

Совместимость аппаратуры преобразования сигналов на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32

© Л. В. Федотов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Радиотелескопы РТ-32 комплекса «Квazar-КВО» оснащены узкополосными (до 32 МГц) многоканальными системами преобразования сигналов, которые были разработаны в начале 2000-х годов и обеспечивали совместимость с аналогичными зарубежными системами. Системы, установленные на новых радиотелескопах РТ-13, существенно отличаются широкой (512 МГц) полосой пропускания цифровых каналов и позволяют компенсировать потери чувствительности радиоинтерферометра из-за сокращения размеров антенн. Современная концепция развития РСДБ (VGOS) предусматривает широкополосное преобразование и регистрацию сигналов, но предполагает совместимость с созданными ранее узкополосными системами. Для унификации аппаратуры РТ-13 в рамках этой концепции необходима совместимость систем преобразования сигналов на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32. В течение ряда лет в ИПА РАН проводятся исследования и разработки в направлении обеспечения совместимости отечественных систем преобразования сигналов. Статья посвящена обобщению результатов этих работ, анализу возникших при этом проблем и возможностей их решения.

Для совместимости широкополосной и узкополосной аппаратуры преобразования сигналов необходимо в каждом широкополосном канале произвольно выделять узкополосные каналы, аналогичные каналам узкополосной системы. Однако при этом естественно снижается чувствительность радиоинтерферометра из-за меньшего размера антенны РТ-13, что необходимо учитывать при планировании наблюдений. Выделение узкополосных каналов непосредственно на радиотелескопе РТ-13 позволяет в 4 раза сократить поток данных, передаваемых с радиотелескопа на коррелятор, и может осуществляться с помощью специального цифрового преобразователя, разработанного в ИПА РАН. При его создании были успешно решены проблемы устранения искажений сигналов и возможных нарушений синхронизации, связанных с цифровой обработкой широкополосных сигналов в программируемой логической интегральной схеме. Проведенные исследования позволили выявить возможность скачков фазы при полифазной фильтрации сигнала фазовой калибровки и обосновать необходимость корректного выбора частоты следования импульсов этого сигнала, если используется цифровое выделение сигналов в узких полосах из широкополосного сигнала.

Результаты исследований на радиотелескопе РТ-13 указанного цифрового преобразователя потоков данных использованы при разработке новой унифицированной многофункциональной цифровой системы преобразования сигналов для радиотелескопов. Она совместима с другими системами радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 и обеспечивает проведение РСДБ-наблюдений как с широкополосной, так и с узкополосной регистрацией сигналов. Оснащение такими системами всех радиотелескопов комплекса «Квazar-КВО» позволит в максимальной степени реализовать на них совместимость аппаратуры преобразования сигналов.

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

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

Для цитирования: Федотов Л. В. Совместимость аппаратуры преобразования сигналов на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 57. С. 34–40.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.34-40>

The compatibility of Data Acquisition Systems of RT-32 and RT-13 Radio Telescopes

L. V. Fedotov

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

Abstract

The RT-32 radio telescopes of the Quasar VLBI Network are equipped with narrow-band (up to 32 MHz) multichannel data acquisition systems, that were developed in the early 2000s and ensured compatibility with similar foreign systems. The systems installed on the new RT-13 radio telescopes differ significantly in the wide (512 MHz) bandwidth of digital channels and make it possible to compensate for the loss of radio interferometer sensitivity due to the reduction in the size of the antennas. The modern concept of VLBI development (VGOS) provides for broadband conversion and signal

recording, but assumes compatibility with previously created narrowband systems. To unify the RT-13 equipment within the framework of this concept, the compatibility of the data acquisition systems on the RT-13 and RT-32 radio telescopes is required. For a number of years, IAA RAS has been conducting research and development in the direction of ensuring the compatibility of domestic data acquisition systems. The paper is devoted to the generalization of the results of these works, the analysis of the problems that arose in this case, the possibilities and the results of their solution.

