

Влияние нестабильности задержки сигналов в аппаратуре радиотелескопов на оптимальное время накопления сигнала радиointерферометра

© Ю. В. Векшин, В. О. Кен, С. М. Миронова, С. Л. Курдубов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Точность определения поправок всемирного времени в значительной степени определяется точностью измерения задержки прихода сигнала источника на радиотелескопы, входящие в состав радиointерферометра. Погрешность измерения групповой задержки зависит, в том числе, от нестабильности задержки сигналов в аппаратуре радиотелескопов. Результаты оценки нестабильности задержки следует использовать при планировании времени наблюдения источников в сеансах РСДБ.

Целью работы является создание методики определения оптимального времени накопления сигнала радиointерферометра и её применение при обработке сеансов по определению поправок всемирного времени.

Стабильность задержки корреляционного отклика радиointерферометра анализируется по записи непрерывного часового сопровождения источника. С помощью расчета отклонения Аллана определяется оптимальное время накопления сигнала, при котором достигается минимальная погрешность определения задержки. Оптимальное время накопления сигнала конкретного источника определяется таким образом, чтобы расчетное СКО задержки было не меньше отклонения аппаратурной нестабильности.

В статье представлены результаты измерений стабильности задержки корреляционного отклика радиointерферометра на базе радиотелескопов РТ-13 в *S*-, *X*-, *Ka*-диапазонах. Приведены результаты сравнения оценок погрешности определения поправок всемирного времени со штатным и с предложенным оптимальным временем накопления сигналов источников.

Ключевые слова: радиointерферометр, РСДБ, трехдиапазонная приемная система, *FX*-коррелятор, отношение сигнал-шум, задержка корреляционного отклика, групповая задержка, стабильность задержки, всемирное время.

Контакты для связи: Векшин Юрий Вячеславович (yv.vekshin@iaaras.ru).

Для цитирования: Векшин Ю. В., Кен В. О., Миронова С. М., Курдубов С. Л. Влияние нестабильности задержки сигналов в аппаратуре радиотелескопов на оптимальное время накопления сигнала радиointерферометра // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 21–26.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.60.21-26>

Influence of Signal Delay Instability in Radio Telescope Equipment on Optimal Accumulation Time of Radio Interferometer Signal

Y. V. Vekshin, V. O. Ken, S. M. Mironova, S. L. Kurdubov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Accuracy of the Universal Time determination is to a great extent dependent on measurement accuracy of a signal propagation delay difference from a cosmic source to radio telescopes, that are part of the radio interferometer. Measurement error of a group delay depends on the signal delay instability in the radio telescope equipment. Evaluations of delay instability should be used when planning source observation time in VLBI sessions.

The aim of the work is to create a technique for determining an optimal accumulation time of a radio interferometer signal and to apply this technique while processing the Universal Time determination sessions.

The correlation response delay stability is analyzed from a record of continuous 1-hour source tracking. The optimal signal accumulation time (which helps to achieve the minimum error of delay measuring) is determined by calculating Allan deviation. The optimal accumulation time of the source signal is determined in such a way that the RMS delay calculated is not less than the equipment instability deviation.

The article presents the results of the delay stability measurement of the radio interferometer correlation response based on RT-13 radio telescopes in the *S*-, *X*-, *Ka*-bands. The comparison of the Universal Time determination and its errors with the current and proposed optimal accumulation time of the source signal are also presented.

Keywords: radio interferometer, very long baseline interferometry, tri-band receiver, *FX*-correlator, signal-to-noise ratio, fringe delay, group delay, delay stability, Universal Time.

Contacts: Yuriy V. Vekshin (yv.vekshin@iaaras.ru).

For citation: Vekshin Y. V., Ken V. O., Mironova S. M., Kurdubov S. L. Influence of signal delay instability in radio telescope equipment on optimal accumulation time of radio interferometer signal // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 60. P. 21–26.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.60.21-26>

Введение

Точность определения поправок всемирного времени в значительной степени определяется точностью измерения задержки прихода сигнала источника на радиотелескопы, входящие в состав радиоинтерферометра (Губанов, 1983). Погрешность измерения групповой задержки зависит, в том числе, от нестабильности задержки сигналов в аппаратуре радиотелескопов. Результаты оценки нестабильности задержки следует использовать при планировании времени наблюдения источников в сеансах РСДБ.

