

Следовательно, согласно (6.8)  $U_D(x_D, y_D) = 4k v_{\max}^2 \cdot U_I(x_I, y_I) * \text{sinc}(2v_{\max}x) \text{sinc}(2v_{\max}y)$ . Данное соотношение свидетельствует о том, что реальная система создает размытое изображение, причем размытие тем больше, чем меньше ее ширина полосы пропускания. В системах обработки информации ( $H \neq 1$ ) конечность полосы пропускания приводит к появлению ошибки в выходном сигнале, являющемся результатом обработки. Пространственная протяженность входного сигнала также должна быть ограничена, чтобы все пучки света, дифрагировавшие во входном устройстве, прошли через оптическую систему. Для безаберрационной системы это ограничение определяет эффективную апертуру для входных сигналов, в пределах которой система обладает свойством пространственной инвариантности. В дальнейшем будем полагать, что эффективная апертура для входных сигналов представляет собой квадрат со стороной  $a_I$  (см. рис. 6.2). Тогда входной сигнал оптической системы

$$U_I(x_I, y_I) = U_I(x_I, y_I) \text{rect}(x_I/a) \text{rect}(y_I/a). \quad (6.10)$$

Так как входной сигнал оптической системы является финитным, ее фурье-образ имеет неограниченную протяженность. Поэтому ошибка в выходном сигнале оптической системы, обусловленная потерей части фурье-образа, соответствующей высоким пространственным частотам, неизбежна. Была рассмотрена оптическая система аналогового процессора, предназначенного для параллельной обработки двумерных сигналов. На практике часто приходится иметь дело с одномерными сигналами. Оптическая система когерентного аналогового процессора, способного параллельно обрабатывать множество одномерных сигналов, представлена на рис. 6.3. Такой процессор называют *астигматическим*. Входная информация, подлежащая пространственной фильтрации, поступает по  $N$  независимым каналам во входное устройство астигматического процессора, которое вводит ее в оптическую систему фильтрации в виде вертикальных наборов из  $N$  одномерных оптических сигналов  $U_{IH}(x_I)$ , каждая из которых изменяется только в горизонтальном направлении. Оптическая система, состоящая из цилиндрической линзы  $L_2$  и сферической линзы  $L_3$ , осуществляет двойное преобразование Фурье в вертикальном направлении и простое преобразование Фурье

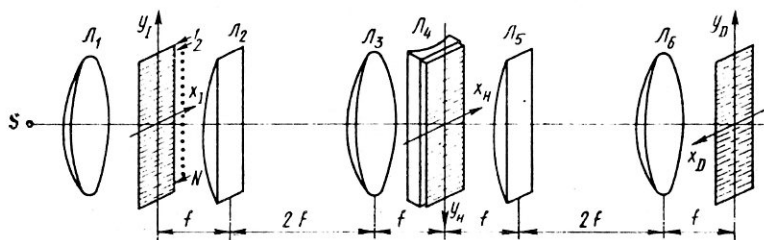


Рис. 6.3. Схема когерентной оптической системы многоканальной фильтрации

в горизонтальном, так как цилиндрическая линза в этом направлении не оказывает воздействия на входные сигналы. Следовательно, эту систему можно рассматривать как систему, создающую в вертикальном направлении изображение, а в горизонтальном — фурье-образ входного сигнала. Таким образом, в спектральной плоскости астигматического процессора образуется вертикальный набор фурье-образов входных сигналов, расположенных в обратном порядке. Преобразованные сигналы содержат фазовый множитель, который устраняется с помощью отрицательной цилиндрической линзы  $L_4$ . В спектральную плоскость многоканального процессора помещается набор одномерных пространственных фильтров. Отфильтрованные сигналы вновь подвергаются многоканальному преобразованию Фурье с помощью оптической системы  $L_5 - L_6$ , идентичной  $L_2 - L_3$ . В результате в выходной плоскости многоканального процессора одновременно наблюдается  $N$  одномерных сигналов, являющихся результатами обработки.

Наиболее широкое применение среди различных типов оптических процессоров нашли оптические корреляторы. Существует много различных вариантов построения корреляторов, среди которых два наиболее часто используемых: коррелятор с частотной плоскостью и коррелятор с одновременным преобразованием.

В качестве коррелятора с частотной плоскостью может служить оптическая система пространственной фильтрации, представленная на рис. 6.2. Действительно, если на вход этой системы подать входной сигнал  $U_I(x_I, y_I)$ , а в фурье-плоскости сформировать фильтр с передаточной функцией  $H(\xi, \eta) = V^*(\xi, \eta)$ , то на выходе получится сигнал

$$U_D(x_D, y_D) = F^{-1} [V^*(\xi, \eta) U_I(\xi, \eta)] = \\ = \iint V^*(x, y) U_I(x_D + x, y_D + y) dx dy = V * U_I. \quad (6.11)$$

представляющий собой кросс-корреляцию сигналов  $v$  и  $U$ . Если  $v = U$ , то получают функцию автокорреляции. Операционный фильтр с передаточной функцией  $H(\xi, \eta) = V^*(\xi, \eta)$  называют *согласованным фильтром*, а соответствующую оптическую схему *схемой согласованной фильтрации*.

Согласованная фильтрация обычно используется при распознавании образов в заданном изображении: отдельных букв, символов, простых рисунков специальной информации. Для этого записывают (одним из методов, рассмотренных в следующем параграфе) фильтр, согласованный с образом информации, подлежащим опознаванию, после чего осуществляют его взаимную корреляцию с заданным изображением. Если в изображении содержится интересный образ, то в результате автокорреляции в выходной плоскости системы образуется яркое световое пятно, указывающее на наличие опознаваемого образа и его местонахождение в искомом изображении. Таким путем распознают отпечатки пальцев, интересные слова на странице текста, специальные объекты на карте местности и т. п.

В коррелятор с одновременным преобразованием (рис. 6.4) функции  $V_1(x, y)$  и  $V_2(x, y)$ , корреляцию которых требуется получить, вводятся с помощью транспарантов, помещенных рядом во входной плоскости. Допустим, что каждая функция имеет ширину  $a$ , а расстояние между центрами функций равно  $2a$ . Амплитудное пропускание транспарантов можно записать в виде

$$U_I(x_I, y_I) = V_1(x_I, y_I - a) + V_2(x_I, y_I + a). \quad (6.12)$$

Распределение комплексных амплитуд света в фурье-плоскости  $P_H$  с точностью до постоянного множителя совпадает с фурье-образом (6.12):

$$U_{IH}(\xi, \eta) \sim V_1(\xi, \eta) \exp(-i2\pi\eta a) + V_2(\xi, \eta) \exp(i2\pi\eta a).$$

Поскольку на регистрирующую среду записывается квадрат модуля данного распределения, последующее амплитудное пропускание полученного фильтра соответствует выражению

$$t_H \sim |V_1|^2 + |V_2|^2 + V_1 V_2^* \exp(-i4\pi\eta a) + V_1^* V_2 \exp(i4\pi\eta a). \quad (6.13)$$

Данный фильтр записывается с помощью когерентного светового пучка с длиной волны  $\lambda_1$ , по существу он представляет собой голограмму с кодированным опорным пучком.

Фильтр с функцией пропускания (6.13) освещается плоской световой волной с длиной волны  $\lambda_2$ , отраженной от светоделиителя  $M$ . В выходной плоскости  $P_D$  получают изображение, описываемое распределением амплитуд:

$$U_D(x_D, y_D) \sim V_1 * V_2 + V_1^* * V_2 * \delta(x_D, y_D + 2a) + V_2^* * V_1 * \delta(x_D, y_D - 2a). \quad (6.14)$$

Таким образом, в выходной плоскости рассмотренной системы (рис. 6.4) формируются кросс-корреляции входных функций  $V_1$  и  $V_2$ , которые локализируются вокруг точек с координатами  $(0, \pm 2a \frac{\lambda_2 f_2}{\lambda_1 f_1})$ . Отметим, что запись и считывание могут осуществляться на одной

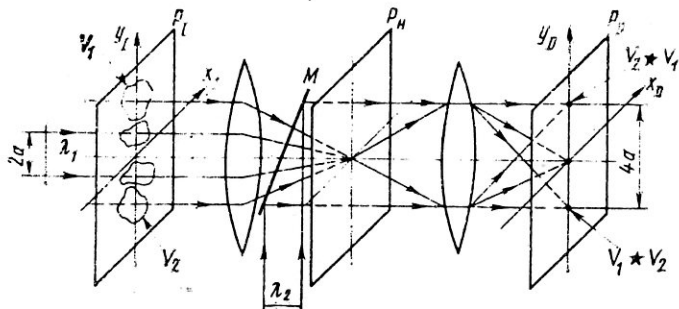


Рис. 6.4. Схема оптического коррелятора с одновременным преобразованием

длине волны  $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$ , если это не лимитируется свойствами регистрирующего материала.

