### ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

### ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

### КАФЕДРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ АСТРОНОМИИ

### ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

## «ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ С ПОМОЩЬЮ РСДБ-ТЕЛЕСКОПОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЭЙНШТЕЙНОВСКОГО ПРИНЦИПА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ»

Выполнил студент 636 группы Филеткин Александр Иванович

подпись студента

Научные руководители: д.ф.-м.н. проф. **Руденко В. Н.,** м.н.с. **Литвинов Д. А.** 

Допущен к защите \_\_\_\_.05.2019 Заведующий кафедрой д.ф.-м.н. проф. **Расторгуев А.С.**  подпись научного руководителя

Рецензент: к.ф.-м.н. **Пилипенко С.В.** 

подпись зав. кафедрой

## СОДЕРЖАНИЕ

Be	веден	ие				
1	Экс	Экспериментальные проверки эйнштейновского принципа эквива-				
	лент	гности				
	1.1	Эйнштейновский принцип эквивалентности (ЭПЭ) 5				
	1.2	Типы экспериментов по проверке ЭПЭ				
	1.3	Эксперименты по измерению эффекта гравитационного замед-				
		ления времени				
	1.4	Измерение эффекта гравитационного замедления времени с по-				
		мощью космического аппарата «РадиоАстрон»				
	1.5	Будущие эксперименты				
2	Про	верка ЭПЭ с помощью доплеровского слежения за КА «Радио-				
	Астрон»					
	2.1	Общее описание эксперимента				
	2.2	Классическая схема компенсации нерелятивистского эффекта				
		Доплера и шумов тропосферы				
	2.3	Модифицированная схема компенсации нерелятивистского эф-				
		фекта Доплера и шумов тропосферы				
	2.4	Эффекты, влияющие на частоту принимаемого со спутника сиг-				
		нала				
	2.5	Многопараметрическая модель нарушения ЭПЭ				
3	Экс	Эксперимент raks17aw/ay/az/ba				
	3.1	Эксперимент по слежению за КА «РадиоАстрон» raks17aw-ba . 30				
	3.2	Схема обработки данных				
	3.3	Предварительная обработка данных				
	3.4	Оценка частоты принятого сигнала				
	3.5	Компенсация нерелятивистского эффекта Доплера и тропосфер-				
		ного сдвига частоты				
	3.6	Расчет тонких эффектов				
	3.7	Оценка параметра нарушения ЭПЭ				
	3.8	Оценка систематических ошибок				
	3.9	Обсуждение результатов				
Заключение						
Сг	Список литературы					

### введение

Общая теория относительности (ОТО) с момента своего создания выдержала множество экспериментальных проверок. Предсказание основных эффектов, таких как смещение перигелия Меркурия, отклонение луча света вблизи массивного тела, гравитационное замедления времени, гравитационно-волновое излучение и др., а также их последующее экспериментальное подтверждение свидетельствуют о том, что на сегодняшний день ОТО несомненно является наиболее обоснованной из существующих теорий гравитации. ОТО описывает гравитацию как проявление искривления пространства-времени и относится к классу метрических теорий, в основе которых лежит эйнштейновский принцип эквивалентности (ЭПЭ). Однако, есть основания полагать, что чисто тензорная ОТО не является окончательной теорией гравитации и нуждается в модификации. Это связано как с внутренними трудностями ОТО (в первую очередь, проблемой сингулярностей), так и с уверенностью научного сообщества в том, что законы гравитации должны быть в итоге сформулированы на языке квантовой теории. Попытки объединения ОТО с квантовой теорией, предпринимаемые в рамках теории струн, петлевой квантовой гравитации и др., неизбежно приводят к нарушению ЭПЭ, лежащего в основе ОТО. Поэтому задача количественной оценки значений параметров возможного нарушения ЭПЭ имеет большое значение для поиска «новой физики». Ожидается, что обнаружение отклонений от предсказаний ЭПЭ позволит заложить экспериментальный базис будущей теории объединенных взаимодействий. Проверка ЭПЭ является поэтому областью активного экспериментального исследования.

В данной работе излагаются полученные автором результаты по обработке экспериментальных данных нескольких измерительных сеансов, являющихся частью эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с помощью космического аппарата (КА) «Спектр-Р» миссии «РадиоАстрон» (согласно принятой практике, для краткости КА «Спектр-Р» мы также иногда будем называть «РадиоАстрон»). Данный эксперимент относится к проверке одного из аспектов ЭПЭ, связанного с локальной позиционной (пространственно-временной) инвариантностью. Основная идея подобного рода экспериментов была разработана и реализована в суборбитальной миссии Gravity Probe A (GP-A). Полученный в данном эксперименте результат дает высокоточную оценку параметра нарушения для водородных атомных стандартов частоты и составляет  $\varepsilon = (0.05 \pm 1.4) \times 10^{-4}$ , что совместимо с утверждением о справедливости ЭПЭ. Проведение аналогичного эксперимента с КА «Спектр-Р» стало возможным благодаря наличию на борту спутника высокостабильного водородного стандарта частоты, высокоэллиптической орбите, а также относительно большому времени функционирования аппарата, что позволило применять длительное накопление информации. В эксперименте реализуется решение задачи выделения гравитационного сигнала на фоне разнообразных помех, таких как допплеровский сдвиг частоты, ионосферные и тропосферные поправки, а также инструментальные шумы. Модифицированный подход, разработанный для КА «Спектр-Р», позволяет достичь точности измерения данного параметра нарушения ЭПЭ  $\delta \varepsilon \sim 10^{-5}$ .

В рамках настоящего исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1) Изучение, подготовка и фильтрация экспериментальных данных, полученных штатными измерителями наземных станций слежения (HCC);

2) Разработка и тестирование программных алгоритмов для обработки данных эксперимента;

3) Обработка 4 сеансов наблюдений эксперимента 29-30 сентября 2016 года;

4) Оценка параметра нарушения  $\varepsilon$  совместно с анализом основных систематических ошибок.

Дипломная работа состоит из введения, трех глав, посвященных исследованию проблемы, основных выводов и заключения. Первая глава посвящена описанию ЭПЭ, обзору наиболее значительных осуществленных экспериментов, возможностям и преимуществам миссии «РадиоАстрон», а также сведениям о будущих космических проектах. Во второй главе дано подробное описание эксперимента по измерению гравитационного замедления в рамках миссии «РадиоАстрон», рассмотрены основные методы и подходы по решению данной проблемы, разобраны классическая и модифицированная схемы компенсации эффектов нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы, а также проведен анализ основных эффектов, влияющих на частоту принимаемого со спутника сигнала. Отдельно стоит отметить многопараметрическую модель нарушения, учитывающую влияние Солнца и Луны. В третьей части проводится описание процедуры обработки, включающей предварительную очистку экспериментальных данных, оценку частоты принимаемого сигнала, расчет и компенсацию основных эффектов, а также результаты по оценке параметра нарушения ЭПЭ совместно с анализом систематических ошибок.

## 1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОВЕРКИ ЭЙНШТЕЙНОВСКОГО ПРИНЦИПА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

В данной главе проводится обзор трёх аспектов ЭПЭ как основ метрических теорий гравитации, а также наиболее существенных экспериментов по их проверке. Более подробно рассмотрены эксперименты по измерению гравитационного замедления времени, представляющие собой проверки принципа локальной позиционной инвариантности, приведены результаты предшествующих и будущих экспериментов. Приводится описание эксперимента с КА «РадиоАстрон», его особенностей и основных преимуществ.

### 1.1 Эйнштейновский принцип эквивалентности (ЭПЭ)

Общая теория относительности и квантовая теория составляют основу современной физической картины мира. Эти две теории, однако, не совместимы. Попытки квантования гравитации в рамках теории струн или петлевой квантовой гравитации неизбежно приводят к нарушению основ ОТО – эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ) и, следовательно, к нарушению метрической природы гравитации. Поэтому экспериментальные проверки ЭПЭ имеют принципиальное значение для задачи построения экспериментального базиса единой теории взаимодействий.

В современном представлении ЭПЭ складывается из трёх составляющих:

1) слабый принцип эквивалентности (СПЭ) или принцип универсальности свободного падения, который утверждает, что траектория свободно падающего пробного тела (на которое не действуют силы другой природы, кроме гравитации, и явление рассматривается в малой области пространства, так что можно пренебречь воздействием приливных сил) не зависит от его внутренней структуры и состава,

2) принцип локальной лоренц-инвариантности (ЛЛИ), согласно которому результат любого локального негравитационного эксперимента не зависит от скорости и ориентации лаборатории,

3) принцип локальной позиционной инвариантности (ЛПИ), согласно которому результат любого локального негравитационного эксперимента не зависит от места и времени его проведения.

Поскольку три составляющие ЭПЭ утверждения столь различны по своему содержанию, то можно было бы предположить, что они являются независимыми. Однако, в 1960-х годах Л. Шифф выдвинул (и обосновал в ряде моделей) гипотезу, согласно которой любая полная, самосогласованная теория гравитации, которая реализует слабый принцип эквивалентности (СПЭ), обязательно осуществляет все аспекты ЭПЭ (так называемая «гипотеза Шиффа»). Другими словами, справедливость СПЭ гарантирует справедливость ЛПИ и ЛЛИ. Если гипотеза Шиффа верна, то эксперименты по проверке равенства гравитационной и инертной масс могут рассматриваться как прямое обоснование ЭПЭ и, тем самым, метрического характера гравитации.

Важнейшая роль ЭПЭ состоит в том, что он является основой всех так называемых «метрических» теорий гравитации, т.е. таких, которые рассматривают гравитацию как проявление искривленной структуры пространствавремени. К числу метрических теорий, естественно, относится и ОТО. Разделение теорий гравитации на метрические и неметрические является принципиальным, т.к. подразумевает описание гравитации либо как геометрического феномена, либо просто как еще одного поля, распространяющегося в плоском пространстве-времени и взаимодействующего с полями других частиц. Лишь эксперименты по проверке ЭПЭ могут ответить на вопрос о том, какая из этих двух точек зрения является правильной.

Метрические теории удовлетворяют следующим требованиям:

1) Пространство-время обладает симметричной метрикой

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx^{\alpha} dx^{\beta}, \qquad g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu};$$

2) Траектории свободно падающих тел - геодезические

$$\frac{d^2x^{\lambda}}{dt^2} + \Gamma^{\lambda}_{\mu\nu} \frac{dx^{\mu}}{dt} \frac{dx^{\nu}}{dt} = 0;$$

3) Законы физики (исключая гравитацию) в локальных свободно падающих системах отсчета записываются так же, как в СТО.

Данные постулаты, как нетрудно убедиться, являются прямым следствием ЭПЭ [1, 2]. Важно отметить, что ОТО является не единственной теорией, удовлетворяющей ЭПЭ. В качестве примера другой совместимой с данными опыта теорией, удовлетворяющей ЭПЭ, можно привести скалярно-тензорную теорию Бранса-Дике [3].

