

УДК 520.8

## Астрономические ПЗС-системы для 6-метрового телескопа БТА (обзор)

В. А. Мурзин, С. В. Маркелов, В. И. Ардиланов, И. В. Афанасьева, А. Н. Борисенко,  
 Н. Г. Иващенко, М. А. Притыченко, Г. Ш. Митиани, А. А. Борисенко, В. Ф. Вдовин

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН имеет многолетний опыт разработки систем регистрации изображений, включая ПЗС-контроллеры и криостатируемые камеры с крупноформатными малошумящими матричными фотодетекторами. В обзорной статье рассмотрены принципы построения ПЗС-систем для фотометрии и спектроскопии на 6-метровом оптическом телескопе БТА (Большой Телескоп Азимутальный). ПЗС-системы обеспечивают близкие к предельным чувствительность и фотометрическую воспроизводимость в длинноэкспозиционных методах наблюдений слабых астрономических объектов за счет цифровой оптимальной фильтрации видеосигнала ПЗС-матрицы, стабилизации и линеаризации передаточной характеристики «свет-цифровые отсчеты» в реальном времени считывания кадра. Разработанные ПЗС-контроллеры универсальны и позволяют управлять одиночными ПЗС-матрицами, КМОП-приемниками и инфракрасными матричными детекторами, а также мозаиками таких приборов в любых практически возможных конфигурациях.*

PACS: 42.79. Pw; 07.50. Qx; 07.05. Nd

*Ключевые слова:* фотоприемное устройство, ПЗС-система, ПЗС-контроллер, сигнал, шум, обработка сигнала, оптимальная фильтрация, сбор данных.

### Введение

В мировой оптической астрономии системы приема изображений, основанные на твердотельных матричных приемниках (ПЗС-матрицы и ИК-матрицы), являются основными инструментами для самых разных методов наблюдений, а именно:

фотометрии в определенной системе спектральных фильтров, спектроскопии низкого, умеренного и высокого разрешения, эшелле-спектроскопии, поляриметрии, спектрополяриметрии и других.

Особенностью современных наблюдательных задач является необходимость исследования, как правило, очень слабых астрономических объектов, что требует получения изображений с экспозициями от 15 до 45 мин или многократных экспозиций (в том числе в течение нескольких ночей) с большим объемом калибровочных снимков для последующей обработки исходных цифровых изображений. Таким образом, чувствительность и долговременная стабильность ПЗС-систем являются определяющими для обеспечения точности и достоверности решения научных задач.

Коммерческие ПЗС-системы с глубоким охлаждением фотодетектора, пригодные для длительных экспозиций, в настоящее время практически не выпускаются, поскольку их точностные характеристики не удовлетворяли требованиям фундаментальной астрономии. Численность разработчиков и производителей собственно матричных фотоприемников научного класса (с большим форматом, высокой квантовой эффективностью, низким шумом считывания, большим динамическим диапазоном) сократилась за последние два

---

Мурзин Валерий Александрович, ведущий инженер<sup>1</sup>.  
 Маркелов Сергей Викторович, заведующий лабораторией<sup>1</sup>.  
 Ардиланов Валерий Иванович, ведущий инженер<sup>1</sup>.  
 Афанасьева Ирина Викторовна, ведущий инженер<sup>1</sup>, аспирант<sup>2</sup>.  
 Борисенко Анатолий Николаевич, ведущий инженер<sup>1</sup>.  
 Иващенко Николай Григорьевич, ведущий инженер<sup>1</sup>.  
 Притыченко Максим Александрович, старший инженер<sup>1</sup>.  
 Митиани Гурам Шотаевич, старший инженер<sup>1</sup>.  
 Борисенко Александр Анатольевич, старший инженер<sup>1</sup>.  
 Вдовин Вячеслав Федорович, ведущий научный сотрудник<sup>3</sup>.  
<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН.  
 Россия, 369167, пос. Нижний Архыз.  
 Тел. 8 (87878) 9-34-27. E-mail: markel@sao.ru  
<sup>2</sup> Университет ИТМО.  
 Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49.  
<sup>3</sup> Институт прикладной физики РАН.  
 Россия, 603950, г. Нижний Новгород, БОКС – 120,  
 ул. Ульянова, 46.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2016 г.