Коррелятор с одновременным преобразованием имеет ряд преимуществ перед коррелятором с частотной плоскостью: 1) менее жесткие допуски на точность установки элементов, поскольку полученный в результате записи фильтр освещается плоской волной; 2) контрастную интерференционную картину и, как следствие этого, хорошую модуляцию всех составляющих в спектре пространственных частот функций  $V_1$  и  $V_2$ . Коррелятор с одновременным преобразованием предпочтительно применять в тех случаях, когда входные функции поступают в реальном масштабе времени.

Следует отметить, что повышения надежности распознавания можно добиться за счет предварительной обработки исходного изображения, например оконтуривания, поскольку контурные линии для большинства изображений обладают наибольшей информативностью. Советскими учеными Е. С. Нежевенко и О. И. Потатуркиным совместно с сотрудниками института автоматики и электрометрии Сибирского отделения АН СССР был разработан и исследован такой голографический коррелятор интенсивности с функциями предобработки [24]. Предварительная обработка в этом корреляторе осуществляется на фотоэлектронном управляемом транспаранте типа «Фототитус» либо на электрооптическом типа ПРИЗ. Причем во втором случае был достигнут более высокий контраст контуров [25].

Для построения описанных когерентных оптических процессоров решающее значение имеет создание оперативных устройств ввода и вывода информации, которые могли бы работать со скоростью, соизмеримой с быстродействием самого процессора. Так как оптический процессор параллельно обрабатывает большое количество информации, скорость передачи информации на его выходе может оказаться непомерно большой. Чтобы согласовать скорости оптической обработки и вывода данных, необходимо широко использовать методы сжатия информации. Кроме того, необходимы также устройства, способные синтезировать пространственные операционные фильтры в реальном масштабе времени.

## § 6.2. Математические операции и задачи, реализуемые на оптическом процессоре

Поскольку простейшие оптические системы способны выполнять операцию преобразования Фурье и давать результаты в виде физически реального распределения комплексных амплитуд света, они могут быть непосредственно использованы для пространственного спектрального анализа. Например, зарегистрировав на фотопленку световое поле в выходной плоскости простейшей оптической системы, показанной на рис. 6.1, получим информацию о спектре мощности входного сигнала, т. е.  $|U_f(\xi, \eta)|^2$ . В тех случаях, когда требуется определить комплексную амплитуду фурье-образа, выходной сигнал сум-

мируется с опорным с известными характеристиками и регистрируется в виде голограммы, после чего выделяется из суммарного сигнала с помощью цифровых методов восстановления. Если нужно выполнить одномерный спектральный анализ, то можно воспользоваться астигматической оптической системой, состоящей из цилиндрических и сферических линз (см. рис. 6.3). С помощью такой системы, как отмечалось, можно производить многоканальный спектральный анализ. Подобный многоканальный оптический спектроанализатор широко используется для спектрального анализа временных электрических сигналов, которые преобразуются в пространственные сигналы и вводятся в спектроанализатор с помощью акустооптического преобразователя [23].

Хотя спектральный анализ находит практическое применение, более важным следствием физического преобразования Фурье, осуществляемого оптическими системами, является возможность выполнения достаточно сложных математических операций методами пространственной фильтрации [26]. Такие методы являются основными методами обработки пространственных оптических сигналов. Приведем примеры математических операций и задач, эффективно реализуемых этими методами.

**Согласованная фильтрация и распознавание.** Пространственный фильтр считают согласованным с входным сигналом  $S(x, y)$ , если его импульсный отклик

$$h(x, y) = S^*(-x, -y). \quad (6.15)$$

Следовательно, выходной сигнал оптической системы фильтрации

$$U_D(x_D, y_D) = \iint_{-\infty}^{\infty} U_I(x_I, y_I) S^*(x_I - x_D, y_I - y_D) dx_I dy_I \quad (6.16)$$

представляет собой взаимную корреляцию входного сигнала и импульсного отклика фильтра. Если на вход системы поступает сигнал  $U_I(x_I, y_I) = S(x_I, y_I)$ , то выходной сигнал является автокорреляционной функцией входного. Автокорреляционной функции входного сигнала, как известно, соответствует максимум освещенности, называемый *барицентром распределения энергии*. Это явление лежит в основе практического применения согласованной фильтрации.

Согласованная фильтрация играет важную роль в задачах распознавания образов. Допустим, что входной сигнал оптической системы пространственной фильтрации представляет собой сложный сигнал, состоящий из большого числа элементарных сигналов  $S_k(x_I, y_I)$ , так что  $U_I(x_I, y_I) = \sum_k S_k(x_I, y_I)$ . Если требуется выявить наличие и местоположение некоторого сигнала  $S_n$ , то достаточно отфильтровать входной сигнал с помощью фильтра, согласованного с этим сигналом. Тогда в выходной плоскости системы в соответствующем месте будет наблюдаться наиболее яркое световое пятно. Если интересующий сигнал повторяется во входном изображении, то число ярких световых пятен

будет соответствующим. Физическую сущность согласованной фильтрации легко понять путем анализа спектра входного сигнала в частотной плоскости. Входной сигнал, отфильтрованный с помощью согласованного фильтра, непосредственно за фильтром имеет комплексную амплитуду  $U_H^{(1)}(\xi, \eta) \sim S(\xi, \eta) S^*(\xi, \eta) = |S(\xi, \eta)|^2$ . Следовательно, отфильтрованный сигнал представляет собой плоскую световую волну. Это происходит благодаря тому, что согласованный фильтр точно компенсирует фазовую характеристику падающей световой волны, вследствие чего на выходе последующей оптической системы, осуществляющей повторное преобразование Фурье, отфильтрованный сигнал фокусируется в яркую точку. Если входной сигнал отличен от  $S(x, y)$ , то фазовая характеристика его фурье-образа не будет полностью компенсироваться фильтром и, следовательно, соответствующий выходной сигнал не будет фокусироваться в точку, а даст размытое изображение. Таким образом, согласованная фильтрация позволяет выделить и локализовать интересный сигнал.

Если на входной сигнал накладывается аддитивный шум, то согласованная фильтрация может быть использована для выделения сигнала на фоне шума. Допустим, что суммарный входной сигнал

$$U_I(x_I, y_I) = S(x_I, y_I) + n(x_I, y_I),$$

где  $S(x_I, y_I)$  — известный сигнал;  $n(x_I, y_I)$  — шум. Как следует из теории линейной фильтрации, для достижения максимального значения отношения сигнал/шум на выходе требуется фильтр с передаточной функцией

$$H(\xi, \eta) = \frac{k_H S^*(\xi, \eta)}{R_n(\xi, \eta)}, \quad (6.17)$$

где  $R_n(\xi, \eta)$  — спектральная плотность мощности шума;  $k_H$  — константа. Если  $R_n(\xi, \eta) = \text{const}$  (белый шум), то передаточная функция фильтра (6.17) сводится к  $H(\xi, \eta) = k_H S^*(\xi, \eta)$ . Следовательно, фильтр в этом случае является согласованным.

Основным недостатком согласованной фильтрации является чувствительность к изменению масштаба и повороту входных сигналов. Практически это выражается в уменьшении отклика согласованного фильтра на интересующий сигнал, если последний имеет неточную угловую ориентацию или другой масштаб. Однако этот недостаток присущ всем методам пространственной фильтрации.

**Преобразование кодов.** С помощью пространственной фильтрации легко осуществляется операция преобразования кодов.

Пусть требуется преобразовать входной сигнал  $U(x, y)$  в заданный выходной сигнал  $S(x, y)$ . Для этой цели необходим пространственный фильтр с передаточной функцией:

$$H(\xi, \eta) = \frac{S(\xi, \eta)}{U(\xi, \eta)}. \quad (6.18)$$

На примере этого фильтра можно проиллюстрировать трудности,

которые возникают при оптическом синтезе пространственных фильтров. Непосредственно записать фильтр с передаточной функцией типа (6.18) не представляется возможным, так как операция деления не может быть осуществлена оптическим путем. Поэтому обычно записывают фильтр с передаточной функцией:  $H(\xi, \eta) = U^*(\xi, \eta) S(\xi, \eta)$ . Однако такой фильтр реализуем только в том случае, когда  $|U|^2 = \text{const}$ . Действительно,  $H = U^* S = |U|^2 \frac{S}{U}$ . Таким образом, оптическим путем можно получить фильтры для кодовых преобразований только в том случае, когда спектры мощностей преобразуемых сигналов практически постоянны. Это ограничение полностью устраняется при машинном синтезе фильтров. Однако при этом возникает проблема динамического диапазона, особенно когда  $U(\xi, \eta)$  имеет малые значения или обращается в нуль. Эта проблема эффективно решается методом отсеечения амплитуды  $H(\xi, \eta)$ .

Методами оптической пространственной фильтрации можно производить такие важные математические операции, как суммирование и вычитание, дифференцирование и интегрирование и др. Рассмотрим операцию пространственного дифференцирования. Допустим, что требуется получить  $\partial U / \partial x$  и  $\partial^2 U / \partial x \partial y$ . Соответствующие фурье-образы имеют следующий вид:

$$F \left[ \frac{\partial U}{\partial x} \right] = 2\pi i \xi U(\xi, \eta); \quad F \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right] = -4\pi^2 \xi \eta U(\xi, \eta).$$

Следовательно, необходимы фильтры с передаточными функциями:

$$H_1(\xi, \eta) = 2\pi i \xi; \quad H_2(\xi, \eta) = -4\pi^2 \xi \eta. \quad (6.19)$$

Такие фильтры просто синтезируются с помощью ЭВМ.

