

рена непозиционная система остаточных классов. Предложена структура ОЦВС обработки изображений в остаточной арифметике. Приведены оценки основных характеристик системы — быстродействия и точности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации.— М.: Высш. шк., 1988.
2. Суэмацу Я., Аран С. Интегрально-оптический подход к разработке перспективных полупроводниковых лазеров // ТИИЭР.— 1987.— 75, № 11.
3. Галлахер Р. Т. Французские достижения в оптоэлектронике // Электроника.— 1986.— 59, № 2.
4. Орлов Л. А., Попов Ю. М. Оптоэлектронное арифметическое устройство в системе остаточных классов // Автометрия.— 1972.— № 6.
5. Хуан А. Об архитектуре оптической цифровой вычислительной машины // ТИИЭР.— 1984.— 72, № 7.
6. Суган М., Канума А., Судзуки К., Кубо М. СБИС — процессор для обработки изображений // ТИИЭР.— 1987.— 75, № 9.

*Поступила в редакцию 22 ноября 1988 г.*

УДК 681.325.5 : 535

М. А. ГОФМАН, Е. С. НЕЖЕВЕНКО, В. И. ФЕЛЬДБУШ

*(Новосибирск)*

#### ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

Оптическая обработка информации имеет достаточно солидный стаж — около четверти века. В то же время устройства, использующие принципы оптической обработки и нашедшие практическое применение, до сих пор являются редкостью. Причин здесь несколько: и успехи электронной вычислительной техники, создающей жесткую конкуренцию оптической, и бедность элементной базы, и неготовность промышленности к освоению оптических вычислительных средств. Кроме перечисленных проблем, на наш взгляд, средства оптической обработки имеют и принципиальные недостатки, сдерживающие их развитие. Один из них — это специализированность оптических вычислительных систем, их негибкость. Практически для каждой новой задачи приходится разрабатывать новое устройство, что приводит к большим затратам и времени, и средств. В электронной вычислительной технике эта проблема была решена с помощью универсальных ЭВМ, однако в последнее время наблюдается переход от повсеместного их применения к использованию более специализированных устройств, обеспечивающих высокое быстродействие при сравнительно небольших затратах. Один из классов такого рода устройств — цифровые сигнальные процессоры (ЦСП).

Несмотря на ограниченный набор базовых операций, в них реализуется большинство алгоритмов обработки изображений и сигналов, при этом скорость обработки в ЦСП существенно выше, чем на универсальных ЭВМ. Достигается это за счет аппаратной реализации наиболее времяземких процедур, специальной организации памяти, широкого применения конвейерных и систолических архитектур. Фактически ЦСП после программирования их с помощью ППЗУ становятся как бы специализированными устройствами.

Возникает вопрос, нельзя ли создать оптическое вычислительное устройство, подобное ЦСП, т. е. имеющее, с одной стороны, универсальную базовую структуру, с другой — становящееся специализированным после программирования. В данной работе показано, что такие вычисли-

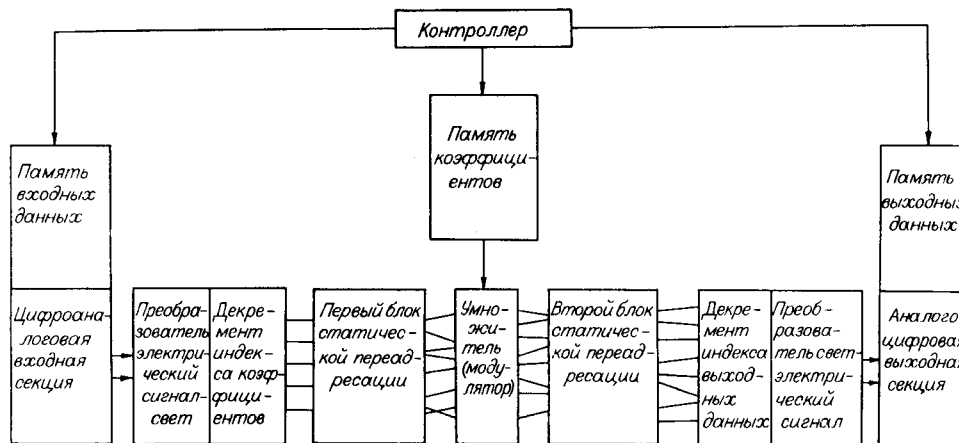


Рис. 1

тельные устройства могут быть созданы, названы они опико-электронными сигнальными процессорами (ОСП) [1].

