

36. Гибин И. С., Гофман М. А., Кибирев С. Ф., Твердохлеб П. Е. Исследование одного варианта голограммной признаковой памяти.— Автометрия, 1976, № 6.
37. Neil N., Krewson U. A. Processor Utilising a Holographic Array and a Content Addressable Storage Unit for High Speed Searching.— Pat. USA N 3810108
38. Bolusset S., Treheux M. PHEDRE — Une Application de l'Holographie.— La Rev. Polytechn. 1973 pp 4195 4197 4199 4205
формы документов «Квант-1».— ОМП, 1978, № 9.
42. Ванин В. А. Устройство для копирования голограмм «Голокопир-1».— Проспект ВДНХ. М.: ЦНИИЭлектроника, 1974.
43. Nelson R. H., Lugt Vander, Zech R. J. Holographic Data Storage and Retrieval (HRMR).— Opt. Eng., 1974, vol. 13, N 5.

Получила в редакцию 17 января 1980 г.

УДК 681.39 : 681.3.07 : 621.378.9

П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ
(Новосибирск)

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МАССИВОВ ДАННЫХ

В работе [1] предложена простейшая система обработки данных (СОД) со структурой ГЗУ—ПСП, где ГЗУ — голографическое ЗУ со страничной организацией памяти, а ПСП — параллельный страничный процессор на основе фоточувствительной БИС [2, 3]. Система реализует поиск в массиве данных, хранящихся в ГЗУ. При каждом обращении к ГЗУ на оптический вход ПСП поступает страница данных, где она обрабатывается в соответствии с поисковым предписанием. На первой стадии обработки ПСП выполняет однотактную групповую операцию умножения матрицы (страница данных) на вектор-столбец (слово опроса), а на второй — поразрядную логическую обработку (операции И, ИЛИ, НЕ) вектора-столбца, являющегося результатом групповой операции.

Недостаток СОД ГЗУ — ПСП — выполнение в ПСП групповой операции умножения матрицы на вектор — приводит к тому, что размерность массива, подлежащего дальнейшей обработке, существенно понижается. Тем самым нарушается высокая степень параллелизма, свойственная СОД на стадиях хранения, выдачи и групповой обработки данных. Очевидно, что такого не произойдет, если в ПСП будет одновременно обрабатываться совокупность из N слов опроса, а групповая операция, реализуемая при этом, будет соответствовать умножению двух, трех или более матриц.

Однако на пути создания фоточувствительных БИС с более «мощной» групповой операцией лежат серьезные трудности, обусловленные планарностью технологии микронэлектронных структур и, как следствие, ограниченным количеством вводных-выводных и внутрисхемных соединений. В то же время указанных ограничений лишены оптические структуры. Так, в настоящее время известны, по меньшей мере, два матричных оптических преобразователя (МОП): с когерентным освещением,

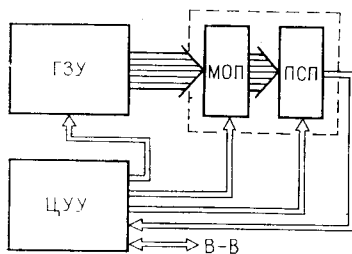


Рис. 1.

реализующим одноканальную групповую операцию умножения двух матриц [4]; с некогерентным освещением, реализующим одноканальную групповую операцию умножения трех матриц [5]. Поэтому интересны структуры СОД, у которых МОП выполняют групповые операции, а фотоэлектронные ПСП — операции параллельной логической обработки совокупности из N векторов, поступающих с выхода МОП.

Настоящая статья посвящена рассмотрению особенностей взаимодействия блоков такой обработки данных могут быть использованы для ускорения информационного обслуживания коллектива пользователей или для сокращения времени решения задач, допускающих распараллеливание.

Структура СОД. Блок-схема системы показана на рис. 1. Она включает ГЗУ, МОП, ПСП и ЦУУ (централизованное устройство управления). Ввод-вывод данных в СОД осуществляется через внешний канал В—В, подключенный к ЦУУ.

ЦУУ — параллельно-последовательный управляющий процессор с внутренней памятью; формирует поток инструкций, выполняемых ГЗУ, МОП и ПСП, и оперирует входными данными и результатами обработки.

ГЗУ в общем случае имеет иерархическую структуру, при этом его высший уровень выполняет функции однонаправленной главной памяти, работающей в режиме произвольной выборки данных и выдачи их в МОП. Обращение к голограмме памяти световым пучком приводит к тому, что на выходе ГЗУ восстанавливается оптическое изображение страницы, при этом числу w_{gp} , $g = 1, 2, \dots, G$, $p = 1, 2, \dots, P$, соответствует значение интенсивности света на одном из $G \times P$ элементарных участков этого изображения (аналоговое представление) или комбинация из N светлых и темных участков (двоично-кодированное представление). Если числа w_{gp} кодируются путем переключения элементов столбцов ($N = G$) или строк ($N = P$) изображения, то страница содержит соответственно P или G чисел. Практически емкость страницы может достигать значений $10^3 - 10^5$ бит. Если время доступа к странице 10 мкс, что обеспечивается, например, акустооптическими дефлекторами, то скорость выдачи данных из ГЗУ составляет $10^8 - 10^{10}$ бит/с.

