

Универсальная цифровая система обработки сигналов для радиотелескопов

© Д. А. Маршалов, С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов, Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Для радиоастрономических наблюдений в России используются радиотелескопы с антеннами разного диаметра, в том числе 32- и 13.2-метровые радиотелескопы РТ-32 и РТ-13 комплекса «Квазар-КВО». Эти радиотелескопы оснащены научной аппаратурой, используемой для проведения наблюдений: высокочувствительными радиоастрономическими приемными системами, рассчитанными на разные диапазоны частот и полосы промежуточных частот, системами преобразования, обработки и регистрации сигналов. Для работы в составе радиоинтерферометра со сверхдлинными базами для радиотелескопов РТ-32 разработаны и используются до сих пор узкополосные полуцифровые системы обработки сигналов Р1002М, для РТ-13 применяются широкополосные цифровые системы. Радиометрические и спектральные наблюдения выполняются с использованием специально разработанных цифровых систем регистрации.

В ИПА РАН была разработана многофункциональная система преобразования сигналов на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей. Это позволило на ее основе создать универсальную цифровую систему обработки сигналов для радиотелескопов. Рабочий диапазон системы в 0–2 ГГц обеспечивает совместимость по диапазонам промежуточных частот, а наличие до 12 широкополосных каналов позволяет независимо обрабатывать сигналы, поступающие с выходов радиоастрономических приемных устройств. Возможность регистрации сигналов в широких полосах 512, 1024 или 2048 МГц повышает чувствительность радиотелескопа, а в случае использования антенн малого диаметра дает возможность сохранить приемлемое для наблюдений отношение сигнал/шум. Режим регистрации 16 независимо перестраиваемых узкополосных (0.5–32 МГц) частотных каналов внутри рабочей полосы частот обеспечивает сопряжение с существующими системами, дает возможность установки специальных настроек и может быть использован при организации наблюдений КА и ИСЗ. Стандартный формат данных и выходной интерфейс 10/40GE дают возможность сопряжения с любыми системами регистрации и буферизации данных. Созданная система способна работать в режимах радиометрической регистрации и спектральных наблюдений. Она подходит для любых радиотелескопов, независимо от размеров антенны и типа радиоприемного оборудования, способна заменить на радиотелескопе всю аппаратуру обработки сигналов и обеспечить их регистрацию данных большинства радиоастрономических наблюдений.

Опытные образцы разработанной системы установлены на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 в обсерваториях «Светлое» и «Зеленчукская» и уже участвуют в различных радиоастрономических наблюдениях. В статье подведены итоги создания универсальной цифровой системы для радиотелескопов. Приведены параметры и варианты исполнения системы. Рассмотрены алгоритмы и конфигурация программируемых логических интегральных схем для всех режимов работы системы. Представлены некоторые результаты ее использования на радиотелескопах.

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

Контакты для связи: Маршалов Дмитрий Александрович (marshalov@iaaras.ru).

Для цитирования: Д. А. Маршалов, С. А. Гренков, Н. Е. Кольцов, Л. В. Федотов. Универсальная цифровая система обработки сигналов для радиотелескопов // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 71. С. 9–17.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.71.9-17>

Universal Digital Signal Processing System for Radio Telescopes

D. A. Marshalov, S. A. Grenkov, N. Ye. Koltsov, L. V. Fedotov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

For radio astronomy observations, radio telescopes with different diameters antennas are used, for example, RT-32 and RT-13 of the Quasar VLBI Network. These radio telescopes are equipped with various scientific equipment used for observations: highly sensitive radio astronomical receiving systems designed for different frequency ranges and intermediate frequency bands, data acquisition, processing and recording systems. To operate as part of a radio interferometer with very large bases (VLBI) for RT-32 radio telescopes, narrow-band semi-digital signal processing systems R1002M have been developed and are still used, for RT-13 wide-band digital systems are used. Radiometric and spectral observations are carried out using specially designed digital registration systems.

The IAA RAS has developed the Multifunctional Digital Backend (MDBE) system based on programmable logic integrated circuits (FPGAs) and high-speed analog-to-digital converters. This made it possible to design a universal digital

signal processing system for radio telescopes on its basis. The operating range of the system in 0 - 2 GHz ensures compatibility in the ranges of intermediate frequencies, and the availability of up to 12 broadband channels allows you to independently process signals from the outputs of radio astronomy receivers. The possibility of recording signals in wide bands of 512, 1024, or 2048 MHz increases the sensitivity of the radio telescope, and in the case of using small-diameter antennas, it makes it possible to maintain a signal-to-noise ratio acceptable for observations. The registration mode of 16 independently tunable narrow-band (0.5–32 MHz) frequency channels within the operating frequency band provides interfacing with the existing systems, making it possible to set special settings, as well as providing the possibility to make spacecraft and satellite observations. The standard data format and 10/40GE output interface make it possible to interface with any data recording and buffering systems. The created system is capable of operating in the modes of radio-metric registration and spectral observations. It is suitable for any radio telescope, regardless of the size of the antenna and the type of radio receiving equipment, it is able to replace all signal processing equipment on the radio telescope and ensure their registration of data from most radio astronomical observations.

