

Точность измерения групповой задержки при РСДБ-наблюдениях с помощью широкополосных и узкополосных каналов преобразования сигналов

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

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Исследована точность измерения групповой задержки сигналов при РСДБ-наблюдениях с узкополосной или широкополосной регистрацией, а также при их совместном использовании. Результаты экспериментальных сеансов РСДБ-наблюдений подтвердили возможность сопряжения широкополосных и узкополосных систем преобразования сигналов непосредственно на радиотелескопе путем выделения узкополосных каналов с помощью разработанного модуля цифровых видеоконверторов.

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

Введение

До недавнего времени практически все РСДБ-наблюдения проводились с использованием относительно узкополосных (до 16 МГц) систем преобразования сигналов (СПС) на радиотелескопах с антеннами большого диаметра, например РТ-32 [1, 2]. Узкополосными системами оснащены большинство зарубежных радиотелескопов. С вводом в эксплуатацию в комплексе «Квазар-КВО» радиотелескопов РТ-13, оснащенных для компенсации потерь чувствительности широкополосными системами преобразования сигналов (ШСПС), стали проводиться наблюдения с регистрацией в каждом канале сигналов широкой полосы частот (512 МГц) [3, 4]. Совместное использование радиотелескопов с широкополосными и узкополосными каналами для расширения возможностей РСДБ вызвало необходимость исследования влияния разнотипных каналов на точность измерения групповой задержки сигналов.

Для корреляционной обработки поступающих от ШСПС высокоскоростных потоков данных необходимы специализированные РСДБ-корреляторы [5]. Однако, до сих пор большинство РСДБ-корреляторов рассчитано на обработку сигналов от СПС с узкополосными каналами. К ним относится и коррелятор комплекса «Квазар-КВО» [6]. Чтобы обрабатывать сигналы от раз-

нотипных СПС необходимо выделять узкополосные каналы, частоты настройки которых произвольно размещены внутри полосы частот широкополосного канала. Эта операция, в принципе, может выполняться программным способом на корреляторе, но для этого требуется передача со станций большого объема данных. Поэтому в ИПА РАН был разработан специальный цифровой преобразователь, который при установке на радиотелескопы, оснащенные ШСПС, решает задачу совместной работы с узкополосными системами и участия в международных наблюдательных программах. Этот преобразователь представляет собой модуль из 16 цифровых видеоконверторов, реализованных на программируемой цифровой интегральной схеме (ПЛИС) [7]. Далее приводятся результаты экспериментальных исследований совместной работы радиотелескопов с широкополосными и узкополосными СПС в составе комплекса «Квazar-КВО», а также анализ влияния разнотипных каналов на точность измерения групповой задержки сигналов при РСДБ.

Точность измерения групповой задержки сигналов при РСДБ-наблюдениях

Известно, что среднеквадратическая ошибка σ_τ измерения радиоинтерферометром групповой задержки сигнала зависит от отношения сигнал/шум (SNR) на выходе коррелятора, по которому судят о чувствительности радиоинтерферометра [8].

При использовании N каналов и синтезе полосы частот погрешность измерения групповой задержки сигнала определяется выражением [9]:

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

Здесь η — 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 интерферометра;

B — полоса пропускания канала СПС;

τ_{int} — время интегрирования сигналов в корреляторе;

Δf_{rms} — эффективная полоса частот, которая определяется формулой

$$\Delta f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{r=1}^N (f_{0r} - f_{cp})^2}.$$

Здесь f_{0r} — среднее значение частоты узкополосного сигнала, выделяемого каналом с номером r , а $f_{cp} = (f_{01} + f_{0N})/2$. При оптимальном взвешенном способе расстановки каналов внутри полосы промежуточных частот (ПЧ) приемной системы Δf_{rms} составляет приблизительно 40 % от ширины полосы ПЧ Δf_{IF} .

С учетом известного соотношения $T_A[^\circ\text{K}] = S[\text{Ян}] \cdot A[\text{м}^2] / 2800$ [9] формулу (1) можно преобразовать к виду

$$\sigma_\tau = \frac{2800}{\sqrt{8\pi\eta S \Delta f_{rms}}} \sqrt{\frac{T_{S1} T_{S2}}{A_{g1} A_{g2} \varepsilon_1 \varepsilon_2 N B \tau_{int}}}, \quad (2)$$

где $A = A_g \varepsilon$ — эффективная площадь антенны, A_g — ее геометрической площадь, ε — коэффициент использования поверхности (КИП), S — плотность потока излучения источника.

