

## Многофункциональная система преобразования сигналов для радиотелескопа RT-13 в обсерватории «Светлое»

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

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Радиотелескопы РСДБ-сети «Квазар-КВО» RT-32 и RT-13 для радиоинтерферометрических, радиометрических и спектральных наблюдений используют различное оборудование. Применяемые в настоящее время на радиотелескопах RT-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадарь» РСДБ-системы преобразования сигналов (СПС) являются узкополосными и не в полной мере удовлетворяют современным требованиям по полосам частот регистрируемых сигналов. Используемые на радиотелескопах RT-13 в обсерваториях «Бадарь» и «Зеленчукская» широкополосные СПС не обладают достаточным функционалом, необходимым для удовлетворения современных требований VGOS. Для расширения функциональных возможностей СПС, обеспечения наблюдений как в широкополосном, так и в узкополосном режимах регистрации сигналов, а также совместимости с любыми отечественными и зарубежными системами в ИПА РАН разработана многофункциональная система преобразования сигналов (МСПС), способная заменить собой все разнообразие СПС и других выходных устройств, используемых на радиотелескопах RT-13 и RT-32.

Система содержит до 12 каналов — модулей цифрового преобразования сигналов, обеспечивающих цифровую обработку радиоастрономических сигналов в полосе шириной 2 ГГц. Управление МСПС осуществляется от центрального компьютера радиотелескопа, и система сопрягается с любыми радиоприемными системами RT-32 и RT-13. Суммарная скорость формируемого МСПС и передаваемого по оптическим линиям информационного потока может достигать 96 Гбит/с. Приведены структурная схема и описание аппаратной части системы, таблица основных параметров МСПС, фотографии входящих в ее состав модулей, которые построены на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Функции, выполняемые МСПС, определяются встроенным программным обеспечением, загружаемым в ПЛИС. Приведены структура и описание прошивки ПЛИС для модуля цифрового преобразования сигналов, которая обеспечивает работу системы в режиме РСДБ. Дано описание работы модуля в этом режиме. Рассмотрены функции программных блоков цифровой обработки и анализа сигналов, синхронизации, контроля и управления системой.

Компактные размеры системы позволили разместить ее внутри фокальной кабины радиотелескопа. Представлены описание и фотографии конструктивного исполнения МСПС. Отмечены конструктивные особенности системы и меры, предпринятые для стабилизации температурного режима ее работы. Эксплуатация опытного образца МСПС, установленного на RT-13 в обсерватории «Светлое», подтвердила его параметры и совместимость с любыми существующими СПС.

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

*Контакты для связи: Федотов Леонид Васильевич (fedotov@iaaras.ru).*

**Для цитирования:** Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В., Шейнман Ю. С. Многофункциональная система преобразования сигналов для радиотелескопа RT-13 в обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 56. С. 39–47.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.56.39-47>

## Multifunctional Digital Backend for RT-13 Radio Telescope at Svetloe Observatory

D. A. Marshalov, E. V. Nosov, L. V. Fedotov, Yu. S. Sheinman

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

### Abstract

The RT-32 and RT-13 radio telescopes of the Quasar VLBI Network use various equipment for single-dish, radiometric and spectral observations. The Data Acquisition Systems (DAS) currently used for VLBI on RT-32 radio telescopes at the Svetloe, Zelenchukskaya and Badary observatories are narrow-band and do not fully meet the modern requirements for the frequency bands of the recorded signals. The broadband DAS used on the RT-13 radio telescopes at the Badary and Zelenchukskaya observatories do not have sufficient functionality necessary to meet modern VGOS requirements. To solve these problems, the IAA RAS has developed the Multifunctional Digital Backend (MDBE) that can replace all the variety of DAS and other output devices used on RT-13 and RT-32 radio telescopes.

The system contains up to 12 channels, or Digital Signal Processing units that capture the signals from receivers in the 2 GHz band, make required processing with them depending on the type of observation being performed, and send the result to the recording system. The MDBE is controlled from the central computer of the radio telescope and is interfaced with any RT-32 and RT-13 radio receiving systems. The total rate of the information data stream produced by the MDBE and transmitted via optical lines can reach 96 Gbit/s. A block diagram and a description of the hardware of the system, a table of the main parameters of the MDBE, photos of the units included in it, which are built on the basis of programmable logic integrated circuits (FPGAs), are given. The functions performed by the MDBE are determined by the firmware loaded into the FPGA. The structure and description of the FPGA firmware for the Digital Signal Processing unit, which ensures the operation of the system in the VLBI mode, is given. The description of the module operation in this mode is given. The functions of software blocks that provide digital signal processing and analysis, as well as synchronization, control and management of the system are considered.

