

времени измерения, установленному для первого и второго режимов, что позволяет прямо сопоставлять результаты измерений. Результаты представлены на рис. 2. Здесь $\hat{D}_1(\tau)$, $\hat{D}_2(\tau)$ и $\hat{D}_3(\tau)$ — оценки дисперсий, полученные экспериментально во всех трех режимах: однолучевом, двухлучевом с фиксированным временем измерения и двухлучевом с фиксированным интегралом в опорном канале. Как и следовало ожидать, в первом режиме ошибка практически не зависит от интенсивности источника, а определяется его нестабильностью, поэтому приведен только результат, полученный при $M(\gamma) = 1$ (кривая 1). Кривые 2—4 соответствуют измерениям во втором режиме при $M(\gamma) = 1; 0,6$ и $0,4$. Здесь ошибка увеличивается пропорционально $M^{-1}(\gamma)$, причем проверка зависимости D от τ по методу наименьших квадратов показывает, что дисперсия действительно описывается выражением $a_1\tau + a_2\tau^2$, как и в первом режиме, что подтверждает (9) и (14). В третьем режиме тоже отмечается некоторая зависимость ошибки от интенсивности, но, во-первых, она много слабее, чем во втором режиме, а во-вторых, имеет другой характер. Если при $M(\gamma) = 1$ ошибка также подчиняется описанию $a_1\tau + a_2\tau^2$ (кривая 5), то при $M(\gamma) = 0,6$ и $M(\gamma) = 0,4$ требуется описание $a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2$ (кривой 6 показано поведение ошибки при $M(\gamma) = 0,4$). Это может быть связано с влиянием неучтенных темновых токов ФЭУ, которые при увеличении среднего времени измерения (неизбежном в третьем режиме при уменьшении интенсивности источника света) могут вносить все больший вклад в интегралы как опорного, так и измерительного сигнала. В целом же результаты эксперимента подтверждают оценки (8), (9), (13), (14), (19), (20) ошибок, возникающих при различных способах измерения коэффициента пропускания образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васьков С. Т., Мамонтов Г. М., Поташников А. К., Ткач С. Е. Сканирующие устройства на ЭЛТ высокого разрешения.— Новосибирск: Наука, 1978.
2. Харрис Т. Теория ветвящихся случайных процессов.— М.: Мир, 1966.
3. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения.— М.: Мир, 1967, т. 2.
4. Косых В. П., Поташников А. К. Машинный комплекс для обработки изображений микрообъектов.— В кн.: Тез. докл. I Всесоюз. конф. «Статистические свойства микрообъектов». М., 1978.

Поступила в редакцию 22 мая 1984 г.

УДК 681.327.68 : 621.383

С. И. НАЙМАРК
(Новосибирск)

ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ МДП-ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФОТОДИОДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Многоэлементные МДП-интегральные фотодиодные преобразователи (МИФП) оптических сигналов (ОС) — значительное достижение интегральной МДП-технологии. В настоящее время ясно, что МИФП — это не столько твердотельные аналоги вакуумных фоточувствительных трубок, появившиеся вследствие прогресса МДП-технологии, сколько новый класс приборов, обеспечивающих функциональную предобработку опти-

ческой информации непосредственно в процессе преобразования ее в электрические сигналы. Одним из наиболее распространенных видов обработки ОС являются линейные преобразования.

Если рассматривать работу любого типа МИФП на ограниченном интервале времени Θ , в течение которого ОС мало изменяется, то преобразование заключается прежде всего в пространственной дискретизации сигналов. С математической точки зрения этот процесс эквивалентен проекции бесконечномерного сигнала на конечномерную систему координат [1], число осей которой совпадает с числом элементарных фотоприемников МИФП. Эта исходная система координат определяется расположением и размерами элементарных фотоприемников в плоскости кристалла интегральной схемы (ИС), задающих дискретизирующий растр для ОС. В такой системе ОС представлен в виде вектора, число координат которого равно числу элементарных фотоприемников МИФП.

Синтез структурной схемы МИФП удобно отождествить с реализацией линейного преобразования от исходной системы координат к новой системе, удобной для получателя информации. В простейшем случае можно организовать МИФП таким образом, чтобы обеспечить поэлементное (одно за другим) подключение элементарных фотоприемников к общему выходу. В этом случае функционирование МИФП сводится к разложению ОС по базису δ -функций.

