

Программное обеспечение для анализа стабильности сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопа по результатам обработки сигналов фазовой калибровки

© М. С. Зорин, В. О. Кен

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Цель работы — создание ПО для анализа стабильности сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопа по результатам обработки сигналов фазовой калибровки (СФК). ПО разработано на языке Python 2.7 с использованием библиотек «NumPy» и «Matplotlib» для вычисления по выходным данным программных корреляторов DiFX и RASFX инструментальных задержек, возникающих в сигнале при прохождении приемно-регистрирующего тракта.

В работе использованы аналитические методы исследования, методы императивного программирования на языке Python, а также аппарат математического анализа и математической статистики.

Разработанное ПО может применяться для контроля стабильности задержки СФК при проведении РСДБ-сеансов на длительных временных интервалах. В частности, ПО использовалось для отслеживания стабильности задержки СФК в течение получасового сеанса наблюдения Ru0804, проведенного на РСДБ-сети «Квазар-КВО» 20 сентября 2019 г. В статье также описаны математические алгоритмы и реализованный функционал.

Ключевые слова: сигнал фазовой калибровки, групповая задержка, DiFX, RASFX, стабильность задержки.

Контакты для связи: Зорин Михаил Сергеевич (ms.zorin@iaaras.ru).

Статья поступила в редакцию 04.02.2020, принята к публикации 20.03.2020, опубликована 01.10.2020.

Для цитирования: Зорин М. С., Кен В. О. Программное обеспечение для анализа стабильности сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопа по результатам обработки сигналов фазовой калибровки // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. С. 3–8.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.3-8>

Software for Stability Analysis of Signals in the Receiving and Recording Equipment of a Radio Telescope Based on the Results of Phase Calibration Signal Processing

M. S. Zorin, V. O. Ken

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

In the majority of radio telescopes which are used for very long baseline interferometry (VLBI), a special signal is injected into a receiver for the phase calibration of the equipment. In order to control the stability of the receiving system, we have elaborated post-processing software for analysis of delay stability of the receiving and recording equipment based on phase calibration data computed by RASFX and DiFX correlators. The software was developed with Python 2.7 and “NumPy” and “Matplotlib” libraries to calculate an instrumental delays, and allows to determine phase calibration signal (PCal) delays with subpicosecond accuracy and to visualize frequency responses of the receiver.

The authors used an analytical research methods, methods of imperative programming in Python, as well as mathematical analysis and mathematical statistics. The algorithms and mathematical methods are presented. The plots used for graphical analysis are presented as well.

This software may be used for PCal delay stability monitoring in VLBI sessions with long-time intervals in order to control the stability of receiving equipment. In particular, we used the software for the analysis of 30-min Ru0804 session which was carried out on September 20, 2019 on Quasar VLBI network. PCal delay fluctuations do not exceed the formal error value at the Badary radio astronomical observatory. There is a periodic dependence of PCal delay with a 30 ps swing at the Zelenchukskaya observatory, that might be caused by a heterodyne frequency setting error in the receiving system. The paper also describes the mathematical algorithms and implemented features, such as receiver frequency responses visualization and calculation of mean-square deviation of the frequency tones phases.

Keywords: phase calibration signal, group delay, DiFX, RASFX, delay stability.

Contacts: Michael Zorin (ms.zorin@iaaras.ru).

Received February 4, 2020, accepted March 3, 2020, published October 1, 2020.

For citation: Zorin M. S., Ken V. O. Software for stability analysis of signals in the receiving and recording equipment of a radio telescope based on the results of phase calibration signal processing // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 53. P. 3–8.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.3-8>

