

УДК 621.397.13

Аппаратная реализация систем ввода, обработки, хранения и вывода изображений различных телевизионных форматов и стандартов

А.В. Бондаренко, И.В. Докучаев, В.Б. Стешенко

Введение

Качественный скачок в степени интеграции современной элементной базы за последние годы позволяет реализовать схемотехнические решения, которые ранее не были достижимы. Это появление высокоскоростных АЦП/ЦАП с большим динамическим диапазоном, скоростных микросхем памяти SD/SGRAM большой емкости и ПЛИС [5], в которых можно разместить практически всю систему обработки информации. Растут требования и к системам «оцифровки» изображений для решения целого ряда задач обработки, в частности обработки медицинских изображений больших пространственных разрешений, а также в телевидении высокой четкости [2], [4]. Автоматизация медицинских и научных исследований, создание экспертных и измерительных систем, средств оперативной видеотелеконференц-связи заставляют искать пути получения и обработки высококачественных изображений. Отсутствие на российском рынке недорогих универсальных высоко-эффективных систем ввода-вывода и обработки изображений, работающих с различными видеоформатами, ставит задачу их создания.

В настоящее время научно-производственной фирмой «Растр Технолоджи» выпускается целый ряд видеопроцессоров, совмещенных с функцией захвата кадров (Frame Grabber), перекрывающих динамический и частотный диапазон АЦП от 8 бит 32 МГц (RT-822VP), 10 бит 60 МГц (RT-821VP, RT-823VP) и до 12 бит 105 МГц (RT-851VP) [1].

Общие характеристики видеопроцессоров

Рассмотрим как пример реализации специализированные платы серии RT-8xxVP, разработанные фирмой «Растр Технолоджи» [1]. Эти платы представляют собой мультиформатные видеопроцессоры, предназначенные для высококачественного ввода черно-белого телевизионного изображения в ПК и обработки его в реальном времени. В качестве источника сигнала могут использоваться телекамеры, ПЗС-линейки и матрицы, видеомагнитофоны, электронные микроскопы, рентгеновские установки, УЗИ-сканеры и другие устройства, выдающие видеосигнал в различных форматах (стандартах). Платы имеют 4-канальный входной мультиплексор и видеовыход, позволяющий контролировать на внешнем видеоконтрольном устройстве (ВКУ) ввод сигнала, выводить на ВКУ «замо-

Приведен обзор аппаратных средств цифровой обработки сигналов, обеспечивающих ввод, обработку, хранение и вывод изображений различных телевизионных форматов и стандартов. К таким устройствам относятся: видеопроцессоры реального времени, совмещенные с функцией захвата кадров (Frame Grabber); цифровые камеры высокого разрешения и динамического диапазона на ПЗС-матрицах и линейках; высокоскоростные интерфейсы систем ввода цифровых данных в компьютер.

роженный» кадр или последовательность кадров в реальном масштабе времени. Различные автоматические настройки дают возможность производить обработку видеосигнала без участия оператора. Видеопроцессоры имеют аналоговую ФАПЧ, представляющую собой фазовый детектор, фильтр, накопительный конденсатор, широкодиапазонный ГУН, делитель на 2 и выходной буфер. ФАПЧ позволяет стабилизировать дрожание пикселя до ± 4 нс. Используя счетчики с переменным коэффициентом деления, можно добиться большого диапазона перестройки строчных и пиксельных частот.

Для подключения внешних сигналов синхронизации или управляющих и исполнительных устройств в RT-82xVP имеется четырехразрядный, а в RT-851VP – девятиразрядный цифровой интерфейс (ТТЛ). Важным свойством плат является сочетание таких характеристик, как высокое пространственное разрешение и ввод сигналов без пропуска кадров с высокой частотой их следования (более 60 Гц). Это достигается благодаря специальной организации внутреннего буфера памяти и встроенному PCI-контроллеру, который работает в режиме DMA и обеспечивает среднюю скорость пересылки данных более 60 Мбайт/с (без участия центрального процессора) [3].

Типичные технические характеристики приборов приведены в табл. 1.

Аппаратная реализация

На рис. 1 представлена функциональная схема устройства RT-851VP.

