

где  $L$  — размер шкалы АЦП;  $t_{пр}$  — время преобразования;  $N_0$  — спектральная плотность белого шума на выходе УПТ.

Анализ графиков, представленных на рис. 1, показывает зависимость оптимального числа разрядов АЦП не только от параметра  $\rho$  (этого следовало ожидать), но и от уровня доверительной вероятности.

Подобные зависимости могут быть построены и для других типов АЦП, что позволит на этапе проектирования осуществлять выбор как типа АЦП, так и его разрядности, минимизируя показатель достоверности.

На рис. 2, а, б представлены вероятности  $P(i|z = L_0)$ , где  $L_0$  — уровень квантования, находящийся в середине шкалы АЦП как функции номера уровня квантования  $i$  при оптимальном значении разрядности АЦП. Из последних зависимостей следует интересный вывод, что при оптимальной разрядности АЦП функцией параметра  $\rho$  является также и достоверность отдельного разряда.

Таким образом, выбор типа и разрядности АЦП для достижения его наилучших точностных показателей при фиксированном времени преобразования должен осуществляться с учетом не только шумовых характеристик элементной базы, но и заданных требований по уровню доверительной вероятности результата преобразования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Высокопроизводительные преобразователи формы информации**/А. И. Колдаев, В. А. Багацкий, В. А. Романов, В. А. Фабричев.— Киев: Наук. думка, 1987.
2. **Гитис Э. И., Пискулов Е. А. Аналого-цифровые преобразователи.**— М.: Энергоиздат, 1981.
3. **Аналого-цифровые преобразователи с переменной значностью**/Ю. В. Мельничук, М. А. Раков, В. С. Якушев.— Киев: Наук. думка, 1988.

Поступило в редакцию 12 мая 1989 г.

УДК 621.3.049.771.12 : 621.396.96(088.8)

Х. И. КЛЯУС, А. И. КОЗЛОВ, В. П. МУСЛИВЕЦ, Е. И. ЧЕРЕПОВ  
(Новосибирск)

#### ПЯТИТОЧЕЧНЫЙ АНАЛОГОВЫЙ СВЕРТЫВАТЕЛЬ НА ПРИБОРАХ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Многие методы обработки сигналов включают двумерную свертку изображения и матрицы весовых коэффициентов (опорного сигнала). Для большинства алгоритмов сокращения объема передаваемой информации, фильтрации сигналов, подавления импульсных помех, выделения на изображении точечных целей и перепадов яркости (контуров) размер взвешивающей матрицы обычно не превышает  $5 \times 5$  элементов [1—3]. Вычисление свертки видеосигнала и весовых коэффициентов в реальном масштабе времени могут осуществлять аналоговые устройства на приборах с зарядовой связью (ПЗС). Например, при организации поточного вычис-

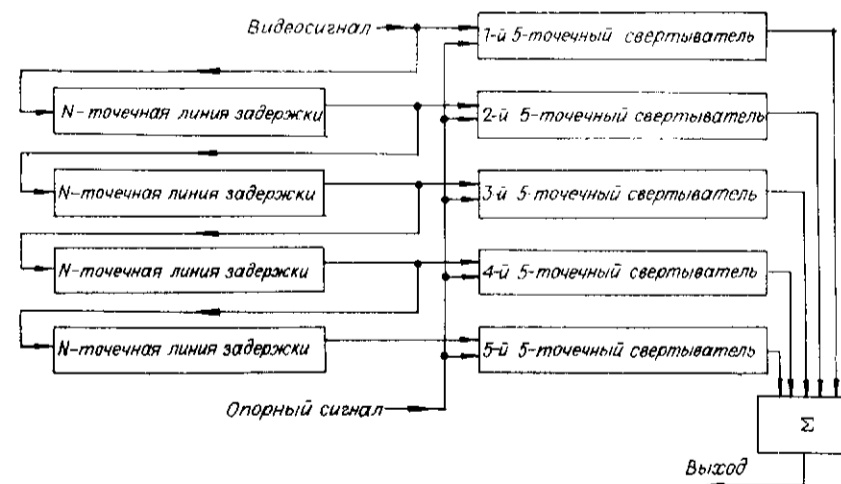


Рис. 1. Организация вычислительного процесса в виде «скользящего окна»:  
 $N$  — число элементов в строке исходного изображения

