

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА  
Физический факультет  
Кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии

На правах рукописи



Дуев Дмитрий Андреевич

**АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ  
КОСМИЧЕСКОЙ РАДИО  
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ СО  
СВЕРХДЛИННЫМИ БАЗАМИ**

Специальность 01.03.01 – Астрометрия и небесная механика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

- Научные руководители:** д.ф.-м.н., профессор  
Жаров Владимир Евгеньевич  
(физический факультет МГУ)
- к.ф.-м.н., профессор,  
Гурвиц Леонид Ильич  
(Объединённый европейский институт РСДБ JIVE, Делфтский технический университет, Нидерланды)
- Официальные оппоненты:** д.ф.-м.н., с.н.с.  
Дугин Николай Александрович  
(ФГБНУ НИРФИ)
- д.ф.-м.н.,  
Малкин Зиновий Меерович,  
(ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН)
- Ведущая организация:** Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Физико-Технических и Радиотехнических Измерений (ВНИИФТРИ)

Защита состоится 18 октября 2012 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д501.001.86 при МГУ имени М.В. Ломоносова, расположенном по адресу: *119192, Москва, Университетский проспект., дом 13, ГАИШ МГУ.*

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова (*119991, Москва, Ломоносовский проспект, дом 27, Фундаментальная библиотека*).

Автореферат разослан "18" сентября 2012 года.

Заверенные отзывы и замечания по автореферату просьба высылать на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

д.ф.-м.н.



Алексеев С.О.

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) на протяжении последних нескольких десятилетий с большим успехом применяется при наблюдениях космических аппаратов (КА) для целей как служебных (навигационных), так и научных. Данный метод налагает минимальные технические требования на бортовое оборудование КА и может применяться для наблюдений практически любого радио сигнала, передаваемого космическим аппаратом, при условии, что сигнал сильный и обладает достаточной фазовой стабильностью. Среди наиболее успешных кампаний по наблюдению КА, при которых использовался метод РСДБ, в первую очередь стоит упомянуть следующие: РСДБ-трекинг аэростатных зондов международного проекта “ВЕГА” в атмосфере Венеры в 1984-86 гг. [1], зонда Европейского Космического Агентства (European Space Agency - ESA) “Гюйгенс” во время его спуска на поверхность спутника Сатурна Титана в 2005 г. [2], наблюдения антеннами Европейской сети РСДБ (European VLBI Network - EVN) управляемого падения зонда ESA “Smart-1” на поверхность Луны в 2006 г. [3], РСДБ-наблюдения космического аппарата американского Национального аэро-космического агентства NASA Mars Exploration Rover В во время заключительной фазы его перелёта к Марсу в 2004 г. [4], РСДБ-трекинг КА НАСА “Кассини” 2004-2011 гг. [5], а также недавние РСДБ-наблюдения телескопами сети EVN пролёта Фобоса КА ЕКА Mars Express (МЕХ) [6].

РСДБ-наблюдения КА, развиваются, в частности, в рамках международного проекта PRIDE (Planetary Radio Interferometer and Doppler Experiment) под руководством специалистов Объединенного Европейского Института РСДБ (JIVE - Joint Institute for VLBI in Europe, Нидерланды) [7, 8]. С помощью измерений, полученных с применением РСДБ-техники фазовой привязки, а также радиальных доплеровских измерений, проект PRIDE позволяет получать высокоточные оценки вектора состояния космического аппарата. Это даёт возможность решать широкий круг научных задач и приложений, среди которых необходимо прежде всего упомянуть задачи планетологии (измерения приливных деформаций спутников планет, атмосферная динамика и климатология, а также сейсмология, тектоника; изучение внутренней структуры и состава планетных тел), высокоточную небесную механику планетных систем, гравиметрию и фундаментальную физику (например, тесты общей теории относительности и другие релятивистские эксперименты [9]). Кроме этого, доплеровские наблюдения космических аппаратов – единственный доступный на данный момент способ обнаружения гравитационных волн в диапазоне частот  $10^{-5} - 1$  Гц [10]. В качестве примера “побочных” научных продуктов PRIDE стоит назвать исследования межпланетных сцилляций [11]. С помощью PRIDE также можно осуществлять диагностику космических аппаратов и наземных принимающих станций (например, для обнаружения причин фазовых нестабильностей) и доставку непосредственно

на Землю (например, с посадочных модулей без использования ретрансляции сигнала через спутник) ограниченного количества критических данных (см., например, [12]).

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Практически любой космический аппарат, излучающий радио сигнал, может наблюдаться в рамках PRIDE. Среди текущих “пользователей” PRIDE – КА ЕКА “Венера Экспресс” (VEX) и “Марс Экспресс” (MEX), а также космический радиотелескоп Российской академии наук (РАН) Российского космического агентства (РКА) “РадиоАстрон” [13]. Особую важность РСДБ-наблюдения имеют для проекта “РадиоАстрон”, поскольку позволяют более чем на порядок величины улучшать точность навигационных измерений аппарата – фактора, от которого во многом зависит успех всей миссии.

Отдельно необходимо отметить актуальную задачу точной привязки Земной системы координат (International Terrestrial Reference Frame – ITRF) к Небесной системе координат (International Celestial Reference Frame – ICRF), решить которую напрямую позволят лишь наблюдения спутников Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС) РСДБ-методами [14–16].

С очень большой вероятностью PRIDE-наблюдения будут использоваться в ближайшем будущем в различных проектах исследования Венеры (EVE [17]), ледяных Лун Юпитера (JUICE/Laplace [18, 19]), Луны (“Луна-Глоб” и “Луна-Ресурс”), Меркурия (“VepiColombo”) и астероидов (“MarcoPolo”). Особо стоит указать чрезвычайно важную роль РСДБ-наблюдений космического телескопа ЕКА Gaia, запуск которого намечен на 2013 год. Вектор состояния с точностью, необходимой для успешного выполнения этого астрометрического проекта, будет рассчитываться, в частности, по данным оптических измерений, которые сильно зависят от погоды и невозможны при полной Луне (ожидаемая звёздная величина КА Gaia –  $\sim 17^m$  или слабее).

**Цель диссертационной работы** состоит в создании и отладке в рамках проекта PRIDE надёжной системы проведения, обработки и анализа РСДБ-наблюдений космических аппаратов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

1. Разработка высокоточной модели задержки радио сигнала при РСДБ-наблюдениях космических аппаратов, учитывающей эффекты ближнего поля, эффекты теории относительности, геофизические и инструментальные эффекты, а также эффекты распространения (усовершенствование модели вычисления тропосферной задержки с применением ме-

тогда трассировки лучей (ray-tracing) через трёхмерную модельную тропосферу).

2. Разработка формализма и создание на его основе алгоритма оценивания вектора состояния космического аппарата по данным РСДБ-наблюдений. Создание программного комплекса для решения этой задачи, включающего разработанную модель задержки.
3. Развитие и унификация программного обеспечения (ПО), используемого для обработки и анализа РСДБ-наблюдений космических аппаратов. В частности, встраивание созданной модели задержки в программный коррелятор SFXC (Software FX Corralator) Европейской сети РСДБ EVN, установленный в JIVE. Адаптация ПО под нужды оперативного анализа прокоррелированных данных.
4. Проведение, обработка и анализ РСДБ-наблюдений космических аппаратов “Венера Экспресс” (VEX) и “РадиоАстрон”, а также спутников ГЛОНАСС.

