

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 520.374

**СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ МНОГОЛУЧЕВОГО
РАДИОТЕЛЕСКОПА БСА ПРАО АКЦ ФИАН**

© 2023 г. С. В. Логвиненко^{а,*}

*^аФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН
Россия, 142290, Пушкино, Московская обл., Радиотелескопная ул., 1А*

**e-mail: lsv@prao.ru*

Поступила в редакцию 07.04.2023 г.

После доработки 27.06.2023 г.

Принята к публикации 08.07.2023 г.

Описывается многоканальная система регистрации сигналов, созданная для 128-лучевого радиотелескопа БСА ПРАО АКЦ ФИАН. Сигналы, поступающие от радиотелескопа, представляют собой радиочастотные сигналы в диапазоне частот 0–115 МГц с рабочей полосой телескопа шириной 2.5 МГц, расположенной в диапазоне 109–111.5 МГц. Оцифровка каждого сигнала осуществляется методом прямой оцифровки с частотой 230 МГц с дальнейшей полностью цифровой обработкой сигналов. В обработку входят перенос рабочей полосы в область низких частот, подавление сигнала вне рабочей полосы и разделение полезного сигнала на 512 спектральных каналов с помощью комплексного фурье-процессора. Вся обработка выполняется на основе программируемых логических интегральных схем, расположенных на специально разработанных в ПРАО базовых модулях, устанавливаемых в слоты промышленных компьютеров. Последовательности спектров затем передаются в ОЗУ компьютера в программу регистрации с последующей записью в нужном формате на жесткий диск. Применение совмещенной аппаратной и программной обработки позволило создать компактную, надежную и недорогую систему регистрации. Многоканальная система регистрации сигналов создана специально для радиотелескопа БСА и является уникальной.

1. ВВЕДЕНИЕ

В ПРАО АКЦ ФИАН в результате модернизации в 2010–2012 годах введенного в эксплуатацию в 1974 году радиотелескопа БСА (Большая Сканирующая Антенна) был создан фактически новый 128-лучевой радиотелескоп. 128 лучей радиотелескопа охватывают участок неба от -9° до 55° по склонению. Более ранние данные о радиотелескопе и программах наблюдений можно посмотреть в работе [1]. Для реализации всех возможностей радиотелескопа необходимо было создать многоканальную систему

регистрации сигналов радиотелескопа, непосредственно работающую с широкополосными сигналами, поступающими от телескопа. Многоканальная система регистрации сигналов (МСРС) должна быть компактной, недорогой, стабильно работающей 24 часа в сутки системой. Это удалось сделать за счет оптимального разделения процессов обработки и регистрации сигналов между аппаратными и программными средствами. Работа проводилась в несколько этапов, с 2012 года по 2020, по мере готовности технических средств и финансовых возможностей. В настоящий момент радиотелескоп и МСРС работают в штатном режиме круглосуточно. Регистрируются всех 128 лучей радиотелескопа одновременно в двух режимах с разными временным и спектральным разрешениями. В первом режиме временное разрешение составляет 100 мс, в нём 6 спектральных каналов, во втором (более информативном) временное разрешение составляет 12.5 мс, в нём 32 спектральных канала. Суммарный поток данных в этих режимах составляет около 115 Гб в сутки.

2. БАЗОВЫЙ МОДУЛЬ

Аппаратная часть МСРС состоит из трёх промышленных компьютеров (ПК), в PCI-слоты (Peripheral component interconnect) которых устанавливается необходимое количество базовых модулей. Для 128-лучевой антенны используются три таких ПК, в каждый из которых устанавливаются соответственно 4, 6 и 6 базовых модулей. Такая комплектация связана прежде всего с последовательным по времени вводом в эксплуатацию составных частей всего регистратора. Максимальное количество базовых модулей, устанавливаемых в один ПК, может достигать восьми. На один базовый модуль можно подать сигналы от 8 лучей антенны (рис. 1). Ограничение по количеству сигналов определяется максимальной высотой базовых модулей, ограниченной высотой ПК стандарта 4U (17.78 см).

