

УДК 621.397

А. А. Голицын, Н. А. Сейфи

Новосибирский филиал Института физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт
прикладной микроэлектроники»
ул. Николаева, 8, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630092, Россия

E-mail: aag-09@yandex.ru; natalia_nsk@inbox.ru

ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ УСТРОЙСТВА КРУГЛОСУТОЧНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Описывается разработка аппаратной части комплекса получения и обработки изображений, предназначенного для использования в качестве визирного канала в цифровом круглосуточном приборе наблюдения. Произведен выбор фотоприемного устройства, наиболее подходящего для наблюдения в условиях низкой освещенности, разработан модуль получения и обработки изображения на базе программируемой логической интегральной схемы, а также печатная плата устройства.

Ключевые слова: видеонаблюдение, обработка изображений, ПЗС-фотоприемник, программируемая логическая интегральная схема.

Введение

Целью работы являлось создание аппаратной части (архитектуры) аппаратно-программного комплекса получения и обработки изображений, предназначенного для использования в качестве визирного канала в макете круглосуточного прибора наблюдения.

Разработка велась с учетом следующих требований.

1. Прибор должен передавать оператору комфортное для восприятия изображение при различной освещенности наблюдаемой сцены от 0,001 лк ночью до 10 000 лк днем, а также в условиях помех и локальных засветок.

2. Модуль должен обладать достаточной скоростью вычисления, чтобы обеспечить обработку получаемого изображения разрешением не менее 576×768 пикселей (типовой размер телевизионного кадра) и его вывод на дисплей или внешние устройства в реальном времени.

3. Устройство должно быть переносимым, т. е. его полное энергопотребление должно составлять не более 3...5 Вт. Для обработки изображения, получаемого устройством, не допускается использование вычислительных ресурсов внешнего персонального компьютера.

4. Должна быть предусмотрена возможность изменения алгоритмов обработки изображения с целью проверки работоспособности алгоритмов в различных условиях наблюдения и дальнейшего выбора нескольких алгоритмов или их комбинаций для использования в приборе, при этом изменение алгоритмов обработки изображения, а также алгоритмов работы всего прибора не должно требовать изменения его принципиальной схемы или конструкции печатной платы.

5. Должна быть предусмотрена возможность использования (не одновременно) в устройстве нескольких фотоприемников одного типа с целью выбора для использования в приборах различного назначения

фотоприемников с наиболее подходящим разрешением, шагом пикселей и кадровой частотой.

Условно разработанный электронный модуль получения и обработки изображения цифрового прибора наблюдения состоит из следующих частей: фотоприемное устройство, модуль обработки / преобразования изображения и модуль вывода изображения. Фотоприемное устройство преобразует входящий в объектив прибора световой поток в электрический сигнал или набор сигналов. Модуль обработки изображения изменяет полученное изображение таким образом, чтобы оно было пригодным для работы оператора. Модуль вывода изображения осуществляет передачу изображения в виде электрических сигналов внешним устройствам, например на дисплей, персональный компьютер или устройство записи изображения.

Выбор типа фотоприемника

При разработке устройств видеонаблюдения обычно выбирают из двух возможных технологий формирования сигнала изображения: ПЗС (приборы с зарядовой связью) или КМОП (комплементарная система металл-оксид-полупроводник). И те и другие имеют свои преимущества и недостатки [1–3].

К преимуществам ПЗС-фотоприемников относятся низкий уровень шумов, высокий коэффициент заполнения пикселей (около 100 %), высокая эффективность (под эффективностью понимается отношение числа зарегистрированных фотонов к их общему числу, попавшему на светочувствительную область матрицы, для большинства ПЗС-фотоприемников эта величина достигает 95 %) и большой динамический диапазон (чувствительность).

Недостатками ПЗС-фотоприемников являются сложный принцип считывания сигнала, а следовательно, им требуется сложная система управления, низкое быстродействие (скорость считывания изображения ПЗС-фотоприемников разрешением от 768×576 элементов обычно не превышает 30 кадров/с), связанное с особенностью технологии построения [1–3], а также высокий уровень энергопотребления по сравнению с фотоприемниками, основанными на технологии КМОП.

