

**ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО
СМЕЩЕНИЯ РАДИОЧАСТОТ ОКОЛОЗЕМНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

А.В. Белоненко, С.М. Попов, В.Н. Руденко

ГАИШ МГУ

av.belonenko@physics.msu.ru, serg@sai.msu.ru, valentin.rudenko@gmail.com

Рассматриваются прецизионные гравитационные эксперименты с помощью околоземных спутников с бортовыми стандартами частоты при доплеровском слежении за траекторией космических аппаратов. Приведены оценки величины атмосферных помех при измерении гравитационного сдвига частоты для сигналов связи спутника с наземной станцией слежения на примере миссии «Радиоастрон». Представлены алгоритмы фильтрации гравитационных эффектов на фоне шумов атмосферы.

Ключевые слова: гравитационные эксперименты, околоземные спутники, алгоритмы фильтрации, гравитационные эффекты.

**PRECISION MEASUREMENT OF GRAVITATIONAL DIS-
PLACEMENT OF RADIO FREQUENCIES OF NEAR-EARTH
SPACECRAFTS**

A.V. Belonenko, S.M. Popov, V.N. Rudenko

Sternberg Astronomical Institute of the MSU

av.belonenko@physics.msu.ru, serg@sai.msu.ru, valentin.rudenko@gmail.com

Precision gravitational experiments using near-Earth satellites with onboard frequency standards during Doppler tracking of the trajectory of spacecraft are considered. Estimates of the magnitude of atmospheric interference when measuring the gravitational frequency shift for communication signals of a satellite with a ground-based tracking station are exemplified by the Radioastron mission. Algorithms for filtering gravitational effects against atmospheric noise are presented.

Key words: gravitational experiments, near-Earth satellites, algorithms for filtering, gravitational effect.

Введение

Релятивистский эффект гравитационного смещения радиочастот на линии связи с околоземными спутниками в настоящее время привлекает внимание с позиции проверки базовых положений ОТО. В частности, это относится к одному из аспектов принципа эквивалентности (ПЭ) — позиционной инвариантности физических процессов в пространстве-времени. Этому способ-

ствует ускоренное развитие техники стандартов частоты в бортовом исполнении, особенно при переходе к оптическому диапазону частот. К последним экспериментам такого типа относится измерение «redshift» эффекта с помощью навигационных спутников системы «GALILEO» [1,2], а также с космическим аппаратом Спектр-Р миссии «Радио Астрон» [3,4]. Обработка данных «GALILEO» уже выполнена с заявкой на улучшение точности проверки формулы Эйнштейна примерно на пол-порядка относительной величины. Обработка данных «РадиоАстрон» продолжается с перспективой подтверждения этого результата. Мы обращаем внимание на то, что дальнейшее улучшение точности в этом типе экспериментов может быть достигнуто также с использованием группировки навигационных спутников ГЛОНАСС. Недавно было предложено также использование этой группировки для регистрации всплесков гравитационного излучения астрофизического происхождения [5].

Одной из серьёзных помех, с которой сталкиваются эксперименты такого типа, являются сдвиги радиочастот на линиях связи КА с НСС (наземной станцией слежения), возникающие из-за влияния атмосферы. Амплитуда и фаза сигнала могут изменяться из-за эффекта Доплера, процессов поглощения, дисперсии и вращения плоскости поляризации электромагнитного излучения, по-разному проявляющихся в различных слоях атмосферы. В результате как несущая частота, так и модуляционные компоненты сигнала, отклоняются от своего первоначального значения. Кроме того, системным и случайным образом меняется оптическая длина пути, проходимая сигналом с движущегося КА. Ниже мы анализируем методы компенсации этих воздействий на примере данных, полученных в гравитационном эксперименте с «Радио Астрон» [6,7]. Объем исследований, представленный в данной работе, включает в себя две конкретные составляющие атмосферные помехи. Это искажения, вносимые а) электрически нейтральной более низкой частью атмосферы - тропосферой и б) удалённой и ионизированной частью - ионосферой.

