

Модернизация системы преобразования сигналов радиотелескопа RT-32 обсерватории «Светлое»

© Д. А. Маршалов, А. С. Бердников, С. А. Гренков, Л. В. Федотов, Ю. С. Шейнман, А. Г. Михайлов, А. Б. Устинов, И. А. Рахимов, А. В. Исаенко

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

С 2011 г. по настоящее время на 32-метровых радиотелескопах (RT-32) радиоинтерферометрического комплекса «Квazar-КВО» эксплуатируются отечественные системы преобразования сигналов P1002M. За счет применения цифровой обработки сигналов на видеочастотах (до 32 МГц) система позволила заметно сократить инструментальные потери, возникающие при преобразовании сигналов.

Развитие элементной базы и методов обработки сигналов привели к созданию более совершенной многофункциональной системы преобразования сигналов (МСПС), выполняющей обработку сигналов в диапазоне промежуточных частот в цифровом виде. МСПС построена по модульному принципу, имеет широкие возможности по переконфигурированию режимов работы за счет используемых в своем составе программируемых логических интегральных схем, а конструктивное исполнение системы обеспечивает ее размещение на подвижной части антенны. С 2020 г. опытный образец МСПС штатно эксплуатируется на 13-метровом радиотелескопе обсерватории «Светлое» комплекса «Квazar-КВО».

В текущем году начаты работы по модернизации системы преобразования сигналов радиотелескопа RT-32 обсерватории «Светлое» путем перехода от P1002M к МСПС. Для размещения на антенне RT-32 потребовалась незначительная модификация аппаратных и расширение программных средств МСПС, а также сопряжение с другими системами и комплексами радиотелескопа. В работе представлены сделанные в системе изменения и текущие результаты работы по модернизации аппаратуры преобразования сигналов на радиотелескопе RT-32, а также результаты тестовых наблюдений на RT-32 с использованием МСПС.

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

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

Для цитирования: Маршалов Д. А., Бердников А. С., Гренков С. А., Федотов Л. В., Шейнман Ю. С., Михайлов А. Г., Устинов А. Б., Рахимов И. А., Исаенко А. В. Модернизация системы преобразования сигналов радиотелескопа RT-32 обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 70. С. 39–49.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.39-49>

Modernization of the RT-32 Radio Telescope Data Acquisition System in Svetloe Observatory

D. A. Marshalov, A. S. Berdnikov, S. A. Grenkov, L. V. Fedotov, Yu. S. Sheinman, A. G. Mikhailov, A. B. Ustinov, I. A. Rahimov, A. V. Isaenko

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

Abstract

From 2011 up to the present, data acquisition systems R1002M have been successfully used on 32-meter radio telescopes (RT-32) of the “Quasar” VLBI network. Due to the use of digital signal processing at video frequencies (up to 32 MHz), the system has significantly reduced the instrumental losses that occur during signal conversion.

The development of microelectronic element base and signal processing methods made it possible to construct a more advanced multifunctional digital backend system (MDBE) that processes signals in the intermediate frequency range (up to 2 GHz) in digital form. The MDBE is built on a modular principle, it has ample opportunities for reconfiguring operating modes, due to the field-programmable gate array. The design of the system ensures its placement on the movable part of the antenna. Since 2020, the MDBE prototype has been routinely operated on the 13-meter radio telescope of the Svetloe observatory of the “Quasar” VLBI network.

This year, work has begun on upgrading of the RT-32 radio telescope signal conversion system of the Svetloe Observatory by switching from R1002M to MDBE. To be placed on the RT-32 antenna, a minor modification of the hardware and expansion of the MDBE software was required, as well as interfacing with other systems and complexes of the radio telescope. The paper presents the changes introduced into the system and the current results of work on the modernization of signal conversion equipment on the RT-32 radio telescope, together with the results of test observations on the RT-32 using MDBE.

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

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

For citation: Marshalov D. A., Berdnikov A. S., Grenkov S. A., Fedotov L. V., Sheinman Yu. S., Mikhailov A. G., Ustinov A. B., Rahimov I. A., Isaenko A. V. Modernization of the RT-32 radio telescope data acquisition system in Svetloe observatory // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 70. P. 39–49.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.39-49>

Введение

Радиоастрономическая система преобразования сигналов (СПС) является одним из ключевых элементов приемно-регистрирующей аппаратуры радиотелескопа, работающего в режиме радиоинтерферометра. Система осуществляет выделение, преобразование и обработку сигналов, поступающих с выходов приемных устройств радиотелескопа. На выходе СПС формирует цифровой поток данных в заданном формате, который удобен для записи на цифровые носители и передачи по каналам связи.

С 2003 г. на 32-метровых радиотелескопах (РТ-32) комплекса «Квазар-КВО» регулярно выполняются радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами (РСДБ). Первый из трех радиотелескопов этого комплекса в обсерватории «Светлое» был оснащен зарубежной СПС типа Mark III/IV DAS. Для РСДБ-наблюдений на РТ-32 в обсерватории «Зеленчукская» использовалась система VLBA4 DAS, а в обсерватории «Бадарь» с 2006 г. — отечественная система P1000 (СПС). С 2011 г. по настоящее время на всех РТ-32 радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» успешно эксплуатируются модифицированные отечественные СПС P1002M. За счет применения цифровой обработки сигналов на видеочастотах (до 32 МГц) эта система позволила заметно сократить инструментальные потери, возникающие при преобразовании сигналов на радиотелескопе ([Федотов и др., 2012](#)).

Развитие элементной базы и методов цифровой обработки сигналов позволили создать более совершенную многофункциональную систему преобразования сигналов (МСПС), выполняющую цифровую обработку сигналов в диапазоне промежуточных частот (до 2 ГГц) в цифровом виде ([Маршалов и др., 2021](#); [Nosov et al., 2021](#)). МСПС построена по модульному принципу, имеет широкие возможности по переконфигурации режимов работы за счет используемых в своем составе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), а конструктивное исполнение системы обеспечивает ее размещение на подвижной части антенны. С 2020 г. опытный образец МСПС штатно эксплуатируется на 13-метровом радиотелескопе обсерватории «Светлое» комплекса «Квазар-КВО» ([Бондаренко и др., 2021](#)).

