

## ЦИФРОВАЯ ФОТОКАМЕРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ

*А. В. Бондаренко<sup>1</sup>, И. В. Докучаев<sup>2</sup>, В. А. Котцов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Генеральный директор, ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ», Москва.

<sup>2</sup> Главный специалист, ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ», Москва.

<sup>3</sup> Научный сотрудник, Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва

*Цифровая фотокамера – ЦФК в составе КНА «Гроза» микроспутника «Чибис-М» предназначена для изучения новых физических механизмов в грозовых атмосферных разрядах. Рассмотрены её состав и алгоритмы работы. Съёмка выполняется в кольцевом цикле наблюдения с отбором и запоминанием кадров с грозовыми вспышками по синхронизации от приборов электромагнитной регистрации событий. Камера обеспечит фиксацию факта молнии с привязкой наблюдаемых координат разряда к системе координат микроспутника «Чибис-М».*

**Ключевые слова:** грозовые атмосферные разряды, цифровая камера, анализ динамики изображений, кольцевой цикл записи.

Молния представляет собой мощный электрический разряд, который происходит в нижних слоях атмосферы. Для появления такого разряда необходимо, чтобы в обкладках атмосферного конденсатора, образованного облаками и земной поверхностью, накопилась значительная разность потенциалов. Считается, что молния возникает как пробой при достижении некоторого порогового значения. Специалисты отмечают в этой теории одно слабое место — расчётное значение порогового поля на порядок превосходит то, которое реально наблюдают при грозовых разрядах. А. В. Гуревич и его коллеги из Физического института им. П. М. Лебедева РАН (ФИАН) считают, что процесс разряда запускают высокоэнергетические частицы космического излучения. Они назвали его пробоем на убегающих электронах. Этот процесс представляет собой лавинообразное размножение быстрых электронов с характерной энергией 0,1 ... 10 МэВ. В атмосфере он возникает в постоянном электрическом поле на порядок меньше обычного. По результатам наблюдений гамма-всплесков во время грозы была выдвинута гипотеза, что при возникновении молний выделяется большое количество гамма-квантов. Экспериментальная проверка этих гипотез представляет достаточно сложную задачу, которая требует наблюдения процессов образования молний и определения синхронности возникновения излучений.

На российских географических широтах гроза – явление достаточно редкое, наиболее часто грозы возникают в экваториальной области. Координаты возникновения молний при грозах случайны. Эффективное изучение этих явлений возможно с космических аппаратов. На рис. 1 показан пример фотоснимка атмосферного грозового разряда, снятого космонавтами с

борта МКС. На снимке хорошо видна вспышка грозового разряда, однако для решения нашей задачи требуется проведение более сложного комплекса наблюдений.

