

## Сравнение шкал времени и частот с помощью радиоинтерферометра нового поколения

© А. А. Царук, Д. В. Иванов, Е. Т. Жуков, А. С. Карпичев

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Более года выполнялось сравнение шкал времени (ШВ) и частоты обсерваторий с помощью радиоинтерферометра нового поколения комплекса «Квazar-КВО». Приведено описание метода и результаты исследования его точностных характеристик. Показано, что неопределенность, характеризующая случайную составляющую погрешности измерений разности ШВ обсерваторий «Бадары» и «Зеленчукская», не превышает 40 пс на интервале усреднения от 1 до 10 часов, а нестабильность измерения разности частот этих ШВ на интервале усреднения более суток составляет  $1 \cdot 10^{-15}$ . При этом неопределенность, характеризующая систематическую составляющую погрешности измерений при сравнении ШВ, составила не более 0.5 нс. Расстояние между ШВ в данном эксперименте составило 4400 км.

**Ключевые слова:** РСДБ, сличение шкал времени, сравнение частот удаленных стандартов, РСДБ-система нового поколения.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.50.79-86>

### Введение

Повышение точности воспроизведения единицы частоты, постоянное улучшение точностных характеристик водородных стандартов времени и частоты, появление новых квантовых стандартов микроволнового и оптического диапазонов на охлажденных атомах подтверждает актуальность задачи передачи эталонных частот и сигналов времени на большие расстояния с высокой точностью и оперативностью. Методы передачи ШВ с использованием дуплексного метода через спутниковые каналы связи или с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) являются общепризнанными и широко применяются на практике. Реже используется еще один классический метод сличения ШВ — с использованием радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), причем в настоящее время потенциальная точность сличения ШВ методом РСДБ находится на уровне 10–20 пс [1].

### РСДБ-сличения стандартов времени и частоты

Метод РСДБ основан на измерении групповой задержки сигналов от внегалактических радиоисточников с помощью удаленных друг от друга радиотелескопов. В результате измерений оценивается сдвиг ШВ базовой обсерватории относительно ШВ всех остальных обсерваторий, принимающих участие в РСДБ-наблюдениях. В России для сличений ШВ методом РСДБ использовался комплекс «Квazar-КВО». Наблюдения проводились на антеннах диаметром

32 м с применением системы преобразования сигналов с частотой дискретизации 32 МГц. Полученные результаты показали возможность сличения номиналов частот стандартов обсерваторий на уровне нескольких единиц  $10^{-15}$  [2]. Точность сравнения шкал времени на долговременном периоде не соответствовала ожидаемой, в основном из-за невозможности оперативной калибровки РСДБ-аппаратуры.

В 2015 г. в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская» комплекса «Квазар-КВО» введены в эксплуатацию два радиотелескопа нового поколения РТ-13 на основе быстроповоротных антенн диаметром 13.2 м [3], модернизированы средства формирования и передачи сигналов опорных частот и реализаций шкал времени, установлены ГНСС-приемники GTR51 для сравнения ШВ относительно UTC (SU) с погрешностью временных измерений равной 2 нс. Обсерватории оснащены водородными стандартами времени и частоты (ВСВЧ) с нестабильностью не хуже  $1 \cdot 10^{-15}$  за сутки.

Принятые технические решения позволяют помимо оперативного определения Всемирного времени проводить сравнение ШВ и частот водородных стандартов времени и частоты обсерваторий [4]. Конфигурация системы РТ-13 дает возможность сличать ШВ на длительных временных интервалах, при этом интервалы между наблюдениями, погодные условия, расстояние между обсерваториями не оказывают существенного влияния на точность и оперативность сравнения ШВ и частот методом РСДБ.

В этой связи цель исследований состояла в оценке возможности сравнения как частот, так и абсолютного сравнения ШВ с использованием РСДБ-системы нового поколения, а также новых средств измерений и передачи сигналов времени и частоты обсерваторий.

