

Рис. 3. Выходной сигнал системы (14, 49; 15, 10; 15, 75 МГц).

диосигналов с использованием ПЗС структур и мини-ЭВМ «Электроника-100». Основные характеристики спектроанализатора определяются характеристиками акустооптического модулятора. ПЗС линейка и ЭВМ не вносят дополнительных искажений в снимаемую информацию, но позволяют при использовании известных методов оперативно менять программу обработки.

Наконец, необходимо отметить, что, используя пространственно-многоканальные ультразвуковые модуляторы [3] и матрицы ПЗС элементов в разработанной оптико-цифровой системе, можно проводить спектральный анализ совокупности сигналов. Структура разработанного интерфейса для программного управления режимами работы ПЗС линейки позволяет использовать его для различных линеек (на 128, 256, 512 и 1024 элементов) и матриц без каких-либо изменений. Изменяется только программа ЭВМ в соответствии с числом элементов линейки или матрицы и их структурной организацией.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cole T. W. Electrooptical signal processing in radioastronomy.—“Optica Acta”, 1975, vol. 22, N 2, p. 83—92.
2. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью. М., «Сов. радио», 1976.
3. Есепкина Н. А., Петрунькин В. Ю., Бухарин Н. А., Котов Б. А., Котов Ю. А., Прусс-Жуковский С. В. Акустические анализаторы спектра для радиоастрономии.—«Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика», 1976, т. XIX, № 12, с. 1732—1739.

Поступила в редакцию 19 июля 1977 г.;  
окончательный вариант — 11 ноября 1977 г.

УДК 681.325 : 621.378.9

Л. А. ОРЛОВ, К. К. СВИДЗИНСКИЙ

(Москва)

### ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СУММАТОР ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

В работе [1] была рассмотрена задача построения оптического арифметического устройства на электрически управляемых транспарантах (ЭУТ). С точки зрения вычислительной техники ЭУТ представляет собой пассивный элемент, в который управляющая информация вводится по строкам или столбцам [2].

Функционально более гибким логическим элементом для дискретной вычислительной техники является активный, оптически управляемый

транспарант (ОУТ) [3]. Это устройство представляет собой усилитель яркости позитивного или негативного изображений. Некоторые способы физической реализации активных ОУТ и выполнения с их помощью логических операций над числовыми картинками в виде бинарных изображений рассмотрены в [4—6]. Преимущество ОУТ по сравнению с ЭУТ состоит в том, что, во-первых, ОУТ обеспечивает высокую скорость ввода управляющих сигналов в виде изображений в логическое устройство и, во-вторых, непосредственную компенсацию потерь при выполнении логических преобразований. В отличие от этого в устройствах на ЭУТ восстановление уровня логического оптического сигнала возможно лишь путем применения фотоэлектрического преобразователя, последующего усиления и обратного преобразования на оптическую несущую с помощью ЭУТ.

В настоящей работе рассматривается способ построения на базе ОУТ оптического сумматора с одновременной выработкой всех переносов. Проблема построения сумматора имеет принципиальное значение для цифровой вычислительной техники, поскольку оптические процессоры могут обеспечить большую скорость вычислений за счет параллельной обработки в большом числе оптических каналов. Операция суммирования многоразрядных чисел является примером наиболее типичной арифметической операции, которая поддается распараллеливанию лишь за счет больших затрат оборудования. Таким образом, решение поставленной задачи должно дать, по существу, ответ на вопрос, возможно ли эффективно обратить высокую степень параллелизма в высокую скорость вычислений в частном, но важном случае выполнения арифметических операций? Может оказаться, что такое превращение достигается ценой слишком большой затраты оптических вычислительных каналов.

**Числовые картины и их преобразования.** Активные ОУТ, например ОУТ отражательного типа на структуре фотопроводник — электрооптический материал [4—6], являются амплитудно-светочувствительными логическими элементами импульсно-потенциального типа с памятью: выходное изображение может сохраняться при снятом входном изображении, если на ОУТ поддерживается напряжение питания. Поэтому ОУТ может использоваться так же, как элемент памяти или регистр.