Преимущества КМОП-фотоприемников следующие: высокое быстродействие (до 500 кадров/с), низкое энергопотребление (почти в 100 раз меньше по сравнению с ПЗС), а также перспективность технологии (на одном и том же кристалле можно реализовать все необходимые дополнительные схемы: аналого-цифровые преобразователи, процессор, память, получив, таким образом, законченную цифровую фото- или видеокамеру).

К недостаткам КМОП-фотоприемников относятся низкий коэффициент заполнения пикселей, за счет чего снижается чувствительность (эффективная поверхность пикселя не более 75 %, остальное занимают вспомогательные элементы), невысокий динамический диапазон и высокий уровень шума, обусловленный так называемыми темповыми токами – даже в отсутствие освещения через фотодиод течет довольно значительный ток.

Основной аргумент против использования КМОП-матрицы в качестве фотоприемника для круглосуточного прибора наблюдения связан с малой чувствительностью КМОП-матриц, ее неоднородностью по массиву элементов, а также с неоднородностью темновых сигналов [2; 3]. В настоящее время чувствительность устройств видеонаблюдения на базе КМОП ограничена в первую очередь структурной помехой (англ. *pattern noise*). При компенсации структурной помехи флуктуационный шум КМОП превышает аналогичное значение шума ПЗС в 3–5 раз при одинаковой частоте считывания сигнала [1]. А поскольку выходной сигнал насыщения у матричных фотоприемников обоих типов соизмерим, то в настоящее время КМОП-фотоприемники имеют меньший динамический диапазон, чем ПЗС-фотоприемники.

Исходя из перечисленных преимуществ и недостатков фотоприемников обоих типов было принято решение использовать в устройстве круглосуточного наблюдения в качестве фотоприемника ПЗС-матрицу: для разрабатываемого устройства круглосуточного наблюдения высокое быстродействие фотоприемника (от 200 кадров/с и более) не требуется – для комфортного наблюдения оператору достаточно скорости 25 кадров/с – кадровой частоты, применяемой в системах телевидения PAL и SECAM, и при этом для наблюдения в условиях низ-

кой освещенности прибору требуется высокая чувствительность фотоприемника.

Для экспериментов были выбраны два ПЗС-фотоприемника производства «Sony» ICX445AL и ICX618AL, обладающие, по заверениям производителя, высокой чувствительностью. Первый имеет разрешение $1\,280 \times 960$ пикселей и кадровую частоту до 25 кадров/с, второй – разрешение 659×494 пикселя, но способен выдавать изображение со скоростью до 60 кадров/с. В качестве фотоприемника для ручного прибора наблюдения предполагается использовать ICX445AL, а для автоматического – либо ICX445AL, либо ICX618AL, либо промежуточный вариант ПЗС-фотоприемника в зависимости от того, какой окажется лучше в ходе экспериментальной работы.

Элементная база электронного модуля обработки изображения

Полученное с фотоприемного устройства изображение необходимо обработать. В телевидении традиционно обрабатывают изображение для того, «чтобы лучше было видно». Так как в разрабатываемом устройстве предполагается наличие возможности эксплуатации и в дневное, и в ночное время, т. е. при освещенности от 0,001 лк ночью до 10 000 лк днем, возникает необходимость предусмотреть в устройстве автоматическую нормировку яркости полученного изображения для его комфортного восприятия наблюдателем.

Другая задача обработки изображения – помехоподавление. Необходимость подавления шумов, фоновых и импульсных помех вполне очевидна практически во всех сферах использования систем видеонаблюдения.

Таким образом, модуль электронной обработки изображения должен выполнять следующие функции:

- получение оцифрованного сигнала, приходящего с фотоприемной матрицы;
- формирование цифровых отсчетов кадров видеоизображения;
- реализация функции автоматической регулировки яркости и контраста выходного изображения (адаптация коэффициента усиления сигнала к условиям наблюдения);
- подавление локальных и фоновых шумов и неоднородностей изображения, возни-

кающих, например, из-за встречных засветок или вспышек.

