

## Алгоритмы синтеза полосы частот при постпроцессорной обработке РСДБ-наблюдений РТ-32 на корреляторе RASFX

© В. А. Шантырь, А. С. Кумейко, И. Ф. Суркис

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

С 2019 г. программный коррелятор RASFX используется для обработки «оперативных» РСДБ-наблюдений, проведенных на радиотелескопах РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская», «Бадарь».

В работе приведены используемые в корреляторе RASFX математические алгоритмы синтеза полосы частот, выполняемого над калиброванными по фазе данными. Перед синтезом полосы частот фазовая калибровка частотных каналов выполнена двумя независимыми методами. Первый метод основан на использовании исходных и скорректированных сигналов фазовой калибровки генераторов пикосекундных импульсов станций. Во втором методе используется фазовая калибровка частотных каналов по опорным источникам.

Для оценки качества синтеза полосы частот этими методами выполнена постпроцессорная корреляционная обработка на корреляторе RASFX 26 часовых сессий РСДБ-наблюдений на радиотелескопах РТ-32 с шириной полосы пропускания частотных каналов 8 МГц, разнесенных на расстояние до 720 МГц. Результаты вторичной обработки сессий даны в сравнении с результатами, полученными после обработки их аппаратно-программным коррелятором (АРК) с собственным пакетом постпроцессорной обработки и программным коррелятором DiFX с пакетом PIMA. В ходе постпроцессорной корреляционной обработки в синтезированной частотной полосе определяется групповая задержка.

Вторичная обработка сессий выполнена в Службе ПВЗ ИПА РАН с использованием программного пакета QUASAR.

Для большинства сессий полученные по данным корреляторов RASFX, АРК и DiFX оценки всемирного времени хорошо согласуются между собой, а в ряде сессий точность вычислений ПВЗ по групповым задержкам, полученным новыми методами, оказалась выше. Работы по совершенствованию методов синтеза будут продолжены.

**Ключевые слова:** взаимно корреляционная функция, групповая задержка, частота интерференции, сигналы фазовой калибровки, СФК, синтез полосы частот.

*Контакты для связи: Шантырь Виолетта Анатольевна (vashantyr@iaaras.ru).*

**Для цитирования:** Шантырь В. А., Кумейко А. С., Суркис И. Ф. Алгоритмы синтеза полосы частот при постпроцессорной обработке РСДБ-наблюдений РТ-32 на корреляторе RASFX // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 63. С. 17–27. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.63.17-27>

## Bandwidth Synthesis Algorithms for Post-Processing RT-32 VLBI Observations using RASFX Correlator

V. A. Shantyr, A. S. Kumeiko, I. F. Surkis

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

### Abstract

Since 2019 the software RASFX correlator has been using to process VLBI observations of RT-32 radio telescopes with a bandwidth of frequency channels 8 MHz, separated by a distance of up to 720 MHz. The group delay is defined with synthesized band during correlation processing.

The phase calibration before bandwidth synthesis is performed by two methods. The first is based on using of initial and corrected phase calibration signals of the station picosecond pulse generators. The second method uses reference observations for phase calibration. Algorithms for both methods are presented. To estimate the quality of synthesis by two methods, post-processing of several RT-32 VLBI one-hour observations on RASFX correlator was performed. The results of secondary processing of these sessions are given in comparison with results of correlator ARC with its own post-processing software and correlator DiFX with the PIMA package. The secondary processing was performed with help of QUASAR package.

For most observations the UT estimates from RASFX correlator are close to the results of ARC and DiFX correlators, and in some observations the accuracy of calculations is higher. Development of both methods to improve results will be continued.

**Keywords:** cross-correlation function, group delay, interference frequency, phase calibration signal, bandwidth synthesis.

Contacts: Violetta A. Shantyr ([vashantyr@iaaras.ru](mailto:vashantyr@iaaras.ru)).

**For citation:** Shantyr V. A., Kumeyko A. S., Surkis I. F. Bandwidth synthesis algorithms for post-processing RT-32 VLBI observations using RASFX correlator // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 63. P. 17–27. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.63.17-27>

## Введение

В состав радиоинтерферометрического комплекса «Квazar-КВО» входят три радиоастрономические обсерватории: «Светлое» (Ленинградская область), «Зеленчукская» (Карачаево-Черкесия) и «Бадарь» (Республика Бурятия). В ходе РСДБ-наблюдений на радиотелескопах РТ-32 записывается 10 частотных каналов в X-диапазоне (длина волны 3.5 см) и 6 каналов в S-диапазоне (длина волны 13 см), разнесенных на 720 и 140 МГц соответственно. Ширина полосы пропускания частотного канала 8 МГц. Для определения поправок всемирного времени UT1–UTC на двух или трёх радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квazar-КВО» проводят ежесуточные РСДБ-наблюдения длительностью один час по программе R-I.

С 2009 г. наблюдения обрабатывались на корреляторе АРК ([Зимовский и др., 2010](#)). С 2019 г. наблюдения обрабатываются на новом, разработанном в ИПА РАН, программном корреляторе RASFX (Russian Academy of Sciences FX) ([Surkis et al., 2017](#)). Результатами работы первичной (корреляционной) обработки стали групповые задержки сигналов в диапазонах X и S, определяемые в синтезированных частотных полосах.

Для коррелятора RASFX потребовалась разработка нового постпроцессорного обеспечения, применяемого для формирования синтезированной частотной полосы и вычисления групповых задержек.

Фазовая калибровка частотных каналов при синтезировании выполнена несколькими способами: по исходным или скорректированным сигналам фазовой калибровки (СФК) и без использования СФК, по калибровочным сканам.

В статье приведено описание алгоритмов фазовой калибровки и вычисления групповых задержек в синтезированной частотной полосе.

## Алгоритмы синтеза полосы частот

В процессе работы коррелятор выполняет сопровождение сигналов по задержке, смещая потоки данных по времени в соответствии с предвычисленной моделью. В ходе постпроцессорной обработки на основании данных измерений определяется поправка к модельной задержке. При РСДБ-наблюдениях внегалактических источников (квazarов) точность предвычисленной модели настолько высока, что поправка к этой модели меняется в течение скана линейно. В результате постпроцессорной обработки измеряются задержка  $\tau$  и частота интерференции  $F_l$ . Частота интерференции — остаточный доплеровский сдвиг, т. е.

$F_{lk} = \tau' f_k$ , где  $f_k$  — центральная частота ( $k$ -ого частотного диапазона).

Коррелятор RASFX по каждому частотному каналу через равные периоды накопления формирует взаимно корреляционные спектры мощности по радиочастоте. Полученные спектры используются для формирования комплексных двумерных массивов данных. В «идеальном случае» (сигнал квазара — белый шум, приемно-регистрирующая аппаратура радиотелескопов имеет независимые от частоты задержку и коэффициент изменения мощности) спектр равен ([Takahashi et al., 2000](#)):

$$S_k(f, t) = a e^{-i2\pi(f\tau + F_l t)}, \quad (1)$$

где  $a$  — амплитуда взаимно корреляционного спектра (постоянна по времени и частоте),  $t \in \left[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}\right]$ ,  $T$  — длительность скана и  $f \in \left[f_k - \frac{B}{2}; f_k + \frac{B}{2}\right]$ ,  $B$  — ширина полосы пропускания канала. При этом  $S_k(f, t)$  задано для дискретных значений  $f$  и  $t$ , определяемых частотным разрешением и периодом накопления коррелятора (задаются как режим работы коррелятора), т. е. для точек  $m$  и  $n$ .

Кроме того, на корреляторе вычисляются амплитуды и фазы тонов СФК, и эти данные поступают в систему постпроцессорной обработки.