### **Научная новизна**

В рамках данной диссертационной работы разработана модель РСДБ-задержки сигнала космических аппаратов и на её основе создан специализированный программный комплекс. Научной группой, в составе которой работает диссертант, впервые проведены РСДБ-наблюдения КА “РадиоАстрон” и спутников ГЛОНАСС, продемонстрировавшие работоспособность и точность модели даже на таких близких расстояниях, как в случае этих аппаратов.

### **Практическая значимость**

Алгоритмы и программное обеспечение, описываемые в диссертации, используются в настоящее время при обработке и анализе РСДБ-наблюдений КА в Объединённом Европейском Институте РСДБ (JIVE). Результаты, полученные в данной работе, позволят в ближайшем будущем решить широкий круг фундаментальных и прикладных задач, среди которых следует особо выделить следующие:

1. Кардинальное улучшение точности определения орбиты космического радиотелескопа РКА “РадиоАстрон”. От этого во многом зависит успех всего проекта в целом, так как получение интерференционных лепестков при совместных наблюдениях на наземно-космических базах возможно лишь при точном знании положения аппарата.
2. Прямая привязка Земной системы координат к Небесной системе координат путём регулярных РСДБ-наблюдений спутников ГНСС.

3. Определение вектора состояния космического телескопа астрометрического проекта ЕКА Gaia с необходимой для проекта точностью в периоды, когда невозможен предусмотренный в проекте штатный режим с применением оптических и доплеровских наблюдений.
4. Исследование верхней атмосферы Венеры по PRIDE-наблюдениям аэродинамического торможения КА VEX.

Помимо этого, результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы в таких будущих космических проектах, как “Луна-Глоб” и “Луна-Ресурс”, MarcoPolo, VeriColombo, JUICE.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Высокоточная модель задержки радио сигнала при РСДБ-наблюдениях космических аппаратов. Эффекты ближнего поля и эффекты теории относительности учитываются с помощью численного решения уравнений для времени распространения сигнала с применением подходов Моера и Копейкина. Геофизические и инструментальные эффекты рассчитываются в соответствии с рекомендациями Международной службы вращения Земли IERS Conventions 2010. Для учёта влияния ионосферы на задержку сигнала используются карты вертикального полного содержания электронов Международной службы ГНСС (IGS). Тропосферная часть задержки в модели вычисляется по разработанному высокоточному алгоритму, использующему метод трассировки лучей через численную модель тропосферы.
2. Формализм матриц Якоби – обобщение  $uv$ -проекции баз для случая РСДБ-наблюдений источников в ближнем поле, позволяющий производить оценивание вектора состояния КА. Вычисление элементов матрицы осуществляется с использованием созданной модели задержки сигнала.
3. Программный комплекс для обработки и анализа РСДБ-наблюдений космических аппаратов, используемый, в частности, для оценивания вектора состояния КА на основе модели задержки сигнала КА и формализма матриц Якоби, разработанных в рамках данного диссертационного исследования. ПО встроено в программную среду одного из наиболее производительных и наиболее гибкого программного коррелятора SFXC в Объединённом Европейском институте РСДБ (JIVE).
4. Результаты РСДБ-наблюдений космических аппаратов “Венера Экспресс” (VEX) и “РадиоАстрон”, а также спутников ГЛОНАСС, и метод вычисления их координат. Продемонстрирована высокая относительная

точность ( $10^{-9}$  –  $10^{-10}$ ) определения положения КА с использованием результатов данной работы.

**Апробация работы и публикации.** Результаты диссертации изложены в 4 печатных работах в рецензируемых журналах:

1. Duev, D.A., Molera Calvés G., Pogrebenko S.V., Gurvits L.I., Cimó G., Vocanegra Bahamon, T. Spacecraft VLBI and Doppler tracking: algorithms and implementation. // **Astronomy & Astrophysics** – 2012, Vol. 541, id.A43. doi: 10.1051/0004-6361/201218885
2. Дувев, Д.А., Погребенко, С.В., Молера Калвес, Г. Модель тропосферной задержки сигнала при радиоастрономических наблюдениях. // **Астрономический журнал** - 2011 - Том 55, № 11, сс. 1008-1015.
3. Tornatore, V., Haas, R., Casey, S., Duev, D., Pogrebenko, S., Molera Calvés, G. Direct VLBI Observations of Global Navigation Satellite System Signals. // **International Association of Geodesy Symposia** – 2012 – Springer, (принято в печать)
4. Wilson C., Chassefière, E., Hinglais, E., and the EVE team (включая Duev, D.A.) The 2010 European Venus Explorer (EVE) mission proposal. // **Experimental Astronomy** – 2011 – 0922-6435, pp. 1-31.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10686-011-9259-9>

Основные результаты диссертации также докладывались на многочисленных международных конференциях; тезисы большинства докладов опубликованы в соответствующих сборниках:

1. Gurvits, L.I., Pogrebenko, S.V., Cimò, G., Duev, D.A., Molera Calvés, G., Vocanegra Bahamon, T.M. Planetary radio interferometry and doppler experiment (PRIDE): a multidisciplinary enhancement of space science missions. 39th COSPAR (Committee on Space Research) Scientific Assembly, 14-22 июля 2012, Майсур, Индия.
2. Cimò, G., Gurvits, L.I., Pogrebenko, S.V., Molera Calvés, G., Duev, D.A., Vocanegra Bahamon, T. Planetary Radio Interferometry and Doppler Experiment for Near-Earth Asteroids mission MarcoPolo-R. // 9th International planetary probe workshop, 18-22 июня 2012, Тулуза, Франция.
3. Duev, D.A., Molera Calvés, G., T. Vocanegra Bahamon. VLBI and Doppler Tracking of Spacecraft. // poster at the 67th Dutch Astronomy Conference NAC-2012. 23-25 мая 2012, Амеланд, Нидерланды.