Методами пространственной оптической фильтрации можно реализовать более сложные дифференциальные операторы, например оператор Лапласа  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ , который часто встречается в прикладных задачах. Пространственный фильтр при выполнении такой операции имеет простую передаточную функцию:

$$H(\xi, \eta) = -4\pi^2 (\xi^2 + \eta^2). \quad (6.20)$$

Фильтр, инверсный данному, можно использовать для приближенного решения дифференциального уравнения Лапласа  $\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = -f(x, y)$  при граничных условиях  $U \rightarrow 0$ ,  $\frac{\partial U}{\partial x} \rightarrow 0$  и  $\frac{\partial U}{\partial y} \rightarrow 0$ , когда  $x, y \rightarrow \pm \infty$ . Действительно, решение данной задачи в спектральной плоскости имеет вид

$$U(\xi, \eta) = \frac{1}{4\pi^2 (\xi^2 + \eta^2)} F(\xi, \eta). \quad (6.21)$$

Особенность передаточной функции фильтра в точке  $\xi = \eta = 0$  устраняется путем отсеечения по амплитуде.

### § 6.3. Когерентная оптическая обработка с использованием обратной связи

В оптических системах обработки информации, в частности изображений, так же как и в электронных устройствах, возможно использование обратной связи, что позволяет улучшить характеристики передачи пространственных частот, которые нельзя определить другими методами. Оптическая обратная связь может быть также эффективно использована при построении нелинейных или пространственно неоднородных систем обработки информации.

Рассмотрим наиболее простой способ введения оптической обратной связи (рис. 6.5). Часть выходного изображения возвращается на вход системы (ее ход показан пунктиром), где объединяется со входным изображением, и вновь поступает в оптическую систему обработки с помощью системы из двух полупрозрачных зеркал  $M_1$  и  $M_2$ . Зеркала  $M_1$  и  $M_2$  симметрично наклонены к оптической оси под малым углом  $\theta$ , но достаточным, чтобы в плоскости фильтрации  $P_H(x_H, y_H)$  получить два пространственно разделенных фурье-образа входного и выходного изображений (для пространственной фильтрации сигнала при прохождении через оптическую систему и цепь обратной связи). Таким образом, в оптической системе с обратной связью применяются два пространственных операционных фильтра: фильтр прямого хода с передаточной функцией  $H(\xi, \eta)$  и фильтр обратной связи с передаточной функцией  $G(\xi, \eta)$ . Входной сигнал формируется в плоскости  $P_I(x_I, y_I)$ , а выходной (отфильтрованный) сигнал — в плоскости  $P_D(x_D, y_D)$ .

Поскольку в описанной системе используется когерентный свет, относительный фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  между входным изображением и изображением обратной связи в плоскости  $P_I$ , где происходит их объединение, определяется длиной оптического пути полного цикла  $l \approx 8f$ . Эта разность фаз  $\Delta\varphi = 2\pi l/\lambda$ , как и в электронике, определяет тип обратной связи. При  $\Delta\varphi = 2\pi n$  имеет место положительная обратная связь, при  $\Delta\varphi = (2n + 1)\pi$  — отрицательная обратная связь. При других значениях  $\Delta\varphi$  реализуется комплексная обратная связь. Обычно зеркало  $M_2$  крепится на пьезоэлектрическом приводе, который позволяет довольно точно регулировать и контролировать длину оптического пути  $l$ , а следовательно, и разность фаз  $\Delta\varphi$ . Поэтому в оптической системе легко может быть реализован любой тип обратной связи. Обычно длина оптического пути  $l < 5$  м, так что время полного цикла оптического процессора с обратной связью составляет менее 15 нс. Следовательно, для того чтобы система успевала приходить в стационар-

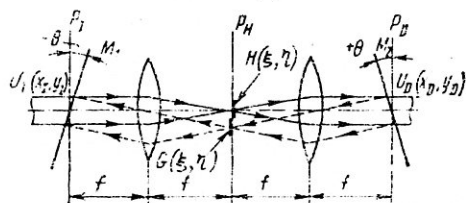


Рис. 6.5. Схема когерентной оптической системы с обратной связью



ное состояние, входное изображение должно изменяться медленнее, а именно в микросекундном диапазоне.

Приведем вывод передаточной функции оптической системы с обратной связью. Обозначим коэффициенты отражения зеркал  $M_1$  и  $M_2$  соответственно  $R_1$  и  $R_2$ . Зеркала имеют высокую отражательную способность, так что  $R_1 \approx R_2 \approx 0,95$  по амплитуде сигнала. Поэтому зеркало  $M_2$  отражает основную часть выходного сигнала в тракт обратной связи. Коэффициенты пропускания оптической системы между зеркалами  $M_1$  и  $M_2$ , а также самих зеркал  $M_1$  и  $M_2$  обозначим  $t_0$ ,  $t_1$  и  $t_2$ . Коэффициент пропускания оптической системы процессора  $t_0 \approx 0,98$ ;  $t_1 = 1 - R_1 \approx 0,02$ ;  $t_2 = 1 - R_2 \approx 0,02$ . В фурье-плоскости оптической системы с обратной связью (см. рис. 6.5) имеем сигнал  $t_1 U_I \times (\xi, \eta) + R_1 U_F(\xi, \eta)$ . Второй член выражения представляет собой фурье-преобразование вклада, даваемого схемой обратной связи. В результате фильтрации получим сигнал  $H(\xi, \eta) |t_1 U_I(\xi, \eta) + R_1 U_F \times (\xi, \eta)|$ . Выходной сигнал  $U_D(x_D, y_D) = F^{-1} \{t_2 H(\xi, \eta) |t_1 U_I(\xi, \eta) + R_1 U_F(\xi, \eta)|$ , так что

$$U_D(\xi, \eta) = t_2 H(\xi, \eta) |t_1 U_I(\xi, \eta) + R_1 U_F(\xi, \eta)|. \quad (6.22)$$

Поскольку функция  $U_F(\xi, \eta)$  описывает сигнал, идущий по цепи обратной связи через фильтр  $G(\xi, \eta)$ ,

$$U_F(\xi, \eta) = \frac{R_2 t_0}{t_2} U_D(\xi, \eta) G(\xi, \eta). \quad (6.23)$$

Подставив выражения (6.23) в (6.22) и решив полученное уравнение относительно  $U_D(\xi, \eta)/U_I(\xi, \eta)$ , найдем полную передаточную функцию системы:

$$H_F(\xi, \eta) = \frac{U_D(\xi, \eta)}{U_I(\xi, \eta)} = \frac{t_1 t_2 H(\xi, \eta)}{1 - R_1 R_2 t_0 G(\xi, \eta) H(\xi, \eta)}. \quad (6.24)$$

Оптические процессоры с обратной связью впервые были использованы для улучшения качества изображений, регулировки их контраста, а также аналогового решения уравнений в частных производных.

Допустим, что изображение искажено помехой, которая описывается импульсной характеристикой  $k(x_I, y_I)$ . В этом случае исходное изображение может быть восстановлено в оптической системе с обратной связью, которая обладает следующими характеристиками:  $H(\xi, \eta) \equiv 1$ ;  $G(\xi, \eta) = 1 - K(\xi, \eta)$ ;  $\Delta q = 2\pi\lambda$ . Полная передаточная функция такой системы имеет вид

$$H_F(\xi, \eta) = \frac{t_1 t_2}{1 - R_2 R_2 t_0 - R_1 R_2 t_0 K(\xi, \eta)}. \quad (6.25)$$

Так как  $1 - R_1 R_2 t_0 \approx 0,005$ ,  $H_F \sim K^{-1}(\xi, \eta)$ , что является необходимым для восстановления изображения передаточной функции. Достоинство системы с обратной связью в том, что фильтр с передаточной функцией  $G(\xi, \eta) = 1 - K(\xi, \eta)$  не имеет особенностей в отли-

чие от инверсного фильтра с передаточной функцией  $1/K(\xi, \eta)$ , он реализуется просто как оптическим путем, так и путем синтеза на ЭВМ.

Рассмотрим применение системы с обратной связью для решения дифференциальных уравнений в частных производных. В качестве примера проанализируем дифференциальное уравнение Лапласа (см. § 6.3), решение которого описывается уравнением (6.21). Там же отмечалось, что передаточная функция  $H = 1/[4\pi^2(\xi^2 \pm \eta^2)]$  имеет особенность в точке  $\xi = \eta = 0$ , что приводит к необходимости порогового отсечения передаточной функции в начале координат, следствием чего является заметное снижение точности. При решении указанного уравнения в оптической системе с обратной связью характеристики последней должны быть выбраны следующими:  $H(\xi, \eta) = 1/(1 + \xi^2 + \eta^2)$ ;  $G(\xi, \eta) \equiv 1$ ;  $\Delta\varphi = 2\pi l$ . Тогда полная передаточная функция системы примет вид

$$H_F = \frac{t_1 t_2}{1 + \xi^2 + \eta^2 - R_1 R_2 t_0} \quad (6.26)$$

Поскольку  $1 - R_1 R_2 t_0 \approx 0$ , то  $H_F \approx t_1 t_2 / (\xi^2 + \eta^2)$ , т. е. получим требуемую передаточную функцию. Однако в отличие от системы без обратной связи передаточная функция  $H(\xi, \eta)$  уже не имеет особенности, что облегчает реализацию фильтра и позволяет получить решение с высокой точностью.