Постпроцессорная обработка начинается с поиска взаимного корреляционного (кросскорреляционного) отклика в каждом из  $K$  частотных каналов. Результатом выполнения двумерного преобразования Фурье исходного взаимно корреляционного спектра, выраженного формулой (1), являются двумерные массивы комплексных чисел по частоте интерференции и задержкам:

$$C_{k,j,l} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} S_{k,m,n} e^{i2\pi \frac{mjnl}{MN}}, \quad (2)$$

где  $S_{k,m,n}$  — значение  $m$ -го отсчета взаимно корреляционного спектра частотного канала  $k$  для периода накопления  $n$ ,  $M$  — количество отсчетов спектра,  $N$  — количество периодов накопления,  $j$ ,  $l$  — дискретные отсчеты, соответствующие задержке и частоте интерференции.

Амплитуды взаимно корреляционной функции  $C_{k,j,l}$  представляют собой пик на фоне шумовой подложки. Координаты пика  $j$ ,  $l$  являются значениями задержки и частоты интерференции в корреляционном окне, которые вычислены в первом приближении или с большим дискретным шагом. Значения получаются с точностью  $1/B$  с и  $1/T$  Гц.

На основании формулы (1) значение амплитуды и фазы взаимно корреляционной функции

можно получить для произвольных значений задержки и частоты интерференции по формуле:

$$C_k(\tau, F_I) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} S_{k,m,n} e^{i2\pi((f_k+B(m/M-0.5))\tau+F_I T(n/N-0.5))} = e^{i2\pi f_k \tau} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} S_{k,m,n} e^{i2\pi(B(m/M-0.5)\tau+F_I T(n/N-0.5))}. \quad (3)$$

Результатом преобразования Фурье с учетом пределов интегрирования  $t \in [-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}]$  и  $f \in [-\frac{B}{2}; \frac{B}{2}]$  в формуле (1) является следующий вид корреляционной функции:

$$C_k(\tau, F_I) = e^{i2\pi f_k \tau} \text{sinc}(\pi B(\tau - \hat{\tau}_k)) \text{sinc}(\pi T(F_I - \hat{F}_{Ik})),$$

где  $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$  — синк-функция, а  $\hat{\tau}_k$  и  $\hat{F}_{Ik}$  — «истинные» задержка и частота интерференции.

То есть зависимость амплитуды корреляционного отклика от задержки и частоты интерференции имеет куполообразную форму размерами  $1/B$  и  $1/T$ , которая характерна для шумоподобных сигналов.

Методом преобразования Фурье определяются точные значения задержки и частоты интерференции, для которых амплитуда корреляционной функции  $C_k(\tau, F_I)$  максимальна. Точности определения задержки и частоты интерференции в одиночном частотном канале зависят от отношения сигнал/шум (ОСШ) и равны (Томпсон и др., 2003):

$$\sigma_\tau = \frac{\sqrt{12}}{2\pi BSNR}, \quad \sigma_{F_I} = \frac{\sqrt{12}}{2\pi TSNR}, \quad (4)$$

где  $SNR$  — отношение сигнал/шум.

В случае многоканальных РСДБ-наблюдений, поскольку точность определения задержек обратно пропорционально ширине полосы, выполняется синтез полосы частот.

Корреляционная функция по синтезированной полосе (группе каналов одного диапазона) получается объединением информации от всех частотных каналов:

$$C(\tau, F_I) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} S_{k,m,n} e^{i2\pi((f_k+B(m/M-0.5))\tau+F_I T(n/N-0.5))} = \sum_{k=0}^{K-1} C_k(\tau, F_I). \quad (5)$$

Точность определения синтезированной задержки  $\sigma_{\tau_{syn}}$  рассчитывается по формуле (Томпсон и др., 2003):

$$\sigma_{\tau_{syn}} = \frac{1}{2\pi B_{syn} SNR_{syn}}, \quad (6)$$

где  $B_{syn} = \sqrt{\frac{(f_k - \bar{f})^2}{K}}$  — «эффективная» ширина синтезированной полосы, а  $SNR_{syn}$  — ОСШ синтезированного отклика. Для «идеального» случая,

в котором ОСШ всех  $K$  частотных каналов одинаков и равен  $SNR$ .

В реальных наблюдениях точность определения задержки на радиотелескопах РТ-32 обычно составляет 20–40 пс в диапазоне X и 100–200 пс в диапазоне S.

В «идеальном» случае зависимость корреляционной функции от частоты интерференции остается  $\text{sinc}(\pi T(F_I - \hat{F}_I))$ . Зависимость от задержки имеет более сложную форму. Ширина центрального корреляционного лепестка  $1/(f_{k-1} - f_1)$ , где  $f_{k-1} - f_1$  — разность частот первого и последнего каналов, обычно 720 МГц для X диапазона и 140 МГц для S — позволяет достигать высокой точности определения задержки.

На рис. 1 приведены примеры смоделированного («идеального») синтеза частотных каналов для диапазонов X и S (для нулевого значения истинной задержки). Толстой линией показана огибающая —  $\text{sinc}(\pi B\tau)$  — сумма корреляционных функций одиночных частотных каналов.

Количество каналов и частоты расположения каналов (начала полос пропускания каналов) представлены в табл. 1. В синтезе полосы частот для корреляторов RASFX и АРК участвовали только каналы верхней боковой полосы, т. к. коррелятор АРК, с которым сравнивался результат, работал с верхними боковыми полосами (при этом коррелятор DiFX в соответствии со своими настройками работал как с верхними, так и с нижними).

Соответственно, эффективная ширина синтезированной полосы составляет в диапазоне X 282 МГц — при использовании нижних боковых

Таблица 1

Частоты каналов X и S диапазонов

Номера каналов	Частоты, МГц	
	Диапазон X	Диапазон S
1	8212.99	2225.99
2	8252.99	2245.99
3	8352.99	2265.99
4	8512.99	2295.99
5	8732.99	2345.99
6	8852.99	2365.99
7	8912.99	
8	8932.99	
9*	8212.99	
10*	8932.99	

\* каналы нижней боковой полосы.

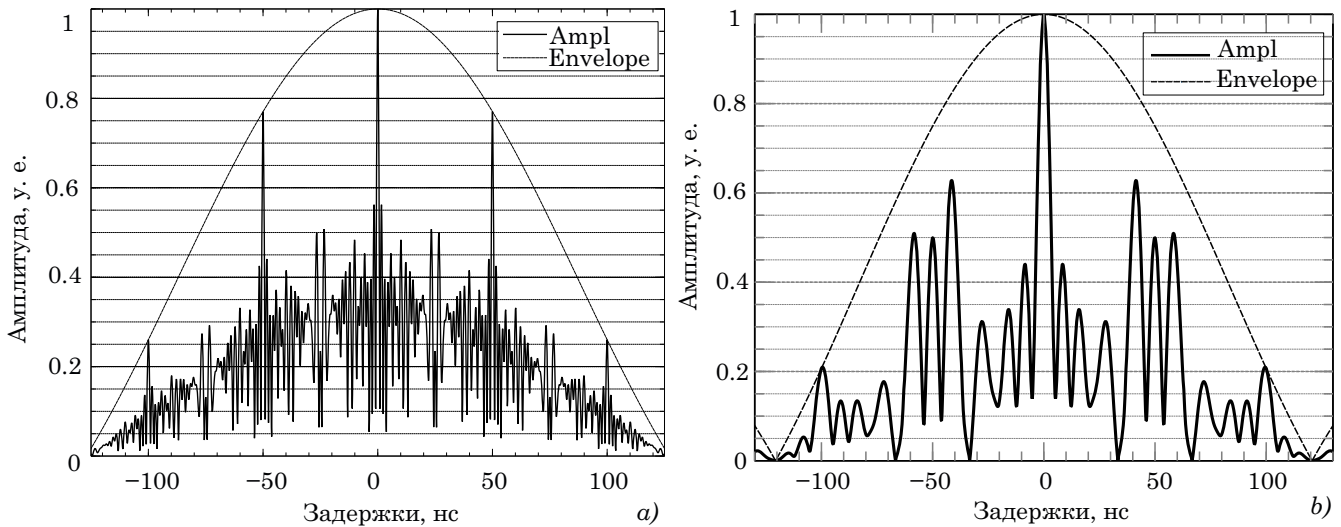


Рис. 1. Зависимость амплитуды корреляционного лепестка от задержки: а) в диапазоне X, б) в диапазоне S. Смоделировано для ширины полосы пропускания частотного канала 8 МГц и разнесения частотных каналов до 720 МГц в диапазоне X и 140 МГц в диапазоне S. Ampl — амплитуда корреляционного лепестка в синтезированной полосе, Envelope — сумма амплитуд взаимно корреляционных функций одиночных частотных каналов

