

Телевизионная видеокамера с цифровой обработкой сигнала в реальном времени

Андрей Бондаренко, Игорь Докучаев, Михаил Князев (Москва)

В статье описываются технические параметры, режимы работы и применение цифровой видеокамеры прогрессивного сканирования высокого разрешения и динамического диапазона. Приведены алгоритмы обработки потока видеоданных в реальном времени. Цифровая камера предназначена для получения высококонтрастных изображений в системах слежения, распознавания, медицинской радиологии, микроскопии и научных исследованиях.

ВВЕДЕНИЕ

Телевизионная цифровая видеокамера RT-1000DC, разработанная в «Растр технолоджи», изначально предназначалась для замены выработавших свой ресурс видеоконвертеров в ангиографических аппаратах импортного производства. Однако характеристики видеокамеры позволяют использовать её во многих приложениях, где исследуемый объект имеет слабые контраст и освещённость.

Цифровая видеокамера позволяет получить высококачественное чёрно-белое телевизионное изображение прогрессивного сканирования, цифровую обработку в реальном времени и ввод в ПЭВМ. Видеокамера также позволяет выводить получаемое изображение из блока фотоприёмника на стандартный телевизионный монитор с чересстрочной развёрткой или на компьютерный RGB-монитор при разрешении 1280 × 1024 / 60 Гц. Использование прогрессивной развёртки позволяет получать чёткие кадры динамических объектов.

Видеокамера состоит из следующих узлов: блока фотоприёмника с блоком цифровой обработки (DSP-блоком), кабеля связи и устанавливаемой в компьютере платы управления с цифровым интерфейсом RT-644. Передача изображения производится на расстоянии до 10 м с использованием канала связи Channel Link (IEEE-644).

Важным свойством платы цифрового интерфейса RT-644 является возможность при сохранении высокого пространственного разрешения изображения обеспечивать ввод сиг-

нала в компьютер и запись его на жёсткий диск без пропуска кадров даже при высокой частоте смены кадров (до 50 Гц при прогрессивной развёртке). Это достигается благодаря наличию на плате PCI-контролера, работающего в режиме DMA и способного пересылать оцифрованные данные из внутреннего буфера памяти RT-644 в оперативную память компьютера со средней скоростью более 60 Мб/с практически без участия процессора.

КАМЕРА

Технические характеристики камеры:

- пространственное разрешение: 1024 × 1024, 1024 × 512 (режим объединения строк – биннинг);
- возможность разворота изображения на 180 градусов и зеркального горизонтального отображения;
- скорость передачи изображения: до 25 кадров/с при полном разрешении и до 50 кадров/с при объединении строк и времени накопления до 40 мс;
- отношение сигнал/шум: не менее 72 дБ;
- размер пиксела: 12,8 × 12,8 мкм;
- максимум спектральной чувствительности: 530 нм;
- электронный затвор (время экспозиции): 100 мкс...9 с;
- режимы внешней и внутренней синхронизации;
- внешняя синхронизация: оптический вход, $R_{вх} = 1$ кОм; запуск осуществляется импульсом тока 3...10 мА длительностью 0,01...5 мс;

- программная регулировка усиления сигнала в диапазоне 0...14 дБ (для 8-битного изображения);
- АЦП: 2 канала по 12 бит (4096 градаций серого), частота дискретизации до 20 МГц, двойная коррелированная выборка;
- видеовыход в стандарте CCIR с разрешением 1024 × 512. Уровень выходного сигнала: 1,0 В_{п-п} на нагрузке 75 Ом при разрядности ЦАП 10 бит;
- RGB-видеовыход на CRT- или LCD-монитор с разрешением 1024 × 1024 × 10 при разрешении монитора 1280 × 1024, 60 Гц (опция);
- внутренний буфер SDRAM-памяти с организацией 8 Мб × 16;
- интерфейс: 32-битная шина PCI, скорость передачи данных: средняя – 60 Мб/с, пиковая – 132 Мб/с. Программное обеспечение позволяет записывать на жёсткий диск компьютера весь поток данных, получаемых от камеры, без сжатия и пропусков кадров;
- питание блока фотоприёмника: 18...36 В постоянного тока или 100...240 В переменного тока;
- потребляемая мощность: 7 Вт;
- длина кабеля связи: 10 м.

