

УДК 520.27:523.9

## РАДИОТЕЛЕСКОП РАТАН-600 В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ. III. СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ НА РАТАН-600

© 2011 С. В. Балдин<sup>1\*</sup>, В. И. Гараимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербургский Филиал, 357147 Россия

Поступила в редакцию 17 сентября 2010 г.; принята в печать 1 декабря 2010 г.

Сообщается о создании многоканальной системы сбора данных и управления для оснащения Спектрально-Поляризационного Комплекса Высокого Разрешения. Данная система обеспечивает скоростную регистрацию от 240 каналов и реализует функции управления подготовкой и проведения процесса наблюдения на комплексе в автоматическом режиме. Оборудование выполнено в формате модулей 3U Евромеханика. Управление измерительным комплексом осуществляется программными средствами, выполненными на основе кроссплатформенной библиотеки QT (open source версия) в ОС Linux, Windows. Регистрация данных производится на магнитный носитель, далее они передаются в компьютерную сеть САО для архивации и доступны для внешнего пользователя.

Ключевые слова: *методы астрономических наблюдений, приборы и инструменты*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальные задачи физики Солнца требуют подробного изучения его атмосферы в широком диапазоне высот [1–3]. С этой целью на РАТАН-600 постоянно идет модернизация спектрально-поляризационного комплекса [4] В работе [5] описан новый многооктавный спектрально-поляризационный комплекс высокого спектрального разрешения (СПКВР). Число частотных каналов этого комплекса достигло 112, а учет регистрации одновременно двух параметров Стокса I и V увеличивает это число до 224. Регистрация такого числа каналов должна осуществляться в параллельном режиме и с высоким быстродействием, достигая 1 мсек на часть или на весь принимаемый спектр частот. Требование обеспечения высокого динамического диапазона также является немаловажным при конструировании системы сбора. В качестве обязательных дополнительных условий к системе предъявляются требования на температурную стабильность, надежность и устойчивость к отказам. Все вышеперечисленные требования налагают жесткие ограничения на реализацию технической

и программной части данной системы сбора и управления.

### 2. МНОГОКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ

Основные параметры системы сбора данных полностью определяются совокупностью требований к СПКВР. Они заключаются в одновременной регистрации большого числа частотных каналов, перекрывающих многооктавный частотный диапазон 0.75–18.0 ГГц, анализа параметров Стокса I и V по каждому каналу, широкому динамическому диапазону для регистрации относительно слабых сигналов на фоне мощного сигнала спокойного Солнца или активной области, высокого быстродействия системы для регистрации импульсных всплесковых процессов. Обязательными являются также требования температурной и временной стабильности, надежности и устойчивости к отказам. Сигналы правой и левой круговых поляризаций поочередно подключаются к общему усилительному тракту с помощью широкополосного переключателя [5]. На выходе этого тракта происходит операция детектирования по каждому частотному каналу и усиление усилителем постоянного тока. Далее сигнал поступает в радиометрический модуль, на

\*E-mail: sts@sao.ru

входе которой стоит переключатель, роль которого состоит в разделении сигналов правой и левой круговых поляризации на два низкочастотных (НЧ) канала. Сигналы обеих поляризаций в каждом канале усредняются с минимальной постоянной времени (от 1 до 5 мсек) и поступают на 24 разрядных аналого-цифровых преобразователя. Структурная схема регистрации НЧ сигналов изображена на Рис. 1. Она состоит из 15 8-канальных радиометрических модулей, сигналы с которых поступают в блок управления данными на микросхеме FPGA фирмы Altera. Для управления микросхемой FPGA используется процессор ARM9.

Схемотехнически каждый радиометрический модуль объединяет на одной печатной плате микросхемы, реализующие получение и первичную обработку данных от 8 частотных каналов. В настоящей конфигурации СПКВР используется 14 плат и одна плата остаётся в резерве. Таким образом, максимально возможное общее число частотных каналов СПКВР составляет 120. Для объединения потоков данных, поступающих от радиометрических НЧ ячеек, используется стандартная шинная архитектура: двунаправленная шина данных, однонаправленные шины адреса и управления. Данная архитектура позволяет реализовать одновременный прием радиометрических данных и управление параметрами регистрации при взаимодействии через локальную сеть (Local Area Network (LAN)) процессора ARM9 и внешнего управляющего компьютера. В случае необходимости первичной обработки принятых данных, она производится функциями подпрограмм, реализованных в виде отдельных задач на процессоре ARM9. Первичная обработка выполняется по командам управления, полученных через LAN от управляющего компьютера.

