

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника, ведущего научного сотрудника НИРФИ ННГУ им.Н.И.Лобачевского
Дугина Николая Александровича
на диссертацию **Кена Войцеха Олеговича**
«Корреляционная обработка РСДБ-данных в режиме квазиреального времени
на графических процессорных устройствах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия.

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) был предложен в 60-х годах прошлого столетия, многие пионерские разработки и первые РСДБ эксперименты проводились в нашей стране. Развитие метода проходило крайне быстро из-за его высокой эффективности во многих приложениях радиоастрономии, астрометрии, астрофизики. В астрометрии были достигнуты предельные точности определения координат источников излучения, в том числе межпланетных космических станций. Приемные системы развивались как по пути увеличения числа приемных пунктов, так и модернизацией всех систем каждого пункта. Способы передачи данных совершенствовались, используя ОВЛС для связи пунктов с центром обработки практически в реальном времени; для быстрой обработки данных разрабатывались корреляторы различного вида с ПО для быстродействующих ЭВМ. Эти процессы до настоящего времени находятся в стадии активного развития, и дальнейшая модернизация метода РСДБ в его различных приложениях является естественным и необходимым процессом радиоастрономических научных исследований. Поэтому **актуальность** настоящей работы не вызывает сомнений.

Диссертационная работа В.О.Кена посвящена решению важной научно-технической задачи повышения производительности корреляционной обработки данных экспериментов на многоэлементных РСДБ-комплексах. Основная цель — разработка методов и алгоритмов высокоскоростного вычисления взаимно-корреляционных функций с использованием графических процессорных устройств в РСДБ-корреляторе.

Автором проведен необходимый анализ современного состояния работ по созданию корреляторов для астрономических радиоинтерферометров и выработаны требования к алгоритмам обработки. Далее решались следующие основные задачи:

- исследование особенностей аппаратно-программной модели CUDA и архитектуры ГПУ для определения возможности реализации быстрого FX-алгоритма корреляционной обработки;
- разработка методики выполнения ряда вычислительных операций на ГПУ, обеспечивающих достаточную производительность для соответствия требованиям стандарта

VGOS; исследование метода выделения сигнала фазовой калибровки с последующей разработкой соответствующего программного модуля;

- проведение анализа точностных характеристик работы коррелятора на ГПУ путем обработки широкополосных сигналов с заранее известными (детерминированными) параметрами;

- сравнение результатов обработки РСДБ-сеансов коррелятором на ГПУ с результатами обработки применявшегося ранее коррелятора для подтверждения качества измеряемых параметров.

Новизна проведенных исследований заключается в том, что в рамках диссертационной работы впервые на графических процессорных устройствах реализован ряд FX-алгоритмов обработки РСДБ-сигналов стандарта VGOS, что позволило за счет повышения скорости обработки широкополосных РСДБ-сеансов повысить оперативность получения результатов. Это техническое достижение позволяет существенно увеличить полезную рабочую нагрузку на РСДБ-комплексы, и, соответственно, повысить точность измеряемых параметров. Кроме того, для тестирования коррелятора создано специализированное программное обеспечение (с имитацией широкополосных РСДБ-сигналов), что позволило методами численного моделирования определить абсолютные точностные характеристики коррелятора.

Положения, выносимые на защиту и основанные на полученных автором результатах, состоят в следующем:

1. Достигнуто существенное повышение скорости процессорной обработки РСДБ-сеансов путем реализации алгоритмов сопровождения РСДБ-сигналов по доплеровской фазе, быстрого преобразования Фурье, коррекции дробного сопровождения задержки, перемножения и усреднения спектров и выделения сигнала фазовой калибровки на графических процессорных устройствах.

2. Точностные характеристики РСДБ-коррелятора оцениваются путем применения макета радиоинтерферометра, в котором генераторами шумовых сигналов являются либо генераторы псевдослучайных последовательностей, либо приемные системы радиотелескопа.

3. Разработанные на основе FX-алгоритмов решения для Программного коррелятора РАН снижают требования к аппаратному обеспечению по сравнению с коррелятором DiFX.

