

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П. Н. ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

Литвинов Дмитрий Александрович

**Проверка эйнштейновского принципа эквивалентности с
помощью космического аппарата РадиоАстрон**

Специальности:

01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

01.04.03 – «Радиофизика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН), г. Москва.

Научные руководители:

Пилипенко Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН

Руденко Валентин Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом гравитационных измерений ГАИШ МГУ

Официальные оппоненты:

Барсуков Дмитрий Петрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Черепенин Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Ведущая организация:

Институт космических исследований РАН, г. Москва

Защита состоится «9» июня 2022 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д002.023.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан «28» марта 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д002.023.01, к.ф.-м.н.

Шахворостова Н. Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Общая теория относительности (ОТО) и квантовая теория составляют основу современной физической картины мира. Тем не менее, классический характер эйнштейновской теории гравитации, а также имеющиеся в ней внутренние противоречия, такие как проблема сингулярности, свидетельствуют о том, что ОТО не является окончательной теорией гравитации. Попытки объединения ОТО с квантовой теорией, предпринимаемые в рамках теории струн, петлевой квантовой гравитации и др., неизбежно приводят к нарушению лежащего в основе ОТО эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ). Экспериментальное обнаружение отклонений от предсказаний ОТО и ЭПЭ является поэтому принципиально важной задачей, решение которой позволит заложить экспериментальный базис единой теории фундаментальных взаимодействий.

Одним из перспективных способов проверки ОТО, а также любой другой метрической теории гравитации, является измерение эффекта гравитационного замедления времени, который является прямым следствием ЭПЭ и, в частности, принципа локальной пространственно-временной инвариантности. Выражение для эффекта гравитационного замедления времени, испытываемого двумя часами, находящимися в точках с различным гравитационным потенциалом, в простейшем случае слабого гравитационного поля и единственного параметра нарушения ЭПЭ имеет вид:

$$\frac{\Delta T_{\text{grav}}}{T} = (1 + \varepsilon) \frac{\Delta U}{c^2}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{grav}}/T$ – относительное замедление времени, испытываемое часами, ΔU – разность гравитационных потенциалов между ними, c – скорость света, ε – параметр нарушения ЭПЭ [1].

Проверка ЭПЭ на основе соотношения (1), а также более сложных его вариантов [2], является сферой активного экспериментального исследования. Первое надежное измерение эффекта было произведено в лабораторных экспериментах, основанных на эффекте Мессбауэра и достигших точности 1% [3]. С использованием водородного стандарта частоты на борту суборбитального космического аппарата (КА) была достигнута точность эксперимента 1.4×10^{-4} [4]. Недавно с помощью навигационных спутников Galileo 5 & 6 эффект был измерен с точностью $(2 - 3) \times 10^{-5}$ [5, 6]. Планируется к запуску проект ACES [7] (ожидаемая точность 2×10^{-6}). На различных ста-

дях планирования находится еще несколько экспериментов: STE-QUEST [2], E-GRIP [8], E-GRASP [9]. Одновременно проводятся дифференциальные (нуль-редшифт) эксперименты, основанные на сравнении скорости хода часов различных типов, находящихся в одной лаборатории и, следовательно, с одинаковым гравитационным потенциалом (точность $\sim 10^{-6}$ [10]). Уникальная возможность проверки ЭПЭ в широком диапазоне расстояний от Земли, от 10 до 350 тыс. км, и точностью на уровне 10^{-5} появилась благодаря реализации проекта РадиоАстрон. Основной научной задачей данного проекта являлось изучение астрофизических объектов и явлений по методу радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами. Однако, благодаря наличию на борту высокостабильного водородного стандарта частоты и эллиптической орбите РадиоАстрон оказался весьма удобным инструментом для измерения эффекта гравитационного замедления времени.

Дальнейшее повышение точности подобных экспериментов связано, во-первых, с произошедшим за последнее десятилетие увеличением на 2–3 порядка стабильности атомных часов (до $\sim 10^{-18}$ в терминах относительных флуктуаций частоты на интервалах усреднения ~ 1 ч) и ожидающимся появлением аналогичных бортовых образцов, и, во-вторых, размещением всех сравниваемых часов на КА. При планировании и осуществлении подобных экспериментов возникает несколько принципиальных вопросов: 1) оценка предельной точности проверки ЭПЭ с часами данного типа; 2) выбор оптимальной конфигурации орбит спутников; 3) исследование точности учета «сопутствующих» эффектов, таких как доплеровский сдвиг частоты и эффект движения фазового центра (ДФЦ) приемо-передающих антенн. Рассмотрение этих вопросов до настоящего времени носило неполный характер либо не проводилось вовсе. Так, оценка точности проверки ЭПЭ в эксперименте Gravity Probe A выполнена в неявном предположении о белом характере шума [4]. В эксперименте со спутниками Galileo не учитывались нарушающие ЭПЭ вклады Солнца и Луны в гравитационное замедление времени, а учет дрейфа скорости хода часов выполнен приближенно [5, 6]. Задача выбора оптимальной конфигурации подобных экспериментов до настоящего времени не рассматривалась, равно как не проводилось исследование точности учета эффекта ДФЦ остронаправленных приемо-передающих антенн.

Целью данной диссертационной работы является усовершенствование математических моделей, описывающих эксперименты по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ), основанные на измерении эф-

факта гравитационного замедления времени с помощью размещаемых на космических аппаратах высокостабильных атомных часов, и использование этих моделей для проверки ЭПЭ с помощью космического аппарата РадиоАстрон.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель космических и наземно-космических экспериментов по проверке ЭПЭ, основанных на измерении эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных часов, учитывающую гравитационное воздействие тел Солнечной системы, окрашенный шум часов и возможную зависимость нарушающего ЭПЭ вклада в гравитационное замедление времени от типа часов и источника гравитационного поля. Модель должна позволять анализировать данные, оценивать точность и интерпретировать результаты экспериментов с атомными часами текущего и следующего поколений.
2. Оценить точность эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени, достижимую с помощью КА РадиоАстрон.
3. Разработать методологию эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с помощью КА РадиоАстрон, учитывающую его аппаратные ограничения.
4. Разработать математическую модель эффекта ДФЦ бортовых и наземных остронаправленных антенн, учитывающую ошибки наведения и схему компенсации нерелятивистского эффекта Доплера типа Gravity Probe A. Апробировать созданную модель на данных, полученных с помощью КА РадиоАстрон.
5. Измерить параметр нарушения ЭПЭ, связанный с эффектом гравитационного замедления времени, используя данные доплеровского слежения за КА РадиоАстрон, полученные в сеансах связи КА с наземными станциями слежения (НСС).

