

УДК 530.12+521.91

## ИЗМЕРЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА “РАДИОАСТРОН”

© 2014 г. А. В. Бирюков<sup>1</sup>, В. Л. Кауц<sup>1,2</sup>, В. В. Кулагин<sup>3</sup>, Д. А. Литвинов<sup>3\*</sup>, В. Н. Руденко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>3</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.05.2014 г.; принята в печать 21.05.2014 г.

Рассмотрена возможность измерения эффекта гравитационного красного смещения с помощью космического радиотелескопа “РадиоАстрон” в различных режимах работы бортового комплекса научной аппаратуры. Точность эксперимента при работе телескопа в стандартном для радиоастрономических наблюдений режиме синхронизации по бортовому водородному стандарту частоты составляет ~1%. Причина ограничения точности связана с наличием в анализируемом сигнале поправок 1-го порядка по  $v/c$  и необходимостью привлечения недостаточно точных баллистических данных для их оценки. Предложен способ синтеза сигнала, несущего информацию об исследуемом эффекте, но не содержащего указанных поправок. Для реализации предлагаемой компенсационной схемы, отличающейся от использованной в эксперименте Gravity Probe A, требуется работа бортового комплекса в особом режиме смешанной синхронизации по наземному и бортовому водородным стандартам частоты. Точность измерения эффекта при этом может достичь  $\sim 10^{-6}$ .

DOI: 10.7868/S0004629914110012

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Прямым следствием эйнштейновского принципа эквивалентности (ЭПЭ) является эффект гравитационного красного смещения [1, 2], согласно которому частота  $f$  электромагнитной волны при прохождении разности гравитационных потенциалов  $\Delta U$  изменяется на величину

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = \frac{\Delta U}{c^2}. \quad (1)$$

Эквивалентная формулировка эффекта состоит в изменении длительности интервалов времени  $\Delta T$ , измеренных по часам, расположенным в точках с разными гравитационными потенциалами:

$$\frac{\Delta T_{\text{grav}}}{T} = \frac{\Delta U}{c^2}. \quad (2)$$

Первое надежное измерение эффекта гравитационного красного смещения было проведено в 1960 г. в лабораторном эксперименте Паунда и Ребки [3] (см. также [4]) с помощью эффекта Мёссбауэра. Наиболее точная проверка (1) на

сегодняшний день осуществлена в эксперименте Gravity Probe A (GP-A) 1976 г. [5], в котором сравнивались частоты двух водородных мазеров — наземного и установленного на ракете, поднявшейся на высоту 10 тыс. км. Результат опыта оказался в согласии с выводами эйнштейновской теории с точностью  $1.4 \times 10^{-4}$ .

Интерес к более точной проверке соотношений (1) и (2) связан с поисками границ применимости принципа эквивалентности, нарушение которого предсказывается большинством теорий объединенных взаимодействий. Конкретные механизмы нарушения могут быть различны, но в любом случае они связаны с неуниверсальным характером взаимодействия гравитационного поля с полями других частиц. Это приводит, в частности, к тому, что соотношение (1) для двух стандартов частоты  $a$  и  $b$ , находящихся в точках с гравитационными потенциалами  $U_a$  и  $U_b$  приобретает вид

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = \frac{U_a}{c^2}(1 + \varepsilon_X^{(a)}) - \frac{U_b}{c^2}(1 + \varepsilon_X^{(b)}), \quad (3)$$

где  $\varepsilon_X^{(a)}$  и  $\varepsilon_X^{(b)}$  — параметры нарушения, которые могут зависеть как от состава  $X$  источника грави-

\*E-mail: litvirq@yandex.ru

тационного поля, так и типа квантового перехода, используемого в соответствующих стандартах частоты. Соотношение (3) вместе с тем утверждает зависимость результатов физического эксперимента от точки пространства-времени. Следовательно, измерение эффекта гравитационного красного смещения позволяет непосредственно проверить ту часть ЭПЭ, которая касается локальной пространственно-временной инвариантности. (Впрочем, согласно гипотезе Шиффа (см. монографию [2]), нарушение этой симметрии влечет за собой нарушение и двух других аспектов ЭПЭ — слабого принципа эквивалентности и локальной лоренц-инвариантности.)

В случае двух одинаковых стандартов частоты соотношение (3) упрощается:

$$\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = \frac{\Delta U}{c^2} (1 + \varepsilon_X^{(a)}). \quad (4)$$

Результатом эксперимента GP-A является, таким образом, установление ограничения на параметр  $\varepsilon_{\oplus}^{(H)}$ , характеризующий нарушение (1) для перехода между уровнями сверхтонкой структуры водорода и гравитационного поля Земли:  $\varepsilon_{\oplus}^{(H)} = (0.05 \pm 1.40) \times 10^{-4}$ .

В ближайшее время может быть осуществлено несколько экспериментов, имеющих своей целью улучшение точности измерения эффекта на 2–4 порядка. В эксперименте ACES Европейского космического агентства [6] планируется установка пары атомных часов — водородного H-мазера и цезиевого фонтана PHARAO [7] — на международную космическую станцию. Активная фаза миссии несколько раз переносилась, в настоящее время запуск планируется на 2016 г. Из-за низкой высоты орбиты МКС разность гравитационных потенциалов между наземными и бортовыми часами составит лишь  $\approx 10\%$  от возможной при удалении на расстояние  $\gtrsim 100$  тыс. км. Тем не менее, относительная погрешность по частоте цезиевого фонтана PHARAO, которая в условиях микрогравитации должна составить  $\sim 10^{-16}$ , позволяет рассчитывать на достижение точности измерения  $\varepsilon$  на уровне  $10^{-6}$ .

Проект миссии STE-QUEST [8], подготавливаемый группой европейских институтов для участия в конкурсе ESA Cosmic Vision M4, имеет своей целью проверку (1) с точностью  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  в гравитационном поле Земли. Кроме того, благодаря специально выбранной конфигурации орбиты, допускающей одновременные сеансы связи с наземными станциями на различных континентах, предполагается проверка (1) в поле тяготения Солнца. Точность второй части эксперимента, не требующей, кстати, наличия на борту стандарта

частоты, должна составить  $\sim 10^{-6}$ . Вопрос о выборе стандарта частоты в настоящее время является открытым. Возможный запуск состоится не ранее 2026 г.

Еще один эксперимент по проверке соотношения (1), с теоретически достижимой точностью измерения эффекта  $\sim 10^{-6}$  в гравитационном поле Земли, осуществляется в настоящее время в рамках миссии космического радиотелескопа (КРТ) “РадиоАстрон” при участии авторов настоящей статьи. Возможность проведения данного эксперимента появилась в результате решения о включении в состав комплекса научной аппаратуры КРТ бортового водородного стандарта частоты (БВСЧ). При этом, ввиду невозможности восстановления орбиты с необходимой для такого эксперимента точностью, была предложена модификация коммуникационной подсистемы КРТ, которая позволила бы в режиме онлайн исключать из анализируемого сигнала часть ошибки, связанную с эффектом Допплера 1-го порядка и тропосферой (проект “Кронос”). Суть модификации сводилась к обеспечению возможности фазовой синхронизации петлевого канала Земля–КРТ–Земля по наземному водородному стандарту частоты (НВСЧ) одновременно с синхронизацией однопутевого канала связи КРТ–Земля по БВСЧ. К сожалению, данное предложение не было реализовано. Имеющиеся режимы работы комплекса высокоинформативного радиоканала (ВИРК) не предусматривают возможность отдельной синхронизации несущих частот каналов связи КРТ (7.2 ГГц вверх, 8.4 и 15 ГГц вниз).

Аппаратура КРТ, однако, допускает возможность отдельной синхронизации несущей (15 ГГц) и модуляционной (72 или 18 МГц) частот информационного канала связи. Данный комбинированный режим синхронизации, так называемый “Частичный когерент”, до настоящего времени не использовался при наблюдениях. Однако, как показывает проведенное авторами исследование, он дает возможность реализовать компенсационную схему, во многом аналогичную компенсационной схеме эксперимента GP-A, и исключить вклад не только нерелятивистского эффекта Допплера, но и тропосферы. Это позволяет рассчитывать на достижение в эксперименте предельной точности  $1.8 \times 10^{-6}$ , связанной с частотной нестабильностью БВСЧ.