For the compatibility of broadband and narrowband data acquisition systems, it is necessary to arbitrarily select narrowband channels in each broadband channel, similar to those of a narrowband system. However, in this case, the sensitivity of the radio interferometer naturally decreases due to the smaller size of the RT-13 antenna, which must be taken into account when planning observations. Allocation of narrow-band channels directly on the RT-13 radio telescope makes it possible to 4 times reduce the data flow transmitted from the radio telescope to the correlator, and can be carried out using a special digital converter developed at the IAA RAS. When this converter was created, the problems of eliminating signal distortions and possible synchronization violations associated with digital processing of wideband signals in FPGAs were successfully solved. It is necessary to take into account the possibility of phase jumps during multi-phase filtering of the phase calibration signal and the need to correctly select the repetition frequency of the pulses of this signal if digital separation of narrowband channels from broadband channels is used.

The results of studies on the RT-13 radio telescope of the indicated digital converter of data streams were used in the development of a new unified Multifunctional Digital Backend system for radio telescopes (MDBE). It is compatible with other systems of RT-13 and RT-32 radio telescopes and provides VLBI observations with both broadband and narrowband signal recording. Equipping all radio telescopes of the Quasar VLBI Network with such systems will make it possible to maximize the compatibility of signal conversion equipment on them.

Keywords: radio telescope, VLBI, data acquisition system, digital signal processing, separation of narrow-band channels.

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

For citation: Fedotov L. V. The compatibility of Data Acquisition Systems of RT-32 and RT-13 radio telescopes // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 57. P. 34–40.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.34-40>

Введение

Комплекс «Квазар-КВО» изначально был создан на основе радиотелескопов РТ-32 с антеннами диаметром 32 м. Эти радиотелескопы оснащались первой отечественной цифровой системой преобразования сигналов Р1002М, которая была разработана в 2000-х годах и соответствовала тенденции внедрения цифровых методов обработки сигналов при совершенствовании аппаратуры для РСДБ. Системы Р1002М обеспечивали совместимость с аналогичными зарубежными системами и позволяли проводить РСДБ-наблюдения совместно с зарубежными радиотелескопами в рамках международных программ. С целью мониторинга ПВЗ и, прежде всего, Всемирного времени, для российской спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС во всех трех обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» за последние годы были введены в эксплуатацию новые радиотелескопы РТ-13 на быстроповоротных антеннах диаметром 13.2 м (Ипатов, 2013). Эти радиотелескопы были оснащены отечественными цифровыми широкополосными системами преобразования сигналов (ШСПС), с помощью которых была решена задача компенсации потерь чувствительности радиоинтерферометра из-за уменьшения площади поверхности антенн РТ-13 по сравнению с использовавшимися ранее антеннами. Расширение полосы частот каждого канала системы преобразования сигналов (СПС) на радиотелескопах стало одним из направлений развития аппаратуры в рамках ло-

гически вытекающей из VLBI2010 новой концепции развития РСДБ (VGOS). Эта концепция предусматривает широкополосное преобразование и регистрацию сигналов. Для повышения точности определения групповых задержек сигналов используется сверхширокий диапазон принимаемых частот (~ 2–14 ГГц), в котором выделяются для регистрации 4 широкополосных (0.5 или 1 ГГц) канала. На радиотелескопах РТ-13 комплекса «Квазар-КВО» также предусмотрена возможность установки широкодиапазонных приемных систем (3–16 ГГц), разработанных в ИПА РАН (Евстигнеев и др., 2018). Зарубежные СПС, разработанные в рамках программы VGOS, предусматривают совместимость с созданными ранее в соответствии с VLBI2010 узкополосными (до 32 МГц на канал) системами путем выделения в каждой из 4 полос, шириной до 1 ГГц, узкополосных каналов и их регистрации с последующим синтезом полосы частот при обработке сигналов на корреляторе (Neil, 2017).

Для унификации аппаратуры РТ-13 в рамках концепции VGOS необходима совместимость СПС на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32. Это дает возможность облегчить планирование и проведение совместных РСДБ-наблюдений с зарубежными радиотелескопами. Унификация оборудования на разных радиотелескопах позволяет оптимизировать его состав и сократить затраты на эксплуатацию. Совместимость СПС — одно из условий для совместного использования в случае необходимости при РСДБ-наблюдениях радиотелескопов

РТ-13 и РТ-32, установленных в разных обсерваториях. В течение ряда лет в ИПА РАН проводятся исследования и разработки в направлении обеспечения совместимости созданных у нас СПС. Обобщению результатов, анализу возникших при этом проблем, а также возможностей их решения посвящена данная статья.

