

3. Jordan J. A. et al. Kinoform Lenses.— Appl. Opt., 1970, vol. 9, N 8, p. 1883.
4. Auria L. et al. Photolithographic Fabrication of Thin Film Lenses.— Opt. Comm., 1972, vol. 5, N 4, p. 232.
5. Слюсарев Г. Г. Оптические системы с фазовыми слоями.— ДАН, 1957, т. 113, № 4, с. 730.
6. Тудоровский А. И. Объектив с фазовой пластинкой.— Опт. и спектр., 1959, т. VI, вып. 2, с. 198.
7. Кирьянов В. П. и др. Киноформы. Оптическая система для синтеза элементов.— Препринт № 99. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
8. Кокоулин Ф. И., Полещук А. Г. Исполнительные элементы автоматической фокусировки.— ОМП, 1979, № 8, с. 21.
9. Лазерные интерферометры: Сб. науч. статей. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1978.
10. Полещук А. Г., Химич А. К. Устройство для линейного управления и стабилизации мощности излучения лазера акустооптическим модулятором.— ОМП, 1980, № 9, с. 36.
11. Наоки А., Хироси Х., Новоу К. Тонкие пленки халькогенидного стекла. Заявл. 11.04.70, № 45-31139, опубли. 13.12.76. Кл. 99(5)С3 (НО1 21/02). Япония. Пат. 51-47027.
12. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Дифракционные оптические элементы, изготовленные методами фотолитографии.— В кн.: Применение лазеров в системах преобразования, передачи и обработки информации. Л.: изд. ЛДНТП, с. 73.

Поступила в редакцию 17 сентября 1980 г.

УДК 681.325.2+681.327.68 : 778.38

П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ

(Новосибирск)

МАТРИЧНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОЦЕССОР

Задача настоящей статьи — конкретизировать структуру, набор операций и возможности специализированного оптико-электронного процессора, предложенного в [1] для многоканальной параллельной обработки больших массивов данных. Устройство ориентировано на выполнение групповых операций матричной алгебры (содержание операций уточняется ниже) и согласно [2] получило название матричного оптико-электронного процессора (МОЭП). Поставленную задачу будем решать при условии, что данные, подлежащие обработке, имеют двоичную форму представления и поступают на вход процессора в страничном формате.

Блок-схема МОЭП, состоящего из матричного оптического преобразователя (МОП) и фоточувствительного параллельного страничного процессора (ПСП), приведена на рис. 1. С помощью параллельных каналов 1 и 2 оптическое изображение страницы данных, восстанавливаемой из голографического ЗУ (ГЗУ), передается в МОП, а затем (в преобразованном виде) в ПСП. В свою очередь, данные, определяющие оператор преобразования, поступают из устройства управления (УУ) по электронным параллельно-последовательным каналам 3 и 4. Результаты параллельной обработки формируются в ПСП и по электронному параллельно-последовательному каналу 5 поступают в УУ.

I. МОП. Согласно [1] МОП, входящий в состав МОЭП, реализует операцию аналогового умножения трех матриц. Для приме-

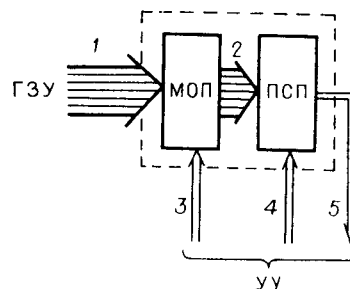
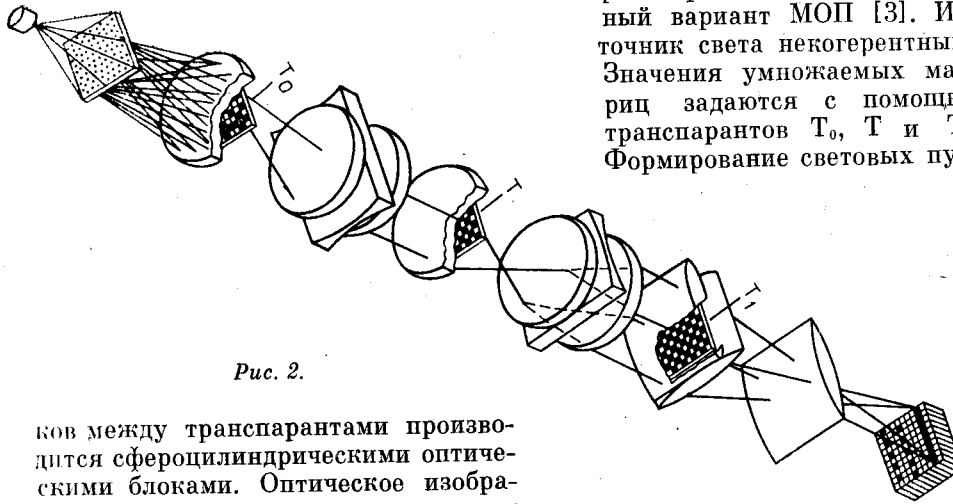


Рис. 1.