Статья состоит из шести разделов. Первый раздел — введение. Во втором описывается общая схема практической реализации эксперимента по измерению гравитационного красного смещения с помощью космических аппаратов и приводятся выражения для расчета его точности. В третьем разделе дается описание аппаратных особенностей

КРТ “РадиоАстрон”, существенных для гравитационного эксперимента, а также рассматриваются три основных режима синхронизации бортового комплекса. Четвертый раздел посвящен изучению возможностей, имеющихся для проведения эксперимента в используемом при астрономических наблюдениях режиме “Н-Мазер”, а также приводятся некоторые результаты анализа экспериментальных данных. В пятом разделе рассматриваются особенности комбинированного режима синхронизации “Частичный когерент”. Наконец, в шестом разделе подводятся итоги работы.

## 2. ОБЩАЯ ИДЕЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОЦЕНКА ЕГО ТОЧНОСТИ

Космические аппараты (КА), снабженные бортовыми атомными стандартами частоты и времени, позволяют осуществлять эксперименты по измерению гравитационного красного смещения путем сравнения как частот (1), так и интервалов времени (2). Заметим, что в GP-A использовался частотный метод сравнения, ACES будет использовать оба подхода, а в STE-QUEST планируется только сравнение частот. В рамках миссии КРТ “РадиоАстрон” возможны оба типа эксперимента, однако, в силу технических особенностей бортового и наземного комплексов аппаратуры, метод сравнения частот позволяет достичь более высокой точности измерения, поэтому далее будем рассматривать именно его. Ограничимся также случаем, когда имеются лишь два стандарта частоты одинакового типа, один из которых находится на борту КА, а второй — на наземной станции слежения (НСС).

Сравнение частот наземного  $f_e$  и бортового  $f_s$  атомных стандартов подразумевает передачу соответствующих сигналов по радио- или оптическим линиям связи. Основную проблему при этом составляет выделение малого гравитационного сдвига на фоне сопутствующих эффектов, связанных с относительным движением КА и НСС, а также распространением сигналов в среде с неоднородным показателем преломления. Изменение частоты сигнала при движении по трассе КА–НСС описывается формулой

$$f_s^\downarrow = f_s + \Delta f_{\text{grav}} + \Delta f_{\text{kin}} + \Delta f_{\text{instr}} + \Delta f_{\text{media}}, \quad (5)$$

где  $f_s^\downarrow$  — измеряемая на НСС частота принимаемого сигнала,  $\Delta f_{\text{grav}}$  — искомый гравитационный эффект,  $\Delta f_{\text{kin}}$  — сдвиг частоты за счет относительного движения,  $\Delta f_{\text{media}}$  — вклад среды распространения (ионосферы, тропосферы, межзвездной среды),  $\Delta f_{\text{instr}}$  — инструментальные эффекты, на которых мы останавливаться не будем. Соотношение (5) может быть использовано для оценки

гравитационного сдвига  $\Delta f_{\text{grav}}$ . Действительно,  $f_s^\downarrow$  измеряется на НСС,  $\Delta f_{\text{kin}}$  может быть вычислена на основе данных об орбите спутника (в предположении справедливости специальной теории относительности), оценка  $\Delta f_{\text{media}}$  возможна при наличии многочастотной линии связи (для ионосферы и межзвездной среды) и данных метеонаблюдений (для тропосферы), учет  $\Delta f_{\text{instr}}$  требует проведения калибровочных процедур и экспериментального изучения шумов приемор-передающей и измерительной аппаратуры. Определенную трудность представляет недоступная наблюдению величина  $f_s$ , которую можно выразить через частоту наземного стандарта  $f_e$  и расстройку  $\Delta f_0$ :

$$f_s^\downarrow = f_e + \Delta f_{\text{grav}} + \Delta f_{\text{kin}} + \Delta f_{\text{instr}} + \Delta f_{\text{media}} + \Delta f_0, \quad (6)$$

где

$$f_s = f_e + \Delta f_0. \quad (7)$$

Проблема невозможности измерения  $f_s$ , или, что то же,  $\Delta f_0$ , имеет различные решения в зависимости от типа стандартов частоты и возможности варьировать разность гравитационных потенциалов  $\Delta U$  между ними (см. далее раздел 3).

Для проверки (1) требуется также вычисление значений функции  $U$  с помощью моделей гравитационного потенциала Земли [9] и Солнечной системы [10], а также данных о географических координатах НСС и орбите КА. При этом важно, чтобы процедура реконструкции орбиты КА не содержала в себе неявного предположения о справедливости проверяемого соотношения (1).

Рассмотрим факторы, влияющие на точность эксперимента. Общую формулу для ошибки измерения параметра  $\varepsilon$ , характеризующего отклонение от ОТО, получим, варьируя (4):

$$\delta\varepsilon = \frac{\delta \frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f}}{\frac{\Delta U}{c^2}} - \frac{\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f}}{\left(\frac{\Delta U}{c^2}\right)^2} \delta \frac{\Delta U}{c^2}. \quad (8)$$

Ошибка  $\delta \frac{\Delta U}{c^2}$  часто сравнима или меньше  $\delta \frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f}$ . В этом случае, подставляя в (8) выражение (4) для  $\frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f}$ , можно положить в нем  $\varepsilon = 0$ . Тогда для ошибки оценки  $\varepsilon$  получим:

$$\delta\varepsilon \approx \frac{\delta \frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} - \delta \frac{\Delta U}{c^2}}{\frac{\Delta U}{c^2}}. \quad (9)$$

Некоторые характеристики БВСЧ КРТ “РадиоАстрон”

Стабильность (аллановская девиация) $\sigma_y(\tau)$	
$\tau = 1000$ с	$3 \times 10^{-15}$
$\tau = 1$ ч	$2 \times 10^{-15}$
Относительная погрешность по частоте $\frac{\Delta f}{f}$	$3 \times 10^{-13}$
Дрейф на интервале	
1 день	$1 \times 10^{-15}$
1 год	$2 \times 10^{-13}$

На больших дальностях вкладом  $\delta \frac{\Delta U}{c^2}$  можно полностью пренебречь, если целью эксперимента является достижение точности  $\delta \varepsilon \sim 10^{-6}$ . Действительно, ошибка за счет неточного знания гравитационного потенциала в месте нахождения наземного стандарта постоянна, и при  $\delta r_e = 10$  см она составляет

$$\delta U_e/c^2 = 1.1 \times 10^{-17}. \quad (10)$$

Ошибка же  $\delta U_s/c^2$  при фиксированной точности определения координат КРТ убывает  $\propto r_s^{-2}$ . Если  $\delta r_s < 100$  м, то при  $r_s > 100$  тыс. км ошибка  $\delta \varepsilon < 4 \times 10^{-17}$ . Таким образом, при  $r_s \gtrsim 100$  тыс. км и требуемой точности  $\delta \varepsilon \sim 1 \times 10^{-6}$  имеем:

$$\delta \varepsilon \approx \frac{\delta \frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f}}{\frac{\Delta U}{c^2}}. \quad (11)$$

Очевидно, (11) справедливо для любых дальностей, если точность измерения координат достаточно высока.

Подчеркнем, что выражения (8), (9) и (11) описывают ошибку оценки  $\varepsilon$  для эксперимента по однократному измерению гравитационного красного смещения  $\Delta f_{\text{grav}}$  частоты сигнала, прошедшего разность гравитационных потенциалов  $\Delta U$ . Ошибка измерения величины модуляции эффекта при движении спутника по эллиптической орбите, а также в случае многократных измерений рассматриваются далее в связи с экспериментом на КРТ “РадиоАстрон”.

### 3. АППАРАТНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КРТ “РАДИОАСТРОН” ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ГРАВИТАЦИОННОГО КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ

Возможность проведения рассматриваемого эксперимента на КРТ “РадиоАстрон” связана,

прежде всего, с наличием бортового водородного стандарта частоты (БВСЧ). Наиболее существенные для нас характеристики этого прибора, согласно протоколам приемо-сдаточных испытаний, приведены в таблице.

Передача сигнала БВСЧ на Землю осуществляется с помощью бортового комплекса ВИРК [11], в состав которого входят два передатчика на частотах 8.4 и 15 ГГц, а также приемник на частоте 7.2 ГГц. Частоты передатчиков ВИРК, а также сетка частот радиоэлектронного комплекса научной аппаратуры (РЭК) могут формироваться как на основе сигнала БВСЧ, так и на основе принимаемого с помощью приемника на 7.2 ГГц сигнала наземного водородного стандарта. Использование того или иного режима синхронизации оказывает существенное влияние на возможность осуществления и точность эксперимента по измерению гравитационного красного смещения.

