

11

Эксперимент по повышению точности передачи шкалы времени на основе метода релятивистской синхронизации

© В.Ф. Фатеев, Ю.Ф. Смирнов, А.И. Жариков, Е.А. Рыбаков, Ф.Р. Смирнов[¶]

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

[¶] E-mail: frsmirnov@vniiftri.ru

Поступило в Редакцию 21 августа 2020 г.

В окончательной редакции 25 сентября 2020 г.

Принято к публикации 26 сентября 2020 г.

Приведены результаты эксперимента по передаче шкалы времени удаленному потребителю с применением метода релятивистской синхронизации. Передача шкалы времени выполнена при помощи перевозимых квантовых часов на автомобильном шасси по дорогам федерального значения на расстояние свыше 5 тысяч километров. Полученные результаты подтверждены независимым методом сравнений шкал времени по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. Погрешность метода релятивистской синхронизации не превышает 150 ps, что существенно лучше, чем при использовании других методов.

Ключевые слова: релятивистская синхронизация, перевозимые квантовые часы, релятивистские эффекты, шкала времени.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.01.50457.18526

Перевозимые квантовые часы (ПКЧ) являются одним из наиболее точных средств передачи шкал времени (ШВ) удаленным потребителям. Для повышения точности передачи ШВ с уровнем нестабильности 10^{-15} и выше необходима высокоточная компенсация релятивистских уходов шкалы времени ПКЧ на трассе движения [1–4]. Метод релятивистской синхронизации основан на непрерывном вычислении и компенсации указанных эффектов вдоль трассы движения путем измерения координат и скорости движения ПКЧ с помощью приемников ГЛОНАСС/GPS. Он предложен в работе [5] и испытан в реальном эксперименте [6].

Экспериментальная передача ШВ от Государственного первичного эталона единиц времени и частоты ГЭТ 1-2018 (Менделеево, Московская обл.) осуществлена ФГУП „ВНИИФТРИ“ Государственному вторичному эталону единиц времени и частоты ВЭТ 1-5 Восточно-Сибирского филиала ФГУП „ВНИИФТРИ“ (Иркутск) с помощью водородных ПКЧ с относительной нестабильностью $1 \cdot 10^{-15}$. Цель эксперимента заключалась в повышении точности передачи ШВ на основе использования метода релятивистской синхронизации.

Шкалы времени эталонов τ_1 (UTC(SU), Менделеево, квантовые часы КЧ1) и τ_2 (UTC(Im), Иркутск, квантовые часы КЧ2) сравнивались со шкалой времени ПКЧ τ_m методом прямых измерений, проводимых в местах их размещения. Транспортировка ПКЧ от ФГУП „ВНИИФТРИ“ до Восточно-Сибирского филиала осуществлялась передвижной платформой на базе серийного автомобиля, оборудованного средствами автономного энергоснабжения и поддержания температурно-влажностного режима. На всем протяжении маршрута движения координаты и скорость измерялись штатным приемником сигналов ГНСС JAVAD Sigma G3T из состава

передвижной платформы. Текущая температура в зоне размещения ПКЧ на маршруте контролировалась термогигрометром ИВА-6А-КП-Д с погрешностью 0.3°C , магнитное поле — с помощью измерителя геомагнитных полей ПЗ-81-01 с погрешностью 0.1 A/m .

Эксперимент проводился поэтапно.

Этап 1 — начальная калибровка, при которой шкалы τ_1 (UTC(SU)) и τ_m ПКЧ были синхронизированы с погрешностью 50 ps. Относительная начальная расстройка частоты ПКЧ относительно частоты базового эталона составила $\Delta f_0/f_0 = (22.510 \pm 0.005) \cdot 10^{-15}$. Температурный коэффициент частоты, который определялся с помощью мобильной термостатированной лаборатории, размещаемой вблизи эталона ГЭТ 1-2018, составил $K_T = (0.430 \pm 0.005) \cdot 10^{-15} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Магнитный коэффициент частоты, измеренный с помощью катушек Гельмгольца с изменением внешнего поля на $\pm 1 \text{ Oe}$, составил $K_M = (0.40 \pm 0.05) \cdot 10^{-15} \text{ Oe}^{-1}$.