Оптическим представлением числа для амплитудных ОУТ служит бинарное изображение, имеющее две градации контрастности изображения, соответствующие наличию или отсутствию светового сигнала. Каждый дискрет такого изображения, называемого «числовой картиной», представляет один разряд двоичного числа и проецируется на соответствующую ячейку ОУТ. Пусть светлomu элементу соответствует код «1», а темному — «0». Тогда при совмещении двух числовых картин на входе позитивного ОУТ в каждой ячейке совершается операция ИЛИ, а при совмещении картин на негативном ОУТ — операция ИЛИ — НЕ [4]. Схемные обозначения этих основных логических элементов и операций приводятся в табл. 1.

Помимо логических преобразований, важную роль в оптической вычислительной технике играют оптические преобразования изображений числовых картин. Эти преобразования производятся при передаче числовых картин от одного логического элемента к другому и служат средством коммутации различных оптических каналов. В отличие от логических преобразований оптические преобразования не требуют машинного времени, так как время распространения света через оптический преобразователь значительно меньше времени срабатывания ОУТ или тактового периода  $t_0$ . Произвольная коммутация оптических каналов (в смысле проекции одного двумерного дискретного множества элементов на другое) может быть обеспечена посредством волоконной оптики, а также голографическими методами [3]. Однако для

Таблица 1

	Числовая картина А
	Элемент разветвления числовой картины
	Элемент совмещения числовых картин
	Позитивный ОУТ (усилитель яркости)
	Негативный ОУТ (активный инвертор)
	Логический элемент ИЛИ
	Логический элемент ИЛИ-НЕ
	Пирамидальный логический сумматор

рассматриваемой задачи оказывается достаточным набор простых преобразований, которые можно выполнить обычной, цилиндрической или растровой оптикой. Набор этих операций и их обозначения приводятся в табл. 2.

Двоичные числа в числовой картине будем располагать вдоль ее строк, так что длина строки кратна количеству разрядов  $n$ , отведенному для записи одного числа, а одинаковым разрядам чисел соответствуют определенные столбцы. Кроме того, будем рассматривать «расширенную» числовую картину, когда на каждое  $n$ -разрядное двоичное число отводится «числовая ячейка» из  $n$  строк и  $n$  столбцов.

Все оптические преобразования чисел производятся в пределах их числовых ячеек. Например, проецирующий оператор  $P$  означает обращение в нуль всех разрядов в числовой ячейке, кроме выделенных. Эта операция осуществляется просто посредством оптической маски, которая повторяется во всех числовых ячейках. Операция сдвига по строкам  $D_r^q$  (или столбцам  $D_c^q$ ) на  $q$  разрядов производится в общем случае не просто сдвигом всего изображения, а сдвигом разрядов внутри числовых ячеек при неподвижных границах последних. Освободившиеся элементы при сдвиге заполняются нулями, а разряды, перешедшие за рамки числовой ячейки, исчезают и не переходят в другие ячейки. Операции  $D_r^q$  и  $D_c^q$  могут быть реализованы с помощью разрезных зеркал или волоконной оптики.

Операция мультипликации  $M^p$  заключается в повторении числа из первой строки еще в  $p-1$  строке числовой ячейки расширенного числа. Эта операция осуществляется, например, растяжением изображения цилиндрическим линзовым растром на  $p$  строк. Допустимая кратность мультипликации ограничивается динамическим диапазоном последующего ОУТ и определяется минимальным перепадом яркости элемента изображения между нулем и единицей. Если такой перепад не обеспечивается, то мультипликация должна проводиться в несколько этапов

