

## Практика применения многофункциональной системы преобразования сигналов на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО»

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

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Новая многофункциональная цифровая система преобразования сигналов (МСПС) была разработана для замены используемых в настоящее время на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» систем. Применение МСПС дает возможность не только повысить эффективность используемой на радиотелескопе аппаратуры, но и улучшить параметры радиотелескопа, непосредственно влияющие на результаты радиоастрономических наблюдений. Статья посвящена обобщению опыта использования МСПС на радиотелескопах РТ-32 и РТ-13, а также анализу полученных с помощью этой аппаратуры результатов.

Возможность использования каналов МСПС для радиометрической регистрации сигналов была исследована на радиотелескопе РТ-32 и подтверждена с использованием прототипа системы. Приведено описание методики испытаний опытного образца МСПС на радиотелескопе РТ-32 и полученные при этих испытаниях результаты. Даны сведения об экспериментальных сеансах РСДБ-наблюдений с участием МСПС на радиотелескопе РТ-13, результаты которых подтвердили совместимость МСПС со штатными отечественными и зарубежными системами. Рассмотрены параметры, методика и результаты использования МСПС при проведении экспериментальных радиолокационных наблюдений Луны. После установки на радиотелескопе РТ-13 в обсерватории «Светлое» в штатном режиме МСПС участвует во всех регулярных плановых РСДБ-наблюдениях. Приведен анализ применения МСПС в таких наблюдениях начиная с сентября 2020 г.

Экспериментальные исследования МСПС на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» и опытная эксплуатация этой системы в обсерватории «Светлое» показали, что по своим параметрам и характеристикам МСПС превосходит использовавшиеся ранее на радиотелескопах комплекса цифровые системы преобразования сигналов Р1002М и широкополосной системы преобразования сигналов. МСПС обеспечивает преобразование сигналов как для широкополосной, так и узкополосной регистрации при РСДБ-наблюдениях, дает возможность проведения радиолокационных наблюдений Луны. Использование МСПС позволяет в перспективе отказаться от отдельных систем регистрации для радиометрических и спектральных наблюдений. МСПС обеспечивает проведение наблюдений в различных режимах без замены аппаратуры и позволяет улучшить получаемые результаты.

**Ключевые слова:** радиотелескоп, система преобразования сигналов, радиоастрономические наблюдения, РСДБ.

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

**Для цитирования:** 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.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.3-9>

## The Practice of Using the Multifunctional Digital Backend System in the Quasar VLBI Network

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

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

### Abstract

The new Multifunctional Digital Backend system (MDBE) has been developed to replace the systems currently used on the radio telescopes of the Quasar VLBI Network. The use of MDBE makes it possible not only to increase the efficiency of the equipment used on the radio telescope, but also to improve the parameters of this equipment, which directly affect the results of radio astronomy observations. The article is devoted to the generalization of the experience of using MDBE on RT-32 and RT-13 radio telescopes, as well as the analysis of the results obtained with the help of this equipment.

The possibility of using MDBE channels for radiometric record of signals was investigated on the RT-32 radio telescope and confirmed using a prototype of the system. The description of the test procedure of the MDBE on the RT-32 radio telescope and the results obtained during these tests are given. The information about experimental sessions of VLBI observations with the participation of MDBE on the RT-13 radio telescope is given. The results of these sessions

confirmed the compatibility of MDBE with standard domestic and foreign systems. The parameters, methodology and results of the use of MDBE during experimental radar observations of the Moon are considered. After installation on the RT-13 radio telescope at the Svetloe Observatory, the MDBE participates in all regular scheduled VLBI observations in the normal mode. The analysis of the use of MDBE in such observations since September 2020 is given.