Из таблицы следует, что МОП и ПСП являются устройствами с параллельным оптическим и параллельно-последовательным электронным входами. Параллельная обработка страницы данных в МОП проводится на оптическом уровне, а в ПСП — на электронном. На ПСП дополнительно возлагаются функции распаковки результатов обработки, получаемых в страничном формате. В соответствии с этим МОП имеет параллельный оптический выход, а ПСП — параллельно-последовательный электронный выход.

Важно, что МОП и ПСП содержат реверсивные регистры памяти двух типов: оптически управляемые транспаранты (ОУТ) для промежуточной записи изображений страниц, поступающих по оптическому каналу, и электрически управляемые транспаранты (ЭУТ) для формирования страниц из данных, поступающих по электронному каналу. При использовании в МОП и ПСП оптически и электрически управляемых транспа-

Элементы СОД	Характеристика				
	Вход		Выход	Регистры памяти	Характер обработки
	Со стороны ГЗУ	Со стороны ЦУУ			
МОП	Оптический параллельный канал	Электронный параллельно-последовательный канал	Оптический параллельный канал	Есть	На оптическом уровне
ПСП	То же	То же	Электронный параллельно-последовательный канал	То же	На электронном уровне

рантов с памятью обработка данных может проводиться с привлечением энергетических ресурсов дополнительных источников: оптического (в составе МОП) и электрического (в составе ПСП). В этом случае энергия изображений страниц, поступающих на их входы по оптическому каналу, должна быть достаточной только для записи данных на ОУТ за промежуток времени, соответствующий такту записи.

Конкретизируем структуру, способы реализации и операционные возможности МОП и ПСП.

МОП. Будем рассматривать МОП с преобразованием вида

$$D = A \cdot B \cdot C,$$

где $A = \|a_{ig}\|$, $B = \|b_{gp}\|$, $C = \|c_{ps}\|$ и $D = \|d_{is}\|$ — матрицы с вещественными элементами. Варианты таких устройств, построенных на элементах сферической и аноморфотной оптики, описаны подробно в [4, 5].

Для примера на рис. 2 в двух проекциях показана оптическая схема МОП с некогерентным источником света. Значения элементов матриц A , B , C вводятся в оптическую систему с помощью управляемых транспарантов T_1 , T_2 , T_3 , содержащих соответственно $T \times G$, $G \times P$, $P \times S$ светомодулирующих элементов. Умножение матриц проводится оптическим аппаратным способом за один такт работы системы. Результат умножения, воспроизводимый в плоскости P_4 системы, — также оптическое изображение.

Если один из транспарантов T_1 , T_2 или T_3 является оптически управляемым, то в течение одной записи в МОП можно ввести изображение страницы w из ГЗУ. Два других транспаранта — электрически управляемые. Поэтому в МОП можно также ввести данные со стороны ЦУУ, чем достигается большая гибкость при обработке данных. Действительно, в зависимости от того, какой из транспарантов T_1 , T_2 или T_3 (см. случаи a , b , c на рис. 2) является оптически управляемым, МОП реализует одно из матричных преобразований:

$$D = w \cdot B \cdot C, \quad (1)$$

$$D = A \cdot w \cdot C, \quad (2)$$

$$D = A \cdot B \cdot w. \quad (3)$$

Пусть обработке в (1), (2) подлежит матрица C , а в (3) — матрица w . Тогда оператор матричного преобразования в (1) зависит от матриц w и B , в (2) — от матриц A и w , а в (3) — от матриц A и B . Отсюда следует, что страницы данных, поступающие со стороны ГЗУ, могут определять как оператор матричного преобразования, так и данные, подлежащие обработке.

Важным свойством МОП является то, что он позволяет реализовать многоканальную параллельную обработку векторов данных. Для

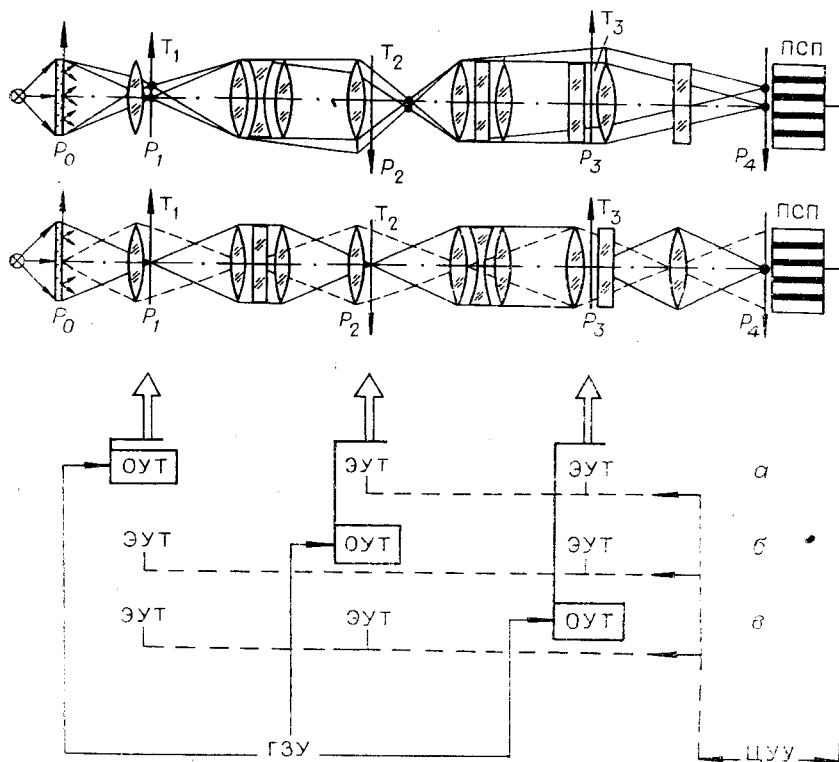


Рис. 2.