Введение

СФК — это последовательность коротких импульсов, создаваемая генератором пикосекундных импульсов из сигнала опорной частоты, поступающего от водородного стандарта. В частотной области СФК представляет собой набор гармонических составляющих, расположенных с постоянным шагом Δf , определяемым периодом следования импульсов T : $\Delta f = \frac{1}{T}$. В настоящее время в ИПА РАН используется СФК с периодом 1 мкс (шаг расстановки тонов 1 МГц) [1], но также возможно использование СФК с периодом 200 нс. СФК вводится в сигнальный тракт радиотелескопа через направленный ответвитель на входе малошумящих усилителей, где смешивается с сигналом от наблюдаемого радиоисточника и шумами системы и проходит через все те же каскады приемно-регистрирующей аппаратуры, что и принимаемый сигнал. В результате прохождения сигнала в СФК возникает задержка, по изменению которой в течение сеанса наблюдения можно судить об общей стабильности тракта. Однако СФК является помехой для сигнала от наблюдаемого радиоисточника, ухудшая отношение сигнал/шум, поэтому мощность СФК должна быть существенно меньше мощности шумов системы. На практике мощность СФК обычно устанавливается на уровне не более 1 % от мощности шумов системы, т. е. в регистрируемом сигнале СФК оказывается скрыт под шумами [2]. Выделение СФК, как правило, осуществляется программными корреляторами, но также, например, реализовано и в широкополосной системе преобразования сигналов [3]. Выходные файлы программных корреляторов DiFX [4] и RASFX [5] содержат выделенные комплексные отсчеты СФК в частотной

области. Под выделенными отсчетами здесь понимаются значения спектра сигнала на выходе коррелятора, соответствующие дискретным значениям частоты. Каждый отсчет представляет собой комплексное число. Авторами разработано ПО на языке Python 2.7 для чтения этих файлов, вычисления задержек СФК с субпикосекундной точностью, анализа характеристик и визуализации результатов. Предусмотрены возможности работы с СФК с периодами 1 мкс и 200 нс.

Стабильность групповой задержки СФК

Под групповой задержкой СФК авторы подразумевают положение максимума произвольного импульса относительно начала периода следования. Само по себе значение групповой задержки не имеет практического применения, однако по ее дисперсии в течение сеанса наблюдения можно судить о стабильности тракта. Для получения СФК во временной области в разработанном ПО реализована процедура обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) от выделенных отсчетов СФК в частотной области с последующим вычислением модулей (абсолютных величин) получаемых комплексных отсчетов. Набор модулей комплексных отсчетов импульса представляет собой модуль импульса. На рис. 1 приведен модуль импульса СФК, усредненного на периоде 1 с и выделенного из скана наблюдения Ru0804, проведенного в обсерватории «Бадары» в частотном диапазоне X (7477.6 МГц) на радиотелескопе РТ-13 20 сентября 2019 г. Период следования импульса составляет 1 мкс, ширина полосы пропускания 512 МГц. Выделение СФК произведено программным коррелятором RASFX. Задержка τ_{psal} на рис. 1 показана графически.

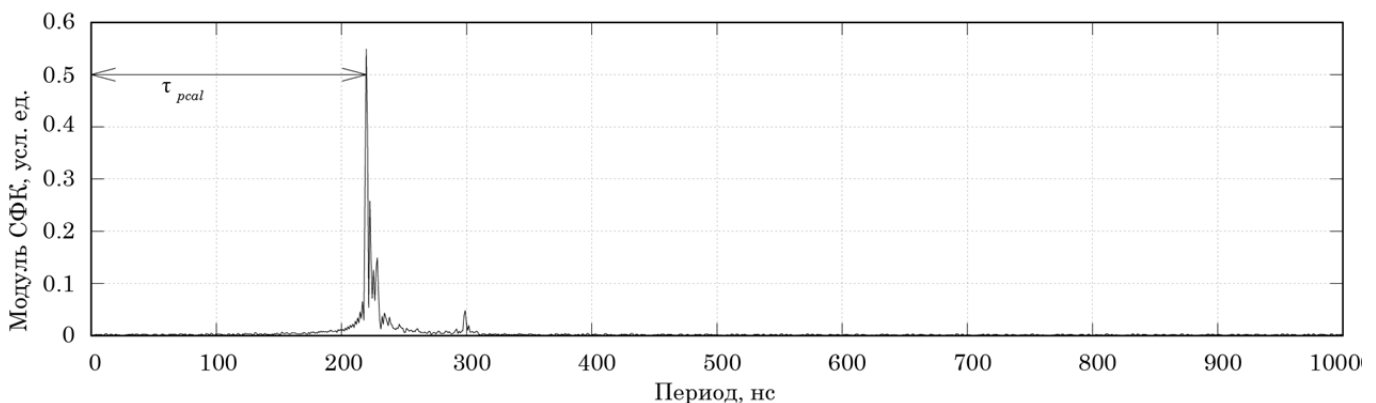


Рис. 1. Модуль импульса СФК и определение задержки: Ru0804, РТ-13, «Бадары», частотный диапазон X