Целью работы является создание методики определения оптимального времени накопления сигнала радиоинтерферометра для минимизации погрешности определения групповой задержки и применение методики при обработке сеансов по определению поправок всемирного времени на радиотелескопах РТ-13 комплекса «Квazar-КВО» (Shuygina, 2019).

Часовой сеанс

Для измерения нестабильности задержки сигналов в аппаратуре радиотелескопов РТ-13 проведен часовой непрерывный сеанс сопровождения источника 3C454.3 в *S*-, *X*-, *Ka*-диапазонах. На корреляторе RASFX (Суржис, 2018) рассчитывались отношение сигнал-шум (SNR) и задержка корреляционного отклика по методике, описанной в одной из предыдущих работ (Векшин, 2019). Были вычислены полные геометрические задержки, учтены задержки в ионосфере и сформированы файлы формата NGS, которые далее обрабатывались пакетом Quasar (Губанов, 2007). По результатам вторичной обработки получены файлы *O-C* (Observed minus Calculated), содержащие разности наблюдаемой и вычисленной задержек. Полученные

результаты сопоставлялись с расчетными значениями. Расчетные значения SNR и СКО задержки корреляционного отклика $\sigma_{t\text{SNR}}$ определяются по формулам (Томпсон, 2003):

$$\text{SNR} = 0.88 \cdot \frac{F_s}{\sqrt{\text{SEFD}_1 \cdot \text{SEFD}_2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta f \cdot \tau}, \quad (1)$$

где F_s — поток радиоисточника, SEFD_i — эквивалентная плотность потока радиотелескопа, Δf — ширина полосы частот, τ — время накопления.

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

Реальная погрешность определения задержки σ_t зависит от нестабильности задержки сигнала в аппаратуре радиотелескопов $\sigma_{t\text{ап}}$:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{t\text{SNR}}^2 + \sigma_{t\text{ап}}^2}. \quad (3)$$

По часовому сеансу наблюдения источника 3C454.3 получены SNR и задержка корреляционного отклика с временем накопления $\tau = 1$ с (3600 точек) в *S*-диапазоне (2.2–2.6 ГГц), в *X*-диапазоне (8.6–9.1 ГГц) и *Ka*-диапазоне (28.5–29 ГГц). Приведем результаты для базы «Бадарь» – «Зеленчукская». SNR при времени накопления $\tau = 8$ с составило в *S*-диапазоне 342, в *X*-диапазоне — 314, в *Ka*-диапазоне — 55. На рис. 1 представлены графики изменения задержки во времени в *X*- и *Ka*-диапазонах при времени накопления $\tau = 8$ с. СКО задержки на часовом интервале в *X*-диапазоне при $\tau = 8$ с составило 7.4 пс (расчетное по формуле (2) значение составляет 3.4 пс), в *Ka*-диапазоне — 22.8 пс (расчетное значение 19.5 пс). Шумовая составляющая задержки в *Ka*-диапазоне больше за счет меньшего SNR в соответствии с формулой (2).

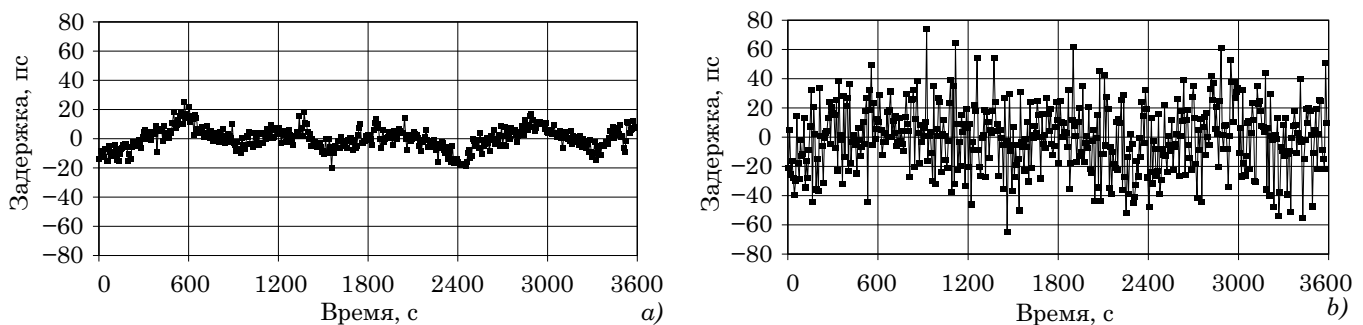


Рис. 1. Графики задержки корреляционного отклика от времени на часовом сеансе сопровождения источника 3C454.3 при времени накопления $\tau = 8$ с: а) в *X*-диапазоне, б) в *Ka*-диапазоне