#### 1.2 Типы экспериментов по проверке ЭПЭ

Наиболее известной проверкой СПЭ является измерение относительного ускорения двух пробных тел различной внутренней структуры и состава, свободно падающих во внешнем гравитационном поле. Измерение предельного значения относительной разницы ускорений характеризуется величиной, называемой отношением Этвеша:  $\eta = 2|a_1 - a_2|/|a_1 + a_2|$ . Различными группами (Этвеш [4], Дике, Брагинский-Панов [5] и др.) были выполнены наземные эксперименты с крутильными весами, которые с относительной точностью не менее  $10^{-13}$  подтверждают СПЭ. Недавно в космическом эксперименте MICROSCOPE был получен результат на уровне точности  $\sim 10^{-14}$  [6]. На борту спутника находятся два идентичных дифференциальных акселерометра, состоящих из двух цилиндрических концентрических пробных масс. В первом – пробные массы сделаны из одинакового материала для калибровки, во втором – из разных. Для реализации свободного падения в поле Земли спутник использует специальную систему компенсации сноса и контроля высоты.

Проверка ЛЛИ подразумевает поиск изменения фундаментальных констант в зависимости от скорости и ориентации лаборатории в пространствевремени (например, вызванного орбитальным движением Земли вокруг Солнца). Эксперименты Майкельсона-Морли по определению степени анизотропии скорости света путем наблюдения запаздывания лучей в лазерном интерферометре дали относительные отклонения от постоянного значения на уровне  $\Delta c/c \sim 10^{-11}$ . Другим типом экспериментов является поиск анизотропии постоянной тонкой структуры для различных атомных стандартов частоты [7, 8]. На текущий момент ЛЛИ подтверждена с точностью  $\sim 10^{-17}$  [9].

Двумя основными проверками ЛПИ являются эксперименты по измерению гравитационного замедления времени, в которых проявляется пространственная зависимость результатов локальных экспериментов, а также измерение постоянства фундаментальных негравитационных констант от времени. В 1907 году Эйнштейн предсказал гравитационное замедление времени или гравитационное красное смещение частоты электромагнитных волн как прямое следствие принципа эквивалентности. Согласно этому эффекту частота электромагнитной волны, f, при прохождении разности гравитационных потенциалов,  $\Delta U$ , изменяется на величину

$$\frac{\Delta f_{grav}}{f} = \frac{\Delta U}{c^2},\tag{1.1}$$

что эквивалентно изменению скорости течения времени в точках с разными гравитационными потенциалами

$$\frac{\Delta T_{grav}}{T} = \frac{\Delta U}{c^2},\tag{1.2}$$

где Т – длительность интервала времени, с – скорость света в вакууме.

Проверка данного эффекта может проводиться путем измерения частотного сдвига электромагнитных волн, распространяющихся в гравитационном

поле, или сравнения темпа хода часов, расположенных в точках с разным гравитационным потенциалом. Если ЛПИ не выполняется, то возможные нарушения описываются следующей многопараметрической моделью

$$\frac{\Delta f_{grav}}{f} = \frac{U_a}{c^2} \left( 1 + \varepsilon_X^{(a)} \right) - \frac{U_b}{c^2} \left( 1 + \varepsilon_X^{(b)} \right)$$
(1.3)

где  $\varepsilon_X^{(a)}$  и  $\varepsilon_X^{(b)}$  – параметры нарушения, зависящие от типа квантового перехода, используемого в соответствующих часах a и b, а также возможно, от источника гравитационного поля, X. Важно отметить, что при справедливости ЭПЭ параметры  $\varepsilon_X^{(a)}$  и  $\varepsilon_X^{(b)}$  равны 0.

Существуют два основных подхода к проверке ЛПИ с помощью измерения гравитационного красного смещения. К первому типу относится так называемая «классическая» схема, в которой проводится сравнение частот двух идентичных атомных стандартов частоты и времени в точках с разными гравитационными потенциалами ( $\varepsilon_X^{(a)} = \varepsilon_X^{(b)}, U_a \neq U_b$ ). Она позволяет проверить результат эксперимента в зависимости от точки пространства. Другая схема, так называемые «нуль-редшифт» эксперименты, предполагает сравнение хода колоцированных часов различных типов ( $\varepsilon_X^{(a)} \neq \varepsilon_X^{(b)}, U_a = U_b$ ) и позволяет тем самым измерять возможную зависимость величины эффекта от типа квантового перехода. Эта схема является по своей сути дифференциальной – позволяет измерить лишь разность параметров нарушения для двух различных атомных часов, а не их значения.

# 1.3 Эксперименты по измерению эффекта гравитационного замедления времени

Первые результаты измерения эффекта были получены при наблюдении смещения спектральных линий в гравитационном поле астрофизических объектов (Солнце, звезды в двойных системах). В 1925 году Адамсу удалось измерить эффект для белого карлика Сириус В [10]. Результаты были ограничены 20% точностью и вызвали сомнения из-за того, что гравитационный сдвиг не отличим от кинематического сдвига, обусловленного звездным движением. Последнее надежное измерение эффекта данным методом было проведено по наблюдениям за солнечными хромосферными линиями кислорода с точностью 1% [11].

Первое надежное измерение гравитационного красного смещения было проведено в серии экспериментов, выполненных Паундом, Ребкой и Снайдером в 1960–1965 годах [12, 13], в которых измерялся сдвиг частоты  $\gamma$ -квантов, излучаемых изотопом железа  ${}^{57}Fe$ , при их распространении в 22.6-метровой

башне Гарвардского университета. Высокая точность эксперимента, достигшая в итоге 1%, была достигнута благодаря использованию узких мессбауэровских резонансных линий.

Развитие измерительной техники и создание стандартов частоты сверхвысокой стабильности – как в наземном, так и в бортовом исполнении – позволили многократно увеличить точность измерения эффекта. До недавнего времени наилучшая точность измерения гравитационного замедления времени была достигнута в эксперименте Gravity Probe A (GP-A) в 1976 году [14], в котором сравнивались частоты двух водородных мазеров – наземного и установленного на борту зонда, запущенного по баллистической траектории на высоту 10 тыс. км над поверхностью Земли. Применение оригинальной радиотехнической схемы компенсации нерелятивистского эффекта Доплера, шумов тропосферы и ионосферы, основанной на использовании двух одновременно функционирующих линий связи, позволила подтвердить предсказание Эйнштейна с точностью  $1.4 \times 10^{-4}$ .

Самые точные на сегодняшний день результаты по измерению гравитационного замедления времени получены в рамках эксперимента GREAT (Galileo gravitational Redshift test with Eccentric sATellites), выполненного с помощью спутников Galileo 5 и 6 [15, 16]. Данные спутники оборудованы пассивными водородными стандартами частоты и являются частью европейской глобальной навигационной спутниковой системы Galileo. В силу возникшей при их запуске ошибки они были выведены на эллиптические орбиты вместо круговых, что и сделало возможным проведение эксперимента. В настоящее время эксцентриситет орбит составляет 0.16, что соответствует величине модуляции гравитационного красного смещения  $\Delta f_{arav}/f \approx 1 \times 10^{-10}$ . Стабильность частоты водородных атомных часов, используемых в эксперименте, составляет  $\approx 10^{-14}$  на временах усреднения порядка периода орбиты T = 12.94часов. Однако, отсутствие схемы компенсации нерелятивистского эффекта Доплера требует высокой точности восстановления орбиты спутников. Данная проблема была решена путем использования специальных лазерных дальнометрических измерений. Аккуратное моделирование систематических эффектов и длительное накопление информации позволяет авторам эксперимента утверждать о достижении точности измерения на уровне  $\sim 3 \times 10^{-5}$  [15, 16].

С помощью космического аппарата «Спектр-Р» миссии «РадиоАстрон» был выполнен эксперимент по измерению эффекта гравитационного замедления времени, ожидаемая точность которого составляет  $\sim 10^{-5}$ . Основными особенностями данного эксперимента являются наличие схемы компенсации нерелятивистского эффекта Доплера, аналогичной использованной в Gravity Probe A, а также возможность длительного накопления данных.

# 1.4 Измерение эффекта гравитационного замедления времени с помощью космического аппарата «РадиоАстрон»

«РадиоАстрон» – международный проект по проведению фундаментальных астрофизических исследований небесных радиоисточников по методу космической радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) [17]. Проект был разработан под руководством Астрокосмического центра ФИАН, а основной его элемент – космический аппарат (КА) «Спектр-Р» с 10-метровым радиотелескопом на борту – создан НПО им. С.А.Лавочкина. Высокоэллиптическая околоземная орбита КА «Спектр-Р», эволюционирующая вследствие гравитационных возмущений от Луны и Солнца, позволяет проводить наблюдения на проекциях баз до 26 диаметров Земли, что позволило достичь рекордного углового разрешения 8 мкс дуги [18]. Перигей орбиты изменяется в пределах 1 000 - 80 000 км, апогей - в пределах 270 000 - 370 000 км, период обращения составляет в среднем 8.5 суток. Существенной особенностью миссии является наличие водородного стандарта частоты VCH-1010 на борту КА. Относительная стабильность частоты атомных стандартов,  $\Delta f/f$ , определяется следующими величинами:  $2 \times 10^{-15}$  для бортового, менее  $1 \times 10^{-15}$ для наземных, оба значения – на временах усреднения 1 час. Для передачи большого объема научных данных на большие расстояния КА оборудован 1.5метровой остронаправленной антенной. Возможна односторонняя и двухсторонняя радиосвязь с наземными станциями слежения, благодаря приемнику 7.2 ГГц и передатчику 8.4 и 15 ГГц на борту, и только односторонняя с наземными радиотелескопами (РТ), оборудованными приемниками 8.4 или 15 ГГп.

Эксперимент по измерению гравитационного замедления времени является частью научной программы миссии «РадиоАстрон» [19]. Основными преимуществами эксперимента по сравнению с предшественниками являются более высокая стабильность бортового водородного стандарта частоты (БВ-СЧ) – в 2 раза лучше GP-A (Рис. 1.2) и примерно в 3.5 раза лучше Galileo, существенная модуляция гравитационного красного смещения при движении по орбите  $\Delta f_{grav}/f \sim 6 \times 10^{-10}$  – у GP-A и Galileo данная величина составила  $1 \times 10^{-10}$ , а также возможность многократного проведения эксперимента. Реализация модуляционного подхода требует проведения нескольких сеансов связи со спутником на одном витке орбиты: вблизи перигея и апогея, а также в промежуточных точках орбиты.

Эксперимент по измерению гравитационного красного смещения находится на стадии обработки. Всего проведено более 70 гравитационных сеансов длительностью порядка 1 часа, что составляет примерно 18 независимых



Рисунок 1.1 – Компоновка космического радиотелескопа «РадиоАстрон» [17].

экспериментов на отдельных витках орбиты КА. Оценка точности эксперимента на основе бюджета ошибок составляет  $\sim 10^{-5}$  [20].