При отсутствии дестабилизирующих факторов, таких как изменение температуры, воздействие на кабель или неисправность аппаратуры, флуктуации задержки определяются только нестабильностью сигнального тракта. В РСДБ-наблюдениях учет нестабильности задержки СФК на каждом радиотелескопе и разность этих задержек на наблюдаемой базе может использоваться для анализа качества работы аппаратуры с более высокой точностью, чем по задержке, вычисляемой в процессе корреляционной обработки.

Вычисление групповой задержки СФК

Дискретное определение задержки при частоте импульса F_{pscal} (МГц) и ширине полосы пропускания B (МГц) может быть произведено с точностью до отсчета $\frac{F_{pscal}}{2B}$. При периоде импульса 1 мкс и ширине полосы пропускания 512 МГц вычисление задержки определяется с точностью до

$$1 \text{ мкс} \cdot \frac{F_{pscal}}{2B} \approx 1 \text{ нс.}$$

Возникающая при этом ошибка проиллюстрирована на рис. 2. В первом случае (рис. 2а) максимум автокорреляционной функции импульса СФК $C(\tau_{pscal})$ соответствует отсчету, следовательно, вычисление по нему задержки будет осуществлено точно. Во втором случае (рис. 2б) максимум находится в области между отсчетами, и при определении задержки произойдет ошибка, не превышающая половину дискрета. При этом, исходя из оценки формальной ошибки и отношения сигнал/шум СФК на выходе коррелятора порядка 1500, вычисление задержки может быть выполнено с субпикосекундной точностью. Оценка производилась по формуле вычисления формальной ошибки определения корреляционного отклика [6]:

$$\sigma_\tau = \frac{\sqrt{12}}{2\pi B \cdot SNR},$$

где SNR — отношение сигнал/шум после выделения СФК коррелятором, для вычисления которого используется эмпирически выведенная формула

$$SNR = \frac{A - m}{\sigma} \cdot \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}},$$

где A — амплитуда импульса СФК, m — средний уровень шумовой дорожки, σ — СКО шума.

Расчет групповой задержки с субдискретной точностью в разработанном ПО реализован двумя способами. Первый основан на методе преобразования Фурье с дробным показателем степени и заключается в вычислении автокорреляционной функции импульса $C(\tau_{pscal})$ с ее последующим сдвигом, которая домножается на комплексную

