

Приложение Б.
Техническая документация
системы регистрации изображений.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

УДК 520; 523.3; 523.9; 524

№



УТВЕРЖДАЮ
Вр.и.о.директора САО РАН
член-корр. РАН Ю.Ю.Балега

«02» июня 2015 г.

Техническое документация
крупноформатной системы регистрации изображений
для УНУ БТА

Разработано в рамках
Соглашения № 14.619.21.0004 от 22 августа 2014 г.

Нижний Архыз

2015

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, заместитель
директора САО РАН, к.ф.-м.н



В.В.Власюк
(Общее руководство)

Исполнители темы:

Зав. лаб. перспективных разработок
САО РАН, к.т.н.



С.В.Маркелов

Ведущий инженер лаборатории
перспективных разработок САО РАН



В.А.Мурзин

Ведущий инженер лаборатории
перспективных разработок САО РАН



И.В.Афанасьева

Нормоконтролер,
старший экономист САО РАН



Т.Ф.Труфанова

СОДЕРЖАНИЕ

1	Краткий обзор проблемы	54
2	Архитектура контроллера	56
3	Основные характеристики контроллера	59

1. Краткий обзор проблемы.

Целью работы является разработка, изготовление и внедрение на 6-м телескопе РАН, а также в других заинтересованных обсерваториях РФ, ПЗС-систем, имеющих практически предельные чувствительность, фотометрическую стабильность и пропускную способность при регистрации слабых астрономических изображений. ПЗС-системы позволят повысить проникающую силу фотометрических, спектрофотометрических, спектрополяриметрических и других наблюдений до 2-х звездных величин, что откроет, в свою очередь, возможность постановки и решения новых научных задач, связанных с наблюдениями предельно слабых астрономических объектов.

Система будет включать в себя криостатируемую камеру со встроенным высокоэффективным матричным ПЗС-приемником изображения, универсальный ПЗС-контроллер нового поколения – мультипроцессорную систему управления режимами работы приемника и многоканальной цифровой обработки видеосигналов в реальном времени считывания зарядовых пакетов, высокоскоростной системы передачи и ввода цифровых изображений в удаленный промышленный компьютер сбора данных.

Необходимость в создании ПЗС-системы обусловлена не только требованием повышения эффективности наблюдений на 6-м телескопе, но и тем, что как в РФ, так и за рубежом промышленное производство систем с глубоким охлаждением приемника изображения практически свернуто. Если 15 лет назад выпускалось более 30 различных типов ПЗС-систем с охлаждением до криогенных температур такими ведущими компаниями как Princeton Instruments (США) и Photometrics (США), то в настоящее время только три типа. Коммерческие ПЗС-системы уже длительное время находят очень ограниченное применение в оптической астрономии по следующим причинам:

- фотометрические характеристики не удовлетворяют требованиям астрономических исследований;
- системы не позволяют применять мозаичные (составные) детекторы;
- ограничен выбор больших ПЗС-матриц высокого качества с очень низким шумом считывания и высокой квантовой эффективностью.

В то же время в мировой оптической астрономии создание ПЗС-систем представляет собой важнейшее научно-техническое направление, широко развиваемое в крупных обсерваториях уже более 20 лет. Фактически фундаментальная астрономия длительное время самостоятельно разрабатывает и производит нужные ей виды научного оборудования в наиболее крупных обсерваториях мира (см. Таблицу Б.1).

Таблица Б.1. Сравнительные характеристики существующих контроллеров.

	SDSU-III (ARC)	NGC (ESO)	MONSOON (NOAO)	DINACON IV (SAO)
Архитектура				
Топология	Линейная (общая шина)	Линейная (точка-точка)	Линейная	Древовидная
Тип процессорных элементов	DSP56003, 100 MHz	FPGA	FPGA	FPGA, 264 MHz
Межмодульные коммуникации	общая шина	Фибер, 2.5 Гбит/с	-	до 4 порт/модуль, 1.2 Гбит/с/порт
Внешние коммуникации	фибер 0.2 Гбит/с	фибер 2.5 Гбит/с	фибер 1 Гбит/с	фибер 1.2 Гбит/с
Обработка сигнала				
Число модулей ВП	6	6	2	8
Число видеоканалов/ модуль	2, 8 (CCD), 2, 8 (IR)	4 (CCD), 8 (IR)	4 (CCD), 8 (IR)	2 (CCD), 4 (IR),
Динамич. диапазон, бит	16	16, 18	16, 18	14 - 18
Макс. скорость, Мпиксел/с*порт	1.0	1, 3	0.5	16.5
Управление детектором				
Число модулей драйверов	4	6	2	4
Временное разрешение, нс	40	20	25	2
Амплитудное разрешение, бит	8	14	12	12
Кол-во управл. сигналов/модуль	24	18	16	24
Прочее				
Рабочая температура	-	-10 ...+30°C	-10 ...+35°C	-30 ...+30°C