Обеспечение совместимости систем преобразования сигналов на радиотелескопах РТ-32 и РТ-13

На радиотелескопах РТ-32 четыре одинаковых входа СПС Р1002М подключаются к выходам промежуточной частоты (ПЧ) приемной системы радиотелескопа. Сигналы диапазона ПЧ 100–1000 МГц распределяются между 16 каналами системы в соответствии с планом РСДБ-наблюдений. На любую частоту в диапазоне ПЧ с шагом 10 кГц может настраиваться любой из 16 каналов (видеоконверторов), подключенных к конкретному входу системы. В каждом канале сигналы в полосе частот шириной до 32 МГц переносятся в область видеочастот с выделением верхней и нижней боковых полос. Разделение боковых полос и окончательная фильтрация с формированием полосы пропускания в каждом канале производится цифровым способом после аналого-цифрового преобразования поступающих на вход сигналов. После цифрового 2-битового квантования на выходе системы формируются 16 параллельных цифровых информационных потоков в формате VSI-N с суммарной скоростью до 2 Гбит/с.

ШСПС радиотелескопов РТ-13 работает в диапазоне ПЧ 1–1.5 ГГц и содержит 8 одинаковых цифровых каналов с полосой пропускания 512 МГц, 2-битовым квантованием, формированием последовательного цифрового потока в формате VDIF и стандартным интерфейсом 10 GE. В каждом канале этой системы цифровые выборки широкополосного шумового сигнала считываются с относительно высокой тактовой частотой (1024 МГц) и для их последующей корреляционной обработки требуется высокоскоростной программный РСДБ-коррелятор. Суммарная скорость информационного потока на всех 8 выходах ШСПС может достигать 16 Гбит/с.

Для совместимости систем Р1002М и ШСПС необходимо в каждом широкополосном канале ШСПС произвольно выделять узкополосные каналы, аналогичные каналам системы Р1002М. Это дает возможность совместной обработки каждой пары одноименных узкополосных каналов на корреляторе (Гренков и др., 2018). Выделение узкополосных каналов из широкополосного может осуществляться программным способом непосредственно на корреляторе. Однако для этого требуется передача со станций, оснащенных ШСПС, до-

статочно большого и в данном случае избыточного объема данных. Действительно, при формировании на радиотелескопе РТ-32, например шестнадцати каналов с шириной полосы частот 16 МГц, расставленных в полосе ПЧ 900 МГц, и 2-битовом квантовании сигналов суммарная скорость информационного потока на выходе СПС Р1002М составляет 1 Гбит/с. Два канала по 512 МГц на радиотелескопе РТ-13, перекрывающие такую же полосу ПЧ, дают на выходе ШСПС информационный поток со скоростью в 4 раза большей. И этот поток, если на радиотелескопе не выделяются узкополосные каналы, необходимо передать на коррелятор.

При совместном использовании для РСДБ-наблюдений радиотелескопов РТ-32 и РТ-13 с выделением на РТ-13 узкополосных каналов естественно снижается чувствительность радиоинтерферометра из-за меньшего размера антенны РТ-13, что необходимо учитывать при планировании наблюдений. Известное выражение (Томпсон и др., 2003) для отношения сигнал/шум (SNR) в корреляционном отклике для каждого частотного канала с использованием такого обобщенного параметра радиотелескопа, как SEFD (System Equivalent Flux Density), можно представить в виде

$$SNR = \frac{\eta S}{2} \sqrt{\frac{2B\tau_{\text{набл.}}}{SEFD_1 SEFD_2}}, \quad (1)$$

где η — коэффициент аппаратных потерь чувствительности радиоинтерферометра; S — спектральная плотность мощности потока радиоизлучения источника в антенне радиотелескопа; B — полоса пропускания приемного тракта для одного частотного канала; $\tau_{\text{набл.}}$ — время наблюдения источника (длительность скана); индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму радиотелескопам интерферометра.