#### § 6.4. Методы синтеза пространственных операционных фильтров

При рассмотрении различных математических операций, выполняемых на когерентном оптическом процессоре, было установлено, что передаточная функция операционного фильтра в общем случае является комплексной, а в частных как действительной (в частности, действительной и неотрицательной), так и фазовой функцией. Вследствие этого различают амплитудный, фазовый, действительный и комплексный фильтры. На ранних этапах разработки пространственных фильтров основную трудность представляла запись фазовой характеристики передаточной функции. Обычно фазовая характеристика передаточной функции реализовывалась путем изменения толщины фоточувствительного слоя пленки, а амплитудная характеристика — путем изменения прозрачности фотографической пленки. Сочетание амплитудного и фазового фильтров давало комплексный фильтр. Однако вследствие больших трудностей, связанных с созданием достаточно сложного рельефа эмульсии на пленке, таким путем удавалось получить только фильтры с простыми передаточными функциями, преимущественно действительными. В этом заключалась одна из основных причин ограниченного применения методов оптической пространственной фильтрации для обработки информации. Положение изменилось лишь после того, как были разработаны методы синтеза комплексных пространственных фильтров с произвольными амплитудной и фазовой характеристиками.

С этого момента методы оптической пространственной фильтрации начали широко применяться для обработки информации в самых различных областях науки и техники.

Методы синтеза пространственных операционных фильтров с производными комплексными передаточными функциями по способу их реализации можно разделить на две группы: 1) методы, требующие оптической записи; 2) цифровые методы синтеза, основанные на использовании ЭВМ. Несмотря на различие в способах реализации, все методы синтеза имеют общий подход к проблеме синтеза — построение действительной неотрицательной функции, однозначно связанной с передаточной функцией синтезируемого фильтра и эквивалентной (с определенной точностью) с ней по воздействию на оптический сигнал, подлежащий фильтрации. Это является следствием того, что любая регистрирующая среда реагирует только на интенсивность падающего светового поля, т. е. способна зарегистрировать распределения, описываемые только действительными неотрицательными функциями

**Метод Вандер-Люгта.** При использовании метода Вандер-Люгта действительная неотрицательная функция получается путем сложения заданной комплексной передаточной функции с известной опорной комплексной функцией. В основе метода Вандер-Люгта лежит идея, согласно которой комплексный сигнал с произвольными амплитудной и фазовой характеристиками можно записать с помощью пространственно-частотной модуляции опорного сигнала с известной амплитудой и фазой [26].

Оптическая схема устройства, реализующего метод Вандер-Люгта, показана на рис. 6.6. Устройство состоит из точечного источника когерентного света  $S$ , зеркал 2 и 4, светоделителей 1 и 3; оно представляет собой модификацию хорошо известного интерферометра Маха — Цендера.

Рассмотрим процесс записи комплексного фильтра по схеме, представленной на рис. 6.6. Свет от точечного источника  $S$  коллимируется линзой  $L_1$  и поступает в интерферометр. Часть плоского светового пучка с помощью светоделителя 1 и зеркала 2 направляется на входной транспарант  $I$ , амплитудный коэффициент пропускания которого соответствует распределению

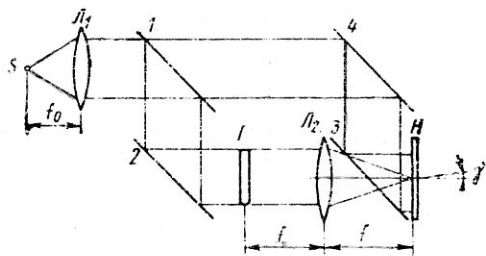


Рис. 6.6. Оптическая схема устройства для записи фильтра по методу Вандер-Люгта

распределению амплитуды импульсного отклика  $h(x, y)$ , т. е.  $t = k_i h(x, y)$ . Линза  $L_2$  осуществляет преобразование Фурье входного сигнала  $U^{(+)} \sim h(x, y)$ . В результате в ее задней фокальной плоскости появится распределение комплексных амплитуд света, пропорциональное фурье-образу  $h(x, y)$ , т. е. переда-

точной функции фильтра  $H(\xi, \eta)$ . Другая часть коллимированного светового пучка с помощью зеркала 4 и светоделителя 3 направляется в плоскость регистрации  $H$  (спектральная плоскость) под некоторым углом  $\gamma$  к оптической оси, который регулируется поворотом зеркала 4. Этот световой пучок, когерентный с объектным, и является опорным. Опорный пучок в плоскости регистрации фильтра  $H$  создает распределение амплитуд с пространственной частотой  $\nu_R = \sin \gamma / \lambda$ :

$$U_R(\xi, \eta) = R' \exp(-2\pi i f_y \eta); \quad f_y = f \sin \gamma.$$

Так как объектный и опорный световые пучки когерентны, они интерферируют. Поэтому результирующее световое поле будет иметь комплексную амплитуду  $U_\Sigma(\xi, \eta) \sim R \exp(-2\pi i f_y \eta) + H(\xi, \eta)$ . Интенсивность результирующего светового поля

$$I(\xi, \eta) \sim R^2 + |H(\xi, \eta)|^2 + RH(\xi, \eta) \exp(2\pi i f_y \eta) + RH^*(\xi, \eta) \exp(-2\pi i f_y \eta). \quad (6.27)$$

Если в плоскость регистрации  $H$  поместить фотографическую пленку и зарегистрировать полученную интерференционную картину на линейном участке  $t$ - $E$ -характеристики, то после соответствующей обработки получится транспарант с амплитудной функцией пропускания:

$$t_H \sim I(\xi, \eta) \sim R^2 + |H(\xi, \eta)|^2 + RH(\xi, \eta) \exp(2\pi i f_y \eta) + RH^*(\xi, \eta) \exp(-2\pi i f_y \eta). \quad (6.28)$$

Данный транспарант может служить в качестве искомого фильтра. Таким образом, благодаря введению опорного светового пучка, требуемая комплексная передаточная функция  $H(\xi, \eta)$  записывается с помощью пространственно-частотной модуляции опорной волны. Очевидно, что фильтр Вандер-Люгта представляет собой фурье-голограмму импульсного отклика  $h(x, y)$ .

Таким образом, фильтр Вандер-Люгта имеет сложную функцию пропускания по амплитуде (6.28), один из компонентов которой содержит желаемую передаточную функцию  $H(\xi, \eta)$ . Покажем, что эту нужную компоненту можно выделить и использовать для фильтрации входных сигналов. Для этого предположим, что фильтр с амплитудным пропусканием (6.28) помещен в спектральную плоскость оптического процессора, схема которого была представлена на рис. 6.2. Допустим, что на вход процессора поступает оптический сигнал, описываемый комплексной функцией  $U_I(x_I, y_I)$ . В результате фильтрации этого сигнала получим сигнал с комплексной амплитудой:

$$U_H^{(+)}(\xi, \eta) \sim t_H(\xi, \eta) U_I(\xi, \eta) = R^2 U_I(\xi, \eta) + |H(\xi, \eta)|^2 U_I(\xi, \eta) + RH(\xi, \eta) U_I(\xi, \eta) \exp(2\pi i f_y \eta) + RH^*(\xi, \eta) U_I(\xi, \eta) \exp(-2\pi i f_y \eta). \quad (6.29)$$

В выходной плоскости оптического процессора возникает световое поле, описываемое следующим распределением комплексных амплитуд:

$$\begin{aligned}
 U_D(x_D, y_D) \sim F[U_I^{(1)}(\xi, \eta)] \sim R^2 U_I(x_D, y_D) + \\
 + U_I(x_D, y_D) * h(x_D, y_D) * h^*(-x_D, y_D) + \\
 + R U_I(x_D, y_D) * h(x_D, y_D + f_y) + R U_I(x_D, y_D) * \\
 * h^*(-x_D, -y_D + f_y).
 \end{aligned}
 \tag{6.30}$$