Основными блоками ЦСП являются [2]: арифметико-логическое устройство, умножитель, устройство микропрограммной последовательности, связанное с памятью, и контроллер. ОСП в общих чертах повторяет структуру ЦСП. На первый взгляд, это можно сделать, только построив ОСП на принципах цифровой техники. Однако если учесть специфику большинства алгоритмов обработки сигналов (изображений), можно построить ОСП, используя элементы аналоговой оптоэлектроники. Действительно, умножение и суммирование в оптике на аналоговом уровне не составляют проблемы, более того, их без труда можно сделать многоканальными, что, естественно, увеличит быстродействие процессора.

Одна из основных проблем оптических процессоров состоит в их статичности, трудности изменения алгоритма обработки данных, в более широком смысле невозможности перепрограммирования процессора. Эту проблему можно решить, используя следующие приемы: 1) ввод входной информации в виде временной последовательности векторов, а не параллельных массивов (матриц), как чаще всего делается в системах оптической обработки; 2) конвейеризация вычислительных процессов; 3) переиндексация промежуточных и результирующих массивов информации за счет их пространственного смещения (напомним, что в оптике пространственная координата может быть одной из независимых переменных); 4) переадресация световых потоков в процессе вычисления.

Первый прием достигается либо за счет естественного временного изменения сигналов, либо путем сканирования (например, телевизионного) изображений. Второй и третий приемы обеспечиваются применением динамических элементов оптоэлектроники, таких, как акустооптика, ПЗС-матрицы, линейки и матрицы светоизлучателей со сдвиговыми регистрами и т. д. Технические средства переадресации световых пучков могут быть выполнены на основе световодных, голографических, линзовращающих и иных оптических элементов.

В соответствии с изложенным рассмотрим наиболее общую структуру опико-электронного сигнального процессора (рис. 1). Память входных данных требуется в случаях, когда темп поступления входных данных не совпадает с темпом их обработки. Эта память выполняется на электронных элементах. Далее идет цифроаналоговая входная секция. В ней формируется импульс управления светоизлучателем, обеспечивающий пропорциональность его световой энергии значению входного сигнала (или его части, определяемой разрядным представлением сигнала).

В другом варианте данные, представленные в соответствующей разрядной сетке, могут вводиться в ОСП в виде пространственного распре-

деления плотности, коэффициента преломления или иного параметра модулирующей среды, которая, будучи освещена светоизлучателем, обеспечивает пространственное распределение света, пропорциональное входным данным. Пространственный оптический сигнал поступает в блок декремента индекса, который будет рассмотрен ниже. Первый блок статической переадресации направляет входные световые потоки на соответствующие области модулятора. При этом обеспечивается умножение входных данных на коэффициенты, хранящиеся в памяти ОСП и записываемые в виде пространственного распределения пропускания модулятора, пропорционального коэффициентам. Индексы сомножителей определяются пространственным представлением входных данных и коэффициентов. При изменении взаимного положения входного массива и поля коэффициентов происходит переиндексация коэффициентов (декремент, инкремент), необходимая для реализации многих алгоритмов обработки. Техническая реализация блока декремента индексов коэффициентов может быть различной: акустооптический модулятор, сдвиговые регистры и т. д.

После модулятора световые потоки попадают на второй блок переадресации, работающий совместно с блоком декремента индекса выходных данных. Последний, как правило, разрабатывается на основе ПЗС-приборов и выполняет следующие функции: а) формирует зарядовый рельеф, пропорциональный световым потокам, падающим на фоточувствительную поверхность; б) смещает этот рельеф с темпом переиндексации данных; в) суммирует световые потоки по мере смещения зарядового рельефа.

Второй блок переадресации суммирует световые потоки в соответствии с алгоритмом и направляет их в заданные области фоточувствительной среды ПЗС-матрицы. Совокупность операций декремента индексов данных и статической переадресации последних позволяет производить не только практически произвольную переиндексацию массивов, но и обработку их в конвейерном режиме.

