

УДК 006.92

НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРТОМЕТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ЭФФЕКТА ЗАМЕДЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ

В.Ф. Фатеев, Е.А. Рыбаков, В.П. Сысоев, А.И. Жариков, Ф.Р. Смирнов
ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

Представлены результаты двух наземных экспериментов по определению разности ортометрических высот стационарных эталонных атомных часов и перевозимых квантовых водородных часов на основе измерения гравитационного эффекта взаимного смещения их шкал времени. Стабильность перевозимых квантовых часов составляла $3 \cdot 10^{-15}$. Эксперименты включали начальную взаимную синхронизацию шкал времени обоих стандартов, перемещение вторых водородных часов в наземную точку с другой ортометрической высотой (с другим гравитационным потенциалом) и измерение взаимного расхождения шкал на суточном интервале с помощью синхронизации по НАП ГЛОНАСС/GPS. Стационарные часы размещались на территории ФГУП «ВНИИФТРИ», перевозимые - в двух точках: в Москве (разность высот -100 м, расстояние 46 км) и в горах Кавказа (разность высот +1804 м, расстояние 1408 км). Измеряемый гравитационный эффект в первом эксперименте составил около -1нс, погрешность измерения 0,3нс, во втором эксперименте он достигал +17 нс при погрешности измерения 0,8 нс. Это соответствует погрешностям определения разностей ортометрических высот 32 м и 85 м соответственно.

The paper presents the results of two ground-based experiments to determine the orthometric height difference between a stationary atomic clock and a transportable hydrogen atomic clock based on the measurement of the gravitational effect of their time scales dilation. The stability of the transportable atomic clock was $3 \cdot 10^{-15}$. The experiments included initial mutual synchronization of the two clocks, moving one of them to a ground point with a different orthometric height (a different gravitational potential) and measuring the time scales dilation at one-day intervals using synchronization with GLONASS/GPS receivers. The stationary clock was located at VNIIFTRI and the transportable clock was placed at two points: in Moscow (difference in height -100 m, distance 46 km) and in the Caucasus Mountains (difference in height +1804 m, distance 1408 km). The measured gravitational effect in the first experiment was about -1ns, with a measurement error of 0.3 ns, and in the second experiment it reached +17ns with a measurement error of 0.8 ns. This corresponds to the errors in the determination of orthometric heights of 32 m and 85 m, respectively.

Ключевые слова: ортометрическая высота, квантовые часы, гравитационный эффект.

Введение. Геоид и его высота над поверхностью референц-эллипсоида является одной из важнейших характеристик формы Земли. Высоту геоида можно легко определить по разности геодезической и ортометрической высот точек физической поверхности Земли. Однако прямые геодезические методы непосредственного измерения ортометрических высот неизвестны. Такая возможность открывается при измерении эффектов гравитационного смещения частоты и гравитационного замедления времени [1]. Известны успешные эксперименты по измерению гравитационного смещения частот

с помощью установок на основе эффекта Мёссбауэра [2,3], а также космические эксперименты по измерению этого эффекта между наземными и космическими водородными стандартами частоты [4,5]. Гравитационный эффект смещения шкалы времени космических атомных часов на практике успешно компенсируется в навигационных системах ГЛОНАСС и GPS путем сдвига частоты спутниковых стандартов частоты и времени [6]. Вместе с тем, измерение гравитационного эффекта смещения шкал времени пары взаимно удаленных наземных атомных часов, и как следствие, разности их ортометрических высот, пока не проводились.

Целью наших наземных экспериментов являлось измерение гравитационного эффекта расхождения шкал времени Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012 (объект «Сигнал» ФГУП «ВНИИФТРИ») и шкалы времени перевозимых водородных квантовых часов (ПКЧВ) «Сапфир» при их размещении в точках с другим гравитационным потенциалом, т.е. на другой высоте. В качестве первой точки выбрано место в Нагатинской пойме в пределах г. Москвы на берегу Москвы-реки с нормальной высотой относительно уровня моря 120 м и с расстоянием до объекта «Сигнал» 46 км. Поскольку нормальная высота размещения объекта «Сигнал» составляет 220 м, то разность высот составляет «– 100 м». Вторая точка размещалась в горах Кавказа (разность высот +1804 м, расстояние 1408 км). На уровне точности эксперимента мы допускаем равенство нормальных и ортометрических высот.

