

## **Программные корреляторы на графических процессорных устройствах. Результаты обработки РСДБ-наблюдений радиотелескопов РТ-13**

**© И. Ф. Суркис, Д. В. Журавов, В. Ф. Зимовский, В. О. Кен, Я. Л. Курдубова, В. Ю. Мишин, Н. А. Мишина, В. А. Шантырь**

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В 2012–2016 гг. в ИПА РАН были разработаны программные корреляторы для обработки наблюдений РСДБ-сети малых антенн [1, 2, 4]. Были созданы корреляторы для центров корреляционной обработки РАН и ГМЦ ГСВЧ.

Программные FX корреляторы функционируют на процессорных кластерах гибридной блейд-серверной архитектуры. Каждый блейд-сервер содержит два 8-ядерных процессора корпорации Intel и два графических ускорителя Tesla K20. Выполнение наиболее трудоемких вычислений — выделение сигналов генераторов пикосекундных импульсов, побитовая перепакровка данных, быстрое преобразование Фурье, перемножение спектров — осуществляется на графических ускорителях.

С начала 2015 г. корреляторы использовались для обработки тестовых наблюдений на радиотелескопах РТ-13 [3]. До настоящего времени успешно обработано свыше 2700 сессий наблюдений.

Проведены эксперименты по обработке сигналов принятых приемниками с линейными и круговыми поляризациями, обработки наблюдений с мобильной станцией и наблюдений космических аппаратов ГЛОНАСС.

**Ключевые слова:** РСДБ, коррелятор, GPU, РТ-13.

### **Введение**

С 2012 по 2016 г. в рамках работ по ОКР «Корреляторы» в ИПА РАН велась разработка программных РСДБ-корреляторов, предназначенных для обработки наблюдений новых радиотелескопов РТ-13 [1].

Было разработано программное обеспечение, закуплено и смонтировано аппаратное обеспечение. Были созданы два коррелятора: Кор-

релятор для центра корреляционной обработки РАН (Коррелятор РАН) и Коррелятор для центра корреляционной обработки ГМЦ ГСВЧ (Коррелятор ГМЦ ГСВЧ).

Корреляторы способны обрабатывать сигналы, регистрируемые на станциях со скоростью до 16 Гбит/с, в четырех частотных каналах с шириной полосы пропускания 1024 МГц или восьми частотных каналах с шириной полосы пропускания 512 МГц. Квантование сигналов — двухбитовое. Коррелятор РАН способен в режиме квази-реального времени обрабатывать данные 6 станций, приходящие на коррелятор со скоростью 16 Гбит/с от каждой станции, суммарный входной поток коррелятора — 96 Гбит/с. Коррелятор ГМЦ ГСВЧ способен обрабатывать данные с суммарным входным потоком 32 Гбит/с, например, данные 4 станций, приходящие на коррелятор со средней скоростью по 8 Гбит/с.

В случае регистрации сигналов в двух поляризациях коррелируется каждая поляризация одной станции с каждой поляризацией другой станции.

В стандартном режиме обработки корреляторы для каждой базы вычисляют по 2048 отсчетов кросскорреляционных спектров для всех частотных каналов.

В корреляторах реализован алгоритм обработки FX (Fourier and Correlation — преобразование Фурье и знак перемножения спектров: корреляция), позволяющий увеличивать разрешение кросскорреляционных спектров без существенного увеличения объема вычислений. Коррелятор является программным, использующим в качестве аппаратного обеспечения только серийно выпускающиеся вычислительные устройства.

Главной особенностью новых корреляторов является применение графических ускорителей корпорации NVIDIA на основе графических процессорных устройств (ГПУ, GPU — Graphics Processing Unit) для реализации наиболее трудоёмких вычислений — быстрого преобразования Фурье (БПФ), перемножения и суммирования спектров, сопровождения сигналов по доплеровской фазе, выделения сигналов фазовой калибровки (СФК) и битовых операций над исходными данными РСДБ-сигналов. Реализация этих операций на ГПУ позволила существенно сократить состав аппаратного обеспечения, требуемого для построения коррелятора.