Рассмотрим реальные варианты настройки (программирования) ОСП на решение тех или иных задач. Предварительно отметим следующее. Алгоритмы обработки сигналов удобно представлять в виде графов потока сигналов (ГПС) [3]. Обозначения в ГПС расшифруем по ходу описания первого примера программирования ОСП — настройки на обработку сигналов фильтрами с конечно-импульсной характеристикой (КИХ-фильтрами).

**1. Настройка ОСП на многоканальную КИХ-фильтрацию.** Эта операция описывается выражением

$$Y(k) = \sum_{l=1}^L x_n(k-l) g_{nl}, \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

ГПС для реализации этого алгоритма приведен на рис. 2. Обрабатываемый вектор  $X(m) = [x_1(m), x_2(m) \dots x_N(m)]$ , где  $n$  — индекс составляющей вектора;  $m$  — временной индекс. Черная точка на ГПС — это операционная вершина графа, она обозначает арифметическую операцию; ребро графа, помеченное буквой  $D(2D, 3D, \dots)$ , соответствует задержке сигнала на один (два, три...) такта. Ребро, помеченное строчной буквой  $(a, b, g, \dots)$ , обозначает умножение на соответствующую константу.

Из вида ГПС для КИХ-фильтрации сразу же следуют некоторые особенности настройки ОСП для решения данной задачи. Очевидно, что каналы обработки независимы (нет перекрестных связей), декремент индексов входных данных осуществляется путем формирования векторов — временных срезов сигналов по  $N$  каналам. Ребра  $D$  расположены после ребер умножения на коэффициенты  $g$ . Таким образом, декремент индексов коэффициентов отсутствует, осуществляется лишь декремент индексов выходных данных.

Схема многоканальной КИХ-фильтрации в ОСП представлена на рис. 3. Формат светоизлучателей (СИ) — линейка. Первый блок пере-

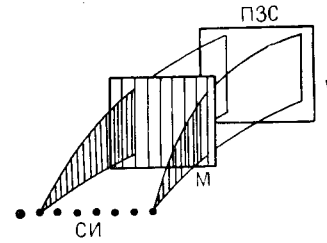
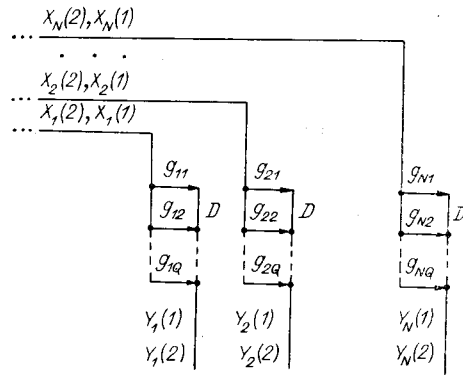


Рис. 3

Рис. 2

адресации транслирует светящуюся точку в линию. На модуляторе (М) записываются ядра преобразований  $g_{ni}$ . Второй блок переадресации проецирующий (точка в точку). Декремент выходных данных осуществляется за счет выполнения выходного блока в виде ПЗС-матрицы в режиме временной задержки с накоплением (ВЗН).

**2. Настройка ОСП на обработку сигналов, передаваемых с помощью распространяющихся в пространстве волн.** Этот вид обработки широко распространен в сейсмологии, геофизике, радиолокации, гидроакустике и т. д. [4]. Задача заключается в выделении компонент сигнала, распространяющихся в определенном направлении (она называется иногда формированием луча). Если волны детектируются решеткой приемников, то простейшим методом формирования луча является взвешенное сложение с задержкой. Оно определяется выражением

$$Y_m(k) = \sum_{n=1}^N x_n(k - \tau_{mn}(k)),$$

где  $(x_1 \dots x_N)$  — вектор значений сигналов, принимаемых решеткой из  $N$  приемников;  $k$  — временной индекс;  $m$  — номер луча.

Граф потока сигналов, соответствующий этой задаче, представлен на рис. 4, где  $D_{mn} = D(\tau_{mn} - \tau_{m, n-1})$ ,  $\tau_{m, 0} = 0$ . Из вида ГПС можно сделать следующие выводы:

в формировании каждого луча участвуют все входные каналы, и формирование от каждого канала является функцией двух аргументов: номера выходного канала (луча) и задержки  $\tau_{mn}(k)$ ;

декремент индексов входных данных осуществляется за счет развития входного сигнала во времени, необходим декремент индексов выходных данных.