#### 3.1. Режим “Н-Мазер”

Основным режимом синхронизации, используемым при радиоастрономических наблюдениях, является комбинация режимов “Н-Мазер” для ВИРК и “Работа от ВИРК-1” для РЭК, или, кратко, режим “Н-Мазер”. В этом режиме синхронизация как ВИРК, так и РЭК осуществляется на основе сигнала БВСЧ. Частота  $f_s^\downarrow$  принимаемого на НСС сигнала отличается от частоты  $f_s$  излучаемого ВИРК сигнала согласно [12] (ср. с формулой (5)):

$$f_s^\downarrow = f_s \left( 1 - \frac{\dot{D}}{c} - \frac{v_s^2 - v_e^2}{2c^2} + \frac{(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})^2 - (\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{n}) \cdot (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})}{c^2} + \frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} + \frac{\Delta f_{\text{trop}}}{f} \right) + \Delta f_{\text{ion}} + o\left(\frac{v}{c}\right)^2, \quad (12)$$

где  $\dot{D} = (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_e) \cdot \mathbf{n}$  — радиальная скорость КРТ относительно НСС,  $\mathbf{v}_s$  и  $\mathbf{v}_e$  — скорости КРТ и НСС,  $\mathbf{n}$  — единичный вектор в направлении, противоположном направлению распространения сигнала,  $\Delta f_{\text{grav}}$  — гравитационный сдвиг частоты,  $\Delta f_{\text{ion}}$  и  $\Delta f_{\text{trop}}$  — сдвиги за счет ионосферных и тропосферных эффектов; все кинематические величины относятся к инерциальной геоцентрической системе отсчета.

Группировка слагаемых в (12) подчеркивает тот факт, что вклады кинематики, гравитации и тропосферы прямо пропорциональны частоте, вклад же ионосферы — обратно пропорционален [13]. Благодаря наличию двухчастотного канала связи это позволяет с высокой точностью учесть вклад ионосферы [12], но не дает возможности разделить

остальные эффекты, что приводит к необходимости их вычисления на основе данных баллистики. Как будет показано в следующем разделе, возникающая при этом ошибка оценки эффекта Доплера  $\dot{D}/c$  ограничивает точность эксперимента величиной  $\sim 1\%$ .

### 3.2. Режим “Когерент”

Следующим режимом работы бортового комплекса является “Когерент”, или режим петли фазовой синхронизации. В этом режиме синусоидаль-

ный сигнал на частоте 7.2 ГГц, синхронизованный по НВСЧ, посылается на борт, где он принимается ВИРК и используется в качестве опорного для генерации сетки частот РЭК КРТ. Кроме того, принятый тоновый сигнал используется для фазовой синхронизации всех сигналов, передаваемых с помощью ВИРК на Землю: 8.4 ГГц тонового сигнала, несущей частоты 15 ГГц информационного канала и частоты 72 (или 18) МГц, используемой для QPSK-модуляции последнего. Измеряемая на НСС частота сигнала, прошедшего по трассе НСС-КРТ-НСС, подчиняется соотношению

$$(Rf_e^\uparrow)^\downarrow = Rf_e \left( 1 - \frac{\dot{D}_{12}}{c} - \frac{\dot{D}_{23}}{c} + \frac{\dot{D}_{12} \cdot \dot{D}_{23}}{c^2} + \right. \\ \left. + \frac{(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}_{23})^2 + (\mathbf{v}_{e1} \cdot \mathbf{n}_{12})^2 - (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}_{12})(\mathbf{v}_{e1} \cdot \mathbf{n}_{12}) - (\mathbf{v}_{e3} \cdot \mathbf{n}_{23})(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}_{23})}{c^2} + \right. \\ \left. + \frac{\Delta f_{\text{trop12}}}{f} + \frac{\Delta f_{\text{trop23}}}{f} \right) + \Delta f_{\text{ion12}} + \Delta f_{\text{ion23}} + o\left(\frac{v}{c}\right)^2, \quad (13)$$

где  $f_e$  — частота посылаемого НСС сигнала,  $R = 8.4/7.2$  или  $15/7.2$  соответственно для 8.4-ГГц и 15-ГГц канала,  $\dot{D}_{12} = (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_{e1}) \cdot \mathbf{n}_{12}$ ,  $\dot{D}_{23} = (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_{e3}) \cdot \mathbf{n}_{32}$ , остальные обозначения ясны из рис. 1.

Сам по себе режим “Когерент” не представляет интереса для гравитационного эксперимента, так как принимаемый сигнал (13) не содержит гравитационного сдвига частоты. Однако в случае одновременного функционирования однопутевого (12) и двухпутевого (13) каналов связи появляется возможность построения радиотехнической компенсационной схемы [12], сигнал на выходе которой содержит гравитационную составляющую, но не содержит вкладов эффекта Доплера 1-го порядка и тропосферы. (В случае специального подбора соотношений частот каналов, возможна также онлайн-компенсация вклада ионосферы.) Данная компенсационная схема была впервые применена в рамках миссии GP-A, но для КРТ “РадиоАстрон” ее реализация невозможна, так как в бортовом комплексе не предусмотрена возможность раздельной синхронизации несущих частот каналов ВИРК.

### 3.3. Режим “Частичный когерент”

Тем не менее, имеется режим, в котором несущие частоты передатчиков ВИРК формируются на основе принятого с Земли сигнала 7.2 ГГц — режим “Когерент” для ВИРК, — а РЭК синхронизируется

по любому бортовому стандарту частоты — режим “Работа от БСЧ 1 или 2” для РЭК. Данный режим, так называемый “Частичный когерент”, оказывается наиболее подходящим для гравитационного эксперимента. Действительно, как и в обычном режиме “Когерент”, тоновый сигнал 8.4 ГГц и несущая частота информационного 15-ГГц канала не содержат гравитационного сдвига частоты. Однако, в отличие от “Когерента”, частота модуляции 15-ГГц сигнала формируется на основе сигнала БВСЧ, а не путем преобразования принятой с Земли частоты 7.2 ГГц. Поэтому все компоненты спектра сигнала информационного канала связи, за исключением центральной, испытывают гравитационное красное смещение. Проблема заключается в том, что величина гравитационного сдвига при этом становится пропорциональна модулирующей частоте 72 (или 18) МГц, тогда как вклады сопутствующих эффектов по-прежнему остаются на масштабе несущих частот. На первый взгляд это должно приводить к  $\approx 100$ -кратному ухудшению точности измерения по сравнению со схемой GP-A, в которой сигнал БВСЧ передавался на несущей частоте линии связи космос–Земля. Однако, как показано ниже, компенсационную схему можно построить таким образом, что все “мешающие” эффекты также переносятся на масштаб частоты модуляции. Более того, как и в GP-A, при этом удастся полностью скомпенсировать вклады эффекта Доплера 1-го порядка и тропосферы.

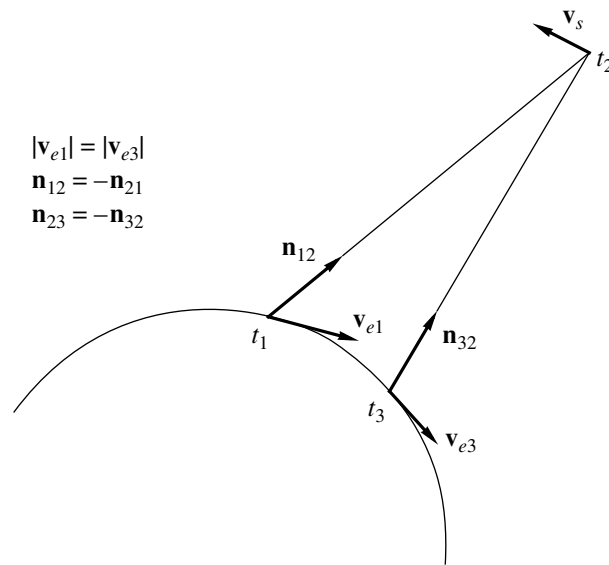


Рис. 1. Кинематические характеристики КРТ и НСС.