ра на рис. 2 показан известный вариант МОП [3]. Источник света некогерентный. Значения умножаемых матриц задаются с помощью транспарантов T_0 , T и T_1 . Формирование световых пуч-

Рис. 2.

ков между транспарантами производится сфероцилиндрическими оптическими блоками. Оптическое изображение, соответствующее результату вычислений, воспроизводится на входе многоканального фотоприемника. По-видимому, возможны другие реализации таких преобразователей.

Однако при анализе основных видов преобразований в МОП удобно отвлечься от способа физико-технической реализации такого устройства и пользоваться его формализованной моделью. В модели, как показано на рис. 3, определены:

1. Характерные плоскости МОП: P_0 , P и P_1 , где размещены транспаранты T_0 , T и T_1 ; P_2 , где установлен ПСП. Плоскость P_0 освещена коллимированной некогерентной волной света.

2. Законы пропускания транспарантов T_0 , T и T_1 по интенсивности: $\tau(x_0, y_0)$, $k(x, y)$ и $h(x_1, y_1)$, где $x_0 = p\Delta x_0$, $y_0 = a\Delta y_0$; $x = p\Delta x$, $y = t\Delta y$; $x_1 = d\Delta x_1$, $y_1 = t\Delta y_1$; $p = 0, \pm 1, \dots, \pm P/2$; $a = 0, \pm 1, \dots, \pm A/2$; $t = 0, \pm 1, \dots, \pm T/2$; $d = 0, \pm 1, \dots, \pm D/2$.

Предполагается, что $\Delta x_0 = \Delta x = \Delta x_1 = \Delta x_2$, $\Delta y_0 = \Delta y = \Delta y_1 = \Delta y_2$ и размер рабочего поля на транспарантах равен $\Delta X \Delta Y$.

3. Законы линейных интегральных преобразований световой волны между плоскостями модели с ядрами:

$$\mathcal{L}_1 = \delta(x + x_0) \delta(y/M - a\Delta y_0 + y_0),$$

$$\mathcal{L}_2 = \delta(x_1/M + p\Delta x + x) \delta(y_1 + y),$$

$$\mathcal{L}_3 = \delta(x_2 + x_1) \delta(y_2 - a\Delta y_2 + t\Delta y_1 - y_1),$$

где $\delta(\cdot)$ — дельта-функция Дирака, а M — коэффициент увеличения оптического блока между характерными плоскостями МОП.

Далее условимся, что T_1 , являясь оптически управляемым, связан оптическим параллельным каналом с голографическим ЗУ, а T_0 и T , являясь электрически управляемыми, — параллельно-последовательным каналом с УУ. Тогда функция h будет характеризовать содержание страниц данных, поступившей из голографического ЗУ, а функции τ и k — содержание страниц, определяющих характер матричного преобразования.

Пусть столбцы страниц k и h соответствуют отдельным двоичным словам, разряды которых размещены линейно вдоль осей y и y_1 . Тогда количество слов в странице k равно $P + 1$, а в странице h — $(D + 1)$. Каждое слово содержит $T + 1$ разрядов.

В странице τ в отличие от страниц k и h номера элементов $p = 0, \pm 1, \dots, \pm P/2$ произвольной строки однозначно соответствуют адресам слов в k и h , а номера строк $a = 0, \pm 1, \dots, \pm A/2$ — адресам параллельных каналов обработки данных в МОП. Количество каналов $A + 1$. адре-

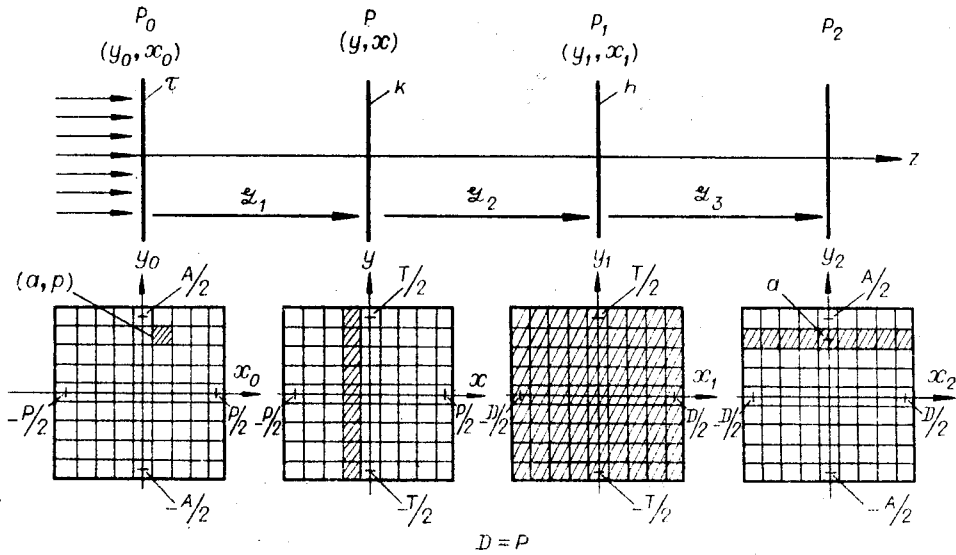


Рис. 3.

