

УДК 520.87:520.2

**КОМПЛЕКС РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИИ
С МАТРИЦЕЙ ПЭС 6-М ТЕЛЕСКОПА**

**А. Н. Борисенко, В. В. Витковский, О.П. Желенкова,
А. И. Копылов, С. В. Маркелов, В. П. Рядченко,
В. С. Шергин**

Описана структура комплекса, принципы его работы и программное обеспечение. Приводятся результаты лабораторных исследований аппаратуры с матрицей типа ФПЭС-1М и первый опыт использования комплекса в наблюдениях на 6-м телескопе.

Hardware and software of the complex is described. The results of the bench tests with the CCD chip ФПЭС-1М are presented. The first experiences of the complex use for observations with the 6-m telescope are reported.

I. ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование приборов с зарядовой связью (ПЭС) в астрономических наблюдениях обусловлено рядом преимуществ этих приемников по сравнению с фотографической эмульсией и телевизионными счетчиками фотонов. Высокая квантовая эффективность в широком спектральном диапазоне, геометрическая стабильность и высокое разрешение, большой динамический диапазон и линейность реакции, а также низкие собственные шумы позволяют достичь высокой фотометрической точности, исследовать предельно слабые объекты и эффективно применять цифровые методы обработки изображений.

Реализация преимуществ ПЭС зависит от выполнения ряда специфических требований. Высокая фотометрическая точность обеспечивается отбором матриц с минимальным количеством "врожденных" дефектов и стабильностью электронной аппаратуры считывания заряда, что позволяет аккуратно исправлять неоднородность чувствительности по полю. Разрешение и линейность — важнейшие характеристики ПЭС, в особенности для спектральных измерений, — во многом зависят от эффективности переноса заряда при низких уровнях освещенности. Уровнем чувствительности матрицы к частицам космических лучей, дополнительному источнику внешних шумов, ограничивается информационная емкость при длительных экспозициях. Поэлементную неоднородность спектральной чувствительности и интерференционные эффекты также необходимо исправлять, если требуется на элементе матрицы достичь фотометрической точности лучше 1 %.

Класс фоточувствительных приборов с зарядовой связью отечественного

производства, насчитывающий в настоящее время более десяти наименований и включающий приборы с форматом от 288 x 232 до 576 x 512 элементов с различной организацией, постоянно пополняется новыми, более совершенными образцами. Появление новых приборов требует быстрого их освоения и внедрения в практику наблюдений, а это иногда влечет за собой переработку или повторную разработку аппаратуры ввиду существенных отличий отдельных видов матриц.

В настоящей статье рассматривается разработанный в САО АН СССР комплекс аппаратуры цифровой регистрации и обработки изображений, предназначенный для работы с ПЭС различных типов. В 1987 году работа велась с матрицей ФПЭС-1М размером 576 x 512 элементов, охлаждаемой жидким азотом. В сентябре 1987 года во время наблюдений по программе "Оптическое отождествление радиоисточников глубоких обзоров РАТАН-600" были получены прямые снимки в первичном фокусе БТА с применением редуктора светосилы.

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА

За основу при создании комплекса были приняты принципы модульности и открытости архитектуры для обеспечения возможности изменения конфигурации и функциональных свойств аппаратуры в соответствии с проблемной ориентацией путем:

- применения мини- или микро-ЭВМ с единой системой команд;
- наращивания периферийного оборудования;
- подключения модулей управления различными исполнительными механизмами, применяемыми на телескопе;
- замены аналоговых или цифровых модулей в соответствии с метрологическими и информационными требованиями к техническим средствам. Архитектура базируется на средствах автоматизации в стандарте КАМАК.

На рис. 1 приведена структура комплекса при наблюдениях, проводимых на 6-м телескопе. Комплекс состоит из двух систем:

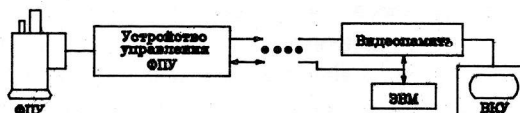


Рис. 1. Структура комплекса.

- системы формирования цифрового видеосигнала (ПЭС-система), включающей фотоприемное устройство, ведомую микро-ЭВМ, модули управления аналоговой обработки и аналого-цифрового преобразования видеосигнала, цифровой передачи данных;

- системы ввода, вывода и обработки изображений, включающей видеопамять, средства отображения изображений, средства межмашинной связи, управляющую мини-ЭВМ с набором внешних устройств.

ПЭС-система размещается в первичном фокусе телескопа, а система ввода и обработки изображений - в аппаратном помещении башни с обеспечением связи между ними по каналам последовательной связи длиной до 200 м.