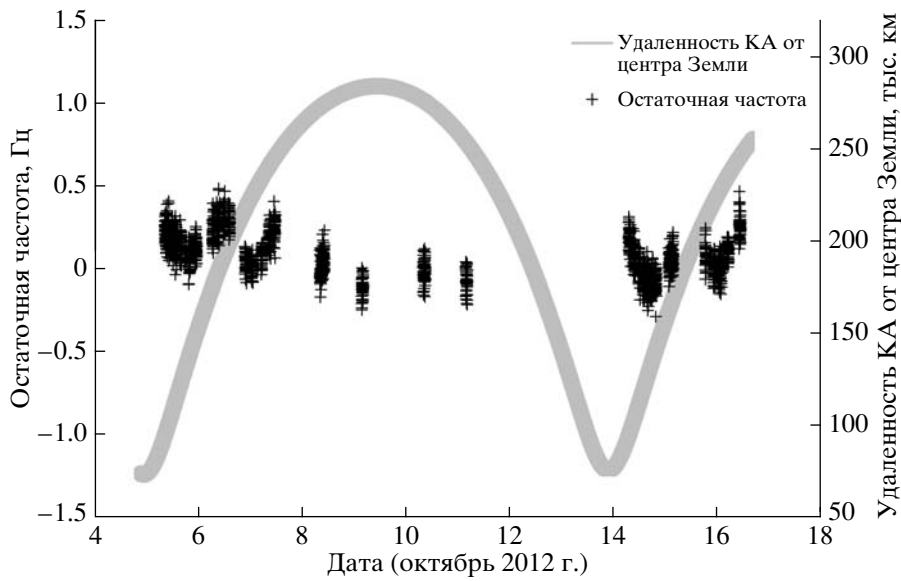


Рис. 2. Остаточная частота 8.4-ГГц канала связи. Октябрь 2012 г. Учтены: эффект Допплера (1-го и 2-го порядков), гравитационное красное смещение, вклады ионосферы и тропосферы.

#### 4. ИЗМЕРЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ В РЕЖИМЕ “Н-МАЗЕР”

Рассмотрим более подробно схему измерения гравитационного красного смещения с помощью КРТ “РадиоАстрон” при работе в режиме “Н-Мазер”. Основным выражением в этом случае является (12), в котором удобно выразить частоту БВСЧ  $f_s$  через частоту НВСЧ  $f_e$  и частотную расстройку  $\Delta f_0$  с помощью (7). Учитывая, что для

орбиты “РадиоАстрона”

$$\frac{\dot{D}}{c} < 3 \times 10^{-5}, \tag{14}$$

а  $\Delta f_0$  не превосходит относительной погрешности стандарта по частоте  $\frac{\Delta f_0}{f} < 3 \times 10^{-13}$  (таблица), получим

$$f_s^\downarrow = f_e \left[ 1 - \frac{\dot{D}}{c} - \frac{v_s^2 - v_e^2}{2c^2} + \right] \tag{15}$$

$$+ \left. \frac{(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})^2 - (\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{n}) \cdot (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n})}{c^2} + o\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right] + \\ + \Delta f_0 + \Delta f_{\text{grav}} + \Delta f_{\text{ion}} + \Delta f_{\text{trop}},$$

где, согласно сделанным замечаниям, наибольшее из отброшенных слагаемых  $\frac{\Delta f_0 \dot{D}}{f_e c} < 10^{-17}$ .

Очевидно, что точность оценки  $\Delta f_{\text{grav}}$  с помощью (15) ограничена незнанием  $\Delta f_0$ . Если эта величина достаточно мала, (15) может быть непосредственно использовано для оценки гравитационного сдвига частоты БВСЧ относительно НВСЧ (так называемая схема абсолютного измерения). Например, погрешность по частоте упоминавшихся выше фонтанных цезиевых часов PHARAO после их установки на МКС, как ожидается, составит  $\left(\frac{\Delta f_0}{f_e}\right)_{\text{PHARAO}} \sim 1 \times 10^{-16}$ , величина же измеряемого эффекта

$$\frac{U_e - U_{\text{ISS}}}{c^2} = \frac{GM}{r_e} - \frac{GM}{r_{\text{ISS}}} = 4.3 \times 10^{-11}. \quad (16)$$

Используя (11), отсюда находим предельную точность измерения параметра  $\varepsilon$ , характеризующего

нарушение ОТО:

$$\delta\varepsilon_{\text{ACES}} \sim 2 \times 10^{-6}. \quad (17)$$

Для “РадиоАстрона” вблизи апогея ( $r_{\text{ap}} \sim \sim 300$  тыс. км) разность потенциалов существенно больше:

$$\frac{U_e - U_{\text{ap}}}{c^2} = \frac{GM}{r_e} - \frac{GM}{r_{\text{ap}}} = 6.8 \times 10^{-10}, \quad (18)$$

однако, из-за проигрыша водородного стандарта в относительной погрешности по частоте (таблица), точность данного типа эксперимента на “РадиоАстроне” ограничена величиной

$$\delta\varepsilon_{\text{RA,ap}} \sim 4 \times 10^{-4}, \quad (19)$$

что хуже не только (17), но и результата миссии GP-A.

Для проверки (1), однако, можно измерять не полную величину гравитационного сдвига частоты, а его модуляцию при движении КРТ по орбите. С помощью (15) и (7) для разности частот, измеренных на НСС в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , имеем:

$$f_{s1}^\downarrow - f_{s2}^\downarrow = (f_{s1} - f_{s2}) + \\ + f_e \left[ -\frac{\dot{D}_1 - \dot{D}_2}{c} - \frac{v_{s1}^2 - v_{s2}^2}{2c^2} + \frac{(\mathbf{v}_{s1} \cdot \mathbf{n})^2 - (\mathbf{v}_{s2} \cdot \mathbf{n})^2 - (\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{n}) \cdot ((\mathbf{v}_{s1} \cdot \mathbf{n}) - (\mathbf{v}_{s2} \cdot \mathbf{n}))}{c^2} + \right. \\ \left. + o\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right] + (\Delta f_{\text{grav}1} - \Delta f_{\text{grav}2}) + (\Delta f_{\text{ion}1} - \Delta f_{\text{ion}2}) + (\Delta f_{\text{trop}1} - \Delta f_{\text{trop}2}). \quad (20)$$

Из-за воздействия Луны высоты перигея и апогея постепенно эволюционируют. В наиболее благоприятные для гравитационного эксперимента периоды (зима–весна 2014 и 2016 гг.) высота перигея составляет  $\sim 1.5$  тыс. км, при этом

$$\left(\frac{U_{\text{ap}} - U_{\text{per}}}{c^2}\right)_{\text{max}} = 5.5 \times 10^{-10}. \quad (21)$$

В наименее же благоприятный период (зима–весна 2015 г.) высота перигея  $\sim 65$  тыс. км, так что

$$\left(\frac{U_{\text{ap}} - U_{\text{per}}}{c^2}\right)_{\text{min}} = 5.3 \times 10^{-11}.$$

Слагаемое  $f_{s1} - f_{s2}$  в (20) представляет собой дрейф частоты БВСЧ за время  $t_2 - t_1$ . На больших временах дрейф водородных стандартов имеет заметную величину, сравнимую с их точностью (таб-

лица). Дрейф за сутки, однако, весьма мал:

$$\left(\frac{f_{s1} - f_{s2}}{f}\right)_{1 \text{ сут}} \sim 1 \times 10^{-15}. \quad (22)$$

Это значение следует сравнить с нестабильностью частоты БВСЧ на актуальном для гравитационного эксперимента интервале усреднения 1000 с:

$$\sigma_y(\tau) = 3 \times 10^{-15} \quad \text{при} \quad \tau = 1000 \text{ с}. \quad (23)$$

За сутки КРТ перемещается из перигея в точку с гравитационным потенциалом, практически не отличающимся от его значения в апогее. Поэтому для однократного эксперимента по измерению модуляции гравитационного красного смещения предел точности определяется нестабильностью частоты БВСЧ (23) и НВСЧ (того же порядка), а не дрейфом (22). Соответствующая формула получается из (11) заменой  $\Delta f_{\text{grav}} \rightarrow \Delta f_{\text{grav}1} - \Delta f_{\text{grav}2}$  и  $U_s - U_e \rightarrow U_{\text{ap}} - U_{\text{per}}$ . Таким образом, учитывая лишь

нестабильность частоты стандарта (23) и величину модуляции гравитационного потенциала (21), получаем следующую оценку *предельной точности однократного эксперимента* по измерению величины модуляции гравитационного красного смещения в благоприятный период низкого перигея:

$$\delta\varepsilon > 5.5 \times 10^{-6}. \quad (24)$$

Для менее благоприятного периода высокого перигея  $\delta\varepsilon > 5.6 \times 10^{-5}$ .