MDBE is installed inside the elevation cabin of the radio telescope. A description and photo of the constructive design of the MDBE are given. The design features of the system and the measures taken to stabilize the temperature regime of its operation are noted. The operation of the MDBE prototype installed on the RT-13 at the Svetloe observatory confirmed its parameters and compatibility with any other existing DAS.

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

*Contacts: Leonid V. Fedotov (fedotov@iaaras.ru).*

**For citation:** Marshalov D. A., Nosov E. V., Fedotov L. V., Sheinman Yu. S. Multifunctional digital backend for RT-13 radio telescope at Svetloe observatory // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 56. P. 39–47. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.56.39-47>

## Введение

На радиотелескопах РСДБ-сети «Квазар-КВО» РТ-32 и РТ-13 для радиоинтерферометрических, радиометрических и спектральных наблюдений используется различное оборудование. Применяемые в настоящее время на РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадарь» для РСДБ-наблюдений СПС являются узкополосными и не в полной мере удовлетворяют современным требованиям по полосам частот регистрируемых сигналов. Широкополосные СПС, используемые на РТ-13 в обсерваториях «Бадарь» и «Зеленчукская», не обладают достаточным функционалом, необходимым для удовлетворения современных требований VGOS [1]. Большой объем разнородного радиотехнического оборудования на радиотелескопах (для РСДБ используется одно оборудование, для радиометрии — другое, для спектральных наблюдений — третье и т.д.) затрудняет его обслуживание, вызывает трудности с взаимным сопряжением различных радиотехнических устройств и не позволяет оперативно перестраивать их для новых научных задач. Для решения этих проблем в ИПА РАН разработана МСПС, способная заменить собой все разнообразие СПС и других выходных устройств, используемых на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32.

Идея создания унифицированной многофункциональной системы на ПЛИС для радиотелескопов была выдвинута авторами более 5 лет назад на основе опыта разработки цифровых систем в ИПА РАН. Концепция разработки МСПС [2] предусматривала реализацию с ее помощью всех возможных режимов регистрации сигналов на радиотелескопе. К таким режимам, в частности, относятся:

- режим РСДБ с широкополосными каналами (512 или 1024 МГц);
- режим РСДБ с узкополосными каналами (до 16 каналов шириной 8, 16 или 32 МГц) внутри каждого широкополосного;
- режим широкополосной радиометрической регистрации сигналов (в полосе 1 ГГц);
- режим регистрации радиоизлучения в спектральных линиях (с полосой анализа 1, 2, 4, 8, 16 или 32 МГц и интервалом частотного разрешения от 122 до 3906 Гц).

Проведенные исследования позволили создать и внедрить на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» устройства на ПЛИС, реализующие режим широкополосной радиометрической регистрации сигналов и режим регистрации в спектральных линиях [3–4]. Был разработан и испытан на радиотелескопе цифровой преобразователь потоков данных, обеспечивающий выделение узкополосных каналов внутри широкополосного [5].

В настоящее время закончена разработка аппаратной части МСПС. Первый опытный образец системы введен в эксплуатацию в обсерватории «Светлое». В нем реализованы режимы регистрации сигналов для РСДБ с широкополосными и узкополосными каналами. Результатам разработки этого образца посвящена данная статья.

## Аппаратная часть системы

МСПС может содержать до 12 каналов или модулей цифрового преобразования сигналов (ЦПС), реализующих по всем выходам промежуточных частот (ПЧ) радиоастрономической приемной системы функции захвата и обработки сигналов в зависимости от типа выполняемых на радиотелескопе наблюдений (рис. 1). Каждый ЦПС содержит 10-битный аналого-цифровой преобразо-

ватель (АЦП), оцифровывающий сигнал от приемника, ПЛИС — вентиляльные матрицы, обрабатывающие оцифрованный сигнал, и оптические приемопередатчики, передающие выходные данные на записывающее устройство (рис. 1). АЦП работает с частотой дискретизации 4096 МГц и входной полосой пропускания 2 ГГц. Это позволяет напрямую оцифровывать сигналы диапазона ПЧ, поступающие от приемников, которые составляют либо 100–1000 МГц для приемной системы радиотелескопов РТ-32 [6], либо 1–2 ГГц для трехдиапазонного [7] и сверхширокополосного [8] приемников РТ-13.

Уровень сигнала на входе ЦПС может заметно отличаться в зависимости от типа приемника, диапазона частот и количества радиочастотных помех в диапазоне. Чтобы предотвратить насыщение АЦП модуль ЦПС содержит аналоговый входной интерфейс с цифровым аттенуатором, настраиваемым в диапазоне от 0 до 31.75 дБ с шагом 0.25 дБ. Постоянно работающий контур автоматической регулировки усиления не применяется в режиме РСДБ, поскольку задержка в цифровых аттенуаторах может варьироваться от единиц до десятков пикосекунд, в зависимости от значения затухания. Поэтому в ЦПС устанавливаются затухание один раз перед наблюдением и сохраняет его постоянным в течение всего сеанса.

