

Технический облик многофункциональной системы преобразования сигналов для радиотелескопов

© Д. А. Маршалов, Е. В. Носов, А. С. Бердников, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Представлены принципы построения, структура и основные параметры многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов для нового радиотелескопа РТ-13, строящегося в обсерватории «Светлое». Система может содержать до 24 широкополосных (1024 МГц) каналов преобразования сигналов, размещается на антенне и обеспечивает регистрацию сигналов в радиоинтерферометрическом и радиометрическом режимах, а также в режиме спектральных наблюдений. Отмечено наличие дополнительных функций калибровки системы и контроля синхронизации сигналов.

Ключевые слова: радиотелескоп, система преобразования сигналов, цифровая обработка сигналов, РСДБ.

Введение

В 2017 году ИПА РАН начато строительство радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое» (Ленинградская область). Для него разрабатывается новая многофункциональная система преобразования сигналов (МСПС), обладающая улучшенными параметрами по сравнению с разработанными ранее широкополосными системами (ШСПС), которые установлены в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары» на аналогичных радиотелескопах двухэлементного радиоинтерферометра нового поколения [1]. Новая система призвана обеспечить расширение функциональных возможностей аппаратуры преобразования сигналов, увеличение числа каналов с 8 до 24 и расширение полосы регистрируемых в каждом канале частот с 512 МГц до 1024 МГц. Выделение в этой полосе заданных участков спектра шумового сигнала с помощью перестраиваемых цифровых видеоконверторов [2] даст возможность осу-

щественно совместную работу с существующими узкополосными системами преобразования сигналов [3] и достигать оптимальный синтез полосы частот при корреляционной обработке, что особенно важно с учетом перспективы создания в рамках Международной РСДБ-службы по геодезии и астрометрии IVS глобальной сети VGOS (VLBI Global Observing System) [4]. Опыт разработки и эксплуатации систем преобразования сигналов (СПС) на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» показал необходимость создания на основе цифровой обработки сигналов гибкой и многофункциональной системы, способной обеспечить регистрацию сигналов как в режиме РСДБ, так и в радиометрическом режиме, а также возможность проведения спектральных наблюдений космических источников радиоизлучения [5, 6]. Это открывает перспективу оснащения такими универсальными высоконадежными и малогабаритными системами не только нового радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое», но и всех радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО».

Принципы построения и основные параметры системы

При проектировании МСПС были использованы основные принципы, уже опробованные при создании ШСПС для радиотелескопов РТ-13 [7]. К этим принципам относится размещение системы непосредственно на антенне, что дает возможность отказаться от использования недостаточно надежных и искажающих широкополосные сигналы длинных фидерных линий и передавать с выходов МСПС в аппаратное помещение радиотелескопа цифровые сигналы по волоконно-оптическим линиям. При этом используется стандартный высокоскоростной интерфейс 10 GE. Применение для цифровой обработки сигналов программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) позволяет реализовать непосредственно в МСПС функции анализа входных сигналов, контроля состояния и калибровки системы.

В отличие от разработанных ранее систем в основу МСПС положены следующие новые принципы:

- оцифровка и обработка сигналов с шириной полосы частот 1 ГГц на канал;
- поддержка различных радиоастрономических приемных систем;
- наличие единой универсальной аппаратной части для преобразования сигналов при любых видах радиоастрономических наблюдений;

— удаленное изменение функциональности системы с помощью перегружаемых «на лету» файлов конфигураций ПЛИС и программного обеспечения МСПС.

Все это позволяет системе работать в любом из следующих режимов:

— режим ШСПС: широкополосные каналы с полосой 512 или 1024 МГц;

— режим СПС: перестраиваемые цифровые видеоконверторы с полосами 2, 4, 8, 16 или 32 МГц. Совместимость с системами, используемыми IVS;

— режим полифазной фильтрации: разбивка входной полосы частот на равномерно расставленные каналы одинаковой ширины [8]. Совместимость с зарубежными системами DBBC и RDBE и концепцией VGOS;

— режим синтеза в широкой полосе частот: гибкая неравномерная расстановка узкополосных каналов одинаковой ширины в 12 каналах МСПС для каждой поляризации с учетом перспективной модернизации концепции VGOS;

— радиометрический режим: формирование модулирующего сигнала и измерение мощности на входе системы в каждом полупериоде модуляции;

— радиометрический режим со спектральной селекцией помех: формирование модулирующего сигнала и измерение мощности входного сигнала в каждом полупериоде модуляции с фильтрацией помех в частотной области;

— любой другой режим работы, для которого достаточно вычислительных ресурсов ПЛИС.