### 1.5 Будущие эксперименты

Кратко остановимся на перспективах дальнейшего увеличения точности измерения эффекта гравитационного замедления времени. В эксперименте ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) [21], реализуемом Европейским космическим агенством, планируется установка на Международную космическую станцию (МКС) пары атомных стандартов частоты и времени – водородного H-мазера и цезиевого фонтана PHARAO. Запуск миссии несколько раз откладывался и в настоящее время планируется на 2020 г. Ожидается, что комбинированная шкала времени на основе этих двух стандартов будет обладать точностью и относительной стабильностью на уровне ~  $2 \times 10^{-16}$  на временах усреднения ~ 100 000 секунд. Предварительная оценка точности эксперимента составляет (2 - 3) ×  $10^{-6}$ . К недостатку миссии следует отнести тот факт, что круговая орбита МКС позволяет измерить только интегральную величину



Рисунок 1.2 – Сравнение стандартов частоты.

эффекта гравитационного замедления времени и не позволяет измерять его модуляцию, что может привести к существенным систематическим ошибкам.

Два других проекта, нацеленные на достижение еще более высоких точностей измерения эффекта, – E-GRASP и E-GRIP – в настоящее время находятся на стадии проработки. Основными задачами проекта E-GRASP является изучение гравитационного поля Земля. Благодаря высокоэллиптической орбите и планируемой установке на борт водородного стандарта частоты, миссия предусматривает также измерение эффекта гравитационного замедления времени. Ожидаемая точность – лучше  $10^{-6}$ . Запуск – не ранее 2024 г [22]. Проект E-GRIP – специализированная миссия по измерению эффекта гравитационного замедления времени с точностью  $10^{-7} - 10^{-8}$  с использованием околоземных спутников и оптических стандартов частоты – в настоящее время находится на ранних стадиях проработки концепции [23].

### 2 ПРОВЕРКА ЭПЭ С ПОМОЩЬЮ ДОПЛЕРОВСКОГО СЛЕЖЕНИЯ ЗА КА «РАДИОАСТРОН»

Данная глава посвящена общему описанию эксперимента по измерению гравитационного красного смещения с космическим аппаратом «Спектр-Р» миссии «РадиоАстрон», рассмотрению классической и модифицированной схем компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы, изучению основных эффектов, влияющих на сдвиг частоты сигнала. Кроме того, рассмотрена многопараметрическая модель нарушения ЭПЭ, учитывающая возможную зависимость параметров нарушения от типа источника гравитационного поля.

#### 2.1 Общее описание эксперимента

В эксперименте по измерению гравитационного красного смещения с КА «РадиоАстрон» мы обнаруживаем изменение частоты бортового H-мазера вследствие движения в гравитационном поле Земли, сравнивая его с помощью радиолиний с H-мазером на наземной станции. Для приема сигнала космического корабля может использоваться либо одна из выделенных наземных станций слежения (HCC), Пущино или Грин Бэнк, либо обычный наземный радиотелескоп (HPT), оборудованный приемником 8.4 или 15 ГГц. Небольшой гравитационный сдвиг частоты ( $\Delta f/f \sim 10^{-10}$ ) необходимо извлечь из ряда других эффектов, влияющих на сигнал, посылаемый с космического корабля на наземную станцию:

$$\Delta f_{1w} = -f\frac{\dot{D}}{c} + \Delta f_{grav} + \Delta f_{ion} + \Delta f_{trop} + \Delta f_{fine} + \Delta f_0 + f \cdot O\left(v/c\right)^2 \quad (2.1)$$

где  $\dot{D}$  – радиальная скорость космического корабля относительно наземной станции,  $\Delta f_{\rm ion}$  и  $\Delta f_{\rm trop}$  – ионосферные и тропосферные сдвиги,  $\Delta f_{\rm fine}$  обозначает различные тонкие эффекты (движение фазового центра, инструментальное и т. д.),  $\Delta f_0$  – смещение частоты между наземным и космическим Н-мазерами, индекс «1w» обозначает однопутевую линию связи (КА – HCC).

Есть две основные проблемы, возникающие при попытке использования уравнения (2.1) для определения гравитационного сдвига частоты напрямую, по крайней мере, в случае «РадиоАстрона». Во-первых, смещение частоты,  $\Delta f_0$ , не может быть определено после запуска без использования уравнения (1.3), проверка которого является целью эксперимента. Мы не ожидаем, что  $\Delta f_0$  будет пренебрежимо малым для водородных стандартов частоты, и, кроме

того, хорошо известный эффект изменения характеристик материалов резонатора (процессы старения), как правило, вызывает существенный дрейф данной величины на длительных временах. Решение данной проблемы заключается в измерении модуляции гравитационного эффекта  $\Delta f_{grav}$  вместо его полного значения. На практике это означает проведение двух или нескольких наблюдательных сеансов на сильно различающихся расстояниях от КА до Земли. Из-за большого эксцентриситета орбиты «РадиоАстрона» ( $e \sim 0.59 - 0.96$ ) глубина модуляции эффекта гравитационного красного смещения сравнима с величиной самого эффекта (Рис. 2.1), поэтому к заметному снижению точности эксперимента это не приводит. Величина дрейфа частоты определяется в серии регулярных измерений на постоянной дальности до КА, и она, действительно, оказывается существенной – изменение относительной частоты составляет несколько единиц  $10^{-14}$  за сутки.



Рисунок 2.1 – Модуляция гравитационного смещения частоты для 8.4 ГГц нисходящей линии связи при движении КА по орбите для периода низкого перигея.

Вторая проблема, возникающая при попытке непосредственного использования формулы (2.1) для измерения гравитационного эффекта, связана с нерелятивистским доплеровским сдвигом,  $-\dot{D}/c$ . Этот член может быть вычислен из эфемерид космического корабля с неопределенностью  $\delta(\dot{D}/c) \sim 10^{-12}$ , в то время как для достижения точности эксперимента  $\delta \varepsilon \sim 10^{-5}$  требуется точность его оценки на уровне  $10^{-15}$ . Оказывается, однако, что доплеровский член первого порядка можно полностью исключить (для HCC) или в достаточной степени уменьшить его величину (для HPT) с помощью дополнительной двухпутевой линии связи (Земля–спутник–Земля). Сигнал двухсторонней линии связи посылается наземной станцией слежения, далее принимается и с сохранением фазы ретранслируется космическим аппаратом и, наконец, снова принимается НСС, а также, возможно, другим НРТ, находящимся в зоне приема сигнала. Сдвиг частоты сигнала двусторонней линии связи для случая распространения сигнала по трассе НСС–КА–НСС составляет:

$$\Delta f_{2w} = -2f\frac{\dot{D}}{c} + 2\Delta f_{trop} + 2\Delta f_{ion} + f \cdot O\left(v/c\right)^2, \qquad (2.2)$$

где  $a_e$  – ускорение наземной станции, а  $\Delta t$  – время прохождения сигнала. (Аналогичное по физическому содержанию, но вычислительно более сложное уравнение справедливо для случая сигнала двухпутевой линии связи, принимаемого соседним НРТ.) Комбинация однопутевых (2.1) и двухпутевых (2.2) измерений частоты, дает:

$$\Delta f_{1w} - \frac{\Delta f_{2w}}{2} = \Delta f_{\text{grav}} + f \cdot O(v/c)^2 + \Delta f_0 + \Delta f_{\text{ion}}^{(\text{res})} + \Delta f_{\text{fine}} + O(v/c)^3, \quad (2.3)$$

где сдвиг частоты за счет нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы оказывается скомпенсированным, но остается вклад гравитации. Идея схемы компенсации на основе уравнения (2.3) была впервые реализована в миссии GP-A. РадиоАстрона она, однако, непосредственно неприменима, т.к. однои двухпутевые линии связи не могут работать одновременно (Рис.2.2). Тем не менее, есть два варианта реализации схемы компенсации (2.3) с помощью «РадиоАстрона», кратко изложенные ниже.

Первый вариант требует чередования однопутевого режима «Н-мазер» (Рис. 2.2а) и двухпутевого режима «Когерент» (Рис. 2.2б). Данные, записанные НРТ (и НСС), содержат только один тип сигнала в любой момент времени. Однако, если цикл переключения достаточно короткий (~ 4 мин при 8.4 ГГц), оказывается возможным интерполировать эти кусочные измерения частоты с ошибкой  $\Delta f/f \sim 4 \times 10^{-15}$ . Таким образом, мы получаем одновременные измерения частоты обоих типов на всем интервале проведения наблюдений и применяем схему компенсации (2.3) непосредственно к ним. Подход с чередующимися измерениями не опирается на какие-либо особенности спектра сигнала и может быть реализован с помощью телескопов, оборудованных приемниками с частотой 8.4 или 15 ГГц.

Второй вариант компенсации эффекта Доплера 1-го порядка предусматривает запись сигнала канала 15 ГГц в так называемом режиме «Частичный



Рисунок 2.2 – Режимы работы радиолиний связи КА РадиоАстрон.

Когерент» синхронизации бортового научного радиооборудования [19], который является в определенном смысле промежуточным между однопутевым

«Н-мазер» и двухпутевым режимом «Когерент». В этом режиме тон восходящей линии связи 7.2 ГГц, тон нисходящей линии связи 8.4 ГГц и несущая нисходящей линии передачи данных 15 ГГц синхронизированы по фазе с сигналом наземного Н-мазера, а частота модуляции (72 МГц) нисходящей линии передачи данных синхронизована по сигналу бортового Н-мазера (Рис. 2.2в). Этот подход, кроме того, существенно зависит от широкополосной структуры (~ 1 ГГц) QPSK-модулированного сигнала 15 ГГц и возможности придания его спектру гребенчатой формы путем передачи по информационному каналу заранее определенной периодической последовательности данных (2.5). Как было показано в [8], различные компоненты спектра сигнала 15 ГГц эффективно играют роль отдельных линий связи компенсационной схемы GP-A, которая может быть реализована на уровне программной обработки оцифрованных и записанных на НСС и/или НРТ сигналов. Ниже мы более подробно рассматриваем особенности классической компенсационной схемы, а также ее модифицированного варианта, используемого в гравитационном эксперименте с КА «РадиоАстрон».

### 2.2 Классическая схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и шумов тропосферы

В данном разделе мы подробно рассматриваем способ компенсации нерелятивистского доплеровского сдвига частоты, который был впервые использован в рамках эксперимента Gravity Probe A и основан на использовании дополнительной двунаправленной линии связи HCC–спутник–HCC. Будем рассматривать распространение сигналов в геоцентрической инерциальной системе отсчета. В случае однопутевой (1w) линии связи спутник–HCC частота  $f_{1w}$ сигнала, принимаемого в момент  $t_3$  на HCC, имеющей координату  $r_3$  и скорость  $v_3$ , связана с частотой  $f_0$  сигнала, излучаемого в момент  $t_2$  спутником, имеющим координату  $r_2$  и скорость  $v_2$ , с помощью следующего соотношения

$$\frac{f_{1w}}{f_0} = \left(\frac{1+2U_2/c^2 - \mathbf{v}_2^2/c^2}{1+2U_3/c^2 - \mathbf{v}_3^2/c^2}\right)^{1/2} \left(\frac{1-\mathbf{v}_3\mathbf{n}_{23}/c}{1-\mathbf{v}_2\mathbf{n}_{23}/c}\right),\tag{2.4}$$

где  $U_2$  и  $U_3$  – гравитационные потенциалы спутника и НСС соответственно, c – скорость света,  $\mathbf{n}_{23}$  – единичный вектор в направлении распространения сигнала [24] (Рис. 2.3).