Для подачи сигналов в модуль используются малогабаритные высокочастотные разъемы типа В, установленные на планку базовых модулей в шахматном порядке. На печатной плате расположены 4 спаренных аналого-цифровых преобразователя (АЦП), программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) с радиатором для отвода тепла, дополнительные радиаторы и другие электронные компоненты. Для улучшения чувствительности регистратора на печатной плате установлены высокочастотные повышающие трансформаторы ADT9-1T+. Это позволило переместить рабочий диапазон входных напряжений в область 0.12–500 мВ. При такой величине нижнего значения диапазона входного сигнала необходимо было минимизировать ухудшение

чувствительности, вызванное проникновением сигнала от работы цифровой части базовых модулей во входные, аналоговые схемы. Это было достигнуто благодаря использованию индивидуальных для каждого АЦП источников питания с фильтрацией, необходимых для аналоговой части питающих напряжений. Также немаловажную роль играет и использование специальных областей слоев печатной платы для организации заземления и экранирования АЦП. Печатная плата состоит из 6 слоев, в верхнем и нижнем слоях предусматриваются места для установки дополнительных радиаторов.

Для дискретизации сигналов используется метод прямой оцифровки [2–4], при котором оцифровывается весь входной сигнал, включая как полезный сигнал рабочей полосы, так и сигнал, лежащий вне ее (рис. 2). Это позволяет в дополнение к аналоговой фильтрации, проводящейся до АЦП, улучшить подавление помех и шумов вне рабочей полосы. Уровень подавления частот за пределами рабочей полосы составляет не менее 60 дБ. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания определяется в основном характеристиками трансформатора и составляет 0.06 дБ. Оцифровка производится на восьми 12-битных АЦП с частотой 230 МГц. Максимальная частота дискретизации АЦП (ADS62P29) составляет 250 МГц. На элементах ПЛИС создан модуль опорных частот, на котором формируется набор тактовых частот, необходимых для всего процесса обработки сигналов. Кроме того, реализован цифровой управляемый наблюдательной программой генератор сигналов (\sin , \cos), необходимых для квадратурного преобразования частоты (Inphase/Quadrature, IQ-преобразователи). В стандартных наблюдениях частоты этих сигналов составляют 110.25 МГц. В случае необходимости имеется возможность изменять их частоту, тем самым смещая рабочую полосу регистрации в спектре входного сигнала. Каждый из входных сигналов перемножаются с синусоидальным и косинусоидальным сигналами гетеродина (на схеме уровень смесителей) и получаемые 16 сигналов (по 2 для каждого входного сигнала) отправляются на этап фильтрации. Первая фильтрация выполняется на каскадных интегрально-гребенчатых, CIC-фильтрах (cascaded integrator-comb) с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ), представляющих собой каскадное соединение сумматоров и дифференциаторов. Эти операции не используют операций умножения и поэтому для них не требуются значительные ресурсы ПЛИС. Операции в смесителях и CIC-фильтрах выполняются параллельно с частотой дискретизации 230 МГц, по этой причине ресурсы, выделяемые для них, должны быть минимизированы. Описанная выше методика позволяет оптимизировать выделяемые ресурсы и в том числе уменьшить тепловыделение, снизить требования к отводу тепла от ПЛИС. После первого этапа фильтрации частота в потоках данных (а их получается 16) снижается в 23 раза до 10 МГц. Это позволяет

применить обработку с помощью блоков, требующих значительно большее количество ресурсов, если использовать раздельно по времени ресурсы одного и того же блока для нескольких потоков данных.

Второй этап фильтрации сигналов выполняется на 16-канальном фильтре низких частот с конечной импульсной характеристикой (КИХ) с последовательной по времени обработкой 16 входных потоков данных, поступающих от СИС-фильтра. Его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) рассчитана таким образом, чтобы компенсировать искажения линейности в полосе пропускания, вызванные характеристиками предыдущего (более простого) СИС-фильтра. Функцией второго фильтра, кроме компенсации искажений в полосе пропускания, является выделение $1/4$ от полосы входного сигнала, являющейся рабочей полосой радиотелескопа. После выделения рабочей полосы частота в потоках данных также снижается в четыре раза.

Далее отфильтрованные данные записываются в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) ПЛИС. За счет того, что фурье-преобразование работает на более высокой частоте, чем частота, с которой данные поступают от фильтров, удается организовать потоковую обработку всех поступающих данных и загрузку результатов преобразования в сумматор на одном и том же аппаратном процессоре Фурье. В сумматоре проводится накопление спектра мощности сигналов путем вычисления и накопления квадрата магнитуды комплексных чисел результата преобразования. Накопленный спектр мощности представляет собой 512 32-разрядных чисел с плавающей точкой в формате, совпадающем с форматом IEEE 754 [5] и не требующем дополнительных преобразований при загрузке в память прикладной задачи.

