

УДК 621.382

В. М. Егоров

(Новосибирск)

ТРЕХМЕРНЫЕ НЕЙРОПОДОБНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ

Рассматриваются некоторые варианты параллельных оптических связей между простейшими двухслойными нейроподобными однородными вычислительными структурами, базирующимися на паре модулятор света — фотоприемник. Приводятся блок-схемы и функциональные схемы структур и примеры параллельных вычислений, в том числе с одновременным хранением результата и начальной информации.

Поиск альтернативных путей повышения производительности существующих вычислительных устройств и создающихся машин шестого поколения, успехи в оптической технологии и в разработке новых параллельных алгоритмов стимулировали в последние годы новое интенсивное развитие моделей нейронных вычислений (см., например, [1]).

В то же время существующая в современной микроэлектронной технологии проблема соединений станет главной при создании нейровычислительных структур, поскольку число межэлементных соединений в них лавинообразно возрастает при стремлении к идеалу — связям «каждый с каждым». Очевидно, что эффективная реализация нейроструктур возможна только при оптимальном использовании электрических и оптических связей между нейронами в трехмерной вычислительной среде.

Ниже рассматриваются некоторые варианты параллельных оптических связей между простейшими двухслойными нейроподобными однородными вычислительными структурами, базирующимися на паре модулятор света — фотоприемник, предполагающими интегральное исполнение. На рис. 1 показана блок-схема оптического вычислительного устройства, работающего в динамическом режиме. Принцип функционирования этого устройства состоит в попеременной передаче информационных сигналов с одного слоя вычислительной структуры 3 на другой с помощью общих внешних источников света 1 и управляемых транспарантов 2, формирующих считывающие световые потоки [2]. В результате такой передачи осуществляется обработка и хранение начальной информации и результата вычислений.

Использование в оптических вычислительных устройствах общего источника света имеет свои недостатки.

1. Трудность получения (для фазовой модуляции) параллельного плоскополяризованного светового потока, причем со строго определенным направлением вектора поляризации в каждой точке структуры.

2. Повышение общего светового и энергетического фона в структуре за счет ее общего облучения и необходимость в световой экранизации межэлементного пространства.

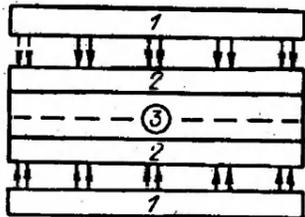


Рис. 1

3. Необходимость введения в вычислительную конструкцию управляемого транспаранта (УТ), также повышающего в ней энергетический и световой фон за счет рассеивания в среде и дифракции на окнах УТ.

Эти недостатки во многом исключает конструкция вычислительного устройства, в котором считывающие световые потоки, поступающие на вычислительную структуру, формируются на матрице управляемых источников света (УИС). В этом качестве могут быть использованы люминесцентные, диодные и более предпочтительные для фазовой модуляции диодно-лазерные источники плоскополяризованного света.

Следует также отметить, что эффективное управление работой транспаранта и матрицы источников света затруднительно при использовании последовательных алгоритмов обработки информации, когда требуется обеспечить доступ к отдельным элементам или небольшим и нерегулярным группам элементов. (При этом значительно усложняется устройство управления транспарантом (или матрицей УИС) и недопустимо возрастает число электрических проводников в их структурах.) В работе [3] и далее рассматриваются параллельные алгоритмы, в которых работает одновременно весь массив  $[m \times n]$  источников света (или УТ) или регулярные группы  $k$  строк (где  $k = 1, 2, 3, \dots$ ) или  $k$  столбцов, или  $k$  диагоналей. Такие алгоритмы не требуют сложных устройств управления УТ и УИС и снижают число проводников в их структурах до приемлемого уровня.

При проектировании оптических многослойных трехмерных вычислительных устройств возможны два подхода.