Experimental studies of MDBE on the radio telescopes of the Quasar VLBI Network and experimental operation of this system at the Svetloe Observatory have shown that, in terms of its parameters and characteristics, MDBE surpasses the Data Acquisition Systems and the existed backends previously used on the radio telescopes of the Quasar VLBI Network. MDBE provides signal conversion for both broadband and narrowband registration during VLBI observations, makes it possible to conduct radar observations of the Moon. The use of MDBE allows in the future abandoning separate recording systems for radiometric and spectral observations. MDBE provides observations in various modes without replacing equipment and allows improving the obtained results.

**Keywords:** radio telescope, digital backend, radio astronomy observations, VLBI.

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

**For citation:** Bondarenko Y. S., Marshalov D. A., Nosov E. V., Fedotov L. V. The practice of using the multifunctional digital backend system in the Quasar VLBI network // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 57. P. 3–9.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.3-9>

## Введение

МСПС была разработана в ИПА РАН для замены всех находящихся в эксплуатации на радиотелескопах комплекса «Квazar-КВО» систем преобразования сигналов. МСПС основана на цифровой обработке радиоастрономических сигналов и позволяет обеспечивать их регистрацию на радиотелескопе как в режиме РСДБ, так и в радиометрическом режиме, а также проводить спектральные наблюдения космических источников радиоизлучения (Носов и др., 2021). Создание такой системы дало возможность не только повысить эффективность использования аппаратуры на радиотелескопе, но и существенно улучшить ее параметры, непосредственно влияющие на качество получаемой при радиоастрономических наблюдениях информации.

В 2019–2020 гг. отдельные макеты и прототипы каналов МСПС, работающие в различных режимах наблюдений, были испытаны на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Светлое». После завершения разработки и изготовления первого промышленного образца МСПС он был установлен на радиотелескопе РТ-13. Это позволило провести ряд экспериментальных сеансов РСДБ с использованием МСПС, ввести систему в эксплуатацию в качестве штатного оборудования радиотелескопа РТ-13 и с конца 2020 г. перейти к регулярным наблюдениям на этом радиотелескопе в обсерватории «Светлое». Целью данной статьи является анализ основных результатов использования МСПС на радиотелескопах в условиях реальных радиоастрономических наблюдений.

## Экспериментальные РСДБ-наблюдения с использованием МСПС

В ходе объектовых испытаний экспериментального образца МСПС сравнивались каналы системы, работающие в режиме широкополосной РСДБ-регистрации с каналами штатной широкополосной системы преобразования сигналов BRAS

(Broadband Acquisition System), которая уже более 6 лет эксплуатируется на радиотелескопах комплекса «Квazar-КВО» (Ipatov et al., 2016). На входы каналов МСПС и штатной системы подавался один и тот же шумовой сигнал в полосе частот шириной 512 МГц с выхода радиоастрономического приемного устройства радиотелескопа РТ-13, настроенного на частоту 9476.6 МГц в X-диапазоне. Зарегистрированные на выходах обеих систем цифровые потоки обрабатывались коррелятором RASFX в стандартном режиме обработки РСДБ-наблюдений (Surkis et al., 2017). Анализ результатов этой обработки показал высокую степень идентичности каналов МСПС и стабильность их фазовых характеристик, что особенно важно при проведении РСДБ-наблюдений.

В 2020 г. экспериментальный образец МСПС был установлен непосредственно в фокальной кабине антенны радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое». Для проверки совместимости МСПС с штатными широкополосными системами был проведен экспериментальный сеанс РСДБ-наблюдений r4121c 30 апреля 2020 г. на базе «Светлое» – «Зеленчукская» – «Бадарь» с регистрацией сигналов в полосе шириной 512 МГц в S- и X-диапазонах частот. В течение часовой сессии наблюдались источники 0808+019, 0805+410, 1144+402, 0415+398 и 1308+328. При этом в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадарь» использовались штатные широкополосные системы преобразования сигналов (ШСПС). В результате обработки зарегистрированных сигналов на корреляторе RASFX для всех источников были получены четкие корреляционные отклики с отношением сигнал – шум (SNR) от 52.7 до 299 в X-диапазоне и от 31.5 до 131.1 в S-диапазоне, что существенно превосходит минимально допустимое для РСДБ-наблюдений значение (рис. 1). Это позволило в стандартном режиме определить величину групповой задержки сигналов и вычислить поправки к Всемирному времени с допустимой погрешностью. Получен-