полос и 262.5 МГц — без использования, в диапазоне S 45 МГц. При условии, что ОСШ всех каналов равно 10, ожидаемая точность определения задержки составила бы в диапазоне X 18 пс при использовании нижних боковых полос, 21 пс — без использования, в диапазоне S — 144 пс.

Однако, синтез полосы частот непосредственно по формуле (5) невозможен. В процессе регистрации РСДБ-сигналов аппаратура радиотелескопов вносит искажения. По крайней мере, присутствует аппаратная задержка  $\tau_{ak}$ , индивидуальная для каждого канала, приводящая к линейному смещению фазы в корреляционном спектре на величину  $\theta_k(f) = -2\pi f(\tau_{ak,j} - \tau_{ak,l}) = -2\pi f\tau_{ak}$  для базы из станций  $j$  и  $l$  (далее под «аппаратной задержкой  $k$ -го частотного канала» некоторой базы будем понимать разность аппаратных задержек первой и второй станций базы). Кроме того, возможны и нелинейные смещения фазы, вызванные нелинейностью передаточных функций аппаратуры телескопов.

Так как в системе преобразования сигналов радиотелескопов РТ-32 используются фильтры с конечной импульсной характеристикой, которые в пределах полосы пропускания частотного канала (до 32 МГц) имеют линейные фазочастотные характеристики (Носов, 2010), то можно считать, что аппаратная задержка приводит к постоянному смещению фазы для каждого канала  $\theta_k = -2\pi f_k \tau_{ak}$ .

Тогда синтез можно выполнить по следующей формуле, с коррекцией фаз отдельных частотных каналов на величину  $\phi_k^{cal}$ :

$$C(\tau, F_l) = \sum_{k=0}^{K-1} C_k(\tau, F_l) e^{-i\phi_k^{cal}}, \quad (7)$$

При условии, что калибровочные фазы  $\phi_k^{cal}$  соответствуют аппаратным смещениям фаз  $\theta_k$  (например,  $\phi_k^{cal} = \theta_k + \text{const}$  — калибровочные фазы отличаются от  $\theta_k$  на постоянную для всех каналов величину), полученная в формуле (7) корреляционная функция будет «идеальной».

В разработанном программном обеспечении определение калибровочных фаз выполнено двумя разными методами. Первый основан на использовании исходных и скорректированных СФК, второй — на применении фазовой калибровки частотных каналов по опорным источникам.

### Синтез полосы с использованием СФК

СФК генерируются приемно-регистрирующей аппаратурой радиотелескопов и представляют собой короткие периодические импульсы порядка десятков пикосекунд (Вытнов и др., 2006). В частотной области СФК представляет собой повторяющиеся через 1 МГц (для РТ-32) линии. СФК подаются на вход приемников радиотелескопа, проходят весь тракт, в том числе системы преобразования сигналов, делящие исходный сигнал на отдельные частотные каналы. Таким образом, можно ожидать, что разность фаз для двух станций одного и того же тона СФК в данном частотном канале  $\phi_k$  отражает данные об аппаратных задержках, то есть с точностью до измерительной ошибки  $\phi_k = -2\pi f_k \tau_{ak} = \theta_k$  является требуемой величиной для синтеза частотных каналов по формуле (7).



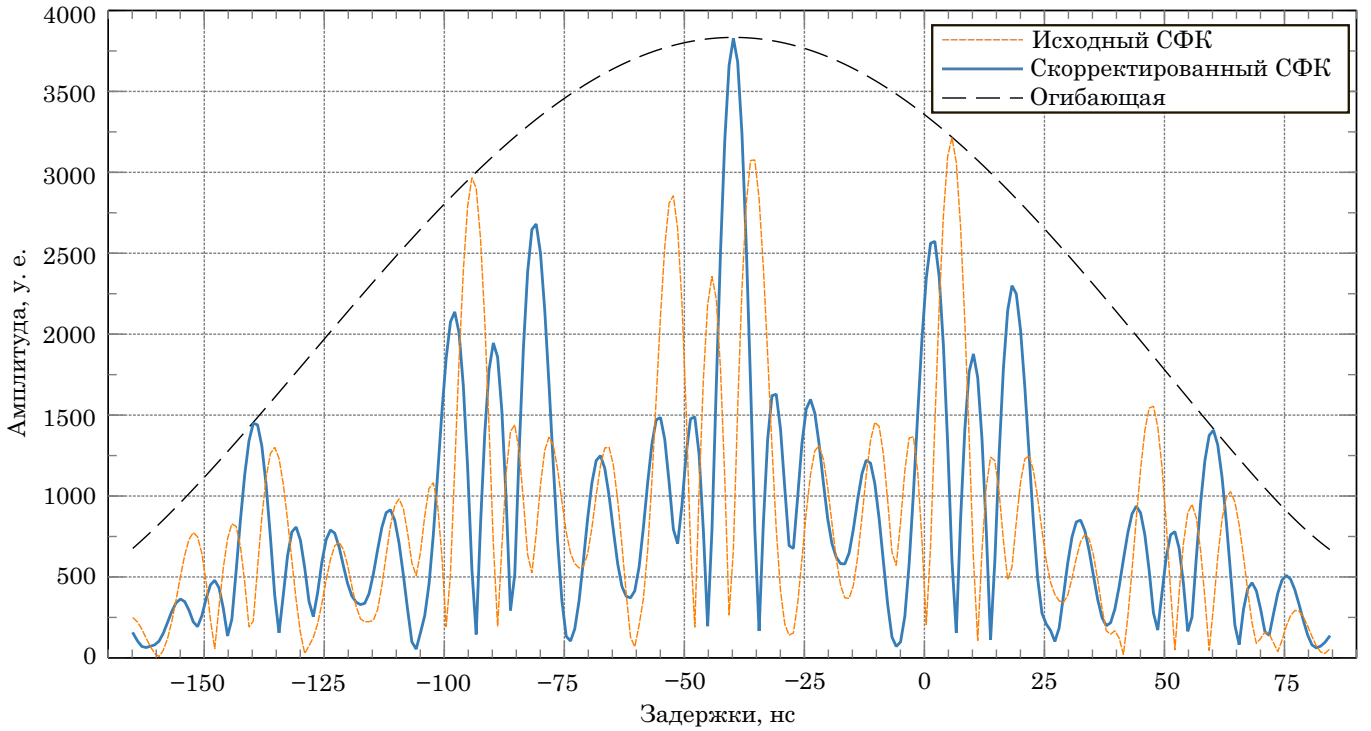


Рис. 2. Синтез полосы S выполнен по исходным и скорректированным значениям фаз СФК. Огибающая — нормированная суммарная амплитуда взаимно корреляционной функции в одиночных частотных каналах

Однако сами СФК могут быть искажены. По крайней мере, возможно одинаковое для всех частотных каналов временное смещение  $\Delta t_p$  между СФК и собственно зарегистрированными сигналами:

$$\begin{aligned}\phi_k &= -2\pi f_k(\tau_{ak} + \Delta t_p) = \theta_k + \psi_k, \\ \psi_k &= -2\pi f_k \Delta t_p.\end{aligned}$$

В этом случае синтез частотных каналов может пройти некорректно, как это показано на рис. 2. Разность моментов времени  $\Delta t_p$  в 50 нс сильно сместила полученный синтезированный отклик относительно огибающей (равной сумме корреляционных функций отдельных каналов). При этом основной корреляционный лепесток может стать меньше боковых лепестков, что приведет к выбору ложного лепестка. Поэтому применяется коррекция фаз СФК.