Устройство состоит из следующих функциональных узлов [1], [3]:

- 4-канальный видеомultipлексор – осуществляет коммутацию аналоговых входов (время переключения – 8 нс);
- схема восстановления постоянной составляющей (DC) – осуществляет фиксацию уровня гашения;
- нормирующий усилитель – обеспечивает согласование уровня входного сигнала с динамическим диапазоном АЦП;

Таблица 1

Технические характеристики	RT-822VP	RT-823VP	RT-851VP
Разрядность данных при вводе, бит	8	от 8 до 10	от 8 до 12
Разрядность данных при выводе, бит	8	от 8 до 10	
Входное сопротивление, Ом	75		
Уровень входного сигнала, В	0,5 – 2		
Регулировка усиления, дБ	± 6 (256 градаций)		
Регулировка уровня черного, В	± 0,3 (256 градаций)		
Синхронизация	внутренняя и внешняя (ТТЛ)		
Частота строк, кГц	12 – 20	12 – 100	
Пиксельная частота, МГц	от 8 до 32	от 2,5 до 60	от 2,5 до 64
Объем внутренней памяти, МБ	4	8	16
Функции настройки и обработки изображений	RT-822VP	RT-823VP	RT-851VP
Автоматическая настройка оптимальных значений яркости и контрастности вводимого изображения	+	+	+
Усреднение полукадров	+	+	+
Накопление и усреднение 2, 4, 8, 16, 32, 64, 256 смежных кадров	до 256	до 64	до 64
Регулировка аспектного соотношения телевизионного изображения	+	+	+
Программная регулировка размеров и положения области ввода изображения в пределах телевизионного растра	+	+	+
Программная регулировка размеров и положения области вывода изображения в пределах телевизионного растра	-	+	+
Анализ и автоматическая настройка входного телевизионного сигнала	-	-	+
Рекурсивное накопление с различными весовыми коэффициентами непрерывной последовательности телевизионных кадров	-	-	+
Вычитание фона (маски) с различными весовыми коэффициентами	-	-	+
Сложение/вычитание вводимого телевизионного изображения с заданным кадром	-	-	+
Дополнительное повышение контрастности вводимого изображения	-	-	+
Режим обработки в окне	-	-	+
Построение гистограммы распределения яркости	-	-	+

