

СОВРЕМЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ КОМПЛЕКСА «КВАЗАР-КВО»

MODERN DIGITAL BACKEND SYSTEMS FOR THE RADIO TELESCOPES OF THE QUASAR VLBI NETWORK

Д.А. Маршалов 

Институт прикладной астрономии РАН,
Санкт-Петербург, Россия, marshalov@iaaras.ru

С.А. Гренков 

Институт прикладной астрономии РАН,
Санкт-Петербург, Россия, grenkov@iaaras.ru

А.С. Бердников

Институт прикладной астрономии РАН,
Санкт-Петербург, Россия, as.berdnikov@iaaras.ru

Л.В. Федотов 

Институт прикладной астрономии РАН,
Санкт-Петербург, Россия, fedotov@iaaras.ru

D.A. Marshalov

Institute of Applied Astronomy RAS,
Saint Petersburg, Russia, marshalov@iaaras.ru

S.A. Grenkov

Institute of Applied Astronomy RAS,
Saint Petersburg, Russia, grenkov@iaaras.ru

A.S. Berdnikov

Institute of Applied Astronomy RAS,
Saint Petersburg, Russia, as.berdnikov@iaaras.ru

L.V. Fedotov

Institute of Applied Astronomy RAS,
Saint Petersburg, Russia, fedotov@iaaras.ru

Аннотация. В статье рассмотрены современные цифровые системы преобразования сигналов радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО». Кратко прослежена эволюция аппаратуры преобразования сигналов от аналоговых и гибридных решений к многофункциональной цифровой системе преобразования сигналов (МСПС), обеспечивающей полную цифровую обработку принимаемых сигналов в широкой полосе частот. Описаны архитектура, основные технические характеристики и режимы работы МСПС, а также особенности ее применения на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32. Показано, что использование МСПС позволяет унифицировать аппаратные средства радиотелескопов, поддерживать широкополосные и узкополосные режимы радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами, а также реализовывать спектральные и радиометрические наблюдения в рамках единой аппаратно-программной платформы. Приведены примеры практического применения системы, подтверждающие ее эффективность, стабильность параметров сигнального тракта и совместимость с отечественными и международными стандартами регистрации и передачи данных. В заключение обсуждаются перспективы дальнейшего развития системы и расширения круга решаемых научных и прикладных задач.

Ключевые слова: радиотелескоп, радиоастрономическая аппаратура, система преобразования сигналов, цифровая обработка сигналов.

Abstract. This paper presents modern digital signal conversion systems used for radio telescopes of the Quasar VLBI network. We briefly trace the evolution of signal conversion equipment from analog and hybrid solutions to a multifunctional digital backend system (MDBE) providing fully digital processing of received signals over a wide frequency range. The architecture, main technical characteristics, and operating modes of MDBE are described, along with specific features of its application on the RT-13 and RT-32 radio telescopes. It is shown that the use of MDBE enables unification of signal conversion hardware, supports both broadband and narrowband very long baseline interferometry modes, and allows spectral and radiometric observations to be implemented within a single hardware–software platform. We give examples of practical applications demonstrating the system’s efficiency, stability of signal path parameters, and compatibility with national and international data recording and transmission standards. Prospects for further development of the system and expansion of the range of scientific and applied problems are also discussed.

Keywords: radio telescope, radio astronomical equipment, signal conversion system, digital signal processing.

ВВЕДЕНИЕ

Современная радиоастрономия, в том числе радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ), в значительной степени опирается на цифровые системы преобразования и обработки сигналов. Именно

такие системы определяют доступную полосу наблюдений, чувствительность радиотелескопов и возможность реализации различных режимов регистрации — от широкополосных РСДБ-наблюдений до спектральных и радиометрических исследований. Разви-

тие аппаратуры преобразования сигналов является одной из ключевых тенденций в создании современной радиоастрономической техники и напрямую связано с переходом от аналоговых и гибридных решений к полностью цифровым методам обработки.

Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» является важным элементом отечественной радиоастрономической инфраструктуры и интегрирован в глобальную сеть РСДБ [Ипатов, 2013]. Он используется для решения координатно-временных задач, а также для проведения астрофизических, радиометрических и спектральных исследований. Радиотелескопы комплекса работают как в составе сети, так и автономно, что предъявляет повышенные требования к универсальности и функциональности систем преобразования сигналов, обеспечивающих первичную обработку принимаемых данных.

