7. **Карамзин Ю. Н., Сухоруков А. П.** Нелинейная адаптивная оптика.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1978, т. 42, № 12.
8. **Волохатюк В. А., Кочетков В. М., Красовский Р. Р.** Вопросы оптической локации. М.: Сов. радио, 1977.

Поступила в редакцию 6 сентября 1979 г.;
окончательный вариант — 17 декабря 1979 г.

УДК 681.327.68 : 621.383

С. И. НАЙМАРК
(Новосибирск)

НЕКОТОРЫЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МДП-ФОТОДИОДНЫХ УСТРОЙСТВ

Со времени первых работ Веймера [1] интегральные многоэлементные фоточувствительные устройства, в особенности МДП-фотодиодные, завоевали признание разработчиков электронной аппаратуры. Однако известные устройства чаще всего представляют собой безвакуумные аналоги телевизионной трубки в том смысле, что считывание исходной функции $g(x, y)$, проецируемой в виде изображения на фоточувствительное устройство, осуществляется путем последовательного сканирования или поэлементной (ячейка за ячейкой) выборки информации. В то же время ясно, что реализуя выборку с определенным алгоритмом, можно осуществлять предобработку изображения. Поскольку подавляющее большинство алгоритмов обработки изображений сводится к интегральным преобразованиям, большой интерес представляет совмещение функций считывания и предобработки с целью увеличения быстродействия преобразования. Некоторые аспекты такого подхода развиты авторами работ [2, 3] применительно к преобразованию Уолша.

Представляет интерес реализация выборки с произвольным алгоритмом в МДП-фотодиодных устройствах, которые изготавливаются в стандартном МДП-технологическом процессе и широко распространены. При такой выборке выходной сигнал на каждом такте будет являться линейной комбинацией сигналов фотоячеек с весами $\{0, 1\}$, а процесс выборки описывается линейным преобразованием

$$\mathbf{F} = H\mathbf{G}, \tag{1}$$

где $\mathbf{G}$ — вектор, составленный из отсчетов изображения $g(x, y)$, проецируемого на фоточувствительное устройство; H — матрица преобразования, состоящая из нулей и единиц.

Критериями оценки качества преобразования могут служить такие характеристики, как отношение сигнал/шум и ограничение на объем передаваемой информации на выходе фоточувствительного устройства, которые будут зависеть от схемы фотоячейки, режима ее работы и структурной организации фотоячеек в линейку или матрицу.

Пусть имеется ограничение Θ на длительность экспозиции и выборки сигналов, эквивалентное длительности телевизионного кадра. В течение интервала времени Θ изображение $g(x, y)$ дискретизируется и представляется конечным множеством отсчетов G, число которых равно числу фотоячеек M в фоточувствительном устройстве. Информация об отсчетах

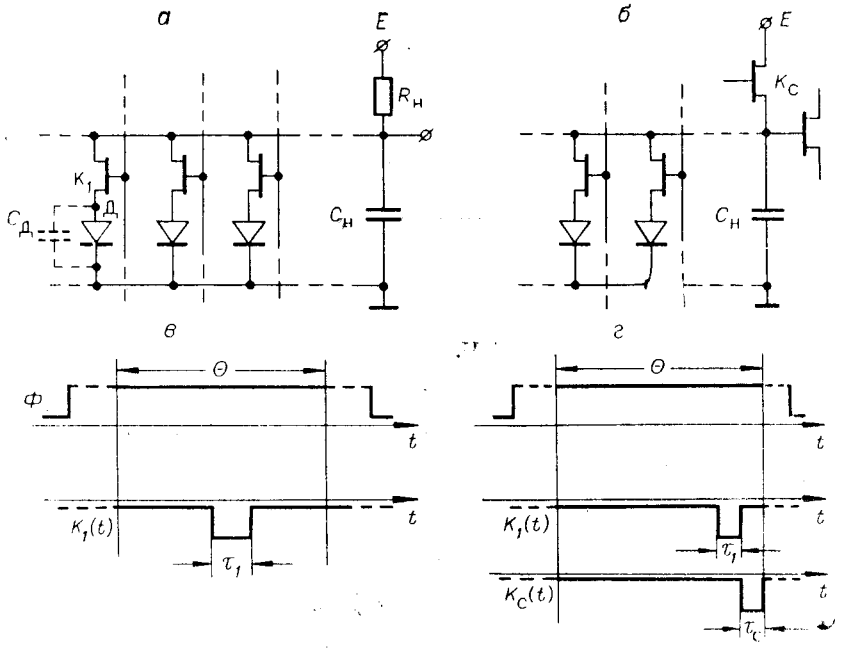

Рис. 1.

может передаваться к выходу устройства с помощью линейного преобразования (1). В зависимости от структурной организации устройства уравнение (1) будет трансформироваться вместе с адекватным описанием множества G и матрицы H, которые, в свою очередь, будут зависеть от структуры устройства и алгоритма выборки. Задача заключается в том, чтобы установить соответствие между указанными выше информационными характеристиками и схемотехническими, структурными и режимными параметрами МДП-фотодиодных устройств с мультиплексированием выходов фотоячеек. Применение общих методов будет показано на примерах поэлементной выборки и выборки в базисах Виленкина — Крестенсона (ВКФ).

Схема МДП-фотодиодной ячейки режима ее работы. Параллельная структура фотоячеек. На рис. 1, *а*, *б* изображена принципиальная схема ячейки, представляющей собой МДП-транзисторную структуру с изолированным истоком [4], который вместе с подложкой образует фотодиод Д.