Полученное выражение позволяет путем математического моделирования исследовать зависимости точности измерения групповой задержки от спектральной плотности потока источника излучения для радиоинтерферометра на радиотелескопах РТ-32 ($A_g = 803,84 \text{ м}^2$; $\varepsilon = 0,57$; $T_S = 40^\circ\text{K}$) и РТ-13 ($A_g = 136,78 \text{ м}^2$; $\varepsilon = 0,7$; $T_S = 35^\circ\text{K}$) комплекса «Квазар-КВО» (рис. 1). При построении этих графиков учитывалось, что время наблюдения и, соответственно, время интегрирования в корреляторе для разных источников разное, как это принято при стандартных РСДБ-наблюдениях. Поэтому, чтобы иметь возможность сравнивать графики для различных условий эксперимента, по оси абсцисс целесообразно откладывать параметр $p = S\sqrt{\tau}_{int}$, который можно назвать «накопленным потоком излучения». Этот параметр имеет размерность $\text{Ян}\sqrt{\text{с}}$ и растет с ростом плотности потока излучения источника и

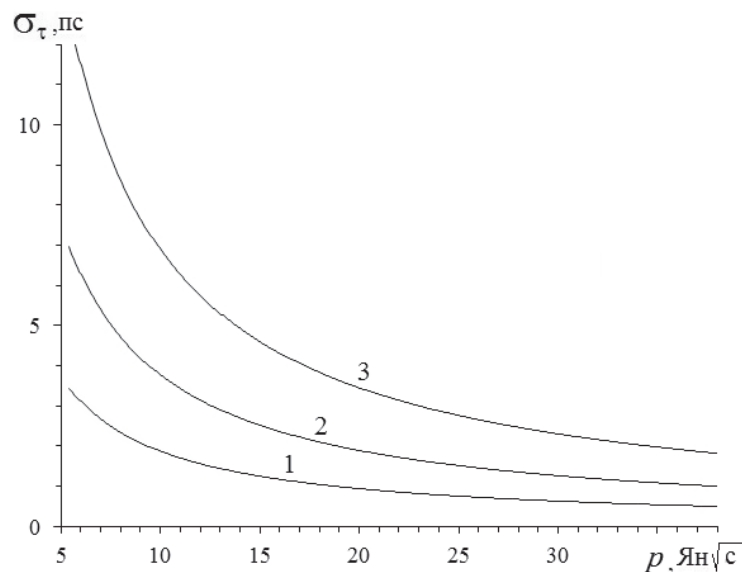


Рис. 1. Расчетные зависимости среднеквадратической ошибки измерения групповой задержки сигнала (σ_τ) от «накопленного потока излучения» $p = S\sqrt{\tau}_{int}$ для двухэлементного радиоинтерферометра в X диапазоне: 8 каналов на РТ-32 по 8 МГц и синтезом полосы частот (кривая 1); 8 каналов на РТ-13 и РТ-32 по 8 МГц с синтезом полосы частот (кривая 2); один канал шириной 512 МГц на РТ-13 (кривая 3)

времени интегрирования. При моделировании было принято, что наблюдения на РТ-32 и РТ-13 происходят одновременно и наблюдаются одни и те же источники с плотностью потока от 1 до 7 Ян. Суммарные потери чувствительности при построении графиков считались равными 50 % ($\eta = 0.5$), а полоса промежуточных частот приемной системы на РТ-32 $\Delta f_{IF} = 900$ МГц. Для радиоинтерферометра на двух радиотелескопах РТ-13 использовался один канал $\Delta f_{IF} = B = 512$ МГц. При совместных наблюдениях на РТ-13 и РТ-32 считалось, что на каждом радиотелескопе в X диапазоне (8.18–9.08 ГГц) выделяются 8 каналов по 8 МГц каждый, расставленных оптимальным образом в полосе $\Delta f_{IF} = 900$ МГц так что расстояние по оси частот между крайними каналами составляло 720 МГц. При последующей корреляционной обработке осуществлялся синтез полосы частот.