1. Специфика распространения радиоволн в земной атмосфере

Нестационарная ионосферная плазма есть результат ионизации молекул и атомов верхних слоёв атмосферы под действием рентгеновского и ультрафиолетового излучения Солнца. Для описания влияния ионизации на проходящие радиоволны часто используется простейшая однослойная модель ионосферы. Ключевым параметром этой модели является величина ТЕС (Total Electron Content), зависящая от вертикальной структуры ионосферы. Изменение частоты радиосигнала обуславливается как нестационарным характером самой среды (флуктуации электронной плотности), так и изменением расстояния «прямой видимости» КА из-за его движения по орбите (т.н. «ки-

нематический сдвиг»). В случае эллиптической орбиты доминирует вторая причина (она даёт сдвиг? более чем на порядок превышающий тот, который создаётся флуктуациями среды). Отметим, что кинематический сдвиг типичен также для нейтральной тропосферы, и его расчёт методически одинаков для обеих сред. Значительная разница связана, однако, с их разными дисперсионными свойствами, именно: тропосферный сдвиг не зависит от частоты электромагнитного сигнала, если она меньше 15 ГГц; ионосферный сдвиг обратно пропорционален квадрату частоты сигнала.

В неоднородной атмосфере присутствуют пространственные и временные вариации показателя преломления электромагнитных волн. Градиент показателя преломления может производить значительное увеличение пути электромагнитного луча по сравнению с его геометрической траекторией в вакууме. Это приводит к задержке электромагнитных сигналов, которую также можно делить на две части - недисперсионную и зависящую от частоты. Сам частотный сдвиг электромагнитных сигналов определяется не их задержкой, а её производной, т.е. скоростью изменения их оптического пути.

2. Оценки атмосферных сдвигов частоты для КА с эллиптической орбитой

Приведём оценки атмосферных сдвигов, используя конкретные орбитальные параметры спутника Спектр-Р, несущего одну из антенн космического радиоинтерферометра КРТ «РадиоАстрон» с бортовым водородным стандартом частоты и измерительным радиокомплексом ВИРК, осуществляющим связь с наземной антенной станции слежения НСС. Простые расчеты показывают, что относительный тропосферный сдвиг частоты радиосигнала является доминирующим, со средним значением $\sim 10^{-12}$. Максимальное относительное смещение в ионосфере достигает только $\sim 10^{-13}$, т.е. на порядок слабее. Обратим внимание на динамику ионосферного и тропосферного эффектов на фоне орбитальной траектории КА. Расчётные зависимости изменения модуля относительных ионосферных и тропосферных частотных сдвигов для несущей частоты связи 8,4 ГГц и геоцентрического расстояния спутника Спектр-Р на его орбите в период 29 сентября 2016 - 1 октября 2016 показаны на рис.1 и рис.2. Резкие колебания ионосферного смещения частоты около 20 часов 29 сентября и 16 часов 30 сентября 2016 года (а также аналогичный эффект для тропосферного сдвига) обусловлены изменением знака производной зенитного угла космического аппарата. Как видно из графиков, величина ионосферного и тропосферного сдвига максимальна в момент перигея КА, что объясняется высокой скоростью КА относительно станции слежения.