Система преобразования сигналов радиотелескопа представляет собой многоканальный аппаратно-программный комплекс, управляемый компьютером и подключаемый к выходам промежуточных частот (ПЧ) приемной аппаратуры. Такая система выполняет выделение сигналов в заданных участках спектра ПЧ, их частотное преобразование с разделением верхней и нижней боковых полос, фильтрацию и последующее аналого-цифровое преобразование. На основе квантованных сигналов формируется поток цифровых данных, пригодный для регистрации в требуемом формате и передачи в центр обработки вместе с метками времени и сигналами синхронизации. Таким образом, система преобразования сигналов играет ключевую роль в функционировании радиотелескопов, определяя качество и информативность получаемых наблюдательных данных.

На первых этапах развития комплекса «Квазар-КВО» в системах преобразования сигналов использовались полностью аналоговые схемы. Позднее в Институте прикладной астрономии РАН (ИПА РАН) была разработана гибридная система P1002M, в которой преобразование к видеочастотам осуществлялось на аналоговых микросхемах, аналого-цифровое преобразование — на видеочастотах, а цифровая фильтрация — на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Переход к гибридным решениям позволил сократить габариты аппаратуры и повысить качество данных, получаемых при РСДБ-наблюдениях. Следующим этапом развития стало создание широкополосной цифровой системы преобразования сигналов (ШСПС) с полосой 512 МГц, обеспечившей компенсацию потерь чувствительности и начало РСДБ-наблюдений на радиотелескопах РТ-13 с полноповоротными антеннами малого диаметра. Это ознаменовало переход к третьему поколению систем, в которых аналоговая обработка сохранилась преимущественно в радиоприемных трактах. Дальнейшее развитие таких систем в течение длительного времени сдерживалось ограничениями по быстродействию аналого-цифровых преобразователей и ПЛИС. При всех достоинствах — компактности, совместимости с режимами eVLBI [Min-Gyu Song et al., 2005; Сальников и др., 2023] и возможности формирования выходных потоков данных до 16 Гбит/с — ШСПС имела существенные

ограничения. Она проектировалась для радиотелескопов РТ-13 и не могла использоваться с другими приемными системами комплекса. Рабочая полоса оказалась недостаточной для современных требований, предполагающих использование полос не менее 1 ГГц. Кроме того, система обеспечивала преимущественно широкополосный режим РСДБ, тогда как значительная часть международных программ продолжает использовать узкополосную регистрацию. Существенным недостатком являлось и отсутствие контроля внутренних задержек сигналов, необходимого для повышения точности геодезических и астрометрических измерений.

Совокупность перечисленных факторов обусловила необходимость разработки многофункциональной цифровой СПС, способной обеспечить полную цифровую обработку сигналов в широкой полосе частот, унифицировать режимы работы радиотелескопов и повысить точность синхронизации. В ИПА РАН такая система была реализована в виде многофункциональной системы преобразования сигналов (МСПС), предназначенной для применения на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» и ориентированной на решение широкого круга научных и прикладных задач.

1. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Разработка МСПС была направлена на создание универсального аппаратно-программного решения, способного заменить несколько специализированных систем, ранее применявшихся на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО». В отличие от предыдущих разработок, ориентированных на отдельные типы радиотелескопов или конкретные режимы наблюдений, МСПС изначально проектировалась как единая платформа для реализации широкополосных и узкополосных режимов РСДБ, а также спектральных и радиометрических наблюдений. Ключевой особенностью МСПС является полный переход к цифровой обработке сигналов в широкой полосе частот при минимизации аналоговых участков тракта. Система обеспечивает оцифровку сигналов непосредственно вблизи приемной аппаратуры радиотелескопа, что позволяет существенно снизить потери и искажения, связанные с передачей аналоговых сигналов по длинным фидерным линиям, а также повысить стабильность параметров сигнального тракта. Такой подход особенно важен для радиотелескопов с различной конфигурацией приемных систем и широким набором наблюдательных режимов.

По своим техническим параметрам МСПС не уступает современным зарубежным цифровым СПС, применяемым в радиоастрономии и РСДБ-наблюдениях, и по ряду характеристик превосходит решения, ранее использовавшиеся в сети «Квазар-КВО». В таблице приведено сравнение основных параметров МСПС и ряда зарубежных аналогов, включая системы DBBC3 (ЕС), R2DBE (США), K6/GALAS (Япония) и KVN DAS (Южная Корея) [Tuccari et al., 2018; Vertatschitsch et al., 2015; Sekido et al., 2015; Oh