Полученные результаты показывают, что, несмотря на компенсацию потерь чувствительности в радиоинтерферометре на РТ-13 за счет расширения полосы частот канала до 512 МГц, наибольшую точность дают измерения с помощью РТ-32, антенны которых имеют большую площадь поверхности, и используется синтез полосы частот. При совместных наблюдениях на РТ-32 и РТ-13 за счет сокращения площади поверхности одной из антенн точность несколько ухудшается, однако все же остается выше, чем для одного широкополосного канала в радиоинтерферометре на РТ-13.

Результаты экспериментальных исследований

В 2017 году на радиотелескопах комплекса «Квazar-КВО» были проведены экспериментальные сеансы РСДБ наблюдений R-I-2140, R-I-2141 и R-I-2142 для исследования возможности выделения узкополосных каналов с помощью экспериментального образца модуля цифровых видеоконверторов [7] и совместного использования узкополосных и широкополосных СПС при РСДБ-наблюдениях. При этом использовался X диапазон длин волн, как и при стандартных геодезических наблюдениях. В обсерватории Светлое на радиотелескопе РТ-32 работала штатная СПС P1002M, которая выделяла для регистрации 16 каналов в X и S диапазонах с шириной полосы частот 8 МГц каждого канала. В обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары» одновременно работали радиотелескопы РТ-32, оснащенные СПС P1002M [10], и радиотелескопы РТ-13, оснащенные ШСПС [3], которые позволяют регистрировать сигналы в полосе 512 МГц. Кроме того, в обсерватории «Зеленчукская» был включен модуль цифровых видеоконверторов, с помощью которого одновременно регистрировались 8 частотных каналов шириной 8 МГц, выделенные из двух рядом расположенных на оси частот широкополосных каналов X1 и X2, шириной 512 МГц (рис. 2). Таким образом, и на РТ-32, и на РТ-13 одновременно регистрировались сигналы в 8 узкополосных каналах, оптимальным образом разнесенных по частоте в диапазоне шириной приблизительно 900 МГц для синтеза частотных каналов при корреляционной обработке.

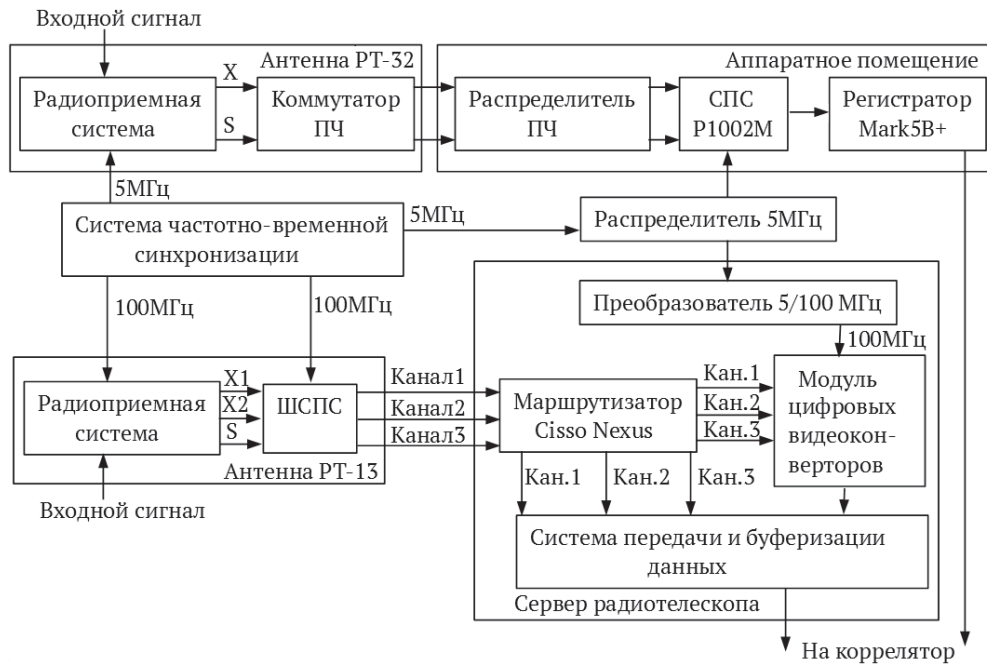


Рис 2. Схема подключения аппаратуры в обсерватории «Зеленчукская» при проведении экспериментов

Для регистрации сигналов с выхода СПС Р1002М использовалась штатная аппаратура регистрации Mark 5B+, а для регистрации сигналов с выхода ШСПС — штатная система передачи и буферизации данных радиотелескопа. Синхронизация осуществлялась с помощью штатной системы частотно-временной синхронизации. Радиоприемные системы обоих радиотелескопов работали в одних и тех же частотных диапазонах. Обработка данных производилась на программном корреляторе DiFX в Институте прикладной астрономии РАН.