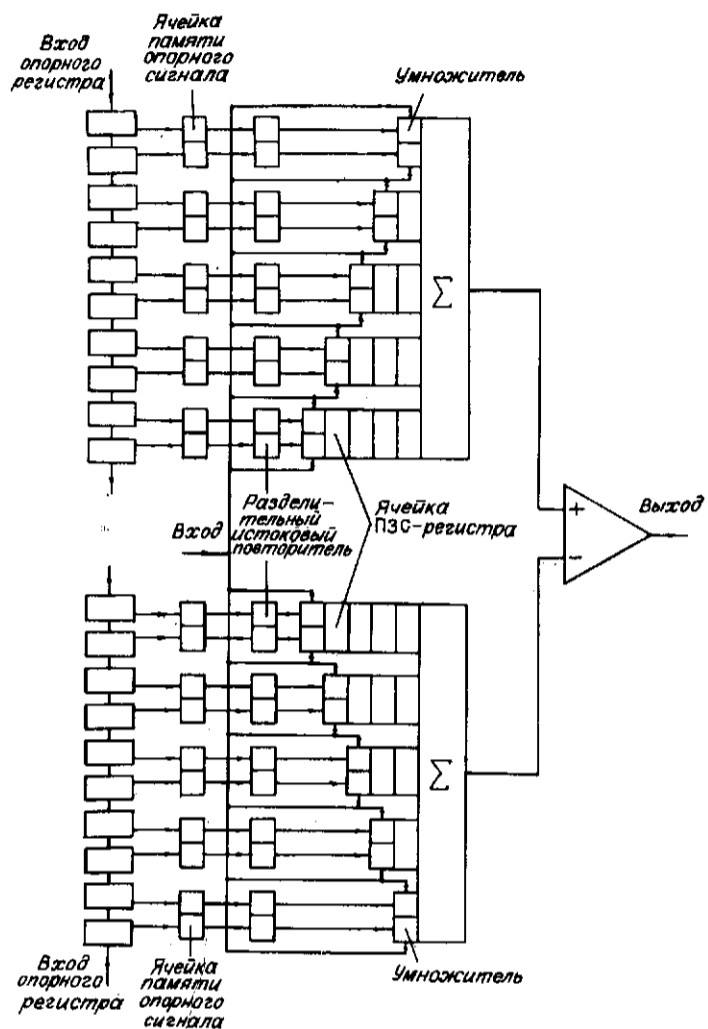


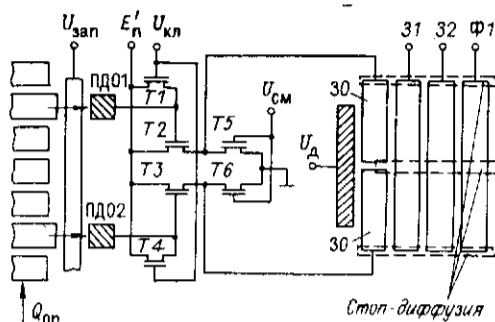
Рис. 2. Блок-схема 5-точечного аналогового свертывателя на ПЗС

лительного процесса в виде «скользящего окна» реализация вышеуказанных алгоритмов сводится к построению быстродействующего одномерного свертывателя (рис. 1) [4]. В настоящей работе рассматривается 5-точечный свертыватель, в котором допустимы цифровые (-2, -1, 0, +1, +2) и аналоговые значения весовых коэффициентов, приводятся экспериментальные характеристики.

Разработанное устройство свертки содержит два блока линий задержки (БЛЗ), умножители, ячейки памяти весовых коэффициентов, два регистра ввода опорного сигнала (рис. 2) [5]. БЛЗ включает набор пяти аналоговых линий (каналов) задержки различной длины (от 1 до 5 ячеек ПЗС). Входное устройство каждого канала состоит из двух электродов 31, 32, диффузионной области и умножающего затвора 30 (рис. 3). Это позволяет вводить сигнальный заряд одним из стандартных способов [6]. Умножающие затворы 30 под управлением опорного кода, хранящегося в ячейках памяти, модулируют сигнальный заряд, вводимый в соответствующий канал БЛЗ. Ячейки канала БЛЗ спроектированы с четырьмя передающими электродами. Каждый электрод переноса канала БЛЗ электрически связан с соответствующей шиной. При подаче на эти шины управляющих импульсов осуществляется перенос введенного сигнального заряда к выходу БЛЗ. Взвешенные заряды из всех каналов суммируются и преобразуются в напряжение на выходе БЛЗ.