Факультативная функция модуля электронной обработки изображения – реализация интерфейса оператора для управления основными параметрами прибора. В частности, модуль может отвечать за формирование кадров со служебной информацией (тексты, индикаторы и т. д.), их передачу на дисплей и при необходимости за объединение служебных кадров с кадрами изображения.

Современные цифровые приборы наблюдения характеризуются большими и постоянно возрастающими требованиями к подсистеме обработки входного потока (потоков) данных. Эти требования обусловлены такими факторами, как высокое разрешение современных и перспективных фотоприемников, высокая частота кадров и необходимость использования сложных ресурсоемких алгоритмов цифровой обработки сигналов: в устройствах видеонаблюдения существует необходимость реализации значительной части вычислений в масштабе реального времени. Кроме того, к подобным приборам предъявляются высокие требования с точки зрения энергопотребления. Исходя из перечисленных требований и из анализа существующих и перспективных решений [4], можно сделать вывод, что удельная сложность подсистемы обработки данных в таких приборах существенно возрастает и при превышении некоторого «порога сложности» требует перехода к новым принципам построения вычислительной системы прибора [5].

Основной объем вычислений должен производить реконфигурируемый модуль, выполненный на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Решение данной задачи с помощью традиционных процессоров, в том числе и процессоров цифровой обработки сигналов, нереализуемо по причине невозможности обеспечить требуемые вычислительную мощность и энергопотребление [5]. Реконфигурируемые (вычислительные) системы (устоявшийся англоязычный термин – Reconfigurable Computing) – это парадигма построения вычислительных систем, сочетающая в себе одновременно гибкость программного подхода (неизменяемый процессор и изменяемое под задачу программное обеспечение) и высокую произво-

дительность аппаратного решения (неизменяемое специализированное устройство, выполняющее неизменяемый алгоритм) [4]. По сути, реконфигурируемая система позволяет строить гибкое решение в двух «ортгональных координатах» – и программно, и аппаратно одновременно. С появлением подходящей элементной базы (в частности, с появлением программируемых логических интегральных схем, обладающих производительностью выше некоторого барьера) стало возможным изменять аппаратную компоненту системы под конкретную задачу [5].

Использование ПЛИС в качестве основной управляющей микросхемы в системах обработки изображения является достаточно распространенным решением [6–8], но при этом в большинстве устройств ПЛИС используется в качестве генератора сигналов управления фотоприемной матрицей, в качестве устройства, осуществляющего предобработку получаемого изображения с помощью простейших алгоритмов (умножение на коэффициент, нормировка, вычитание постоянной, суммирование нескольких кадров, инверсия), и в качестве микросхемы, на базе которой реализован аппаратный кодек сжатия видеопотока. Сложные алгоритмы и их комбинации (масштабирование полученного изображения с помощью интерполяции, гистограммные алгоритмы обработки изображения, анализ изображения на наличие в поле зрения объектов определенной формы) либо не применяются в системах видеонаблюдения, либо реализуются на базе персонального компьютера, к которому видекамера подключена [9]. Причина заключается в большей сложности написания и отладки программ, реализующих сложные алгоритмы, на языках описания аппаратуры (Verilog, VHDL и др.), применяемых в ПЛИС, по сравнению с программами на объектно-ориентированных языках программирования C++ и Java, применяемых при написании программ для персонального компьютера.

Так как нашей целью была разработка электроники для макета носимого прибора, работа которого предполагается без участия персонального компьютера, было принято решение попытаться реализовать алгоритм гистограммной обработки изображения [10] непосредственно на ПЛИС и в случае ус-

пешной его реализации попытаться реализовать на этой же ПЛИС другие сложные алгоритмы и проверить их работоспособность в различных условиях применения прибора.