Этап 2 — движение ПКЧ по маршруту Менделеево (Московская обл.)–Иркутск с суммарным интервалом времени транспортировки шкалы до момента сравнения шкал $\Delta\tau = 114.3 \text{ h}$. Маршрут движения длиной 5384.5 km пролегал по дорогам федерального значения, профиль высоты изменялся от +40 до +592 m, скорость движения не превышала 43 m/s.

В конце маршрута движения вычислены составляющие смещения шкалы ПКЧ $\tau_m = T_{\text{PQC}}$ относительно τ_1 : смещение, вызванное начальной расстройкой частоты $\Delta\tau_0 = \Delta\tau \Delta f_0/f_0 = 9.258 \pm 0.002 \text{ ns}$; смещение вследствие температурного ухода частоты $\Delta\tau_T = \int_0^{\Delta\tau} K_T T(\tau) d\tau = 0.124 \pm 0.002 \text{ ns}$; смещение, вы-

званное изменением напряженности магнитного поля на трассе, $\Delta\tau_M = \int_0^{\Delta\tau} K_M T(\tau) d\tau = 0.165 \pm 0.021$ ns.

Релятивистское смещение шкалы τ_m ПКЧ относительно шкалы базовых часов τ_1 на трассе движения $\Delta\tau_{rel}$ вычислялось по формуле [5]:

$$\Delta\tau_{rel} = \frac{1}{c^2} \left[\varphi_1 + \frac{1}{2} \Omega_0^2 (x_1^2 + y_1^2) \right] \Delta\tau - \frac{1}{c^2} \int_0^{\Delta\tau} \left[\varphi_m + \frac{1}{2} \Omega_0^2 (x_m^2 + y_m^2) + \frac{1}{2} V^2 \right] d\tau - \frac{2\Omega_0 S_{\nabla}}{c^2}, \quad (1)$$

где Ω_0 — угловая скорость вращения Земли; $\varphi_1, \varphi_m(\tau_1)$ — гравитационные потенциалы в точках размещения КЧ1 и движущихся ПКЧ; x_1, y_1 — координаты базовых КЧ1; $x_m(\tau_1), y_m(\tau_1), V(\tau_1)$ — текущие координаты и скорость ПКЧ вдоль трассы; последний член определяет эффект Саньяка за счет движения часов вдоль трассы, причем

$$S_{\nabla} = \frac{1}{2} \int_{\tau_1}^{\tau_2} [x_m(\tau_1) V_y(\tau_1) - y_m(\tau_1) V_x(\tau_1)] d\tau_1.$$

Гравитационные потенциалы в точках размещения базовых φ_1 и мобильных часов φ_m определялись по модели потенциала гравитационного поля Земли EIGEN-6C4 [7] в виде суммы: $\varphi_i = \varphi_i^n + \varphi_i^{an}$ ($i = 1; m$), где

$$\varphi_i^n = (\mu/\rho_i) [1 - J_2(R_e/\rho_i) P_2(\sin \psi_i)] \quad (2)$$

— нормальная составляющая потенциала, определяемая нулевой и второй зональной гармоникой разложения потенциала с коэффициентом $J_2 = 1.0826 \cdot 10^{-3}$; $P_2(\sin \psi_i) = \frac{3}{2} \sin^2 \psi_i - \frac{1}{2}$ — полином Лежандра; ψ_i — геоцентрическая широта точки размещения часов; $\mu = 3.986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ — геоцентрическая гравитационная постоянная; $\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$ — геоцентрическое расстояние точки размещения часов; $R_e = 6.378 \cdot 10^6 \text{ м}$ — экваториальный радиус Земли;

$$\varphi_i^{an} = \frac{\mu}{\rho_i} \left[- \sum_{n=3}^{\infty} J_n \left(\frac{R_e}{\rho_i} \right)^n P_n(\sin \psi_i) + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left(\frac{R_e}{\rho_i} \right)^n \times (C_{nm} \cos(m\lambda_i) + S_{nm} \sin(m\lambda_i)) P_{nm}(\sin \psi_i) \right] \quad (3)$$

— аномальная составляющая потенциала, включающая зональные гармоники J_n начиная с третьей, а также секториальные и тессеральные гармоники разложения потенциала по сферическим функциям с коэффициентами C_{nm}, S_{nm} ; $P_{nm}(\sin \psi)$ — присоединенные полиномы Лежандра; λ — долгота рассматриваемой точки.