уточнения смысла этого понятия предположим, что в (1) $B = I$, где I — единичная матрица. Тогда элементы одного произвольного столбца матрицы C — обрабатываются в МОП одновременно в соответствии с правилами умножения вектора-столбца на матрицу w . Многоканальность при обработке проявляется в том, что указанные выше преобразования проводятся одновременно для всех векторов-столбцов матрицы C . В случае, когда $B \neq I$, характер обработки не меняется. Векторы-столбцы матрицы C независимо и одновременно умножаются на матрицу B , затем векторы-столбцы результирующей матрицы по тем же правилам умножаются на матрицу w .

ПСП. Параллельный страничный процессор представляет собой однородную микрoэлектронную структуру, состоящую из матрицы ($T \times S$) одинаковых обрабатывающих ячеек (ОЯ).

Структурная схема ПСП показана на рис. 3. Каждая из ОЯ содержит фотодетектор, благодаря чему оптическое изображение страницы, поступающей с выхода МОП, вводится в ПСП за одну запись. Кроме того, ОЯ_{*s*} имеют единые шины питания, смещения и управления. По шинам управления в ПСП поступают сигналы стирания, перезаписи (внутри ячейки или между ячейками) и перестройки структуры от ЦУУ. Для параллельно-последовательного вывода результатов обработки ПСП содержит шины АШ₁ — АШ_{*T*} и ИШ₁ — ИШ_{*S*}, причем шины АШ₁ — АШ_{*T*} являются адресными, а шины ИШ₁ — ИШ_{*S*} — информационными, выходными. За один такт считывания по информационным шинам выводятся результаты обработки из S ячеек (произвольной строки).

Схема отдельной ячейки и набор выполняемых ею операций зависят от задачи обработки, решаемой системой. В простейшем случае ПСП может выполнять фотоэлектрическое преобразование входных оптических изображений страниц и параллельно-последовательную выдачу по-

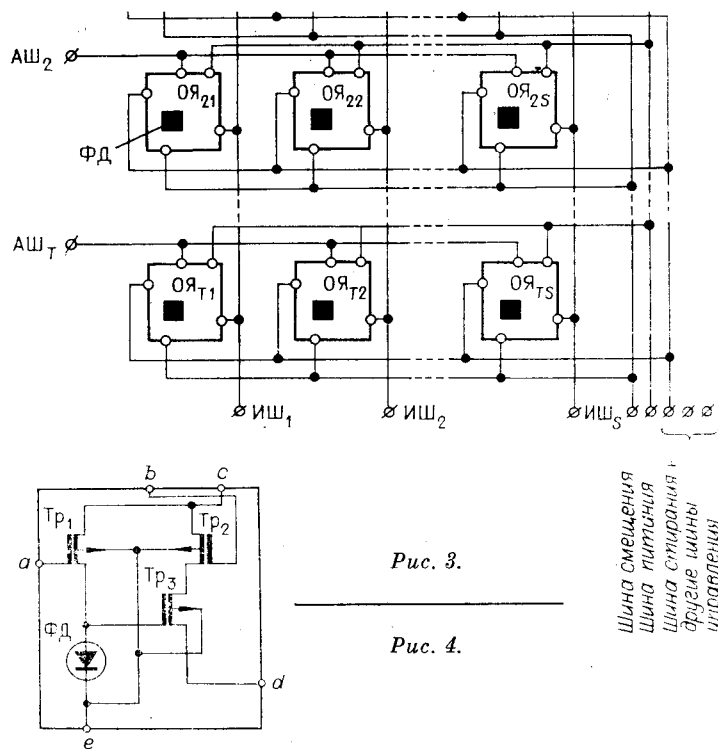


Рис. 3.

Рис. 4.

Шина смещения
Шина питания
Шина стирания
другие шины
управления

лученных результатов в ЦУУ, что соответствует функциям фотоматрицы ГЗУ. Тогда ячейка, как показано на рис. 4, может включать фотодиод (ФД) и три МОП-транзистора, где Tr_1 — ключ стирания записи, Tr_2 — адресный ключ, а Tr_3 — следящий транзистор [6]. На этапе стирания записи барьерная емкость обратносмещенного ФД заряжается до напряжения источника питания. Это достигается путем подачи отрицательного импульса напряжения на шину a . Под действием оптического сигнала, подаваемого на этапе записи, барьерная емкость ФД разряжается. Остаточное напряжение ФД передается через транзистор Tr_3 на информационную шину d после подачи отрицательного импульса напряжения на адресную шину b (этап считывания). В последующих усилительно-измерительных цепях выходные сигналы ПСП подвергаются аналого-цифровому преобразованию или пороговому выделению.