По своим параметрам МСПС не уступает перспективным зарубежным системам (см. таблицу), а по максимальной скорости цифровых потоков на выходе, числу каналов и многофункциональности — превосходит их.

Для повышения точностных характеристик системы в нее закладываются специальные функции калибровки. Из сигнала опорной частоты 100 МГц в МСПС формируется специальный калибровочный сигнал, с помощью которого между соседними сканами производится калибровка задержки широкополосного сигнала в канале МСПС. Это позволяет свести к минимуму ошибки определения групповой задержки сигнала из-за температурной нестабильности параметров

Таблица

Параметры перспективных систем преобразования сигналов

| Система Страна | DBBC3-L Италия | RDBE2 США | CDAS3 Китай | МСПС Россия |
|--|-------------------|--------------|----------------|----------------|
| Число широкополосных входов | 1–8 | 2 | 4 | до 24 |
| Полоса пропускания канала, МГц | 1024–4096 | 2048 | 1024 | 1024 |
| Диапазон входных частот, МГц | 0 – 4096 | 0 – 2048 | 1024–2048 | 0–3072 |
| Квантование, бит | 1, 2 или 8 | 2 | 1, 2 или 4 | 1, 2 или 8 |
| Формат выходных данных | VDIF (10GE) | VDIF (10GE) | VDIF (10GE) | VDIF (10GE) |
| Максимальная скорость выходного цифрового потока при 2-бит квантовании, Гбит/с | 64 | 16 | 16 | до 96 |
| Размещение на антенне | нет | нет | да | да |
| Доступность | доступен | 2018 г. | тестирование | 2019 г. |

системы. Кроме того, специальное устройство обеспечит измерение вариаций шкалы времени форматов данных МСПС относительно шкалы времени радиотелескопа, поддерживаемой высокостабильным водородным стандартом частоты. Результаты этих измерений будут учитываться при последующей обработке данных РСДБ-наблюдений, что позволяет уменьшить инструментальную ошибку определения задержки.

Структура и конструкция МСПС

Система имеет модульную структуру и содержит до 12 двухканальных цифровых преобразователей сигналов (ЦПС), модуль синхронизации и модуль управления, объединенные через кросс-плату (рис. 1).

Каждый модуль ЦПС содержит плату сопряжения, двухканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), ПЛИС со встроенным процессором, электронно-оптические трансиверы и ряд вспомогательных устройств (рис. 2). Плата сопряжения является аналоговым устройством, выполняющим функции усиления и фильтрации сигналов.