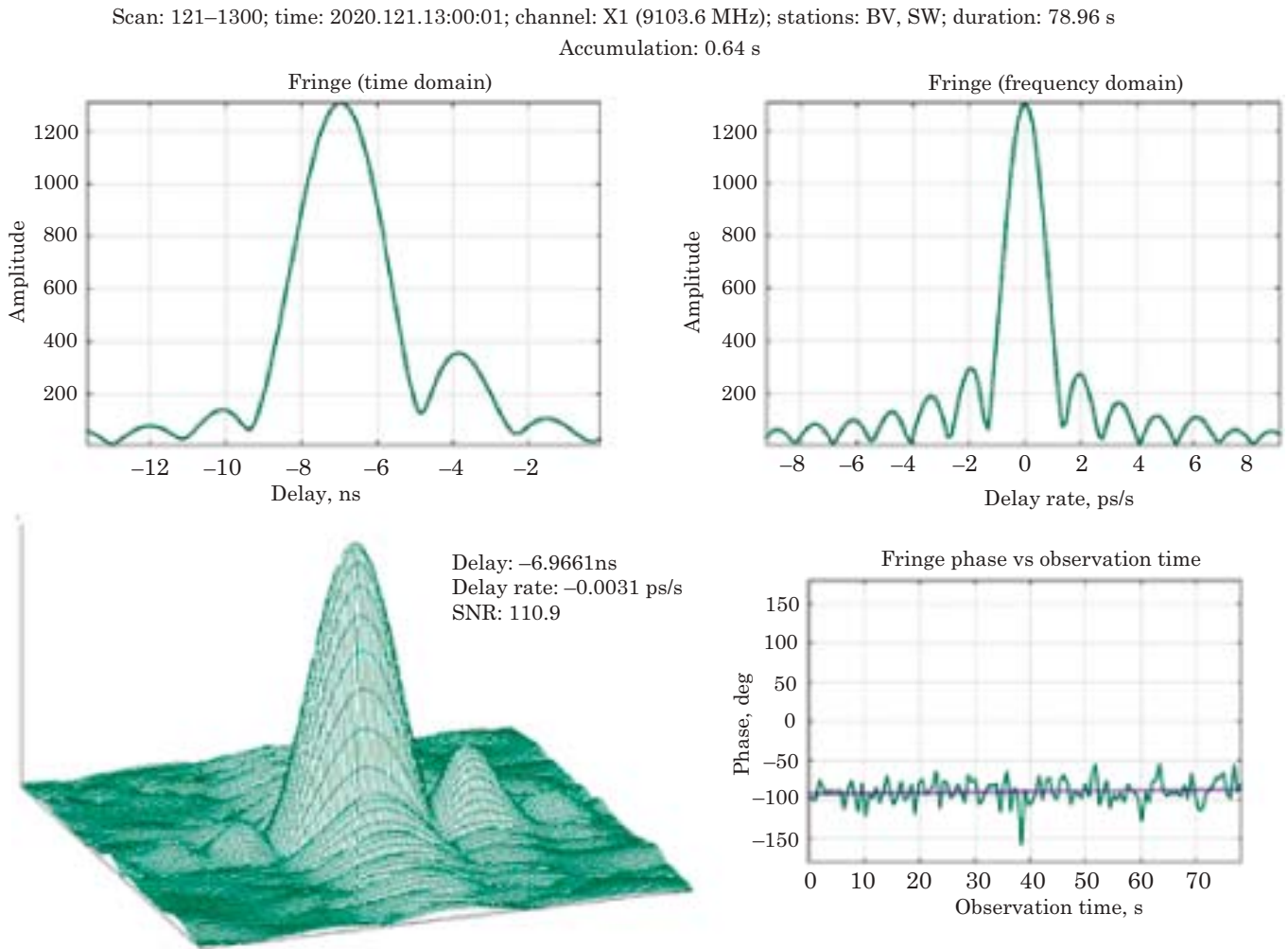


Рис. 1. Пример корреляционного отклика в X-диапазоне волн на базе «Бадарь» – «Светлое», полученного на сеансе r4121c