В качестве управляющей ЭВМ на БТА используется ЭВМ СМ-4, оснащенная

дисковой и ленточной памятью. Для наблюдений на других телескопах возможно использование компактного комплекта аппаратуры с микро-ЭВМ типа "Электроника-60" (ДВК-3 и др.) при соответствующей адаптации программных средств.

ПЭС-система обеспечивает полностью программно-управляемый режим работы по накоплению и преобразованию изображения в цифровой код.

Микро-ЭВМ ("Электроника МС 1201"), в которую по каналу межмашинной связи от управляющей ЭВМ загружается программа управления системой, выполняет функции контроля и управления фотоприемным устройством (ФПУ) и внешними электромеханическими узлами (затвор, турель фильтров, устройство равномерной засветки матрицы) через интерфейс КАМАК (рис. 2).

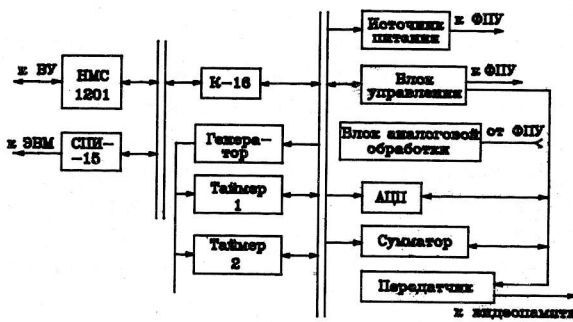


Рис. 2. Архитектура ПЭС-системы.

Работа ФПУ обеспечивается набором модулей, включающим контроллер ФПУ, модуль источников питания матрицы ПЭС, аналоговый процессор, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и сумматор.

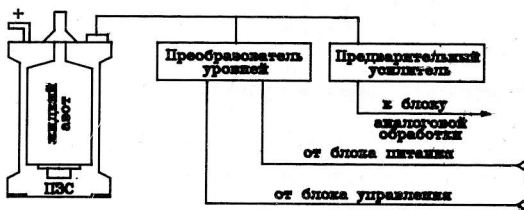


Рис. 3. Схема криостатируемого ФПУ.

Криостатируемое ФПУ выполнено на базе промышленного заливного криостата ГК-019 (рис. 3). Матрица ПЭС установлена в вакуумном объеме криостата и через хладопровод соединена с емкостью, содержащей жидкий азот. Входное кварцевое окно закреплено на съемном фланце и подогревается во избежание выпадения росы.

Габариты криостата (диаметр - 170 мм, высота - 350 мм) и короткий рабочий отрезок 7 мм) позволяют сочленять ФПУ с основными оптическими системами БТА. Одной заливки жидкого азота достаточно для непрерывной работы в течение 12-15 часов.

В состав ФПУ входят блок формирователей управляющих сигналов матрицы и предварительный усилитель видеосигнала. Формирователи построены по схеме, приведенной на рис. 4.

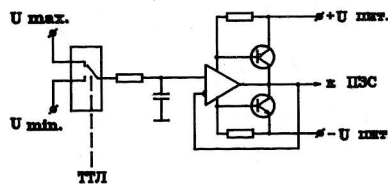


Рис. 4. Схема формирователей управляющих сигналов.

Такая схема обеспечивает высокую амплитудную точность и хорошо работает при регулировании питающих напряжений в широком диапазоне, что важно при оптимизации уровней управляющих сигналов. Грубая и плавная регулировка уровней осуществляется в модуле источников питания. Предварительный усилитель выполнен в нескольких вариантах, определяемых типом детектирующего узла матрицы ПЗС (транзистор с плавающей диффузионной областью или транзистор с плавающим затвором). Следует отметить, что наилучшие стабильность и линейность преобразования сигнального заряда в напряжение удастся получить в усилителе с плавающим затвором на основе одиночного транзистора с выведенными отдельно стоком и истоком, а также истоком транзистора сброса. В этом случае можно обеспечить высокую стабильность рабочей точки усилителя посредством стабилизации как тока, протекающего через транзистор, так и напряжения между стоком и истоком, а также введения обратной связи с выхода предусилителя через транзистор сброса на плавающий затвор (рис. 5). При тщательном подборе рабочей точки могут быть существенно улучшены и шумовые характеристики.