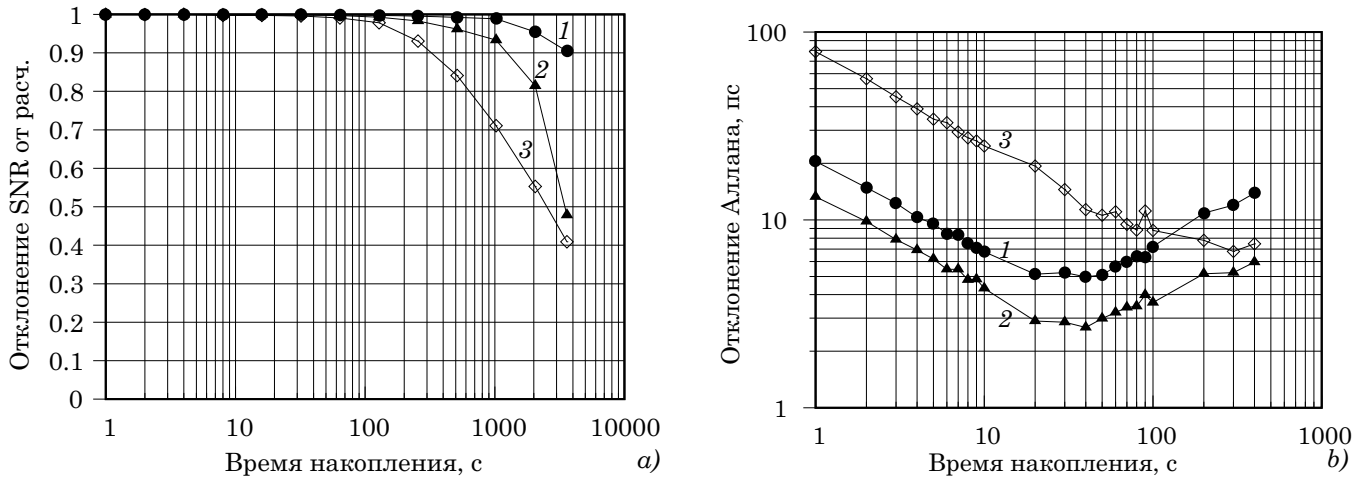


Рис. 2. Отклонение отношения сигнал-шум от расчетного (а) и отклонение Аллана задержки (б) корреляционного отклика на часовом сеансе сопровождения источника 3С454.3: 1 — в *S*-диапазоне, 2 — в *X*-диапазоне, 3 — в *Ka*-диапазоне

Для оценки когерентности РСДБ-интерферометра рассчитано отклонение SNR от расчетного в зависимости от времени накопления (относительно значения при $\tau = 1$ с) в *S*-, *X*-, *Ka*-диапазонах (рис. 2а). Снижение SNR на 10 % от расчетного достигается в *S*-диапазоне при $\tau = 3600$ с, в *X*-диапазоне при $\tau = 1400$ с, в *Ka*-диапазоне при $\tau = 330$ с. Заметим, что время когерентности определяется (Томпсон, 2003) как время, при котором снижение SNR составляет 50 %, однако авторы сознательно усилили этот критерий.

Для оценки стабильности задержки корреляционного отклика рассчитано отклонение Аллана от времени усреднения (рис. 2б). Отклонение Аллана уменьшается обратно пропорционально SNR (по формуле (2)) до времени накопления 20 с в *S*- и *X*-диапазонах и до 200 с в *Ka*-диапазоне. Это время можно назвать оптимальным временем накопления сигнала данного источника, при котором достигается минимальное значение отклонения Аллана задержки — 5 пс в *S*-диапазоне (график 1), 3 пс в *X*-диапазоне (график 2) и 7 пс в *Ka*-диапазоне (график 3), на более длительных временах проявляется нестабильность задержки. В *Ka*-диапазоне изначально больше белый шум задержки (рис. 1б), поэтому время накопления τ до достижения нестабильности дольше.