© Мурзин В. А., Маркелов С. В., Ардиланов В. И.,  
 Афанасьева И. В., Борисенко А. Н., Иващенко Н. Г.,  
 Притыченко М. А., Митиани Г. Ш., Борисенко А. А.,  
 Вдовин В. Ф., 2016

десятилетия от десятка до трех (E2V Technologies, Великобритания; Fairchild Imaging, США; Andanta GmbH, Германия) ввиду невысокой потребности на такие дорогие изделия, которые используются преимущественно в астрономии и медицине.

На практике только крупные обсерватории, например, такие как Европейская Южная Обсерватория (ESO, Европа), Национальная Обсерватория Оптической Астрономии (NOAO, США), а также Специальная астрофизическая обсерватория Российской Академии наук (САО РАН, Россия), имеют возможность комплексно разрабатывать криостатируемые фотоприемные устройства на основе приемников научного класса, ПЗС-контроллеры с современными архитектурами и программное обеспечение (ПО) таких систем [1—3]. Другие обсерватории самостоятельно проектируют требуемые им фотоприемные камеры, а контроллеры и ПО заказывают в небольшой компании Astronomical Research Cameras (США) или в ESO.

Целью данного обзора являлось рассмотрение сформированных принципов построения ПЗС-систем для фотометрии и спектроскопии, в т.ч. на 6-метровом оптическом телескопе БТА в САО РАН.

### Направления исследований и разработок ПЗС-систем в САО РАН

Специальная астрофизическая обсерватория РАН имеет более чем 35-летний опыт работы по применению твердотельных матричных фотоприемников в астрономических наблюдениях. Основная область деятельности в этом направлении — разработка криостатируемых фотоприемных камер и ПЗС-контроллеров для широкоформатных малощумящих ПЗС-матриц научного класса для использования в составе светоприемной аппаратуры 6-метрового телескопа БТА и в других обсерваториях.

Исследования ведутся в Лаборатории перспективных разработок САО РАН в сотрудничестве с Институтом прикладной физики РАН (в части совместной разработки криостатов), при этом во главу угла ставятся следующие цели:

- достижение максимальной чувствительности (минимального шума считывания и минимального темнового тока), требуемой во всех методах наблюдений слабых объектов при длительности единичной экспозиции несколько десятков минут;

- достижение максимальной стабильности и линейности передаточной характеристики «светцифровые отсчеты» фотоприемной аппаратуры для фотометрических методов наблюдений в условиях, когда аппаратура подвержена большим колебаниям температуры и влажности в течение наблюдательной ночи или сета наблюдений;

- построение универсальных контроллеров, способных работать с фотоприемниками различных типов, форматов и конфигураций.

При создании ПЗС-систем мы руководствуемся требованиями самого чувствительного к качеству фотометрии метода наблюдений — высокоточной дифференциальной звездной ПЗС-фотометрии, направленной на обнаружение слабых осцилляций блеска исследуемых звезд в сравнении с хорошо изученными опорными звездами. Эти требования сводятся к тому, что фотометрическая воспроизводимость по ансамблю полученных изображений при исследовании слабых объектов в течение от нескольких часов, или даже ночей, не должна быть хуже 0,002 %, что примерно соответствует значению 0,05 % для единичной экспозиции. Для других методов наблюдений такой точности не требуется. Примером оценки пределов дифференциальной ПЗС-фотометрии является работа [4], в которой в лабораторных условиях в течение 10 дней регистрировались и усреднялись сотни изображений от имитационной маски звездного поля. Авторы пришли к выводу, что в этих условиях предел воспроизводимости составляет 0,001 %. В другой уникальной, ставшей классической, работе [5] проведены параллельные наблюдения одной и той же области М67 на шести телескопах 4-метрового класса в течение семи ночей. Наблюдения сопровождалась тщательной калибровкой нелинейности всех ПЗС-систем, получением большого количества калибровочных изображений фона неба, среднего значения электрического нуля (bias) и последующей постобработки. Суммарное время параллельных наблюдений составило 154 часа. Обобщение результатов показало, что практически достижимая воспроизводимость даже в таком сложном эксперименте составляет 0,002 %.