В каждом канале системы ПЛИС захватывает поток данных от АЦП, производит их цифровую обработку и формирует цифровые потоки выходных данных. С помощью трансиверов, встроенных в систему модулей SFP+ или QSFP, выходные данные передаются по оптоволоконным линиям в систему записи и буферизации данных радиотелескопа [9]. Модуль SFP+ поддерживает канал 10 GbE, скорости которого достаточно для типовых РСДБ-наблюдений с 2-битовым квантованием выходных данных. В случае необходимости дополнительный модуль QSFP 40 GbE позволяет передавать необработанный поток данных от АЦП, который можно использовать для реализации еще более сложных алгоритмов цифровой обработки на внешних устройствах или на компьютере.

Модуль ЦПС выполнен в виде 14-слойной печатной платы (PCB), с радиатором для отвода тепла и экранирования чувствительных частей схемы (рис. 2, без радиатора). Для амплитудной калибровки ЦПС генерирует управляющий сигнал, который включает и выключает генератор калибровочного шума в приемнике радиотелескопа. Частоту управляющего сигнала можно установить в диапазоне от 2 Гц до 2 кГц. Начальная фаза этого сигнала привязана к внутренней шкале времени системы (сигналу 1PPS) и может быть сдвинута для компенсации задержек принимаемого сигнала с целью лучшего согласования с периодами

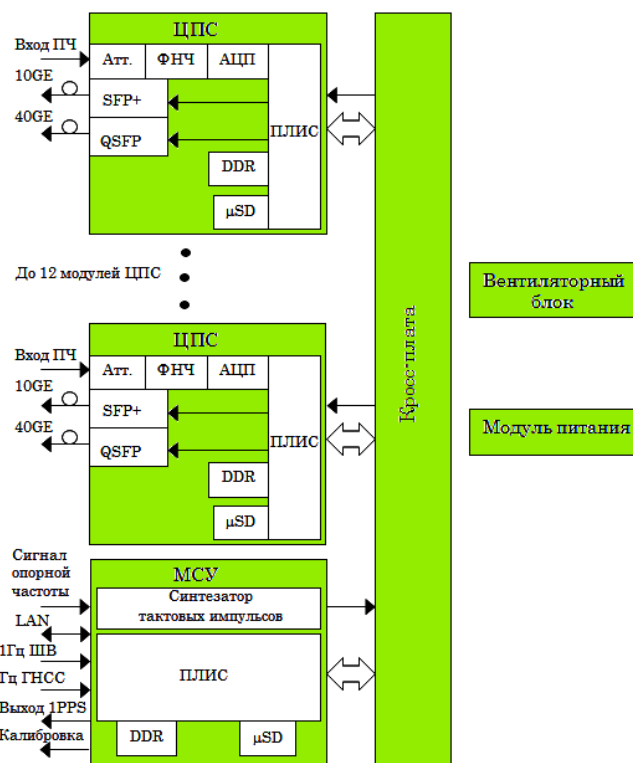


Рис. 1. Структура МСПС: ЦПС — цифровой преобразователь сигналов; Атт. — аттенуатор; ФНЧ — фильтр нижних частот; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема; SFP+ и QSFP — оптические трансиверы; DDR — микросхема памяти; μSD — карта памяти micro SD; LAN — локальная сеть

интегрирования измерителей мощности в модулях ЦПС, которые также привязаны к 1PPS.

Все ЦПС связаны с модулем синхронизации и управления (МСУ) через кросс-плату. МСУ, содержащий такую же ПЛИС, что и ЦПС, получает команды управления от центрального компьютера управления радиотелескопом через интерфейс 10/100/1000 Ethernet (оптический или медный) и связывается со всеми модулями ЦПС через выделенные дуплексные каналы в стандарте LVDS со скоростью 256 Мбит/с. Существует техническая возможность увеличить скорость передачи данных до 1024 Мбит/с для сокращения времени отклика системы. Программное обеспечение ПЛИС модулей



Рис. 2. Модуль ЦПС без радиатора





Рис. 3. МСУ со снятым экраном

МСУ и ЦПС может быть загружено со встроенной карты памяти или удаленно по сети. Благодаря этому разработчики могут создавать идеально адаптированные прошивки для каждого режима наблюдений и переключаться между ними в течение нескольких секунд.