Сличение шкал времени первичного эталона ГЭТ 1-2012 и перевозимых квантовых часов осуществлялось с помощью двух навигационных приемников Dicom GTR51, работающих по спутниковой системе ГЛОНАСС/GPS. Один из них установлен на объекте «Сигнал» и связан со шкалой времени первичного эталона ГЭТ 1-2012, а второй установлен вблизи ПКЧВ и связан с его шкалой времени. Разность гравитационных набегов шкал времени обоих часов определялась на суточном интервале наблюдения.

Расчетное значение ожидаемого эффекта. Согласно [7], ожидаемый эффект релятивистского расхождения временных шкал разнесенных в пространстве перевозимых часов «М» (со шкалой τ_M) и стационарных часов «О» (со шкалой τ_0) $\Delta\tau_R = \tau_M - \tau_0$ определяется суммой трех слагаемых. Первое слагаемое $\Delta\tau_{GR}$ определяется разностью гравитационных потенциалов истинного поля Земли в точках размещения часов, второе слагаемое $\Delta\tau_\Omega$ определяется разностью центробежных потенциалов, а третье слагаемое представляет эффект Саньяка, вызванное

вращением Земли и несовпадением координат часов. Однако временной набег Саньяка для стационарных часов во времени τ_0 не изменяется, а поэтому его на суточном интервале наблюдения можно считать величиной постоянной, т.е. его приращение равно нулю. В результате имеем:

$$\Delta\tau_R = \tau_M - \tau_0 = \Delta\tau_{GR} + \Delta\tau_{\Omega}. \quad (1)$$

Первое слагаемое $\Delta\tau_{GR}$ можно вычислить через разность ортометрических высот подвижных ΔH_{ORT}^M и стационарных ΔH_{ORT}^0 часов $\Delta H_{ORT} = H_{ORT}^M - H_{ORT}^0$:

$$\Delta\tau_{GR} = \frac{\varphi_0 - \varphi_M}{c^2} \Delta\tau_0 = \frac{\Delta\varphi_M - \Delta\varphi_0}{c^2} \Delta\tau_0 \approx \frac{g \cdot \Delta\tau_0}{c^2} \Delta H_{ORT}, \quad (2)$$

где гравитационный потенциал на поверхности Земли представлен в виде:

$\varphi_k = \varphi_G - \Delta\varphi_k = \varphi_G - \int g(H) dH_{ORT}^k \approx \varphi_G - gH_{ORT}^k$ (здесь $k=0;M$); φ_G - потенциал на поверхности геоида; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - среднее значение ускорения свободного падения в регионе, где выполняется эксперимент; $\Delta\tau_0$ - интервал наблюдений, отсчитываемый по базовым часам. Для водородных часов его целесообразно устанавливать равным одним суткам. При выводе формулы (2) учтено, что гравитационный потенциал на поверхности геоида в любой его точке одинаков.

Центробежная составляющая $\Delta\tau_{\Omega}$ определяется соотношением:

$$\Delta\tau_{\Omega} = \frac{\Omega^2}{2c^2} [(x_0^2 + y_0^2) - (x_{П1}^2 + y_{П1}^2)] \Delta\tau_0, \quad (3)$$

где Ω - угловая скорость Земли.

Значение центробежного смещения (3) вычисляется при следующих значениях координат базовых и перевозимых часов:

- для базовых часов: $x_0 = 2,8455 \cdot 10^6 \text{ м}$; $y_0 = 2,1609 \cdot 10^6 \text{ м}$;

- для перевозимых часов в точке 1: $x_{П1} = 2,8528 \cdot 10^6 \text{ м}$; $y_{П1} = 2,2018 \cdot 10^6 \text{ м}$;

- для перевозимых часов в точке 2: $x_{П2} = 2,8455 \cdot 10^6 \text{ м}$; $y_{П2} = 2,8455 \cdot 10^6 \text{ м}$.