Архитектура устройства видеонаблюдения на базе реконфигурируемого модуля представлена на рис. 1. Под архитектурой электронного прибора и его отдельных модулей подразумевается аппаратно-программная модель, которая отображает видимые свойства прибора и его модулей.

Получение аналогового сигнала с матрицы и его оцифровка выполняются ПЗС-процессором, специальным устройством, объединяющим в себе блоки аналоговой обработки сигнала ПЗС-матрицы: модуль двойной коррелированной выборки, аналого-цифровой преобразователь, операционные усилители и фильтры.

Основная задача блока памяти состоит в запоминании кадров видеоизображения, используемых для последующей обработки, суммирования и выдачи на дисплей. Эту задачу можно решить применением быстродействующей памяти – оперативного запоминающего устройства (SDRAM). Другая задача – сохранение ряда изменяемых параметров прибора, которые не должны теряться при выключении питания. Таких параметров обычно не много, поэтому можно обойтись энергонезависимой памятью (FLASH) небольшой емкости. Для большей производительности в схему было включено три SDRAM – одна используется в качестве буфера обмена данными между ПЛИС и сигнальным процессором, а две другие – в качестве хранилищ обрабатываемых с помощью ПЛИС кадров изображения. Производительность может возрасти за счет параллельного использования нескольких SDRAM в случае, если при одновременном выполнении нескольких сложных алгоритмов скорости обращения к одной SDRAM будет недостаточно для выполнения алгоритмов в реальном времени. Объем SDRAM выбирался из учета одновременного хранения нескольких кадров разрешением не менее 576×768 пикселей (по 16 бит каждый) и для каждой микросхемы составляет по 32 Мб.

Такие задачи, как управление фотоприемной матрицей, управление прибором в целом, формирование служебного кадра, а также непосредственно обработка изображения