Большинство полупроводниковых фотодетекторов (в том числе ФД, показанный на рис. 4) работает в режиме накопления заряда. Это позволяет использовать входные фоточувствительные элементы ПСП для целей аналогового суммирования нескольких следующих друг за другом оптических изображений страниц.

Реализация в ПСП логической обработки изображений страниц требует, в частности, того, чтобы каждая ОЯ, кроме фотодетектора и коммутирующих элементов, содержала 1—2 одноразрядных регистра памяти (триггера) с входными перестраиваемыми от ЦУУ элементами логики. Операция преобразования полутонового отсчета в двухградационное выполняется в этом случае на входе регистра памяти, следующего сразу за фотодетектором. Такое ПСП позволяет вести параллельную логическую обработку совокупности изображений страниц. Если $D^{(1)}, \dots, D^{(M)}$ — изо-

бражения страниц, поступающие последовательно с выхода МОП, а $d_{is}^{(1)}, \dots, d_{is}^{(M)}$ — одноименные разряды этих страниц, то на первом «слое» памяти могут быть получены, например, результаты выполнения следующих операций:

$$\begin{aligned} d_{is} &= d_{is}^{(1)} \vee d_{is}^{(2)} \vee \dots \vee d_{is}^{(M)}, \\ d_{is} &= d_{is}^{(1)} \wedge d_{is}^{(2)} \wedge \dots \wedge d_{is}^{(M)}, \\ d_{is} &= d_{is}^{(1)} \oplus d_{is}^{(2)} \oplus \dots \oplus d_{is}^{(M)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где \vee , \wedge , \oplus — логические операции сложения, умножения и сложения по модулю 2. Страницу с отсчетами d_{is} можно переписать (с инвертированием или без) на второй «слое» памяти, а освободившийся первый «слой» будет вести обработку очередной серии из M изображений страниц. При необходимости операция переписи страницы из первого «слоя» памяти на второй может быть совмещена с операцией ее логической обработки. Над одноименными разрядами страниц также выполнимы операции вида (4).

В настоящее время на основе МОП-технологии создан вариант ПСП с регистром памяти и функциями логической обработки данных [3]. Достигнутый уровень упаковки элементов (~ 200 транзисторов/мм²) является далеко не предельным.

Возможности СОД. Отметим основные задачи, которые можно решать в рассматриваемой СОД. Для определенности будем считать, что обработке подлежат многоградационные или двухградационные изображения страниц, поступающие из ГЗУ.

1. *Многоканальный доступ* к данным — режим работы СОД, при котором N пользователей имеют одновременный доступ к данным произвольной страницы w , предварительно восстановленной из ГЗУ и зарегистрированной на оптическом входе МОП. Иначе говоря, если столбцы страницы, показанной для примера на рис. 5, а, соответствуют отдельным словам, то в режиме многоканального доступа каждый из пользователей может адресоваться к любому из шести слов и читать их содержимое независимо друг от друга.

Задачу можно решить, применяя МОП с преобразованием вида (1) при условии, что $C = I$. Оператор многоканального доступа определяется матрицей B с элементами, принимающими значения 1 и 0.

2. *Перестройка данных* — перестановка, сдвиг, мультиплицирование, маскирование и другие подобные виды преобразований над словами страницы w . Для ясности на рис. 5, б — д приведены результаты преобразований двухградационной страницы из шести слов (слева) и соответствующие этим преобразованиям графы (справа). Важность перестройки данных отмечена в [7].

Как и в предыдущем случае, для перестройки данных можно использовать МОП с преобразованием вида (1), полагая при этом, что $C = I$. Оператор перестройки задается матрицей B , элементы которой принимают значения 1 и 0.

3. *Многоканальный параллельный поиск.* МОП предоставляет каждому из N пользователей индивидуальные каналы ввода-вывода данных и позволяет параллельно вычислять совокупность функционалов скалярного произведения между содержимым каждого из введенных слов запроса и содержимым слов в текущей странице w .

Задача поиска решается МОП с преобразованием вида (4). В этом случае матрица w — обрабатываемая страница данных; матрица B — совокупность из $N = P$ линейных слов запроса; матрица A — оператор, оп-