Развитие ПЗС-технологий включает в себя:

- разработку на собственной или промышленной базе новых высококачественных ПЗС-матриц с большим числом пикселей;
- разработку криостатируемых камер самого различного назначения для монолитных и мозаичных матричных приемников;
- создание ПЗС-контроллеров различного назначения, обеспечивающих работу монолитных матриц, мозаичных детекторов, инфракрасных детекторов и ПЗС-детекторов прикладного назначения (в датчиках волнового фронта и системах гидирования).

В период 1998 – 2010 гг. в САО РАН были разработаны ПЗС-контроллеры четырех поколений типа DINACON, в которых впервые в мире реализована цифровая оптимальная фильтрация видеосигнала из его смеси с шумом, а также цифровая коррекция нестабильности и нелинейности сквозной передаточной характеристики свет-цифровой код в реальном времени считывания заряда накопленного в ПЗС-матрице. Это позволило получить наилучших из известных результатов по чувствительности и фотометрической стабильности ПЗС-систем. Были изготовлены и внедрены 4 системы на 6-м телескопе, а

также ряд систем для обсерваторий РФ и других стран. Пропускная способность в трех типах систем составляла 10 Мбит/с, 100 Мбит/с и 1 Гбит/с, что в настоящее время уже недостаточно для работы новых типов ПЗС-матриц.

Другая проблема связана с самими ПЗС-матрицами. Нами использовались лучшие в то время матрицы E2V Technologies: CCD42-40 2048 x 2048, «тонкие» с обратной засветкой и CCD42-90 2048 и 4096, «тонкие» и «толстые» с глубоким обеднением. Толщина подложки у толстых составляет 30..100 мкм, а у тонких - 16 мкм, что вызывает интерференционные полосы в полученных изображениях.

Высокая стабильность ПЗС-систем обеспечила возможность улучшения качества исправления интерференционных искажений (так называемых «фрингов»), возникающих при накоплении изображений преимущественно в диапазоне длин волн 700 – 1000 нм. Тем не менее остаточные фринги снижают чувствительность системы.

На матрице с толстой подложкой с исходной величиной фрингов 3-5% после применения программных методов исправления достигнут уровень в 0.5%, что значительно повышает точность регистрации спектров слабых объектов. На матрице с тонкой подложкой фринги составляют 15-20%, их исправление обычно возможно до 3-4%, но с применением сложных методик спектральных наблюдений возможно получение 1%.

Необходимость в разработке ПЗС-контроллера нового поколения также вызвана следующими обстоятельствами:

- устаревание элементной базы, на которой построен контроллер предыдущего поколения Dinacon 4;
- разработка новой архитектуры в связи с требованием значительного увеличения количества видеоканалов для перспективных мозаичных детекторов;
- увеличение суммарной производительности контроллера;
- миниатюризация конструктива контроллера для работы с матричными детекторами большого формата;
- уменьшение тепловыделения и достижение эффективного теплоотвода от большого числа модулей.

2. Архитектура контроллера.

На основе тщательного анализа многочисленных факторов и требований к архитектуре модульного расширяемого универсального контроллера в CAO РАН ведется разработка ПЗС-контроллера нового поколения Dinacon 5. Универсальность контроллера

проявляется в способности управлять как одиночными, так и матричными твердотельными приемниками различных типов – такие как ПЗС, импактроны, pnCCD, инфракрасные мультиплексированные приборы. Нарастающая архитектура контроллера позволяет обслуживать мозаичные детекторы с числом видеоканалов до 256 и с суммарной производительностью считывания до 1 Гпиксел/с, что делает возможным построение на его основе гигапиксельных мозаик с секундными временами считывания. Кроме высокой производительности и гибкости контроллер позволяет реализовать предельные характеристики точности и чувствительности, необходимые в наблюдательной астрономии. Это достигается методами цифровой фильтрации видеосигнала и цифровой коррекции передаточной характеристики видеоканала в реальном времени, а также стабилизацией режимов детектора.