ные на сеансе r4121c результаты подтвердили высокое качество МСПС и полную совместимость этой системы в режиме РСДБ со штатными ШСПС.

Для исследования совместимости МСПС с узкополосными системами преобразования сигналов 3 сентября 2020 г. был проведен экспериментальный РСДБ-сеанс Ru-TEST-846 на базе «Светлое» – «Бадарь» комплекса «Квazar-КВО». При этом в обсерватории «Бадарь» использовалась штатная узкополосная система преобразования сигналов P1002M, установленная на радиотелескопе РТ-32, а в обсерватории «Светлое» — МСПС на радиотелескопе РТ-13. Длительность экспериментального сеанса составляла 20 мин.

Для наблюдений в S- и X-диапазонах частот использовался один из опорных источников OJ287. В каждом диапазоне на частотах, обычно используемых при РСДБ-наблюдениях, выделялись 8 узкополосных каналов с шириной полосы частот каждого 32 МГц. Использовалась верхняя

боковая полоса сигнала. Обработка данных наблюдений проводилась в ИПА РАН на корреляторе DiFX в штатном режиме. При этом для каждого из 16 узкополосных каналов фиксировался корреляционный отклик, определялось отношение сигнал/шум SNR, стабильность амплитуды и фазы корреляционного отклика, а также частотные характеристики каналов по стандартной методике, как это принято при обработке обычных РСДБ-наблюдений (рис. 2). В результате обработки по всем каналам были получены четкие корреляционные отклики с отношением сигнал/шум от нескольких десятков до нескольких сотен, достаточным для высокоточного измерения групповой задержки сигналов.

Возможность функционирования радиотелескопа, оснащенного МСПС, в составе международной РСДБ-сети IVS проверялась путем включения радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое» в плановый сеанс РСДБ-наблюдений IVS R1972