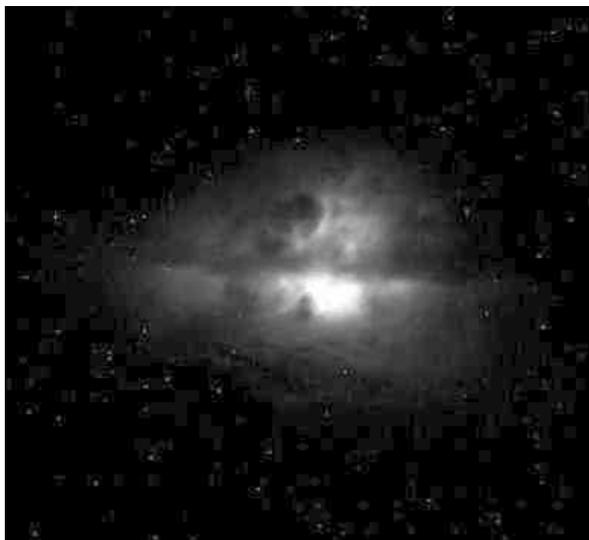


Рис. 1. Атмосферный грозовой разряд, снятый космонавтами с борта МКС

Для наблюдений грозовых явлений в Специальном конструкторском бюро космического приборостроения ИКИ РАН разрабатывается микроспутник «Чибиc-М». В составе его комплекса научной аппаратуры «Гроза» предусмотрена цифровая фотокамера ЦФК, разработанная совместно ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ» (разработка электроники) и ИКИ РАН (разработка конструкции, сборка, испытания и т. д.) и предназначенная для изучения новых физических механизмов в грозовых атмосферных разрядах. Эта камера – достаточно сложное устройство, которое должно вести постоянное наблюдение, выделять и фиксировать вспышки молний, определять их координаты и, что самое главное, идентифицировать их с одновременно наблюдаемыми физическими явлениями. Для этого ЦФК должна выполнять съёмку в кольцевом цикле наблюдения с обработкой, отбором и запоминанием грозовых вспышек по синхронизации от приборов электромагнитной регистрации одновременных событий.

Цифровая фотокамера представляет собой устройство получения полутонных высококачественных изображений со встроенным видеопроцессором реального времени. Реализованный на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) DSP-процессор способен выполнить различные функции обработки видеoinформации. Цифровая фотокамера содержит входную оптику, блок фотоприёмника на ПЗС-матрице, DSP-процессор реального времени для выполнения операций с видеoinформацией, блок запоминания изображений, интерфейсы обмена данными и управления.

Структурная схема связей функциональных блоков фотокамеры показана на рис. 2:

