

**СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ  
РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «КВАЗАР-КВО»**

Д. А. Маршалов, Е. В. Носов, Л. В. Федотов

Институт прикладной астрономии РАН  
Российская Федерация, 191187, г. Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10  
E-mail: marshalov.iaa@gmail.com

*Рассмотрены современные системы преобразования радиоастрономических сигналов, используемые на радиointерферометрическом комплексе «Квazar-КВО». Показана зависимость точности координатно-временных измерений от параметров системы преобразования сигналов. Рассмотрена структура и принцип работы системы R1002M, которая разработана в ИПА РАН и введена в эксплуатацию на радиотелескопах комплекса «Квazar-КВО». Эта 16-канальная система работает в диапазоне частот 0,1–1 ГГц и обеспечивает регистрацию данных со скоростью до 2 Гбит/с в широко распространенном формате VSI-H. С 2011 года системы R1002M работают на радиотелескопах комплекса в качестве штатного оборудования и используются во всех радиointерферометрических наблюдениях, проводимых по отечественным и зарубежным программам, включая траекторные измерения космических аппаратов. Приведен анализ результатов работы системы R1002M на радиотелескопах за несколько лет. Показан положительный эффект от замены зарубежных систем на R1002M, связанный с сокращением инструментальных потерь чувствительности радиointерферометра, улучшением линейности и стабильности фазовых характеристик каналов за счет использования цифровой обработки сигналов. Для оснащения радиотелескопов с антеннами небольшого (12–13 м) диаметра разработана новая широкополосная система BRAS. Она предназначена для размещения непосредственно на антенне, позволяет отказаться от высокочастотных фидеров и передавать цифровые потоки по оптическим линиям через интерфейс 10G Ethernet. Система BRAS построена по модульному принципу и состоит из восьми одинаковых каналов цифрового преобразования сигналов, работающих в диапазоне промежуточных частот 1–1,5 ГГц с полосой пропускания 512 МГц. Она обеспечивает формирование информационного потока в международном формате VDIF с суммарной скоростью 16 Гбит/с. Приведена структура, элементная база и описание работы системы, сравнение с зарубежными аналогами, а также результаты испытаний опытных образцов BRAS на действующих радиотелескопах. Испытания подтвердили высокие параметры разработанной системы, позволяющие заметно повысить чувствительность радиointерферометра и увеличить число доступных для наблюдения космических источников радиоизлучения.*

*Ключевые слова: радиointерферометрия со сверхдлинными базами, система преобразования сигналов, видеоконвертер, цифровое преобразование широкополосных сигналов.*

Vestnik SibGAU  
2014, No. 4(56), P. 81–87**SIGNALS CONVERSION SYSTEMS OF VLBI “QUASAR” NETWORK**

D. A. Marshalov, E. V. Nosov, L. V. Fedotov

Institute of Applied Astronomy Russian Academy of Science  
10, Kutuzova emb., St. Petersburg, 191187, Russian Federation  
E-mail: marshalov.iaa@gmail.com

*The paper is devoted to modern signals conversion systems which are used in radio interferometric “Quasar” network. The relations between coordinate-time measurements accuracy and system signal conversion parameters are showed. The structure, basic principles and performance of the regular system R1002M, which is developed in IAA RAS, with data stream 2 Gbit/s are considered. The 16-th channels system R1002M works in intermediate frequency range 0,1–1 GHz, and provides acquisition up to 2 Gbits/s data rate in widespread format VSI-H. Since 2011 the systems R1002M working on “Quasar” network radio telescopes as regular equipment, and are used in all VLBI observations carried out by domestic and foreign programs, including the trajectory measurements of spacecraft. The analysis of the operation results of R1002M are presented for last few years. The positive effect of replacing of foreign systems on the R1002M’s are showed. Its due to the reduction of radio interferometer instrumental sensitivity losses, improvement of linearity and stability of the channels phase characteristics by using digital signal processing. To equip*

*new radio telescopes with small antennas (12–13 m) diameter the new broadband acquisition system (BRAS) was developed. It is designed for accommodation directly on the antenna, which allows to refuse high frequency feeders and transmit digital data streams through optical fiber by 10G Ethernet interface. The system is constructed by a modular design and consists of eight identical digital signal conversion channels, working in intermediate frequency range of 1–1,5 GHz with 512 MHz bandwidth. It provides formation of information data flow in the VDIF international format with a total data stream up to 16 Gbit/s. The structure, element base, description of the system, comparison with foreign analogues and also the results of development type BRAS testing on existing radio telescopes are given. Tests confirmed the high parameters of the developed system that allows you to significantly increase the sensitivity of the radio interferometer and increase the number of available observations for cosmic radio sources.*

