

## Совместные РСДБ-наблюдения на РТ-32 и РТ-13 с широкополосной и узкополосной регистрацией сигналов

© С. А. Гренков, Л. В. Федотов, А. Е. Мельников

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

При РСДБ-наблюдениях на радиотелескопах РТ-32 используется узкополосная регистрация сигналов (8 каналов по 8 МГц). На новых радиотелескопах РТ-13 сигналы регистрируются в широкополосных каналах (512 МГц), что приводит к увеличению потока данных в 8 и более раз. Для работы с такими широкополосными каналами был разработан преобразователь потоков данных. С его помощью были проведены экспериментальные наблюдения совместно на РТ-13 и РТ-32.

Результаты показали, что использование преобразователя потоков позволяет сохранить точность определения групповой задержки сигнала с узкополосной регистрацией сигналов при использовании РТ-32 вместо одного из РТ-13.

**Ключевые слова:** радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, радиоинтерферометрические наблюдения, точность измерения групповой задержки сигналов, система преобразования сигналов.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.47.101-105>

На большинстве радиотелескопов, задействованных в РСДБ-наблюдениях, используются системы преобразования сигналов (СПС) с узкополосными каналами (до 16 МГц). Такой системой (P1002M) оснащены в настоящее время и радиотелескопы РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» [1]. В то же время на новых радиотелескопах с антеннами малого диаметра (РТ-13) используются широкополосные (512 МГц) каналы преобразования и регистрации сигналов [2]. Естественно возникает вопрос о совместимости указанных систем при проведении РСДБ-наблюдений на РТ-32 и РТ-13. Проверить их совместимость важно еще и потому, что на зарубежных радиотелескопах часто используется узкополосная регистрация сигналов в таком же формате как и на P1002M.

Чтобы обеспечить совместную работу радиотелескопов с широкополосными и узкополосными каналами, необходимо выделить в широкой полосе частот (например, 512 МГц) несколько произвольно расставленных узкополосных каналов. Это можно сделать непосредственно на корреляторе, что уже было апробировано в экспериментах с РТ-13, проведенных совместно с зарубежными станциями в 2015–2016 гг. [3]. Однако при таком выделении узкополосных каналов на коррелятор с радиотелескопа необходимо передавать весь объем информации с выхода широкополосной системы преобразования сигналов (ШСПС). Для РТ-13 это информационный поток со скоростью 8 Гбит/с, что в 8 раз выше скорости информационного потока на выходе системы P1002M. Для устранения этого недостатка был разработан специальный пре-

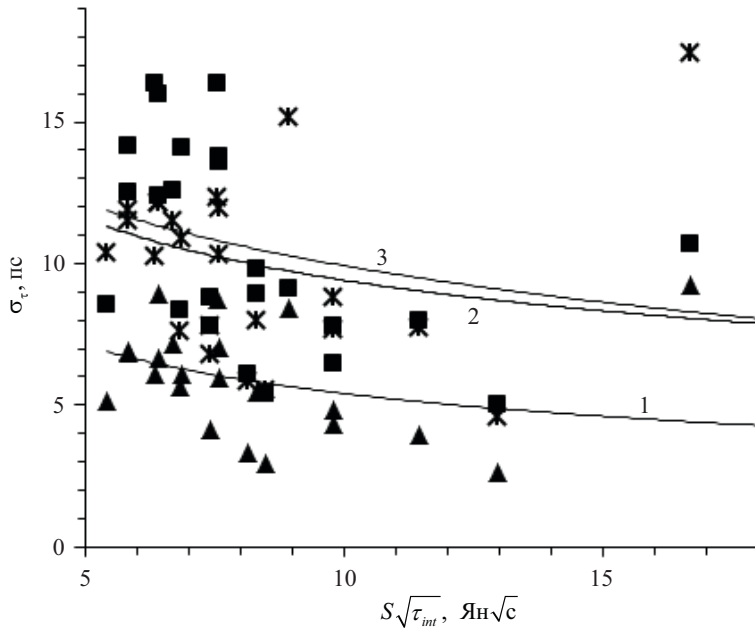
образователь потоков данных на программируемой логической интегральной схеме, который позволяет выделять сигналы узкополосных каналов из широкополосного непосредственно на радиотелескопе [4].