Канал МДП-транзистора работает как ключ $К_1$ с внутренним сопротивлением $R_к$, подключающий фотодиод к шине считывания, и управляется сигналом по адресной шине. $C_Д$ — емкость p-n-перехода фотодиода Д, $C_н$ — емкость выходной шины.

Различают два режима работы МДП-фотодиодной ячейки: мгновенного действия и накопления (см. рис. 1, *в*, *г*). Режим мгновенного действия (см. рис. 1, *в*) обеспечивается при замкнутом во время экспозиции ключе $К_1$. После окончания переходного процесса через ключ $К_1$ протекает постоянный ток $S_\lambda Ф$, пропорциональный интенсивности светового потока Ф, падающего на фоточувствительную площадку фотодиода со спектральной чувствительностью S_λ.

Режим накопления обеспечивается, если ключ $К_1$ разомкнут в течение длительности кадра Θ и на емкости p-n-перехода накоплен заряд $S_\lambda ФΘ$. Тогда при замыкании ключа $К_1$ можно измерить перетекающий заряд, пропорциональный $S_\lambda ФΘ$.

Считая, что фотодиод Д, ключ $К_1$ и нагрузка $R_{н,с}$ образуют непрерывный канал с аддитивным гауссовым шумом, можно получить выражение

для соотношения сигнал/шум на выходном электроде. Аппроксимируем спектральную плотность шума $R_к C_д$-цепи белым шумом в полосе $\Delta F = 1/\tau_д = 1/R_к C_д$. Тогда для режима мгновенного действия получим

$$\gamma^2 = g^2/(\overline{z^2} + \overline{n^2}) \cong \frac{S_\lambda \Phi \tau_1}{e}\left(1 + \frac{4kT/R_н}{eS_\lambda \Phi}\right)^{-1}, \qquad (2)$$

где $\overline{z^2}$, $\overline{n^2}$ — шумы, связанные с фотодиодом и выходным электродом соответственно; τ_1 — длительность коммутации ключа $К_1$ (см. рис. 1, *в*, *г*); e — заряд электрона; дробовой шум темнового тока не учитывается.

Очевидно, что для сохранения полосы пропускания канала на уровне $1/\tau_д$ необходимо выбирать $R_н \approx R_к C_д/C_н$, поскольку значительное уменьшение $R_н$ привело бы к неоправданному росту $\overline{n^2}$, а увеличение $R_н$ — к уменьшению ширины полосы.

В режиме накопления для считывания выходного сигнала часто применяют интегратор со сбросом [5] (см. рис. 1, *б*), что эквивалентно $R_н \to \infty$; тогда шумовое сопротивление определяется внутренним сопротивлением $R_с$ ключа сброса $К_с$, которое также должно выбираться из соображений выбора необходимой полосы пропускания канала $R_с \approx R_к C_д/C_н$. Используя результаты работы [6], для сигнала получим

$$g^2 \cong (S_\lambda \Phi \Theta)^2 (C_н/(C_д + C_н))^2. \qquad (3)$$

Шум фотоприемника $\overline{z^2}$ складывается из заряда $\sqrt{eS_\lambda \Phi \Theta}$, накопленного на емкости $C_д$ в процессе экспозиции, и заряда $\sqrt{kTC_д}$, внесенного при коммутации ключа $К_1$. Шум выходного электрода $\overline{n^2}$ вносится ключом сброса $К_с$ (см. рис. 1, *г*):

$$\overline{z^2} + \overline{n^2} \cong (C_н/(C_д + C_н))^2 (eS_\lambda \Phi \Theta + kTC_д) + kTC_н. \qquad (3а)$$

При τ_1, $\tau_с > \tau_д$ выражения (3), (3а) практически не зависят от параметров τ_1 и $\tau_с$, поэтому для отношения сигнал/шум в режиме накопления будем иметь

$$\tilde{\gamma}^2 = \frac{S_\lambda \Phi \Theta}{e}\left\{1 + \frac{\tau_д}{\Theta}\frac{4kT/R_с}{eS_\lambda \Phi}\left[\frac{C_д}{C_н} + \left(\frac{C_н + C_д}{C_н}\right)^2\right]\right\}^{-1}, \qquad (4)$$

где использовано то, что $R_с C_н \approx R_к C_д$.

Если $R_с \approx R_н$, то из уравнений (2), (4) следует, что для большого оптического сигнала $((4kT/R_{н,с})/eS_\lambda \Phi \ll 1)$ отношение сигнал/шум определяется множителем перед выражением в (-1)-й степени и при $\tau_1 = \Theta$ равно

$$\gamma = \tilde{\gamma} = (S_\lambda \Phi \Theta/e)^{1/2}, \qquad (5)$$

что адекватно идеальному фотоприемнику, в котором действует только фотонный шум.

Для малого оптического сигнала $((4kT/R_{н,с})/eS_\lambda \Phi \gg 1)$ можно при $\gamma = \tilde{\gamma} = 1$ выразить пороговую чувствительность или шумовой эквивалентный сигнал (ШЭС) следующим образом:

режим мгновенного действия —

$$\frac{4kT}{R_н}\frac{1}{\Theta} \leqslant (\text{ШЭС})^2 = S_\lambda^2 \Phi_{пор}^2 = \frac{4kT}{R_н}\frac{1}{\tau_1} \leqslant \frac{4kT}{R_н}\frac{1}{\tau_д}, \qquad (6)$$

режим накопления —

$$(\widetilde{\text{ШЭС}})^2 = S_\lambda^2 \tilde{\Phi}_{пор}^2 = \frac{\tau_д}{\Theta^2}\frac{4kT}{R_к}\beta = \frac{4kT}{R_с}\frac{\tau_д}{\Theta^2}, \qquad (7)$$

где $\beta = [\alpha + (1 + \alpha)^2]/\alpha$, а $\alpha = C_н/C_д$.