Научная новизна:

1. Впервые построена математическая модель эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных часов, основанная на использовании полной информации об их

шумовых параметрах в виде спектральной плотности мощности шума, а также учитывающая гравитационное воздействие тел Солнечной системы и возможную зависимость нарушающего ЭПЭ вклада в гравитационное замедление времени от типа часов и источника гравитационного поля.

2. Впервые предложена концепция эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени и проверке ЭПЭ с помощью двух околоземных спутников, оснащенных высокостабильными часами. Определена оптимальная конфигурация орбит спутников и показано, что точность эксперимента может достичь 3×10^{-10} с использованием существующих образцов атомных часов.
3. Впервые разработана математическая модель эффекта ДФЦ бортовых и наземных остронаправленных антенн, учитывающая ошибки наведения. Впервые показано, что схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера типа Gravity Probe A позволяет на 4–5 порядков уменьшить эффект ДФЦ для наземной антенны (до 1×10^{-16} для РадиоАстро-на) и полностью скомпенсировать вклад бортовой антенны в сдвиг частоты передаваемых сигналов.
4. Впервые разработана схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферного сдвига частоты в экспериментах по доплеровскому слежению за космическими аппаратами, основанная на использовании широкополосных сигналов с синхронизацией несущего и модулирующего сигналов от различных источников: несущего – от наземного стандарта, модулирующего – от бортового.
5. Впервые осуществлена проверка ЭПЭ путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с точностью 3×10^{-2} на расстояниях от 10 до 350 тыс. км от Земли.

Научная и практическая значимость. Полученные в рамках данной работы теоретические результаты могут быть использованы при разработке концепций будущих экспериментов по проверке ЭПЭ и иных высокоточных экспериментов, использующих данные доплеровского слежения за КА. Предложенная усовершенствованная математическая модель экспериментов

по проверке ЭПЭ, основанных на измерении эффекта гравитационного замедления времени, может быть использована для оценки точности, обработки и интерпретации данных наземно-космических, полностью космических и полностью наземных экспериментов с атомными часами текущего и следующего поколений (с относительной частотной стабильностью до $\sim 10^{-18}$ на временах усреднения ~ 1 ч). Предложенная концепция эксперимента с двумя околоземными спутниками открывает возможность нового типа измерения постньютоновских параметров β и γ и улучшения точности проверки ЭПЭ на 5 порядков. Разработанная математическая модель эффекта ДФЦ антенн, учитывающая ошибки наведения, а также демонстрация компенсации данного эффекта с помощью схемы Gravity Probe A закладывают основу для будущих высокоточных экспериментов по доплеровскому слежению за КА с помощью остронаправленных антенн. Разработанная схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферного сдвига частоты, основанная на смешанном режиме синхронизации несущего и модулирующего сигналов линии связи с КА, может быть использована в будущих экспериментах по измерению гравитационного замедления времени. Проведенное измерение эффекта гравитационного замедления времени с помощью КА РадиоАстрон подтверждает справедливость ЭПЭ с точностью 3×10^{-2} на расстояниях от 10 до 350 тыс. км от Земли и закладывает основания для дальнейших экспериментальных проверок данного принципа.

Методы исследования. При решении задачи оценки предельной точности эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с помощью двух спутников на околоземной орбите использовался метод максимального правдоподобия и неравенство Крамера-Рао. В качестве вычислительных средств использовались языки программирования C++, Python и Matlab. Для расчета орбит и условий видимости аппаратов применялась библиотека SPICE.

При решении задачи расчета параметра нарушения ЭПЭ с помощью КА РадиоАстрон и оценке его ошибки, использовался метод наименьших квадратов. В качестве вычислительных средств использовались языки программирования C++ и Matlab. Для расчета кинематических параметров НСС и преобразования координат использовалась библиотека NOVAS. Эти же средства использовались при расчете эффекта ДФЦ наземных и бортовых зеркальных приемо-передающих антенн.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана математическая модель космических экспериментов по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности, основанных на измерении эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных часов. Модель учитывает гравитационное воздействие тел Солнечной системы, окрашенный характер шума часов и возможную зависимость нарушающего принцип эквивалентности вклада в гравитационное замедление времени от типа часов и источника гравитационного поля. С помощью данной модели произведена оценка предельной точности эксперимента по проверке эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью космического аппарата РадиоАстрон, которая составила 5×10^{-6} при накоплении данных в течение 1 года.
2. Разработана концепция эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени и проверки эйнштейновского принципа эквивалентности с помощью двух околоземных спутников, оснащенных высокостабильными часами. Определена оптимальная конфигурация орбит спутников и показано, что точность эксперимента может достичь 3×10^{-10} с использованием существующих атомных часов при накоплении данных в течение 3 лет. Это на 5 порядков лучше достигнутого на настоящий момент результата.
3. Разработана математическая модель эффекта движения фазового центра бортовых и наземных остронаправленных антенн, учитывающая ошибки наведения. Показано, что в гравитационном эксперименте с РадиоАстроном эти ошибки могут на порядок превышать допустимые. Разработана схема компенсации данного эффекта, которая позволяет на 4–5 порядков уменьшить его вклад в сдвиг частоты сигналов.
4. Разработана схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы в экспериментах по доплеровскому слежению за космическими аппаратами, основанная на смешанном режиме синхронизации радиолинии космический аппарат – наземная станция (несущий сигнал – от наземного стандарта частоты, модулирующий – от бортового). Схема реализована на практике в гравитационных сеансах по доплеровскому слежению за космическим аппаратом РадиоАстрон.

5. Осуществлена проверка эйнштейновского принципа эквивалентности путем измерения эффекта гравитационного замедления времени с помощью космического аппарата РадиоАстрон с точностью 3×10^{-2} . Данная точность впервые достигнута на расстояниях, охватывающих диапазон от 10 до 350 тыс. км от центра Земли.

Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые.

Высокая достоверность полученного экспериментального результата по проверке ЭПЭ подтверждается его согласием с опубликованными ранее результатами экспериментов Gravity Probe A и GREAT. Достоверность теоретических результатов обеспечивается надежностью методик, реализованных в программном обеспечении, которое использовалось при моделировании, и независимой проверкой результатов различными методами. Достоверность представленных результатов подтверждается апробацией на российских и зарубежных международных конференциях, где присутствовали специалисты в данной области, а также публикациями в рецензируемых журналах.