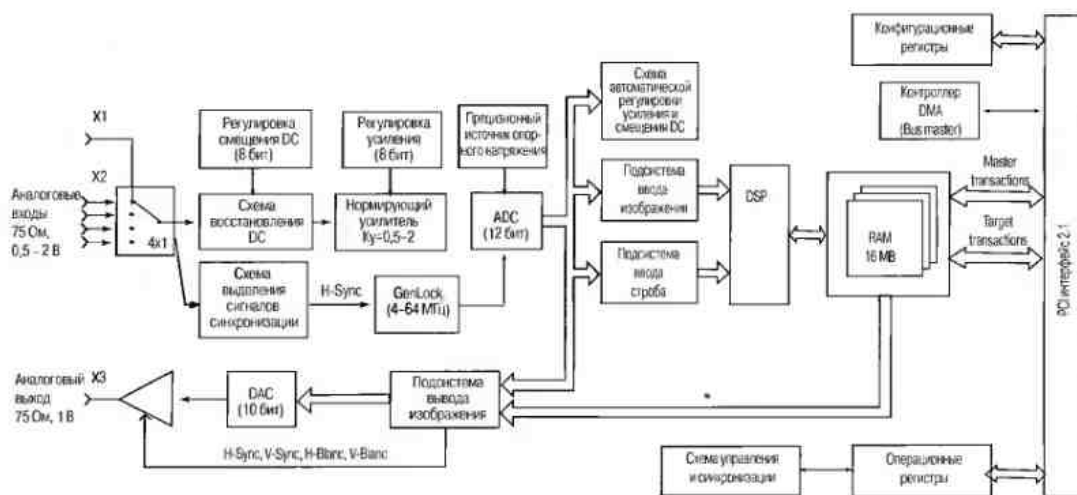


Рис. 1. Функциональная схема устройств RT-851VP

- схема регулировки смещения постоянной составляющей (DC) и усиления – позволяет программно автоматически или вручную настраивать яркость и контрастность входного телевизионного изображения (256 градаций);
- схема выделения сигналов синхронизации – выделяет из входного сигнала строчные и кадровые синхросимпульсы;
- ADC – 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП); для повышения стабильности и точности преобразования используется прецизионный источник опорного напряжения;
- GenLock – широкодиапазонный генератор частоты квантования входного сигнала (пиксельной частоты); имеет систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и обеспечивает дрожание пикселя (*jitter*) не более ± 4 нс;
- DAC – 10-разрядный выходной цифроаналоговый преобразователь (ЦАП); использует старшие 10 бит 12-разрядных данных;
- подсистема ввода изображения – основной канал ввода; формирует окно ввода кадров изображения, осуществляет управление фиксацией изображения во внутреннем буфере памяти;
- подсистема ввода строба – дополнительный канал ввода, работающий параллельно с основным; позволяет вводить изображение с другим форматом окна и другими функциями цифровой обработки, используется так же, как вспомогательный канал для DSP-обработки данных основного канала ввода;
- подсистема вывода изображения – формирует окно вывода выходного изображения, вырабатывает сигналы синхронизации, осуществляет переключение потоков данных (сквозной канал АЦП-ЦАП / вывод из внутреннего буфера памяти);
- выходной усилитель – формирует выходной телевизионный сигнал и обеспечивает согласование с 75-омной нагрузкой;

- схема управления и синхронизации – осуществляет общее управление всеми процессами в устройстве;
- RAM – 32-разрядный внутренний буфер памяти (SDRAM, 16 МБ); буфер функционально разделен на 8 банков по 2 Мбайта;
- DSP – блок цифровой обработки сигналов реального времени; выполняет целочисленные операции сложения, вычитания, умножения и деления элементов одного или нескольких изображений; позволяет реализовать различные виды накопления; блок DSP является динамически загружаемым в процессе работы устройства модулем (программа загружается из файла на диске); время обновления функции – не более 10 мс;
- PCI Interface V2.1, контроллер DMA, конфигурационные и операционные регистры – обеспечивают связь RT-851VP с оперативной памятью компьютера через шину PCI в режимах MASTER и TARGET.

Блок DSP, конвейер, конечный автомат работы с SDRAM и стеки FIFO реализованы на ПЛИС ALTERA семейства APEX EP20K100QC240-2; интерфейс-мастер PCI V2.1, интеллектуальный контроллер, входные/выходные ФАПЧ, управление электронными регулировками и настройками на семействе ACEX EP1K50FC256-2. Плата выполнена по технологии двухстороннего поверхностного монтажа с применением FBGA-256 корпуса с шагом 1 мм. Габаритные размеры – 120x102x18 мм [5], [6].

Устройство ввода и обработки изображений обеспечивает следующие основные режимы работы:

- **фиксацию** телевизионного **кадра** во внутреннем буфере памяти;
- **передачу** данных через интерфейс PCI;
- **мониторирование** (просмотр) входного телевизионного сигнала на внешнем мониторе (или ВКУ – видеоконтрольном устройстве);
- **визуализацию** (просмотр) на внешнем мониторе (ВКУ) телевизионных кадров, записанных во внутреннем буфере памяти.

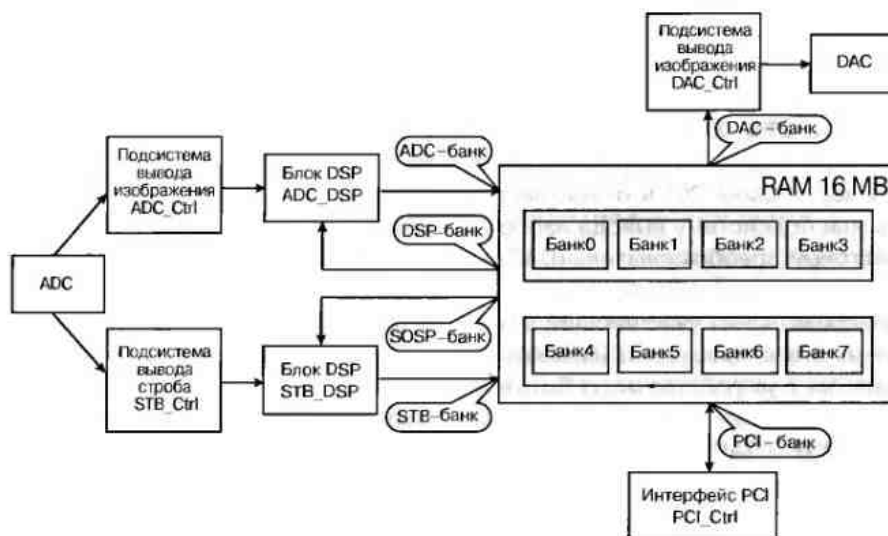


Рис. 2. Структура буфера видеопроцессора

Различные сочетания перечисленных режимов работы устройства предполагают его использование в следующих вариантах:

- непрерывный или одиночный ввод телевизионных кадров (с обработкой или без таковой) в компьютер с одновременным контролем вводимого исходного или обработанного изображения на внешнем мониторе;
- непрерывный или одиночный ввод телевизионных кадров (с обработкой или без) в компьютер с одновременным просмотром любого ранее введенного телевизионного кадра на внешнем мониторе; при этом формат вводимого и выводимого телевизионного изображения может быть различным;
- вывод серии ранее введенных кадров или полукадров на внешний монитор в реальном времени или с замедлением (без ввода изображения в компьютер).

Использование входного коммутатора на 4 аналоговых входа и 4 программируемых цифровых входов/выходов позволяет реализовать функциональные дополнительные возможности: подключение до 4 источников ТВ-сигнала (возможно RGB), использование внешних команд управления, подключение исполнительных устройств и т.д.

Отдельно хотелось бы рассмотреть особенности организации буфера памяти, поскольку, как правило, это наиболее критичный узел систем ввода и обработки видеоизображений. Структура буфера приведена на рис. 2 (видеопроцессор RT-851VP).

Внутренний буфер памяти имеет объем 16 Мбайт и состоит из 8 банков по 2 Мбайт. Каждый банк используется для записи и хранения одного телевизионного кадра.

Логика работы видеопроцессора предполагает одновременное обращение к внутренней памяти со стороны нескольких подсистем устройства. При захвате видеосигнала данные от аналого-цифрового преобразователя (ADC) сначала через подсистемы ввода изображения и строба заносятся в банки памяти, определяемые регистрами **ADC_Ctrl** и **STB_Ctrl**. Если при этом задействована какая-либо функция цифровой обработки, то в качестве второго операнда используются данные из банков, определяемых регистрами **ADC_DSP** и **STB_DSP** соответственно. После «оцифровки» всего кадра или строба данные могут передаваться через шину PCI в оперативную память компьютера или подсистему вывода изображения в цифроаналоговый преобразователь (DAC) и далее на ВКУ.

Банк памяти, непосредственно участвующий в одном из перечисленных выше процессов, называется активным. Таким образом, в устройстве могут быть несколько активных банков, которые условно назовем **PCI**, **ADC**, **DSP**, **STB**, **SDSP** и **DAC**-активными банками. Номера активных банков определяются соответственно битами D2-D0 регистров **PCI_Ctrl**, **ADC_Ctrl**, **ADC_DSP**, **STB_Ctrl**, **STB_DSP** и **DAC_Ctrl**.

Назначение активных банков при вводе и выводе одиночных кадров может быть любым. Достаточно, на-

пример, использовать нулевой банк в качестве активного ADC-банка для «оцифровки» кадра и в качестве активного PCI-банка для последующей передачи его через шину PCI.

При вводе или выводе непрерывного потока кадров манипулирование активными банками памяти должно подчиняться определенному правилу: «оцифровка» или вывод телевизионного изображения осуществляются в банке, отличном от банка, выбранного в данный момент для передачи данных по шине PCI. Это позволит избежать пропуска кадров при вводе и выводе изображения. Помимо этого следует учесть, что внутри буфера существует разделение банков памяти на две группы – это банки с номерами 0–3 и 4–7. Доступ к банкам из разных групп осуществляется параллельно, внутри одной группы – последовательно (в порядке поступления запросов от различных подсистем видеопроцессора). Поэтому при больших частотах «оцифровки» и использовании DSP-обработки, когда плотность потока данных значительно возрастает, для эффективного управления процессами ввода-вывода изображения следует пользоваться банками из разных групп. Правильная организация конвейера – довольно нетривиальная задача и будет рассмотрена отдельно.