Mk4/DiFX fourfit 3.20 rev 2790  
access1

OJ287, 1BC05U, No0002, Bs  
BADARY – SVERT13V, fgroup X, pol RR

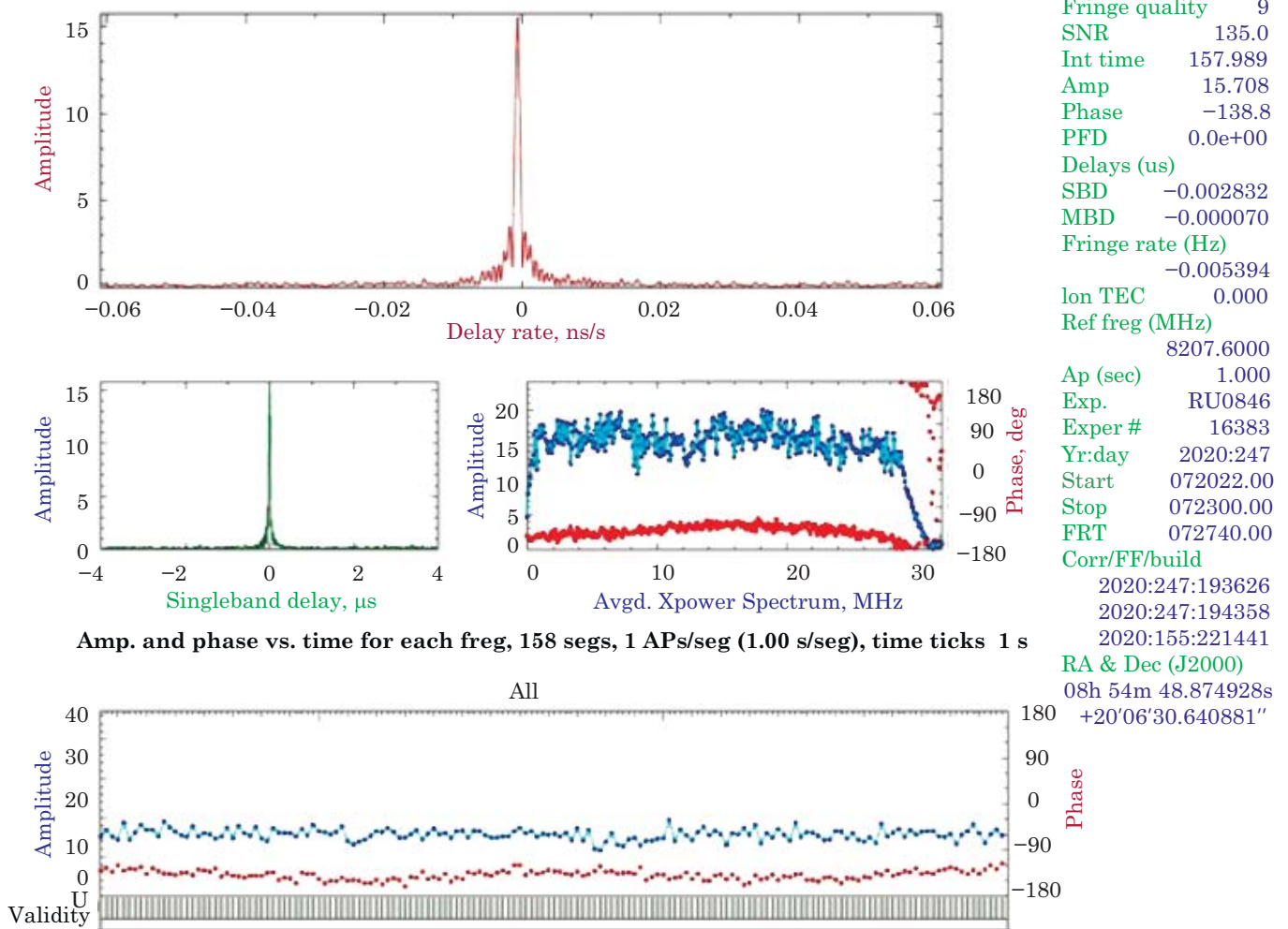


Рис. 2. Пример корреляционного отклика от источника OJ287 в канале №9 при наблюдениях на радиоинтерферометре «Светлое» – «Бадарь» с использованием узкополосной системы преобразования сигналов и опытного образца МСПС

9 ноября 2020 г. При этом сеть работала со стандартным геодезическим набором частот в S- и X-диапазонах и выборкой 16 частотных каналов шириной каждого по 8 МГц. По всем 384 сканам наблюдений, в которых участвовал радиотелескоп RT-13 с МСПС, были зафиксированы четкие корреляционные отклики со всеми зарубежными радиотелескопами, участвовавшими в наблюдениях на сеансе R1972.

Для проверки совместимости МСПС с современными зарубежными системами преобразования сигналов, соответствующими требованиям программы VGOS, 7 сентября 2020 г. был проведен экспериментальный РСДБ-сеанс Ru-TEST-848 совместно с обсерваторией Onsala (Швеция), VGOS радиотелескоп которой оснащен системой преобразования сигналов DBVC3 (Tuccari et al., 2018).