В 2022 г. работы по модернизации системы преобразования сигналов радиотелескопа РТ-32 обсерватории «Светлое» вышли на финишную

прямую. Разработанный ранее опытный образец МСПС, предназначенный для радиотелескопов РТ-13, был модернизирован: дополнен модулями распределителей промежуточной частоты и набором программных средств, реализующих поддержку РСДБ-режимов работы с узкими полосами частот, широкополосной радиометрической регистрации сигналов и режимов спектрально-селективного радиометра. Для обеспечения работы МСПС в модуляционном режиме в состав радиоастрономического приемного комплекса на РТ-32 введен распределитель сигналов модуляции ([Иванов, Носов, 2019](#)). Проведены работы по сопряжению МСПС с системой записи и передачи данных ([Bezrukov et al., 2018](#)) и системой частотно-временной синхронизации радиотелескопа ([Вытнов и др., 2013](#)). Создан комплекс программ управления МСПС от центрального управляющего компьютера радиотелескопа, обеспечивающий настройку и диагностику функционирования системы при проведении РСДБ- и радиометрических наблюдений. После серии экспериментов установленная на радиотелескопе РТ-32 МСПС будет использоваться при проведении регулярных РСДБ-наблюдений в обсерватории «Светлое».

В работе представлен состав модернизированной системы, ее основные характеристики и первые результаты, полученные при её использовании.

Состав и исполнение МСПС для РТ-32

МСПС выполнена по модульному принципу и содержит объединенные через кросс-плату модули: цифрового преобразования сигналов (ЦПС), синхронизации и управления (МСУ) и питания, а также вентиляторный блок (рис. 1). Для радиотелескопов РТ-32 достаточно четырех модулей 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 поляризаций в модернизированной МСПС используются две кассеты распределителей сигналов ПЧ.

МСУ обеспечивает синхронизацию работы всех цифровых схем модулей ЦПС, прием и передачу команд от центрального компьютера радиотелескопа с последующей трансляцией их адресатам. Управление внутри системы организовано по выделенным полудуплексным каналам в стандарте LVDS (low-voltage differential signaling), а внешнее — по интерфейсу 10/100/1000 Ethernet.

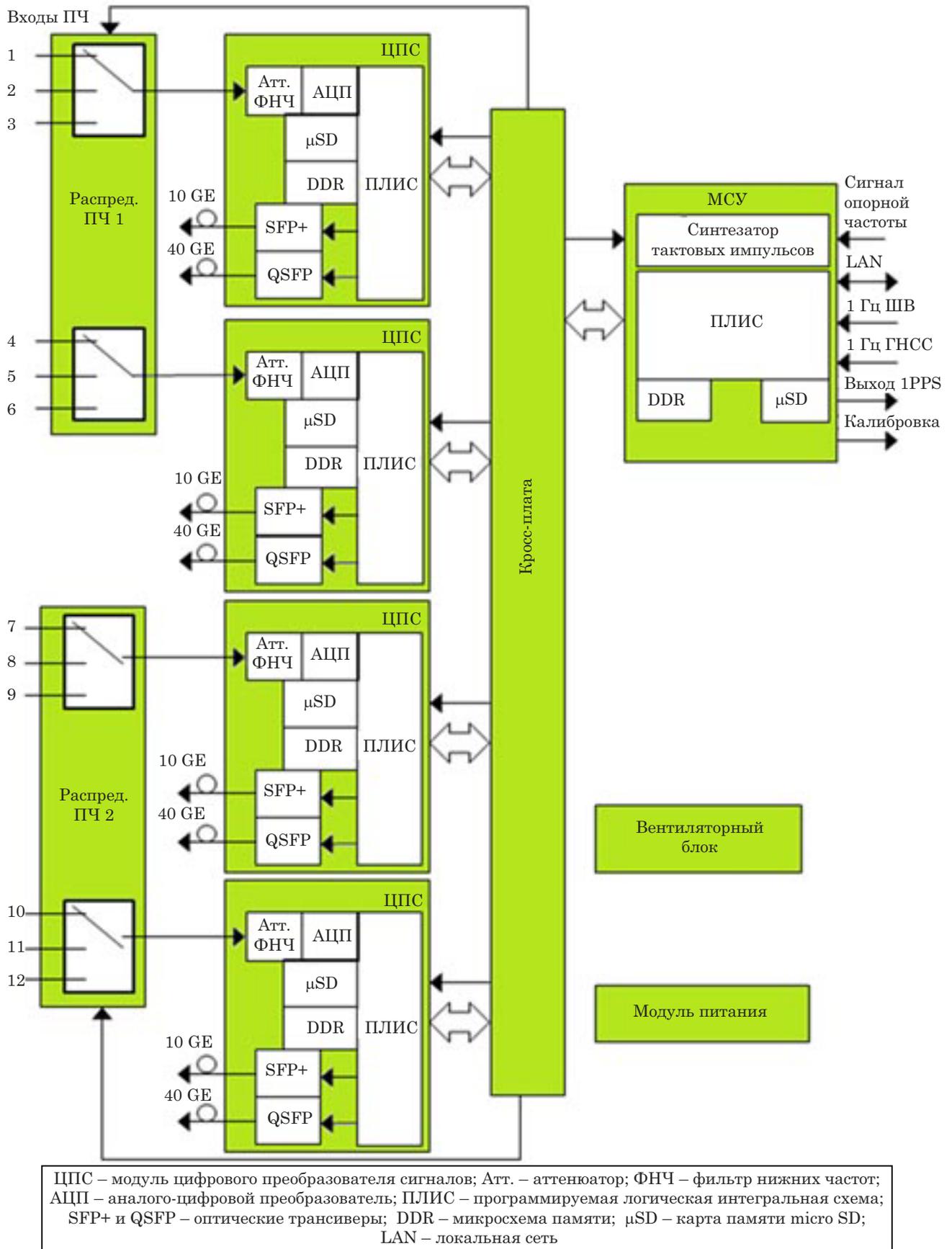


Рис. 1. Структура МСПС

На основе программного обеспечения МСУ реализованы режимы локальной (со встроенной карты памяти) и дистанционной (по сети) загрузок соответствующих прошивок в ПЛИС МСУ и ЦПС. Это позволило создать систему, практически идеально адаптированную для каждого режима наблюдений и способную переключаться между ними в течение нескольких секунд.