Характеристики контроллера в первую очередь оптимизированы для работы с современными широкоформатными научными ПЗС-матрицами и мозаиками на их основе.

Таблица Б.2. Основные параметры научных ПЗС-матриц.

Тип детектора	Формат	Размер пиксела, мкм	Кол-во выходов	Скорость считывания/выход, Мпиксел/с	Стыкуемость
CCD42-40	2048x2052	13.5	2	3	-
CCD42-90	2048x4612	13.5	2	3	3-стор.
CCD44-82	2048x4096	15	2	1	3-стор.
CCD203	4096x4096	12	4	2.5	4-стор.
CCD230-42	2048x2064	15	4	5	-
CCD230-84	4096x4112	15	4	5	-
CCD231-84	4096x4112	15	4	3	4-стор.
CCD261-84	2048x4104	15	2	1	3-стор.
CCD231-C6	6144x6144	15	4	3	4-стор.
CCD290-99	9216x9232	10	16	1	4-стор.
KA4320E	2092x2092	24	4	5	-

Контроллер строится на основе модулей 3-х типов - интерфейсный модуль, формирователь/видеопроцессор и модуль питания.

Топология линий обмена данными в контроллере имеет форму звезды. От интерфейсного модуля по четырем направлениям подключаются модули видеопроцессоров/драйверов. По каждому направлению последовательно можно подключить до 16 таких модулей. Количество модулей питания зависит от количества имеющихся в системе модулей видеопроцессора/драйвера. Модули питания также подключаются цепочкой к коммуникационному модулю для передачи данных управления и телеметрии.