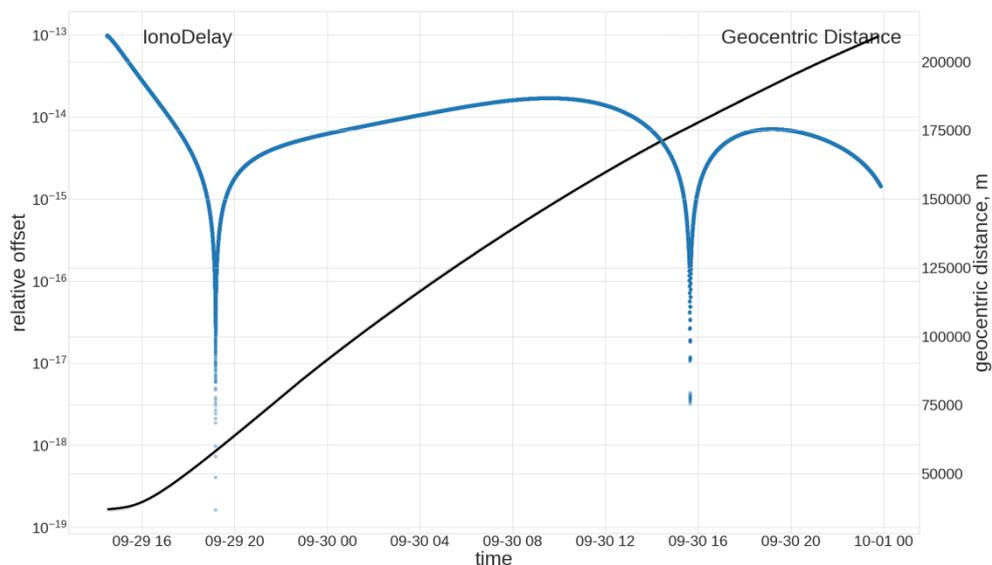


Рис. 1. Зависимость изменения модуля относительного ионосферного сдвига частоты на 8,4 ГГц и геоцентрического расстояния космического аппарата Спектр-Р от времени в течение 29 сентября 2016 г. - 1 октября 2016 г. (время записывается в формате месяц-дата-час)

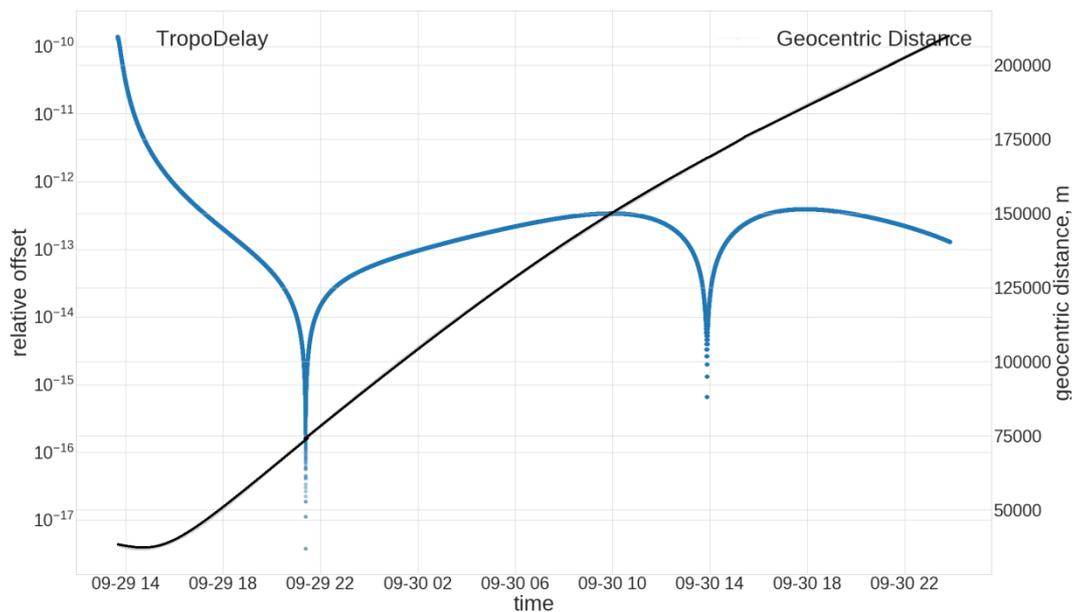


Рис. 2. Зависимость изменения модуля относительного тропосферного сдвига частоты на 8,4 ГГц и геоцентрического расстояния космического аппарата Спектр-Р от времени в течение 29 сентября 2016 г. - 1 октября 2016 г. (время записывается в формате месяц-дата час)

3. Теория ионосферного сдвига

Ионосфера представляет собой частично ионизованную плазму, концентрация заряженных частиц которой и их химический состав значительно различаются в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Полное выражение для вариации частоты радиосигнала, распространяющегося между КА и НСС есть:

$$\delta f = -\frac{f}{c} \frac{\delta R}{\delta t} - \frac{f}{c} \frac{\delta}{\delta t} \int_0^R n ds,$$

где δf - изменение частоты, n - показатель преломления, R - расстояние от космического корабля до наземной станции, f - номинальная частота связи, c - скорость света. Первый член описывает эффект Доплера. Второе слагаемое - это искомый сдвиг частоты, вызванный ионосферой.