*Keywords: very long baseline radio interferometry, video convertor, digital conversion of wideband signals.*

**Введение.** Уникальный комплекс «Квazar-КВО» широко используется в научных исследованиях по астрофизике, астрометрии и космической геодезии, а также при решении ряда важных прикладных задач, например, высокоточного координатно-временного обеспечения и поддержки глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС [1]. Комплекс объединяет наземные радиоастрономические обсерватории, расположенные в трех субъектах Российской Федерации – «Светлое» (п. Светлое, Ленинградская область), «Зеленчукская» (ст. Зеленчукская, Республика Карачаево-Черкесия) и «Бадары» (Тункинский район, Республика Бурятия), которые образуют радиоинтерферометрическую сеть со сверхбольшими базами (РСДБ) 2015×4282×4405 км, а также центр корреляционной обработки РАН [2]. Каждая радиоастрономическая обсерватория помимо РСДБ аппаратно-программных средств оснащена аппаратурой космической геодезии, квантово-оптической системой, радиометром водяного пара и рядом вспомогательных средств, которые составляют стацию колоцированных средств [3].

Основным источником радиоастрономических наблюдательных данных на каждой станции комплекса является полноповоротный прецизионный радиотелескоп с диаметром зеркала 32 м, оснащенный высокочувствительными охлаждаемыми приемниками радиоизлучения сантиметрового диапазона волн [4]. При радиоинтерферометрии выделение, преобразование и обработку сигнала, принятого приемной системой радиотелескопа от радиоисточников естественно или искусственного происхождения, к пригодному для регистрации виду осуществляет система преобразования сигналов [5]. Ключевые параметры такой системы (рабочий диапазон частот  $\Delta f_{IF}$ , полоса пропускания канала  $B$ , число каналов  $m$ , число бит в одной выборке сигнала  $b$ , коэффициент инструментальных потерь чувствительности  $\eta$ ) непосредственно влияют на отношение сигнал/шум на выходе коррелятора  $SNR$  и, в конечном счете, на точность координатно-временных измерений, которая определяется среднеквадратической ошибкой измерения групповой задержки сигналов  $\sigma_\tau$ :

$$SNR \approx \eta_\Sigma \frac{T_A}{T_S} \sqrt{N\tau_c/b}; \sigma_\tau \approx \frac{1}{2\pi\Delta f_{RMS} SNR}, \quad (1)$$

где  $\eta_\Sigma$  – суммарный коэффициент инструментальных потерь в отношении сигнал/шум на выходе радиоинтерферометра;  $T_A$  – шумовая температура сигнала в антенне;  $T_S$  – шумовая температура приемной

системы радиотелескопа;  $N = 2Bbm$  – скорость информационного потока на выходе радиотелескопа;  $\tau_c$  – время усреднения в корреляторе. Среднеквадратическая полоса частот принимаемого сигнала при синтезе  $m$  каналов:

$$\Delta f_{RMS} = \left[ 1/m \prod_{i=1}^m (f_i - f_{IF}) \right]^{0,5}, \quad (2)$$

где  $f_i$  – частота настройки  $i$ -го канала;  $f_{IF}$  – центральная частота рабочего диапазона  $\Delta f_{IF}$ .

**Штатная система преобразования сигналов P1002M.** В настоящее время все радиотелескопы комплекса «Квazar-КВО» оснащены разработанной в ИПА РАН 16-канальной радиоинтерферометрической системой преобразования сигналов P1002M [6], которая обеспечивает регистрацию данных со скоростью до 2 Гбит/с в широко распространенном международном формате VSI-H. По своим параметрам (диапазон частот, полосы пропускания каналов) система P1002M соответствует большинству из находящихся в эксплуатации зарубежных систем преобразования сигналов. Из-за использования в P1002M цифровой обработки сигналов на видеочастотах по некоторым характеристикам она превосходит широко распространенные зарубежные системы (табл. 1).

P1002M отличается модульной конструкцией и состоит из трех блоков (рис. 1), что обеспечивает гибкое комплексирование аппаратуры на радиотелескопе. Основной блок кроме четырех каналов преобразования сигналов включает в себя распределитель сигналов промежуточных частот (ПЧ) и синтезатор тактовых частот. В каждом дополнительном блоке размещаются по 6 каналов.