Структура выходного светового поля иллюстрируется рис. 6.7. Первый член выражения (6.30) соответствует изображению входного сигнала, которое образуется в центре выходной плоскости процессора. Изображение, определяемое вторым членом, также возникает в центральной области выходной плоскости и накладывается на изображение входного сигнала, соответствующее первому члену. Эти изображения не представляют интереса. Изображения, определяемые двумя последними членами (6.30), образуются на расстоянии  $f_y$  от начала координат по разные стороны от них. Изображение, соответствующее третьему члену, представляет собой свертку входного сигнала с импульсным откликом и является требуемым входным сигналом. Изображение, описываемое четвертым членом, является взаимной корреляцией входного сигнала с импульсным откликом фильтра. Как видно из рис. 6.7, эти изображения могут быть пространственно отделены от двух первых при определенном выборе угла  $\gamma$  между опорным пучком и оптической осью. Из рассмотрения структуры выходного сигнала следует, что полное пространственное разделение изображений достигается при

$$f_y = f \sin \gamma > \frac{3}{2} a_n + a_u. \tag{6.31}$$

Следовательно, условие для выбора  $\gamma$  следующее:

$$\gamma > \arcsin \left[ \frac{1}{f} \left( \frac{3}{2} a_n + a_u \right) \right]. \tag{6.32}$$

Таким образом, при использовании фильтра Вандер-Люгта желаемый выходной сигнал-свертка входного сигнала  $U_I(x_I, y_I)$  с импульсным откликом фильтра  $h(x, y)$  наблюдается в области, ограниченной значениями  $|x_D| \leq a_n + a_u$ ;  $|y_D + f_y| \leq a_n + a_u$ . Взаимная корреляция входного сигнала с импульсным откликом фильтра, представляющая основной интерес в задачах распознавания, наблюдается в области  $|x_D| \leq a_n + a_u$ ,  $|y_D - f_y| \leq a_n + a_u$ .

Если имеется транспарант, соответствующий импульсному отклику фильтра, то запись фильтра по методу Вандер-Люгта

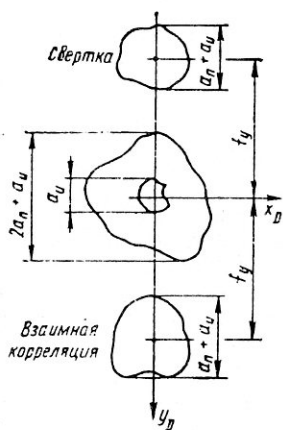


Рис. 6.7. Структура выходного светового поля оптического процессора при использовании фильтра Вандер-Люгта

не представляет сложности. Поэтому фильтры Вандер-Люгта удобно использовать в задачах согласованной фильтрации, когда импульсный отклик фильтра может быть записан на пленку в виде транспаранта. В случае фильтров, предназначенных для выполнения математических операций, более удобны цифровые методы синтеза, позволяющие сразу получить передаточную функцию фильтра.

**Цифровые методы синтеза операционных фильтров с помощью ЭВМ.** При машинном синтезе пространственных операционных фильтров их передаточные функции подвергаются дискретизации:

$$\widehat{H}(\xi, \eta) = \sum_n \sum_m H(n\Delta\xi, m\Delta\eta) \delta(\xi - n\Delta\xi, \eta - m\Delta\eta), \quad (6.33)$$

где  $\Delta\xi, \Delta\eta$  — шаги дискретизации, выбираемые в соответствии с требованиями теоремы отсчетов. Амплитуда  $A_{nm}$  и фаза  $\varphi_{nm}$  каждого отсчета квантуются с использованием ограниченного числа уровней квантования. Квантованные значения амплитуд и фаз отсчетов передаточной функции кодируются по одному из методов, рассмотренных в гл. 2, и отображаются на выходном устройстве ЭВМ в виде картины, представляющей увеличенное изображение искомого фильтра. Оптическим уменьшением этой картины до требуемых размеров и записью на носитель (например, на фотопленку) заканчивается синтез фильтра. Описанный процесс может быть реализован в реальном масштабе времени при наличии специального высокоразрешающего устройства для отображения картины фильтра и ее регистрации на оперативном носителе.

Амплитудные функции пропускания синтезированных фильтров и их воздействие на спектр входного сигнала различаются в зависимости от метода кодирования и техники исполнения. При использовании метода Ломана синтезированный фильтр имеет функцию пропускания вида

$$t(\xi, \eta) = \sum_{n, m} \text{rect} \left[ \frac{\xi - (n + P_{nm}) \Delta v}{c \Delta v} \right] \text{rect} \left[ \frac{\eta - m \Delta v}{W_{nm} \Delta v} \right]. \quad (6.34)$$

где в первом приближении  $P_{nm} \sim \varphi_{nm}$ ;  $W_{nm} \sim A_{nm}$ . Заметим также, что  $\Delta\xi = \Delta\eta = \Delta v$ . Если такой фильтр поместить в передней фокальной плоскости фурье-линзы и осветить нормально падающей плоской световой волной, то в задней фокальной плоскости линзы появится множество регулярно расположенных изображений, приближенно представляющих желаемый импульсный отклик фильтра. Наименее искаженные и наиболее яркие изображения формируются световыми пучками, дифрагированными  $\pm 1$ -порядками дифракции. Эти изображения образуются в ограниченных областях, центры которых совпадают с точками  $\pm 1/\Delta v, 0$ . Если синтезированный фильтр поместить в спектральную плоскость оптического процессора, то в двух указанных областях будут наблюдаться наиболее точные и яркие изображения, представляющие свертку входного сигнала с импульсным откликом фильтра. Для отделения этих полезных изображений от других

шаги дискретизации передаточной функции фильтра должны быть выбраны из условия  $\Delta v \leq (a_n + a_u)^{-1}$ .

Если желаемая передаточная функция фильтра описывается только фазовой характеристикой ( $A = \text{const}$ ), то фильтр может быть изготовлен в виде киноформа. Идеальный киноформ, как известно, дает один отклик, следовательно, его дифракционная эффективность может достигать 100 %. Другое важное преимущество киноформа состоит в том, что входной оптический сигнал наблюдается в центральной области выходной плоскости процессора. Недостатком киноформа является невозможность управления амплитудой проходящего сигнала.

Основное отличие синтезированных фильтров от фильтра Вандер-Люгта заключается в том, что они имеют дискретную структуру, тогда как фильтр Вандер-Люгта имеет непрерывную структуру. Вследствие этого синтезированные фильтры, как правило, дают множество откликов, расположенных в регулярной последовательности. Преимуществом машинных методов синтеза операционных фильтров является их универсальность.

### § 6.5. Оптоэлектронная гибридная вычислительная система

Основные достоинства когерентных оптических процессоров в сравнении с электронными обусловлены параллельностью работы и возможностью осуществлять сложные двумерные операции типа комплексного преобразования Фурье, корреляции и свертки, которые лежат в основе методов решения важных прикладных задач. Аналоговые оптические процессоры особенно эффективны в системах обработки изображений, поскольку для них изображение является естественным двумерным операндом, а основные операции обработки изображений — преобразование Фурье и пространственная фильтрация — осуществляются за один такт работы. Поэтому оптическая обработка изображений методами пространственной фильтрации находит все более широкое применение в задачах распознавания и идентификации образов, анализа изображений земной поверхности, полученных при аэрофотосъемке, анализа движения облаков и воздушных масс по изображениям, полученным с метеорологических спутников.

Однако оптические процессоры в настоящее время еще не обладают эффективными логическими средствами и оперативными устройствами ввода — вывода данных. Поэтому техническая реализация оптических методов обработки информации осуществляется путем создания оптоэлектронных гибридных вычислительных систем (ГВС) [28]. В состав оптоэлектронной ГВС входит цифровой электронный процессор, который обеспечивает ввод — вывод данных, программное управление процессом обработки, а также цифровую обработку и когерентный аналоговый оптический процессор, выполняющий основные операции по параллельной обработке двумерного потока данных. Одной из основных функций оптического процессора в ГВС является сжатие ин-

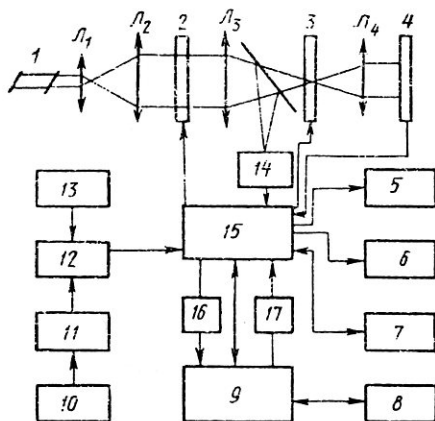


Рис. 6.8. Структура оптоэлектронной ГВС

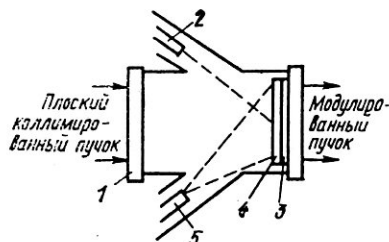


Рис. 6.9. Схема оперативного электронно-адресуемого устройства для ввода информации в оптический процессор:

1 — оптические окна; 2 — электронная пушка для записи; 3 — прозрачный электрод; 4 — модулирующий кристалл; 5 — электронная пушка для стирания изображения

формации, благодаря чему существенно облегчается задача согласования скоростей обработки данных в оптическом и электронном процессорах.