Существенным преимуществом миссии “Радио-Астрон” по сравнению с GP-A является возможность многократного повторения эксперимента. Статистическая обработка результатов измерений позволяет уменьшить вклад случайных ошибок в  $\sqrt{N}$  раз, где  $N$  — количество проведенных измерений. В частности, для  $N \sim 10$  вклад (23) нестабильности частоты оказывается сравнимым со вкладом дрейфа. Так как дрейф вносит систематическую погрешность, то дальнейшее накопление данных не позволит повысить точность эксперимента. Предполагая, что величина дрейфа БВСЧ относительно НВСЧ не может быть измерена с точностью, превосходящей (22), получаем следующую оценку *предельной точности эксперимента по измерению модуляции гравитационного красного смещения в рамках миссии КРТ “Радио-Астрон”*:

$$\delta\varepsilon > 1.8 \times 10^{-6}. \quad (25)$$

На практике точность измерения обсуждаемого эффекта ограничивается не столько параметрами стабильности и точности стандартов частоты, сколько недостаточно точным знанием орбиты КРТ. Если, например, ошибка определения радиальной скорости аппарата составляет  $\delta\dot{D} = 3$  мм/с, то с помощью (20) для ошибки оценки гравитационного сдвига частоты получаем  $\delta \frac{\Delta f_{\text{grav}}}{f} = 1.0 \times 10^{-11}$ . В данной ситуации, очевидно, не имеет смысла измерять модуляцию эффекта, так как вклад ошибки, связанной с точностью стандарта, на 2 порядка меньше. Точность же эксперимента по измерению полной величины эффекта, согласно (11) и (18), составляет  $\delta\varepsilon = 1.5 \times 10^{-2}$ .

Измерение частот 8.4- и 15-ГГц сигналов осуществляется на НСС Пушино и Гринбенк в штатном режиме во время сеансов наблюдений КРТ. На рис. 2 представлены результаты обработки частотных измерений 8.4-ГГц сигнала, произведенных на НСС Пушино в период 5–16 октября 2012 г. Редукция данных осуществлена на основе (15), кинематические величины рассчитаны по данным реконструированной орбиты КРТ, вклад

ионосферы — путем привлечения измерений на частоте 15 ГГц [12], тропосферы — с помощью метеоданных и картирующих функций [14]. Для проверки качества данных было положено  $\Delta f_{\text{grav}}/f = \Delta U/c^2$  и построены невязки между измеренными и расчетными значениями принятой частоты. Среднеквадратичная величина невязки составила 0.18 Гц, т.е.  $\approx 3\%$  от гравитационного сдвига 8.4-ГГц сигнала в этот период (5.3–5.7 Гц). В предположении отсутствия нарушения ОТО на рассматриваемом масштабе, данная величина, согласно (11), дает нижнюю границу точности оценки  $\varepsilon$ . Если предположить, что основная часть ошибки связана с радиальной скоростью КРТ, то отсюда находим  $\delta\dot{D} \sim 6$  мм/с.

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ В РЕЖИМЕ “ЧАСТИЧНЫЙ КОГЕРЕНТ”

Преимущество режима “Частичный когерент” по сравнению с режимом “Н-мазер” заключается в возможности построения компенсационной схемы, сигнал на выходе которой содержит гравитационный сдвиг частоты, но не содержит сдвига за счет эффекта Допплера 1-го порядка и тропосферы. Это приводит к снижению требований к качеству баллистических данных и дает возможность достижения рекордной точности измерения эффекта гравитационного красного смещения  $\delta\varepsilon \sim 10^{-6}$ . Ниже излагается способ синтеза сигнала с указанными свойствами из принимаемого на НСС сигнала 15 ГГц и сигнала наземного водородного стандарта.

Напомним, что в режиме “Частичный когерент” тоновый сигнал на частоте 7.2 ГГц посылается НСС на КРТ, где он используется для синтеза сетки частот РЭК, а также, путем эффективного умножения на 8.4/7.2 и 15/7.2, для получения тонового сигнала 8.4 ГГц и несущей частоты информационного 15-ГГц канала связи КРТ–НСС. Частота модуляции 15-ГГц канала, в отличие от режима “Когерент”, формируется на основе сигнала БВСЧ.

Рассмотрим более подробно преобразования частоты сигналов при их распространении “вверх” и “вниз”. Частота  $f_e^\uparrow$  принимаемого КРТ сигнала связана с частотой  $f_e$  этого сигнала на выходе антенны НСС согласно формуле

$$f_e^\uparrow = f_e \left[ 1 - \frac{\dot{D}_{12}}{c} + \frac{\Delta f_{\text{grav}12}}{f} - \frac{v_{e1}^2 - v_s^2}{2c^2} + \frac{(\mathbf{v}_{e1} \cdot \mathbf{n}_{12})^2 - (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}_{12}) \cdot (\mathbf{v}_{e1} \cdot \mathbf{n}_{12})}{c^2} \right] + \quad (26)$$



$$+ T_{12} + \frac{1}{f_e^2} I_{12} + o\left(\frac{v}{c}\right)^2],$$

где, по сравнению с аналогичной формулой (12) для  $f_s^\downarrow$ , мы явно выписали характер частотной зависимости тропосферного и ионосферного вкладов:  $\frac{\Delta f_{\text{trop}}}{f} = T_{12}$ ,  $\frac{\Delta f_{\text{ion}}}{f} = \frac{I_{12}}{f^2}$ . Предполагается, что для рассматриваемого диапазона частот (7–15 ГГц)  $T$  и  $I$  являются константами по отношению к  $f$ , но могут зависеть от времени и траектории распространения сигнала [13].

На борту частота принятого 7.2-ГГц сигнала умножается на фактор  $R = 15/7.2$  и используется далее в качестве несущей частоты информационного канала связи КРТ–НСС. Передача информации осуществляется путем QPSK-модуляции этого сигнала с частотой 72 (или 18) МГц, генерируемой БВСЧ. В результате прохождения по трассе космос–Земля спектр 15-ГГц сигнала деформируется. Согласно (12), спектральная компонента исходного сигнала с частотой  $Rf_e^\uparrow \pm \nu_s$  в момент приема на НСС будет обладать частотой

$$\begin{aligned} (Rf_e^\uparrow \pm \nu_s)^\downarrow &= (Rf_e^\uparrow \pm \nu_s) \times \\ &\times \left[ 1 - \frac{\dot{D}_{23}}{c} + \frac{\Delta f_{\text{grav}23}}{f} - \frac{v_s^2 - v_{e3}^2}{2c^2} + \right. \\ &+ \frac{(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}_{23})^2 - (\mathbf{v}_{e3} \cdot \mathbf{n}_{23}) \cdot (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}_{23})}{c^2} + \\ &\left. + T_{23} + \frac{1}{(Rf_e^\uparrow \pm \nu_s)^2} I_{23} + o\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

Отметим, что из-за дисперсионной природы ионосферного вклада имеем  $(Rf)^\downarrow \neq Rf^\downarrow$ ,  $(f + \nu)^\downarrow \neq f^\downarrow + \nu^\downarrow$  и аналогично для символа  $\uparrow$ .

Подставляя (26) в (27) с учетом  $\phi_{e3} = \phi_{e1} = \phi_e$ ,  $v_{e3}^2 = v_{e1}^2 = v_e^2$  (что справедливо на интервалах порядка времени распространения сигнала) и раскладывая по малым параметрам  $\nu/Rf$  и  $(Rf^\uparrow - Rf)/Rf \approx (\dot{D}_{12}/c)/Rf$ , получаем:

$$\begin{aligned} (Rf_e^\uparrow \pm \nu)^\downarrow - (Rf_e^\uparrow)^\downarrow &= \\ &= \pm \nu_s \left( 1 - \frac{\dot{D}_{23}}{c} + \frac{\Delta f_{\text{grav}23}}{f} - \frac{v_s^2 - v_{e3}^2}{2c^2} + \right. \\ &+ \frac{(\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}_{23})^2 - (\mathbf{v}_{e3} \cdot \mathbf{n}_{23}) \cdot (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n}_{23})}{c^2} + T_{23} \Big) \mp \\ &\mp \frac{I_{23}}{Rf} \frac{\nu}{Rf} + \Delta \nu_0 + o\left(\frac{v}{c}\right)^2. \end{aligned} \quad (28)$$

Важное свойство дифференциального сигнала (28) состоит в том, что здесь, в отличие от (27), величины всех поправок уже пропорциональны частоте модуляции  $\nu_s$ . В то же время данный сигнал

не имеет преимуществ перед сигналом (12) режима “Н-мазер”, так как по-прежнему содержит вклад эффекта Допплера 1-го порядка. Отметим также перемену знака перед ионосферным слагаемым в (28) по сравнению с (12).