4. Duev, D.A. Towards the ultra-precise determination of spacecraft state vectors // 24 ноября 2011, ASTRON/JIVE Colloquium, Двингелоо, Нидерланды.
5. Duev, D.A., Molera Calvés G., Pogrebenko S.V., Gurvits L.I., Cimó G., Vocanegra Bahamon, T. Status of the Planetary Radio Interferometry and Doppler Experiment (PRIDE): Applications for the Phobos-Soil and Other Planetary Missions. // В материалах Второго московского симпозиума по Солнечной системе, 10-14 октября 2011, ИКИ РАН, Москва, Россия.
6. Duev, D.A. Near Field VLBI Experiments, // NOVA Fall School 2011, 3-7 октября 2011, Двингелоо, Нидерланды.
7. Duev, D.A. VLBI observations of spacecraft with EVN radio telescopes. // YERAC-2011, Jodrell Bank Centre for Astrophysics, University of Manchester, Манчестер, Великобритания, 18-21 июля 2011.
8. Duev, D.A., Molera Calvés G., Pogrebenko S.V., Gurvits L.I., Cimó G., Keimpema, A. Near Field VLBI observations of spacecraft. // ASTRON / JIVE AstroFest 2011, 29 июня 2011, Экслоо, Нидерланды.
9. Tornatore, V., Haas, R., Casey, S., Pogrebenko, S., Duev, D., Molera, G. Determination of GLONASS satellite positions with respect to natural radio sources by using the VLBI technique: preliminary results. // ETTC 2011, European Test and Telemetry Conference, Тулуза, Франция, 14-16 июня 2011.
10. Cimò, G., Gurvits, L.I., Pogrebenko, S.V., Molera Calvés, G., Duev, D.A., Vocanegra Bahamon, T. Planetary Radio Interferometry and Doppler Experiment (PRIDE). // GREAT-EST workshop, 6-9 июня 2011, Порту, Португалия.
11. Molera Calvés, G., Pogrebenko, S.V., Cimò, G., Duev, D.A., Gurvits, L.I. VLBI tracking of the PHOBOS SOIL mission. // 8th International planetary probe workshop, 6-10 июня 2011, Портсмут, Вирджиния, США.
12. Duev, D.A., Molera Calvés, G., Pogrebenko, S.V., Cimò, G., Gurvits, L.I., Keimpema, A., Quick, J.F.H., Haas, R., Kronschnabl, G., Smirnov, A.I. Near Field VLBI experiments with EVN radio telescopes. // URSI Benelux Forum 2011, 6 июня 2011, ESA/ESTEC, Нордвьяк, Нидерланды.
13. Keimpema, K.A., Duev, D.A., Pogrebenko, S.V., Molera Calvés, G. Spacecraft tracking with the SFXC software correlator. // URSI Benelux Forum 2011, 6 июня, 2011, ESA/ESTEC, Нордвьяк, Нидерланды.



14. Дуев, Д.А. РСДБ-наблюдения спутников ГЛОНАСС. // Материалы Международного молодежного научного форума “ЛОМОНОСОВ-2011” – Отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, М.В. Чистякова. – 2011 – М.: МАКС Пресс.
15. Gurvits, L., Pogrebenko, S., Cimò, G., Duev, D., Fridman, P., Molera Calvés, G. Radio astronomy segments of prospective planetary science and exploration missions. // Geophysical Research Abstracts – 2011 – Vol. 13, EGU2011-11076.
16. Duev, D. A. Tropospheric Signal Delay Model for Radio Astronomical Observations. // the 20th EVGA Meeting and 12th Analysis Workshop, Бонн, Германия, 29-31 марта 2011.
17. Tornatore, V., Haas, R., Duev, D., Pogrebenko, S., Casey, S., Molera Calvés, G., Keimpema A. Single baseline GLONASS observations with VLBI: data processing and first results. // the 20th EVGA Meeting and 12th Analysis Workshop, Бонн, Германия, 29-31 марта 2011.
18. Tornatore, V., Pogrebenko, S., Duev, D., Haas, R., Casey, S., Molera Calvés, G. Single baseline GLONASS observations with VLBI: preliminary results. // стендовый доклад, the 20th EVGA Meeting and 12th Analysis Workshop, Бонн, Германия, 29-31 марта 2011.
19. Molera Calvés, G., Pogrebenko, S., Wagner, J., Cimò, G., Gurvits, L., Duev, D. Tracking of Mars Express and Venus Express spacecraft with VLBI radio telescopes. // American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #P51D-1479.
20. Tornatore, V., Haas, R., Maccaferri, G., Casey, S., Pogrebenko, S.V., Molera Calves, G., Duev, D. Tracking of GLONASS satellites by VLBI radio telescopes. // TTC 2010, 5th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, ESA-ESTEC, Нордвйк, Нидерланды, 21-23 сентября 2010.
21. Дуев, Д.А. Моделирование тропосферной задержки при радиоастрономических наблюдениях. // Материалы Международного молодежного научного форума “ЛОМОНОСОВ-2010” - Отв. ред. И.А. Алешковский, П.Н. Костылев, А.И. Андреев, А.В. Андриянов. - 2010 - М.: МАКС Пресс.

### **Личный вклад автора**

1. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

2. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами.
3. Модель задержки сигнала для РСДБ-наблюдений в ближнем поле, алгоритмы обработки и анализа данных таких наблюдений, а также их программная реализация, опубликованные в работе [8], также, как и модель тропосферной задержки, описываемая в работе [20], разработаны лично автором.
4. Обработка наблюдений спутников ГЛОНАСС, представленная в работе [16], производилась автором с помощью ПО, разработанного в рамках данного диссертационного исследования.
5. Автор принимал персональное участие на всех этапах проведения реальных экспериментов с КА, результаты которых опубликованы в статьях [8, 20], от планирования до анализа результатов.
6. Приводимое в статье [17] описание методики РСДБ-наблюдений КА, их обработки и анализа, в свете предлагаемого проекта исследования Венеры EVE (European Venus Explorer) подготовлено совместно с соавторами.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 138 страниц, из них 131 страница текста, включая 39 рисунков. Библиография включает 74 наименования на 7 страницах.

## Содержание работы по главам

### Введение

Обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Также приводится список печатных работ диссертанта и список международных конференций, на которых докладывались основные результаты работы.

### Обзор литературы

Приводится краткое описание методов, применяемых при радиометрических наблюдениях космических аппаратов и используемых для определения движения КА. Дается обзор методов доплеровских измерений, измерений

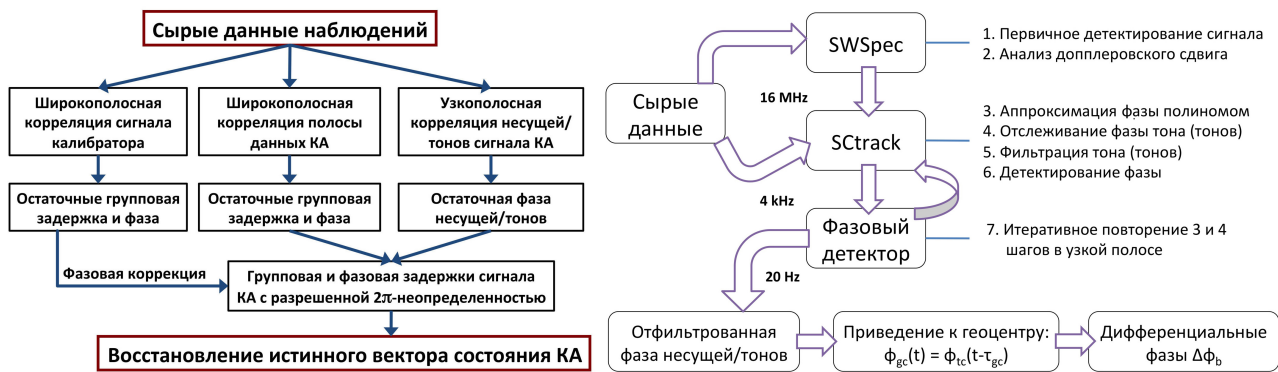


Рис. 1. (слева) Блок-схема процесса обработки данных РСДБ-наблюдений космических аппаратов с использованием метода фазовой привязки. (справа) Блок-схема процесса узкополосной обработки данных РСДБ-наблюдений космических аппаратов с помощью программного комплекса SWSpec / SCTrack / PLL.