Структура оптоэлектронной ГВС представлена на рис. 6.8. В оптический процессор ГВС информация поступает из видеоканала 13, киноплёнки 10 через преобразователи 11, 12 из аналоговой памяти 7, оперативной или внешней цифровой памяти 8 электронного процессора 9. Входная информация загружается через блоки сопряжения 16, 17 и канал данных 15 в устройство ввода 2, которое представляет собой матричный пространственный модулятор света. Далее информация вносится в коллимированный световой пучок и поступает в оптическую систему процессора для фильтрации. Операционные фильтры могут быть записаны на обычную фотопластинку или оперативный носитель в виде библиотеки стандартных фильтров, а также синтезированы в процессе обработки информации. Библиотека стандартных фильтров записывается в виде двумерной матрицы подобно матрице фурье-голограмм ГЗУ.

Спектр входного сигнала направляется на нужный операционный фильтр с помощью дефлектора, управляющего излучением лазера 1. В спектральной плоскости оптического процессора может храниться до  $10^2$  и более операционных фильтров, предназначенных для выполнения стандартных операций. Необходимость синтеза операционного фильтра в реальном масштабе времени возникает часто, например при осуществлении согласованной фильтрации. Поэтому для записи операционных фильтров, синтезируемых электронным процессором, требуются оперативный носитель 3 и устройство, производящее запись в электронном масштабе времени. Вывод информации осуществляется как в выходной, так и в спектральной плоскости оптического процессора.



Для этой цели используются интегральные фотоматрицы 4 и 14. Можно воспользоваться также и обычными видиконами. Информация с выхода этих устройств передается на цифровой электронный процессор для логического анализа, выработки дальнейших управляющих сигналов и отображения результатов.

Результаты обработки могут быть переданы в аналоговую или цифровую память для хранения, отображены на дисплее 5 и выведены на печать 6. Необходимо отметить, что выходные детекторы 4 и 14 способны зарегистрировать только интенсивность падающего на них светового поля. Амплитуду и фазу выходного сигнала следует определять из известных характеристик опорного пучка путем смещения его с выходным сигналом и детектирования суммарного поля. Амплитуда и фаза выходного сигнала при этом могут быть выделены из суммарного сигнала с помощью цифровых методов восстановления на электронном процессоре [7].

Технический прогресс в создании оптоэлектронных ГВС до недавнего времени был незначительным главным образом из-за отсутствия эффективных и доступных оперативных устройств ввода информации и синтеза операционных фильтров. В настоящее время созданы устройства ввода как с оптическим, так и с электрическим входом. Схема одного из таких устройств, предназначенного для ввода информации в оптический процессор, приведена на рис. 6.9. Устройство работает следующим образом. Управляемый электронный луч записывает потенциальный рельеф на поверхности мишени — электрооптического кристалла  $KD_2PO_4$  размерами  $50 \times 50 \times 0,25$  мм. Этот рельеф изменяет оптические свойства кристалла в соответствии с линейным продольным электрооптическим эффектом и приводит к пространственной модуляции проходящего когерентного светового пучка по амплитуде и фазе. Устройство позволяет осуществить ввод раstra размером  $10^3 \times 10^3$  точек с контрастностью 60 : 1 со скоростью 30 кадров/с или 30 Мбит/с. Оперативный режим работы модулятора достигается путем использования дополнительной электронной пушки с широким пучком, снимающим поверхностный заряд с кристалла.

В целом оптоэлектронная ГВС представляет собой высокопроизводительную и эффективную систему, предназначенную для решения трудоемких задач специального назначения. Оптоэлектронные ГВС особенно эффективны при обработке изображений, распознавании или идентификации образов (символов), а также при экспрессном решении краевых задач математической физики из различных областей техники.

## ЦИФРОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

## § 7.1. Требования к элементной базе цифровой вычислительной техники

Известно, что преобразование информации в ЭВМ производится электронными устройствами двух классов: комбинационными и цифровыми автоматами.

В комбинационных устройствах совокупность выходных сигналов зависит от комбинации входных сигналов и вырабатывается при подаче последних. Закон функционирования комбинационного устройства задается в виде таблицы соответствия входных и выходных сигналов либо в аналитической форме с использованием логических функций.

Цифровой автомат в отличие от комбинационного устройства имеет конечный набор внутренних состояний, в которые он переходит под воздействием команд программы. Выходное слово цифрового автомата в дискретный момент времени  $t_i$  определяется входным словом, поступившим в этот момент времени, а также внутренним состоянием автомата, которое явилось результатом воздействия на него входных слов в предыдущие моменты времени. Для фиксации и хранения внутренних состояний цифрового автомата служит память. Комбинационное устройство не имеет памяти. Цифровой автомат содержит память и комбинационные устройства.

Пусть имеется цифровой автомат с одним входом и одним выходом (рис. 7.1), работа которого описывается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} Q(t_{i+1}) &= \Psi[Q(t_i), x(t_i)]; \\ y(t_i) &= \Phi[Q(t_i), x(t_i)], \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

где  $Q = \{Q_0, Q_1, \dots, Q_m\}$  — множество внутренних состояний автомата;  $\Psi(Q, x)$  — функция перехода автомата из одного состояния в другое;  $\Phi(Q, x)$  — функция выходов;  $Q_0 = Q(0)$  — начальное состояние автомата.

Такой автомат называют *автоматом Мура*. Автомат, выходной сигнал которого в момент времени  $t_i$  определяется только его внутренним состоянием  $Q(t_i)$  и не зависит от входного сигнала, называют *автоматом Мура*. Функционирование автомата Мура описывается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} Q(t_{i+1}) &= \Psi[Q(t_i), x(t_i)]; \\ y(t_i) &= \Phi[Q(t_i)]. \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

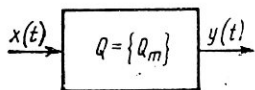


Рис. 7.1. Условное обозначение цифрового автомата

Элементарным автоматом, широко используемым в ЭВМ, является триггер, который может находиться в одном из двух устойчивых состояний. Под действием входного сигнала триггер скачкообразно переходит из одного устойчивого состояния в другое. Одному из этих состояний присписывается значение «1», другому — «0». Триггер используется главным образом в качестве запоминающего элемента для хранения одного бита информации. В логических процедурах одно из состояний триггера принимается за истинное высказывание, а другое — за ложное.

Для построения комбинационных устройств и цифровых автоматов необходимо иметь комплекс элементов, удовлетворяющих требованиям, основными из которых являются требования наличия:

- 1) пороговых элементов, обладающих двумя устойчивыми состояниями;
- 2) набора логических элементов, реализующих функционально полную систему логических функций;
- 3) запоминающих элементов, позволяющих записывать, хранить и считывать информацию;
- 4) усилителей, восстанавливающих энергию и форму сигнала до стандартного уровня и формы;
- 5) каналов передачи сигналов, обеспечивающих межэлементные связи и допускающих объединение сигналов на входах отдельных элементов и разветвление их на выходах.

Основным элементом любого вычислительного устройства является пороговый или переключательный элемент, на базе которого строятся логические и запоминающие элементы. Предельная скорость вычислительных операций в ЭВМ определяется временем перехода переключательного устройства из одного состояния в другое. Поэтому переключательный элемент должен обладать сильной и малоинерционной нелинейностью преобразования сигнала, обеспечивающей резкий порог срабатывания и большое быстродействие. Вольт-амперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода  $I \sim \exp [eU/(kT)]$  до последнего времени являлась наилучшим физическим средством реализации нелинейности, действующей в широком интервале температур. Соответствующий полупроводниковый переключательный элемент (транзистор) на сегодняшний день является наиболее миниатюрным, быстродействующим и эффективным бистабильным устройством. Кроме того, благодаря успехам кремниевой интегральной технологии стало возможным получать полупроводниковые интегральные схемы с большой степенью интеграции, измеряемой числом активных элементов порядка  $10^3$  —  $10^5$  на одном кристалле. Причем полупроводниковые интегральные схемы наилучшим образом удовлетворяют всем схемотехническим и технологическим требованиям, предъявляемым в настоящее время к элементной базе вычислительной техники.

Важнейшим показателем качества логических и запоминающих элементов является энергетическая добротность:

$$K = m/(P\tau),$$

(7.3)

где  $m$  — нагрузочная способность (коэффициент разветвления сигнала на выходе элемента);  $P$  — мощность источника питания;  $\tau$  — время срабатывания.

Энергетическая добротность является удобным критерием для оценки качества элементов, поскольку она представляет собой меру эффективности использования мощности источника питания. Логические и запоминающие элементы должны иметь большую энергетическую добротность, т. е. малое значение произведения мощности питания на время срабатывания [29].

Усилительные элементы характеризуются полосой усиления

$$B \approx G \Delta f \approx m \tau, \quad (7.4)$$

где  $G$  — коэффициент усиления по мощности;  $\Delta f$  — ширина полосы пропускания. Полоса усиления  $B \geq G f_{\tau}$  определяет максимальную тактовую частоту  $f_{\tau}$  срабатывания элемента при заданном коэффициенте усиления. Следовательно, элементы ВТ должны обеспечивать большие значения полосы усиления.

Каналы связи между элементами должны иметь соответствующую большую ширину полосы пропускания.