В САО РАН были разработаны несколько поколений универсальных ПЗС-контроллеров, на их основе изготовлено свыше 40 криостатируемых фотоприемных систем как для телескопа БТА, так и для других российских и зарубежных телескопов. Пример такой системы показан на рис. 1.



Рис. 1. Криостатируемая ПЗС-система (справа — азотный криостат с ПЗС-приемником CCD42-90 форматом 2К×4К, слева — блок питания (снизу) и ПЗС-контроллер).

Основным типом фотоприемников, применяемых в настоящее время в наблюдательной астрономии в целом и в САО РАН в частности, стали широкоформатные ПЗС-матрицы научного класса производства фирмы E2V Technologies с форматами  $2K \times 2K$  (CCD42-40),  $2K \times 4K$  (CCD42-90, CCD44-82, CCD261-84),  $4K \times 4K$  (CCD203, CCD230-84, CCD231-84). Преимущественно это приборы с за светкой с обратной стороны как с утоньшенной подложкой, так и с толстой подложкой на основе обедненного кремния. Квантовая эффективность таких матриц в максимуме чувствительности превышает 95 %.

В САО РАН имеется также существенный опыт создания камер с мозаичным фотоприемником, в частности, с фотодетектором из восьми матриц  $2K \times 4K$  с общим форматом  $8K \times 8K$ . В настоящее время заканчивается изготовление мозаичной камеры на основе 16 ПЗС-матриц типа CCD44-82 для 1,6 м телескопа АЗТ 33ВМ ИСЗФ СО РАН.

Помимо классических ПЗС-систем были разработаны камеры на основе ПЗС с умножением заряда (EMCCD), гибридных быстродействующих *pn*CCD, а также контроллер для ИК-детектора HAWAII I.

### Развитие методов обработки видеосигнала в реальном времени

Для достижения предельных параметров фотометрической точности и чувствительности нами был детально изучен процесс формирования сигнала в фотодетекторе и предложены методы стабилизации передаточной характеристики выходного каскада и цифровой обработки видеосигнала в видеоканале.

Известно, что в выходных узлах малошумящих ПЗС-матриц используется МОП-транзистор с широким и коротким каналом для преобразования перепадов напряжения на емкости плавающей диффузионной области (ПДО), которая детектирует заряд. Такой транзистор, включенный по типовой схеме истокового повторителя, обеспечивает максимальную крутизну преобразования накопленного заряда в перепады напряжения на его истоке, которая пропорциональна отношению  $W/L$ , где  $W$  — ширина, а  $L$  — длина канала. Величина емкости ПДО очень мала и составляет 8—12 фФ, но увеличение ширины канала  $W$  приводит к росту емкостей  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$  и  $C_{gb}$ , т.е. между затвором и истоком, стоком, подложкой, что несколько снижает зарядовую чувствительность. В то же время укорочение длины  $L$  приводит к нарастанию проводимости сток—исток  $G_{ds}$ , что ухудшает чувствительность, линейность и стабильность передачи

сигнала [6]. Таким образом, выходной МОП-транзистор очень сильно влияет на качество приема изображений в целом.

Мы построили детальные эквивалентные схемы и математические модели выходных узлов ПЗС-матриц, на основе которых произвели экспериментальные исследования свойств трех способов включения МОП-транзистора, а именно: истокового повторителя с резистивной нагрузкой, схемы с нагрузкой в виде источника тока, а также схемы с источником тока и динамической стабилизацией напряжения сток—исток [7]. Исследования, например, транзистора с  $W = 75$  мкм и  $L = 4$  мкм, показали, что в третьем варианте приведенная ко входу детектирующая емкость уменьшается на 30 %, крутизна повышается на 35 %, нелинейность уменьшается в 6 раз и влияние нестабильности задающих режим транзистора токов и напряжений снижается от 4 до 10 раз. Результаты подтверждены с помощью SPICE-моделирования с использованием SPICE-моделей разных МОП-транзисторов с большим  $W/L$ , представленных на микроэлектронных фабриках, например, таких как MOSIS (США).