сания к слову p в канале a осуществляется путем перевода элемента (a, p) на transparente T_0 из состояния «непрозрачен» («0») в состояние «прозрачен» («1»).

Плоскость P_2 модели имеет структуру, подобную структуре страницы t . Каналу a в плоскости P_2 соответствует строка с номером a . Выходное слово, содержащее $D+1$ отсчетов (разрядов), представляет собой модулированную по интенсивности «полосу» света. При работе модели по всем $A+1$ каналам в ее выходной плоскости воспроизводится оптическое изображение страницы размером $(A+1)(D+1)$.

Пусть с помощью T_0 сформировано воздействие вида

$$\text{rect} \left[\frac{x_0 - p\Delta x_0}{\Delta x_0} \right] \text{rect} \left[\frac{y_0 - a\Delta y_0}{\Delta y_0} \right],$$

где функция

$$\text{rect} [\xi] = \begin{cases} 1, & \text{если } |\xi| \leq 1/2; \\ 0, & \text{если } |\xi| > 1/2. \end{cases}$$

Тогда в плоскости P модели появится воздействие

$$\int_{-\Delta X/2}^{\Delta X/2} \int_{-\Delta Y/2}^{\Delta Y/2} \text{rect} \left[\frac{x_0 - p\Delta x_0}{\Delta x_0} \right] \text{rect} \left[\frac{y_0 - a\Delta y_0}{\Delta y_0} \right] \delta(x + x_0) \delta(y/M - a\Delta y_0 + y_0) \times \\ \times dx_0 dy_0 = \text{rect} \left[\frac{-x - p\Delta x}{\Delta x} \right] \text{rect} \left[-\frac{y}{\Delta Y} \right], \quad (1)$$

соответствующее «полосе» света размером $\Delta x \Delta Y$. В результате прохождения воздействия (1) через transparent T произойдет считывание слова p и на его выходе получим модулированную волну

$$k(p\Delta x, y) \text{rect} \left[\frac{-x - p\Delta x}{\Delta x} \right] \text{rect} \left[-\frac{y}{\Delta Y} \right]. \quad (2)$$

Между плоскостями P и P_1 волна (2) проецируется по оси y и расширяется по оси x до размера следующего transparenta. Это вытекает

из преобразования

$$\int_{-\Delta X/2}^{\Delta X/2} \int_{-\Delta Y/2}^{\Delta Y/2} k(p\Delta x, y) \operatorname{rect}\left[\frac{-x-p\Delta x}{\Delta x}\right] \operatorname{rect}\left[-\frac{y}{\Delta Y}\right] \delta(y_1 + y) \times \\ \times \delta(x_1/M + p\Delta x + x) dx dy = k(p\Delta x, -y_1) \operatorname{rect}\left[\frac{x_1}{\Delta X}\right] \operatorname{rect}\left[\frac{y_1}{\Delta Y}\right]. \quad (3)$$

Все элементы транспаранта T_1 оказываются освещенными изображением (3). Поэтому на выходе T_1 получим волну

$$h(x_1, y_1) k(p\Delta x, -y_1) \operatorname{rect}\left[\frac{x_1}{\Delta X}\right] \operatorname{rect}\left[\frac{y_1}{\Delta Y}\right] = \sum_{t=-T/2}^{T/2} h(x_1, t\Delta y_1) k(p\Delta x, -t\Delta y_1) \times \\ \times \operatorname{rect}\left[\frac{y_1 - t\Delta y_1}{\Delta y_1}\right] \operatorname{rect}\left[\frac{x_1}{\Delta X}\right]. \quad (4)$$

Дальнейшее преобразование волны (4) проводится с ядром \mathcal{L}_3 , в силу чего эта волна передается без изменения по оси x_1 и интегрируется по оси y_1 . Результат интегрирования восстанавливается на строке a плоскости P_2 . Это следует из преобразования

$$\sum_{t=-T/2}^{T/2} \int_{-\Delta X/2}^{\Delta X/2} \int_{-\Delta Y/2}^{\Delta Y/2} h(x_1, t\Delta y_1) k(p\Delta x, -t\Delta y_1) \operatorname{rect}\left[\frac{y_1 - t\Delta y_1}{\Delta y_1}\right] \operatorname{rect}\left[\frac{x_1}{\Delta X}\right] \delta(x_2 + x_1) \times \\ \times \delta(y_2 - a\Delta y_2 + t\Delta y_1 - y_1) dx_1 dy_1 = \left(\sum_{t=-T/2}^{T/2} h(-x_2, t\Delta y_1) k(p\Delta x, -t\Delta y_1) \times \right. \\ \left. \times \operatorname{rect}\left[-\frac{x_2}{\Delta X}\right] \right) \operatorname{rect}\left[\frac{y_2 - a\Delta y_2}{\Delta y_2}\right] = \left(\sum_{d=-D/2}^{D/2} s_{p,-d} \operatorname{rect}\left[\frac{-x_2 - d\Delta x_2}{\Delta x_2}\right] \right) \times \\ \times \operatorname{rect}\left[\frac{y_2 - a\Delta y_2}{\Delta y_2}\right], \quad (5)$$

где $s_{p,-d} = \sum_{t=-T/2}^{T/2} h(-d\Delta x_2, t\Delta y_1) k(p\Delta x, -t\Delta y_1)$ — результат скалярного логического умножения слова d (строка h) на слово p (строка k), пропорциональный количеству совпавших разрядов в словах d и p . Если одно из этих слов задано в обратном двоичном коде, то $s_{p,-d}$ будет пропорционально количеству несовпавших разрядов. В свою очередь, выражение (5) описывает распределение по строке a результатов логических произведений слова p строки k на все слова строки h .