При разности ортометрических высот между ГЭТ 1-1012 и Нагатинской поймой «-100,6 м», расстоянии между двумя объектами около 46 км и интервале измерения около суток (86400 с), ожидаемое релятивистское смещение шкал времени за счет влияния гравитационного поля Земли составляет -0,95 нс, а ожидаемое значение эффекта центробежного поля сил составляет -0,56 нс. Знак минус обозначает, что перевозимые часы, находящиеся в точке с меньшей ортометрической высотой, отстают (они находятся в точке, где гравитационный потенциал

больше).

При размещении перевозимых часов на Кавказе (разность высот +1804 м) ожидаемые смещения шкал времени за счет гравитационного поля Земли и центробежного потенциала составили соответственно: +16,97 нс (на высоте потенциал меньше) и -21,94 нс.

Суммарное расхождение двух шкал времени на суточном интервале $\Delta\tau_0$ с учетом собственных уходов шкалы ПКЧВ и релятивистского смещения (1) складывается из следующих составляющих:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_{GR} + \Delta\tau_{\Omega} + \Delta\tau_{C1} + \Delta\tau_T + \Delta\tau_{C2} + \sigma(\tau), \quad (4)$$

где $\Delta\tau_{C1} = C_1\Delta\tau_0$ - собственный ход шкалы времени ПКЧВ $C_1 = \Delta f / f_0$ за счет начальной относительной разности частот стандартов Δf по отношению к эталонной частоте f_0 ; $\Delta\tau_T = K_T \int_{\Delta\tau} \Delta T d\tau_0$ - температурное

расхождение шкал, которое рассчитывается через температурный коэффициент частоты K_T и разность температур ΔT в точках размещения часов; $\Delta\tau_{C2} = C_2\Delta\tau_0^2$ - смещение, вызванное нестабильностью частоты задающего генератора ПКЧВ; $\sigma(\tau)$ - среднеквадратическая ошибка измерений (СКО). Из этой формулы по результатам измерений $\Delta\tau$ и расчетным значениям $\Delta\tau_{C1}, \Delta\tau_T, \sigma(\tau)$ определяется искомый гравитационный эффект $\Delta\tau_{GR}$, а по формуле (1) - искомая разность ортометрических высот.

Подготовка экспериментов. В экспериментах использовалось следующее оборудование (рис. 1):

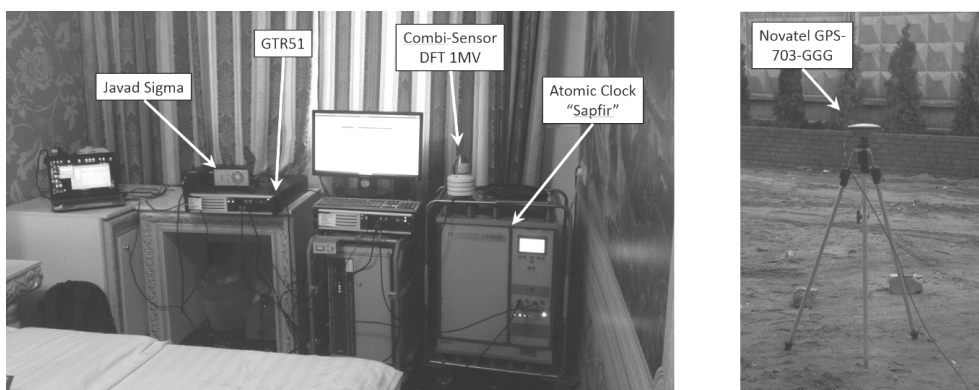


Рис. 1. Экспериментальное оборудование

- 1) стандарт частоты и времени водородный активного типа «Сапфир» с нестабильностью $(3-4) \cdot 10^{-15}$ за 3600 с;
- 2) два навигационных приемника GTR51 с антенной Novatel GPS-703-GGG с погрешностью определения расхождения шкал времени 0.3 нс;
- 3) навигационный приемник JAVAD Sigma с точностью определения 1 см по горизонтали и 1.5 см по вертикали в относительном режиме;
- 4) метеостанция Combi-Sensor DTF 1MV: измеряемый диапазон температур от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$, разрешение 0.025°C , точность $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