1. Сложные функциональные схемы, изготавливаемые в каждом слое по традиционной кремниевой  $p-n$ -технологии, соединяются между собой с помощью оптоэлектронных элементов оптическими информационными каналами, чем повышается объемная плотность и функциональная мощность вычислительных устройств.

Недостатками такого подхода являются: проблема соединений в каждом функциональном слое, функциональная жесткость устройства, трудность реализации параллельных алгоритмов в традиционной микроэлектронике.

2. Слои формируются на базе простейших оптических логических схем. Функциональная мощность устройства наращивается за счет определенного модульного интегрально выполненного набора слоев различных логических структур, связанных между собой оптическими информационными каналами.

Такой подход учитывает преимущества оптики в организации параллельных информационных связей между функциональными слоями на элементарном уровне и преимущества электрических проводников при реализации функций объединения по входу и разветвления по выходу, решает проблему соединений, оптимально распределяя их в каждом функциональном слое, значительно повышает функциональную гибкость вычислительного устройства за счет отсутствия жестких электрических связей между логическими структурами, снижает в них число вентиляющих и переключающих элементов.

На рис. 2 показана функциональная схема базового элемента оптической вычислительной структуры (ОВС), [4], состоящего из фотоприемников  $F$ , ключевого элемента  $K$  (транзистора или транзисторного каскада) и электрооптического модулятора света  $M$ . Элемент может работать как в динамическом, так и в потенциальном режиме и выполнять бинарные логические функции ИЛИ, ИЛИ-НЕ, а также функции простейшего нейрона в определении, приведенном в [5], если фотоприемники имеют технологически заданные входные весовые коэффициенты. Ниже рассмотрены построенные на этом элементе ОВС, работающие в динамическом режиме

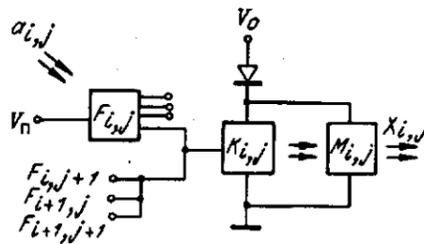


Рис. 2

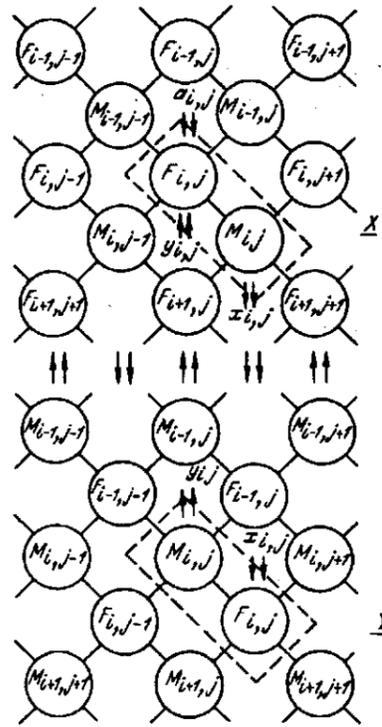


Рис. 3

и имеющие два слоя (для потенциальных структур потребуется дополнительно устройство буферной памяти).

На рис. 3 представлены фрагменты упрощенных топологических схем матриц двухслойной ОВС — первого слоя X и второго слоя Y, причем фотоприемники одного слоя, являющиеся его информационными входами, оптически связаны с модуляторами одноименных индексов другого слоя, являющимися его информационными выходами. Работа ОВС заключается в попеременной передаче информации с одной матрицы на другую.