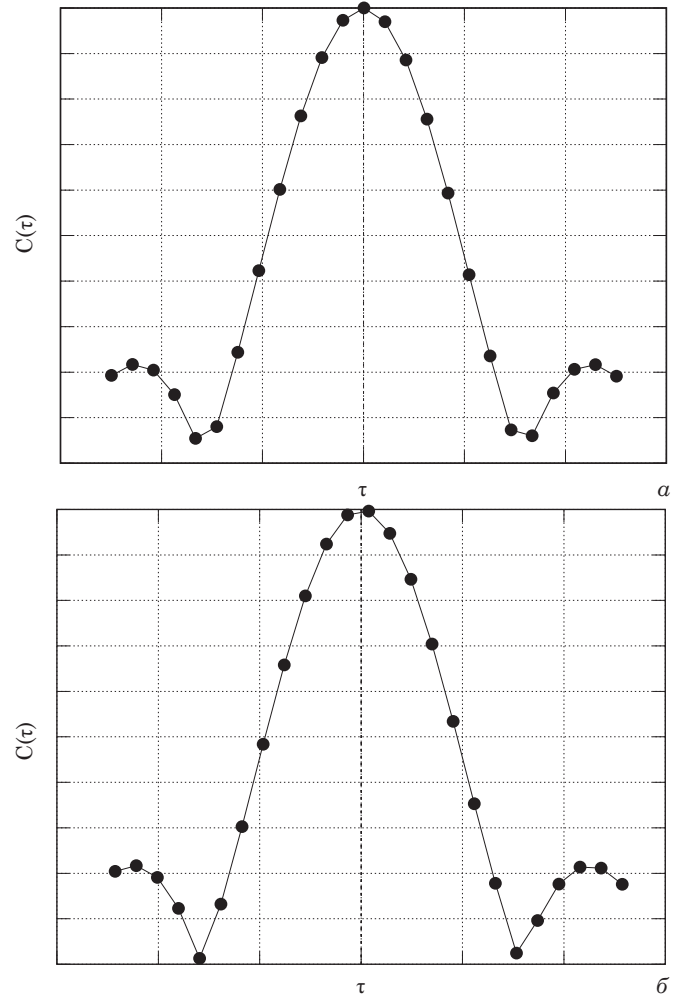


Рис. 2. Автокорреляционная функция импульса СФК: а — максимум функции соответствует отсчету, б — максимум функции находится в области между отсчетами

экспоненту, содержащую дробное значение отсчета, с целью максимизации значения:

$$C(\tau_{pscal}) = \sum_{k=0}^{N-1} S(f_k) e^{j \cdot 2\pi \frac{k}{N} \tau_{pscal} B},$$

где $S(f_k)$ — амплитуда k -го отсчета, восстановленного во временной области СФК, N — число отсчетов во временной области, k — номер отсчета.

При использовании метода преобразования Фурье с дробным показателем степени поиск задержки τ_{pscal} в окрестностях максимума производится в диапазоне $[\tau_{pscal} - 1 \text{ отсчет}; \tau_{pscal} + 1 \text{ отсчет}]$ с шагом 0.1 отсчета. Таким образом значение задержки уточняется 4 раза с постоянным уменьшением зоны поиска и шага ее прохода в 10 раз, чем достигается точность определения задержки 0.1 пс.

Второй метод вычисления задержки основан на интерполяции путем дополнения импульса СФК в частотной области нулями с последующим выполнением ОБПФ средствами библиотеки Python «NumPy» [7]. Число отсчетов в импульсе