В результате обработки корреляционные отклики с достаточным для определения групповой задержки отношением сигнал/шум были зафиксированы для всех наблюдаемых источников (рис. 3).

Характер зависимости формальной точности измерения групповой задержки сигналов от плотности потока мощности источника и времени интегрирования в корреляторе в целом совпадает с теоретическим (рис. 1). Однако, при реальных наблюдениях на величину среднеквадратической ошибки измерения групповой задержки сигнала влияет очень много случайных факторов, которые нельзя учесть при теоретическом анализе, например: ошибки наведения антенны, изменения шумовой температуры системы (T_s) при изменении угла возвышения антенны и другие. Поэтому, разброс значений формальной ошибки определения групповой задержки для разных сканов

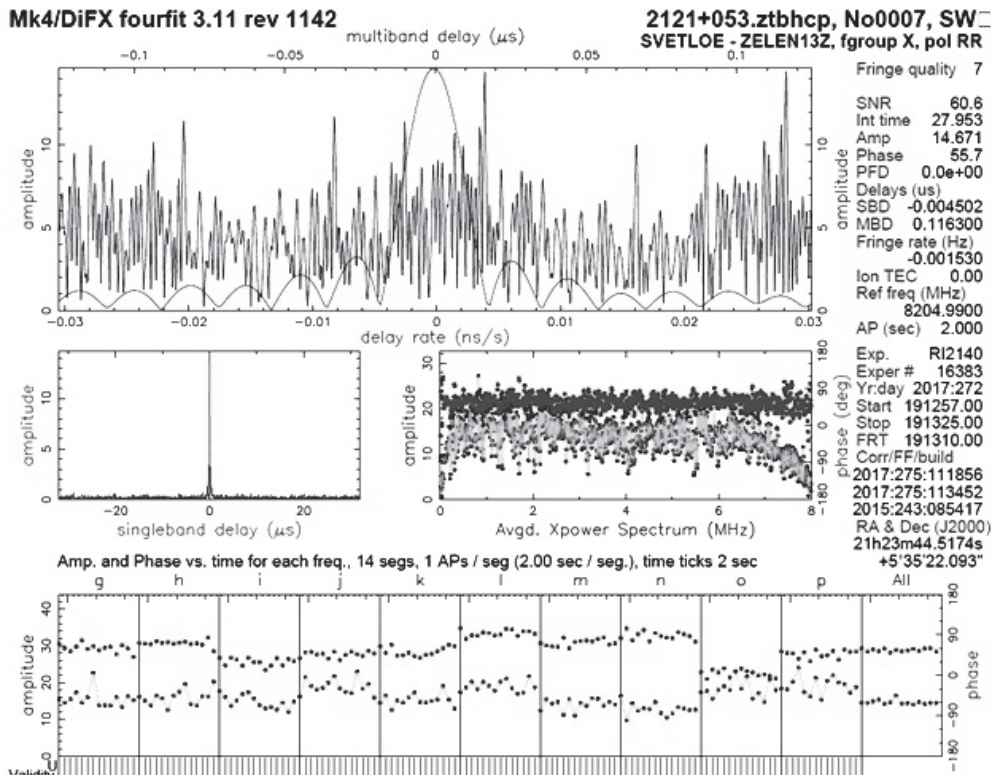


Рис. 3. Результат корреляционной обработки наблюдений источника 2121+053 на сеансе R-I-2140 для базы «Светлое»–«Зеленчукская» в X-диапазоне длин волн при использовании узкополосной регистрации в Светлом и широкополосной регистрацией с банком цифровых видеоконверторов в «Зеленчукской»

достаточно велик и можно говорить только о тенденции их изменения с ростом величины параметра $p = S\sqrt{\tau_{int}}$ (рис. 4). В среднем формальная ошибка при использовании РТ-32 совместно с РТ-13, выделении 8 каналов по 8 МГц и синтезе полосы частот мало отличается от использования двух радиотелескопов РТ-13 с каналом шириной 512 МГц на каждом из них.