Experimental prototypes of the developed system have been installed on the RT-13 and RT-32 radio telescopes at the Svetloe and Zelenchukskaya observatories and are already participating in various radio astronomical observations. The paper summarizes the results of the developing of a universal digital system for radio telescopes. The parameters and variants of the system are given. Algorithms and FPGA configuration for all operating modes of the system are considered. Some results of its use on radio telescopes are presented.

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

Contacts: Dmitry A. Marshalov (marshalov@iaaras.ru).

For citation: Marshalov D. A., Grenkov S. A., Koltsov N. Ye., Fedotov L. V. Universal digital signal processing system for radio telescopes // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 71. P. 9–17.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.71.9-17>

Введение

Для радиоастрономических наблюдений в России используются радиотелескопы с антеннами разного диаметра, в том числе РТ-32 и РТ-13 в РСДБ-комплексе «Квазар-КВО» ([Shuygina et al., 2019](#)). Ведутся работы по созданию компактных передвижных радиотелескопов с антеннами диаметром 2–4 м ([Зотов и др., 2019](#)). Эти радиотелескопы оснащаются различной научной аппаратурой, используемой для проведения наблюдений: высокочувствительными радиоастрономическими приемными системами, рассчитанными на разные диапазоны частот и полосы промежуточных частот, системами преобразования, обработки и регистрации сигналов. Для работы в составе радиоинтерферометра со сверхдлинными базами для радиотелескопов РТ-32 разработаны и используются до сих пор узкополосные полуцифровые системы обработки сигналов Р1002М, для РТ-13 применяются широкополосные цифровые системы. Радиометрические и спектральные наблюдения выполняются с использованием специально разработанных цифровых систем регистрации.

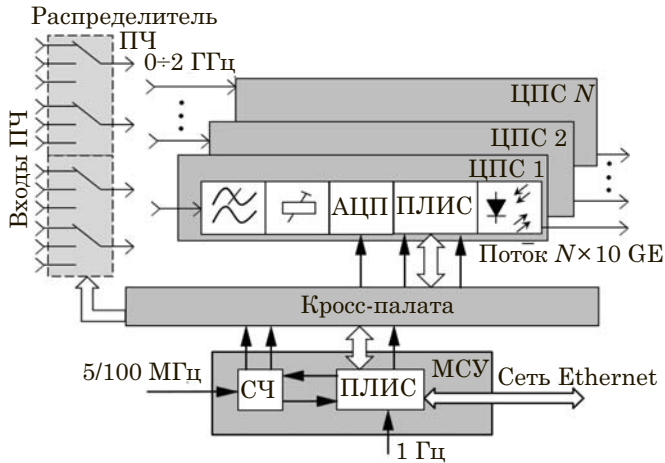
После создания многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов (МСПС) в ИПА РАН ([Nosov et al., 2021](#)) на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) появилась возможность унифицировать аппаратуру радиотелескопа, подключаемую к выходам приемной системы. МСПС подходит для большинства существующих радиотелескопов, независимо от размеров антенны и типа радиоприемного оборудования. Она способна заменить на радиотелескопе практически всю аппаратуру

обработки сигналов и обеспечить их регистрацию для большинства радиоастрономических наблюдений. Для этого были разработаны конфигурации (прошивки) ПЛИС для каналов МСПС, обеспечивающие работу системы не только в режиме РСДБ, но и в режиме радиометрической регистрации сигналов, либо в режиме спектральных наблюдений, в том числе с селекцией и исключением помех. Эта задача была успешно решена в ИПА РАН в 2020–2022 гг.

В статье подведены итоги создания МСПС, рассмотрены принципы ее работы в различных режимах: РСДБ с широкополосными каналами 2048, 1024 или 512 МГц; РСДБ с 16 узкополосными каналами 0.5–32 МГц внутри каждого широкополосного; режим радиометрической регистрации сигналов с селекцией помех и режим спектральных наблюдений. Приведены соответствующие алгоритмы, реализованные в прошивках ПЛИС, параметры и особенности конструкции системы для радиотелескопов РТ-13 и РТ-32, а также результаты использования МСПС в реальных радиоастрономических наблюдениях.

МСПС как универсальная система цифровой обработки сигналов для радиотелескопов

МСПС создана по модульному принципу (рис. 1) и помимо вентиляторного блока содержит объединенные через кросс-плату съемные кассеты модулей цифрового преобразования сигналов (ЦПС), а также модуль синхронизации и управления (МСУ) ([Nosov et al., 2021](#)). Модули питания размещены внутри основного шасси (системного) блока. В основной конфигурации (рис. 2), предназначенной для радиотелескопов РТ-13, система может содержать до 12 ЦПС — каналов цифровой



ЦПС — модуль цифрового преобразователя сигналов;
 АЦП — аналого-цифровой преобразователь;
 ПЛИС — программируемая логическая интегральная
 схема; СЧ — синтезатор частот