Однако ничто не мешает организовать МИФП таким образом, чтобы обеспечивалось подключение элементарных фотоприемников к общему выходу в произвольных комбинациях и последовательности. В этом случае МИФП осуществляет некоторое линейное преобразование ОС. Выходные сигналы такого МИФП есть координаты вектора ОС в конечномерной системе координат, задаваемой структурной схемой [2], или спектральное преобразование ОС, а выбор некоторой части компонент преобразованного сигнала эквивалентен его пространственной фильтрации.

Подобное описание МИФП очень удобно, так как, используя аппарат линейных преобразований, можно построить модель, включающую самые разнообразные типы МИФП, предназначенные для получения видеосигнала (аналогично телевизионной трубке с электронно-лучевой разверткой) и для спектральных преобразований или пространственной фильтрации ОС и т. п.

МДП-фотодиодные m -ячейки. Для того чтобы дальнейшее изложение имело ясную микросхемотехническую основу, в качестве элементной базы МИФП будет рассмотрен МДП-фотодиод [3].

Хотя допустимы самые произвольные соединения МДП-фотодиодов в фотоприемном блоке МИФП, с практической точки зрения наиболее важны регулярные структуры — фоточувствительные решетки. Используем для простоты наиболее сильное условие регулярности, а именно предположим, что каждый регулярный фрагмент решетки содержит только один элементарный фотоприемник. Фрагмент в соответствии с принятой в литературе терминологией будем называть фотоячейкой [3].

МДП-фотодиод [3] уже сам по себе может служить элементарной фотоячейкой. Его электрическая схема изображена на рис. 1, а. На рис. 1, б представлена эквивалентная схема, состоящая из генератора фототока i (величина которого пропорциональна интегральному значению светового потока, падающего на фотоприемную площадку фотодиода); барьерной емкости фотодиода C_D ; идеального ключа K ; его внутреннего сопротивления R_K .

Работа МДП-фотодиода крайне проста: при замыкании ключа на время τ по окончании переходного процесса через сопротивление ключа протекает ток i , который может быть измерен внешней схемой [3].

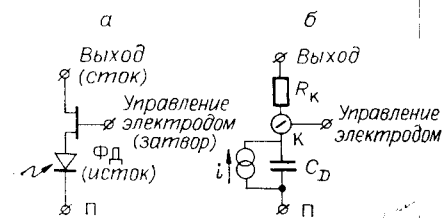


Рис. 1.

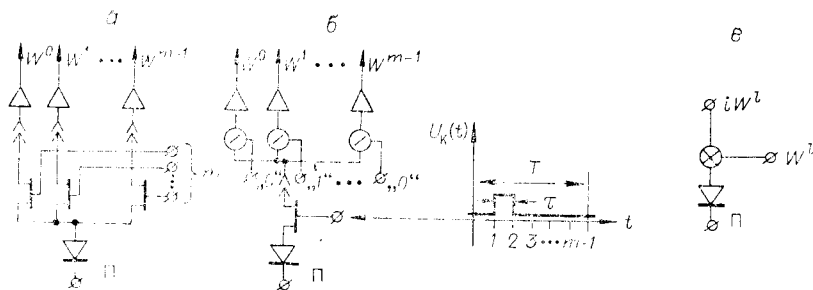


Рис. 2.

Функционально работа МДП-фотодиода эквивалентна умножению фототока i либо на 0 (ключ К разомкнут), либо на 1 (ключ К замкнут). Для представления выходного сигнала МИФП в произвольной системе координат необходимо позаботиться о расширении запаса весовых коэффициентов. Один из способов заключается в том, что в фотоячейке содержится m МДП-ключей (рис. 2, а). Замыкание каждого из них обеспечивает протекание фототока в соответствующей измерительной ветви, которой может быть приписано некоторое число, взятое из конечного множества $\{W^k\}$ ($k=0, 1, \dots, m-1$). В это множество необходимо добавить 0 (все m ключей разомкнуты). Коэффициенты $\{W^k\}$ можно реализовать на операционных усилителях (ОУ) (см. рис. 2, а). Такие фотоячейки будем называть параллельными m -ячейками.