### *2.1. Радиометрический модуль*

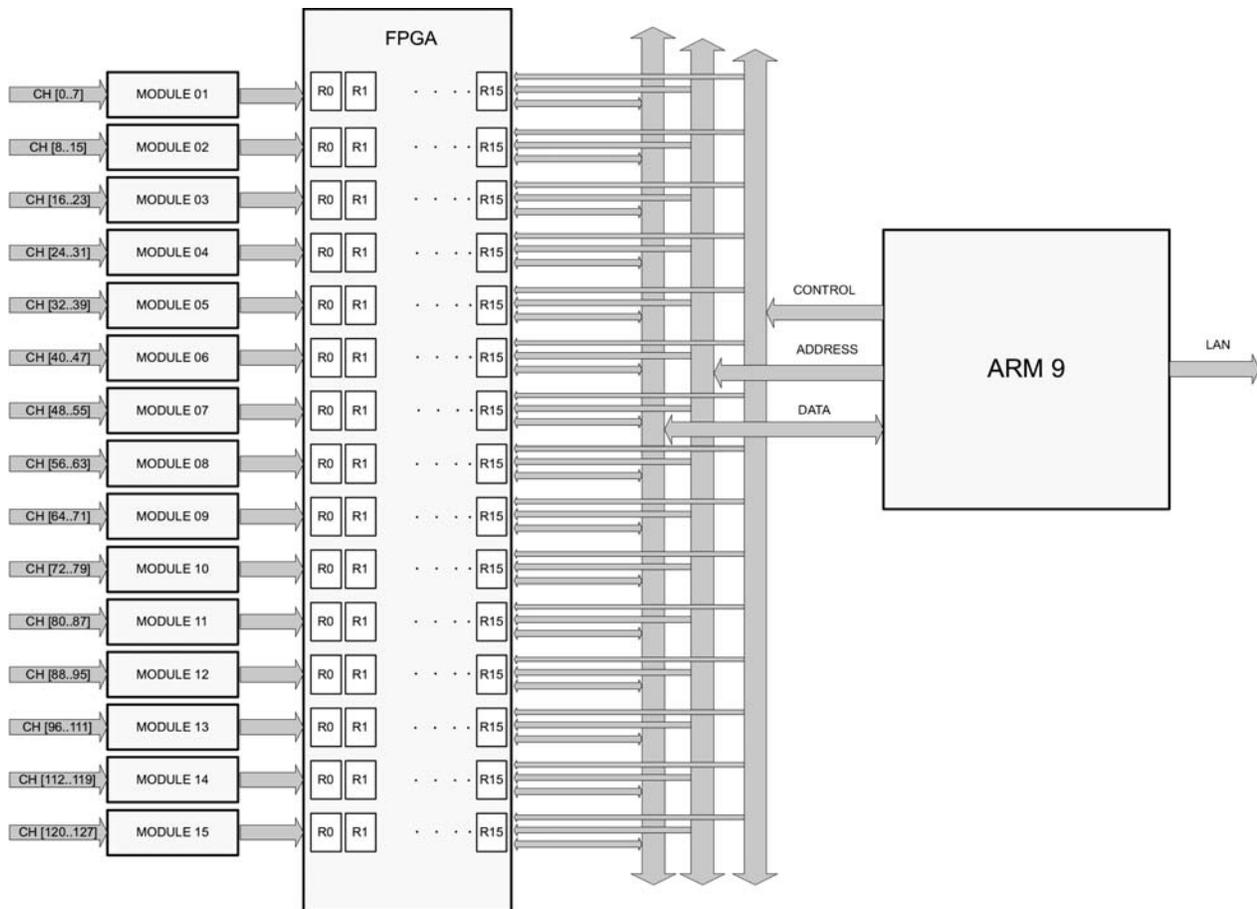
Радиометрический модуль реализует прием сигналов от 8 частотных каналов. На его выходе образуются цифровые потоки соответствующие 16 каналам с учетом приема двух поляризаций на каждой частоте.

Канал радиометрического модуля представляет собой согласующие цепи, цепи распределения сигналов поляризации, совмещенные с РС-цепями. На выходе цепей каждой из поляризаций подключены быстродействующие многоразрядные сигма-дельта АЦП (0.1 МГц, 24 бит). Общее число задействованных в настоящее время радиометрических модулей составляет 14, всего в них используется 224 АЦП.