Величина  $\Delta t_p$  может быть определена на сканах с достаточно большим ОСШ, как разность между максимумом огибающей и максимумом нужного корреляционного лепестка. Значения ОСШ должны соответствовать точности определения задержки  $\sigma_{\tau_{syn}} = 20$  пс.

Анализ данных для нескольких десятков сессий РСДБ-наблюдений показывает, что в течение часа величина  $\Delta t_p$  для каждой базы постоянна или меняется линейно от времени. Поэтому возможно выбрать два опорных скана в начале и в конце

сессии, определить для них  $\Delta t_p$  и выполнить линейную интерполяцию  $\Delta t_p(t)$ . Далее для каждого частотного канала определяется  $\psi_k = -2\pi f_k \Delta t_p$ , выполняется коррекция фаз  $\phi_k \rightarrow \phi_k - \psi_k$ , и получившиеся скорректированные величины фаз СФК используются для синтеза полосы по выражению (7).

Данный метод позволяет выполнять корректно синтез полосы частот и вычислять значения задержек и частот интерференции правильно при условии, что в начале и в конце сессии было не менее 2 сканов с достаточным ОСШ и наличием отклика в каждом частотном канале. В противном случае разница между задержками в начале и в конце сессии может достигать 10 нс, что приводит к ухудшению результата.

Поиск  $\Delta t_p$  выполняется отдельно для каждого из диапазонов X и S. Величина  $\Delta t_p$  определяется для базы из станций  $l, j$  и является разностью величин двух станций  $\Delta t_{p,l,j} = \Delta t_{p,l} - \Delta t_{p,j}$ . Для многобазовых наблюдений одна из станций выбирается в качестве опорной, ее  $\Delta t_{p,l}$  приравнивается к нулю, и вычисляются сдвиги остальных станций относительно опорной.

Разумеется, введение в систему величины  $\Delta t_p$ , к тому же линейно смещающейся в течение сессии наблюдений, приводит к эквивалентному смещению результирующей задержки. При вторичной обработке определяется и исключается разность хода стандартов времени станций как линейная

функция от времени. Добавочное смещение несколько изменит найденную разность хода, но не приведет к ухудшению определения других параметров (таких как параметры вращения Земли). Однако, если будут проводиться РСДБ-наблюдения для синхронизации стандартов времени станций, потребуется определять все кабельные и другие аппаратные задержки из независимых данных.

Для постпроцессорной обработки РСДБ-наблюдений разработан программный пакет WOPS (wideband postprocessing observations system). Пакет WOPS написан на C++ и работает под управлением операционной системы семейства Linux. Результаты обработки записываются в служебный промежуточный файл, используемый для создания файла формата NGS.

Выполнена доработка программного пакета WOPS для обработки наблюдений с РТ-32 приведенными выше методами. Графический пользовательский интерфейс разработан с использованием библиотеки Qt.

### Метод фазовой калибровки с использованием опорного скана

Основная идея метода состоит в том, чтобы выбрать сканы для калибровки, по ним найти индивидуальные аппаратные задержки частотных каналов и поправки фаз при синтезе полосы частот  $\theta_k = -2\pi f_k \tau_{ak}$  (Kondo, Takefuji, 2016).

При этом неизбежны некоторые допущения. Полная задержка в частном канале  $\hat{\tau}_k$  искусственно разделена на общую для всех каналов задержку  $\bar{\tau}$  и индивидуальную аппаратную задержку для каждого канала  $\tau_{ak}$ :  $\hat{\tau}_k = \bar{\tau} + \tau_{ak}$ . Критерий разделения может быть разным. В настоящее время первый канал выбирается в качестве опорного, и его аппаратная задержка считается равной нулю  $\tau_{a1} = 0$ . В дальнейшем, возможно, будет выбран критерий  $\sum_k \tau_{ak} = 0$ .

На первом этапе фазовой калибровки выполняется выбор опорного наблюдения. Оно является общим для всех баз, но индивидуальное для X и S диапазонов. Поиск осуществляется по следующему разработанному авторами алгоритму:

1. Выполняется вычисление задержек  $\tau_k$ , частот интерференции  $F_k$  и ОСШ для каждого частотного канала каждого скана. Исключаются сканы, в которых хотя бы в одном частотном канале нет корреляционного отклика.

2. Каждому скану ставится в соответствие наименьшее из всех частотных каналов ОСШ. Из них выбирается скан с наибольшим ОСШ. Таким образом, исключается возможность того, что один из каналов опорного наблюдения будет иметь низкое ОСШ.

3. Выбранный скан может быть забракован, если для одного из частотных каналов велико

СКО колебаний фазы от частоты (ниже описан процесс вычисления СКО). Тогда в соответствии с п. 2. выбирается новый опорный скан среди оставшихся.

После выбора калибровочного скана, для каждого частотного канала двумерный массив — спектр от радиочастоты и периода накопления — преобразуется в одномерный с корректировкой по задержке:

$$S^{avr}_{k,m} = \sum_{n=0}^{N-1} S_{k,m,n} e^{i2\pi((f_k+B(m/M-0.5))\tau_k + F_k T(n/N-0.5))}. \quad (8)$$

Фактически выполняется преобразование Фурье по времени, берется одномерный ряд для значения частоты интерференции, при котором корреляционный отклик максимален, спектр поворачивается вдоль оси радиочастот. В случае наблюдений на радиотелескопах РТ-32, полученный спектр  $S^{avr}_{k,m}$  имеет практически постоянную фазу (иногда фаза линейно меняется от частоты). Методом наименьших квадратов находятся параметры линейного тренда  $\phi_k^{avr}(f) = \phi_k^{(0)avr} + f \cdot \phi_k^{(1)avr}$  и СКО невязок. СКО должно соответствовать ОСШ данного частотного канала, СКО существенно большее ОСШ является критерием для отбраковки данного опорного скана (по п. 3).

Найденная фаза  $\phi_k^{avr}(f)$  характеризует ошибку определения задержки частотного канала  $\tau_k$ . В самом деле, если полная задержка в канале  $\hat{\tau}_k$ , то фаза исходного спектра  $\phi_k = -2\pi(f_k + f)\hat{\tau}_k$ , и после выполнения операции (8)  $\phi_k^{avr}(f) = -2\pi(f_k + f)(\hat{\tau}_k - \tau_k)$ .

Тогда  $\phi_k(f) = \phi_k^{avr}(f) - 2\pi(f_k + f)\tau_k$  будет характеризовать полную задержку в частотном канале. С учетом критерия  $\tau_{a1} = 0$ , получим, что  $\tau_{ak} = \tau_k - \tau_1$ ,  $\hat{\tau}_1 = \tau_1$ , следовательно, фазы для калибровки опорного скана вычисляются по формуле:  $\phi_k^{cal}(f) = -2\pi(f_k + f)(\tau_k - \tau_1) - \phi_k^{avr}(f)$ .

Калибровочные фазы, полученные для опорного скана, используются и для всех остальных сканов часовой сессии наблюдений.

