

УДК.621.389

СОЗДАНИЕ И ОТРАБОТКА ГИБКОЙ СИСТЕМЫ ЗАХВАТА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РАДИАЦИОННО СТОЙКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

*К.И. Сухачёв, Д.П. Григорьев, А.С. Дорофеев, А.А. Артюшин,
А.С. Кирюшкина¹*

Самарский университет
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

E-mail: sukhachev.ki@ssau.ru, grigorev.dp@ssau.ru, dorofeev.as@ssau.ru, artyushin.aa@ssau.ru

Аннотация. Цель работы состоит в создании универсальной гибкой системы захвата изображения, необходимой для регистрации изображений различных диапазонов длин волн в космической научной аппаратуре. Главная проблема реализации такой системы заключается в ограниченной пропускной способности канала для формирования полного кадра изображения. Для решения проблемы ограниченной пропускной способности канала авторами был разработан алгоритм, основой которого является процесс записи кадра с накоплением, что позволяет сформировать полный кадр изображения с использованием нескольких реальных кадров с прореживанием пикселей, полученных с матричного фотоприемника.

Результатом проделанной работы является система, построенная по принципу этажной конструкции, имеющая малые габариты, высокую помехоустойчивость, повышенную надежность и стойкость к внешним воздействующим факторам, а также полную поддержку FMU (Flexible Microcontroller Unit) ядра. В качестве материалов применялись радиационно стойкие электронные компоненты отечественного производства. Основные модули HDL (Hardware Description Language) были оптимизированы по минимальному количеству используемых вентилях, а также адаптированы для использования в ПЛИС бытового назначения. Сравнение параметров реализации модуля захвата изображения на различных ПЛИС приведено в материалах статьи. Данная система может быть использована в космической аппаратуре (при использовании радиационно стойких электронных компонентов), а также найти бытовое или образовательное применение (при реализации системы на компонентах бытового назначения). Также система имеет ряд программно регулируемых параметров, позволяющих настроить системные регистры матрицы. Для разработанной системы создано программное обеспечение на персональном компьютере для захва-



© Автор(ы), 2024

¹ *Кирилл Игоревич Сухачев, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник института космического приборостроения.*

Данил Павлович Григорьев, младший научный сотрудник института космического приборостроения, аспирант.

Александр Сергеевич Дорофеев, младший научный сотрудник института космического приборостроения.

Андрей Алексеевич Артюшин, инженер-конструктор института космического приборостроения, аспирант.

та и обработки изображений. Приведены результаты отладки системы и примеры тестовых снимков.

Ключевые слова: ПЗС-матрица, КМОП-матрица, SPAD-матрица, ПЛИС, микроконтроллер, FMU, IP-ядро.

Введение

Для получения снимка окружающего нас пространства фотоприбору необходимы две вещи – оптическая система и светочувствительный элемент. Первым предметом может выступать любая линза или отверстие в пластине (камера обскура). Вторым предметом является любой полупроводник, так как он реагирует на свет и с помощью внутреннего фотоэффекта начинает испускать электроны (впоследствии – ток, сила которого зависит от яркости света). Самый простой фотоэлемент – фотодиод. Если сложить фотодиоды в виде матрицы с 512 строками и 512 столбцами, то получим простейшую матрицу с разрешением 512×512 пикселей. Однако она будет выдавать черно-белое изображение. Для цветного изображения необходимо наложить цветные фильтры на три фотодиода в каждом пикселе – красный, синий и зеленый. Так выглядит простейшая модель любой светочувствительной цветной матрицы. Для технологического процесса все не так просто, и существует целый ряд технологий, по которым на сегодняшний момент изготавливаются матрицы для захвата изображений. Рассмотрим кратко некоторые технологии работы матриц.

Виды матриц и способы кодирования свет – сигнал

ПЗС – приборы с зарядовой связью [1] (англ. **CCD** – Charge Coupled Device). Эта технология включает в себя матрицу из фотодиодов, на которых при попадании света выделяется некоторый заряд Q . Этот заряд с каждого пикселя поступает через вертикальную и горизонтальную шины переноса зарядов в усилители, в которых заряды усиливаются и преобразуются в электрические сигналы. Затем сигналы попадают в тракт обработки на базе АЦП и микроконтроллера. Каналы переноса зарядов представляют собой большие проводящие шины, количество которых напрямую зависит от числа фотодиодов. Чтобы заряд с каждого пикселя прошел на магистральную шину, необходимо подать на затвор каждого фотодиода отпирающее напряжение. Структура одного ПЗС пикселя показана на рис. 1.

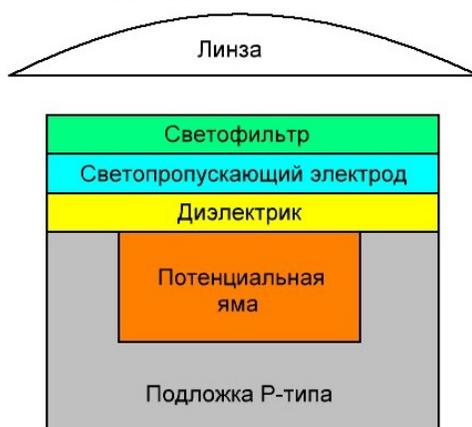


Рис. 1. Структура ПЗС пикселя

Принцип работы ПЗС пикселя заключается в следующем. Свет через линзу собирается в равномерный пучок и проходит через светофильтр (красный / си-

ний / зеленый). После светофильтра отфильтрованный свет проходит на светопропускающий электрод. Диэлектрик имеет прозрачную структуру, которая пропускает свет на кристалл. На верхней части кристалла подается положительный потенциал. Падающий свет проникает внутрь полупроводниковой структуры, и образуется электрон-дырочная пара. Электрическое поле разделяет появившуюся пару, электрон попадает в зону хранения (потенциальную яму), а дырка – в подложку. В итоге заряд перемещается по каналам вертикального и горизонтального переноса зарядов.