По результатам обработки наблюдений на базе «Бадары»–«Зеленчукская» при совместном использовании РТ-32 с узкополосными каналами и РТ-13 с широкополосными каналами, из которых с помощью модуля цифровых видеоконверторов выделены узкополосные, можно заключить, что в среднем точность измерения групповой задержки ухудшается приблизительно в 1.8 раза (рис. 5) по сравнению со штатными наблюдениями на РТ-32. Это очевидно связано с уменьшением площади поверхности одной из антенн почти в 6 раз. Аналогичные результаты получены на базе «Светлое»–«Зеленчукская» для всех трех экспериментальных сеансов R-I-2140, R-I-2141 и R-I-2142.

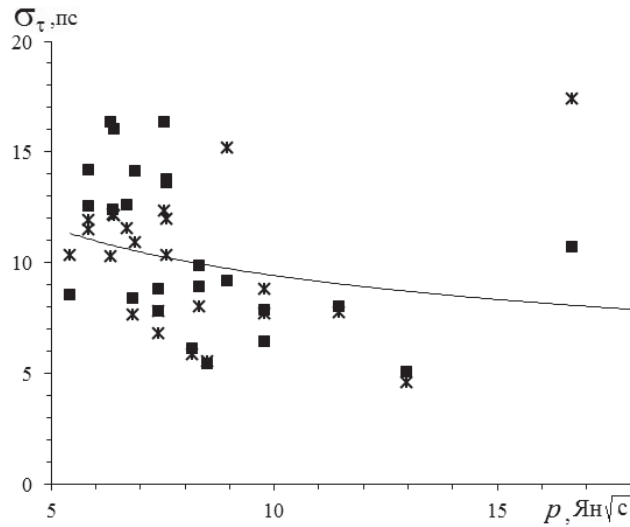


Рис. 4. Экспериментальные зависимости среднеквадратической ошибки измерения групповой задержки сигнала (σ_τ) от «накопленного потока излучения» $p = S\sqrt{\tau_{int}}$, полученные по результатам обработки на корреляторе DiFX наблюдений R-I-2140 на базе «Бадары»–«Зеленчукская»: 8 каналов на РТ-13 и РТ-32 по 8 МГц с синтезом полосы частот (*); один канал шириной 512 МГц на РТ-13 (■); сплошная линия — тренд со степенной аппроксимацией

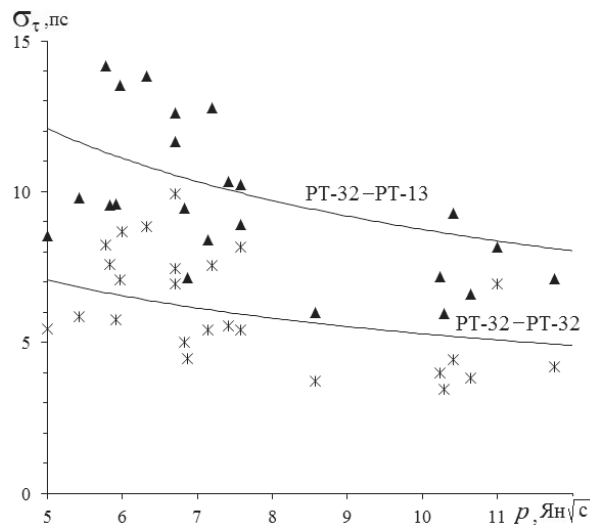


Рис. 5. Зависимости среднеквадратической ошибки измерения групповой задержки сигнала (σ_τ) от «накопленного потока излучения» $p = S\sqrt{\tau_{int}}$ для двухэлементного радиоинтерферометра «Бадары»–«Зеленчукская» на сеансе R-I-2142 при использовании 8 каналов по 8 МГц с синтезом полосы частот: экспериментальные результаты для радиотелескопов РТ-32 (*) и совместного использования РТ-32 и РТ-13 (▲); сплошные линии — тренд со степенной аппроксимацией

Аппаратное выделение узкополосных каналов с помощью модуля цифровых видеоконверторов дает точность примерно на 20 % худшую, чем программное выделение с помощью коррелятора DiFX. Это ухудшение предположительно вызвано дополнительными аппаратными потерями при разделении методом полифазной фильтрации широкополосного цифрового сигнала на несколько узкополосных в модуле цифровых видеоконверторов, а также с потерями при разделении комплексного полосового сигнала на пару вещественных сигналов при цифровой обработке в ПЛИС [7]. Однако, на суммарной погрешности радиоинтерферометрических измерений это практически не сказывается.