В случае двухпутевой (2w) линии связи наземная станция в точке с радиус-вектором  $\mathbf{r}_1$  и скоростью  $\mathbf{v}_1$  посылает спутнику сигнал на частоте  $f_0$  в направлении  $\mathbf{n}_{12}$ , после приема на котором сигнал передается с сохранением фазы обратно на наземную станцию в направлении  $\mathbf{n}_{23}$ . Сдвиг частоты  $f_{2w}$ 



Рисунок 2.3 – Кинематические характеристики КА и НСС.

относительно  $f_0$  описывается следующим выражением

$$\frac{f_{2w}}{f_0} = \left(\frac{1+2U_1/c^2 - \mathbf{v}_1^2/c^2}{1+2U_3/c^2 - \mathbf{v}_3^2/c^2}\right)^{1/2} \left(\frac{1-\mathbf{v}_3\mathbf{n}_{23}/c}{1-\mathbf{v}_2\mathbf{n}_{23}/c}\right) \left(\frac{1-\mathbf{v}_2\mathbf{n}_{12}/c}{1-\mathbf{v}_1\mathbf{n}_{12}/c}\right).$$
(2.5)

Индексы 1 и 3 соответствуют моментам передачи и приема сигнала на наземной станции. За время распространения сигнала  $2\Delta t \approx \Delta t_{12} + \Delta t_{12}$  по двухпутевой линии связи вектор скорости наземной станции изменится с  $\mathbf{v}_1$ на  $\mathbf{v}_3$ , однако её модуль останется практически неизменным  $\mathbf{v}_1^2 = \mathbf{v}_3^2$  (в пренебрежении эффектами земных приливов, неравномерностью вращения Земли и т.п.), аналогично для гравитационного потенциала  $U_1 = U_3$ . Следовательно, множитель в первой скобке формулы (2.5) сводится к 1.

Предположим, что спутник и наземная станция обмениваются сигналами (2.4) и (2.5) непрерывно. Раскладывая формулы (2.4) и (2.5) в ряд Тейлора до слагаемых 2-го порядка по v/c включительно, получаем, что сигнал двухпутевой линии содержит удвоенный, по сравнению с однопутевой, вклад эффекта Доплера 1-го порядка. Комбинация двух линий связи позволяет скомпенсировать его с помощью соотношения

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_{1w} - f_0}{f_0} - \frac{1}{2} \frac{f_{2w} - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f_{1w}}{f_0} - \frac{\Delta f_{2w}}{2f_0}.$$
(2.6)

Раскладывая вектора  $\mathbf{v}_1$  и  $\mathbf{n}_{12}$  с точностью до 1-го порядка по времени

распространения сигнала,  $\Delta t$ , получаем

$$\mathbf{v}_1 \approx \mathbf{v}_3 - \boldsymbol{a}_3 \cdot 2\Delta t + O(\Delta t^2), \qquad (2.7)$$

где  $a_3$  – центробежное ускорение НСС,

$$\mathbf{n}_{12} \approx -\mathbf{n}_{23} + \frac{2\left[\mathbf{v}_3 - (\mathbf{v}_3 \mathbf{n}_{23})\mathbf{n}_{23}\right]}{c} + O(\Delta t^2).$$
 (2.8)

Подстановка уравнений (2.4) и (2.5) в (2.6) с учетом (2.7) и (2.8), а также  $\mathbf{v}_1^2 = \mathbf{v}_3^2, U_1 = U_3$  дает

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta U_{23}}{c^2} - \frac{|\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_3|^2}{2c^2} - \frac{(\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{n}_{23})}{c} \Delta t + O(v/c)^3,$$
(2.9)

где  $\Delta U_{23} = U_2 - U_3$  – разность гравитационных потенциалов,  $\Delta t = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3|/c$  – время распространения сигнала по трассе КА–НСС.

Первые два слагаемых в выражении (2.9) содержат гравитационный сдвиг и эффект Доплера второго порядка специальной теории относительности, обусловленный относительной скоростью движения бортового и наземного стандартов. Последнее слагаемое представляет собой изменение нерелятивистского доплеровского сдвига частоты за время распространения сигнала.

Для построения компенсационной схемы, учитывающей релятивистские кинематические эффекты 3-го порядка по v/c, что уже требуется для эксперимента с КА «РадиоАстрон», необходимо следовать подходу, изложенному в [25] и основанному на разложении метрики до 2-го порядка по 1/c (1PN приближение) с последующим построением явного решения уравнений движения фотона в приближении геометрической оптики. Таким образом приходим к следующей формуле для сдвига частоты сигнала на выходе компенсационной схемы

$$\begin{aligned} \frac{\Delta f}{f_0} &= \frac{1}{f_0} \left( f_{1w} - f_0 - \frac{f_{2w} - f_0}{2} \right) = \\ &= \left( \frac{\Delta U_{23}}{c^2} - \frac{|\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_3|^2}{2c^2} + \frac{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3|}{c^2} (\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{n}_{23}) \right) \left( 1 + \frac{\dot{D}_{23}}{c} \right) + \\ &+ \frac{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3|}{c} \left( \frac{2(\mathbf{a}_3 \mathbf{v}_3)}{c^2} - \frac{\mathbf{a}_3 \mathbf{v}_2}{c^2} + \frac{(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3)}{c^2} \frac{d\mathbf{a}_3}{dt} - \frac{\mathbf{v}_3 \nabla U_3}{c^2} \right) + O(c^{-4}) \,, \end{aligned}$$

где  $da_3/dt$  – производная ускорения НСС,  $\nabla U_3 = \partial U_3/\partial \mathbf{r}_3$  – градиент скалярного гравитационного потенциала.

# 2.3 Модифицированная схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и шумов тропосферы

Для миссии «РадиоАстрон» эта схема не применима напрямую, поскольку бортовая аппаратура не предусматривает возможность раздельной синхронизации однопутевой и двухпутевой линий связи. Для преодоления этой сложности было разработано два подхода:

1) метод чередования режимов синхронизации,

2) метод, основанный на использовании так называемого режима «Частичный когерент».

Первый подход основан на циклическом переключении одно- и двухпутевого режимов синхронизации бортового комплекса с периодом 120-240 секунд и последующим восстановлением (интерполяцией) частотных измерений обоих типов на всей длительности сеанса наблюдений (Рис. 2.4). Таким образом, мы эффективно получаем одновременные частотные данные обоих типов и можем непосредственно применить к ним компенсационную схему нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферных шумов, как в GP-А.



Рисунок 2.4 – Остаточные частоты 1w и 2w 8.4 ГГц сигналов. Отчетливо видна модуляция гравитационного сдвига между двумя сеансами (в диапазоне от 0,54 Гц до 0,74 Гц).

Второй подход основан на использовании смешанного режима синхронизации бортового комплекса научной аппаратуры («Частичный когерент»), в котором несущая частота нисходящего сигнала синхронизирована по НВСЧ, а частота модуляции 15 ГГц канала связи формируется на основе сигнала БВ-СЧ. Вторым ключевым компонентом данного подхода является использование режима «Тест-2» бортового форматера, благодаря которому спектр сигнала 15 ГГц распадается на ряд изолированных спектральных компонент, частоту которых удобно оценивать (Рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Спектр сигнала канала связи 15 ГГц в режиме «Тест-2» бортового форматера.

Преимущество режима данного подхода по сравнению с чередованием режимов заключается в отсутствии необходимости переключения режимов работы бортового оборудования и проведения процедуры интерполяции, которая вносит дополнительную погрешность в оценку частоты. Компенсационная схема в данном случае выглядит следующим образом [19]:

$$\left\{ \left[ \left( Rf_{e}^{\uparrow} + \nu_{s} \right)^{\downarrow} - \left( Rf_{e}^{\uparrow} \right)^{\downarrow} \right] - \nu_{e} \right\} - \frac{1}{2} \frac{\nu_{0}}{Rf_{0}} \left[ \left( Rf_{e}^{\uparrow} \right)^{\downarrow} - Rf_{e} \right] = \\ = \nu_{e} \left[ \frac{\Delta f_{grav23}}{f} - \frac{|\mathbf{v}_{2} - \mathbf{v}_{3}|^{2}}{2c^{2}} - \frac{(\mathbf{a}_{3} \cdot \mathbf{n}_{23})}{c} \Delta t + \frac{1}{2} (T_{23} - T_{12}) \right] - \\ - \frac{3}{2} \frac{I_{23}}{Rf_{0}} \frac{\nu_{0}}{Rf_{0}} - \frac{1}{2} \frac{I_{12}}{f_{0}} \frac{\nu}{f_{0}} + \Delta \nu_{0} + o (v/c)^{2} + o (\Delta t) \quad (2.10)$$

где  $f_e^{\uparrow}$  – принимаемый на КА сигнал, R=15/7.2 – постоянный фактор преоб-

разования частоты, номинальные значения частоты модуляции  $\nu_0 \equiv 72 \text{ MF}$ ц и несущей  $f_0 \equiv 15 \text{ FF}$ ц,  $T_{12} \approx T_{23} = \Delta f_{trop}/f$  – тропосферные вклады,  $I_{12}$  и  $I_{23}$  – ионосферные вклады,  $\nu_s = \nu_0 + \Delta \nu_0$  – связь фактического и номинального значений частоты модуляции.

Большинство экспериментов по измерению гравитационного красного смещения, в том числе анализируемый в данной работе, были проведены с помощью метода, основанного на чередовании режимов синхронизации. Это связано с достаточно узкой (80 МГц) полосой приема сигнала 15 ГГц на станциях слежения миссии «РадиоАстрон», что приводит к снижению точности оценки частоты, и гораздо большей доступностью приемников на частоте 8.4 ГГц на наземных радиотелескопах, участвовавших в эксперименте (Рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Сравнение частотной стабильности режима «Тест-2» бортового форматера. Сигнал нисходящей линии связи 8.4 ГГц, записанный НРТ (Эффельсберг) и НСС (Грин Бэнк).

# 2.4 Эффекты, влияющие на частоту принимаемого со спутника сигнала

Помимо рассмотренных выше кинематических эффектов, частота передаваемых между спутником и наземной станцией сигналов изменяется также за счета ряда других факторов. Принимаемый со спутника сигнал описывается выражением

$$f_{\rm s}^{\downarrow} = f_{\rm s} + \Delta f_{\rm grav} + \Delta f_{\rm kin} + \Delta f_{\rm media} + \Delta f_{\rm instr} + \Delta f_{\rm other} , \qquad (2.11)$$

где  $\Delta f_{\text{grav}}$  – гравитационный сдвиг,  $\Delta f_{\text{kin}}$  – рассмотренный выше доплеровский сдвиг частоты за счет относительного движения,  $\Delta f_{\text{media}}$  – вклад среды распространения (ионосфера, тропосфера),  $\Delta f_{\text{instr}}$  – инструментальные эффекты (чувствительность БВСЧ к магнитному полю, температуре и т.п.),  $\Delta f_{\text{other}}$  – вклад окружения (приливы и т.п.). Таким образом, задача заключается в выделении гравитационного сдвига частоты на фоне сопутствующих эффектов.