Аппаратным обеспечением корреляторов являются гибридные блейд-серверные кластеры. Каждый сервер кластера содержит по два

процессора Intel E5-2670 (8 ядер, 2.6 ГГц тактовая частота) и по два графических ускорителя NVIDIA Tesla K20. Блейд-сервера содержат по 64 Гбайта оперативной памяти, а сервера в 19" исполнении — 256 Гбайт. Между собой серверы соединены локальной сетью стандарта InfiniBand на коммутаторах Mellanox, позволяющих одновременно передавать до 56 Гбит/с между любыми двумя абонентами.

Кластер Коррелятора РАН содержит 40 вычислительных серверов, Коррелятора ГМЦ ГСВЧ — 14.

Производится параллельная конвейерная обработка РСДБ-данных на наборе серверов. Сервера с расширенной до 256 Гбайт оперативной памятью осуществляют прием данных и первый этап обработки — декодировку данных, сопровождение сигналов по задержкам, в ГПУ производятся выделение сигналов ГПИ и битовая перепакровка данных. Потом данные передаются на остальные сервера, в ГПУ которых осуществляется сопровождение сигналов по доплеровским фазам, быстрое преобразование Фурье, вычисление кросскорреляционных и автокорреляционных спектров.

На ядре процессора одного из серверов запущен процесс, осуществляющий управление обработкой, запись и сохранение промежуточных результатов (кросскорреляционных спектров).

Параллельно процессорной обработке выполняется постпроцессорная обработка, в ходе которой из полученных кросскорреляционных функций (спектров мощности от частоты и времени) вычисляются значения задержек, частот интерференции и отношений сигнал/шум.

Работа оператора коррелятора осуществляется через графический пользовательский интерфейс, внешний вид которого приведен на рис. 1.

При разработке программного обеспечения коррелятора использованы средства:

- C, C++ , как основные языки программирования;
- MPI (Message Passing Interface) для разработки приложения, функционирующего на большом количестве серверов и ядер;
- CUDA (Compute Unified Device Architecture) для программирования GPU;
- Qt для разработки пользовательского интерфейса;
- Fortran для предвычисления задержек.