Таблица 2

	Логическое суммирование (сборка) элементов строк
	Логическое суммирование (сборка) элементов столбцов
	Транспонирование (замена строк столбцами)
	Сдвиг всей числовой картины вдоль строк на $n$ разрядов влево
	Сдвиг всей числовой картины вверх вдоль столбцов на $n$ разрядов
	$n$ -кратная мультипликация числового столбца
	$n$ -кратная мультипликация числовой строки
	Выделение совокупности элементов числовой картины (маскирование)

и сопровождаться усилением яркости, что будет связано с временной задержкой. Очевидно, обратный линзовый растр осуществляет сжатие («сборку») расширенного изображения по столбцам  $\Sigma_c$  (или по строкам  $\Sigma_r$ ).

Наиболее сложным преобразованием является транспонирование, т. е. замена строк столбцами в расширенных числовых ячейках. Кроме упомянутого способа с применением волоконной оптики, эта операция может быть выполнена с помощью цилиндрического транспонирующего растра, где оси цилиндрических линз расположены вдоль главных диагоналей числовых ячеек.

**Принцип построения сумматора.** Способ синтеза устройства на ОУТ, выполняющего заданную логическую функцию над числовыми картинами, сводится к представлению этой функции в дизъюнктивной форме [4]. С этой целью все встречающиеся логические произведения приводятся к операциям инверсии и дизъюнкции с помощью формулы де Моргана.

Как известно [1],  $k$ -й разряд арифметической суммы двух чисел  $A = a_n a_{n-1} \dots a_1$  и  $B = b_n b_{n-1} \dots b_1$  в терминах алгебры логики может быть записан в виде

$$S_k = a_k b_k e_k + \bar{a}_k \bar{b}_k e_k + \bar{a}_k b_k \bar{e}_k + a_k \bar{b}_k \bar{e}_k. \quad (1)$$

Здесь и в дальнейшем произведение означает конъюнкцию, а сумма — дизъюнкцию,  $\bar{a}$  — инверсию числа  $a$ . Перенос в  $k$ -й разряд  $e_k$  выражает

ся через собственные переносы  $c_i$  и признаки транзита  $t_i$  переноса в  $i$ -м разряде:

$$c_i = a_i b_i; \quad t_i = a_i + b_i; \quad (2)$$

$$e_k = c_{k-1} + t_{k-1} c_{k-2} + t_{k-1} t_{k-2} c_{k-3} + \dots + t_{k-1} \dots t_1 c_0, \quad (3)$$

где  $c_0 \equiv e_1$  — перенос, добавляемый в младший разряд при получении дополнительного кода или при округлении. Так как

$$\bar{e}_k = \overline{c_{k-1} + t_{k-1} e_{k-1}} = \bar{t}_{k-1} + \bar{c}_{k-1} \bar{e}_{k-1}, \quad (4)$$

где

$$\bar{c}_i = \bar{a}_i + \bar{b}_i; \quad \bar{t}_i = \bar{a}_i \bar{b}_i, \quad (5)$$

то последовательным применением (4) получим инверсию (3)

$$\bar{e}_k = \bar{t}_{k-1} + \bar{c}_{k-1} \bar{t}_{k-2} + \dots + \bar{c}_{k-1} \dots \bar{c}_2 \bar{t}_1 + \bar{c}_{k-1} \dots \bar{c}_1 \bar{c}_0. \quad (6)$$

Пользуясь соотношением де Моргана

$$xyz \dots = \overline{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z} + \dots}, \quad (7)$$

