

11.3

Измерение эффекта удвоения гравитационного смещения частоты с помощью квантового нивелира на водородных часах

© В.Ф. Фатеев, Ф.Р. Смирнов, Е.А. Рыбаков

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия

E-mail: frsmirnov@vniiftri.ru

Поступило в Редакцию 26 октября 2021 г.

В окончательной редакции 18 января 2022 г.

Принято к публикации 27 января 2022 г.

Впервые измерен эффект удвоения гравитационного смещения частоты в гравитационном поле Земли в системе стационарных и перевозимых водородных квантовых часов с нестабильностью $1 \cdot 10^{-15}$. Часы разнесены по высоте на 34 м и соединены радиоканалом на основе оптического волокна. Измеренный относительный удвоенный эффект „красного“ смещения на этой высоте составил $\Delta f_{GR}/f_{ref} = (-7.73 \pm 1.61) \cdot 10^{-15}$.

Ключевые слова: гравитационный эффект замедления времени, гравитационное смещение частоты, квантовые водородные часы.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.07.52291.19062

Известны эксперименты с квантовыми нивелирами, измеряющими разность гравитационных потенциалов между точками на поверхности Земли с помощью перевозимых водородных квантовых часов [1–3] на основе известного гравитационного эффекта замедления времени Эйнштейна [4]. В настоящей работе предлагается перейти на прямое измерение эффекта гравитационного смещения частоты.

Для измерения гравитационного смещения частоты использовался макет квантового нивелира, включающий высокостабильные стационарные и мобильные (первозимые) водородные квантовые часы. В качестве стационарных (опорных) квантовых часов (ОКЧВ) использовался активный водородный стандарт частоты и времени Ч1-1003М, расположенный в термокамере с суточными вариациями температуры не более 0.1°C . Часы размещались в оборудованном помещении на 6-м этаже технического здания и имели относительную суточную нестабильность $(0.5–0.6) \cdot 10^{-15}$.

В качестве перевозимых квантовых часов использовался активный водородный стандарт частоты и времени ПКЧ-Н производства ЗАО „Время-Ч“ с суточной нестабильностью около $1 \cdot 10^{-15}$. На 6-м этаже в непосредственной близости от ОКЧВ располагался частотный компаратор Ч7-315. Для передачи измерительного радиосигнала с частотой f_{TR}^{down} около 10 МГц на 6-й этаж от ПКЧ-Н, перемещенного на „1“-й этаж, использовалось одномодовое оптическое волокно типа SMF-28. Модуляция и демодуляция оптической несущей радиосигналом от ПКЧ-Н выполнялись соответственно с помощью блока оптического трансмиттера OTS-1RefT-10/S5-1307-E2-IC и блока оптического ресивера OTS-1RefR-10/S5-E2-IC производства фирмы Emcore. Эксперимент проводился в четыре этапа.

Этап 1 — начальная калибровка, при которой часы ПКЧ-Н располагались на 6-м этаже в непосредственной близости от стационарных ОКЧВ Ч1-1003М, а их сигналы с частотами соответственно f_{TR}^{up} и f_{ref} , значения которых лежат вблизи 10 МГц, подавались на два входа компаратора Ч7-315. Результат измерений на выходе компаратора может быть представлен формулой

$$\frac{\Delta f_1^{meas}}{f_{ref}} = \frac{f_{TR}^{up} - f_{ref}}{f_{ref}} = \frac{\Delta f^0}{f_{ref}}, \quad (1)$$

где Δf^0 — начальное техническое расхождение частот.

Количество измерений в течение 72 h составило 258 498. В результате статистической обработки измерений среднее значение измеряемого относительного начального смещения с учетом нестабильности частоты ПКЧ-Н и среднего значения нестабильности ОКЧВ составило $\Delta f_1^{meas}/f_{ref} = (-128.14 \pm 1.14) \cdot 10^{-15}$.

Этап 2 — перемещение ПКЧ-Н с 6-го этажа на „-1“-й этаж на высоту „-34 м“ на 72 h. Частоту его задающего генератора в нижнем положении часов обозначим f_{TR}^{down} . Чтобы определить, насколько изменится частота f_{TR}^{down} по отношению к f_{TR}^{up} , обратимся к соотношениям интервалов собственного времени в разных точках гравитационного поля в общей теории относительности (ОТО) [4]. Обозначим шкалу собственного времени перевозимых квантовых часов ПКЧ-Н в нижнем и верхнем положении соответственно как τ_{TR}^{down} , τ_{TR}^{up} . Далее учтем, что собственные (измеряемые) частоты задающих генераторов пары квантовых часов f_{TR}^{down} и f_{TR}^{up} соотносятся прямо пропорционально интервалам собственного времени [5]. Поэтому для неподвижных часов на основе ОТО можем

записать

$$\frac{\tau_{TR}^{up}}{\tau_{TR}^{down}} = \frac{f_{TR}^{up}}{f_{TR}^{down}} = 1 - \frac{\varphi_{TR}^{up} - \varphi_{TR}^{down}}{c^2} \approx 1 + \frac{gH}{c^2}, \quad (2)$$

