

## **Анализ стабильности задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопов РТ-13 по результатам корреляционной обработки РСДБ-наблюдений**

© Ю. В. Векшин, В. О. Кен

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Одной из главных характеристик радиоинтерферометра является точность определения групповой задержки принимаемого сигнала. Стабильность групповой задержки определяется в том числе стабильностью инструментальной задержки сигнала в приемно-регистрирующей аппаратуре.

В статье представлены методика и результаты исследований стабильности задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопов РТ-13 в S-, X- и Ka-диапазонах с помощью корреляционной обработки наблюдений, полученных методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Проведена часовая сессия наблюдений при непрерывном сопровождении космического радиисточника и вычислены разности наблюдаемой и расчетной задержек.

Выполнено сравнение измеренных значений отношения сигнал/шум и среднеквадратического отклонения (СКО) задержки корреляционного отклика с расчетными значениями. Получены зависимости отношения сигнал/шум и СКО Аллана задержки корреляционного отклика от времени усреднения.

**Ключевые слова:** радиоинтерферометр, РСДБ, трехдиапазонная приемная система, программный коррелятор, отношение сигнал/шум, задержка корреляционного отклика, групповая задержка, стабильность задержки.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.51.42-48>

### **Введение**

Главная задача радиоинтерферометра нового поколения [1] на базе радиотелескопов РТ-13 — определение поправок Всемирного времени. Для их определения с СКО не более 20 мкс на базе обсерваторий «Бадары» — «Зеленчукская», «Бадары» — «Светлое» СКО задержки корреляционного отклика зарегистрированных сигналов должно быть не более 20 пс.

Радиотелескопы РТ-13 [2] оснащены трехдиапазонной (S-, X-, Ka-) приемной системой [3], широкополосной цифровой системой преобразования сигналов (ШСПС) с рабочей полосой частот 512 МГц [4], системой частотно-временной синхронизации [5], системой буферизации и передачи данных (СПБД) [6]. Корреляция сигналов с радиотелескопов РТ-13 осуществляется с помощью программного FX-коррелятора РАН [7].

Для определения в лабораторных условиях инструментальных погрешностей приемно-регистрирующей аппаратуры радиотелескопов РТ-13, влияющих на точность определения задержки, в ИПА РАН был создан макет радиоинтерферометра; результаты исследований стабильности задержки на макете приведены в [8–10]. Отклонения СКО задержки корреляционного отклика от расчетных значений для макета радиоинтерферометра с трехдиапазонными приемными системами составили не более 2 пс [8].

В данной работе исследуется стабильность задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопов РТ-13 в процессе реальных РСДБ-наблюдений.

## Методика исследований

Стабильность задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре определяется путем долговременной записи выходных сигналов радиотелескопов при непрерывном сопровождении космического радиоисточника и определением на корреляторе фактических значений задержки корреляционного отклика. Расчет на заданном временном интервале осуществлялся с помощью пакета постпроцессорной корреляционной обработки WOPS [11].

Для оценки инструментальных погрешностей аппаратуры радиотелескопа производилось сравнение расчетных и фактических значений отношения сигнал/шум (SNR, Signal-to-noise ratio) и СКО задержки  $\sigma_\tau$  корреляционного отклика. Отношение сигнал/шум корреляционного отклика рассчитывается по формуле:

$$SNR = 0.88 \cdot \frac{F_{\text{ист}}}{\sqrt{SEFD_1 \cdot SEFD_2}} \cdot \sqrt{2 \Delta f t_H}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{ист}}$  — поток радиоисточника,  $SEFD_i$  — эквивалентная плотность потока мощности радиотелескопа,  $\Delta f$  — полоса принимаемых частот,  $t_H$  — время накопления, 0.88 — коэффициент потерь от двухбитового квантования сигналов.

Ожидаемое значение СКО определения задержки корреляционного отклика  $\sigma_{\text{расч}}$  при полученном SNR рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{\sqrt{12}}{2\pi \Delta f SNR}. \quad (2)$$

Измеряемое СКО задержки корреляционного отклика  $\sigma_\tau$  зависит от расчетного СКО  $\sigma_{\text{расч}}$ , определяемого SNR и СКО задержки  $\sigma_{\text{ан}}$ , обусловленного нестабильностью задержки сигнала в аппаратуре:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\sigma_{\text{расч}}^2 + \sigma_{\text{ан}}^2}. \quad (3)$$

На радиотелескопах РТ-13 РСДБ-комплекса «Квazar-КВО» проведены длительные (до 1 часа) тестовые сеансы с непрерывной регистрацией сигнала в частотных диапазонах S/X/Ka.