Основные параметры МСПС и ее зарубежных аналогов

Параметр	МСПС (Россия)	DBBC3 (ЕС)	R2DBE (США)	K6/GALAS (Япония)	KVN DAS (Южная Корея)
Число каналов	12	4	2	4	4
Макс. полоса (МГц)	2048	4096	2048	1024	1024
Макс. скорость общего потока данных (Гбит/с)	96	128	16	40	8
Квантование выходного сигнала	1/2/8/16	2/10	2	1/2	2
Формат данных на выходе	VDIF, 10GbE (40GbE)	VDIF, 10GbE/40GbE	VDIF, 10GbE	VDIF; VTP/UDP/IP, 10GbE	VSI-H→VDIF, 10GbE
Место размещения	антенна	лаб. корпус	лаб. корпус	лаб. корпус	лаб. корпус

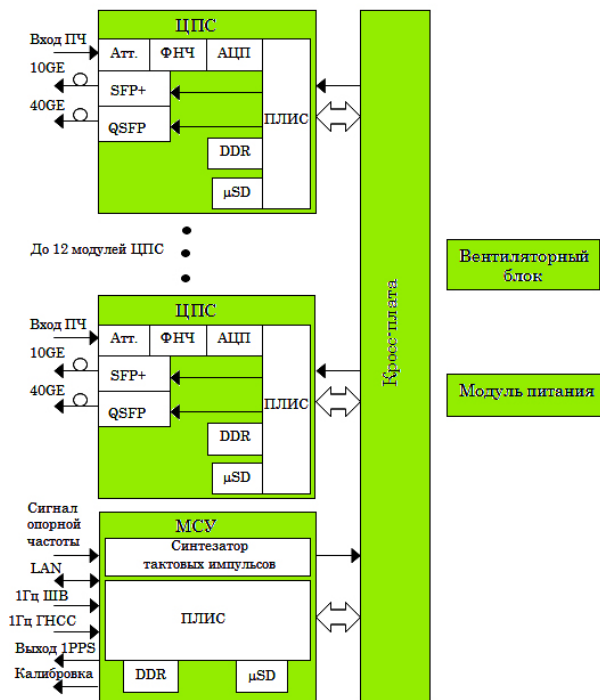


Рис. 1. Структура МСПС: ЦПС — цифровой преобразователь сигналов; Атт. — аттенуатор; ФНЧ — фильтр нижних частот и фильтр верхних частот (дифференциальный преобразователь с цепью развязки, встроенный в модуль ЦПС по входу АЦП); АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема; SFP+ и QSFP — оптические трансиверы; DDR — микросхема памяти; μSD — карта памяти micro SD; LAN — локальная сеть

et al., 2011]. Сравнение показывает, что МСПС сочетает высокую суммарную полосу обработки, большое число независимых каналов и гибкость конфигурации выходных потоков данных, что обеспечивает ее универсальность при решении широкого круга научных и прикладных задач.

МСПС выполнена по модульному принципу и включает до 12 цифровых преобразователей сигналов (ЦПС), модуль синхронизации и управления (МСУ), модуль питания и кросс-плату (рис. 1). Для обеспечения стабильного теплового режима предусмотрен отдельный блок вентиляции. Такая архитектура позволяет гибко конфигурировать систему в зависимости от числа приемных каналов и особенностей приемной аппаратуры радиотелескопа, сохраняя при этом единый аппаратный и программ-

ный базис. Установка МСПС осуществляется в непосредственной близости от приемной аппаратуры радиотелескопа, что существенно снижает потери и искажения сигналов в аналоговых трактах и обеспечивает оцифровку сигналов по каждому выходу промежуточных частот. Каждый модуль ЦПС содержит 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), работающий на частоте дискретизации 4096 МГц и обеспечивающий обработку сигналов в полосе до 2 ГГц, а также программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) для выполнения цифровой обработки. Передача выходных потоков данных осуществляется по оптическим каналам с использованием трансиверов SFP+ и QSFP в систему буферизации и передачи данных радиотелескопа [Сальников и др., 2023]. Для предотвращения насыщения АЦП в каждом входном тракте предусмотрен программно-управляемый аттенуатор с диапазоном ослабления 0–31.75 дБ и шагом 0.25 дБ, а также встроенная цепь развязки по постоянному току, подавляющая постоянную составляющую и частоты ниже 1 МГц вместе с фильтром нижних частот (ФНЧ), исключаяющим наложение спектров при дискретизации. Такой подход обеспечивает устойчивую работу системы при различных уровнях входных сигналов и упрощает ее адаптацию к различным приемным системам радиотелескопов комплекса.