получим выражение для суммы (1) и переносов (3) и (6) в требуемом виде:

$$S_k = \overline{\bar{a}_k + \bar{b}_k + \bar{e}_k} + \overline{a_k + b_k + \bar{e}_k} + \overline{\bar{a}_k + b_k + e_k} + \overline{e_k + \bar{b}_k + e_k}; \quad (8)$$

$$e_k = \sum_{i=1}^k \overline{\Delta_{k-1,i}(\bar{t}) + \bar{c}_{i-1}}; \quad (9)$$

$$\bar{e}_k = \sum_{i=1}^k \overline{\Delta_{k-1,i}(c) + t_{i-1}}. \quad (10)$$

Здесь  $c_0 \equiv e_1$ , а компоненты вектора  $\Delta_k(x)$  определяются следующим образом:

$$\Delta_{k,i}(x) = \begin{bmatrix} \Delta_{k,k}(x) \\ \Delta_{k,k-1}(x) \\ \dots \\ \Delta_{k,1}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ x_k + x_{k-1} \\ \dots \\ x_k + x_{k-1} + \dots + x_1 \end{bmatrix} \quad (i \leq k); \quad (11)$$

$$\Delta_{k,i}(x) = 0 \quad (i > k).$$

На рис. 1 в обозначениях табл. 1 приводится схема двухтактного сумматора числовых картин с тремя комплементарными входами. Схема для одновременной выработки переносов изображена на рис. 2, где

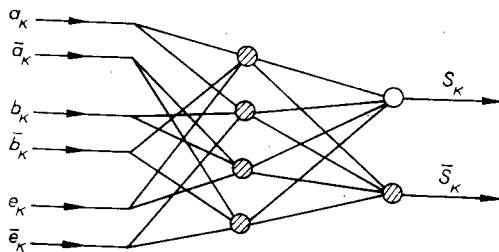


Рис. 1. Сумматор числовых картин с комплементарными входами.

также показана последовательность преобразований картин числовой ячейки для 4-разрядных чисел. Применяемая в этой схеме операция проецирования  $P_\Delta$  означает обращение в нуль всех элементов числовой картины, находящихся ниже главной диагонали.

Специфическим элементом схемы выработки переносов является так называемый пирамидальный сумматор  $\Delta$ ,