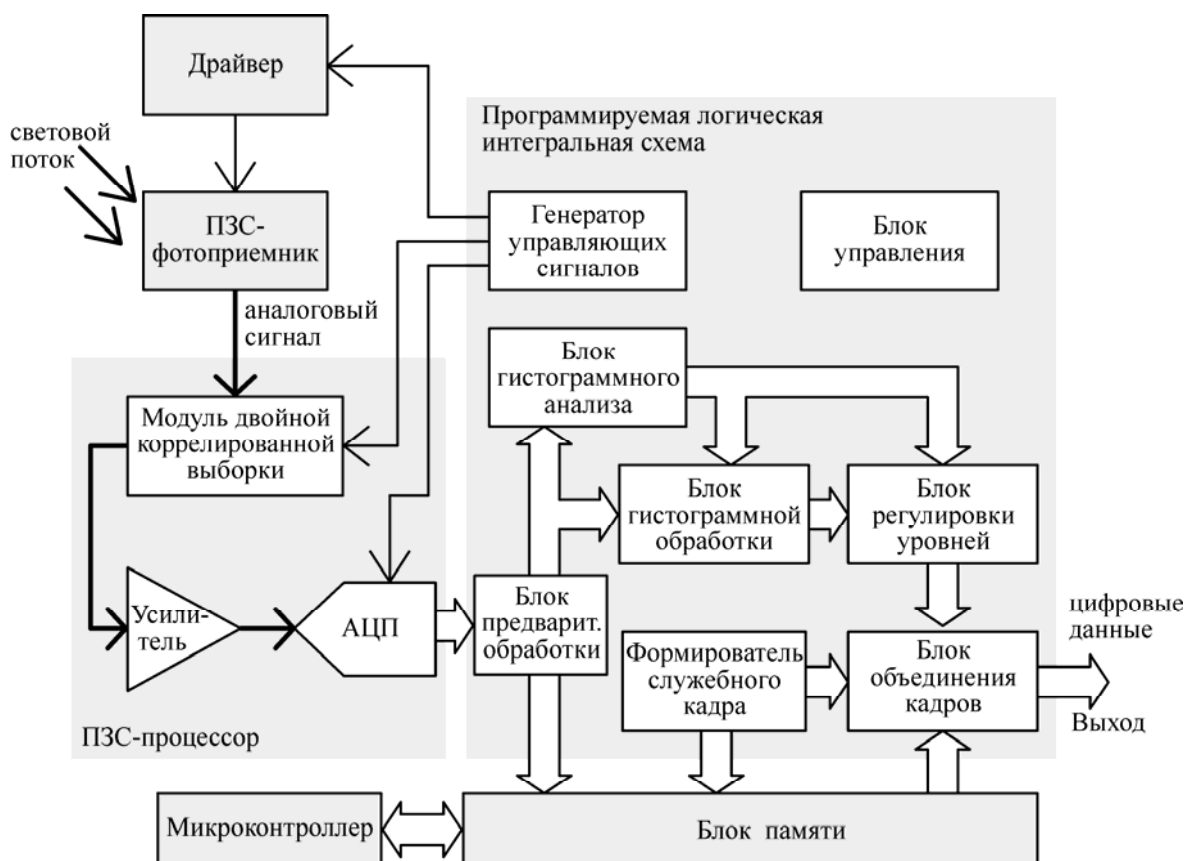


Рис. 1. Архитектура устройства видеонаблюдения на базе ПЛИС

выполняются программируемой логической интегральной схемой. В ней происходит предварительный анализ кадров изображения (построение гистограммы), вычитание опорного кадра, масштабирование, различные преобразования значений яркости каждого пикселя изображения в соответствии с используемым алгоритмом обработки. ПЛИС выбиралась по следующим условиям: количество логических элементов должно быть не менее 20 000 и объем встроенного ОЗУ не менее 1 000 кбит – величины, основанные на опыте разработок устройств получения видеоизображения заданного разрешения на базе ПЛИС, с пятикратным запасом, а также количество логических выводов микросхемы должно быть не менее 300, чтобы к ПЛИС можно было подключить не менее трех внешних микросхем памяти, сигнальный процессор, ПЗС-процессор и драйвер сигналов вертикальной развертки ПЗС-матрицы. Была выбрана ПЛИС EP3C40F780 производства «Altera». Выбор пал именно на этого про-

изводителя, так как уже имелся опыт работы с некоторыми его ПЛИС и средой разработки.

Для выполнения функций по поддержке технологического интерфейса, по управлению прибором, таких как анализ разряда аккумулятора, анализ нажатия кнопок управления, а также по формированию служебного кадра, например прорисовки текста и вспомогательных значков-индикаторов, к ПЛИС был подключен сигнальный процессор (на общей схеме не показан), используемый в качестве быстродействующего микроконтроллера. В настоящее время существуют ПЛИС с уже встроенными микроконтроллерами, но пока их энергопотребление при работе на высокой (порядка 200 МГц) частоте превышает энергопотребление отдельно подобранных ПЛИС и микроконтроллера.

Отличие спроектированной архитектуры от существующих аналогов заключается в использовании реконфигурируемой системы на базе ПЛИС в совокупности с сигнальным