ПЗС-пиксели обладают следующими параметрами:

1) емкость потенциальной ямы (зоны хранения) – максимальное количество электронов, помещающихся в зону хранения;

2) спектральная чувствительность – зависимость отношения величины фотопотока к величине светового потока от длины волны излучения;

3) квантовая эффективность – физическая величина, равная отношению количества поглощенных фотонов, которые вызвали образование квазичастиц, к общему числу фотонов;

4) динамический диапазон – отношение напряжения или тока насыщения к среднему квадратичному напряжению.

Три вида способов чтения пикселей ПЗС-матрицы [3]: межстрочные; кадровые; полнокадровые.

Достоинствами этой структуры являются: простота в изготовлении матрицы; лучший коэффициент заполнения по сравнению с КМОП, что увеличивает квантовую эффективность и уменьшает уровень шумов.

Из недостатков стоит отметить коллизии, возникающие в момент освещения матрицы ярким светом. При таком облучении на изображении возникают характерные светлые полосы. Такие полосы вызваны тем, что электрический заряд большой величины наводится на остальные линии вертикальной шины переноса зарядов. Помимо этого ПЗС-пиксели считываются последовательно, без произвольного доступа к пикселям, что влияет на оптимизацию программного обеспечения. Также стоит отметить большие энергетические затраты на открывание затворов для каждого пикселя.

Разновидностью CCD является **EMCCD** (Electron Multiplying CCD), где ключевую роль играет дополнительное внедрение регистров умножения между ПЗС-ячейкой и потенциалом +50 В [4]. Ввиду этого умножения под действием ионизационного эффекта возникает дополнительная случайная электронно-дырочная пара, что приводит к увеличению общего числа электронов (в рамках каждого пикселя). Такой способ понижает внутренние шумы и увеличивает квантовую эффективность, что делает чувствительность сенсора более высокой. Из недостатков отмечают повышение цены сенсора и малая износоустойчивость, поскольку на регистры умножения постоянно подается высокое напряжение.

КМОП – комплементарный металл-окисел-полупроводник (англ. **CMOS** – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Такая технология имеет усилитель на каждом пикселе, который преобразует заряд в электрический сигнал заданного номинала. Эти сигналы формируются в столбцы на вертикальной шине, доступ к которой осуществляется в момент коммутации переключателя выбора пикселей. Вертикальная шина коммутируется к горизонтальной шине путем переключателей выбора столбца; таким образом, имеется возможность аппаратным методом выбирать требуемый пиксель для захвата изображения как по строкам,

так и по столбцам (оконное считывание). Структура одного КМОП пикселя показана на рис. 2 [2].

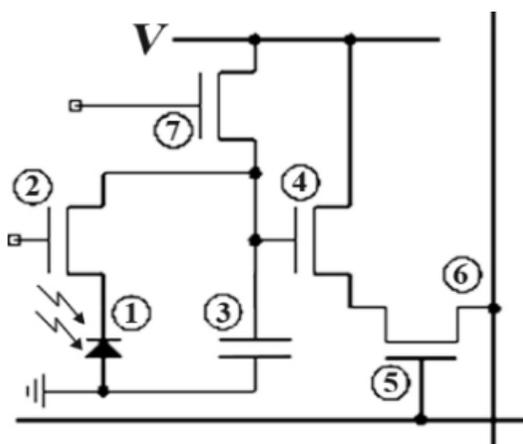


Рис. 2. Структура КМОП пикселя: 1 – фотодиод; 2 – электронный затвор; 3 – конденсатор, накапливающий заряд с фотодиода; 4 – усилитель; 5 – шина выбора строки; 6 – вертикальная шина вывода информации; 7 – управляющий вывод сигнала сброса

Принцип работы пикселя состоит в следующем. При необходимости захвата изображения открывается транзистор 2, что позволяет ввести фотодиод в рабочий режим. В зависимости от яркости света ток фотодиода 1 (и, как следствие, заряд) будет изменяться. Заряд с фотодиода 1 через затворный транзистор 2 подается на конденсатор 3, который накапливает заряд и переводит его в напряжение. Чем ярче картинка – тем больше заряд и, как следствие, выше напряжение. В противном случае прибегают к усилителям, если изображение снято при малом освещении, но тут стоит помнить об усилении шумов. Далее с конденсатора 3 по окончании зарядки напряжение поступает на усилительный транзистор 4, который усиливает напряжение конденсатора и подает его на ключ 5 вертикальной шины 6. Ключ 5 открывается только при подаче соответствующего опорного напряжения на шине выбора строки. В этот момент все пиксели одной строки начинают подавать заряды на отдельные столбцы. Все элементы выполнены по технологии КМОП, откуда и следует название матрицы. Транзистор 7 используется для сброса пикселя, т. е. для разрядки конденсатора 3.