В этой конструкции элемент  $x_{i,j}$  матрицы X выполняет следующие функции от сигналов, поступающих с матрицы Y. Для ОВС на базе повторителя

$$x_{i,j} = y_{i,j} \vee y_{i+1,j} \vee y_{i,j+1} \vee y_{i+1,j+1} = \bigvee_{k=i, l=j}^{i+1, j+1} y_{k,l} \quad (1)$$

Для ОВС на базе инвертора

$$x_{i,j} = \bigwedge_{k=i, l=j}^{i+1, j+1} y_{k,l} \quad (2)$$

Если ходы ОВС имеют весовые коэффициенты  $w_{i,j}$ , функции на выходе  $x_{i,j}$ -го элемента имеют вид (для повторителя и инвертора соответственно):

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{если } \sum_{k=i, l=j}^{i+1, j+1} y_{k,l} w_{k,l} \geq T_{i,j} \\ 0 & \text{если } \sum_{k=i, l=j}^{i+1, j+1} y_{k,l} w_{k,l} < T_{i,j} \end{cases} \quad (3)$$

где  $T_{i,j}$  — порог срабатывания  $i, j$ -го ключевого элемента.

Соответственно элемент  $y_{i,j}$  матрицы Y может выполнять следующие функции от сигналов, поступающих с матрицы X:

$$y_{i,j} = \bigvee_{k=i-1, l=j-1}^{i,j} x_{k,l} \quad (4)$$

$$y_{i,j} = \bigwedge_{k=i-1, l=j-1}^{i,j} x_{k,l} \quad (5)$$

$$y_{i,j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \begin{cases} 0, & \text{если } \sum_{k=i-1, l=j-1}^{i,j} x_{k,l} w_{k,l} \geq T_{i,j}; \\ 1, & \text{если } \sum_{k=i-1, l=j-1}^{i,j} x_{k,l} w_{k,l} < T_{i,j}. \end{cases} \quad (6)$$

Пусть на входы матрицы подан с внешнего устройства массив информации  $A[m \times n]$ , и полученный массив  $X[m \times n]$ , где  $x_{i,j}$  имеет вид (1) или (2), подан на входы матрицы  $Y$ , тогда ее  $i, j$ -й элемент реализует функцию от девяти исходных соседних входных сигналов. Для ОВС на повторителях это дизъюнкция:

$$y_{i,j} = \bigvee_{k=i-1, l=j-1}^{i+1, j+1} a_{k,l} \quad (7)$$

Для ОВС на инверторах

$$y_{i,j} = \bigvee_{k=i-1, l=j-1}^{i,j} a_{k,l} \wedge \bigvee_{k=i-1, l=j}^{i, j+1} a_{k,l} \wedge \bigvee_{k=i, l=j-1}^{i+1, j} a_{k,l} \wedge \bigvee_{k=i, l=j}^{i+1, j+1} a_{k,l} \quad (8)$$

В картинной логике функция (8) интерпретируется состоянием центрального из девяти элементов (рис. 4) (показаны основные симметричные состояния элементов, штриховка соответствует «1»), который сохраняет свое единичное состояние или в него переключается, если:

- 1) имеет два единичных соседа (снизу и сверху или справа и слева);
- 2) три единичных соседа симметричны относительно центрального или включают в себя соседей по п. 1;
- 3) четыре единичных соседа симметричны относительно центрального или включают в себя соседей по п. 1, 2;
- 4) имеет пять единичных соседей, включающих в себя соседей по п. 1—3;
- 5) имеет шесть единичных соседей в любой конфигурации.

Функции (7), (8) вырабатываются в течение трех тактов. Попеременно передавая информацию с одной матрицы на другую, можно получить функции (7), (8) от 25, 49... и т. д. аргументов в течение 5, 7... тактов.

Рассмотрим выполнение других логических функций на приведенной выше ОВС, базирующейся на инверторах.

Пусть на входы матрицы  $X$ , имеющие только нечетные индексы, подан с внешнего устройства массив информации  $B[m + 1/2 \times n + 1/2]$ . Полагая  $i = 2k - 1$ ;  $j = 2l - 1$  (где  $k = 1, 2, 3...$ ;  $l = 1, 2, 3...$ ), получим  $b_{i+1, j} = b_{i, j+1} = b_{i+1, j+1} = b_{i-1, j} = b_{i, j-1} = b_{i-1, j-1} = 0$  и  $b_{i, j} = b_{2k-1, 2l-1}$ .

