

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Кен Войцех Олегович

**Корреляционная обработка РСДБ-данных в режиме
квазиреального времени на графических процессорных
устройствах**

01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте прикладной астрономии Российской Академии наук

Научный руководитель: Суркис Игорь Феликсович,
кандидат физико-математических наук, стар-
ший научный сотрудник ИПА РАН

Официальные оппоненты: Дугин Николай Александрович
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Научно-
исследовательского радиофизического
института Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный иссле-
довательский Нижегородский государствен-
ный университет им. Н. И. Лобачевского»
(НИРФИ ННГУ)

Андрианов Андрей Сергеевич
кандидат физико-математических наук,
высококвалифицированный научный сотруд-
ник Астрокосмического центра учреждения
Российской Академии наук Физического ин-
ститута им. П. Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН)

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный уни-
верситет

Защита состоится "18" мая 2021 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертаци-
онного совета Д 002.067.01 при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте прикладной астрономии Российской Академии
наук по адресу: 191187, г. Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государ-
ственного бюджетного учреждения науки Института прикладной астрономии
Российской Академии наук и на сайте

<http://iaaras.ru/about/dissertational-board/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Бондаренко Ю.С.

Актуальность темы

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) является одним из основных методов радиоастрономических исследований для решения как проблем астрофизики и звездной астрономии, так и прикладных задач по созданию высокоточной единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО), позволяющей проводить измерения координат на поверхности Земли с субсантиметровой точностью, осуществлять временные измерения в единой шкале времени с пикосекундной точностью, а также определять параметры вращения Земли (ПВЗ) и решать навигационные задачи в ближнем и дальнем космосе. Главными объектами РСДБ-наблюдений являются галактические и внегалактические радиоисточники, квазары, ядра галактик. В последние годы метод РСДБ также применяется для мониторинга координат искусственных спутников Земли (ИСЗ). Определение ПВЗ решается методами РСДБ с начала 1990-х гг.

В середине 2000-х гг. в научном сообществе были сформулированы требования к обеспечению точности результатов РСДБ-наблюдений, а также задачи и предложения по основным направлениям формирования РСДБ-системы нового поколения VLBI2010 (в 2014 г. переименована в VGOS). Согласно требованиям VGOS-интерферометр должен содержать быстроповоротные радиотелескопы с диаметром зеркала 10–15 м и обладать способностью проводить непрерывные наблюдения с большой плотностью (порядка 120 сканов в час). Такие характеристики VGOS-сети должны дать новое качество исследований: определение внутрисуточных вариаций ПВЗ, получение информации о внутреннем строении Земли, исследование внегалактических объектов (квазаров). Необходимая чувствительность VGOS-сети обеспечивается, в основном, за счет увеличения ширины полосы пропускания частотных каналов с 16 до 512 МГц (в перспективе 1024 МГц). Суммарный поток данных от одного телескопа составляет 16 (в перспективе 32) Гбит/с. При паузе между сканами равной их длительности суммарный средний поток данных на входе коррелятора достигает 16 Гбит/с.

После проведения РСДБ-наблюдений данные передаются в центр корреляционной обработки, где в дальнейшем обрабатываются специализированным устройством — коррелятором. Коррелятор вычисляет взаимно-корреляционные спектры, по которым определяются параметры корреляционного отклика. Одним из основных измеряемых параметров при радиоинтерферометрических наблюдениях радиоисточников является задержка (или запаздывание) τ — разность моментов времени прихода одного и того же волнового фронта радиоизлучения на пару радиотелескопов интерферометра. Помимо задержки, интерес представляют главным образом значения частоты интерференции F_i (т.е. скорость изменения задержки) и отношение сигнал-шум (ОСШ, или SNR).

На момент начала работы существовавшие корреляторы были построены с использованием либо интегральных схем специального назначения, либо программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), либо с использованием процессоров общего назначения (ЦПУ, или CPU) в составе вычислительных кластеров. Несмотря на их хорошую масштабируемость по числу станций и гибкость настроек, в связи с ростом числа радиотелескопов, существенным расширением полос регистрации на VGOS-совместимых интерферометрах и увеличением количества РСДБ-сеансов (в перспективе ожидалось проведение непрерывных сеансов) корреляторы перестали удовлетворять требованиям по оперативной обработке радиоастрономических наблюдений.