Другое направление исследований связано с построением стабильного и линейного канала обработки видеосигнала. Видеоканал, кроме задач усиления и аналого-цифрового преобразования, выполняет функцию противозумовой фильтрации. Традиционно в ПЗС-контроллерах эта задача выполнялась путем двойной коррелированной выборки (ДКВ) с аналоговой обработкой сигнала. Такой метод не является оптимальным согласованным фильтром для спектра шумов выходного транзистора ПЗС, в котором присутствует смесь белого шума и шума типа  $1/f$ . Кроме того, температурная и временная нестабильности компонентов аналоговых схем, а также таких источников искажений, как инжекция заряда из многочисленных аналоговых ключей, абсорбции заряда на измерительных конденсаторах и т.д., добавляют существенную неточность в видеоканал, увеличивающуюся с возрастанием частоты считывания. В цифровом видеоканале количество аналоговых компонентов сведено к минимуму, что существенно снижает нестабильность и нелинейность его передаточной характеристики.

В 2000 г. нами был впервые предложен и применен метод многократной цифровой выборки видеосигнала в одном пикселе с последующей обработкой согласованным цифровым фильтром [1]. Коэффициенты фильтра рассчитываются по специальной методике [8] на основе измерения спектра шумов и формы реального видеосигнала. Для этого форма сигнала преобразуется в спектральную область, затем рассчитывается спектр согласованного фильтра путем деления спектра сигнала

на спектр шумов. Далее из спектра фильтра путем обратного ДПФ находят форму фильтра и коэффициенты цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой. Этот метод согласованной цифровой фильтрации позволил получить практически предельный шум считывания, а также на порядок поднять типичную частоту считывания (с 20 до 200 Кпиксель/с) с сохранением стабильности видеоканала. Позднее другие исследователи [9] также применили метод цифровой фильтрации видеосигнала, но в отличие от нашего подхода с расчетными коэффициентами оптимального фильтра, использовали псевдо-оптимальную форму фильтра, полученную эмпирическим путем, то есть посредством перебора коэффициентов фильтра до достижения минимума шума.

Для многократной выборки видеосигнала в течение времени обработки пикселя мы использовали высокоскоростные 14-битные АЦП Analog Devices с частотой выборки от 20 до 80 МГц. В то же время рабочая частота считывания пикселей намного ниже и находится в диапазоне от 50 КГц до 4 МГц, следовательно, имеет место существенная передискретизация сигнала. Однако тот факт, что выходной сигнал ПЗС всегда имеет низкочастотную шумовую компоненту, позволил в результате усреднения многих отсчетов получить на выходе устройства цифровой обработки необходимый 16-битный динамический диапазон и минимизировать присущую скоростным АЦП дифференциальную нелинейность.

Применение в видеоканале процессоров цифровой обработки сигнала (ЦОС) с плавающей точкой позволило кроме задач фильтрации попутно осуществлять цифровую коррекцию передаточной функции видеоканала, в т.ч. коррекцию встроенного нуля и коррекцию остаточной нелинейности в каждом пикселе в реальном времени считывания заряда.

Коррекция встроенного нуля производилась путем измерения усредненного встроенного заряда в пересканированных пикселях строки (в которых отсутствует полезный сигнал) и вычитания этой величины из сигнала рабочих пикселей в данной строке. Количество считываемых пересканированных пикселей может варьироваться для достижения требуемой точности измерения встроенного заряда.

Коррекция нелинейности сквозной передаточной характеристики «свет-цифровые отсчеты» производилась путем умножения отсчета в пикселе на корректирующий многочлен высокого порядка (5...7) в реальном времени считывания. Для измерения нелинейности и расчета коэффициентов многочлена использовался лабораторный оптический стенд плоского поля с источником высокостабильной импульсной подсветки.

Исследования и разработки, проведенные в САО РАН с целью повышения чувствительности, стабильности и линейности видеоканала, позволили добиться предельных на практике результатов, в том числе:

- для ПЗС CCD42-40 достигнут среднеквадратичный шум считывания 1,7 электрон при скорости считывания 18 Кпиксель/с;
- долговременная среднеквадратичная нестабильность встроенного нуля видеоканала 0,6 электрон за 2 года наблюдений на телескопе;
- нестабильность наклона сквозной передаточной характеристики (коэффициента преобразования «свет-цифровые отсчеты») менее 0,03 % при перепадах температуры окружающей среды 15 °С;
- нелинейность передаточной характеристики не превышает 0,03 % с нестабильностью  $\pm 0,01$  % при перепадах температуры 15 °С.