## Теоретические оценки точности сличения ШВ и частот с помощью радиointерферометра нового поколения

Среднеквадратическое отклонение (СКО) фазы корреляционного отклика определяется отношением сигнал/шум (SNR) в рабочем диапазоне частот:

$$\sigma_{\phi} = 1/\text{SNR}.$$

SNR зависит от плотности потока излучения радиоисточника  $S$  и параметров радиointерферометра:  $SEFD$  — эквивалентной плотности потока шума системы [5],  $B_e$  — эффективной полосы частот,  $T$  — интервала времени когерентного накопления,  $\eta$  — коэффициента потерь в системе.

$$\text{SNR} = \eta S \sqrt{2B_e T} / SEFD.$$

СКО групповой задержки прихода сигналов между опорными точками радиотелескопов вычисляется с помощью следующих соотношений:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{\phi} / 2\pi B_e, B_e = B\sqrt{12},$$

где  $B$  — верхняя частота равномерно распределенной полосы наблюдения.

СКО скорости изменения задержки определяется как СКО частоты интерференции, отнесенной к средней частоте диапазона наблюдения  $f$ :

$$\sigma'_{\tau} = \sqrt{12} / \text{SNR}\tau f,$$

где  $\tau$  — интервал времени измерения.

Сравнение теоретических и реальных значений погрешностей групповых задержек и скоростей их изменения показывает достоверность теоретических оценок (таблица).

При расчете реальных значений использовались данные РСДБ-наблюдений, полученные за период 4.11.2015–30.04.2015 с помощью коррелятора RASFX ИПА РАН [6] по часовым сессиям с сеансами наблюдений длительностью 22...50 с в полосе частот 512 МГц в X-диапазоне.

Т а б л и ц а

Сравнение теоретических и реальных значений погрешностей задержек и скоростей их изменения для РСДБ-системы нового поколения

Источник	S, Ян	Количество наблюдений источника	Среднее время наблюдения, с	СКО задержки, нс		СКО скорости изменения задержки, пс/с	
				среднее по ngs-файлам	рассчитанное теоретически	среднее по ngs-файлам	рассчитанное теоретически
3С371	0.58	361	25	0.022	0.02	0.31	0.32
3С418	1.33	844	25	0.008	0.009	0.1	0.14
0836+710	0.49	1068	25	0.025	0.024	0.34	0.37
0833+585	0.69	827	18	0.025	0.02	0.41	0.43
0059+581	3.43	1234	17	0.004	0.004	0.13	0.1
0718+793	0.72	315	24	0.018	0.017	0.21	0.27
0917+449	0.95	189	25	0.011	0.012	0.17	0.19
0014+813	0.77	625	17	0.018	0.019	0.42	0.43
0917+624	0.69	577	17	0.027	0.02	0.53	0.47

Теоретически оцениваемая среднеквадратическая погрешность групповой задержки между опорными точками радиотелескопов составляет от 4 пс до 27 пс в зависимости от яркости наблюдаемого источника.

В результате вторичной обработки РСДБ-наблюдений с помощью пакета QUASAR [7] был оценен ряд параметров, одними из которых являлись поправки к ШВ обсерваторий «Бадары» и «Зеленчукская» комплекса «Квазар-КВО». Формальная ошибка поправок к ШВ составила примерно 10 пс.

### **Эксперимент по сличению ШВ на радиоинтерферометре нового поколения**

С 2016 г. проводятся сличения ШВ и частоты с использованием новых РСДБ-станций в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская» и специализированных ГНСС-приемников GTR51 с калибровкой трактов передачи сигналов

времени. Получены результаты взаимного сравнения ШВ обсерваторий на более чем годовом интервале по кодовым измерениям GTR51 и по часовым РСДБ-наблюдениям, проводимым 3–4 раза в сутки.

С целью контроля достоверности результатов сличений методом РСДБ ШВ обсерватории «Бадары» была принудительно сдвинута между сеансами РСДБ-наблюдений (рис. 1). Зафиксированное методом РСДБ смещение шкалы в 2 нс (пунктирная черная линия с ромбовидными маркерами — результаты сравнения ШВ обсерваторий методом РСДБ, сплошная черная линия с круглыми маркерами — они же за вычетом линейного тренда) подтверждается показаниями фазового компаратора VCH-315 обсерватории «Бадары» (жирная серая линия) и хорошо согласуются с данными кодовых измерений GTR-51 (тонкая серая линия с крестообразными маркерами — данные сеансных сравнений, усредненные за час).