Рис. 1. Структура МСПС

обработки сигналов, каждый из которых включает в себя АЦП и ПЛИС. Для радиотелескопов РТ-32 достаточно четырех ЦПС, обеспечивающих захват и обработку сигналов промежуточных частот (ПЧ), поступающих от радиоастрономической приемной системы в диапазоне 100–1000 МГц. Для обеспечения выбора сигналов ПЧ от десяти приемников пяти частотных диапазонов (L, S, C, X и K) двух поляризацій в такой МСПС используются две кассеты распределителей сигналов ПЧ. На МСУ поступают сигналы опорной частоты 5, 10 или 100 МГц, а также метки времени 1 Гц от системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа. Сигналы тактовых частот (4096 МГц и 256 МГц)



Рис. 2. Общий вид 8-канальной МСПС

формируются в синтезаторе частоты МСУ и через кросс-плату распределяются по всем ЦПС. Управление системой осуществляет центральный компьютер управления радиотелескопом по внутренней сети Ethernet. Основные параметры МСПС приведены в таблице.

Среди факторов, определяющих универсальность этой системы, следует отметить:

— диапазон рабочих частот 0–2 ГГц, который включает практически все диапазоны ПЧ радиоастрономических приемных устройств;

— наличие до 12 широкополосных каналов ЦПС, которые могут быть использованы для формирования различных комбинаций для одновременной регистрации сигналов от нескольких приемников, т. н. частотный синтез полосы;

— режим регистрации 16 независимо перестраиваемых узкополосных (0.5–32 МГц) частотных каналов внутри рабочей полосы частот ЦПС, что обеспечивает сопряжение с существующими системами, а также дает возможность установки специальных настроек, может быть использовано при организации наблюдений КА и ИСЗ;

Таблица

Основные параметры МСПС

Параметр	Значение
Число каналов – модулей ЦПС	До 12
Частота дискретизации сигналов в АЦП	4096 МГц
Входная полоса частот	2 ГГц
Максимальная мощность сигнала на входе	0 дБм
Входной аттенюатор	диапазон: 0..31.75 дБ; шаг перестройки: 0.25 дБ
Выходной интерфейс	10 GbE SFP+
Формат данных	VDIF
Суммарная скорость выходного информационного потока	До 96 Гбит/с
Память в каждом модуле	512 МВ (DDR3),
Интерфейс управления	10/100/1000 Ethernet
Входные сигналы синхронизации	5, 10 или 100 МГц, 1 Гц
Контрольные выходы	Контроль 1PPS,
Масса	Контроль модуляции внешнего генератора шума
Габариты	15 кг (для 8-канальной версии)
Потребляемая мощность	48 × 35 × 18 см 440 Вт от сети 220 В

— режимы регистрации сигналов в полосах 512, 1024 или 2048 МГц, которые повышают чувствительность радиотелескопа, а в случае использования антенн малого диаметра дают возможность сохранить приемлемое для наблюдений отношение сигнал/шум;

— стандартный формат данных VDIF и современный выходной интерфейс 10/40GE упрощают сопряжения с системами регистрации и буферизации данных;

— совмещение в единой системе функций радиометрической регистрации и спектральных наблюдений позволяет минимизировать состав оборудования.

Универсальность системы в части используемых алгоритмов обработки поступающих на ее вход сигналов достигнута за счет реализованной возможности в МСПС оперативной смены алгоритма работы путем загрузки в ПЛИС соответствующей битовой конфигурационной карты (прошивки).

Алгоритмы цифровой обработки сигналов в различных режимах работы МСПС

Прошивки ПЛИС в каналах МСПС для любого режима работы имеют одинаковую логическую

структуру (рис. 3). Эта структура включает в себя три основных программных блока:

— основной блок, обеспечивающий синхронизацию и демультимплицирование четырех параллельных цифровых потоков, поступающих в ПЛИС от АЦП, а также цифровую обработку параллельно 16 цифровых выборок сигнала;

— измерительный блок, обеспечивающий контроль переполнения и калибровку АЦП, а также измерение параметров сигнала, включая выделение сигнала фазовой калибровки (СФК);

— блок управления, содержащий модули, которые обеспечивают связь с компьютером, прямой доступ к памяти (ПДП), а также системные часы и встроенный в ПЛИС процессор.

Цифровая обработка сигналов в режиме широкополосной регистрации при РСДБ с полосами частот в каждом канале 2048, 1024 или 512 МГц заключается в 2-битовом квантовании, VDIF форматировании квантованных сигналов и формировании кадров Ethernet для передачи их на выход через встроенный контроллер 10GE (рис. 4). В случае обработки сигналов в полосах 1024 МГц или 512 МГц предварительно производится преобразование с понижением частоты, а также выбор заданной полосы частот.

