

УДК 531.5 + 621.317

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ
УДВОЕННОГО ГРАВИТАЦИОННОГО СМЕЩЕНИЯ
ЧАСТОТЫ В КВАНТОВОМ НИВЕЛИРЕ
НА ВОДОРОДНЫХ ЧАСАХ**

**В.Ф. Фатеев, Ю.Ф. Смирнов, С.С. Донченко,
Ф.Р. Смирнов, Е.А. Рыбаков**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
fateev@vniiftri.ru

Аннотация. Впервые измерен удвоенный эффект гравитационного смещения частоты в гравитационном поле Земли с помощью стационарных и перевозимых водородных квантовых часов, разнесённых по высоте на 34 м. Часы связаны радиоканалом на частоте около 10 МГц, реализованном путём модуляции оптической несущей в оптическом волокне. Измерения основаны на одновременном использовании и сложении двух эффектов: эффекта изменения частоты задающего генератора перевозимых квантовых часов, возникающего вследствие замедления времени в гравитационном поле, а также классического эффекта гравитационного смещения в радиоканале. Эффекты одинаковы по величине, имеют противоположные знаки и поэтому при перемещении мобильных часов по высоте складываются.

Ключевые слова: квантовый нивелир, гравитационное смещение частоты, водородный стандарт частоты.

**EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF THE DOUBLED
GRAVITATIONAL FREQUENCY SHIFT IN A QUANTUM
LEVEL ON HYDROGEN CLOCKS**

**V.F. Fateev, Y.F. Smirnov, S.S. Donchenko,
F.R. Smirnov, E.A. Rybakov**

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
fateev@vniiftri.ru

Abstract. For the first time, the doubled effect of the gravitational frequency shift in the gravitational field of the Earth was measured using stationary and transportable hydrogen quantum clocks separated by 34 m in height. The clocks were connected by a radio channel at a frequency of about 10 MHz, implemented by modulating an optical carrier in an optical fiber. The measurements are based on the simultaneous use and addition of two effects: the effect of changing the frequency of the master oscillator of the transported quantum clock, which occurs due to time dilation in the gravitational field, as well as the classical effect of gravitational frequency shift in the radio channel. The effects are the same in magnitude, have opposite signs, and therefore, when moving the mobile watch in height, they are summed up.

Keywords: quantum level, gravitational frequency shift, hydrogen frequency standard.

Введение

Известны эксперименты с квантовыми нивелирами, измеряющими разность гравитационных потенциалов и соответствующую разность ортометрических высот точек на поверхности Земли с помощью перевозимых водородных квантовых часов [1–3]. В основе этих геодезических измерений лежит известный гравитационный эффект замедления времени Эйнштейна [4]. Суть этого эффекта состоит в том, что квантовые часы, находящиеся на разном расстоянии относительно центра Земли (т.е. на разной высоте), имеют различный темп, или ход, времени. Верхние часы, расположенные в точке, где гравитационный потенциал по абсолютной величине меньше, идут быстрее, а нижние часы идут медленнее и в результате отстают от верхних. При этом отставание нижних квантовых часов тем больше, чем больше разность высот и продолжительнее интервал наблюдения (или интервал накопления гравитационного эффекта). В перечисленных выше экспериментах с макетами квантовых нивелиров на водородных квантовых часах наблюдение продолжалось от 1 до 5 суток, но для повышения точности измерений этот интервал целесообразно увеличивать до 10–15 суток. Вместе с тем увеличение интервала наблюдения снижает оперативность геодезических измерений.

В этой связи представляет практический интерес использование в квантовых нивелирах эффекта гравитационного смещения частоты, который является следствием гравитационного эффекта замедления времени, однако принципиально не требует большого времени наблюдения.

Замысел эксперимента

Для измерения гравитационного смещения частоты использовался макет квантового нивелира ФГУП «ВНИИФТРИ», включающий высокостабильные стационарные и мобильные (перевозимые) водородные квантовые часы (КЧВ). Стационарные часы размещались в оборудованном помещении на шестом этаже технического здания (рис. 1а), а мобильные часы на разных этапах эксперимента можно было размещать на шестом этаже вблизи стационарных часов, а также на минус первом этаже этого же здания в оборудованном термостатированном подвальном помещении. Измеряемая разность высот между точками установки мобильных часов составляла 34 м. Эксперименты проводились в период с апреля по июль 2021 г.