Рис.1. Результаты сравнения шкал времени при сдвиге фазы опорного сигнала в одной обсерватории

## Калибровка задержек в тракте передачи ШВ в РСДБ

По результатам вторичной обработки РСДБ-наблюдений с помощью пакета QUASAR оценивается разность ШВ, измеряемая в опорных точках радиотелескопов (точка А — точка пересечения азимутальной и угломестной осей радиотелескопа). Для вычисления разности ШВ обсерваторий с учетом инструментальных задержек необходимо выполнить абсолютную калибровку тракта передачи сигнала ШВ от стандарта времени и частоты до точки А. Задержка в тракте передачи сигнала ШВ до точки А определяется задержкой в широкополосной системе преобразования сигналов (ШСПС) при формировании импульсного сигнала 1 Гц для синхронизации РСДБ-наблюдений и изменяющейся задержкой в магистральных кабелях при передаче сигнала 1 Гц на РТ-13.

Разработанная в ИПА РАН аппаратура позволяет измерять разность фаз сигналов 1 Гц ШСПС и 1 Гц ШВ, а также проводить постоянный контроль задержек в тракте передачи ШВ на радиотелескоп. По результатам мониторинга задержек в тракте передачи ШВ на радиотелескопы РТ-13 и обработки данных РСДБ-наблюдений неопределенность типа В ( $U_B$ ) [7], характеризующая систематическую составляющую погрешности измерений при сравнении ШВ, составила не более 0.5 нс. Величина  $U_B$  в этом случае складывается из неопределенности при калибровке задержек в тракте формирования сигнала ШВ, к которой привязываются РСДБ-наблюдения и неопределенности калибровки измерителя интервалов времени.

На рис. 2 представлены графики результатов сравнения ШВ обсерваторий, полученные методом ГНСС и РСДБ с учетом калибровки тракта передачи сигналов времени. Совпадение результатов в пределах точности измерений предложенных методов подтверждают работоспособность предложенного метода РСДБ-сличений. По результатам, полученным из РСДБ- и кодовых ГНСС-наблюдений, следует, что структура флуктуаций ШВ, вызванная случайными блужданиями частоты водородных стандартов, может быть более точно исследована при использовании РСДБ-метода.