Достигнутые параметры фотометрической точности являются наиболее высоким результатом в ПЗС-астрономии и полностью удовлетворяют самым жестким требованиям различных методов астрономических наблюдений.

### Разработка универсальных ПЗС-контроллеров

Начиная с 2000 г., нами было разработано и внедрено пять поколений ПЗС-контроллеров DINACON с цифровой обработкой видеосигнала. Первые версии контроллеров разрабатывались на основе процессоров ЦОС компании Analog Devices (США) с соответствующей разработкой встроенного ПО в виде ядер жесткого реального времени. Но в дальнейшем оказалось, что бурный прогресс в области программируемых логических матриц (ПЛМ) позволяет более эффективно и проще реализовать функции обработки сигнала и управления ПЗС-системой в ПЛМ. В связи с этим мы выполняли работы по модернизации и разработке новых алгоритмов цифровой обработки сигнала с целью повышения их точности и переноса на ПЛМ.

Эволюция поколений контроллеров САО РАН происходила в направлении увеличения скорости считывания и суммарного количества видеоканалов и каналов управления детектором. Контроллер первого поколения DINACON-1 работал с одной матрицей с двумя выходами на скорости до 100 Кпиксель/с/канал. Контроллер пятого поколения DINACON-5, разработка которого завершается в этом году, имеет наращиваемую модульную архитектуру (см. рис. 2) и позволяет обслуживать мозаичные детекторы с числом видеовыходов до 256, максимальной скоростью считывания 40 Мпиксель/с/канал и суммарной производительностью до 600 Мпиксель/с. Модули могут находиться в корзинах стандарта Eurocard 19 дюймов или размещаться непосредственно на камере.