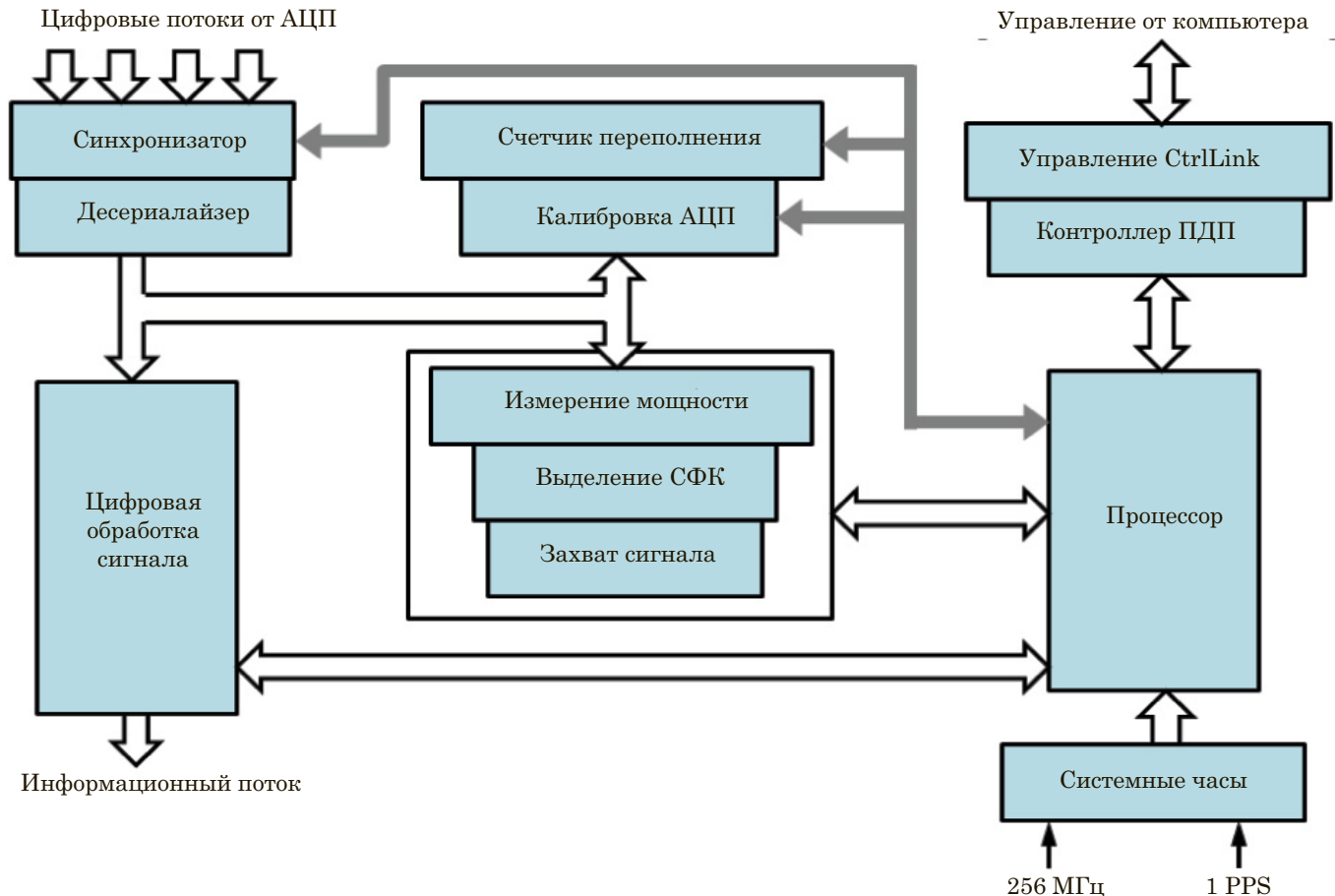


Рис. 3. Логическая структура прошивки ПЛИС

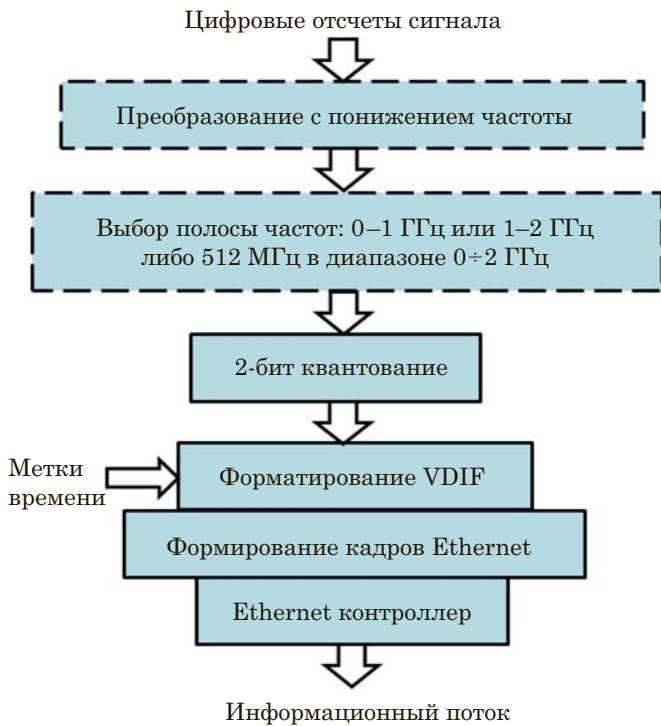


Рис. 4. Алгоритм цифровой обработки сигналов в режиме РСДБ с широкополосной регистрацией

