

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Гибин, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб. Устройство для записи матриц голограмм.— *Автометрия*, 1973, № 5.
2. P. K. Weimer, N. S. Pike, G. Sadastiv, F. V. Shallcross, L. Miray—
Horvath. Multielement Selfscanned Mosaic Sensors.— *IEEE Spectrum*, March 1969.

Поступила в редакцию 14 мая 1973 г.

УДК 681.3.01

И. И. КОРШЕВЕР, Г. Г. МАТУШКИН, П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ

(Новосибирск)

ЦИФРОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Известны попытки создания функциональных преобразователей табличного типа на основе элементов вычислительных машин предыдущих поколений. Эти попытки не имели большого успеха, так как на пути обеспечения даже средней точности вычислений лежали серьезные технические трудности.

С развитием оптических (в том числе голограммных) систем памяти, обеспечивающих высокую плотность записи информации при малом времени ее выборки, снова возникает интерес к цифровым функциональным преобразователям (ЦФП), основанным на принципе выборки искомого значения функции из массива ее значений, записанных в постоянное запоминающее устройство. Рассмотрим открывающиеся при этом возможности и укажем примеры их использования.

Исходные соображения. Полная емкость памяти ЦФП определяется как

$$C = n_{\phi} \cdot 2^{n_a N_a},$$

где N_a — число входных переменных (аргументов), а n_a и n_{ϕ} — числа разрядов в двоичных представлениях входных переменных и искомым значениям функций соответственно. В случае разной разрядности входных переменных это выражение запишем в виде

$$C = n_{\phi} \cdot 2^{n_{a_1} + \dots + n_{a_k}} = n_{\phi} \cdot 2^{\sum n_{a_i}}.$$

Полная емкость памяти ЦФП распределяется в различных соотношениях между числом значений функции и их разрядностью, определяемой требуемой погрешностью представления значений функций. Число же значений функции N_{ϕ} определяется (при заданной емкости) суммарной разрядностью аргументов

$$N_{\phi} = \frac{C}{n_{\phi}} = 2^{\sum n_{a_i}}.$$

Так, при $C = 2^{21}$ бит и погрешности значений функции порядка 0,5%, при которой длина выходного кода должна составлять 2^3 бит, число значений функции может быть равно 2^{18} . Следовательно, при нахождении значений функции одного переменного на вход ЦФП можно подавать 2^{18} значений этого переменного. В этом случае число двоичных разрядов входного слова равно 18. Если же число аргументов функции

более одного, то разрядность значений аргументов должна выбираться таким образом, чтобы в сумме число всех переменных не превышало 18.

В большинстве случаев погрешность значений функции, определяемая как среднеквадратичная погрешность на шаге квантования аргумента, больше погрешности задания аргументов. Поэтому, исходя из условия универсального* применения ЦФП, целесообразно выбирать число разрядов в двоичном представлении значений функции равным или меньшим суммарному числу разрядов аргументов.

Принципы действия. Основные преимущества, которые дает использование в качестве ЦФП оптических запоминающих устройств (ЗУ), заключаются в следующем:

1) в высокой плотности записи информации (10^8 бит/см²) при малом времени ее времени выборки (0,1—1 мкс);

2) в возможности изменения простыми средствами вида выполняемого функционального преобразования. Изменение вида преобразования в известных постоянных запоминающих устройствах связано с перемонтажом матрицы памяти либо с ее заменой. Как первое, так и второе, учитывая большие объемы требуемой памяти, сводится к весьма трудоемким и дорогостоящим операциям.

Постраничная организация хранения информации в оптических ЗУ позволяет осуществить дешифрацию адреса (значения аргумента) с помощью двух не связанных друг с другом схем. Первая схема, дешифруя старшие разряды аргумента, выбирает страницу оптической памяти, в которой находится искомый результат. В то же время вторая схема дешифрует младшие разряды аргумента, выбирая в данной странице результирующее значение функции. Использование двух независимых схем дешифрации значительно упрощает адресную схему.

Структурная схема ЦФП на основе оптического ЗУ приведена на рис. 1, где показаны: входной регистр (1); дешифратор старших разрядов (2) — первая схема дешифрации; матрица излучающих элементов (3) со схемами управления; кассета оптической памяти (4), в которую занесены все возможные значения функции, размещенные на N страницах; оптическая система (5), проецирующая изображение выбранной страницы на матрицу фотоприемников (6) с элементами управления; дешифратор младших разрядов (7) — вторая схема дешифрации; линейка выходных импульсных усилителей (8) и выходной регистр (9).