Апробация работы. Основные результаты и положения, которые выносятся на защиту, апробированы в публикациях и обсуждениях на конференциях. Результаты были представлены и обсуждались на следующих конференциях:

1. *40-я Научная ассамблея КОСПАР (40th COSPAR Scientific Assembly)*, г. Москва, Россия, 2014;
2. *Конференция «Рассекая Вселенную» (Dissecting the Universe)*, Бонн, Германия, 2015;
3. *13-й Симпозиум европейской РСДБ сети (13th European VLBI Network Symposium)*, г. Санкт-Петербург, Россия, 2016;
4. *14-я Конференция им. Марселя Гроссмана (The 14th Marcel Grossmann Meeting)*, г. Рим, Италия, 2016;
5. *Всероссийская астрономическая конференция «ВАК-2017»*, г. Ялта, Россия, 2017;
6. *Конференция «6-й Международный colloquium по научным и фундаментальным аспектам ГНСС/Галилео» (6th International Colloquium*

- on Scientific and Fundamental Aspects of GNSS/Galileo*), г. Валенсия, Испания, 2017;
7. *14-й Симпозиум европейской РСДБ сети (14th European VLBI Network Symposium)*, г. Гранада, Испания, 2018;
 8. *42-я Научная ассамблея КОСПАР (42nd COSPAR Scientific Assembly)*, г. Пасадина, США, 2018;
 9. *15-я Конференция им. Марселя Гроссмманна (The 15th Marcel Grossmann Meeting)*, г. Рим, Италия, 2018;
 10. *54-я конференция «Rencontres de Moriond»*, г. Ля Тюиль, Италия, 2019;
 11. *43-я Научная ассамблея КОСПАР (43rd COSPAR Scientific Assembly)*, г. Сидней, Австралия, 2021.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах. Всего имеется 5 научных статей [A1–A5] с основными результатами, выносимыми на защиту, в журналах, входящих в список Web of Science Core Collection и рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) при Министерстве образования и науки РФ. Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- A1** Бирюков А. В., Кауц В. Л., Кулагин В. В., Литвинов Д. А., Руденко В. Н. Измерение гравитационного красного смещения с помощью космического радиотелескопа «РадиоАстрон» // *Астрономический журнал*. 2014. Т. 91, № 11. С. 887–900.
- A2** Litvinov D. A., Rudenko V. N., Alakoz A. V., Bach U., Bartel N., Belonenko A. V., Belousov K. G., Bietenholz M., Biriukov A. V., Carman R., Cimò G., Courde S., Dirkx D., Duev D. A., Filetkin A. I., Granato G., Gurvits L. I., Gusev A. V., Haas R., Herold G., Kahlon A., Kanevsky B. Z., Kauts V. L., Kopelyansky G. D., Kovalenko A. V., Kronschnabl G., Kulagin V. V., Kutkin A. M., Lindqvist M., Lovell J. E. J., Mariey H., McCallum J., Molera Calvés G., Moore C., Moore K., Neidhardt A., Plötz C., Pogrebenko S. V., Pollard A., Porayko N. K., Quick J., Smirnov A. I., Sokolovsky K. V., Stepanyants V. A., Torre J. M., de Vicente P., Yang J., Zakhvatkin M. V. Probing the gravitational redshift with an Earth-orbiting satellite // *Physics Letters A*. 2018. Vol. 382, no. 33. P. 2192–2198.

- A3** Nunes N. V., Bartel N., Bietenholz M. F., Zakhvatkin M. V., Litvinov D. A., Rudenko V. N., Gurvits L. I., Granato G., Dirkx D. The gravitational redshift monitored with RadioAstron from near Earth up to 350,000 km // *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 65, no. 2. P. 790–797.
- A4** Litvinov D., Pilipenko S. Testing the Einstein equivalence principle with two Earth-orbiting clocks // *Classical and Quantum Gravity*. 2021. Vol. 38, no. 13. P. 135010.
- A5** Litvinov D. A., Nunes N. V., Filetkin A. I., Bartel N., Gurvits L. I., Molera Calves G., Rudenko V. N., Zakhvatkin M. V. The antenna phase center motion effect in high-accuracy spacecraft tracking experiments // *Advances in Space Research*. 2021. Vol. 68, no. 10. P. 4274–4291.

Личный вклад. Во всех результатах, выносимых на защиту, личный вклад автора является основным или равным вкладу соавторов.

В работе [A1] вклад диссертанта основной и включает разработку концепции проведения эксперимента в режиме работы «Частичный Когерент» КА РадиоАстрон, обработку данных частотных измерений со спутника, моделирование спектра сигнала 15 ГГц КА РадиоАстрон в режиме «Тест-2», участие в обсуждении результатов и подготовку публикации.

В работе [A2] вклад диссертанта основной и включает разработку концепции эксперимента на основе чередования режимов синхронизации линий связи с КА РадиоАстрон, планирование наблюдений, разработку программного обеспечения для обработки экспериментальных данных, обработку экспериментальных данных (построение кривой дрейфа частоты бортового стандарта относительно наземного стандарта НСС Грин Бенк, обработку данных измерений с телескопа Онсала), участие в обсуждении результатов и подготовку публикации.

В работе [A3] вклад диссертанта равен вкладу соавторов и включает постановку задачи, разработку алгоритмов и программного обеспечения для обработки экспериментальных данных, обработку экспериментальных данных, получение оценки параметра нарушения ЭПЭ, связанного с эффектом гравитационного замедления времени, и участие в обсуждении результатов.

В работе [A4] вклад диссертанта равен вкладу соавтора и включает постановку задачи, создание математической модели эффекта нарушения ЭПЭ, разработку концепции эксперимента по измерению эффекта гравитационно-

го замедления времени с помощью двух околоземных спутников, проведение математического моделирования, участие в обсуждении результатов и подготовку публикации.

В работе [А5] вклад диссертанта основной и включает постановку задачи, разработку математической модели эффекта ДФЦ остронаправленных антенн, разработку схемы компенсации эффекта, разработку программного обеспечения для обработки экспериментальных данных и математического моделирования, обработку экспериментальных данных (за исключением расчета невязок частотных измерений с НСС Грин Бенк), моделирование эффекта для КА РадиоАстрон и КА будущих проектов космической РСДБ, участие в обсуждении результатов и подготовку публикации.