дальности и интерферометрических измерений (DOR,  $\Delta$ DOR и метод привязки фазы). Описываются результаты нескольких успешных примеров экспериментов по РСДБ-наблюдениям космических аппаратов (КА “Гюйгенс”, “Mars Exploration Rover B”, “Кассини”).

## Глава 1 “Моделирование РСДБ- и доплеровских наблюдений космических аппаратов”

Применение метода привязки фазы (phase-referencing VLBI) при РСДБ-наблюдениях космических аппаратов лежит в основе международного проекта PRIDE (Planetary Radio Interferometer and Doppler Experiments), руководство которым осуществляется специалистами Объединенного Европейского Института РСДБ (JIVE - Joint Institute for VLBI in Europe, Двингелоо, Нидерланды) [8]. Использование указанного метода подразумевает чередующиеся наблюдения радио сигнала КА и близких фоновых источников (т.н. калибраторов, в качестве которых, в основном, используются квазары) и последующую калибровку (“привязку”) интерференционной фазы (fringe phase) КА с использованием измеренных фаз калибратора. Это позволяет с высокой точностью определять относительное положение КА.

Программные инструменты, используемые в рамках проекта PRIDE для обработки и анализа данных РСДБ-наблюдений космических аппаратов, базируются на двух основных платформах: программном пакете для определения (детекции) фазы сигнала SWSpec / SCTrack / Phase-Lock-Loop, включающий в себя спектрометр со сверх-высоким разрешением [21], и программном корреляторе Европейской РСДБ сети EVN, SFXC (the EVN Software Correlator at JIVE SFXC) [22].

Для успешного детектирования сигнала, обработки и анализа данных РСДБ-наблюдений космических аппаратов (см. рис. 1, слева) необходимо использование двух “ингредиентов”, разработанных в рамках данного диссертаци-

ционного исследования:

1. Моделей РСДБ-задержки и доплеровского сдвига сигнала КА как источника ближнего поля
2. Величин, обобщающих применяемые в “классическом” РСДБ *uv*- проекции баз для случая ближней зоны, – т.н. матриц Якоби.

Практическое решение этих задач осуществляется с помощью программного пакета VINT (VLBI In the Near-filed Toolkit, набор инструментов для РСДБ в ближнем поле) разработанного на языке Matlab в рамках данной работы.

В разделе 1.1 даётся подробное описание процесса планирования, подготовки и проведения РСДБ-наблюдений космических аппаратов. Описываются процедуры широкополосной корреляции сигнала калибратора и КА, оценивания сдвига и хода часов (стандартов частоты) на станциях, извлечения групповой задержки сигнала; узкополосной корреляции сигнала КА (см. рис. 1, справа), приведения измерений к общему фазовому центру и разрешения  $2\pi$ -неопределенности. Рассматривается применяемое при этом программное обеспечение (коррелятор SFXC и пакет SWSpec / SCTrack / PLL).

Раздел 1.2 посвящён моделированию РСДБ-наблюдений космических аппаратов как источников ближнего поля<sup>1</sup>. Геометрическая модель РСДБ-задержки сигнала КА, предлагаемая в данной работе, формулируется в Барицентрической небесной системе отсчета (Barycentric Celestial Reference System, BCRS, см. рис. 2). В разделе приводится описание необходимых преобразований используемых временных шкал и координат наблюдательных стан-

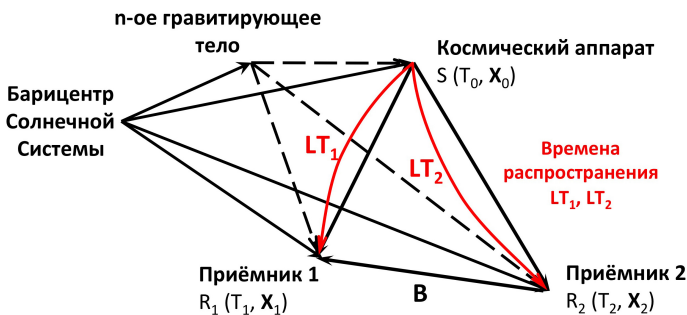


Рис. 2. Геометрия РСДБ-наблюдений космических аппаратов в Барицентрической небесной системе координат.

ций (а при необходимости и КА), учитывающих релятивистские, а также разнообразные геофизические эффекты. Модель задержки сигнала, разработанная для обработки РСДБ-наблюдений космических аппаратов, учитывает эффекты “ближнего поля”, возникающие из-за конечности расстояния до источника. РСДБ-задержка во временной шкале системы BCRS определяется как разница между временами распространения сигнала  $LT_1$  и  $LT_2$  от КА до

<sup>1</sup> Дифрагированная радио волна считается находящейся в ближнем поле, если расстояние до источника от апертуры  $R \lesssim D^2/\lambda$  [23], где  $D$  – характерный размер апертуры, а  $\lambda$  – длина волны. Для РСДБ-сети с синтезированной апертурой в  $\sim 1000$  км при наблюдениях в X-диапазоне ( $\lambda \sim 3$  см) имеем  $R \lesssim 100$  AU.

первой и второй станции базы (см. рис. 2). Момент излучения сигнала космическим аппаратом определяется с помощью итеративного решения уравнения для времени распространения. При этом для учёта релятивистского вклада в задержку предлагается использование подходов Моера [24] либо Копейкина [10].

При применении РСДБ-метода фазовой привязки задержки, рассчитываемые для КА и калибратора, должны быть согласованы в том смысле, что величины, общие для моделей ближнего и дальнего поля, должны вычисляться на одной программной платформе. В связи с этим в конце раздела даётся краткое описание т.н. консенсусной модели задержки для внегалактических источников, рекомендованной МСВЗ [25].

Описание предлагаемой в данной работе модели доплеровского сдвига частоты в барицентрической системе отсчёта BCRS, сформулированная в том предположении, что гравитирующие тела Солнечной системы остаются неподвижными за время распространения сигнала, приводится в разделе 1.3. Там же даётся формулировка модели доплеровского сдвига в приближении произвольного движения гравитирующих масс Копейкина-Шеффера [10]. Несмотря на то, что точность предлагаемой модели, хотя и достаточна для современных приложений, теоретически ниже таковой из работы [10]. Однако при этом скорость вычислений по разработанной модели в несколько раз выше, чем по модели Копейкина-Шеффера.

Раздел 1.4 посвящён описанию подходов к учёту влияния эффектов распространения на задержку сигнала – одного из наиболее существенных факторов, ограничивающих современную точность радиоастрономических наблюдений. Даётся алгоритм расчёта ионосферной задержки сигнала с использованием карт вертикального полного содержания электронов (vertical total electron content – vTEC), ежедневно рассчитываемых Международной службой ГНСС (International GNSS service – IGS) по наблюдениям спутников ГНСС на глобальной сетке [26].