На вход МСУ поступает сигнал опорной частоты 5, 10 или 100 МГц от системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа, из которого в мезонинном модуле синтезатора частот (отдельной печатной плате, устанавливаемой на основную в виде надстройки — «мезонина») формируются тактовые сигналы 256 МГц и 2048 МГц для всех ПЛИС и аналого-цифровых преобразователей (АЦП), входящих в модули МСПС. Сформированные тактовые сигналы распределяются по всем модулям ЦПС через высокостабильные микросхемы распределителей, расположенные на кросс-плате. Оптимизация геометрии печатных проводников, используемых для передачи тактовых сигналов, позволила снизить дрожание фронтов импульсов на тактовом входе каждого АЦП до уровня, не превышающего 250 фс. Схемотехническая реализация синтезатора частот стабилизирует фазы генерируемых импульсов в случае рассинхронизации или сброса питания, что обеспечивает постоянную фазу тактового сигнала АЦП и стабильность групповой задержки сигналов в МСПС. В МСУ реализована привязка всех синхросигналов ЦПС к единой шкале времени системы, которая, в свою очередь, синхронизируется секундными импульсами шкалы времени радиотелескопа. Расхождение между шкалами времени МСПС и радиотелескопа постоянно измеряется с точностью не хуже 4 нс для выявления грубых ошибок синхронизации при регистрации сигналов.



Рис. 2. Кассета распределителя сигналов ПЧ со снятой боковой стенкой

В состав каждого ЦПС входит 10-битный АЦП для оцифровки входного сигнала, ПЛИС для его обработки и оптические приемопередатчики SFP+ или QSFP для передачи данных в систему записи. АЦП работает с частотой дискретизации 4096 МГц в полосе пропускания 2 ГГц. Это позволяет напрямую оцифровывать сигналы диапазона ПЧ, поступающие с выходов радиоастрономических приемных устройств. Для установки уровня сигнала на входе АЦП в модуле ЦПС предусмотрен управляемый аттенуатор с диапазоном регулировки от 0 до 31.75 дБ и шагом 0.25 дБ. Выходной интерфейс модуля SFP+ обеспечивает передачу данных со скоростью стандарта 10 GbE, что вполне достаточно для РСДБ-наблюдений с полосой регистрации в 500–1000 МГц и 2-битовым квантованием выходных данных. В случае необходимости может быть задействован дополнительный модуль QSFP стандарта 40 GbE. Конструктивно модуль ЦПС выполнен в виде 14-слойной печатной платы, к которой крепится радиатор для отвода тепла и экранирования чувствительных частей схемы.

В каждой кассете распределителя сигналов ПЧ (рис. 2) реализована коммутация шести входов на два выхода. На выходах установлены полосовые фильтры, формирующие полосы ПЧ 100–1000 МГц, соответствующие диапазону рабочих частот приемной системы радиотелескопа РТ-32. Кассета реализована в виде многослойной печатной платы с врубными разъемами, которая размещается в экранированном корпусе. Коммутация выходов распределителя ПЧ и входов соответствующих модулей ЦПС реализована с помощью кабельных перемычек.

Конструктивное исполнение МСПС

МСПС выполнена на основе 19-дюймового шасси Eurogas PRO 3U (рис. 3), предназначенного для жестких условий эксплуатации. В шасси расположены 4 модуля ЦПС (позиции 1, 2, 7 и 8), МСУ и две кассеты распределителей ПЧ (позиции 3–6 и 9–12). Все модули МСПС надёжно зафиксированы винтами на передних панелях, а также через врубные разъемы и ловители со стороны кросс-платы. В МСПС предусмотрена активная система поддержания оптимальной температуры внутри модулей. Исполнительным механизмом для этого является блок вентиляторов высотой 1U, располагающийся над основным шасси. Производительность блока задается скоростью вращения трех вентиляторов. Для регулировки этой скорости применяется пропорционально-интегрально-дифференцирующий алгоритм, который для обеспечения стабильности температуры системы использует данные с датчиков температуры из ключевых ее мест.



Рис. 3. Опытный образец МСПС для радиотелескопа РТ-32

Программное обеспечение МСПС

Функции, выполняемые МСПС, определяются встроенным программным обеспечением (ПО), загружаемым в виде прошивок в ПЛИС. В этом ПО критические задачи, связанные с обработкой сигналов и синхронизацией, реализованы в программируемой логике с использованием языка описания оборудования System Verilog. Остальные задачи, в основном связанные с управлением, реализованы на базе процессора ARM Cortex-A9 с использованием языка «С». Встроенное программное обеспечение ПЛИС МСУ в основном отвечает за функции управления, в то время как у модулей ЦПС оно определяет поведение системы в зависимости от режима работы, то есть определяет, какая обработка сигнала будет выполняться и каков будет формат выходных данных для определенного типа наблюдений. Встроенное ПО модуля ЦПС в режиме РСДБ можно условно разделить на три блока: основной блок обработки сигналов, блок анализа сигналов и блок управления и синхронизации. Основной блок обработки отвечает за прием сигнала от АЦП, выполнение необходимой фильтрации, сдвиг частоты, разделение на каналы и т. д., а также за подготовку преобразованного сигнала к отправке в систему записи 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. Блок управления и синхронизации отвечает за связь с МСУ, с системными часами и установку параметров всех остальных блоков. Подробно алгоритмы работы ПО рассмотрены в публикации (Гренков, Федотов, 2022). В модернизированном опытном образце МСПС реализованы следующие конфигурации встроенного ПО:

- режим РСДБ с широкополосными каналами (512 или 1024 МГц);
- режим РСДБ с узкополосными каналами (до 16 каналов шириной 0.5, 2, 4, 8, 16 или 32 МГц) внутри каждого широкополосного;
- режим спектрально-селективного радиометра.