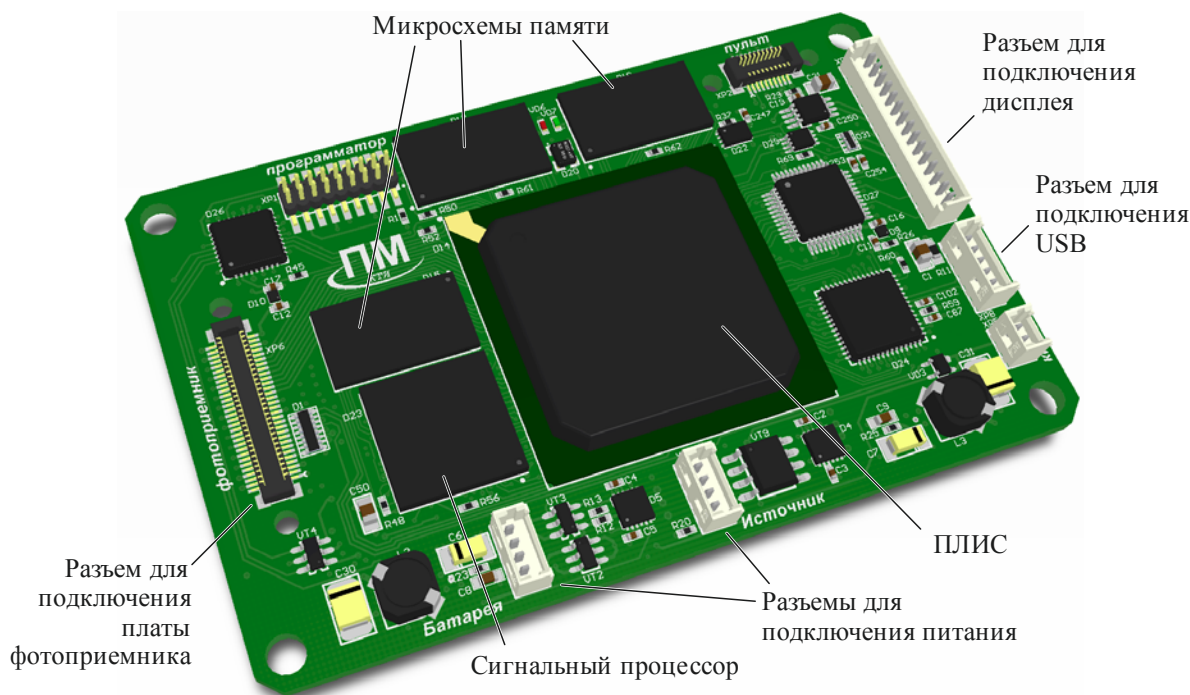


Рис. 2. Внешний вид платы анализа и обработки изображения

процессором. Реконфигурируемая система позволяет строить гибкое решение в двух «ортогональных координатах» – и программно, и аппаратно одновременно, при этом имеется возможность изменять под конкретную задачу не только программную компоненту, но и аппаратную, не меняя конструкции электронной платы. Например, прибор наблюдения может содержать в себе модули, выполняющие алгоритмы обработки изображения, адаптированные к низкой освещенности, и одновременно содержать модули, использующие алгоритмы обработки изображения, применимые для наблюдения в условиях повышенной яркости. Так как одновременное выполнение программ модулей обоих типов не требуется, они могут использовать одни и те же вычислительные ресурсы.

Кроме того, данное схемотехническое решение позволяет заменять фотоприемную матрицу прибора (например, с целью модернизации) без изменения принципиальной схемы модуля получения и обработки изображения. В модуле предусмотрено достаточное количество выводов для подключения дополнительных управляющих сиг-

налов фотоприемной матрицы в случае, если количества управляющих сигналов используемой и новой матриц отличаются. Форма управляющих сигналов определяется программно, и для ее изменения вмешательства в принципиальную схему устройства не требуется.

Компоновка устройства наблюдения. Hardware

Механически устройство состоит из двух электронных плат. На одной находится фотоприемник – ПЗС-матрица, его вспомогательные дискретные элементы, а также ПЗС-процессор. На второй – элементы модуля управления и обработки изображения, а также другие электронные модули, используемые в приборе. Соединяются две платы гибким шлейфом через специальные разъемы. Необходимость такого решения обусловлена тем, что фотоприемник должен располагаться в приборе параллельно объективу, т. е. вертикально, но при этом возникает трудность вертикального расположения платы с большим числом элементов,

поэтому было принято решение разместить ПЗС-матрицу, ее вспомогательные элементы и ПЗС-процессор, работающий в качестве преобразователя аналогового сигнала матрицы в цифрой, на одной плате, а всю цифровую часть электроники прибора – на второй плате, расположенной горизонтально. Внешний вид платы устройства представлен на рис. 2. Размеры платы составляют 50×80 мм.

На плате обработки изображения помимо цифрового визирного канала располагаются модуль передачи видеоизображения на персональный компьютер по высокоскоростной шине USB 2.0, модуль передачи видеоизображения на монитор по шине VESA, а также модуль анализа полученного изображения, реализованный в той же ПЛИС, что и визирный канал.