Существенно повысить скорость обработки данных РСДБ-наблюдений в интересах фундаментального координатно-временного обеспечения (в том числе в интересах системы ГЛОНАСС) можно путем переноса трудоемких и хорошо параллелизуемых алгоритмов, таких как сопровождение по доплеровскому смещению частоты, быстрое преобразование Фурье (БПФ), коррекция дробного сопровождения по задержке, перемножение спектров, выделение сигнала фазовой калибровки (СФК), на процессоры, архитектура которых специально разработана для решения такого класса задач. К ним, в частности, относятся графические процессорные устройства (ГПУ). На момент начала работы наиболее предпочтительной для использования считалась разработанная

компанией Nvidia программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений CUDA, позволяющая существенно увеличить вычислительную производительность компьютерных систем благодаря использованию ГПУ, что открыло возможность применять их при реализации методов корреляционной обработки РСДБ-сигналов.

Несмотря на широкое внедрение технологий обработки данных с помощью CUDA в начале 2010-х гг., в научной литературе практически не были освещены вопросы проектирования РСДБ-корреляторов с использованием ГПУ. В частности, оставались неясными ожидаемый выигрыш производительности по сравнению с ЦПУ и потери чувствительности коррелятора вследствие использования упрощенных функций и оптимизаций. Не были разработаны и адаптированные к ГПУ корреляционные алгоритмы, решающие упомянутые выше трудоемкие задачи. Также в литературе не освещены в достаточной мере проблемы экспериментального определения точности вычисляемых параметров корреляционного отклика. Как правило, вновь создаваемые корреляторы сравниваются с ранее разработанными путем сличения вычисленных задержек и рядов ПВЗ; при этом методики оценки в публикациях практически не отражены.

Цель и задачи работы

Диссертационная работа направлена на решение важной научно-технической задачи повышения производительности корреляционной обработки в интересах радиоастрономии и развития методов РСДБ квазиреального времени. **Цель диссертационной работы** — разработка методов и алгоритмов высокоскоростного вычисления взаимокорреляционных функций с использованием графических процессорных устройств в РСДБ-корреляторе, позволяющих проводить обработку РСДБ-сеансов с участием VGOS-совместимых радиотелескопов в режиме квазиреального времени, и определение его точностных характеристик.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные задачи:

- провести анализ современного состояния работ по созданию корре-

ляторов для астрономических радиоинтерферометров и обосновать требования к алгоритмам обработки;

- исследовать ключевые особенности аппаратно-программной модели CUDA и архитектуры ГПУ для определения возможности реализации быстрого FX-алгоритма корреляционной обработки;
- разработать методику выполнения операций сопровождения по доплеровскому смещению частоты, БПФ, коррекции дробного сопровождения по задержке, перемножения и усреднения спектров на ГПУ, обеспечивающих достаточную производительность для соответствия требованиям стандарта VGOS;
- исследовать методы выделения сигнала фазовой калибровки и разработать программный модуль, реализующий оптимальное выделение сигнала на ГПУ;
- провести анализ точностных характеристик работы коррелятора на ГПУ путем обработки широкополосных сигналов с заранее известными (детерминированными) параметрами;
- исследовать влияние точности эфемеридных моделей на точность вычисляемых параметров корреляционного отклика для подтверждения готовности коррелятора обрабатывать данные, полученные по наблюдениям квазаров и ИСЗ;
- провести сравнение результатов обработки РСДБ-сеансов коррелятором на ГПУ с результатами обработки применявшегося ранее коррелятора для подтверждения качества измеряемых параметров.

Научная новизна работы

- Впервые в мире реализованы на графических процессорных устройствах корреляционные FX-алгоритмы обработки РСДБ-данных с потоками данных до 16 Гбит/с от станции. Это позволяет проводить непрерывные круглосуточные РСДБ-наблюдения и получать результаты в режиме квазиреального времени.