Для синхронизации всех ПЛИС и АЦП в каналах системы МСУ (рис. 3, со снятым экраном) содержит мезонинный модуль синтезатора тактовых импульсов, который генерирует необходимые сигналы. Он принимает внешний сигнал опорной частоты 5, 10 или 100 МГц от системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа. Сформированные тактовые импульсы распределяются по всем модулям ЦПС через высокостабильные распределители тактовых импульсов, расположенные на кросс-плате. Выравнивание длин печатных проводников, по которым передаются тактовые сигналы, позволило снизить дрожание фронтов импульсов на тактовом входе АЦП до уровня 250 фс.

Конструкция синтезатора тактовых импульсов гарантирует постоянство фазы генерируемых импульсов после ресинхронизации или сброса питания. Это обеспечивает постоянную фазу тактового сигнала АЦП и стабильность групповой задержки сигналов в МСПС. МСУ также отвечает за привязку всех ЦПС к единой шкале времени системы. Для этого в МСУ формируется внутренний сигнал 1PPS, который может быть синхронизован секундными импульсами шкалы времени радиотелескопа. Расхождение между шкалами времени МСПС и радиотелескопа, а также относительно секундных импульсов, поступающих от приемника ГНСС, постоянно измеряется с точностью не хуже 4 нс для выявления грубых ошибок синхронизации при регистрации сигналов. Для более точных измерений имеется выход «Контроль 1 Гц» на каждом модуле ЦПС.

На кросс-плате размещены распределители тактовых сигналов АЦП и ПЛИС, сигнала 1PPS и сигнала калировки АЦП. В качестве последнего используется либо входной сигнал опорной частоты, либо тактовый сигнал АЦП, распределяемый на модули ЦПС. Этот сигнал может подаваться на

вход АЦП вместо внешнего сигнала ПЧ и использоваться для измерения фазовой стабильности синтезатора тактовых импульсов и АЦП с точностью до нескольких фемтосекунд.

### Конструкция МСПС

Также как и используемые на РТ-13 широкополосные системы, МСПС разрабатывалась специально для установки внутри фокальной кабины радиотелескопа, что упрощает соединение с выходами приемников и устраняет нестабильность, вызванную передачей чувствительных аналоговых сигналов по длинным коаксиальным или оптоволоконным линиям через движущиеся части кабельных петель антенны. Однако, это накладывает дополнительные требования к температурной стабильности, надежности и простоте обслуживания, что было учтено при проектировании системы. Конструкция МСПС основана на 19-дюймовом шасси Euroras PRO 3U (рис. 4), предназначенном для жестких условий эксплуатации. Для охлаждения системы над основным корпусом расположен блок вентиляторов высотой 1U. Он содержит 3 регулируемых вентилятора, которые управляются МСУ с помощью специализированного 3-канального контроллера вентиляторов. Скорость вращения регулируется алгоритмом пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) управления, чтобы компенсировать изменения температуры окружающей среды и поддерживать температуру системы постоянной для обеспечения фазовой и амплитудной стабильности каналов. В системе используются датчики температуры, доступные в ключевых точках кросс-платы, МСУ синтезатора тактовых импульсов и модулей ЦПС. Информация с этих датчиков используется в качестве входной для ПИД-регулятора, что обеспечивает эффективную стабилизацию температурного режима системы. Чтобы иметь полное представление о состоянии системы, есть также датчики напряжения и тока для всех критически важных цепей питания. Если значения питающих



Рис. 4. Опытный образец МСПС в обсерватории «Светлое»

напряжений выходят за установленные пределы, оператору выдается предупреждение о возможной неисправности оборудования.

### Программное обеспечение МСПС

Функции, выполняемые МСПС, определяются встроенным программным обеспечением, загружаемым в ПЛИС. При его разработке большинство критических задач по обработке сигналов и синхронизации реализованы в программируемой логике и разработаны с использованием языка описания оборудования SystemVerilog. Остальные задачи, в основном управляющие, выполняются

встроенной системой обработки на базе процессора ARM Cortex-A9 и разработаны с использованием языка «С». Прошивка ПЛИС МСУ в основном отвечает за функции управления, в то время как прошивки ПЛИС модулей ЦПС определяют поведение системы в зависимости от приложения, то есть определяет, какая обработка сигнала будет выполняться и каков будет формат выходных данных для определенного типа наблюдений. Поэтому прошивка для ЦПС сложнее, требовательнее к ресурсам и в то же время интереснее, чем прошивка для МСУ. Прошивку ПЛИС модуля ЦПС в режиме РСДБ (рис. 5) можно условно