Расчет составляющих релятивистского смещения (1) проводился на основе массива данных объемом 58 969 записей текущих координат и текущей скорости ПКЧ, снимаемых с НАП ГНСС с частотой 1 раз в 5 с, кроме

случаев срыва наблюдений за спутниками, когда интервал между соседними эпохами увеличивался от 10 до 40 с. Погрешность измерения координат составляла 2 м, скорости — $5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$. При расчете учитывались гармоники потенциала не выше 13-й, поскольку их коэффициенты имеют порядок 10^{-6} и менее. Погрешности вычисления составляющих формулы (1) для интервала движения $\Delta\tau = 114.3 \text{ h}$ определялись по формулам, приведенным в работе авторов [5]. В результате получено

$$\Delta\tau_{mov} = -\frac{1}{c^2} \int_0^{\Delta\tau} \varphi_m d\tau = -286 541.0453 \pm 0.1318 \text{ ns};$$

$$\Delta\tau_V = -\frac{1}{2c^2} \int_0^{\Delta\tau} V^2 d\tau = -0.7538 \pm 0.003 \text{ ns};$$

$$\Delta\tau_{\Omega^2} = -\frac{\Omega_0^2}{2c^2} \int_0^{\Delta\tau} (x_m^2 + y_m^2) d\tau = -1 065 307.8913 \pm 0.0002 \text{ ns};$$

$$\Delta\tau_S = -\frac{2\Omega_0 S_{\nabla}}{c^2} = \frac{\Omega_0}{c^2} \int_{\tau_1}^{\tau_2} [(x_m(\tau_1) V_y(\tau_1) - y_m(\tau_1) V_x(\tau_1))] d\tau_1 = -11.8941 \pm 0.0031 \text{ ns}.$$

Первый член формулы (1) составляет

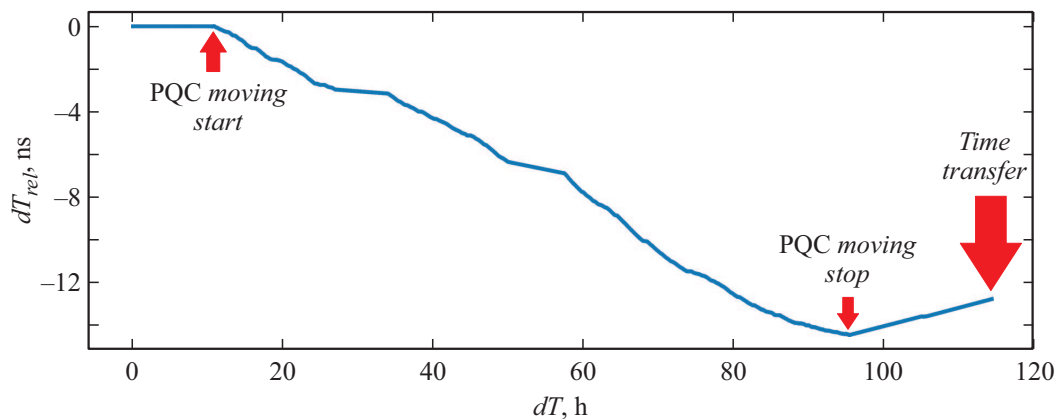
$$\Delta\tau_1 = \frac{1}{c^2} \left[\varphi_1 + \frac{1}{2} \Omega_0^2 (x_1^2 + y_1^2) \right] \Delta\tau = 1 351 848.8199 \text{ ns}.$$

Погрешность вычисления этой составляющей ввиду очень высокой точности знания координат базовых часов пренебрежимо мала (единицы пикосекунд).