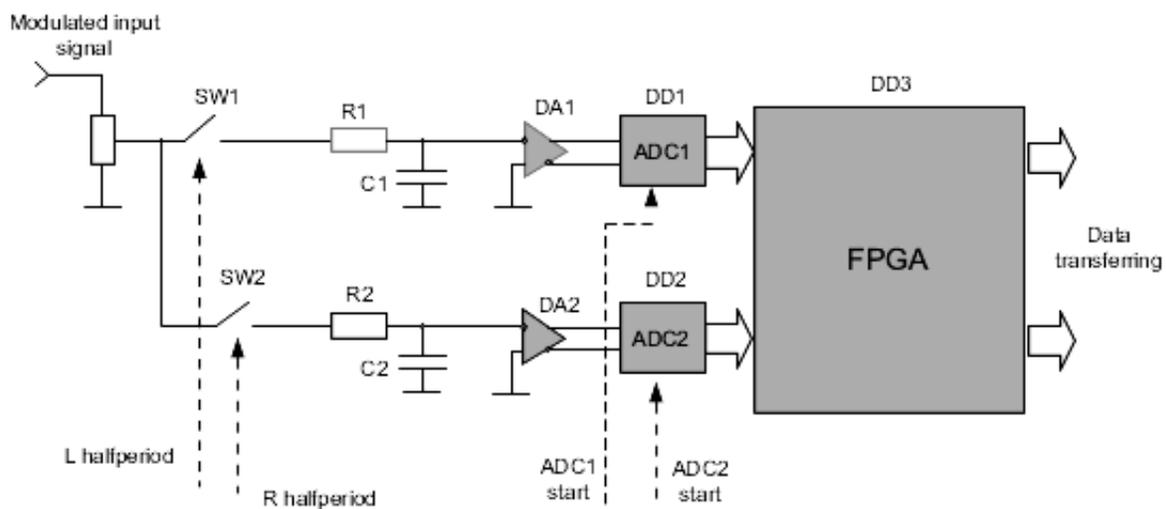
Блок-схема канала радиометрического модуля приведена на Рис. 2. Модулированный входной сигнал от СВЧ блоков комплекса поступает на ключи-демодуляторы SW1 и SW2, которые переключаются в зависимости от управляющих импульсов и осуществляют демодуляцию входного сигнала для отдельного аналого-цифрового преобразования (оцифровки) напряжений, соответствующих левой и правой поляризациям входного сигнала. Фильтры НЧ, реализованные на R1C1 (R2C2), обеспечивают сглаживание входного сигнала. Они рассчитаны таким образом, чтобы постоянная времени фильтров превышала в несколько раз период частоты модуляции. В настоящей версии СПКВР реализован вариант фильтров для частоты модуляции от 100 до 500 Гц. Операционные усилители DA1 и DA2 предназначены для согласования демодулированного и отфильтрованного сигнала с диапазоном входного напряжения АЦП.

На Рис. 3 приведена временная диаграмма демодуляции входного сигнала и аналого-цифрового преобразования полупериодов левой и правой поляризаций входного сигнала. АЦП использует установленную частоту модуляции для подготовки оцифровки, частота которой в 64 раза выше, чем исходная частота модуляции входного сигнала. Таким образом, внутри АЦП реализован режим Oversampling, и при использовании заложенных аппаратных вычислительных возможностей АЦП нет необходимости повторять режим Oversampling программно, достаточно правильно задать частоту снятия конечных отсчетов, которые в нашем случае совпадают с частотой модуляции. В приведенной на Рис. 3 диаграмме, подготовка данных внутри АЦП схематично отображена в виде вертикальных линий, длина которых соответствует мгновенным значениям напряжения, приложенного в момент преобразования ко входу АЦП. Момент снятия отсчетов с АЦП изображен кружком.

В соответствии с временной диаграммой можно заметить, что особенность данного метода получения значений демодулированного сигнала состоит в том, что появляется возможность оцифровывать сигнал в момент, когда он непосредственно не приложен ко входу АЦП, что после последующей обработки позволяет поднять общую чувствительность в 1.25 раза. Эта возможность появляется из-за того, что фильтр НЧ в случае превышения постоянной времени в несколько раз над периодом частоты модуляции, выступает в роли устройства выборки-хранения, т.е. запоминает уровень предыдущего сигнала и удерживает его в течение по-



**Рис. 1.** Структурная схема системы сбора данных. Сигналы с выходов частотных каналов поступают на 8-канальные радиометрические модули и далее в блок управления данными на FPGA-микросхеме фирмы Altera, управляемой процессором ARM9.