Получение выходного сигнала свертывателя путем вычитания выходных сигналов двух БЛЗ обеспечивает следующий набор цифровых весовых коэффициентов: -2, -1, 0, +1, +2. При записи в ячейки памяти значения цифровых коэффициентов необходимо кодировать: «0» представляется в виде «00», «1» — в виде «01» или «10», «2» — в виде «11». Кроме того, неотрицательные значения опорного сигнала вводят в один сдвиговый регистр, а неположительные — в другой. В случае аналоговых весовых коэффициентов для записи в сдвиговые регистры используют неин-

Рис. 3. Принципиальная электрическая схема входного устройства канала БЛЗ



вертированный и инвертированный опорные сигналы с общим постоянным смещением.

Каждый из регистров ввода опорного сигнала непрерывно вводит поток данных. По команде, подаваемой на шину  $U_{зап}$ , данные из регистра ввода опорного сигнала параллельно загружаются в ячейки памяти (см. рис. 2). Ячейки памяти выполнены в виде «плавающих» диффузионных областей (ПДО1 и ПДО2) стоков зарядных ключей (Т1, Т4) (см. рис. 3) [7]. После записи опорного заряда напряжение на ПДО1 (ПДО2) изменяется на величину, пропорциональную поступившему заряду. Шина  $U_{зап}$  изолирует ячейки памяти весовых коэффициентов от регистров таким образом, что в свертывателе может осуществляться вычисление свертки поступающего сигнала с запомненным опорным кодом даже в то время, когда новый опорный сигнал будет записываться в регистры ввода. Разделительные истоковые повторители опорного сигнала обеспечивают ослабление паразитной модуляции входным сигналом весовых коэффициентов, хранимых в ячейках памяти [6].

Выходной сигнал данного устройства  $U_{вых}(i)$  в  $i$ -й момент времени можно записать следующим образом:

$$U_{вых}(i) = k \sum_{j=1}^{N=5} U_c(i+j-1) R_j, \quad (1)$$

где

$$k = K \times C_{сз} / C_{пд} \quad (2)$$

для случая цифрового опорного сигнала;

$$k = 2 \times K \times K' \times C_{сз} \times C_{сд} / C_{пд} C_{до} \quad (3)$$

для случая аналогового опорного сигнала;  $C_{сз}$  — эффективная емкость второго входного затвора опорного регистра;  $C_{пд}$  — полная емкость выходной диффузионной области;  $C_{сд}$  — эффективная емкость второго затвора входного устройства БЛЗ;  $C_{до}$  — емкость диффузионной области ячейки ОЗУ опорного сигнала;  $K'$  — коэффициент передачи разделительного истокового повторителя опорного сигнала;  $K$  — коэффициент передачи выходного усилителя;  $R_j$  — значение опорного кода, соответствующее  $j$ -у каналу БЛЗ;  $U_c(i)$  — значение входного сигнала в  $i$ -й такт ввода. Выражение (1) представляет собой одномерную дискретную свертку двух сигналов.

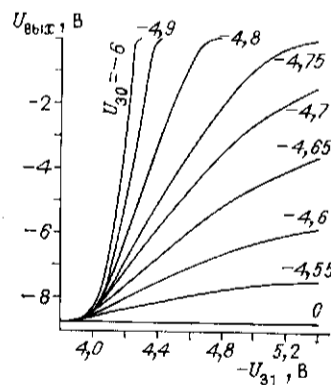


Рис. 4. Передаточная характеристика для линии задержки на ПЗС с двумя сигнальными входными затворами при вводе заряда методом динамической инжекции

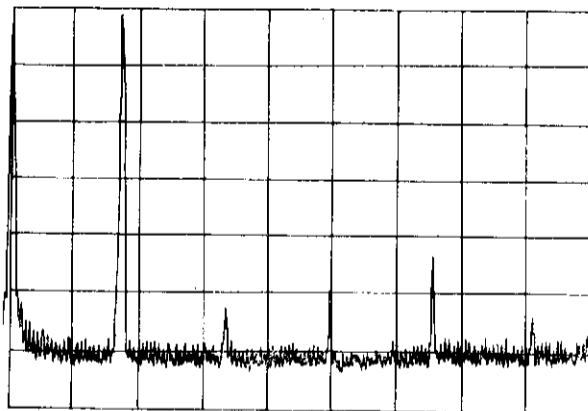


Рис. 5. Спектр выходного сигнала (по оси ординат — 10 дБ на деление, по оси абсцисс — 10 МГц на деление)