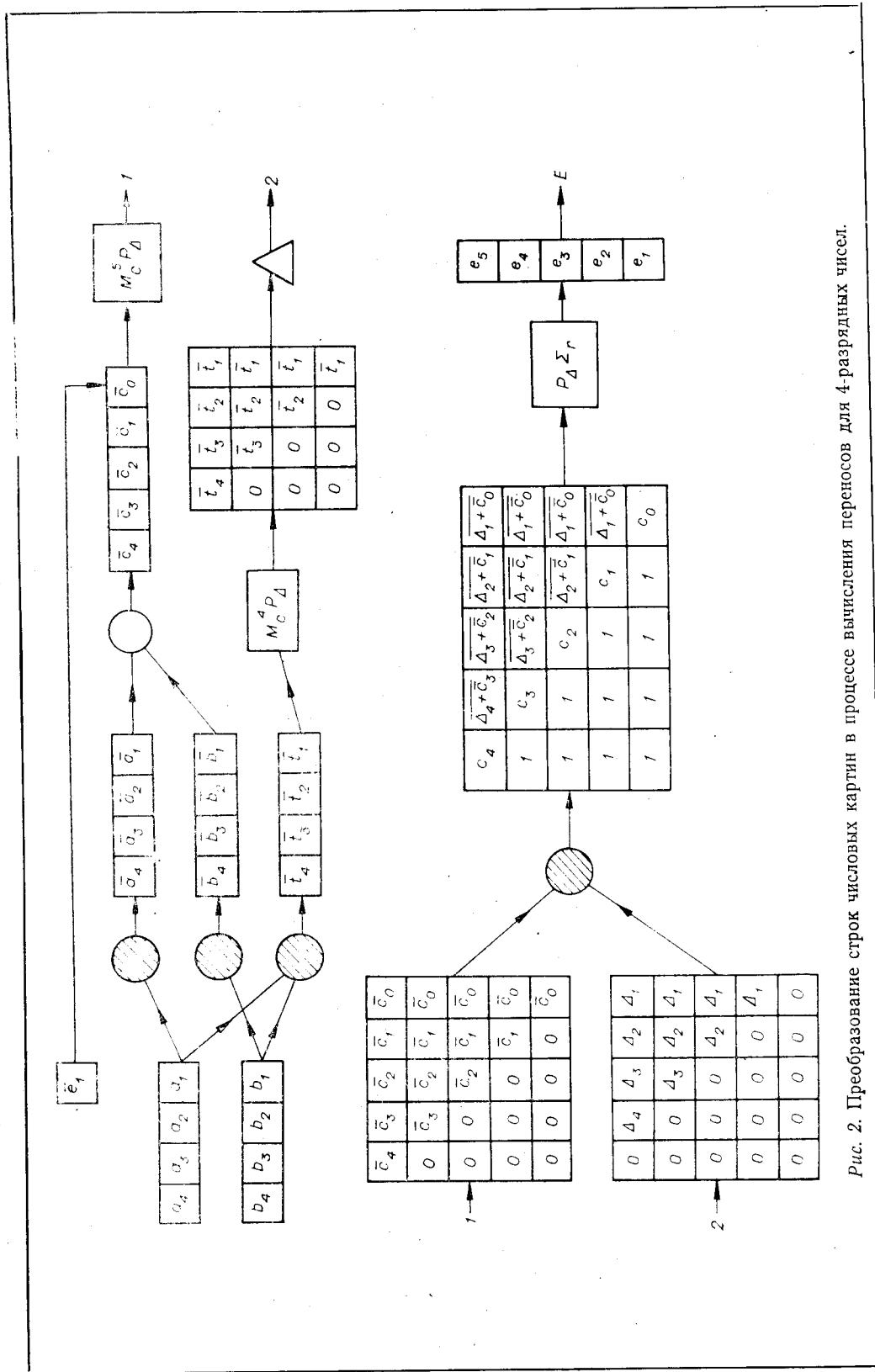


Рис. 2. Преобразование строк числовых картин в процессе вычисления переносов для 4-разрядных чисел.

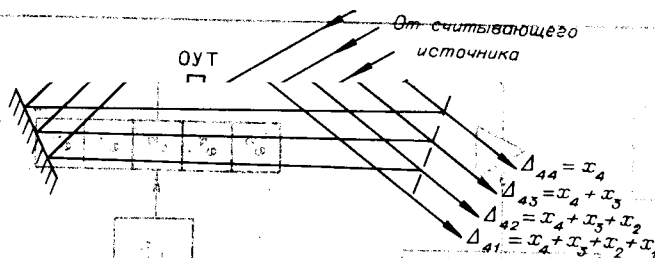


Рис. 3. Оптическая схема 4-разрядного пирамидального сумматора. Справа — его схемное обозначение.

который образует вектор-строку по формуле (11). Оператор  $\Delta$ , схема которого изображена на рис. 3, строится из позитивного ОУТ и зеркал, обеспечивающих обратную связь со сдвигом на один разряд вправо. Нетрудно видеть, что действие оператора  $\Delta$  сводится к повторению единицы во всех младших разрядах числа  $\Delta_k(x)$ , начиная с некоторого, являющегося старшим разрядом числа  $X$ , где встречается единица. Поскольку время распространения световой единицы по оптической цепи обратной связи по всем разрядам числа  $\Delta_k(x)$  существенно меньше времени срабатывания ОУТ, то указанная единица вырабатывается практически одновременно во всех разрядах, т. е. за один тактовый период.

Параллельный сумматор, полученный при объединении схем суммы и переносов, изображенных на рис. 1, 2, рассчитанный на минимум оборудования по суммарному числу ячеек транспарантов, вырабатывает сумму за шесть тактов: переносы — за четыре и сумму — за два. Приведенные схемы вычисления переносов и суммы дают возможность построить также сумматор с одновременными групповыми переносами. Например, сумматор с байтовыми группами и двухкаскадной схемой выработки переносов требует дополнительно двух тактов для вычисления суммы.