Перед началом измерений была произведена калибровка: определен собственный ход ПКЧВ относительно ГЭТ 1-2012 и температурный коэффициент частоты (ТКЧ) ПКЧВ.

Собственный ход частоты ПКЧВ относительно ГЭТ 1-2012 определялся следующим образом: ПКЧВ «Сапфир» размещались в непосредственной близости от первичного эталона времени и частоты, на одной высоте в термостабилизированном помещении. Расхождение частот определялось с помощью частотного компаратора VCN-314 в течение 3 суток непосредственно перед началом экспериментов.

Определение температурного коэффициента частоты производилось на вторичном эталоне, выполненном на основе СЧВ Ч1-1003М. Начальное расхождение частоты ПКЧВ устанавливалось с помощью частотного компаратора VCN-314 относительно вторичного эталона. Затем ПКЧВ перемещался в другое помещение на такой же высоте на 1 сутки. С помощью метеостанции Combi-Sensor DTF 1MV велась запись текущей температуры в течение всего интервала наблюдения. После суточного интервала измерений ПКЧВ возвращался в первоначальное помещение, где с помощью того же частотного компаратора производилось измерение расхождения частот. При средней разности температур в двух помещениях определялся ТКЧ для ПКЧВ «Сапфир».

Результаты первого эксперимента. В месте измерений, расположенном в Нагатинской пойме устанавливались часы «Сапфир», навигационный приемник GTR51 с антенной Novatel GPS-703-GGG. По методике, описанной выше, перед началом эксперимента были определены собственный ход ПКЧВ относительно ГЭТ 1-2012, который составил $\Delta f/f = -2,85 \cdot 10^{-13}$ и температурный коэффициент частоты, который составил $-3,57 \cdot 10^{-15}$ на градус.

Перед началом процесса сличения шкал времени базовых и перевозимых часов с помощью приемника Javad Sigma были определены координаты точки размещения ПКЧВ. Для определения координат антенны использовались данные измерений со станции IGS (mdvj). Контроль температуры на объекте «Нагатинская пойма» осуществлялся непрерывно в *Альманах современной метрологии, 2016, №7*

течение всего эксперимента метеостанцией Combi-Sensor DTF 1MV.

Продолжительность измерений в течение эксперимента составила 5 суток (с 05:10 25.04.2015 г. по 02:58 30.04.2015 г.). Накопленный массив измерений содержал 436 измерений для каждого приемника.

Для обработки был выбран участок продолжительностью около суток, на котором колебания температуры в помещении были минимальными (рис. 2). Время измерения составило 86160 с. За этот интервал произошло суммарное рассогласование шкал времени ГЭТ 1-1012 и ПКЧ «Сапфир» на $\Delta\tau = -27,63$ нс.