**Рис. 2.** Блок-схема канала радиометрического модуля.

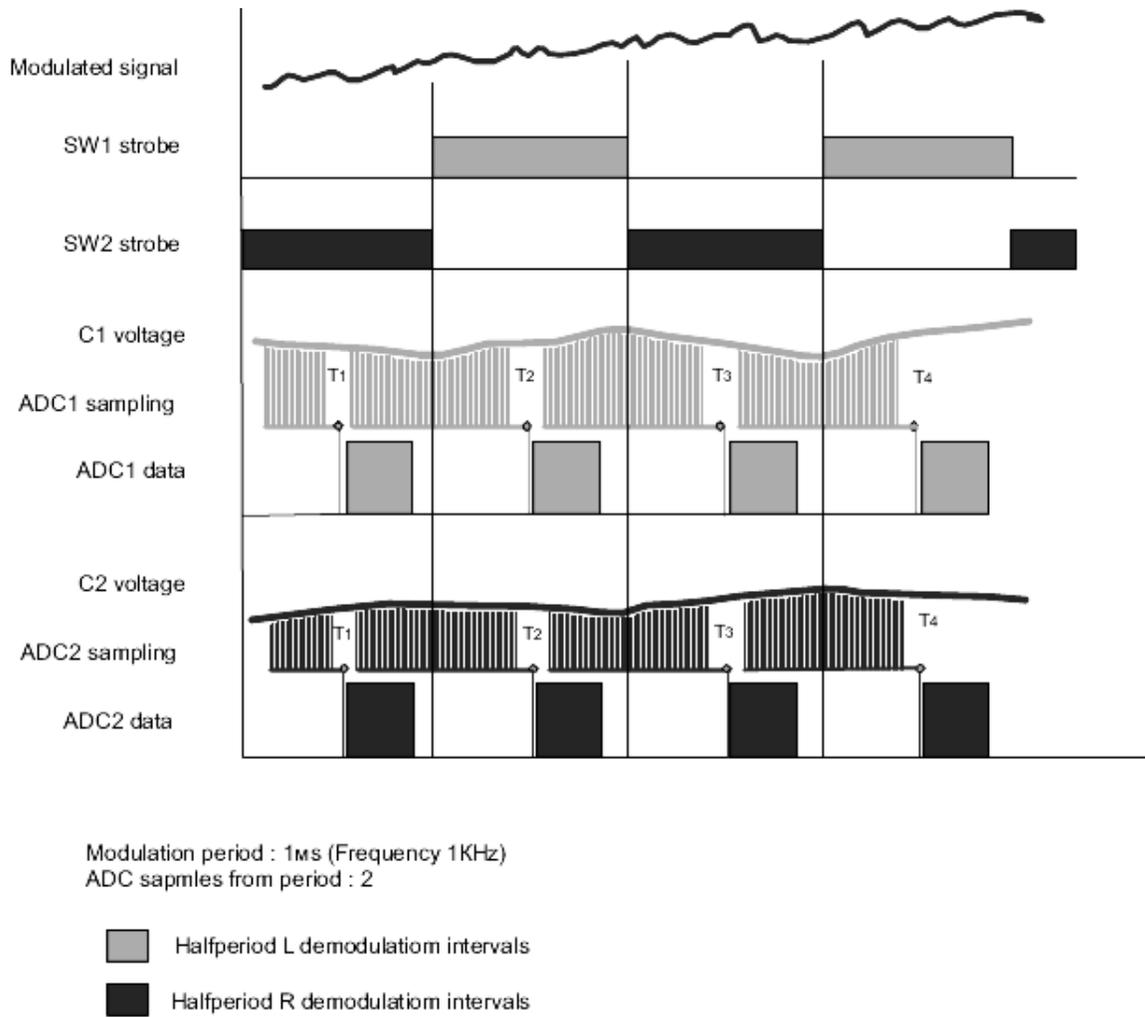


Рис. 3. Временная диаграмма демодуляции и аналого-цифрового преобразования входного сигнала.

лупериода, когда ключ демодулятора находится в разомкнутом состоянии.

### 2.2. Схемотехника радиометрического модуля

Внешний вид радиометрического модуля изображен на Рис. 4. На одной плате размещаются микросхемы, реализующие сбор данных для 8 независимых частотных каналов.

Для точной подстройки уровней входного сигнала используются аттенюаторы, выполненные на цифровых потенциометрах AD5258. Регулируется уровень входных напряжений частотных каналов, поэтому левая и правая поляризация входного сигнала по каждому частотному каналу будут изменяться одновременно.

Цепи демодулятора, выполненные на ключах ADG621, обеспечивают синхронное подключение модулированных сигналов от сверхвысокочастотного (СВЧ) блока к соответствующим каналам АЦП.

Применение двух АЦП ADS1278 позволяет одновременно оцифровывать 16 каналов с разрядностью 24 бита. Это даёт возможность реализовать режим наблюдений с полной мощностью (Total Power) по левой и правой поляризациям входного сигнала.

Цепи управления аттенюаторами и ключами-демодуляторами гальванически развязаны от цифровых цепей FPGA и АЦП с помощью оптронов.

Синхронизацию управляющих сигналов обеспечивает микросхема FPGA, работающая от отдельного стабильного кварцевого генератора.

При обмене данными с интерфейсным контроллером радиометрический модуль работает по протоколу SPI в режиме SPI Slave. В программном обеспечении микросхемы FPGA, заложена возможность изменения частоты демодуляции и непосредственно аналого-цифрового преобразования в диапазоне частот от 1 до 1 КГц.