При планировании РСДБ-наблюдений время накопления сигнала источника τ авторы предлагают выбирать таким образом, чтобы рассчитываемое по формуле (2) СКО задержки корреляционного отклика $\sigma_{\tau, \text{SNR}}$ было не меньше указанного СКО нестабильности сигнала $\sigma_{\tau, \text{ап}}$, поскольку дальнейшее увеличение времени накопления даст не

снижение, а увеличение погрешности определения задержки для данного РСДБ-интерферометра.

Для оценки влияния состояния ионосферы и тропосферы на найденные величины нестабильности задержки и оптимальные времена накопления дополнительно проведена серия измерений с источником 4С39.25 при разной погоде на базе «Бадарь» — «Зеленчукская» («*Bv* — *Zv*»). Первый сеанс: ночь, *Bv* — ясно, *Zv* — ясно; второй сеанс: день, Солнце, *Bv* — малооблачно, *Zv* — ясно; 3 сеанс: ночь, *Bv* — снег, *Zv* — ясно. Результаты для *X*- и *Ka*-диапазонов представлены на рис. 3. В *X*-диапазоне (рис. 3а) отклонение Аллана задержки корреляционного отклика для трех сеансов почти не изменилось — минимальная нестабильность составила 3 пс, оптимальное время накопления для источника 4С39.25 составило 30 с. В *Ka*-диапазоне (рис. 3б) при плохой погоде (*Bv* — снег) видно незначительное ухудшение стабильности задержки, величина нестабильности составила 15–30 пс, оптимальное время накопления — около 100 с. Для получения более точных результатов в *Ka*-диапазоне следует провести измерения с источником, имеющим большой поток.

Предлагаемый метод определения оптимального времени накопления сигнала был проверен на регулярных сеансах «*R-X*», в которых ведутся наблюдения в диапазонах *S*-, *X*-, *Ka*- с временем накопления $\tau = 120$ с. Для сеанса gx-1620 измерены значения SNR на базе «Бадарь» — «Зеленчукская» и рассчитаны теоретические значения СКО задержки $\sigma_{\tau, \text{SNR}}$ по формуле (2), см. табл. 1, и они сопоставлены с найденными величинами нестабильности задержки.

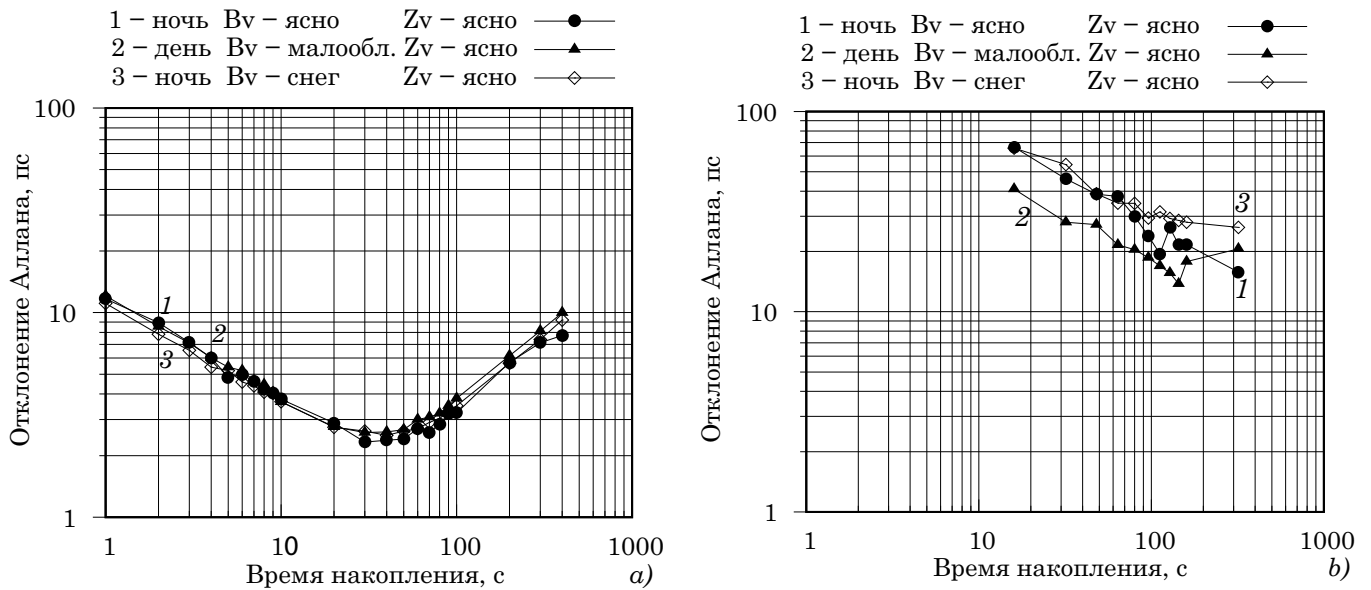


Рис. 3. Влияние погоды на стабильность задержки корреляционного отклика на базе «Бадарь» — «Зеленчукская»: по источнику 4C39.25: а) — в X-диапазоне, б) — в Ka-диапазоне