Исследование причин ухудшения погрешности при аппаратном выделении узкополосных каналов показало, что при использовании модуля цифровых видеоконверторов разброс от скана к скану значений измеренных поправок к априорной групповой задержке сигнала существенно больше, чем при выделении узкополосных каналов программно на корреляторе DiFX (рис. 6). Причем величина отклонения измеренных значений от среднего имеет дискретный характер.

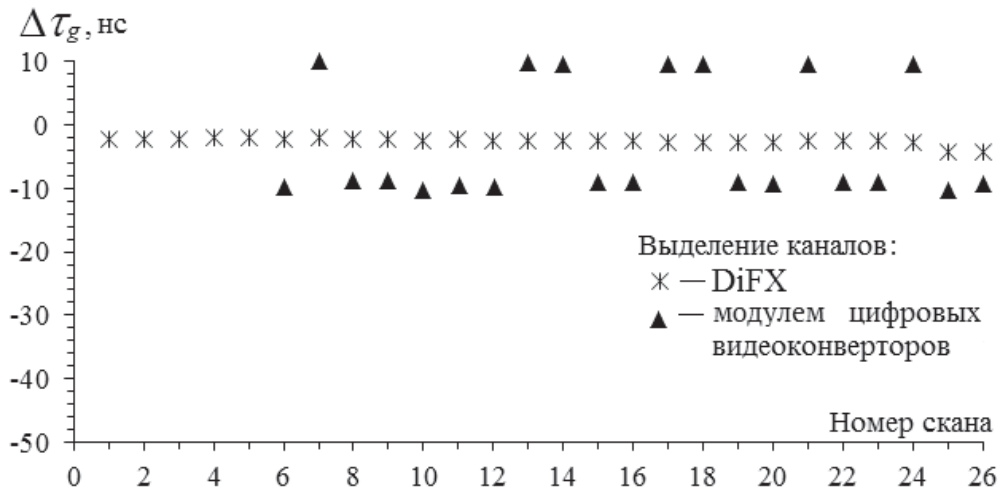


Рис. 6. Изменение измеренных значений поправок к априорной групповой задержке сигнала на сеансе R-I-2141

Исследования показали, что это вызвано дискретной неопределенностью момента начала обработки данных каждого конкретного скана в модуле цифровых видеоконверторов. Дело в том, что тактовая частота работы ПЛИС в модуле цифровых видеоконверторов составляет $f_{\text{такт.}} = 256$ 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 ПЛИС. Таким образом, на каждом скане возникает случайная задержка в несколько (от 1 до 16) периодов

частоты $f_{\text{такт.}}$, 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 модуле цифровых видеоконверторов осуществлять не на каждом скане, а только один раз в начале сеанса наблюдений. По результатам проведенных экспериментальных исследований эти изменения были внесены в битовую карту прошивки ПЛИС модуля цифровых видеоконверторов. После коррекции указанной погрешности синхронизации обработки данных разброс измеренных с помощью модуля цифровых видеоконверторов значений поправки групповой задержки сигналов сократился более чем на порядок (рис. 7). Теперь среднеквадратическое отклонение измеренных значений поправки (СКО = 0.58 нс) практически не отличается от среднеквадратического отклонения, полученного при выделении узкополосных каналов на корреляторе DiFX (СКО = 0.54 нс) и соизмеримо с разбросом значений поправки, полученных по результатам работы штатной аппаратуры преобразования сигналов и регистрации узкополосных каналов на радиотелескопах РТ-32 (СКО = 0.1 нс).

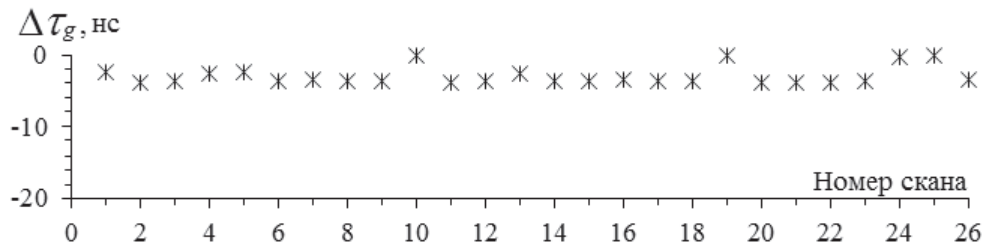


Рис. 7. Распределение измеренных значений поправки к априорной групповой задержке после коррекции погрешности синхронизации обработки данных в модуле цифровых видеоконверторов