Соответствие специальности. Цель диссертационной работы находится в русле исследований по созданию и совершенствованию физической картины мира, раскрытию природы процессов и явлений в космическом пространстве – и поэтому соответствует специальности 01.03.02 («Астрофизика и звездная астрономия»). Диссертация посвящена исследованию распространения электромагнитного излучения в космическом пространстве под действием гравитации со стороны тел Солнечной системы, что соответствует паспорту специальности 01.03.02, а также исследованию приема и распространения радиоволн, что соответствует паспорту специальности 01.04.03 («Радиофизика»). Построенная в диссертации математическая модель гравитационного эксперимента по проверке ЭПЭ с учетом шумовых параметров часов, новая концепция эксперимента по проверке ЭПЭ с помощью двух космических аппаратов и новые результаты проверки ЭПЭ по данным проекта РадиоАстрон вносят вклад в области науки, соответствующие специальности 01.03.02. Разработанная математическая модель эффекта ДФЦ бортовых и наземных остронаправленных антенн и новая схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера составляют вклад диссертации в исследования антенных систем и способов передачи радиосигналов, что относится к специальности 01.04.03.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, списка рисунков и списка таблиц. Полный объем диссертации составляет 120 страниц с 35 рисунками и 8 таблицами. Список литературы содержит 109 наименований на 9 страницах.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Также во введении приводятся основные результаты работы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена изложению разработанного автором и С. Пилипенко подхода к оценке точности наземно-космических экспериментов по измерению эффекта гравитационного замедления времени с помощью высокостабильных часов [А4]. Предыдущие исследования подобного рода использовали приблизительные оценки, основанные на аллановской девиации относительной частоты часов либо исходили из других существенных упрощающих предположений о характере шума часов, а также не учитывали нарушающие ЭПЭ вклады Солнца и Луны в эффект гравитационного замедления времени [4, 5, 6]. Разработанный нами аналитический подход, основанный на методе максимального правдоподобия и неравенстве Крамера-Рао, использует полную информацию о шумовых характеристиках часов, содержащуюся в спектральной плотности мощности шумов в их выходном сигнале, и применим как к белому, так и окрашенному шуму. Кроме того, наша модель учитывает нарушающие ЭПЭ вклады в эффект гравитационного замедления времени от Солнца, Луны и планет и применима к многопараметрическим моделям нарушения ЭПЭ.

Для экспериментов по измерению гравитационного замедления времени, или гравитационного красного смещения, в околоземном пространстве наиболее общее уравнение для гравитационного сдвига частоты имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = \frac{U_E^{(1)} - U_E^{(2)}}{c^2} + \frac{\varepsilon_E^{(1)} U_E^{(1)} - \varepsilon_E^{(2)} U_E^{(2)}}{c^2} + \frac{\varepsilon_S^{(1)} U_S^{(1)} - \varepsilon_S^{(2)} U_S^{(2)}}{c^2} + \frac{\varepsilon_M^{(1)} U_M^{(1)} - \varepsilon_M^{(2)} U_M^{(2)}}{c^2} + \dots, \quad (2)$$

где верхний индекс различает часы, а нижний – источники гравитационного поля: E для Земли, S для Солнца, M для Луны, многоточие обозначает аналогичные слагаемые для других массивных тел Солнечной системы [2, 11]. Нами был рассмотрен важный частный случай уравнения (2), когда все параметры нарушения ЭПЭ в (2) равны, а часы идентичны. Также мы учли возможный

Таблица 1: Спектральная плотность мощности (СПМ) флуктуаций относительной частоты, $\Delta f/f$, выходного сигнала часов [A4].

Часы	СПМ
VCH-1010	$1.5 \times 10^{-26} f^0 + 7.0 \times 10^{-31} f^{-1} + 3.5 \times 10^{-35} f^{-2}$
PHARAO	$5.0 \times 10^{-27} f^0 + 7.5 \times 10^{-33} f^{-1}$
JILA SrI	$2.0 \times 10^{-31} f^0 + 2.1 \times 10^{-36} f^{-1}$

сдвиг частоты между двумя часами. Таким образом, нами предложена следующая математическая модель эксперимента по измерению гравитационного смещения частоты:

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = \frac{U_{\text{E}}^{(1)} - U_{\text{E}}^{(2)}}{c^2} + \varepsilon \left(\frac{U_{\text{E}}^{(1)} - U_{\text{E}}^{(2)}}{c^2} + \frac{U_{\text{S}}^{(1)} - U_{\text{S}}^{(2)}}{c^2} + \frac{U_{\text{M}}^{(1)} - U_{\text{M}}^{(2)}}{c^2} + \dots \right) + \Delta f_0 + n(t), \quad (3)$$

где ε – параметр нарушения ЭПЭ, который необходимо определить, Δf_0 – неизвестное смещение частоты между часами, $n(t)$ – случайный процесс, который характеризует флуктуации относительной частоты часов, t – координатное время. В реальном эксперименте необходимо учитывать и другие вклады в сдвиг частоты сигналов, например, связанные с движением КА.

Данная модель была применена к решению задачи оценки точности эксперимента в двух конфигурациях: 1) полностью космический эксперимент с двумя КА; 2) наземно-космический эксперимент со спутником РадиоАстрон и НСС Грин Бенк. В качестве примера часов использованы: водородный стандарт частоты ВЧ-1010 КА РадиоАстрон [A2], цезиевые часы PHARAO планируемого проекта ACES [7], лабораторные стронциевые часы JILA SrI [12]. Шумовые характеристики часов приведены в Таблице 1. Точность измерения параметра ε оценивалась с помощью неравенства Крамера-Рао.

Для эксперимента с двумя КА были выбраны кеплеровы орбиты, часть параметров которых была фиксирована по соображениям максимизации глубины модуляции гравитационного эффекта и невхождения спутников в атмосферу Земли (Таблица 2). По периоду орбит, который был принят одинаковым, была проведена оптимизация (Рис. 1). Оптимальное значение периода для всех часов составило ~ 4 – 5 ч.

Данный метод также был применен к проблеме оценки точности эксперимента по измерению гравитационного красного смещения с КА РадиоАстрон.

Таблица 2: Значения фиксированных параметров орбит спутников (на произвольно выбранную эпоху 01/01/2030 00:00:00 UTC) [A4].

Параметр орбиты	Спутник 1	Спутник 2
Наклонение	0 град	0 град
Перигей	7,500 км	7,500 км
Долгота восходящего узла	0 град	0 град
Аргумент перигея	0 град	180 град
Средняя аномалия на эпоху	0 град	180 град