Из сумматора под управлением контроллера PCI, реализованного с помощью ресурсов ПЛИС, в режиме прямого доступа данные пакетами по 2048 байт передаются в буферные области системной памяти компьютера. Эти области выделяются для каждого базового модуля посредством запроса прикладной программы (в данном случае это программа проведения наблюдений) к специально разработанному драйверу универсального устройства PCI. Выделенные драйвером физические адреса передаются в регистры каждого базового модуля и используются для передачи пакетов данных. Драйверы разрабатывались с использованием пакета Microsoft Driver Development Kit (DDK) для операционных систем Windows 7, 8, 10 в 32- и 64-битных вариантах. Посредством системных запросов к драйверу осуществляются поддержка операций ввода-вывода для устройств, подключенных к шине PCI, выделение буферных областей в системной области ОЗУ и доступ к этим областям (чтение) со стороны прикладных программ.

3. ПРОГРАММА ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Основной задачей программы проведения наблюдений является корректный ввод в программу последовательности спектров для каждого входного сигнала. Обычно это сигналы от 48 лучей телескопа. Для каждого луча формируются последовательности спектров, состоящих из 512 спектральных каналов. Для формирования такого 512-канального спектра требуется набор 1024 точек сигнала полосой 2.5 МГц, оцифрованного с частотой 5 МГц. Таким образом, минимальное возможное временное разрешение составляет 0.2048 мс, а объем данных одного спектра – это 2048 байт. Со спектрами с таким временным разрешением и работает аппаратная часть базовых модулей. Стабильная безошибочная передача и регистрация данных с таким временным разрешением хотя бы для нескольких лучей невозможна при использовании стандартных технических средств ПК. Поэтому проводится аппаратное накопление спектра мощности в базовых модулях до минимально требуемого временного разрешения. Для стандартного режима с временным разрешением 12.4928 мс, а это 61 аппаратное суммирование единичных спектров, в наблюдательную программу передается 48 спектров каждые 12.5 мс. Формирование спектров для записи с меньшим количеством спектральных каналов и с меньшим временным разрешением осуществляется программным способом. Таким образом, одновременно регистрируются данные в двух основных режимах: 6 спектральных каналов с временным разрешением 100 мс и 32 спектральных канала с разрешением 12.5 мс. В ПРАО регулярно проводятся также наблюдения в режиме с временным разрешением 3.072 мс со 128 спектральными каналами [6]. Во всех режимах регистрации дополнительно к указанным количествам спектральных каналов записываются значения полной мощности сигнала рабочей полосы. Это делается для удобства просмотра данных и упрощения программ визуализации данных.

Запуск наблюдений обычно осуществляется оператором радиотелескопа и сводится к нажатию кнопки запуска в окне наблюдательной программы. Все режимы работы и параметры наблюдений заранее определены и устанавливаются при запуске программы. Наблюдательная программа используется также при проведении технических работ, она позволяет контролировать каждый входной сигнал регистратора, в том числе возможен визуальный контроль спектра любого входного сигнала.

Класс приоритета потоков задачи наблюдений при запуске устанавливается равным классу реального времени. Потоки процессов с таким классом приоритета вытесняют потоки всех остальных процессов, включая системные процессы. Использование такого

режима обеспечивает надежное функционирование программы, что особенно важно как при использовании передачи данных по шине PCI в буферы памяти компьютера, так и при записи данных на диск.