С помощью коэффициента β учитывается условие $R_н C_н = R_с C_н \cong R_к C_д$, сохраняющее полосу пропускания.

Вводя одинаковое для обоих режимов ограничение на амплитуду входного оптического сигнала, равное сигналу насыщения в режиме накопления $S_\lambda \Phi_{нас} = S_\lambda \widetilde{\Phi}_{нас} = EC_д/\Theta = \tau_д E/\Theta R_к$, видно, что диапазон изменения сигнала

$$\varkappa^2 \tau_д \eta^2 \leqslant \widetilde{\Phi}^2_{нас}/(ШЭС)^2 = \varkappa^2 \tau_1 \eta \leqslant \varkappa^2 \tau_д \eta \tag{8}$$

и

$$\widetilde{\Phi}^2_{нас}/(\widetilde{ШЭС})^2 = \varkappa^2 \tau_д, \tag{8a}$$

где $\eta = \tau_д/\Theta$, а $\varkappa^2 = E^2 R_н / R_к^2 4kT = E^2/\beta 4kT R_к$ можно трактовать как сигнал насыщения, нормированный на спектральную плотность шума.

При $C_н \leqslant C_д$ $\varkappa = \varkappa_0$ и выбор $R_с = R_н = R_к/\beta$ практически не изменяет полосы пропускания канала, так как $\beta \geqslant 1$.

При $C_н \gg C_д$ имеем $\beta = \alpha \gg 1$ и выбор $R_с = R_н = R_к/\beta$ также обеспечивает сохранение полосы пропускания на уровне $1/\tau_д$. Однако величина нормированного сигнала насыщения $\varkappa^2$, определяемая из (8) и (8а), при этом уменьшится по отношению к $\varkappa_0^2$.

Пусть M фотоячеек организованы в параллельную структуру таким образом, что каждая из них имеет индивидуальный выходной электрод. Тогда для получения информации обо всех отсчетах множества G необходима одна коммутация ключей, и ничто не мешает приравнять $\tau_1 = \Theta$. При этом выражение (2) максимизируется, выражение (4) остается неизменным, а отношение сигнал/шум для большого оптического сигнала совпадает с (5).

Для системы параллельных каналов можно записать ограничения на объемы передаваемой информации в обоих режимах, равные физическим объемам многоканальной системы, состоящей из M каналов.

Используя (8) и (8а), имеем для режима мгновенного действия

$$V = M\eta^{-1} \log\left(1 + \varkappa_0^2 \tau_д \eta\right) \underset{\eta \to 0}{\leqslant} M \varkappa_0^2 \tau_д \text{ [нат]*}, \tag{9}$$

для режима накопления

$$\widetilde{V} = M\eta^{-1} \log\left(1 + \varkappa_0^2 \Theta \eta\right) \underset{\eta \to 0}{\leqslant} M \varkappa_0^2 \Theta \text{ [нат]}. \tag{9a}$$

Очевидно, что выражения (9), (9а) определяют верхние границы для объемов передаваемой за время Θ информации при любой структурной схеме многоэлементного устройства, состоящего из M фотоячеек, поскольку в этом случае число каналов является максимальным, а полоса шумов — минимальной.

Матрица H в уравнении (1) вырождается в скаляр, принимающий значения «1» или «0», что соответствует одновременному замыканию или размыканию ключей $К_1$.

Структурные схемы многоэлементных устройств. При числе фотоячеек $M \geqslant 10^2$ в устройстве обычно используют мультиплексирование выходов [7].

На рис. 2, *а* изображена структурная схема линейки МДП-фотодиодных ячеек с $m_1 \times m_2$-мультиплексором, имеющим m_1 адресных и m_2 выходных шин считывания. Поскольку возбуждение любой из m_1 управляющих адресных шин мультиплексора обеспечивает подключение m_2 фотоячеек к m_2 шинам считывания, то линейное пространство для отсчетов из множества G можно представить тензорным произведением m_1-мерного и m_2-мерного линейных пространств, где множество отсчетов G представляет собой тензор g_k^i, зависящий от двух индексов $1 \leqslant i \leqslant m_1$, $1 \leqslant k \leqslant m_2$, первый из которых связан с номером адресной шины, а второй — с номером выходной шины считывания.

---

* Нат — натуральная единица информации, получающаяся при натуральном основании логарифма.

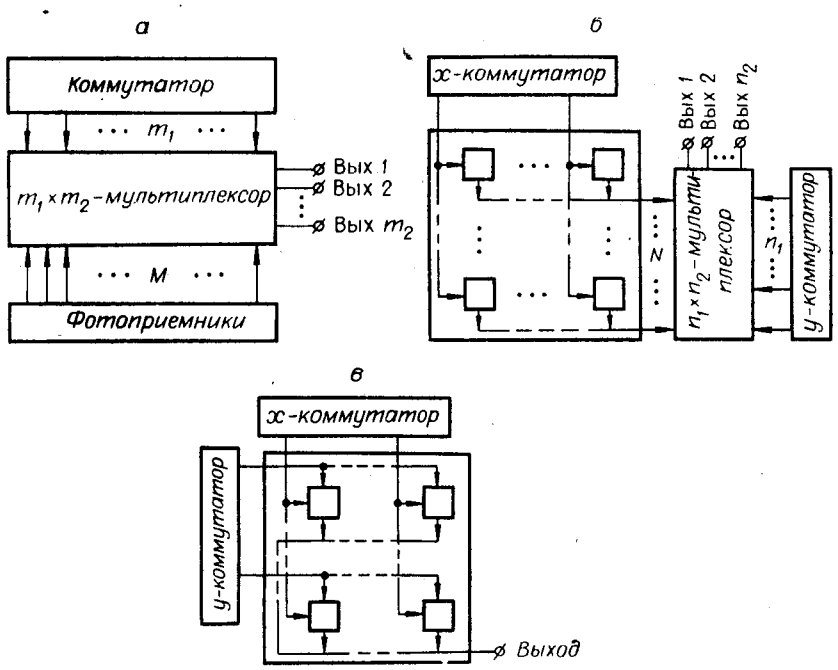

Рис. 2.