Сеанс состоял из двух частей: проверочной и геодезической. Геодезическая часть, длительностью 1 час, заключалась в 55 наблюдениях (сканах) различных квазаров. Всего регистрировались сигналы 64 каналов по 32 МГц шириной в двух линейных поляризациях. Поток данных от каждого радиотелескопа составлял 8 Гбит/с. Корреляционная обработка проводилась на программном корреляторе ИПА РАН и корреляторе DiFX. По всем наблюдениям были получены корреляционные отклики с отношением сигнал/шум порядка нескольких сотен (рис. 3), что подтвердило полную совместимость МСПС с зарубежными VGOS системами преобразования сигналов.





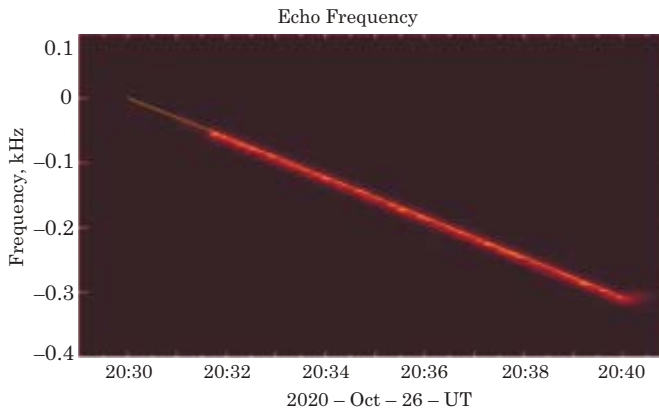


Рис. 4. Пример спектрограммы эхо-сигнала от Луны, полученной на радиотелескопе РТ-13 обсерватории «Светлое» с использованием МСПС 26 октября 2020 г.

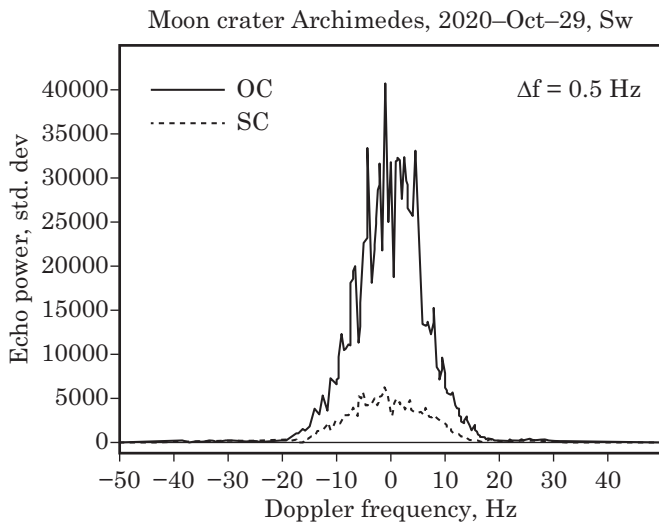


Рис. 5. Пример спектров мощности эхо-сигнала, отраженного от лунного кратера «Архимед» в левой и правой круговых поляризациях, полученных 29 октября 2020 г. по бистатистическим радиолокационным наблюдениям DSA 3 и РТ-13 с использованием МСПС. Сплошными и штриховыми линиями изображены спектры зеркальной (ОС) и диффузной (SC) компонент эхо-сигнала соответственно

эхо-сигналов, рассчитанная на основе высокоточных эфемерид. Частота эхо-сигналов в начале эксперимента была принята за нулевое значение по вертикальной оси для каждого дня наблюдения.

Эксперимент показал, что наблюдаемая частота практически совпадает с численной моделью. Это свидетельствует о высокой точности радиолокационных наблюдений с использованием МСПС. В ходе эксперимента с использованием МСПС были зафиксированы спектры мощности эхо-сигнала, отраженного от лунного кратера «Архимед» в левой и правой круговых поляризациях (рис. 5). Время интегрирования спектров составляет 60 с с учетом изменения доплеровской частоты,

так что эхо-сигнал накапливается на заданной частоте.