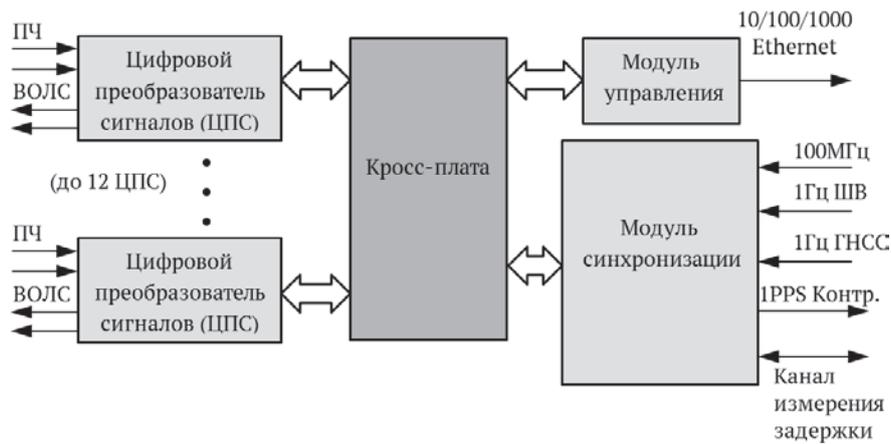


Рис. 1. Структура МСПС

Поступающие на ее входы сигналы промежуточных частот (ПЧ) от радиоприемных устройств усиливаются и ограничиваются по полосе частот, чтобы обеспечить оптимальные параметры аналого-цифрового преобразования. Выбором соответствующей съемной платы сопряжения обеспечивается совместимость МСПС с различными радиоприемными устройствами, которые могут отличаться как полосой ПЧ, так и уровнем сигнала. Для работы с 3-диапазонной приемной системой [9] плата сопряжения содержит два канала с аттенюаторами и полосовыми фильтрами 1–2 ГГц. Для работы с широкополосной приемной системой [10] используется плата сопряжения, в которой входной сигнал ПЧ (1–3 ГГц) разветвляется на каналы с полосами пропускания 1–2 ГГц и 2–3 ГГц. После платы сопряжения и АЦП сигналы поступают в ПЛИС, где осуществляется их обработка. Алгоритм производимой в ПЛИС цифровой обработки сигналов задается используемым конфигурационным файлом в зависимости от программы выполняемых радиоастрономических наблюдений. Этот файл может выбираться из имеющегося набора во встроенной памяти или загружаться по сети с управляющего компьютера.

Модуль синхронизации обеспечивает формирование и распределение сигналов синхронизации между ЦПС. Для формирования тактовых сигналов ПЛИС (256 МГц) и АЦП (2048 МГц) используется поступающий от системы частотно-временной синхронизации (СЧВС) радиотелескопа [11] сигнал опорной частоты 100 МГц. Внутренние часы МСПС, обеспечивающие все ЦПС секундными метками (сигнал 1PPS на рис. 2), синхронизируются от СЧВС с помощью сигнала 1 Гц ШВ.

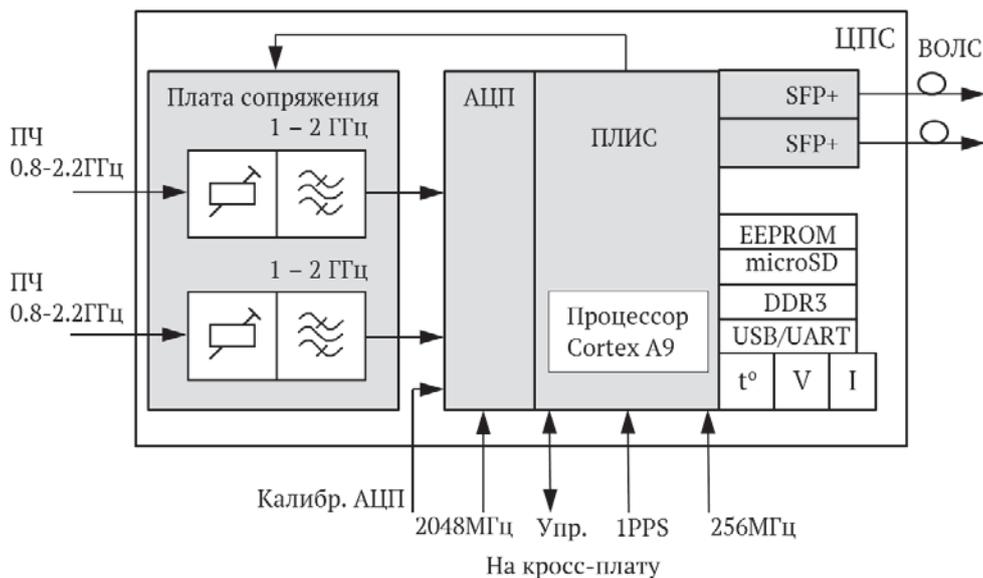


Рис. 2. Модуль ЦПС

Для контроля часов МСПС в модуле синхронизации реализован измеритель задержки, постоянно контролирующей их расхождение с метками времени часов радиотелескопа (сигнал 1 Гц ШВ) и метками времени от установленного в обсерватории ГНСС приемника (сигнал 1 Гц ГНСС). Кроме того, модуль синхронизации позволяет по отдельному измерительному каналу контролировать как внутренние вариации шкалы времени, вызванные, например, температурной нестабильностью в оборудовании, так и вариации входного сигнала опорной частоты.