Каждый видеоконвертор системы P1002M содержит преобразователь частот с малозумящим гетеродином, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) типа LTC2299 и программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) типа XC4VSX35, в которой осуществляется разделение верхней и нижней боковых полос сигнала и формирование полосы пропускания канала [7; 8].

Синтезатор частот, связанный с системой частотно-временной синхронизации (СЧВС) радиотелескопа, формирует меандр тактовой частоты 64 МГц, который синхронизирует работу гетеродинов и обеспечивает синфазность работы АЦП и ПЛИС всех видеоконверторов. Поток данных в формате VSI-H формируется платой сведения потоков основного блока P1002M.

Основные параметры системы P1002M

Рабочий диапазон частот ПЧ	100–1000 МГц
Число каналов	16
Номиналы полос пропускания	0,5, 2, 4, 8, 16, 32 МГц
Ослабление шумов зеркального канала	≥ 40 дБ
СКО гетеродинов	≤ 1,2 град
ФЧХ каналов	Линейные
Измерение мощности сигнала	По ПЧ и по видео
Интерфейс управления	RS-232, RS-485, Ethernet
Формат выходных сигналов	VSI-H
Суммарная скорость информационного потока на выходе	До 2 Гбит/с
Точность измерения групповой задержки для канала 16 МГц, для синтезированной полосы 720 МГц	0,5–2 нс 3–10 пс

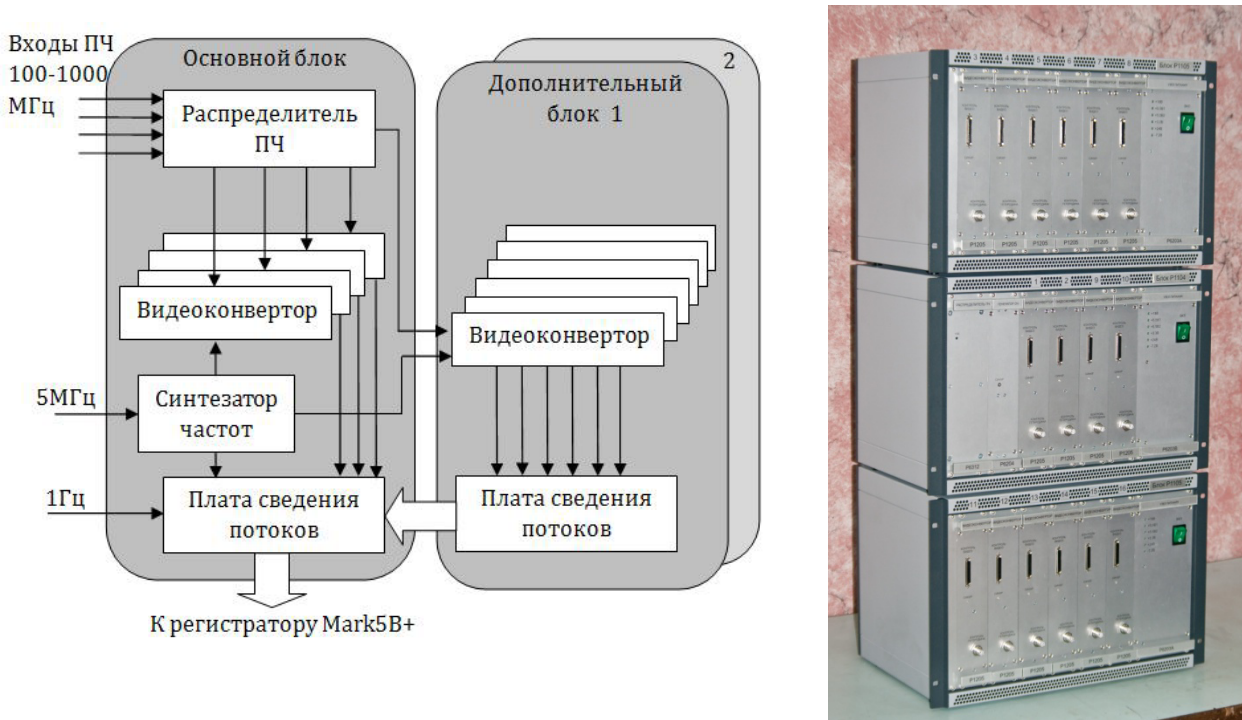


Рис. 1. Система преобразования сигналов P1002M: структура (слева) и общий вид (справа)