Для более длительных сессий потребуется вводить несколько калибровочных сканов и линейно интерполировать калибровочные фазы между ними. Предполагается выполнить доработку метода в дальнейшем.

Рассмотренный метод фазовой калибровки не входит в состав программного пакета WOPS. Он был реализован в отдельной программе VERS, написанной на языке Python с использованием сторонних библиотек, входящих в состав дистрибутива Anaconda, и расширений, написанных на языке C++. В программе есть инструменты для чтения основной информации о сессиях, генерирования выходных файлов (для последующей вторичной обработки), а также отображения графиков. Кроме этого, программа может в виде отдельного расширения генерировать файлы

с калибровочными данными для их передачи в программный пакет WOPS, поскольку VERS не имеет графического интерфейса.

### Сравнение результатов корреляционной обработки

Для оценки результатов, полученных на RASFX с новым постпроцессорным обеспечением, обработан ряд сессий 2020 г. Было выполнено сравнение результатов обработки на APK (со своим постпроцессорным обеспечением) (Суркис и др., 2009) с результатами, полученными на DiFX (Deller et al., 2007) с постпроцессорным обеспечением PIMA (PIMA), где использовалось порядка 80 доступных сессий. Также сравнивались результаты, полученные на APK с RASFX (80 сессий) и DiFX с RASFX (60 сессий). При обработке на корреляторе RASFX с помощью СФК исключались каналы, корреляционный отклик которых не выделялся на фоне шумов. В результате из общего числа сессий (88 сессий) в 46 был исключен минимум один частотный канал (подробнее см. табл. 3).

Результаты корреляционной обработки (в виде файлов стандарта NGS) были загружены в пакет вторичной обработки Quasar (Губанов, Суркис, 2002; Губанов и др., 2002; Губанов и др., 2007) для получения оценок всемирного времени UT1–UTC.

Корреляторы APK и DiFX — системы обработки разных поколений, а постпроцессорное программное обеспечение PIMA, созданное почти на 10 лет позже постпроцессорного обеспечения коррелятора APK, более совершенно. Основное отличие в постпроцессорной обработке следующее: в APK реализован алгоритм калибровки частотных каналов по СФК, а в PIMA — по опорным источникам (алгоритмы аналогичны описанным выше).

Результаты, полученные с применением корреляторов APK и DiFX, приведены на рис. 3–4. На рис. 3 представлены оценки всемирного времени UT1–UTC (отклонение от опорного ряда C04), на рис. 4 — формальные ошибки оценок всемирного времени, характеризующие внутреннюю непротиворечивость данных (СКО невязок — остаточного белого шума, получающегося из ряда данных после определения параметров). СКО разностей оценок всемирного времени для корреляторов и методов обработки сведены в табл. 2.

Результаты сравнения следующие. Отклонения оценок UT1–UTC и формальные ошибки в случае применения данных DiFX меньше в сравнении с данными APK. СКО для UT1–UTC с использованием данных корреляторов APK и DiFX равно 43 мкс и 38 мкс соответственно, формальные

ошибки при использовании данных APK в среднем на 13 % больше.

На рис. 5–6 приведено сравнение результатов, полученных с использованием данных RASFX и DiFX: оценки всемирного времени UT1–UTC и их формальные ошибки.

Оценки UT1–UTC по данным RASFX и DiFX близки, а формальные ошибки в случае использования RASFX несколько больше. СКО для UT1–UTC по данным RASFX при обработке с помощью СФК равно 69 мкс, а при обработке по опорному источнику — 59 мкс. На этом же ряде наблюдений СКО поправок в случае DiFX равно 56 мкс. Формальные ошибки UT1–UTC при обработке РСДБ-наблюдений с помощью СФК на RASFX в среднем на 13 % больше, а с помощью опорного источника — на 3 % больше, чем при обработке на DiFX.

На рис. 7 и 8 приведены разности оценок UT1–UTC по данным RASFX и APK, RASFX и DiFX соответственно.

Как уже отмечалось выше, постпроцессорная обработка с использованием СФК близка к обработке коррелятора APK, а обработка с калибровкой частотных каналов по опорным сканам близка к обработке пакетом PIMA с DiFX. Можно сделать вывод, что разница результатов корреляторов APK и DiFX в значительной степени, обусловлена стабильностью СФК.

Таблица 2

Сравнение оценок UT1–UTC для разных вариантов обработок

	Количество наблюдений	СКО разностей оценок UT1–UTC, мкс
APK – PIMA	75	37.51
APK – RASFX (PCALM)	79	31.49
APK – RASFX (BWS)	79	42.76
DiFX – RASFX (PCALM)	56\45*	82.04\34.99*
DiFX – RASFX (BWS)	56	26.98

\* значения разностей оценок UT1–UTC после фильтрации — исключения некоторых сканов (т. к. некоторые разности слишком велики, добавлен вариант, когда устраняются выбросы)

\*\* BWS — калибровка частотных каналов по калибровочным сканам, PCALM — калибровка по СФК с введением скорректированной задержки (PCALM)

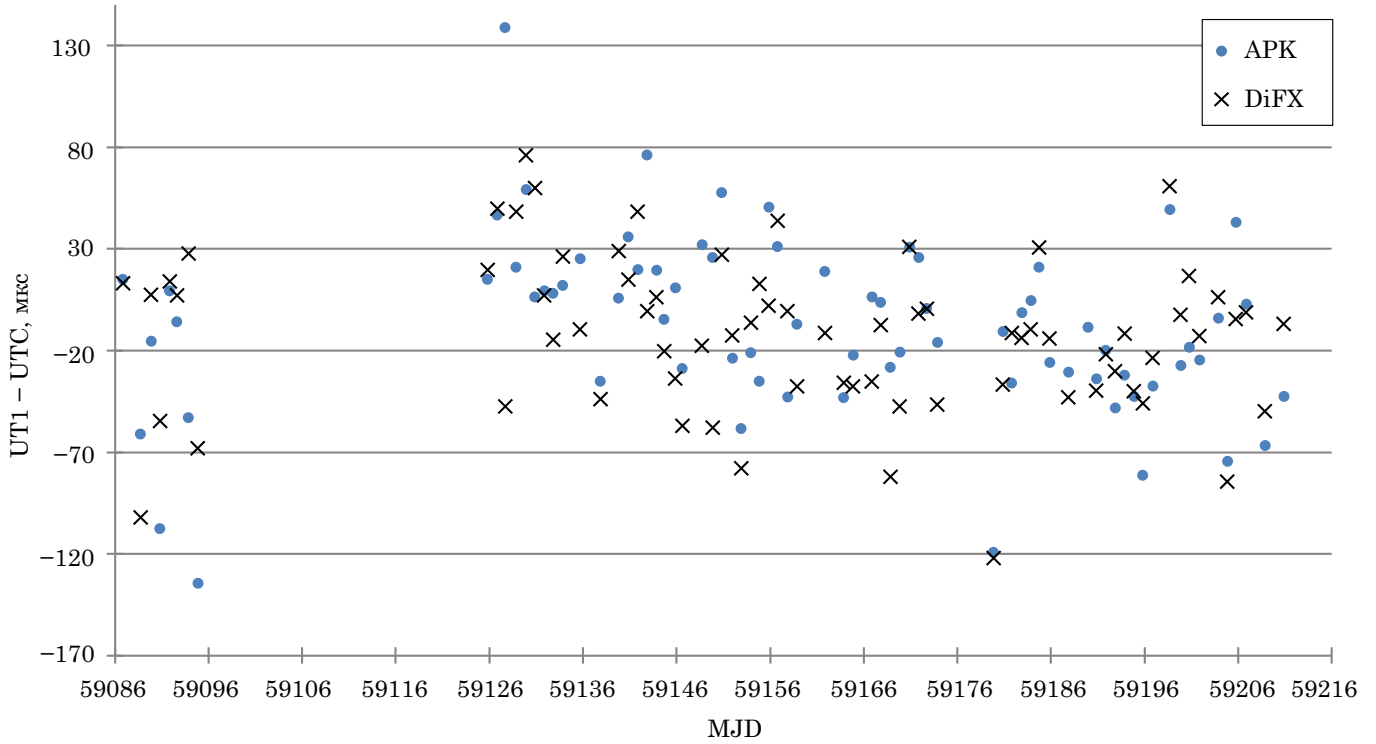


Рис. 3. Оценки  $UT1-UTC$  (отклонения от опорного ряда C04) по данным корреляторов APR и DiFX