Таблица 1

Результаты измерений SNR и расчета СКО задержки корреляционного отклика по сеансу gx-1620

	SNR (измер.)			σ , пс (расчет)		
	S	X	Ka	S	X	Ka
1717+178	136	184	33	7.9	5.8	32.4
0642+449	122	198	41	8.8	5.4	26.3
1156+295	61	628	260	17.7	1.7	4.1
1642+690	122	165	18	8.8	6.5	61.0
1546+027	363	861	98	3.0	1.3	11.0
NRAO150	93	644	185	11.6	1.7	5.8
OK290	62	211	35	17.4	5.1	30.3
0716+714	85	201	36	12.6	5.4	29.8
0805+410	58	244	21	18.5	4.4	51.1

Для источников 1156 + 295 (наблюдается 2 раза за сеанс), 1546+027 (6 раз), NRAO150 (2 раза) расчетное СКО задержки в X-диапазоне меньше СКО нестабильности аппаратуры $\sigma_{\text{тап}} = 3$ пс, и, соответственно, не достигается на практике. Поэтому имеет смысл сократить время накопления этих источников и оценить при этом погрешность определения поправок всемирного времени.

Двухмесячная серия наблюдений

За период с 27 августа по 27 октября 2021 г. были переобработаны сеансы «R-X» с разбиванием исходных (120 с) сканов на отрезки с временем

накопления по 60, 30, 15 и 8 с для выбранных источников. В пакете «Quasar» были получены поправки к всемирному времени относительно международного ряда IERS finals и их случайные погрешности в результате обработки сочетаний диапазонов «X-S» и «Ka-X», где второй диапазон используется для исключения ионосферной задержки. В табл. 2 для разных времен накопления приведены СКО ряда поправок всемирного времени и средние за месяц случайные погрешности их определения (СКО невязок решения системы уравнений методом наименьших квадратов).

СКО ряда поправок всемирного времени
и средняя за месяц случайная погрешность их определения на сеансах «R-X»

Время накопления τ , с	«X-S»		«Ka-X»	
	СКО (UT1-UTC)	Средн. погрешность	СКО (UT1-UTC)	Средн. погрешность
120	36.6	13.0	27.2	11.0
60	35.1	10.6	27.4	9.5
30	34.5	8.1	27.3	8.0
15	33.7	5.9	27.4	6.8
8	32.4	4.6	27.7	6.1

При уменьшении времени накопления со 120 с до 8 с для сочетания диапазонов «X/S» СКО ряда уменьшилось на 4 мкс, а случайная погрешность — на 8 мкс за счет исключения влияния неустойчивости при длительных временах накопления (рис. 2b). В сочетании диапазонов «Ka/X» случайная погрешность уменьшилась на 5 мкс, а СКО ряда поправок всемирного времени не изменилось, поскольку в Ka-диапазоне за счет меньшего потока источников белый шум преобладает всем

диапазоне выбранных времен накопления от 8 с до 120 с (рис. 2b). Ряды поправок всемирного времени и случайные погрешности их определения при времени накопления 120 с и 8 с представлены на рис. 4 и 5, по оси X отложена модифицированная юлианская дата (MJD). На рис. 5 очевидно снижение случайной погрешности определения поправок всемирного времени при времени накопления 8 с как в сочетании «X/S», так и в сочетании «Ka/X».