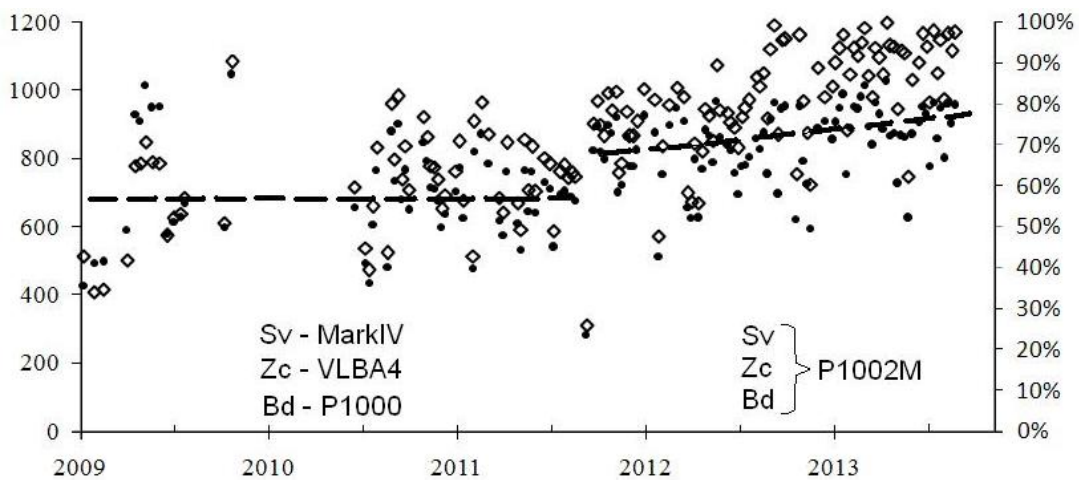


Рис. 2. Среднее число наблюдений, пригодных для вторичной обработки: абсолютное значение (●) и % от общего числа наблюдений за сессию (◊)

С 2011 г. системы P1002M работают на всех радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» в качестве штатного оборудования и используются во всех РСДБ наблюдениях по отечественным и зарубежным программам, включая траекторные измерения космических аппаратов «Марс-экспресс» и «Венера-экспресс» и совместные наблюдения с аппаратом «Спектр-Р» (проект «РадиоАстрон»). Положительный эффект от замены зарубежных систем на P1002M, связанный с сокращением инструментальных потерь  $\eta_{\Sigma}$ , а также практически идеальной линейностью и стабильностью фазовых характеристик каналов, позволил заметно улучшить качество получаемых при РСДБ наблюдениях данных [9]. Чувствительность радиointерферометра возросла в среднем на 20–30 %, при этом разброс значений  $SNR$  для разных каналов сократился более чем на порядок. Таким образом, среднее число полученных за одну сессию результатов наблюдений космических источников радиоизлучения, пригодных для вторичной обработки (в частности, для вычисления параметров вращения Земли), с вводом в эксплуатацию систем P1002M увеличилось более чем на 20 % (рис. 2).

#### Новая система преобразования сигналов BRAS.

Следующим поколением систем преобразования сигналов комплекса «Квазар-КВО» является широкополосная цифровая система преобразования сигналов BRAS (Broadband Acquisition System) с цифровой обработкой сигналов на высоких частотах и суммарным информационным потоком 16 Гбит/с. В первую очередь, система BRAS предназначена для перспективных радиointерферометров на антеннах малого диаметра [10–12], в том числе для новых радиотелескопов РТ-13, строительство которых завершается в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары», комплекса «Квазар-КВО».

Параметры системы BRAS (табл. 2) позволяют скомпенсировать потери чувствительности радиointерферометра, связанные с уменьшением диаметра антенн. Они соответствуют уровню лучших зарубежных

разработок, а по соотношению цена–качество превосходят их. Кроме того, система BRAS отличается тем, что предназначена для размещения непосредственно на антенне радиотелескопа, а не в аппаратном помещении, как зарубежные системы. Это позволяет исключить длинные линии передачи сверхвысокочастотных широкополосных сигналов от радиоприемных устройств, а с выхода системы по оптическим линиям с высокой надежностью передавать цифровые потоки данных через интерфейс Ethernet на систему буферизации данных для дальнейшей передачи их в центр корреляционной обработки.