На ПК, входящих в систему регистрации, также обеспечивается доступ как к текущим, так и к архивным данным. Архивы создаются для данных с временным разрешением 100 мс с 6 спектральными каналами. Доступ к архивам поддерживается с помощью сервера FTP, входящего в состав ОС Windows. Данные архивов и текущие данные наблюдений хранятся на разных физических дисках. Практика эксплуатации серверов FTP с соблюдением перечисленных выше режимов показала, что одновременная регистрация данных и работа серверов FTP не приводит к ошибкам при записи данных и востребована наблюдателями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке и изготовлении МСРС использовался модульный принцип построения, который предполагает реализацию структуры регистратора на основе нескольких стандартных ПК, оснащенных нужным на данном этапе количеством базовых модулей. Основной объем подготовки к регистрации сигналов, поступающих от лучей радиотелескопа (перенос по частоте, фильтрация, спектральный анализ), выполняется с помощью ресурсов базовых модулей. В настоящий момент перечисленная выше обработка многоканальных высокочастотных сигналов только с помощью ресурсов стандартного компьютера невозможна. В данном случае реализована обработка на основе ПЛИС, позволяющих это сделать в компактном и недорогом варианте. Остальная обработка, которую можно выполнить стандартными техническими средствами, возложена на программные и аппаратные возможности, входящие в состав стандартного персонального компьютера. МСРС радиотелескопа БСА ПРАО АКЦ ФИАН в полном объеме реализована (2020 год) и круглосуточно работает с 2012 года по настоящее время. Поскольку регистратор является неотъемлемой частью радиотелескопа, проверка его чувствительности и эффективной площади проводится постоянно как в автоматическом режиме, так и с использованием специальных измерительных приборов. Регистраторы ни разу не являлись причиной изменения параметров радиотелескопа. За все годы работы регистратора не было ни одного отказа в работе по причине неисправности базовых модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tyul'bashev S.A., Tyul'bashev V.S., Oreshko V.V., Logvinenko S.V.* // *Astron. Rep.* 2016. V. 60. P. 220. <http://doi.org/10.1134/S1063772916020128>
2. *Jamin O.* RF Receiver Architecture State of the Art // *Broadband Direct RF Digitization Receivers.* 2014. P. 1. http://doi.org/10.1007/978-3-319-01150-9_1
3. *York J., Little J., Munton D.* // *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010).* Portland. OR. 2010. P. 1905.
4. *Henthorn S., O'Farrell T., Anbiyaei M. R., Ford K. L.* // *IEEE Transactions on Wireless Communications.* 2023. V. 22. № 1. P. 550. <http://doi.org/10.1109/TWC.2022.3196279>
5. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. IEEE Std 754-2008. P.1. <http://doi.org/10.1109/IEEESTD.2008.4610935>
6. *Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Logvinenko S.V., Tyul'basheva G.E.* // *Astron. Rep.* 2021. V. 65. P. 1246. <http://doi.org/10.1134/S1063772921120088>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Фото базового модуля регистратора.

Рис. 2. Блок-схема этапов обработки сигналов лучей радиотелескопа.