Из формулы (1) можно найти минимальное значение потока S , которое необходимо для наблюдения источника радиоинтерферометром с заданными параметрами $\eta, B, \tau_{\text{набл.}}, SEFD_1, SEFD_2$:

$$S_{\text{min}} = \frac{SNR_{\text{min}}}{\eta} \sqrt{\frac{SEFD_1 SEFD_2}{0,5 B \tau_{\text{набл.}}}}. \quad (2)$$

Известно, что для надежного обнаружения сигналов и определения радиоинтерферометром групповой задержки с допустимой погрешностью необходимо $SNR_{\text{min}} \approx 8$ (Sasao, Fletcher, 2011). Поэтому теоретически при наблюдениях с $\tau_{\text{набл.}} = 60$ с и $B = 16$ МГц для радиоинтерферометра из двух радиотелескопов РТ-32 с $SEFD = 250$ Ян в X-диапазоне при $\eta \approx 0,5$ получаем $S_{\text{min}} \approx 0,18$ Ян. При этом коэффициент $\eta \approx 0,5$ учитывает потери от всех возможных факторов. Если же один из радиотелескопов будет заменен на РТ-13 с $SEFD = 810$ Ян, то при прочих равных условиях S_{min} уве-

личивается до 0.33 Ян не зависимо от того, что по остальным параметрам совместимость аппаратуры РТ-32 и РТ-13 обеспечена.

Выделение сигналов в узких полосах частот из широкополосного сигнала непосредственно на радиотелескопах РТ-13, оснащенных ШСПС, можно обеспечить путем применения специальных цифровых преобразователей потоков данных (Гренков, Кольцов, 2018). Для работы с таким преобразователем используется предусмотренный в ШСПС режим передачи по интерфейсу 10 GE в формате VDIIF последовательности 8-разрядных выборок сигнала без 2-битового квантования. Преобразователь на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) принимает потоки данных от трех широкополосных каналов ШСПС, обеспечивая тем самым типовой для РСДБ режим регистрации сигналов в двух диапазонах волн. При этом двумя широкополосными каналами перекрывается полоса ПЧ шириной 1 ГГц, например при работе РТ-13 в диапазоне X. В каждом канале преобразователя после извлечения синхронизирующих импульсов и дешифрации данных восстанавливается поток 8-разрядных цифровых выборок широкополосного сигнала. Полученный цифровой сигнал подвергается предварительной полифазной фильтрации, в результате чего диапазон частот шириной 512 МГц разбивается на 8 поддиапазонов по 64 МГц. В каждом из этих поддиапазонов с помощью цифровых видеоконверторов, настроенных на заданные частоты, выделяются узкополосные каналы с заданной полосой пропускания (8 или 16 МГц). В каждом из этих каналов сигнал подвергается цифровому 2-битовому квантованию. Полученные с помощью 16 цифровых видеоконверторов узкополосные сигналы верхних и нижних боковых полос коммутируются для формирования 16 цифровых потоков в формате VSI-N или форматирования по стандарту VDIIF и передачи на выход через интерфейс 10 GE. Таким образом, цифровой преобразователь на РТ-13 обеспечивает такие же функции выделения узкополосных сигналов, что и СПС Р1002М на РТ-32, давая возможность обработки зарегистрированных на РТ-13 сигналов многоканальным РСДБ-коррелятором узкополосных сигналов.

Полифазная фильтрация сигналов при выделении сигналов в узких полосах частот из широкополосного сигнала вызывает определенные проблемы при выборе частоты следования пикосекундных импульсов сигнала фазовой калибровки (СФК), который вводится на входе приемной системы радиотелескопа для проверки работы аппаратуры, а также для коррекции относительных изменений фаз сигналов в каналах. На радиотелескопах РТ-32 с узкополосными каналами обычно используется СФК с частотой следования пикосекундных импульсов $F_1 = 1$ МГц (Вытнов и др.,