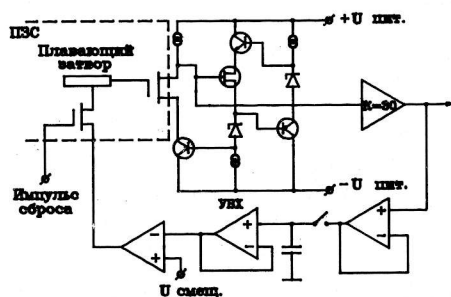


Рис. 5. Схема включения обратной связи в предусилителе.

Контроллер матрицы вырабатывает последовательности управляющих сигналов в режимах накопления заряда от изображения в фоточувствительной области ПЗС, его считывания и обработки. Программным путем в контроллере задаются:

- время экспозиции;
- накопление/считывание заряда;
- пуск или останов горизонтального регистра в режиме накопления;
- фрагментный режим работы.

Схемотехнически реализуются:

- предустановка формата матрицы (число элементов в выходном регистре и число строк в секции накопления);
- программирование в ППЗУ временной диаграммы управляющих сигналов для конкретного типа ПЗС;
- установка необходимой тактовой частоты переноса заряда.

Во фрагментном режиме работы в контроллере могут быть запрограммированы координаты прямоугольных фрагментов числом до четырех в пределах формата ПЗС-матрицы. В этом случае цифровая обработка сигнала производится только в выделенных областях изображения. Такой режим предназначен, в первую очередь, для регистрации спектров объектов и позволяет компоновать аппаратуру минимального состава с исключением видеопамати, поскольку объем

цифровой информации, получаемой от спектра, не превышает объема 2–3-х банков ОЗУ микро-ЭВМ.

Преобразование видеосигнала, поступающего из преусилителя, осуществляется по модифицированной схеме двойной коррелированной выборки (рис. 6).

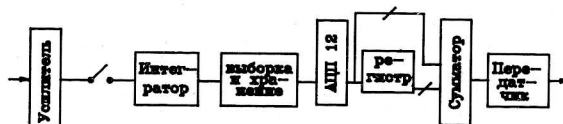


Рис.6. Схема обработки видеосигнала.

Обработка начинается со сброса сигнала предыдущего элемента матрицы из детектирующего узла. После усиления и интегрирования полученный "опорный" сигнал преобразуется в цифровой код и запоминается в регистре сумматора, а интегратор сбрасывается. Затем в детектирующий узел вводится сигнальный заряд, накопленный за время экспозиции. Процедура интегрирования и преобразования повторяется, и на выходе сумматора устанавливается код разности произведенных отсчетов. Преимущество такой схемы заключается в компенсации дрейфа всего измерительного тракта, включая АЦП. В системе применен АЦП типа Ф4223 с временем преобразования 5 мкс и количеством разрядов 12.

Цифровой видеосигнал со скоростью 1.25 Мбит/с передается по каналу последовательной передачи данных в систему ввода, вывода и обработки и записывается в видеопамять с организацией 512 x 512 x 16 бит. Видеопамять позволяет визуализировать содержимое в стандартном чересстрочном разложении раstra на черно-белом видеоконтрольном устройстве. Обмен данными с управляющей ЭВМ при выполнении процедур обработки изображений производится через контроллер видеопамати.

3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА

Программное обеспечение (ПО) представляет собой открытую систему, обеспечивающую управление комплексом, калибровку ПЭС-системы, первичную редукцию и измерение параметров изображения.

Управляющие программы выполняют:

- начальную загрузку ведомой микро-ЭВМ;
- управление и контроль состояния ПЭС-системы;
- перемещение цифровых изображений между видеопамтью, магнитными дисками и лентами с записью справочной информации.

В процессе эксплуатации аппаратуры на телескопе возникает необходимость проверки ее метрологических характеристик. Для этой цели служат программы фотометрической калибровки, которые позволяют оценивать величину кванта преобразования, линейность и шум считывания ПЭС-системы. Первичная редукция изображений обеспечивается арифметическими поэлементными операциями (суммирование изображений, вычитание темного кадра, деление на "плоское поле") с дополнительными возможностями по укрупнению фрагментов до полного экрана, линейного преобразования диапазона яркости, цифровой фильтрации с окном 3x3 элемента. Программы измерения параметров изображения позволяют строить

распределение яркости в разрезе, вычислять статистические характеристики распределения яркости во фрагментах изображения и строить гистограммы распределения интенсивности фотоотсчетов в заданных границах. ПО написано на языках ФОРТРАН IV и МАКРО-11 и рассчитано на работу под управлением операционной системы RT-11 или NTS. Требования открытости ПО реализуются по следующему принципу. Каждый программный модуль – это функционально законченная рабочая программа, на которую наложено условие: первый и последний исполняемые операторы модуля являются вызовами специальных подпрограмм. Эти подпрограммы организуют межпрограммный интерфейс, обеспечивающий возможности вызова других модулей, передачу параметров вызова, использование общего поля памяти (контекст), передаваемого между программами через файл на диске. При этом сохраняется возможность стандартного вызова программ по команде RUN из командных файлов и IND-программ.

