

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 520.27

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОТОКОВ  
ДАНЫХ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ  
СИГНАЛОВ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ**

© 2019 г. С. А. Гренков<sup>а,\*</sup>, Л. В. Федотов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт прикладной астрономии РАН  
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10*

*\*e-mail: skynet81@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.09.2018 г.

После доработки 25.09.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

Представлены результаты испытаний преобразователя потоков данных на основе программируемых логических интегральных схем в реальных радиоастрономических наблюдениях. Наблюдения проводили при совместном использовании радиотелескопов: РТ-32 с узкополосными каналами преобразования и регистрации сигналов и РТ-13 с широкополосной системой регистрации и преобразователем потоков данных. Испытания показали, что, несмотря на ухудшение точности измерения групповой задержки сигналов по сравнению с теоретически достижимой, использование преобразователя потоков эффективно, поскольку позволяет в 8 раз сократить поток данных с радиотелескопа РТ-13 и обеспечить совместимость с РТ-32.

DOI: 10.1134/S0032816219030054

**ВВЕДЕНИЕ**

Значительное число радиотелескопов, проводящих в настоящее время радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами (р.с.д.б.), оснащены системами преобразования сигналов с числом узкополосных каналов (до 16 МГц) от 14 до 16. С вводом в эксплуатацию радиотелескопов нового поколения с небольшими антеннами, например РТ-13 в р.с.д.б.-комплексе “Квazar-КВО”, на которых установлены широкополосные системы [1], стали проводиться наблюдения с регистрацией в каждом канале широкой полосы частот (512 МГц) для компенсации потерь чувствительности радиоинтерферометра из-за уменьшения диаметра антенн. Совместное использование радиотелескопов с широкополосными и узкополосными каналами для увеличения числа станций, одновременно участвующих в р.с.д.б.-наблюдениях, и, например, уточнения координат радиотелескопов требует выделения в полосе 512 МГц нескольких (обычно не более 8) произвольно расставленных узкополосных каналов. Для этого был разработан специальный преобразователь потоков данных, принципы конструирования и параметры которого рассмотрены в работе [2]. Выделять узкополосные каналы можно и программным способом при обработке данных на корреляторе. Однако при этом скорость информационного потока и объем инфор-

мации, которую надо передать на коррелятор с выхода системы преобразования сигналов, многократно возрастают, что ведет к неоправданным затратам ресурсов и времени. Если при регистрации на радиотелескопе сигналов в восьми узкополосных каналах информационный поток не превышает 0.5 Гбит/с, то для двух широкополосных каналов системы преобразования сигналов он увеличивается до 8 Гбит/с.

Экспериментальный образец преобразователя потоков данных для широкополосной цифровой системы регистрации сигналов был установлен на радиотелескопе РТ-13 в обсерватории Зеленчукская. Это позволило провести р.с.д.б.-наблюдения космических источников радиоизлучения радиоинтерферометром “Зеленчукская–Бадары” с одновременным использованием как узкополосной, так и широкополосной аппаратуры.

Эксперимент дал возможность провести испытания преобразователя потоков данных в реальных условиях, определить чувствительность и точность измерения групповой задержки сигналов радиоинтерферометром, в котором на одном из радиотелескопов используются широкополосные приемно-регистрирующие каналы с преобразователем потока данных, а на другом – традиционная система преобразования сигналов с узкополосными каналами.

