

06.2; 06.3; 07

© 1992

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОЦЕССОР НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ФПЗС С ВОЛОКОННОЙ ШАЙБОЙ

Н. А. Е с е п к и н а, Г. А. Г а в р и л о в,  
А. П. Л а в р о в, М. Н. А н а н ь е в,  
С. А. М о л о д ь я к о в, Ю. Г. П о м и г у е в,  
Г. Ю. С о т н и к о в а

1. Среди активно исследуемых в настоящее время оптоэлектронных систем обработки информации большой интерес представляют процессоры на основе матричных ПЗС-фотоприемников. Современный уровень развития основных компонентов оптоэлектронных процессоров (ОЭП) (многоэлементных полупроводников светоизлучателей, матричных ПЗС - фотоприемников, модуляторов света) определяет высокие потенциальные вычислительные возможности таких процессоров (более  $10^9$  операций в секунду) при малых габаритах и энергопотреблении. ОЭП могут быть использованы для решения широкого круга задач по обработке сигналов и изображений [1-5], сводящихся к линейным интегральным преобразованиям. Для реализации потенциальных возможностей ОЭП и сохранения их конкурентоспособности с быстроразвивающимися цифровыми сигнальными процессорами [6] необходимо стремиться к выполнению ОЭП в виде гибридной структуры - „сэндвича“, состоящего из набора элементов в интегральном исполнении (светоизлучателей, модуляторов, ПЗС-фотоприемников) и оптических каскадов формирования и отображения. В настоящее время, на наш взгляд, перспективным вариантом реализации оптических каскадов формирования и отображения в ОЭП является использование световых волокон.

В данной работе рассмотрен один из возможных вариантов построения ОЭП с гибридной структурой на основе матричного ПЗС-фотоприемника, входное окно которого выполнено в виде световолоконной шайбы.

2. Структурная схема оптоэлектронного процессора, аналогичного [1, 3], представлена на рис. 1, а. Она содержит источник света  $S$ , оптический формирующий каскад ОФК, двумерный амплитудный транспарант (маску)  $M$ , волоконную шайбу  $ВШ$ , собственно ПЗС-фотоприемник ФПЗС, устройство управления фотоприемником УУ, систему регистрации выходного электрического сигнала процессора СР, схему управления источником света СУ и источник обрабатываемого сигнала ИС.

В этой схеме обрабатываемый сигнал  $U(t)$  модулирует по интенсивности источник света  $S$ . Оптический формирующий каскад

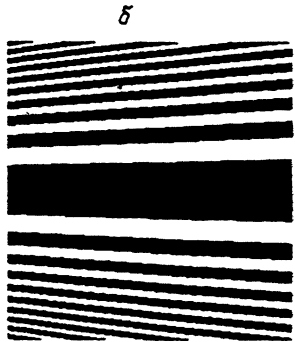
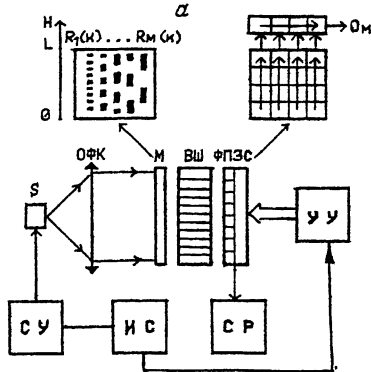


Рис. 1.

обеспечивает равномерную засветку маски  $M$ . Маска представляет из себя совокупность  $M$  параллельно расположенных каналов (столбцов), каждый из которых имеет собственные пространственные изменения коэффициента пропускания вдоль канала в соответствии с заданным ядром преобразования  $R_m$ . Маска находится в механическом контакте с волоконной шайбой, выполненной в виде тонкой плоскопараллельной пластины. Волокна имеют диаметр и шаг расположения в несколько раз меньше размеров элементов ФПЗС. Таким образом, волоконная шайба выполняет роль отображающего элемента — сферической линзы. Выходная плоскость шайбы совмещена с фоточувствительной поверхностью ФПЗС. Фотоприемник работает в режиме непрерывного (конвейерного) считывания сигнала, т.е. в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), в котором в каждом из столбцов матрицы интегрирующие сигнал элементы непрерывно смещаются вдоль соответствующего столбца маски.