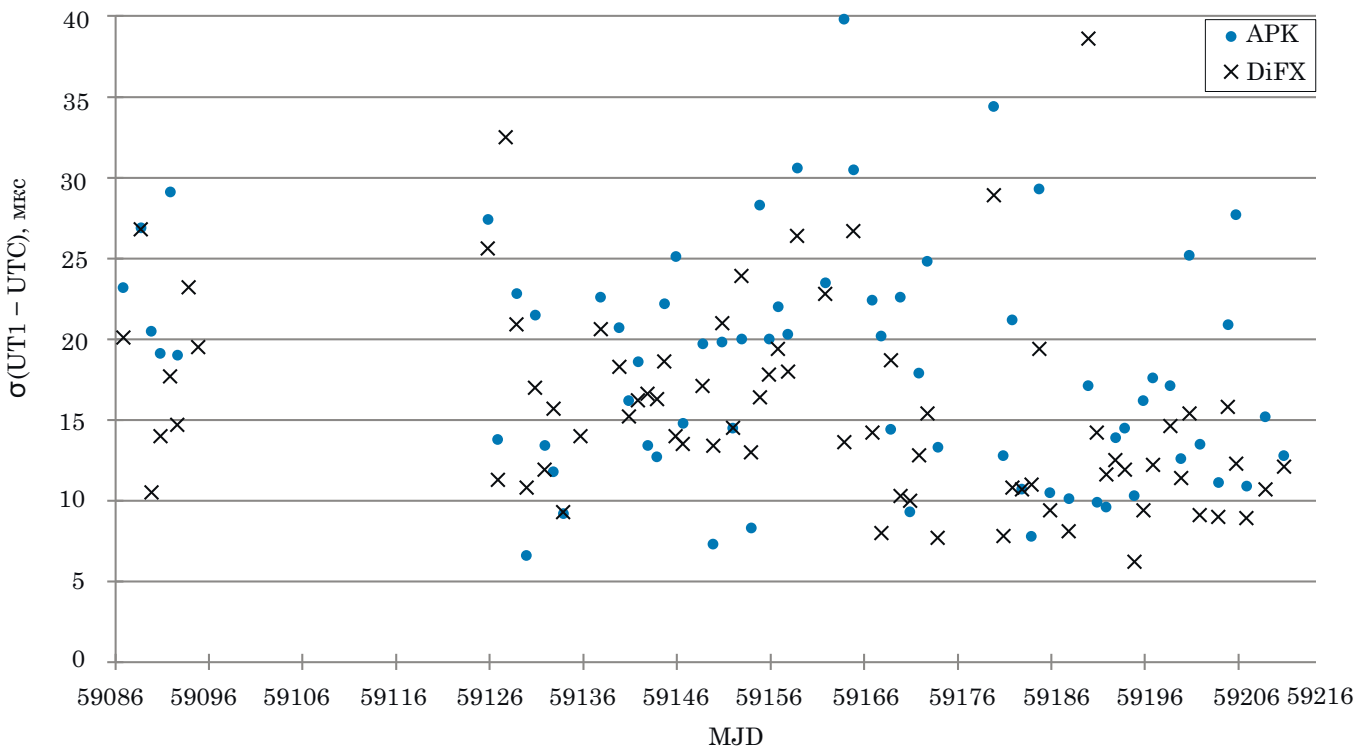


Рис. 4. Формальные ошибки оценок  $UT1-UTC$  по данным корреляторов DiFX и APR



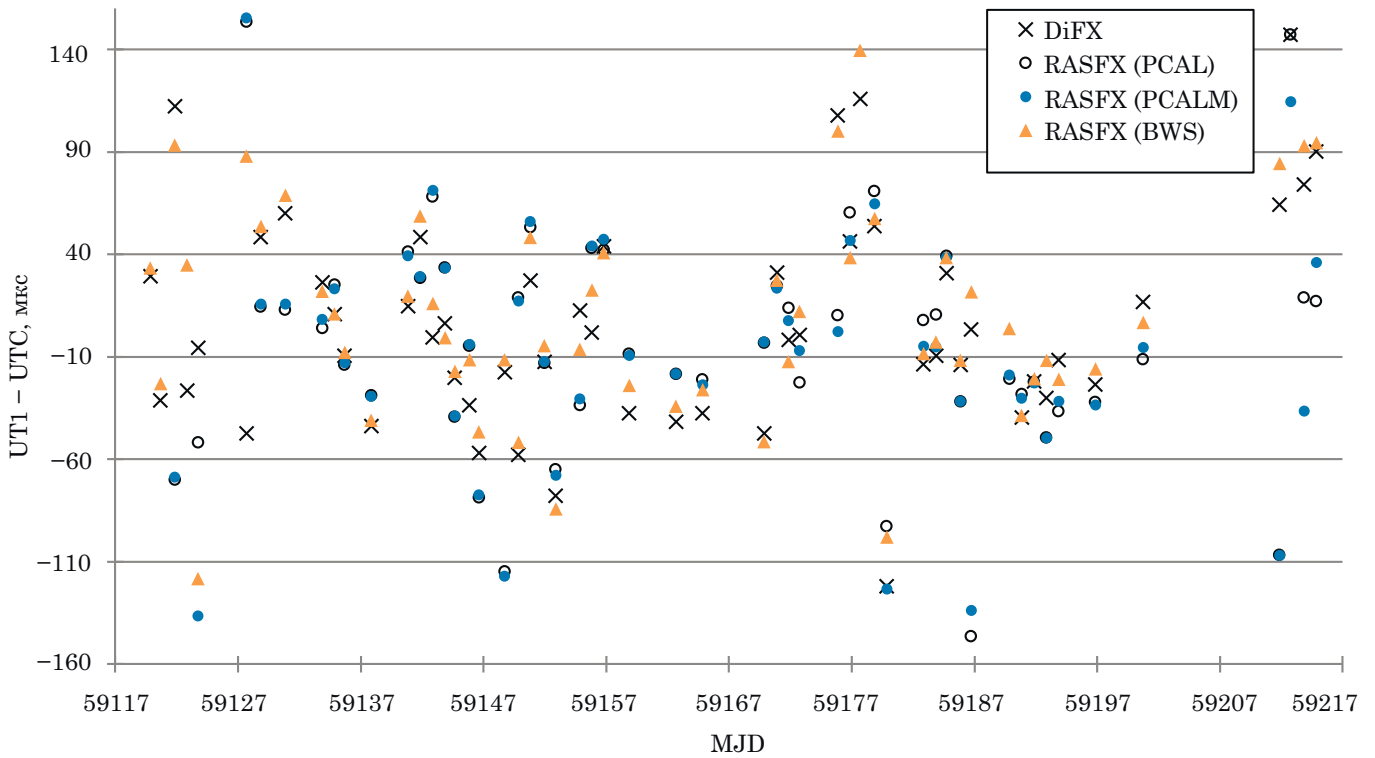


Рис. 5. Оценки  $UT1-UTC$  (отклонения от опорного ряда C04), полученные по данным корреляторов DiFX (PIMA) и RASFX, использовались методы калибровки частотных каналов по калибровочным сканам (BWS), по СФК (PCAL), по СФК с введением скорректированной задержки (PCALM)