Сплошными и штриховыми линиями на рис. 5 показаны спектры зеркальной (ОС) и диффузной (SC) компонент эхо-сигнала соответственно. По оси ординат отложена мощность эхо-сигнала, выраженная в единицах стандартного отклонения шума. Нулевое значение соответствует величине математического ожидания шума. По оси абсцисс отложена частота. Нулевое значение частоты соответствует частоте эхо-сигнала от центра лунного кратера «Архимед» с селенографическими координатами  $4.0^\circ$  W и  $29.7^\circ$  N. Разрешение по частоте составляет 0.5 Гц. Как показал проведенный эксперимент, доплеровское уширение спектров составляет около 40 Гц, что совпадает с априорными оценками.

По полученным спектрам были определены радиолокационные свойства поверхности Луны на длине волны передатчика (4.2 см). В частности, отмечено, что круговая поляризация сигнала меняется на обратную после отражения от плоской поверхности и максимальная мощность отраженного сигнала ожидается в поляризации ОС, хотя часть сигнала из-за вторичных отражений принимается с той же поляризацией. Отношение круговой поляризации SC/ОС является мерой шероховатости поверхности в масштабе длины волны. Полученное в ходе эксперимента это отношение равно 0.2 хорошо согласуется с другими радиолокационными наблюдениями Луны. Эффективная площадь рассеивания, полученная по спектрам ОС, составила  $2.1 \times 10^4$  км<sup>2</sup>, а величина радиолокационного альбедо (отношение эффективной площади рассеивания к его геометрической площади) составляет 0.07, что также согласуется с другими радиолокационными наблюдениями Луны (Evans, 1965).

### Регулярные РСДБ-наблюдения с использованием МСПС

В декабре 2020 г. опытный образец МСПС был введен в эксплуатацию на радиотелескопе РТ-13 в обсерватории «Светлое» в штатном режиме. Он был подключен к приемной системе радиотелескопа, системе управления радиотелескопом, системе высокоточной синхронизации, а также к системе записи и передачи данных (рис. 6). 8 входов каналов МСПС были соединены с выходами промежуточной частоты (1–2 ГГц) приемной системы радиотелескопа. Сигналы синхронизации 100 МГц и секундные импульсы шкалы времени радиотелескопа (1 Гц ШВ) и приемника ГНСС (1 Гц ГНСС) подавались от системы высокоточной синхронизации РТ-13. В составе аппаратуры радиотелескопа РТ-13 опытный образец МСПС участвовал

