

УДК 006.92

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА КВАНТОВОГО НИВЕЛИРА НА МОБИЛЬНЫХ КВАНТОВЫХ ЧАСАХ

© 2021 г. В. Ф. Фатеев¹, Е. А. Рыбаков^{1,*}

Представлено академиком РАН В.И. Пустовойтом 07.08.2020 г.

Поступило 02.09.2020 г.

После доработки 02.09.2020 г.

Принято к публикации 07.09.2020 г.

Представлены результаты первой экспериментальной проверки квантового нивелира, основанного на использовании эффекта гравитационного смещения времени и метода релятивистской синхронизации. Разность ортометрических высот измерялась между пунктом в Московской области и Нижним Новгородом на расстоянии около 480 км. Использовались мобильные высокостабильные квантовые часы с относительной нестабильностью 1×10^{-15} , что обеспечило погрешность измерения около 9.1 м.

Ключевые слова: квантовые часы, гравитационное смещение времени, гравитационный потенциал, ортометрическая высота

DOI: 10.31857/S2686740020060097

Измерение гравитационных смещений времени и частоты между стационарными и мобильными квантовыми часами может выполняться с использованием космического канала синхронизации по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS/Galileo/Beidou [1–3], а также с помощью волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) [4, 5]. В сообщении предлагается проводить измерения разности ортометрических высот с помощью квантового нивелира на мобильных квантовых часах с использованием метода релятивистской синхронизации. Метод основан на компенсации мешающих релятивистских эффектов на маршруте движения мобильных часов с помощью измерений их текущих координат и скорости по сигналам ГНСС [6]. Метод не требует специального канала синхронизации.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим измерительную схему квантового нивелира, содержащего стационарные базовые квантовые часы КЧ-1 в точке 1 на поверхности Земли и мобильные КЧ-М, которые могут перемещаться по некоторому наземному маршруту из точки 1 в точку 2. Задача состоит в измерении раз-

ности гравитационных потенциалов и ортометрических высот точек 1 и 2 с помощью мобильных КЧ. Условимся, что опорные, или базовые КЧ-1 являются хранителем собственной частоты задающего генератора f_1 и шкалы собственного (измеряемого) времени (ШВ-1) τ_1 . Мобильные КЧ-М являются хранителем собственной частоты и шкалы собственного бортового времени (ШВ-М), соответственно, f_m, τ_m . Текущее взаимное положение стационарных и мобильных наземных квантовых часов будем рассматривать из геоцентрической вращающейся земной системы отсчета ITRS. Положение базовых часов в этой системе характеризуется радиус-вектором $\mathbf{R}_1\{x_1, y_1, z_1\}$, положение мобильных часов – переменным во времени радиус-вектором $\mathbf{R}_m(\tau_1)\{x_m(\tau_1), y_m(\tau_1), z_m(\tau_1)\}$, а скорость перемещения мобильных часов относительно Земли – переменным вектором $\mathbf{V}(\tau_1)\{V_x, V_y, V_z\}$.

Измерения в квантовом нивелире выполняются в несколько этапов.

Этап 1 – калибровка нивелира, при которой по известным моделям потенциала ГПЗ определяются ускорения свободного падения (УСП) g_1, g_2 и ортометрическая высота H_1^{ort} точки 1, измеряется относительная начальная разность частот задающих генераторов КЧ-1 и КЧ-М (начальная расстройка частот) $\Delta f_0/f_0$, а также температурный коэффициент частоты КЧ-М K_T .

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия

*E-mail: rybakov@vniiftri.ru

Этап 2 – перемещение КЧ-М из точки 1 в точку 2 (путь “туда”, или \uparrow), измерение и компенсация текущего ухода шкалы ШВ-М на трассе $\Delta\tau_{\uparrow}$.

Этап 3 – стационарная стоянка КЧ-М в точке 2 с целью накопления искомого гравитационного смещения ШВ-М $\Delta\tau_{GR}$ на интервале наблюдения τ_{obs2} , а также компенсация мешающих эффектов.

