

II. Временные и навигационные измерения

УДК 629.05

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА РЕЛЯТИВИСТСКОЙ
СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ШКАЛЫ
ВРЕМЕНИ ГЛОБАЛЬНО УДАЛЁННОМУ ПОТРЕБИТЕЛЮ**

**В.Ф. Фатеев, Ю.Ф. Смирнов, А.И. Жариков,
Е.А. Рыбаков, Ф.Р. Смирнов**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,

fateev@vniiftri.ru,

rybakov@vniiftri.ru,

frsmirnov@vniiftri.ru

Аннотация. В работе приведены результаты эксперимента по исследованию метода релятивистской синхронизации при транспортировке шкалы времени глобально удалённому потребителю. Транспортировка шкалы времени выполнена при помощи перевозимых квантовых часов на автомобильном шасси на расстояние 5,4 тысячи километров. Полученные результаты подтверждены независимым методом сравнений шкал времени по сигналам ГНСС. Погрешность метода релятивистской синхронизации в эксперименте составила 148 пс, что существенно лучше, чем при использовании других методов синхронизации глобально удалённых потребителей.

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

**RESEARCH THE RELATIVISTIC SYNCHRONIZATION
METHOD WHEN TRANSPORTING THE TIME SCALE
TO A GLOBALLY REMOTE CONSUMER**

**V.F. Fateev, Yu.F. Smirnov, A.I. Zharikov,
E.A. Rybakov, F.R. Smirnov**

FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,

fateev@vniiftri.ru,

rybakov@vniiftri.ru,

frsmirnov@vniiftri.ru

Annotation. The paper presents the results of an experiment on research the relativistic synchronization method when transporting a time scale to a globally remote consumer. The time scale transported using a transported quantum clock on a vehicle chassis over a distance of 5.4 thousand kilometers. The obtained results were confirmed by an independent method for comparing time scales by GNSS signals. The error of the relativistic synchronization method in the experiment amounted to 148 ps, which is significantly better than when using other methods of synchronizing globally remote consumers.

Key words: relativistic synchronization, transported quantum clocks, relativistic effects, time scale.

Введение

Перевозимые квантовые часы (ПКЧ) являются одним из наиболее точных средств сравнений шкал времени (ШВ) территориально разнесённых потребителей. С их помощью определяется абсолютное значение смещений исследуемой шкалы времени относительно опорной путём последовательного сравнения их непосредственно со шкалой времени ПКЧ. Точность сравнения ШВ при таком способе в основном определяется погрешностью хранения шкалы времени на ПКЧ.

Для повышения точности сравнений территориально удалённых ШВ с уровнем нестабильности 10^{-15} – 10^{-17} на суточном интервале времени измерений необходима высокоточная компенсация релятивистских уходов (смещений) шкалы времени ПКЧ на трассе движения [1–4]. Метод релятивистской синхронизации на основе непрерывного вычисления указанных эффектов вдоль трассы движения путём измерения координат и скорости движения ПКЧ с помощью приёмников ГЛОНАСС/GPS предложен в работе [5] и испытан в реальном эксперименте [6].

В конце 2019 г. ФГУП «ВНИИФТРИ» провело эксперимент по передаче шкалы времени с помощью ПКЧ нового поколения из Подмоскovie в Иркутск на расстояние около 5,4 тысяч километров. Цель эксперимента заключалась в повышении точности передачи ШВ на основе метода релятивистской синхронизации с использованием ПКЧ, транспортируемых на глобальные расстояния автомобильным транспортом.

Планирование эксперимента

Рассмотрим эксперимент по передаче ШВ, содержащий стационарные базовые квантовые часы КЧ1 в точке 1 на поверхности Земли и мобильные ПКЧ, которые могут перемещаться по некоторому наземному маршруту из точки 1 к другим стационарным часам КЧ2, размещённым в точке 2 маршрута. Задача состоит в сравнении и определении расхождения шкал времени пространственно-разнесённых квантовых часов КЧ1 и КЧ2 с помощью шкалы мобильных часов. Условимся, что опорные, или базовые, часы КЧ1 являются хранителями собственной частоты задающего генератора f_1 и шкалы собственного времени τ_1 . Мобильные ПКЧ являются хранителями собственной частоты f_m и шкалы собственного бортового времени τ_m соответственно. Часы КЧ2, подлежащие синхронизации, имеют собственную частоту задающего генератора f_2 и шкалу времени τ_2 . Текущее взаимное положение стационарных и мобильных наземных квантовых часов будем рассматривать из геоцентрической вращающейся земной системы отсчёта ITRS. Положение базовых КЧ1 и синхронизируемых КЧ2 часов в этой системе характеризуется радиус-векторами $\vec{R}_1 \{x_1, y_1, z_1\}$ и $\vec{R}_2 \{x_2, y_2, z_2\}$, положение ПКЧ — переменным