Старшие двоичные разряды значений аргументов, определяющие номер страницы, где находится искомое значение функции, подаются с входного регистра на дешифратор старших разрядов. Сигнал с одного

из выходов этого дешифратора поступает на соответствующий элемент излучающей матрицы, который освещает противоположную страницу в кассете оптической памяти. Проходя через коллективную линзу, световое изображение страницы (мозаика темных и светлых элементов) проецируется на матрицу фотоприемников. Фотоприемники, соответствующие светлым элементам мозаики, генерируют единый сигнал.

Элементы на фотоприемной матрице объединяются в группы по числу двоичных разрядов в кодах значений функции. Все выходы элементов групп, соответствующих одноименным разрядам значений функции, соединяются между собой

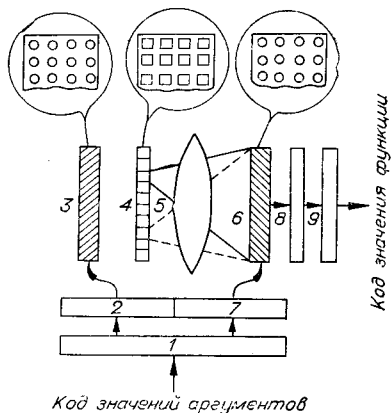


Рис. 1.

* Под универсальностью ЦФП понимается возможность его использования при нахождении значений функции одного, двух, трех и большего числа переменных.

и выводятся на линейку импульсных усилителей и через них на соответствующие разряды выходного регистра. Следовательно, число групп элементов на матрице фотоприемников соответствует числу значений функции, записанных в одной странице, а число элементов в группе — числу разрядов в коде значения функции. Число выходов из матрицы фотоприемников и число выходных импульсных усилителей также равно числу разрядов кода значений функции.

На каждую группу фотоприемников подается общее питание через ключ, управляемый сигналами с выходов дешифратора младших разрядов аргументов. Код младших разрядов аргументов определяет адрес той или иной группы элементов фотоматрицы и, следовательно, адрес слова, подлежащего считыванию и выводу на выходной регистр ЦФП.

Вид функционального преобразования в описанном ЦФП определяется только матрицей оптической памяти. Эта матрица помещается в специальной кассете и легко заменяется.

Таким образом, располагая типовым блоком ЦФП и набором кассет оптической памяти, можно осуществлять однотактное вычисление значений любой функции одной или нескольких переменных. Допустимое количество переменных при этом определяется заданной точностью преобразования, областью определения функции и емкостью памяти.

Информация в ячейки памяти может быть внесена либо методом поточечной записи, либо методом голографической регистрации. В первом случае кассета оптической памяти содержит линзовый растр; во втором — в качестве излучателей необходимо использовать матрицу полупроводниковых лазеров.

Выбор параметров схемы. При создании ЦФП возникает вопрос о распределении общего объема памяти. Чем меньше количество страниц памяти в оптическом ЗУ, тем меньше требуется светодиодов или полупроводниковых лазеров, однако тем больший объем информации приходится на одну страницу и, следовательно, тем больше элементов должна содержать матрица фотоприемников.

Распределение объема памяти может быть выполнено по-разному в зависимости от принятого критерия, учитывающего технологическую сложность выполнения матриц излучающих элементов, фотоприемников, дешифраторов и т. п. В частности, если исходить из равенства числа элементов в излучающей и приемной матрицах, что соответствует

$$n_{\Phi} \cdot 2^{\sum_i n''_{a_i}} = 2^{\sum_i n'_{a_i}},$$

то суммарное число разрядов в регистре дешифратора старших разрядов аргументов будет равно

$$\sum_i n'_{a_i} = \sum_i n''_{a_i} + \log_2 n_{\Phi}.$$

Здесь $\sum_i n'_{a_i}$ и $\sum_i n''_{a_i}$ — суммарные числа старших и младших разрядов аргументов, определяющих разрядность первой и второй схем дешифрации.

Учитывая, что $\sum_i n_{a_i} = \sum_i n'_{a_i} + \sum_i n''_{a_i}$, получим

$$\sum_i n'_{a_i} = 1/2 \sum_i n_{a_i} + \log \sqrt{n_{\Phi}}.$$

Каждый выход дешифратора старших разрядов, т. е. дешифратора, обеспечивающего выбор страниц, связан с одним излучающим элементом (одной страницей памяти). Каждый выход дешифратора младших разрядов, т. е. дешифратора, обеспечивающего выбор значения функции, связан с группой разрядов, образующих выходное слово.