Другой возможный способ основан на том, что для выборки одного отсчета сигнала из МДП-фотодиода отведен интервал времени $T \geq m\tau_D$, который разбивается на m подынтервалов длительностью $\tau \geq \tau_D$ (рис. 2, б)*. Величина фототока, измеренного на k -м подынтервале ($0 \leq k \leq m-1$), умножается на весовой коэффициент W^k . Это можно сделать, например, с помощью демультиплексора (см. рис. 2, б), в котором k -й ключ замыкается в k -й момент времени, а к k -му выходу демультиплексора подключен ОУ с заданным масштабным коэффициентом усиления. Такие фотоячейки будем называть последовательными m -ячейками.

Ясно, что в m -ячейках в качестве весовых коэффициентов можно применять произвольный конечный набор чисел (включая комплексные). Количество задаваемых коэффициентов равно $m+1$. Обыкновенная МДП фотодиодная ячейка, рассмотренная в начале этого раздела, представляет собой частный случай m -ячейки при $m=1$ с множеством весовых коэффициентов $\{0, 1\}$. Для изображения m -ячеек будем использовать символическую схему, показанную на рис. 2, в.

Фоточувствительные решетки m -ячеек. Пусть на полупроводниковом кристалле размещены M m -ячеек, пронумерованных натуральными числами от 1 до M . Если фотоячейки никак не связаны друг с другом (исключая соединения по подложке), то такая примитивная решетка обладает, очевидно, максимальной функциональной гибкостью. Однако уже для сравнительно небольшого числа фотоячеек ($M \approx 10^3$) реализация подобной решетки практически невозможна из-за большого числа внешних выводов, для сокращения которого необходимо введение некоторой электрической сети межсоединений. Идея организации сети может быть позаимствована из многоканальных систем связи, в которых используется временное уплотнение каналов с помощью $m_1 \times m_2$ -мультиплексора. Ключи МДП-фотодиодов объединяются в мультиплексную схему, которая образует структуру, аналогичную фоточувствительной $m_1 \times m_2$ -решетке МИФП, содержащей m_1 управляющих и m_2 выходных каналов.

* Для упрощения предполагается, что экспоненциальный вид переходного процесса линеаризован; тогда его длительность в точности равна $R_{in}C_D = \tau_D$.

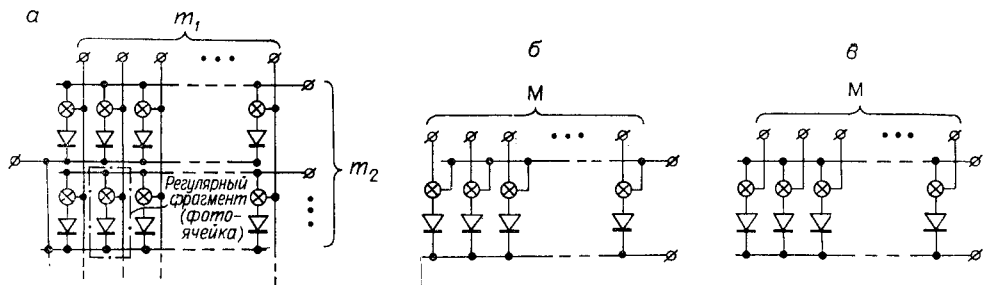


Рис. 3.

Для случая $m = 1$ в работе [4] исследованы решетки, по существу представляющие собой $m_1 \times m_2$ -мультиплексор ($m_1 m_2 = M$), изображенный на рис. 3, а с помощью символической схемы. Легко видеть, что в такой $m_1 \times m_2$ -решетке есть доступ к каждому элементарному фотоприемнику независимо от остальных, осуществляемый выбором одного из m_1 управляющих и одного из m_2 выходных каналов. Общее число внешних выводов решетки уменьшено с $M + 1$ до $m_1 + m_2 + 1$ и минимально при $m_1 = m_2 = \sqrt{M}$.

Существует два крайних случая: 1) $m_1 = 1$, $m_2 = M$ (рис. 3, б), при этом решетка имеет M выходных электродов и является мозаичным многоэлементным фотоприемником [5]; 2) $m_1 = M$, $m_2 = 1$ (рис. 3, в) — решетка содержит только один выходной электрод, т. е. представляет собой $M \times 1$ -мультиплексор с M управляющими электродами.