- Разработана уникальная методика тестирования коррелятора путем создания программного макета интерферометра.

Практическая ценность

- Создан Программный коррелятор РАН, предназначенный для обработки непрерывных круглосуточных РСДБ-наблюдений с целью определения внутрисуточных колебаний параметров вращения Земли, построения изображений радиоисточников и других исследований в области астрофизики и астрометрии.
- Достигнута производительность коррелятора, позволяющая обрабатывать РСДБ-данные от шести радиотелескопов стандарта VGOS в режиме квазиреального времени с суммарным потоком данных 96 Гбит/с.
- Программный коррелятор РАН используется при обработке РСДБ-сеансов модернизированного радиоинтерферометра РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» для измерения поправок к Всемирному времени, в том числе в интересах системы ГЛОНАСС. В настоящее время обработано более 7000 сессий наблюдений.
- Сравнение Программного коррелятора РАН с широко распространенным коррелятором DiFX по результатам обработки РСДБ-данных с комплекса «Квазар-КВО» позволяет оценить точность Программного коррелятора и показать высокую согласованность результатов с точностью, не превышающей формальную ошибку определения задержки.

Методическая и теоретическая основы исследования

В работе использованы аналитические методы исследования, численное моделирование, методы программирования ЦПУ и ГПУ на языках C, CUDA C и Python, а также аппарат теории вероятностей и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод корреляционной обработки РСДБ-данных в режиме квазиреального времени на основе алгоритмов, реализованных на графических процессорных устройствах, с потоком данных до 96 Гбит/с.
2. Макет программного интерферометра, подтверждающий обеспечение среднеквадратического отклонения задержки не более 10 пс.
3. Результаты обработки РСДБ-наблюдений за период 2015–2020 гг.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликованы 7 научных статей в рецензируемых журналах из списка ВАК [1–7] и 11 — в других научных изданиях [8–18], получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [19] и 1 свидетельство об аттестации программного обеспечения. В создании алгоритмов и методов корреляционной обработки и выработке технических и программных решений, а также написанных в соавторстве статьях личный вклад автора диссертации состоит в следующем:

- исследование принципов реализации FX-алгоритмов корреляционной обработки данных на графических процессорных устройствах, применение решений при создании Программного коррелятора РАН [1, 8–11, 13, 17, 19].
- создание программного макета интерферометра и исследование точностных характеристик коррелятора [2, 3, 6, 15].
- участие в подготовке и обработке РСДБ-наблюдений на радиоинтерферометре «Квазар-КВО», а также последующем анализе полученных данных [4, 5, 7, 10, 12, 14, 17, 18].

Степень достоверности и апробация результатов

Основные положения и результаты работы обсуждались на научных семинарах ИПА РАН, а также на 7 российских и 8 международных науч-

ных конференциях и симпозиумах:

1. 1st RadioNet3 European Radio Astronomy Technical Forum Workshop Week, 8–12 апреля 2013, Бонн, ФРГ
2. Пятая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2013), 15–19 апреля 2013 г., Санкт-Петербург, Россия
3. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2013) 23–27 сентября 2013 г., Санкт-Петербург, Россия
4. 8th IVS General Meeting (IVSGM), 2–7 марта 2014, Шанхай, КНР
5. Всероссийская радиоастрономическая конференция (ВРК-2014), 22–26 сентября 2014 г., Пущино, Россия
6. Third International VLBI Technology Workshop, 10–13 ноября 2014 г., Гронинген/Двингеллоу, Нидерланды
7. Шестая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2015), 20–24 апреля 2015 г., Санкт-Петербург, Россия
8. The 22nd European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting, 17–21 мая 2015 г., Сан-Мигел, Португалия
9. 13th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, 20–23 сентября 2016 г., Санкт-Петербург, Россия
10. Седьмая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017), 17–21 апреля 2017 г., Санкт-Петербург, Россия
11. Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ВРК-2018), 17–21 сентября 2018 г., Санкт-Петербург, Россия
12. The 14th European VLBI Network (EVN) Symposium and Users Meeting, 8–11 октября 2018 г., Гранада, Испания