Можно показать [2, 3], что сигнал на выходе  $m$ -го столбца ФПЗС в момент времени  $t$  определяется следующим выражением:

$$Q_m(t) = \int_{-T/2}^{+T/2} I(t - T/2 + \tau) \cdot F_m(\tau) d\tau = C + \int_{-T/2}^{+T/2} U(t - T/2 + \tau) \cdot R_m(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $m = 1, 2, 3, \dots, M$  — номер канала маски или столбца ФПЗС,  $I(t) = A + U(t)$  — интенсивность источника света;  $F_m(x) = B + R_m(x)$  — пространственное изменение коэффициента пропускания  $m$ -го канала маски;  $R_m(x)$  — ядро преобразования;  $F_m(\tau) = F_m(x/v)$ ,  $v$  — скорость движения элементов по столбцам ФПЗС, определяемая частотой управляющих фазных напряжений;  $T = L/v$  — время прохождения интегрирующим элементом всего столбца ФПЗС;  $L$  — длина столбца ФПЗС (длина канала маски);  $A, B$  и  $C$  — некоторые посто-

янные величины, обусловленные работой с биполярными сигналами и ядрами.

Таким образом, выходной сигнал ФПЗС есть сумма некоторой постоянной составляющей и искомого интегрального преобразования входного сигнала. Записывая на маске различные ядра  $R_m$ , в процессоре можно осуществлять различные интегральные преобразования входного сигнала. Некоторые результаты экспериментального исследования таких процессоров, выполняющих корреляционный и спектральный анализ сигналов, приведены в [2, 3].

Отметим важные особенности процессора - конвейерный режим работы и высокую производительность. Процессор обрабатывает накладываемые выборки входного сигнала длительностью  $T$ , следующие с малым смещением  $\Delta t = T/N$ ,  $N$  - число элементов ФПЗС в столбце. По каждой выборке производится интегральное преобразование (1) параллельно по всем каналам процессора. Производительность процессора может быть оценена величиной  $P = N \cdot f_T$  операций "умножение + сложение"/с, где  $f_T$  - максимальная частота фазных напряжений выходного регистра ФПЗС. При  $N = 300$  и  $f_T = 10$  МГц (среднеформатная матрица ФПЗС)  $P = 3 \cdot 10^9$  операций/с, причем операции умножения и сложения выполняются над аналоговыми отсчетами, соответствующими 7-8 двоичным разрядам. Дискретный характер ФПЗС и импульсный режим управления им делают процессор дискретно-аналоговым устройством. Его работу можно описать в дискретной форме выражением

$$Q_{m,k} = C + \sum_{n=k}^N U_{n+k} \cdot R_{m,n}, \quad (2)$$

которое следует из (1), где  $U_{n+k}$  -  $n$ -й отсчет входного сигнала в выборке длиной  $N$  с началом выборки на  $k$ -ом отсчете,  $k = t/\Delta t$ ;  $R_{m,n} = R_m(\tau/\Delta t)$  можно рассматривать как импульсный отклик процессора, задаваемый используемым транспарантом.

В процессоре можно обрабатывать как одиночный входной сигнал  $U$ , так и множество входных сигналов  $U_m$ , число которых равно числу столбцов матрицы  $m$ . В первом случае используется одиночный излучатель света (светоизлучающий диод - СИД), во втором случае используется линейка СИД с независимой модуляцией каждого СИД своим входным сигналом, а формирующий каскад ОФП является астигматическим с отображением каждого из СИД на свой канал маски.

3. Лабораторный макет ОЭП был создан на основе экспериментального образца фотоприемника, выполненного на базе ФПЗС-13М, в котором в качестве оптического окна использовалась световолоконная шайба, играющая роль отображающей системы. Фотоприемник имел 264 столбца по 290 элементов размером  $24 \times 32$  мкм. Шайба выполнена из волокон диаметром 6 мкм, расположенных упорядоченно в гексагональной упаковке. Толщина шайбы (длина волокон) со-

ставляла 2,5 мм. В качестве источника света в макете использовалась линейка СИД типа ИПТЮБ, имеющая 63 элемента размером 50x25 мкм с независимым управлением. Формирующий каскад был выполнен из сферической и цилиндрической линз с  $f = 50$  мм. Маска была изготовлена фотографическим способом на фотошленке с высоким разрешением. Изготовление промежуточного шаблона в масштабе 20:1 было выполнено на печатающем устройстве типа РОБОТРОН в графическом режиме работы с точностью 0.1%. Устройство управления обеспечивало работу ФПЗС в стандартном телевизионном режиме с контролем видеосигнала на мониторе, а также в ВЗН-режиме. Выходной сигнал процессора регистрировался с помощью быстродействующего АЦП типа Ф4226 с буфером памяти объемом 1024 отсчета. Обработка выходного сигнала процессора и генерация обрабатываемых сигналов выполнялись с помощью микроЭВМ типа ДВК-3.