С использованием такого преобразователя в 2017 г. было проведено несколько экспериментальных сеансов РСДБ на радиоинтерферометре «Светлое»-«Зеленчукская»-«Бадары» при совместной работе РТ-32 и РТ-13 с широкополосной и узкополосной регистрацией сигналов. Целью таких экспериментов было не только испытать преобразователь потоков данных в условиях реальных РСДБ-наблюдений, но и исследовать, как меняется точность определения групповой задержки сигнала при совместных наблюдениях на РТ-13 и РТ-32 с широкополосной и узкополосной регистрацией, сравнив ее с точностью групповой задержки при стандартных наблюдениях на РТ-32 с узкополосной регистрацией. В ходе экспериментов во всех обсерваториях использовалось штатное оборудование для РСДБ, которое в обсерватории «Зеленчукская» было дополнено экспериментальным образцом преобразователя потоков данных. С его помощью в X-диапазоне одновременно регистрировались 8 частотных каналов шириной по 8 МГц, выделенных из двух широкополосных каналов, которые были настроены так, чтобы вместе перекрыть полосу частот шириной 1024 МГц. При узкополосной регистрации на РТ-32 и на РТ-13 использовалась стандартная для геодезических наблюдений расстановка каналов в полосе частот шириной 720 МГц для последующего синтеза полосы при корреляционной обработке [5].

В ходе эксперимента на всех радиотелескопах трех обсерваторий наблюдались 26 опорных космических источников радиоизлучения с плотностью потока излучения от 0.6 до 7.3 Ян. Время наблюдения каждого источника составляло от 21 до 112 сек, в зависимости от типа источника и его интенсивности. Эксперимент проходил в виде трех сеансов длительностью 1 ч каждый. Обработка данных производилась на программном корреляторе DiFX в ИПА РАН [6]. При обработке наблюдений с использованием преобразователя потоков данных для всех наблюдаемых источников были получены корреляционные отклики с отношением сигнал/шум, достаточным для вычисления значений групповой задержки сигналов и формальных ошибок ее определения.

Известно, что погрешность определения групповой задержки сигнала обратно пропорциональна плотности потока излучения источника и квадратному корню от времени интегрирования в корреляторе [5]. На основе полученных экспериментальных данных были построены графики этих зависимостей. При этом учитывалось, что время наблюдения и, соответственно, время интегрирования в корреляторе для разных источников устанавливается разным, как это принято при стандартных РСДБ-наблюдениях. Поэтому, чтобы иметь возможность сравнивать графики для различных условий эксперимента, по оси абсцисс откладывалось произведение плотности потока на корень квадратный от времени интегрирования в корреляторе. Эта величина имеет размерность  $\text{Ян} \cdot \sqrt{\text{с}}$  и растет с ростом плотности потока излучения источника и времени интегрирования.

Все экспериментальные сеансы наблюдений дали приблизительно одинаковые результаты. Полученные графики изменения среднеквадратической погрешности групповой задержки сигналов показывают (см. рисунок), что характер этого изменения совпадает с теоретическим.



Экспериментальные зависимости среднеквадратической ошибки групповой задержки сигнала ( $\sigma_{\tau}$ ) от плотности потока радиоизлучения источника ( $S$ ) и времени интегрирования  $\tau_{int}$  для радиоинтерферометра «Бадары»-«Зеленчукская»: 1 — при использовании 8 каналов по 8 МГц на обоих радиотелескопах РТ-32 ( $\blacktriangle$ ); 2 — при использовании 8 каналов по 8 МГц на РТ-13 и РТ-32 ( $\times$ ); 3 — при использовании каналов 512 МГц на обоих радиотелескопах РТ-13 ( $\blacksquare$ ); сплошными линиями показаны тренды со степенной аппроксимацией