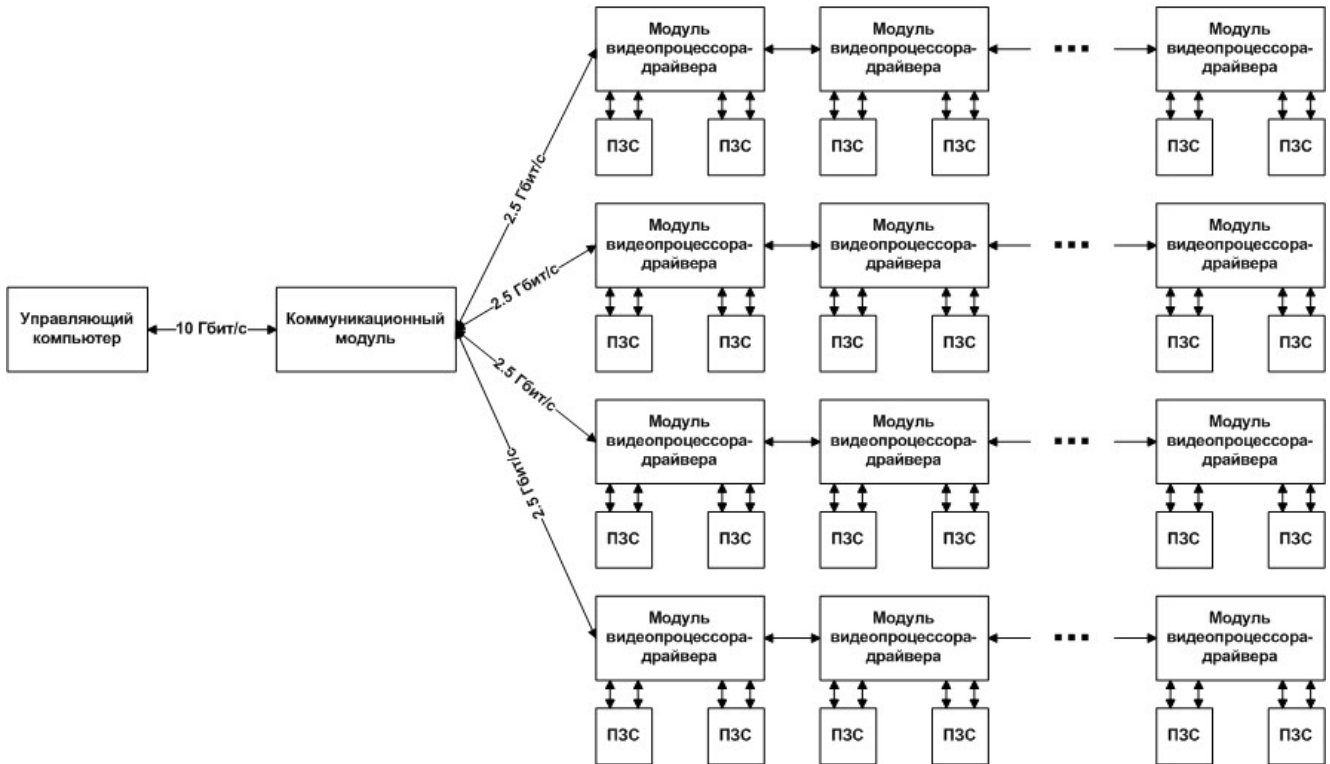


Рис. 2. Структура ПЗС-контроллера DINACON-5.

Связь камеры с управляющим компьютером осуществляется по оптоволоконной линии посредством сетевого адаптера стандарта Ethernet производительностью 10 Гбит/с.

Вместе с ростом производительности постоянно расширяется универсальность контроллеров. Контроллер пятого поколения позволяет работать со всеми типами ПЗС, КМОП и ИК приемников в любых практически возможных конфигурациях.

### Программное обеспечение для контроллеров

Программное обеспечение для ПЗС-систем [10] выполняет функции управления режимами накопления и считывания, приема и анализа изображений, визуализации и сохранения последовательности кадров в дисковой памяти компьютера, настройки режимов камеры и их телеметрического контроля. ПО для анализа изображений включает получение усредненных плоских полей и темновых кадров для последующего исправления рабочих изображений, а также исследование характеристик отдельных кадров.

На рис. 3 представлена многослойная архитектура программного обеспечения.

Компоненты *User Interface* и *Command Line* реализуют клиентскую часть ПО и обеспечивают взаимодействие с наблюдателем, *CCD Server* реализует серверную часть. Компонент *Observation* обеспечивает процесс наблюдений, *Camera Control* управляет платой ввода-вывода и реализует про-

токол управления камерой. Компонент *Image Building* отвечает за управление потоком данных, формирование и запись изображений, *Real Time Display* осуществляет анализ и визуализацию данных.

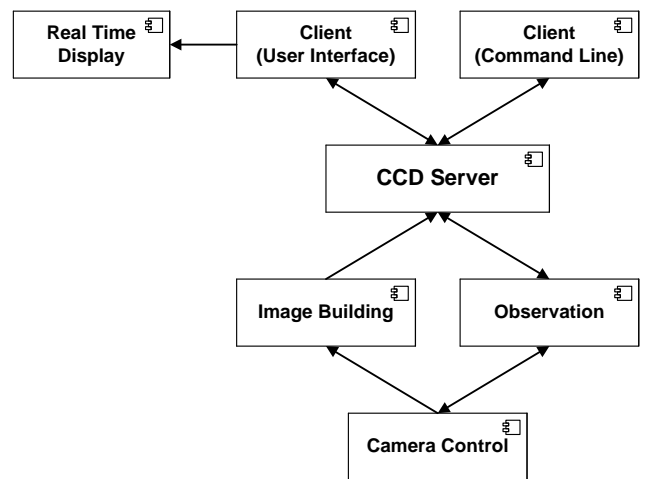


Рис. 3. Архитектура ПО для универсального ПЗС-контроллера.

Используемая архитектура полностью соответствует требованиям, предъявляемым к программам сбора астрономических данных: позволяет быстро адаптироваться к новым ПЗС-контроллерам (универсальность), обеспечивает эффективность и надежность в эксплуатации, обладает гибкостью и расширяемостью, повышает продуктивность дальнейших разработок (повторное использование) [11].