Рассмотрим функционирование мультиплексной $m_1 \times m_2$ -решетки с произвольным алгоритмом выборки [4], который можно компактно описать линейным преобразованием (уравнением выборки)

$$\mathbf{I}' = C\mathbf{I}, \quad (1)$$

где \mathbf{I}' — вектор выходного сигнала решетки; \mathbf{I} — вектор, компонентами которого являются выходные сигналы фотоячеек; C — матрица линейного преобразования (матрица выборки).

Очевидно, что при $m = 1$ матрица C состоит из нулей и единиц (каждая строка матрицы есть двоичный код коммутации ключей выборки в фотоячейках).

Для восстановления по вектору \mathbf{I}' вектора \mathbf{I} достаточно того, чтобы матрица выборки была невырожденной. Тогда векторное уравнение выборки эквивалентно системе линейно-независимых уравнений, описывающих связь выходных сигналов фотоячеек и решетки.

Переход от $M \times 1$ - к $m_1 \times m_2$ -решеткам приводит к разложению матрицы выборки в кронекерово произведение двух матриц:

$$C_{[M \times M]} = C_{[m_1 \times m_1]} \otimes P_{[m_2 \times m_2]}. \quad (2)$$

Здесь матрица $C_{[m_1 \times m_1]}$ описывает алгоритм выборки, а $P_{[m_2 \times m_2]}$ — перестановку m_2 выходных каналов. Матрица $C_{[m_1 \times m_1]}$ является «динамическим» сомножителем в правой части (2), так как каждая ее строка генерируется во времени в течение одного такта выборки, а для генерации m_1 строк требуется m_1 тактов. Матрица $P_{[m_2 \times m_2]}$ — «статический» сомножитель, реализуемый в структуре межсоединений и не зависящий от времени.

Рассмотрим теперь случай произвольного $m > 1$, соответствующий расширенному множеству весовых коэффициентов выборки $\{W^k\}$, которые могут быть заданы одним из способов, изображенных на рис. 2, а, б.

Очевидно, что справедливость выражений (1) и (2) сохраняется, однако элементами матрицы выборки являются числа $\{W^k\}$ и 0. Поскольку набор $\{W^k\}$ фиксирован, то справедливо разложение

$$C = \sum_{k=0}^{m-1} W^k C_k, \quad (3)$$

где C_k содержит в качестве своих элементов «1» в позициях, в которых в матрице C располагаются числа W^k , и «0» — во всех остальных позициях. Матрицы C_k , состоящие только из «0» и «1», по существу являются алгоритмом выборки. Соотношение (3) представляет решетку как суперпозицию решеток с $m = 1$.

Сумму в правой части (3) можно реализовать в суммирующем устройстве, подключенном к каждому из m выходов тех каналов, которые входят в состав схемы обрамления МИФП. В случае параллельных m -ячеек это устройство является устройством параллельного типа и временное уплотнение каналов задает ограничение на длительность коммутации τ :

$$\tau_D \leq \tau \leq \Theta/m_1, \quad (4)$$

Θ — длительность кадра.

В случае последовательных m -ячеек устройство суммирования имеет последовательный тип, сумма накапливается за m тактов коммутации $T = m\tau$. Тогда

$$\tau_D \leq \tau \leq \Theta/m_1. \quad (5)$$

Структура матрицы выборки $C_{[M \times M]}$ определяется разложением (2) независимо от конкретного вида матрицы $C_{[m_1 \times m_1]}$ и включает m_2 квадратных блоков. При $m_1 = M$ и $m_2 = 1$ матрица $C_{[M \times M]}$ состоит из одного блока размерностью $M \times M$, а в случае $m_1 = 1$ и $m_2 = M$ — из матрицы $P_{[M \times M]}$. Легко видеть, что регулярная структура матрицы $C_{[M \times M]}$ однозначно соответствует регулярной структуре $m_1 \times m_2$ -решетки.

Ортогональные решетки m -ячеек. С энергетической точки зрения наиболее выгодна решетка типа $1 \times M$ (см. рис. 3, б). В ней максимально распараллелены выходные каналы и возможно использование полной длительности кадра для экспозиции всех отсчетов ОС, так как нет необходимости во временном уплотнении. Однако такая решетка обладает двумя существенными недостатками: большим числом внешних выводов (не менее $1 + M$), наличием только одного способа выборки (эквивалентного поэлементной выборке и описываемого матрицей $P_{[M \times M]}$).