Кратко опишем использованные нами методы учета вклада этих слагаемых. Учет эффектов релятивистской кинематики 2-го и 3-го порядка по v/c может быть произведен путем прямого расчета на основе эфемерид КА (как показано ниже в разделе 3.8, точность орбитальных данных оказывается для этого достаточной); ионосферный сдвиг частоты может быть рассчитан благодаря наличию данных измерений на двух частотах, 8.4 и 15 ГГц, либо двухчастотных данных GLONASS/GPS-приемников станций слежения и ионосферных карт; вклад тропосферы на выходе компенсационной схемы сокращается с точностью до различия прямого и обратного лучей; изменение выходной частоты БВСЧ и НВСЧ за счет изменений окружающей температуры и магнитного поля рассчитывается на основе калибровочных коэффициентов и данных телеметрии спутника; эффект движения фазового центра бортовой и наземной антенн – на основе данных ориентации спутника и целеуказаний наземных станций; смещение положения наземной станции из-за приливных эффектов - с использованием коэффициентов упругости Земли, эфемерид Луны и Солнца.

Остановимся на причинах возникновения и способах учета некоторых из упомянутых выше эффектов более подробно. Эффект движения фазового центра бортовой и наземных антенн возникает следующим образом [26, 27].

Принимаемый антенной сигнал регистрируется в фазовом центре антенны (в фокусе для осесимметричных рефлекторов), который, как правило, не совпадает с опорной точкой антенны (т.е. точкой относительно которой определяется положение наземной станции). Фронт волны достигает фазового центра раньше, чем опорной точки. Следовательно, фактически преодолеваемое сигналом растояние отличается от расчетного (относительно опорной точки) на величину, называемую антенной задержкой. (Для случая передающей антенны ситуация аналогичная.)



Рисунок 2.7 – Взаимное расположение фазового центра антенны (точка Р) и опорной точки станции (точка О) в различные моменты времени. Первичная ось вращения монтировки расположена в плоскости рисунка, вторичная ось (точка А) – ортогональна плоскости рисунка.

Впервые влияние смещения между осями монтировки антенны на точность фазовых измерений было рассмотрено в работе [28], где показана необходимость её учета в радиоинтерферометрических наблюдениях [29, 30]. Влияние движения фазового центра было также исследовано в [31], но только для случая однопутевой линии связи. При сопровождении наблюдаемого объекта возникает движение фазового центра антенны относительно опорной точки и соответствующее изменение фазовой задержки, которое вносит дополнительный вклад в доплеровский сдвиг частоты.

Скорость движения фазового центра относительно опорной точки можем представить как

$$\mathbf{u} = \dot{\mathbf{R}} \approx \frac{\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1}{\Delta t},\tag{2.12}$$

где  $\mathbf{R}_1$  и  $\mathbf{R}_2$  – положения фазового центра относительно опорной точки в различные моменты времени,  $\Delta t$  – промежуток времени, малый по сравнению со временем наблюдения.

Приведем выражения для дополнительного сдвига частоты, вызванного движением фазового центра со скоростью (2.12), для случаев однопутевой и двухпутевой линии связи с КА, а также сигнала на выходе компенсационной схемы – с точностью до 2-го порядка по v/c и u/c [26]. Подставляя добавку

(2.12) к скорости наземной станции в (2.4), находим дополнительный сдвиг частоты однопутевого сигнала:

$$\frac{\Delta f_{1w}^{\mathbf{u}}}{f_0} = -\frac{(\mathbf{u}_3 \,\mathbf{n}_{23})}{c} - \frac{(\mathbf{v}_2 \,\mathbf{n}_{23})(\mathbf{u}_3 \,\mathbf{n}_{23})}{c^2} + 2\frac{(\mathbf{v}_3 \,\mathbf{u}_3)}{c^2} + \frac{\mathbf{u}_3^2}{c^2}.$$
(2.13)

где  $u_3$  – скорость фазового центра относительно опорной точки в момент приема сигнала на НСС. Аналогично, для двухпутевой линии

$$\frac{\Delta f_{2\mathbf{w}}^{\mathbf{u}}}{f_0} = -2 \frac{(\mathbf{u}_3 \, \mathbf{n}_{23})}{c} - 4 \frac{(\mathbf{v}_2 \, \mathbf{n}_{23}) (\mathbf{u}_3 \, \mathbf{n}_{23})}{c^2} + 2 \frac{(\mathbf{v}_3 \, \mathbf{u}_3)}{c^2} - \frac{(\mathbf{u}_3 \, \mathbf{n}_{23})^2}{c^2} + 2 \frac{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3| (\mathbf{w}_3 \mathbf{n}_{23})}{c^2}.$$
 (2.14)

 $\mathbf{w}_3$  – ускорение фазового центра. И для компенсационной схемы:

$$\frac{\Delta f^{\mathbf{u}}}{f_0} = \frac{(\mathbf{v}_2 \,\mathbf{n}_{23}) \left(\mathbf{u}_3 \,\mathbf{n}_{23}\right)}{c^2} + \frac{(\mathbf{v}_3 \,\mathbf{u}_3)}{c^2} + \frac{\mathbf{u}_3^2}{2c^2} - \frac{\left(\mathbf{u}_3 \,\mathbf{n}_{23}\right)^2}{c^2} - 2 \,\frac{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3| \left(\mathbf{w}_3 \mathbf{n}_{23}\right)}{c^2}.$$
(2.15)

Проведем оценку величин входящих в эти выражения слагаемых, исходя из максимально возможных значений кинематических характеристик:  $|\mathbf{v}_1| = |\mathbf{v}_3| = 465 \text{ м/c}, |\mathbf{v}_2| \le 8500 \text{ м/c}, |\mathbf{u}| \le 10^{-3} \text{ м/c}.$  Имеем

$$\left| \frac{(\mathbf{u}_{3} \, \mathbf{n}_{23})}{c} \right| < 10^{-11}, \qquad \left| \frac{(\mathbf{v}_{2} \, \mathbf{n}_{12})(\mathbf{u}_{3} \, \mathbf{n}_{23})}{c^{2}} \right| < 10^{-16},$$
$$\left| \frac{(\mathbf{v}_{3} \, \mathbf{u}_{3})}{c^{2}} \right| < 10^{-17}, \qquad \left| \frac{\mathbf{u}_{3}^{2}}{2c^{2}} \right| < 10^{-23}. \tag{2.16}$$

Данные оценки показывают, что слагаемые 1-го порядка могут иметь заметную величину. Учет слагаемых 2-го порядка для антенного эффекта может потребоваться в будущих космических экспериментах по проверке ЭПЭ.

Рассмотрим вопрос о влиянии параметров окружающей среды на выходную частоту водородных стандартов. Для устранения зависимости частоты выходного сигнала водородных стандартов от внешних магнитных полей и температуры используются системы термостатирования (внешний и внутренний термостаты) и магнитного экранирования, внутрь которых помещается СВЧ резонатор водородного мазера.

Даже в случае многослойных экранов, однако, имеется остаточный эффект, характеризуемый коэффициентом магнитной чувствительности  $\alpha_{\rm B}$ . Для водородного стандарта частоты на борту спутника «РадиоАстрон» относительное изменение частоты при изменении внешнего магнитного поля на 1 Гс составляет  $2.0 \times 10^{-14}$  [32].

Для оценки вклада внешнего магнитного поля Земли в сдвиг частоты бортового водородного стандарта в нашем случае достаточно его расчета в дипольном приближении. Для точных расчетов требуется использование более совершенных моделей магнитного поля Земли (например, IGRF [33] и WMM [34]). В сферических координатах для модуля магнитной индукции в месте положения спутника имеем

$$|\mathbf{B}(r,\varphi,\lambda)| = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3\sin^2\varphi}, \qquad (2.17)$$

где  $r, \varphi, \lambda$  – геоцентрические расстояние, широта и долгота спутника;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{A}^{-2} \text{c}^{-2}$  – магнитная постоянная,  $m = 7.94 \times 10^{22} \text{ A} \cdot \text{m}^2$  – магнитный дипольный момент Земли. Для сдвига частоты имеем

$$\frac{\Delta f_{\text{mag}}}{f} = \alpha_{\text{B}} \times |\mathbf{B}|. \tag{2.18}$$

Еще одним важным условием стабильности выходной частоты стандарта является температурный контроль. Относительное изменение частоты бортового стандарта «РадиоАстрона» при изменении температуры окружающей среды на 1°C в диапазоне рабочих температур составляет  $5.0 \times 10^{-15}$  и характеризуется коэффициентом температурной чувствительности  $\alpha_T$ . Оценка вклада данного эффекта производится по формуле

$$\frac{\Delta f_{\text{temp}}}{f} = \alpha_{\text{T}} \times \Delta \text{T}.$$
(2.19)

Контроль температуры осуществляется с помощью датчиков, помещенных в разных точках системы. Данные телеметрии свидетельствуют о постоянстве температуры базовой плиты, на которой установлены бортовые стандарты космического аппарата «РадиоАстрон», с точностью 0.01°С. Проведя оценку изменения выходной частоты бортового стандарта для разных участков орбиты, можем сказать, что температурная чувствительность БВСЧ вносит пренебрежимо малый вклад в выходную частоту стандарта, и её можно не учитывать.

На рисунке 2.8 в качестве примера приведены величины вкладов эффектов движения фазового центра антенны и чувствительности БВСЧ к магнитному полю для участка орбиты в эпоху низкого перигея. Наблюдаемые изменения вкладов с периодом 8-10 суток связаны с периодом орбиты КА, а резкие изменения вблизи перигея орбиты связаны с увеличением скорости спутника и уменьшением расстояния до него. Линия, соответствующая значению  $5 \times 10^{-16}$ , обозначает безопасный уровень, эффекты меньше которого нет необходимости учитывать в рамках решаемой задачи.



Рисунок 2.8 – Вклады эффектов в сдвиг частоты сигнала для спутника «РадиоАстрон» и наземной станции слежения Грин Бэнк.

На рисунке 2.8 изображены вклады эффекта движения фазового центра для двух случаев – однопутевой линии связи и компенсационной схемы, а также влияния магнитного поля Земли на частоту бортового водородного стандарта. На рисунке 2.9 изображены вклады в сдвиг частоты за счет гравитации,  $\Delta U/c^2$ , а также эффектов Доплера 2-го и 3-го порядков, отдельно выделено слагаемое второго порядка, содержащее ускорение наземной станции слежения (так называемый эффект Саньяка). Абсолютные величины эффектов отнесены к левой вертикальной оси (в логарифмическом масштабе), расстояние от КА до центра Земли (серая кривая) отнесено к правой вертикальной оси (в линейном масштабе).

Графики (Рис. 2.8 и 2.9) подтверждают сделанные выше утверждения о необходимости учета слагаемых третьего порядка по v/c, а также чувствительности БВСЧ к магнитному полю.



Рисунок 2.9 – Вклады эффектов в сдвиг частоты сигнала для спутника «РадиоАстрон» и наземной станции слежения Грин Бэнк.