В режиме РСДБ с узкополосной регистрацией сигналов для формирования 16 узкополосных каналов внутри каждого широкополосного канала после преобразования с понижением частоты и разбиения входного диапазона частот на поддиапазоны осуществляется коммутация сигналов на цифровые видеоконверторы, настроенные на заданные частоты (рис. 5). В каждом цифровом видеоконвертере спектр сигнала переносится в область видеочастот с разделением на верхнюю и нижнюю боковые полосы. После этого сигнал квантуется, форматируется и поступает на контроллер Ethernet.

При использовании канала МСПС в качестве модуля регистрации сигналов при наблюдениях в спектральных линиях спектр входного сигнала разделяется преселектором на несколько частично перекрывающихся частотных каналов с соответствующим понижением тактовой частоты (рис. 6). Из выбранного коммутатором канала с помощью цифрового видеоконвертора выделяется регистрируемый сигнал, спектр которого вычисляется методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Синхронно с циклами вычисления мгновенных спектров формируется меандр модулирующей частоты, который поступает на радиоприемную систему радиотелескопа для модуляции встроенного генератора шума. «Мгновенные» спектры, вычисленные на разных полупериодах модуляции, усредняются в накопителе спектров и передаются на компьютер для дальнейшей обработки.

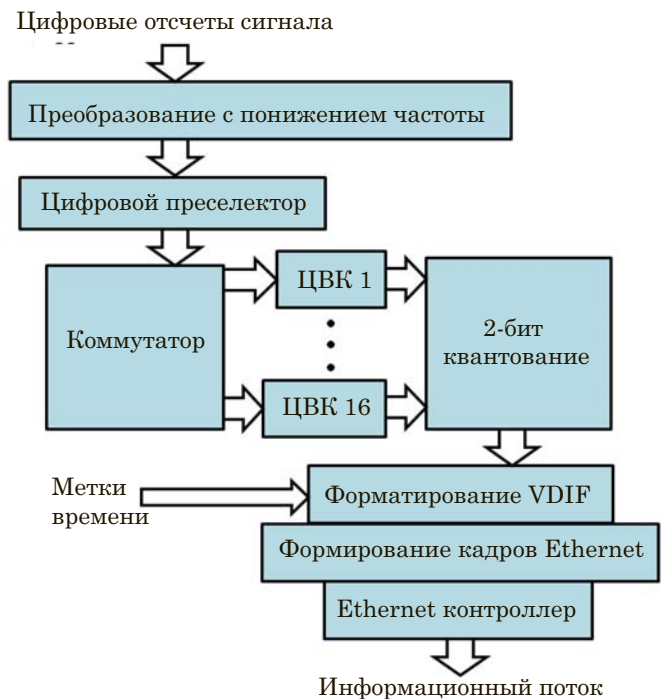


Рис. 5. Алгоритм цифровой обработки сигналов в режиме РСДБ с узкополосной регистрацией

Для регистрации сигналов при радиометрических наблюдениях в ПЛИС вычисляется дисперсия сигнала 4000 раз/с (рис. 7). Значения дисперсии синхронно с метками времени 1PPS поступают в процессор для вычисления мощности сигнала. Мощность может вычисляться как при регистрации в режиме полной мощности, так и в модуляционном режиме. Вычисленные значения мощности поступают в центральный управляющий компьютер радиотелескопа по запросу от него.

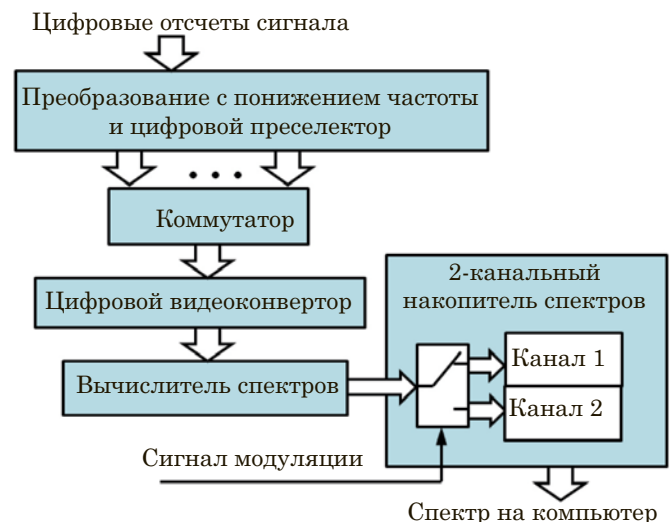


Рис. 6. Алгоритм цифровой обработки сигналов в режиме регистрации при спектральных наблюдениях



Рис. 7. Алгоритм цифровой обработки сигналов в режиме радиометрической регистрации