Радиометрическая регистрация сигналов в МСПС реализована во всех перечисленных выше режимах. Осуществляется раздельное измерение мощности на двух полупериодах модуляции как во всей входной полосе частот (на входе АЦП), так и для заданных полос узкополосных или широкополосных каналов.

В режиме широкополосных каналов с полосой 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 поддерживается выделение до 16 частотных каналов в пределах полосы частот от 0 до 1024 МГц с шагом установки частоты каждого канала в 10 кГц. Режим с широкополосными каналами может быть использован при совместных наблюдениях с РТ-13 по отечественным программам РСДБ наблюдений, а режим с узкополосными каналами обеспечивает все существующие потребности в РСДБ как по отечественным, так и по международным программам. Режим спектрально-селективного радиометра позволяет проводить наблюдения в непростых условиях помеховой обстановки, так как в нем предусмотрена возможность исключения помех.

Для измерения энергетических параметров широкополосного космического радиоизлучения — мощности P_s регистрируемого сигнала в полосе B_0 ,

шумовой температуры T_s принимаемого радиосигнала и спектральной плотности мощности потока излучения в МСПС используется спектрально-селективный метод (Гренков, Кольцов, 2015), который обеспечивает высокую точность измерений даже при воздействии радиопомех. Принцип действия спектрально-селективного радиометра на базе ЦПС МСПС основан на вычислении спектра мощности сигнала методом быстрого преобразования Фурье (БПФ), исключении частотных каналов, занятых радиопомехами, и определении мощности принимаемого сигнала в полосе частот, свободной от помех. В ПЛИС коды демультимплексированного сигнала с АЦП проходят предварительную цифровую фильтрацию и затем распределяются по параллельно работающим с тактовой частотой 256 МГц БПФ вычислителям спектров мощностей (в зависимости от полосы пропускания приёмного канала таких вычислителей может быть 16, 8 или 4 для соответствующих полос $B_0 = 2048, 1024$ или 512 МГц). Из полученных спектров по алгоритму Кули-Тьюки формируются мгновенные спектры мощности шумового сигнала с полосой $B_0 = 0.5F_d$, где F_d — частота дискретизации сигнала. Эти спектры усредняются на заданном интервале времени t_n . Мгновенные спектры вычисляются циклически с периодом $t_{ци} = 1/w$, где $w = B_0/N$ — интервал частотного разрешения, $N = 32768$ — число компонент дискретного спектра мощности на положительной полуоси частот ($w = 62.5; 31.25$ и 15.625 кГц для полос регистрации $B_0 = 2048; 1024$ и 512 МГц соответственно). Циклы вычисления спектров синхронизированы с фронтами импульсов меандра с частотой $F_{мод}$, которым модулируется генератор шума в приемной системе радиотелескопа и переключается затухание аттенюатора при работе в режиме модуляционного радиометра. За период модуляции $t_{мод} = 1/F_{мод}$ накапливается n_1 мгновенных спектров мощности, а число накопленных в течение заданного интервала времени t_n спектров $n = t_n/t_{ци} = n_2/n_1$, где $n_2 = t_n/t_{мод}$ — целое число периодов модуляции.

Мгновенные спектры мощности и их спектральные куртозисы, вычисленные на чётных и нечётных полупериодах модуляции генератора шума, отдельно накапливаются и суммируются, а затем через МСУ по интерфейсу Ethernet передаются в компьютер управления радиотелескопом. Разность накопленных и усреднённых на интервалах $0.5 t_n$ спектров даёт спектр мощности принятого широкополосного радиосигнала и воздействующих на радиотелескоп помех. Компоненты узкополосных спектров помех выделяются на фоне усреднённого гладкого спектра собственных шумов радиотелескопа и могут быть автоматически определены с использованием спектрального куртозиса и амплитудно-фильтрационных алгоритмов. После исключения компонентов спектра, со-

держащих помехи, вычисляются мощность и другие энергетические параметры исследуемого радиоизлучения. Предусмотрена также возможность работы в режиме измерения полной мощности (без модуляции генератора шума и аттенюатора).

Интеграция с центральным компьютером управления радиотелескопом

Для полноценной поддержки режимов и функций на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» программное обеспечение для управления МСПС было интегрировано в структуру ПО центрального управляющего компьютера радиотелескопа, которое включает программную систему MarkIV Field System, являющуюся стандартом для международных сетей РСДБ. ПО МСПС состоит из трех основных компонент.

1. Основная управляющая программа-сервер. Она осуществляет непосредственное взаимодействие компьютера с МСПС по локальной сети в соответствии с протоколом обмена, формирует команды управления, принимает и анализирует сообщения МСПС, формирует лог-файлы сеансов наблюдений и позволяет записывать файлы данных для последующей обработки. Все остальные компоненты ПО взаимодействуют с МСПС через программу-сервер.

2. Блок интерпретатора командного языка, дополняющего язык SNAP MarkIV Field System командами управления МСПС. Язык SNAP используется в процедурных файлах сеансов наблюдений для установки параметров регистрации сигнала перед сеансом и для управления в ходе сеанса.