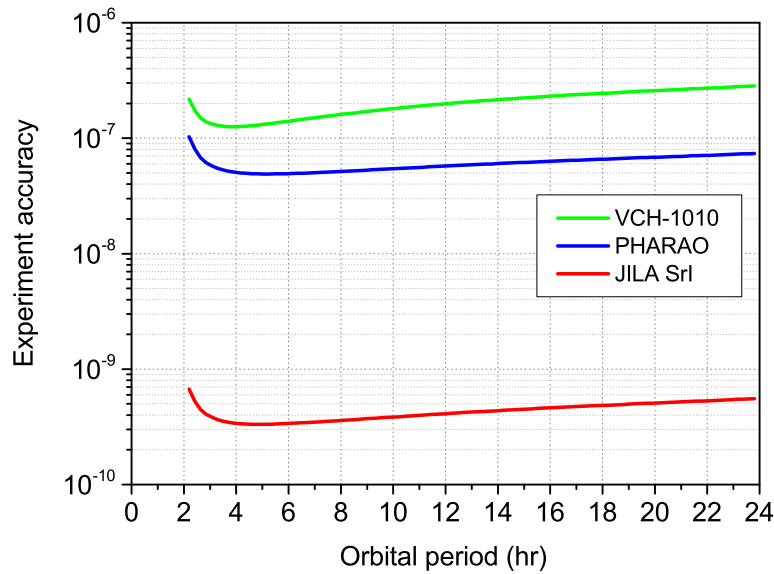


Рис. 1: Точность эксперимента по проверке ЭПЭ с двумя КА на околоземной орбите в зависимости от периода орбит. Продолжительность эксперимента 3 года. Параметры часов указаны в Таблице 1. По горизонтальной оси – период орбит спутников (ч), по вертикальной – точность измерения параметра нарушения ЭПЭ ε [A4].

Зависимость точности данного эксперимента от времени накопления для интервала 01/01/2014 – 01/01/2015 и НСС Грин Бенк представлена на Рис. 2. На временах порядка 1 года точность эксперимента достигает 5.1×10^{-6} , что более чем на порядок ниже, чем у рассмотренного выше космического эксперимента с теми же часами и такой же продолжительностью. На больших временах накопления зависимость точности эксперимента от времени отклоняется от закона $t^{-1/2}$, что связано с эволюционирующим характером орбиты РадиоАстроны. Также отметим низкую точность эксперимента на временах накопления ~ 1 сут, что объясняется существенной коррелированностью ошибок в оценках параметра ε и разности частот бортового и наземного стандартов, Δf_0 , что, в свою очередь, связано с импульсной формой гравитационного сигнала.

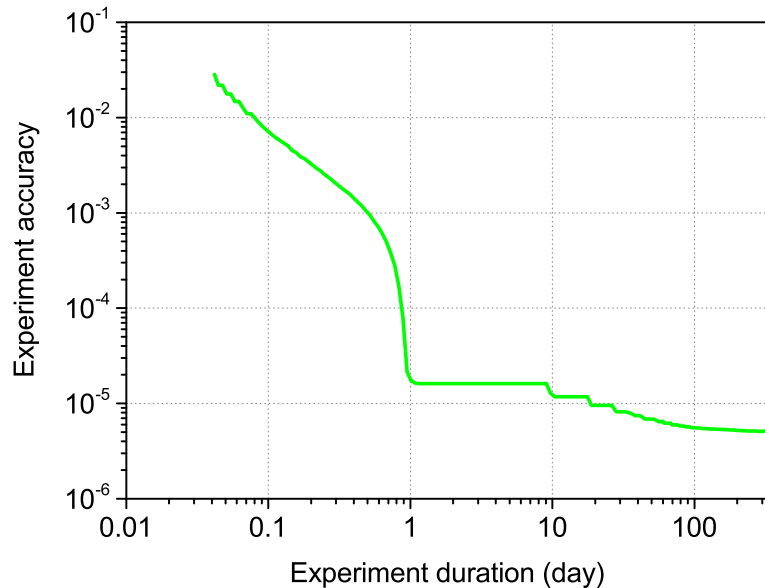


Рис. 2: Точность эксперимента по измерению эффекта гравитационного красного смещения с КА РадиоАстрон и НСС Грин Бэнк в зависимости от времени накопления для интервала 01.01.2014–01.01.2015 в предположении непрерывного накопления данных. По горизонтальной оси – время накопления (дни), по вертикальной – точность эксперимента [A4].

Преимуществом разработанного подхода является его применимость к случаю многопараметрических моделей нарушения ЭПЭ, а также учет окрашенного характера шума часов. Для точности эксперимента с КА РадиоАстрон получена оценка, которая существенно лучше реально ожидаемой [A2], что связано с предположением о непрерывном проведении измерений.

Вторая глава посвящена результатам исследования эффекта движения фазового центра (ДФЦ) остронаправленных следающих антенн космических аппаратов (КА) и наземных станций слежения (НСС) и его влияния на точность экспериментов по доплеровскому слежению за КА. При проведении подобных экспериментов необходимо учесть, что слежение наземной антенны за КА и, соответственно, бортовой антенны КА за НСС сопровождается ошибками наведения, в первую очередь, за счет ошибок прогнозной орбиты КА. Это приводит к необходимости корректировки основных формул для учета эффекта. Кроме того, необходимо не только рассчитать вклад эффекта ДФЦ, например, в сдвиг частоты принимаемых и передаваемых сигналов, но и произвести оценку точности его расчета.

Нами разработана улучшенная модель эффекта ДФЦ для остронаправленных зеркальных следающих антенн, учитывающая возможность неточного наведения антенны на источник/приемник сигнала. Используя данные доплеровского слежения за КА РадиоАстрон, нами показано, что величина эффек-

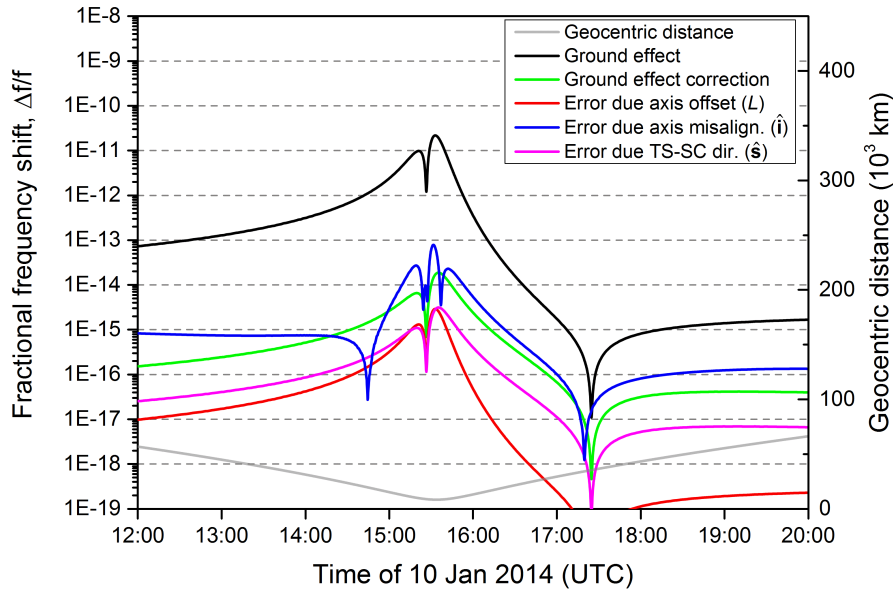


Рис. 3: Эффект движения фазового центра для наземной антенны НСС Грин Бенк при слежении за КА РадиоАстрон: перигей 10 января 2014. Ground effect – эффект ДФЦ антенны, ground effect correction – введенная нами поправка к наземному эффекту. Ошибки расчета эффекта ДФЦ за счет: error due axis offset (L) – неопределенности расстояния между осями наземной антенны, error due axis misalign. (\hat{i}) – отклонения направления оси наземной антенны от номинального, error due TS-SC dir. (\hat{s}) – неопределенности направления НСС–КА за счет неопределенности положения КА. По горизонтальной оси – время 10 января 2014 г. (UTC). По левой вертикальной оси – относительное смещение частоты сигнала, по правой вертикальной – расстояние от КА до центра Земли (тыс. км) [A5].