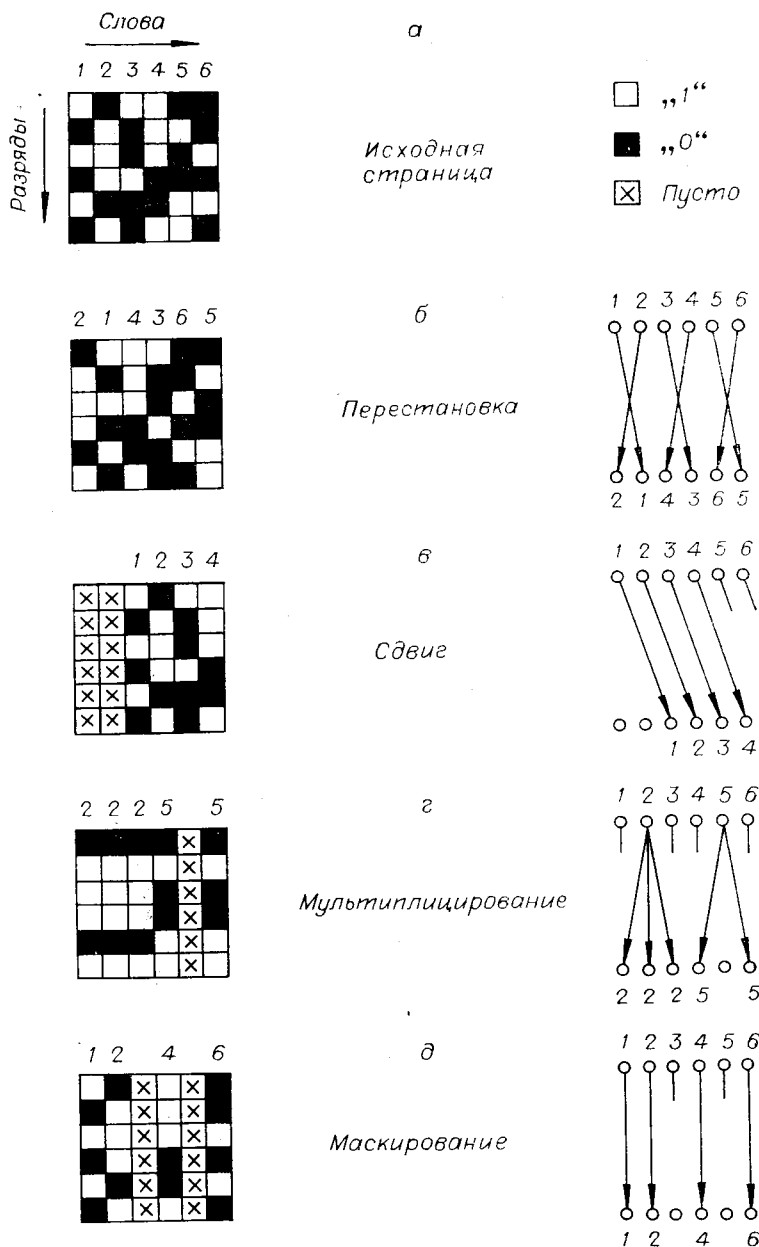


Рис. 5.

ределяющий характер связи каналов ввода-вывода данных. Элементы матрицы B могут быть многоградационными (аналоговое представление) и двухградационными (цифровое представление); элементы матрицы A принимают значения 1 и 0.

Способ организации цифрового простого поиска в оптической системе, показанной на рис. 2, и полученные экспериментальные результаты описаны в [8]. Отсюда, в частности, следует, что при решении задачи простого поиска функции ПСП совпадают с функциями фотоматрицы. ПСП с возможностями параллельной логической обработки должны при-

меняться при реализации сложных видов поиска (упорядочивание, сортировка данных).

4. *Поиск координат фрагмента на изображении.* Решение задачи, как следует из [9], можно свести к адресной выборке изображения страницы из ГЗУ, двухкоординатному сдвигу этого изображения в МОП и последующему проецированию сдвинутого изображения на вход ПСП, где суммируется (интегрируется) серия последовательно восстановленных и сдвинутых изображений. Требуемая операция сдвига выполнима в МОП с преобразованием вида (2). Оператор сдвига по осям x и y задается с помощью матриц A и C , элементы которых принимают значения 1 и 0.

5. *Кодирование (декодирование) данных,* хранимых в памяти. Такая задача возникает, например, тогда, когда данные, извлекаемые из памяти, подлежат передаче по каналам связи.

Многоградационные изображения страниц можно кодировать с помощью МОП вида (2). Матрица w в этом случае определяет содержимое кодируемой страницы, а матрицы $A = B^*$ и B — двумерный базис разложения ($*$ — знак транспонирования). Подтверждение этому получено в работах [5, 10], где экспериментально реализовано разложение тестовых изображений по ортогональным базисам Уолша, Адамара и Лежандра.

Возможно также кодирование совокупности двоичных слов (сообщений), образующих двухградационное изображение страницы. Так, согласно [11] получение проверочных символов передаваемого кодового слова из кодируемого цифрового сообщения требует образования нескольких заранее определенных линейных комбинаций из двоичных разрядов исходного сообщения и последующего сложения этих разрядов по модулю 2. Поэтому МОП можно использовать для образования различных комбинаций из разрядов кодируемых сообщений, а ПСП — для параллельного сложения двоичных разрядов по модулю 2 и получения окончательных значений проверочных символов.

6. *Вычисление квадратичной формы.* Необходимость вычисления квадратичной формы $Y_h^* \sum^{(i)} Y_h$ возникает, например, при распознавании образов [12]. Здесь Y_h — вектор центрированных признаков классифицируемого образа, Y_h^* — транспонированный вектор, а $\sum^{(i)}$ — матрица, определяющая свойства i -го класса сигналов. Эту задачу в более общей постановке, когда классификация ведется по N параллельным каналам, можно решить путем применения МОП вида (2). Для этого на строках матрицы A и одновременно на столбцах матрицы C должны быть представлены значения N входных векторов-признаков [13]. Свойства классов, к которым должны относиться распознаваемые образы, будут определяться значениями матриц $w = \sum^{(i)}$, поочередно извлекаемых из ГЗУ.