во времени радиус-вектором $\vec{R}_m(\tau)\{x_m(\tau), y_m(\tau), z_m(\tau)\}$, а скорость перемещения мобильных часов относительно Земли — переменным вектором $\vec{V}(\tau)\{V_x, V_y, V_z\}$.

Синхронизация ШВ КЧ1 и КЧ2 выполняется в несколько этапов.

Этап 1 — калибровка ПКЧ, при которой синхронизируются шкалы τ_1 КЧ1 (UTC (SU)) и τ_m ПКЧ, измеряются относительная начальная разность частот задающих генераторов КЧ1 и ПКЧ (начальная расстройка частот) $\Delta f_0/f_0$, температурный коэффициент частоты ПКЧ K_T , а также магнитный коэффициент частоты ПКЧ K_M .

Этап 2 — перемещение ПКЧ из точки 1 в точку 2, вычисление и компенсация текущего ухода шкалы ПКЧ $\Delta\tau_m$ на трассе. При этом расхождение τ_1 и τ_m на трассе движения определяется следующей формулой [6]:

$$\Delta\tau_m = \tau_1 - \tau_m = \Delta\tau_0 + \Delta\tau_T + \Delta\tau_M + \Delta\tau_{rel}, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_0 = \Delta\tau(\Delta f_0/f_0)$ — уход шкалы ПКЧ на интервале времени движения $\Delta\tau$ от точки 1 до точки 2 за счёт начальной расстройки частоты бортового генератора $\Delta f_0/f_0$; $\Delta\tau_T = \int_0^{\Delta\tau} K_T T(\tau) d\tau$ — температурный уход ШВ за счёт

текущей разности температур вдоль пути; $\Delta\tau_M = \int_0^{\Delta\tau} K_M T(\tau) d\tau$ — уход шкалы времени ПКЧ, обусловленный текущим приращением напряжённости магнитного поля в пути;

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

— релятивистское расхождение шкал КЧ1 и ПКЧ на трассе; Ω_0 — угловая скорость вращения Земли; φ_1, φ_m — гравитационные потенциалы в точках размещения КЧ1 и ПКЧ; последний член определяет эффект Саньяка за счёт движения часов.

По окончании движения мобильных часов в точке 2 по формуле (1) вычисляется накопленное на трассе смещение шкалы времени ПКЧ. Для вычисления используются результаты калибровки ПКЧ, а также их координаты и скорость. Текущие координаты и скорость движения ПКЧ определяются с помощью навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ГНСС. Точность современных НАП обеспечивает погрешность вычисления релятивистских смещений от единиц до десятков пикосекунд в зависимости от расстояния [6].

Затем вычисленное по формуле (1) суммарное смещение ШВ ПКЧ компенсируется путём введения в шкалу времени ПКЧ цифровой корректиру-

ющей поправки, равной по величине и противоположной по знаку правой части (1): $\Delta\tau^{kor} = -\Delta\tau_m$. При этом, согласно (1), достигается условие синхронизации шкал КЧ1 и ПКЧ в конце пути: $\tau_m = \tau_1$.

Этап 3 — этап передачи ШВ от ПКЧ квантовым часам КЧ2 в точке 2 путём сравнения их показаний. В результате сравнения определяется смещение синхронизируемой шкалы КЧ2 относительно базовой шкалы КЧ1, которая доставлена в точку 2 перевозимыми часами.