Обмен данными на шине PCI может проходить в двух режимах: **MASTER** и **TARGET**. В режиме **TARGET** передача данных осуществляется с помощью простых языковых операторов типа **copy**. В режиме **MASTER** задействован механизм прямого доступа к памяти (DMA). Скорость передачи данных в режиме **MASTER** примерно в шесть раз больше и составляет более 60 Мбайт/с.

При обмене данными в режиме **TARGET** каждый банк памяти делится на 128 частей (окон). Одно окно является частью адресного пространства оперативной памяти компьютера размером 16 кбайт и начальным адресом, сдвинутым на 16 кбайт вверх относительно адреса, указанного в первом базовом адресном регистре конфигурационного заголовка платы. Например, если базовый адрес равен 000D0000h, то окно памяти, через которое будет вестись обмен данными, составит диапазон 000D4000h – 000D7FFFh. Номер окна памяти (от 0 до 127), подключенного к адресному пространству компьютера, определяется битами D9..D3 регистра **PCI_Ctrl**.

При обмене данными в режиме **MASTER** (или **DMA**) внутренний буфер памяти видеопроцессора на адресное пространство оперативной памяти компьютера не отображается. Банк памяти представляет собой единое целое и может быть записан или считан целиком за один раз. Обмен данными в режиме **DMA** будет рассмотрен ниже.

При «оцифровке» изображения строки ТВ-кадра во внутреннем буфере памяти располагаются последовательно друг за другом – сначала строки первого поля, затем второго. При передаче изображения в оперативную память компьютера для восстановления правильного чередования строк можно использовать чересст-

рочный обмен данными (то же относится и к выводу изображения на внешний монитор).

Таким образом, мы рассмотрели основы построения аппаратных средств цифровой обработки сигналов, обеспечивающих ввод, обработку, хранение и вывод изображений различных телевизионных форматов и стандартов, предназначенных для применения в научных исследованиях, медицине и промышленности.

Функции цифровой обработки

Используя регистры **ADC_DSP** и **STB_DSP**, осуществляется управление цифровой обработкой ТВ-сигнала, поступающего от подсистем ввода изображения и строба.

Биты	Описание
2..0	Выбор банка в качестве второго операнда для DSP-обработки (выбор активных DSP- и SDSP-банков)
3	Не используется
6..4	Выбор функции DSP-обработки: D2 D1 D0 0 0 0 – ввод без цифровой обработки 0 0 1 – усреднение первого и второго полей кадра 0 1 0 – исключение фона, записанного в DSP-банке 0 1 1 – вычитание DSP-банка 1 0 0 – сложение с DSP-банком 1 0 1 – операция AND с DSP-банком 1 1 0 – операция OR с DSP-банком 1 1 1 – операция XOR с DSP-банком
31..7	Не используются

Изображение, используемое в качестве второго операнда, должно быть записано в активный DSP-банк в 12-разрядном виде.

В видеопроцессоре реализованы следующие функции цифровой обработки:

- *усреднение первого и второго полей кадра* (второго операнда не требуется);
- *исключение фона* из вводимого изображения; функция работает по принципу сравнения значений одинаково расположенных пикселей в двух кадрах (оцифровываемым в данный момент и записанным в DSP-банке) и заменой их на нулевое значение, если разность по модулю не превышает порога, заданного в регистре **DSP_Level** (8 бит);
- *вычитание двух кадров*; в качестве вычитаемого используется изображение из DSP-банка;
- *сложение двух кадров*; для исключения переполнения разрядной сетки операнды перед сложением делятся на 2;
- *наложение пространственной маски AND, OR, XOR*.

Регистры **ADC_Accum** и **STB_Accum** осуществляют управление режимом накопления кадров входного ТВ-сигнала, поступающего от подсистем ввода изображения и строба. Если задана какая-либо функция цифро-

вой обработки, то она выполняется в конечной стадии режима накопления при вводе последнего кадра.

В режиме накопления кадров выдача прерываний от подсистемы ввода осуществляется по каждому введенному кадру, а бит готовности (бит D0 регистра **Reg_Stat**) будет установлен по окончании ввода последнего из серии накапливаемых кадров. Процесс накопления можно принудительно остановить, сбросив бит D8 регистра **ADC_Ctrl**.