13. The 7th International VLBI Technology Workshop, 12–15 ноября 2018 г., Краби, Таиланд
14. Восьмая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019), 15–19 апреля 2019 г., Санкт-Петербург, Россия
15. 2nd Russian-Chinese «IAA-RAS & NAOC-CAS Collaborating Researches & Workshops», 7–12 октября 2019, Санкт-Петербург, Россия

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, двух приложений и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 115 страниц с 17 рисунками и 9 таблицами. Список используемой литературы содержит 62 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, указаны научная новизна и практическая значимость ее результатов работы, перечислены положения, выносимые на защиту, и публикации, содержащие основные результаты работы, даны сведения о ее апробации на научных конференциях.

В **первой главе** рассматриваются принципы корреляционной обработки. Приводится обзор корреляторов, разработанных в России (ТИСС-1, МикроПарсек, АРК и АКЦ) и за рубежом (MarkIV, DiFX, K5, Cobalt и др.), которые применялись и применяются при обработке данных РСДБ-сеансов. Анализ современного состояния работ по созданию корреляторов показал, что для решения астрофизических и астрометрических задач в мире регулярно создаются как радиоинтерферометры совместно с коррелятором, так и универсальные корреляторы для обработки данных, регистрируемых сетями интерферометров. В связи с модернизацией комплекса «Квазар-КВО», оборудованного, в частности, широкополосными цифровыми преобразователями промежуточных частот, показана необходимость

создания нового коррелятора FX-типа, удовлетворяющего требованиям обработки РСДБ-наблюдений в режиме квазиреального времени, т.е. со скоростью не ниже скорости регистрации.

Анализ требований по корреляционной обработке данных от перспективной сети комплекса «Квазар-КВО» и иных сетей, совместимых со стандартом VGOS и суммарно содержащих до 6 радиотелескопов, регистрирующих поток данных до 96 Гбит/с, показал, что рационально использовать гибридный процессорный кластер, содержащий процессоры общего назначения и графические процессорные устройства. При этом методика создания такого коррелятора и алгоритмы обработки РСДБ-данных в литературе практически отсутствуют. В связи с этим требовалось проработать ряд научных и технических вопросов по созданию методов и эффективных алгоритмов обработки широкополосных данных.

Вторая глава посвящена исследованию свойств аппаратно-программной архитектуры ГПУ CUDA компании Nvidia, описанию решений и исследованию возможности применения библиотеки CUFFT для операции БПФ.

Концепция CUDA отводит ГПУ роль массивно-параллельного сопроцессора, поэтому ГПУ наиболее эффективны при решении задач, обладающих параллелизмом по данным, число арифметических операций в которых велико по сравнению с операциями над памятью. К таким задачам относится и задача обработки данных, поступающих от радиотелескопов с широкополосными данными. Определены все трудоемкие и хорошо параллелизуемые операции FX-алгоритма: выделение сигнала фазовой калибровки, сопровождение по доплеровскому смещению частоты, БПФ, коррекция дробного сопровождения по задержке, перемножение и усреднение спектров.

Изложены идеи и методы адаптации алгоритмов к архитектуре ГПУ и вычислительного комплекса. Согласно предложенной архитектуре, блоки выделения СФК располагаются на серверах, осуществляющих чтение входных данных. Выполнение трудоемких операций, связанных с вычислением взаимокорреляционных функций, вынесено на отдельные вычислительные узлы, число которых определяется оператором обработки РСДБ-

сеанса в зависимости от требуемой производительности.

Программный блок выделения СФК, основанный на методе двойного когерентного накопления, позволяет выделять сигнал из широкополосных РСДБ-данных, поступающих от радиотелескопа, задействуя 1 ГПУ. Важнейшая оптимизация метода для ГПУ состоит в реализации алгоритма редукции, позволяя путем перегруппировки элементов входных данных привести задачу к суммированию частичных сумм. При этом скорость вычисления массива с N слагаемыми пропорциональна $\log_2 N$, так как на каждом шаге S выполняется $N/2^S$ операций.