2013). На радиотелескопах РТ-13 с широкополосными (512 МГц) каналами использование такого же СФК ведет к недопустимым потерям чувствительности радиоинтерферометра (до 10 %) и требует специальных мер либо по ограничению мощности СФК на входе приемной системы, либо по увеличению частоты следования импульсов СФК (Суркис, Кольцов, 2016). Эта частота не может быть слишком высокой, так как необходимо обеспечить наличие гармоник СФК в каждом узкополосном канале. Кроме того, некорректный выбор указанной частоты может привести к дополнительным скачкообразным фазовым сдвигам гармоник СФК в узкополосных каналах, выделяемых из широкополосного. СФК на входе приемной системы радиотелескопа представляет собой последовательность импульсов с очень малой (несколько пикосекунд) длительностью τ_i и частотой следования F_1 . Фазы всех гармоник СФК, расположенных на интервале частот от 0 до $1/\tau_i$ равны нулю. Амплитуды гармоник в полосе ПЧ приемной системы радиотелескопа в первом приближении можно считать одинаковыми. На входе аналого-цифрового преобразователя ШСПС количество гармоник СФК ограничено целым числом $M = \lfloor \Delta f / F_1 \rfloor$, где Δf — входная полоса частот канала ШСПС. При этом все импульсы СФК смещены по времени на величину $\tau_{гр}$ групповой задержки сигнала в приемной системе радиотелескопа. Поэтому фазы гармоник СФК приобретают компоненту $2\pi m F_1 \tau_{гр}$, линейно нарастающую с увеличением номера гармоники m . Спектральная плотность мощности СФК на входе АЦП тогда имеет вид:

$$\hat{S}(2\pi m F_1) = A \sum_{m=1}^M e^{-j2\pi m F_1 \tau_{гр}}, \quad (3)$$

где A — амплитуда гармоник. В результате аналого-цифрового преобразования с тактовой частотой дискретизации f_d спектр СФК представляет собой совокупность бесконечного числа копий спектральной функции (3), сдвинутых по оси частот друг относительно друга на величину $2\pi f_d$. Полифазная фильтрация при выделении нескольких узкополосных каналов из одного широкополосного шириной Δf предполагает разбиение полосы Δf на K равных частей и полифазную декомпозицию фильтра-прототипа (фильтра нижних частот) с группированием коэффициентов фильтра в K подгрупп, называемых фазными фильтрами. Преобразование сигналов при полифазной фильтрации сводится к переносу участков спектра входного сигнала, ограниченных полосой пропускания $\Delta F = \Delta f / K$ каждого из K фазных фильтров в область низких частот, фильтрации полученных сигналов и их децимации (прореживанию) в K раз. Для k -го фазного фильтра указанные преобразования в частотной области отражает произведение спектральной функции входного цифрового сиг-

нала, сдвинутой влево по оси частот на величину, соответствующую конкретному фазному фильтру, и комплексной функции передачи фильтра

$$\hat{S}[2\pi(mF_1 - k\Delta F)]\hat{H}[2\pi(mF_1 - k\Delta F)]. \quad (4)$$

Децимация вызывает размножение копий спектра (4) по оси частот K раз, причем каждая копия сдвигается относительно другой на величину $2\pi f_d/K$. Таким образом, при полифазной фильтрации фаза произвольной гармоники СФК из $2\pi mF_1\tau_{гр}$ преобразуется в

$$2\pi mF_1\tau_{гр} - 2\pi k\tau_{гр}\Delta F = 2\pi F_1\left(m - k\frac{\Delta F}{F_1}\right)\tau_{гр} \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что если $\Delta F/F_1$ целое число, то при переходе от одного участка спектра шириной ΔF к следующему сохраняется линейная зависимость фазы от номера гармоники СФК. Если же $\Delta F/F_1$ не является целым числом, то имеет место разрыв фазы, величина которого зависит от указанного соотношения и аппаратурной задержки $\tau_{гр}$. Это может создавать дополнительные трудности при фазовой калибровке аппаратуры радиointерферометра.