Модуль управления связан с центральным управляющим компьютером радиотелескопа по стандартному интерфейсу Ethernet через локальную сеть радиотелескопа. Модуль осуществляет управление всеми узлами МСПС, загрузку необходимых конфигурационных файлов ПЛИС и встроенных процессоров, логирование и передачу необходимой контрольной информации.

Конструкция МСПС обеспечивает размещение системы в подвижной части антенны, в виде съемного модуля, устанавливаемого в стойку. Поэтому формат конструктива МСПС выбран в виде экранированного высоконадежного шасси типа EuroPRO 19" высотой 3U. С учетом системы охлаждения габаритные размеры системы составляют $483 \times 177 \times 300$ мм. Масса МСПС в полном оснащении не должна превышать 20 кг.

Синхронизация сигналов в МСПС

Синхронизация сигналов при их преобразованиях в МСПС, выравнивание задержек в каналах системы и их учет чрезвычайно важен для достижения предельных точностей РСДБ-измерений. Момент фиксации принимаемого радиотелескопом сигнала зависит от момента прихода на АЦП фронта тактового сигнала. Поэтому вариации задержки тактового сигнала, как за счет внутренних (в основном, температурных), так и за счет внешних факторов, приводят к прямым ошибкам радиоинтерферометрических измерений. Для повышения температурной стабильности тактового генератора (синтезатора частот) в МСПС при его разработке использованы специальные схемные и конструктивные решения. Конструкция модуля синхронизации и МСПС в целом обеспечивает выравнивание задержек сигналов в каналах системы. Оставшиеся неустранимыми колебания задержки тактовых сигналов АЦП измеряются с помощью специального калибровочного сигнала, который формируется на кросс-плате из сигнала опорной частоты 100 МГц, поступающего от СЧВС, и распределяется между всеми каналами системы вместе с сигналами синхронизации. Не охваченные измерительным контуром задержки учитываются по измеренным при настройке оборудования температурным коэффициентам и данным, получаемым с датчиков температуры.

Для контроля стабильности тактовой частоты АЦП относительно часов радиотелескопа используется отдельный измерительный канал, состоящий из двух измерительных устройств и связывающего их коаксиального кабеля. Одна часть измерителя (ведомая) расположена в модуле синхронизации, а другая (опорная) — в подвальном помещении (эталонной) вблизи от водородного стандарта, где поддерживается постоянная температура и сигнал опорной частоты можно считать наиболее стабильным. Каждая из частей измерителя передает другой измерительный сигнал и вычисляет задержку принимаемого сигнала относительно переданного. При этом сдвиг фронта тактового сигнала одной из частей измерителя приведет к соответствующему изменению задержки формируемого измерительного сигнала, что в свою очередь проявится в разнонаправленном изменении наблюдаемых задержек в опорной и ведомой частях измерителях. С другой стороны, изменение задержки в самом кабеле приведет к однонаправленному изменению получаемых задержек. Таким образом, благодаря использованию двухпутевого метода измерений удастся практически исключить влияние на результат измерений вариаций задержки в кабеле.

Заключение

Разрабатываемая система учитывает основные тенденции развития радиоастрономической аппаратуры, в частности: полностью цифровая обработка сигнала, значительное расширение регистрируемой полосы частот и многофункциональность. Заложенные в МСПС функции измерения и калибровки внутренних задержек в настоящий момент не реализованы ни в одном из существующих аналогов, тогда как в самое ближайшее время они будут крайне необходимы для выхода на пикосекундные точности РСДБ-измерений. Завершение разработки и изготовление первого опытного образца МСПС планируется в 2019 году. Он будет установлен и введен в эксплуатацию на радиотелескопе РТ-13 в обсерватории «Светлое». В дальнейшем планируется оснащение такими системами всех радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО», что существенно расширит чувствительность и возможности как радиотелескопов РТ-32, так и РТ-13.