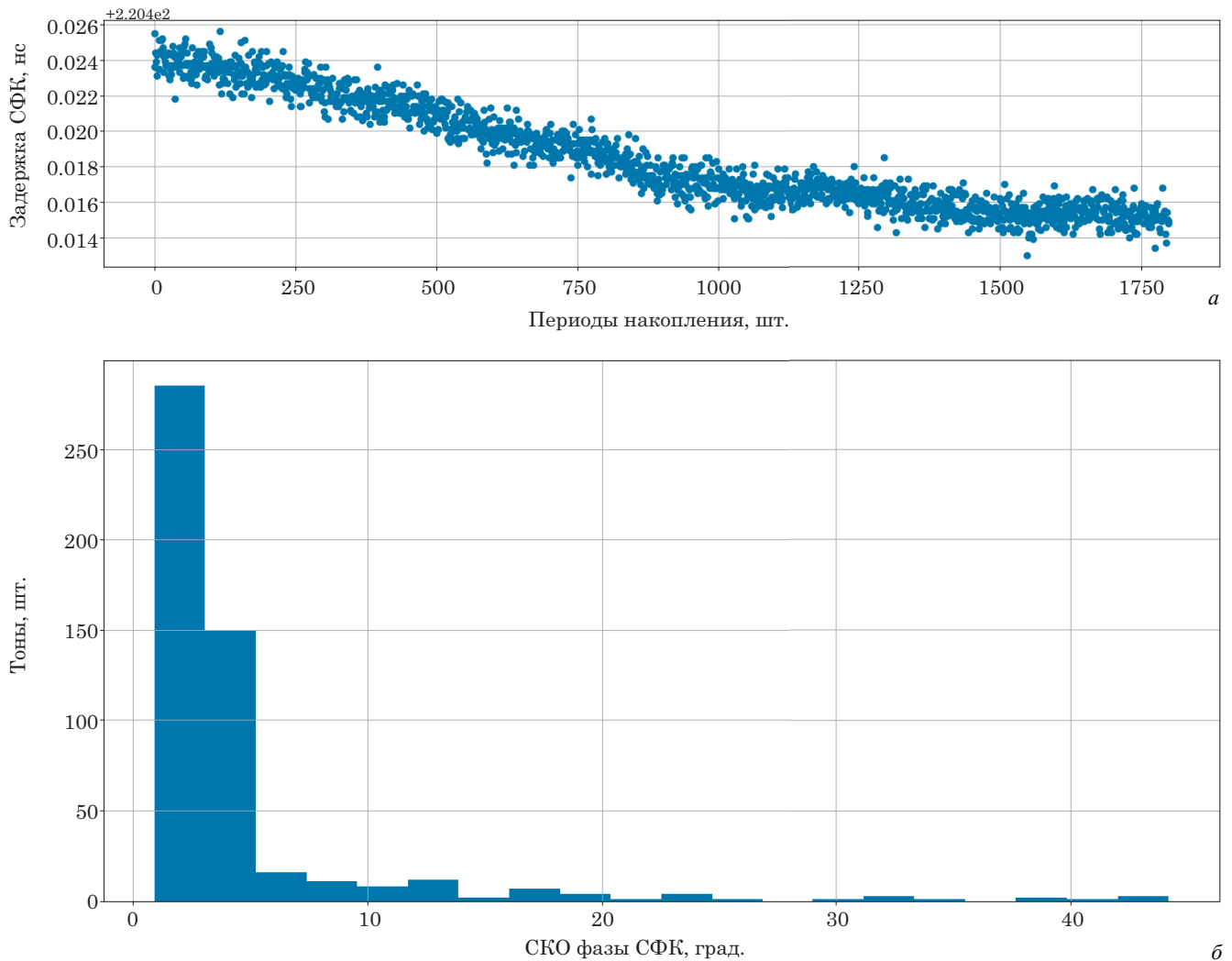


Рис. 3. Отображение результатов работы ПО: *а* — импульс СФК и зависимость задержки от времени, *б* — гистограмма распределения тонов по СКО

в результате дополнения нулями увеличивается в 8192 раза, что при ширине полосы пропускания 512 МГц позволяет после выполнения ОБПФ определить положение максимума с точностью 0.12 пс.

По умолчанию в ПО используется метод преобразования Фурье с дробным показателем степени, т. к. его осуществление требует меньших затрат времени (вычисление задержек на вычислительном узле гибридного процессорного кластера ИПА РАН методом преобразования Фурье с дробным показателем степени осуществляется со скоростью обработки 14-секундного ряда наблюдений за секунду, методом интерполяции — менее 8 с). Получаемые двумя методами результаты эквивалентны с точностью до формальной ошибки. Рассчитанные задержки записываются в выходные текстовые файлы, также у пользователя есть возможность получения их в графической форме с использованием библиотеки Python «Matplotlib» [8]. Пример графического представления результатов расчета задержки приведен на рис. 3а.

Дополнительные функции разработанного программного обеспечения

В разработанном ПО предусмотрена возможность визуализации спектральных характеристик СФК, по внешнему виду которых можно оценить влияние помех на СФК с целью дальнейшей фильтрации, при которой указанные пользователем участки спектра зануляются.

Также реализована возможность представления гистограммы распределения частотных тонов по СКО фазы (пример построенной гистограммы приведен на рис. 3б). Каждый тон характеризуется разбросом относительного среднего значения фазы и линейным трендом, который может быть вызван расхождениями шкал времени между системой преобразования сигналов и атомным стандартом частоты. Этот тренд устраняется методом наименьших квадратов, после чего для каждого тона вычисляется СКО фазы. Гистограмма распределения тонов по СКО представляется в графическом и текстовом виде.