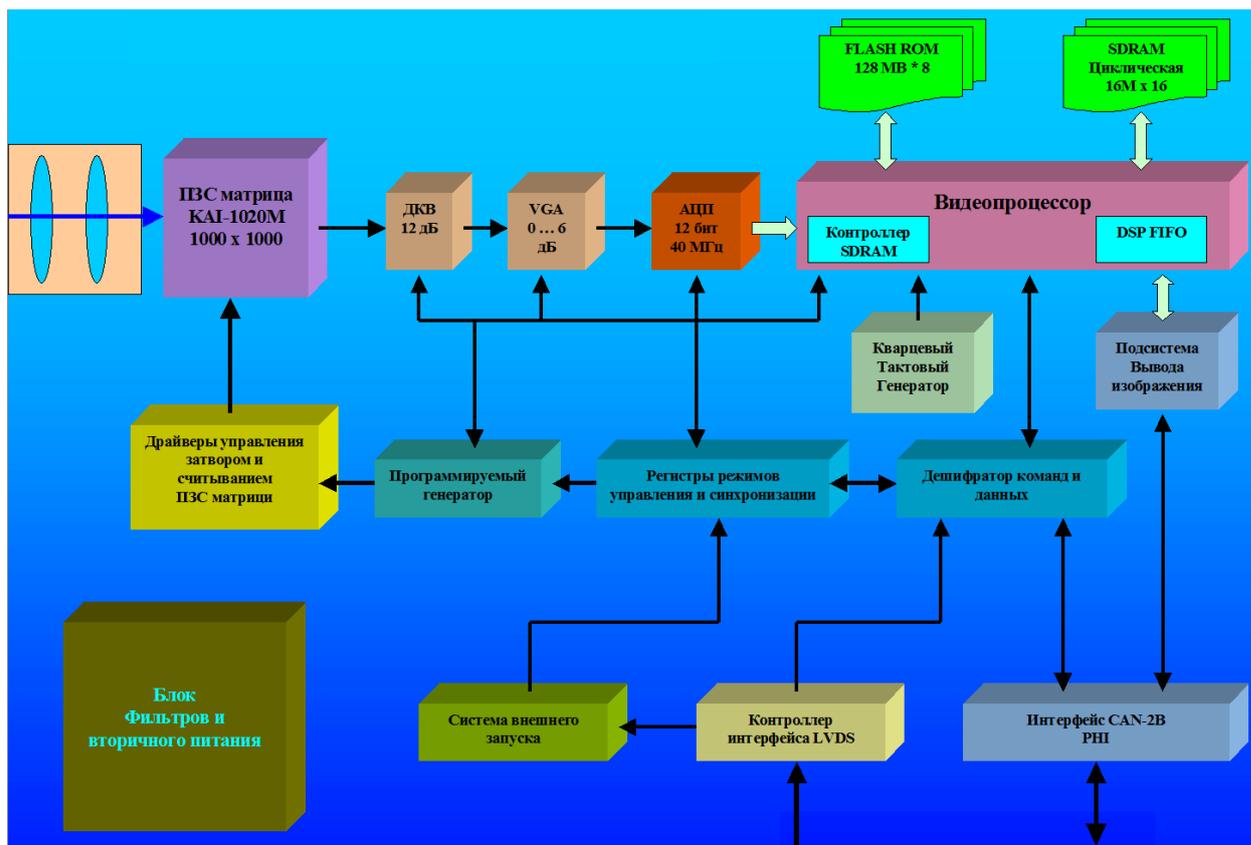


Рис. 2. Структурная схема связей функциональных блоков цифровой фотокамеры

Эта схема даёт представление о составе блоков, характере их взаимодействия и степени сложности рассматриваемого устройства. Для формирования изображения в фотокамере используется объектив «Астрар-6» с фокусным расстоянием 18 мм, угловое поле зрения 30°. Разрешение объектива при контрасте 70% и относительном отверстии 1/2 – не хуже 70 пар линий/мм. Для повышения информативности спектральная характеристика камеры ограничивается селенокадмиевым светофильтром типа ЖС или ОС. Аппаратная реализация фотокамеры выполнена на ПЗС-матрице Kodak KAI-1020M с двойной коррелированной выборкой (ДКВ) и электронным затвором, АЦП-преобразователь – 12 бит при 45 МГц с VGA (усилитель с переменным коэффициентом усиления), DSP-видеопроцессор выполнен на ПЛИС Altera семейства Cyclone II с DSP-памятью – SDRAM (16M × 16), для запоминания кадров изображений используется память - FLASH (1G × 8). Камера оснащена цифровым датчиком температуры, работающим в диапазоне от – 40 до + 75 °С.

Цифровая фотокамера работает от источника электропитания постоянного тока с напряжением 12 В и гальванической развязкой; потребление – не более 5 Вт, при этом общим проводом должен быть -12 В, шина +12В разрывается непосредственно в бортовом вычислительном комплексе (БВК).

Обмен данными и управление осуществляется по интерфейсу CAN-2B, для запуска используется интерфейс LVDS, скорость передачи данных – до

1 Мбайт/с. Камера включается и выключается подачей либо снятием питания от бортовой сети 12 В.

Изображение, полученное с ПЗС-матрицы (при формате кадра  $1024 \times 1024$  пикселя  $\times$  12 бит), имеет пространственное разрешение  $1000 \times 1000$  элементов с 12-битным разрешением по яркости (4096 градаций оттенков серого) и частотой не менее 12 кадров/с.

Использование режима объединения пикселей (биннинга) позволяет увеличить чувствительность матрицы в 2 раза при соответствующем снижении пространственного разрешения. В режиме биннинга  $1 \times 2$  ( $2 \times 2$ ) – получаемое разрешение  $1024 \times 512$  ( $512 \times 512$ ) с частотой не менее 24 кадров/с. Использование 12-бит АЦП позволяет повышать контрастность изображений в 2, 4 и 8 раз, за счёт таблиц перекодировки LUT. Расчёт пороговых значений освещённости для ПЗС-матрицы КАИ-1020М приведён в статье [1].

За основу изучения физических механизмов в грозовых атмосферных разрядах могут быть приняты алгоритмы обработки изображений в реальном масштабе времени, реализованные ранее для решения подобных задач в цифровых видеокомплексах и мультимплексоре RT-106MX, разработанных в ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ».

На рис. 3 представлена блок-схема DSP-обработки видеоинформации в цифровой фотокамере.

Рассмотрим некоторые варианты решения отдельных задач обработки видеоинформации с использованием процессора цифровой камеры. Для обнаружения вспышки грозового атмосферного разряда можно использовать алгоритм анализа последовательности из трёх кадров и детектор движения.