Далее в разделе 1.4 формулируются два подхода к учёту влияния тропосферы на задержку радио сигнала. Первый из них базируется на использовании глобальных эмпирических моделей, а второй – на применении метода трассировки лучей (ray-tracing) через численные модели тропосферы (ЧМТ, numerical weather models – NWM). Первый подход предоставляет 2 “ингредиента” для вычисления полной тропосферной задержки – задержку в направлении местного зенита и картирующую функцию для её проецирования на направление на источник. Приводится краткое описание т.н. Венской модели VMF1 (Vienna mapping functions 1), рекомендованной соглашениями МСВЗ 2010 года и реализующей указанный подход. Встречаются, однако, случаи, когда точность эмпирических моделей<sup>2</sup> недостаточна, и оказывается необходи-

---

<sup>2</sup> Как правило, при формулировке таких моделей используются некоторые упрощающие предполо-

мым использовать второй подход. Примером может служить ситуация, когда источник находится очень низко над горизонтом и/или когда угловое расстояние между целевым источником и калибратором больше размера изопланатической зоны<sup>3</sup>. Заметим, что именно такая ситуация сложилась во время проведения РСДБ-эксперимента по наблюдению КА VEX EM081с, которому посвящена глава 2. В рамках настоящего диссертационного исследования разработана модель и на её основе построен алгоритм вычисления тропосферной задержки радио сигнала методом трассировки лучей через ЧМТ. Описание алгоритма приводится в разделе 1.4, а пример его применения, демонстрирующий выигрыш в точности по сравнению с VMF1, – в главе 2.

В заключительной части главы в разделе 1.5 рассматриваются подходы к оцениванию вектора состояния космических аппаратов как функции времени – основной цели РСДБ-наблюдений КА. Эта задача в значительной мере сходна с традиционными астрометрическими приложениями метода РСДБ. Однако в связи с тем, что КА – источник ближней зоны для апертуры интерферометра, синтезированной с помощью РСДБ, оказывается необходимым осуществить модификацию традиционного подхода РСДБ дальней зоны. В разделе предлагается формализм матриц Якоби, обобщающих т.н. *uv*-проекции баз, используемые в случае “стандартных” РСДБ-наблюдений. Элементы этой матрицы представляют собой частные производные геоцентрических задержек сигнала по координатам источника и рассчитываются численно по модели из раздела 1.2. Показывается, как с помощью введённых матриц Якоби записывается уравнение измерений, которое затем решается относительно поправок к априорному положению КА. Наконец, описывается альтернативный подход к оцениванию координат КА, основанный на построении радио изображений КА с использованием предлагаемого формализма. Поправки к априорному положению в этом случае определяются по положению на карте максимума нормированной интенсивности.

Результаты первой главы опубликованы в работах [8, 17, 20]. Последующие главы посвящены применению результатов главы 1 при реальных РСДБ-наблюдениях космических аппаратов.

## **Глава 2 “Результаты экспериментов по РСДБ-наблюдениям космического аппарата Venus Express”**

В главе 2 приводится описание РСДБ-наблюдений в режиме фазовой привязки космического аппарата Европейского космического агентства (ESA) “Венера-Экспресс” (VenusExpress, VEX), проводившихся с использованием те-

---

жения, такие как азимутальная симметрия тропосферы вокруг наблюдательных станций или разделение полной задержки на гидростатическую и “влажную” части

<sup>3</sup> Изопланатической зоной, или углом, называется угловая область на небе, в пределах которой измеренная фаза источника может быть когерентно скомпенсирована. Её размер определяется характеристиками атмосферной турбулентности.



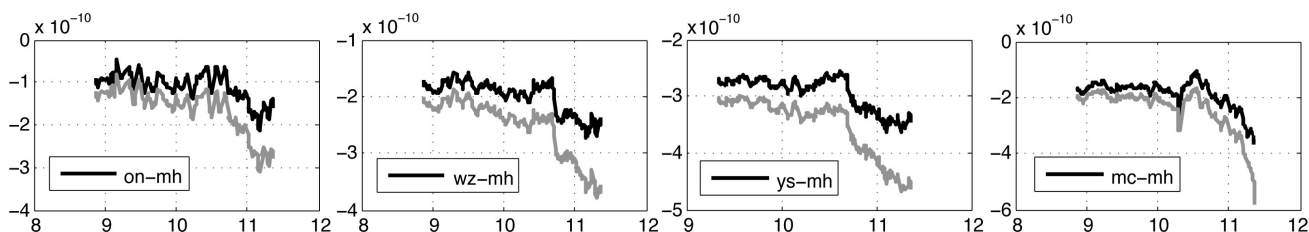


Рис. 3. Откалиброванные фазы на некоторых базах, полученные с применением Венской модели тропосферной задержки (светлые линии) и модели, разработанной при подготовке данной диссертации (тёмные линии). По горизонтальной оси – время UTC в часах, по вертикальной – откалиброванные дифференциальные фазы в секундах. 28 марта 2011 года, EVN проект EM081.

лескопов Европейской РСДБ-Сети (EVN) в рамках проекта EM081. В разделе 2.1 подробно рассматривается сессия EM081с, в которой участвовало 10 телескопов: станции EVN Онсала (Onsala, код On, Швеция), Ветцель (Wetzell, Wz, Германия), Медичина (Medicina, Mc, Италия), Матера (Matera, Ma, Италия), Йебес (Yebees, Ys, Испания), Мецахови (Metsähovi, Mh, Финляндия), Светлое (Sv, Россия), Зеленчукская (Zs, Россия), Хартебеистхук (Hartebeesthoek, Hh, ЮАР), а также станция VLBA Санта-Крус (St. Croix, Sc, США). Описываемые наблюдения проводились 28 марта 2011 года с 08:45 до 11:30 UTC. Отметим, что расстояние от Земли до КА VEX во время эксперимента составляло  $\sim 1.24$  АЕ.

Для записи данных использовалась стандартная система сбора РСДБ-данных, базирующаяся на оборудовании системы Mark5 A/B. Наблюдения производились на частоте 8411.99 МГц с использованием 4 частотных каналов шириной 16 МГц с 2-ух битной найквистовской оцифровкой. Для первоначального поиска интерференционных лепестков, определения сдвига и хода часов (стандартов частоты) на станциях и коррекции отклика по полосе приёма сигнала использовался источник J2225-0457 (также известный как 3C446, fringe finder), находившийся приблизительно в  $15^\circ$  от КА VEX. В качестве калибратора был выбран источник J2211-1328, находившийся в  $\sim 2.5^\circ$  от КА VEX. Необходимо отметить, что условия наблюдений в данном эксперименте были далеки от идеальных. В частности, склонения источников в диапазоне от  $-11^\circ$  до  $-13^\circ$  являются неблагоприятными для наблюдений с помощью сети EVN. В добавок к этому, угловое расстояние между КА VEX и калибратором в  $\sim 2.5^\circ$  превышало характерный размер изопланатической зоны на низких высотах источников над горизонтом, что привело к относительно большой нескомпенсированной тропосферной / ионосферной разнице фаз калибратора и КА VEX.