Модуль синхронизации и управления, выполненный на той же элементной базе, что и ЦПС, обеспечивает централизованное управление системой и распределение синхросигналов. Управление МСПС осуществляется от центрального компьютера радиотелескопа по сети Ethernet, а взаимодействие МСУ с модулями ЦПС реализовано по высокоскоростным LVDS-каналам с пропускной способностью 256 Мбит/с. Встроенный синтезатор тактовых импульсов принимает внешний опорный сигнал частоты 5, 10 или 100 МГц и формирует сигналы синхронизации, распределяемые по всем модулям ЦПС. В МСУ также формируется сигнал меток времени 1PPS с возможностью синхронизации по шкале времени радиотелескопа. Контроль расхождений относительно импульсов глобальных навигационных спутниковых систем осуществляется с точностью до 4 нс, что позволяет своевременно выявлять и устранять нарушения синхронизации, критичные для высокоточных РСДБ-наблюдений.

МСПС устанавливается в фокальной кабине радиотелескопа, что позволяет отказаться от передачи



Рис. 2. Четырехканальная МСПС для радиотелескопов РТ-32

аналоговых сигналов по протяженным и подвижным кабельным линиям антенны. Такое размещение существенно снижает влияние нестабильностей, связанных с температурными изменениями, механическими деформациями и движением кабелей. Конструкция системы выполнена на базе стандартного шасси Eurocas PRO высотой 3U, рассчитанного на эксплуатацию в жестких условиях и подходящего для подвижной части радиотелескопов. Модульная архитектура МСПС позволяет реализовывать различные конфигурации системы без изменения габаритов и общей компоновки. Для радиотелескопов РТ-13 используется 8-канальная версия МСПС, тогда как для радиотелескопов РТ-32 разработана 4-канальная модификация системы, которая обеспечивает работу в диапазоне промежуточных частот 100–1000 МГц и позволяет осуществлять выбор сигналов от десяти приемников пяти диапазонов (L, S, C, X и K) в двух ортогональных поляризациях. Несмотря на различия в конфигурации, габаритные размеры и конструктивное исполнение системы для РТ-13 и РТ-32 остаются одинаковыми (рис. 2), что упрощает ее эксплуатацию и обслуживание.

Поддержание стабильного теплового режима МСПС обеспечивается отдельным вентиляторным блоком высотой 1U, оснащенный тремя управляемыми вентиляторами. Управление скоростью вращения вентиляторов осуществляется в автоматическом режиме на основе показаний встроенных датчиков температуры, размещенных в кросс-плате, а также в модулях ЦПС и МСУ. Такой подход позволяет поддерживать оптимальные температурные условия работы системы при изменяющихся внешних условиях эксплуатации. Для повышения надежности работы МСПС реализован непрерывный мониторинг напряжений и токов всех критических цепей питания. Контроль параметров осуществляется встроенными аппаратно-программными средствами, а при выходе измеряемых значений за допустимые пределы оператор радиотелескопа получает предупреждение о возможной неисправности. Это обеспечивает своевременное выявление отклонений в работе системы и снижает риск отказов в ходе наблюдений.

Функциональные возможности МСПС в значительной степени определяются прошивками программируемых логических интегральных схем модулей ЦПС, загружаемыми в систему в зависимости от выбранного режима работы. В прошивках реализуются все критические задачи цифровой обработки сигналов и синхронизации, тогда как функции управления и обмена с управляющим компьютером выполняются встроенным процессором ARM Cortex-A9. Логика цифровой обработки и синхронизации реа-

лизована на языке SystemVerilog, а программное обеспечение встроенного процессора — на языке С. Прошивка ПЛИС модуля синхронизации и управления в основном отвечает за конфигурацию и координацию работы системы, распределение синхросигналов и взаимодействие с центральным компьютером радиотелескопа. Прошивки ПЛИС модулей ЦПС, в свою очередь, определяют формат выходных потоков данных и конкретные алгоритмы обработки принимаемых сигналов, что обеспечивает гибкость системы и возможность быстрой адаптации к различным наблюдательным задачам. Обобщенная логическая структура прошивки ПЛИС модуля ЦПС показана на рис. 3 и включает три основных функциональных блока.

Основной блок цифровой обработки выполняет синхронизацию входных потоков данных, демуплексирование четырех цифровых потоков от АЦП и параллельную обработку 16 выборок сигнала. В этом блоке реализуются базовые операции цифровой обработки, необходимые для формирования выходных потоков данных в заданном формате.

Блок управления аналого-цифровым преобразователем обеспечивает калибровку АЦП, контроль переполнения и анализ параметров входного сигнала. В частности, в этом блоке реализованы функции фазовой калибровки системы, используемые для оценки и компенсации внутренних задержек сигнального тракта.

Блок синхронизации и системного контроля отвечает за взаимодействие с управляющим компьютером, прямой доступ к памяти (DMA), формирование системных часов и работу встроенного процессора. Этот блок обеспечивает согласованную работу всех компонентов прошивки и поддерживает обмен управляющей и диагностической информацией.