где c — скорость света, $\varphi_{TR}^{up} = \mu/R_E$, $\varphi_{TR}^{down} = \mu/(R_E - H)$ — гравитационные потенциалы в верхней и нижней точках, R_E и H — радиус Земли и превышение ортометрической высоты верхних часов относительно нижних, $\mu = 3.986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ — геоцентрическая гравитационная постоянная. Центробежными потенциалами пренебрегаем. Из формулы (2) следует, что нижние часы, которые находятся в гравитационном поле Земли с большим по абсолютной величине потенциалом, замедляются. Этот эффект измерялся как на Земле (см., например, [1–3]), так и в космосе на основе наблюдения бортовых шкал времени навигационных спутников GALILEO [6,7].

Из данного соотношения следует выражение для искомого гравитационного смещения частоты задающего генератора ПКЧ-Н f_{TR}^{up} при перемещении этих часов „вниз“

$$f_{TR}^{down} \approx f_{TR}^{up} \left(1 - \frac{gH}{c^2}\right). \quad (3)$$

Таким образом, при уменьшении высоты квантовых часов над землей наблюдается „красное“ (отрицательное) гравитационное смещение частоты задающего генератора. Отсюда же следует, что при увеличении высоты это смещение имеет положительный знак („фиолетовое“ смещение). Положительный гравитационный эффект смещения частоты задающих генераторов космических квантовых часов впервые исследовал Эшби [8]. Сейчас он широко используется для повышения точности спутниковой навигации. Для компенсации „фиолетового“ смещения в значение частоты задающих генераторов бортовых спутниковых часов глобальных навигационных спутниковых систем перед их запуском заранее вносят корректирующее смещение с обратным знаком. В частности, для ГЛОНАСС относительная величина этой корректирующей поправки составляет $-4.36 \cdot 10^{-10}$ [9], для GPS эта поправка равна $-4.4647 \cdot 10^{-10}$ [8].

Этап 3 — передача радиосигнала с частотой f_{TR}^{down} через оптическое волокно с помощью модуляции-демодуляции и измерение разности частот, поступающих на входы компаратора. Частота радиосигнала на входе в волокно („внизу“) составляет $f_{FOCL}^{down} = f_{TR}^{down}$, частота на выходе волокна („вверху“) — f_{FOCL}^{up} . Соотношение собственных частот и интервалов собственного времени на концах трассы волны известно из ОТО [4]:

$$\frac{\tau_{FOCL}^{up}}{\tau_{FOCL}^{down}} = \frac{f_{FOCL}^{down}}{f_{FOCL}^{up}} = 1 - \frac{\varphi_{FOCL}^{up} - \varphi_{FOCL}^{down}}{c^2} \approx 1 + \frac{gH}{c^2}, \quad (4)$$

где использованы выражения для потенциалов из формулы (2).

Соответствующее смещение частоты электромагнитной волны вдоль трассы ее распространения „вверх“

имеет отрицательный знак (классическое „красное“ смещение):

$$f_{FOCL}^{up} \approx f_{FOCL}^{down} \left(1 - \frac{gH}{c^2}\right) = f_{TR}^{down} \left(1 - \frac{gH}{c^2}\right). \quad (5)$$

Существование эффекта „красного“ и „фиолетового“ гравитационного смещения частоты в электромагнитной волне сегодня не вызывает сомнений, его экспериментальной проверке посвящено значительное число работ (см., например, обзоры [10,11]). Из последних экспериментов следует упомянуть успешные эксперименты на основе оптических стандартов частоты с нестабильностью 10^{-17} – 10^{-18} и волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) [12,13]. Кроме того, известны предложения по использованию эффекта гравитационного смещения в электромагнитной волне в ВОЛС для измерения ортометрических высот [14–16].

Учитывая, что $\Delta f^0 \ll f_{ref}$, используя формулы (1) и (3), а также пренебрегая произведениями $\Delta f^0 \frac{2gH}{c^2}$, $f_{ref} \left(\frac{gH}{c^2}\right)^2$ в силу их малости, формулу (5) приводим к виду

$$f_{FOCL}^{up} = (f_{ref} + \Delta f^0) - f_{ref} \frac{2gH}{c^2}. \quad (6)$$

В результате измеряемая компаратором разность частот сигналов, подаваемых на оба его входа, в абсолютном и относительном выражении составит соответственно

$$\Delta f_2^{meas} = f_{FOCL}^{up} - f_{ref} = \Delta f^0 - f_{ref} \frac{2gH}{c^2},$$

$$\frac{\Delta f_2^{meas}}{f_{ref}} = \frac{f_{FOCL}^{up} - f_{ref}}{f_{ref}} = \frac{\Delta f^0}{f_{ref}} - \frac{2gH}{c^2}. \quad (7)$$

Количество измерений, накопленных на этапе 3 в течение 72 h, составило 255 030. В результате статистической обработки измерений среднее значение измеряемого относительного смещения частоты с учетом нестабильности частоты ПКЧ-Н составило $\Delta f_2^{meas}/f_{ref} = (-135.87 \pm 1.14) \cdot 10^{-15}$.