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 °С. Относительная суточная нестабильность частоты задающего генератора ОКЧВ Ч1-1003М в таких условиях составляет $(0,5–0,7) \cdot 10^{-15}$. В качестве мобильных (транспортируемых) квантовых часов использовался перевозимый активный водородный стандарт частоты и времени ПКЧ-Н производства ЗАО «Время-Ч» с суточной нестабильностью около $1 \cdot 10^{-15}$ (рис. 1б).

В помещении шестого этажа в непосредственной близости от опорных КЧВ Ч1-1003М располагался частотный компаратор Ч7-315 с вносимой нестабильностью частоты на интервале времени измерений 1 час не более $0,3 \cdot 10^{-15}$.



Рис. 1. Размещение экспериментального оборудования: а — на шестом этаже (слева — стационарные термостатированные квантовые часы Ч1-1003М, справа внизу — перевозимые часы ПКЧ-Н); б — ПКЧ-Н на минус первом этаже; в правом верхнем углу показано оптическое коммуникационное оборудование

Схема измерений представлена на рис. 2. Для измерений начальной разности частот на этапе калибровки на шестом этаже от обоих часов на компаратор подавались сигналы с частотами $f_{\text{П}}^{\text{верх}}$ и $f_{\text{О}}$, значения которых лежат вблизи 10 МГц (рис. 2а), а для передачи измерительного сигнала от ПКЧ-Н, размещённого в помещении на минус первом этаже, использовалось одномодовое оптическое волокно типа SMF-28 с рабочей длиной волны 1310 нм (рис. 2б). При этом модуляция и демодуляция оптической несущей выполнялись соответственно блоком оптического трансмиттера OTS-1RefT-10/S5-1307-E2-IC и блоком оптического ресивера OTS-1RefR-10/S5-E2-IC производства фирмы Emcore.

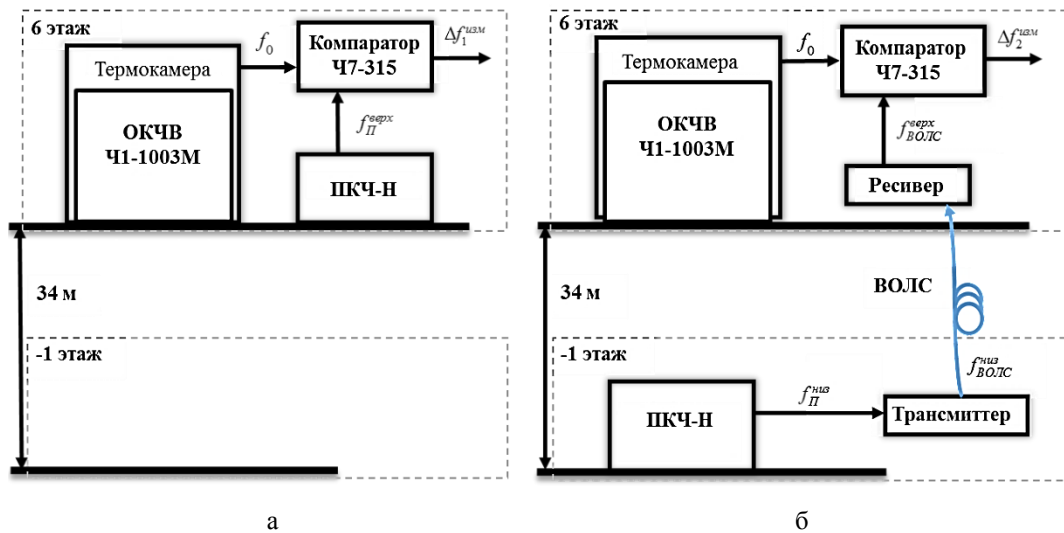


Рис. 2. Схема экспериментальных измерений гравитационного смещения частоты:
 а — с ПКЧ-Н на шестом этаже; б — с ПКЧ-Н на минус первом этаже

Исходные релятивистские соотношения

Обозначим шкалу времени нижних и верхних квантовых часов τ_1 , τ_2 соответственно. Из общей теории относительности известно [4], что для неподвижных часов соотношение между их временными шкалами (интервалами собственного, или измеряемого, времени) определяется разностью гравитационных потенциалов φ_1 , φ_2 гравитационного поля Земли (ГПЗ) в точках размещения часов и имеет вид:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = 1 - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{c^2}, \quad (1)$$

где c — скорость света; $\varphi_2 = \frac{\mu}{R_3}$; $\varphi_1 = \frac{\mu}{R_3 - H}$; R_3 , H — радиус Земли и превышение ортометрической высоты верхних часов относительно нижних соответственно (центробежными потенциалами в силу малой разности высот в планируемом эксперименте пренебрегаем).