ФОТОПРИЁМНИК

В качестве фотоприёмника в камере применяется CCD-матрица Kodak KAI-1003M.

Основные параметры матрицы приведены в табл. 1. Графики квантовой эффективности $\eta(\lambda)$ и относительной спектральной чувствительности $S_{отн}(\lambda)$ матрицы приведены на рис. 1.

В табл. 2 приведены значения пороговых (минимальных) значений потока излучения и освещённости, при которых уровень полезного сигнала, снимаемый с одиночного пиксела матрицы, будет равен значению среднеквадратического отклонения (СКО) шума. Значения получены для источников с цветовой температурой 2856°К (источник света типа «А») и

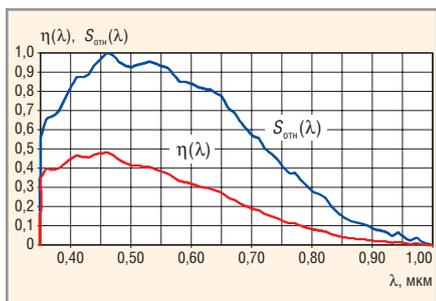


Рис. 1. Квантовая эффективность $\eta(\lambda)$ и спектральная чувствительность $S_{отн}(\lambda)$ матрицы KAI-1003M

6000°K при времени накопления 40 мс. Нетрудно подсчитать, что увеличение времени накопления до 5...10 секунд позволяет камере работать с освещённостями примерно 10-5 лк.

Общая функциональная схема

Видеокамера RT-1000DC, функциональная схема которой приведена на рис. 2, состоит из следующих основных блоков и узлов:

- Блок фотоприёмника:
 - CCD – ПЗС-матрица. Имеет два аналоговых выхода считывания заряда: X и Y. Каждый из выходов подключен к области матрицы размером 512 × 1024 элементов;
 - CDS – каскады, осуществляющие двойную коррелированную выборку, преобразование выходного сигнала матрицы в видеосигнал для последующего аналого-цифрового преобразования;
 - VGA – нормирующий видеоусилитель. Устраняет рассогласование усиления в каналах X и Y, возникающее из-за технического разброса параметров, и обеспечивает согласование уровня видеосигнала с динамическим диапазоном АЦП;
 - драйверы управления затвором и считыванием заряда – преобразуют цифровые тактовые сигналы управления в сигналы с необходимыми для ПЗС-матрицы уровнями напряжения;
 - ADC – 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с CCD-процессором;
 - DSP – блок цифровой обработки сигналов. Обеспечивает динамическое и статическое выравнивание каналов X и Y, выполняет DSP-обработку изображения в реальном времени [1] Аппаратно блок цифровой обработки реализован на ПЛИМ фирмы ALTERA EP1C12Q240C7;