МСПС обеспечивает работу радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» в нескольких основных режимах [Маршалов и др., 2024], охватывающих как задачи радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами, так и автономные радиометрические и спектральные наблюдения.

Широкополосный режим РСДБ — система обеспечивает регистрацию сигналов в полосах 2048, 1024, 512, 128 и 64 МГц. Выбор полосы осуществляется программно и позволяет адаптировать параметры регистрации к требованиям конкретных наблюдательных программ и пропускной способности каналов передачи данных.

Узкополосный режим РСДБ — МСПС формирует до 16 независимо настраиваемых частотных каналов на каждый вход системы. Для каждого канала может быть задана полоса 32, 16, 8, 4, 2 или 0.5 МГц, что обеспечивает совместимость с международными программами РСДБ-наблюдений, использующими узкополосную регистрацию, а также гибкую настройку спектрального разбиения полосы.

Спектрометрический режим предназначен для регистрации спектров мощности принимаемых сигналов с заданным частотным разрешением и используется при проведении спектральных радиоастрономических наблюдений. Реализация этого режима в цифровой форме позволяет получать стабильные и воспроизводимые спектры в широкой полосе частот.

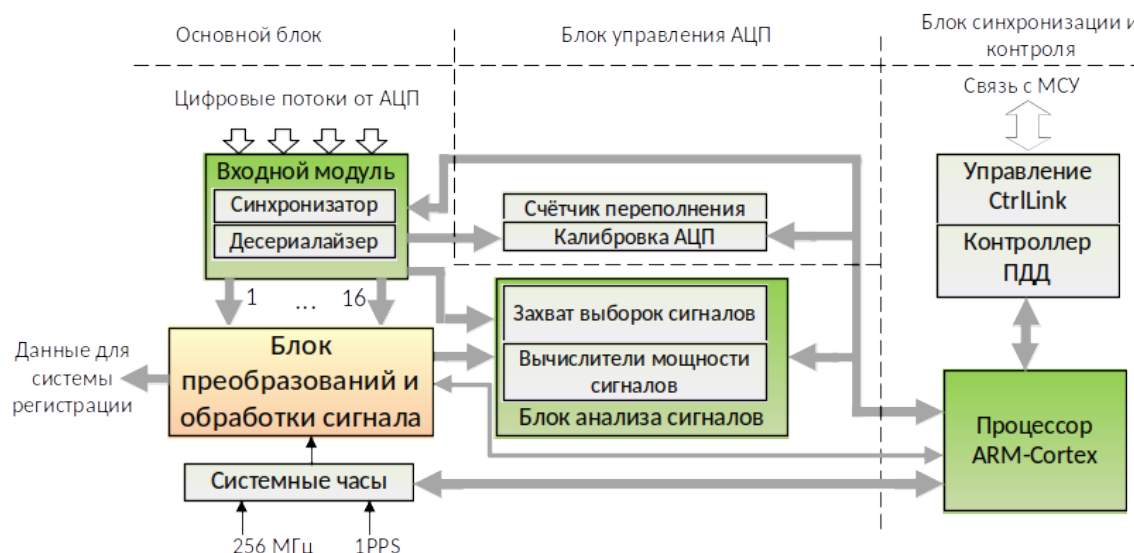


Рис. 3. Обобщенная логическая структура прошивки ПЛИС ЦПС

Радиометрический режим — осуществляется измерение интегральной мощности принимаемых сигналов во времени. Этот режим применяется при радиометрических наблюдениях и калибровке приемных систем радиотелескопов.

Спектрально-селективный радиометрический режим с защитой от помех — отдельно реализованный режим, в котором производится выделение заданных участков спектра с последующей радиометрической обработкой. Такой режим повышает устойчивость наблюдений к радиочастотным помехам и расширяет возможности применения МСПС при работе в условиях сложной электромагнитной обстановки.