Рассмотрим, далее, следующую комбинацию спектральных компонент принимаемого на НСС сигнала 15 ГГц:

$$\begin{aligned} &\left\{ \left[ (Rf_e^\uparrow + \nu_s)^\downarrow - (Rf_e^\uparrow)^\downarrow \right] - \nu_e \right\} - \\ &- \frac{1}{2} \frac{\nu_0}{Rf_0} \left[ (Rf_e^\uparrow)^\downarrow - Rf_e \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

Появление здесь величин с индексом “0”, представляющих собой номинальные значения частоты модуляции  $\nu_0 \equiv 72$  МГц и несущей  $f_0 \equiv 15$  ГГц, связано с соображениями практической реализации компенсационного алгоритма (см. ниже). При реализации в виде аппаратной радиотехнической схемы фактор  $\frac{\nu_0}{Rf_0}$  представляет собой коэффициент умножения синтезатора, при программном подходе – это числовая константа в коде программы. (Во втором случае вместо (29) может использоваться выражение  $\left\{ \left[ (Rf_e^\uparrow + \nu_s)^\downarrow - (Rf_e^\uparrow)^\downarrow \right] - \nu_0 \right\} - \frac{1}{2} \frac{\nu_0}{Rf_0} \left[ (Rf_e^\uparrow)^\downarrow - Rf_0 \right]$ .)

Номинальные и фактические значения частот связаны соотношениями, аналогичными (7):

$$f_s = f_0 + \tilde{\Delta} f_0, \quad \nu_s = \nu_0 + \tilde{\Delta} \nu_0, \quad (30)$$

причем, вообще говоря,  $\Delta f_0 \neq \tilde{\Delta} f_0$ . Отклонение фактических значений от номинальных, очевидно, не превышает относительной погрешности стандартов по частоте. В частности, для “РадиоАстро-на” (таблица)

$$\tilde{\Delta} f_0/f < 3 \times 10^{-13}, \quad \tilde{\Delta} \nu_0/\nu < 3 \times 10^{-13}. \quad (31)$$

Вернемся к (29) и подставим в него (28) и (27), положив в последнем  $\nu = 0$ , а также воспользуемся справедливыми с точностью до  $\Delta t = |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{e3}|/c$  соотношениями

$$\mathbf{v}_{e1} \approx \mathbf{v}_{e3} - 2\Delta t \cdot \mathbf{a}_{e3}, \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{12} &\approx \mathbf{n}_{32} + \\ &+ \frac{2\Delta t}{|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{e3}|} \left[ \mathbf{v}_{e2} - \mathbf{n}_{32} \cdot (\mathbf{n}_{32} \cdot \mathbf{v}_{e3}) \right], \end{aligned} \quad (33)$$

где  $\mathbf{a}_{e3}$  – ускорение НСС в момент  $t_3$ . Используя также (7), (30) и (14), получим

$$\begin{aligned} &\left\{ \left[ (Rf_e^\uparrow + \nu_s)^\downarrow - (Rf_e^\uparrow)^\downarrow \right] - \nu_e \right\} - \\ &- \frac{1}{2} \frac{\nu_0}{Rf_0} \left[ (Rf_e^\uparrow)^\downarrow - Rf_e \right] = \nu_e \left[ \frac{\Delta f_{\text{grav}23}}{f} - \right. \end{aligned} \quad (34)$$

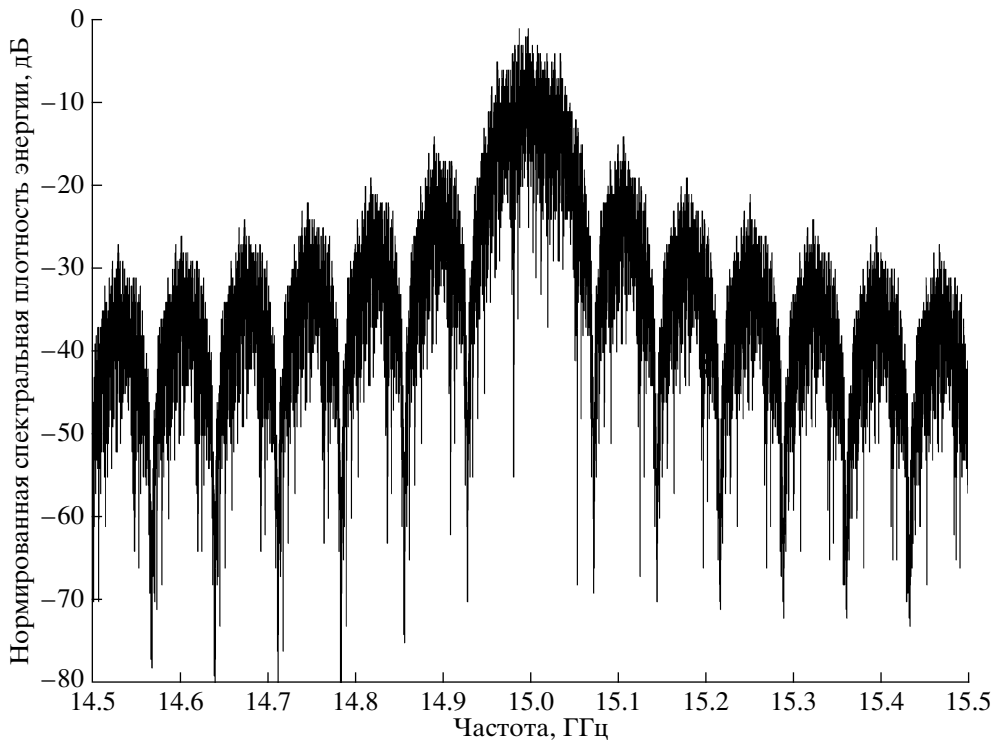


Рис. 3. Результат моделирования спектра 15-ГГц сигнала в режиме передачи шумоподобной информации.

$$- \left[ \frac{|\mathbf{v}_s^2 - \mathbf{v}_e^2|}{2c^2} + \frac{\mathbf{a}_{e3} \cdot \mathbf{n}_{32} \Delta t}{c} + \frac{1}{2}(T_{23} - T_{12}) \right] - \frac{3}{2} \frac{I_{23}}{Rf_0} \frac{\nu_0}{Rf_0} - \frac{1}{2} \frac{I_{12}}{f_0} \frac{\nu}{f_0} + \Delta\nu_0 + o(v/c)^2 + o(\Delta t),$$

где отброшены слагаемые типа  $\frac{I_{23}}{Rf} \frac{\nu}{Rf} \frac{\dot{D}_{12}/c}{f}$  и  $\frac{I}{f} \frac{\Delta\nu_0}{f}$ .

Сигнал (34) не содержит вклада эффекта Доплера 1-го порядка. Кроме того,  $T_{12} \approx T_{23}$  с точностью до мелкомасштабных и быстропеременных тропосферных флуктуаций, поэтому вклад тропосферы также в значительной мере сокращается. В этих двух отношениях сигнал (34) эквивалентен сигналу на выходе компенсационной схемы эксперимента GP-A. Однако, в отличие от GP-A, приближенное равенство  $I_{12} \approx I_{23}$  не приводит к компенсации ионосферного вклада. Заметим, что комбинацию, обладающую свойством сокращения эффекта Доплера 1-го порядка и тропосферы, можно составить также из  $Rf^\uparrow + \nu$  и  $Rf^\uparrow - \nu$ , т.е. двух симметричных боковых компонент сигнала, а не боковой и центральной, как в (29). Легко видеть, однако, что и в этом случае компенсации вклада ионосферы не происходит. Данное обстоятельство связано с изменением

знака перед ионосферным слагаемым в (34), и можно показать, что не существует комбинации спектральных компонент 15-ГГц сигнала, для которой вклад ионосферы был бы скомпенсирован, даже если бы имелась возможность, как в GP-A, произвольно распоряжаться соотношениями частот каналов.

Для практического применения (34) или аналогичного соотношения с симметричными боковыми компонентами необходимо, чтобы спектр QPSK-модулированного сигнала 15 ГГц содержал изолированные пики с большим отношением сигнал-шум. В действительности, однако, при передаче на Землю данных астрономических наблюдений, имеющих шумоподобную природу, спектр сигнала представляет собой набор широких “горбов” (рис. 3), положение максимумов которых измерять затруднительно. Требуемая форма спектра может быть получена при передаче информации, представляющей собой регулярную последовательность чередующихся двоичных 0 и 1. Бортовой форматор КРТ “РадиоАстрон” имеет режим тестирования (“Тест 2”), предусматривающий генерацию такой последовательности. Спектр 15-ГГц сигнала в режиме “Тест 2” форматора изображен на рис. 4.