Для выполнения операций, связанных с вычислением взаимнокорреляционных спектров, используются глобальная, константная и разделяемая типы памяти, позволяющие в требуемых ситуациях существенно уменьшить время ожидания на операции чтения и записи. В частности, при реализации фазового генератора для операции сопровождения по доплеровскому смещению частоты используются предвычисленные тригонометрические значения, помещенные в константную память, что позволяет после первого обращения на чтение далее иметь доступ со скоростью обращения к кэшу памяти. При операции перемножения и усреднения спектров данные, к которым требуется многократный доступ, размещены в разделяемой памяти для минимизации обращения к глобальной памяти.

Для операции БПФ использована библиотечная функция CUFFT. Проведено исследование точностных характеристик CUFFT в сравнении с самостоятельной реализацией алгоритма дискретного преобразования Фурье (DFT). В качестве оценки точности реализации БПФ библиотекой CUFFT использована СКО по невязкам, определяемым по разности вычисленных векторов X_k^{DFT} и X_k^{CUFFT} , где X_k — вектор, содержащий элементы, распределенные по нормальному закону с нулевым средним и СКО равным единице. Показано, что для операций с одинарной точностью СКО невязки не превышает $3.9 \cdot 10^{-6}$ и удовлетворяет требуемой точности.

Разработанные методы были использованы при создании программных блоков Программного коррелятора РАН (за рубежом известен как коррелятор RASFX).

Третья глава посвящена исследованию точностных характеристик

Программного коррелятора РАН. Описаны проблемы и трудности определения ошибок, вносимых коррелятором в исходный сигнал и предложена методика использования программного генератора псевдослучайных последовательностей (ГПСП) для создания скана квазинаблюдения с детерминированными свойствами с целью вычисления невязок между ожидаемыми и вычисленными параметрами корреляционного отклика.

Приводится описание программной модели двухэлементного радиointерферометра, в котором разнесение радиотелескопов имитируется путем внесения требуемой задержки в шкалу меток времени VDIF-заголовка, отношение сигнал-шум обусловлено мощностью ГПСП, а задержка в корреляционном окне и частота интерференции формируются эфемеридной моделью. С помощью критерия Пирсона доказана линейная независимость на необходимом интервале накопления выборок, формируемых ГПСП в математическом пакете MATLAB.

Для одной пары сканов квазинаблюдений с ожидаемым ОСШ и задержкой $\tau=1$ мс разработаны 29 эфемеридных моделей. Для компенсации постоянного сдвига сигналов в 1 мс в файлы эфемерид введены постоянные значения задержки. В эфемеридные файлы также введен малый сдвиг по задержке и частоте интерференции (разность на двух станциях базы) для имитации РСДБ-наблюдений. При обработке реальных РСДБ-наблюдений ненулевая частота интерференции свидетельствует о величине некомпенсированного доплеровского смещения частоты вследствие неточности эфемеридной модели; обычно это значение не превышает 5 пс/с. Для изучения в экспериментах взят сдвиг в интервале от -20 до 20 пс/с. Значение вычисленной задержки в корреляционном окне при обработке реальных РСДБ-наблюдений не превышает 50 нс (величина смещения определяется после обработки первого скана; эфемериды корректируются таким образом, чтобы задержка отклика приходилась на центр корреляционного окна, затем сканы переобрабатываются, чтобы избежать потерь чувствительности, связанных с треугольным взвешиванием). Для изучения в экспериментах взят интервал от -200 до 200 нс.

Исследованы точностные характеристики коррелятора при нулевой и ненулевой скоростях изменения задержки. Первый случай актуален в

реальных наблюдениях при равенстве доплеровских частот станций, второй является общим. Вычисление СКО σ_τ по невязкам задержки при $F_i = 0$ пс/с дало результат $\sigma_\tau = 1.74$ пс, т.е. он находится внутри формальной ошибки определения задержки (при ОСШ 112 она составляет 9.6 пс). Этот результат имеет практическое применение при обработке данных с интерферометра с нулевой базой, например при лабораторных испытаниях приемно-регистрирующей аппаратуры. Важно и то, что в широком диапазоне значений задержек $\Delta\tau = \pm 200$ нс сохраняется высокая точность вычисления координат корреляционного отклика.