Этап 4 – перемещение КЧ-М из точки 2 в точку 1 (путь “обратно”, или \downarrow), измерение и компенсация текущего ухода шкалы ШВ-М на трассе $\Delta\tau_{\downarrow}$, а также измерение накопленного гравитационного эффекта $\Delta\tau_{GR}$ путем сравнения показаний шкал времени стационарных и “путешествующих” часов, возвратившихся в точку 1.

Расхождение ШВ-1 и ШВ-М при движении “туда” и “обратно” (\uparrow, \downarrow) определяется следующими формулами [6]:

$$\Delta\tau_{\uparrow\downarrow} = \tau_{m\uparrow\downarrow} - \tau_1 = \Delta\tau_{0\uparrow\downarrow} + \Delta\tau_{T\uparrow\downarrow} + \Delta\tau_{rel\uparrow\downarrow}, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_{0\uparrow\downarrow} = \Delta\tau_{1\uparrow\downarrow}(\Delta f_0/f_0)$ – уход шкалы ШВ-М на интервале движения “туда” и “обратно” за счет начальной расстройки частоты бортового генератора; $\Delta\tau_{1\uparrow\downarrow}$ – время перемещения КЧ-М на трассе “туда” и “обратно” по ШВ-1; $\Delta\tau_{T\uparrow\downarrow} = \tau_{0\uparrow\downarrow}K_T\Delta T_{\uparrow\downarrow}$ – температурный уход за счет текущей разности температур $\Delta T_{\uparrow\downarrow}$ вдоль пути;

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{rel\uparrow\downarrow} = & \frac{1}{c^2} \left[\Phi_1 + \frac{1}{2} \Omega_0^2 (x_1^2 + y_1^2) \right] \Delta\tau_{1\uparrow\downarrow} - \\ & - \frac{1}{c^2} \int_{\Delta\tau_{1\uparrow\downarrow}} \left[\Phi_{m\uparrow\downarrow} + \frac{\Omega_0^2}{2} (x_{m\uparrow\downarrow}^2 + y_{m\uparrow\downarrow}^2) + \frac{1}{2} V_{\uparrow\downarrow}^2 \right] d\tau_{1\uparrow\downarrow} - \\ & - \frac{2\Omega_0 S_{V\uparrow\downarrow}}{c^2} \end{aligned} \quad (2)$$

есть релятивистское расхождение шкал ШВ-1 и ШВ-М на трассе; Ω_0 – угловая скорость вращения Земли; Φ_1, Φ_m – гравитационные потенциалы в точках размещения КЧ-1 и КЧ-М; последний член определяет эффект Саньяка за счет движения часов. Текущие координаты и скорость определяются с помощью навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ГНСС. Точность современных НАП обеспечивают погрешность вычисления релятивистских смещений в несколько пикосекунд [6].

На пути “туда” и “обратно”, а также по окончании движения часов определяемые формулой (1) смещения компенсируются путем введения в ШВ-М цифровых поправок, равных по величине и противоположных по знаку правой части (1): $\Delta\tau_{\uparrow\downarrow}^{kor} = -\Delta\tau_{\uparrow\downarrow}$. При этом, согласно (1), достигается условие непрерывной синхронизации в течение пути и в конце пути: $\tau_{m\uparrow\downarrow} = \tau_1$.

Во время стоянки в точке 2 накопленное расхождение шкалы КЧ-М относительно КЧ-1 на интервале наблюдения τ_{obs2} , согласно (1), составит

$$(\tau_m - \tau_1)_{obs2} = \frac{\Phi_1 - \Phi_{m2}}{c^2} \tau_{obs2} + \delta\tau_{obs2}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \delta\tau_{obs2} = & \frac{\Omega_0^2}{2c^2} [(x_1^2 + y_1^2) - (x_{m2}^2 + y_{m2}^2)] \tau_{obs2} + \\ & + \tau_{obs2} [(\Delta f_0/f_0) + K_T \Delta T_{obs}] \end{aligned}$$

есть паразитное смещение, подлежащее компенсации. Компенсирующая поправка $\delta\tau_{obs2}^{kor} = -\delta\tau_{obs2}$ рассчитывается по известным параметрам этой формулы.