Из этой формулы следует известный факт: при заданных выше условиях разность временных шкал $\tau_2 - \tau_1 \geq 0$, т.е. верхние квантовые часы идут быстрее нижних. И наоборот, нижние часы, которые находятся в ГПЗ с большим по абсолютной величине потенциалом, замедляются. В этом — существо и практическая значимость эффекта замедления времени Эйнштейна.

Кроме того, известно [5], что собственные (измеряемые) частоты задающих генераторов пары квантовых часов соотносятся прямо пропорционально интервалам собственного времени. Это означает, что увеличение (рост) показаний шкалы собственного времени часов сопровождается прямо пропорциональным увеличением (ростом) собственной частоты их задающего генератора:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{f_2}{f_1} = 1 - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{c^2} = 1 + \frac{gH}{c^2}, \quad (2)$$

где $g = \frac{\mu}{R_3^2}$ — среднее значение ускорения свободного падения вблизи точки измерений; $\mu = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ — геоцентрическая гравитационная постоянная.

Из этого соотношения следует выражение для разностей шкал времени и соответствующей разности частот задающих генераторов квантовых часов:

$$\frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1} = \frac{f_2 - f_1}{f_1} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{c^2} = +\frac{gH}{c^2}, \quad (3)$$

$$f_2 = f_1 + f_1 \frac{gH}{c^2} \approx f_1 + f_2 \frac{gH}{c^2} = f_1 + \Delta f_{GR}, \quad (4)$$

где гравитационное смещение частоты задающего генератора:

$$\Delta f_{GR}^{GEN} = f_2 - f_1 = +f_1 \frac{gH}{c^2} \approx +f_2 \frac{gH}{c^2}. \quad (5)$$

Отсюда следует важный вывод: при увеличении высоты квантовых часов над землёй гравитационное смещение частоты его задающего генератора растёт (имеет положительный знак), при уменьшении высоты (т.е. при перемещении вниз) имеет отрицательный знак. Этот гравитационный эффект смещения частоты спутниковых часов впервые исследовал Н. Эшби [6], и он широко используется на практике спутниковой навигации. Дело в том, что гравитационное увеличение частоты бортовых часов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) может существенно снизить их точность. Поэтому для его компенсации в значение частоты задающих генераторов бортовых спутниковых часов ГНСС перед их запуском заранее вносят корректирующее смещение с обратным знаком. В частности, для ГЛОНАСС относительная величина этой корректирующей поправки составляет $(-4,36 \cdot 10^{-10})$ [7], для GPS эта поправка равна $(-4,4647 \cdot 10^{-10})$ [6]. В настоящее время имеется ряд работ, посвящённых повышению точности определения гравитационного эффекта замедления времени в космосе, в частности на основе наблюдения бортовых шкал времени навигационных спутников GALILEO [8, 9].

Для рассмотрения гравитационного смещения частоты электромагнитной волны в гравитационном поле рассмотрим фазовый набег этой волны, проходящей через исследуемые точки 1 и 2 ГПЗ. Один и тот же фазовый набег $\Delta\Phi$, равный N периодов колебаний, представим через собственное время и собственные частоты волны в точках размещения квантовых часов 1 и 2, через которые проходит волна:

$$\Delta\Phi = 2\pi N = 2\pi f_1 d\tau_1 = 2\pi f_2 d\tau_2. \quad (6)$$

Отсюда следует соотношение для собственных частот и интервалов времени на концах трассы распространения электромагнитной волны [4]:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{f_1}{f_2} = 1 - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{c^2} = 1 + \frac{gH}{c^2}. \quad (7)$$

Оно отличается от соотношения (2) тем, что собственные (измеряемые) частоты вдоль волны связаны с интервалами собственного времени обратно пропорциональной зависимостью. Однако в основе по-прежнему лежит эффект замедления времени Эйнштейна.