Таблица 1

| Число двоичных разрядов в кодах аргументов (n_a) | Число двоичных разрядов в кодах значения функции (n_ϕ) | Число элементов в излучающей матрице | Число элементов в фотоприемной матрице | Емкость ОПЗУ в битах | Размеры излучающей и фотоприемной матриц |
|--|---|--------------------------------------|--|----------------------|--|
| 6 | 9 | 192 | 192 | $9 \cdot 12^{12}$ | 12×16 |
| 8 | 16 | 1024 | 1024 | 2^{20} | 32×32 |
| 10 | 16 | 4096 | 4096 | 2^{24} | 64×64 |
| 12 | 25 | 20 480 | 20 480 | $25 \cdot 2^{21}$ | 128×160 |
| 16 | 25 | 327680 | 327680 | $25 \cdot 2^{32}$ | 512×640 |

Итак, если исходить из условия равенства числа элементов в излучающей и фотоприемной матрицах, то распределение общего объема памяти будет оптимальным, когда число страниц

$$N_{\text{стр}} = 2^{\sum_i n'_i a_i} = \sqrt{n_\phi} \cdot 2^{\frac{\sum_i n_{a_i}}{2}},$$

а в каждой странице записано

$$C_{\text{стр}} = \frac{C}{N_{\text{стр}}} = \sqrt{n_\phi} \cdot 2^{\frac{\sum_i n_{a_i}}{2}} \text{ бит.}$$

Поскольку входные дешифраторы преобразуют двоичный код значений аргументов в число, соответствующее номеру (адресу) страницы, или в число (адрес) n_ϕ -разрядных слов, содержащихся в странице, то для эффективного использования элементов схемы целесообразно выбирать $\sum_i n_{a_i}$ четным, а $n_\phi = 2^{2k}$, или, в крайнем случае, $n_\phi = l^{2k}$, где k, l — числа натурального ряда.

В табл. 1 приведены данные о количестве элементов матриц и емкости памяти для случая определения значений функций двух переменных с одинаковым числом разрядов. Условие $n_\phi = \sum_i n_{a_i}$, как целесообразное в смысле универсального применения ЦФП и погрешности значений функций, выполняется только при $n_{a_i} = 8$.

Можно также исходить из критерия простоты дешифрации значений аргументов, т. е. из минимального количества вентилях, требующихся для создания схем дешифраторов. Поскольку общее число вентилях в дешифраторах

$$M = 2^{\sum_i n'_i a_i} + 2^{\sum_i n''_i a_i},$$

то оно будет минимальным при

$$\sum_i n'_i a_i = \sum_i n''_i a_i = 1/2 \sum_i n_{a_i}$$

и равно

$$M_{\text{min}} = 2^{\frac{\sum_i n_{a_i}}{2}} + 1.$$

Следовательно, число страниц памяти равно $N_{\text{стр}} = 2^{\frac{\sum_i n_{a_i}}{2}}$, а в каждой странице должно быть записано

$$C_{\text{стр}} = \frac{C}{N_{\text{стр}}} = n_\phi 2^{\frac{\sum_i n_{a_i}}{2}} \text{ бит.}$$

Т а б л и ц а 2

| Число двоичных разрядов в кодах аргументов (n_a) | Число двоичных разрядов в коде значения функции (n_ϕ) | Число элементов в излучающей матрице | Число элементов в фотоприемной матрице | Емкость ОПЗУ в битах | Размеры излучающей (1) и фотоприемной (2) матриц |
|--|--|--------------------------------------|--|----------------------|--|
| 6 | 12 | 64 | 768 | $3 \cdot 2^{14}$ | 8×8 (1) 24×32 (2) |
| 8 | 16 | 256 | 4096 | 2^{20} | 16×16 (1) 64×64 (2) |
| 10 | 20 | 1024 | 20 480 | $5 \cdot 2^{22}$ | 32×32 (1) 128×160 (2) |
| 12 | 24 | 4096 | 98 304 | $3 \cdot 2^{27}$ | 64×64 (1) 256×384 (2) |
| 16 | 32 | 65536 | 2 097 152 | 2^{27} | 256×256 (1) 1024×2048 (2) |

В этом случае число элементов в матрице фотоприемников должно быть в n_ϕ раз больше числа элементов в матрице излучателей.