та ДФЦ может быть весьма существенной для КА на высоких эллиптических орбитах, а именно, порядка 10^{-11} в терминах относительного сдвига частоты. Данное утверждение относится как к наземным, так и к бортовым антеннам КА. Величина введенной нами поправки к уравнениям эффекта ДФЦ для РадиоАстрона достигает 2×10^{-14} (Рис. 3).

Мы также рассмотрели вопрос о точности учета эффекта ДФЦ. Показано, что ошибка его оценки может достигать 4×10^{-14} , что существенно для высокоточных экспериментов, например, связанных с изучением гравитации. В частности, это на порядок превосходит допустимую в гравитационном эксперименте с РадиоАстроном величину. Наибольший вклад в ошибку вносят погрешности положения точки пересечения осей вращения бортовой антенны КА относительно его центра масс, расстояния между осями наземной антенны и направления ее оси, фиксированной относительно Земли.

Также нами рассмотрен случай одного из возможных будущих проектов космической РСДБ с КА на менее вытянутой орбите по сравнению с РадиоАстроном и с улучшенным бюджетом ошибок. Показано, что в этом случае эффект ДФЦ и ошибки его оценки также являются неприемлемо большими

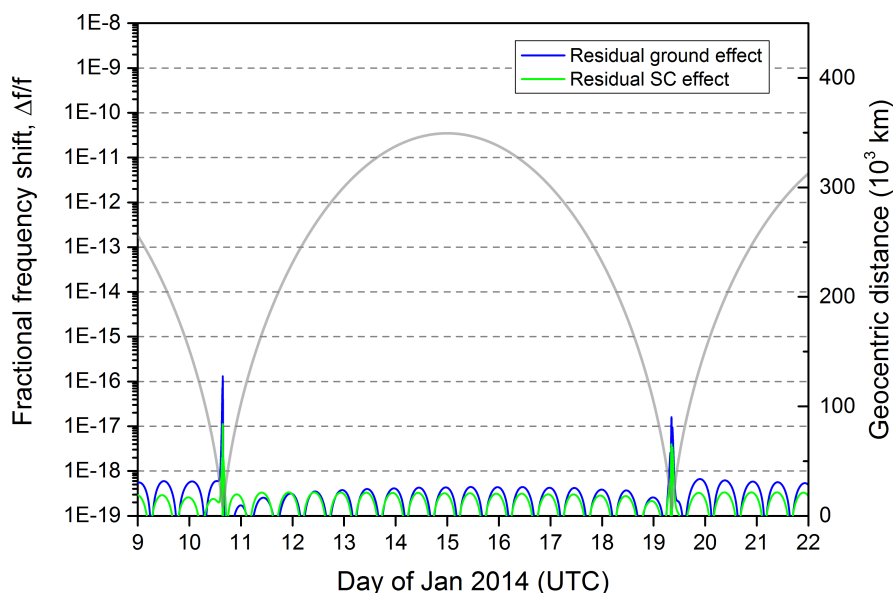


Рис. 4: Остаточный эффект ДФЦ для бортовой и наземной антенн при использовании схемы компенсации типа Gravity Probe A. Слежение НСС Грин Бенк за КА РадиоАстрон 9–23 января 2014. Residual ground effect – остаточный эффект ДФЦ наземной антенны, residual SC effect – остаточный эффект ДФЦ бортовой антенны. По горизонтальной оси – дни января 2014 г. (UTC). По левой вертикальной оси – относительное смещение частоты сигнала, по правой вертикальной – расстояние от КА до центра Земли (тыс. км) [A5].

для высокоточных экспериментов по доплеровскому слежению за КА.

Наконец, нами показано, что вклад эффекта ДФЦ можно значительно уменьшить при одновременном использовании одно- и двухпутевой линий связи и совместно обрабатывая данные их частотных измерений по схеме типа Gravity Probe A. В случае с КА РадиоАстрон это позволяет уменьшить как наземный, так и бортовой эффект ДФЦ до уровня менее 1.3×10^{-16} (Рис. 4), что позволяет не учитывать эффект ДФЦ при использовании предложенной схемы компенсации в эксперименте по измерению гравитационного красного смещения с КА РадиоАстрон. Предложенная компенсационная схема также обеспечивает возможность использования антенн рассматриваемого типа в будущих высокоточных экспериментах по доплеровскому слежению за КА.

В третьей главе изложены методология эксперимента по проверке ЭПЭ с помощью КА РадиоАстрон [A1, A2] и результаты обработки части собранного массива экспериментальных данных – измерений частоты «однопутевых» сигналов со спутника, полученных с помощью штатных измерителей частоты на станциях слежения проекта РадиоАстроны во время сеансов радиоастрономических наблюдений [A3]. Суть эксперимента состоит в слежении за изменением частоты бортового водородного стандарта КА РадиоАстрон под воздействием гравитационного поля, изменяющегося при движении КА по эллиптической орбите, и использовании измеренного гравитационного сдви-

га частоты для оценки параметра нарушения ЭПЭ с помощью модели (3).

При передаче сигнала бортового стандарта по радиолинии частота принимаемого на НСС сигнала оказывается смещенной как в силу исследуемого гравитационного эффекта, так и ряда других факторов:

$$\Delta f_{1w} = f \left(-\frac{\dot{D}}{c} - \frac{v_s^2 - v_e^2}{2c^2} + \frac{(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})^2 - (\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{n}) \cdot (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})}{c^2} \right) + \Delta f_{\text{grav}} + \Delta f_{\text{ion}} + \Delta f_{\text{trop}} + \Delta f_{\text{fine}} + \Delta f_0 + O\left(\frac{v}{c}\right)^3, \quad (4)$$

где Δf_{grav} – гравитационный сдвиг частоты, \mathbf{v}_s и \mathbf{v}_e – скорости КА и НСС (в геоцентрической инерциальной системе отсчета), \dot{D} – радиальная скорость КА относительно НСС, \mathbf{n} – единичный вектор в направлении, обратном к направлению распространения сигнала по трассе КА – НСС, Δf_{ion} и Δf_{trop} – ионосферный и тропосферный сдвиги частоты, Δf_{fine} – «тонкие» эффекты (движения фазовых центров антенн, инструментальные и т.п.), Δf_0 – отстройка частоты между бортовым и наземным стандартами.