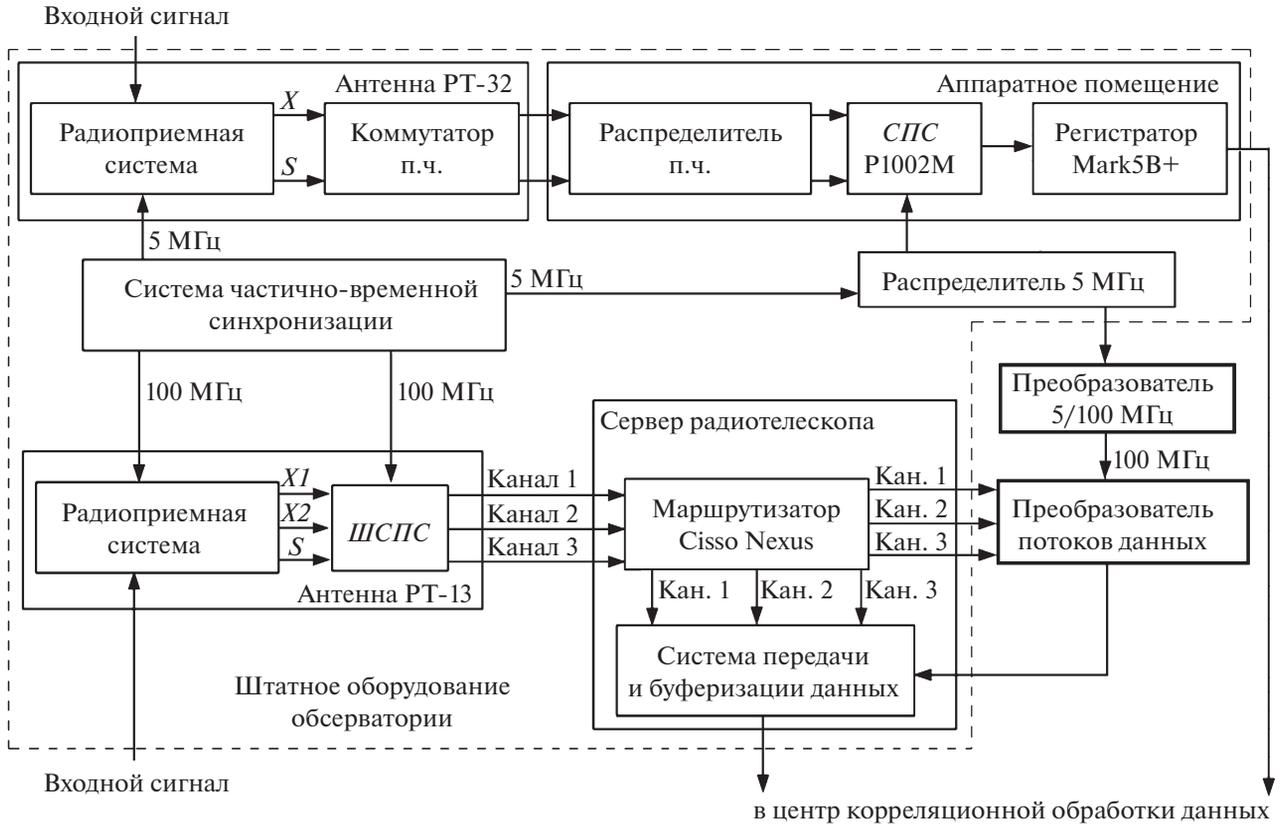


Рис. 1. Структурная схема подключения преобразователя потоков данных к штатной аппаратуре обсерватории Зеленчукская. СПС – система преобразования сигналов; ШСПС – широкополосная система преобразования сигналов.

## АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На каждой из двух участвующих в эксперименте обсерваторий (Зеленчукская и Бадары) использовалось штатное оборудование радиотелескопов РТ-32 и РТ-13 в режиме геодезических р.с.д.б.-наблюдений. Радиоприемные системы обоих радиотелескопов работали в X-диапазоне длин волн (3.5 см). На радиотелескопе РТ-32 принятые сигналы через коммутатор промежуточных частот (п.ч.) по фидерным линиям поступали в аппаратное помещение (рис. 1). Там через распределитель сигналов п.ч. они подавались на систему преобразования сигналов (СПС) P1002M [3], где выделялись для регистрации с помощью аппаратуры Mark 5B+ восьми частотных каналов с шириной полосы частот каждого 8 МГц. Каналы были оптимальным для синтеза полосы образом расставлены в полосе частот шириной 900 МГц для X-диапазона, так же как и при стандартных геодезических р.с.д.б.-наблюдениях. На радиотелескопе РТ-13 использовались 2 канала шириной 512 МГц каждый. Эти каналы располагались вплотную друг к другу на частотной оси, так что суммарная полоса регистрируемых частот составляла 1024 МГц.