Этап 4 — вычисление „красного“ гравитационного смещения частоты Δf_{GR} по результатам измерений на этапах 1 и 3. На основе результатов измерений (1) и (7) получаем

$$\frac{\Delta f_{GR}}{f_{ref}} = \frac{\Delta f_2^{meas} - \Delta f_1^{meas}}{f_{ref}} = -\frac{2gH}{c^2}. \quad (8)$$

Результат вычислений на этапе 4 составил

$$\Delta f_{GR}/f_{ref} = (-7.73 \pm 1.61) \cdot 10^{-15}.$$

Искомая ортометрическая высота составила $H = -\frac{c^2}{2f_{ref}g} \Delta f_{GR} \approx 35.49 \pm 7.38 \text{ м}$. Высота 34 м лежит в интервале неопределенности измерений.

В целом в эксперименте впервые измерен удвоенный эффект гравитационного „красного“ смещения частоты в гравитационном поле Земли с помощью квантового

нивелира, основанного на использовании стационарных и перевозимых водородных квантовых часов, разнесенных по высоте на 34 м. Измеренная высота составила $H \approx 35.49 \pm 7.38$ м.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-29-11023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.Ф. Фатеев, В.П. Сысоев, Е.А. Рыбаков, Измерительная техника, № 4, 41 (2016). [V.F. Fateev, V.P. Sysoev, E.A. Rybakov, Meas. Tech., **59** (4), 402 (2016). DOI: 10.1007/s11018-016-0979-0].
- [2] В.Ф. Фатеев, А.И. Жариков, В.П. Сысоев, Е.А. Рыбаков, Ф.Р. Смирнов, ДАН, **472** (2), 206 (2017). DOI: 10.7868/S0869565217020189 [V.F. Fateev, A.I. Zharikov, V.P. Sysoev, E.A. Rybakov, F.R. Smirnov, Dokl. Earth Sci., **472** (1), 91 (2017). DOI: 10.1134/S1028334X17010147].
- [3] В.Ф. Фатеев, Е.А. Рыбаков, ДАН. Физика, технические науки, **496** (1), 41 (2021). DOI: 10.31857/S2686740020060097
- [4] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Теория поля* (Наука, М., 1967).
- [5] К. Одуан, Б. Гино, *Измерение времени. Основы GPS* (Техносфера, М., 2002), с. 359.
- [6] S. Herrmann, F. Finke, M. Lulf, Phys. Rev. Lett., **121** (23), 231102 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.231102
- [7] P. Delva, N. Puchades, E. Schönemann, F. Dilssner, C. Courde, S. Bertone, F. Gonzalez, A. Hees, Ch. Le Poncin-Lafitte, F. Meynadier, R. Prieto-Cerdeira, B. Sohet, J. Ventura-Traveset, P. Wolf, Phys. Rev. Lett., **121** (23), 231101 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.231101
- [8] N. Ashby, Living Rev. Relativ., **6** (1), 1 (2003). DOI: 10.12942/lrr-2003-1
- [9] *Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС*, редакция 5.1 (2008).
- [10] В.Н. Руденко, УФН, **126** (3), 361 (1978). DOI: 10.3367/UFNr.0126.197811a.0361 [V.N. Rudenko, Sov. Phys. Usp., **21** (11), 893 (1978). DOI: 10.1070/PU1978v021n11ABEH005714].
- [11] В.Г. Турышев, УФН, **179** (1), 3 (2009). DOI: 10.3367/UFNr.0179.200901a.0003 [S.G. Turyshev, Phys. Usp., **52** (1), 1 (2009). DOI: 10.3367/UFNe.0179.200901a.0003].
- [12] J. Grotti, S. Koller, S. Vogt, S. Häfner, U. Sterr, C. Lisdat, H. Denker, C. Voigt, L. Timmen, A. Rolland, F.N. Baynes, H.S. Margolis, M. Zampaolo, P. Thoumany, M. Pizzocaro, B. Rauf, F. Bregolin, A. Tampellini, P. Barbieri, M. Zucco, G.A. Costanzo, C. Clivati, F. Levi, D. Calonico, Nature Phys., **14**, 437 (2018). DOI: 10.1038/s41567-017-0042-3
- [13] M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Yahagi, K. Kokado, H. Shinkai, H. Katori, Nature Photon., **14**, 411 (2020). DOI: 10.1038/s41566-020-0619-8
- [14] J. Müller, D. Dirkk, S.M. Kopeikin, G. Lion, I. Panet, G. Petit, P.N.A.M. Visser, Space Sci. Rev., **214** (1), 5 (2018). DOI: 10.1007/s11214-017-0431-z
- [15] В.Ф. Фатеев, *Релятивистская метрология околоземного пространства-времени* (ВНИИФТРИ, Менделеево, 2017).
- [16] В.Ф. Фатеев, Альманах современной метрологии, № 3(23), 11 (2020).