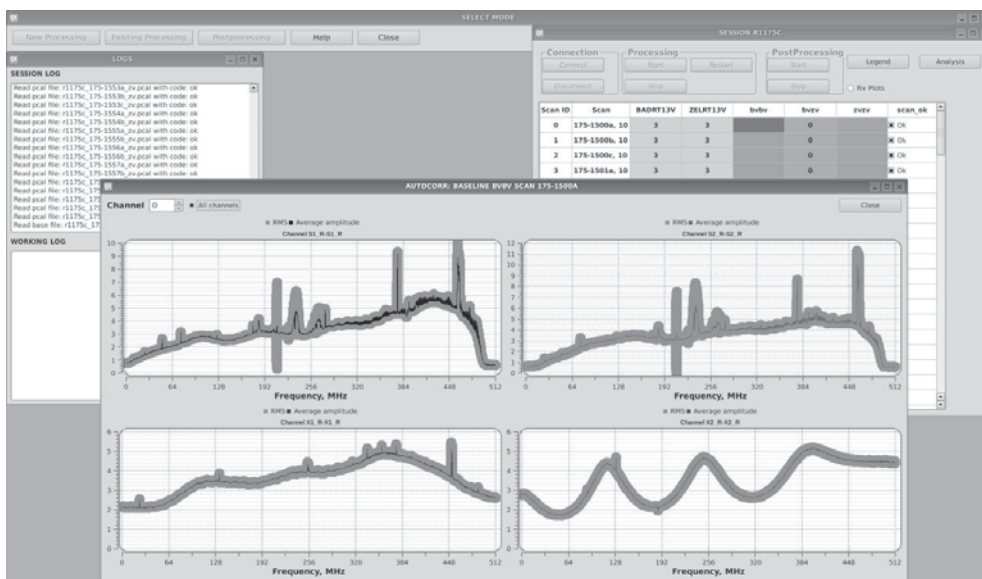


Рис. 1. Пример пользовательского интерфейса коррелятора

## Метрологические испытания программного обеспечения корреляторов

Точность вычисления групповой задержки коррелятором зависит от соотношения сигнал/шум интерферометра, определяемого характеристиками радиотелескопов, плотности потока излучения источника и длительности его наблюдения. Однако коррелятор не должен добавлять существенных ошибок в определяемую задержку. В частности, при ширине полосы пропускания частотного канала 512 МГц и отношении сигнал/шум 108, коррелятор должен вычислять задержку с точностью не более 10 пс.

Для проверки точностных характеристик коррелятора совместно с ФГУП «ВНИИФТРИ» были выполнены метрологические исследования программного обеспечения корреляторов. Метод аттестации — программная генерация тестовых сигналов с заданными свойствами (заранее известной задержкой, введённой при их формировании) и их обработка коррелятором. В результате было установлено, что среднеквадратическое отклонение (СКО) определения групповых задержек коррелятором равно 4.4 пс; полученное значение находится в пределах заданного в техническом задании 10 пс.

Получено свидетельство о метрологической аттестации программного обеспечения.

## Обработка наблюдений радиотелескопов РТ-13

В конце 2014 г. было изготовлено, установлено и протестировано аппаратное обеспечение Коррелятора РАН, отлажено программное обеспечение. Весной 2015 г., по мере окончания строительства радиотелескопов РТ-13 в обсерваториях Зеленчукская и Бадары, были проведены тестовые наблюдения [3] в диапазоне  $X$  (длина волны 3.5 см) с шириной полосы пропускания частотного канала 512 МГц. Обработка наблюдений проводилась на Корреляторе РАН. Были получены корреляционные отклики.

С июня 2015 г. на интерферометре РТ-13 Зеленчукская–Бадары началось проведение регулярных наблюдений с целью определения Всемирного времени. На Корреляторе РАН осуществлялась первичная обработка наблюдений. Коррелятором формировались выходные файлы стандарта NGS, по которым в ИПА РАН были получены поправки Всемирного времени UT1-UTC.

Интенсивность проведения и обработки наблюдений были увеличены в ноябре 2015 г. С 4 по 24 ноября 2015 г. в ходе проведения Государственных испытаний по ОКР «Квазар-М» проводилось и обрабатывалось до 4 сессий наблюдений в сутки.

После окончания Государственных испытаний продолжились проведение и обработка сессий наблюдений; всего за 2015 г. было обработано 137 сессий наблюдений.

С весны 2016 г., после расширения пропускной способности каналов связи от обсерваторий до коррелятора, интенсивность проведения и обработки наблюдений была увеличена. В сутки проводится 5 сессий в диапазонах  $S/X$  длительностью 1 час и одна сессия в диапазонах  $S/X/Ka$  длительностью 30 минут (диапазон  $S$  — длина волны 13 см,  $X$  — длина волны 3.5 см,  $Ka$  — длина волны 1 см. Сессии в диапазонах  $S/X$  содержат до 125 наблюдений длительностью по 10 секунд, в диапазонах  $S/X/Ka$  — до 50 наблюдений длительности от 10 до 60 секунд. Периодически проводятся и обрабатываются сессии наблюдений в диапазонах  $S/X$  длительностью 24 часа.

Всего до июня 2017 г. было обработано 2300 сессий часовой длительности в диапазонах  $S/X$ , 14 сессий суточной длительности в диапазонах  $S/X$  и 460 сессий в диапазонах  $S/X/Ka$ .

Все наблюдавшиеся сессии были успешно обработаны Коррелятором РАН. По данным коррелятора в Центре обработки и анализа данных РАН получен ряд поправок Всемирного времени UT1-UTC (отклонений от опорного ряда EOP C04) [6].