Биты	Описание
2..0	Выбор количества накапливаемых кадров: D2 D1 D0 0 0 0 – нет накопления 0 0 1 – 2 кадра 0 1 0 – 4 кадра 0 1 1 – 8 кадров 1 0 0 – 16 кадров 1 0 1 – 32 кадра 1 1 0 – 64 кадра 1 1 1 – не используется
31..3	Не используются

Еще одним свойством видеопроцессора является возможность проводить с «оцифрованным» сигналом линейное преобразование по формуле

$$y = a \cdot (x - b),$$

где x – сигнал на входе преобразователя;
 y – сигнал на выходе преобразователя;
 a – константа повышения контрастности;
 b – константа смещения (12 бит).

Суть этого преобразования – повышение контрастности вводимого изображения. Необходимость контрастирования может возникнуть в случае слабого ТВ-сигнала (если не хватает аналоговых регулировок) или сильно зашумленного сигнала (с применением накопления). Фактически знак умножения означает сдвиг старших значащих разрядов каждого пикселя влево, а знак вычитания – перемещения информационной части в область младших разрядов. Значение константы смещения (12 бит) определяется регистрами **ADC_Offset** для подсистемы ввода изображения и **STB_Offset** для подсистемы ввода строба. Значение константы повышения контрастности определяется регистрами **ADC_Contrast** и **STB_Contrast** соответственно.

Биты	Описание
1..0	Значение константы повышения контрастности: D1 D0 0 0 – 1 0 1 – 2 1 0 – 4 1 1 – 8
31..2	Не используются

Гистограмма яркости входного сигнала вычисляется по 8 старшим битам каждого пикселя всякий раз при вводе кадров и представляет собой массив из 256 эле-

ментов, где каждый элемент – это количество пикселей с одним значением яркости. Область вычисления – весь кадр или строб, определяется регистром **ADC_MinMax**.

Для построения гистограммы элементы массива последовательно друг за другом считываются из регистра **Reg_Hist**. Перед началом считывания необходимо записать в регистр **Reg_Hist** любое произвольное значение, тем самым установив счетчик элементов массива в 0. Построение гистограммы проводится после окончания фиксации кадра или строка.

Пример работы видеопроцессора RT-851VP

На рисунках ниже представлены результаты работы видеопроцессора RT-851VP.

Условия съемки – ТВ-камера WATEC-902H, калиброванная освещенность $10E^{-7}$ люкс, электронно-оптический преобразователь (ЭОП).

На *рис. 3а* показан входной кадр, представляющий собой шумовую составляющую ПЗС-матрицы и ЭОП.

На *рис. 3б* – результат обработки, время интеграции – около 4 с. Использовались следующие функции:



Рис. 3. Пример кадра на входе (а) и выходе (б) устройства обработки

- автоматическая настройка на максимальный динамический диапазон АЦП (12 бит);
- рекурсивное накопление по формуле $F_n = k \cdot F_n + (1-k) \cdot F_{n-1}$, при $k=1/32$; 18-битный аккумулятор;
- аппаратное контрастирование в 4 раза.

Использование функции рекурсивного накопления позволяет снизить требования к качеству ПЗС-матрицы, повышая соотношение сигнал/шум.

Литература

1. Техническая документация и руководство пользователя на видеопроцессоры серии RT-8xxVP. ООО «Растр Технолджи». М., 2002, www.rastr.net.
2. Бондаренко А.В., Докучаев И.В. Использование мультимедийного видеопроцессора RT-850 для визуализации и обработки ангиографических изображений в реальном времени. Труды I Евразийского конгресса, V национальной конференции по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика-2001». М., 18–22 июня 2001.
3. Бондаренко А.В. RT-850 – мультимедийный видеопроцессор реального времени. Доклад на 3-й Международной конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М., 2000, 29 ноября – 1 декабря.
4. Бондаренко А.В. Профессиональный мультимедийный видеопроцессор реального времени. Труды международной конференции по биомедицинскому приборостроению «Биомедприбор-2000». 24–26 октября, М., 2000, т.1, с. 183.
5. Стешенко В.Б. Программируемые логические интегральные схемы: обзор архитектур и особенности применения в аппаратуре ЦОС. // Цифровая обработка сигналов, 2000, № 2, с. 39.
6. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы ALTERA: проектирование устройств обработки сигналов. М.: ДОДЕКА, 2000.

Статья подготовлена в ООО «Растр Технолджи» (Raster-msk@mtu-net.ru, www.rastr.net)