Обработка и анализ данных, рассматриваемые в разделе 2.2, осуществлялись по методике, описанной в главе 1 данной диссертации. Узкополосная обработка данных и извлечение частоты/фазы несущей осуществлялась с по-

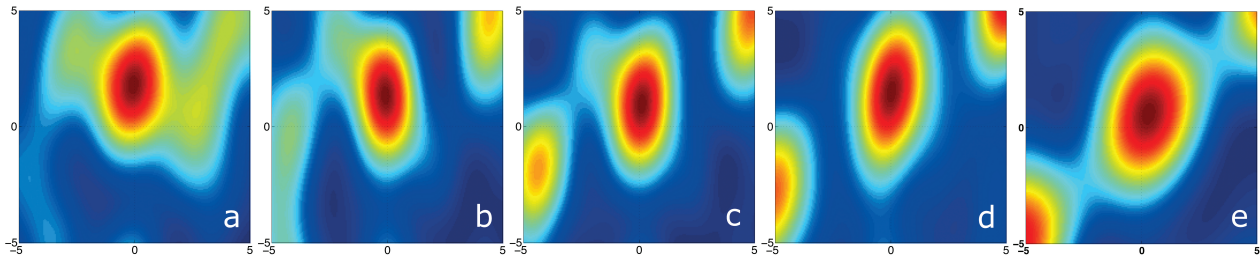


Рис. 4. Радио изображения КА VEX, полученные с использованием телескопов сети EVN, исключая Нh. Горизонтальная ось показывает отклонение от номинального прямого восхождения источника в мсд, вертикальная – отклонение от номинального склонения в мсд. (a)  $09^h05^m$  TDB, станции Op, Wz, Ma, Mc, Mh, Sv, Zc, (b)  $09^h30^m$  TDB, станция Ys включена в решение, (c)  $09^h55^m$  TDB, станция Sv исключена из решения, (d)  $10^h20^m$  TDB, станция Mh исключена из решения, (e)  $10^h45^m$  TDB, станция Zc исключена из решения. Методы чистки изображений за ненадобностью не применялись, поскольку не имеют смысла для истинного точечного источника. Интервал усреднения для каждой карты составляет 20 минут.

мощью ПО SWSpec / SCTracker / PLL (см. раздел 1.1). Топоцентрические измерения частоты и фазы были приведены в геоцентр по модели, разработанной в рамках данного исследования (см. раздел 1.2). Геоцентрические значения для разных станций в среднем очень мало отличаются друг от друга (для частот различие – несколько мГц и менее), что подтверждает точность вычислений по модели, а также согласованность модельных и наблюдаемых задержек. Широкополосная корреляция производилась в JIVE с помощью программного коррелятора SFXC.

К сожалению, аномальных ход шкалы часов на Нh не позволил определить абсолютную фазу для этой станции. Это не играет роли при построении самокалиброванных (self-calibrated) изображений, однако для целей оценивания вектора состояния космического аппарата использовать данные Нh оказалось невозможным. Дефект в работе преобразователя стандарта частоты на станции Нh был исправлен несколько дней спустя основываясь на анализе, выполненном с помощью ПО сверх-высокого спектрального разрешения SCTrack.

После корреляции сигнала калибратора на каждой базе на выходе были получены остаточные задержки (невязки). Для когерентной привязки фазы космического аппарата и калибратора, величина невязок должна быть меньше периода радио волны в X-диапазоне, что составляет примерно 0.120 нс. С помощью остаточных задержек и фаз источника J2211-1328 были откалиброваны измеренные остаточные фазы КА. Отметим, что для достижения необходимой точности на большей части баз оказалось достаточно использовать Венскую модель тропосферной задержки (см. раздел 1.4). Однако для некоторых баз её точности оказалось недостаточно, в следствие чего была применена разработанная в данной работе модель (описание см. раздел 1.4).



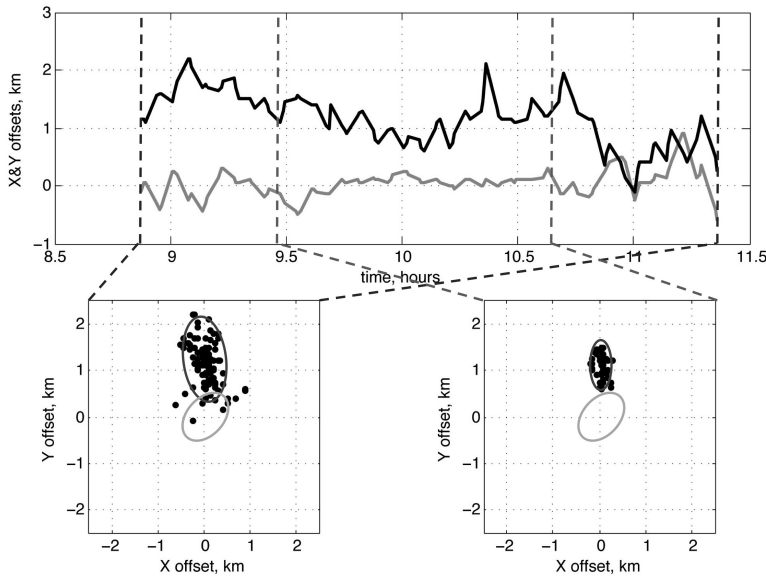


Рис. 5. (вверху) Измеренные отклонения координат космического аппарата ESA VEX относительно априорных. Сдвиг по координате X показан светлой линией, по Y – тёмной. Координаты X и Y приблизительно соответствуют прямому восхождению и склонению. (внизу) Разброс ошибок; светлые эллипсы – априорные  $1\sigma$ -оценки точности траектории, тёмные –  $3\sigma$ -разброс измерений для всего временного диапазона (слева) и для диапазона с наилучшей калибровкой (справа).

В большинстве случаев такой подход позволил значительно улучшить качество калибровки благодаря уменьшению непромоделированной части тропосферной задержки. Примеры приведены на рис. 3, где фазы, полученные с использованием модели, описываемой в данной работе, показаны красным цветом в сравнении с результатами применения Венской модели, выделенными синим цветом.

Используя откалиброванные данные, было выполнено построение радио изображений космического аппарата VEX (см. рис. 4) и определение отклонения его положения в картинной плоскости относительно априорного<sup>4</sup> с использованием двух подходов, описанных в разделе 1.5. Рис. 5 показывает оценку отклонения положения КА VEX от априорного по результатам измерений. Результаты показали согласованность подходов на уровне в  $\sim 25$  микросекунд дуги. Дискретизация данных на рис. 4 – 30 с, 1 км соответствует  $\approx 1.1$  мсд на расстоянии 1.24 АЕ. Точность оценки положения на  $3\sigma$ -уровне составляет 200-300 м поперёк и 500-600 м вдоль траектории КА.

Относительно большое угловое расстояние между КА VEX и калибратором ( $2.5^\circ$ ), их низкая высота над горизонтом и ограниченная точность моделей тропосферной и ионосферной задержки не позволили разрешить  $2\pi$ -неопределённость фазы на базах с участием станции Sc и включить эти данные в астрометрическое решение. В будущих экспериментах точность астрометрического решения может быть улучшена более, чем в 3 раза (разрешение может быть повышено до 20 мксд, или 0.1 нрад) при условии успешного решения указанных проблем.