Заключение

Спроектирован многофункциональный модуль электроники для макета прибора круглосуточного наблюдения. Модуль обеспечивает весь цикл типичной обработки видеоизображения, начиная с первичной обработки на выходе матричного сенсора и заканчивая выводом видеоданных на устройство отображения и на внешние устройства. На базе модуля реализован алгоритм гистограммной обработки получаемого с фотоприемного устройства изображения.

За счет универсальности в модуле могут быть использованы различные алгоритмы обработки изображения, реализуемые программно. Программная реализация алгоритмов позволяет на этапе разработки прибора, без изменения его аппаратной части, производить выбор алгоритмов путем экспериментальной проверки работоспособности того или иного алгоритма обработки изображения, а также производить изменение функций анализа и обработки получаемого прибором изображения в зависимости от требований, предъявляемых к прибору наблюдения, что существенно упрощает разработку самого прибора. Универсальность достигается использованием ПЛИС и микросхем памяти с избыточной производительностью, а также применением базовых программных модулей (контроллер памяти, менеджер памяти, блок управляющих регистров, модуль вывода изображения на дис-

плей, модуль передачи данных по шине USB и пр.), функции и код которых не зависят от задач, выполняемых прибором. При этом для удешевления модуля электроники при серийном производстве приборов может быть использована ПЛИС в аналогичном корпусе, но меньшей производительности.

В настоящее время спроектированный модуль электроники используется в качестве визирного канала экспериментального цифрового прибора наблюдения день-ночь, и на его базе производится апробация алгоритмов обработки изображения различной сложности.

Список литературы

1. *Magnan P.* Detection of Visible Photons in CCD and CMOS: A Comparative View // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* 2003. Vol. A 504. P. 199–212.
2. *Гуртов В. А.* Твердотельная электроника: Учеб. пособие. М., 2005. 492 с.
3. *Бирюков Е.* Эволюция датчиков изображения: от ПЗС к КМОП // *Компоненты и технологии.* 2007. № 10. С. 24–27.
4. *Hauck S., Dehon A.* Reconfigurable Computing: The Theory and Practice of FPGA-based Computation. Burlington: Elsevier Inc., 2008. 945 p.
5. *Журов Г. Е., Цивинский М. Ю.* Применение парадигмы высокопроизводительных реконфигурируемых вычислительных систем для построения тракта обработки изображения в тепловизионных и многоканальных приборах // *ГЕО-Сибирь-2010: Сб. материалов VI науч. конгресса.* Новосибирск, 2010. Т. 5: Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 1.
6. *Chang C., Hsiao P., Huang Z.* Integrated Operation of Image Capturing and Processing in FPGA // *International Journal of Computer Science and Network Security.* 2006. Vol. 6. No. 1A. P. 173–179.
7. *Yan B.* Design of CMOS Image Acquisition System Based on FPGA // *Industrial Electronics and Applications.* 2011. P. 1726–1730.
8. *Johnston C. T., Gribbon K. T., Bailey D. G.* Implementing Image Processing Algorithms on FPGAs // *Proc. 11th Electronics New Zealand Conference.* Palmerston North, 2004. P. 118–123.

9. *Burger W., Burge M. J.* Principles of Digital Image Processing. Core Algorithms. 1st ed. Springer, 2009. 329 p.

10. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. / Под ред. П. А. Чочиа. М.: Техносфера, 2005. 1071 с.

Материал поступил в редколлегию 31.05.2012

A. A. Golitsyn, N. A. Seyfi

**THE ARCHITECTURE OF THE DIGITAL DEVICE
FOR ROUND-THE-CLOCK SURVEILLANCE**

The article describes the hardware development of the image processing system which is used as a viewer in digital day-and-night surveillance device. During the work the most suitable image sensor for the surveillance in low luminance conditions is selected, image processing module based on FPGA is developed and the printed circuit board of the device is designed.

Keywords: video surveillance, image processing, CCD image sensor, field programmable gate array.