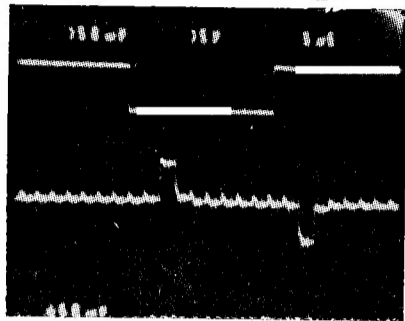


Рис. 6. Выходной сигнал устройства в режиме дифференциатора сигналов

Свертыватель изготовлен по стандартной МДП-технологии на кремнии КЭФ-7.5 с кристаллографической ориентацией (1 0 0). Размеры разработанного кристалла  $5 \times 5$  мм. Кристалл имеет 48 контактных площадок, для работы прибора требуется 33 площадки, причем 3 из них могут быть объединены. Приведенные ниже экспериментальные данные получены при обследовании нескольких приборов и могут рассматриваться как типичные.

Применение аналогового опорного сигнала в разработанном устройстве обусловлено модуляцией тока инжекции (при соответствующем способе ввода заряда в ПЗС) потенциалами двух входных электродов 30 и 31. Модуляцию тока инжекции иллюстрирует семейство передаточных характеристик линии задержки на ПЗС (рис. 4). Передаточные характеристики получены путем регистрации выходного сигнала при постоянном напряжении

на диффузионной области и изменении потенциала на одном из входных электродов (31). Параметром является напряжение на другом электроде (30).

Для оценки динамического диапазона ячейки умножения и канала задержки на вход свертывателя подавался сигнал синусоидальной формы (16 кГц), а в ячейке памяти опорного сигнала записывалась одна единица, которая обеспечивала прохождение на выход прибора взвешенной синусоиды от единственной точки свертывателя. БЛЗ и регистры ввода опорного сигнала приводились в действие перекрывающимися тактовыми импульсами с частотой повторения 500 кГц. Ввод заряда осуществляется посредством метода «модифицированной отсечки диода» [8]. Сигнал прикладывался ко второму затвору 32 входного устройства ПЗС, на первый затвор 31 подавались импульсы «отсечки», а диффузионная область находилась под постоянным смещением. Время перезаписи опорного кода из регистра ввода в ячейки памяти не превышало 0,1 мкс. Для выделения полезной составляющей выходного сигнала применена схема выборки-хранения, состоящая из двух истоковых повторителей, ключа выборки и емкости хранения. Выходной сигнал подавался на анализатор спектра. Ширина полосы частот анализатора составляла 100 Гц. Спектр выходного сигнала для описанного случая показан на рис. 5. Первая гармоника сигнала на 56 дБ выше пиков шума, в то время как вторая, третья и четвертая гармоники ниже уровня основной частоты на 45 дБ. Аналогичные соотношения между первой гармоникой сигнала, шумами и высшими гармониками получены для сигналов в диапазоне частот от 200 Гц до 60 кГц. При дальнейшем увеличении частоты входного сигнала наблюдались уменьшение первой гармоники сигнала и увеличение высших гармоник, вызванные, по-видимому, влиянием процессов дискретизации-восстановления. На выходе свертывателя среднее значение нормированной погрешности, вызванной технологическим разбросом параметров каналов БЛЗ, составляет 0,6–0,8% и определяет точность суммирования, эквивалентную 7 разрядам при цифровом представлении. Измеренная эффективность переноса заряда в канале БЛЗ с фоновым зарядом — не менее 0,9999 на тактовых частотах до 2 МГц.

Данное устройство испытано в качестве дифференциатора сигналов. Кодовый генератор формировал опорные последовательности (0 0 —2 +2 0), которые записывались в ячейки памяти опорного сигнала. Сигнал прямоугольной формы (10 единиц, 100 пугей) подавался на вход БЛЗ. Таким образом, осуществлялось дифференцирование вводимого сигнала. Исходный и обработанный сигналы для этого случая показаны на рис. 6. Разработанное устройство функционировало на тактовых частотах порядка 6 МГц без ухудшения качества работы.

При построении вычислительной системы (например, на основе алгоритма Собела) путем организации «скользящего окна» шесть разработанных ИС вместе с ИС К528БР2, содержащей две линии задержки по 512 каскадов, позволяют обрабатывать 20 кадров исходного полноформатного изображения за 1 с.