Представляет практический интерес разработка схемы такой решетки, которая соединяла бы в себе энергетические преимущества параллельной решетки с функциональной гибкостью, представляемой динамическим множителем (2), и с уменьшением числа внешних выводов $m_1 \times m_2$ -решетки. Подобные решетки при определенных условиях адекватны ортогональному преобразованию.

Для параллельных m -ячеек таким условием является то, что в каждый момент времени (исключая конечное число моментов переключения) замкнут ровно один ключ (см. рис. 2, а) и отсутствует ситуация, когда все ключи разомкнуты. Для последовательных m -ячеек необходимо, чтобы ключ обязательно замыкался ровно один раз на интервале выборки T (см. рис. 2, б).

Физический смысл условия проще всего рассмотреть для решетки на параллельных m -ячейках. Так как в каждой ячейке решетки обязательно замкнут только один ключ, то фототоки от всех ячеек постоянно протекают через сопротивления ключей R_k (см. рис. 1, б). Значение фототока не зависит от того, через какой ключ m -ячейки он протекает. Следовательно, мгновенная мощность, рассеиваемая на сопротивлениях ключей R_k , всегда постоянна и равна

$$P = R_k \sum_{j=1}^M i_j i_j^* = R_k (\mathbf{I}, \mathbf{I}) = \text{inv}, \quad (6)$$

где $j = 0, 1, \dots, M$ — номер фотоячейки в решетке; * — знак комплексного сопряжения.

Для решетки на последовательных m -ячейках формула (6) выражает инвариантность средней на интервале T мощности, рассеиваемой на сопротивлениях ключей R_k . Действительно, пока ключ K в последовательной m -ячейке разомкнут, на емкости C_D (см. рис. 1, б) накопи-

вается реактивная мощность, которая рассеивается при замыкании ключа. Так как ключ на интервале T замыкается ровно один раз, то это гарантирует постоянство средней мощности.

Весовые коэффициенты ортогональной выборки можно представить в явном виде, используя $1 \times M$ -решетку, изображенную на рис. 3, в, и уравнение (6):

генерация кодов выборки, где время цикла связано с длительностью кадра Θ ; генерация коэффициентов W^k также воспроизводится циклически и описывается системой уравнений: $LW^0 = W^1$; $LW^1 = W^2$; ...; $LW^{m-1} = W^m = W^0$, L — циклический оператор, определяемый из уравнения $L^{m-1} - 1 = 0$.

Решениями этого уравнения являются m первообразных корней из единицы, а также все их степени от 0 до $m - 1$. Полагая

$$W^k = W^{jl} = e^{2\pi i j l / m}, \quad (8)$$

имеем

$$W^{k*} = W^{j'l'} = e^{-2\pi i j' l' / m} = e^{2\pi i l'(m-j) / m} = e^{2\pi i (m-1) j' l' / m}, \quad (9)$$

где $k = jl \pmod{m}$.

В общем случае $m_1 \times m_2$ -решетки на матрицу выборки накладываются условия, касающиеся расположения элементов (8) и (9) в матрице. Они особенно наглядны для $M \times 1$ -решетки. Из (1) и (6) следует [8] $(\mathbf{I}', \mathbf{I}') = (\mathbf{C}\mathbf{I}, \mathbf{C}\mathbf{I}) = (\mathbf{C}\mathbf{C}^*\mathbf{I}, \mathbf{I})$. Откуда

$$\mathbf{C}^* = \mathbf{C}^{-1}, \quad (10)$$

т. е. матрица выборки должна быть унитарной [6]. Поиск различных унитарных матриц с дискретным набором элементов вида (8), (9) является самостоятельной задачей теории дискретных сигналов. Воспользуемся известным в литературе классом унитарных матриц или классом функций Виленкина — Крестенсона (ВКФ) [7]. ВКФ задаются на интервале $[0, M = m^2]$. При $m = 2$ ВКФ переходят в функции Уолша, при $m = M$ — в дискретные экспоненциальные функции [7], применяемые для дискретного преобразования Фурье.

Так как единичная матрица формально удовлетворяет (10), то МИФП с поэлементной выборкой также являются ортогональными и представляют собой их частный случай при $m = 1$. Для МИФП с поэлементной выборкой параллельная и последовательная m -ячейки неразличимы, однако здесь появляется новая возможность — реализация принципа накопления. Этот принцип широко используется в телевизионных системах, в случае МДП-фотодиода он заключается в измерении пикового значения выходного тока в переходном процессе замыкания ключа выборки [3]. Таким образом, для ортогональных МИФП при $m = 1$ имеется два варианта считывания сигнала: в режиме мгновенного действия (измерение фототока по окончании переходного процесса), в режиме накопления (во время переходного процесса).