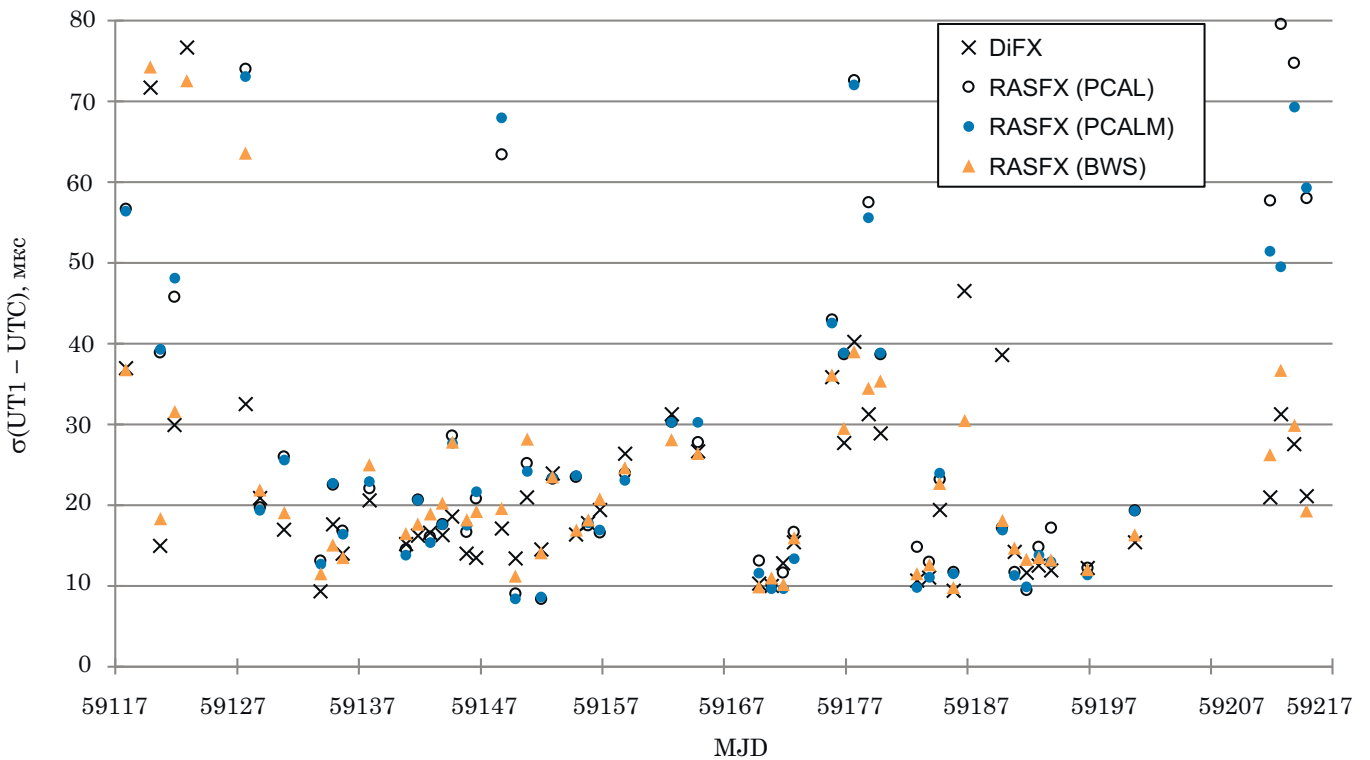


Рис. 6. Формальные ошибки оценок  $UT1-UTC$  (отклонения от опорного ряда C04), полученные по данным корреляторов DiFX (PIMA) и RASFX, использовались методы калибровки частотных каналов по калибровочным сканам (BWS), по СФК (PCAL), по СФК с введением скорректированной задержки (PCALM)

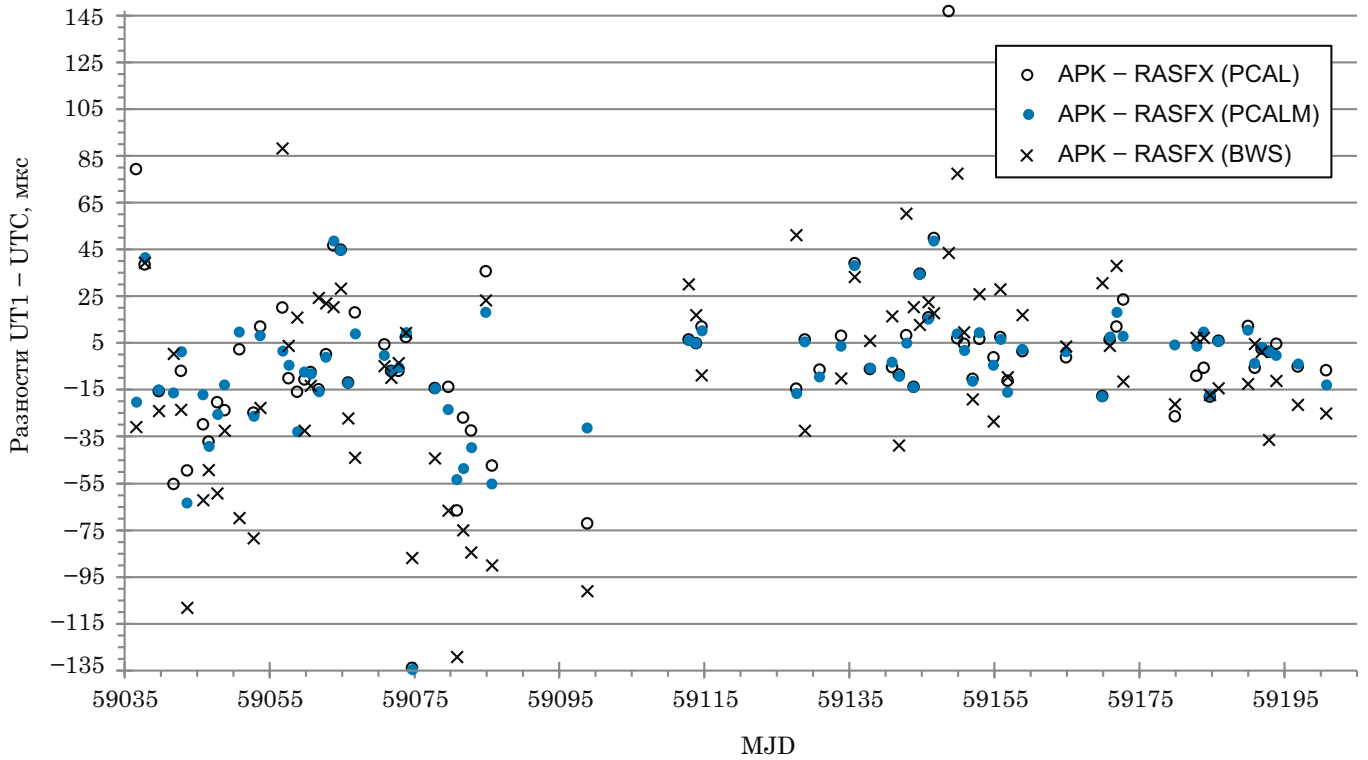


Рис. 7. Разности оценок  $UT1-UTC$  по данным корреляторов RASFX и APK (ARK). В случае RASFX использовались методы калибровки частотных каналов по калибровочным сканам (BWS), по СФК (PCAL), по СФК с введением скорректированной задержки (PCALM)