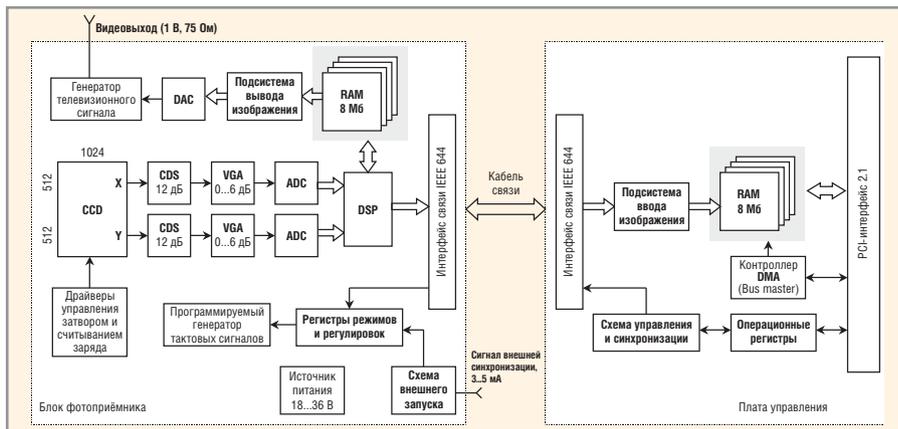


Рис. 2. Функциональная схема цифровой видеокамеры RT-1000DC

- RAM – 32-разрядный внутренний буфер памяти (8 Мб). Функционально разделён на 4 банка по 2 Мб × 16. Используется для хранения промежуточных результатов при DSP-обработке, а также для вывода изображения на внешний монитор;
 - подсистема вывода изображения – осуществляет преобразование прогрессивного изображения матрицы в стандартный ТВ-сигнал и обеспечивает синхронизацию ввода и вывода;
 - DAC – 10-разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП);
 - генератор ТВ сигнала – формирует аналоговый сигнал по стандарту CCIR;
 - интерфейс связи IEEE 644 – обеспечивает связь фотоприёмника с платой управления по стандарту Channel Link;
 - схема внешнего запуска – синхронизирует ввод изображения с внешним сигналом начала кадра, имеет оптическую развязку.
- Плата управления:
- подсистема ввода изображения – осуществляет управление фиксацией изображения во внутреннем буфере памяти;
 - схема управления и синхронизации – осуществляет общее управление всеми процессами в устройстве;
 - RAM – 32-разрядный внутренний буфер памяти (8 Мб × 16). Функционально разделён на 4 банка по 2 Мб. Используется контроллером DMA для бесперебойной скоростной пересылки видеоданных из блока фотоприёмника в память ПЭВМ;
 - PCI Interface 2.1, контроллер DMA, конфигурационные и операцион-

Таблица 1. Основные параметры матрицы Kodak KAI-1003M

Параметр	Значение
Количество пикселей в матрице	1024 × 1204
Геометрические размеры пиксела W × H, мкм	12,8 × 12,8
Максимальная квантовая эффективность $\eta(\lambda_{макс})$	0,45
Длина волны, соответствующая максимуму $\eta(\lambda_{макс})$, нм	510
Чувствительность, мкВ/электрон	7,5
СКО шума, электронов	40
Ёмкость потенциальной ямы, электронов	170 000

Таблица 2. Пороговые значения светового потока и освещённости

Параметр	Цветовая температура источника T _{цв} , °K	
	2856	6000
Энергетический пороговый поток, Вт	9,3 × 10 ⁻¹⁵	2,5 × 10 ⁻¹⁵
Энергетическая пороговая освещённость, Вт/м ²	5,8 × 10 ⁻¹⁵	1,6 × 10 ⁻¹⁵
Световой пороговый поток, лм	1,53 × 10 ⁻¹³	2,3 × 10 ⁻¹³
Световая пороговая освещённость, лк	9,5 × 10 ⁻⁴	1,5 × 10 ⁻³

ные регистры – обеспечивают связь RT-1000DC с оперативной памятью компьютера через шину PCI. Конструктивно блок фотоприёмника видеокamеры выполнен в ударопрочном анодированном корпусе из материала ДТ-16. Вся электроника – три четырёхслойные печатные платы (плата фотоприёмника, блоков DSP и питания) – изготовлена в конструктиве этажерка и на шпильках прикреплена к лицевой панели толщиной 6 мм. Через переходные кольца можно присоединить любые объективы.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ КАМЕРЫ

Видеокamera RT-1000DC имеет следующие основные режимы работы:

- режим внутренней синхронизации, при котором осуществляется непрерывный ввод телевизионных кадров в компьютер с одновременным контролем вводимого изображения на внешнем мониторе (ВКУ). Частота ввода кадров составляет 25 Гц (50 Гц при объединении строк) или определяется временем экспозиции, если это время превышает 40 мс (20 мс при объединении строк);
- режим внешней синхронизации, при котором осуществляется одиночный или потоковый ввод телевизионных кадров в компьютер с одновременным контролем телевизионного изображения на ВКУ. Сигнал внешней синхронизации должен иметь частоту запуска не более 25 Гц (50 Гц при объединении строк);
- режим передачи тестового изображения, при котором осуществляется проверка канала связи между блоком фотоприёмника и платой управления (ПЗС матрица не задействована) [4].