Плотность электронов в ионосфере меняется с высотой, имея максимум на 300-500 км. В дисперсионной среде угловая частота радиоволны ω и волновое число k не пропорциональны, и показатель преломления зависит от частоты. В ионосфере в первом приближении ω и k связаны как:

$$\omega^2 = c^2 \times k^2 + \omega_p^2,$$

где введена плазменная частота:

$$\omega_p = 2 \cdot \pi f_p, f_p = 8.98 \sqrt{N_e}$$

Разница между измеренным расстоянием (оптический путь) и длиной прямой видимости «спутник – приёмник» определена формулами:

$$\Delta_{ph,f}^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e dl, \quad \Delta_{gr,f}^{iono} = \frac{40.3}{f^2} \int N_e dl,$$

где N_e - концентрация свободных электронов, $\Delta_{ph,f}^{iono}$ и $\Delta_{gr,f}^{iono}$ - фазовая и групповая рефракция, соответственно, а интеграл даёт так называемую характеристику STEC (Slant Total Electron Content). Следовательно, ионосферная рефракция, как и ТЕС, зависят от географического местоположения приёмника, времени суток и солнечной активности.

4. Расчёт ионосферного сдвига в случае двухчастотной линии связи

Как отмечено выше, в ионосфере преломление сигналов КА зависит от их частот как квадрат обратной величины. Такая зависимость позволяет компенсировать ионосферный эффект более чем на 99,9 % с помощью двухчас-

тотных измерений, что обеспечивалось каналами связи со спутником Спектр-Р на частотах 8,4 ГГц и 15 ГГц. Формула компенсации выглядит как [7]:

$$\frac{df_{iono15}}{f_{15nom}} = \frac{\frac{\delta f_{8.4}}{f_{8.4nom}} - \frac{\delta f_{15}}{f_{15nom}}}{f_{15nom}^2 \times \left(\frac{1}{f_{15nom}^2} - \frac{1}{f_{8.4nom}^2} \right)}, \quad (1)$$

где $f_{8.4nom}$ - номинальная несущая частота 8.4ГГц,
 f_{15nom} - номинальная несущая частота 15ГГц,
 $\delta f_{8.4}$ - разница между принятой частотой на 8.4 ГГц и номинальной,
 δf_{15} - разница между принятой частотой на 15 ГГц и номинальной,
 df_{iono15} - ионосферное смещение для 15ГГц.

В случае, когда имеется только одночастотный приёмник, для компенсации оценочно расчетным методом используется однослойная модель ионосферы. Зная параметры ТЕС из карт UQRG, угол места и координаты наземной станции слежения, можно рассчитать ионосферный сдвиг по формуле (2):

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{40.3}{f^2 c} \times \frac{dVTEC}{dt} \times F(E) + \frac{40.3}{f^2 c} \times VTEC \frac{dF(E)}{dt}, \quad (2)$$

где E – угол места, f – номинальная частота, $F(E)$ – картирующая функция.

Пример для сеансов связи со спутником Спектр-Р 29-30 сентября 2016 г. с НСС «Пушино» представлен на рис. 3, 4.