Достоверность и обоснованность вынесенных положений подтверждается использованием аналитических методов исследования, методов программирования ЦПУ и ГПУ на разных языках программирования, численным моделированием, а также аппара-

том теории вероятностей и математической статистики. Важнейшим фактором достоверности является апробация проведенных разработок в составе специализированных систем (коррелятора) при обработке данных многочисленных экспериментов на многоэлементных интерферометрических комплексах.

Отметим приведенные в диссертации **основные результаты**.

В **первой** главе рассматриваются принципы корреляционной обработки и приводится обзор корреляторов, разработанных в России и за рубежом. В связи с модернизацией комплекса «Квазар-КВО» ИПА РАН показана необходимость создания нового коррелятора FX-типа, удовлетворяющего требованиям обработки РСДБ-наблюдений в режиме квазиреального времени, т.е. со скоростью не ниже скорости регистрации.

Комплекс «Квазар-КВО» содержит 6 радиотелескопов, регистрирующих сигналы от внеземных объектов на трех частотах на двух поляризациях. Показано, что рационально использовать гибридный процессорный кластер, содержащий процессоры общего назначения и графические процессорные устройства. Поскольку методика создания такого коррелятора и алгоритмов обработки РСДБ-данных в литературе практически отсутствуют, автору требовалось проработать ряд научных и технических вопросов по разработке 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.

Показано, что точность библиотеки CUFFT для осуществления операции БПФ совпадает с точностью тривиальной реализации ДПФ, а библиотека CUFFT может применяться без потери чувствительности коррелятора.

На основе программно-аппаратной архитектуры ГПУ разработаны методы реализации алгоритмов FX-обработки РСДБ-данных. Эти методы и алгоритмы реализованы автором при создании программных блоков Программного коррелятора ИПА РАН, выполняющие операции сопровождения по доплеровскому смещению частоты, БПФ, коррекции дробного сопровождения по задержке, перемножения и усреднения спектров и выделяющих СФК. Это позволило решить задачу корреляционной обработки РСДБ-сеансов, зарегистрированных широкополосными системами регистрации.

Третья глава посвящена исследованию точностных характеристик Программного коррелятора ИПА РАН. Описаны проблемы и трудности определения ошибок, вносимых коррелятором в исходный сигнал.

Автором разработана методика использования программного генератора псевдослучайных последовательностей для создания скана квазинаблюдения с детерминирован-

ными свойствами с целью вычисления невязок между ожидаемыми и вычисленными параметрами корреляционного отклика. Предложено оценивать точность вычисляемых параметров корреляционного отклика, полученных в результате обработки сканов, сгенерированных шумовыми сигналами с известными с высокой точностью задержкой, частотой интерференции и отношением сигнал/шум.

Создано программное обеспечение, позволяющее создавать сканы формата VDIF с двухбитовым квантованием с заданными характеристиками ОСШ и имитацией разнесения станций на расстояние.

Результаты обработки сканов квазионаблюдений и сканов, полученных на макете радиоинтерферометра, показали высокую точность работы алгоритмов FX-обработки, реализованной на ГПУ, а также обозначили необходимую точность эфемеридных моделей при обработке сигналов, зарегистрированных от различных видов радиоисточников (кварзаров, космических аппаратов и пр.).

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 сравнения результатов обработки геодезических РСДБ-наблюдений. Результаты проведенных исследований показали, что во всех режимах обработки Программный коррелятор РАН имеет преимущество в скорости и количестве требуемых вычислительных ресурсов.

Разработанные алгоритмы FX-обработки РСДБ-данных прошли успешную апробацию в составе Программного коррелятора РАН при обработке свыше 7000 регулярных широкополосных сеансов с радиотелескопом РТ-13 и более 500 узкополосных сеансов с радиотелескопом РТ-32; оба пункта входят в состав модернизированного комплекса «Кварзар-КВО».