Еще одной проблемой, связанной с цифровым выделением узкополосных сигналов, являются искажения, возникающие при полифазной фильтрации и цифровом гетеродинировании вблизи нулевой частоты и частот, кратных f_d/K или $f_d/2K$, где K — коэффициент децимации. Эти искажения обусловлены отличием реальных амплитудно-частотных характеристик фильтров от идеальных, особенностями цифрового преобразования Гильберта при разделении боковых полос сигнала (Носов, 2010), а также частичным перекрытием спектров сигналов при децимации. Решить указанную проблему позволяет использование в преобразователе потоков данных дополнительного банка полифазных фильтров со сдвигом спектров сигналов относительно каналов основного банка на половину полосы пропускания (Гренков, Кольцов, 2018).

Экспериментальные исследования цифрового преобразователя потоков данных выявили проблему синхронизации цифровых данных при выделении узкополосных каналов с помощью цифрового преобразователя. Задержка сигнала в ПЛИС цифрового преобразователя определяется битовой картой прошивки ПЛИС и не меняется от скана к скану. Однако, если тактовая частота выходных данных (которая для узкополосных каналов шириной 8 или 16 МГц в 16 или 8 раз меньше тактовой частоты работы ПЛИС 256 МГц) привязана к меткам времени 1PPS заново в начале каждого скана, то может возникнуть неопределенность положения цифровых данных от каждого скана на шкале времени радиотелескопа. Это ведет к нестабильности аппаратурной задержки сигнала в

цифровом преобразователе и соответствующему росту погрешности определения интерферометрической задержки при РСДБ-наблюдениях. При доработке цифрового преобразователя этот недостаток был устранен путем использования принципа синхронизации данных, используемого в Р1002М и ШСПС. Согласно этому принципу привязка по фазе сигнала тактовой частоты ПЛИС к меткам времени происходит только один раз за сеанс наблюдений на первом скане. Далее стабильность положения цифровых данных разных сканов на шкале времени определяется стабильностью опорного сигнала водородного стандарта частоты, которым синхронизован генератор тактов цифрового преобразователя. Эксперименты на радиотелескопе РТ-13 в обсерватории «Светлое» подтвердили возможность использования цифрового преобразователя потоков данных на ПЛИС для обеспечения совместимости узкополосных и широкополосных СПС (Гренков, Федотов, 2019).

Решению проблемы совместимости аппаратуры преобразования сигналов на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 может способствовать замена используемых на них СПС на новые унифицированные многофункциональные цифровые системы МСПС (Nosov et al., 2021). МСПС размещается непосредственно на антенне радиотелескопа и подключается к выходам приемной системы. Каждый из 12 цифровых преобразователей (каналов) системы производит фильтрацию, аналого-цифровое преобразование, цифровую обработку и форматирование сигнала ПЧ с шириной полосы до 1 ГГц и максимальной частотой 2 ГГц. Это позволяет проводить на радиотелескопе РТ-13 РСДБ-наблюдения в различных режимах: 1 канал — в S-диапазоне и 3 канала — в X-диапазоне, либо 1 канал — в X-диапазоне и 3 канала — в Ka-диапазоне в двух поляризациях при использовании трехдиапазонной приемной системы S/X/Ka. Кроме того, 12 каналов МСПС дают возможность синтеза широкой полосы частот при использовании на радиотелескопе широкодиапазонной приемной системы в соответствии с концепцией VGOS (Neill et al., 2018). Цифровые потоки с выходов МСПС по волоконно-оптическим линиям передаются в аппаратное помещение радиотелескопа, где размещается система буферизации данных. МСПС представляет собой универсальную платформу для преобразования сигналов при любых видах радиоастрономических наблюдений. Каждый канал МСПС содержит быстродействующий аналого-цифровой преобразователь и ПЛИС. Алгоритм производимой в ПЛИС цифровой обработки сигналов задается используемой прошивкой в зависимости от программы выполняемых радиоастрономических наблюдений. Прошивка может выбираться из имеющегося во встроенной памяти набора или загружаться по сети с управляющего компьютера.

Это позволяет МСПС работать в любом из следующих режимов:

- режим РСДБ с широкополосными каналами;
- режим РСДБ с узкополосными каналами;
- режим широкополосной радиометрической регистрации сигналов;
- режим регистрации радиоизлучения в спектральных линиях.