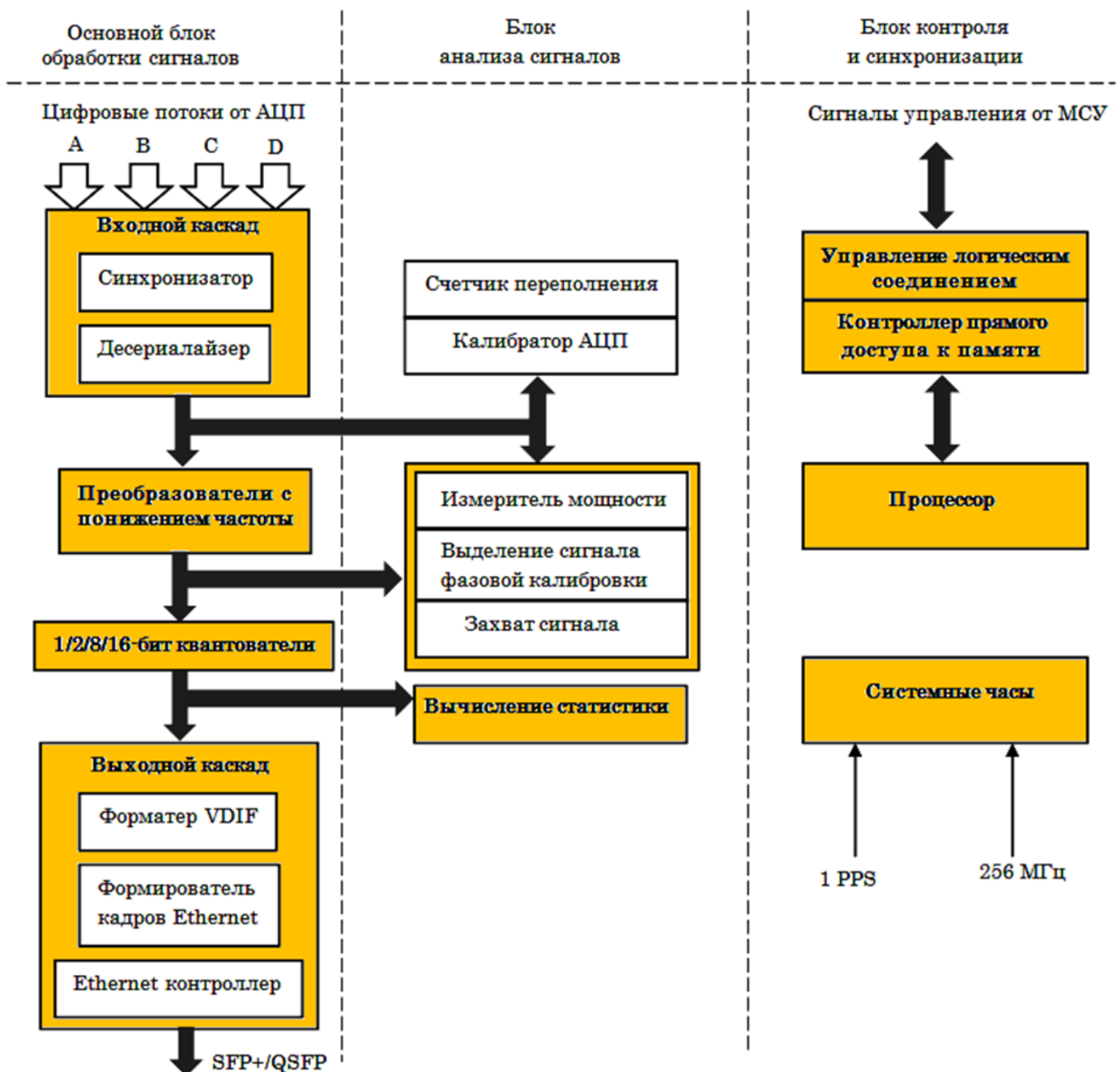


Рис. 5. Упрощенная схема прошивки ПЛИС для модуля ЦПС в режиме РСДБ

разделить на три части: основной блок обработки сигнала, блок анализа сигналов, блок управления и синхронизации.

Основной блок обработки отвечает за прием сигнала от АЦП, выполнение необходимой фильтрации, сдвигов частоты, разделение на каналы и т. д., а также за подготовку сигнала к отправке в систему буферизации данных радиотелескопа в требуемом формате. Блок анализа сигналов выполняет различные типы измерений сигналов на пути их прохождения. Эти измерения требуются для задач калибровки, установки пороговых значений квантования, контроля состояния системы и т. д. Наконец, блок управления и синхронизации отвечает за связь с МСУ, системными часами и установку параметров всех остальных блоков.