Описание эксперимента

Экспериментальная передача ШВ от Государственного первичного эталона единиц времени и частоты ГЭТ 1-2018 (Менделеево, Московская область) 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 $1 \cdot 10^{-15}$. Шкалы времени эталонов τ_1 (UTC (SU), Менделеево) и τ_2 (UTC (Im), Иркутск) сравнивались со шкалой времени ПКЧ τ_m методом прямых измерений, проводимых в местах их размещения. Транспортировка ПКЧ от ФГУП «ВНИИФТРИ» (Менделеево) до Восточно-Сибирского филиала осуществлялась передвижной платформой на базе серийного автомобиля, оборудованного средствами автономного энергообеспечения и поддержания температурно-влажностного режима. При этом на всём протяжении транспортировки значения координат и скорости передвижения фиксировались штатным приёмником сигналов ГНСС JAVAD Sigma G3T из состава передвижной платформы с периодичностью 1 раз в секунду. Текущая температура в зоне размещения ПКЧ на маршруте контролировалась термогигрометром ИВА-6А-КП-Д с погрешностью 0,3 °С, магнитное поле — с помощью измерителя геомагнитных полей ПЗ-81-01 с погрешностью 0,1 А/м.

Эксперимент согласно плану проводился поэтапно.

На этапе 1 установлено, что относительная начальная расстройка частоты ПКЧ относительно частоты базового эталона составила: $\Delta f_0 / f_0 = (22,51 \pm \pm 0,005) \cdot 10^{-15}$. ТКЧ определялся с помощью мобильной термостатированной лаборатории, размещаемой вблизи эталона ГЭТ 1-2018, и составил: $K_T = (0,43 \pm 0,005) \cdot 10^{-15} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Измерения коэффициента магнитного экранирования производились в катушках Гельмгольца с изменением внешнего поля на ± 1 Э. Значение магнитного коэффициента частоты составило $K_M = (0,4 \pm \pm 0,05) \cdot 10^{-15} \text{ } \text{Э}^{-1}$.

Движение ПКЧ по маршруту Менделеево (Московская обл.) — Иркутск на этапе 2 проводилось в течение 95,5 часов плюс 18,8 часов на подготовку к сравнению шкал времени. Суммарный интервал времени транспортировки

шкалы времени составил: $\Delta\tau_0 = 114,3$ ч. Маршрут движения длиной 5384,5 км пролегал по дорогам федерального значения (рис. 1а), профиль высоты изменялся от +40 до +592 м (рис. 1б), скорость движения не превышала 43 м/с (рис. 1в).

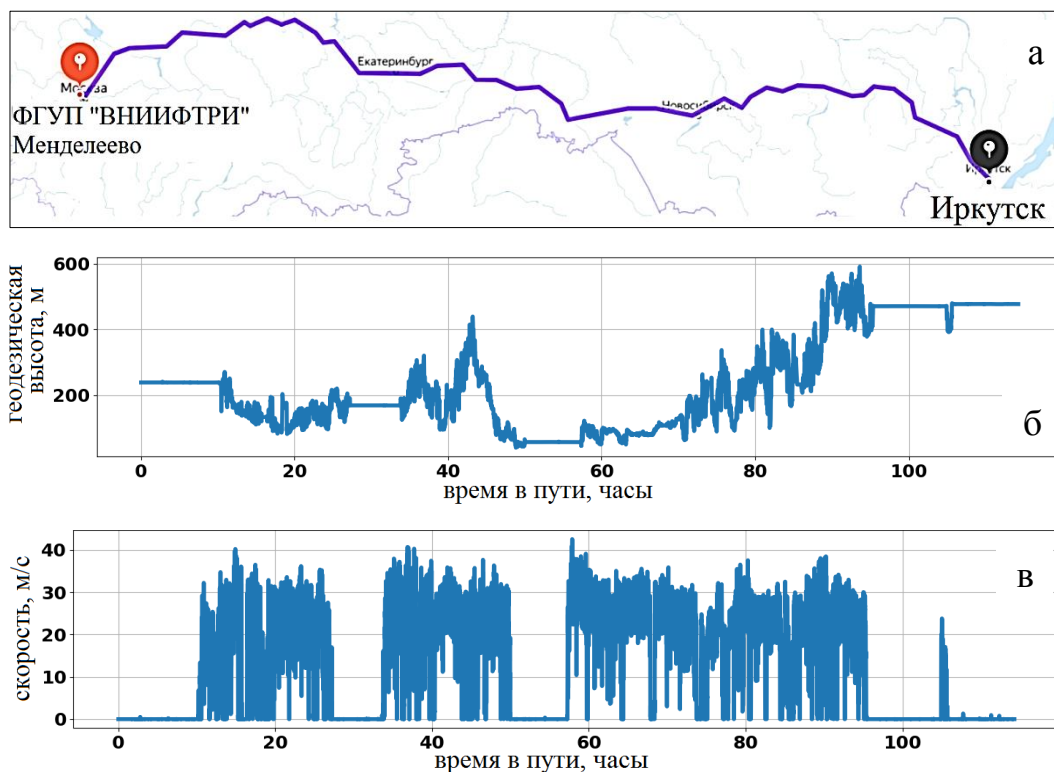


Рис. 1. Маршрут и параметры движения ПКЧ: а — трасса движения; б — профиль высот вдоль трассы; в — скорость движения вдоль трассы Менделеево — Иркутск