Для наглядности на рис. 4, a показан характер преобразования световых пучков между плоскостями модели. Расширение пучка по оси y , осуществляемое между T_0 и T , соответствует преобразованию (1); дальнейшее расширение световой «полосы» размером ΔY вдоль оси x_1 , наблюдаемое между T и T_1 , — преобразованию (3); интегрирование изображения размером $\Delta X \Delta Y$ по переменной y_1 , выполняемое между T_1 и P_2 , — преобразованию (5)*. При этом координата строки плоскости P_2 , где размещены результаты $s_{p,-d}$, соответствует номеру работающего канала a .

Изменение на T_0 адреса слова с p на $p+i$, $i=1, 2, \dots, (|p+i| \leq \leq P/2)$ с сохранением номера канала приведет к тому, что на рассматриваемой строке плоскости P_2 восстановятся результаты логического умножения слова $p+i$ строки k на все слова строки h .

* Для простоты на рис. 4, a (и далее) проецируемое по осям x_1, x_2 изображение показано без инверсии знака.

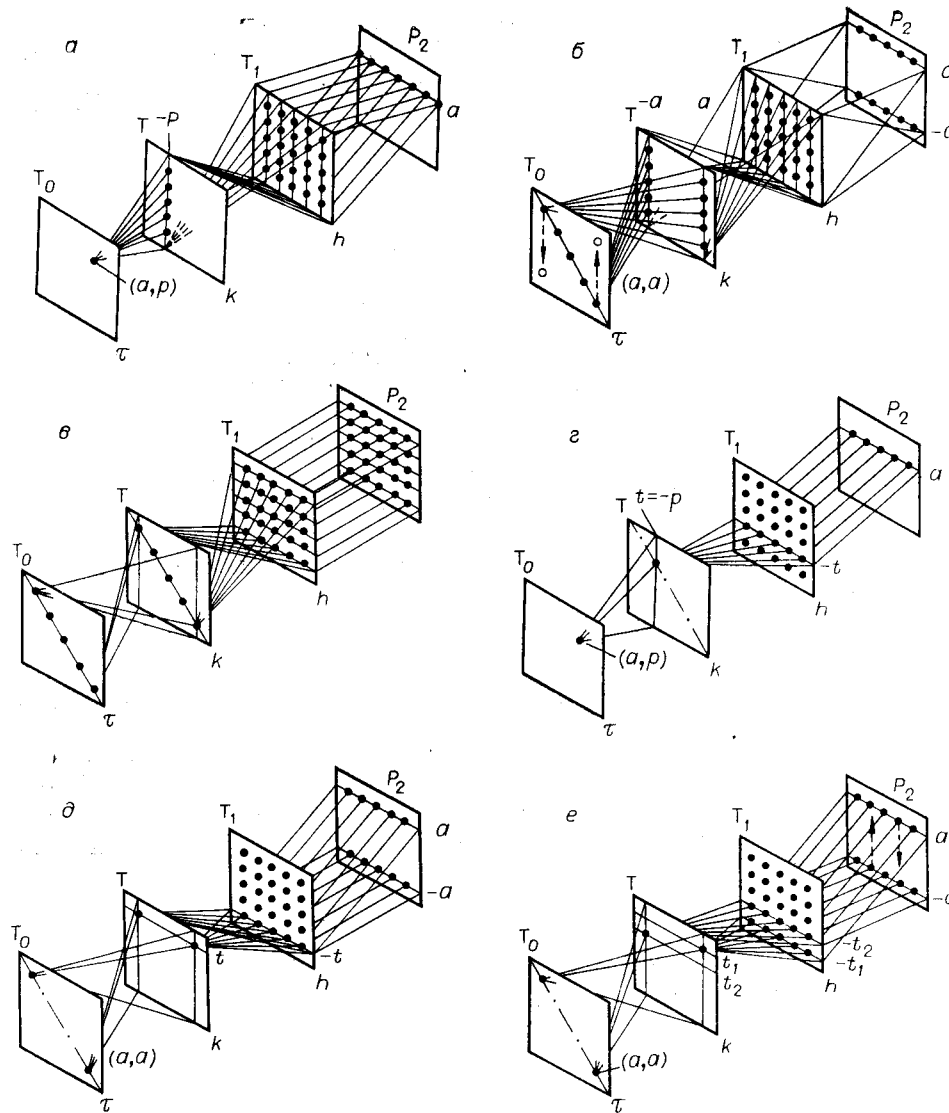


Рис. 4.