Непосредственно из схемы рис. 2, *а* легко видеть, что матрица H допускает разложение:

$$H = \mathscr{H} \otimes \mathscr{P}, \tag{10}$$

где $\otimes$ — символ кронекерова произведения; $\mathscr{P}$ — матрица, описывающая межсоединения выходов ячеек и шин считывания в мультиплексоре; $\mathscr{H}$ — матрица двоичных кодов, генерируемых коммутатором.

С учетом (10) уравнение (1) преобразуется к виду

$$\mathscr{F} = \mathscr{H}\mathscr{G}\mathscr{P}^{\text{т}}. \tag{11}$$

Здесь $\mathscr{G}$ — матрица координат тензора g_k^i в единичном базисе, составленная из элементов множества G; $\mathscr{F}$ — матрица со столбцами, составленными из m_2 параллельных выходных сигналов; $\mathscr{P}^{\text{т}}$ — транспонированная матрица $\mathscr{P}$.

Для получения m_2-размерного вектора выходных сигналов f_k необходимо свернуть тензор g_k^i слева с h_i строкой матрицы $\mathscr{H}$:

$$f_k = \sum_i^{M/m_2} h_i g_k^i$$

— и затем умножить результирующий вектор справа на транспонированную матрицу $\mathscr{P}$, переставляющую компоненты результирующего вектора в соответствии с межсоединениями мультиплексора, причем эта операция выполняется за один такт коммутации ключей $К_1$.

Рассмотрим предельные случаи:

1. $m_1 = M$, $m_2 = 1$ — последовательная структура. Тогда существует единственная комбинация межсоединений, и матрица $\mathscr{P}$ — скаляр, равный 1. Матрица $\mathscr{H}$ совпадает с матрицей H, а матрица $\mathscr{G}$ вырождается в вектор **G**. Уравнение (11) совпадает с (1), и каждая компонента вектора **F** представляет собой линейный функционал, реализуемый за один такт коммутации ключей $К_1$.

2. $m_1 = 1$, $m_2 = M$ — описанная выше параллельная структура фотоячеек с общей управляющей (адресной) шиной для ключей $К_1$. Матрица $\mathscr{P}$ имеет размерность $M \times M$ и описывает перестановку выходных сигналов.

Если фотоячейки расположить в пространстве в виде двумерного массива, то наиболее удобной для реализации в планарной интегральной технологии является решетка фотоячеек, каждая из которых располагается в узле пересечения двух взаимно перпендикулярных шин. На рис. 2,*б* изображена квадратная $N \times N$-решетка со словарной организацией [4], содержащая, по существу, $N \times N$-мультиплексор с единичной матрицей $\mathscr{P}$. Пространственное расположение фотоячеек совпадает с расположением элементов в матрице $\mathscr{G}$. Согласно (11) функционирование такого типа устройств можно описать уравнением

$$\mathscr{F} = \mathscr{H}\mathscr{G},$$

где $\mathscr{G}$ — $N \times N$-матрица координат тензора g_k^i; $\mathscr{H}$ — матрица, составленная из двоичных кодов, генерируемых коммутатором на адресных шинах решетки; $\mathscr{F}$ — матрица, столбцами которой являются N-размерные векторы выходных сигналов.

Выходы решетки также можно мультиплексировать с помощью $n_1 \times n_2$-мультиплексора (см. рис. 2, *б*). Тогда каждый отсчет из множества G зависит от трех индексов и описывается тензором g_k^{il}, где $1 \leqslant i \leqslant N$, $1 \leqslant l \leqslant n_1$, $1 \leqslant k \leqslant n_2$.

Для получения n_2-размерного вектора выходных сигналов тензор g_k^{il} необходимо свернуть с векторами-кодами h_i^x и h_l^y, генерируемыми x- и y-коммутаторами (см. рис. 2, *б*):

$$f_k = \sum_i^N \sum^{N/n_2} h_i^x g_k^{il} h_l^y, \tag{12}$$

а результирующий вектор умножить слева на перестановочную матрицу $\mathscr{P}_y$, описывающую межсоединения в $n_1 \times n_2$-мультиплексоре.

При $n_1 = N$ и $n_2 = 1$ имеем устройство с единственным выходом и каждый отсчет из множества G можно описать тензором g^{il}, зависящим от двух индексов, матрица координат которого вновь совпадает с сигналами на фотоприемниках и их пространственным расположением. Уравнение (12), описывающее правую и левую свертки с кодами коммутаторов, имеет вид матричного уравнения:

$$\mathscr{F} = \mathscr{H}_x \mathscr{G} \mathscr{H}_y^{\mathrm{т}}, \tag{12а}$$

где $\mathscr{H}_x$ и $\mathscr{H}_y$ — матрицы, строками которых являются коды x- и y-коммутаторов.