Наибольший вклад в сдвиг частоты в (4) связан с нерелятивистским эффектом Доплера, \dot{D}/c , относительная величина которого достигает $\Delta f/f \sim 2 \times 10^{-5}$. Выделение на его фоне гравитационного эффекта, $\Delta_{\text{grav}} f/f \sim 10^{-10}$, представляет существенную проблему. Для ее решения нами было разработано три подхода:

1. Расчет нерелятивистского эффекта Доплера на основе данных орбиты.
2. Компенсация нерелятивистского эффекта Доплера с помощью модифицированной схемы Gravity Probe A [1], основанной на смешанном режиме синхронизации радиолинии КА – НСС «Частичный когерент» и широкополосном характере сигнала 15 ГГц [A1].
3. Компенсация нерелятивистского эффекта Доплера с помощью модифицированной схемы Gravity Probe A, основанной на периодическом переключении радиолинии КА – НСС между одно- и двухпутевым режимами [A2].

Два последних подхода являются оригинальными и разработаны с участием автора.

Первый подход подразумевает расчет вклада нерелятивистского эффекта Доплера с помощью данных об орбите КА и положения НСС и его вычитание из измеренной частоты принятого сигнала. Недостатком данного подхода является его низкая точность: при точности восстановления вектора скорости

КА РадиоАстрон ~ 1.8 мм/с точность проверки ЭПЭ оказывается ограничена величиной ~ 0.01 [A1].

Второй подход – компенсация нерелятивистского эффекта Доплера (и тропосферного сдвига частоты) с помощью режима «Частичный когерент». В этом режиме тоновый сигнал на частоте 7.2 ГГц, синхронизированный сигналом наземного стандарта, посылается НСС на КА, где он используется для синтеза частоты несущего сигнала 15 ГГц и тонового сигнала 8.4 ГГц. Частота модуляции сигнала 15 ГГц формируется на основе сигнала бортового стандарта. Требуется также, чтобы спектр посылаемого КА сигнала имел гребенчатую форму, что обеспечивается работой бортового формирователя сигнала (форматора) в режиме генерации периодической тестовой последовательности. Это делает возможным выделение отдельных спектральных компонент сигнала и формирование таких их комбинаций, которые не содержат вклада нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы, например:

$$\begin{aligned} & \{ [(Rf_e^\uparrow + \nu_s)^\downarrow - (Rf_e^\uparrow)^\downarrow] - \nu_e \} - \frac{1}{2} \frac{\nu_0}{Rf_0} [(Rf_e^\uparrow)^\downarrow - Rf_e] = \\ & = \nu_e \left[\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} - \frac{|\mathbf{v}_s^2 - \mathbf{v}_e^2|}{2c^2} + \frac{\mathbf{a}_e \cdot \mathbf{n}_{32} \Delta t}{c} + \frac{1}{2} (T_{23} - T_{12}) \right] - \\ & \quad - \frac{3}{2} \frac{I_{23}}{Rf_0} \frac{\nu_0}{Rf_0} - \frac{1}{2} \frac{I_{12}}{f_0} \frac{\nu}{f_0} + \Delta\nu_0 + o(v/c)^2 + o(\Delta t), \end{aligned} \quad (5)$$

где f_e – частота посланного НСС сигнала, f_e^\uparrow – частота принятого КА сигнала, R – постоянный множитель преобразования частоты на борту КА, $(Rf_e^\uparrow)^\downarrow$ – частота несущей принятого на НСС сигнала, ν_s – смещение частоты боковой гармоники относительно несущей на борту, ν_e – аналогичная величина для наземного стандарта, $\Delta\nu_0 = \nu_s - \nu_e$, $(Rf_e^\uparrow + \nu_s)^\downarrow$ – частота боковой гармоники принятого на НСС сигнала, $\Delta f_{\text{grav}}/f$ – относительное гравитационное смещение частоты, f_0 – номинальное значение частоты несущего сигнала (15 ГГц), \mathbf{v}_s – скорость КА в момент посылки сигнала, \mathbf{v}_e и \mathbf{a}_e – скорость и ускорение НСС в момент приема, \mathbf{n}_{32} – единичный вектор, направленный вдоль линии распространения сигнала от НСС к КА, Δt – время распространения однопутевого сигнала, T_{12} и T_{23} – тропосферные сдвиги частоты сигналов восходящей и нисходящей линий, I_{12} и I_{23} – ионосферные сдвиги частоты, c – скорость света в вакууме. Выделение отдельных гармоник в спектре сигнала 15 ГГц может осуществляться аппаратно на НСС в момент приема либо путем анализа оцифрованного и записанного на носитель широкополосного сигнала программными средствами [A1].

Соотношение (5) не содержит вклада нерелятивистского эффекта Доплера. Кроме того, с точностью до быстрых и мелкомасштабных флуктуаций параметров среды ($T_{12} \approx T_{23}$) вклад тропосферы также компенсируется. Ионосферный сдвиг частоты, не равный нулю при $R \neq 1$, может быть вычислен при использовании двух (или более) линий на разнесенных частотах или рассчитан с помощью карт ионосферной плотности электронов.

Второй разработанный нами способ компенсации нерелятивистского эффекта Доплера основан на периодическом переключении однопутевого и двухпутевого режимов работы радиолинии КА – НСС. На основе кусочных измерений принятой частоты формируются две непрерывные оценки эволюции частоты сигналов обоих типов и к ним применяется компенсационная схема Gravity Probe A.

Учет прочих негравитационных эффектов, таких как релятивистский эффект Доплера, эффект движения фазового центра антенн, ионосферный сдвиг частоты и др., – производится путем их расчета на основе дополнительных данных (орбиты, ионосферных карт, телеметрии) [A2]. В случае компенсации эффекта Доплера учет эффекта ДФЦ антенн не требуется [A5].

В ходе реализации эксперимента были собраны данные следующих типов:

1. Измерения частоты сигналов 8.4 и 15 ГГц при работе радиолинии в однопутевом режиме, полученные на НСС Пушино и Грин Бенк с помощью штатных измерителей частоты во время сеансов радиоастрономических наблюдений.
2. Измерения частоты и записи оцифрованных сигналов 8.4 и 15 ГГц при работе радиолинии по схеме с чередованием одно- и двухпутевого режимов – на обеих НСС, а также радиотелескопах Gb, Ef, Hh, On, Sv, VLBA, Wn, Wz, Yg, Ys, Zc.
3. Записи оцифрованного сигнала 15 ГГц при работе радиолинии в смешанном режиме синхронизации «Частичный когерент» на НСС Пушино и радиотелескопах Ef и VLBA.