Каналы МСПС могут использоваться для регистрации сигналов в режиме спектрально-селективного радиометра с исключением помех. Для этого после преобразования с понижением тактовой частоты и выбора полосы частот в преселекторе цифровые сигналы поступают на несколько параллельно работающих вычислителей БПФ (рис. 8). Число таких вычислителей может быть 16, 8 или 4 для полос 2048 МГц, 1024 МГц или 512 МГц соответственно. При работе во всем диапазоне входных частот 0–2048 МГц выбор полосы не используется и сигналы после демультимплексирования сразу поступают на вычислители спектров. Из вычисленных спектров по алгоритму Кули-Тьюки ([Blahut, 1985](#)) формируются мгновенные спектры мощности сигнала, которые накапливаются на четных и нечетных полупериодах модуляции отдельно. Предусмотрена также возможность работы в режиме измерения полной мощности без модуляции. Накопленные спектры передаются на компьютер, где производится обнаружение, селекция и исключение помех при радиометрических измерениях.

Для управления работой МСПС во всех режимах было разработано специальное программное обеспечение (ПО) компьютера, которое затем было интегрировано в структуру ПО центрального управляющего компьютера радиотелескопа. Таким образом, оператору радиотелескопа представлен графический интерфейс, который наглядно отображает все параметры МСПС, включает ряд функций ручного управления, а также содержит средства диагностики системы. Более подробно ПО управления МСПС и интерфейс пользователя описаны в отдельной статье ([Маршалов и др., 2022](#)).



Рис. 8. Алгоритм цифровой обработки сигналов при их регистрации в режиме спектрально-селективного радиометра

Практическое применение МСПС на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО»

В сентябре 2020 г. опытный образец 8-канальной МСПС был введен в эксплуатацию на радиотелескопе РТ-13 в обсерватории «Светлое». Это позволило подключить указанный радиотелескоп к регулярным РСДБ-наблюдениям по мониторингу Всемирного времени, проводившимся раньше только на двух радиотелескопах РТ-13 (в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары») с широкополосной регистрацией сигналов. При этом МСПС продемонстрировала полную совместимость с указанными штатными широкополосными системами при регистрации сигналов в полосе 512 МГц. Стандартный результат обработки наблюдений в ЦКО ИПА РАН приведен на рис. 9, полученное в течение трех месяцев значение СКО определения Всемирного времени для трехстанционных наблюдений составило 19.3 мкс.

В 2021 г. с использованием опытного образца МСПС, работающего на РТ-13 в режиме РСДБ с узкополосными каналами (32 МГц), были успешно проведены экспериментальные радиолокационные наблюдения Луны ([Bondarenko et al., 2022](#)). В ходе этих экспериментов 35-метровая антенна DSA 3 станции MALARGÜE (MLG) Европейского космического агентства в Аргентине облучала