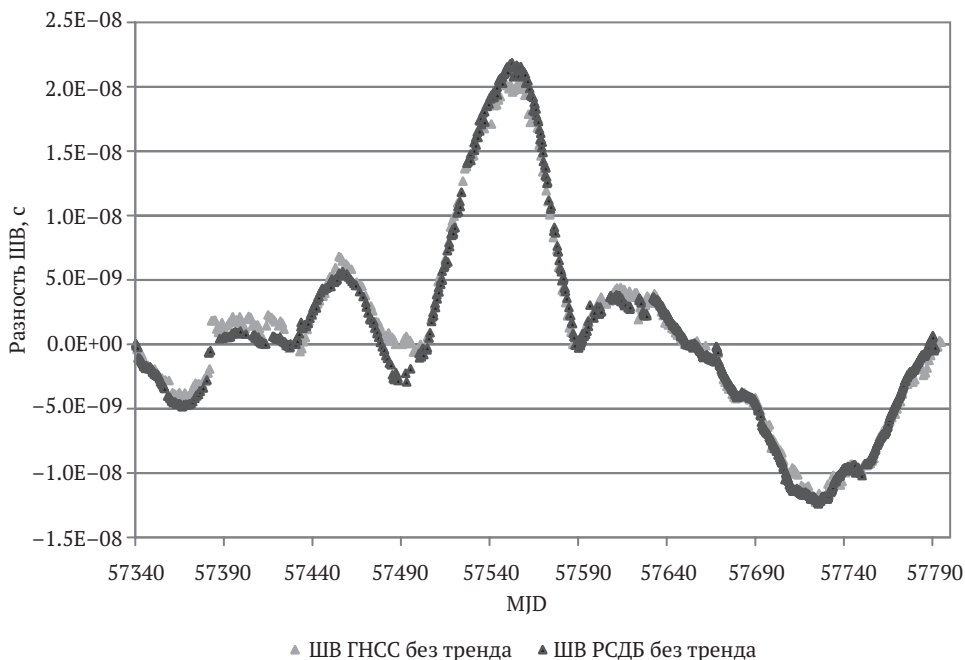


Рис. 2. Результаты сравнения шкал времени обсерваторий РСДБ-комплекса «Квazar-КВО» в период 13.11.2015–07.02.2017 с учетом калибровки задержек в тракте

## Оценка случайной составляющей сличения ШВ и частот методом РСДБ

На рис. 3, 4 представлены оценки девиации временного интервала (TDEV) и нестабильности частоты (модифицированной дисперсии Аллана Mod. ADEV) [8] внутренних и дистанционных сличений водородных стандартов времени и частоты (ВСЧВ), выполненных в 2016–2017 гг. на радиотелескопах РТ-13 и ГНСС-приемниках обсерваторий «Бадары» и «Зеленчукская».

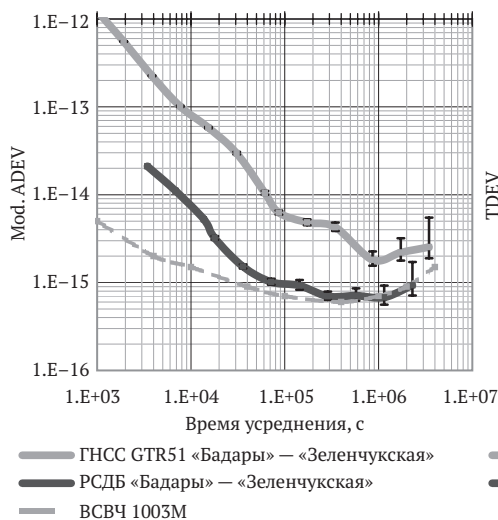


Рис. 3. Частотная нестабильность внутренних и дистанционных сличений ВСЧВ

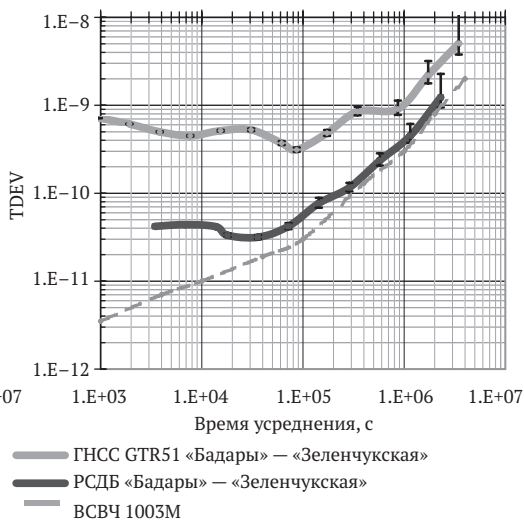


Рис. 4. Временная нестабильность внутренних и дистанционных сличений ВСЧВ

Представленные графики показывают, что при сравнении ШВ методом РСДБ неопределенность  $U_A$ , характеризующая случайную составляющую погрешности измерений [7], составила 40 пс. Значение  $U_A$  получено из оценок TDEV при времени усреднения до 10 ч. Нестабильность частоты при использовании данного метода соответствует  $1 \cdot 10^{-15}$  на интервале усреднения более суток. Эти значения меньше нестабильностей, получаемых с помощью специализированных для передачи времени и частоты ГНСС-приемников в режиме кодовых измерений, и сравнимы с нестабильностью сличаемых ВСЧВ Ч1-1003М [9].

## Заключение

Метод РСДБ позволяет проводить высокоточные сличения шкал времени и эталлонных частот на любых расстояниях вплоть до межконтинентальных.