### 2.5 Многопараметрическая модель нарушения ЭПЭ

В настоящей работе, как и во всех предшествующих космических экспериментах по измерению эффекта гравитационного замедления времени (Gravity Probe A и GREAT), используется следующая модель нарушения ЭПЭ

$$\frac{\Delta f_{grav}}{f} = \frac{\Delta U_E}{c^2} (1 + \varepsilon_E), \qquad (2.20)$$

где  $\Delta U_E$  – гравитационный потенциал Земли,  $\varepsilon_E$  – параметр нарушения ЭПЭ, связанный с гравитационным полем Земли. Параметры нарушения ЭПЭ, связанные с полями других тел Солнечной системы, в частности, Солнца и Луны, которые в общем случае могут быть отличными от  $\varepsilon_E$ , в данное соотношение не входят.

Недавно было показано [35], что в подобных экспериментах требуется исходить из более сложной многопараметрической модели

$$\frac{\Delta f_{grav}}{f} = \frac{\Delta U_E}{c^2} + \frac{\varepsilon_E \Delta U_E + \varepsilon_S \Delta U_S + \varepsilon_M \Delta U_M + \dots}{c^2}$$
(2.21)

где  $\varepsilon_E$ ,  $\varepsilon_S$ ,  $\varepsilon_M$  – параметры нарушения ЭПЭ, связанные с гравитационными

полями Земли, Солнца и Луны, соответственно (вклад других тел Солнечной системы пренебрежимо мал на доступном на сегодня уровне точности). Таким образом, в общем случае необходима независимая оценка трех параметров нарушения ЭПЭ. Чувствительность эксперимента к тому или иному параметру нарушения будет, очевидно, зависеть от глубины модуляции соответствующего гравитационного потенциала, т.е. от орбиты КА. Например, в случае круговой орбиты КА возможность измерения параметра  $\varepsilon_E$  отсутствует. В случае орбиты РадиоАстрона, как показывает анализ [36], точность оценки параметра нарушения  $\varepsilon_E$  практически не зависит от того, какая из моделей (2.20) и (2.21) используется (Рис. 2.10). Данное замечание позволяет считать обоснованным использование в настоящей работе при анализе экспериментальных данных упрощенной модели (2.20).



Рисунок 2.10 – Результаты оценки точности эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени в поле Земли с помощью КА «РадиоАстрон» для различных моделей нарушения ЭПЭ. Синяя кривая – вклад Солнца и Луны игнорируется (модель 2.20); оранжевая – игнорируется вклад Луны, параметры нарушения для Земли и Солнца считаются равными; зеленая – игнорируется вклад Луны, параметры нарушения для Земли и Солнца определяются независимо; красная – все три параметра нарушения (для Луны, Солнца и Земли) определяются независимым образом.

### **3** ЭКСПЕРИМЕНТ RAKS17AW/AY/AZ/BA

В данной главе представлены результаты обработки экспериментальных данных четырех сеансов доплеровского слежения за КА РадиоАстрон raks17aw/ay/az/ba, проведенных осенью 2016 года в рамках эксперимента по измерению гравитационного замедления времени. Приведено описание использованных методов обработки экспериментальных данных и оценки случайных и систематических погрешностей полученной оценки параметра нарушения ЭПЭ.

### 3.1 Эксперимент по слежению за КА «РадиоАстрон» raks17aw-ba

В рамках эксперимента по измерению эффекта гравитационного замедления времени с помощью КА РадиоАстрон осенью 2016 года было проведено 4 сеанса доплеровского слежения.

Данные получены в рамках заявки «Gravitational redshift experiment with RadioAstron» на наблюдательное время на КРТ «РадиоАстрон» в период АО-4. Эксперимент проводился на основе метода чередования однопутевого и двухпутевого режимов синхронизации (см. раздел 2.3). Глубина модуляции гравитационного потенциала между данными сеансами составляет  $6 \times 10^{-11}$ . Основные параметры сеансов приведены в Таблице 3.1.

Сеанс	Начало (UTC)	Конец (UTC)	Дальность (км)
raks17aw	2016-09-29 14:55:00	2016-09-29 15:25:00	50 000
raks17ay	2016-09-29 19:00:00	2016-09-29 19:45:00	80 000
raks17az	2016-09-30 02:30:00	2016-09-30 03:30:00	128 000
raks17ba	2016-09-30 07:30:00	2016-09-30 08:30:00	155 000

Таблица 3.1 – Список сеансов

В ходе эксперимента на станции слежения Пущино было собрано два типа данных: 1) сигнал со спутника был оцифрован и записан с помощью стандартной РСДБ-аппаратуры, 2) оценка частоты сигнала произведена в реальном времени и записана на цифровой носитель с помощью так называемого штатного измерителя станции слежения. Проведенный в данной работе анализ основан на использовании второго типа данных, т.к., несмотря на их более низкое качество по сравнению с РСДБ-данными (примерно в 5 раз меньшую стабильность на временах усреднения >100 с, см. рис. 2.6), они позволяют продемонстрировать основные этапы обработки данных эксперимента. Данные штатного измерителя характеризуются следующими параметрами:

частота дискретизации 25 Гц, глубина дискретизации  $10^{-3}$  Гц (для 8.4 ГГц) и  $10^{-6}$  (для 15 ГГц), интервал оценки принятой частоты 80 мс.

### 3.2 Схема обработки данных

Процедура обработки экспериментальных данных состоит из следующих основных этапов:

1) Предварительная обработка (отождествление режимов работы, представление данных в удобной форме, удаление выбросов, фильтрация);

2) Построение оценки частоты принятого сигнала на всем интервале наблюдений в каждом из двух режимов;

3) Применение компенсационной схемы;

4) Расчет величин регулярных слагаемых, остающихся не скомпенсированными после применения компенсационной схемы, и их вычитание;

5) Оценка параметра нарушения ЭПЭ путем минимизации отклонений измеренных значений частоты от предсказанных на основе принятой модели нарушения по методу наименьших квадратов;

6) Оценка систематических ошибок.

Алгоритмы обработки разработаны на языке MATLAB с подключением программного пакета NAIF SPICE, использованного для расчета кинематических параметров движения КА и наземных станций, их преобразования между различными системами координат, учета параметров вращения Земли и т.п.

### 3.3 Предварительная обработка данных

Первым этапом обработки экспериментальных данных является отождествление режимов работы бортового и наземного комплексов. Данная часть обработки выполняется с помощью программного пакета RA90G, разработанного Д.А.Литвиновым с использованием циклограммы наблюдений КА. Исходные экспериментальные данные для каждого сеанса следующие:

- 1) Дата и время (UTC);
- 2) Измеренная частота 8.4 ГГц канала (1w, 2w);
- 3) Измеренная частота 15 ГГц канала (1w, 2w);
- 4) Поправка к излученной частоте 7.2075 ГГц в 2w режиме;
- 5) Реконструированная орбита КА «Спектр-Р».

Дальнейшим этапом обработки является анализ и фильтрация данных, которая состоит из удаления коротких интервалов (<6 секунд), выбросов и артефактов.

Удаление выбросов предполагает снятие основного тренда изменения частоты, вызванного орбитальным движением спутника и другими эффекта-

ми, и исследование отклонения точек относительно среднего значения невязок. Данная процедура выполняется следующим образом.

Рассмотрим простую модель поведения имеющегося частотного сигнала для каждого из режимов работы за время наблюдения *T*. Пусть

$$f(t) = s(t) + n(t), \quad 0 \le t \le T$$
 (3.1)

где f(t) – экспериментальные данные,  $s(t) = \sum_{i=1}^{n} a_i t^i$  – модельная кривая, n(t) – аддитивный белый гауссовый шум (флуктуации).

Медленный тренд для каждого типа данных оценивается с использованием весовой матрицы  $\omega(t)$ , а затем вычитается из экспериментальных данных. Весовой матрице изначально присваиваются единичные значения для каждого момента времени, а в дальнейшем она итерационного может переопределяться в зависимости от критерия выброса отклоняющихся точек.

Модельная кривая s(t) рассчитывается с помощью взвешенного метода наименьших квадратов с весовыми коэффициентами  $\omega(t)$  и представлена полиномом степени M от времени наблюдения. Степень полинома выбирается с использованием априорной информации о медленном движении космического аппарата и, как правило, принимается равной 4. Аппроксимация проводится итерационным методом с присвоением  $\omega(t_i) = 0$  точкам, выходящим за пороговое значение 3 стандартных отклонений  $3 \cdot STD$ , для остальных точек устанавливается  $\omega(t_i) = 1$ . Расчет взвешенного среднего и стандартного отклонения осуществляется по стандартным формулам. После нескольких итераций среднеквадратичное отклонение невязок, как правило, сходится к постоянному значению. Следующим шагом является исключение всех точек, удовлетворяющих условию  $d(t_i) > 4 \cdot STD$ , а также точек в некоторой окрестности выбросов.

Затем производится анализ невязок частоты, который включает исследование плотности распределения. Для всех двухпутевых данных плотность распределения невязок соответствует нормальному закону. В однопутевых данных наблюдается двухгорбость (3.1). Спектр незявок однопутевых данных, полученный дискретным преобразованием Фурье, позволяет выявить паразитные гармоники на фурье-частотах выше 4 Гц (3.3). Сотрудники НСС Пущино подтвердили техническую природу этих гармоник и необходимость их фильтрации. Спектральная очистка невязок с помощью низкочастотного фильтра на частоте среза 4 Гц позволяет существенно уменьшить флуктуации однопутевых данных до уровня двухпутевых (3.2).

Процедура очистки выбросов предусматривает возможность ручного уда-



Рисунок 3.1 – Плотность распределения невязок частоты 8.4 ГГц в однопутевом режиме ceaнca rask17ba до фильтрации.



Рисунок 3.2 – Плотность распределения невязок частоты 8.4 ГГц в однопутевом режиме сеанса rask17ba после фильтрации.

ления точек и подынтервалов с явными отклонениями от нормы, которые не попадают под автоматический алгоритм. Для наглядной демонстрации возможных артефактов и технических проблем нами был выбран ceanc raks17ba,



Рисунок 3.3 – Спектр невязок частоты 8.4 ГГц для одного из подынтервалов в однопутевом режиме ceaнca rask17ba. Отчетливо видны паразитные гармоники на фурье-частотах ~ 5 и 10 Гц. Красным цветом выделены частоты в спектре сигнала, пропускаемые использованным низкочастотным фильтром.

в котором на интервале 400–1300 секунд от начала сеанса наблюдаются многократные потери захвата сигнала со спутника (Рис. 3.4).

#### 3.4 Оценка частоты принятого сигнала

Восстановление частоты двухпутевого сигнала было произведено на всем интервале наблюдений с помощью их фитирования модельной кривой, в качестве которой использовался полином степени M, на основе критерия минимизации суммы квадратов отклонений измеренных значений частоты от модели. Степень полинома выбиралась равной 4 на основе априорной информации о динамике аппарата. Было проверено, что окончательные результаты практически не зависят от выбора M при условии  $M \ge 4$ . Использованный метод оценки частоты является оптимальным для случая белого шума. В действительности, однако, имеющийся шум, очевидно, не является белым, поэтому для более корректного восстановления частоты необходимо использовать более общие методы оценки, основанные на использовании информации о спектральных характеристиках шумов.