3. Программа с графическим интерфейсом «Монитор МСПС», которая наглядно отображает все параметры МСПС, включает ряд функций ручного управления, а также содержит средства диагностики. К основной программе-серверу можно одновременно подключить несколько программ «Монитор МСПС», работающих как локально на том же компьютере, так и удаленно.

Структура интерфейса программы «Монитор МСПС» повторяет структуру самой системы: информация, связанная с общими блоками МСПС, расположена на вкладке «Шасси»; данные по отдельным преобразователям и распределителям — на вкладке «Кассетъ». Вкладки «Шасси» и «Кассетъ» разделены на две логические части. Основная масса данных располагается в древовидной структуре в правой части вкладки. Иерархия объектов сделана для того, чтобы облегчить поиск нужного параметра за счёт их группировки, и позволяет избежать сложной в анализе громоздкой одноуровневой таблицы. Для удобства использования была добавлена возможность разворачивания и сворачивания в один клик всех ветвей дерева, а также поиска по нему. Часть элементов структуры

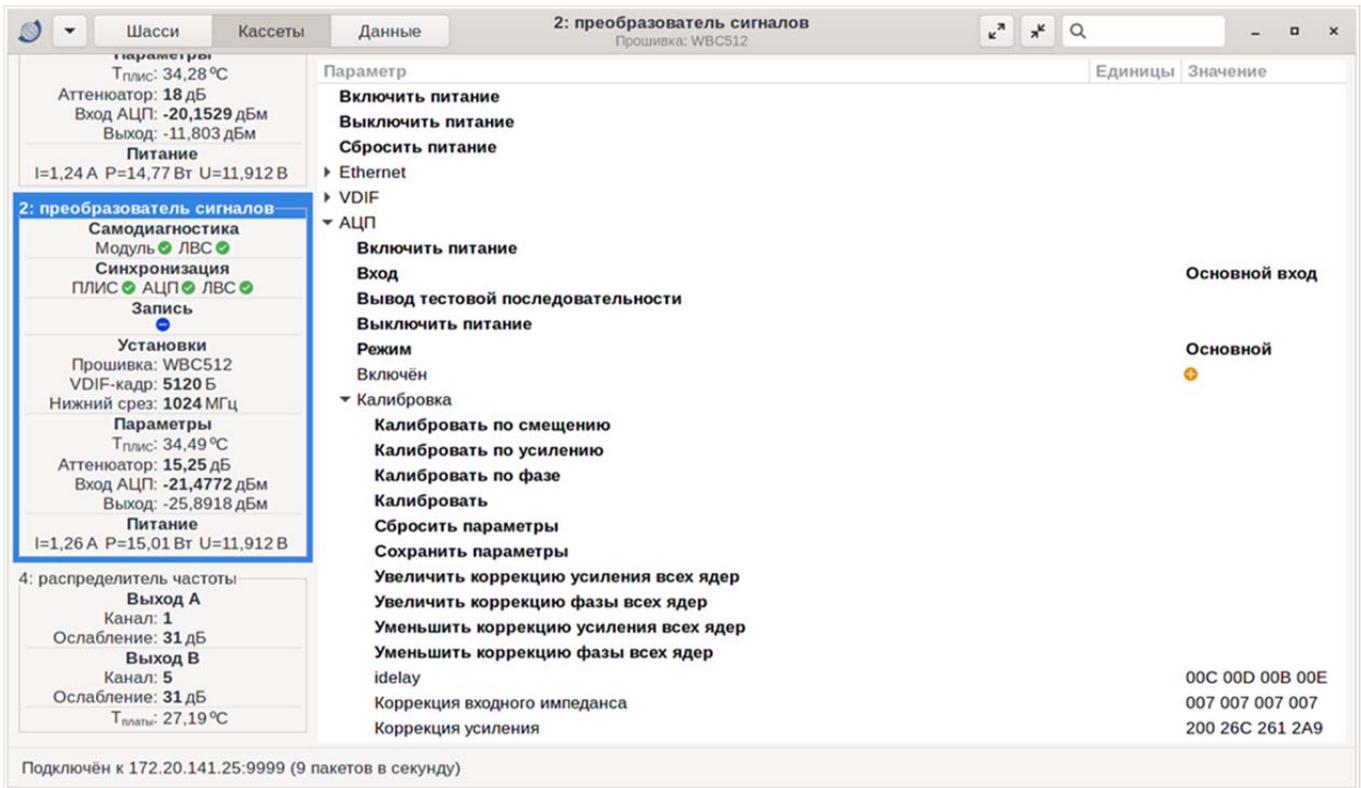


Рис. 4. Интерфейсное окно вкладки «Кассеты» с отображением на боковой панели параметров цифрового преобразователя сигналов № 2

необходимо наблюдать регулярно, так как они информируют оператора о корректности работы оборудования. Такие элементы были продублированы в боковых панелях первых двух вкладок интерфейса (рис. 4).

Информация, доступная на вкладке «Кассеты», зависит от установленных кассет и вариантов загруженного встроенного ПО. При этом смена последнего может приводить к существенным изменениям в дереве параметров кассеты. Для учёта этого, в том числе перезагрузки дерева параметров в случае смены «прошивки» кассеты, в программу был добавлен соответствующий модуль.

Вкладка интерфейса «Данные» позволяет пользователю анализировать зависимости, поступающие от устройства. Программа в виде графиков выводит собираемые МСПС-данные: выборки сигнала во временной области, спектры мощности, фазовые спектры, фазочастотные характеристики каналов, групповые задержки, фазы гармоник сигнала фазовой калибровки, статистику двухбитового квантования (рис. 5). На вкладке реализованы функции управления отображением данных: увеличение/уменьшение масштаба, курсор, стоп-кадр, режим накопления, автомасштабирование. Кроме этого предусмотрена возможность сохранения графиков в растровом формате .png, либо в векторных форматах .svg и .pdf. Данные с гра-

фиков можно сохранить в форматах .tsv, .csv или .json. Поскольку в некоторых случаях может появиться необходимость произвести дополнительную обработку данных, была добавлена возможность сохранения исходных данных, поступающих с МСПС, в двоичном формате .cbor.