Система BRAS [13; 14] построена по модульному принципу и состоит из восьми одинаковых модулей каналов цифрового преобразования сигналов (КЦП), работающих в диапазоне ПЧ 1–1,5 ГГц, модуля синхронизации и узла питания, соединенных между собой через кросс-плату (рис. 3).

Каждый КЦП (рис. 4) содержит усилитель (УПЧ) с фильтром, ограничивающим спектр входного широкополосного сигнала, аттенюатор для автоматического поддержания оптимального уровня сигнала, быстродействующий АЦП типа ADC081500, ПЛИС типа XC6SLX100T, выполняющую функции цифрового 2-битового квантования сигналов и формирования цифровых потоков в формате VDIF (VLBI Data Interchange Format) для интерфейса 10G Ethernet, а также оптический трансивер. На модуль синхронизации, который формирует и распределяет синфазные сигналы тактовых частот для КЦП, поступают сигналы времени и сигналы опорной частоты 100 МГц от СЧВС-радиотелескопа. Управление системой осуществляет центральный компьютер управления радиотелескопом. В системе предусмотрены функции измерения задержек между сигналами от приемника Глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС) и шкалы времени радиотелескопа (ШВ), анализа спектра входного сигнала, выделения и измерения фазы сигнала фазовой калибровки радиотелескопа, а также ряд функций контроля и диагностики.

Таблица 2

Сравнение параметров системы BRAS и последних зарубежных разработок

Система, страна	DBBC 2010, Италия	RDBE-H, США	CDAS, Китай	BRAS, Россия
Число входов ПЧ	8	2	4	8
Число каналов	8	1	1	8
Полоса пропускания канала, МГц	1024	512	512	512
Диапазон входных частот АЦП, МГц	0–3500	0–1536	50–1024	0–1536
Квантование, бит	1, 2 или 4	2	1, 2 или 4	2 или 8
Формат данных на выходе	VDIF/VSI-H	VDIF (10GE)	VSI-H	VDIF (10GE)
Суммарная скорость потока на выходе, Гбит/с	32	2	2	16
Место размещения	Лаб. корпус	Лаб. корпус	Лаб. корпус	Антенна
Цена при серийном производстве	US\$131 470	US\$18 000	US\$50 000	US\$72 000