Анализируется последовательность изображений из трёх кадров ( $F_{i-1}, F_i, F_{i+1}$ ) и задан пороговый уровень сигнала  $P$ . Пороговый уровень задаётся БВК и может меняться в зависимости от факторов окружающей среды. Аппаратно проверяется условие: если разность кадров ( $F_i - F_{i-1} - P > 0$ ) и ( $F_{i+1} - F_i - P < 0$ ), то принимается решение о наличии вспышки (импульса). Для регистрации вспышек молний может быть использован известный алгоритм детектора движения. Кадр изображения делится на три прямоугольные области (стробы) по вертикали. Строб на изображении может быть выделен пунктирной линией; в каждом стробе, заданном прямоугольной областью кадра изображения, проводятся статистические измерения. Затем для каждого строба вычисляется свой порог превышения.

Аппаратно по изображению могут выполняться: определение минимального и максимального значения пикселя внутри строба статистики за время ввода одного кадра, определение количества пикселей, превышающих заданный порог обнаружения, интервал разности значений одинаково расположенных пикселей в двух кадрах изображения - текущего и эталонного. Эта информация позволяет изучать динамику изменения

изображения в определённом пространственном направлении, проводить селекцию статических и динамических изображений.

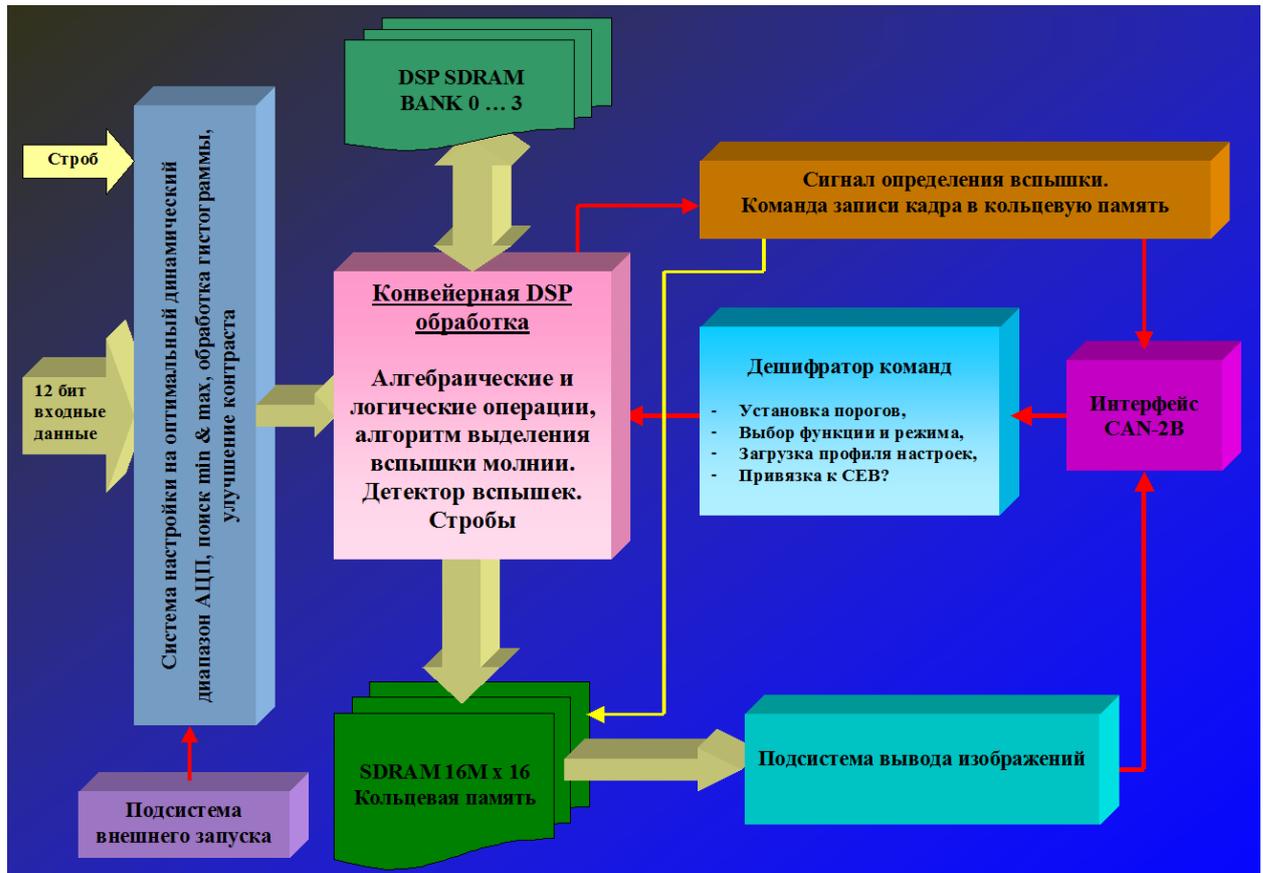


Рис. 3. Блок-схема DSP-обработки видеоинформации в цифровой фотокамере

Интервал разности сравниваемых значений яркости – порог обнаружения – задаётся БВК по модулю в одном из регистров цифровой камеры. В качестве эталонного может использоваться предыдущий кадр изображения или любой кадр из потока, записанный в DSP-банк. В результате работы алгоритма по импульсу превышения происходит запись изображения с грозовой вспышкой во флэш-память. Приведём описание некоторых алгоритмов, используемых в задачах обработки видеоинформации, реализуемых в процессоре цифровой фотокамеры.

При плохом качестве изображения из-за малого соотношения сигнал/шум можно применить рекурсивные методы обработки видеоинформации.

*Рекурсивное накопление*, результирующее изображение вычисляется по формуле:

$$Y_n = \frac{1}{k} X_n + \left(1 - \frac{1}{k}\right) Y_{n-1},$$

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,  $2 \leq k \leq 64$ .