Достоинства: дешевизна; отсутствие коллизии засветки, в отличие от ПЗС-матриц, поскольку передача идет электрическим сигналом при коммутировании каждого пикселя; меньшие энергетические затраты и геометрические размеры; на одном кристалле с матрицей можно расположить вычислительный блок обработки изображения, благодаря которому с матрицы можно выводить изображение в каком-либо формате, и проводить различные операции; имеется доступ к каждому пикселю по отдельности; каждый пиксель имеет свой усилитель, что позволяет оперировать сигналами внутри матрицы.

Недостатки: высокий уровень шума; дополнительный нагрев ввиду дополнительных элементов схемы на одном кристалле с матрицей; низкий коэффициент заполнения пикселей; низкая чувствительность.

SPAD – Single Photon Avalanche Diode – матрицы на базе однофотонных лавинных диодов. Такой тип датчика регистрирует не количество света (как в КМОП- или ПЗС-структурах), а каждую отдельную частицу, достигающую пиксель (фотон). Схематично сравнение между CMOS и SPAD показано на рис. 3 [5].

Каждый фотон, дошедший до диода SPAD, вызывает внутренний фотоэффект, который извлекает один электрон. После этого сразу же возникает лавинное умножение электронов, которое можно будет зарегистрировать в электрическом сигнале. В это же время КМОП-сенсор не имеет электронного умножения на квантовом уровне, ввиду чего регистрируется наименьшее количество информации (света). Следовательно, SPAD-сенсор имеет высокую чувствительность к слабо освещенным объектам и малое временное разрешение – до 100 пикосекунд, что позволяет фиксировать световые следы, движущиеся со скоростью примерно 300 000 км/с.

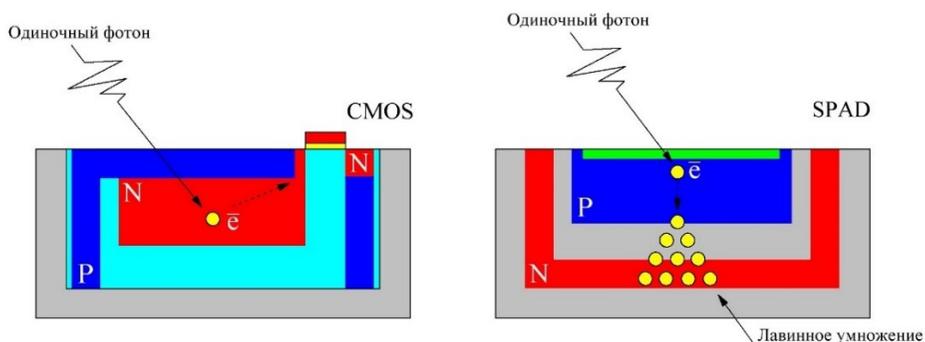


Рис. 3. Пояснение разницы в работе CMOS- и SPAD-датчиков

Данный тип матрицы широко применяется как для обычных камер, так и для научной аппаратуры, где нередко появляется необходимость наблюдения за чрезвычайно быстрыми процессами (в ускорителе микрочастиц). На конец 2019 года имеется ряд исследований по временной производительности матрицы и регистрации 2D- и 3D-объектов, продемонстрированных в статье [6].

Особенности системы захвата изображения FICS

Для реализации гибкой системы захвата изображения (FICS – Flexible Image Capture System) применялась отечественная радиационно стойкая КМОП-матрица 1205XB014 [7, 10], ПЛИС 5578ТС034 [11] и СОЗУ ОП 1663РА06. Структурная схема системы показана на рис. 4.

Система имеет всего три модуля – модуль матрицы, модуль ПЛИС и модуль питания. Платы собраны по этажной конструкции, что позволяет избежать длинных сигнальных линий и в то же время обеспечить компактность системы в целом с точки зрения массогабаритных параметров. Внешний вид системы показан на рис. 5. Габаритные размеры системы в сборе – 66×66×30 мм.

Особенность FICS на базе КМОП-матрицы (1205XB014) состоит в том, что она генерирует непрерывный поток данных со скоростью от 0,6 до 4,8 Гб/с. Такой объем невозможно в реальном времени отправить во внешние устройства из-за отсутствия в целевых ИМС ПЛИС (5578ТС034) высокоскоростных аппаратных передатчиков. Также невозможно в реальном времени записать весь кадр в целевую статическую ОЗУ (радиационно стойкая СОЗУ ОП 1663РА06). Таким

пропущено. Далее захватываются следующие актуальные данные с параллельных шин матрицы и процесс записи с накоплением повторяется вновь, однако адрес ячейки СОЗУ смещается с учетом пропущенных пикселей, и т. д. Таким образом, после первого кадра с матрицы в СОЗУ остаются «прореженные» данные, полная информация об изображении собирается из нескольких реальных кадров, т. к. каждый следующий пишется со смещением адреса как пикселя, так и ячейки СОЗУ на единицу. Полный кадр в СОЗУ формируется за количество реальных кадров матрицы, равное количеству пропущенных пикселей за время записи с накоплением в СОЗУ (стабильное значение для указанных ИМС составляет 8). Иллюстрация описанного метода показана на рис. 6. DSYN – синхроимпульс для тактирования пакетов данных. Data AB и CD – потоки данных с квадрантов матрицы, поскольку матрица разбита на области А, В, С и D.