Таким образом, в зависимости от задачи, решаемой СОД, МОП выполняет функции страничного буферного ЗУ с многоканальным доступом (случаи 1, 2), параллельного коммутатора данных (случаи 3, 5), двухкоординатного дефлектора изображений (случай 4) и специализированных аналоговых предпроцессоров (случаи 5, 6). В свою очередь, ПСП при решении задач 1—3 (простой поиск) и 6 выполняет функции фотоматрицы, задач 3 (сложный поиск) и 5 — функции логического процессора, а задачи 4 — функции аналогового сумматора (интегратора) изображений страниц.

Характеристики СОД. Возможности системы можно характеризовать следующими параметрами: длительностью одного системного такта работы (ГЗУ + МОП + ПСП) — T_c , длительностью одного такта работы гибридного процессора (МОП + ПСП) — T_n , количеством операций скалярного произведения (ОСП), выполняемых аппаратным способом за время такта T_c — R , производительностью аппаратных средств — R/T_c , производительностью программных средств — R/T_n .

Длительность системного такта работы определяется приближенно формулой

$$T_c = \tau_d^{ГЗУ} + \tau_{ВВ}^{ОУТ} + \tau_{ВВ}^{ЭУТ} + \tau_{ВЫВ}^{ПСП}, \quad (5)$$

где $\tau_d^{ГЗУ}$ — время доступа к данным в ГЗУ, $\tau_{ВВ}^{ОУТ}$ и $\tau_{ВВ}^{ЭУТ}$ — время ввода данных в МОП соответственно по оптическому и электронному входам, а $\tau_{ВЫВ}^{ПСП}$ — время вывода результатов обработки из ПСП в ЦУУ. В (5) не учтены времена ввода страницы из МОП в ПСП и стирания данных в МОП. Полагаем, что первое из них пренебрежимо мало в сравнении с задержкой $\tau_{ВВ}^{ОУТ}$ (условие обеспечивается путем выбора соответствующей частоты тактовой частоты в МОП), а второе сокращается

$$T_{II} = \tau_{ВВ}^{ЭУТ} + \tau_{ВЫВ}^{ПСП}. \quad (6)$$

Параметр T_{II} , как следует из (6), не включает времени ввода данных по оптическому входу МОП.

За время такта T_c МОП системы реализует операцию умножения трех матриц, т. е.

$$R = 2P^2 \text{ ОСП}. \quad (7)$$

Размерность матриц принята одинаковой и равной $P \times P$.

Из (7) и (5) следует, что производительность аппаратных средств системы

$$R/T_c = 2P^2 / (\tau_d^{ГЗУ} + \tau_{ВВ}^{ОУТ} + \tau_{ВВ}^{ЭУТ} + \tau_{ВЫВ}^{ПСП}) \text{ ОСП/с.}$$

Параметр R/T_c характеризует аппаратные возможности СОД при обработке совокупности страниц, поступающих последовательно из ГЗУ.

В свою очередь, из (7) и (6) можно заключить, что производительность гибридного процессора системы

$$R/T_{II} = 2P^2 / (\tau_{ВВ}^{ЭУТ} + \tau_{ВЫВ}^{ПСП}) \text{ ОСП/с.} \quad (8)$$

Параметр R/T_{II} характеризует возможности процессора или, иначе говоря, программных средств системы при обработке одной страницы, введенной в МОП.

Если параметр $P = 100$, а задержки в (5) примерно одинаковы и равны 25 мкс, то $R/T_c = 2 \cdot 10^8$ ОСП/с, а $R/T_{II} = 4 \cdot 10^8$ ОСП/с. При этом одна операция скалярного произведения требует выполнения 100 произведений и 99 сложений.

Для сравнения приведем характеристики СОД со структурой ГЗУ — ПСП [1]:

$$T'_c = \tau_d^{ГЗУ} + \tau_{ВВ}^{ПСП}, \quad (9)$$

$$T'_{II} = \tau_{II}^{ПСП},$$

$$R' = P \text{ ОСП}, \quad (10)$$

$$R'/T'_c = P / (\tau_d^{ГЗУ} + \tau_{ВВ}^{ПСП}) \text{ ОСП/с}, \quad (11)$$

$$R'/T'_{II} = P / \tau_{II}^{ПСП} \text{ ОСП/с},$$

где $\tau_{ВВ}^{ПСП}$ — время ввода страницы по оптическому входу ПСП, а $\tau_{II}^{ПСП}$ — время одного «электронного» такта ПСП, включающего вре-

мена ввода, обработки и вывода слова размерности P . Оценка (10) получена при условии, что ПСП в СОД ГЗУ — ПСП реализует аппаратным способом операцию умножения матрицы $P \times P$ на вектор-столбец размерности P . При принятых ранее значениях P , $\tau_{\text{д}}^{\text{ГЗУ}}$ и $\tau_{\text{вв}}^{\text{ПСП}}$ производительность аппаратных средств равна $2 \cdot 10^8$ ОСП/с, что на два порядка меньше производительности СОД ГЗУ — МОП — ПСП.