Одна из возможных схем настройки ОСП для решения описанной выше задачи приведена на рис. 5. Формат светоизлучателей — матрица. Энергия каждого светоизлучателя транслируется на часть модулятора,

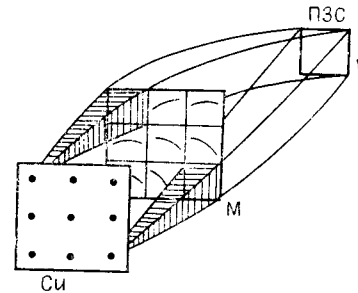
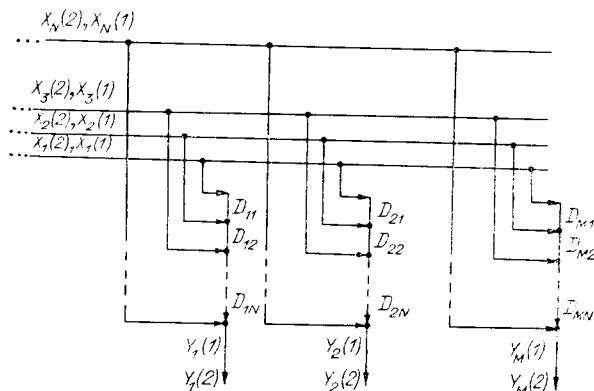


Рис. 5

Рис. 4

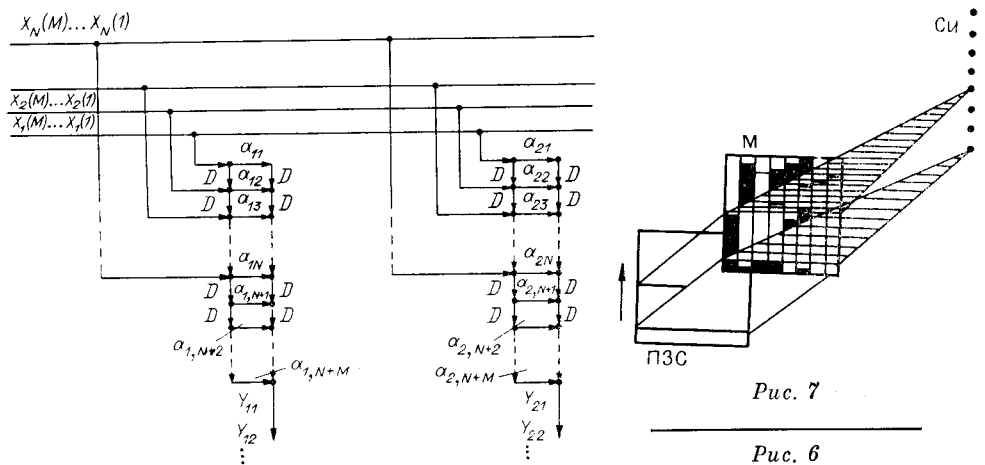


Рис. 7

Рис. 6

представляющую собой двумерную область с координатами  $m, k$ . Всего областей  $N$ , т. е. первый блок переадресации — «точка — двумерная область». Каждая область на модуляторе представляет собой маску, формирующую световой поток в виде линии, конфигурация которой зависит от расположения датчиков, генерирующих обрабатываемые сигналы. Затем все области совмещаются в одну на фоточувствительном слое ПЗС-матрицы, обеспечивающей декремент индекса  $k$ , т. е. второй блок переадресации — « $N$  областей — одна область». Результирующий сигнал представляется в виде массива  $m \times k$ , где  $m$  — номер луча;  $k$  — временной индекс.

**3. Настройка ОСП на многоканальный спектральный анализ данных.** Пусть требуется провести спектральный анализ данных, поступающих одновременно по  $N$  каналам, т. е. вычислить коэффициенты Фурье:

$$Y_{kn} = \sum_{m=1}^M x_n(m) a_k(m),$$

где

$$a_k(m) = \sin mk/M, \quad k = 1, 3, 5, \dots, N-1; \quad a_k(m) = \cos mk/M, \\ k = 0, 2, 4, \dots, N.$$

Из всех возможных вариантов спектрального анализа выберем тот, который соответствует идеологии ОСП, определяемой набором базовых операций. ГПС для этого варианта представлен на рис. 6.