Соответствующее гравитационное смещение частоты электромагнитной волны вдоль трассы её распространения, которое вычисляется по аналогии с формулами (3) и (4), имеет обратный знак:

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

Существование эффекта гравитационного смещения частоты в электромагнитной волне на сегодняшний день не вызывает сомнений, и 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 ВОЛС [12, 13]. Кроме того, известно предложение по использованию эффекта гравитационного смещения в электромагнитной волне для измерения ортометрических высот [14–16].

Таким образом, на практике существуют два независимых эффекта гравитационного смещения частоты: эффект гравитационного смещения частоты электромагнитной волны, распространяющейся между двумя точками в ГПЗ, а также эффект гравитационного смещения частоты задающего генератора квантовых часов, перемещающихся в ГПЗ между двумя этими же точками. Оба эффекта экспериментально подтверждены, равны по абсолютной величине и обратны по знаку:

$$\Delta f_{GR}^{EMV} = -\Delta f_{GR}^{GEN}. \quad (9)$$

Причём в первом эффекте при увеличении высоты, на которую распространяется волна, частота волны уменьшается ровно на ту же величину, на которую увеличивается частота задающего генератора квантовых часов на этой же высоте.

Впервые этот факт отмечен в работах одного из соавторов настоящей статьи [15, 16] и открывает возможность сложения этих двух эффектов в экспериментальной установке, представленной на рис. 2.

Этапы эксперимента и его результаты

Эксперимент проводился в три этапа.

Этап 1. Происходит начальная калибровка, при которой определяется начальное расхождение частоты перевозимых квантовых часов ПКЧ-Н относительно частоты стационарных (опорных) часов ОКЧВ. Для этого часы ПКЧ-Н располагались на шестом этаже в непосредственной близости от стационарных ОКЧВ Ч1-1003М, а сигналы с частотой около 10 МГц от обоих КЧВ подавались на два входа компаратора Ч7-315 (рис. 2а).

Исходное соотношение, связывающее частоту задающего генератора опорных часов ОКЧВ f_0 и частоту задающего генератора перебазируемых часов ПКЧ-Н при размещении их на шестом этаже (вверху) $f_{\Pi}^{\text{верх}}$, имеет вид:

$$f_{\Pi}^{\text{верх}} = f_0 + \Delta f^0, \quad (10)$$

где Δf^0 — начальное (техническое) расхождение частот. Гравитационное смещение отсутствует, поскольку оба задающих генератора находятся в одной точке ГПЗ. Измеряемой величиной на этапе 1 является начальная разность частот Δf^0 и её относительное значение:

$$\Delta f_1^{\text{изм}} = f_{\Pi}^{\text{верх}} - f_0 = \Delta f^0; \quad \frac{\Delta f_1^{\text{изм}}}{f_0} = \frac{\Delta f^0}{f_0}. \quad (11)$$

Измерения этого частотного смещения выполнялись в течение 71,8 часа. Количество измерений, вовлекаемых в обработку, составило 258 498. В результате статистической обработки измерений стандартным методом первичного анализа среднее значение измеряемого относительного начального смещения частоты ПКЧ-Н Δf^0 с учётом нестабильности частоты ПКЧ-Н составило $\frac{\Delta f^0}{f_0} = (-128,14 \pm 1,0) \cdot 10^{-15}$ (нестабильность частоты опорных часов ОКЧВ считаем пренебрежимо малой). Результаты измерений на интервале 71,8 часа представлены на рис. 3.