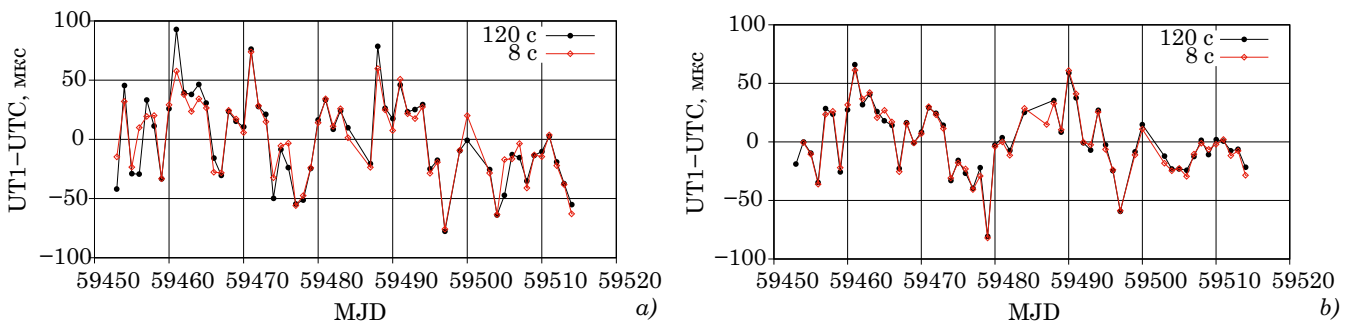


Рис. 4. Ряды поправок всемирного времени при разном времени накопления сигнала: а) в сочетании диапазонов X/S, б) в сочетании диапазонов Ka/X

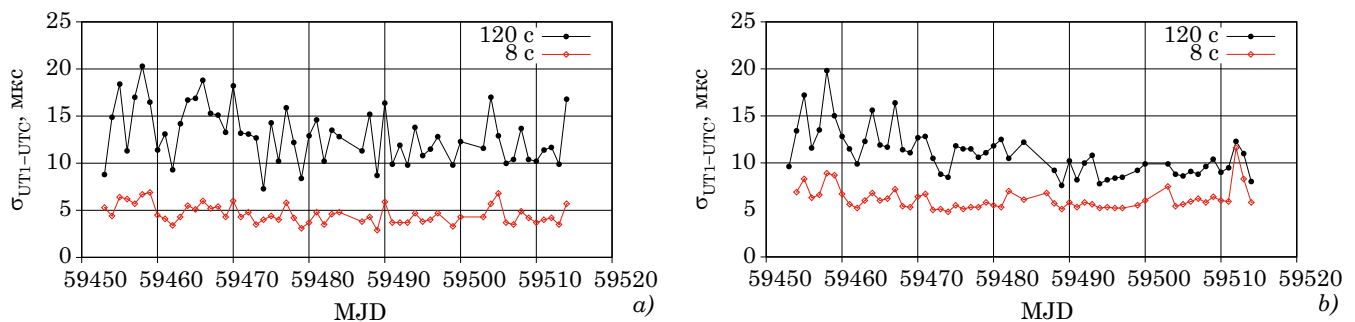


Рис. 5. Случайная погрешность определения поправок всемирного времени: а) в сочетании диапазонов X/S, б) в сочетании диапазонов Ka/X

Заключение

При планировании наблюдений кроме отношения сигнал-шум следует учитывать нестабильность задержки сигналов в аппаратуре радиотелескопов. Для определения нестабильности задержки сигнала радиоинтерферометра следует проводить длительные (часовые) непрерывные наблюдения источника и рассчитывать отклонение Аллана задержки. Сокращение времени накопления сигнала некоторых источников (разбиение сканов на несколько коротких) таким образом, чтобы расчетное СКО задержки было не меньше СКО нестабильности, позволило уменьшить погрешность определения поправок всемирного времени. При изменении планирования это позволит наблюдать больше источников за сеанс, что должно привести к еще большему уменьшению погрешности определения поправок всемирного времени.

Благодарность

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

Авторы выражают благодарность А. Е. Мельникову за организацию РСДБ-наблюдений и И. Ф. Суркису за обсуждение результатов исследований.

Литература

Векшин Ю. В., Кен В. О. Анализ стабильности задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопов РТ-13 по результатам корреляционной обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 51. С. 42–48.

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

Губанов В. С., Финкельштейн А. М., Фридман П. А. Введение в радиоастрометрию. М.: Наука, 1983. 280 с.

Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. Вып. 6. С. 8–16.

Томпсон А. Р., Моран Д. М., Свенсон Д. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии // Перевод с англ. под ред. Л. И. Матвеевко. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 624 с.

Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., et al. Russian VLBI network “Quasar”: Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2018. Vol. 10, no. 2. P. 150–156.