Тогда можно показать, что в динамическом режиме работы ОВС в каждом  $2n$ -м

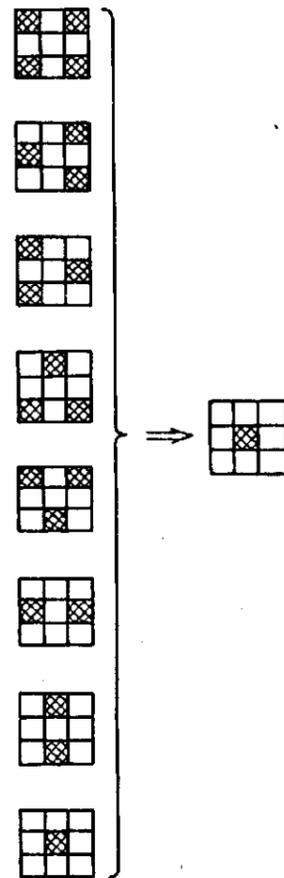


Рис. 4

( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) такте на  $x_{i,j}$ -м выходе матрицы  $X$  и на трех соседних выходах сигнал будет равен

$$x_{i,j} = \bar{x}_{i,j-1} = x_{i-1,j} = x_{i-1,j-1} = \bar{b}_{2k-1,2l-1} = \bar{b}_{i,j}$$

и в каждом  $2(n+1)$ -м такте на выходах матрицы  $X$  будут вырабатываться следующие логические функции от исходных входных сигналов:

1) на выходах с нечетной индексацией сигнал равен исходному сигналу:

$$y_{i,j} = b_{2k-1,2l-1},$$

т. е. ОВС осуществляет хранение полученной информации;

2) на выходах с четной индексацией сигнал равен конъюнкции от четырех аргументов:

$$\begin{aligned} y_{i-1,j+1} &= b_{2k-3,2l-1} \wedge b_{2k-3,2l+1} \wedge b_{2k-1,2l-1} \wedge b_{2k-1,2l+1} = \\ &= b_{i-2,j} \wedge b_{i-2,j+2} \wedge b_{i,j} \wedge b_{i,j+2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{i+1,j+1} &= b_{2k-1,2l-1} \wedge b_{2k-1,2l+1} \wedge b_{2k+1,2l-1} \wedge b_{2k+1,2l+1} = \\ &= b_{i,j} \wedge b_{i,j+2} \wedge b_{i+2,j} \wedge b_{i+2,j+2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{i-1,j-1} &= b_{2k-3,2l-3} \wedge b_{2k-3,2l-1} \wedge b_{2k-1,2l-3} \wedge b_{2k-1,2l-1} = \\ &= b_{i-2,j-2} \wedge b_{i-2,j} \wedge b_{i,j-2} \wedge b_{i,j}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{i+1,j-1} &= b_{2k-1,2l-3} \wedge b_{2k-1,2l-1} \wedge b_{2k+1,2l-3} \wedge b_{2k+1,2l-1} = \\ &= b_{i,j-2} \wedge b_{i,j} \wedge b_{i+2,j-2} \wedge b_{i+2,j}; \end{aligned}$$

3) на выходах со смешанной (четно-нечетной) индексацией сигнал равен конъюнкции от двух аргументов:

$$y_{i,j+1} = b_{2k-1,2l-1} \wedge b_{2k-1,2l+1} = b_{i,j} \wedge b_{i,j+2},$$

$$y_{i+1,j} = b_{2k-1,2l-1} \wedge b_{2k+1,2l-1} = b_{i,j} \wedge b_{i+2,j},$$

$$y_{i-1,j} = b_{2k-3,2l-1} \wedge b_{2k-1,2l-1} = b_{i-2,j} \wedge b_{i,j},$$

$$y_{i,j-1} = b_{2k-1,2l-3} \wedge b_{2k-1,2l-1} = b_{i,j-2} \wedge b_{i,j}.$$

Схема конъюнктивных связей показана на рис. 5.