Использование режима накопления позволяет повысить соотношение сигнал/шум в сильно зашумленных статических и слабо динамичных изображениях.

*Вычитание кадра*, в качестве вычитаемого используется кадр изображения, записанный по команде от БВК. Результирующее изображение вычисляется по формуле:

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

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,  $\frac{1}{64} \leq k \leq 1$ .

$C$  – коэффициент, равный половине разрядной сетки АЦП.

#### *Пример применения функции рекурсивного накопления*

На рис. 4 показано исходное изображение, представляющее собой шумовую составляющую ПЗС-матрицы и электронно-оптического преобразователя (ЭОП). На рис. 5 приведено обработанное изображение с калиброванной освещённостью  $10^{-6}$  лк и с параметрами обработки: коэффициент рекурсии  $1/32$ , контраст 4, время интеграции 4 с.

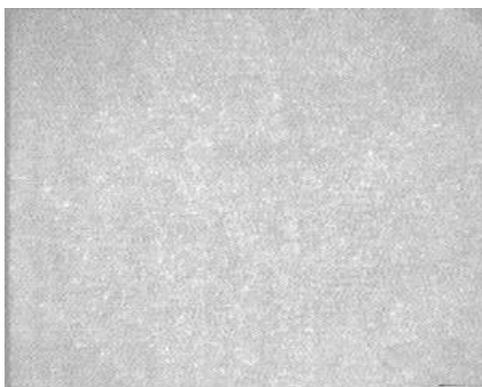


Рис. 4. Исходное изображение



Рис. 5. Обработанное изображение

*Сложение с кадром*, в качестве слагаемого используется кадр изображения, записанный по команде от БВК. Результирующее изображение вычисляется по формуле:

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

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,  $\frac{1}{64} \leq k \leq 1$ .

*Вычитание двух смежных кадров*, в качестве вычитаемого используется предыдущий кадр изображения. Результирующее изображение вычисляется по формуле:

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

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,  $\frac{1}{64} \leq k \leq 1$ .

$C$  – коэффициент, равный половине разрядной сетки АЦП.

*Сложение двух смежных кадров*, в качестве слагаемого используется предыдущий кадр изображения. Результирующее изображение вычисляется по формуле:

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

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,  $\frac{1}{64} \leq k \leq 1$ .

Конструкция цифровой камеры должна выдерживать вибрационные механические нагрузки при выводе на орбиту спутника, а элементы устройства обеспечить надёжное длительное функционирование в условиях околоземного космического пространства. На рис. 6 показан прототип такой камеры с видеопроцессором, памятью для хранения видеoinформации, видеовыходом, интерфейсом и блоком питания.