Энергетическая добротность при ограничении мощности рассеяния также характеризует максимально допустимую плотность обработки информации на вычислительной схеме, выражаемую числом элементарных логических операций в секунду  $N$  на единицу площади схемы  $S$ :

$$N \leq \sigma q S K / G, \quad (7.5)$$

где  $\sigma$  — среднее число тактов, затрачиваемых на одну операцию;  $q$  — допустимая плотность мощности тепловыделения.

Тепловой барьер для современных интегральных логических схем является основным фактором, ограничивающим их основные характеристики: степень интеграции и быстродействие. Для современных ИС при воздушном охлаждении без специального теплоотвода  $q = 1$  Вт/см<sup>2</sup>. Например, для 16-разрядного микропроцессора, который выполнен на кристалле площадью 33 мм<sup>2</sup>, согласно (7.5) получаем ( $K \approx 10^{11}$  Дж<sup>-1</sup>,  $\sigma = 3 \div 5$ ,  $G \approx 20$ )  $N \sim 10^{10}$  оп/с на единицу площади схемы. Переход от воздушного охлаждения к жидкостному дает возможность повысить допустимую плотность мощности тепловыделения до  $q = 20$  Вт/см<sup>2</sup>, т. е. увеличивает плотность обработки информации на ИС более чем на порядок.

Быстродействие  $\tau = 10^{-10}$  с (0,1 нс) является практическим пределом для транзисторных элементов, который достигается только при жидкостном охлаждении до криогенных температур. В ИС практически реализовано быстродействие  $\tau = 10^{-9} - 10^{-8}$  с. Минимальное время переключения порядка 1 нс, достигнутое для полупроводниковых транзисторных элементов в условиях воздушного охлаждения, близко к пределу и вряд ли его удастся существенно улучшить.

Однако для построения супер-ЭВМ, которые в настоящее время разрабатываются, требуются сверхбыстродействующие переключательные элементы со временем переключения  $\tau = 10^{-12} - 10^{-11}$  с. Такие элементы могут быть созданы только на основе принципиально новой технологии, новых физических эффектов. К числу наиболее перспективных относятся технологии, основанные на эффектах Джозефсона, лазерной технике, голографии и нелинейных оптических эффектах.

## § 7.2. Оптические логические элементы и функциональные узлы

Первоначально для создания оптических переключательных элементов были использованы инжекционные полупроводниковые лазеры (ПЛ) и оптроны.

В переключательных элементах на основе инжекционных ПЛ в качестве пороговой нелинейности использовался механизм взаимного гашения генерации одного ПЛ излучением другого. Действительно, при пропускании когерентного излучения одного из ПЛ через активное вещество другого возникает индуцированное излучение, имеющее направление распространения, вызывающее уменьшение населенности инверсных уровней второго ПЛ и приводящее к его гашению. На основе таких лазерных переключательных элементов можно построить логические схемы, реализующие основные логические функции, а также элемент памяти.

Сотрудники Физического института АН СССР во главе с академиком Н. Г. Басовым предложили использовать в качестве переключательного элемента пару ПЛ — фотодиод, в которой кремниевый фотодиод соединен с пассивной частью лазерного диода, а в активную часть последнего инжектируется ток, обеспечивающий возбуждение лазера до уровня, близкого к порогу генерации. Входной световой сигнал преобразуется фотодиодом в электрический, инжекция которого приводит к превышению порога генерации, в результате чего лазер генерирует выходной световой импульс. В отсутствие же светового сигнала на входе фотодиода ПЛ работает в спонтанном режиме и сигнал на его выходе отсутствует. Ими были собраны и испытаны логические схемы, составляющие функционально полную систему, элемент памяти и динамический триггер.

Для ПЛ с двойной гетероструктурой характерны высокие предельные значения критериев качества:  $\Delta f \approx 10^{13}$  Гц;  $B \approx 10^{14}$  Гц. Приведенные значения выше, чем у транзистора. Преимущество ПЛ заключается в возможности практического достижения более высокого быстродействия, например  $\tau = 10^{-10} - 10^{-11}$  с. Однако разработка интегральной технологии получения ПЛ и объединения их в логические схемы еще находится на начальной стадии и встречает большие трудности. Кроме того, мощность рассеяния ПЛ на несколько порядков больше, чем электронных логических элементов, что является причиной их

низкой добротности и делает переключательные элементы на основе ПЛ неконкурентоспособными с транзисторными ключами.

Наиболее перспективно применение ПЛ в качестве стандартных источников когерентного излучения для оптико-электронных вычислительных систем вследствие их экономичности, легкости управления и возможности изготовления методами интегральной технологии.

Оптроны представляют собой сочетание светодиода (люминесцентный диод) и фототранзистора. Функционирование оптронов основано на двойном преобразовании энергии: фотоэлектрическом (свет — электрический сигнал) и электролюминесцентном (электрический сигнал — свет). На базе оптронов также может быть создана функционально полная система логических элементов, отвечающая современным схемотехническим и технологическим требованиям. Основным достоинством оптронов является высокая степень электрической развязки, достигаемая с их помощью. Поэтому оптроны с быстродействием 1—10 нс, полученные на базе светодиодов с двойной гетероструктурой, могут найти широкое применение в качестве элементов развязки для ИС транзисторной логики.

Однако как элементная база для построения вычислительных устройств оптронные логические схемы не могут конкурировать с транзисторными: потери, связанные с двойным преобразованием энергии, обуславливают низкую энергетическую добротность оптронов ( $K \sim \sim 10^7$  Дж<sup>-1</sup>), что на четыре порядка ниже, чем у транзисторных ключей. Дополнительные трудности при построении вычислительных устройств на базе оптронов создает также необходимость согласования спектральных характеристик светодиодов и фотоприемников, так как число оптронов, а следовательно, светодиодов определяется числом логических элементов.

Рассмотрим оптические переключательные элементы, которые смогут составить конкуренцию транзисторным ключам.

**Трансфазор.** Сотрудники Эдинбургского университета во главе с проф. Д. Смитом создали оптический аналог электронного транзистора и назвали его трансфазором [30]. Трансфазор переключается при небольшом изменении интенсивности падающего на него лазерного луча. Время переключения экспериментального образца трансфазора составило несколько пикосекунд (1 пс =  $10^{-12}$  с), что на два-три порядка лучше, чем у электронного транзистора.

В основе работы трансфазора лежит свойство некоторых кристаллов изменять показатель преломления при увеличении интенсивности падающего на них света. При создании конструкции трансфазора была заимствована идея, заложенная в интерферометре Фабри—Перо.

Простейший интерферометр Фабри — Перо (рис. 7.2) состоит из двух плоских зеркал, расположенных параллельно друг другу и разделенных некоторым пространством, именуемым резонатором, которое заполняется веществом, пропускающим свет только определенной длины волны. Расстояние между зеркалами может быть изменено. Зеркала обладают высокой отражательной способностью. Коэффициент отраже-

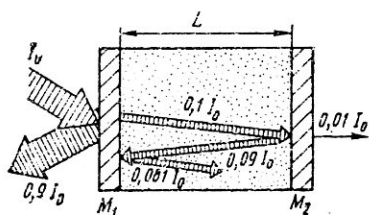


Рис. 7.2. Схематическое изображение интерферометра Фабри—Перо

же свойствами, что и  $M_1$ , выходной пучок света, прошедший через интерферометр, будет иметь интенсивность, равную  $0,01 I_0$ , т. е. в 100 раз меньшую интенсивности входного пучка. Пучок света, отраженный от задней стенки интерферометра и имеющий интенсивность  $0,09 I_0$ , многократно отражаясь от зеркал резонатора, будет становиться все слабее и слабее, пока весь свет не выйдет из интерферометра. Каждый проход пучка вносит определенный вклад в выходной пучок, увеличивая его энергию, но несущественно.

Однако прямой и обратный пучки света в резонаторе нельзя разделить так, как это сделано в приведенном схематическом описании (рис. 7.2). Входной пучок падает на интерферометр перпендикулярно поверхности его зеркал, поэтому все пучки в резонаторе распространяются по одному и тому же пути, взаимодействуя между собой. Результат взаимодействия зависит от соотношения фаз прямого ( $\varphi_n$ ) и обратного ( $\varphi_0$ ) пучков: если разность фаз кратна  $2\pi$  ( $\varphi_n - \varphi_0 = 2k\pi$ ), то происходит конструктивная интерференция (пучки в резонаторе усиливают друг друга); если же разность фаз составляет  $(2n + 1)\pi$ , то происходит деструктивная интерференция (пучки ослабляют друг друга). Может иметь место и любая промежуточная картина. Полная конструктивная интерференция возникает, когда оптическая длина резонатора  $L$  равна целому числу полуволн падающего света:

$$L = k\lambda/2, \quad (7.6)$$

где  $\lambda$  — длина волны падающего света;  $k$  — целое число. В этом случае световой пучок, входящий в резонатор, и пучки, образованные вследствие многократного отражения от зеркал внутри резонатора, а также пучок, выходящий из интерферометра, совпадают по фазе. Если  $L = (k + 0,5)\lambda/2$ , то наблюдается полная деструктивная интерференция.