Вычисление СКО по невязкам задержки с ненулевой F_i дало результат $\sigma_\tau = 4.98$ пс. Наибольший вклад в СКО вносят эксперименты с большими значениями $\Delta\tau$ и $\Delta\tau'$, при которых наблюдается увеличение ошибки определения координат отклика, что накладывает ограничения на обработку радиоисточников с быстрым изменением координат (например, космических аппаратов). Для правильной обработки подобного рода источников потребуется корректировка эфемерид.

И, наконец, в главе представлены результаты определения точностных характеристик коррелятора при использовании аппаратного макета радиоинтерферометра на базе двух криостатируемых приемных систем радиотелескопа, выполняющих роль аппаратных генераторов шумового сигнала. На макете зарегистрирован широкополосный сигнал длительностью 10 с в X-диапазоне с ожидаемым ОСШ равным 230. ОСШ был подобран таким образом, чтобы формальная ошибка определения задержки соответствовала ранее определенной точности ее вычисления коррелятором (т.е. не более 5 пс). Длина скана выбрана достаточно короткой, чтобы гарантировать практическую неизменность параметров макета за время регистрации. Проведено 12 экспериментов с различными значениями $\Delta\tau'$. Экспериментально показано, что если $\Delta\tau'$ не превышает 30 пс/с, то коррелятор сохраняет практически неизменную точность определения характеристик корреляционного отклика: задержки, частоту интерференции и ОСШ, — позволяя использовать приближенные модели при обработке источников, координаты и скорости изменения которых известны с ограниченной точностью.

Таким образом, результаты обработки сканов квазинаблюдений и сканов, полученных на макете радиоинтерферометра, показали высокую точность работы алгоритмов FX-обработки, реализованной на ГПУ. Полученные результаты могут применяться для оценки вклада коррелятора в потери чувствительности радиоинтерферометра совместно с оценками нестабильности приемно-регистрирующей аппаратуры и системой частотно-временной синхронизации.

Четвертая глава посвящена разработке методики сравнения скоростных характеристик разработанного Программного коррелятора РАН (RASFX) с коррелятором DiFX для подтверждения преимущества использования первого в части производительности и сравнению результатов обработки геодезических РСДБ-наблюдений.

Проведенные испытания коррелятора RASFX подтвердили оценки производительности разработанных FX-алгоритмов на ГПУ, что для корреляционной обработки данных от 6 VGOS-совместимых радиотелескопов, регистрирующих 8 широкополосных каналов в 4 диапазонах и двух поляризациях, с общим потоком 96 Гбит/с в режиме квазиреального времени требуется 55 ГПУ Tesla K20, которые установлены в 28 блейд-серверов вычислительного кластера.

Предложенная методика испытаний на сравнение производительности RASFX и DiFX версии 2.4.1, установленного на вычислительном кластере Программного коррелятора РАН, подразумевает хранение исходных данных (сканов) в оперативной памяти узла, который в реальных условиях считывает приходящие из обсерваторий данные. Коррелятор DiFX запускается многократно с итеративным увеличением числа задействованных процессорных ядер. В случае если увеличение числа ядер не приводит к увеличению производительности (т. е. происходит насыщение), то фиксируется результат, полученный на предыдущей итерации. Полученные результаты свидетельствуют, что требование по обработке в режиме квазиреального времени DiFX выполняет только при обработке 2 станций и 4 каналов, достигая необходимой производительности с 95 процессорными ядрами. При обработке в остальных режимах происходит насыщение сети Infiniband (полная утилизация) вычислительного комплекса, что не

позволяет достигнуть ожидаемой производительности. Это связано с программной архитектурой DiFX: межблочный обмен данным происходит в формате вещественных чисел, в отличие от коррелятора RASFX.