### Разработка криостатируемых камер

Значительное внимание уделяется конструированию термостабильных криостатов с системой охлаждения разных типов: с жидким азотом, замкнутого цикла на основе фреонов, термоэлектрическим. Разработана линейка азотных криостатов емкостью от одного до двух литров для детекторов различных размеров, позволяющих поддерживать рабочую температуру детектора на протяжении 18 часов. При этом была достигнута стабильность температуры детектора на уровне  $\pm 0,1$  °C при рабочей температуре от  $-120$  °C до  $-130$  °C. Это позволило минимизировать влияние температуры на спектральную чувствительность фотоприемника и коэффициент передачи его выходных каскадов.

### Заключение

Таким образом, в САО РАН накоплен опыт по созданию высокочувствительных и высокостабильных ПЗС-систем для фундаментальной и прикладной астрономии.

Системы построены исходя из жестких требований дифференциальной звездной фотометрии и основаны на цифровой обработке видеосигнала попиксельно в реальном времени считывания заряда, а именно, цифровой согласованной фильтрации полезного сигнала из его смеси с шумом. Это снижает выходной шум на 40—50 %. Помимо этого используется стабилизация передаточной характеристики «свет-цифровые отсчеты» и линеаризация передаточной характеристики в реальном времени.

Достигнуты следующие важные результаты: получен среднеквадратичный шум считывания 1,7 электрон при скорости считывания 18 Кпиксель/с; долговременная нестабильность встроенного нуля

видеоканала составляет 0,6 электрон; нестабильность коэффициента преобразования «свет-цифровые отсчеты» не превышает 0,03 % и нелинейность передаточной характеристики не превышает 0,03 % при перепадах окружающей температуры 15 °C.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Markelov S. V., Murzin V. A., Borisenko A. N., Ivashchenko N. G., Afanasieva I. V., and Ardilanov V. I. // *Astron. Astrophys. Transactions*. 2000. Vol. 19. P. 579. doi:10.1080/10556790008238604
2. Meyer M., Baade D., Balestra A., Cumani C., Deiries S., Geimer C., Dorn R., Eschbaumer S., Finger G., Mehrgan L., Moorwood A., Reiss R., Reyes J., and Stegmaier J. *Scientific Detectors for Astronomy 2005*. — Netherlands: Springer. 2006. doi:10.1007/1-4020-4330-9\_65
3. Hunten M., Buchholz N., George R., Moore P., and Sawyer D. // *Proc. SPIE*. 2010. Vol. 7742. P. 77421X. doi:10.1117/12.857717
4. Robinson L. B., Wei M. Z., Borucki W. J., Dunham E. W., Ford C. H., and Granados A. F. // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 1995. Vol. 107. No. 717. P. 1094. doi:10.1086/133665
5. Gilliland R. L., Brown T. M., Kjeldsen H., McCarthy J. K., Peri M. L., Belmonte J. A., Vidal I., Cram L. E., Palmer J., Frandsen S., Parthasarathy M., Petro L., Schneider H., Stetson P. B., and Weiss W. W. // *The Astronomical Journal*. 1993. Vol. 106. No. 6. P. 2441. doi:10.1086/116814
6. Кобболод П. Теория и применение полевых транзисторов. — Л.: Энергия, 1975.
7. Markelov S. V., Murzin V. A., Ivashchenko N. G., Afanasieva I. V. and Borisenko A. N. // *Journal of the Korean Astronomical Society*. 1996. Vol. 29. P. S387.
8. Мурзин В. А., Маркелов С. В., Ардиланов В. И., Афанасьева И. В., Борисенко А. Н., Иващенко Н. Г. «Способ обработки видеосигнала в ПЗС-контроллере для матричных приемников изображения». Патент РФ № 2480717. 07.11.2011.
9. Gach J. L., Darson D., Guillaume C., Goillandeau C., Boissin O., Boulesteix J., and Cavadore C. *Scientific Detectors for Astronomy*. — Netherlands: Springer, 2004. doi:10.1007/1-4020-2527-0\_83
10. Afanasieva I. V. // *Astrophysical Bulletin*. 2015. Vol. 70. No. 2. P. 232. doi:10.1134/S1990341315020108
11. Афанасьева И. В., Новиков Ф. А. // *Информационно-управляющие системы*. 2016. № 3. С. 51. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.51