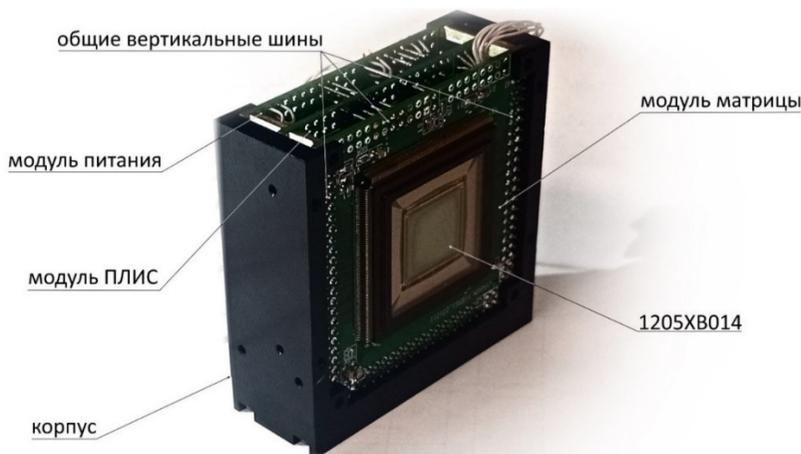


Рис. 5. Конструкция системы захвата изображения

Для возможности использования разработанных HDL-модулей в различных ПЛИС была проведена оптимизация по количеству используемых вентилях. Сравнительные характеристики приведены в таблице.

Дополнительные особенности системы:

1. Накопление данных происходит непосредственно в процессе записи данных в СОЗУ, для этого из ячейки сначала считываются данные, потом суммируются с актуальными данными от матрицы, и результат записывается обратно в ту же ячейку. Параметры накопления могут задаваться в диапазоне от 1 до 16, т. е. при параметре 16 будет использована вся область доступной СОЗУ, имеющая разрядность одного слова 16 бит, при параметре накопления 1 будет занято только 14 бит, что соответствует разрядности АЦП КМОП матрицы.

2. Кроме накопления доступен режим с усреднением по нескольким кадрам, доступны режимы 2X, 4X, 8X и 16X.

3. Аппаратная поддержка для работы с FMCU-микроконтроллером [8, 12, 14, 15] на базе интерфейса SPI [9, 11, 13].

Сравнение параметров реализации модуля захвата изображения на различных ПЛИС

Параметр	ПЛИС				
	5578 TC034	EPF10 K100E BC356-1	EP2C8 F256C6	EP3C5 F256C6	EP3C16 U484C6
Занимаемый объем	2079 (42%)	2049 (42%)	1829 (22%)	1833 (33%)	1835 (12%)
Количество регистров	–	–	834 (10%)	834 (16%)	834 (5%)
Количество выводов	84 (46%)	84 (31%)	84 (46%)	88 (48%)	88 (25%)

Параметр	ПЛИС			
	EP3C40 F484C6	EP4C55F 780C8	EP4C120 F780C7	EP3SE50 F780C2
Занимаемый объем	1834 (5%)	2688 (5%)	2700 (3%)	911 (2%)
Количество регистров	834 (2%)	36864+(5%)	36864 + (<2%)	692 (2%)
Количество выводов	88 (27%)	88 (17%)	88 (17%)	84 (17%)

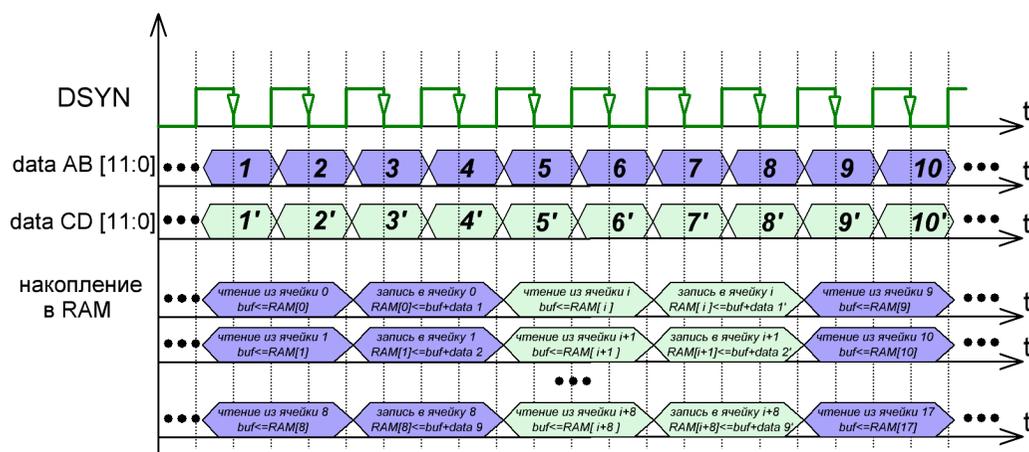


Рис. 6. Временные диаграммы захвата и записи данных с матрицы

Отладка и испытание системы

Для первичной отладки разработана модель самой матрицы 1205XB014 с помощью HDL-описания. Модель генерирует импульсы, идентичные импульсам от реальной ИМС-матрицы, и позволяет выдавать потоки данных настроечных таблиц. Результат испытаний с моделью показан на рис. 7, где представлена одна и та же настроечная картинка без накопления (рис. 7, а) и с 10-кратным накоплением соответственно (рис. 7, б). Изображение на рис. 7, в демонстрирует испытание с моделью матрицы, выдающей градиентную заливку в секторах «CD», и горизонтальные полосы с заливкой в секторах «AB». Программируемые настройки матрицы, задающиеся по SPI, были одинаковые для всех 4 секторов и находились в состоянии «по умолчанию». Важно отметить, что конфигурацию

и формат импульсов синхронизации пришлось изменить от состояния «по умолчанию», чтобы они соответствовали технической документации на матрицу.