Для обеспечения эффективной работы оператора по управлению комплексом, разработан модуль экранного пользовательского интерфейса, назначение которого – экранное редактирование и запуск на исполнение командных строк. Независимость экранной работы от типа терминала обеспечивается считыванием с диска файла с описанием команд управления экраном и кодов функциональных клавиш.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АППАРАТУРЫ

Из числа матриц крупного формата интерес представляет прибор ФПЭС-1М (Березин, 1982), имеющий 512×576 элементов с размерами 24×18 мкм. Питание матрицы построено по трехфазной схеме с кадровым переносом. Объединение секций накопления и считывания в единую fotocувствительную область обеспечивает размеры фотоприемной поверхности 9.2×13.8 мм. Достоинствами ФПЭС-1М является построение выходного узла с раздельно выведенными электродами транзисторов с плавающим затвором и транзистора сброса, а также наличие двух (верхнего и нижнего) выходных регистров, что позволяет выбирать наилучший из них по качеству переноса и детектирования заряда. Недостатком прибора является примененный способ переноса заряда в поверхностном канале, который ограничивает пространственное разрешение и шумы, однако в отобранных образцах эти параметры могут быть удовлетворительными для обеспечения, например, фотометрических наблюдений.

Исследования аппаратуры с матрицей ФПЭС-1М проводились в лаборатории и на телескопе. Спектральные характеристики получены с применением двойного монохроматора ДМР-4 ($\Delta\lambda = 100 - 300 \text{ \AA}$) и калиброванного фотодиода. Спектральная зависимость квантовой чувствительности одной из матриц ПЭС приведена на рис. 7.

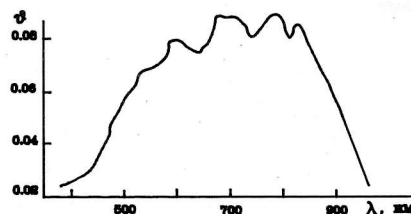


Рис. 7. Спектральная характеристика.

Для оценки шума применена модифицированная нами методика, описанная Гудеусом и Хеги (1985). На входе ФПУ создается равномерная засветка и считываются несколько кадров, полученных с одинаковым временем накопления. Из каждого кадра сохраняется фрагмент. Вычисляется среднее значение во фрагменте и дисперсия поэлементной разности пары фрагментов. Такая процедура повторяется для различных времен накопления с тем, чтобы перекрыть динамический диапазон системы.

В нашем случае сохранилось четыре фрагмента с размерами 32×32 элемента. Зависимость дисперсии от среднего значения, полученная в одном из измерений, представлена на рис. 8. Она позволяет определить количество носителей заряда, соответствующих одному кванту преобразования АЦП, и среднеквадратичное значение шума всего тракта преобразования от матрицы до АЦП.

Величина шума считывания, достигнутая в системе, составляет 38 электронов/элемент при кванте преобразования 16.5 электронов/бит (рис. 8) и в сравнении с ранее полученными результатами (Борисенко, 1987) свидетельствует о существенном улучшении аппаратуры. Учитывая, что максимальный линейно передаваемый сигнал в ФПЭС-1М соответствует уровню $4 \cdot 10^5$ носителей заряда, динамический диапазон системы ограничивается разрядностью АЦП и составляет 1500.

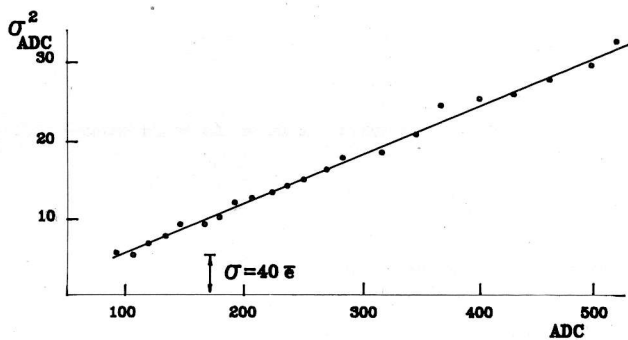


Рис. 8. Зависимость дисперсии фотоотчетов от среднего значения

Линейность преобразования свет-цифровой код проверялась по передаче "плоского поля" с изменяемым количеством освещения. Существенных отклонений от линейности во всем динамическом диапазоне не происходит (рис. 9).