Интерференция света внутри резонатора существенно влияет на пропускание интерферометра Фабри — Перо:

$$J = I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}},$$

где  $I_{\text{ВХ}}$ ,  $I_{\text{ВЫХ}}$  — интенсивности входного и выходного световых пучков.

ния  $R$  зеркал таких, что при освещении любого из них 90—95 % падающего света отражается обратно и только 5—10 % пропускается независимо от длины волны. Допустим, что  $R = 0,9$ . Тогда, если на зеркало  $M_1$ , образующее переднюю стенку интерферометра, падает пучок света интенсивностью  $I_0$ , то пучок, прошедший внутрь резонатора, будет иметь интенсивность, равную  $0,1 I_0$ . Поскольку зеркало  $M_2$  обладает теми

При полной деструктивной интерференции интенсивность выходного светового пучка минимальна:

$$\min I_{\text{вых}} = \frac{(1-R)^2}{(1+R)^2} I_{\text{вх}}.$$

В этом случае пропускание интерферометра незначительно. При полной конструктивной интерференции многочисленные прямые и обратные пучки света усиливают друг друга, складываясь по амплитуде, в результате чего в резонаторе создается поле, интенсивность которого во много раз превышает интенсивность падающего на интерферометр пучка. Интенсивность светового пучка на выходе интерферометра равна интенсивности входного пучка, т. е.  $\max I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}}$ . Таким образом, изменяя оптическую длину резонатора  $L$ , можно менять пропускание интерферометра от незначительного до единицы:  $\frac{(1-R)^2}{(1+R)^2} \leq J \leq 1$ . Зависимость пропускания  $J$  интерферометра от длины резонатора  $L$  описывается функцией Эйри (рис. 7.3). Функция Эйри показывает, что при постепенном приближении  $L$  к значению, определяемому соотношением (7.6), пропускание будет меняться медленно до определенного порогового значения, после чего произойдет резкий скачок. Это означает, что интерферометр Фабри — Перо способен резко переходить из одного состояния в другое и может служить основой для создания оптического переключательного элемента. Причем чем больше коэффициент отражения, тем лучше различимы эти состояния (рис. 7.3).

Весь вопрос заключается в том, как можно быстро изменять оптическую длину резонатора. Это можно сделать двумя путями: изменить расстояние между зеркалами  $l$  либо показатель преломления  $n$  вещества в резонаторе. Поскольку оптическая длина резонатора  $L = ln$ , то пригодны оба способа, однако управление изменением длины резонатора не позволит создать быстродействующий прибор.

Долгое время считалось, что показатель преломления не зависит от интенсивности света. С появлением лазеров, способных генерировать мощное когерентное излучение, было определено, что при взаимодействии лазерного излучения с некоторыми веществами показатель преломления последних изменяется в зависимости от интенсивности падающего излучения, т. е. такие вещества имеют нелинейный показатель преломления. Если в резонатор интерферометра Фабри — Перо поместить вещество, обладающее таким свойством, то можно управлять его показателем преломления путем изменения интенсивности входного светового пучка. Данный способ управления пропусканием интерферометра оказался эффективным и был принят при создании трансфазора.

Рассмотрим более подробно, как меняется пропускание интерферометра Фабри — Перо с нелинейным показателем преломления. Допустим, что интенсивность пучка падающего лазерного излучения можно плавно менять в определенном интервале. Пусть интенсивность тако-



ва, что оптическая длина  $L$ , обусловленная естественным показателем преломления вещества  $n_0$ , имеет значение, лежащее между пиками функции Эйри (рис. 7.4), а пропускание интерферометра мало. Если медленно увеличивать  $I_{вх}$ , то  $n$  и  $L$  постепенно изменяются, а пропускание  $J$  медленно возрастает. При определенном значении интенсивности света в резонаторе, называемом пороговым, между ним и приращением показателя преломления  $\Delta n$  образуется положительная обратная связь — они начинают увеличивать друг друга. Вследствие изменения  $n - n_0 + \Delta n$  прямые и обратные световые пучки смещаются по фазе, увеличивая взаимное усиление, интенсивность света в резонаторе резко возрастает, еще более изменяя показатель преломления. На графике функции Эйри это соответствует переходу на крутой участок, где  $J$  резко возрастает. Значение удовлетворяет (7.6), а  $J \approx 1$ , что соответствует пику кривой Эйри. Дальнейшее увеличение  $I_{вх}$  сопровождается линейным увеличением  $I_{вых}$ .

Если постепенно уменьшать  $I_{вх}$ , то пропускание интерферометра некоторое время остается неизменным, пока интенсивность света в резонаторе достаточно велика, чтобы значения  $n$  и  $L$  удерживались на уровне, соответствующем максимуму пропускания. Наступает момент, когда пропускание начинает плавно уменьшаться. При некотором критическом значении  $I_{вх}$  показатель преломления и интенсивность света в резонаторе начинают резко ослаблять друг друга. Пропускание интерферометра падает до минимума.

График зависимости  $I_{вых} = J(I_{вх})$  представлен на рис. 7.4, он напоминает петлю гистерезиса ферритового сердечника, широко использовавшегося в качестве элементов оперативной памяти ЭВМ второго поколения. Таким образом, интерферометр Фабри — Перо, в резонатор которого помещено вещество с нелинейным показателем преломления, является оптически бистабильным прибором, так как имеет два устойчивых состояния, в которых интенсивность выходного светового пучка изменяется незначительно при значительном изменении

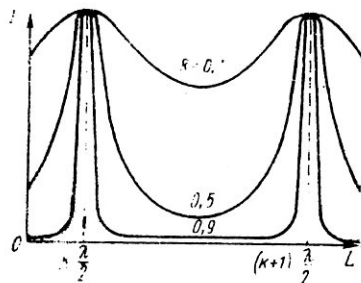


Рис. 7.3. Кривые пропускания интерферометра Фабри — Перо при различных значениях коэффициента отражения  $R$

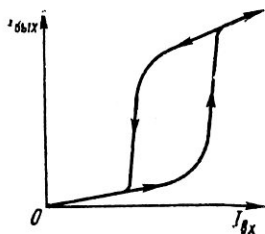


Рис. 7.4. Петля гистерезиса для интерферометра Фабри — Перо с нелинейным показателем преломления среды резонатора

интенсивности входного пучка. Такой прибор, так же как ферритовый сердечник, может быть использован в качестве элементов памяти, предназначенной для хранения двоичной информации. Только в отличие от ферритового сердечника он является энергозависимым и при отключении падающего света теряет информацию. Очевидно также, что в качестве двоичной или логической единицы можно принять одно из устойчивых состояний интерферометра, например состояние, соответствующее высокому уровню пропускания ( $J_{\max} = 1$ ), а другое — низкому уровню  $J_{\min}$ , приписать к нулю или наоборот. Любое из этих состояний интерферометра может поддерживаться сколь угодно долго с помощью пучка лазерного излучения промежуточной интенсивности.

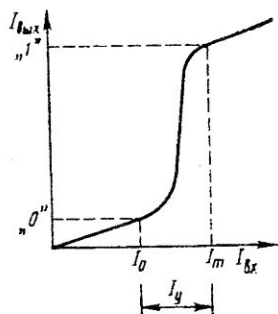


Рис. 7.5. Передаточная характеристика трансфазора с однозначной функцией пропускания

В переключательных элементах, применяемых при построении операционных устройств, явление гистерезиса не используется. Форма петли гистерезиса рассмотренного оптически бистабильного прибора зависит от оптической длины резонатора  $L$ , длины волны падающего света  $\lambda$  и свойств вещества, заполняющего резонатор. Изменив конструкцию прибора, петлю гистерезиса можно сузить и даже устранить. В результате получится однозначная кривая пропускания (рис. 7.5). Ее форма напоминает характеристику тока коллектора электронного транзистора. Кривая пропускания такого вида принимается за основу в оптическом аналоге транзистора. Оптический прибор с такой характеристикой, созданный на основе оптического интерферометра Фабри — Перо, был назван трансфазором, поскольку его работа основана на управлении фазовой световой волны, многократно проходящей вещество резонатора.

В первых экспериментальных образцах трансфазора в качестве вещества резонатора были использованы кристаллы антимонида индия  $\text{In Sb}$ , обладающего сильно выраженной нелинейной характеристикой. Из этого кристалла вырезались прямоугольные образцы, которые имели грани размером несколько миллиметров. Передние и задние грани кристаллов покрывались тончайшим слоем отражающего вещества, которые служили зеркалами. Исследования показали, что применение покрытия даже необязательно: полированная поверхность кристалла сама может служить зеркалом. Как видим, устройство трансфазора чрезвычайно просто и технологично.

Кристалл  $\text{In Sb}$  прозрачен только для некоторой области инфракрасной части спектра и лучше всего проявляет свою оптическую нелинейность при температуре 77 К и длине волны излучения, равной приблизительно 5 мкм. Такое излучение может генерироваться химическим лазером на оксиде углерода, излучение которого можно регули-