Измеренные значения частоты однопутевого сигнала использовались непосредственно, без построения их оценки на всем интервале наблюдения. Дан-



Рисунок 3.4 – Остаточная частота принятого со спутника сигнала: красная кривая – до фильтрации, синяя – после. Двухпутевому режиму соответствуют значения, сосредоточенные около 0 Гц, однопутевому – около 5.7 Гц.

ный подход приводит к уменьшению времени накопления полезного гравитационного сигнала, но позволяет уменьшить ошибку за счет построения оценочной кривой. Детальный анализ преимуществ и недостатков каждого из этих двух подходов планируется провести в ходе дальнейшего исследования.

# 3.5 Компенсация нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферного сдвига частоты

Компенсация нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы проводится с использованием исходных однопутевых частотных измерений и интерполированных двухпутевых. Согласно модифицированной компенсационной схеме в данном случае мы имеем два типа измерений для отдельных подынтервалов, определяемых однопутевыми данными. Для выделения суммарного сдвига частоты для каждого из режимов необходимо вычесть номинальную частоту  $f_0$ , а также вычесть из  $\Delta f_{1w}$  половину  $\Delta f_{2w}$ , тогда для сигнала на выходе компенсационной схемы имеем

$$\frac{f_{out}}{f_0} = \frac{f_{1w} - f_0}{f_0} - \frac{f_{2w} - f_0}{2f_0}.$$
(3.2)

Для выделения из данного сигнала интересующего нас гравитационного сдвига частоты требуется вычесть из него величины всех остальных эффектов,

описываемых формулой (2.3).

В рамках данной работы был произведен учет следующих эффектов: кинематические слагаемые 2-го и 3-го порядка по v/c, отстройка и дрейф БВСЧ относительно НВСЧ, а также расчет и оценка вкладов магнитной и температурной чувствительности БВСЧ, эффекта движения фазового центра наземной и бортовой антенн.

Кинематические слагаемые второго и третьего порядка рассчитываются на основе реконструированной орбиты КА «РадиоАстрон», предоставляемой ИПМ им. М. В. Келдыша РАН.

### 3.6 Расчет тонких эффектов

Как было пояснено в предыдущей главе, к тонким эффекты относятся эффект движения фазового центра наземной и бортовой антенн, кинематические слагаемые 3-го порядка, температурная и магнитная чувствительность, а также вклад от приливного воздействия Луны и Солнца. Радиотелескоп на НСС Пущино имеет альт-азимутальную монтировку, у которой оси вращения телескопа по азимуту и высоте пересекаются, в силу чего для данного телескопа эффект движения фазового центра практически отсутствует – в отличие от НСС Грин Бэнк, для которой были приведены графики в предыдущей главе. Эффект, связанный с бортовой антенной КА, полностью компенсируется согласно схеме (3.2). В силу этих двух обстоятельств, эффектом движения фазового центра как бортовой, так и наземной антенны для рассматриваемых сеансов можно пренебречь.

Данные телеметрии свидетельствует о постоянстве температуры базовой плиты, на которой установлены бортовые стандарты космического аппарата «РадиоАстрон», с точностью 0.01°С. С учетом паспортных характеристик БВСЧ, коэффициент его температурной чувствительности равен  $\alpha_T \approx 5 \times 10^{-15}$  °С<sup>-1</sup>, следовательно, величина эффекта <  $10^{-16}$  является незначительной и его учитывать не нужно.

Магнитная чувствительность оказывает влияние непосредственно на выходную частоту БВСЧ. Для сеансов на малых расстояниях до центра Земли ( $\sim 10~000$  км) величина соответствующего эффекта достигает  $3 \times 10^{-15}$ . Однако, для используемых в обработке сеансов этот вклад оказывается незначительным ( $< 10^{-16}$ ), поскольку дальность варьируется от 50 000 до 155 000 км, в чем можно убедиться из таблицы (3.1).

Учет приливного воздействия и остаточного вклада ионосферы не проводился.

Отстройка БВСЧ относительно НВСЧ на интервалах времени порядка

нескольких месяцев может быть представлена следующей моделью

$$\Delta f_0(t) = \Delta f_0(t_0) + \alpha(t - t_0).$$
(3.3)

В расчетах использовался модуляционный подход, который позволяет убрать систематическую ошибку, связанную постоянной отстройкой частоты БВСЧ и НВСЧ. Оценка отстройки проводится по специализированным сеансам на одной и той же дальности. Величина отстройки и дрейфа на начало эксперимента raks17aw/ay/az/ba составляет  $\Delta f_0(t_0) = (2.54 \pm 0.06) \times 10^{-12}$  и  $\alpha = (-2.52 \pm 0.07) \times 10^{-14}$  соответственно по оценке Литвинова Д.А. Дальнейшим этапом является вычитание постоянного сдвига  $\Delta f_0(t_0)$  из данных, в которых учтены вышеперечисленные эффекты. Для серии сеансов с учетом прошедшего времени от момента  $t_0$  расчитывается дрейф отстройки и также вычитается из сигнала (3.2).

После применения к сигналу (3.2) описанных выше процедур мы получаем набор значений частоты, которая принимается в качестве экспериментально измеренного эффекта гравитационного красного смещения. Дальнейшая обработка состоит в сравнении полученных экспериментальных значений эффекта с теоретически предсказанными на основе ОТО.

### 3.7 Оценка параметра нарушения ЭПЭ

Заключительным этапом обработки является оценка значения параметра нарушения ЭПЭ с помощью следующей модели линейной регрессии

$$\frac{\Delta f_{grav}}{f} - \frac{\Delta U}{c^2} = \varepsilon \frac{\Delta U}{c^2},\tag{3.4}$$

где  $\varepsilon$  – искомый параметр нарушения, показывающий отклонение измеренного гравитационного сдвига частоты от предсказанного согласно ЭПЭ. Левая часть выражения представляет собой, таким образом, разность между экспериментально измеренными и теоретическими значениями гравитационного сдвига частоты.

Для расчета гравитационного потенциала Земли в месте нахождения КА мы используем квадрупольное приближение

$$U_2 = -\frac{GM_E}{r} - J_2 GM_E a_1^2 \frac{\left(1 - 3\sin^2\varphi\right)}{2r^3},$$
(3.5)

где координата r отсчитывается от центра Земли,  $\varphi$  – широта, отсчитываемая от экватора, экваториальный радиус Земли  $a_1 = 6378136.5$  м, параметр  $GM_E = 3.986004418 \times 10^{14} \text{ м}^3/\text{c}^2$ , квадрупольный момент  $J_2 = 1.082636 \times 10^{-3}$ .



Рисунок 3.5 – Расчетные вклады эффектов в сдвиг частоты сигнала на выходе компенсационной схемы в период с 29 сентября по 1 октября 2016 года для КА «РадиоАстрон» и наземной станции слежения Пущино.

Для гравитационного потенциала НСС Пущино использовалось значение, рассчитанное с помощью модели EGM96.

В результате решения задачи (3.4) по методу наименьших квадратов получены следующие результаты (см. также Рис. 3.6, 3.7):

$$\varepsilon = (7.62 \pm 0.11) \times 10^{-4}$$
для 8.4 ГГц,  
 $\varepsilon = (8.55 \pm 0.14) \times 10^{-4}$ для 15 ГГц

где указанные погрешности соответствуют доверительному интервалу  $1\sigma$ .

В обоих случаях полученное значение параметра нарушения отличается от нулевого более чем на  $60\sigma$ , т.е. является статистически значимым. Однако, приведенные значения погрешностей учитывают лишь флуктуационную ошибку измерения гравитационного сдвига частоты. Для получения окончательных значений погрешностей необходимо провести также оценку систематических ошибок.



Рисунок 3.6 – Результаты построения модели линейной регрессии для 8.4 ГГц.



Рисунок 3.7 – Результаты построения модели линейной регрессии для 15 ГГц.

### 3.8 Оценка систематических ошибок

Оценку погрешности экспериментально измеренных значений гравитационного сдвига частоты произведем с помощью стандартной формулы для расчета погрешностей результатов косвенных измерений

$$\delta \frac{\Delta f}{f} = \sqrt{\sum_{k}^{K} \left( \Delta x_k \frac{\partial (\Delta f/f)}{\partial x_k} \right)^2},$$
(3.6)

где  $\Delta x_k, K$  – погрешность и количество величин, определяемых прямыми измерениями.

Ошибки расчетов кинематических эффектов определяются точностью орбитальных данных, которые для КА «РадиоАстрон» составляют: дальность  $\delta D \sim 20-50$  м, радиальная скорость  $\delta \dot{D} \sim 0.04-0.2$  мм/с, 3D-вектор положения  $\delta \mathbf{r} \sim 50$  м, 3D-вектор скорости  $\delta \mathbf{v} \sim 2.5 - 3.1$  мм/с [37]. Оценим величину систематической ошибки расчета кинематических эффектов для наиболее значительного слагаемого, связанного с релятивистским эффектом Доплера 2-го порядка. Ошибки определения положения и скорости HCC существенно меньше ошибок для КА, поэтому с учетом полной скорости движения КА на данный период наблюдений, не превышающей 5 км/с, получим ошибку

$$\delta\left(\frac{\Delta f_{kin}}{f}\right) \simeq \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} \left(\frac{\mathbf{v}^2}{2c^2}\right) \delta \mathbf{v} = \frac{2\mathbf{v}\delta \mathbf{v}}{c^2} < 4 \times 10^{-16}.$$
(3.7)

Аналогично, для величины гравитационного потенциала в месте нахождения КА имеем максимальную ошибку в период низкого перигея (~10 000 км)

$$\delta\left(\frac{\Delta U}{c^2}\right) \simeq \frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{GM}{c^2 r}\right) \delta r = \frac{GM\delta r}{c^2 r^2} \sim 2 \times 10^{-15}$$
(3.8)

Для текущего эксперимента минимальная дальность соответствует 50 000 км, что дает ошибку менее  $10^{-16}$ . Относительная точность определения отстройки составляет  $\delta \Delta f_0 / f \sim 6 \times 10^{-14}$ .

Объединяя все рассмотренные ошибки по формуле (3.6), получаем оценку величины систематической погрешности:

$$\delta \frac{\Delta f}{f} \approx 6 \times 10^{-14},\tag{3.9}$$

что дает ошибку

$$\delta \varepsilon \approx \frac{\delta \frac{\Delta f}{f}}{\frac{\Delta U}{c^2}} \approx 9.8 \times 10^{-5}.$$
 (3.10)

#### 3.9 Обсуждение результатов

В результате обработки четырех сеансов доплеровского слежения за КА «РадиоАстрон» на частотах 8.4 и 15 ГГц, выполненных осенью 2016 г., получены следующие оценки для параметра нарушения ЭПЭ, соответствующего эффекту гравитационного замедления времени:

$$arepsilon = (7.62 \pm 0.11_{
m stat} \pm 0.98_{
m sys}) imes 10^{-4}$$
для 8.4 ГГц,  
 $arepsilon = (8.55 \pm 0.14_{
m stat} \pm 0.98_{
m sys}) imes 10^{-4}$ для 15 ГГц,

где ошибки соответствуют доверительному интервалу 1*о*.