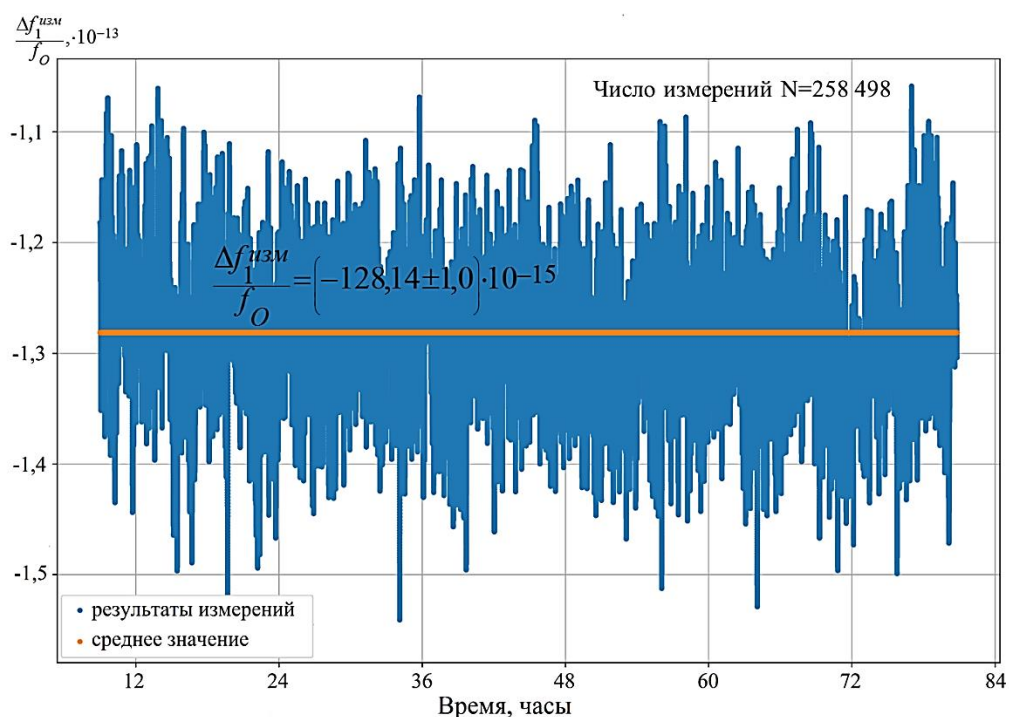


Рис. 3. Результаты измерения начальной относительной разности частот на этапе 1 в течение 71,8 ч: синий цвет — необработанные измерения; оранжевая линия — среднее значение в результате статистической обработки

Поскольку изменения температуры в помещениях шестого и минус первого этажей в течение измерений были незначительны (в пределах $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), её влияние на измерения считалось несущественным и не учитывалось.

Этап 2. На этом этапе ПКЧ-Н перемещался на минус первый этаж здания на трое суток. Его выходную частоту, которая подвергается гравитационному смещению, в нижнем положении часов обозначим $f_{\text{П}}^{\text{низ}}$ (рис. 2б). Для выполнения измерений радиосигнал от ОКЧВ с частотой f_0 подавался на первый вход компаратора Ч7-315, расположенный на шестом этаже в непосредственной близости от стационарных часов. Радиосигнал от ПКЧ-Н через трансмиттер OTS-1RefT подавался на нижний вход ВОЛС, где имел частоту $f_{\text{ВОЛС}}^{\text{низ}} = f_{\text{П}}^{\text{низ}}$. После прохождения ВОЛС и ресивера OTS-1RefR радиосигнал с изменённой частотой $f_{\text{ВОЛС}}^{\text{верх}}$ подавался на второй вход компаратора Ч7-315.

Для определения измеряемого компаратором частотного смещения двух сигналов на его входах воспользуемся приведёнными выше общими соотношениями (2)–(8).

Применительно к рассматриваемому случаю, в формуле (2) перейдём к принятым на рис. 2б следующим обозначениям:

$$f_2 \rightarrow f_{\Pi}^{\text{верх}}; f_1 \rightarrow f_{\Pi}^{\text{низ}}. \quad (12)$$

Используя эти замены, из формулы (5) имеем:

$$f_{\Pi}^{\text{низ}} = f_{\Pi}^{\text{верх}} \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right). \quad (13)$$

Как и следовало ожидать, это означает уменьшение частоты задающего генератора за счёт гравитационного эффекта замедления времени при размещении часов на нижнем этаже.

Для рассмотрения гравитационного смещения частоты при распространении волны в ВОЛС «снизу вверх» воспользуемся соотношением (8), в котором произведём замену обозначений в соответствии с рис. 2б:

$$f_2 \rightarrow f_{\text{ВОЛС}}^{\text{верх}}; f_1 \rightarrow f_{\text{ВОЛС}}^{\text{низ}} = f_{\Pi}^{\text{низ}}. \quad (14)$$

На основе этих замен из (8) следует:

$$f_{\text{ВОЛС}}^{\text{верх}} = f_{\text{ВОЛС}}^{\text{низ}} \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right) = f_{\Pi}^{\text{низ}} \left(1 - \frac{gH}{c^2} \right). \quad (15)$$