Работа модели по остальным каналам аналогична описанной: логические произведения $s_{p,-d}$, вычисляемые в этих каналах, восстанавливаются на своих строках плоскости P_2 так, что результаты преобразований по всем $A + 1$ каналам не перекрываются.

Рассмотрим несколько практически важных случаев преобразования страницы h .

П1. Все элементы T_0 с координатами (a, a) переведем в состояние «1». Тогда в плоскости P_2 модели восстановится $A + 1$ модулированных по амплитуде световых «полос» вида (5), образующих в совокупности изображение

$$\sum_{a=-A/2}^{A/2} \left(\sum_{d=-D/2}^{D/2} s_{a,-d} \operatorname{rect} \left[\frac{-x_2 - d\Delta x_2}{\Delta x_2} \right] \right) \operatorname{rect} \left[\frac{y_2 - a\Delta y_2}{\Delta y_2} \right], \quad (6)$$

где

$$s_{a,-d} = \sum_{t=-T/2}^{T/2} h(-d\Delta x_2, t\Delta y_1) k(a\Delta x, -t\Delta y_1) \quad (7)$$

— результат логического умножения слова a (страница k) на слово d (страница h), размещенный на элементе $(a, -d)$ плоскости P_2 . На других элементах этой же строки размещаются результаты логического умножения слова a (страница k) на все остальные слова страницы h . Изменение номера слова, считываемого со страницы k , влечет за собой смену адреса строки плоскости P_2 . Этот вид преобразований иллюстрируется рис. 4, б, где для простоты показано прохождение световых пучков от двух диагональных элементов.

Преобразование П1 эквивалентно нахождению логического произведения матриц

$$U = BC. \quad (8)$$

Здесь B и C — исходные матрицы с двоичными элементами $b_{\eta\epsilon}$ и $c_{\epsilon\xi}$ соответственно. Для реализации этого преобразования в МОП необходимо провести следующие действия.

Из матрицы B получим транспонированную матрицу B^T с элементами $b_{\epsilon\eta}^T = b_{\eta\epsilon}$. Элементы матрицы B^T разместим на странице k так, чтобы

$$k(a\Delta x, t\Delta y) = b_{\epsilon\eta}^T = b_{-t,a}^T. \quad (9)$$

Такое размещение легко выполнить, если матрицу B^T повернуть на 180° вокруг горизонтальной оси и спроецировать на k .

В свою очередь, разместим матрицу C на странице h так, чтобы

$$h(d\Delta x_1, t\Delta y_1) = c_{\epsilon\xi} = c_{t,-d}. \quad (10)$$

Для этого матрицу C необходимо повернуть на 180° вокруг вертикальной оси и спроецировать на h .

В процессе вычислений, как следует из (7), страницы (9) и (10) преобразуются к виду $k(a\Delta x, -t\Delta y)$ и $h(-d\Delta x_2, t\Delta y_1)$, что эквивалентно их повороту на 180° соответственно вокруг осей x и y . Тем самым повороты матриц B^T и C , выполненные ранее при записи данных, компенсируются. Получаем, что

$$\begin{aligned} k(a\Delta x, -t\Delta y) &= b_{t,a}^T = b_{\eta\epsilon}, \\ h(-d\Delta x_2, t\Delta y_1) &= c_{t,d} = c_{\epsilon\xi}. \end{aligned}$$

В результате из (7) будем иметь

$$s_{a,-d} = \sum_{t=-T/2}^{T/2} b_{t,a}^T c_{t,d} = u_{\eta\xi}.$$

П2. Все диагональные элементы T_0 и T_1 переведем в состояние «1», остальные элементы оставим в состоянии «0».

В этом случае изображение (6) преобразуется к виду

$$\sum_{a=-A/2}^{A/2} \sum_{d=-D/2}^{D/2} h(-d\Delta x_2, a\Delta y_1) \text{rect} \left[\frac{-x_2 - d\Delta x_2}{\Delta x_2} \right] \text{rect} \left[\frac{y_2 - a\Delta y_2}{\Delta y_2} \right], \quad (11)$$

поскольку при $t = a$ $k(a\Delta x, -a\Delta y) = 1$ и, следовательно, $s_{a,-d} = h(-d\Delta x_2, a\Delta y_1)$.

Характер преобразования световых пучков, соответствующих рассматриваемому случаю, показан на рис. 4, в.

Из (11) следует, что при переводе всех диагональных элементов на T_0 и T_1 в состояние «1» страница h передается в плоскость P_2 без изменения.

П3. В плоскость P_2 модели МОП можно передать не только содержимое страницы h , но и произвольные одноименные (по весу) разряды слов страницы h . Этот случай иллюстрируется рис. 4, г. Перевод элемента (a, p) на T_0 и всех элементов (t, t) на T в состояние «1» приводит

к тому, что на строке a плоскости P_2 восстановятся одноименные отсчеты страницы h с номером $t = -p$. Выдача одноименных разрядов (т. е. строк) страницы h достигается путем последовательного переключения элементов T_0 , находящихся на строке с номером a . Смена номера канала приводит к смене номера строки в плоскости P_2 .