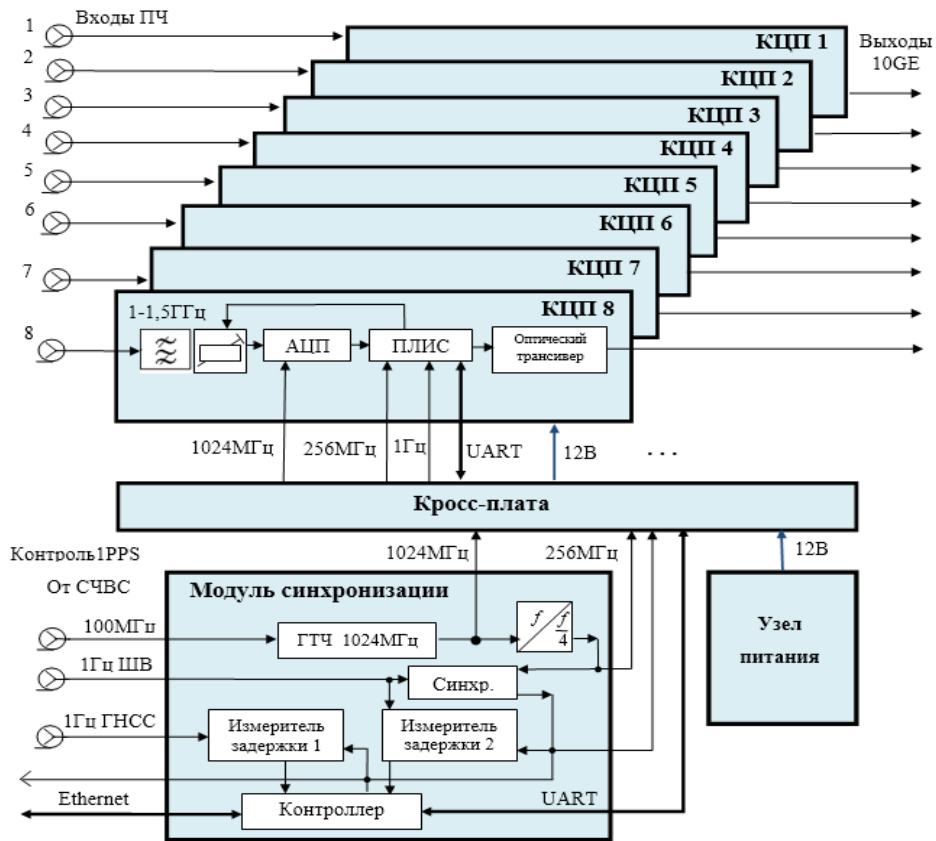


Рис. 3. Система BRAS

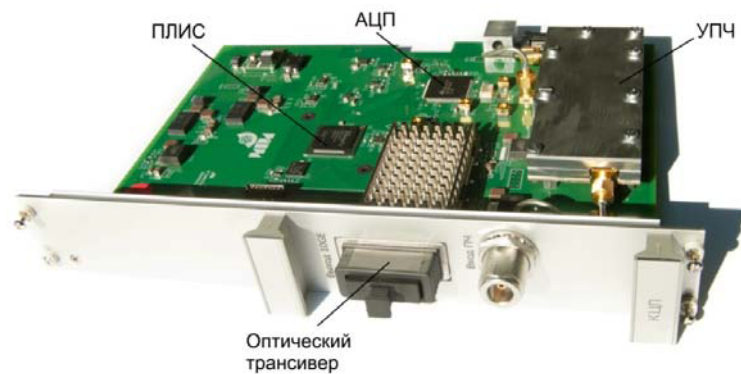


Рис. 4. Канал цифрового преобразования сигналов

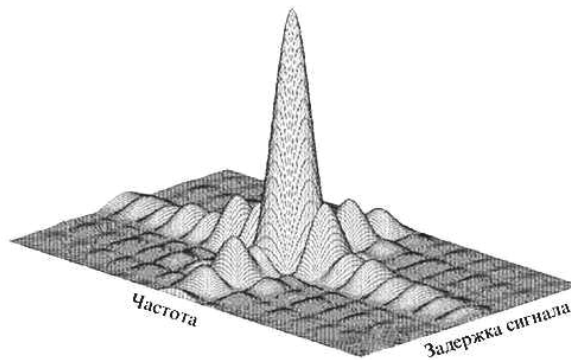


Рис. 5. Корреляционный отклик от источника 0059+581 на базе Светлое–Зенленчукская, полученный при наблюдениях 10.08.2012 г. в диапазоне длин волн 3,5 см с использованием прототипа системы BRAS

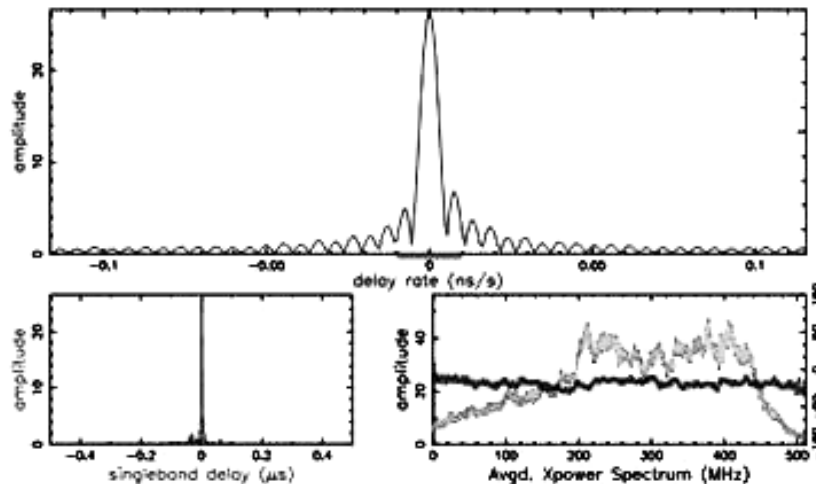


Рис. 6. Корреляционный отклик от источника 1803+784 на базе Бадары–Зеленчукская, полученный при наблюдениях 04.09.2014 г. в диапазоне длин волн 3,5 см с использованием системы BRAS: SNR = 341