Разделимые решетки m -ячеек. При обработке изображений с помощью ЭВМ применяют разделимые матрицы [8]. Если число элементов изображения равно M , то в общем случае матрица преобразования имеет размерность $M \times M$ и для реализации обработки требуются M^2 вычислений. Однако если матрица преобразования может быть представлена в виде кронекерова произведения матриц размерностью $\sqrt{M} \times \sqrt{M}$, то число вычислений сокращается до $2M$ [8].

Совершенно аналогично можно поставить вопрос о сокращении числа управляющих и выходных каналов с помощью организации раздели-

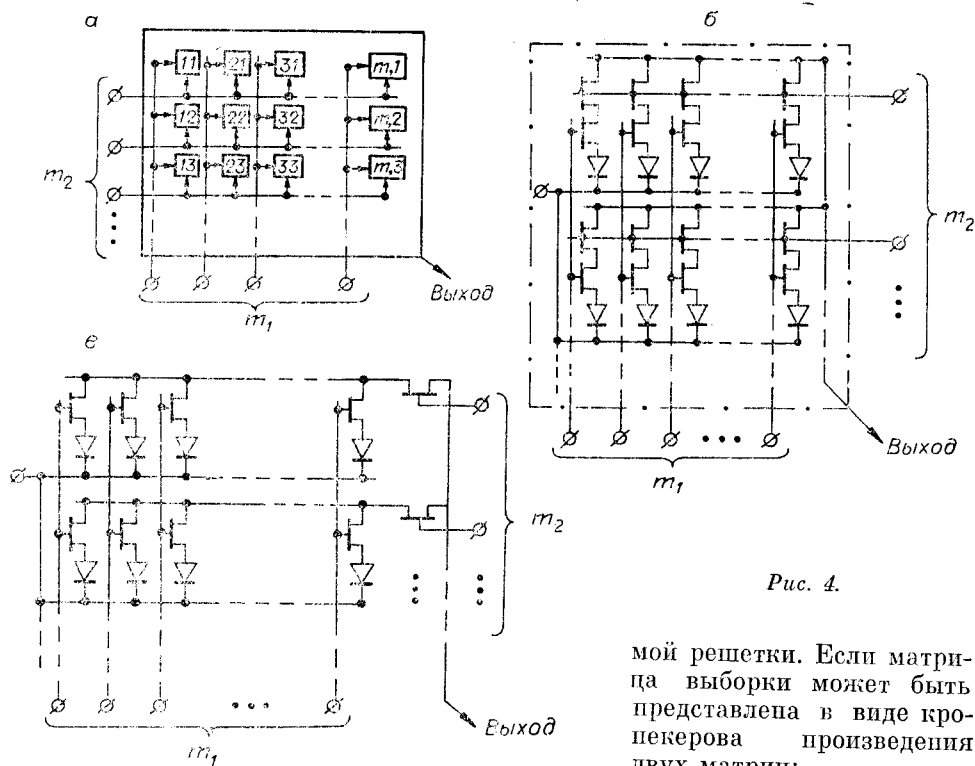


Рис. 4.

мой решетки. Если матрица выборки может быть представлена в виде крокерева произведения двух матриц:

$$C_{[M \times M]} = C_{[m_1 \times m_1]} \otimes \hat{C}_{[m_2 \times m_2]}, \quad (11)$$

где $m_1, m_2 \neq 1, M$, то число управляющих каналов решетки уменьшается с M до $m_1 + m_2$. Элементами матрицы $C_{[M \times M]}$ являются всевозможные попарные произведения элементов матриц $C_{[m_1 \times m_1]}$ и $\hat{C}_{[m_2 \times m_2]}$.

В соответствии с (11) уравнение выборки (1) трансформируется следующим образом:

$$I'_{[m_2 \times m_1]} = C_{[m_1 \times m_1]} I_{[m_2 \times m_1]} \hat{C}_{[m_2 \times m_2]}^T, \quad (12)$$

где $I_{[m_2 \times m_1]}$ — матрица размерностью $m_2 \times m_1$, составленная из выходных сигналов фотоячеек (используется с двухиндексной нумерацией фотоячеек в решетке (рис. 4, а)); $I'_{[m_2 \times m_1]}$ — матрица выходных сигналов решетки.