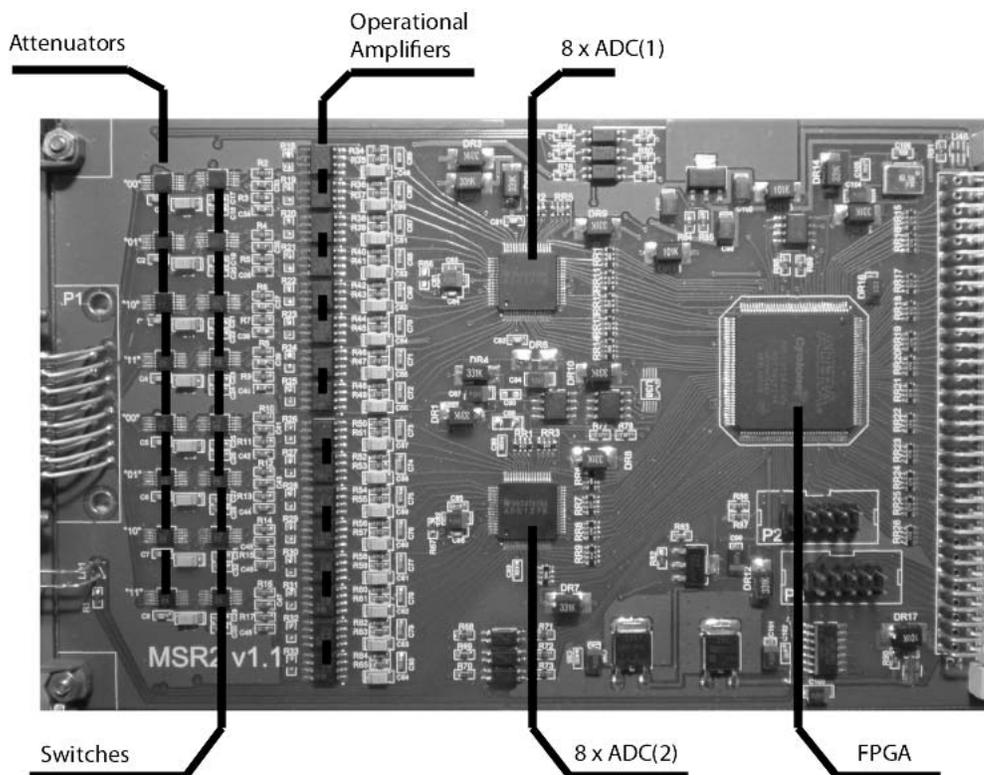


Рис. 4. Расположение элементов в радиометрическом модуле.

### 2.3. Программа для радиометрического модуля

В радиометрическом модуле функции демодуляции, временной синхронизации аналого-цифрового преобразования и последующей передачи полученных данных в интерфейсный контроллер реализованы в программе микросхемы FPGA. Программа выполнена на языке VHDL.

Содержит программные блоки:

- основная программа;
- подпрограмма обмена по шине SPI с интерфейсным контроллером.

Основная программа реализует функции: управление конфигурацией PLL, загрузка программы для радиометрического модуля из конфигурационной Flash-памяти, формирование импульсов синхронизации, необходимых для правильного взаимодействия программных функций, управление 8 аттенюаторами по дополнительным шинам SPI в режиме SPI Master, управление конфигурацией и режимами аналого-цифрового преобразования для АЦП1 и АЦП2, программный сброс всех программных функций в начальные установки, приём данных от 16 каналов АЦП, предварительная обработка данных, полученных от АЦП1 и АЦП2 в

соответствии с заданным параметром усреднения, выдача обработанных данных по левой и правой поляризациям входного сигнала по 8 независимым частотным каналам по шине SPI в интерфейсный контроллер в режиме SPI Slave.

### 2.4. Организация системы управления комплексом и передачей данных

Алгоритм сбора данных от радиометрических НЧ ячеек синхронизирован с частотой обмена по шине SPI для максимальной унификации управляющих сигналов и предотвращения сбоев, связанных с потерей синхронизации. Функциональная схема алгоритма сбора данных и взаимодействия микросхемы FPGA с процессором ARM9 приведена на Рис. 5. Внутренняя структура микросхемы FPGA содержит логические элементы, сгруппированные программно для реализации функций:

- приём данных от 15-ти НЧ модулей по шине SPI;
- размещение данных в регистрах;
- синхронизация управляющих сигналов;
- передача данных в процессор ARM9;
- получение команд от процессора ARM9.

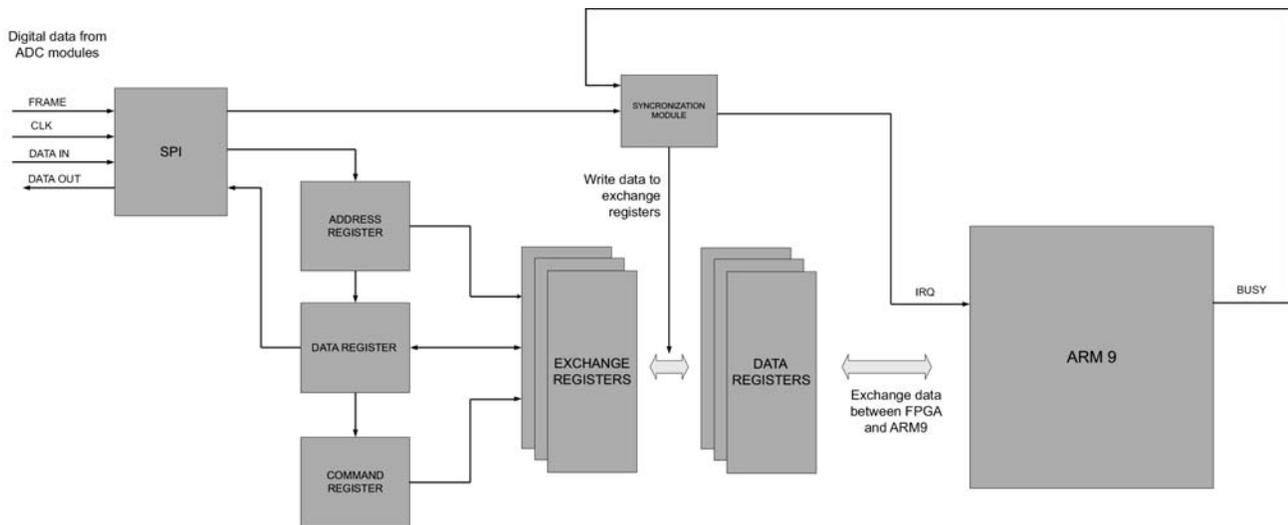


Рис. 5. Функциональная схема взаимодействия FPGA и ARM9 в интерфейсном контроллере