На сеансе R-I-2141 был проведен эксперимент по использованию 8-битовых цифровых сигналов для выделения узкополосных каналов из широкополосного в модуле цифровых видеоконверторов. Эксперимент показал, что результаты работы цифрового видеоконвертора фактически не зависят от того, 2-битовый или 8-битовый сигнал используется для цифровой обработки. Полученные после обработки на корреляторе DiFX зависимости погрешности измерения групповой задержки от плотности потока мощности радиозлучения источника практически повторяют приведенные выше (рис. 4–6).

Заключение

Совместное использование при РСДБ-наблюдениях радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 позволяет обеспечить точность измерения групповой задержки сигнала, сравнимую с точностью при штатных наблюдениях на РТ-13 с широкополосными каналами, не смотря на разнотипные СПС, которыми оснащены эти радиотелескопы. При совместном использовании широкополосных и уз-

кополосных каналов точность измерения задержки ухудшается в среднем приблизительно в 1.8 раза. Однако она остается выше, чем точность, при использовании двух радиотелескопов РТ-13 с одним широкополосным каналом. Выделение узкополосных каналов из широкополосных может осуществляться как программно на корреляторе DiFX, так и аппаратно на радиотелескопах с помощью модуля цифровых видеоконвертеров на ПЛИС. При этом отличия в точности измерения групповой задержки не превышают 20 %. Применение модуля цифровых видеоконвертеров дает возможность существенно сократить объем данных, которые надо регистрировать на радиотелескопах и передавать в центр корреляционной обработки. После доработки битовых карт прошивки ПЛИС для исключения погрешности синхронизации цифровые видеоконвертеры могут использоваться на всех радиотелескопах, оснащенных широкополосными СПС, для сопряжения со штатными узкополосными системами.

Литература

1. Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Скурихина Е. А., Смоленцев С. Г., Суркис И. Ф., Федотов Л. В. Геодинамические наблюдения на РСДБ-сети «Квазар-КВО» в 2009–2011 гг. // Письма в Астрономический журнал. — М.: Наука, 2012. — Том 38, №6. — С. 446–451.
2. 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.
3. 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.
4. Маршалов Д. А., Мельников А. Е., Федотов Л. В. Экспериментальные исследования применения широкополосных цифровых каналов преобразования сигналов при РСДБ-наблюдениях // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2017). Седьмая Всероссийская конференция: тезисы докладов. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — С. 160.
5. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О., Курдубова Я. Л., Мишин В. Ю., Мишина Н. А., Шантырь В. А. Программный РСДБ-коррелятор на гибридном процессорном кластере // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 33. — С. 64–71.
6. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Шантырь В. А., Мельников А. Е. Радиоинтерферометрический коррелятор для комплекса «Квазар-КВО» // Приборы и техника эксперимента. — М.: Наука, 2011. — № 1. — С. 91–99.
7. Кольцов Н. Е., Гренков С. А. Цифровые видеоконвертеры для радиоастрономических систем преобразования сигналов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — СПб.: СПбГЭТУ, 2017. — Вып. 5. — С. 19–27.
8. Tetsuo Sasao and Andr'e B. Fletcher. Introduction to VLBI Systems. Lecture Notes for KVN Students. Ajou University, Korea, 2011. Chapter 4. Very Long Baseline Interferometry. [Electronic resource]. URL: www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/jvn/reduction/kvnlecnote/kchap4.pdf (дата обращения: 19.10.2017).

9. 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.

10. Гренков С. А., Кольцов Н. Е., Носов Е. В., Федотов Л. В. Цифровая радиоинтерферометрическая система преобразования сигналов // Приборы и техника эксперимента. — М.: Наука, 2010. — №5. — С. 60–66.

The Accuracy of VLBI Group Delay Measurement using Broadband and Narrowband Channels

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

We investigated the accuracy of measuring the group delay in VLBI observations with narrowband, broadband or combine registration. The results of experimental VLBI observations confirmed the possibility of interfacing broadband and narrowband Data Acquisition Systems using the developed Digital Down Converters module.

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