Видеокamera RT-1000DC подключается к компьютеру через плату управления цифрового интерфейса RT-644, устанавливаемую в свободный разъем шины PCI. Для нормальной работы камеры требуется ПЭВМ со следующими характеристиками:

- IBM PC-совместимый компьютер с процессором Intel Pentium III 450 МГц или выше;
- 256 Мб оперативной памяти;
- жёсткий диск с интерфейсом UATA/100 и выше и средней скоростью записи не менее 50 Мб/с или аналогичный с интерфейсом SCSI;

- видеоадаптер с поддержкой 24-битного цвета;
- устройство для чтения компакт-дисков CD-ROM;
- «мышь» или совместимое устройство;
- операционная система:
 - Microsoft Windows XP Professional,
 - Windows XP Home Edition,
 - Windows 2000 Professional.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ

При вводе изображения в ПЭВМ доступны следующие функции цифровой обработки.

- *Рекурсивная фильтрация.* Коэффициент рекурсии определяет соотношение между уровнем шумов слабоконтрастного изображения и динамикой его обновления. Результирующее изображение в n -ом кадре вычисляется по формуле:

$$Y_n = kX_n + (1 - k)Y_{n-1},$$

где: Y_n – результирующее изображение в n -ом кадре;

X_n – оцифрованное изображение в n -ом кадре;

Y_{n-1} – результирующее изображение в $(n-1)$ -ом кадре;

k – коэффициент рекурсии ($1/64 \leq k \leq 1$).

- *Вычитание кадра.* В качестве вычитаемого используется кадр изображения, записанный по команде оператора:

$$Y_n = (kX_n - (1 - k)X_{\text{DSP}})/2 + C,$$

где: Y_n – результирующее изображение в n -ом кадре;

X_n – оцифрованное изображение в n -ом кадре;

X_{DSP} – вычитаемый кадр изображения;

k – весовой коэффициент ($1/64 \leq k \leq 1$);

C – коэффициент, равный половине разрядной сетки АЦП.

- *Сложение с кадром.* В качестве слагаемого используется кадр изображения, записанный по команде оператора:

$$Y_n = kX_n + (1 - k)X_{\text{DSP}},$$

где: Y_n – результирующее изображение в n -ом кадре;

X_n – оцифрованное изображение в n -ом кадре;

X_{DSP} – суммируемый кадр изображения;

k – весовой коэффициент ($1/64 \leq k \leq 1$).

- *Вычитание двух смежных кадров.* В качестве вычитаемого используется предыдущий кадр изображения:

$$Y_n = (kX_n - (1 - k)X_{n-1})/2 + C,$$

где: Y_n – результирующее изображение в n -ом кадре;

X_n – оцифрованное изображение в n -ом кадре;

X_{n-1} – оцифрованное изображение в $(n-1)$ -ом кадре;

k – весовой коэффициент ($1/64 \leq k \leq 1$);

C – коэффициент, равный половине разрядной сетки АЦП.

- *Сложение двух смежных кадров.* В качестве слагаемого используется предыдущий кадр изображения:

$$Y_n = kX_n + (1 - k)X_{n-1},$$

где: Y_n – результирующее изображение в n -ом кадре;

X_n – оцифрованное изображение в n -ом кадре;

X_{n-1} – оцифрованное изображение в $(n-1)$ -ом кадре;

k – весовой коэффициент ($1/64 \leq k \leq 1$);

Статистические измерения проводятся в так называемом стробе статистики – в некоторой произвольно расположенной прямоугольной области кадра изображения размером от 1×1 до 1024×1024 пикселей. В настоящее время выполняются следующие виды измерений:

- определение минимального и максимального значения пиксела внутри строба статистики за время ввода одного кадра;
- определение количества пикселей, превышающих заданный интервал разности значений одинаково расположенных пикселей в двух кадрах изображения – текущего и эталонного.