Данные о количествах элементов матриц и емкости памяти при такой организации ЦФП для нахождения значений функции двух переменных приведены в табл. 2.

Из табл. 1, 2 следует, что уже при двух 12-разрядных аргументах объем памяти для хранения 24-разрядных значений функций должен быть порядка 2^{28} — 2^{29} (10^8 — 10^9) бит, т. е. приближается к предельным значениям объема памяти оптических запоминающих устройств на современном техническом уровне. Можно также выделить (см. вторые строки таблиц) довольно рациональный (по простоте, стоимости, ожидаемым габаритам) байтовый вариант ЦФП емкостью памяти 2^{20} (10^6) бит. При использовании быстродействующих элементов (светодиодов, фотодиодов) в излучательной и фотоприемной матрицах время, затрачиваемое на получение результата, может составлять величину порядка 0,1 мкс. Поэтому на основе таких устройств могут быть созданы оптико-электронные многобайтовые функциональные преобразователи, подобные тем, которые описаны, к примеру, в*.

Применение. Одна из перспективных областей применения ЦФП — это операции над комплексными числами, которые, будучи заданными в алгебраической форме, легко суммируются, однако гораздо труднее умножаются, поскольку при этом необходимо осуществить четыре операции умножения и две — сложения над их компонентами;

в экспоненциальной форме, напротив, легко перемножаются, однако при их сложении необходимо выполнять ряд сложных операций.

Естественным выходом из этой ситуации может быть переход от формы представления к другой в зависимости от требуемой операции с помощью ЦФП, причем один тип ЦФП должен осуществлять преобразование комплексного числа из алгебраической формы в экспоненциальную ($A \rightarrow \Theta$), второй — из экспоненциальной формы в алгебраическую ($\Theta \rightarrow A$). Эти типы ЦФП будут отличаться друг от друга лишь матрицей ячеек памяти.

Например, ЦФП с емкостью памяти 2^{20} бит может быть использован для преобразования комплексных чисел из одной формы представления в другую за один такт с погрешностью порядка 0,5%. В случае ЦФП ($\Theta \rightarrow A$) на входы поступают 8-разрядные коды модуля амплитуды и фазы экспоненциального представления комплексного числа, а с вы-

* A. Heme1. Making Small ROM's do Math Quickly, Cheaply and Easily.—Electronics, 1970, v. 43, № 10.

хода считываются 16-разрядные коды, половина разрядов которых составляет действительную, а половина — мнимую составляющую этого числа в алгебраической форме. В случае ЦФП ($A \rightarrow \mathcal{E}$) на входы поступают 8-разрядные коды действительной и мнимой составляющих комплексного числа в алгебраической форме представления, а с выходных регистров считывают 16-разрядное слово, половина разрядов которого определяет значение амплитуды, а вторая половина — фазу этого числа в экспоненциальной форме. Поскольку значения фазы в различных октантах связаны несложной зависимостью, то, используя простые логические схемы, можно значительно увеличить точность представления фазы комплексного числа.

Другая трудоемкая операция, также часто встречающаяся на практике, — это операция поворота вектора, заданного своими координатами (операция преобразования координат). Новые координаты

$$x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha, \quad y' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha$$

можно рассматривать, как новые компоненты вектора $(x + jy)$ при повороте его на угол $(-\alpha)$. Поворот вектора, заданного в алгебраической форме, может быть осуществлен двумя способами.

Первому из них соответствует выражение

$$(a_R + ja_I) e^{j\alpha} = A e^{j\varphi} e^{j\alpha} = A e^{j(\varphi + \alpha)} = a'_R + ja'_I,$$

из которого следует, что комплексное число, характеризующее вектор, преобразуется с помощью ЦФП ($A \rightarrow \mathcal{E}$) из алгебраической формы в экспоненциальную, затем к аргументу φ в сумматоре прибавляется значение угла α и, наконец, на следующем ЦФП ($\mathcal{E} \rightarrow A$) полученное комплексное число снова преобразуется в алгебраическую форму. Структурная схема такого устройства приведена на рис. 2, а.

Второй способ вытекает из тождества

$$(a_R + ja_I) e^{j\alpha} = a_R e^{j\alpha} + a_I e^{j(\alpha + \pi/2)} = a'_R + ja'_I$$

и предусматривает преобразование на двух ЦФП ($\mathcal{E} \rightarrow A$) комплексных величин $a_R e^{j\alpha}$ и $a_I e^{j(\alpha + \pi/2)}$ в алгебраическую форму и затем раздельное суммирование их действительных и мнимых составляющих. Структурная схема этого устройства приведена на рис. 2, б.