Пусть электронные блоки сравниваемых СОД выполнены на единой технологической основе и характеризуются элементарным тактом работы, равным $\Delta\tau$. В течение этого такта можно или ввести, или обработать, или вывести слово размерности P . Тогда из (6) и (9) получим, что $T_{\text{п}} = 2P\Delta\tau$, $\tau_{\text{п}}^{\text{ПСП}} = 3\Delta\tau$. Если эти значения подставить соответственно в (8) и (11), то $R/T_{\text{п}} = P/\Delta\tau$, а $R'/T'_{\text{п}} = P/3\Delta\tau$ ОСП/с.

Отсюда следует важный вывод о том, что сравниваемые СОД при существенно различной производительности аппаратных средств имеют примерно одинаковую производительность программных средств. Поскольку реальные задачи обработки данных решаются с применением как аппаратных, так и программных средств СОД, то результирующие значения производительностей рассматриваемых систем существенно зависят от количества изображений страниц, подлежащих выдаче из ГЗУ, и степени использования аппаратных и программных средств в процессе их обработки.

Отметим, что в СОД ГЗУ — МОП — ПСП ценой частичного уменьшения аппаратной производительности можно увеличить длительность системного такта $T_{\text{с}}$, а следовательно, снизить требования к длительности некоторых задержек, входящих в выражение (5). Согласно (10) задержки $\tau_{\text{вв}}^{\text{ЭУТ}}$ и $\tau_{\text{вв}}^{\text{ПСП}}$ задают производительность программных средств СОД. Они должны быть на уровне $\tau_{\text{вв}}^{\text{ЭУТ}} = P\Delta\tau$, $\tau_{\text{вв}}^{\text{ПСП}} = P\Delta\tau$ с тем, чтобы параметры $R/T_{\text{п}}$ и $R'/T'_{\text{п}}$ СОД ГЗУ — МОП — ПСП и СОД ГЗУ — ПСП сохранить примерно на одинаковом уровне. Поэтому резерв времени, появляющийся за счет увеличения $T_{\text{с}}$, следует использовать, в первую очередь, для снижения требований к длительности задержки $\tau_{\text{вв}}^{\text{ОУТ}}$, которая в [14, 15] определена, например, на трудно реализуемом уровне 0,1—1 мкс. Наше замечание сводится практически к тому, что в составе СОД ГЗУ — МОП — ПСП вполне применимы ОУТ со значительно большими (10—100 мкс) временами цикла «запись — стирание». При этом аппаратная производительность системы будет по-прежнему достаточно высока.

Реализация СОД. Можно, по-видимому, считать, что задачи создания постоянных ГЗУ и простейших фотоэлектронных ПСП (например, фотоматриц) близки к решению. Поэтому возможности создания СОД связаны в основном с возможностями разработки быстродействующих ОУТ, ЭУТ и синтеза на их основе МОП с параллельным оптическим и параллельно-последовательным электронным входами.

В последнее время исследования оптически управляемых структур типа МД₁ПД₂М (металл — диэлектрик — полупроводник — диэлектрик — металл) привели к интересным результатам. Так, в работе [16] показано, что в структуре с ЦТСЛ-сегнетокерамикой (диэлектрик D_2) время такта «запись — стирание» может составлять 20 мкс. Структура управлялась энергией 10^{-9} — 10^{-8} Дж/см² при $\lambda = 0,9$ мкм. Данный спектральный диапазон хорошо соответствует ГЗУ на полупроводниковых лазерах. Аналогичная структура, исследованная в работе [17], имела время такта «запись — стирание», равное 50 мкс. Диэлектриком D_2 служил слой подогретого жидкого кристалла (S -эффект). К структуре прикладывалось напряжение ~ 100 В. Эти экспериментальные данные позволяют считать, что создание ОУТ с длительностью такта «запись — стирание» в 20—50 мкс практически реально.

Не менее реальным представляется создание быстродействующих ЭУТ с параллельно-последовательным формированием страницы данных на основе ЦТСЛ-сегнетокерамики, многоканальных акусто- и магнито-оптических модуляторов света. Достижимая скорость ввода 100—400 Мбит/с и более.

МОП, схема которого показана на рис. 2, построен с учетом того, что ввод страниц данных осуществляется с помощью фототранспарантов. Применение реальных ОУТ и ЭУТ приведет к частичному изменению схемы МОП, однако при этом сохраняются основные принципы формирования и передачи световых пучков, использованные в исходной схеме. В частности, для включения ОУТ и обеспечения ввода изображений страниц со стороны ГЗУ желательно, чтобы элементы оптики слева от плоскостей P_1 , P_2 и P_3 отсутствовали. Возможность такого схемотехнического решения МОП подтверждена в [18]. Кроме того, необходимо, чтобы считывание данных с ОУТ осуществлялось линейно-поляризованным светом.

Представляют значительный интерес варианты МОП с полупроводниковыми источниками света и, в частности, такие, у которых формирование и передача световых пучков проводятся элементами волоконной и интегральной оптики.