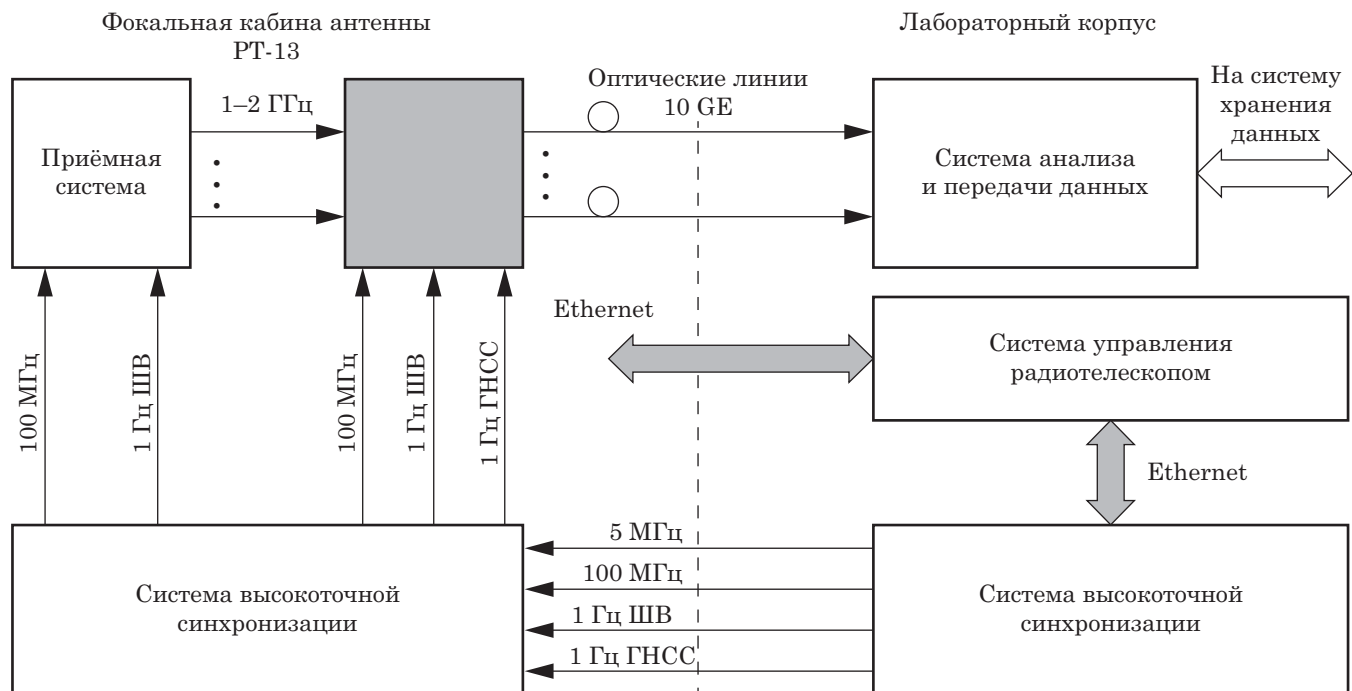


Рис. 6. МСПС в составе оборудования радиотелескопа РТ-13

во всех регулярных РСДБ-наблюдениях по определению поправок к Всемирному времени. Всего за период с декабря 2020 по сентябрь 2021 г. с его участием было проведено 1007 сессий РСДБ-наблюдений по программе «R» в диапазонах S и X, а также 258 сессий по программе «X» в S/X/Кадиапазонах.

Во всех наблюдениях МСПС зарекомендовала себя как удобная и надежная система, обеспечивающая высокое качество получаемой информации и минимизацию аппаратных потерь. Ввод в эксплуатацию в обсерватории «Светлое» радиотелескопа РТ-13, оснащенного МСПС, позволил почти в 1.5 раза улучшить точность определения поправок к Всемирному времени по результатам часовых сессий и довести ее в среднем до величины порядка 20 мкс.

### Заключение

Экспериментальные исследования МСПС на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» и опытная эксплуатация этой системы в обсерватории «Светлое» показали, что по своим параметрам и характеристикам МСПС превосходит использовавшиеся ранее на радиотелескопах комплекса цифровые системы преобразования сигналов P1002M и ШСПС. Использование МСПС дает возможность в перспективе отказаться от отдельных систем регистрации для радиометрических и спектральных наблюдений. МСПС обеспечивает

проведение наблюдений в различных режимах без замены аппаратуры и позволяет улучшить получаемые результаты. Целесообразно оснащение такими системами всех радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО».

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

### Литература

- Носов Е. В., Маршалов Д. А., 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.
- Evans, J. V. Radar studies of the Moon // *Radio Science*. 1965. 69D. P. 1637–1659.
- Ipatov A., Ivanov D., Ilin G. et al. New generation VLBI: intraday UT1 estimations // *IVS 2016 General Meeting Proceedings “New Horizons with VGOS”*. P. 106–110. URL: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2016/> (accessed: 10.09.2021).
- Surkis I., Ken V., Kurdubova Y. et al. The RASFX VGOS GPU Based Software Correlator // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 123–126.
- Tuccari G., Alef W., Dornbusch S. et al. DBBC3 — the new wide-band backend for VLBI. 14th European VLBI Network Symposium & Users Meeting (EVN 2018) 8–11 October 2018 Granada, Spain. URL: <https://pos.sissa.it/344/140/pdf> (accessed: 10.09.2021).