П4. Все диагональные элементы на T_0 и все элементы t -й строки на T переведены в состояние «1». Тогда согласно (7) на выходе модели восстановится изображение

$$\sum_{a=-A/2}^{A/2} \sum_{d=-D/2}^{D/2} h(-d\Delta x_2, t\Delta y_1) \operatorname{rect} \left[\frac{-x_2 - d\Delta x_2}{\Delta x_2} \right] \operatorname{rect} \left[\frac{y_2 - a\Delta y_2}{\Delta y_2} \right],$$

представляющее собой мультиплицированную $A + 1$ раз t -ю строку страницы h . Это следует из того, что при принятых условиях $s_{p,-d} = s_{a,-d} = h(-d\Delta x_2, t\Delta y_1)$. Принцип выполнения данного вида преобразования показан на рис. 4, δ .

Изменение на T номера включенной строки с t на t_1 приведет к тому, что в плоскости P_2 модели восстановится мультиплицированное изображение t_1 -й строки страницы h . Подобным образом может быть мультиплицирована любая другая ее строка.

Если один из включенных элементов t -й строки транспаранта T , например элемент (t, d) , перевести в состояние «0», то соответствующее ему изображение t -й строки страницы h в плоскости P_2 будет отсутствовать. Это означает, что закон размещения включенных и невключенных элементов на любой из строк T определяет закон размещения мультиплицированных строк страницы h в плоскости P_2 модели.

П5. Элементы (a_1, a_1) , (a_2, a_2) на T_0 и (t_1, d_1) , (t_2, d_2) на T , где $d_1 = -a_1$, а $d_2 = -a_2$, переведены в состояние «прозрачен». Тогда исходя из схемы, показанной на рис. 4, e , нетрудно понять, что на строках a_1 и a_2 плоскости P_2 восстановятся соответственно t_1 -я и t_2 -я строки страницы h . Положение этих строк может быть изменено, например, на противоположное, если на T , вместо элементов $(t_1, -a_1)$, $(t_2, -a_2)$, включить элементы $(t_1, -a_2)$, $(t_2, -a_1)$. Аналогичным образом достигается перестройка произвольного (из $T + 1$) числа строк страницы h . Положение строк в плоскости P_2 модели определяется номером соответствующего ей диагонального элемента на T_0 .

П6. Элементы (a_1, p_1) , (a_2, p_2) на T_0 переведены в состояние «1». В этом случае, как следует из преобразования П1, на строках a_1 и a_2 плоскости P_2 модели восстановятся соответственно результаты логического произведения слов $d_1 = -p_1$ и $d_2 = -p_2$ (страница k) на слова страницы h . Если теперь на T_0 в состояние «1» перевести элементы (a_1, p_2) и (a_2, p_1) , то результаты логического умножения слова $d_1 = -p_2$ (страница k) на слова страницы h восстановятся на строке a_1 выходной плоскости, а результаты логического умножения слова $d_2 = -p_1$ на слова страницы h — на строке a_2 этой плоскости. Положение результатов логического умножения в плоскости P_2 изменится на обратное. Отсюда следует, что одновременно с реализацией логического умножения матриц (8) МОП предоставляет возможность произвольным образом перестроить строки результирующей матрицы U и выдать их на свой выход. Это достигается путем соответствующей переконмутации элементов T_0 .

Таким образом, в зависимости от состояния транспарантов T_0 и T_1 МОП позволяет:

а) находить скалярное логическое произведение матриц, при этом страница h является матрицей-множимым, а страница k — матрицей-множителем (П1);

б) передать содержимое страницы h в выходную плоскость без изменения (П2);

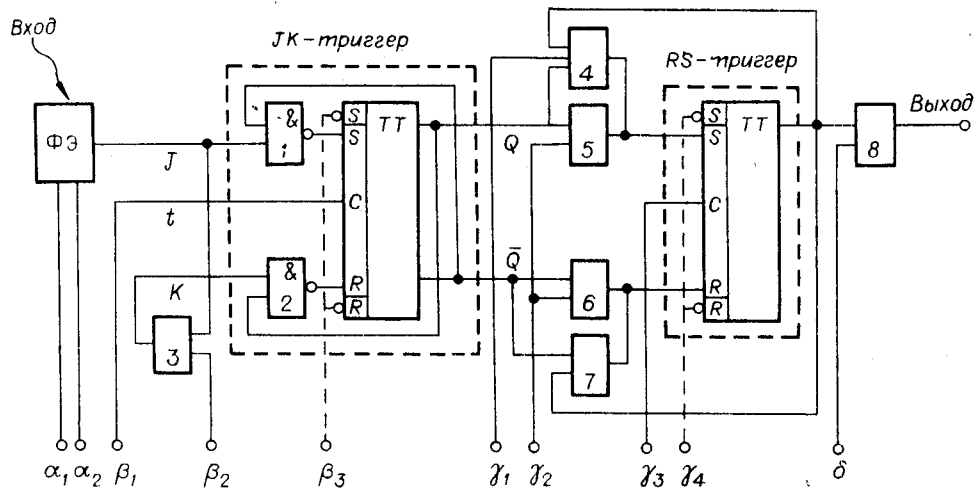


Рис. 5.