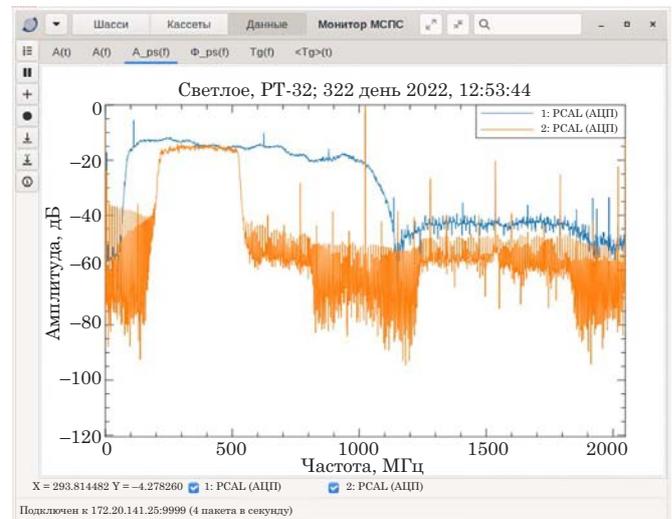


Рис. 5. Интерфейсное окно вкладки «Данные» с отображением спектров сигнала фазовой калибровки в двух каналах МСПС, подключенных к приемникам X- и S-диапазонов на РТ-32

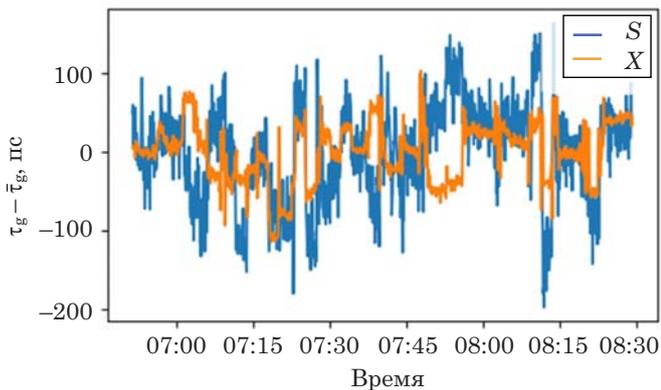


Рис. 6. Результаты изменения групповой задержки в X- и S-диапазонах частот на сеансе RI4037, полученные по выделенным МСПС-гармоникам генератора пикосекундных импульсов

На рис. 6 представлены результаты изменения групповой задержки в X- и S-диапазонах частот на сеансе RI4037, полученные по выделенным МСПС-гармоникам генератора пикосекундных импульсов. Видно, что результирующие вариации измеренной на интервале полутора часов групповой задержки не превышают 200 и 300 пс в X- и S-диапазонах соответственно.

Оснащение радиотелескопов РТ-32, модернизированных МСПС

В 2022 г. радиотелескоп РТ-32 обсерватории «Светлое» был оснащен модернизированной МСПС, для этого были решены следующие основные задачи:

1. Разработка проекта размещения и монтажа системы на радиотелескопе. В процессе подготовки проекта было рассмотрено несколько вариантов установки МСПС в надзеркальной кабине радиотелескопа. Для подключения МСПС к штатным системам радиотелескопа были разработаны две схемы: временная, когда система подключается параллельно штатному распределителю сигналов ПЧ Р6104 и может работать одновременно с использовавшейся ранее системой Р1002М, и постоянная, предполагающая замену Р1002М вместе с распределителем ПЧ на МСПС. Подключение по временной схеме реализовано с использованием широкополосных разветвителей, подключенных к выходам распределителя сигналов ПЧ. Для крепления МСПС на антенне была разработана рабочая конструкторская документация и изготовлены несколько комплектов монтажных частей. Один из этих комплектов был использован для монтажа модернизированной МСПС в надзеркальной кабине РТ-32 обсерватории «Светлое» (рис. 7), а остальные планируется задействовать на других радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квар-КВО».

2. Подключение МСПС к системе частотно-временной синхронизации (СЧВС) радиотелескопа. Основная сложность в подключении заключалась в отсутствии в надзеркальной кабине радиотелескопа сигналов 100 МГц и 1 Гц для подачи сигнала опорной частоты и сигнала меток шкалы времени. Кроме того, для контроля шкалы времени встроенным в МСПС измерителем необходимо иметь сигнал шкалы времени 1 Гц ГНСС, формируемый приемником ГНСС. Указанные сложности были преодолены путем размещения на антенне РТ-32 комплекта аппаратуры, используемого для передачи сигнала опорной частоты по волоконно-оптической линии.

3. Передача данных с МСПС в систему записи и буферизации данных, располагающуюся в серверной лабораторного корпуса. От серверной радиотелескопа до надзеркальной кабины РТ-32 были задействованы 4 одномодовые волоконно-оптические линии для передачи выходных цифровых



Рис. 7. Опытный образец МСПС в надзеркальной кабине РТ-32 обсерватории «Светлое»

потоков данных от МСПС до системы буферизации и передачи данных радиотелескопа в формате 10G Ethernet.

4. Интеграция МСПС в контур управления центрального компьютера управления радиотелескопом. Для соединения с центральным компьютером управления радиотелескопа на физическом уровне МСПС была включена в локальную сеть Ethernet в надзеркальной кабине. Программная интеграция выполнена путем создания комплекта специальных программ (см. выше).

5. Формирование и подача сигналов модуляции на радиоприемные устройства. Генерация сигналов модуляции реализована в модуле синхронизации и управления МСПС. Для подачи сигналов модуляции использован специально разработанный и изготовленный распределитель сигналов модуляции (Иванов, Носов, 2019). Коммутация между распределителем сигналов модуляции и МСПС выполнена с использованием оптического кабеля. Это обеспечило возможность проведения радиометрических наблюдений и амплитудной калибровки радиотелескопа в модуляционном режиме с использованием МСПС.