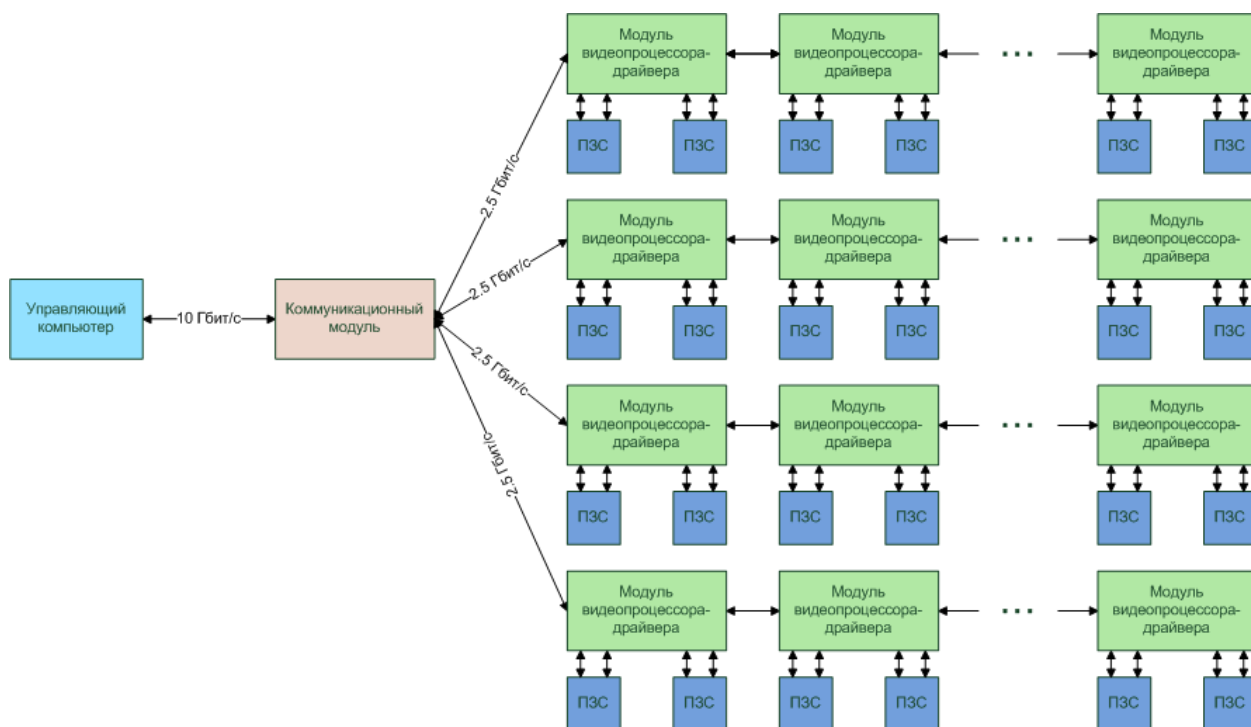


Рисунок Б.1. Архитектура контроллера DINACON 5

2.1 Интерфейсный модуль.

Для связи с управляющим компьютером используется оптоволоконный канал. Интерфейс реализован по стандарту GigE Vision. Суммарная скорость передачи данных интерфейсного модуля - 10 Гбит/с. Модуль принимает видеоданные и посылает их в управляющий компьютер. Для связи интерфейсного модуля с модулями формирователя/видеопроцессора (ФВ) служат 4 канала на основе плоских кабелей. На каждый такой канал может быть подключено до 16-ти модулей ФВ, соединенными последовательно в цепочку, с суммарной производительностью канала до 2.5 Гбит/с). Интерфейсный модуль также формирует задающие частоты и развертку и рассылает их по всем подключенным модулям ФВ.

2.2 Формирователь/видеопроцессор.

Формирует управляющие фазные сигналы и постоянные напряжения для видеовыходов. Включает 4 (ПЗС) либо 8 (ИК) видеоканалов с частотой обработки до 5 либо до 40 Мпиксел/с/канал для разных модификаций модуля.

2.3 Модуль питания.

Преобразует входное напряжение 48 В в набор из 7 стандартных напряжений питания. Обеспечивает работу одного интерфейсного модуля и до 8-ми модулей ФВ.

Модуль также обеспечивает термостабилизацию детектора, измерение вакуума в камере, питание подогрева окна и вентиляторов. Количество модулей питания в видеосистеме может наращиваться в зависимости от количества обслуживаемых видеопроцессоров. Для управления и телеметрии модули питания объединяются последовательным каналом связи с интерфейсным модулем.

3. Основные характеристики контроллера

Таблица Б.3. Основные характеристики контроллера

Возможности управления детектором	
Программируемая последовательность включения и выключения управляющих сигналов, напряжений и токов	+
Программная установка параметров управляющих сигналов, напряжений и токов	+
Защита детектора путем отключения упр. сигналов и напряжений	+
Количество модулей формирователей/видеопроцессоров	до 64
Кол-во фазных сигналов / модуль	25
Временное разрешение развертки, нс	2
Мин. длительность фронта, нс	4
Диапазон регулировки фазных сигналов, В	ампл. – до 15, сдвиг +1...-10
Амплитудное разрешение упр. сигналов, бит (мВ)	12 (5 мВ)
Кол-во пост. напряжений / модуль	18+2 (100 / 20 мА)
Диапазон регулировки напряжений, В	-7...+15, 0...+28
Амплитудное разрешение напряжений, бит (мВ)	12 (5 / 8 мВ),
Возможности обработки видеосигнала	
Цифровая фильтрация видеосигнала	+
Коррекция встроенного нуля видеоканала	+
Коррекция усиления видеоканала	+
Коррекция нелинейности видеоканала	+
Вход канала	дифференциальный
Тип ДКВ	цифровая
Кол-во видеоканалов/модуль	4 (ПЗС), 8 (ИК),
Динамический диапазон канала, бит	16
Макс. скорость, Мпиксел/с*канал	5 / 40
Стабильность встроенного нуля видеоканала	1 ADU rms
Стабильность усиления видеоканала	0.03%
Собственный шум видеоканала	<1e- @ 100 Кпиксел/с

Указанные параметры достигаются впервые в мире и обеспечивают существенный прогресс в технологиях астрономических наблюдений. Будут обеспечены фактически предельные фотометрическая стабильность, точность и чувствительность.