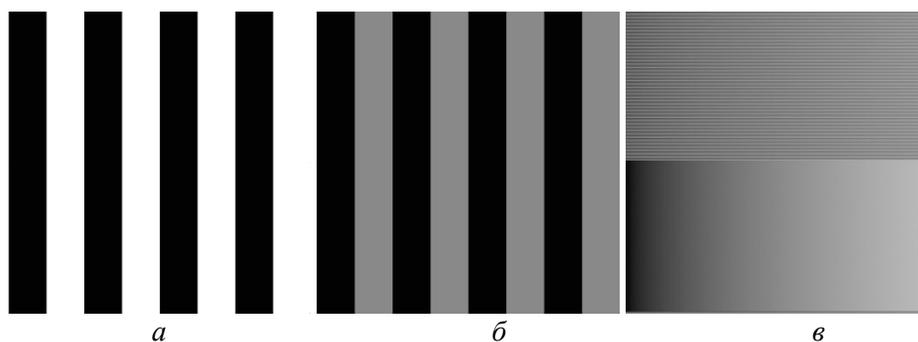


Рис. 7. Тестовые изображение модели матрицы

Для реальных испытаний системы был напечатан на 3D-принтере оптически непрозрачный корпус и добавлена оптическая система в виде объектива «ЛОМО» от пленочного фотоаппарата «СМЕНА». Макет системы в разборе показан на рис. 8, где также показан внешний вид электроники без корпуса.



Рис. 8. Макет системы захвата изображения

Для отладки работы системы захвата изображения была написана программа на языке C# с возможностью контроля поступающего изображения и изменения потока данных в реальном времени, а именно: поворот и совмещение двух половин изображения (поскольку матрица выдает изображение двумя зеркальными половинами), гамма кодирование/декодирование, переключение MSB/LSB пакета (рис. 9). Протокол прописан в рамках обмена данными между ПЛИС и ПК. Слева добавлена область по контролю пришедших данных. Алгоритм работы следующий:

1. ПК посылает запрос в ПЛИС на захват изображения.
2. ПЛИС записывает пакеты с матрицы в СОЗУ и по окончании отправляет в ПК команду «ready».

3. При принятии команды «ready» ПК посылает запросы на пакеты, реализуя систему запрос-ответ.

4. При приеме пакета происходят парсинг данных, склейка байт и заполнение буфера с одновременным выводом изображения по частям. В случае если ПЛИС зависает, прописана дополнительная команда повтора и сброса системы, если время ожидания превысило тайм-аут.

Один принимаемый пакет состоит из 32768 байт и содержит всегда в начале команду о готовности. При сбое ПК повторно запрашивает данные, которые пришли с ошибкой. Итого необходимо принять 127 пакетов по 32 768 байт, что в сумме даст 2 097 152 байта, в которых содержится 1 048 576 слов для формирования изображения в 1 мегапиксель. Полученное изображение можно сохранить в трех форматах: JPG, BMP, PNG. Помимо этого в программе предусмотрен интерфейс передачи управляющих команд в матрицу, которая настраивается ПЛИС через интерфейс SPI. Для этого выделено два поля: Address и Data. Все команды и временные диаграммы для работы и настройки матрицы описаны в документации на соответствующую матрицу.

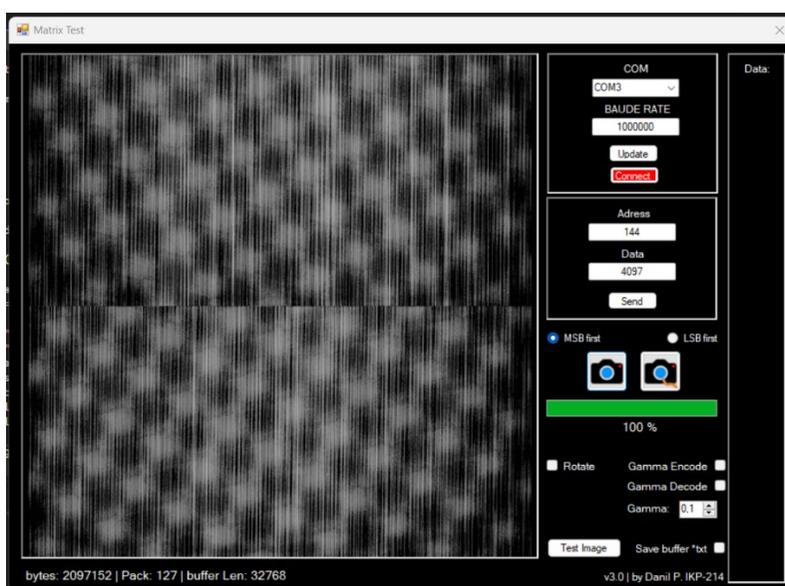


Рис. 9. Скриншот программы по захвату изображения с оптической системой

С помощью системы в сборе, показанной на рис. 8, были получены серии тестовых изображений без оптической системы (рис. 10) при разных параметрах опорного напряжения столбцовых АЦП. Причем белые квадратики на самом деле черные, а черные – светлые, поскольку особенность матрицы состоит в том, что при сильной засветке она выдает величину напряжения равной нулю. На снимках показана матрица квадратиков, напечатанных на прозрачной пленке черной краской. Засветка проходила с помощью лампы, запитанной от аккумулятора (во избежание паразитных мерцаний).