Интервал разности значений – порог превышения (обнаружения) – задается по модулю в одном из регистров камеры. В качестве эталонного может использоваться предыдущий кадр изображения или любой кадр из потока, записанный в DSP-банк. Эта информация позволяет определять динамику изменения изображения в определённом пространствен-

ном направлении, проводить селекцию статических и динамических изображений, реализовать детектор движения.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Вместе с камерой поставляется комплект разработчика программно-алгоритмического обеспечения Raster technology SDK v2.xx. Комплект разработчика представляет собой инструмент, позволяющий разрабатывать собственные приложения и программные средства, использующие видеопроцессоры и цифровые камеры нашего производства [2]. Пакет содержит:

- набор тестовых и демонстрационных утилит;
- техническую документацию на весь модельный ряд видеопроцессоров и цифровых камер, включая описание их программирования на уровне регистров;
- динамические библиотеки управления видеопроцессорами и цифровыми камерами для операционных систем Microsoft Windows 2000/XP с исходными текстами;
- описание интерфейса библиотек и руководство по программированию;
- заголовочные файлы для подключения библиотек к проектам на C и Delphi;
- примеры использования библиотек для Borland C++ Builder и Borland Delphi.

Помимо функций низкоуровневого управления камерой, динамическая библиотека RT1000dc.DLL включает в себя мегафункцию «Панели управления». Панель содержит все необходимые регулировки и переключатели режимов работы камеры. Вид панели показан на рис. 3.

На закладке «Главная» расположены следующие регулировки:

- «Время экспозиции» – определяет время накопления световой энергии на ПЗС-матрице в секундах в диапазоне 0,012...9,2 с. Кнопка «Номинал» устанавливает время накопления равным 40 мс для полного кадра и 20 мс в режиме биннинг, что соответствует скорости ввода 25 и 50 кадров/с соответственно;
- «Контраст» – управляет усилением сигнала после его оцифровки. Эта регулировка используется в основном для ввода изображения при глубине 8 бит/пиксел. Диапазон ре-

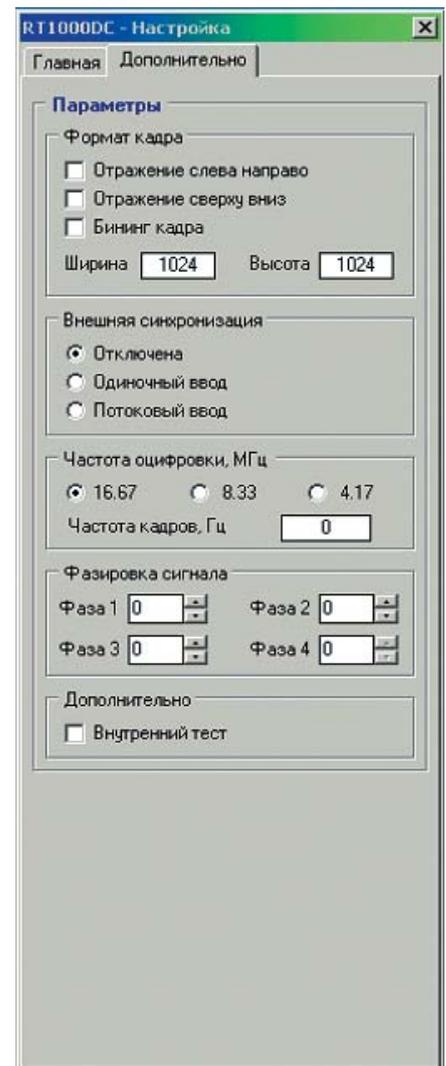
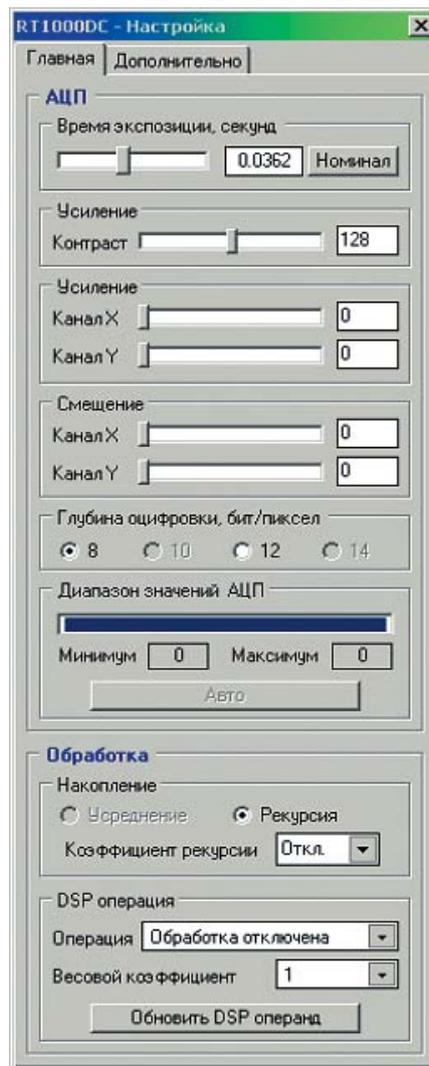