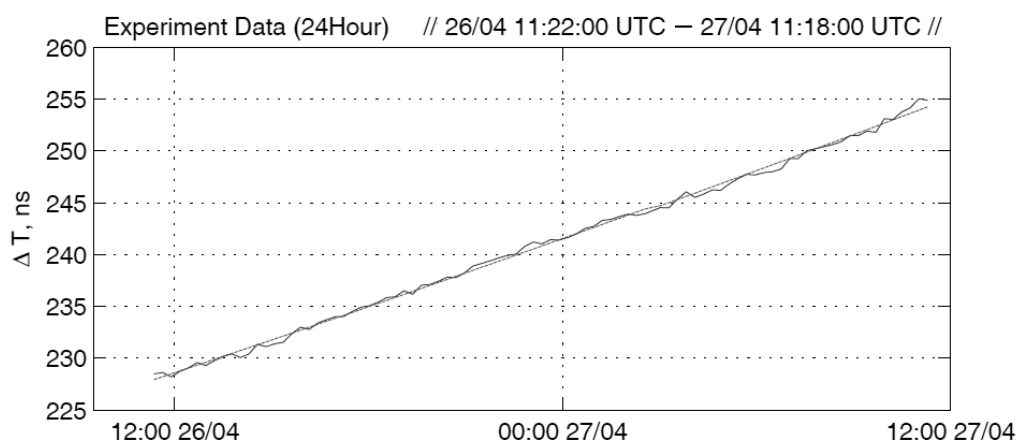


Рис. 2. Результаты измерений в Нагатинской пойме

Средняя температура за время наблюдения была измерена метеостанцией и составила $25,88^{\circ}\text{C}$. При измеренном ранее температурном коэффициенте частоты расхождение шкал за счет температуры составило $\Delta\tau_T = -1,81$ нс. Расхождение шкал за счет собственного хода на интервале измерения составило $\Delta\tau_{\Delta f} = -24,55$ нс.

Случайная ошибка измерений расхождения шкал времени двух разнесенных часов определялась по всему ансамблю измерений в течение всего эксперимента на основе программного продукта MATLAB R2013b. Всего в обработку при этом было включено 90 измерений. В результате обработки всего массива измерений среднеквадратическая ошибка измерений составила $\sigma_{\Delta\tau} = 0,3$ нс.

На основе полученных данных из формулы (4) получено искомое значение гравитационного эффекта: $\Delta\tau_{GR} = -0,71 \pm 0,3$ нс при расчетном значении $-0,95$ нс. Это соответствует разности ортометрических высот 75 ± 32 м.

Результаты второго эксперимента. В месте наблюдения, расположе-

Альманах современной метрологии, 2016, №7

нном на Кавказе, устанавливались часы «Сапфир», навигационный приемник GTR51 с антенной Novatel GPS-703-GGG. Согласно методике калибровки, описанной выше собственный ход ПКЧВ относительно ГЭТ 1-2012 составлял $\Delta f/f = -7,83 \cdot 10^{-14}$, а температурный коэффициент составлял $-4,5 \cdot 10^{-15}$ на градус. Перед началом процесса сличения шкал времени базовых и перевозимых часов через систему ГЛОНАСС/GPS с помощью приемника Javad Sigma были определены координаты точки размещения квантовых часов. Контроль температуры в месте наблюдения на Кавказе осуществлялся непрерывно в течение всего эксперимента метеостанцией Combi-Sensor DTF 1MV.

Продолжительность измерений в течение эксперимента составила порядка 5 суток (с 11:30 11.09.2015 г. по 06:38 16.09.2015 г.). Накопленный массив измерений содержал 427 измерений для каждого приемника.

Для обработки был выбран участок продолжительностью около суток, на котором колебания температуры в помещении были минимальными (рис. 3). Время измерения: 86160 с. За этот интервал произошло суммарное рассогласование шкал времени ГЭТ 1-1012 и часов «Сапфир» на $\Delta\tau = -12,98$ нс.