### 2.5. Структурная схема управления комплексом

Управление комплексом СПКВР осуществляется интерфейсным контроллером. Структурная схема управления комплексом изображена на Рис. 6. Прием информации от радиометрических ячеек производится в микросхеме FPGA по последовательному протоколу SPI. Тактовая частота шины SPI составляет 5 МГц. Общее количество SPI шин — 15, по одному на каждый радиометрический модуль. Реализован протокол обмена между микросхемой FPGA и процессором ARM9 по шине статической памяти, в результате чего удалось значительно сократить время получения информации от радиометрических каналов.

В качестве операционной системы процессора ARM9 применена opensource версия uCOS-II фирмы Micrium. Данная многозадачная ОС позволяет обеспечить выдачу по шине Ethernet 100 на управляющий компьютер данных с частотой до 200 Гц по протоколу UDP, размер информационного пакета до 1500 байт. Передача фрейма данных сопровождается служебной информацией в размере 5 байт, каждый частотный канал передается в виде двух отсчетов по 4 байта.

Для расчёта скорости передачи используем формулу:  $S = 200 \times (P1 / P2)$ , где  $S$  — скорость передачи (Гц),  $P1$  — размер информационного пакета (байт),  $P2$  — передаваемый объём информации (байт).

Предельная скорость передачи данных на управляющий компьютер варианта для 8 каналов составляет:

$$200 \times 1500 / (16 \times 4 + 5) = 4347 \text{ Гц.}$$

Предельная скорость передачи варианта для 112 каналов составляет:

$$200 \times 1500 / (224 \times 4 + 5) = 332 \text{ Гц.}$$

Для наиболее стабильного управления комплексом СПКВР экспериментально была выбрана частота выдачи данных 142 Гц от процессора ARM9 к управляющему компьютеру. С учетом того, что в одном фрейме производится выдача данных по двум полупериодам модуляции (по левой и правой поляризациям входного сигнала), частота дискретизации по одному частотному каналу составляет 71 Гц.

Контроль температуры в объёме, в котором располагается интерфейсный контроллер, осуществляется по цифровому датчику температуры DS1820. На плате интерфейсного контроллера также располагается микросхема Real Time Clock (RTC), позволяющая привязывать фреймы данных к абсолютной шкале времени и осуществлять в последующей обработке проверку ошибок последовательности выдачи данных. Первичный контроль правильности последовательности фреймов данных осуществляется в микросхеме FPGA.

Применение многозадачной ОС позволяет запускать параллельно задачи получения данных от радиометрических НЧ модулей и задачи управления исполнительными устройствами автоматического управления СПКВР.

Выдача данных из интерфейсного контроллера осуществляется по протоколу UDP, чтобы максимально облегчить вычислительную нагрузку расчёта контрольных сумм информационных пакетов на процессор ARM9. При этом возможны потери отдельных пакетов из-за того, что контрольные