Для ортонормированного базиса при $m = 1$ разделимость реализуется последовательным соединением двух ключей выборки (рис. 4, б), так как в этом случае требуется лишь логическое перемножение двух чисел $\{0, 1\}$. Необходимо отметить, что мультиплексная $m_1 \times m_2$ -решетка при $m = 1$ с поэлементной выборкой также является разделимой, так как для нее выполняется соотношение (2), формально совпадающее с (11), где в качестве сомножителей использованы единичные матрицы. Поэтому схема, представленная на рис. 4, в, функционирует аналогично схеме рис. 4, б.

Для $m > 1$ существует уже гораздо больше степеней свободы при реализации разделимости. Один из путей заключается в аналогии со случаем $m = 1$. Используя символическую схему m -ячейки, легко построить две аналогичные рис. 4, б, в схемы при произвольном m . Попарные произведения элементов из матриц-сомножителей не должны выходить за пределы конечного множества весовых коэффициентов $\{W^k\}$. Так как имеется ровно m коэффициентов, то перемножение элементов матриц $C_{[m_1 \times m_1]}$ и $\hat{C}_{[m_2 \times m_2]}$ понимается как умножение по модулю m . При-

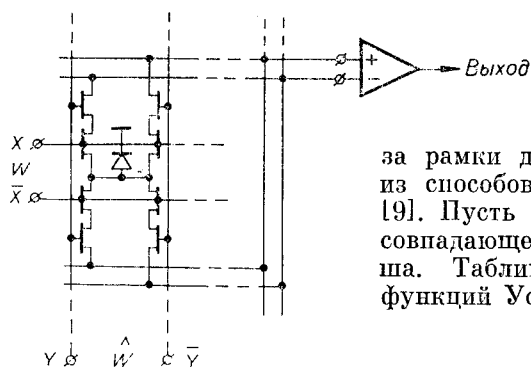


Рис. 5.

мером разделимых матриц, удовлетворяющих этому условию, являются ВКФ-матрицы [7].

Анализ всех методов реализации разделимости выходит за рамки данной работы. Рассмотрим один из способов для случая $m = 2$ на примере [9]. Пусть выборка ведется в базисе ВКФ, совпадающем при $m = 2$ с функциями Уолша. Таблица умножения двух значений функций Уолша имеет вид

$\hat{W} \backslash W$	-1	1
-1	1	-1
1	-1	1

Идея построения разделимой решетки полностью аналогична случаю $m = 1$ (см. рис. 4, б) и иллюстрируется рис. 5. Непосредственной проверкой легко убедиться, что в параллельной 2-ячейке, изображенной на рис. 5, фототок перераспределяется таким образом, что для первой и последней строк таблицы умножения сигнал направляется к инвертирующему входу дифференциального усилителя, а для двух средних строк — к инвертирующему. Таким образом реализуется умножение по модулю 2.

Сравнивая случай $m = 1$, где для ортогональной разделимости требуются только два ключа (см. рис. 4, б), со случаем параллельной 2-ячейки (см. рис. 5), где необходимо уже восемь ключей, легко видеть, что сложность схемы параллельной разделимой m -ячейки быстро растет с увеличением m . Эту трудность можно обойти с помощью разделимости, использованной в схеме рис. 4, в, либо переходом к последовательным m -ячейкам (или смешанным вариантам). Однако в последнем случае упрощение достигается за счет увеличения времени выборки или быстройдействия МДП-ключей (при сохранении того же времени выборки).

Заключение. В работе построена линейная модель МИФП, которая с помощью аппарата линейных преобразований M -мерной системы координат описывает как МИФП с самосканированием, являющиеся аналогами телевизионной трубки с разверткой, так и МИФП, реализующие линейную обработку сигналов (типа спектральных преобразований и фильтрации). Главную роль в анализе и синтезе структурной схемы МИФП играет матрица выборки, представляющая собой описание фоточувствительной решетки и схем обррамления.