РСДБ-сеансы были обработаны коррелятором и вычислены значения SNR и задержки при времени накопления  $t_H = 8$  с. С помощью входящей в состав коррелятора утилиты CreateNGS определены полные геометрические задержки и сформированы файлы формата NGS, которые далее обрабатывались пакетом вторичной обработки Quasar [12]. По результатам вторичной обработ-

ки получены файлы O-C (Observed minus Calculated), содержащие разности наблюдаемой и вычисленной задержек. По этим разностям сделаны оценки нестабильностей задержек сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре станций на внутрис часовых интервалах с устраненным линейным и квадратичным трендами. Эти тренды могут быть вызваны также нелинейностью влажной составляющей тропосферной задержки. Отделить их от нестабильности аппаратуры при наблюдении одного источника возможно, только используя данные радиометра водяного пара и меняющиеся во время наблюдения параметры вращения Земли (например, при использовании результатов проводящихся в то же время РСДБ-сеансов), что сильно усложнило бы задачу.

## Результаты исследований

Обычно длительность регулярных наблюдений на РСДБ-интерферометре составляет один час. Поэтому важно оценить стабильность задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре на этом интервале. Для этого проведен часовой сеанс при непрерывном сопровождении источника OJ287. На рис. 1 представлено изменение задержки корреляционного отклика РСДБ-интерферометра на базе «Бадары»-«Зеленчукская» на часовом интервале в X- и Ka-диапазонах, а в таблице приведены результаты измерений при времени накопления  $t_{\text{н}} = 8$  с.

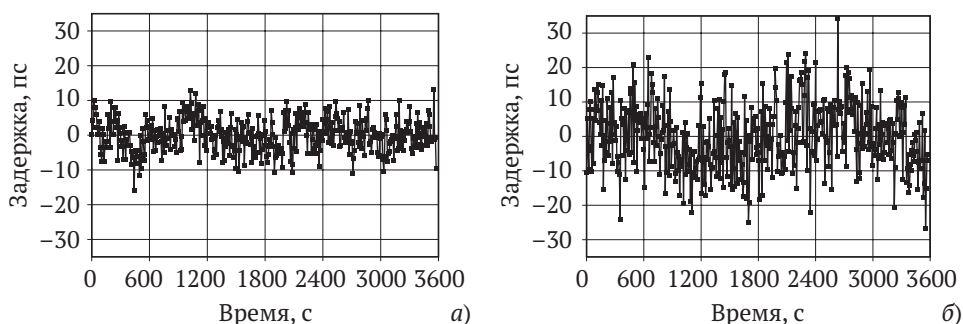


Рис. 1. Графики задержки корреляционного отклика РСДБ-интерферометра от времени при сопровождении источника OJ287 на интервале 1 час при  $t_{\text{н}} = 8$  с: а) в X-диапазоне, б) в Ka-диапазоне

В X- и Ka-диапазонах отклонение SNR от расчетного значения составляет не более 20 %, отклонение задержки составило не более 2 пс. Большее абсолютное значение СКО задержки в Ka-диапазоне обусловлено большим SEFD радиотелескопа по сравнению с X-диапазоном. В соответствии с формулой (3) СКО нестабильности задержки сигналов в аппаратуре в X-диапазоне  $\sigma_{\text{ан}} = 3.3$  пс, в Ka-диапазоне  $\sigma_{\text{ан}} = 5.6$  пс.

Результаты измерений параметров корреляционного отклика РСДБ-интерферометра на часовом интервале при времени накопления  $t_n = 8$  с

Диапазон	Источник	Поток, Ян	SEFD, Ян	SNR		$\sigma_t$ , пс	
				расчет.	измер.	расчет.	измер.
S, 512 МГц (268 МГц)	OJ287	1.09	1150	75 (55)	42 (50)	25.5 (30.0)	46.4 (30.7)
X	OJ287	2.61	730	285	342	3.2	4.6
Ка	OJ287	3.08	1900	129	137	7.9	9.7