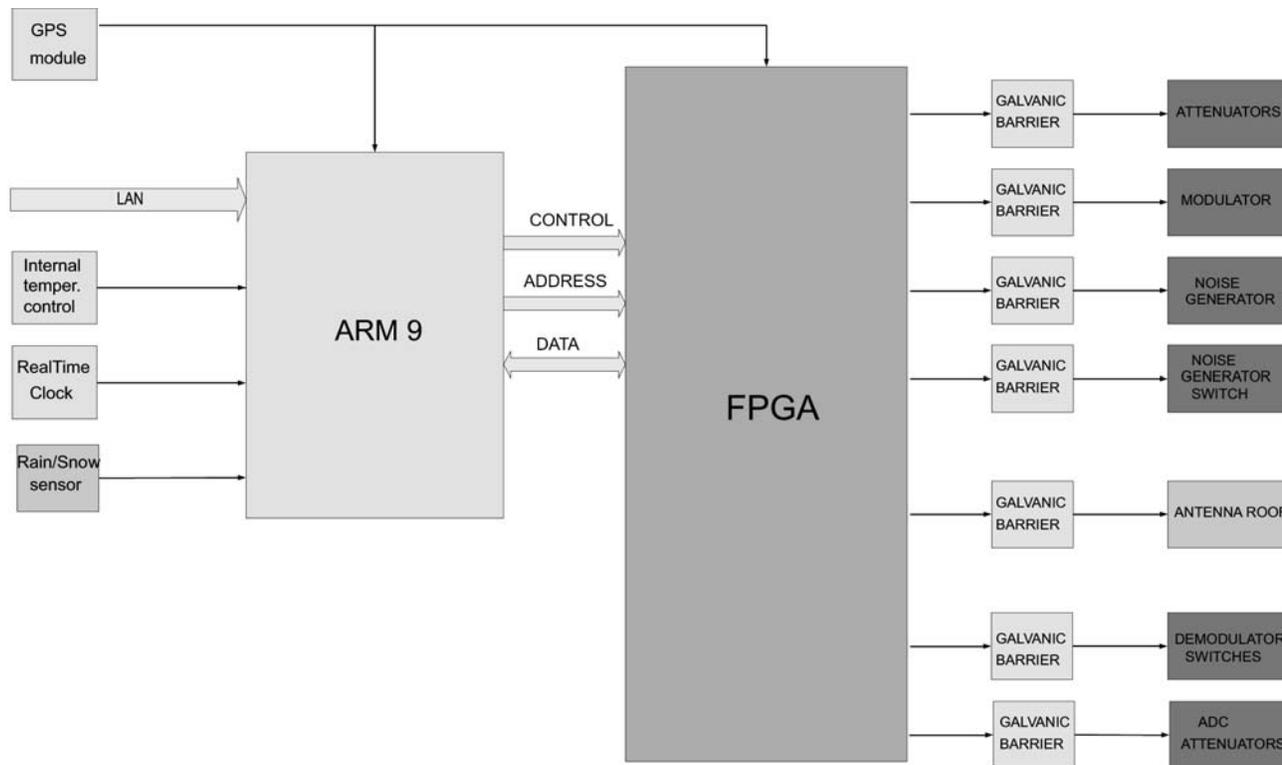


Рис. 6. Структурная схема управления модулем регистрации данных.

суммы пакетов не считаются и доставка информации не гарантируется. Так как в каждом пакете имеется дополнительная информация о внутренних сигналах синхронизации и метки привязки к шкале времени, потерянные данные легко обнаруживаются и затем восстанавливаются в процессе последующей обработки.

Для реализации команд управления от компьютера в интерфейсном контроллере имеется два варианта обработки команд. В первом варианте реализовано подтверждение получения интерфейсным контроллером полученной команды путем выдачи в отдельный порт информации по протоколу UDP. Во втором варианте реализован прием управляющих команд по протоколу TCP, что гарантирует доставку информационных пакетов от клиента серверу. Интерфейсный контроллер в обоих вариантах выступает в роли сервера.

Для дополнительной синхронизации с абсолютной шкалой времени используется GPS модуль ResolutionT фирмы Trimble. Сигнал синхронизации 1PPS соединяется непосредственно с блоком синхронизации данных, реализованном в FPGA. Значение меток абсолютной шкалы передается через UART порт в процессор ARM9.

В интерфейсном контроллере предусмотрено управление параметрами СВЧ блока комплекса:

- управление модулятором;
- управление генератором шума;
- управление переключателем генератора шума;
- управление СВЧ аттенюаторами.

На радиометрические НЧ-модули передаются сигналы синхронизации для демодуляции принимаемых данных и параметры управления НЧ аттенюаторами. Уровни управляющих сигналов соответствуют 3В TTL/CMOS.

Для управления укрытием приемной антенны (колпаком) использована отдельная линия, которая реализует пуск и отключение механизма управления укрытием. По сигналу от датчика осадков укрытие переводится из открытого в закрытое состояние (если датчик срабатывает при открытом укрытии) или блокирует открытие (при закрытом укрытии).

Для расширения функций интерфейсного контроллера предусмотрены разъемы для мезонинного модуля, который можно расположить сверху контроллера. На мезонинный модуль выводятся шины USB и линии портов процессора ARM9, до 32 линий (в зависимости от комплектации и исполнения).

### 2.6. Программы для интерфейсного контроллера

В интерфейсном контроллере программируются микросхема FPGA и процессор ARM9.

Программа для микросхемы FPGA выполнена на языке VHDL в среде разработки Quartus. Содержит программные блоки:

- основная программа FPGA;
- подпрограмма синхронизации управляющих импульсов;
- подпрограмма взаимодействия с ARM9 по интерфейсу статической памяти;
- подпрограмма обмена по шине SPI с радиометрическими модулями.

Основная программа FPGA реализует функции конфигурации PLL, загрузки из конфигурационной Flash-памяти, программный сброс в начальные установки, прием данных от 224 каналов АЦП, предварительная обработка данных в соответствии с заданным параметром усреднения. Подпрограмма взаимодействия с ARM9 по интерфейсу статической памяти реализует протокол обмена FPGA-ARM9 по запросам со стороны контроллера ARM9. К регистрам FPGA можно при этом общаться как к статической памяти контроллера ARM9. Подпрограмма синхронизации управляющих импульсов задает все необходимые сигналы для организации синхронного обмена с радиометрическими модулями, модулем GPS и контроллером ARM9. Подпрограмма обмена по шине SPI с радиометрическими модулями реализует обмен данных по шине SPI в режиме SPI Master.

Программа для процессора ARM9 выполнена на языке C++ в среде разработки IAR. Содержит программные блоки:

- операционная система uC-OS-II v.2.84 фирмы Micrium;
- стек uC-TCP/IP v1.88 фирмы Micrium;
- реализация задачи обмена с FPGA;
- реализация задачи синхронизации времени (источники RTC, GPS);
- реализация задачи обмена с управляющим компьютером.