Для выполнения конъюнктивных функций от большого числа аргументов может быть использована ОВС, где первый слой  $X$  выполнен на базе элемента «Штрих Шеффера», второй  $Y$  — на базе элемента «Стрелка Пирса»; т. е. элемент  $x_{i,j}$  матрицы  $X$  выполняет следующую функцию от сигналов, поступающих с матрицы  $Y$ :

$$x_{i,j} = \bigwedge_{k=i, l=j}^{i+1, j+1} y_{k,l},$$

а элемент  $y_{i,j}$  матрицы  $Y$  —

$$y_{i,j} = \bigvee_{k=i-1, l=j-1}^{i, j} x_{k,l}.$$

Тогда, если на входы матрицы  $X$  подать с внешнего устройства массив информации  $A[m \times n]$ , через три такта работы ОВС на  $y_{i,j}$  выходе матрицы  $Y$

сигнал будет равен конъюнкции от девяти соседних исходных входных сигналов:

$$y_{i,j} = \bigwedge_{k=i-1, l=j-1}^{i+1, j+1} a_{k,l} \quad (9)$$

Попеременно передавая информацию далее, с одной матрицы на другую, можно получить функцию (9) от 25, 49... и т. д. аргументов. Следует отметить, что реализация таких функций в течение одного такта затруднительна из-за физических ограничений. У электронных элементов это нагрузочные способности, у оптических — рассеяние в среде и на окнах.

Приведенные выше примеры двухслойных конструкций ОВС не обладают функциональной полнотой, но, как показано в [3], комбинация таких конструкций в многослойных вычислительных структурах многократно повышает их функциональную мощность и гибкость и может эффективно использоваться для бинарных и нейронных вычислений. Дополнительным преимуществом использования трехмерных ОВС для построения нейронных сетей являются возможности параллельного изменения входных весов элементов с помощью оптического маскирования различными по интенсивности и фазе световыми потоками регулярных групп строк, столбцов, диагоналей матриц элементов и варьирования порогами срабатывания ключевых элементов изменением их базового напряжения и общей интенсивности поступающего на фотоприемники светового потока.

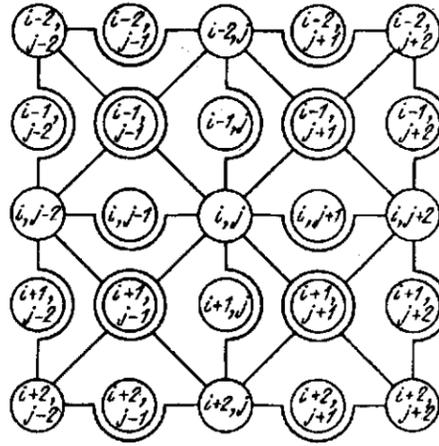


Рис. 5

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ачасова С. М. Вычисления на нейронных сетях.—Новосибирск, 1990.—(Препр. /ВЦ СО АН СССР; 920).
2. Егоров В. М., Косцов Э. Г. Особенности организации связей в оптических цифровых вычислительных устройствах, основанных на модуляции светового потока // Автометрия.— 1981.—№ 5.
3. Егоров В. М., Косцов Э. Г. Перспективы создания оптических цифровых высокопроизводительных вычислительных устройств // Автометрия.—1985.—№ 1.
4. Косцов Э. Г., Потапов А. Н. Пороговый оптический логический элемент // Автометрия.— 1976.—№ 5.
5. Arrathoon R., Hassoun M. H. Optical threshold logic elements for digital computation // Opt. Lett.—1984.—9, N 4.—P. 143.

Поступила в редакцию 4 февраля 1993 г.