Полученные значения параметра нарушения отличаются от нулевого, предписываемого ЭПЭ, более чем на  $7\sigma$ , что является статистически значимым результатом. Хотя формально это свидетельствует о нарушении ЭПЭ, более вероятной причиной данного результата является наличие неучтенных систематических эффектов. В данной работе не учитывался вклад в сдвиг частоты сигнала за счет ионосферы, вклад которой для данных сеансов может составлять от  $10^{-14}$  до  $10^{-13}$ , что может привести к ошибке оценки  $\varepsilon$  на уровне  $\sim 10^{-3}$ . Существенная ошибка может быть также связана с использованными значениями отстройки собственных частот бортового и наземного стандартов, которые на настоящий момент являются предварительными. Еще одним источником ошибок может являться использованный упрощенный подход к обработке данных, который, как было отмечено выше, является оптимальным лишь для случая белого шума. Данные вопросы планируется рассмотреть в ходе дальнейшего исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены теоретические разработки и практические результаты, полученные автором в ходе участия в проекте по измерению эффекта гравитационного замедления времени с помощью КА «РадиоАстрон». Автором получены формулы для расчета эффекта движения фазового центра бортовой антенны КА и с их помощью показано, что для гравитационного эксперимента с «РадиоАстроном» эффект движения фазового центра как бортовой, так и наземной антенн является существенным лишь на изолированных участках траектории КА вблизи перигея. Построена модель учета чувствительности бортового стандарта к магнитному полю и с ее помощью показана необходимость учета соответствующего сдвига частоты на избранных участках траектории. Показано, что чувствительностью выходной частоты бортового го стандарта к температуре в рамках данного эксперимента можно пренебречь.

Разработан набор алгоритмов и реализующий их пакет программ для обработки экспериментальных данных доплеровского слежения за КА «РадиоАстрон», позволяющий находить оценку параметра нарушения ЭПЭ, связанного с эффектом гравитационного замедления времени. Программный пакет включает модули для импорта орбиты КА, реализации модифицированной схемы компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферных шумов, позволяет рассчитывать ряд «тонких» кинематических эффектов и др. С помощью созданного программного пакета произведена обработка экспериментальных данных четырех сеансов доплеровского слежения за КА «Радио-Астрон», выполненных на одном витке орбиты на различных дальностях. В результате данной обработки получены следующие оценки параметра нарушения ЭПЭ:

 $\varepsilon = (7.62 \pm 0.11_{\text{stat}} \pm 0.98_{\text{sys}}) \times 10^{-4}$  для измерений на 8.4 ГГц,  $\varepsilon = (8.55 \pm 0.14_{\text{stat}} \pm 0.98_{\text{sys}}) \times 10^{-4}$  для измерений на 15 ГГц.

Полученный результат формально свидетельствует о нарушении ЭПЭ, согласно которому значение данного параметра должно быть равно 0. Представлены аргументы в пользу того, что более вероятными причинами данного результата являются недостаточный учет систематических эффектов, таких как ионосферный сдвиг частоты, и использование в процессе обработки предварительных значений параметров, характеризующих относительную отстройку и дрейф частоты участвовавших в эксперименте бортового и наземного атомных водородных стандартов.

#### Благодарности

Автор выражает благодарность научным руководителям Руденко В.Н. и Литвинову Д.А., а также коллегам по отделу гравитационных измерений Гусеву А.В., Кулагину В.В., Попову С.М., за внимание к данной работе и помощь при её выполнении в виде многочисленных обсуждений и советов. Автор хочет поблагодарить команду Астрокосмического центра ФИАН, а также сотрудников станции слежения Пущино за предоставление и хранение экспериментальных данных.

Проект «РадиоАстрон» осуществляется Астрокосмическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук и Научнопроизводственным объединением им. С.А. Лавочкина по контракту с Госкорпорацией "РОСКОСМОС" совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Will C. M. Theory and Experiment in Gravitational Physics. Cambridge University Press; Revised edition, 1993. March 26. 400 p.

[2] M. Will Clifford. The Confrontation between General Relativity and Experiment // Living Reviews in Relativity. 2014. 01. T. 17.

[3] Brans Carl. Jordan-Brans-Dicke Theory // Scholarpedia. 2014. 02. T. 9.

[4] Eotvos R.V. Pekar V., Fekete E. Beitrage zum Gesetze der Proportionalitat von Tragheit und Gravitat // Ann. Phys. (Leipzig). 1922. T. 68. C. 11–66.

[5] Braginskii V. B., Panov V. I. Verification of equivalence of inertial and gravitational masses // Sov. Phys. JETP. 1972. T. 34. C. 463–466.

[6] Nobili Anna M., Anselmi Alberto. Testing the equivalence principle in space after the MICROSCOPE mission // Phys. Rev. D. 2018. Aug. T. 98. c. 042002. URL: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.98.042002.

[7] Hughes V. W., Robinson H. G., Beltran-Lopez V. Upper Limit for the Anisotropy of Inertial Mass from Nuclear Resonance Experiments // Phys. Rev. Lett. 1960. Apr. T. 4. C. 342–344. URL: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.4.342.

[8] Drever R. W. P. A search for anisotropy of inertial mass using a free precession technique // The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics. 1961. T. 6, № 65. C. 683–687. URL: https://doi.org/10.1080/14786436108244418.

[9] Tests of Relativity by Complementary Rotating Michelson-Morley Experiments / Holger Müller, Paul Louis Stanwix, Michael Edmund Tobar [и др.] // Phys. Rev. Lett. 2007. Jul. T. 99. c. 050401. URL: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.99.050401.

[10] B. Holberg J. Sirius B and the Measurement of the Gravitational Redshift // Journal for The History of Astronomy - J HIST ASTRON. 2010. 02. T. 41. C. 41–64.

[11] C. Lopresto James, Schrader Charles, K. Pierce A. Solar gravitational redshift from the infrared oxygen triplet // The Astrophysical Journal. 1991. 07. T. 376. C. 757–760.

[12] Pound R. V., Rebka G. A. Apparent Weight of Photons // Physical Review Letters. 1960. Vol. 4, no. 7. P. 337–341.

[13] Pound R. V., Snider J. L. Effect of Gravity on Gamma Radiation // Physical Review Letters. 1965. Vol. 140. p. 788.

[14] Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser / R. F. C. Vessot, M. W. Levine, E. M. Mattison [и др.] // Phys. Rev. Lett. 1980. Dec.

T. 45. C. 2081–2084. URL: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.45.2081.

[15] Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites / P. Delva,
N. Puchades, E. Schönemann [и др.] // Phys. Rev. Lett. 2018. Dec. T. 121.
c. 231101. URL: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.231101.

Gravitational Redshift **Satellites** [16] Test of the with Galileo Eccentric Orbit Sven Herrmann, Felix in an / Finke. Martin Lülf [и др.] // Phys. Rev. Lett. 2018. Dec. T. 121. c. 231102. URL: https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.231102.

[17] «РадиоАстрон» - телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений / Н. С. Кардашев, В. В. Хартов, В. В. Абрамов [и др.] // Астрономический журнал. М., 2013. Т. 90, № 3. С. 179–222.

[18] Zaslavskiy G.S., Zakhvatkin M.V., Stepanyants V.A., Tuchin A.G., Shishov V.A. Ballistic and navigation support for spacecraft flight control and science performance of the RadioAstron project: Five years of flights // Vestn. NPO im. Lavochkina. 2016. T. 33. C. 25–37. cited By 3.

[19] Бирюков А. В., Кауц В. Л., Кулагин В. В., Литвинов Д. А., В. Н. Руденко. Измерение гравитационного красного смещения с помощью космического радиотелескопа «РадиоАстрон» // Астрономический журнал. 2014. Т. 91, № 11. С. 887–900.

[20] Litvinov D. A., Gusev A. V., Porayko N. K., Rudenko V. N. RadioAstron gravitational redshift experiment: status update. 2016.

[21] Salomon. C., Dimarcq N., Abgrall M., et al. Cold atoms in space and atomic clocks: ACES // C. R. Acad. Sci. Paris, T.2, Serie IV. 2001. P. 1313–1330.

[22] Pollet A., Coulot D., Biancale R., Mandea M. E-GRASP/Eratosthenes: GRGS numerical simulations and millimetric TRF realization // AGU Fall Meeting Abstracts. 2017. dec.

Saha Prasenjit, [23] Angélil Raymond, Bondarescu Ruxandra [и др.]. Spacecraft clocks and relativity: Prospects future satellite for missions // Phys. Rev. D. 2014. Mar. T. 89. 064067. URL: c. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.89.064067.

[24] Vessot R. F. C., Levine M. W. Gravitational Redshift Space-Probe Experiment. GP-A Project Final Report. 1979.

[25] Blanchet. L., Salomon C., Teyssandier P., P.Wolf. Relativistic theory for time and frequency transfer to order  $c^3$  // Astronomy and Astrophysics. 2001. Vol. 370. P. 320–329.

[26] Филеткин А. И. Учет релятивистских поправок при измерении гравитационного замедления времени с космическим аппаратом «Радио-Астрон» // Курсовая работа. 2017.

[27] Filetkin A. I., Litvinov D. A., Rudenko V. N., Zakhvatkin M. V. The

antenna phase center motion effect in space-based experiments for fundamental physics and astronomy // arXiv:1712.01187. 2017.

[28] Wade C. M. Precise Positions of Radio Sources. I. Radio Measurements // The Astrophysical Journal. 1970. November. Vol. 162. P. 381–390.

[29] Томпсон А. Р., Моран Д. М., Свенсон Д. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. ФИЗМАТЛИТ, 2003. 624 с.

[30] Жаров В. Е. Основы радиоастрометрии. Фрязино, 2006. 480 с.

[31] Moyer T. D. Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation. Deep Space Communications and Navigation Series. Monograph 2, 2000. 527 c.

[32] ЗАО «Время-Ч» Россия Н.Новгород. Бортовой водородный стандарт частоты космического радиотелескопа VCH-1010. URL: https://www.vremya-ch.com/russian/product/index6e49.html?Razdel=8&Id=39.

[33] Thébault E., Finlay C. C., Alken P., Beggan C. D., Aubert J. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth, Planets and Space. 2015. Vol. 69, no. 79.

[34] Chulliat A., Macmillan S., Alken P., Beggan C., Nair M. The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020 // Technical Report. 2014.

[35] Wolf Peter, Blanchet Luc. Analysis of Sun/Moon gravitational redshift tests with the STE-QUEST space mission // Classical and Quantum Gravity. 2016. jan. T. 33, № 3. c. 035012. URL: https://doi.org/10.1088

[36] Литвинов Д. А., Пилипенко С. В., Руденко В.Н. // Classical and Quantum Gravity, in preparation. 2019.

[37] M. Zakhvatkin, et al. // Advances in Space Research, in press. 2019.