Исследование качества результатов процессорной обработки коррелятором RASFX в сравнении с коррелятором DiFX проводилось в два этапа: сравнение вычисленных полных задержек и сравнение определенных ПВЗ (по параметру Всемирного времени) после анализа пакетом вторичной обработки QUASAR. Для сравнения были выбраны наблюдения, проводившиеся на радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 РСДБ-сети «Квазар-КВО» в августе-сентябре 2018 г. на базе «Бадары»—«Зеленчукская» с целью определения поправок к Всемирному времени. В качестве программного обеспечения, вычисляющего задержки, использовалось постпроцессорное программное обеспечение PIMA. Анализ 97 сеансов с РТ-13 и 17 сеансов с РТ-32 показал, что СКО остаточных разностей задержек от разных корреляторов не превышает 15.4 пс и 10 пс для РТ-13 и РТ-32 соответственно. Этот результат сходится с формальными ошибками определения задержек, что позволяет сделать вывод о согласованности результатов процессорной обработки двух корреляторов. Анализ поправок к Всемирному времени по данным более 50 сессий показал, что конечные разности UT1-UTC и IERS C04 для корреляторов RASFX и DiFX хорошо согласуются (в пределах нескольких мкс) и их СКО не превышают 30 мкс.

Заключение

В результате проведенной работы разработаны и реализованы оригинальные FX-алгоритмы РСДБ-обработки данных на графических процессорных устройствах. Это позволило создать Программный коррелятор РАН (коррелятор RASFX) для обработки широкополосных РСДБ-наблюдений в режиме квазиреального времени от сети VGOS-совместимых радиотелескопов с общим потоком данных 96 Гбит/с. Коррелятор вошел в состав модернизированного РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Качество разработанных решений подтвердилось как лабораторными, так и реальными РСДБ-наблюдениями в 2014–2020 гг. Всего за время

многолетней эксплуатации было успешно обработано более 7000 широкополосных и 500 узкополосных наблюдений, а также более 300 лабораторных. Общее число обработанных сканов составило более полумиллиона.

Коррелятор начал работу в конце 2014 – начале 2015 г., что позволило по мере ввода в эксплуатацию быстроповоротных антенн малого диаметра РТ-13 первыми в мире начать проводить и обрабатывать регулярные РСДБ-наблюдения с широкой полосой регистрации для оперативного вычисления поправок к Всемирному времени, в том числе в интересах фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС.

После разработки программных решений и методов исследованы точностные характеристики алгоритмов корреляционной обработки в составе коррелятора. Для этой цели разработаны методика и набор программных решений, позволившие создать искусственные сканов наблюдений с заранее детерминированными параметрами: ОСШ, задержка и частота интерференции. Благодаря этому удалось вычислить СКО определения задержки на корреляторе, составившее 4.4 пс. На практике определены допустимые ошибки значений предвычисленных задержек и их первых производных, при которых обеспечивается приемлемая точность сопровождения РСДБ-сигналов и коррелятор выдает корректные значения отношения сигнал-шум, групповой задержки и частоты интерференции.

Отдельный интерес представляла работа по сличению результатов обработки разработанного коррелятора с коррелятором DiFX, а также их сравнение по производительности. Проведено сравнение задержек сканов по сеансам, зарегистрированных на радиотелескопах РТ-32 и РТ-13, а также сделаны оценки результатов поправок к Всемирному времени. Полученные результаты показали высокий уровень сходимости. В части производительности проведенные исследования показали значительное преимущество использования ГПУ перед процессорами общего назначения, особенно при обработке данных от большого количества станций.

Список опубликованных автором работ по теме диссертации

Публикации автора по теме диссертации, включенных в перечень ВАК

1. Суркис И.Ф., Зимовский В.Ф., **Кен В.О.**, Курдубова Я.Л., Мишин В.Ю., Мишина Н.А., Шантырь В.А. Радиointерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. — 2018. — Вып. 6. — С. 8–16.

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

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

4. **В.О. Кен**, А. Е. Мельников. Сравнение результатов обработки геодезических РСДБ-наблюдений корреляторами RASFX и DiFX // Труды ИПА РАН. — 2019. — Вып. 49. — С. 37–42.

5. **V. Ken**, A. Melnikov. RASFX and DiFX: The comparison of geodetic VLBI processing results // PoS(EVN2018)138. — 2019. — Vol. 344.