Перечислим основные его особенности:

декремент индексов входных данных осуществляется за счет развития процессов во времени;

в ГПС ребро умножения на константу расположено между двумя ребрами с индексом  $D$ , следовательно, необходим декремент индексов как коэффициентов, так и выходных данных;

столбцы выходных данных соответствуют различным спектральным составляющим (коэффициентам синус- и косинус-разложения), строки — различным каналам.

С первого взгляда на ГПС кажется, что в формировании фурье-разложения по каждому каналу участвуют все каналы, на самом же деле это не так: за счет того, что декремент индексов осуществляется и для коэффициентов, и для выходных данных, входные и выходные потоки перемещаются синхронно, без «перепутывания», в то время как коэффициенты остаются на месте, за счет чего и получается эффект умножения сигнала на скользящую синусную или косинусную составляющую.

Схема ОСП для спектрального анализа приведена на рис. 7. Источник излучения представляет собой линейку светоизлучателей, ориентированную по направлению сдвига заряда в ПЗС-матрице. Энергия каждого светоизлучателя трансформируется в линию, перпендикулярную ориентации линейки, т. е. первый блок переадресации — «точка — линия».

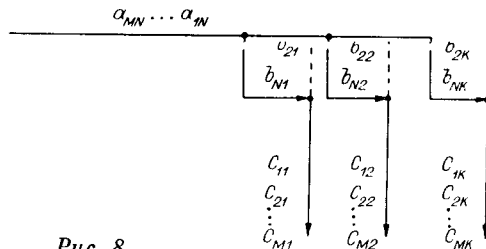


Рис. 8

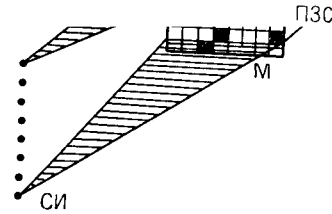


Рис. 9

В течение интервала дискретизации сигнала, который будем называть тактом, светятся  $N$  светоизлучателей ( $N$  — число каналов), соответствующий временному срезу сигналов. По окончании такта следующий временной срез сдвигается по линейке светоизлучателей на одну позицию, что и соответствует декременту коэффициентов. Синхронно и в том же направлении смещается и зарядовый рельеф ПЗС-матрицы.

Модулятор представляет собой маску с функциями пропускания в направлении сдвига зарядов, пропорциональными  $(1 + \sin nk/N)$  и  $(1 + \cos nk/N)$ . Второй блок переадресации обеспечивает проецирование светового распределения с модулятора на фоточувствительную поверхность ПЗС-матрицы (адресация «точка — точка»).

4. **Настройка ОСП на матричное умножение.** Пусть требуется найти результат умножения двух матриц  $C = A \times B$ , т. е. элементы матрицы

$$C_{mk} = \sum_{n=1}^N a_{mn} b_{nk}.$$

ГПС для матричного умножения в идеологии ОСП представлен на рис. 8. Основные особенности графа:

одна из матриц (на рисунке — матрица  $A$ ) вводится в ОСП со сдвигом строк, т. е. каждая последующая строка поступает в процессор со сдвигом на один элемент по отношению к предыдущей, в результате прямоугольная матрица превращается в ромбовидную;

декремент коэффициентов отсутствует, осуществляется лишь декремент индексов выходных данных синхронно с поступлением входных;

формат выходных данных — прямоугольная матрица, выводящаяся из ОСП построчно, в темпе ввода матрицы-множимого, с задержкой, определяемой размерностями матриц множимого и множителя (задержкой конвейера).

Настройка ОСП для реализации ГПС матричного умножения представлена на рис. 9. Входной блок — линейка светоизлучателей. Первый блок переадресации трансформирует энергию светоизлучателя в линию (тип адресации — «точка — линия»). На модуляторе записана матрица  $B$ . Второй блок переадресации проецирующий («точка — точка»). Матричный множитель в ОСП-идеологии по структуре является одним из самых простых устройств, предложенных для этих целей.