В 2016 г. был создан Коррелятор ГМЦ ГСВЧ. В октябре-ноябре 2016 г. на время опытной эксплуатации Коррелятор ГМЦ ГСВЧ был подключен к каналу связи с пропускной способностью 1 Гбит/с, по которому на коррелятор были переданы данные 80 сессий наблюдений. Все сессии наблюдений были успешно обработаны Коррелятором ГМЦ ГСВЧ.

### **Обработка сигналов, принятых приемниками с линейными поляризациями**

3 марта 2017 г. был проведен сеанс RU0684 на базе Бадары-Зеленчукская на радиотелескопах РТ-13. Особенностью данного сеанса было использование на одной базе приемников с разными типами поляризации принимаемого излучения. На радиотелескопе РТ-13 Бадары установлен трехдиапазонный приемник с регистрацией сигналов с круговыми правой и левой поляризациями (RCP, right circular polarization и LCP, left circular polarization), а в Зеленчукской — макет сверхширокополосного приемника с линейными горизонтальной и вертикальной (HLP, horisontal linear polarization и VLP, vertical linear polarization). В процессе сеанса были записаны 3 скана в режиме регистрации одного частотного канала в  $X$ -диапазоне (несущая частота 8476 МГц), полоса регистрации — 512 МГц.

В результате процессорной обработки на корреляторе были получены кросскорреляционные спектры для всех сканов во всех четырех сочетаниях поляризаций.

Для получения синтезированного кросскорреляционного отклика необходимо сложить кросскорреляционные спектры с учетом фазовой задержки в каждом приемном тракте.

Сигнал, регистрируемый антенной с RCP, связан с линейными компонентами  $H$ ,  $V$  соотношением:

$$E^{RCP} = E^H e^{i\delta} + E^V e^{-i\delta},$$

где  $\delta$  — половинный угол между осями, сформированными линейными поляризациями (при ортогональности осей  $\delta = 45^\circ$ ). Таким образом, для решения задачи синтеза достаточно осуществить коррекцию фазы одного из кросс-спектров путем комплексного поворота на фазовую задержку.