Программный блок операционной системы реализует функции параллельного взаимодействия нескольких задач и синхронизацию процессов (семафоры, мьютексы и т.п.). Внутренние события ОС происходят с частотой 2 кГц.

### 3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В измерительном комплексе СПКВР реализованы следующие программные модули:

- программа планирования наблюдений для управляющего контроллера;
- программа конвертера данных из raw формата в формат fits;
- программа для визуализации потока данных и настройки оборудования комплекса.

#### 3.1. Программа планирования наблюдений для управляющего компьютера

Выполнена на языке C++ в среде разработки QT. Содержит программные блоки:

- блок инициализации;
- обработчик расписания наблюдений;
- обработчик расписания команд управления ARM9;
- блок контроля обменом управляющими командами с ARM9.

Программа планировщика наблюдений во время запуска определяет параметры UDP соединения с управляемым контроллером (ARM9), проводит определение имен файлов расписания наблюдений, файлов логов и имен каталогов записи данных на диске. Обработчик расписания наблюдений следит за содержанием текстового файла заданий (наблюдений) и при наступлении соответствующего времени запускает обработчик расписания команд управления ARM9, передавая ему необходимые данные (параметры источника, точное время начала наблюдения, имя файла команд сценария). Обработчик расписания команд управления ARM9 формирует файл наблюдения (RAW data) и посылает управляющие команды через UDP протокол в контроллер ARM9, согласно содержанию файла команд сценария. Файл наблюдения (RAW data) состоит из FITS заголовка (Binary Table) и двоичных данных наблюдения. Т. к. UDP протокол не гарантирует получение посланного пакета принимающей стороной, в программе планировщика наблюдений в отдельном потоке выполняется блок контроля обменом управляющими командами с ARM9. Данный блок контролирует своевременное получение команды контроллером ARM9.

### 3.2. Программа конвертера данных из gaw формата в формат fits

Выполнена на языке C++ в среде разработки QT. Программа создает FITS файл на основе файла наблюдений в gaw-формате. Программа проверяет целостность gaw-файла и производит восстановление пропущенных пакетов данных в исходном файле данных.

### 3.3. Программа для визуализации потока данных и настройки оборудования комплекса

Выполнена на языке C++ в среде разработки QT. Обеспечивает визуализацию данных, принимаемых от интерфейсного контроллера комплекса СПКВР на управляющем компьютере. Использование технологии OpenGL позволяет обеспечить скорость отображения до 400 отсчетов в секунду. В программе предусмотрена возможность ручного управления функциями комплекса.

## 4. ВЫВОДЫ

Создана новая многоканальная система сбора данных для наблюдений Солнца на RATAN-600. Система обеспечивает скоростную регистрацию всех 240 каналов в режиме квазисовременной записи данных, их хранение, первичную обработку и выдачу информации на следующий уровень обработки [6]. Другая важная задача системы сбора данных — обеспечение процесса полной автоматизации наблюдений и управления параметрами

приемного комплекса в процессе наблюдений. Для решения всех вопросов написан большой пакет программ, который показал свою актуальность в реальных наблюдениях.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам, участвовавшим в разработке и тестировании системы сбора данных, а также руководителю В. М. Богоду за активное содействие данной работе.

Работа частично поддерживалась Программами Российской Академии наук ОФН-15 и ПАН-4 и грантами Российского фонда фундаментальных исследований 08-02-00378 и 11-02-00072.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. М. Богод и С. Х. Тохчукова, Письма в АЖ **29**, 305 (2003).
2. В. М. Богод, Известия РАН Серия физическая **70**, 1491 (2006).
3. В. М. Богод, Астрофизический бюллетень **66**, 207 (2011).
4. V. M. Bogod, A. M. Alesin, S. V. Baldin, et al., in *Proc. of the 11th European Solar Physics Meeting "The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations"* (2005, ESA SP-600, no. 1) p. 80.
5. В. М. Богод, А. М. Алесин и А. А. Перваков, Астрофизический бюллетень **66**, 223 (2011).
6. С. Х. Тохчукова, Астрофизический бюллетень **66**, 409 (2011).

## RATAN-600 RADIO TELESCOPE IN 24TH SOLAR ACTIVITY CYCLE. III. SYSTEM OF DATA ACQUISITION AND CONTROL OF THE SOLAR SPECTRAL FACILITY

S.V. Baldin, V.I. Garaimov

We report the development of a multichannel data acquisition and control system for the Spectral and Polarization High-Resolution Solar Research System, installed at the RATAN-600 radio telescope. This facility provides high-speed registration of signals from 240 channels and controls the preparation for observations and the process of automatic observations. The hardware is made in the form factor of 3U Evromekhanika modules. The measurement facility is controlled by the software based on the QT cross-platform library (the open source version), which can be run both on Linux and Windows operating systems. The data are written to a magnetic carrier and then transferred to the computer network of the Special Astrophysical Observatory for archiving, and can be accessed by external users.

Key words: *Sun: activity—techniques: radar astronomy—techniques: polarimetric*