Выделенные с помощью широкополосной системы преобразования сигналов ШСПС [1] широкополосные сигналы в виде цифровых потоков по оптоволоконным линиям поступали на маршрутизатор сервера радиотелескопа и, далее, в систему передачи и буферизации данных для передачи в центр корреляционной обработки [4]. Синхронизация приема, преобразования и регистрации данных на РТ-32 и на РТ-13 осуществлялась сигналами опорных частот 5 и 100 МГц от водородного стандарта единой системы частотно-временной синхронизации.

В обсерватории Зеленчукская, кроме того, потоки данных от двух широкополосных каналов ШСПС через маршрутизатор одновременно подавались на испытуемый преобразователь потоков, который выделял узкополосные каналы на тех же частотах, что и P1002M. Для синхронизации преобразователя потоков данных использовался тот же сигнал опорной частоты – 5 МГц, преобразованный в 100 МГц. Таким образом, в обсерватории Зеленчукская, помимо одновременного приема сигналов от одних и тех же источников в восьми узкополосных и двух широкополосных каналах, узкополосные каналы выделялись из широкой

полосы с помощью преобразователя потоков данных.

В ходе эксперимента на всех радиотелескопах одновременно наблюдались 26 опорных космических источников с плотностью потока излучения от 0.6 до 7.3 Ян. Время наблюдения каждого источника составляло от 21 до 112 с в зависимости от типа источника и его интенсивности. Эксперимент проходил в виде трех сеансов длительностью 1 ч каждый. Обработка данных осуществлялась на программном корреляторе DiFX в Институте прикладной астрономии [5]. На корреляторе определялись групповая задержка сигнала для каждого источника, а также среднеквадратическая погрешность ее измерения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Основной задачей эксперимента было исследование возможности выделения узкополосных каналов с помощью экспериментального образца преобразователя потоков данных и совместного использования узкополосных и широкополосных систем при р.с.д.б.-наблюдениях. Важно было сравнить полученную в эксперименте точность определения групповой задержки сигналов с расчетной теоретической. При этом учитывалось, что СПС с узкополосными каналами установлены на радиотелескопах с антеннами диаметром 32 м (РТ-32), а широкополосная регистрация используется на радиотелескопах с антеннами малого диаметра (РТ-13) для компенсации снижения чувствительности радиоинтерферометра.

Известно, что среднеквадратическая ошибка  $\sigma_\tau$  измерения радиоинтерферометром групповой задержки сигнала зависит от отношения сигнал/шум (SNR) на выходе коррелятора, по которому судят о чувствительности радиоинтерферометра. При использовании  $N$  каналов и синтезе полосы частот погрешность измерения групповой задержки сигнала определяется выражением [6]:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\eta\pi\sqrt{8}} \sqrt{\frac{T_{S1}T_{S2}}{T_{A1}T_{A2}}} \frac{1}{\sqrt{NB\tau_{int}\Delta f_{rms}}}. \quad (1)$$

Здесь  $\eta$  – коэффициент потерь, который с учетом всех возможных потерь чувствительности может достигать 0.5;  $T_A$  – шумовая температура сигнала от наблюдаемого источника радиоизлучения в антенне радиотелескопа;  $T_S$  – шумовая температура приемной системы радиотелескопа; индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму радиотелескопам;  $\Delta f_{rms}$  – эффективная полоса частот, составляющая при стандартном взвешенном способе расстановки каналов внутри полосы п.ч. приемной системы приблизительно 40% от ширины этой полосы;  $B$  – полоса пропускания кана-

ла СПС;  $\tau_{int}$  – время усреднения сигналов в корреляторе.

Считая антенны и приемные системы на обоих радиотелескопах одинаковыми, с учетом известного соотношения  $T_A$  [K] =  $S$  [Ян]· $A$  [м<sup>2</sup>]/2800 формулу (1) можно упростить:

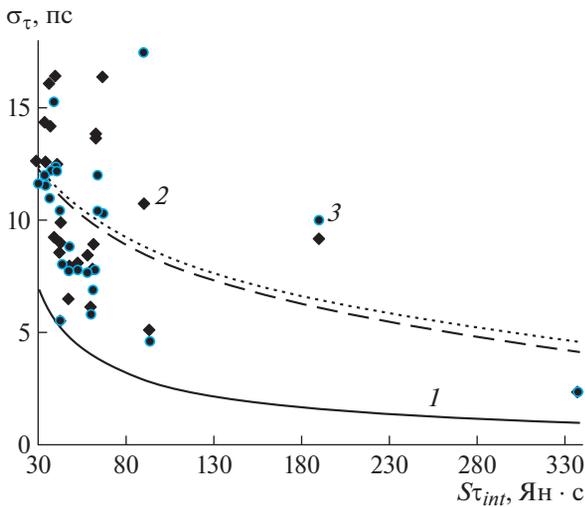
$$\sigma_\tau = \frac{2800T_S}{\sqrt{8\pi\eta SA_g\epsilon}\sqrt{NB\tau_{int}\Delta f_{rms}}}, \quad (2)$$

где  $A = A_g\epsilon$  – эффективная площадь антенны;  $A_g$  – ее геометрическая площадь;  $\epsilon$  – коэффициент использования поверхности;  $S$  – плотность потока излучения источника. Если антенны радиотелескопов имеют разные эффективные площади, то в формулу (2) вместо  $A_g\epsilon$  надо подставить квадратный корень из произведения этих величин для первой и второй антенн.

Полученное выражение позволяет построить график теоретической зависимости точности измерения групповой задержки от спектральной плотности потока источника излучения для радиоинтерферометра на радиотелескопах РТ-32 ( $A_g = 803.84$  м<sup>2</sup>;  $\epsilon = 0.57$ ;  $T_S = 40$  К) и РТ-13 ( $A_g = 136.78$  м<sup>2</sup>;  $\epsilon = 0.7$ ;  $T_S = 35$  К) комплекса “Квazar-KBO”, чтобы сравнить с ним полученные экспериментально результаты. При этом необходимо учитывать, что время наблюдения и соответственно время интегрирования в корреляторе для разных источников устанавливается разным, как это принято при стандартных р.с.д.б.-наблюдениях. Поэтому, чтобы иметь возможность сравнивать графики для различных условий эксперимента и получить наглядное представление о характере зависимости погрешности измерения от плотности потока излучения, по оси абсцисс целесообразно откладывать произведение плотности потока излучения и времени интегрирования в корреляторе. Эта величина имеет размерность Ян·с и растет с ростом плотности потока излучения источника.

В результате экспериментальных сеансов наблюдений с использованием преобразователя потоков данных для всех наблюдаемых источников были зафиксированы четкие корреляционные отклики, вычислены значения групповой задержки сигналов и погрешность ее измерения. Это подтвердило работоспособность преобразователя потоков и возможность его использования для сопряжения аппаратуры, использующей широкополосные и узкополосные каналы регистрации сигналов.

Все эксперименты дали приблизительно одинаковые результаты. Полученные в результате экспериментов графики зависимости точности измерения групповой задержки сигналов от плотности потока излучения источника показывают



**Рис. 2.** Зависимости среднеквадратической ошибки измерения групповой задержки сигнала ( $\sigma_{\tau}$ ) от плотности потока радиоизлучения источника ( $S$ ) для двухэлементного радиоинтерферометра “Бадары–Зеленчукская”: 1 – расчетная зависимость; 2 – эксперимент с использованием восьми каналов по 8 МГц на РТ-13 и РТ-32 (тренд со степенной аппроксимацией – штриховая линия); 3 – эксперимент с использованием одного канала 512 МГц на РТ-13 (тренд со степенной аппроксимацией – пунктирная линия).

(рис. 2), что характер этой зависимости близок к теоретическому (2).

При использовании преобразователя потоков данных результаты, полученные для восьми 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). Увеличение погрешности измерения групповой задержки почти в 2 раза по сравнению с теоретической вызвано тем, что формулы (1) и (2) не учитывают все возможные погрешности, связанные с условиями проведения наблюдений и используемой аппаратурой. В частности, не учитываются дополнительные аппаратные потери при цифровой обработке сигналов в преобразователе потоков данных, связанные с разделением широкополосного сигнала на несколько узкополосных методом полифазной фильтрации, а также с разделением комплексного полосового сигнала на два вещественных в программируемой логической интегральной схеме (п.л.и.с.) [2]. Однако при большом числе участвующих в наблюдениях станций влияние указанного недостатка на суммарную погрешность радиоинтерферометрических измерений существенно падает.