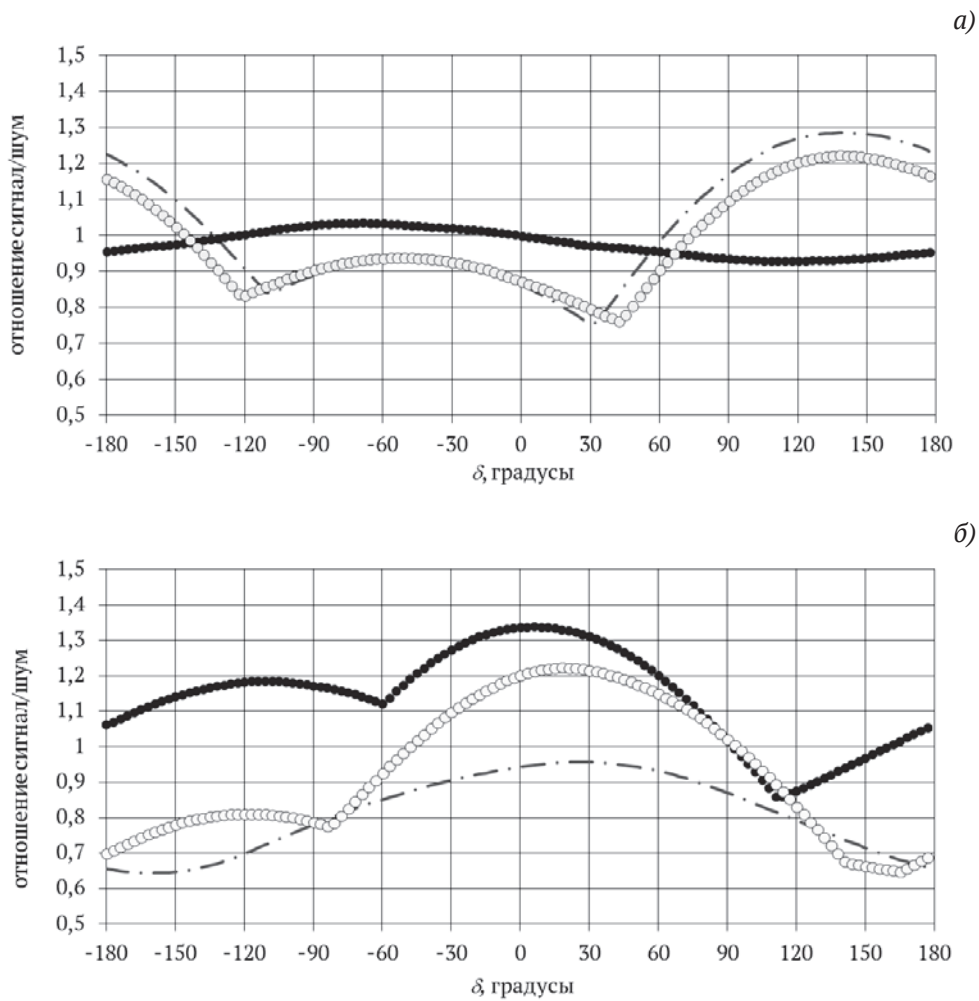


Рис. 2. Синтезированные отклики для разных значений  $\delta$  для трех сканов 072-1332 (темная линия), 072-1334 (пунктирная линия), 072-1337 (светлая линия). По оси ординат — отношение сигнал/шум: а) корреляция с правой круговой поляризацией; б) корреляция с левой круговой поляризацией

Однако для корректировки фазовых задержек необходимо знать задержки в тракте от облучателя до ответвителя (вычисляются при лабораторных испытаниях) и от ответвителя до системы регистрации (по сигналу фазовой калибровки). Ввиду отсутствия данных значений был разработан программный фазовый генератор, сдвигающий один из кросскорреляционных спектров в диапазоне  $\delta \in [-180^\circ, 180^\circ]$  с шагом 3 градуса. На каждой итерации поворота вычислялось отношение сиг-

нал/шум и определялся угол, соответствующий его максимуму (см. рис. 2).

В результате данной процедуры были получены синтезированные отклики, позволившие получить отношение сигнал/шум почти на том же уровне, как если бы сигнал был зарегистрирован в круговых поляризациях.

### **Проверка работоспособности коррелятора при обработке наблюдений мобильной станции**

В 2017 г. в ИПА РАН прорабатывалась возможность использования мобильной РСДБ-станции для построения координатных систем. В том числе был рассмотрен вопрос корреляционной обработки данных интерферометра с мобильной станцией, причем априорные координаты мобильной станции были заданы с низкой точностью (ошибка до 6 км), а водородный стандарт мобильной станции был плохо синхронизован стандартами времени (ошибка до 1 мкс). Был проведен эксперимент по обработке таких наблюдений.

Для эксперимента была использована сессия наблюдений РТ-13 в диапазонах  $S/X$ , с введением ошибки в каталог координат РТ-13 Бада-ры коррелятора и закруглением данных синхронизации водородных мазеров. В результате ожидалось смещение задержки до 20 мкс относительно ожидаемой и частоты интерференции до 12 Гц.

Проведена обработка коррелятором первых нескольких сканов наблюдений в режиме 65536 отсчетов кросскорреляционной функции и периодом накопления 32 мс (стандартный режим обработки 2048 отсчетов функции с периодом накопления 62.5 мс). В данном режиме ширина корреляционного окна составила 128 мкс по задержке (при частоте квантования 1024 МГц) и 31.25 Гц по частоте интерференции.

Были получены «грубые» корреляционные отклики (с точностью 2 нс по задержке и 0.1 Гц по частоте интерференции), которых было достаточно для корректирования координат мобильной станции в каталоге коррелятора. Затем была выполнена переобработка данных коррелятором в обычном режиме, сформирован выходной NGS файл, выполнен анализ данных пакетом вторичной обработки «Quasar» и оценены точные поправки к координатам станции.

В результате были восстановлены исходные координаты с сантиметровой точностью.