Цифровые выборки от АЦП поступают по четырем шинам, каждая из которых состоит из 10 битов данных, флага переполнения и сопутствующего тактового сигнала. Электрическая длина дорожек печатной платы ЦПС выравнивается внутри каждой шины с учетом задержек внутри корпуса ПЛИС, в то время как задержка между шинами физически не выравнивается. Для этого используется синхронизатор, который выравнивает сигналы на всех шинах по отношению к тактовому сигналу ПЛИС со сдвигом фазы приблизительно на половину периода, чтобы обеспечить правильное срабатывание в первых триггерах входных регистров. Это достигается за счет использования блоков переменной задержки, имеющихся в ПЛИС, и развитого детектора сбоев, позволяющего автоматически определять оптимальные значения задержки. Калибровка задержек выполняется один раз после синхронизации часов и занимает доли секунды. Скорость передачи поступающих выборок составляет 1024 Мбит/с на шину и не может быть напрямую воспринята обычными ресурсами ПЛИС из-за ограничений рабочей частоты. Для уменьшения частоты ввода данных используются встроенные в ПЛИС десериалайзеры, которые преобразуют входные последовательные потоки битов в несколько параллельных потоков с соответственно более низкой частотой, в нашем случае 256 МГц. Это позволяет получить 16 параллельных выборок данных на выходах десериалайзера, которые затем поступают в блок понижающих преобразователей частоты сигнала. Этот блок позволяет вырезать интересные части спектра из входной полосы частот, переносить их в полосу пропускания канала и фильтровать для формирования требуемой ширины полосы пропускания.

Существуют отдельные прошивки, созданные для регистрации данных в VGOS режиме либо одного канала с полосой 1024 МГц, либо одного канала 512 МГц, либо до шестнадцати каналов по 32 МГц. Первые два широкополосных режима ис-

пользуются для отечественных программ РСДБ-наблюдений, а третий, узкополосный, может использоваться для наблюдений по международным программам. Существует также ряд узкополосных режимов, необходимых для совместимости с радиотелескопами предыдущих поколений, использующими каналы шириной 16 МГц или меньше. При использовании полной полосы пропускания 2048 МГц блок понижающих преобразователей не требуется, и данные из входного каскада поступают непосредственно в квантователи. В режиме полосы пропускания 1024 МГц МСПС позволяет выбирать между диапазонами 0–1024 МГц или 1024–2048 МГц. В режиме полосы пропускания 512 МГц эта полоса канала может быть размещена в любом месте частотной шкалы в диапазоне от 0 до 2048 МГц с шагом 128 МГц. Для узкополосных режимов требуется точная настройка частоты каждого канала. Прошивка поддерживает шаг настройки 10 кГц, что обеспечивает совместимость с узкополосными системами. После понижающих частоту преобразователей квантователи выполняют цифровое «переквантование» 16-битовых выборок в 2-битовые, используя среднеквадратичное значение сигнала в качестве порога. Квантованные выборки поступают на выходной каскад, который упаковывает их в пакеты VDIF [10], формирует кадры Ethernet с необходимыми заголовками верхнего уровня (IP, UDP) и отправляет полученные кадры в приемопередатчик SFP+. Выходной каскад в настоящее время поддерживает скорость передачи данных до 8192 Мбит/с по одному каналу 10 GbE. Этого достаточно для передачи сигнала одного канала с полосой 2 ГГц и 2-битным квантованием или, например шестнадцати каналов шириной 32 МГц с 8-битным квантованием. Таким образом, полностью оборудованная МСПС с 12 модулями ЦПС может обеспечить скорость передачи данных почти 100 Гбит/с. Предусмотрена возможность реализации канала 40 GbE с приемопередатчиком QSFP, например, для передачи необработанных выборок с выхода АЦП.

Форматер VDIF упаковывает данные в пакеты необходимого размера с 32-байтовым заголовком. Длина пакета может быть установлена до 8192 байт, что с одной стороны соответствует ограничениям Jumbo-кадра, а с другой стороны упрощает запись потока данных за счет уменьшения количества пакетов в секунду. Чтобы запустить форматер, оператор должен отправить в МСПС команду, содержащую время начала и продолжительность наблюдения источника в секундах. Форматер начнет принимать входные данные с первой выборки в указанную секунду. Также имеются команды для запуска или остановки форматера с начала следующей секунды без указания времени.

Формирователь кадров Ethernet инкапсулирует входящие пакеты VDIF в кадры Ethernet



и, при необходимости, добавляет заголовки IP и UDP. Полученные кадры поступают в Ethernet-контроллер доступа к среде передачи данных (MAC), а затем — в высокоскоростной трансивер, доступный в ПЛИС. Чтобы упростить тестирование выходного каскада, последующего канала передачи данных и записывающего устройства предусмотрена возможность замены реальных данных тестовой последовательностью.