5. **Настройка ОСП на двумерную свертку (корреляцию) изображений** [5]. Эта операция описывается выражением

$$Y(k, l) = \sum_m \sum_n x(k - m, l - n) g(m, n).$$

ГПС данного преобразования изображен на рис. 10. Основные его особенности: входные сигналы являются строками одного из формируемых изображений; декремент индексов входных данных производится за счет построчного сканирования изображения; декремент индекса коэффициентов отсутствует и осуществляется лишь декремент индексов вы-

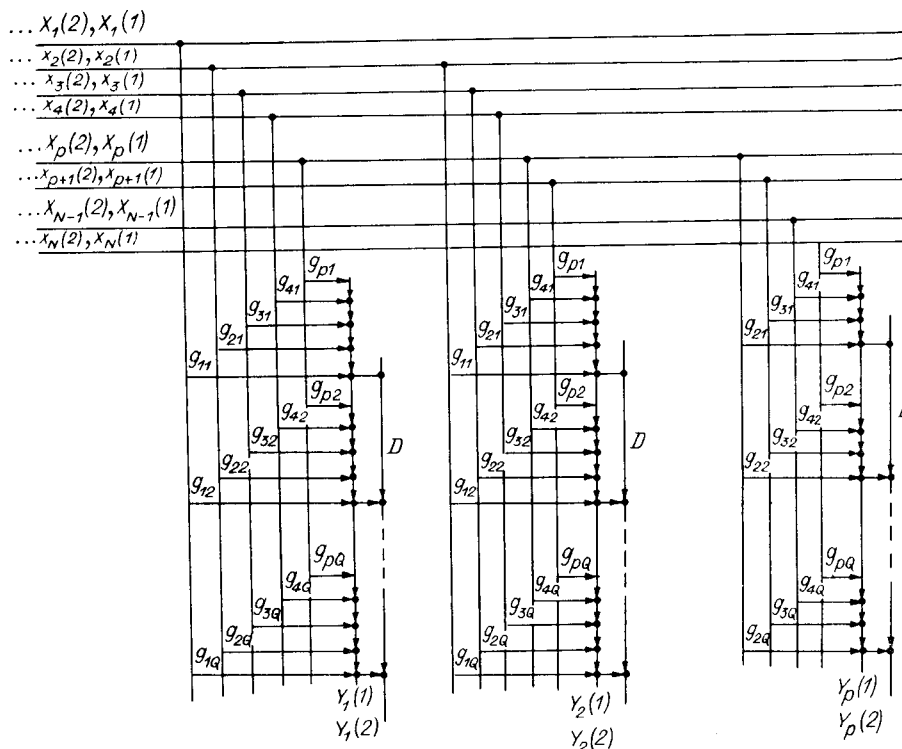


Рис. 10

ходных данных; выходной сигнал представляет собой построчно выводимую двумерную корреляционную функцию.

Настройка ОСП на двумерную корреляцию представлена на рис. 11. Формат светоизлучателей — матрица. Первый блок переадресации трансформирует поток с каждого светоизлучателя на всю область модулятора, тип адресации — «точка — плоскость». На модуляторе записывается маска, пропускание которой пропорционально ядру  $g(m, n)$ . Второй блок переадресации осуществляет проекцию плоскости модулятора на фоточувствительную поверхность ПЗС-матрицы так, что изображение, записанное на модуляторе и восстанавливаемое светоизлучателем с номером  $m$ , сдвинуто относительно изображения, восстановленного первым излучателем, на расстояние  $(m-1)d$ , где  $d$  — размер элемента разрешения изображения. Тип адресации — «точка — сдвинутая точка», где сдвиг определяется номером светоизлучателя, формирующего эту точку. Путем такой адресации вычисляется одномерная корреляционная функция строки изображения и ядра, записанного на модуляторе. Корреляция по другой координате осуществляется обычным для ОСП методом — путем декремента индексов выходных данных (см. п. 1).

Таким образом, в настоящей работе показано, что предложенная структура оптико-электронного сигнального процессора позволяет при одной и той же базовой структуре перепрограммировать его на решение широкого класса задач обработки изображений и сигналов. В частности, приведены примеры настройки ОСП для решения пяти различных задач.