6. **V. Ken**, Y. Vekshin, V. Chernov, A. Evstigneev, E. Khvostov, M. Zotov. Analysis of VLBI Interferometer Characteristics Using Zero-baseline Lab Prototype and RASFX Correlator // PoS(EVN2018)142. — 2019. — Vol. 344.

7. Ю. В. Векшин, **В. О. Кен**. 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.

Публикации автора по теме диссертации в других научных изданиях

8. И. Ф. Суркис, В. Ф. Зимовский, **В. О. Кен**, А. Е. Мельников, В. Ю. Мишин, Н. А. Соколова, В. А. Шантырь. Программный коррелятор

для РСДБ-сети малых антенн // Труды ИПА РАН. — 2012. — Вып. 24. — С. 172–176.

9. И. Ф. Суркис, В. Ф. Зимовский, В. А. Шантырь, **В. О. Кен**, В. Ю. Мишин, Н. А. Соколова, Д. А. Павлов. Характеристики и структура программного РСДБ-коррелятора для обработки наблюдений сети малых антенн // Труды ИПА РАН. — 2013. — Вып. 27. — С. 299–305.

10. **Voytsekh Ken**, Vladimir Mishin, Dmitry Pavlov, Nadezda Sokolova, Igor Surkis. Design of a VGOS Software Correlator Based on GPUs // IVS 2014 General Meeting Proceedings "VGOS: The New VLBI Network Dirk Behrend, Karen D. Baver, and Kyla L. Armstrong (Eds), 183–187 (2014).

11. И. Ф. Суркис, В. Ф. Зимовский, **В. О. Кен**, Я. Л. Курдубова, В. Ю. Мишин, Н. А. Мишина, В. А. Шантырь. Программный РСДБ-коррелятор на гибридном процессорном кластере // Труды ИПА РАН. — 2015. — Вып. 33. — С. 64–71.

12. **V. Ken**, I. Surkis, Y. Kurdubova, A. Melnikov, N. Mishina, V. Mishin, V. Shantyr. 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, P. 40.

13. **В. О. Кен**, И. Ф. Суркис. Основные принципы реализации FX-алгоритма корреляционной обработки РСДБ-данных на графических процессорных устройствах // Труды ИПА РАН. — 2015. — Вып. 33. — С. 58–63.

14. **В. О. Кен**, А. Е. Мельников, И. Ф. Суркис, В. А. Шантырь. Первое сличение результатов обработки широкополосных РСДБ-данных на корреляторах DiFX и Программном корреляторе РАН // Труды ИПА РАН. — 2016. — Вып. 36. — С. 102–106.

15. **V. Ken**, I. Surkis, L. Yurov. RASFX Correlator accuracy characteristics // 3th European VLBI Network Symposium and Users Meeting. Program and Abstracts Book. IAA RAS. 2016. P. 68.

16. I. Surkis, **V. Ken**, Y. Kurdubova, N. Mishina, V. Mishin, V. Shantyr, D. Zhuravov, V. Zimovsky. The RASFX VGOS GPU Based Software Correlator // Труды ИПА РАН. — 2017. — Вып. 41. — С. 123–126.

17. D. Zhuravov, A. Melnikov, S. Kurdubov, I. Surkis, **V. Ken**, V. Mishin,

V. Shantyr, N. Mishina, Y. Kurdubova, V. Zimovsky. RASFX Correlator Processing Result // Труды ИПА РАН. — 2017. — Вып. 41. — С. 147–150.

18. И. Ф. Суркис, Д. В. Журавов, В. Ф. Зимовский, **В. О. Кен**, Я. Л. Курдубова, В. Ю. Мишин, Н. А. Мишина, В. А. Шантырь. Программные корреляторы на графических процессорных устройствах. Результаты обработки РСДБ-наблюдений радиотелескопов РТ-13 // Труды ИПА РАН. — 2017. — Вып. 43. — С. 129–139.

Объекты интеллектуальной собственности

19. Суркис И.Ф., Журавов Д.В., Зимовский В.Ф., **Кен В.О.**, Курдубова Я.Л., Мишин В.Ю., Мишина Н.А., Павлов Д.А., Шантырь В.А. Программное обеспечение широкополосного РСДБ-коррелятора. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018613915, 27.03.2018.