Полученные в ИПА РАН результаты продемонстрировали возможности метода РСДБ по проведению высокоточных сличений шкал времени и номиналов частот на расстояниях несколько тысяч километров, при этом неопределенность измерений  $U_B$  не превышает 0.5 нс. При сравнении ШВ неопределен-

ность измерений  $U_A$  не превышает 40 пс при интервале времени усреднения до 10 ч. Нестабильность частоты дистанционных сравнений водородных стандартов частоты составляет около  $1 \cdot 10^{-15}$  на интервале усреднения более суток.

В дальнейшем целесообразно провести эксперимент по одновременному сличению ШВ такими методами как двусторонняя передача (TWSTFT) [8], лазерная локация [10] и РСДБ. Использование для сличений методов, основанных на разных физических принципах, позволит повысить достоверность результатов сличений и выявить систематические ошибки применяемых методов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квazar-КВО» и ЦКП «Суперкомпьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрометрии и космической геодезии».

## Л и т е р а т у р а

1. Takiguchi H., Koyama Y., Ichikawa R. T., Gotoh T., Ishii A., Hobiger T., Hosokawa M. VLBI measurements for time and frequency transfer // Proc. of the 24th Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency, 2008: Conference. — 2008. — Vol. 1. — 5 p.

2. Жуков Е. Т., Иванов Д. В., Курдубов С. Л. Сличение удаленных стандартов частоты и времени методом РСДБ // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2012 — Вып. 23. — С. 125–130.

3. Ипатов А. В., Гаязов И. С., Смоленцев С. Г., Варганов М. Е., Иванов Д. В., Шахнабиев И. В., Мардышкин В. В., Федотов Л. В., Кайдановский М. Н., Вытнов А. В., Сальников А. И., Михайлов А. Г. РСДБ-система нового поколения // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 216–222.

4. Царук А. А., Жуков Е. Т., Иванов Д. В., Курдубов С. Л., Суркис И. Ф., Мельников А. Е., Носов Е. В., Безруков И. А., Хвостов Е. Ю. Оценка возможностей сравнения шкал времени и частот с использованием РСДБ-системы нового поколения // Метрология времени и пространства: материалы VIII Международного симпозиума. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. — С. 80–84.

5. Ipatov A., Ipatova I., Mardyshev V., Evstigneev A., Khvostov E., Lavrov A., Chernov V. Tri-band system for the Russian interferometer // IVS 2014 General Meeting Proceedings «VGOS: The New VLBI Network». — P. 118–121.

6. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О., Курдубова Я. Л., Мишин В. Ю., Мишина Н. А., Шантырь В. А. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. — 2018. — Вып. 6. — С. 8–16.

7. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 56 с.

8. Безменов И. В., Блинов И. Ю. Теоретические основы построения моделей для описания современных шкал времени и стандартов частоты: Монография. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». — 2015. — С. 529.

9. ЗАО «Время-Ч» [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.vremya-ch.com/russian/product/indexa42d.html?Razdel=9&Id=43> (дата обращения: 8.07.2019).

10. Игнатенко И. Ю., Тряпцын В. Н., Игнатенко Ю. В. Метод определения разности шкал времени бортовых часов ИСЗ и станции лазерной локации // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 45. — С. 51–56.

# VLBI Time and Frequency Transfer Using the New Generation Radio Interferometer

A. Tsaruk, D. Ivanov, E. Zhykov, A. Karpichev

We have made a longer than a year comparison of the observatories' time and frequency scales using our new generation radio interferometer of the "Quasar" VLBI network. This article describes the method we used and its accuracy characteristics investigated. It shows that the uncertainty figures (which characterise a random component of the error occurring when we measure the differences between the time scales of the Badary and Zelenchukskaya observatories) are less than 40 ps on the averaging interval from 1 to 10 hours. The instability figure (which is obtained when we measure the frequency difference between these time scales) is  $1 \cdot 10^{-15}$  on the averaging interval of more than 24 hours. Moreover, we have received smaller than 0.5 ns uncertainty which characterises the systematic component of the measurement errors occurring when time scales are compared. The distance between this experiment's time scales was 4400 km.

**Keywords:** VLBI, comparison of time scales, comparison of frequencies for remote standards, new generation VLBI system.