Вычисленное в конце пути суммарное релятивистское смещение составило (см. рисунок):

$$\Delta\tau_{rel} = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_{mov} + \Delta\tau_{\Omega^2} + \Delta\tau_V + \Delta\tau_S = -(12.764 \pm 0.137) \text{ ns}.$$

Полный уход шкалы мобильных часов τ_m относительно шкалы τ_1 на трассе равен сумме вычисленных выше составляющих ($\Delta\tau_0, \Delta\tau_T, \Delta\tau_M, \Delta\tau_{rel}$) с учетом их среднеквадратических отклонений, включая ошибку начальной синхронизации. В результате $\Delta\tau_m = \tau_m - \tau_1 = -(3.217 \pm 0.148) \text{ ns}$. В конце пути все вычисленные смещения компенсировались с помощью введения в бортовую шкалу времени ПКЧ τ_m корректирующей поправки $\Delta\tau^{cor} = -\Delta\tau_m = +3.217 \text{ ns}$. В результате скорректированная шкала равна $\tau_m^{cor} = \tau_1 \pm 0.148 \text{ ns}$. Это свидетельствует о том,



Релятивистский эффект смещения шкалы времени ПКЧ на маршруте Менделеево-Иркутск.

что ПКЧ доставили в Иркутск шкалу τ_m^{cor} , которая с точностью до случайной ошибки совпадает с исходной шкалой τ_1 (UTC(SU)).

Этап 3 — сравнение в Иркутске скорректированной бортовой шкалы времени $\tau_m^{cor} = T_{PQC}^{cor}$ и синхронизируемой местной шкалы времени КЧ2 τ_2 (UTC(Im), Иркутск). В результате разность показаний этих шкал составила

$$\Delta\tau_{PQC} = T_{PQC}^{cor} - T_{UTC(Im)} = 0.464 \pm 0.148 \text{ ns.}$$

Верификация результатов, полученных с использованием метода релятивистской синхронизации, проводилась прямым сравнением шкалы времени UTC(Im) с национальной шкалой времени UTC(SU) по сигналам ГНСС. На основе результатов сравнения независимым методом all-in-view по сигналам GPS P3 [8] установлено, что расхождение данных шкал времени на момент проведения измерений 03.09.2019 г. в 10:16 UTC составило

$$\Delta\tau_{GNSS} = T_{UTC(SU)} - T_{UTC(Im)} = 0.6 \pm 1.5 \text{ ns.}$$

Таким образом, результат, полученный с использованием метода релятивистской синхронизации с погрешностью 0.148 ns, находится внутри интервала неопределенности оценки расхождения шкал времени, полученной независимым методом прямых измерений по ГНСС с погрешностью ± 1.5 ns.

В целом использование метода релятивистской синхронизации при передаче шкалы времени в Восточно-Сибирский филиал ФГУП „ВНИИФТРИ“ на расстояние свыше 5 тысяч километров обеспечило погрешность передачи ШВ не более 150 ps. Это является новым результатом при передаче шкал времени с помощью ПКЧ на большие расстояния и обеспечивает суточную стабильность хранения шкалы времени лучше $2 \cdot 10^{-15}$.

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] Л.Б. Борисова, В.Н. Мельников, Измерительная техника, № 4, 13 (1988).
- [2] Ю.Н. Медведев, Ю.Ф. Смирнов, в сб. *Метрология времени пространства: Тр. 5-го Рос. симп.* (ВНИИФТРИ, М., 1994). С. 342–343.
- [3] Б.А. Гайгеров, В.П. Сысоев, Измерительная техника, № 2, 25 (2012).
- [4] В.Ф. Фатеев, В.П. Сысоев, Измерительная техника, № 8, 31 (2014).
- [5] В.Ф. Фатеев, Е.А. Рыбаков, Ф.Р. Смирнов, Письма в ЖТФ, 43 (10), 3 (2017).
- [6] В.Ф. Фатеев, В.П. Сысоев, в сб. *Метрология времени пространства: Тр. 7-го Рос. симп.* (ВНИИФТРИ, М., 2015). С. 130–144.
- [7] C. Förste, S. Bruinsma, O. Abrikosov, J.-M. Lemoine, M. Charles, J. Charles, F. Flechtner, G. Balmino, F. Barthelmes, R. Biancale, *EIGEN-6C4. The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services* (2014). <https://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>
- [8] *Бюллетень E-09-2019/E5. Государственный вторичный эталон единиц времени и частоты ВЭТ 1–5.* ftp://ftp.vniiftri.ru/Atomic_Time/Im/BULLETTINS/E/2019/be0919-5