Снимки на рис. 10 получены следующим образом. Один снимок разбит на две половины, и для каждой половины заданы разные настройки времени экспозиции. По итогу лучший результат показан на рис. 10, в в верхней половине.

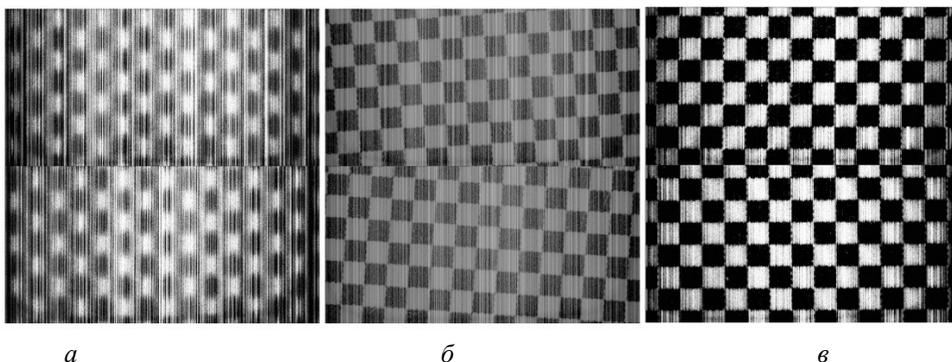


Рис. 10. Снимок фотошаблона без оптической системы: *а* – высокое опорное напряжение; *б* – низкое опорное напряжение; *в* – среднее опорное напряжение

На рис. 11 показаны изображения, полученные с помощью оптической системы при фокусном расстоянии, равном шести метрам. Настройки регистров выдержки матрицы – «по умолчанию», режим накопления – 8X.

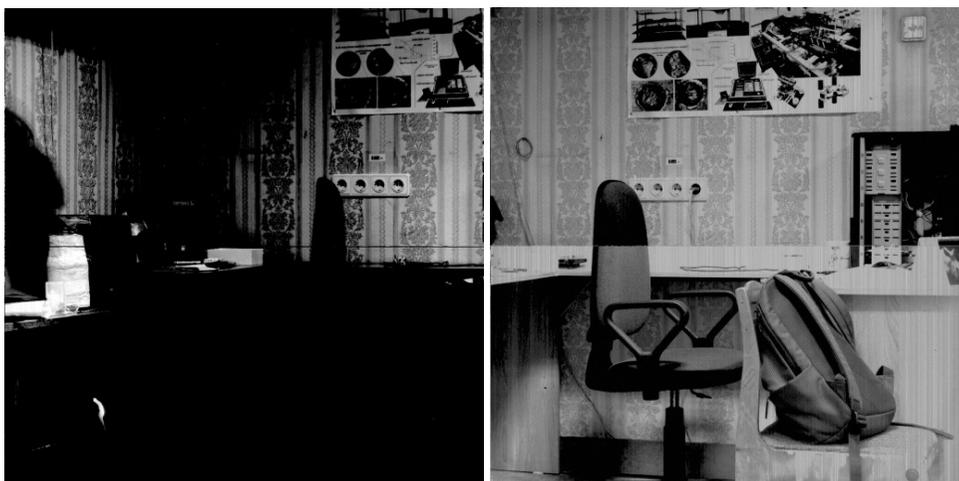


Рис. 11. Снимок с помощью оптической системы ЛОМО Т-43 4/40

Заключение

Итогом проделанной работы служит создание универсальной электронной системы захвата изображения с варьируемыми параметрами, задаваемыми как для матрицы, так и для самой ПЛИС. Электроника выполнена полностью на отечественной элементной базе с использованием радиационно стойких компонентов, что повышает надежность устройства и делает возможным его использование в среде с жесткими внешними воздействующими факторами.

Созданные HDL-модули и схемотехнические решения универсальны и могут быть использованы для создания устройства на ПЛИС бытового назначения, что делает возможным ее использование как в образовательных, так и в бытовых целях. Способы захвата изображения с матрицы 1205XB014, разработанные АО «НИИ телевидения» [10], не могут считаться универсальными и обладают боль-

шими массогабаритными характеристиками, а также требуют значительных финансовых вложений.