В S-диапазоне помехи от сетей мобильной связи влияют на измеряемое отношение сигнал/шум и СКО задержки. Проведена фильтрация помех с помощью пакета постпроцессорной корреляционной обработки WOPS [11]. Вырезаны участки спектра, содержащие помехи: 0–80 МГц, 210–310 МГц, 448–512 МГц, эффективная полоса после фильтрации составила 268 МГц. Для оценки расчетных значений SNR в формулу (1) следует подставлять эффективную полосу шириной 268 МГц, а для оценки СКО задержки в формулу (2) – полосу, равную ширине полосы регистрации за вычетом отфильтрованных краев спектра шириной 144 МГц (итоговая ширина полосы 368 МГц). Несмотря на уменьшение полосы частот после фильтрации значение SNR возросло в 1.2 раза, а СКО задержки уменьшилось в 1.5 раза, при этом значения SNR и СКО задержки стали близки к расчетным (см. таблицу). Завышенное значение СКО задержки в S-диапазоне по сравнению с X- и Ка-диапазонами объясняется тем, что источник OJ287 имеет относительно слабый поток (1.09 Ян).

На рис. 2а представлено отношение сигнал/шум, а на рис. 2б – отклонение Аллана задержки корреляционного отклика РСДБ-интерферометра в зависимости от времени усреднения при сопровождении источника OJ287.

SNR в S-, X-, Ка-диапазонах увеличивается пропорционально корню из времени накопления в соответствии с формулой (1) до времени накопления 1500 с (рис. 2а). При этом отклонение Аллана задержки корреляционного отклика уменьшается как у белого шума пропорционально SNR до времени накопления  $t_n = 50–70$  с в зависимости от диапазона (рис. 2б). После этого времени проявляется фликкер-шум, вызванный нестабильностью задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре. Интервал времени накопления ( $t_n = 50–70$  с) можно считать оптимальным с точки зрения минимизации СКО задержки для данного источника. При усреднении по оптимальному времени накопления устраняется белый шум задержки  $\sigma_{расч}$ , определяемый SNR (формула 2), и остается только СКО задержки  $\sigma_{ан}$ , обусловленное нестабильностью задержки сигнала в аппаратуре. После усреднения определены СКО нестабильности:  $\sigma_{ан} = 11.4$  пс в S-диапазоне,  $\sigma_{ан} = 2.8$  пс в X-диапазоне,  $\sigma_{ан} = 5.4$  пс в Ка-диапазоне, что соответствует значениям, полученным ранее из формулы (3).

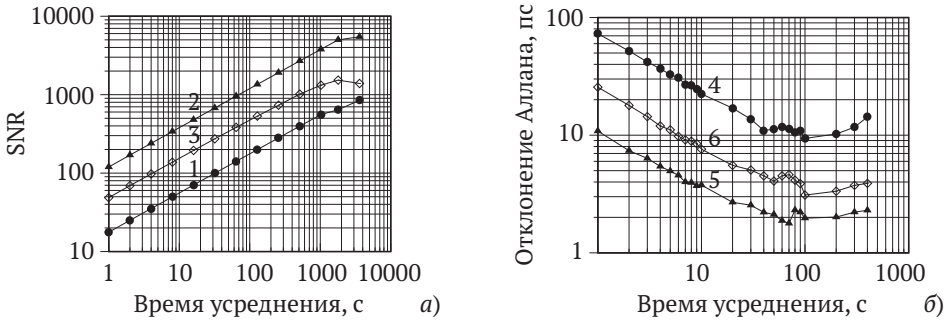


Рис. 2. Отношение сигнал/шум — *a* и отклонение Аллана задержки — *б* корреляционного отклика РСДБ-интерферометра в зависимости от времени усреднения при сопровождении источника OJ287: 1 – SNR в S-диапазоне; 2 – SNR в X-диапазоне; 3 – SNR в Ka-диапазоне; 4 – отклонение Аллана задержки в S-диапазоне; 5 – отклонение Аллана задержки в X-диапазоне; 6 – отклонение Аллана задержки в Ka-диапазоне

При планировании РСДБ-наблюдений время накопления сигнала источника следует выбирать таким образом, чтобы рассчитываемое по формуле (2) СКО задержки корреляционного отклика было не меньше СКО нестабильности сигнала в аппаратуре (2, 3 и 10 пс для диапазонов -X, -Ka, -S соответственно рисунку 2б), поскольку дальнейшее увеличение времени накопления не даст снижения погрешности определения задержки для данного РСДБ-интерферометра.