в) выделить произвольную строку (одноименные разряды слов) строки h и передать ее по любому из параллельных выходных каналов (ПЗ);

г) размножить (мультиплицировать) любую строку строки h по произвольному закону (П4);

д) перестроить строки строки h по произвольному закону (П5);

е) перестроить произвольным образом строки матрицы U , являющейся результатом матричного умножения вида (8) (П6).

II. ПСП. Из [1] следует, что ПСП, представляющее собой однородную микроэлектронную структуру, должно выполнять следующие функции: преобразование в общем случае полутонного оптического изображения строки, поступающей с выхода МОП, в двухградационное электрическое; хранение двоичных страниц на промежуточных этапах обработки; выполнение над одноименными элементами хранимых и вновь поступающих страниц логических операций, таких, например, как сложение, умножение и сложение по модулю 2; выдачу данных в УУ.

На рис. 5 приведена функциональная схема одной ячейки ПСП с требуемыми преобразованиями. Ячейка состоит из фотоприемного элемента (ФЭ) и двух одноразрядных регистров памяти (JK - и RS -триггеры) с входными элементами логики. Номерами 1, 2 обозначены логические элементы И — НЕ, номерами 4—8 — элементы И. На рис. 5 показаны также оптический вход и электронный выход ячейки. Кроме того, ячейка имеет управляющие входы α , β , γ и δ , по которым поступают сигналы: α_1 — стирание оптической записи в ФЭ, α_2 — запись содержимого ФЭ в JK -триггер, β_1 — синхронизация работы JK -триггера, β_2 — перестройка JK -триггера в T -триггер, β_3 — стирание записи в JK -триггере (сброс в «0»), γ_1 — разрешение на выполнение операции логического умножения, γ_2 — запись содержимого JK -триггера в RS -триггер, γ_3 — синхронизация работы RS -триггера, γ_4 — стирание записи в RS -триггере (сброс в «0»), δ — выдача содержимого RS -триггера в УУ. Каждой из выполняемых ячейкой операций соответствует свое состояние управляющих входов.

Порог детектирования оптического изображения строки обеспечивается за счет выбора режима работы фотоприемных элементов ячеек ПСП [4].

Возможность выполнения в ячейке логической операции сложения следует непосредственно из таблицы переходов JK -триггера [5]. Пусть в результате ввода в ПСП предыдущей строки JK -триггер ячейки на-

ходится в состоянии $Q(t-1) = 0$ или 1. Тогда при вводе в ПСП на t -м такте времени очередной страницы возможны два случая:

на вход JK -триггера из ФЭ поступает «0» ($J = 0, K = 0$); состояние триггера не меняется: $Q(t) = Q(t-1)$;

на вход JK -триггера из ФЭ поступает «1» ($J = 1, K = 0$); независимо от предыдущего состояния $Q(t) = 1$.

Тем самым выполняются все правила логического сложения ($0 + 0 = 0, 0 + 1 = 1, 1 + 0 = 1, 1 + 1 = 1$).

Сложение по модулю 2 выполняется ячейкой путем перевода JK -триггера в режим счета. С этой целью на вход шины β_2 подается единичный сигнал. Тогда на входах триггера могут воспроизводиться две комбинации: 11, если с выхода ФЭ поступает «1», и 00, если поступает «0». В первом случае предыдущее состояние триггера («0» или «1») меняется на обратное, т. е. $Q(t) = \bar{Q}(t-1)$; во втором — не меняется, т. е. $Q(t) = Q(t-1)$. Поэтому обработка двоичной последовательности, поступающей на вход триггера, проводится по правилам сложения по модулю 2 ($0 + 0 = 0, 0 + 1 = 1, 1 + 0 = 1, 1 + 1 = 0$).

Логическое умножение в ячейке осуществляется с помощью RS -триггера и логических элементов 4, 7 при условии, что $\gamma_1 = 1$. В этом случае передачи сигналов через элементы 5, 6 не происходит.

Пусть состояние RS -триггера на $(t-1)$ -м такте равно 1. Тогда если $Q(t) = 1$, то на t -м такте состояние входов RS -триггера будет $S = 1, R = 0$; если $Q(t) = 0$, то $S = 0, R = 1$. В первом случае RS -триггер подтвердит свое состояние, равное 1, во втором — перейдет в состояние «0». Пусть теперь состояние RS -триггера на $(t-1)$ -м такте равно 0. Тогда при любом из выходов JK -триггера $Q(t) = 1$ или 0 состояние входов RS -триггера будет $S = 0, R = 0$. Триггер своего состояния не изменит. Получаем, что обработка содержимого JK - и RS -триггеров происходит в соответствии с правилами логического умножения ($0 \times 0 = 0, 0 \times 1 = 0, 1 \times 0 = 0, 1 \times 1 = 1$).