Для обеспечения надежной работы МСПС и контроля корректности обработки сигналов разработаны аппаратно-программные средства диагностики, интегрированные в систему управления радиотелескопами комплекса «Квазар-КВО». Эти средства обеспечивают дистанционный контроль состояния сигнального тракта радиотелескопа на участке от выходов приемных устройств до входов модулей МСПС. В рамках диагностических процедур выполняется измерение мощности сигналов по всем каналам, а также получение и анализ спектров мощности и фазовых спектров. Это позволяет оперативно выявлять отклонения в работе приемных трактов, нарушения согласования уровней сигналов и возможные неисправности отдельных элементов системы. Дополнительно реализованы средства оценки фазо-частотных характеристик и групповых задержек, а также анализа фаз гармоник сигнала при фазовой калибровке в каждом канале [Nosov, 2019]. Такие измерения используются для контроля внутренних задержек сигнального тракта и повышения точности РСДБ-наблюдений, особенно в геодезических и астрометрических режимах. Интеграция диагностических функций непосредственно в цифровую систему преобразования сигналов позволяет проводить контроль параметров в реальном времени без подключения внешней измерительной аппаратуры, что существенно упрощает

эксплуатацию радиотелескопов и повышает надежность проведения наблюдений.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ НА РАДИОТЕЛЕСКОПАХ КОМПЛЕКСА «КВАЗАР-КВО»

В 2011–2023 гг. РСДБ-наблюдения на радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» выполнялись с использованием гибридной системы преобразования сигналов Р1002М, тогда как радиотелескопы РТ-13 изначально оснащались ШСПС. Для радиометрических исследований на РТ-32 применялись аналоговые модули ПРМ-2, разработанные в ИПА РАН в 1990-е годы, а спектрометрические задачи решались с использованием экспериментальных цифровых модулей Р3901 и Р3902. Таким образом, различные типы наблюдений обеспечивались разрозненными аппаратными средствами, отличающимися по архитектуре и принципам обработки сигналов.

С 2020 г. начался поэтапный переход всех радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» на многофункциональную систему преобразования сигналов. На радиотелескопах РТ-32 МСПС первоначально эксплуатировалась параллельно с системой Р1002М, что позволило провести сравнительные испытания в условиях реальных наблюдений. Результаты этих испытаний подтвердили корректность функционирования МСПС, ее совместимость с существующей аппаратурой регистрации и существенные преимущества по гибкости конфигурации и стабильности параметров сигнального тракта.

В настоящее время все радиоастрономические наблюдения в комплексе «Квазар-КВО» выполняются с использованием МСПС. Применение системы в режиме РСДБ обеспечивает успешное использование радиотелескопов комплекса в международных наблюдательных программах, а также проведение высокоточных геодезических измерений. Пример корре-