Далее, последовательно воспользовавшись формулами (13), (10), условием $\Delta f^0 \ll f_0$, а также пренебрегая произведениями $\Delta f^0 \cdot \frac{2gH}{c^2}$; $f_0 \left(\frac{gH}{c^2} \right)^2$ в силу их чрезвычайной малости, эту формулу приводим к виду:

$$f_{\text{ВОЛС}}^{\text{верх}} = (f_0 + \Delta f^0) - f_0 \frac{2gH}{c^2}. \quad (16)$$

Сравнивая выражения (10) и (16), видим, что частота волны на выходе ВОЛС $f_{\text{ВОЛС}}^{\text{верх}}$ меньше исходной частоты задающего генератора $f_{\Pi}^{\text{верх}}$, который в начале эксперимента располагался в той же точке ГПЗ на удвоенное значение гравитационного смещения в сторону уменьшения (в «красную» сторону спектра). Это ожидаемый результат.

В результате измеряемая разность частот сигналов, подаваемых на оба входа компаратора, составит:

$$\Delta f_2^{\text{изм}} = f_{\text{ВОЛС}}^{\text{верх}} - f_0 = \Delta f^0 - f_0 \frac{2gH}{c^2}; \quad \frac{\Delta f_2^{\text{изм}}}{f_0} = \frac{\Delta f^0}{f_0} - \frac{2gH}{c^2}. \quad (17)$$

Результаты измерений $\frac{\Delta f_2^{\text{изм}}}{f_0}$ на интервале 70,8 ч представлены на рис. 4.

Количество измерений, вовлекаемых в обработку на этом этапе, составило 255 030. В результате статистической обработки измерений среднее значение измеряемого относительного смещения частоты с учётом нестабильности

частоты ПКЧ-Н составило: $\frac{\Delta f_2^{\text{изм}}}{f_0} = (-135,87 \pm 1,0) \cdot 10^{-15}$.

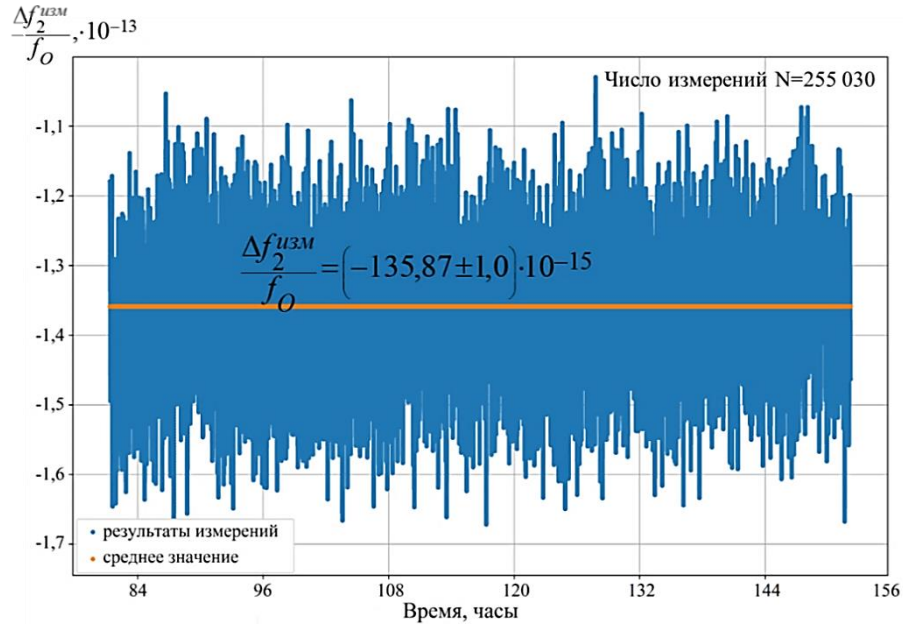


Рис. 4. Результаты измерений относительной разности частот на этапе 2: синий цвет — необработанные измерения; оранжевый цвет — среднее значение

Этап 3. Вычисление гравитационного смещения частоты по результатам измерений на этапах 1 и 2. На этом этапе по результатам измерений (11) и (17) вычисляется искомое абсолютное гравитационное смещение частоты:

$$\frac{\Delta f_{\Sigma}}{f_0} = \frac{\Delta f_2^{\text{изм}} - \Delta f_1^{\text{изм}}}{f_0} = -\frac{2gH}{c^2}. \quad (18)$$

Результат вычислений на этапе 3 составил: $\frac{\Delta f_{\Sigma}}{f_0} = (-7,73 \pm 1,41) \cdot 10^{-15}$.