Возможность использования для синхронизации цифровых потоков сигналов опорной частоты 5, 10 или 100 МГц обеспечивает МСПС совместимость с системой частотно-временной синхронизации любого радиотелескопа. МСПС имеет диапазон входных частот до 2 ГГц и совместима по ПЧ с любой приемной системой радиотелескопов РТ-13 или РТ-32. При работе с приемной системой РТ-13 входы каналов МСПС подключаются непосредственно к выходам ПЧ. Для соединения со штатной приемной системой РТ-32 используются входящие в состав МСПС два распределителя сигналов ПЧ, каждый из которых имеет 6 входов и два выхода на каналы МСПС. Это позволяет исключить штатный блок распределения и усиления сигналов ПЧ, используемый на РТ-32.

При оснащении как РТ-13, так и РТ-32 цифровыми системами МСПС и использовании штатных приемных систем S/X-диапазонов совместимость радиотелескопов обеспечивается в любом из двух режимов РСДБ. В режиме широкополосной регистрации сигналов на каждом радиотелескопе из-за ограничений, накладываемых приемной системой РТ-32, возможно использование только двух каналов МСПС (по одному в S- и X-диапазонах) для приема сигналов в каждой из двух поляризаций. При этом в соответствии с формулой (2) теоретически минимальное значение спектральной плотности мощности потока излучения, необходимое для получения корреляционного отклика на интервале наблюдения в 60 с, составляет в X-диапазоне приблизительно 0.044 Ян. Режим широкополосной регистрации обеспечивает более надежное обнаружение интерференционных лепестков и позволяет сократить длительность скана при сохранении требуемого отношения сигнал-шум (SNR). В этом режиме цифровая обработка сигналов в каждом канале МСПС сводится к аналого-цифровому преобразованию, 2-битовому квантованию и формированию информационного потока в формате VDIF, который через оптический интерфейс 10GE и систему буферизации передается на коррелятор. Увеличение числа каналов и синтез полосы частот возможны лишь при условии оснащения радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 широкодиапазонными приемными системами ([Евстигнеев и др., 2018](#)), либо если на РТ-32 будет установлена трехдиапазонная приемная система, аналогичная используемой на РТ-13.

В режиме узкополосной регистрации, который позволяет существенно сократить суммарную скорость информационного потока на каждом радиотелескопе, внутри полосы частот Δf шириной 512 МГц или 1024 МГц каждого канала МСПС выделяются до 16 частотных каналов с шириной полосы $B = 8, 16$ или 32 МГц. Для этого используется такой же алгоритм, как и в упомянутом выше цифровом преобразователе потоков данных. Для его реализации в ПЛИС, работающей с тактовой частотой в несколько раз меньше частоты дискретизации сигналов в АЦП, входной цифровой сигнал с частотой дискретизации $f_{д} = 2048$ МГц распределяется демультимплексором по 8 каналам блока полифазных фильтров с понижением частоты до допустимого значения. Использование затем цифровых видеоконверторов для выделения узкополосных каналов позволяет размещать их внутри широкой полосы канала МСПС произвольно в соответствии с заданной программой РСДБ-наблюдений.

Использование МСПС на всех радиотелескопах позволит повысить стабильность работы аппаратуры, так как в этой системе приняты специальные меры по минимизации вариаций задержки сигналов в каналах путем использования элементов, наименее чувствительных к изменению параметров окружающей среды и, в частности, температуры. Предварительная оценка температурной стабильности каналов МСПС показала, что температурный коэффициент задержки сигналов в этой системе сокращен приблизительно на порядок по сравнению с штатной ШСПС, используемой на РТ-13. Кроме того, в МСПС имеется возможность контроля с точностью лучше 1 пс внутренних задержек сигналов в каналах с помощью встроенной системы калибровки ([Носов и др., 2019](#)).

Заключение

Штатные СПС радиотелескопов РТ-13 в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадарь» комплекса «Квазар-КВО» существенно отличаются от аналогичных систем радиотелескопов РТ-32 шириной полосы частот сигналов, регистрируемых в каждом канале системы. Поэтому совместимость указанных СПС может быть достигнута только в режиме узкополосной регистрации сигналов путем выделения узкополосных каналов, аналогичных каналам РТ-32, в каждом широкополосном канале РТ-13. При этом неизбежны потери чувствительности радиоинтерферометра, составленного из радиотелескопов РТ-13 и РТ-32. Эти потери обусловлены меньшими по сравнению с РТ-32 размерами антенны РТ-13.