В настоящей работе представлены результаты обработки данных 1 типа, т.е. однопутевые частотные измерения (обработка данных 2 и 3 типов на момент написания работы продолжается). Обработка данных была выполнена следующим способом. Все сеансы были разбиты на пары таким образом, чтобы временной интервал между ними не превышал 4.5 сут, а разность гравитационных потенциалов была максимальной. Каждая пара сеансов рассматривалась как отдельный независимый эксперимент, в котором параметр

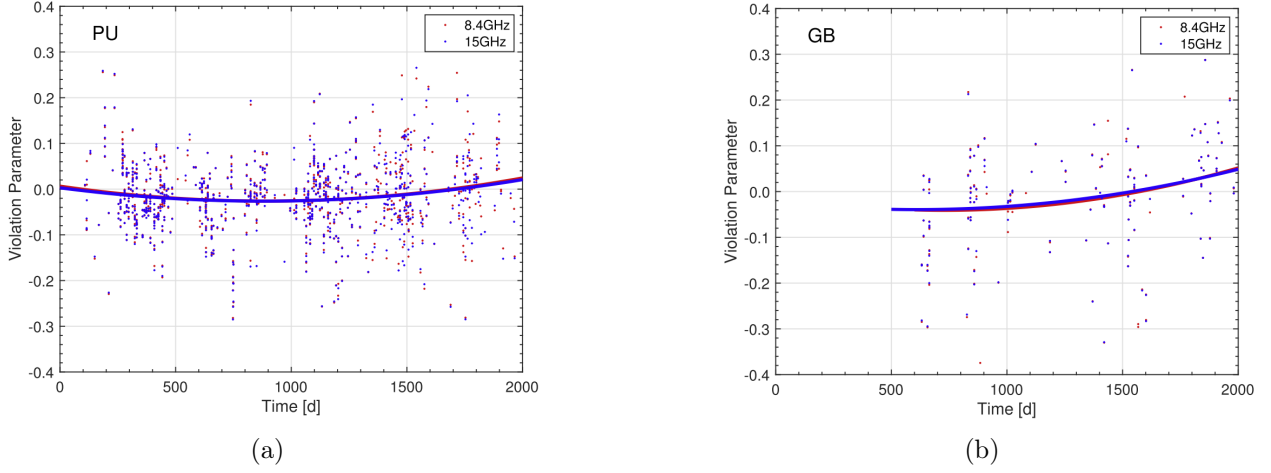


Рис. 5: Оценка параметра нарушения ЭПЭ ε по результатам обработки данных однопутевых измерений частоты: (a) – Пущино, (b) – Грин Бенк. По горизонтальной оси – дни от 1 января 2012 г., по вертикальной – значения параметра ε [A3].

ε определялся путем аппроксимации частотных измерений приведенной выше формулой по методу наименьших квадратов. В связи с ограничением временного интервала между сеансами величиной 4.5 сут, учет дрейфа частоты бортового стандарта относительно наземного не производился, т.к. за это время его величина не превышает погрешности расчета нерелятивистского эффекта Доплера. Результаты обработки данных примерно 3900 радиоастрономических сеансов представлены на Рис. 5. Каждая точка соответствует оценке параметра ε по паре сеансов. Итоговая оценка параметра нарушения ЭПЭ по результатам обработки данных всех однопутевых частотных измерений, полученная как среднее от описанного набора ε , составляет

$$\varepsilon = -0.016 \pm 0.003_{\text{stat}} \pm 0.030_{\text{syst}}, \quad (6)$$

где систематическая ошибка, связанная с погрешностью расчета нерелятивистского эффекта Доплера, упрощенно оценена как разность максимального и минимального значений, которые принимает на интервале наблюдений полином второй степени, аппроксимирующий полученный набор значений параметра ε [A3]. Полученный результат согласуется с ожидаемым на основе точности расчета нерелятивистского эффекта Доплера с помощью орбитальных данных [A1]. Ожидаемая точность проверки ЭПЭ по результатам обработки всех собранных данных составляет $\sim 10^{-5}$ [A2].

В **заключении** сформулированы результаты диссертации, а также обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Список литературы

- [1] Vessot R. F. C., Levine M. W. A test of the equivalence principle using a space-borne clock // *General Relativity and Gravitation*. 1979. Vol. 10. P. 181–204.
- [2] Altschul B., Bailey Q. G., Blanchet L. et al. Quantum tests of the Einstein Equivalence Principle with the STE-QUEST space mission // *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 55. P. 501–524.
- [3] Pound R. V., Rebka G. A. Apparent Weight of Photons // *Physical Review Letters*. 1960. Vol. 4, no. 7. P. 337–341.
- [4] Vessot R. F. C., Levine M. W., Mattison E. M. et al. Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser // *Physical Review Letters*. 1980. Vol. 45. P. 2081–2084.
- [5] Delva P., Puchades N., Schönemann E. et al. Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites // *Phys. Rev. Lett.* 2018. Vol. 121, no. 23. P. 231101.
- [6] Herrmann S., Finke F., LülF M. et al. Test of the Gravitational Redshift with Galileo Satellites in an Eccentric Orbit // *Phys. Rev. Lett.* 2018. Vol. 121. P. 231102.
- [7] Heß M. P., Stringhetti L., Hummelsberger B. et al. The ACES mission: System development and test status // *Acta Astronautica*. 2011. Vol. 69. P. 929–938.
- [8] Jetzer P. General relativity tests with space clocks in highly elliptic orbits // *International Journal of Modern Physics D*. 2017. Vol. 26, no. 05. P. 1741014.
- [9] Pollet A., Coulot D., Biancale R. et al. E-GRASP/Eratosthenes: GRGS numerical simulations and millimetric TRF realization // *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2017.
- [10] Guéna J., Abgrall M., Rovera D. et al. Improved Tests of Local Position Invariance Using Rb87 and Cs133 Fountains // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 109, no. 8. P. 080801.
- [11] Wolf P., Blanchet L. Analysis of Sun/Moon gravitational redshift tests with the STE-QUEST space mission // *Classical and Quantum Gravity*. 2016. Vol. 33, no. 3. P. 035012.
- [12] Bothwell T., Kedar D., Oelker E. et al. JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of $2.0E-18$ // *Metrologia*. 2019. Vol. 56, no. 6. P. 065004.