## Astronomical CCD systems for the 6-meter telescope BTA (a review)

V. A. Murzin<sup>1</sup>, S. V. Markelov<sup>1</sup>, V. I. Ardilanov<sup>1</sup>, I. V. Afanasieva<sup>1,2</sup>, A. N. Borisenko<sup>1</sup>, N. G. Ivashchenko<sup>1</sup>, M. A. Pritychenko<sup>1</sup>, G. Sh. Mitiani<sup>1</sup>, A. A. Borisenko<sup>1</sup>, and V. F. Vdovin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences  
Nizhnij Arkhyz, 369167, Russia  
E-mail: markel@sao.ru

<sup>2</sup> ITMO University  
49 Kronverksky av., St. Petersburg, 197101, Russia

<sup>3</sup> Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences  
46 Ul'yanov str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Received September 10, 2016

***The Special Astrophysical Observatory of the RAS has accumulated extensive experience in the development of the scientific CCD image acquisition systems including CCD controllers and cryostatic cameras with large low-noise matrix photodetectors. The paper discusses the principles of the CCD system for photometry and spectroscopy at the BTA 6-m optical telescope. CCD systems provide close to the ultimate sensitivity and photometric accuracy of long exposure observation methods of faint astronomical objects. This is possible due a digital optimal filtering of the video signal of the CCD, stabilization and linearization of the “light-to-digital counts” transfer characteristic in real-time of frame readout. Developed CCD controllers are versatile and able to control a single CCD, CMOS or infrared detector, as well as mosaics of such devices in any practically possible configuration.***

PACS: 42.79. Pw; 07.50. Qx; 07.05. Hd

**Keywords:** image acquisition system, CCD system, CCD controller, signal, noise, signal processing, optimal filtering, data acquisition.

#### REFERENCES

1. S. V. Markelov, V. A. Murzin, A. N. Borisenko, N. G. Ivashchenko, I. V. Afanasieva, and V. I. Ardilanov, *Astron. Astroph. Trans.* **19**, 579 (2000).
2. M. Meyer, D. Baade, A. Balestra, C. Cumani, S. Deiries, C. Geimer, R. Dorn, S. Eschbaumer, G. Finger, L. Mehrgan, A. Moorwood, R. Reiss, J. Reyes, and J. Stegmaier, in *Scientific Detectors for Astronomy 2005*. Ed. by J. E. Beletic et al. (Springer, Netherlands, 2006). P. 571.
3. M. Hunten, N. Buchholz, R. George, P. Moore, and D. Sawyer, *Proc. SPIE* **7742**, 77421X (2010).
4. L. B. Robinson, M. Z. Wei, W. J. Borucki, E. W. Dunham, C. H. Ford, and A. F. Granados, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 1094 (1995).
5. R. L. Gilliland, T. M. Brown, H. Kjeldsen, J. K. McCarthy, M. L. Peri, J. A. Belmonte, I. Vidal, L. E. Cram, J. Palmer, S. Frandsen, M. Parthasarathy, L. Petro, H. Schneider, P. B. Stetson, and W. W. Weiss, *Astron. J.* **106**, 2441 (1993).
6. R. S. C. Cobbold, *Theory and Applications of Field-Effect Transistors* (New York, Wiley-Interscience, 1970; Leningrad, Energiia, 1975).
7. S. V. Markelov, V. A. Murzin, N. G. Ivashchenko, I. V. Afanasieva, and A. N. Borisenko, *Journal of the Korean Astronomical Society* **29**, S387 (1996).
8. V. A. Murzin, S. V. Markelov, V. I. Ardilanov, I. V. Afanas'eva, A. N. Borisenko, and N. G. Ivashchenko, RF Patent, No. 2480717, November 7, 2011.
9. J. L. Gach, D. Darson, C. Guillaume, C. Goillandeau, O. Boissin, J. Boulesteix, and C. Cavadore, in *Scientific Detectors for Astronomy* (Springer, Netherlands, 2004). P. 603.
10. I. V. Afanasieva, *Astrophysical Bulletin* **70**, 232 (2015).
11. I. V. Afanasieva, and F. A. Novikov, *Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy (Information and Control Systems)* **3**, 51 (2016) [in Russian].