При построении модели учитывались практические ограничения, связанные со стремлением сократить число внешних выводов фоточувствительной решетки и уменьшить сложность схем обррамления. С этой точки зрения наибольший практический интерес имеют ортогональные (унитарные) МИФП, впервые изучавшиеся авторами работ [10, 11] для случая $m = 2$ в базисе функций Уолша. Действительно, переход от энергетически наиболее выгодной параллельной структуры решетки, имеющей число выводов порядка M , к разделимой решетке со значительно меньшим числом выводов при сохранении энергетических преимуществ привел к структуре ортогональной решетки, адекватной унитарной матрице выборки. Поскольку элементная база для синтеза фоточувствительной решетки состоит из дискретного набора МДП-фотодиодов, то матрица выборки строится из чисел, взятых из конечного числового поля. Поиск конкретных типов унитарных матриц над конечным числовым полем по модулю m является самостоятельной задачей дискретной математики. К таковым, в частности, относятся ВКФ-матрицы [7].

В данной работе в явном (схемотехническом) виде изучались только фоточувствительные решетки МИФП, определяемые блочной структурой

матрицы выборки. Конкретный вид элементов матрицы выборки вполне определяет и тип схем обрамления. Хорошо известны схемотехнические реализации таких схем для самосканируемых МИФП с поэлементной выборкой ($m = 1$) и МИФП с выборкой в базисе ВКФ при $m = 2$ (генераторы функций Уолша). Используя ВКФ-базисы, аналогично можно построить и схемы обрамления для случаев $m > 2$.

МИФП в виде интегральной схемы, содержащей фоточувствительную решетку и схемы обрамления, представляет собой функционально законченный прибор, решающий конкретную задачу обработки оптической информации. С точки зрения использования такого прибора работа МИФП для случая произвольного m (в рамках разработанной модели) ничем не отличается от его самосканируемого варианта ($m = 1$), т. е. в течение длительности кадра Θ получатель регистрирует M коэффициентов Фурье (в случае МИФП с $m \geq 2$) или M пространственных отсчетов ОС (в случае $m = 1$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Френке Л. Теория сигналов: Пер. с англ./Под ред. Д. Е. Вакмана.— М.: Сов. радио, 1974.
2. Ахмед Н., Рао К. Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов.— М.: Связь, 1980.
3. Наймарк С. И. Многоэлементные МДП-интегральные фотодиодные преобразователи оптических сигналов. Ч. 1. Многоэлементные преобразователи на МДП-фотодиодных решетках.— М.: ЦНИИ «Электроника», 1983.
4. Наймарк С. И. Некоторые схемотехнические и структурные особенности многоэлементных МДП-интегральных фотодиодных устройств.— Автометрия, 1981, № 3.
5. Берковская К. Ф. и др. Фотоприемная мозаика с изолированными чувствительными элементами.— В кн.: Оптико-электронные методы обработки изображений.— М.— Л.: Наука, 1982.
6. Мальцев А. И. Основы линейной алгебры.— М.: Наука, 1975.
7. Трахтман А. М., Трахтман В. А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах.— М.: Сов. радио, 1975.
8. Эндрюс Г. Двумерные преобразования.— В кн.: Обработка изображений и цифровая фильтрация: Пер. с англ. М.: Мир, 1979.
9. Raith S. Матрица фотоприемников.— Заявл. 19.04.75, опубл. 13.01.77. Кл. Н04 п 3/14. ФРГ. Акцептованная заявка № 2517346.
10. Берковская К. Ф., Кириллова Н. В., Подласкин Б. Г., Столовичий В. М. Формирование интегральных признаков изображения на фотоприемной матрице.— В кн.: Оптико-электронные методы обработки изображений/Под ред. С. Б. Гуревича. Л.: Наука, 1982.
11. Григорьев Г. К., Подласкин Б. Г. Оценка точности дискретного преобразования Адамара, реализуемого на основе фотоприемных матриц.— Там же.

Поступила в редакцию 26 декабря 1983 г.

УДК 621.391

В. Р. МАРТИРОСЯН

(Ереван)

ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ШИРИНОЙ КОРИДОРА ОЦЕНКИ

В последнее время в обработке изображений широкое распространение получили различные итерационные методы, достаточно полный обзор которых с весьма общих позиций приведен в работе [1]. К основным достоинствам этих методов следует, в первую очередь, отнести сравнительно небольшие требования к памяти ЭВМ и высокую скорость вычислений (особенно при сильно разреженных матрицах функции рас-