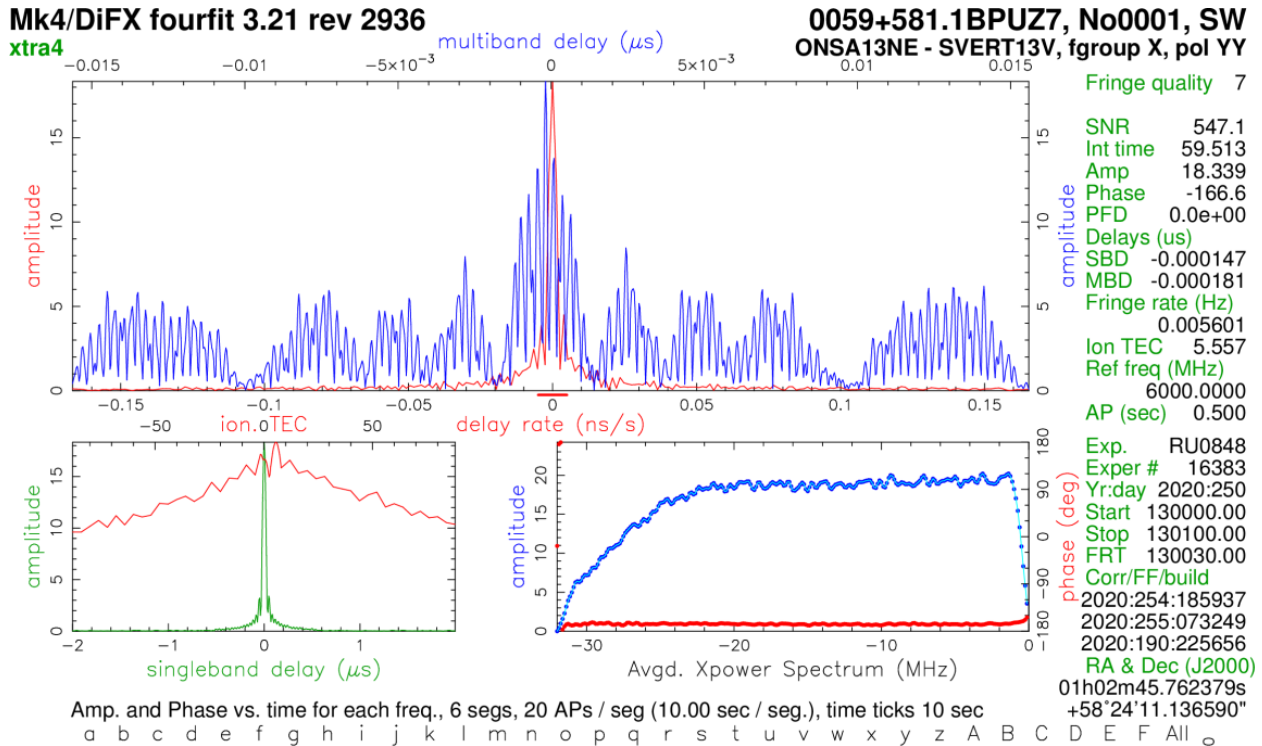


Рис. 4. Результат обработки на корреляторе DiFX ИПА РАН наблюдений источника 0059+581 (PT-13 «Светлое» — Онсала, Швеция), зарегистрированных с помощью МСПС

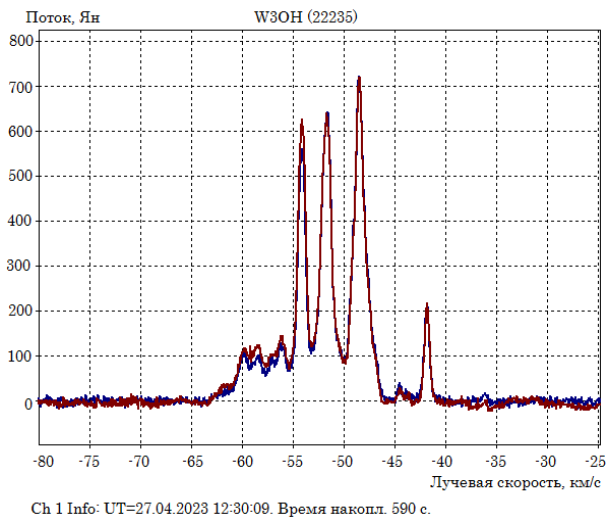


Рис. 5. Спектр источника W3OH, полученный на PT-32 (обсерватория «Зеленчукская») в диапазоне 1.35 см с помощью МСПС

реляционной обработки данных РСДБ-наблюдений, зарегистрированных с использованием МСПС, показан на рис. 4. Обработка наблюдений источника 0059+581 выполнена в ИПА РАН на программном корреляторе DiFX [Deller et al., 2007].

Использование МСПС в спектральных режимах позволяет эффективно проводить радиоастрономические наблюдения молекулярных линий. На рис. 5 показан спектр источника W3OH, полученный на радиотелескопе PT-32 в диапазоне 1.35 см. Данный пример демонстрирует стабильность работы системы и возможность получения спектров с высоким отношением сигнал/шум при цифровой обработке в ши-

рокой полосе частот. При спектральных наблюдениях в диапазоне 1.35 см с использованием PT-32 и МСПС (полоса анализа 16 МГц, разрешение 0.488 кГц, время накопления 10 мин) достигнута флуктуационная чувствительность ~ 0.2 К по антенной температуре на спектральный канал. В радиометрическом режиме в диапазоне 3.5 см (полоса 1024 МГц, постоянная времени 1 с) среднеквадратичное отклонение выходного сигнала не превышает ~ 0.001 К. Данные параметры соответствуют лучшим мировым аналогам и подтверждают высокую стабильность МСПС.

Дополнительным подтверждением универсальности МСПС стали экспериментальные радиолокационные наблюдения Луны, выполненные в обсерватории «Светлое» комплекса «Квазар-КВО» [Bondarenko et al., 2024]. В ходе экспериментов были получены спектрограммы эхо-сигналов от кратеров Архимед, Тихо, Коперник, Моря Ясности и района посадки «Аполлона-15». В наблюдениях использовались 35-метровая антенна DSA-3 станции MALARGÜE (ЕКА, Аргентина) и 13-метровый радиотелескоп PT-13 комплекса «Квазар-КВО», оснащенный МСПС. Полученные результаты подтвердили возможность использования системы не только в классических радиоастрономических, но и в радиолокационных экспериментах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход к цифровым методам преобразования и обработки сигналов является ключевым направлением развития современной радиоастрономической аппаратуры. Если на ранних этапах в радиотелеско-

пах комплекса «Квазар-КВО» цифровые методы использовались лишь частично, то современные решения обеспечивают полную цифровую обработку сигналов в широкой полосе частот и поддержку различных режимов наблюдений.

В ИПА РАН разработана и внедрена многофункциональная цифровая система преобразования сигналов (МСПС), предназначенная для применения на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 комплекса «Квазар-КВО». Система обеспечивает унификацию аппаратуры преобразования сигналов, ранее реализованной в виде разрозненных специализированных устройств, и позволяет поддерживать широкополосные и узкополосные режимы РСДБ, а также спектральные и радиометрические наблюдения в рамках единой аппаратно-программной платформы.