В дальнейшем планируется увеличить скорость приема изображения, реализовать передачу данных через более скоростной интерфейс, прописать автоматические команды на изменения параметров матрицы для регулировки изображения и внедрить поддержку системы захвата в виде отдельного блока периферии FMU микроконтроллера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Удовина А.С.* Исследование технологических характеристик CCD (ПЗС) и CMOS (КМОП) электронно-оптических преобразователей // Вестник Московского государственного университета печати им. Ивана Фёдорова. 2011. № 1. С. 197–201. EDN: VMBVMR.
2. *Артюшин А.А.* Анализ основных типов матриц для измерения профиля пучка лазерного излучения // Вестник молодых учёных и специалистов Самарского университета. 2023. № 2 (21). С. 187–192.
3. Camera technology basics. CCD sensor [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vision-doctor.com/en/camera-technology-basics/ccd-sensors.html> (дата обращения: 05.08.2024).
4. EMCCD камеры – принцип работы, достоинства и недостатки [Электронный ресурс]. URL: https://www.biotechnologies.ru/catalog/_emccd.html?ysclid=lzjh2g16gk589838408 (дата обращения: 05.08.2024).
5. SPAD Sensor – Canon global [Электронный ресурс]. URL: <https://global.canon/en/technology/spad-sensor-2023.html> (дата обращения: 05.08.2024).
6. *Kazuhiro M., Andrei A., Ming-lo Wu, Arin Can Ulku, Ivan M.A., Claudio Bruschini, Edoardo Charbon.* A megapixel time-gated SPAD image sensor for 2D and 3D imaging applications // Instrumentation and Detectors. 2019. P. 11.
7. Радиационно-стойкий фотоприемник матричный 1205XB014 [Электронный ресурс]. URL: <https://niitv.ru/product-categories/product/27> (дата обращения: 05.08.2024).
8. *Сухачев К.И., Григорьев Д.П., Исмаилова Е.В.* Разработка микроконтроллерного FMU ядра на базе ПЛИС для научной космической аппаратуры // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16. № 5. С. 12–23. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-12-23. EDN: WTMNAF.
9. *Сухачев К.И., Григорьев Д.П., Шестаков Д.А. и др.* Разработка кольцевой полудуплексной сети для обмена данными между устройствами в научной космической аппаратуре // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 34–45. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-34-45. EDN: AHVMXO.
10. *Умбиталиева А.А., Цыцулина А.К. и др.* Теория и практика космического телевидения. СПб.: НИИ телевидения, 2017. 368 с.
11. АО «Воронежский завод полупроводниковых приборов» (ВЗПП-С). Каталог изделий 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vzpp-s.ru/production/catalog.pdf> (дата обращения: 27.07.2024).
12. *Atehortúa J.C.B.* Desarrollo e implementación del procesador soft-core LatticeMico32 en una FPGA. 2016. URL: <https://1library.co/document/ye9524eq-desarrolloimplementacion-procesador-soft-core-latticemicofpga.html> (дата обращения: 30.07.2024).
13. *Старшинов В.С., Ткачев С.А.* Разработка IP-Core для соединения интерфейсов AXI и SPI с использованием микропроцессорных систем в связке с ПЛИС // Наука. Технологии. Инновации: Сб. научных трудов. В 10 т. Т. 1 / Под ред. Д.Н. Достовалова. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. С. 110–117.
14. *Никитин А.А.* Реализация радиационно-стойкого кодирования в рамках межкристалльной связи систем, состоящих из нескольких программируемых логических интегральных схем // Космическая техника и технологии. 2018. № 4 (23). С. 100–110. EDN: YUJJNB.
15. *Козаченко В.Ф., Алямкин Д.И., Анучин А.С. и др.* Практический курс микропроцессорной техники на базе процессорных ядер ARM-Cortex-M3/M4/M4F. Архитектура, система команд, разработка и отладка программного обеспечения на Ассемблере в интегрированной среде Keil uVision. М.: Изд-во МЭИ, 2019. 543 с.

DEVELOPMENT AND TESTING OF A FLEXIBLE IMAGE CAPTURE SYSTEM BASED ON DOMESTIC RADIATION-HARDENED ELECTRONIC COMPONENTS

K.I. Sukhachev, D.P. Grigorev, A.S. Dorofeev, A.A. Artyushin, A.S. Kiryushkina¹

Samara University
34, Moskovskoye Shosse, Samara, 443086, Russian Federation

E-mail: sukhachev.ki@ssau.ru, grigorev.dp@ssau.ru, dorofeev.as@ssau.ru, artyushin.aa@ssau.ru

Abstract. *The aim of the work is to create a universal flexible image capture system required for recording images of various wavelength ranges in space scientific equipment. The main problem of implementing such a system is the limited bandwidth of the channel for forming a full image frame. To solve this problem, the authors designed an algorithm based on the process of recording a frame with accumulation, that allowed to form a full image frame using several real frames with reduced number of pixels got with the matrix photodetector.*

The result of the work is a system built on the principle of a tiered design, having small dimensions, high noise immunity, high reliability and resistance to external factors, as well as full support for the FMU (Flexible Microcontroller Unit) core. Russian radiation-resistant electronic components were used as materials. The main HDL (Hardware Description Language) modules were optimized to reduce the number of gates and to adapt for household FPGAs. Parameters comparison of the image capture module implementation on various FPGAs is given in this article. This system can be used both in space equipment (using radiation-resistant electronic components) and for household or educational use (implementing the system on household components). The system also has a number of program-controlled parameters that allow to configure the matrix system registers. For capturing and processing images was created software on a personal computer. The results of debugging the system and examples of test shots are given.