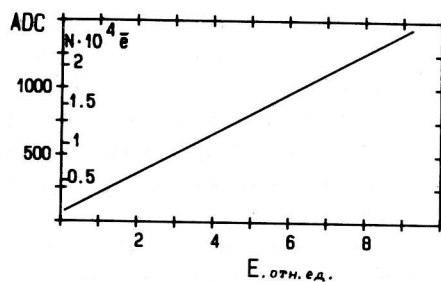


Рис. 9. Линейность ПЭС-системы.

Оценка стабильности фотометрической однородности по полю проводилась по равномерным засветкам, получаемым на телескопе в сумеречное и предрассветное время в фильтрах V и R. Критерием выбрана точность, с которой может быть исправлена неоднородность чувствительности. Величина средней относительной ошибки взаимного исправления "плоских полей", зарегистрированных в разное время в течение полугода составляет 0.5 % - 1.5 % в зависимости от пространственных частот.

Другой важной характеристикой аппаратуры является долговременная стабильность величины "кванта преобразования". Из рис. 10, на котором приведено семейство калибровочных графиков, снятых периодически на протяжении двух месяцев, видно хорошее совпадение по углу наклона.

Аппаратура, как и подобные системы, применяемые на зарубежных телескопах, чувствительна к космическим частицам, регистрируя в среднем около 20 событий в минуту на кадр.

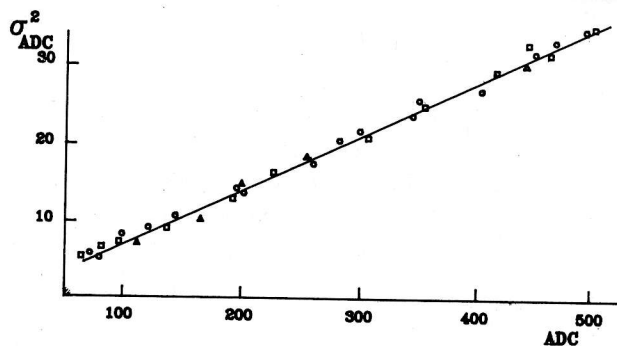


Рис. 10. Сводные данные по калибровке ПЗС-системы.

5. ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТУРЫ В НАБЛЮДЕНИЯХ НА БТА

Описанная аппаратура была впервые использована в наблюдательной программе "Оптическое отождествление радиоисточников глубоких обзоров РАТАН-600", для получения прямых снимков областей источников сантиметрового радиоизлучения. Наблюдения проводились в первичном фокусе БТА в течение двух сетов 20-24 сентября и 25-28 ноября 1987 года. При наблюдениях использовался фокальный редуктор с коэффициентом редукции 1/3, при этом размер элемента составил 0.41" x 0.54". Наблюдаемые области расположены в полосе 21^h - 4^h по прямому восхождению и +4° 53' ± 10' по склонению. Всего было получено 78 пригодных для дальнейшей обработки прямых изображений 36 областей. Для каждой области выполнялось по две экспозиции с R-фильтром. За 900 с при изображениях FWHM = 2.5" звездная величина 23-23.5 регистрировалась с отношением S/N=3. Кроме того, каждую ночь делались экспозиции темного кадра и яркого сумеречного фона неба в качестве "плоского поля", обычно в начале и в конце наблюдений. Астрометрическая привязка проводилась по SAO-звездам, близким к изучаемым площадкам. Для фотометрической привязки выполнялись экспозиции фотометрических стандартов.

Изображения регистрировались на магнитной ленте в FITS-формате и подвергались первичной обработке, которая заключалась в коррекции за "плоское поле", сложении парных экспозиций с целью подавления эффектов космических частиц и сглаживания. Для отождествленных объектов определялись звездные величины и строились фотометрические разрезы.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшее развитие комплекса, улучшение его физических и эксплуатационных характеристик проводится по пути совершенствования программного обеспечения и методики наблюдений, замены отдельных электронных и оптических узлов (АЦП, фокальный редуктор и др.), применения матриц ПЗС с объемным каналом.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В. Л. Афанасьеву за постоянное внимание и помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

- Березин В. Ю., Зинчик Ю. С., Санин К. В., Тимофеев В. О., Хвилицкий А. Т.: 1982, Электронная промышленность, 7, С. 27-30.
- Борисенко А. Н., Маркелов С. В., Рядченко В. П., Чепурных Г.С.: 1987, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. 56, С. 42-43.
- Гудеус и Хегги (Gudehus D. H. and Hegyi D. J.): 1985, Astron. J., 90, No.1, P.130-138.

Поступила в редакцию
8 декабря 1989 г.