Блок анализа сигналов объединяют несколько вспомогательных блоков, которые не участвуют напрямую в обработке сигнала, но используются для получения различной полезной информации о сигнале. Счетчик переполнения использует специальный бит переполнения АЦП для расчета процента переполнения. Полученное значение используется для предупреждения оператора о том, что, вероятно, уровень входного сигнала слишком велик. Калибратор АЦП вычисляет степень расхождения между выборками, полученными от первого и других ядер АЦП. Эти показания используются для калибровки фазовых соотношений между ядрами АЦП. Измеритель мощности используется для расчета мощности выборок сигнала, полученных от АЦП. Это значение требуется для управления уровнем входного сигнала путем настройки аттенюатора. Мощность сигнала на выходах понижающих преобразователей также измеряется и используется для установки пороговых значений в квантователях. Измеритель мощности интегрирует мощность с периодом 0.25 мкс, что дает 4000 отсчетов мощности в секунду. Кроме того, он рассчитывает мощность отдельно для каждого ядра АЦП, что позволяет легко откалибровать усиление для каждого ядра. Период измерения синхронизирован с сигналом 1PPS, поэтому первое измерение соответствует интегральному значению мощности на интервале от 0 до 0.25 мкс, вторая выборка соответствует интервалу 0.25–0.5 мкс и т. д.

Функция выделения сигнала фазовой калибровки (СФК) используется при обслуживании и калибровке системы. При этом гармоники СФК выделяются из смеси сигнала с шумом, что делает их доступными для дальнейшего анализа [11]. Извлечение СФК из выборок высокого разрешения, доступных в ПЛИС, дает лучшие результаты, чем выделение этого сигнала из 2-битовых выборок в корреляторе. Главное преимущество состоит в том, что появляется возможность увидеть, что происходит с амплитудами и фазами гармоник СФК в реальном времени, что значительно упрощает обслуживание оборудования радиотелескопа и устранение неисправностей. Еще одна полезная функция — возможность захватывать данные длиной 4096 отсчетов с входов и выходов, понижающих частоту преобразователей и отправлять их для визуализации и анализа на компьютер.

Реализована также такая функция анализа сигнала, как вычисление статистики выходных 2-битовых отсчетов. Нормально распределенный шумовой сигнал с нулевым средним значением, квантованный по среднеквадратическому уровню, должен давать статистическое распределение, близкое к 0,16; 0,34; 0,34; 0,16. Контролируя отклонение от этих значений, программа позволяет автоматически обнаруживать некорректность порогов квантования, наличие помех или насыщения в сигнальном тракте.

Программа управления МСПС, написанная на языке «С», реализует на базе процессора ARM Cortex-A9 следующие функции:

- регулярно считывает показания встроенных датчиков и оценивает состояние системы на основе полученных значений;
- устанавливает параметры реализованных в ПЛИС блоков и считывает из них необходимые данные;
- участвует в процедурах синхронизации;
- выполняет внешние команды, поступающие от МСУ или перенаправленные МСУ с удаленного хоста;
- получает от МСУ новую прошивку и загружает ее в ПЛИС;
- контролирует внутренние регистры SFP, QSFP и АЦП;
- другие второстепенные функции.

Реализованный в ПЛИС модуль управления логическим соединением выполняет сериализацию выходных и десериализацию входных данных в 32-битные слова. Протокол связи по управлению включает в себя компактный заголовок в каждом сообщении, используемом каналом управления. Он содержит слово синхронизации, длину полезного сообщения и тип сообщения. Целостность сообщений контролируется с помощью контрольной суммы CRC32. Контроллер прямого доступа к памяти (DMA) обеспечивает быструю связь между каналом управления и выделенным разделом памяти DDR. Это позволяет прерывать работу процессора только тогда, когда сообщение было полностью получено и помещено в память или полностью извлечено из памяти и отправлено.

Модуль системных часов, реализованный в ПЛИС, содержит схемы на основе счетчика и компараторов для генерации внутреннего сигнала 1PPS, который может быть синхронизирован с помощью МСУ. Модуль постоянно проверяет задержку между внутренними и внешними сигналами 1PPS и предупреждает оператора, если она не равна нулю. Это означает, что либо система не была должным образом синхронизирована, либо произошел сбой синхронизации. Каждый импульс 1PPS увеличивает состояние счетчика, который определяет количество секунд с начала текущего полугодия. Этот счетчик вместе со схемами для