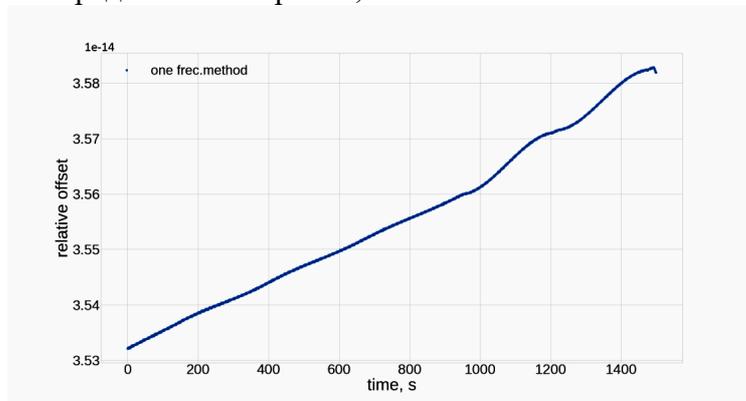


Рис. 3. Относительный ионосферный сдвиг, рассчитанный одночастотным методом для сеанса 29.09.2016 19:05-19:42

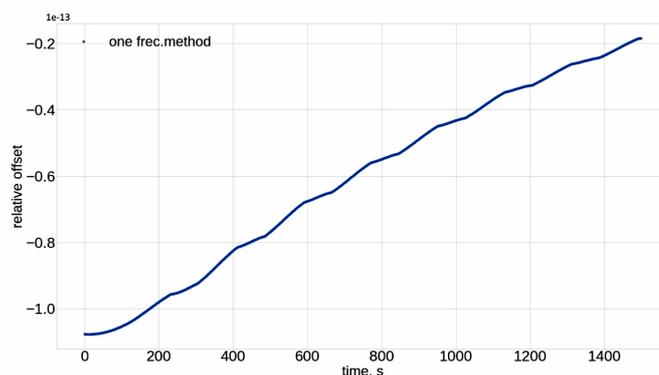


Рис. 4. Относительный ионосферный сдвиг, рассчитанный одночастотным методом для сеанса 30.09.2016 07:50-08:12

Две расчётные данные, полученные двумя методами (с использованием эффекта дисперсии и с использованием ионосферных карт в одночастотном режиме), дают схожие результаты.

5. Модель тропосферного сдвига частоты

Грубо тропосфера представляет собой смесь сухих газов, которые способствуют гидростатической задержке, и водяного пара, который даёт т.н. «влажную» задержку. «Сухая атмосфера» может быть смоделирована на основе давления и температуры с использованием законов идеального газа. Тропосферная задержка зависит от пути прохождения сигнала через нейтральные слои атмосферы, и поэтому также может быть смоделирована как функция зенитного угла спутника. Вместе с тем весьма динамичным и наиболее важным параметром является парциальное давление водяного пара. Его содержание меняется от 0 до 4 % от общего объёма воздуха и существенно зависит от географического района, времени суток и года.

Нами было проведено экспериментальное вычисление тропосферного сдвига по модели «Хопфилд» [8]. Для этого использовались сеансы КА Спектр-Р с НСС «Пушино» 29-30 сентября 2016 г. Значения параметров тропосферы брались из метеоданных на сервере webinet АКЦ ФИАН. Результаты представлены на рис 5.

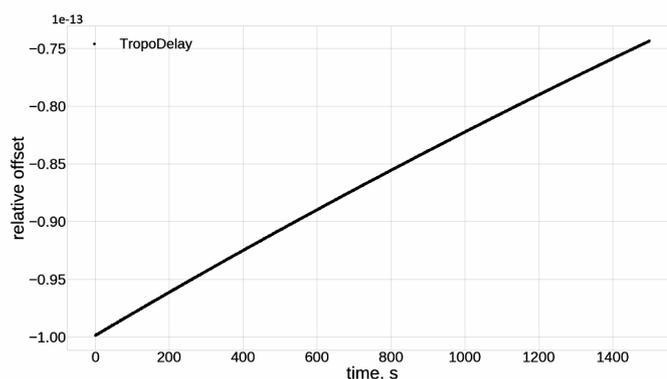


Рис. 5. Относительный тропосферный сдвиг, рассчитанный одночастотным методом для сеанса 30.09.2016 07:50-08:12