Практическая ценность и значимость результатов исследований заключается в том, что на основе разработанных автором методов корреляционной обработки с использованием графических процессорных устройств создан Программный коррелятор РАН. Новый коррелятор активно используется при обработке РСДБ-сеансов модернизированного радиоинтерферометра РСДБ-комплекса «Кварзар-КВО», на котором осуществляется измерение поправок Всемирного времени, в том числе в интересах системы ГЛОНАСС.

Достигнутая производительность коррелятора, разработанного с использованием методов и алгоритмов на ГПУ, позволяет обрабатывать РСДБ-данные от шести радиоте-

лескопов стандарта VGOS в режиме квазиреального времени. Это позволяет проводить сеансы наблюдений в более плотном и интенсивном режиме.

Материал диссертации изложен достаточно ясно, работа хорошо оформлена.

К числу замечаний можно отнести следующие.

1. При обзоре истории развития РСДБ корреляторов на стр.19 диссертации говорится, что первый отечественный коррелятор был разработан в ИПА РАН. Здесь же на абзац выше описан коррелятор АКЦ ФИАН, в ссылке на который не проставлен год издания. Кроме того, например, в работах [Antonets M.A. et al. Long base interferometer on the 86MHC frequency. *Izv.Vuzov Radiofizika*, 1970, v.XIV, n.9, 1303-1314 (*Radiophysics and Quantum electronics*, 1971, v.XIV, n. 9)] или [B.S.Ablyazov, V.A.Alekseev, M.A.Antonets, et al. Observation of H₂O sources using the long-base Pushchino-Simeiz radio interferometer. *Radiophysics and Quantum Electronics*, October 1974, Volume 17, Issue10, pp.1095–1100], описаны эксперименты, при обработке данных которых использовались корреляторы НИРФИ в 1970-х годах.

2. На стр.24-25 говорится о фильтрации узкополосных помех. Видимо, надо было указать, что наличие помех определяется автокорреляционной обработкой записей на отдельных пунктах, а кросскорреляционная обработка позволяет ослабить действие некоррелированных помех.

Далее: Стр.22. «...и высоком спектральном разрешении (сотни кГц)» Это разве высокое разрешение?

Стр.22. «...аппаратный XF коррелятор работает с одно- и двухбитовыми потоками, как правило имеет небольшое число задержек (32-64)» Все зависит от полосы приема и неопределенности задержки.

Стр. 22 "...программный коррелятор работает с числами с плавающей запятой .." Что мешает использовать целочисленную арифметику?

Стр.29. « В частотной области СФК в таком сигнале состоит из тонов...». В радиотехнике более принят термин «гармоники».

3. Для иллюстрации данных обработки можно было бы поместить два-три вида полученных корреляционных функций, например, для слабых и сильных радиоисточников.

4. В тексте есть незначительное число орфографических и грамматических ошибок.

Указанные замечания не влияют на общее качество работы.

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. В работе приведены новые научные результаты, позволяющие квалифицировать их как решение задачи, имеющей существенное значение для развития опе-

ративных методов обработки РСДБ экспериментов. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы, они базируются на большом количестве экспериментальных исследований. Большинство вынесенных на защиту результатов докладывалось на отечественных и международных конференциях и опубликовано в ведущих зарубежных и отечественных изданиях (из списка ВАК). Авторским коллективом, в который входит В.О.Кен, получены государственные свидетельства об аттестации программного обеспечения программного коррелятора ИПА РАН и о регистрации созданной программы для ЭВМ. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа «Корреляционная обработка РСДБ-данных в режиме квазиреального времени на графических процессорных устройствах», соответствует критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», в отношении диссертаций, представляемых на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор **Кен Войцех Олегович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник
НИРФИ ННГУ им.Н.И.Лобачевского,
доктор физико-математических наук

Н.А. Дугин

Научно-исследовательский радиофизический институт Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. А. И. Лобачевского»
603950 г.Нижний Новгород ул.Б.Печерская 25/12а
8(831) 436-54-21, 8-910-397-57-03
ndugin@yandex.ru

Подпись Н.А.Дугина заверяю
Ученый секретарь ННГУ им.Н.И.Лобачевского



Л.Ю.Черноморская

«16» апреля 2021 г.