При использовании преобразователя потоков данных результаты, полученные для 8 каналов по 8 МГц на РТ-32 и РТ-13 с синтезом полосы частот (кривая 2), практически не отличаются от результатов, полученных при использовании широкополосных каналов 512 МГц на обоих радиотелескопах РТ-13 без выделения узкополосных каналов (кривая 3). Однако в любом из этих двух случаев погрешность приблизительно в 2 раза больше, чем при стандартной узкополосной регистрации 8 каналов на обоих радиотелескопах РТ-32. Это связано, очевидно, с сокращением площади поверхности антенны при использовании РТ-13 вместо РТ-32. Потери от этого сокращения не компенсируются при использовании узкополосной регистрации.

Таким образом, выделение узкополосных каналов с помощью преобразователя потоков данных при совместном использовании широкополосной и узкополосной регистрации сигналов обеспечивает возможность проведения совместных РСДБ-наблюдений на РТ-13 и РТ-32. Формальная точность опре-

деления групповой задержки сигнала при этом в среднем даже лучше (приблизительно на 1 пс), чем при использовании двух радиотелескопов РТ-13 с широкополосными каналами.

## Заключение

Результаты обработки экспериментальных сеансов подтвердили возможность совместного использования широкополосной и узкополосной регистрации сигналов, а также возможность использования преобразователя потоков данных для сопряжения широкополосных и узкополосных систем преобразования сигналов при РСДБ-наблюдениях. При совместных наблюдениях на РТ-13 и РТ-32 из-за сокращения площади поверхности одной из антенн погрешность определения групповой задержки сигналов, конечно, ухудшается по сравнению со стандартными узкополосными наблюдениями на РТ-32. Однако, по сравнению с наблюдениями на двух радиотелескопах РТ-13 сопряжение узкополосной и широкополосной систем регистрации сигналов позволяет практически сохранить, и даже немного улучшить, точность определения групповой задержки.

## Литература

1. *Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В.* Системы преобразования сигналов радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — Красноярск: СибГАУ, 2014. — № 4 (56). — С. 81–87.
2. *Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В.* Цифровая система преобразования широкополосных сигналов для астрономических радиоинтерферометров // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — СПб.: СПбГЭТУ, 2014. — Вып. 1. — С. 34–40.
3. *Маршалов Д. А., Мельников А. Е., Федотов Л. В.* Экспериментальные исследования применения широкополосных цифровых каналов преобразования сигналов при РСДБ-наблюдениях // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып. 44. — С. 90–96.
4. *Гренков С. А., Кольцов Н. Е.* Преобразователь потоков данных для радиотелескопа с цифровой системой регистрации широкополосных сигналов // Приборы и техника эксперимента. — М.: Наука, 2018. — Вып. 4. — С. 11–19.
5. *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.
6. *Melnikov A., Vicente P., Kurdubov S., Mikhailov A.* First 2 Gbps observations between KVAZAR VGOS antennas and Yebes RAEGE antenna // IVS 2016 General Meeting Proceedings. “New Horizons with VGOS”. Edited by D. Behrend, K. D. Baver, and K. L. Armstrong. — NASA/CP, 2016. — P. 40–43.

# Joint VLBI Observations on RT-32 and RT-13 with Wideband and Narrowband Signal Registration

S. A. Grenkov, L. V. Fedotov, A. E. Melnikov

The VLBI observations on RT-32 are carried out with narrowband registration of signals, for example 8 channels with 8 MHz. On the new radio telescopes RT-13 signals are registered in wideband channels (512 MHz). Increasing data stream by 8 times is the result of this. The converter of data streams was developed to overcome the lack. With its help the experimental VLBI sessions were made on RT-13 jointly with RT-32. Their results showed that the use of streams converter allows to keep accuracy of signals group delay when using RT-32 instead of one of RT-13 and narrowband signal registration.

**Keywords:** VLBI, observations, group delay measurement accuracy, data acquisition system.