После компенсации паразитных смещений шкалы времени КЧ-М на всей трассе его движения в результате сравнения шкал времени τ_m и τ_1 находим величину измеряемого гравитационного смещения шкалы “путешествующих” часов:

$$(\tau_m - \tau_1)_{GR}^{meas} = \Delta\tau_{GR}^{meas} = \frac{\Phi_1 - \Phi_{m2}}{c^2} \tau_{obs2}, \quad (4)$$

откуда находится искомая разность потенциалов $\Phi_1 - \Phi_{m2}$.

Используя известные средние значения ускорений свободного падения \bar{g}_1, \bar{g}_2 , представляя потенциалы в точках 1 и 2 через потенциал геоида Φ_G в виде $\Phi_i = \Phi_G - g_i H_i^{ort}$, где $i = 1; 2$, и вводя значение относительной нестабильности задающего генератора КЧ-М $\sigma f/f_m$, из формулы (4) находим искомую ортометрическую высоту точки 2:

$$H_2^{ort} = \frac{\bar{g}_1}{\bar{g}_2} H_1^{ort} + \frac{c^2}{\bar{g}_2} \left(\frac{\Delta\tau_{GR}^{meas}}{\tau_{obs2}} + \frac{\sigma f}{f_m} \right). \quad (5)$$

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРОВЕРКЕ КВАНТОВОГО НИВЕЛИРА

Проверка основных соотношений квантового нивелира проводилась на его макете, который создан на основе перевозимых квантовых часов водородных новых (ПКЧВ-Н) российского производства с относительной нестабильностью не хуже

$(\sigma f/f_m) = 1 \times 10^{-15}$. Новые перебазируемые квантовые часы имеют в три-четыре раза более высокую стабильность, нежели квантовые часы, используемые в предыдущих экспериментах [2, 3]. Релятивистская синхронизация на трассе перемещения часов выполнялась на основе измерений НАП ГНСС Javad Sigma. В качестве базовых часов КЧ-1 в макете использовался первичный эталон единицы времени и частоты национальной шкалы времени РФ ГЭТ 1-2018 [7] с погрешностью 0.5×10^{-15} . В процессе эксперимента тем-

Таблица 1. Сводная таблица результатов эксперимента

Составляющие смещения шкалы времени КЧ-М		Этап 2. Движение по трассе Менделеево—Н. Новгород	Этап 3. Стоянка в Н. Новгороде	Этап 4. Движение по трассе Н. Новгород — Менделеево
1	Расхождение шкал, вызванное: начальной расстройкой частоты $\Delta f_0/f_0$:	11.826	84.280	9.787
2	$\Delta\tau_0 = \tau_1(377.6 \times 10^{-15})$, нс температурным уходом частоты, $\Delta\tau_T = \tau_1 K_T \Delta T$, нс	0.0027	0.008	-0.0021
3	релятивистскими эффектами на трассе, $\Delta\tau_{rel\uparrow}; \Delta\tau_{rel\downarrow}$, нс	$\Delta\tau_{rel\uparrow} = -1.651$	—	$\Delta\tau_{rel\downarrow} = 0.822$
4	влиянием центробежного потенциала во время стоянки ПКЧ-Н в Н. Новгороде, $\Delta\tau_{obs2}^\Omega$, нс	—	-1.251	—
5	накопленным гравитационным смещением шкалы времени КЧ-М в точке 2 $\Delta\tau_{GR}^{meas}$, нс		-1.399	
Время движения/время стоянки $\tau_{1\uparrow\downarrow}$, ч		$\tau_{1\uparrow} = 8.7$	$\tau_{obs2} = 62$	$\tau_{1\downarrow} = 7.2$

пература контролировалась с помощью метеостанции Combi-Sensor DTF 1MV с погрешностью 0.3°C и чувствительностью 0.01°C.