Результаты обработки по реальным сеансам наблюдений

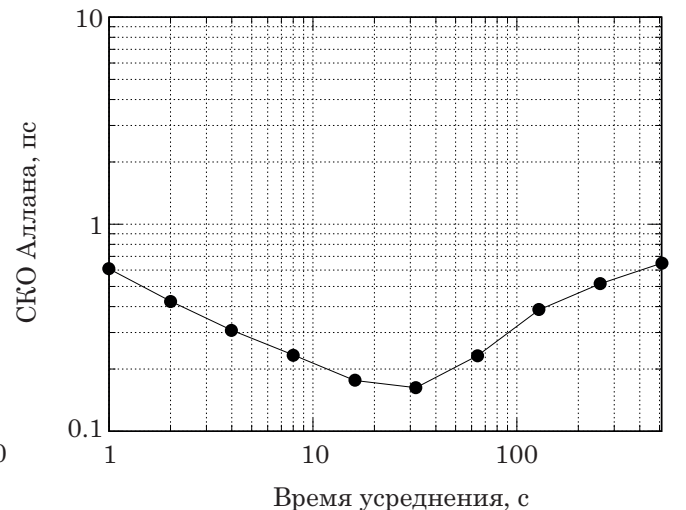
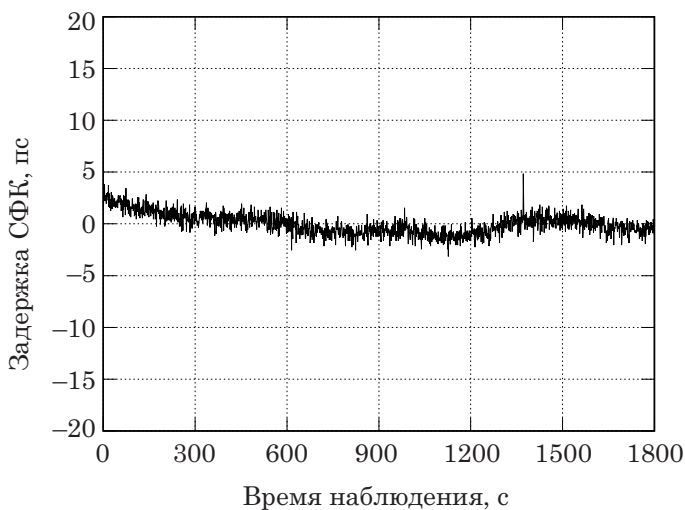
Разработанное ПО было использовано для отслеживания стабильности задержки СФК в течение сеанса наблюдений Ru0804 длительностью 30 мин, проведенного на РСДБ-сети «Квазар-КВО» 20 сентября 2019 г. В наблюдениях были задействованы радиотелескопы РТ-13 в обсерваториях «Бадарь», «Зеленчукская» и «Светлое». Выделение СФК произведено программным коррелятором RASFX.

В обсерватории «Бадарь» СКО групповой задержки для частотного канала X составило 0.9 пс. Ширина шумовой дорожки, оцененная по СКО Аллана, составила 0.6 пс. Оценка формальной ошибки, исходя из отношения сигнал/шум порядка 1300, составила 0.8 пс, т. е. флуктуации групповой задержки СФК находятся в пределах формальной ошибки. График зависимости задержки СФК с устраненным средним от времени и СКО

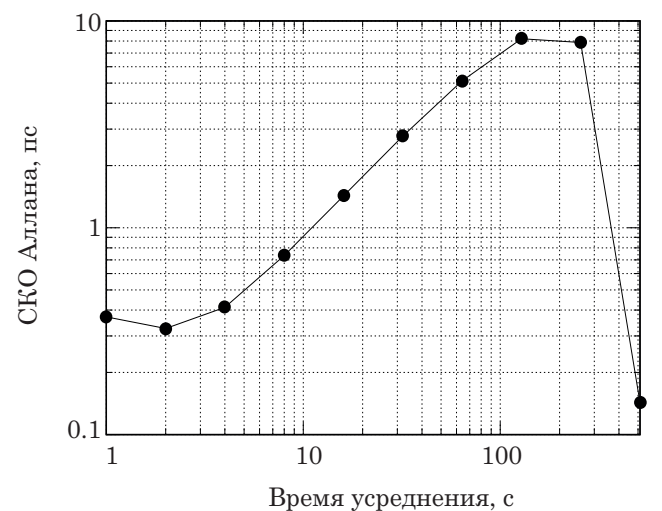
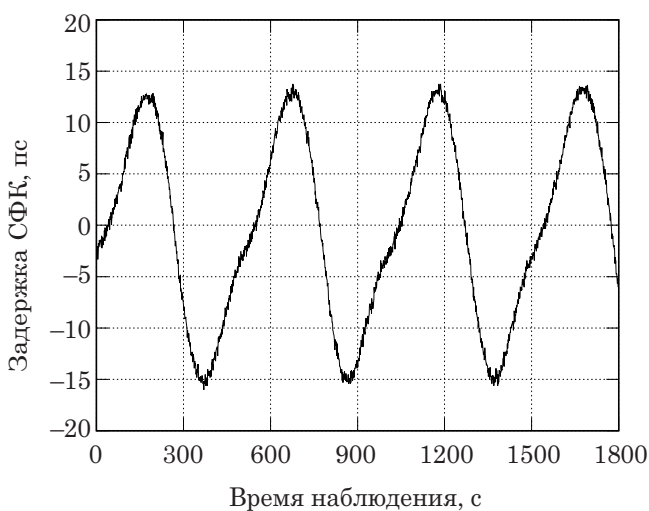
Аллана для обсерватории «Бадарь» приведены на рис. 4а.