Считывание содержимого RS -триггера при реализации ячейкой любых операций осуществляется путем подачи на управляющий вход δ единичного сигнала.

В ПСП, объединяющем работу матрицы из $(A+1)(D+1)$ ячеек, входы α, β, γ являются общими, вход δ подключен к адресной шине, а выход ячейки — к информационной. Адресная шина является общей для строки ячеек, информационная — для столбца ячеек. Количество адресных и информационных шин равно соответственно количеству строк и столбцов в матрице ячеек ПСП.

Сложность ячейки — 26 логических элементов и один фотоприемный элемент. При изготовлении ПСП методами МОП-технологии общее количество МОП-транзисторов в ячейке $\sim 80-90$. Для размещения такого количества МОП-транзисторов (при плотности упаковки 10^3 эл./мм²) необходима площадь 0,09 мм². Реализуемый по МОП-технологии фотодиод с чувствительностью $10^{-11}-10^{-12}$ Дж/бит имеет площадь около 0,1 мм². Следовательно, площадь, занимаемая каждой из ячеек ПСП, будет составлять $\sim 0,19$ мм² ($0,44 \times 0,44$). Поэтому ПСП с $32 \times 32, 64 \times 64, 128 \times 128$ ячейками могут быть созданы методами гибридной МОП-технологии.

III. МОЭП. Обработка данных в МОЭП осуществляется с помощью МОП и ПСП, работающих совместно. В этом случае МОП специализирован на выполнении интегральных преобразований типа П1 — П6, а ПСП — поэлементных логических операций сложения, умножения и сложения по модулю 2. Работа МОП оценивается количеством выполненных операций скалярного логического умножения, а работа ПСП — количеством элементарных логических операций. Если операции проводятся над двоичными словами размером n , то в течение рабочего такта времени T_n

МОЭП может выполнять $2n^2$ операций скалярного умножения и n логических операций. Пусть, к примеру, $T_n = 25$ мкс, а $n = 100$. Тогда обработка одной страницы данных будет проводиться со скоростью $\sim 8 \cdot 10^8$ опер/с.

Содержимое памяти голографического ЗУ обрабатывается путем последовательной выборки страниц данных и выдачи этих страниц в МОЭП через промежуток времени T_c , равный системному такту. Задержка T_c больше T_n , поскольку она, помимо временного такта работы процессора, включает времена выборки данных из голографического ЗУ и ввода данных по оптическому входу МОП. Если $T_c = 4T_n$, то при ранее указанных значениях T_n и n обработка содержимого памяти голографического ЗУ будет проводиться со скоростью $2 \cdot 10^8$ опер/с (или $2 \cdot 10^{10}$ бит/с).

Благодаря возможности перестройки оператора преобразования матричный оптико-электронный процессор является гибким и многофункциональным устройством параллельной обработки данных. Этот факт следует, в частности, из разделов I и II статьи, где акцентировалось внимание на возможности выполнения как в МОП, так и в ПСП ряда практически важных операций.

В заключение отметим, что МОЭП, помимо уже указанных преобразований, позволяет считывать данные страниц, поступающих из голографического ЗУ, и передавать их в УУ. Это достигается за счет того, что: а) МОП реализует преобразование П2, в результате которого страница h с фоточувствительного входа МОП передается без изменения на его выход; б) ПСП позволяет передать страницу h со своего фоточувствительного входа вначале на первый, а затем на второй регистры памяти без обработки. Такая операция необходима, например, для работы системы [4] в частном режиме выдачи данных из голографического ЗУ.

ВЫВОДЫ

1. МОЭП является гибким, многофункциональным и высокопроизводительным устройством параллельной логической обработки больших массивов данных. Это достигнуто благодаря использованию двух «мощных» программно перестраиваемых параллельных аппаратных средств: матричного оптического преобразователя (предпроцессора) и фоточувствительного параллельного страничного процессора.

2. МОЭП сочетает в себе возможности специализированного устройства логической обработки данных и параллельного коммутатора данных.

3. МОЭП имеет параллельный оптический и параллельно-последовательный электронный входы и параллельно-последовательный электронный выход. Это позволяет организовать его работу с однонаправленными страничными голографическими ЗУ, с одной стороны, и с цифровыми электронными системами управления — с другой.

Автор выражает благодарность Б. Г. Матиенко за замечания, сделанные им при чтении рукописи статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Твердохлеб П. Е. Организация системы для многоканальной параллельной обработки массивов данных. — Автометрия, 1981, № 1.
2. Стрелчан Д. Матричный процессор, работающий в реальном времени. — Электроника, 1979, т. 52, № 17.
3. Кривенков Б. Е. и др. Некогерентная оптическая система для выполнения матричных преобразований. — Автометрия, 1975, № 3.
4. Матиенко Б. Г., Нестерихин Ю. Е. Многоэлементные фотоприемные матрицы для голограммных запоминающих и вычислительных устройств. — Автометрия, 1979, № 3.
5. Каган Б. М., Каневский М. М. Цифровые вычислительные машины и системы. М.: Энергия, 1973.

Поступила в редакцию 13 января 1981 г.