**Испытания системы BRAS.** Двухканальный прототип системы был исследован в условиях реальных РСДБ-наблюдений на базе Светлое–Зеленчукская комплекса «Квazar-КВО» с использованием штатного оборудования 32-метровых антенн [15]. При этом в качестве системы буферизации данных использовалась аппаратура регистрации Mark5C фирмы Conduant Corp. (США). В ходе экспериментального сеанса РСДБ наблюдались 8 калибровочных радиоисточников из каталога *rfc\_2012c* со спектральными плотностями мощности потока излучения от 0,09 до 2 Янских. От всех источников были получены четкие корреляционные отклики (рис. 5) с отношением сигнал/шум в 4,7–4,8 раза большим, чем для каналов штатной аппаратуры с шириной полосы пропускания 16 МГц, что приблизительно соответствует соотношению полос пропускания каналов штатной аппаратуры и системы BRAS. Эксперимент показал, что точность определения временного положения корреляционного отклика при использовании одного широкополосного канала ( $m = 1$ ,  $B = 512$  МГц) приблизительно в 1,6 раза выше точности, которую можно получить при использовании 8 штатных узкополосных каналов и синтезе полосы частот ( $\Delta f_{rms} = 736$  МГц).

При проведении лабораторных испытаний опытных образцов системы BRAS были измерены их электрические характеристики, проверено и отлажено программное обеспечение, включая конфигурации ПЛИС в КЦП и модулях синхронизации. Механические и климатические испытания опытных образцов подтвердили возможность их эксплуатации непосредственно на антенне радиотелескопа.

Объектовые испытания опытных образцов BRAS были проведены в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары». При этом использовалось штатное оборудование 32-метровых антенн комплекса «Квazar-КВО». В ходе экспериментального РСДБ-сеанса 4 сентября 2014 года с помощью системы BRAS наблюдались 25 опорных источников радиоизлучения

с плотностью потока от 0,6 до 7,6 Янских, используемых обычно для оперативного определения параметров вращения Земли на комплексе «Квazar-КВО». В результате обработки на программном корреляторе в ИПА РАН были получены четкие отклики (рис. 6) от всех наблюдаемых источников с оценкой качества 9 из 10 возможных.

**Заключение.** Уникальный радиоинтерферометрический комплекс «Квazar-КВО» оснащен отечественной аппаратурой преобразования сигналов, современное состояние которой соответствует мировому уровню. Штатная система P1002M с цифровой обработкой сигналов на видеочастотах хорошо зарекомендовала себя при работе комплекса «Квazar-КВО» как по отечественным, так и по зарубежным программам РСДБ-наблюдений. Создание новой широкополосной системы преобразования сигналов BRAS позволяет оснастить перспективные радиотелескопы на малых антеннах. Ввод в эксплуатацию опытных образцов системы BRAS на строящихся радиотелескопах с 13-метровыми антеннами планируется в 2015 г.

Впервые в стране на радиоинтерферометре комплекса «Квazar-КВО» были проведены РСДБ-наблюдения с использованием широкополосных каналов преобразования сигналов. Использование таких каналов на антеннах большого диаметра позволит заметно повысить чувствительность радиоинтерферометра и увеличить число доступных для наблюдения источников космического радиоизлучения.

#### Библиографические ссылки

1. РСДБ системы для поддержки ГНС ГЛОНАСС / Ипатов А. В. [и др.] // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 24. С. 12–23.
2. Радиоинтерферометрический коррелятор для комплекса «Квazar-КВО» / И. Ф. Суркис [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 91–99.

3. Использование РСДБ-сети «Квazar-КВО» для фундаментального координатно-временного обеспечения космической системы ГЛОНАСС / А. М. Финкельштейн [и др.] // Письма в АЖ. 2008. Т. 34, № 1. С. 59–69.

4. Finkelstein A., Ipatov A., Smolentsev S. The Network “Quasar”: 2008–2011 // *Measuring the Future: Proceedings of the Fifth IVS General Meeting*. St. Petersburg : Nauka Publ., 2008. P. 39–46.

5. Федотов Л. В. РСДБ-терминалы: современное состояние и перспективы развития // Труды ИПА РАН. 2008. Вып. 19. С. 98–108.

6. Цифровая радиоинтерферометрическая система преобразования сигналов / С. А. Гренков [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 5. С. 60–66.

7. Цифровой видеоконвертор для системы преобразования сигналов РСДБ радиотелескопа / Е. В. Носов [и др.] // Труды ИПА РАН. 2008. Вып. 19. С. 109–126.

8. Цифровой преобразователь сигналов для радиоастрономических систем / С. А. Гренков [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 5. С. 80–89.