Заключение. Предлагаемая СОД со структурой ГЗУ — МОП — ПСП принадлежит к классу новых высокопроизводительных оптико-электронных систем, специализированных по обработке массивов данных (задачи поиска, упорядочивания, сортировки, кодирования и перестройки). Главная особенность СОД — возможность организации многоканальной параллельной обработки данных, что достигнуто благодаря применению оптического преобразователя, реализующего аппаратным способом операцию умножения трех матриц. В зависимости от решаемой задачи оптический преобразователь выполняет функции страничного буферного ЗУ с многоканальным доступом, параллельного коммутатора данных, двухкоординатного дефлектора изображений и специализированного аналогового предпроцессора.

Существуют реальные предпосылки для создания СОД на элементах классической оптики и микроэлектроники. Наряду с этим, значительный интерес представляют возможности реализации СОД на элементах волоконной и интегральной оптики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гибин И. С. и др. Голограммное ЗУ с ассоциативной обработкой страниц информации. — В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. конф. по голографии. Л.: изд. ЛИЯФ, 1978, с. 249—250.
2. Вьюхина Н. Н., Кибирев С. Ф., Панков Б. Н. Фотоматричное ассоциативное ЗУ. — В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1979, с. 149—150.
3. Коняев С. И., Кибирев С. Ф., Наймарк С. И. Фотоматричный ассоциативный накопитель. — Там же, с. 150—151.
4. Нежевенко Е. С., Твердохлеб П. Е. Умножение матриц оптическим методом. — Автометрия, 1972, № 6.
5. Кривенков Б. Е., Михляев С. В., Твердохлеб П. Е., Чугуй Ю. В. Некогерентная оптическая система для выполнения матричных преобразований. — Автометрия, 1975, № 3.
6. Магиенко Б. Г., Нестерихин Ю. Е. Многоэлементные фотоприемные матрицы для голограммных запоминающих и вычислительных устройств. — Автометрия, 1979, № 3.
7. Feng Tse-Yun. Data Manipulating Functions in Parallel Processors and Their Implementations. — IEEE Trans. on Computers, 1974, vol. C-23, N 3.
8. Гофман М. А. и др. Многоканальный поиск в некогерентной оптической системе памяти. — Автометрия, 1976, № 6.
9. Твердохлеб П. Е. Табличный метод поиска координат фрагмента на изображении. — Автометрия, 1979, № 1.

10. Кривенков Б. Е., Твердохлеб П. Е., Чугуй Ю. В. Оптический метод кодирования изображений при помощи преобразования Адамара.— *Автометрия*, 1974, № 6.
11. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Связь, 1979.
12. Нильсон Н. Обучающиеся машины. М.: Мир, 1967.
13. Твердохлеб П. Е. Многоканальное вычисление квадратичной формы некогерентными методами.— *Автометрия*, 1980, № 6.
14. Володин Е. Б., Свидзинский К. К. Возможность построения интегральных управляемых транспарантов для оптической цифровой техники и связи.— *Автометрия*, 1977, № 4.
15. Мнацаканян Э. А. и др. О возможности использования оптоэлектроники в устройстве логического умножения матрицы на вектор.— *Автометрия*, 1981, № 1.
16. Сихарулидзе Д. Г. Пространственно-временная модуляция света в структурах типа МДП — электрооптический материал: Автореф. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. Тбилиси: изд. Тбилисского ун-та, 1980, с. 19—20.
17. Беляев В. В. и др. Повышение быстродействия жидкокристаллических модуляторов света.— *Письма в ЖТФ*, 1980, т. 6, вып. 14, с. 845—847.
18. Кривенков Б. Е., Чугуй Ю. В. Исследование путей повышения точности матричных вычислений в оптической некогерентной системе.— Препринт № 69. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977.

Поступила в редакцию 21 июля 1980 г.

УДК 778.38

А. ТАЙ, Х. ЧЕН, Ф. ЮУ
(Пенсильвания, США)

ОДНОСТУПЕНЧАТАЯ РАДУЖНАЯ ГОЛОГРАФИЯ И ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Введение. Радужный голографический процесс по Бентону [1—3] включает две ступени записи. Первая ступень — запись основной голограммы с реального объекта посредством традиционной внеосевой голографической техники [4, 5], вторая — запись радужной голограммы с реального голограммного изображения, полученного из основной голограммы. Вследствие помещения узкой апертурной щели за основной голограммой появляется возможность уменьшения требований к когерентности восстанавливающего источника света на второй ступени голографической записи. Однако двухступенчатый процесс голографической записи является громоздким и требует для каждой ступени отдельных оптических устройств.

Предлагается альтернативный метод, при котором процесс записи может выполняться за один этап. Эта новая техника дает определенную гибкость в построении радужных голограмм и допускает использование более простых оптических приспособлений, чем при традиционной двухступенчатой записи. Следует также отметить, что создание радужной голограммы требует записи реального голографического изображения объекта через узкую щель. Если радужная голограмма освещается монохроматическим источником света, образуется реальное голограммное изображение объекта, которое ограничено открытой щелью. Если же она освещается белым источником света, то голограммное изображение щели будет расщеплять свет внутри полностью видимого голографического изображения на все цвета радуги. Поэтому основная задача радужной голографии сводится к формированию изображения апертурной щели