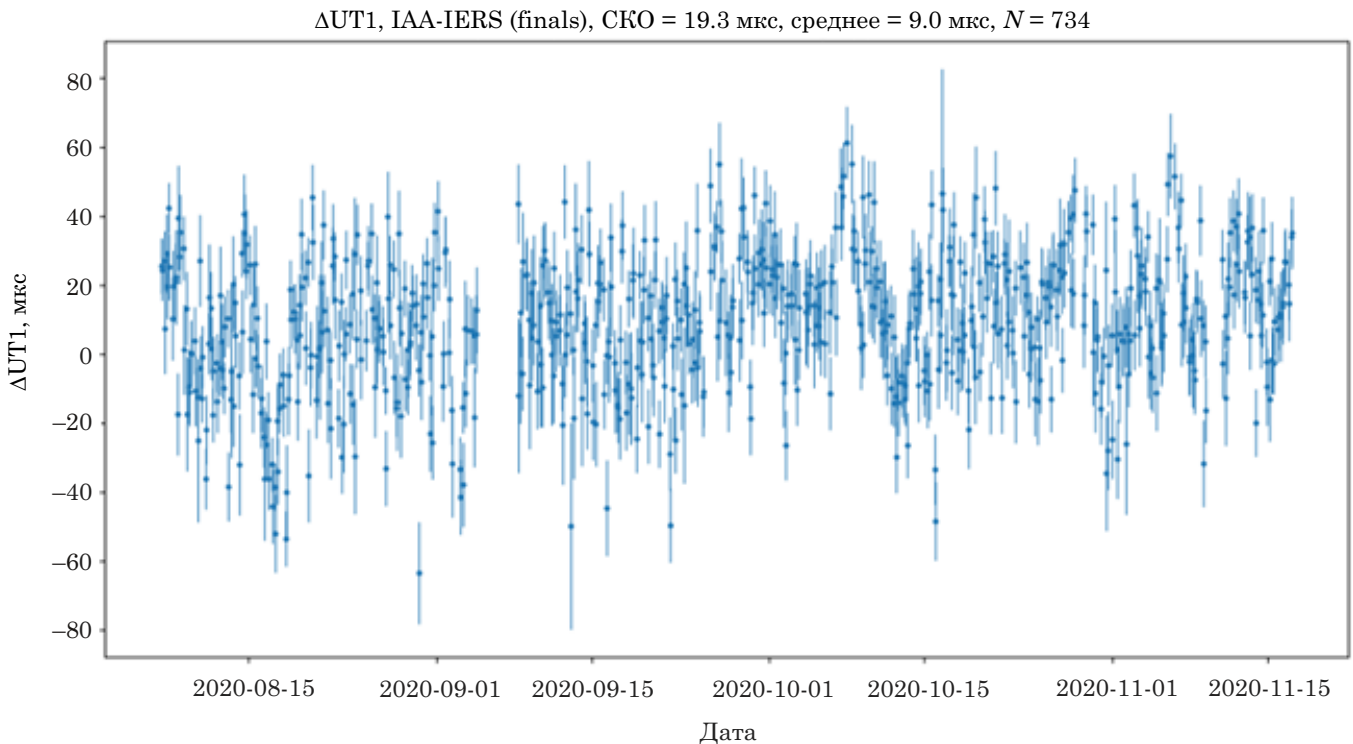


Рис. 9. Погрешности результатов определения Всемирного времени при обработке данных сессий РСДБ-наблюдений на РТ-13 с участием МСПС в августе – ноябре 2020 г.

заданный участок поверхности Луны модулированным псевдослучайной последовательностью сигналом на частоте 7190 МГц. Радиотелескоп РТ-13 в обсерватории «Светлое» принимал отраженный от лунной поверхности сигнал, который регистрировался с помощью МСПС, а полученные данные передавались по оптическим линиям связи из обсерватории на сервер Центра обработки данных ИПА РАН в Санкт-Петербурге. В результате были получены радиолокационные изображения областей Апеннин и Моря Ясности на длине волны 4.2 см с разрешением порядка 75 м.

В 2022 г. 4-канальный опытный образец МСПС, включающий в себя распределители ПЧ (рис. 1) был установлен на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое» и подключен параллельно штатной узкополосной аппаратуре преобразования сигналов. Это позволило проводить регулярные наблюдения для исследования совместимости МСПС со штатными узкополосными системами при РСДБ-наблюдениях. Результаты обработки РСДБ-наблюдений на сеансах ru3973 и ru0884 показали, что МСПС способна полностью заменить штатные узкополосные системы Р1002М на радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО».

Радиометрический режим, реализующий принцип спектрально-селективного помехозащищенного радиометра, широко используется при исследованиях переменностей широкополосного космического радиоизлучения, а также при мониторинге шкал потоков опорных радиоисточников. Для это-

го особенно эффективно использование МСПС, что и показали наблюдения на РТ-32 в обсерватории «Светлое». Использование МСПС дало возможность проводить радиометрические наблюдения даже в том случае, когда обычными методами в режиме измерения полной мощности без селекции помех регистрация сигналов была практически невозможна (рис. 10). Кроме того, в обсерватории «Светлое» МСПС успешно заменила используемый ранее БПФ-спектрометр на базе Р1002М. Это позволило только в январе – марте 2023 г. успешно провести уже 6 сеансов наблюдений в спектральных линиях, а также провести совместные спектральные наблюдения в обсерваториях «Светлое» и «Зеленчукская» (рис. 11).

В 2023 г. опытные образцы МСПС были установлены на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 в обсерватории «Зеленчукская». На антенне РТ-13 8-канальный образец МСПС заменил штатную широкополосную систему ШСПС. На радиотелескопе РТ-32 был установлен 4-канальный МСПС параллельно со штатной системой преобразования сигналов Р1002М. Система находится на этапе экспериментальной эксплуатации, пока выполняется модернизация системы частотно-временной синхронизации.

До конца года планируется завершение работ по вводу МСПС в эксплуатацию в обсерватории «Зеленчукская», а также установка таких систем на радиотелескопах обсерватории «Бадарь». Всего с начала эксплуатации на радиотелескопах опытные

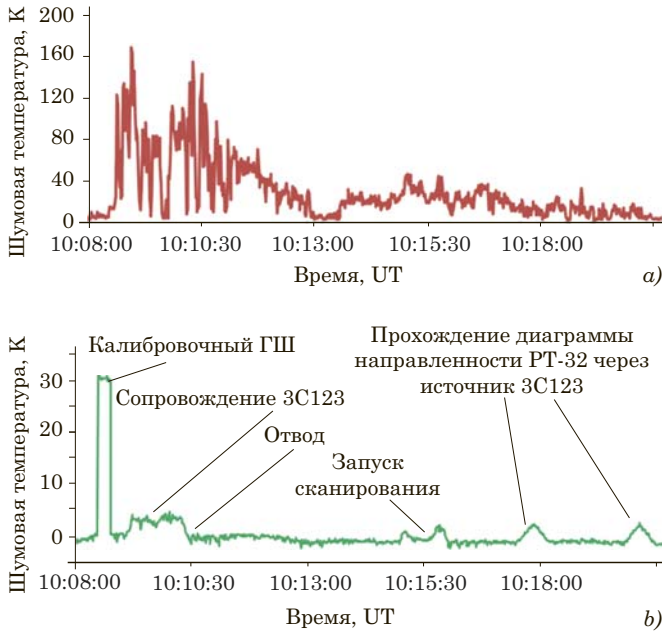
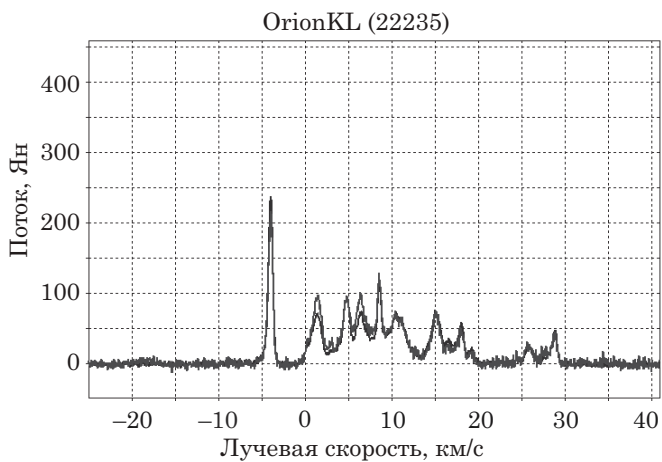