Таблица

Основные параметры МСПС

Параметр	Значение
Число каналов – модулей ЦПС	до 12
Частота дискретизации сигналов в АЦП	4096 МГц
Входная полоса частот каждого канала	2 ГГц
Номинальная мощность сигнала на входе	0 дБм (при гармоническом входном сигнале 1 ГГц и 0 дБ затухания в аттенюаторе)
Входной аттенюатор	диапазон: 0..31.75 дБ; шаг перестройки: 0.25 дБ
Выходной интерфейс	10 GbE SFP+ module; 40 GbE QSFP module
Параметры цифровой обработки сигналов	FPGA: 900 умножителей, 400К логических блоков, встроенный процессор ARM Cortex-A9
Память	512 MB (DDR3), карта памяти micro SD
Интерфейс управления	10/100/1000 Ethernet
Интерфейс отладки системы	USB-JTAG; USB-UART bridge
Входные сигналы синхронизации	5, 10 или 100 МГц
Контрольные выходы	1 Гц Контроль 1PPS, Контроль модуляции внешнего генератора шума
Масса	15 кг (для 8-канальной версии)
Габариты	48 × 35 × 18 см (длина × ширина × высота)
Потребляемая мощность	440 Вт от сети 220 В

формирования 1PPS предоставляет информацию о времени формату VDIIF, процессору и другим потребителям.

### Заключение

По своим параметрам МСПС значительно превосходит все аналогичные системы, ранее использовавшиеся в сети «Квазар-КВО». Основные параметры МСПС приведены в таблице.

МСПС содержит до 12 каналов с полосой пропускания 2 ГГц и может обеспечивать все необходимые режимы наблюдения, включая режим VGOS, режимы узкополосной РСДБ регистрации и широкополосный режим РСДБ. В МСПС предусмотрена возможность работы в радиометрическом режиме и режиме спектральных наблюдений на одиночном радиотелескопе. Первый опытный образец МСПС был установлен на радиотелескопе РТ-13 в обсерватории «Светлое» и введен в эксплуатацию в сентябре 2020 г. С его помощью было проведено уже около 1500 сеансов РСДБ-наблюдений. Результаты использования МСПС в обсерватории «Светлое» подтвердили совместимость этой системы с любыми другими существующими системами преобразования сигналов.

Набор функций анализа сигналов, а также функции тестирования и калибровки, доступные в МСПС, помогают не только в обслуживании самой системы, но и в контроле всей аппаратуры сигнального тракта радиотелескопа. Конструкция системы и ее компонентов, продуманная система охлаждения и теплоотвода в сочетании с компакт-

ными размерами обеспечивают надежную и стабильную работу при установке системы внутри фокальной кабины радиотелескопа. Гибкость системы позволяет в дальнейшем развивать ее, добавляя новые функции и режимы наблюдения. Планируется, например, расширить возможности режима работы VGOS, увеличив набор устанавливаемых полос пропускания. Программное обеспечение МСПС будет дополнено программами, обеспечивающими проведение радиометрических и спектральных наблюдений. Преимущества разработанной системы позволяют использовать ее для замены всех используемых в настоящее время систем преобразования сигналов на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО».

Работа выполнена в соответствии с Планом научно-исследовательских работ ИПА РАН и с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

### Литература

1. IVS Technology. VGOS Concept [Электронный ресурс]. URL: <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-concept.html> (accessed: 21.12.2020).
2. Маршалов Д. А., Носов Е. В., Гренков С. А. и др. Технический облик многофункциональной системы преобразования сигналов для радиотелескопов // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 43. С. 95–103.
3. Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Спектрально-селективный модуль радиометра с защитой от радиопомех // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 7. С. 577–586.
4. Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Усовершенствованная система регистрации радионизлучения в спектральных линиях // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. С. 23–29.



5. Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Преобразователь потоков данных для радиотелескопа с цифровой системой регистрации широкополосных сигналов // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 4. С. 11–19.

6. Ипатов А. В., Кольцов Н. Е., Крохалев А. В. Радиометрическая система радиотелескопа РТ-32 // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 4. С. 66–75.

7. Chernov V., Evstigneev A., Evstigneeva O. et al. The S/X/Ka Receiving System for Radio Telescope RT-13 of the «Quasar» VLBI Network // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 79–84.

8. Evstigneev A., Evstigneeva O., Khvostov E. et al. The Ultra-Wideband Receiver System for RT-13 Radio Telescope IAA RAS «Quasar» Network // Труды ИПАРАН. 2017. Вып. 41. С. 49–52.

9. Bezrukov I. A., Salnikov A. I., Yakovlev V. A., Vylegzhanin A. V. A Data Buffering and Transmission System: A Study of the Performance of a Disk Subsystem // Instrum. Exp. Tech. 2018. Vol. 61, no. 4. P. 467–472. <https://doi.org/10.1134/S0020441218040164>

10. Whitney A., Kettenis M., Phillips C., Sekido M. VLBI Data Interchange Format (VDIF). Proceedings of The 8th International e-VLBI Workshop — PoS(EXPReS09). P. 042. SissaMedialab, Madrid, Spain. 2009. <https://pos.sissa.it/082/042/>

11. Носов Е. В. Методы измерения сигнала фазовой калибровки РСДБ-радиотелескопов // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 4. С. 263–276.