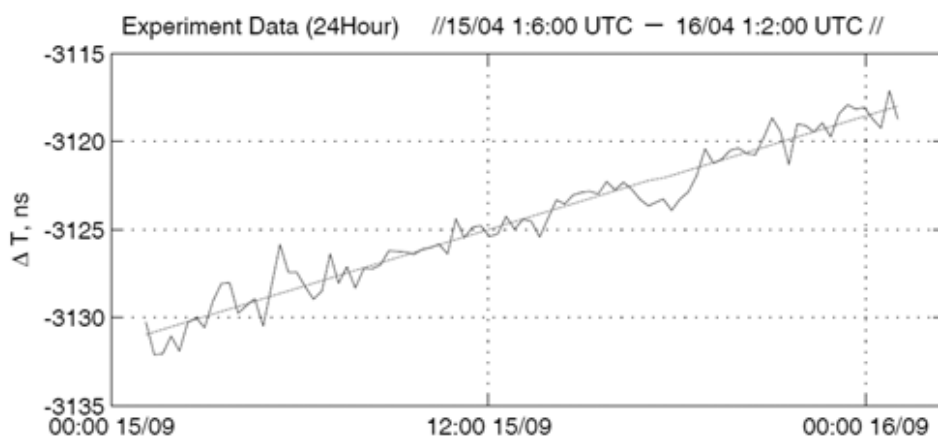


Рис. 3. Суточные измерения в месте наблюдений на Кавказе

Средняя температура за время наблюдения была измерена метеостанцией и составила 24,51°C. При измеренном ранее температурном коэффициенте частоты, расхождение шкал за счет температуры составило $\Delta\tau_T = -1,75$ нс. Расхождение шкал за счет собственного хода на суточном интервале измерения составило $\Delta\tau_{\Delta f} = -6,74$ нс.

Случайная ошибка измерений расхождения шкал времени двух разнесенных часов определялась по всему ансамблю измерений в течение всего эксперимента на основе программного продукта MATLAB R2013b.

Всего в обработку при этом было включено 90 измерений. В результате обработки всего массива измерений среднеквадратическая ошибка измерений составила $\sigma_{\Delta\tau} = 0,8$ нс.

На основе полученных данных из формулы (4) получено искомое значение гравитационного эффекта: $\Delta\tau_{GR} = +17,45 \pm 0,8$ нс при расчетном значении $+16,97$ нс. Это соответствует разности ортометрических высот 1855 ± 85 м.

Заключение

Гравитационный эффект замедления времени может быть использован в геодезии для измерения разности ортометрических высот, что весьма важно для определения высоты геоида и создания единой высотной основы в горах, на удаленных островах, в Арктике и т.д. Эксперименты показали, что современные перевозимые водородные квантовые часы типа «Сапфир» с нестабильностью $(3-4) \cdot 10^{-15}$ позволяют измерить гравитационный эффект с погрешностью 0,3 нс на коротких базах и 0,8 нс на длинных, что эквивалентно определению ортометрической высоты с точностью 32 м и 85 м соответственно.

Для повышения точности измерений необходимо использование перевозимых квантовых часов с более высокой стабильностью задающего генератора. Так, при использовании перевозимых стандартов частоты и времени с относительной нестабильности частоты 10^{-16} ожидаемое разрешение по высоте составляет около 1 м, при нестабильности частоты 10^{-17} – примерно 10 см.

Литература

1. Petit G. Future of interactions between time and frequency metrology and geodesy, 26th IUGG General assembly 2015, Prague.
2. Pound R.V., Snider J.R. Effect of gravity on gamma radiation // Physical Review, 1965, v. 140B, p. 788.
3. Katila T., Riski K.J. Measurement of the interaction between electromagnetic radiation and gravitation field using Zn^{67} Mossbauer spectroscopy // Physical Review Letters, 1981, v. 83A, p. 51-54.
4. Vessot R.F.C., Levine M.W., Mattison E.M. et al. Test of relativistic gravitation with space-borne hydrogen maser // Physical Review Letters, 1980, v. 45, p. 2081-2084.
5. Biriukov A. V., Kauts V.L., Kulagi V.V., Litvino D.A., Rudenko V. N.. Gravitational Redshift Test with the Space Radio Telescope "RadioAstron" // Astronomy Reports, 2014, v. 58. №. 11, p. 783–795.
6. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Reviews in Relativity, 2003, v. 6, s. 1-42.
7. Fateev V.F., Sysoev V.P. Relativistic Effects on Moving Clocks // Measurement Techniques, November 2014, v. 57, Issue 8, pp 891-897.