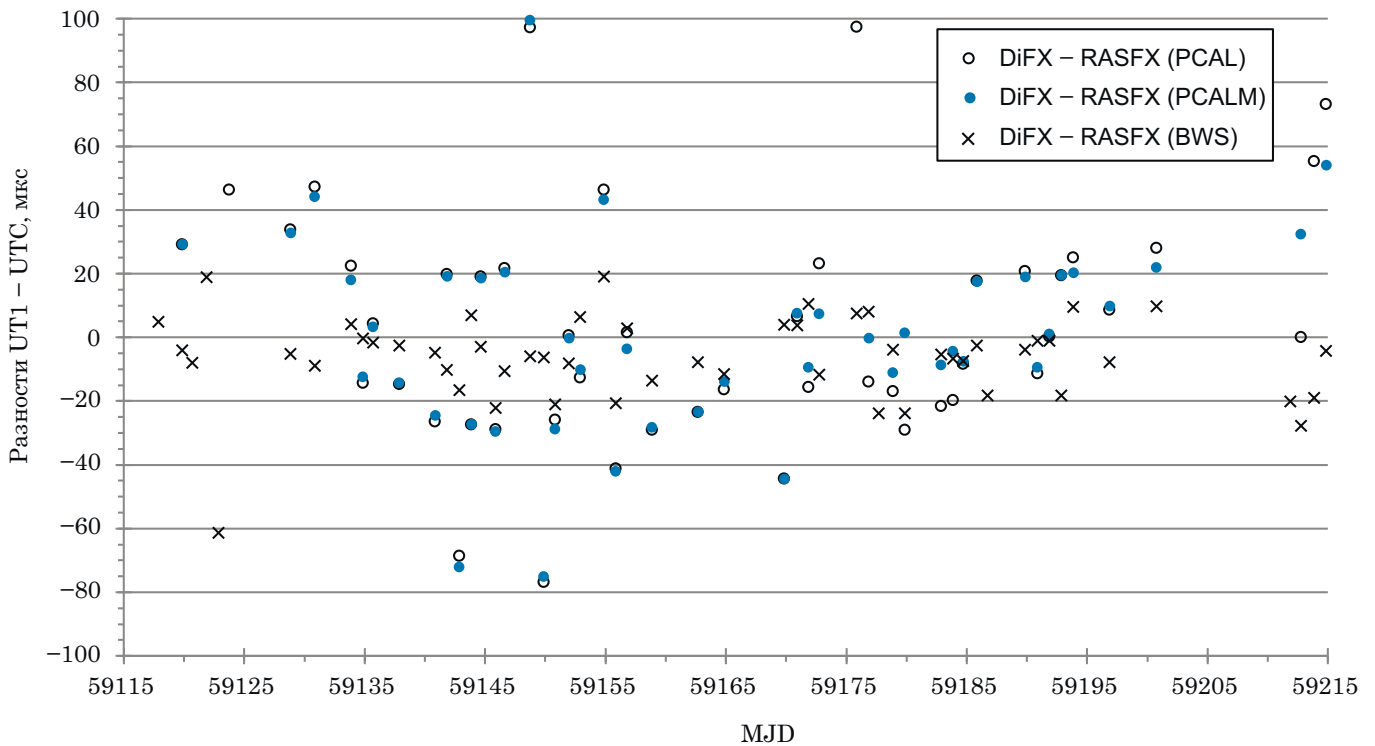


Рис. 8. Разности оценок  $UT1-UTC$  по данным корреляторов RASFX и DiFX (PIMA). В случае RASFX использовались методы калибровки частотных каналов по калибровочным сканам (BWS), по СФК (PCAL), по СФК с введением скорректированной задержки (PCALM)

Таблица 3

Сводка по количеству исключенных каналов при обработке на корреляторе RASFX с помощью СФК

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	S1	S2	S3	S4	S5
Общее количество исключений	5	4	5	10	10	27	20	8	17	7	1	1
Количество сессий, где канал исключался хотя бы один раз	4	4	4	8	8	22	13	7	16	6	1	1
Количество сканов, на которое приходится исключение одного канала*	18	22	18	18	18	18	14	19	20	19	22	22

\* каждая сессия в среднем содержит 22 скана

### Заключение

Разработано постпроцессорное программное обеспечение для обработки часовых сессий наблюдений на радиотелескопах РТ-32 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Синтез полосы частот выполняется с использованием разных методов фазовой калибровки частотных каналов: с использованием исходных или скорректированных СФК, калибровкой по опорным источникам.

Выполнена тестовая обработка 26 часовых сессий РСДБ-наблюдений. Проведен анализ результатов вторичной обработки — оценок всемирного времени UT1–UTC (отклонений от опорного ряда C04) и их формальных ошибок. Аналогичные результаты получены с корреляторов АРК (с его собственным постпроцессорным программным обеспечением) и DiFX с постпроцессорной обработкой пакетом PIMA.

Сравнение показало близость результатов, полученных с использованием рассматриваемых корреляторов. Для большинства сессий оценки всемирного времени, полученные по данным корреляторов RASFX, ARK и DiFX, хорошо согласуются. Хорошо сходятся результаты постпроцессорной обработки с использованием СФК с результатами коррелятора АРК (разброс около 31 мкс), а результаты синтеза с фазовой калибровкой по опорным источникам — с результатами обработки коррелятора DiFX с пакетом PIMA (разброс около 26 мкс). То есть наибольшие отличия между корреляторами, вероятно, вызваны колебаниями фаз СФК, приводящими к искажению результатов.

Разные методы синтеза дополняют друг друга и используются для обработки РСДБ-наблюдений на радиотелескопе РТ-32.

### Благодарность

Авторы выражают благодарность Мельникову А. Е. за предоставление результатов обработки данных коррелятором DiFX и Скурихиной Е. А. за оперативную вторичную обработку.

### Литература

- Вятнов А. В., Иванов Д. В., Милляев А. П. Генератор пикосекундных импульсов системы фазовой калибровки РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2006. Вып. 15. С. 130–139.
- Губанов В. С., Козлова И. А., Суркис И. Ф. Обработка РСДБ-наблюдений: Программный пакет QUASAR. II. Методы анализа данных // Сообщения ИПА РАН. 2002. № 142.
- 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., Суркис И. Ф. Обработка РСДБ-наблюдений: Программный пакет QUASAR. I. Редукция данных наблюдений // Сообщения ИПА РАН. 2002. № 141.
- Зимовский В. Ф., Суркис И. Ф., Кен В. О. Аппаратное обеспечение шестистанционного коррелятора ИПА РАН // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 61–64.
- Носов Е. В. Видеоконвертер с цифровой обработкой сигналов на видеочастотах для систем преобразования сигналов РСДБ-телескопа // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 99–105.
- Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Аппаратно-программное обеспечение коррелятора АРК // Труды ИПА РАН. 2009. Вып. 20. С. 223–230.
- Томпсон А. Р., Моран Дж. М., Свенсон Дж. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: Физматлит, 2003. 331 с.
- Deller A. T., Tingay S. J., Bailes M., West C. DiFX: A software correlator for very long baseline interferometry using multi-processor computing environments. Centre for Astrophysics and Supercomputing, Swinburne University of Technology, Australia. 2007. С. 1–41. arXiv:astro-ph/0702141.
- Kondo T., Takefuji K. An algorithm of wideband bandwidth synthesis for geodetic VLBI // Radio Sci. 2016. no. 51. P. 1686–1702.
- Surkis I. F., Ken V. O., Kurdubova Y. L., et al. The RASFX VGOS GPU Based Software Correlator // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 123–126.
- Takahashi F., Takahashi Y., Kondo T., Koyama Y. Very Long Baseline Interferometer. 2000. 88 с.
- VLBI processing software PIMA. [Электронный ресурс]. URL: <http://astrogeo.org/pima/> (дата обращения: 15.11.2022)