Выделение сигналов в узких полосах частот из широкополосного сигнала на РТ-13 можно осуществить с помощью цифрового преобразователя по-

токов данных на ПЛИС, который был разработан и испытан в ИПА РАН. Алгоритм выделения узкополосных каналов при цифровой обработке широкополосных сигналов включает в себя полифазную фильтрацию, которая приводит к возникновению ряда проблем, связанных с выбором частоты следования импульсов СФК, необходимостью устранения искажений сигналов при их фильтрации и возможностью возникновения неопределенности положения цифровых данных на шкале времени радиотелескопа после их обработки в ПЛИС. В результате проведенных исследований были найдены приемлемые решения указанных проблем.

В максимальной степени совместимость СПС радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 может быть реализована путем оснащения этих радиотелескопов новыми унифицированными многофункциональными системами МСПС, при создании которых использованы результаты исследований совместимости аппаратуры преобразования сигналов на разных радиотелескопах.

Работа выполнена в соответствии с Планом научно-исследовательских работ ИПА РАН.

Литература

- Витнов А. В., Иванов Д. В., Карпичев А. С.* Система контроля фазовой стабильности в радиоинтерферометрических экспериментах // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 2. С. 54–57.
- Гренков С. А., Федотов Л. В., Мельников А. Е.* Совместные РСДБ-наблюдения на РТ-32 и РТ-13 с широкополосной и узкополосной регистрацией сигналов // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 47. С. 101–105.
- Гренков С. А., Кольцов Н. Е.* Преобразователь потоков данных для радиотелескопа с цифровой системой регистрации широкополосных сигналов // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 4. С. 11–19.
- Гренков С. А., Федотов Л. В.* Результаты испытаний преобразователя потоков данных для цифровой регистрации широкополосных сигналов на радиотелескопе // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С. 111–115.
- Евстигнеев А. А., Векишин Ю. В., Евстигнеева О. Г. и др.* Широкополосная приемная система для РТ-13 обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 46. С. 50–56.
- Ипатов А. В.* Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 769–777.
- Носов Е. В.* Видеоконвертер с цифровой обработкой сигналов на видеочастотах для системы преобразования сигналов РСДБ-радиотелескопа // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 99–105.
- Носов Е. В., Бердников А. С., Маршалов Д. А.* Стабильность задержки в системах преобразования сигналов для РСДБ-радиотелескопов // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 49. С. 52–59.
- Суркус И. Ф., Кольцов Н. Е.* Зависимость потерь чувствительности радиоинтерферометра от параметров сигналов фазовой калибровки // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 38. С. 55–61.
- Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии; пер. с англ. под ред. Л. И. Матвеевко. 2-е изд. М.: Физматлит, 2003. 624 с.
- Niell A.* VGOS Band and channel frequency configuration. VGOS MEMO #044. 2017. URL: https://www.haystack.mit.edu/wp-content/uploads/2020/07/memo_VGOS_044.pdf (accessed: 05.05.2021).
- Niell A., Barrett J., Burns A. et al.* Demonstration of a broadband very long baseline interferometer system: a new instrument for high-precision space geodesy // Radio Science. 2018. Vol. 53, Iss. 10. P. 1269–1291. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018RS006617> (accessed: 05.05.2021).
- Nosov E., Marshalov D., Fedotov L., Sheynman Y.* Multifunctional digital backend for Quasar VLBI network // Journal of Instrumentation. 2021 Vol. 16. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/16/05/P05003/pdf> (accessed: 05.07.2021).
- Sasao T., Fletcher A. B.* Introduction to VLBI systems. Chapter 4. Very long baseline interferometry. Lecture notes for KVN students. Ajou University Lecture Notes, 2011. 263 p. URL: <http://astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/jvn/reduction/kvnlecnote/kchap4.pdf> (accessed: 05.05.2021).