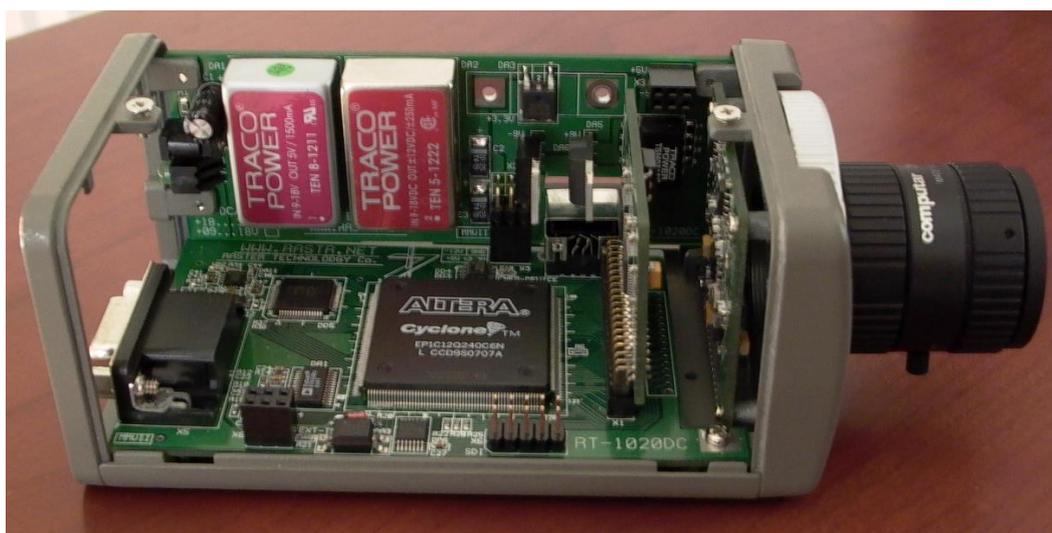


Рис. 6. Прототип ЦФК

## Литература

1. Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Князев М. Г. Расчёт пороговых значений потока излучений и освещённости для ПЗС-матриц Kodak KAI-1003M, KAI-1020M и Philips FTF-3020M // ССТV focus.2006, № 4, С. 24.
2. Бондаренко А. В. Докучаев И. В. Использование мультимедийного видеопроцессора RT-850 для визуализации и обработки ангиографических изображений в реальном времени // Труды 1-го евразийского конгресса, V национальной конференции по медицинской физике и инженерии. «Медицинская физика –2001» 18-22 июня 2001, г. Москва.
3. Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Стешенко В. Б. Аппаратная реализация систем ввода, обработки, хранения и вывода изображений различных телевизионных форматов и стандартов // ЦОС, 2003, №1. С. 27.
4. Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Князев М. Г. Телевизионная видеокамера с цифровой обработкой в реальном времени // Современная электроника, 2006, № 3, С. 50.
5. Бондаренко А.В., Докучаев И. В., Князев М. Г., Конопляников Ю., Лазаренко Ю. М. Лазерная система автоматизации измерения габаритов сооружений на железных дорогах // ЦОС, 2004, № 4, С. 36.
6. Бондаренко А.В., Докучаев И. В., Князев М.Г. Расчёт пороговых значений потока излучений и освещённости для ПЗС-матриц Kodak KAI-1003M, KAI-1020M и Philips FTF-3020M // ССТV focus.2006, № 4, С. 24.
7. Техническая документация и руководство пользователя на видеопроцессоры серии RT-8xxVP. М.: ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ», 2009, [www.rastr.net/product/video-proc.html](http://www.rastr.net/product/video-proc.html).
8. Техническая документация на цифровые ПЗС камеры. М.: ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ», 2009, [www.rastr.net/product/digit-cam.html](http://www.rastr.net/product/digit-cam.html).
9. Техническая документация на программно-алгоритмическое обеспечение. М.: ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ», 2009, [www.rastr.net/product/soft.html](http://www.rastr.net/product/soft.html).
10. Ritter G. X., Wilson J.N. Handbook of computer vision algorithms in Image Algebra / 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton, 2001.