Эксперимент проводился в соответствии с этапами, рассмотренными выше, на трассе Менделеево (Московская обл.) — Нижний Новгород длиной 480 км. Результаты приведены в табл. 1. Вычисленные мешающие смещения компенсировались с помощью корректирующих цифровых поправок на основе измерений НАП ГНСС.

Из табл. 1 следует, что накопленное в точке стояния 2 и измеренное в точке 1 гравитационное расхождение шкалы времени КЧ-М составило:

$$\Delta\tau_{GR}^{meas} = -1.399 \text{ нс.}$$

Ортометрическая высота точки 2 определялась по формуле (5). При $(\sigma f/f_m) = 1 \times 10^{-15}$ и значениях УСР $g_1 \approx g_2 \approx 9.816 \text{ м/с}^2$ [8] превышение ортометрической высоты точки 2 относительно точки 1 составило $H_2^{ort} - H_1^{ort} = -(57.4 \pm 9.1) \text{ м}$, что соответствует действительной разности высот этих точек -65 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный эксперимент подтвердил справедливость полученных релятивистских соотношений, лежащих в основе квантового нивелира на транспортируемых часах. При этом успешно использован метод релятивистской синхронизации, который основан на компенсации мешающих релятивистских эффектов в квантовых часах на трассе их движения с помощью НАП ГНСС.

Он не требует создания специальных высокоточных каналов синхронизации.

Измеренное превышение ортометрических высот разнесенных точек составило $-(57.4 \pm 9.1) \text{ м}$ при действительной разности высот -65 м.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Müller J., Dirx D., Kopeikin S.M. et al. High Performance Clocks and Gravity Field Determination // Space Sci Rev. 2018. V. 214. P. 5. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0431-z>
2. Фатеев В.Ф., Сысоев В.П., Рыбаков Е.А. Экспериментальное измерение гравитационного эффекта замедления времени с помощью перевозимых квантовых часов // Измерительная техника. 2016. № 4. С. 41–43.
3. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А., Смирнов Ф.Р и др. Об измерении разности гравитационных потенциалов Земли с помощью перевозимых квантовых часов // ДАН. 2017. Т. 472. № 2. С. 206–209.
4. Grotti J., Koller S., Vogt S. et al. Geodesy and metrology with a transportable optical clock // Nature Physics, V. 14. May 2018. P. 437–441.
5. Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N. et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks // Nature Photonics. 2020. V. 14. P. 411–415.
6. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А., Смирнов Ф.Р. Метод релятивистской синхронизации мобильных кванто-

- вых часов и его экспериментальная проверка // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 10. С. 3–11.
7. Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты. Приказ №1621 от 31.07.2018 “Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений времени и частоты (ФГУП “ВНИИФТРИ”)” <https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/38441>
8. *Pavlis N.K. et al.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B04406.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE QUANTUM LEVEL USING TRANSPORTABLE ATOMIC CLOCK

V. F. Fateev^a and E. A. Rybakov^a

^a *Federal Agency on Technical Regulation and Metrology State Scientific Center of the Russian Federation
“Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering”,
Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.I. Pustovoit

The article presents first experimental studies of “quantum level”. The operation principle of this device is based on measuring the effect of time dilation in a gravitational field using a transported quantum clock and method of relativistic synchronization. Orthometric heights difference was measured between two points, one of them was located in the Moscow region, the one of them in Nizhny Novgorod. Distance between two points was about 480 km. Russian transportable atomic clocks with relative instability 1×10^{-15} were used in the experiment. It provided 9.1 m measurement error.

Keywords: quantum level, atomic clock, gravitational time shift, gravitational potential difference, orthometric height