Рис. 3. Панель управления цифровой видеокамеры RT1000DC

гулировки составляет 0...255 условных единиц, что соответствует усилению от 1 до 17 раз (увеличение регулятора на 16 единиц соответствует усилению в 2 раза);

- регулировки «Усиление» и «Смещение» – используются исключительно для настройки камеры и в рабочих режимах отключены;
- «Глубина оцифровки» – предполагает ввод изображения в режиме один байт (8 бит) на пиксел с целью экономии пространства на жестком диске и два байта (12 бит) на пиксел;
- «Диапазон значений АЦП» – индикатор, показывающий минимальный и максимальный уровень сигнала за время ввода последнего кадра;
- «Накопление» – определяет один из способов корреляционной обработки изображения. В видеокамере RT1000DC используется только один способ такой обработки – рекурсия. Коэффициент рекурсии выбирается в диапазоне 1/64...63/64;

- «DSP-операция» – выбирает одну из возможных DSP-функций, описанных в разделе 3.4, с весовым коэффициентом в диапазоне 1/64...63/64. Кнопка «Обновить DSP-операнд» перезаписывает текущий кадр изображения без весового коэффициента в DSP-банк для последующего использования в функциях сложения/вычитания кадра.

На закладке «Дополнительно» расположены следующие регулировки:

- «Формат кадра» – позволяет осуществить зеркальный горизонтальный разворот, поворот изображения на 180 градусов, а также выбрать режим объединения строк (биннинг кадра);
- «Внешняя синхронизация» – подключает вход сигнала внешней синхронизации в одном из двух режимов. Одиночный ввод – используется при частоте запуска менее 12 Гц, Поточковый ввод – при частоте запуска 12...25 Гц. Отличие этих двух режимов заключается в спосо-

бе накопления световой энергии на ПЗС-матрице. При одиночном вводе сброс заряда с матрицы (очистка матрицы) и последующее накопление заряда происходит непосредственно перед вводом кадра. При потоковом вводе сброса накопленного заряда не происходит, а световая энергия накапливается в течение всего периода внешнего сигнала запуска. Режим потокового ввода используется в основном, если ввод изображения сопровождается быстрыми вспышками света;

- «Частота оцифровки» – используется для выбора частоты сканирования матрицы. В рабочем режиме должно быть выбрано значение 16,67 МГц;

- «Фазировка сигнала» – регулировки зарезервированы и в данном устройстве не используются;
- «Внутренний тест» – включает режим передачи тестового изображения (серый клин). Используется для проверки канала связи между блоком фотоприемника и платой управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техническая документация и руководство пользователя на видеопроцессоры серии RT-8xxVP. М.: «Растр Технолоджи», 2002.
2. Техническая документация на цифровые камеры и программное обеспечение. М.: «Растр технолоджи», 2005.
3. *Бондаренко А.В., Докучаев И.В.* Использование мультимедийного видеопроцессора RT-850 для визуализации и обработ-

ки ангиографических изображений в реальном времени. Труды 1 Евразийского конгресса, V нац. конф. по медицинской физике и инженерии. «Медицинская физика – 2001». Москва. 18-22 июня 2001.

4. *Бондаренко А.В., Докучаев И.В., Стешенко В.Б.* Аппаратная реализация систем ввода, обработки, хранения и вывода изображений различных телевизионных форматов и стандартов. Журнал ЦОС. 2003. № 1. С. 27.
5. *Бондаренко А.В., Докучаев И.В., Князев М.Г., Коноплянников Ю., Лазаренко Ю.М.* Лазерная система автоматизации измерения габаритов сооружений на железных дорогах. Журнал ЦОС. 2004. № 4. С. 36.
6. *М.Г. Князев.* Расчёт пороговых значений потока излучения и освещенности для ПЗС-матриц. М.: «Растр технолоджи», 2006. ©