Экспериментальные и регулярные наблюдения на РТ-32 с использованием МСПС

Для экспериментальных исследований опытного образца МСПС в обсерватории «Светлое» был проведен тестовый сеанс РСДБ-наблюдений RU0884. В сеансе были задействованы 4 радиотелескопа: РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадарь», а также РТ-13 — в обсерватории «Светлое». В эксперименте регистрировался сигнал в X-диапазоне частот (3.5 см) в правой круговой поляризации. На всех станциях записывались данные 8-частотных каналов с шириной полосы пропускания 8 МГц для каждого канала и использовалось двухбитовое квантование сигнала. Для РТ-32 применялось стандартное оборудование: СПС P1002M и система записи Mark5B+.

Дополнительно на РТ-32 обсерватории «Светлое» МСПС была подключена параллельно со штатной системой P1002M. Запись данных на МСПС осуществлялась с использованием системы буферизации и передачи данных (СВПД) РТ-13 в файлы VDIFF с размером фрейма 5152 байта (5120 байт данных + 32 байта заголовок) (Bezrukov et al., 2018). Регистрации данных на РТ-13 выполнялась на штатной МСПС в таком же формате, как и на МСПС РТ-32. Всего было записано 3 скана длительностью 120 с от источника 3C454.3 с плотностью потока излучения в X-диапазоне 10.605 Ян.

Корреляционная обработка производилась в ИПА РАН на корреляторе DiFX 2.6.2 для всех десяти баз. Постпроцессорная обработка была выполнена в программном пакете hops 3.21. Были определены значения отношений сигнала к шуму (snr), временных задержек, скорости изменения задержек, фаза и другие параметры. При этом по все трем сканам были получены почти идентичные результаты для всех 8 каналов (рис. 8). Например, значения snr для базы РТ-32 «Бадарь» (P1002M) — РТ-32 «Светлое» (МСПС) колеблются в пределах 203–210, а для базы РТ-32 «Светлое» (МСПС) — РТ-32 «Зеленчукская» (P1002M) в пределах 432–456, что практически совпадает с результатами, полученными для тех же баз, но при использовании только систем P1002M. На нулевой базе в обсерватории «Светлое», когда коррелировались идентичные сигналы от одного приемника, но зарегистрированные разными СПС, snr корреляционного отклика превышало 36 тыс. единиц.

Для тестирования МСПС в режиме однобитового квантования при проведении стандартных геодезических сеансов RI3962, RI3973, RI4002 и RI4004 на базе «Бадарь» (Bd) — «Зеленчукская» (Zc) в двух диапазонах длин волн 3.5 и 13 см в правой круговой поляризации была добавлена обсерватория «Светлое», где на радиотелескопе РТ-32 параллельно работали СПС P1002M и МСПС

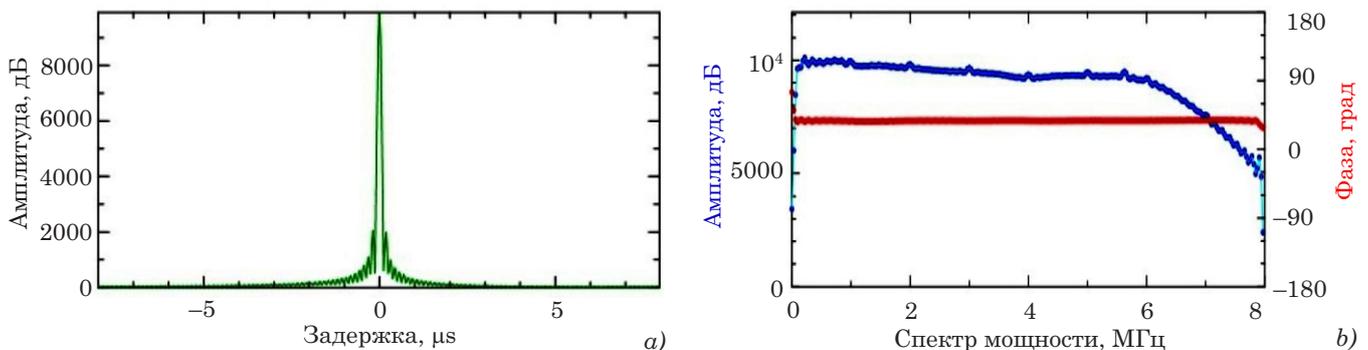


Рис. 8. *a)* Кросскорреляционный отклик и *b)* спектр мощности на нулевой базе для 8-го канала (частота 8431.99 МГц) при использовании одновременно P1002M и МСПС

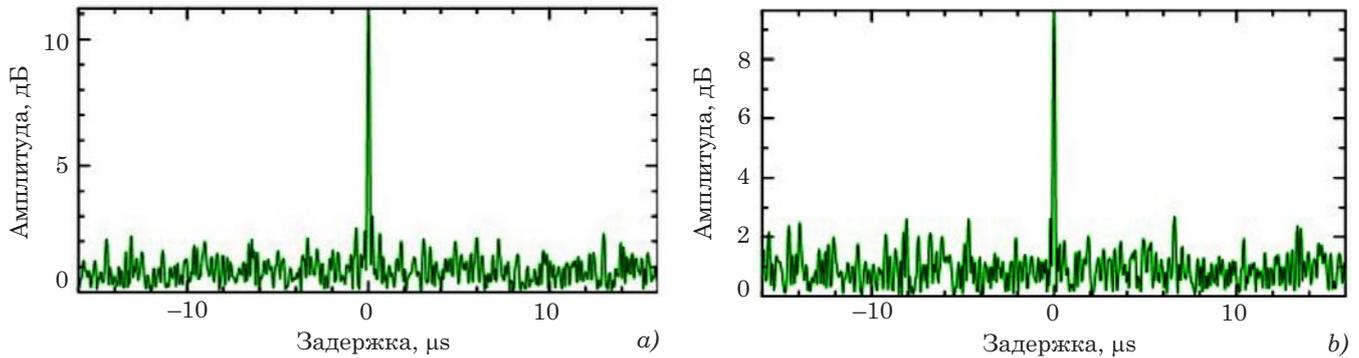


Рис. 9. Пример корреляционных откликов, полученных на сеансе R13962 для канала 8212.99 МГц: а) для базы «Бадарь» P1002M — «Светлое» МСПС; б) для базы «Светлое» МСПС — «Зеленчукская» P1002M