При исследовании работы процессора использовались сигналы вида

$$U(n) = \begin{cases} 0.5(1 + D \cos[\beta_m \cdot (n - n_0)^2]), & |n - n_0| \leq 145, \\ 0.5 & , \quad |n - n_0| > 145, \end{cases} \quad (3)$$

где  $D \leq 1$  - глубина модуляции;  $n$  - номера отсчетов,  $n_0$  - положение середины сигнала;  $\beta_m$  - коэффициент, зависящий от номера канала. Такие сигналы характерны для систем синтеза радиоизображений местности [4] и соответствуют отклику точечного источника на местности. Процессор в таких системах должен осуществлять корреляционное выделение сигнала вида (3), поэтому в нем используется маска, представляющая собой часть зонной пластины Френеля, вид которой представлен на рис. 1, б.

На рис. 2, а представлен тестовый входной сигнал длительностью  $N = 290$  отсчетов, соответствующий каналу  $m = 170$  ( $\beta_m = 31$ ). На рис. 2, б представлен импульсный отклик процессора в этом канале, показывающий изменение коэффициента пропускания маски по каналу (в макете использовалась бинарная маска и спадающая к краям засветка). Провал в центре пятна связан с особенностями используемой матрицы ФПЗС - наличием промежутка, делящего в обычном телевизионном режиме светочувствительную поверхность прибора на секции накопления и памяти. На рис. 2, в представлен выходной сигнал процессора для рассматриваемого канала для случая  $n_0 = 195$ . Анализ показывает, что экспериментальный отклик процессора хорошо соответствует расчетному по форме сигнала, его ширине, уровню боковых лепестков. На рис. 2, г показан отклик процессора на два входных, налагающихся друг на друга сигнала. Сигналы имели одинаковые амплитуды, длительности  $N = 290$  отсчетов и были сдвинуты друг относительно друга на 15 отсчетов. На выходе процессора в этом случае регистрируются два сигнала одинаковой амплитуды с соответствующим разнесением во времени на те же 15 отсчетов.

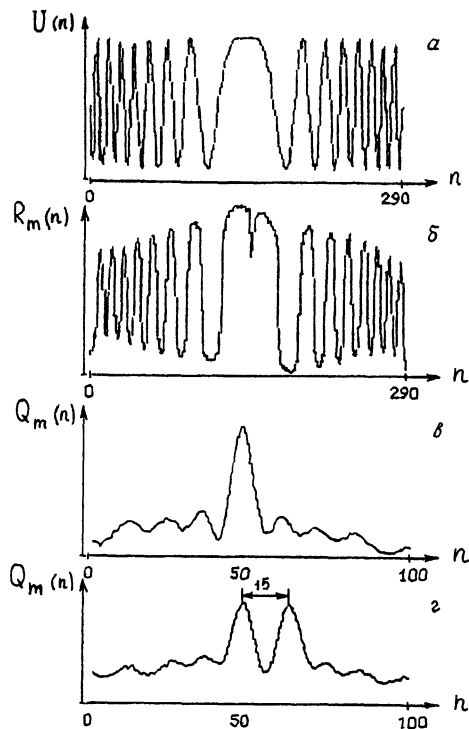


Рис. 2.

Проведенные исследования показывают, что имеющаяся в настоящее время отечественная элементная база позволяет реализовать оптоэлектронный процессор высокой производительности в виде гибридной структуры с малыми габаритами и высокой жесткостью конструкции. Дальнейшие перспективы улучшения характеристик ОЭП связаны с использованием линеек СИД с размерами элементов, соответствующими размеру столбца ФПЗС. В этом случае первый формирующий каскад также может быть выполнен в виде волоконной шайбы, что существенно сократит габариты процессора. Использование в ОЭП управляемых модуляторов, например, на основе жидких кристаллов, позволит перестраивать в процессоре ядро преобразования и использовать его в адаптивных системах, в том числе, в обучаемых нейрноподобных системах [7].

#### С п и с е к л и т е р а т у р ы

- [1] В r o m l e y К., М o n a h a n М.А., С a - ж е S.G. // Proc. SPIE. 1981. V. 373. P. 59.  
 [2] Е с е п к и н а Н.А., З а б р о д с к а я В.П., К о - т о в Б.А., Л а в р о в А.П. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 19. С. 1160-1165.

- [3] Есепкина Н.А., Лавров А.П., Дравских З.В. и др. Л.: Препринт САО АН СССР, 1988. № 58Л. 32 с.
- [4] Псалтис Д. // ТИИЭР. 1984. Т. 72. № 7. С. 240-255.
- [5] Гофман М.А., Нежевенко Е.С., Фельдбуш В.И. // Автометрия. 1989. № 3. С. 53.
- [6] Оптическая вычислительная техника. Тематический выпуск. / ТИИЭР. 1984. Т. 72. № 7.
- [7] Кума К., Нитта У., Оhta J., et al. // Technical Digest Intern. Conf. "Optical Computing'91 1991, Salt Lake City. USA. P. 291.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе,  
С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
14 ноября 1991 г.