На рис. 2, *в* изображена структурная схема решетки с поэлементной организацией [4], каждая ячейка которой содержит два последовательных ключа так, что мультиплексоры по x и y встроены в решетку и описываются единичными матрицами $\mathscr{P}$. Устройство функционирует согласно уравнению (12а), которое иллюстрирует возможность применения разделимых преобразований и независимого выбора матриц $\mathscr{H}_x$ и $\mathscr{H}_y$ [8].

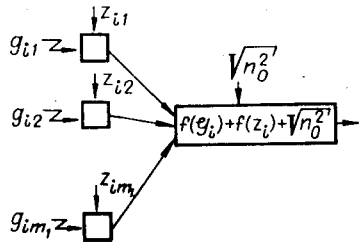

Рис. 3.

Отношение сигнал/шум в многоэлементных устройствах. При мультиплексировании выходов фотоячеек возникают шум с фиксированным распределением (ШФР) [9] и шум коммутации, существенно превышающие рассматриваемые выше флуктуационные шумы. Однако эти

шумы не принимаются во внимание, поскольку известны способы их эффективного подавления [12, 5].

На рис. 3 изображена блок-схема канала для одномерного фрагмента устройства из $\xi^{-1} = M/m_2$ фотоячеек, подключенных к k-й выходной шине считывания. Так как учитываются только флуктуационные шумы, можно использовать модель непрерывного канала с аддитивным гауссовым шумом с нулевым средним. Тогда выходной сигнал на любом k-м выходе равен

$$f_k = \sum_i^{\xi^{-1}} h_i g_k^i + \sum_i^{\xi^{-1}} h_i z_k^i + n_k, \tag{13}$$

где z_k^i — реализация шума в соответствующей фотоячейке, n_k — реализация шума на k-м выходе ($1 \leqslant i \leqslant m_1$, $1 \leqslant k \leqslant m_2$).

Поскольку z_k^i и n_k гауссовы величины, имеем

$$|f_k|^2 = \sum_i^{\xi^{-1}} h_i (z_k^i)^2 + (n_k)^2 + \left(\sum_i^{\xi^{-1}} h_i g_k^i\right)^2. \tag{13а}$$

Для сигнального члена в (13а) можно записать ограничение

$$\left(\sum_i h_i g_k^i\right)^2 \leqslant \|h\|^2 \|g_k\|^2. \tag{13б}$$

Здесь $\|h\| = \sqrt{(h_1)^2 + (h_2)^2 + \ldots + (h_{m_1})^2}$ — норма вектора-строки из матрицы $\mathscr{H}$, а $\|h\|^2$ — вес двоичного кода; $\|g_k\| = \sqrt{(g_k^1)^2 + (g_k^2)^2 + \ldots + (g_k^{m_1})^2}$ — норма вектора g_k соответствующего фрагмента изображения, $\|g_k\|^2$ — энергия сигнала фрагмента.

Если $(z_k^i)^2$ приблизительно одинаковы для всех фотоячеек, а n_k^2 — для всех m_2 выходов, то для шумового члена в выражении (13а) получим

$$\sum_i^{M/m_2} h_i (z_k^i)^2 + n_k^2 \cong \|h\|^2 \overline{z^2} + \overline{n^2} = \|h\|^2 (\overline{z^2} + \overline{n^2}/\|h\|^2). \tag{13в}$$

Из (13 а, б, в) следует, что отношение сигнал/шум ограничено сверху

$$\gamma^2, \ \widetilde{\gamma^2} \leqslant \|g_k\|^2/(\overline{z^2} + \overline{n^2}/\|h\|^2). \tag{14}$$

Сравнивая (14) с (2) и (4), можно видеть, что в многоэлементном устройстве шум $\overline{n^2}$ уменьшается в $\|h\|^2$ раз относительно $\overline{z^2}$.

Для того чтобы оценить диапазон изменения сигнала, необходимо выразить ограничение на энергию $\|g_k\|^2$ через сигнал насыщения фотоячейки. Это потребует задания плотности вероятности для исходной функции $g(x, y)$ или ансамбля для множества G. Используем равновероятностное задание ансамбля. Тогда средняя энергия на фотоячейку равна $\xi\|g_k\|^2$ ($\xi = m_2/M$). Ограничивая ее, как и в случае одиночной фотоячейки, сигналом насыщения в режиме накопления, имеем из (8) и (14) для режима мгновенного действия

$$\gamma_2 \leqslant \eta \xi^{-1} \varkappa^2 \tau_1 \|h\|^2, \tag{15}$$

а из (8а) и (14) для режима накопления

$$\widetilde{\gamma}^2 \leqslant \xi^{-1} \varkappa^2 \tau_д \|h\|^2, \tag{15а}$$

где полагаем, что $R_с = R_н$ и $\varkappa^2 = E^2 R_н / R_к^2 4kT$, когда шум определяется выбором нагрузочного сопротивления, и $\varkappa^2 = E^2/R_к^2 \overline{n_0^2}$, когда шум определяется внешним к интегральной схеме усилителем. В первом случае следует учитывать, что к выходной шине считывания подсоединены ξ^{-1} фотоячеек, так что $C_н = \xi^{-1} C_н^0$, где емкость $C_н^0 \leqslant C_д$ образуется в ре-

зультате соединения стоковой области МДП-ключа с металлической шиной считывания. При $\xi^{-1} \gg 1$ имеем $\beta \cong \alpha = \xi^{-1}$ и выбор $R_н \approx R_с = R_к/\beta$ обеспечивает сохранение полосы пропускания канала на уровне $1/\tau_д$, а пороговая чувствительность, как видно из (6) и (7), ухудшается в $\sim\xi^{-1}$ раз. При $\xi^{-1} = 1$ (параллельная структура) нагрузочная емкость (см. рис. 1, *а*, *б*) может быть минимизирована до $C_н \leqslant C_д$, что приводит к уменьшению $\varkappa$ вплоть до $\varkappa_0$.