В ходе эксперимента выделение узкополосных каналов из широкополосных осуществлялось не только преобразователем потоков данных, но и

коррелятором DiFX в процессе корреляционной обработки результатов. Это позволило выявить некоторое (до 20%) ухудшение результатов при использовании преобразователя потоков данных по сравнению с программным выделением каналов на корреляторе.

Исследование причин этого ухудшения показало, что при использовании преобразователя потоков разброс от одного наблюдения к другому измеренных поправок к априорной групповой задержке сигнала существенно больше, чем при выделении узкополосных каналов программно на корреляторе DiFX. При этом величина отклонения измеренных значений от среднего изменяется дискретно. Это вызвано дискретной неопределенностью момента начала обработки данных каждого конкретного наблюдения (скана) в преобразователе потоков.

Дело в том, что тактовая частота работы п.л.и.с. в преобразователе составляет  $f_T = 256$  МГц, а данные при ширине полосы частот каждого канала 8 МГц выводятся с тактовой частотой 16 МГц, которая на каждом скане начинает формироваться заново только после поступления данных этого скана на вход п.л.и.с. Таким образом, на каждом скане возникает случайная задержка в несколько (от 1 до 16) периодов частоты  $f_T$ , которая может как прибавляться к измеряемому значению, так и вычитаться из него.

Этого эффекта можно избежать, если взаимную привязку тактовых частот при обработке данных в преобразователе осуществлять не на каждом скане, а только один раз в начале сеанса наблюдений. По результатам проведенных исследований эти изменения были внесены в битовую карту прошивки п.л.и.с. преобразователя потоков данных. После коррекции указанной погрешности синхронизации разброс измеренных с помощью преобразователя потоков данных поправки групповой задержки сигналов сократился более чем на порядок, и отличия в погрешности измерения групповой задержки при выделении узкополосных каналов коррелятором и преобразователем потоков данных были практически нивелированы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные на радиоинтерферометре комплекса “Квазар-КВО” р.с.д.б.-наблюдения с одновременным использованием узкополосных и широкополосных систем преобразования сигналов подтвердили эффективность использования на радиотелескопе преобразователя потоков данных для выделения узкополосных каналов из широкополосных и сопряжения ШСПС на РТ-13 с СПС на РТ-32. Совместное использование радиотелескопов РТ-13, оснащенного широкополос-

ной системой с преобразователем потоков данных, и РТ-32 с узкополосной системой регистрации позволяет обеспечить точность измерения групповой задержки сигнала, практически такую же, как при штатных наблюдениях на РТ-13 с широкополосными каналами. Хотя аппаратное выделение узкополосных каналов с помощью преобразователя потоков и ухудшает точность р.с.д.б.-измерений по сравнению с теоретически достижимой, но зато позволяет не менее чем в 8 раз сократить скорость информационного потока с радиотелескопа, оснащенного широкополосной аппаратурой, на коррелятор. Это особенно важно при ограниченной пропускной способности линий передачи данных между радиотелескопами и коррелятором, а также при проведении международных р.с.д.б.-наблюдений. Планируется оснащение такими преобразователями всех радиотелескопов РТ-13 комплекса “Квазар-КВО”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кольцов Н.Е., Маршалов Д.А., Носов Е.В., Федотов Л.В.* // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 1. С. 34.
2. *Гренков С.А., Кольцов Н.Е.* // ПТЭ. 2018. № 4. С. 11. doi 10.1134/S0032816218040079
3. *Гренков С.А., Носов Е.В., Федотов Л.В., Кольцов Н.Е.* // ПТЭ. 2010. № 5. С. 60.
4. *Безруков И.А., Сальников А.И., Яковлев В.А., Вылегжанин А.В.* // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 32. С. 3.
5. *Кен В.О., Мельников А.Е., Суркис И.Ф., Шантырь В.А.* // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 36. С. 102.
6. *Томпсон А.Р., Моран Дж.М., Свенсон Дж.У.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / Пер. с англ. Под ред. Л.И. Матвеевко. 2-е изд. М.: Физматлит, 2003.