Эксперимент EM081 продемонстрировал возможность достижения высокой астрометрической точности определения положения КА с использовани-

<sup>4</sup> Априорный вектор состояния КА VEX предоставлен Европейским центром управления полётами (European space operations centre – ESOC)

ем подхода, описанного в первой главе данной диссертации.

Для дальнейшего увеличения точности астрометрического решения будет необходимо разрешать  $2\pi$ -неопределённости фазы на длинных базах при низких высотах источников над горизонтом. Для этого в будущих наблюдениях целесообразно использовать более близко расположенные к целевому источнику калибраторы, желательны находящиеся в пределах главного лепестка диаграммы направленности телескопов одновременно с КА. Вдобавок к этому требуется дальнейшее улучшение точности моделей задержки сигнала в тропосфере и ионосфере, особенно для низких высот источников.

Результаты данного исследования с точки зрения достигнутой точности сопоставимы с результатами наиболее успешных экспериментов по определению методами РСДБ положения космических аппаратов, таких как “Кассини” [5] и Марсоход NASA MER-B на заключительном этапе фазы перелёта от Земли к Марсу [4]. Результаты второй главы опубликованы в работе [8].

### **Глава 3 “Результаты экспериментов по РСДБ- и доплеровским наблюдениям космических аппаратов ГЛОНАСС и РадиоАстрон”**

Область применения подхода, описанного в главе 1, не ограничивается только лишь аппаратами дальнего космоса – с равным успехом он может использоваться и при РСДБ-наблюдениях околоземных КА. Глава 3 посвящена описанию результатов экспериментов по наблюдению именно таких КА – спутников ГЛОНАСС (раздел 3.1) и космического радиотелескопа “РадиоАстрон” (раздел 3.2).

Наблюдения спутников ГЛОНАСС использовались в первую очередь как “тестовая платформа” для решения чрезвычайно важной задачи – улучшения точности определения орбиты КА “РадиоАстрон”, от чего во многом зависит успех всего проекта космического радиотелескопа. Однако эксперименты по наблюдению ГНСС имеют и самостоятельную научную ценность – постоянные наблюдения, подобные проведенным, позволят решить фундаментальную задачу - осуществить прямую привязку Земной системы координат (ITRS) к Небесной системе (ICRS) за счет одновременного наблюдения спутников навигационных систем и удаленных источников естественного радиоизлучения [14–16].

В подразделах 3.1.1 и 3.1.2 приводятся результаты экспериментов по наблюдению спутников ГЛОНАСС g100816 и g120402. Первый из них проводился 16 августа 2010 года при участии двух радиотелескопов: Медичина (Mc, Италия) и Онсала-85 (On, Швеция) на частоте излучения ГЛОНАСС L1 ( $\sim 1.6$  ГГц)<sup>5</sup>. Наблюдались спутники ГЛОНАСС PR11, с 12.00 до 12.15 UTC, PR21, с 12.45 до 13.00 UTC, и PR13, с 13.30 до 13.45 UTC. Экспери-

---

<sup>5</sup> Станция Mc не оборудована приёмником, способным регистрировать сигнал на частоте L2 ( $\sim 1.2$  ГГц)

мент был в первую очередь посвящён отработке технической стороны наблюдений, поэтому РСДБ-метод привязки фазы не применялся. Сессия g100816 выявила множество сопутствующих сложностей и проблем технического характера возникающих на разных этапах от планирования наблюдений до анализа результатов их обработки. Главная цель РСДБ-наблюдений спутников ГНСС – прямая привязка Земной СК к Небесной СК – может быть достигнута только после преодоления указанных трудностей. Именно это и явилось основной целью проекта ET019<sup>6</sup>, одобренного программным комитетом Европейской РСДБ-сети EVN. Тестовые наблюдения спутников ГЛОНАСС в рамках этого проекта были проведены 2 апреля 2012 года в течении 6 часов с 9:00 до 15:00 UT (сессия g120402, второй из описываемых экспериментов). В наблюдениях участвовало 3 телескопа – Медичина (Италия, Mc), Ното (Италия, Nt) и Онласа-85 (Швеция, On). Были выбраны спутники PR02, PR04, PR12 и PR14. Система сбора и записи РСДБ-данных Mark5A на станциях была настроена таким образом, чтобы сигнал от каждого спутника попадал примерно в середину одной из четырёх predetermined частотных полос шириной 16 МГц. В качестве калибраторов во время наблюдений было использовано 10 радиоисточников. Такое большое количество обусловлено тем фактом, что спутники ГЛОНАСС двигаются с большой скоростью по небесной сфере. При этом измеренная фаза калибратора может быть когерентно приложена к фазам спутников только при небольшом угловом расстоянии между ними.

Обработка и анализ данных проводились по схеме, описанной в главе 1. Возможность применения метода фазовой привязки оказалась ограничена некоторыми трудностями, с которыми пришлось столкнуться при обработке результатов кросс-корреляции сигнала близкорасположенных к спутникам ГЛОНАСС калибраторов – через боковые лепестки диаграммы направленности телескопов произошло “просачивание” сигнала от спутников из-за большой его мощности. Уровень шума измерений остаточной задержки для калибраторов при этом оказывается в  $\sim 10$  раз выше, чем в том случае, когда спутники находятся на относительно большом угловом расстоянии –  $\sim 50$  нс против  $\sim 5$  нс на времени интегрирования в 5 секунд – что сильно затрудняет калибровку. Таким образом, определение движения спутников ГЛОНАСС по методу привязки фазы станет возможным только если “паразитный” сигнал от них будет предварительно отфильтровываться из данных наблюдений калибровочных источников. Оценка достижимой при этом точности (осуществлена по данным обоих описываемых экспериментов с использованием независимых подходов) оказывается на уровне в несколько см.

В случае наблюдений спутников ГЛОНАСС доступна дополнительная

---

<sup>6</sup> Научные руководители проекта – доктор В. Торнаторе (Миланский политехнический университет, Италия) и доктор Р. Хаас (Технический университет Чалмерса, Швеция)

априорная информация, а именно частота передатчика в сопутствующей системе координат. Поэтому кинематические поправки к заданному положению КА могут быть определены с помощью минимизации разностей измеренных частот, приведённых в общий фазовый центр, обычно, – геоцентр, и предсказания однопутевого доплеровского сдвига частоты для этого фазового центра. Соответствующий математический аппарат приводится в разделе 3.1.1, где также обсуждаются возможные вычислительные трудности, возникающие при такой процедуре, и пути их преодоления. Точность поправок, рассчитанных таким методом, оказывается на 1-2 порядка ниже ( $\sim 20$  м против  $\sim 10$  см), чем таковая при использовании измерений фазы. Однако в случае наблюдений КА “РадиоАстрон” даже это является значительным улучшением по сравнению с текущей точностью определения его движения ( $\sim$  несколько км).