### Обработка сигналов КА «ГЛОНАСС»

В 2017 г. были проведены пробные наблюдения космических аппаратов «ГЛОНАСС» на радиотелескопах РТ-32. Целью работы являлось изучение возможностей РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» по уточнению параметров системы «ГЛОНАСС».

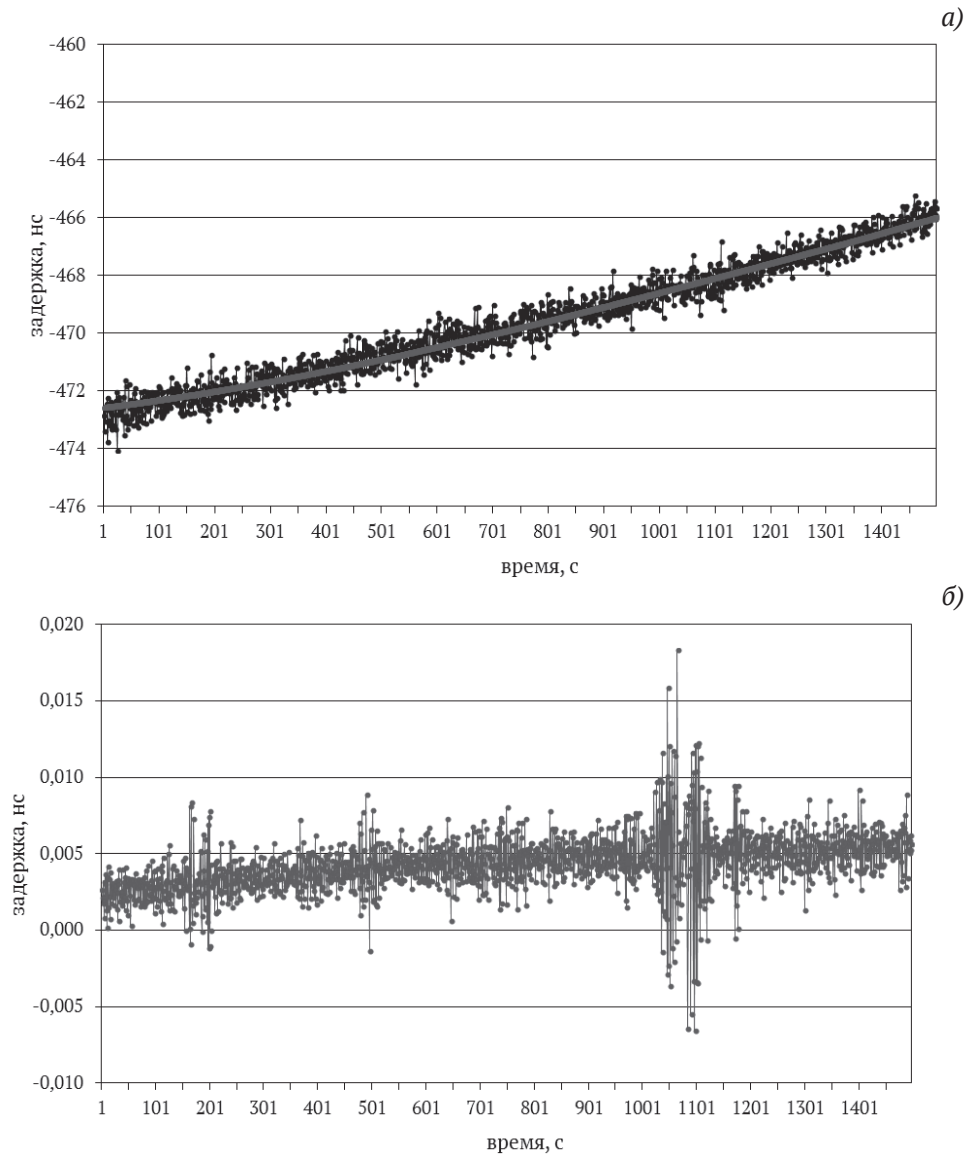


Рис. 3. Задержки по наблюдениям КА «ГЛОНАСС», м. а) амплитудная (черные точки) и фазовая (серые точки) задержки; б) первые разности фазовых задержек

Наблюдения проводились на частоте 1.6 ГГц, ширина полосы пропускания частотного канала составляла 16 МГц. Наблюдения проводились длинными непрерывными сканами с длительностью десятки минут.