Однако если шум $\overline{n_0^2}$, связанный с выходным электродом, определяется внешним усилителем, то $\varkappa^2$ не зависит от выбора сопротивлений $R_с$ и $R_н$.

В соотношениях (15) и (15а) множитель ξ^{-1} является структурным параметром многоэлементного устройства, характеризующим степень распараллеливания выходов. Множитель $\|h\|^2$ характеризует коды, используемые при выборке информации, а $\varkappa^2$ является схемотехническим параметром фотоячейки и внешнего усилителя.

Поэлементная выборка и выборка в базисе ВКФ. В выражениях (15) и (15а) имеется неопределенность, связанная с параметрами $\eta = \tau_д/\Theta$, $\tau_д$ и τ_1, которые определяют последовательность во времени коммутации ключей в фотоячейках (или алгоритм выборки) и связь с минимальной и максимальной постоянными времени. Влияние алгоритма рассмотрим на примерах наиболее интересных случаев поэлементной выборки и выборки в базисе ВКФ [11].

Поэлементная выборка эквивалентна представлению изображения $g(x, y)$ в базисе δ-функций. Следует отметить, что граница, получаемая из (13б), является точной только для изображений со слабо меняющейся интенсивностью и кодов с большим числом единиц. При поэлементной выборке, когда энергия сигнала в изображении концентрируется в одной точке или вес двоичного кода коммутатора близок к единице, граница (13б) является максимально завышенной. Однако в этом случае граница следует непосредственно из (2) и (4), где $R_н = R_с$ выбрано в соответствии с $\beta = \xi^{-1}$. Учитывая условие на длительность коммутации $\tau_д \leqslant \tau_1 \leqslant \Theta\xi$, из (2) и (4) имеем:

для большого оптического сигнала

$$\gamma^2 = \xi S_\lambda \Phi \Theta, \tag{16}$$

$$\tilde{\gamma}^2 = S_\lambda \Phi \Theta, \tag{16а}$$

для малого оптического сигнала

$$\gamma^2 \cong \xi \frac{(S_\lambda \Phi)^2 \Theta}{4kT/R_н} = \xi^2 \frac{(S_\lambda \Phi)^2 \Theta}{4kT/R_к}, \tag{17}$$

$$\tilde{\gamma}^2 \cong \eta^{-1} \frac{(S_\lambda \Phi)^2 \Theta}{4kT/R_с} = \xi\eta^{-1} \frac{(S_\lambda \Phi)^2 \Theta}{4kT/R_к}. \tag{17а}$$

Из (8) и (8а) получаем выражения для физических объемов канала V и $\tilde{V}$:

$$V \leqslant M\xi\eta^{-1} \log(1 + \varkappa^2 \tau_д \xi\eta) \underset{\xi\eta \to 0}{\leqslant} M\xi^2 \varkappa^2 \tau_д, \tag{18}$$

$$\tilde{V} \leqslant M\xi\eta^{-1} \log(1 + \varkappa^2 \Theta\eta) \underset{\eta \to 0}{\leqslant} M\xi\varkappa^2\Theta. \tag{18а}$$

Как следует из неравенства $\eta \leqslant \xi$, переход к пределу в (18) осуществляется быстрее, чем в (18а).

Из выражений (16), (16а) и (17), (17а) можно видеть, что для большого сигнала режим накопления обеспечивает независимость отношения сигнал/шум от числа выходов многоэлементного устройства, однако

для малого сигнала эта зависимость проявляется вследствие влияния емкости выходной шины (см. рис. 1, *а, б*).

Если параметр ξ^{-1} — целая степень некоторого числа m ($m^n = \xi^{-1}$), то для выборки можно использовать любую базисную систему функций Виленкина — Крестенсона с модулем m [11]. Для $m = 2$ ВКФ совпадают с функциями Уолша, принимающими значения {−1, 1}. Для любой матрицы базисных функций Уолша допустимо разложение

$$\{\mathrm{Walsh}(k,\ l)\} = \mathscr{H} + (-1)\overline{\mathscr{H}}, \tag{19}$$

где в матрице $\mathscr{H}$ заменены нулями отрицательные элементы, а в матрице $\overline{\mathscr{H}}$ — положительные. Таким образом, матрицы $\mathscr{H}$ и $\overline{\mathscr{H}}$ содержат в качестве строк только двоичные коды, которые могут непосредственно применяться для коммутации ключей фотоячеек.

Известны МДП-фотодиодные устройства, реализующие разложение (19) параллельно [12] так, что в этом случае $\|h\|^2 = \xi^{-1}$. Тогда, опуская индекс k, из (14) определяем

$$\gamma^2,\ \tilde{\gamma}^2 \leqslant \|g\|^2/(\bar{z}^2 + \xi\bar{n}^2). \tag{20}$$

Причем равенство достигается тогда, когда освещенность в каждой точке одинакова. Учитывая, что $\tau_д \leqslant \tau_1 \leqslant \Theta\xi$, имеем для большого оптического сигнала

$$\gamma^2,\ \tilde{\gamma}^2 \leqslant S_\lambda \overline{\Phi}\Theta$$

$\left(\overline{\Phi} = \xi \sum_i^{\xi^{-1}} \Phi_i\right.$ — средняя освещенность фрагмента). Режим накопления в этом случае вырождается в интегрирование фототока внешним интегратором, поскольку в любой момент времени ключи фотоячеек замкнуты.