6. Обсуждение результатов

На текущий момент опубликованы только предварительные результаты измерения гравитационного «редшифт» эффекта в миссии «Радиоастрон» [9], которые не превосходят точности классического эксперимента GP-A. Они получены без использования режима т.н. двух путевой (или петлевой) связи с КА, в котором зондирующий сигнал генерируется с опорой на наземный стандарт НСС, посылается на спутник и ретранслируется обратно к НСС. В нем содержится только информация об атмосферных смещениях частоты, а гравитационный сдвиг отсутствует. Это в принципе позволяет в комбинированном режиме одно- и двух путевой связи произвести фильтрацию гравитационного сдвига «онлайн» без расчетной – компенсационной процедуры устранения атмосферных помех [4]. Ожидается, что в комбинированном режиме точность измерений GP-A будет улучшена. К сожалению, миссия «Радиоастрон» была прервана в 2019 г. вследствие выхода из строя спутника Спектр-Р. Получено только ограниченное количество накопленных сеансов связи в комбинированном режиме. Таким образом, дальнейшее уточнение «редшифт» эффекта возможно только при однопутевом режиме связи с помощью расчетной оценочно-компенсационной процедуры обработки данных, как это сделано, в частности для спутников системы ГАЛИЛЕО. Группировка навигационных спутников ГЛОНАСС также в принципе должна позволить выполнение гравитационных измерений по уточнению «редшифт» эффекта, однако для этого потребуется траекторный анализ всех 26 его компонент с целью отбора орбит с наибольшим эксцентриситетом.

7. Заключение

Авторы благодарят членов гравитационной группы АКЦ ФИАН А.В. Бирюкова, А.В. Коваленко, К.Г. Белоусова за предоставление некоторых траекторных данных по спутнику Спектр-Р и полезные обсуждения.

Литература

1. Herrmann Sven, Finke Felix, Lulf Martin, Kichakova Olga et al. Test of the Gravitational Redshift with Galileo Satellites in an Eccentric Orbit// *Phys. Rev. Lett.* 121, 231102 – Published 4 December 2018.
2. Delva P., Puchades N., Schönemann E., Dilssner F. et al. Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites// *Phys. Rev. Lett.* 121, 231101 – Published 4 December 2018.
3. Кардашев Н. С., Хартов В.В., Абрамов В.В. и др «РадиоАстрон» - телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // *Астрон. журн.* 90. 179 (2013).
4. Biriukov A.V., Kauts V.L., Kulagin V.V. et al. Gravitational redshift test with the space radio telescope “RadioAstron”// *Astronomy Reports.* 58. 2014. 783-795.
5. Пустовойт В.И., Донченко С.С., Фатеев В.Ф., Тестоедов Н.А., Косенко В.Е. Космическая лазерная интерферометрическая гравитационная антенна на основе космических аппаратов, расположенных на орбитах ГЛОНАСС / Тезисы докладов. II Научно-техническая конференция «Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии». -Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2019.
6. Litvinov D., Rudenko V. et al. Probing the gravitational redshift with an Earth-orbiting satellite// *Phys. Lett. A* 382. 2192 (2018). Special issue in memory of Professor V. B. Braginsky.
7. Rudenko V., Popov S., Belonenko A. Compensation of tropospheric and ionospheric effects in gravitational sessions of the spacecraft RadioAstron. arXiv.— Vol.1 of *Instrumentation and Methods for Astrophysics (astro-ph.IM); General Relativity and Quantum Cosmology.* — Los Alamos arXiv e-Print Los Alamos USA. 2019.
8. Hopfield H.S. Tropospheric effect on electromagnetically measured range: prediction from surface weather data// *Radio Sci.* 6. 3. 1971. 357–367.
9. Nunes N., Bartel N., Bietenholz M. et al. The gravitational redshift monitored with RadioAstron from near Earth up to 350,000 km // *Adv. Space Res.* 2020. 65 (2). 790–797.