Рис. 10. Результаты радиометрических наблюдений источника 3C123 в S-диапазоне 5 мая 2022 г. на РТ-32 в обсерватории «Светлое»: а) регистрация в режиме измерения полной мощности и б) в режиме селекции помех МСПС



Ch1 Info: UT = 27.04.2023 12:45:09; время накопл.: 370 с
Ch2 Info: UT = 27.04.2023 12:45:09; время накопл.: 370 с

Рис. 11. Спектр источника W3OH, полученный с помощью МСПС при наблюдениях на РТ-32 в обсерватории «Зеленчукская» в диапазоне 1.35 см 27.04.2023

образцы МСПС участвовали уже в нескольких тысячах сеансов различных радиоастрономических наблюдений.

Заключение

В ИПА РАН создана многофункциональная система преобразования сигналов МСПС, которая по функциональности и совокупности своих параметров может считаться универсальной цифровой системой обработки сигналов для радиотелескопов. МСПС по диапазону рабочих частот и уровню сигнала сопрягается практически с любыми ра-

диоастрономическими приемными устройствами, размещается непосредственно на антенне радиотелескопа и может содержать до 12 каналов цифровой обработки сигналов. Созданные алгоритмы обработки сигналов и соответствующие прошивки ПЛИС, которые позволяют МСПС поддерживать режимы РСДБ с широкополосной регистрацией сигналов в полосе 512, 1024 или 2048 МГц, регистрации 16 узкополосных частотных каналов 0.5–32 МГц внутри каждого широкополосного, а также режимы радиометрической регистрации и спектральных наблюдений.

На двух радиотелескопах РТ-13 (в обсерваториях «Светлое» и «Зеленчукская») 8-канальные МСПС уже введены в эксплуатацию и обеспечивают регистрацию данных наблюдений. Опытные образцы МСПС в 4-канальном варианте исполнения установлены на радиотелескопах РТ-32 в обсерваториях «Светлое» и «Зеленчукская» и находятся на этапе в экспериментальной эксплуатации. Выполняется отладка программ управления и режимов работы системы. На основе результатов тестирования определяются требования и состав оборудования, необходимый для штатной эксплуатации МСПС.

Положительные результаты работы МСПС во всех режимах радиоастрономических наблюдений подтвердили целесообразность и эффективность замены всех используемых ранее для радиотелескопов систем преобразования сигналов на единую универсальную МСПС. В ближайшее время планируется оснастить такими системами все радиотелескопы комплекса «Квазар-КВО».

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПА РАН (тема: № 124041500036-4). В статье использованы материалы доклада, сделанного авторами на Десятой всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2023).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» и ЦКП «Суперкомпьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрометрии и космической геодезии».

Литература

Зотов М. Б., Иванов Д. В., Поздняков И. А. и др. Двухканальная приемная система X-диапазона для макета радиотелескопа РТ-4 // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 48. С. 50–55. Doi 10.32876/AplAstron.48.50-55.

Blahut R. E. Fast algorithms for digital signal processing. Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1985. 455 p.

Маршалов А., Бердников А. С., Гренков С. А. и др. Модернизация системы преобразования сигналов радиотелескопа РТ-32 обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 70. С. 39–49.

Bondarenko Yu. S., Marshalov D. A., Makarchuk S. Radar images of the Moon at 4.2-cm wavelength // 53rd Lunar and Planetary Science Conference, held 7-11 March, 2022 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution, No. 2678, id.2131. 2022.

Nosov E., Marshalov D., Fedotov L., Sheynman Y. Multifunctional digital backend for quasar VLBI network //

Journal of Instrumentation. 2021. Vol. 16, no. 5. P. P05003. Doi 10.1088/1748-0221/16/05/P05003.

Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A. et al. Russian VLBI network "Quasar": Current status and out-look // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, Iss. 2. P. 150–156. Doi 10.1016/j.geog.2018.09.008.