Дальнейшее сокращение времени вычисления может быть достигнуто, если не вычислять переносов в качестве промежуточного результата. В такой схеме суммирование проводится за три такта, что достигается путем почти двукратного увеличения количества транспарантов. Для получения схемы этого сумматора подставим (3) в выражение (1) и проведем необходимые преобразования с помощью (7).

В результате получим

$$S_k = S_k^{(1)} + S_k^{(2)} + S_k^{(3)} + S_k^{(4)}, \quad (12)$$

где

$$S_k^{(1)} = \overline{a_k b_k c_k} = \overline{a_k + \bar{b}_k + \bar{c}_{k-1} + \bar{a}_k + \bar{b}_k + \bar{t}_{k-1} + \bar{c}_{k-2} + \dots} \\ \dots + \overline{a_k + \bar{b}_k + \bar{t}_{k-1} + \dots + \bar{t}_2 + \bar{c}_1 + \bar{a}_k + \bar{b}_k + \bar{t}_{k-1} + \dots + \bar{t}_1 + \bar{c}_0}. \quad (13)$$

Остальные слагаемые суммы (12) выражаются аналогичным образом. Пользуясь определением вектора  $\Delta_k(x)$  (11), запишем их в виде:

$$S_k^{(1)} = \sum_{i=1}^k \overline{c_k + \Delta_{k-1,i}(\bar{t}) + \bar{c}_{i-1}}; \quad (14)$$

$$S_k^{(2)} = \sum_{i=1}^k t_k + \Delta_{k-1,i}(t) + c_{i-1}; \quad (15)$$

$$S_k^{(3)} = \sum_{i=1}^k g_k + \Delta_{k-1,i}(c) + t_{i-1}; \quad (16)$$

$$S_k^{(4)} = \sum_{i=1}^k h_k + \Delta_{k-1,i}(c) + t_{i-1}; \quad (17)$$

где

$$g_k = a_k + \bar{b}_k; \quad h_k = \bar{a}_k + b_k. \quad (18)$$

Схема трехтактного сумматора, реализующего выражения (14)–(17), приведена на рис. 4. На первом такте вырабатываются собственные переносы  $C$  и признаки отсутствия транзита  $\bar{T}$ . После операций  $M^n$ ,  $P_\Delta$ ,  $D_r^{-1}$  подготавливаются необходимые данные для пирамидальных сумматоров, производящих матрицы  $\Delta_{k,i}(\bar{t})$  и  $\Delta_{k,i}(c)$ . Тем временем на позитивных ОУТ с двухтактной задержкой образуются числа  $T$ ,  $C$ ,  $G$  и  $H$ , которые после умножения, транспонирования и проецирования дают требуемые слагаемые для получения сумм (13)–(17). На третьем такте происходит образование этих сумм в четырех негативных ОУТ, окончательное суммирование в соответствии с (11) осуществляется путем сборки по рядам без затрат вычислительного времени. Образованные столбцы чисел транспонируются в строки. Четвертый каскад в сумматоре служит для формирования, если необходимо, стандартного уровня сигналов  $S$ , а также для образования инверсного кода  $\bar{S}$ .

**Оценка производительности и затрат оборудования.** За счет применения волоконной оптики или голографической коммутации может быть достигнута почти двойная экономия ячеек транспарантов. Самая большая числовая ячейка в инверторах должна иметь  $(n+1)(n+2)/2$  ячеек, а в пирамидальных сумматорах —  $(n+1)/2$  ячеек. Общее количество ячеек ОУТ, необходимое для сложения пары  $n$ -разрядных чисел, равно  $3n^2 + 11n + 8$ , что для чисел среднего формата  $n=32$  составляет 3432. Для сравнения укажем, что электронный сумматор с трехступенчатой схемой одновременных групповых переносов производит сложение за 10 тактов и должен содержать около 400 транзисторных логических элементов типа И и ИЛИ. Таким образом, оптический сумматор работает втрое быстрее, но имеет на порядок больше логических элементов. Следует, однако, отметить, что сложность электронного сумматора гораздо выше, так как он должен содержать около 1000 индивидуальных входов к логическим элементам, в то время как