Эксплуатация МСПС в реальных наблюдательных условиях подтвердила целесообразность замены ранее применявшихся систем единой универсальной системой. Применение МСПС позволило повысить стабильность параметров сигнального тракта, упростить эксплуатацию радиотелескопов и обеспечить совместимость с отечественными и международными стандартами регистрации и передачи данных. В настоящее время все радиоастрономические наблюдения в комплексе «Квазар-КВО» выполняются с использованием МСПС, а с 2023 г. РСДБ-сеансы на радиотелескопах РТ-13 проводятся исключительно с ее применением.

Перспективы дальнейшего развития МСПС связаны с расширением реализуемых алгоритмов цифровой обработки, повышением устойчивости к радиочастотным помехам, развитием спектральных режимов и исследованиями переменных и транзитных радиоисточников, а также интеграцией с виртуальными обсерваториями (International Virtual Observatory Alliance (IVOA) [<https://www.ivoa.net>]), что обеспечит доступ к наблюдательным данным радиотелескопов сети «Квазар-КВО» через единые международные интерфейсы. Это создает основу дальнейшего расширения научных и прикладных задач, решаемых радиотелескопами комплекса «Квазар-КВО».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ипатов А.В. Радиointерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований. *Успехи физических наук*. 2013, т. 183, № 7, с. 769–777. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0183.201307i.0769>.
- Маршалов Д.А., Гренков С.А., Кольцов Н.Е., Федотов Л.В. 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>.

- Сальников А.И., Безруков И.А., Васильев В.В., Вылегжанин А.В. Опыт эксплуатации систем буферизации и передачи данных в течение 2012–2022 годов. Перспективы развития. *Труды ИПА РАН*. 2023, вып. 64, с. 9–14. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.64.9-14>.
- Bondarenko Yu.S., Marshalov D.A., Zinkovsky B.M., Mikhailov A.G. Radar images of the candidate spacecraft landing sites on the Moon. *Astron. Lett.* 2024, vol. 50, no. 1, pp. 92–97. <https://doi.org/10.1134/S1063773724600127>.
- Deller A.T., Tingay S.J., Bailes M., West C. DiFX: a software correlator for very long baseline interferometry using multiprocessor computing environments. *Publ. Astron. Soc. Pacific*. 2007, vol. 119, iss. 853, pp. 318–336. <https://doi.org/10.1086/513572>.
- International Virtual Observatory Alliance.
URL: <https://www.ivoa.net> (дата обращения 10 декабря 2025 г.).
- Min-Gyu Song, Do-Young Byun, Hyun-Goo Kim, et al. The design of network model for the implementation of e-VLBI. *Publ. Korean Astron. Soc.* 2005, vol. 20 (1), pp. 63–71. <https://doi.org/10.5303/PKAS.2005.20.1.063>.
- Nosov E.V. Methods for measuring the signal of the phase calibration of the VLBI radio telescopes. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2019, vol. 62, no. 4, pp. 237–249. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09972-z>.
- Oh S.-J., Roh D.-G., Wajima K., et al. Design and development of a high-speed data-acquisition system for the Korean VLBI Network. *Publ. Astron. Soc. of Japan*. 2011, vol. 63, iss. 6, pp. 1229–1242. <https://doi.org/10.1093/pasj/63.6.1229>.
- Sekido M., Takefuji K., Tsutsumi M., Kondo T. Broadband VLBI Data Acquisition System for GALA-V. *IVS NICT TDC News*, 2015, no. 35, pp. 7–11.
URL: https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/news_35/tdc_news35.pdf (дата обращения: 20 декабря 2025 г.).
- Tuccari G., Alef W., Dornbusch S., et al. DBBC3 — the new wide-band backend for VLBI *Proc. Science (PoS). 14th European VLBI Network Symposium and Users Meeting*. Granada, Spain, 2018, p. 140. <https://doi.org/10.22323/1.344.0140>.
- Vertatschitsch L., Primiani R., Young A., et al. R2DBE: a wideband digital backend for the Event Horizon Telescope. *Publ. Astron. Soc. Pacific*. 2015, vol. 127, iss. 959, pp. 1226–1239. <https://doi.org/10.1086/684513>.
- Как цитировать эту статью:
Маршалов Д.А., Гренков С.А., Бердников А.С., Федотов Л.В. Современные цифровые системы преобразования сигналов радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО». *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 2, с. 130–136. <https://doi.org/10.12737/szf-122202614>.