Обратимся к вопросу, каким образом может быть синтезирован сигнал с частотой (29). Первый

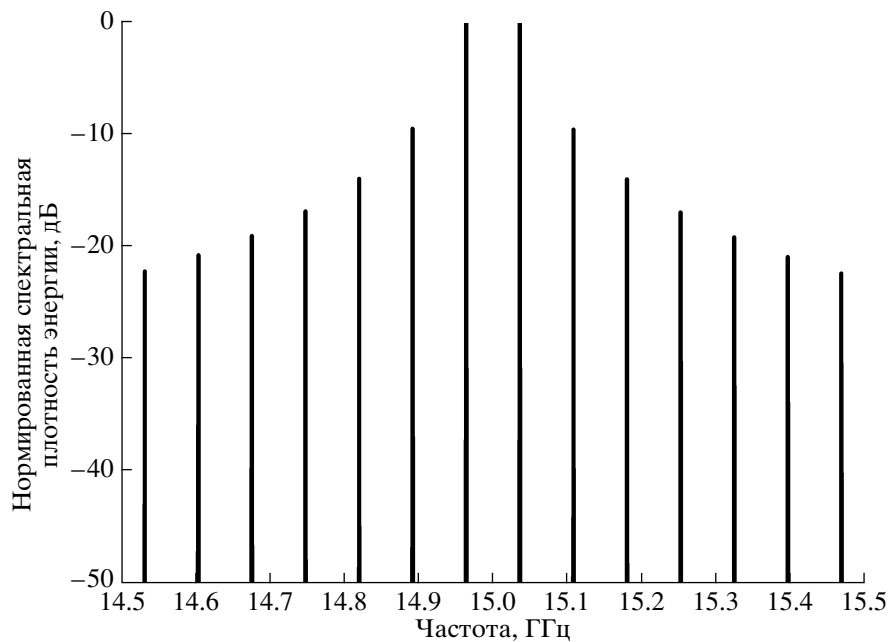


Рис. 4. Результат моделирования спектра 15-ГГц сигнала при работе бортового форматора в режиме “Тест 2”.

подход (онлайн-компенсация) состоит в построении аппаратной радиотехнической схемы, состоящей из набора фильтров, смесителей и синтезаторов (рис. 5). На вход этой схемы подается сигнал 15 ГГц с выхода соответствующего приемника антенны НСС. Далее с помощью фильтров производится выделение спектральных компонент, фигурирующих в (29), их умножение и смешивание согласно указанным арифметическим действиям. Результирующий сигнал с частотой (34) на выходе схемы может быть подан на частотный измеритель, либо оцифрован и записан на цифровой носитель для последующего анализа. Второй подход (оффлайн-компенсация) подразумевает непосредственную запись (например, на РСДБ-аппаратуре) перенесенного на промежуточную частоту и оцифрованного сигнала с выхода 15-ГГц приемника. Далее к записанному сигналу применяются оптимальные алгоритмы обработки с целью нахождения временной эволюции его спектральных компонент. Синтез частоты (29) производится программно, путем применения соответствующих арифметических действий к измеренным частотам компонент спектра. Первый способ может быть реализован лишь на наземных станциях слежения, тогда как второй — как на НСС, так и на любом наземном телескопе, оборудованном 2-см приемником и комплексом регистрирующей аппаратуры РСДБ (в последнем случае приведенные выше формулы должны быть незначительно модифицированы).

Соотношение (34) может быть использовано

для оценки  $\Delta f_{\text{grav}}$ , так как все остальные величины в нем либо измеряются, либо могут быть вычислены по данным баллистики и метеонаблюдений. Оценим точность баллистических данных для  $v$ , необходимую для получения точности измерения параметра  $\varepsilon$  на уровне  $10^{-6}$ . При максимальной скорости КРТ 10 км/с и ошибке  $\delta v = 3$  мм/с имеем  $\delta \frac{v^2}{c^2} = 7 \times 10^{-16}$ . Соответствующую ошибку оценки  $\varepsilon$  в эксперименте по измерению модуляции гравитационного потенциала (21) найдем, как обычно, с помощью (11):

$$\delta \varepsilon = 1.3 \times 10^{-6}. \quad (35)$$

Таким образом, использование режима “Частичный когерент” вместе с компенсационной схемой (34) в принципе позволяет при существующей точности восстановления орбиты КРТ достичь рекордной точности измерения эффекта гравитационного красного смещения. Заметим, однако, что для нахождения реально достижимой точности оценки  $\varepsilon$  необходим учет ошибок измерения всех величин в (34), а также экспериментальное изучение шумов приемо-передающей и регистрирующей аппаратуры. Результаты аналогичного исследования для схемы GP-A [15] оказываются здесь лишь частично применимыми. Полное решение этого вопроса является предметом исследований и тестов, результаты которых будут опубликованы позднее.

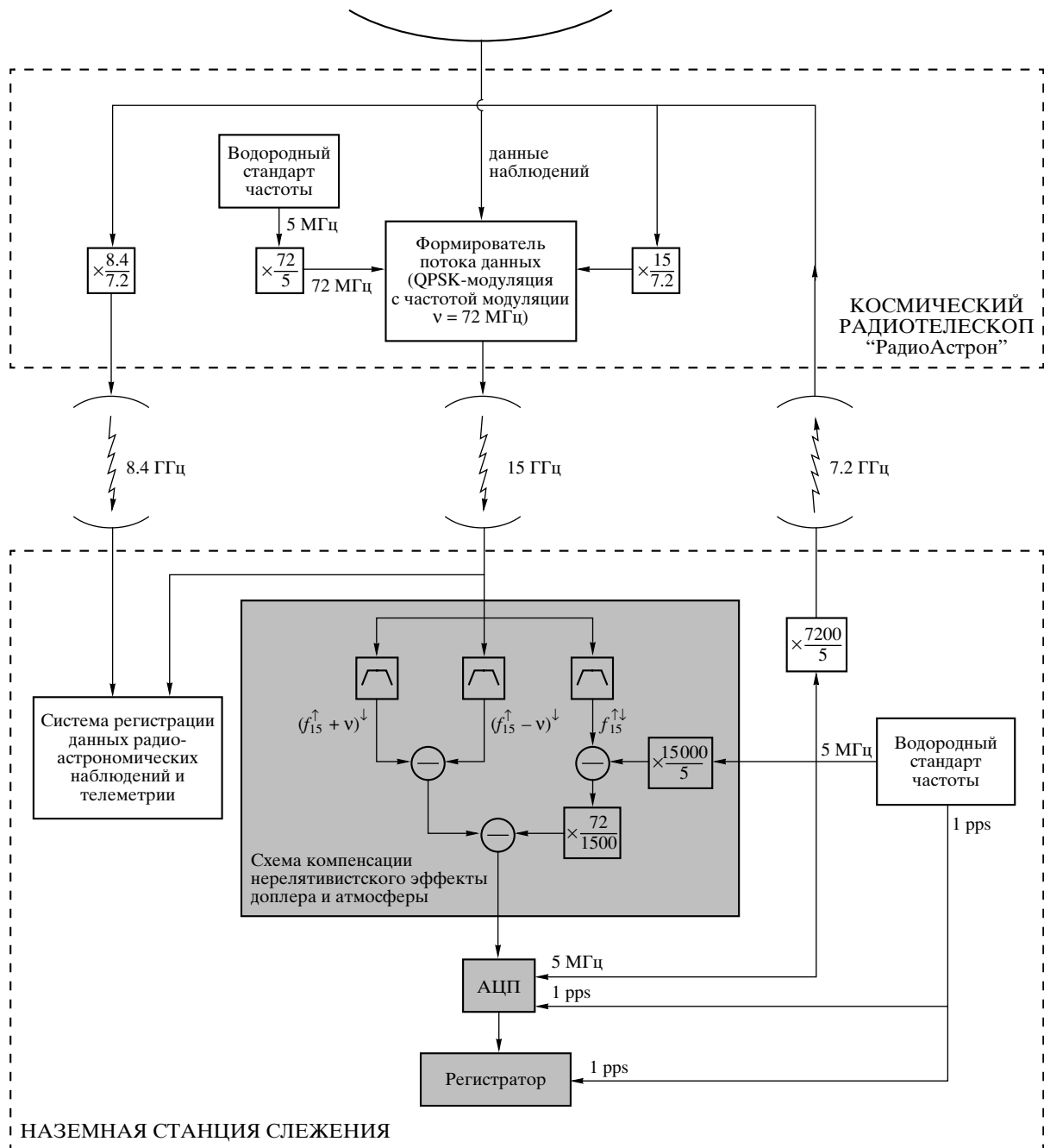


Рис. 5. Аппаратная схема компенсации нерелятивистского эффекта Доплера и тропосферы.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент по измерению эффекта гравитационного красного смещения представляет собой важную проверку основ современной физики. Достигнутая на сегодня точность проверки этого предсказания ОТО, осуществленная с помощью КРТ "РадиоАстрон", составляет  $\approx 1\%$ . Улучшение точности эксперимента возможно с помощью предложенной в статье компенсационной схемы,

для функционирования которой, однако, требуется специальный режим синхронизации бортового комплекса радиоэлектронной аппаратуры и высокоинформативного радиоканала. Во время гравитационных сеансов также требуется переключение бортового форматора в режим генерации детерминированной последовательности данных, что, с одной стороны, позволяет получить сигнал с желаемыми спектральными характеристиками, но, с другой, не позволяет совмещать гравитационные

сеансы с радиоастрономическими наблюдениями. Требуемая продолжительность гравитационных сеансов составляет  $\approx 1000$  с, т.е. порядка времени накопления, необходимого для достижения наилучшей стабильности частоты БВСЧ.