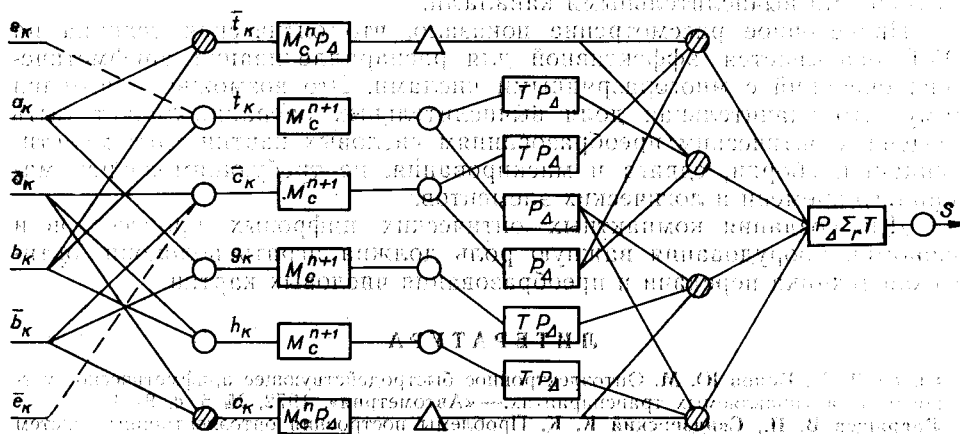


Рис. 4. Схема сверхпараллельного сумматора на оптически управляемых транспарантах.



Таблица 3

Функция	Число ОУТ	Тип ОУТ	Количество ячеек
$\bar{T}, C$	2	Нер.	$2mn$
$\bar{C}, T, G, H$	4	Поз.	$4mn$
$\Delta(\bar{t}), \Delta(c)$	2	Поз.	$1/2mn(n-1)$
$S^{(1)}, S^{(2)}, S^{(3)}, S^{(4)}$	4	Нер.	$1/2mn(n+1)$
$S$	1	Поз.	$m(n+1)$

оптический транспарант имеет однородную структуру и не более четырех входов по изображениям.

Благодаря тому, что суммирование может идти параллельно по множеству каналов, общая производительность оптического сумматора при полной загрузке существенно превосходит производительность электронного сумматора с тем же быстродействием.

Сумматор на  $m$  независимых суммирующих каналов может быть построен, например, на 10 транспарантах, типы и размеры которых сведены в табл. 3. Самый крупный транспарант такого сумматора на 256 каналов для 32-разрядных чисел должен иметь около  $1,5 \cdot 10^5$  ячеек и может быть набран из стандартных модулей, меньшего размера. При диаметре ячейки 300 мкм [4] линейный размер транспаранта составит около 10 см.

**Заключение.** Активные оптические управляемые транспаранты открывают возможность построения быстродействующих многоканальных сумматоров с высокой общей производительностью. Например, на ОУТ площадью порядка 100 см<sup>2</sup> может быть построен 256-канальный сумматор, который при тактовой частоте в 1 МГц производит около  $10^8$  операций сложения 32-разрядных двоичных чисел в секунду. Предложенный метод может использоваться для построения многоканального арифметического устройства с производительностью порядка  $10^8 \div 10^9$  опер./с, в котором возможна оптическая коммутация между различными вычислительными каналами.

Проведенное рассмотрение показало, что оптическая техника на ОУТ оказывается эффективной для распараллеливания арифметических операций с многоразрядными числами. Это возможно благодаря тому, что значительная доля вычислительных операций может быть сведена к оптическим преобразованиям числовых картин типа мультипликации, сборки, сдвига и маскирования, не требующим затрат машинного времени и логических элементов.