В свою очередь, для малого оптического сигнала получим

$$\gamma^2 \leqslant \frac{S_\lambda^2 \overline{\Phi}^2 \Theta}{4kT/R_н \xi^{-1}}, \tag{21}$$

$$\tilde{\gamma}^2 \leqslant \eta^{-1}\xi \frac{S_\lambda^2 \overline{\Phi}^2 \Theta}{4kT/R_c \xi^{-1}}, \tag{21a}$$

где $\overline{\Phi}^2 = \xi \sum_i^{\xi^{-1}} \Phi_i^2 = \xi \|g\|^2$. Если $R_c = R_н$, то формулы (21) и (21а) отличаются множителем $\xi\eta^{-1} \geqslant 1/2$.

Ограничивая среднюю энергию сигналом насыщения, из (15), (15а) и (20) имеем

$$V \leqslant M\eta^{-1}\xi \log\left(1 + \varkappa^2 \tau_д \xi^{-1}\eta\right) \underset{\xi^{-1}\eta \to 0}{\leqslant} M\varkappa^2\tau_д, \tag{22}$$

$$\tilde{V} \leqslant M\eta^{-1}\xi \log\left(1 + \varkappa^2 \Theta \xi^{-1}\eta\right) \underset{\xi^{-1}\eta \to 0}{\leqslant} M\varkappa_0^2\Theta. \tag{22a}$$

Сравнивая (22), (22а) с (9), (9а), замечаем, что объемы V и $\tilde{V}$ в (22) и (22а) в пределе совпадают с (9) и (9а), если ШЭС определяется внешним усилителем и не зависит от выбора $R_н$, R_c. Другими словами, структуры, аналогичные [12], с выборкой в базисе Уолша имеют в пределе параметры, характерные для параллельной структуры, инвариантные к числу выходов устройства m_2. Однако следует помнить, что предельный переход достигается только для широкой полосы при $\eta \ll \xi$.

Разложение (19) можно реализовать в традиционной структуре с мультиплексированием, как это показано на блок-схеме рис. 4. При этом первое слагаемое в (19) подается на один вход дифференциального усилителя, а второе — на другой. Сумма слагаемых накапливается последо-

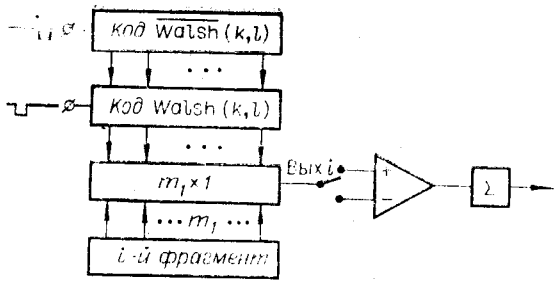

Рис. 4.

вательно в два такта на внешнем накопителе. Очевидно, что в этом случае $\tau_Д \leqslant \tau_1 \leqslant \Theta\xi/2$.

Матрица любой базисной системы ВКФ с произвольным модулем m после сокращения на фазы, кратные 2π, не содержит никаких других элементов, кроме m значений дискретной экспоненциальной функции ДЭФ (m) [11], так что для матрицы системы ВКФ можно записать разложение, подобное (19). Члены разложения — матрицы, содержащие в качестве элементов «0» и «1», а их сумма — матрица, полностью заполненная единицами. Скалярные коэффициенты при каждом члене являются различными значениями ДЭФ (m). Таким образом, суммирование членов в структурах с мультиплексированием потребует m тактов коммутации и может быть реализовано так, как показано на рис. 5. С учетом условия $\tau_Д \leqslant \leqslant \tau_1 \leqslant \Theta\xi m^{-1}$

$$\gamma^2,\ \tilde{\gamma}^2 \leqslant \|g\|^2/(\overline{z^2} + m\overline{n^2}\xi).$$

Аналогично (21) и (21а) можно получить отношение сигнал/шум исходя из средних освещенностей фотоячеек.

Ограничения на объемы V и $\tilde{V}$ имеют вид

$$V \leqslant M\eta^{-1}\xi \log\left(1 + \varkappa^2\tau_Д\eta\xi^{-1}m^{-1}\right) \underset{(m\xi)^{-1}\eta\to 0}{\leqslant} M\varkappa^2 m^{-1}\tau_Д, \tag{23}$$

$$\tilde{V} \leqslant M\eta^{-1}\xi \log\left(1 + \varkappa_0^2\Theta\eta\xi^{-1}m^{-1}\right) \underset{(m\xi)^{-1}\eta\to 0}{\leqslant} M\varkappa_0^2 m^{-1}\Theta. \tag{23а}$$

Объемы в пределе достигают в m раз меньшего значения, чем для параллельной структуры, однако предельный переход осуществляется в m раз быстрее.