Имеется два способа реализации предложенной компенсационной схемы. Реализация в виде радиоэлектронной схемы с помощью смесителей, фильтров и синтезаторов возможна лишь на наземных станциях слежения. Другая возможность состоит в записи принимаемого с борта сигнала 15 ГГц — либо непосредственно на НСС, либо на любом наземном телескопе, оборудованном 2-см приемником и комплексом регистрирующей аппаратуры РСДБ. Последующая обработка записанного сигнала может быть выполнена программными средствами с помощью алгоритмов оптимального оценивания параметров сигналов. Выяснение преимуществ и недостатков обоих подходов является предметом дальнейших исследований авторского коллектива.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Н.С. Кардашева, А.А. Андреянова, А.С. Андрианова, М.Н. Андрианова, К.Г. Белоусова, П.А. Войцика, Б.З. Каневского, Ю.Ю. Ковалева, А.В. Коваленко, Г.Д. Копелянского, Т.А. Мизякину, Б.С. Новикова, С.В. Пилипенко, М.В. Попова, С.В. Сазанкова, А.А. Скрипкина, А.И. Смирнова, К.В. Соколовского, А.В. Чибисова и многих других сотрудников АКЦ ФИАН и ПРАО ФИАН за помощь и поддержку в работе над экспериментом.

Проект “РадиоАстрон” осуществляется Астрокосмическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и Научно-производственным объединением им. С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. Уилер, *Гравитация* (М.: Мир, 1977).
2. С. М. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1993).
3. R. V. Pound and G. A. Rebka, *Phys. Rev. Lett.* **4**, 337 (1960).
4. R. V. Pound and J. L. Snider, *Phys. Rev. B* **140**, 788 (1965).
5. R. F. C. Vessot, M. W. Levine, E. M. Mattison, E. L. Blomberg, T. E. Hoffman, G. U. Nystrom, B. F. Farrel, R. Decher, P. B. Eby, C. R. Baugher, J. W. Watts, D. L. Teuber, and F. D. Wills, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 2081 (1980).
6. M. P. Hess, L. Stringhetti, B. Hummelsberger, K. Hausner, R. Stalford, R. Nasca, L. Cacciapuoti, R. Much, S. Feltham, T. Vudali, B. Leger, F. Picard, D. Massonnet, P. Rochat, D. Goujon, W. Schaefer, P. Laurent, P. Lemonde, A. Clairon, P. Wolf, C. Salomon, I. Prochazka, U. Schreiber, and O. Montenbruck, *Acta Astron.* **69**, 929 (2011).
7. Ph. Laurent, M. Abgrall, Ch. Jentsch, P. Lemonde, G. Santarelli, A. Clairon, I. Maksimovic, S. Bize, Ch. Salomon, D. Blonde, J. F. Vega, O. Grosjean, F. Picard, M. Saccoccio, M. Chaubet, N. Ladiette, L. Guillet, I. Zenone, Ch. Delaroche, and Ch. Sirmain, *Appl. Phys. B* **84**, 683 (2006).
8. *STE-QUEST Assessment Study Report, 2013*, <http://sci.esa.int/ste-quest/53445-ste-quest-yellow-book/>.
9. N. K. Pavlis, S. A. Holmes, S. C. Kenyon, and J. K. Factor, *J. Geophys. Res. (Solid Earth)* **117**, B04406 (2012).
10. E. M. Standish, JPL Interoffice Memorandum IOM 312.F-98-048 (1998); <http://iau-comm4.jpl.nasa.gov/de405iom/de405iom.pdf>.
11. Н. С. Кардашев, В. В. Хартов, В. В. Абрамов, В. Ю. Авдеев, А. В. Алакоз, Ю. А. Александров, С. Анантакришнан, В. В. Андреянов, А. С. Андрианов, Н. М. Антонов, М. И. Артюхов, М. Ю. Архипов, В. Баан, Н. Г. Бабакин, В. Е. Бабышкин, Н. Бартель, К. Г. Белоусов, А. А. Беляев, И. И. Берулис, Б. Ф. Бёрк, А. В. Бирюков, А. Е. Бубнов, М. С. Бургин, Дж. Буска, А. А. Быкадоров, В. С. Бычкова, В. И. Васильков, К. Дж. Веллингтон, И. С. Виноградов, Р. Витфилд, П. А. Войцик, А. С. Гвамичава, И. А. Гирин, Л. И. Гурвиц, Р. Д. Дагкесаманский, Л. Д’Аддарио, Г. Джиованини, Д. Л. Джонси, П. Дьюдни, А. А. Дьяков, В. Е. Жаров, В. И. Журавлев, Г. С. Заславский, М. В. Захваткин, А. Н. Зиновьев, Ю. Илинин, А. В. Ипатов, Б. З. Каневский, И. А. Кнорин, Ж. Л. Кассе, К. И. Келлерманн, Ю. А. Ковалев, Ю. Ю. Ковалев, А. В. Коваленко, Б. Л. Коган, Р. В. Комаев, А. А. Коноваленко, Г. Д. Копелянский, Ю. А. Корнеев, В. И. Костенко, А. Н. Котик, Б. Б. Крейсман, А. Ю. Кукушкин, В. Ф. Кулишенко, Д. Купер, А. М. Кутькин, В. Х. Кэннон, М. Г. Ларионов, М. М. Лисаков, Л. Н. Литвиненко, С. Ф. Лихачев, Л. Н. Лихачева, А. П. Лобанов, С. В. Логвиненко, Г. Лэнгстон, К. Мак-Кракен, С. Ю. Медведев, М. В. Мелёхин, А. В. Мендеров, Д. В. Мерфи, Т. А. Мизякина, Ю. В. Мозговой, Н. Я. Николаев, Б. С. Новиков, И. Д. Новиков, В. В. Орешко, Ю. К. Павленко, И. Н. Пашенко, Ю. Н. Пономарев, М. В. Попов, А. Правин-Кумар, Р. А. Престон, В. Н. Пышинов, И. А. Рахимов, В. М. Рожков, Дж. Д. Ромни, П. Роша, В. А. Рудаков, А. Рэйзенен, С. В. Сазанков, Б. А. Сахаров, С. К. Семенов, В. А. Серебренников, Р. Т. Скилицци, Д. П. Скулачев, В. И. Слыш, А. И. Смирнов, Дж. Г. Смит, В. А. Согласнов, К. В. Соколовский, Л. Х. Сондаар, В. А. Степаньянц, М. С. Турыгин,

- С. Ю. Турыгин, А. Г. Тучин, С. Урпо, С. Д. Федорчук, А. М. Финкельштейн, Э. Б. Фомалонт, И. Фейеш, А. Н. Фомина, Ю. Б. Хапин, Г. С. Царевский, Дж. А. Цензус, А. А. Чуприков, М. В. Шацкая, Н. Я. Шапировская, А. И. Шейхет, А. Е. Ширшаков, А. Шмидт, Л. А. Шнырева, В. В. Шпилевский, Р. Д. Экерс, В. Е. Якимов, *Астрон. журн.* **90**, 179 (2013).
12. R. F. C. Vessot and M. W. Levine, *Gen. Relat. and Grav.* **10**, 181 (1979).
13. А. Р. Томпсон, Д. М. Моран, Д. У. Свенсон, *Интерферометрия и синтез в радиоастрономии* (М.: Физматлит, 2002).
14. A. E. Niell, *J. Geophys Res.* **101**, 3227 (1996).
15. R. F. C. Vessot and M. W. Levine, *NASA Experimental Final Redshift Report, GPA Project Report, Contract NAS 8-27969* (NASA, 1979).