Для создания компактных оптических цифровых процессоров и экономии оборудования важную роль должна играть волоконно-оптическая техника передачи и преобразования числовых картин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов Л. А., Попов Ю. М. Оптоэлектронное быстродействующее арифметическое устройство на управляемых транспарантах.— «Автоматика», 1972, № 6, с. 8—13.
2. Лаврищев В. П., Свидзинский К. К. Проблемы построения оптоэлектронных систем обработки информации.— «Микроэлектроника», 1973, т. 2, № 1, с. 3—18.

3. Свидзинский К. К. Элементарная база когерентных оптических ЦВМ.— «Электрон. пром-сть», 1973, вып. 6 (20), с. 56—62.
4. Свидзинский К. К. Оптические логические устройства на активных управляемых транспарантах.— «Микроэлектроника», 1974, т. 3, № 3, с. 200—207.
5. Meitzler A. H., Maldonado J. R., Fraser D. B. Image storage and display devices using fine-grain ferroelectric ceramics.— «Bell Syst. Techn. J.», 1970, vol. 49, N 6, p. 953—967.
6. Salvo C. Solid-State light valve.— «IEEE Trans. on Electron Devices», 1971, vol. ED-18, N 9, p. 748—757.

*Поступила в редакцию 29 мая 1974 г.;  
окончательный вариант — 8 июля 1974 г.*

УДК 681.327.02 : 771.534.14

**Е. К. ШМАРЕВ**

(Киев)

### ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ СУММАТОР НА ФОТОПЛАСТИКЕ

При построении когерентных оптических систем распознавания и обработки изображений часто ставится задача их обучения и адаптации. В ряде случаев для этого необходимо осуществлять временное суммирование комплексных световых полей, соответствующих реализациям самих изображений, или же некоторых передаточных функций. При этом использование обычных фотографических материалов наталкивается на существенные трудности. Во-первых, при увеличении числа суммируемых происходит переполнение регистрирующей среды по постоянной составляющей, что сопряжено с уменьшением дифракционной эффективности и отношения сигнал/шум. Во-вторых, возможно получение лишь конечного результата суммирования, так как проявление осуществляется один раз, в то время как для реализации алгоритмов Видуру—Хоффа, стохастической аппроксимации, калмановской фильтрации и других необходимо использование голографического транспаранта в оптическом корреляторе после выполнения суммирования каждого последующего слагаемого.

Рассмотрим возможность реализации свободного от перечисленных недостатков голографического сумматора на основе фотопластических сред. За основу примем схему оптического коррелятора Ван дер Люгта с фотопластическим элементом в частотной плоскости, описанную в работе [1]. Предположим, что на фотопластике голографически записана комплексная функция  $H_1(\xi, \eta)$  и его комплексное пропускание

$$\tau(\xi, \eta) = 1 + jmH_1(\xi, \eta) \exp[-j\omega\xi] + jmH_1^*(\xi, \eta) \exp[j\omega\xi]. \quad (1)$$

Задача состоит в том, чтобы осуществить повторную запись новой функции  $H_2(\xi, \eta)$  без стирания первичного изображения. Если провести повторную равномерную зарядку фотопластического носителя и проэкспонировать его интенсивностью света

$$I(\xi, \eta) = |H_2(\xi, \eta)|^2 + 1 + H_2(\xi, \eta) \exp[-j\omega\xi] + H_2^*(\xi, \eta) \exp[j\omega\xi], \quad (2)$$

то зарядное изображение на фотопластике в пределах небольшой зарядной модуляции

$$\sigma(\xi, \eta) = \sigma_0 + \sigma_{\sim}(It_0), \quad (3)$$

где  $t_0$ — время экспозиции,  $\sigma_0$  и  $\sigma_{\sim}$ — соответственно постоянная и переменная составляющие плотности заряда. Переменная составляющая  $\sigma_{\sim}$