Из формулы (18) следует искомая ортометрическая высота:

$$H = -\frac{c^2}{2f_0 g} \Delta f_{\Sigma}, \quad (19)$$

откуда на основе результатов определения $\frac{\Delta f_{\Sigma}}{f_0}$ находим значение высоты,

на которую разнесены квантовые часы, и погрешность её определения: $H = (35,49 \pm 6,47)$ м, что вполне согласуется с истинной высотой 34 м.

Заключение

В эксперименте впервые измерен удвоенный эффект гравитационного смещения частоты в гравитационном поле Земли с помощью квантового нивелира, основанного на использовании стационарных и перевозимых водородных квантовых часов, разнесённых по высоте на 34 м. Часы связаны радиоканалом на частоте около 10 МГц, причём канал связи реализован путём модуляции оптической несущей в оптическом волокне.

Измерения основаны на одновременном использовании и сложении двух гравитационных эффектов «красного» смещения: первый эффект состоит в уменьшении частоты задающего генератора перевозимых квантовых часов при перемещении их на меньшую высоту (вниз относительно опорных часов). Эффект возникает вследствие эффекта замедления времени в гравитационном поле (эффекта Эйнштейна). Второй эффект — классический эффект гравитационного «красного» смещения в радиоканале при распространении радиолуча вверх по направлению к опорным часам. Эффекты одинаковы по величине и в экспериментальной установке складываются.

Результаты определения разности ортометрических высот квантовых часов дали следующий результат: $H = (35,49 \pm 6,47)$ м, при этом истинная разность высот (34 м) находится внутри интервала неопределённости измерений.

Для снижения погрешности измерений необходимо использование более стабильных квантовых часов: при относительной нестабильности 10^{-16} интервал неопределённости не превышает метра.

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

Список литературы

1. 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.
2. Фатеев В.Ф., Жариков А.И., Сысоев В.П., Рыбаков Е.А., Смирнов Ф.Р. Об измерении разности гравитационных потенциалов Земли с помощью перевозимых квантовых часов // Доклады Академии наук. — 2017. — Т. 472. — № 2. — С. 206–209.
3. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А. Экспериментальная проверка квантового нивелира на мобильных квантовых часах // Доклады Академии наук. Физика, технические науки. — 2020. — Т. 495. — С. 34–37.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. — М.: Наука, 1967. — 460 с.
5. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. — М.: Техносфера, 2002.
6. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Reviews in Relativity. — 2003. — V. 6. — P. 1–42.

7. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС, редакция 5.1, 2008 // Российские космические системы: [сайт]. — URL: https://russianspace-systems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf.
8. Herrmann S., Finke F., Lulf M. et al. Test of the Gravitational Redshift with Galileo Satellites in an Eccentric Orbit // *Phys. Rev. Lett.* — 2018. — V. 121.
9. Delva P., Puchades N., Schönemann E. et al. Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites // *Physical review letters.* — 2018. — V. 121. — P. 231101.
10. Руденко В.Н. Релятивистские эксперименты в гравитационном поле // *Успехи физических наук.* — 1978. — Т. 126. — Вып. 3. — С. 361–401.
11. Турышев В.Г. Экспериментальные проверки общей теории относительности: недавние успехи и будущие направления исследований // *Успехи физических наук.* — 2009. — Т. 179. — № 1. — С. 3–34.
12. Grotti J., Koller S., Vogt S. et al. Geodesy and metrology with a transportable optical clock // *Nature Physics.* — 2018. — V. 14. — P. 437–441.
13. 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.
14. Müller J., Dirkx D., Kopeikin S.M. et al. High Performance Clocks and Gravity Field Determination // *Space Science Reviews.* — 2018. — V. 214. — P. 5.
15. Фатеев В.Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени: монография. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. — 439 с.
16. Фатеев В.Ф. Релятивистская теория и применение квантового нивелира и сети «Квантовый футшток» // *Альманах современной метрологии.* — 2020. — № 3. — С. 11–52.

Статья поступила в редакцию: 19.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 18.01.2022 г.

Статья принята в работу: 20.01.2022 г.