Литература

1. *Ипатов А. В.* Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // *Успехи физических наук.* — М.: Наука, 2013. — Т. 183, № 7 — С. 769–777.
2. Grenkov S., Marshalov D., Nosov E. Extending the Facilities of BRAS by External Digital Downconverter Bank // *Труды ИПА РАН.* — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып. 41. — С. 65–68.
3. *Гренков С. А., Носов Е. В. и др.* Цифровая радиоинтерферометрическая система преобразования сигналов / Гренков С. А., Носов Е. В., Федотов Л. В., Кольцов Н. Е. // *Приборы и техника эксперимента.* М.: Наука, 2010. — № 5. — С. 60–66.
4. *Nothnagel A., Behrend D. et al.* Strategic Plan of the IVS for the Period 2016 — 2025 / Nothnagel A., Behrend D., Bertarini A., Charlot P., Combrinck L., Gipson J., Himwich E., Haas R., Ipatov A., Kawabata R., Lovell J., Ma C., Niell A., Petrachenko B., Schuler T., Wang G. // *IVS 2016 General Meeting Proceeding.* Ekudeni (Johannesburg), South Africa, March 13–17, 2016. — USA: NASA, Goddard Space Flight Center, 2016. — P. 3–11.
5. *Носов Е. В.* Модернизация тракта преобразования сигналов на радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» // *Труды ИПА РАН.* — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 32. — С. 34–47.
6. *Носов Е. В., Кольцов Н. Е. и др.* Многофункциональный цифровой преобразователь радиоастрономических сигналов с полосой 512 МГц / Носов Е. В., Кольцов Н. Е., Гренков С. А., Федотов Л. В. // *Приборы и техника эксперимента.* — М.: Наука, 2017. — № 2. — С. 49–56.

7. Федотов Л. В., Кольцов Н. Е. и др. Система преобразования сигналов S/X диапазона волн для радиоинтерферометра оперативного мониторинга Всемирного времени / Федотов Л. В., Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В. // Приборы и техника эксперимента. — М.: Наука, 2013. — № 3. — С. 101–108.

8. Гренков С. А., Федотов Л. В. Цифровая система преобразования сигналов с полифазной фильтрацией // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 33. — С. 38–51.

9. Иванов Д. В., Мардышкин В. В. и др. Трехдиапазонная приемная система радиотелескопов с малыми антеннами / Иванов Д. В., Мардышкин В. В., Лавров А. С., Евстигнеев А. А. // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 197–203.

10. Евстигнеев А. А., Евстигнеева О. Г. и др. Результаты разработки сверхширокополосной приемной системы радиотелескопа РТ-13 / Евстигнеев А. А., Евстигнеева О. Г., Лавров А. С., Мардышкин В. В., Поздняков И. А., Хвостов Е. Ю. // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 35. — С. 98–103.

11. Царук А. А., Вытнов А. В. и др. Методы обеспечения опорной частотой аппаратуры радиотелескопа / Царук А. А., Вытнов А. В., Иванов Д. В. // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 32. — С. 71–76.

Development of Multifunctional Digital Backend for Radio Telescopes

**D. A. Marshalov, E. V. Nosov, S. A. Grenkov, A. S. Berdnikov,
L. V. Fedotov**

This paper presents the construction principle, structure and basic parameters of the Multifunctional Digital BackEnd (MDBE). MDBE is intended to equip the new radio telescope RT-13 of the «Svetloe» observatory first of all and other radio telescopes of the «Quasar» VLBI network afterwards. The system can include up to 24 broadband channels with 1024 MHz bandwidth. It is placed on the antenna and supports all the VLBI observation modes required, as well as radiometric modes and spectral observations. A number of functions are implemented in the system for calibration of instrumental delays and synchronization control in order to improve accuracy of the VLBI observations.

Keywords: radio telescope, data acquisition system, digital backend, digital signal processing, VLBI.