В обсерватории «Зеленчукская» выявлена периодическая синусообразная зависимость групповой задержки СФК от времени с размахом порядка 30 пс и периодом 500 с, причины возникновения которой требуют отдельного изучения за рамками данной статьи (отметим, однако, что авторами проверено, что данная нестабильность не оказала влияния на стабильность задержки корреляционного отклика).

Оценка ширины шумовой дорожки по СКО Аллана составила 0.4 пс при оценке формальной ошибки 0.6 пс. График зависимости задержки СФК с устраненным средним от времени и СКО Аллана для обсерватории «Зеленчукская» приведены на рис. 4б. График зависимости СКО Аллана от времени показывает максимум в области 250 с, что соответствует половине периода синусоиды.



а



б

Рис. 4. Зависимость задержки СФК от времени и СКО Аллана, Ru0804, РТ-13, частотный диапазон X: а — «Бадарь»; б — «Зеленчукская»

Заключение

Для исследования СФК было разработано ПО, позволяющее по выходным файлам программных корреляторов RASFX и DiFX вычислять групповые задержки СФК с субмикросекундной точностью, производить анализ частотных характеристик сигнального тракта по СФК и анализ СКО фаз частотных тонов. ПО использовалось для отслеживания стабильности задержки СФК в течение получасового сеанса наблюдения Ru0804, проведенного на РСДБ-сети «Квazar-КВО» 20 сентября 2019 г. В обсерватории «Бадарь» ширина шумовой дорожки не превышает формальной ошибки, в обсерватории «Зеленчукская» при малой ширине шумовой дорожки выявлена периодическая синусообразная зависимость с размахом 30 пс и периодом 500 с, требующая отдельных исследований.

Благодарности

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

Авторы выражают благодарность Ю. А. Векшину, Е. В. Носову, И. Ф. Суркису и В. К. Чернову за обсуждение результатов исследований, Д. А. Маршалову — за поддержку идеи проведения исследования, А. Е. Мельникову — за консультации по корреляционной обработке на DiFX.

Литература

1. Вытнов А. В., Иванов Д. В., Зиновьев П. В., Карпичев А. С. Возможность применения сверхбыстрых логических микросхем в системе фазовой калибровки РСДБ радиотелескопа // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 43. С. 53–59.
2. Носов Е. В. Методы измерения сигнала фазовой калибровки РСДБ-телескопов // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Вып. 4. С. 263–276.
3. Носов Е. В. Реализация на программируемой логической интегральной схеме контроля сигнала фазовой калибровки в перспективной широкополосной системе преобразования сигналов // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 499–503.
4. Deller A. T., Brisken W. F., Phillips C. J., et al. DiFX-2: A more flexible, efficient, robust, and powerful software correlator // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2011. Vol. 123, no. 901. P. 275–287.
5. 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.
6. Томпсон А. Р., Моран Дж. М., Свенсон Дж. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: Физматлит, 2003. 331 с.
7. NumPy [Электронный ресурс]. URL: <https://numpy.org> (дата обращения: 20.01.2020).
8. Matplotlib: Python plotting — Matplotlib 3.1.2 documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://matplotlib.org> (дата обращения: 20.01.2020).