Обработка проводилась на Корреляторе РАН. Определялись «грубая» амплитудная и «точная» фазовая задержки. Примеры определения задержки приведены на рис. 3.

Таким образом, было экспериментально выяснено, что можно получать задержки с миллиметровой точностью. Однако в настоящее время велики систематические ошибки определения задержек. Разработка алгоритмов вычисления задержек КА продолжается.

### **Заключение**

Созданные в ИПА РАН программные корреляторы на GPU показали высокую надежность и эффективность при обработке РСДБ-наблюдений радиотелескопов РТ-13, а также обработки наблюдений ГЛОНАСС радиотелескопов РТ-32. В течение двух лет успешно проводится обработка наблюдений по определению поправки Всемирного времени UT1-UTC, по данным коррелятора в Центре обработки и анализа данных РАН получен ряд поправок Всемирного времени UT1-UTC. Проведены эксперименты по синтезу откликов наблюдений с линейными и круговыми поляризациями, определению координат мобильных станций и вычислению задержек по наблюдениям КА «ГЛОНАСС».

### **Литература**

1. 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.: Наука, 2013. — Вып. 27. — С. 216–221.
2. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О., Мельников А. Е., Мишин В. Ю., Соколова Н. А., Шантырь В. А. Программный коррелятор для РСДБ сети малых антенн // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2012. — Вып. 24. — С. 172–177.
3. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Шантырь В. А., Кен В. О., Мельников А. Е., Мишин В. Ю., Соколова Н. А., Павлов Д. А. Характеристики и структура программного РСДБ-коррелятора для обработки наблюдений сети малых антенн // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2013. — Вып. 27. — С. 299–305.
4. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Курдубова Я. Л., Мишин В. Ю., Мишина Н. А., Шантырь В. А. Программный коррелятор для обработки наблюдений РСДБ-сети малых антенн. Результаты первых испытаний // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2016. — Вып. 36. — С. 83–89.

5. Surkis I., Ken V., Kurdubova Y., Melnikov A., Mishina N., Mishin V., Shantyr V. IAA VGOS GPU-based Software Correlator: current status and broadband processing // Proceedings of the 22nd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting. 18-21 May 2015. Ponta Delgada, Azores. / R. Haas and F. Colomer (eds.), 2015. — P. 40–42.

6. Иванов Д. В., Ипатов А. В., Ильин Г. Н., Смоленцев С. Г., Гаязов И. С., Мардышкин В. В., Федотов Л. В., Стэмковский В. Г., Вытнов А. В., Сальников А. И., Суркис И. Ф., Михайлов А. Г., Маршалов Д. А., Курдубов С. Л., Мельников А. Е., Безруков И. А., Носов Е. В., Кен В. О. Первые результаты определения всемирного времени по наблюдениям двухэлементного радиоинтерферометра нового поколения // «Метрология времени и пространства». Материалы VIII международного симпозиума. — Санкт-Петербург–Менделеево.: ВНИИФТРИ, 2016. — С. 74–79.

### **GPU Based Software Correlators. VLBI Processing Results Using Observations of RT-13 Telescopes**

**I. F. Surkis, V. O. Ken, Y. L. Kurdubova, N. A. Mishina, V. Y. Mishin,  
V. A. Shantyr, D. V. Zhuravov, V. F. Zimovsky**

The paper describes the main software and hardware features of the software correlators designed and developed in the IAA RAS from 2012 to 2016. It shows the results of the most recent metrological tests and UT1 determinations.

Our current efforts to develop the correlators are focused on processing the GLONASS spacecraft signals and the circle- and linear-polarized signals from the receivers which have been developed in the IAA RAS. Also, a number of preliminary tests to process the VLBI data have been made using a simulated mobile telescope. Results are given in the paper.

**Keywords:** VLBI, GPU, RT-13, software correlator.