Таким образом, перемножение двух комплексных чисел, задаваемых алгебраически, с помощью прямого и обратного преобразователей ($A \rightarrow \mathcal{E}$) и ($\mathcal{E} \rightarrow A$) может быть реализовано по схеме, изображенной на рис. 2, в, а сложение двух комплексных чисел, заданных в экспоненциальной форме, — как показано на рис. 2, г. Эти операции могут быть

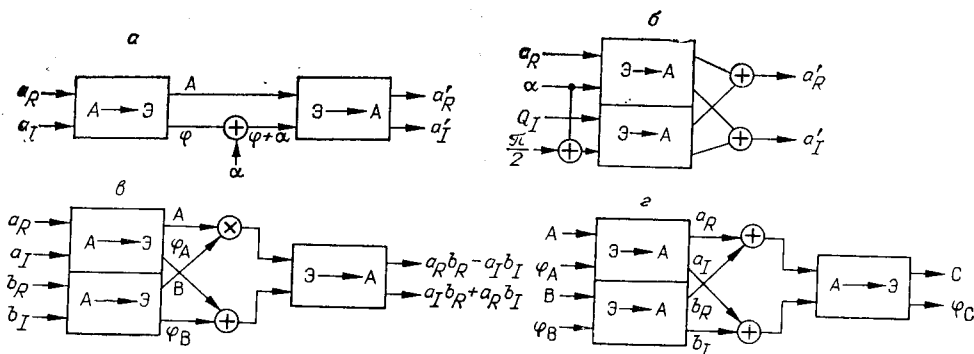


Рис. 2.

реализованы одновременно, если имеются в наличии все три ЦФП, или последовательно — в два такта, если есть пара ЦФП — прямой и обратный, и, наконец, с помощью одного ЦФП ($A \rightarrow \mathcal{E}$) — тогда каждая операция ($\mathcal{E} \rightarrow A$) потребует несколько более длительного времени, а само управление — специальной, хотя и несложной, организации.

Наличие ЦФП, осуществляющих поворот вектора, открывает новые возможности перед специализированными вычислителями, предназначенными для решения трансцендентных уравнений или для дискретного спектрального анализа, осуществляемого с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье.

На основе рассматриваемых устройств могут быть также созданы операционные узлы перспективных вычислительных машин, сочетающих программные и аппаратные методы обработки.

Эффективность использования ЦФП будет тем выше, чем сложнее функциональное преобразование, которое он осуществляет, поскольку сложность ЦФП не зависит от вида преобразования.

Поступила в редакцию 27 апреля 1973 г.

УДК 681.327.02+621.378.9

**А. А. ВАСИЛЬЕВ, И. Н. КОМПАНЕЦ,
В. В. НИКИТИН, Л. В. ТАРАСОВ**
(Москва)

УПРАВЛЯЕМЫЙ ТРАНСПАРАНТ НА ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ЭЛЕМЕНТОВ

Повышение производительности современных вычислительных систем немислимо без широкого применения в них методов оптической обработки информации и когерентных источников света. Представление в оптическом виде информации, вводимой в систему в форме электрических сигналов, можно осуществлять с помощью матричного переключающего устройства — управляемого транспаранта. В [1] для записи голограмм использовался управляемый транспарант на жидком кристалле, имеющий плотность элементов 400 1/см^2 . Обладая выгодной энергетикой и хорошей контрастной характеристикой, такой транспарант мог обеспечить ввод двумерного массива информации со скоростью 50 кадров (голограмм) в секунду. В [2] удалось уменьшить время включения и выключения используемого эффекта рассеяния света в кристалле.

Увеличение скорости ввода данных зависит также от числа элементов транспаранта, т. е. от числа параллельных каналов, осуществляющих преобразование электрических сигналов в оптические. С учетом сложности электрической коммутации (обычно последовательно-параллельной) наиболее приемлемыми являются транспаранты на 10^4 элементов («страница»). Повышение плотности элементов транспаранта на жидком кристалле, необходимое для уменьшения его размеров, может вызывать, однако, нежелательную взаимосвязь элементов, проявляющуюся в снижении контрастной характеристики оптического отклика.

В данной работе обсуждаются электрические и оптические характеристики управляемого транспаранта на жидком кристалле с плотностью