(Sv и S1 соответственно). При этом регистрировались сигналы 16 частотных каналов с шириной полосы пропускания 8 МГц каждый, 10 каналов в X-диапазоне и 6 каналов в S-диапазоне. Для источников с различной спектральной плотностью мощности излучения на разных сеансах было зафиксировано от 20 до 23 сканов длительностью от 33 до 178 с. Обработка данных была выполнена аналогичным образом. Во всех каналах были обнаружены отклики, получены значения задержек, скорости изменения задержек, фаза и другие параметры (рис. 9). Были вычислены и проанализированы отношения значений snr в отдельных частотных каналах по всем сканам для независимых баз с участием P1002M и МСПС, т. е. отношения snr на базах Bd-S1/Bd-Sv и S1-Zc/Sv-Zc. Для сравнения амплитуд корреляционных откликов, полученных с использованием МСПС и P1002M, вычислялись среднее значение и СКО по данным 20 сканов, так что полученные оценки можно считать статистически достоверными. Проведенный анализ показал, что отношение сигнала к шуму для корреляционных откликов, полученных с помощью МСПС и с помощью P1002M, совпадает в пределах СКО.

Тестирование МСПС на РТ-32 в режиме радиометрической регистрации подтвердило ожидаемые параметры (Гренков, Федотов, 2022). После завершения тестовых испытаний планируется перевод всех радиоастрономических наблюдений на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое» на МСПС. Это позволит исключить потери и искажения, связанные с передачей сигналов ПЧ по фидерным линиям, повысить надежность приемного комплекса радиотелескопа в целом за счет замены использовавшегося ранее оборудования (распределитель и коммутатор ПЧ, кабельные петли, СПС P1002M, система радиометрической регистрации и спектрометр), отдельные блоки которого эксплуатируются более 20 лет.

Заключение

Для оснащения радиотелескопов РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» МСПС была модернизирована. В состав системы включены два распределителя сигналов ПЧ, обеспечивающих подключение до 10 выходов радиоприемных устройств. Встроенное ПО дополнено необходимыми компонентами, что позволило реализовать основные РСДБ-режимы работы системы преобразования сигналов, а также радиометрические и спектрометрические режимы, в которых МСПС может заменить всю выходную регистрирующую аппаратуру радиотелескопа. Различные режимы работы МСПС успешно были протестированы по реальным сигналам на радиотелескопе РТ-32.

Для управления системой на радиотелескопах сети «Квазар-КВО» было разработано специальное ПО центрального управляющего компьютера радиотелескопа и комплекс программ для управления МСПС в ручном и автоматическом режимах, графического вывода данных анализируемых сигналов и характеристик аппаратуры радиотелескопа.

В 2022 г. модернизированная МСПС успешно протестирована и введена в эксплуатацию на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое». Результатом этого стало заметное улучшение технических и эксплуатационных параметров окончательного оборудования радиотелескопа (таблица).

Планируется в ближайшее время оснастить такими системами все обсерватории комплекса «Квазар-КВО».

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ ИПА РАН. В статье использованы материалы доклада, сделанного авторами на Всероссийской радиоастрономической конференции «Радиотелескопы, аппаратура и методы в радиоастрономии» (ВРК-2022).

Таблица

Основные результаты установки МСПС на радиотелескоп РТ-32

Параметр	P1002M+Mark5B+	МСПС+СВПД
Диапазон ПЧ, ГГц	0.1–1	0.1–1
Число широкополосных/узкополосных каналов	– /16	4/4 × 16
Полоса пропускания канала, МГц	0.5; 2; 4; 8; 16; 32	1024; 512; 0.5; 2; 4; 8; 16; 32
Максимальный регистрируемый поток данных, Гбит/с	2	16
Выходной формат данных	Mark 5B	VDIF; 10GE
Непрерывная амплитудная калибровка	нет	да
Возможность модернизации, в том числе дистанционная	нет	да
Режимы работы	Только РСДБ	РСДБ; Радиометр; Спектрально-селективный
Размещение в сигнальном тракте радиотелескопа	Аппаратная, наличие АЗ и УМ петель	Надзеркальная кабина, подключение к выходам приемников

Литература

Бондаренко Ю. С., Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В. Практика применения многофункциональной системы преобразования сигналов на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 57. С. 3–9.

Вытнов А. В., Иванов Д. В., Жуков Е. Т. и др. Система частотно-временной синхронизации комплекса «Квазар-КВО» // История науки и техники. 2013. № 3. С. 84–90.

Гренков С. А., Кольцов Н. Е. Спектрально-селективный модуль радиометра с защитой от радиопомех // Известия вузов. Радиофизика. Н. Новгород: изд-во Науч.-исслед. радиофиз. ин-т. 2015. Т. LVIII, № 7. С. 577–586.

Гренков С. А., Федотов Л. В. Спектрально-селективная регистрация радиометрических сигналов с помощью многофункциональной системы // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 62. С. 3–9.

Иванов В. К., Носов Е. В. Распределитель сигналов модуляции для радиотелескопа РТ-32 // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 49. С. 32–36.

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

Федотов Л. В., Носов Е. В., Бердников А. С. и др. Эффективность замены аналоговых систем преобразования сигналов на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» системой P1002M с цифровой обработкой сигналов // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 218–223.

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.

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.