Особый интерес представляет случай $m = \xi^{-1}$, когда выборка в базисе ВКФ адекватна дискретному преобразованию Фурье. Использование условия на длительность коммутации $\tau_D \leqslant \tau_1 \leqslant \xi^2\Theta$ и формул (23), (23а) дает выражения для V и $\tilde{V}$:

$$V \underset{\xi^{-2}\eta\to 0}{\leqslant} M\varkappa^2\xi\tau_D, \tag{24}$$

$$\tilde{V} \underset{\xi^{-2}\eta\to 0}{\leqslant} M\varkappa_0^2\xi\tau_D, \tag{24а}$$

Если сравнивать (24) и (24а) с (18) и (18а) для поэлементной выборки, то видно, что для случая когда ШЭС определяется выбором на-

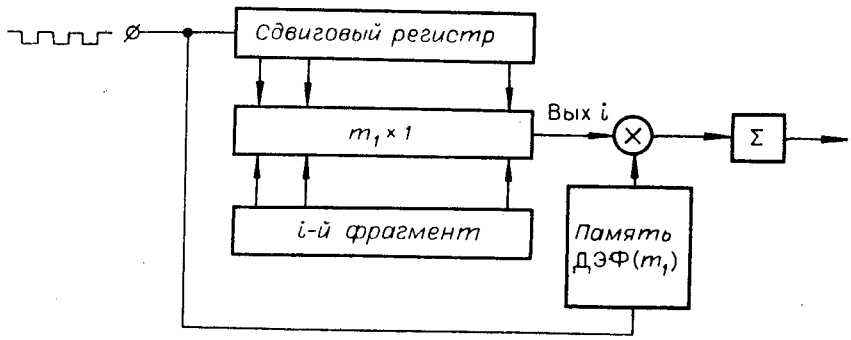

Рис. 5.

грузочных сопротивлений $R_н$ и $R_с$, т. е. $\varkappa_0^2 = \xi\varkappa^2$, в выражениях (18) и (18а) степень малого параметра ξ на единицу выше, что является следствием наличия внешнего накопителя, который суммирует энергию выходного сигнала за ξ^{-1} тактов.

Оценивая различные способы выборки в различных структурных схемах по объему передаваемой информации, можно прийти к следующим выводам: 1) для поэлементной выборки зависимость объемов V и $\tilde{V}$, а также отношений сигнал/шум γ и $\tilde{\gamma}$ от структурного параметра ξ наиболее резкая; 2) выборка в базисе Уолша инвариантна к параметру ξ и не зависит от степени распараллеливания выходных каналов фоточувствительного устройства; 3) объемы V и $\tilde{V}$ для параллельной структуры не зависят от способа выборки и совпадают в пределе с объемами передаваемой информации при выборке в базисе Уолша. Иными словами, к максимальным значениям объемов передаваемой информации V и $\tilde{V}$ можно подойти двумя способами: либо изменяя структурную схему фоточувствительного устройства путем увеличения числа выходных каналов, либо используя базис ВКФ с малым числом m (близким к 2) при неизменной структурной схеме.

Выборка в базисе ВКФ весьма показательно иллюстрирует влияние алгоритма коммутации на информационные характеристики устройства, через параметр m, который характеризует вклады параллельных и последовательных операций.

Однако ясно, что реализация линейных преобразований в процессе выборки не ухудшает, а в ряде случаев улучшает отношение сигнал/шум и ограничение на объем передаваемой информации, хотя также ясно, что требования к динамическому диапазону и к полосе внешних усилительных схем при этом существенно повышаются.

В заключение автор выражает признательность Е. С. Нежевенко, Р. Д. Баглаю, А. Н. Касперовичу, Б. Н. Панкову и П. Е. Твердохлебу за полезные замечания, сделанные при обсуждении рукописи работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Веймер П. К.** Твердотельный датчик изображения. Заявл. 30.15.65, опубл. 06.01.70. Кл. 250—211. США. Пат. № 3.488.508.
2. **Берковская К. Ф. и др.** Возможности реализации адамаровского спектроанализатора на фотоприемном устройстве типа «маскон».— В кн.: Оптическая обработка информации. Л.: Наука, 1978.
3. **Райс С.** Матрица фотоприемников. Заявл. 19.4.75, опубл. 13.1.77. Кл. НО 3/14. ФРГ. Акц. заявка № 2517346.
4. **Йесперс П.** Двухкоординатная адресация.— В кн.: Полупроводниковые формирователи сигналов изображений: Пер. с англ./Под ред. Р. Л. Суриса. М.: Мир, 1979.
5. **Басс Р. Р., Танака С. С., Веклер Дж. Г.** Принципы малошумящего выделения сигнала в фотодиодных матрицах.— Там же.
6. **Кругликов С. В.** Анализ динамических характеристик ячейки фотодиодной матрицы с коммутацией на МДП-транзисторах.— Автометрия, 1979, № 3.
7. **Weimer P. K.** Image Sensors for Solid-State Cameras.— Advances in Electronics and Electron Ptysics, 1975, vol. 37, p. 181—262.
8. **Эндрюс Г.** Двумерные преобразования.— В кн.: Обработка изображений и цифровая фильтрация: Пер. с англ. М.: Мир, 1979.
9. **Fry P. W., Noble P. J. W., Rycroft R. S.** Fixed-Pattern Noise in Photomatrics.— IEEE J. of Solid State Circ., 1970, vol. VSC-5, N 5.
10. **Mc Neil W. D., Rohland W. S.** Compensation for a Scanning Sysetm. Filed 18.12.72, publ. 26.3.74. Cl.178/7.1. US Pat. N 3.800.079.
11. **Трахтман А. М., Трахтман В. А.** Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах. М.: Сов. радио, 1975.
12. **Берковская К. Ф., Кругликов С. В., Подласкин Б. Г., Столовицкий В. М.** Координатоуказатель точечного объекта с интегральным опросом фотоприемной матрицы.— В кн.: Координатно-чувствительные твердотельные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе: [Тез. конф.].— Барнаул, 1979, с. 52—53.

Поступила в редакцию 26 июня 1980 г.