Минимальная конфигурация контроллера включает по одному модулю каждого типа и обеспечивает работу до 4-х видеовыходов с максимальной суммарной

производительностью до 312 Мбит/с. Обслуживается одним сетевым адаптером Ethernet 1 или 10 Гбит/с.

Максимальная конфигурация контроллера включает:

- Коммуникационный модуль – 1 шт.
- Модуль питания – 8 шт.
- Формирователь/Видеопроцессор - 64 шт.

Такая конфигурация обеспечивает работу до 256 видеовыходов с максимальной суммарной производительностью до 312 Мбит/с x 8 x 4 = 10 Гбит/с. Обслуживается одним сетевым адаптером Ethernet 10 Гбит/с.

Для обслуживания большего количества выходов контроллеры могут включаться параллельно. Например, конфигурация, которая обеспечивает работу до 1024 видеовыходов с максимальной суммарной производительностью до 312 Мбит/с x 32 x 4 = 40 Гб/с включает четыре контроллера и обслуживается двумя двухканальными сетевыми адаптерами Ethernet 10 Гбит/с.

3.1 Высокоскоростной интерфейс ‘камера – хост компьютер’.

На данный момент имеются два утвержденных международных стандарта высокоскоростных интерфейсов машинного зрения, позволяющих использовать оптоволоконную линию связи – GigE Vision и Camera Link HS (CLHS). Стандарт CLHS не является предпочтительным стандартом, прежде всего из-за наличия только одного производителя оптоволоконных адаптеров. После рассмотрения преимуществ и недостатков двух стандартов выбор был сделан в пользу стандарта GigE Vision.

Адаптеры стандарта 10GigE с оптоволоконной связью уже реализованы на практике и поддерживаются несколькими производителями (с ценой одноканального адаптера от 650\$). Уже существуют проекты мозаичных камер, ориентирующиеся на интерфейс GigE Vision (A Gigapixel camera for the J-PAS 2.5m survey telescope).

Максимальная пропускная способность для стандарта GigE Vision составляет 40 Гбит/с по четырем линиям связи. Стандарт GigE Vision позволяет сетевое подключение камеры, что несколько усложняет реализацию протоколов связи, а именно – для реализации протокола GigE Vision в полном объеме на стороне камеры может потребоваться не просто ПЛИМ, а микропроцессор, что существенно усложняет достижение синхронизации устройств контроллера, необходимой для достижения минимальных шумов считывания. Поэтому часть функций не первой необходимости была исключена из протоколов, что позволило реализовать их на базе ПЛИМ.

3.2 Программная модель и программное обеспечение контроллера.

Контроллер с точки зрения управляющей программы представляет собой набор адресуемых регистров и памяти к которым можно обращаться на запись и чтение. Младшая часть 32-битного адресного пространства жестко закреплена согласно требованиям стандарта GigE Vision. Остальная часть распределена между модулями. Обмен с регистрами происходит по виртуальному каналу управления, а передача видеоданных – по виртуальному видеоканалу. Данные и команды передаются в виде UDP пакетов транспортного протокола IPv4 Ethernet.

Программное обеспечение осуществляет управление работой контроллера, передачу и отображение изображений. Управляющая программа реализует необходимое подмножество протоколов стандарта GigE Vision v2, а также связанного с ним протокола GenCP v1.0 стандарта GenICam.

Программное обеспечение функционирует под управлением операционной системы Windows 7 (64-бит). В состав программного обеспечения кроме программы управления контроллером может входить и набор программных компонентов для разработчика (SDK). Компоненты SDK обеспечивают программный интерфейс (API) для полноценного использования ПЗС-системы из внешних программ.

Программа управления в интерактивном режиме имеет пользовательский интерфейс в виде диалогового окна управления процессом сбора данных с развитой системой меню и дополнительными окнами для визуализации, телеметрии и вывода графической и текстовой информации.

В программе управления реализованы следующие основные функции:

- инициализация оборудования;
- задание и контроль уровней управляющих сигналов ПЗС-детектора;
- управление всеми параметрами накопления и считывания;
- запуск экспозиции;
- прием видеоданных;
- визуализация данных;
- запись данных на жесткий диск в FITS-формате;
- ведение протоколов исполняемых команд.