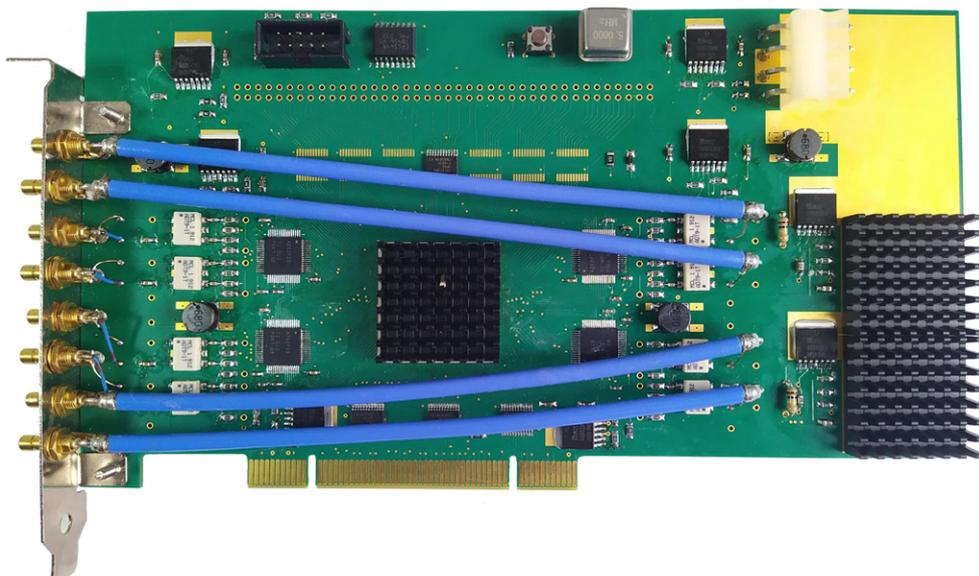


Рис. 1

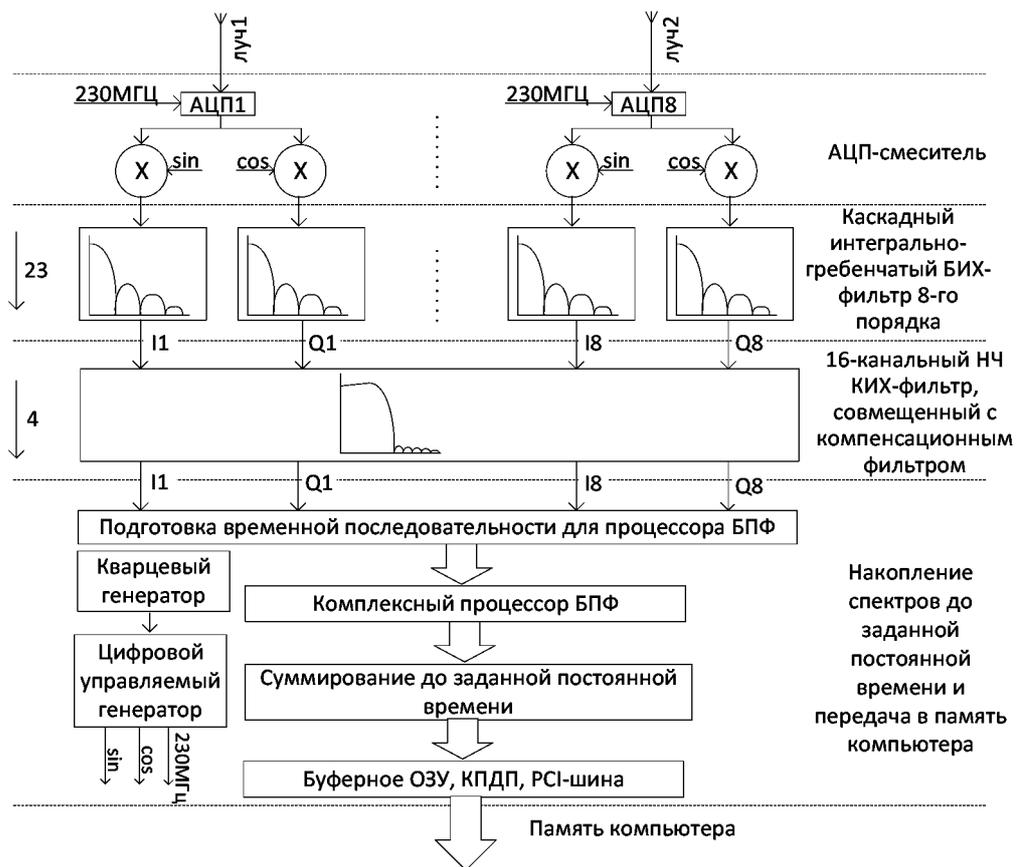


Рис. 2

Для связи с автором:
Логвиненко Сергей Валентинович
Е-mail: lsv@prao.ru
Тел.: 8-905-504-63-02 (моб.)

В помощь переводчику:

SIGNAL RECORDING SYSTEM OF THE MULTIBEAM LPA RADIO TELESCOPE PRAO ASC LPI

Аннотация:

A multichannel signal recording system (MSRS) developed for the 128-beam LPA radio telescope PRAO ASC LPI is described. The signals coming from the radio telescope are radio frequency signals in the frequency range of 0-115 MHz with a telescope operating band of 2.5 MHz wide, located in the range of 109-111.5 MHz. Digitization of each signal is carried out by direct sampling at a frequency of 230 MHz with further, fully digital signal processing. The processing includes the transfer of the operating band to the low-frequency region, the suppression of the signal outside the operating band, and the separation of the useful signal into 512 spectral channels using a complex Fourier processor. All processing is performed on the basis of field-programmable gate arrays (FPGAs) located on base modules specially developed in PRAO, installed in slots of industrial computers. The spectrum sequences are then transferred to the computer's RAM to the registration program, followed by recording in the required format on the hard disk. The use of combined hardware and software processing made it possible to create a compact, reliable and inexpensive registration system. MSRS was created specifically for the LPA radio telescope and is unique.