## ВЫВОДЫ

Разработан 5-точечный свертыватель на ПЗС, в котором допустимы цифровые (–2, –1, 0, +1, +2) и аналоговые значения весовых коэффициентов.

Для линии задержки на ПЗС, имеющей два входных затвора, получена передаточная характеристика, показывающая возможность аналогового умножения во входном устройстве ПЗС при вводе заряда методом динамической инжекции.

В описанном свертывателе экспериментально достигнута скорость работы, позволяющая использовать созданный образец при обработке полноформатных изображений в реальном масштабе времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.: Сов. радио, 1979.
2. Кузнецов Ю. А., Шилин В. А. Микросхемотехника БИС на приборах с зарядовой связью. — М.: Радио и связь, 1988.
3. Прэрт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982.
4. Hicks Eby. Signal processing techniques in commercially available high-speed optical character reading equipment // SPIE.— V. 180: Real-Time Signal Proces.— 1979.— 11.— P. 242.
5. Козлов А. И., Кляус Х. И., Черепов Е. И. Пятиточечный аналоговый свертыватель на приборах с зарядовой связью. Распределенная обработка информации // Тез. докл. Третьего регионального семинара.— Улан-Удэ, июль 1989.
6. Приборы с зарядовой связью/Под ред. М. Хоувза и Д. Моргана: Пер. с англ.— М.: Энергоиздат, 1981.
7. А. с. 913563 СССР. Программируемый трансверсальный фильтр/Х. И. Кляус, И. И. Ли, В. В. Филиппова, Е. И. Черепов.— Оpubл. 15.03.82. Бюл. 10.
8. Gradl D. A. CCD sampling of high-frequency broad-band signals // IEEE J. of Solid-State Circuits.— 1982.— SC-17, N 3.— P. 619.

Поступило в редакцию 5 июля 1989 г.

УДК 621.397.2 : 519.65

Ф. Д. МЕЖОВ  
(Ленинград)

### ВЕСОВАЯ ФУНКЦИЯ ИНТЕРПОЛЯТОРА ДЛЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В последнее время широкое распространение в качестве интерполяционных функций получили кубические сплайны различных типов. В частности, для массива отсчетов  $U = \{u_k\}$ ,  $k = \overline{1; N}$ , заданного на равномерной сетке  $x_1 < x_2 < \dots < x_N$  с шагом  $x_{k+1} - x_k = h_1$  для всех  $k$ , применяется сплайн

$$S(x) = \sum_{k=1}^N A_k B_k(x), \quad x \in [x_1; x_N],$$

где  $B(x)$  — кубический  $B$ -сплайн [1].

Свойства  $B$ -сплайна таковы, что для каждого интервала  $[x_k; x_{k+1}]$  интерполяционная формула имеет вид

$$S(x_k + h_1 \xi) = \sum_{r=k-1}^{k+2} c_r b_r(\xi), \quad \xi \in [0; 1], \quad (1)$$

где  $\xi = (x - x_k)/h_1$ ,  $b_r(\xi) = 6h_1 B_r(\xi)$ ,  $c_r = A_r/6h_1$ .

Требование совпадения в узлах сетки значений сплайна и интерполируемой функции приводит к системе уравнений относительно неизвестных коэффициентов  $c_r$ :

$$CL = U, \quad (2)$$

где  $C = \{c_k\}$ ,  $k = \overline{1; N}$ ;  $L$  — трехдиагональная матрица размером  $N \times N$ . Элементы главной диагонали этой матрицы равны четырем, а элементы побочных диагоналей — единице.

Решать систему (2) обычно рекомендуется методом прогонки [1]. Однако удобнее в интерполяционной формуле (1) использовать матрицу  $L^{-1}$ , обратную матрице  $L$ . Поскольку

$$L^{-1} = Q/\Delta(N),$$

где  $Q = \{q_{ik}\}$  — матрица, присоединенная к матрице  $L$ , а  $\Delta(N)$  — определитель матрицы  $L$ , то из (2) следует, что

$$c_r = \frac{1}{\Delta(N)} \sum_{m=1}^N u_m q_{mk},$$

и сплайн (1) можно представить как отклик линейной системы на входной сигнал  $\{u_m\}$ :

$$S(x_k + h_1 \xi) = \frac{1}{\Delta(N)} \sum_{m=1}^N u_m \alpha_{k-m}(\xi), \quad (3)$$