В разделе 3.2 приводится описание РСДБ-наблюдений космического радиотелескопа “РадиоАстрон” в рамках эксперимента r120314, которые проводились на станциях Медичина (Mc, Италия), Онсала (On, Швеция) и Ветцель (Wz, Германия) 14-15 марта 2012 года параллельно с EVN-сессией EK032 РСДБ-наблюдений источников 0716+714 и 2200+420 на наземно-космических базах КА “РадиоАстрон” – Земля. Основная цель проводившегося эксперимента r120314 – изучение поляризационных характеристик узконаправленной антенны КА, используемой для передачи данных на Землю. Одновременно с этим для целей данной диссертации осуществлялась отработка описываемого в настоящей работе алгоритма для определения поправок к априорным координатам, использование которого позволит существенно улучшить определение движения КА “РадиоАстрон”.

Наблюдения проводились в X-диапазоне (8.4 ГГц), для сбора данных на станциях использовалась стандартная система Mark5 A/B, ширина полосы записи – 16 МГц. Поскольку наблюдения носили тестовый характер, РСДБ-метод привязки фазы не применялся. Кроме того, в силу разных технических причин за весь сеанс только в течение небольшого промежутка времени одновременно наблюдало 2 телескопа, всё остальное же время – лишь какой-то один. Вдобавок к этому, промежуток времени, во время которого наблюдения одновременно велись на двух телескопах, с геометрической точки зрения оказался наименее благоприятен для определения движения КА по алгоритму, описываемому в разделе 3.1.1. Вследствие указанных причин результаты, приводимые в разделе, являются лишь демонстрационными. Несмотря на это, в разделе показана работоспособность и точность разработанного в данной диссертации алгоритма. Подход, успешно продемонстрированный на примере РСДБ-наблюдений спутников ГЛОНАСС, в будущем будет применяться и для определения движения КА “РадиоАстрон”.

Некоторые результаты третьей главы опубликованы в работах [14–16].

## Заключение

Приводятся выводы работы, суммируются достигнутые результаты и обсуждаются перспективы дальнейших исследований по теме данной диссертации.

## Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному сотруднику Объединённого Европейского института РСДБ (JIVE) к.ф.-м.н. С.В. Погребенко, помощь и направляющее содействие которого стали одним из определяющих факторов для успешного проведения данного диссертационного исследования. Многочисленные плодотворные научные дискуссии с С.В. Погребенко и, конечно, научными руководителями диссертанта профессорами В.Е. Жаровым и Л.И. Гурвицем, подкреплённые моральной поддержкой с их стороны, предопределили успешное завершение работы над диссертацией. Автор благодарен Дж. Чимо, Г. Молера Калвес, Т. Боканегра Бахамон, Р. Кэмпбелл и А. Кяймпема из JIVE, оказывавших содействие на различных этапах работы, сотрудникам обсерваторий, участвовавших в наблюдениях: П. де Висенте, Дж. Квику, Г. Кроншнаблю, Р. Хаасу, А. Орлатти, Дж. Колуччи, А. Финкельштейну, М. Харинову, А. Михайлову, сотрудникам NRAO VLBA, а также дирекции JIVE. Метеорологические данные Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ESMWF предоставлены Королевским Нидерландским метеорологическим институтом KNMI. Грант на стажировку в JIVE предоставлен в рамках проекта Европейской комиссии FP7 EuroPlaNet (грант №228319).

И наконец последнее, что необходимо здесь упомянуть, но от этого не менее важное – это помощь и поддержка со стороны самых близких людей, вдохновлявшие автора во время работы над диссертацией.

## Список литературы

1. Preston, R., Hildebrand, C., Purcell, G., et al. *Science* **231**(4744), 1414–1416 (1986).
2. Lebreton, J. P., Witasse, O., Sollazzo, C., et al. *Nature* **438**, 758–764 (2005).
3. Pogrebenko, S. V., Gurvits, L. I., Wagner, J., et al. In *Proceedings of the Cassini PSG meeting* (Nantes, France, 2006).
4. Lanyi, G., Bagri, D. S., and Border, J. S. *Proceedings of the IEEE* **95**(11), 2193–2201 (2007).
5. Jones, D. L., Fomalont, E., Dhawan, V., et al. *The Astronomical Journal* **141**(2), 29 (2011).
6. Molera Calvés, G., Pogrebenko, S. V., Gurvits, L. I., et al. In *American Geophysical Union, Fall Meeting 2010*, (2010).

7. Avruch, I., Pogrebenko, S., and Gurvits, L. *Proceedings of Science 8th European VLBI Network Symposium* (2006).
8. Duev, D. A., Molera Calvés, G., Pogrebenko, S. V., Gurvits, L. I., Cimó, G., and Bahamon, T. B. *Astron. Astrophys.* **541**(id.A43) (2012).
9. Turyshev, S. G. and Toth, V. *Living Rev. Relativ.* **13**(4) (2010).
10. Kopeikin, S. M. and Schaefer, G. *Phys. Rev. D* **60** (1999).
11. Molera Calvés, G. *Radio Spectroscopy and Space Science with VLBI Radio Telescopes for Solar System Research*. PhD thesis, Aalto University, Finland, (2012).
12. Fridman, P. A. et al. *SKA Memo No. 104*. (2008).
13. Kardashev, N. S. *Phys. Uspekhi* **179**(11), 1127–1137 (2009).
14. Tornatore, V., Haas, R., Pogrebenko, S., et al. In *5th ESA International Workshop on Tracking Telemetry and Command System for Space Applications*, 21-23 September (2010).
15. Tornatore, V., Haas, R., Duev, D., et al. In *Proceedings of 20th EVGA Meeting & 12th Analysis Workshop* (, MPIfR, Bonn, Germany, 2011).
16. Tornatore, V., Haas, R., Casey, S., Duev, D., Pogrebenko, S., and Molera Calvés, G. *International Association of Geodesy Symposia* (2012).
17. Wilson, C., Chassefire, E., Hinglais, E., et al. *Exp. Astron.* (0922-6435), 1–31 (2011).
18. Blanc, M., Alibert, Y., Atreya, S., et al. *Exp. Astron.* **23**, 849–892 (2009).
19. Christophe, B., Foulon, B., and Levy, A. In *Proceedings of Societe Francaise d’Astronomie et d’Astrophysique, 2008*, Charbonnel, C., Combes, F., and Samadi, R., editors, 73–76, (2009).
20. Duev, D. A., Pogrebenko, S. V., and Molera Calvés, G. *Ast. Rep.* **55**(11), 1008–1015 (2011).
21. Wagner, J., Molera Calvés, G., and Pogrebenko, S. V. *Metsähovi Software Spectrometer and Spacecraft Tracking tools, Software Release, GNU GPL*. MIT Haystack Observatory, (2009-2012).
22. Keimpema, K. A., Duev, D. A., Pogrebenko, S. V., et al. In *Proceedings of the URSI-BeNeLux Forum, June 6, 2011* (, ESTEC, Noordwijk aan Zee, The Netherlands, 2011).
23. Born, M. and Wolf, E. *Principles of Optics 7th ed.* Cambridge, (2002).
24. Moyer, T. D. *Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation*. Wiley-Interscience, (2003).
25. Petit, G. and Luzum, B., editors. *IERS Conventions 2010. Technical Note 36*. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, (2010).
26. Feltens, J. and Schaer, S. In *Proceedings of the IGS AC Workshop* (Darmstadt, Germany, 1998).