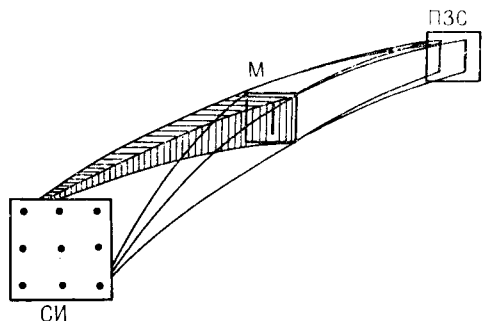


Рис. 11

Технические решения вариантов настройки ОСП для трех задач из пяти, перечисленных выше, а также результаты экспериментальных исследований этих вариантов приведены в [6].

Известно, что одной из основных проблем аналоговой вычислительной техники является проблема точности вычислений. Покажем, что в ОСП она не стоит так остро, как в других устройствах такого типа. Входной сигнал в ОСП полностью дискретизирован в пространстве, так как он формируется набором дискретных излучателей. Аналогично дискретизирован выходной сигнал, так как считывается он дискретным прибором — ПЗС-матрицей. Как правило, дискретизированы также устройства переадресации и модуляции светового потока. Таким образом, ОСП является вычислителем, полностью дискретизированным по пространству, т. е. «перепутывание» каналов, существенно ухудшающее параметры аналоговых вычислителей, здесь исключается. Эта же дискретизация дает возможность радикального повышения точности ОСП, если ввести разрядно-аналоговое кодирование, т. е. представить входную информацию в двоичном виде, каждый разряд обработать отдельно, а окончательный результат получить путем взвешенного суммирования результатов обработки отдельных разрядов.

Будущее ОСП связано с развитием элементной базы. Так, с созданием линеек и матриц светоизлучателей в интегральном исполнении существенно уменьшатся габариты ОСП. Важнейшим узлом ОСП является блок адресации. Оптимальный вариант статического блока адресации световолоконный. Очевидно, в будущем можно будет говорить и о динамическом блоке адресации, выполненном, например, на основе оперативных голограмм или набора ключей — модуляторов света. Такие узлы позволят оперативно перепрограммировать ОСП, что, конечно, существенно повысит его функциональные возможности. Прогресс в области пространственных модуляторов уже в ближайшем будущем позволит решить задачу оперативного ввода в ОСП матриц коэффициентов или ядер преобразований. Наконец, один из самых главных элементов ОСП — ПЗС-матрица — также должен быть разработан под структуру ОСП. Сейчас быстродействие ОСП ограничивается в основном скоростью вывода информации с ПЗС-матрицы (~10 МГц). В специализированной матрице этот параметр можно будет увеличить на один-два порядка [7], пропорционально увеличится и быстродействие ОСП. В будущем ОСП видится как «сэндвич», состоящий из набора элементов в интегральном исполнении — светоизлучателей, модуляторов, ПЗС-структур, коммутаторов. Такие процессоры будут аналогичны электронным ЦСП в варианте СБИС, однако с быстродействием на два-три порядка выше, чем у последних.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нежевенко Е. С. Оптико-электронные сигнальные процессоры // Тез. докл. I Всесоюз. конф. по оптической обработке информации.— Л.: ЛИАП, 1988.
2. Коул Б. К. Цифровые методы и средства в обработке сигналов // Электроника.— 1985.— № 18.
3. Гунь Сунъюань. Систематические и волновые матричные процессоры для высокопроизводительных вычислений // ТИИЭР.— 1984.— 72, № 7.
4. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов.— М.: Мир, 1988.
5. Гофман М. А., Коржов Е. И., Нежевенко Е. С., Полежаев В. В. Оптико-электронный конвейерный коррелятор изображений // Тез. докл. на 6 Всесоюз. школе-семинаре по оптической обработке информации.— Фрунзе: ФПИ, 1986.
6. Гиблина Л. А., Гофман М. А., Нежевенко Е. С., Фельдбуш В. И. Экспериментальное исследование оптико-электронных сигнальных процессоров в режиме обработки изображений и сигналов // Автометрия.— 1989.— № 3.
7. Технология ПЗС-интегральных микросхем: Обзор ВИНТИ.— М., 1986.

*Поступила в редакцию 22 декабря 1988 г.*