Keywords: *CCD matrix, CMOS matrix, SPAD matrix, FPGA, microcontroller, FMU, IP-core.*

REFERENCES

1. *Udovina A.S. Issledovanie tehnologicheskikh harakteristik CCD (PZS) i CMOS (KMOP) elektronno-opticheskikh preobrazovatelej [Study of Technological Characteristics of CCD (Charge-Coupled Devices) and CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) Electro-Optical Converters] // Vestnik Moskovskogo gosudar-stvennogo universiteta pechati im. Ivana Fyodorova. 2011. № 1. P. 197–201. (In Russian)*
2. *Artyushin A.A. Analiz osnovnykh tipov matric dlya izmereniya profilya puchka lazer-nogo izlucheniya [Analysis of Main Types of Matrices for Laser Beam Profile Measurement] // Vestnik molodyh uchyonyh i specialistov Samarskogo universite-ta. 2023. № 2 (21). P. 187–192. (In Russian)*



© The Author(s), 2024

¹ *Kirill I. Sukhachev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Senior Researcher at the Institute of Space Instrumentation.*

Danil P. Grigorev, Junior Researcher at the Institute of Space Instrumentation, Postgraduate Student.

Alexander S. Dorofeev, Junior Researcher at the Institute of Space Instrumentation.

Andrey A. Artyushin, Design Engineer at the Institute of Space Instrumentation, Postgraduate Student.

3. Camera technology basics. CCD sensor [Online]. Available: <https://www.vision-doctor.com/en/camera-technology-basics/ccd-sensors.html> (Accessed: August 5, 2024).
4. EMCCD cameras – principle of operation, advantages and disadvantages [Online]. Available: https://www.biotechnologies.ru/catalog/_emccd.html?ysclid=lzjh2g16gk589838408 (Accessed: August 5, 2024).
5. SPAD Sensor – Canon global [Online]. Available: <https://global.canon/en/technology/spad-sensor-2023.html> (Accessed: August 5, 2024).
6. *Kazuhiro M., Andrei A., Ming-lo Wu, Arin Can Ulku, Ivan M. A., Claudio Bruschini, Edoardo Charbon.* A megapixel time-gated SPAD image sensor for 2D and 3D imaging applications // *Instrumentation and Detectors*. 2019. P. 11.
7. Radiation-resistant matrix photodetector 1205XB014 [Online]. Available: <https://niitv.ru/product-categories/product/27> (Accessed: August 5, 2024).
8. *Suhachev K.I., Grigorev D.P., Ismagilova E.V.* Razrabotka mikrokontrolernogo FMU yadra na baze PLIS dlya nauchnoj kosmicheskoy apparatury [Development of a microcontroller FMU core based on FPGA for scientific space equipment] // *Izvestiya SPbGETU «LETI»*. 2023. V. 16. № 5. P. 12–23. DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-12-23. (In Russian)
9. *Suhachev K.I., Grigorev D.P., Shestakov D.A. i dr.* Razrabotka kolcevoj poludup-leksnoj seti dlya obmena dannymi mezhdru ustrojstvami v nauchnoj kosmicheskoy apparature [Development of a ring-based half-duplex network for data exchange between devices in scientific space equipment] // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023. № 84. P. 34–45. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-34-45. (In Russian)
10. *Umbitalieva A.A., Cyculina A.K. i dr.* Teoriya i praktika kosmicheskogo televideniya [Theory and Practice of Space Television]. SPb: NII televideniya, 2017. 368 p. (In Russian)
11. JSC “Voronezh Semiconductor Devices Plant” (VZPP-S). Product catalog 2020 [Online]. Available: <http://www.vzpp-s.ru/production/catalog.pdf> (Accessed: July 27, 2024).
12. *Atehortúa J.C.B.* Desarrollo e implementación del procesador soft-core LatticeMico32 en una FPGA. 2016. URL: <https://1library.co/document/ye9524eq-desarrolloimplementacion-procesador-soft-core-latticemicofpga.html> (Accessed: July 30, 2024).
13. *Starshinov V.S., Tkachev S.A.* Razrabotka IP-Core dlya soedineniya interfejsov AXI i SPI s ispolzovaniem mikroprocessornykh sistem v svyazke s PLIS [Development of an IP-Core for interfacing AXI and SPI using microprocessor systems in conjunction with FPGA] // *Nauka. Tehnologii. Innovacii: Sb. nauchnykh trudov*. V 10 t. T. 1 / Pod red. D.N. Dostovalova. Novosibirsk: Novosibirskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 2018. P. 110–117. (In Russian)
14. *Nikitin A.A.* Realizaciya radiacionno-stojkogo kodirovaniya v ramkah mezhkristalnoj svyazi sistem, sostoyashih iz neskolkih programmiruemym logicheskimi integralnymi shem [Implementation of radiation-hardened encoding for inter-chip communication in systems consisting of multiple programmable logic integrated circuits] // *Kosmicheskaya tehnika i tehnologii*. 2018. № 4 (23). P. 100–110. (In Russian)
15. *Kozachenko V.F., Alyamkin D.I., Anuchin A.S. i dr.* Prakticheskij kurs mikroprocessornoj tehniki na baze processornykh yader ARM-Cortex-M3/M4/M4F. Arhitektura, sistema komand, razrabotka i otladka programmogo obespecheniya na Assemblere v integrirovannoj srede Keil uVision [Practical Course in Microprocessor Technology Based on ARM Cortex-M3/M4/M4F Processor Cores. Architecture, Instruction Set, Development, and Debugging of Assembly Language Software in the Keil uVision Integrated Environment]. M.: Izd-vo MEI, 2019. 543 p. (In Russian)

Original article submitted 10.12.2024