## Заключение

Исследована стабильность задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопов РТ-13 в процессе РСДБ-наблюдений по результатам их корреляционной обработки. СКО аппаратурной нестабильности задержки составило 11.5 пс в S-диапазоне, 3 пс в X-диапазоне, 5.5 пс в Ka-диапазоне, при этом его вклад в СКО задержки корреляционного отклика для источника OJ287 составил не более 2 пс при времени накопления 8 с на интервале 1 час (при устранении линейного и квадратичного трендов, неотделимых от трендов тропосферы). Нестабильность задержки сигнала в аппаратуре ограничивает интервал накопления корреляционного отклика радиointерферометра, что следует учитывать при планировании РСДБ-наблюдений. В S-диапазоне применение цифровой фильтрации позволило увеличить отношение сигнал/шум и уменьшить СКО задержки, поэтому оно является необходимым при постпроцессорной обработке.

## Благодарности

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

Авторы выражают благодарность Мельникову А. Е., Михайлову А. Г., Маршалову Д. А. за организацию РСДБ-наблюдений, Суркису И. Ф. за обсуждение методики обработки и результатов.

## Литература

1. *Ипатов А. В.* Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. — М.: Наука, 2013. — Т. 183, № 7. — С. 769–777.

2. *Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I., Marshalov D., Melnikov A., Kurdubov S., Vasilyev M., Ilin G., Skurikhina E., Surkis I., Mardyshkin V., Mikhailov A., Salnikov A., Vytnov A., Rakhimov I., Dyakov A., Olifirov V.* Russian VLBI network «Quasar»: Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. — 2018. — Vol. 10., no. 2. — P. 150–156.

3. *Chernov V., Evstigneev A., Evstigneeva O., Ivanov D., Ipatov A., Ipatova I., Khvostov E., Lavrov A., Mardyshkin V., Pozdnyakov I., Vekshin Y., Zotov M.* The S/X/Ka Receiving System for Radio Telescope RT-13 of the «Quasar» VLBI Network // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып. 41. — С. 79–84.

4. *Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В., Федотов Л. В.* Цифровая система преобразования широкополосных сигналов для астрономических радиоинтерферометров // Известия вузов России. Радиоэлектроника. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — № 1. — С. 34–39.

5. *Вытнов А. В., Иванов Д. В., Махнач А. А., Карпичев А. С., Царук А. А.* Система контроля синхронизации радиотелескопов РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 47. — С. 12–22.

6. *Безруков И. А., Сальников А. И., Яковлев В. А., Вылегжанин А. В.* Система буферизации и передачи данных нового поколения // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 32. — С. 3–9.

7. *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. — М.: 2018. — Вып. 6. — С. 8–16.

8. *Векшин Ю. В., Кен В. О., Хвостов Е. Ю., Лавров А. П.* Макет радиоинтерферометра для определения параметров корреляционного отклика приемно-регистрирующей аппаратуры радиотелескопов RT-13 // Радиотехника, 2018. — №12. — С. 21–28.

9. *Векшин Ю. В., Кен В. О., Чернов В. К., Евстигнеев А. А.* Исследования характеристик приемных устройств на радиоинтерферометрическом стенде // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 46. — С. 19–30.

10. *Ken V., Vekshin Y., Chernov V., Evstigneev A., Khvostov E., Zotov M.* Analysis of VLBI interferometer characteristics using zero-baseline lab prototype and RASFX correlator // PoS(EVN2018)142. — 2019. — Vol. 344.

11. *Шантырь В. А., Курдубова Я. Л., Суркис И. Ф.* Программный пакет постпроцессорной обработки РСДБ-наблюдений WOPS // Восьмая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019), 15–19 апреля 2019 г., Санкт-Петербург: тезисы докладов. — СПб.: ИПА РАН, 2019. — С. 194.

12. *Губанов В. С., Курдубов С. Л., Суркис И. Ф.* Новая версия пакета QUASAR для обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2007. — Вып. 16. — С. 61–83.

# Delay Stability Analysis of RT-13 Radio Telescope Receiving and Recording Equipment Based on Correlation Processing of VLBI Observations

Yu. V. Vekshin, V. O. Ken

One of the main radio interferometer characteristics is the accuracy of determining the received signal group delay. The group delay variation is likely to be influenced to a great extent by the instrumental delay stability of the receiving and recording equipment.

The paper presents measurement techniques and the results of radio telescope RT13 receiving and recording equipment delay stability in S-, X-, Ka-bands based on correlation processing of VLBI observations. A 1-hour VLBI session was carried out with cosmic radio source continuous tracking. The observed and calculated delay differences were computed with Quasar software.

Signal-to-noise ratio and group delay standard deviation were measured and compared with the calculated ones. The dependences of signal-to-noise ratio and delay Allan deviation on averaging time are obtained.

**Keywords:** radio interferometer, VLBI, tri-band receiver, software correlator, signal-to-noise ratio, fringe delay, group delay, delay stability, RASFX.