9. Эффективность замены аналоговых систем преобразования сигналов на радиотелескопах комплекса «Квazar-КВО» системой R1002M с цифровой обработкой сигналов / Л. В. Федотов [и др.] // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 218–223.

10. Геодинамические наблюдения на РСДБ-сети «Квazar-КВО» в 2009–2011 гг. / А. М. Финкельштейн [и др.] // Письма в *Астрономический журнал*. 2012. Том 38, № 6. С. 446–451.

11. Новое поколение систем преобразования сигналов для перспективных РСДБ-комплексов на антеннах малого диаметра / Л. В. Федотов [и др.] // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 24. С. 165–171.

12. Система преобразования сигналов S/X диапазона волн для радиоинтерферометра оперативного мониторинга Всемирного времени / Л. В. Федотов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 3. С. 101–108.

13. Перспективная цифровая широкополосная система преобразования сигналов BRAS для РСДБ радиотелескопов / А. С. Бердников [и др.] // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 96–101.

14. Цифровая система преобразования сигналов для астрономических радиоинтерферометров / Н. Е. Кольцов [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 1. С. 34–40.

15. Экспериментальные исследования прототипа цифровой широкополосной системы преобразования сигналов на радиоинтерферометре комплекса «Квazar-КВО» / Н. Е. Кольцов [и др.] // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 477–482.

## References

1. Ipatov A. V. et al. [VLBI system for support of GLONASS]. *Trudy IPA RAN*, 2012, vol. 24, p. 12–23. (In Russ.).

2. Surkis I. F. et al. [A Correlator for the Quasar VLBI Network]. *Instruments and Experimental Techniques*. 2011, vol. 54, no. 1, p. 84–91.

3. Finkelstein A. M. et al. [Using the Quasar VLBI Network for the Fundamental Time-Positioning Service of GLONASS]. *Astronomy Letters*. 2008, vol. 34, no. 1, p. 59–69.

4. Finkelstein A., Ipatov A., Smolentsev S. [The Network “Quasar”: 2008 – 2011]. *Measuring the Future. Proceedings of the Fifth IVS General Meeting*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2008, p. 39–46.

5. Fedotov L. V. [VLBI Terminals: Modern World Level and Provide Carrying]. *Trudy IPA RAN*. 2009, vol. 19, p. 98–108. (In Russ.).

6. Grenkov S. A. et al. [Digital Radio Interferometric Data Acquisition System]. *Instruments and Experimental Techniques*. 2010, vol. 53, no. 5, p. 675–681.

7. Nosov E. V., Fedotov L. V. [Digital baseband converter for data acquisition system of VLBI radio telescope]. *Trudy IPA RAN*. 2009, vol. 19, p. 109–126. (In Russ.).

8. Grenkov S. A. et al. [A Digital Signal Converter for Radio Astronomical Systems]. *Instruments and Experimental Techniques*. 2009, vol. 52, no. 5, p. 686–694.

9. Fedotov L. V. et al. [Efficiency of replacement of analog DAS on new R1002M system with digital processing of signals on radio telescopes of VLBI network “Quasar”]. *Trudy IPA RAN*. 2012, vol. 23, p. 218–223. (In Russ.).

10. Finkelstein A. M. et al. [Geodynamic Observations on VLBI Network “Quasar” at 2009–2011]. *Astronomy Letters*. 2012, vol. 38, no. 6, p. 446–451.

11. Fedotov L. V. et al. [The next-generation data acquisition system for perspective VLBI-network with small diameter antennas]. *Trudy IPA RAN*. 2012, vol. 24, p. 165–171. (In Russ.).

12. Fedotov L. V. et al. [A Data Acquisition System of the S/X-wave Range of the Radio Interferometer for the Universal Time On-Line Monitoring]. *Instruments and Experimental Techniques*. 2013, vol. 56, no. 3, p. 339–346.

13. Berdnikov A. S. et al. [The perspective digital broadband conversion system BRAS for VLBI radio telescopes]. *Trudy IPA RAN*. 2013, vol. 27, p. 96–101. (In Russ.).

14. Koltsov N. E. et al. [Digital wideband signals conversion system for astronomical interferometers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika*. 2014, vol. 1, p. 34–40. (In Russ.).

15. Koltsov N. E. et al. [Experimental research of digital broadband acquisition system prototype on the radio interferometer of VLBI-network “Quasar”]. *Trudy IPA RAN*. 2013, vol. 27, p. 477–482. (In Russ.).