В конце движения в точке 2 вычислены составляющие формулы (1):

- смещение шкалы ПКЧ, вызванное начальной расстройкой частоты: $\Delta\tau_0 = \Delta\tau_0 \cdot (22,51 \pm 0,005) \cdot 10^{-15} = (9,258 \pm 0,002)$ нс;
- смещение вследствие температурного ухода частоты:

$$\Delta\tau_T = \int_0^{\Delta\tau} K_T T(\tau) d\tau = (0,124 \pm 0,002) \text{ нс};$$

- смещение, вызванное изменением напряжённости магнитного поля на трассе: $\Delta\tau_M = \int_0^{\Delta\tau} K_M T(\tau) d\tau = (0,165 \pm 0,021) \text{ нс}.$

Релятивистское смещение $\Delta\tau_{rel}$, вычисляемое по формуле (2) на основе измерения текущих координат и скорости движения ПКЧ, составило:

$\Delta\tau_{rel} = -(12,764 \pm 0,137)$ нс (рис. 2). При этом ошибка вычислений оценена по методике, изложенной в [6].

Результирующий уход шкалы мобильных часов на трассе равен сумме всех перечисленных составляющих с учётом их среднеквадратических отклонений: $\Delta\tau_m = -(3,217 \pm 0,148)$ нс.

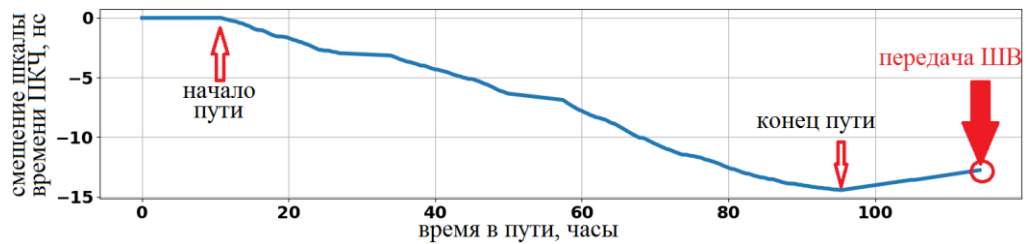


Рис. 2. Релятивистский эффект смещения шкалы времени ПКЧ на маршруте Менделеево — Иркутск

В конце пути все вычисленные смещения компенсировались с помощью введения в шкалу времени ПКЧ корректирующей поправки $\Delta\tau^{kor} = -\Delta\tau_m = 3,217$ нс. При этом на основе метода релятивистской синхронизации выполнялась компенсация релятивистского набега шкалы ПКЧ на трассе движения.

На этапе 3 производилось сравнение доставленной в Иркутск скорректированной шкалы времени τ_m (ПКЧ) и синхронизируемой шкалы времени τ_2 (UTC (Im), Иркутск). В результате сравнения получено:

$$\Delta\tau_{ПКЧ} = T_{ПКЧ} - T_{UTC(Im)} = 0,464 \pm 0,148 \text{ нс}.$$

Верификация метода релятивистской синхронизации

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

$$\Delta\tau_{ГНСС} = T_{UTC(SU)} - T_{UTC(Im)} = 0,6 \pm 1,5 \text{ нс}.$$

Полученное в результате измерений значение расхождения шкал времени $\Delta\tau_{ГНСС}$ сопоставимо с расчётным значением $\Delta\tau_{ПКЧ}$, полученным с использованием метода релятивистской синхронизации. При этом результат, полученный с использованием метода релятивистской синхронизации и имеющий погрешность 0,148 нс, находится внутри интервала неопределённости оценки расхождения шкал времени, полученной независимым методом прямых измерений по ГНСС с погрешностью $\pm 1,5$ нс.

Заключение

Испытание метода релятивистской синхронизации при передаче шкалы времени в Восточно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ» на расстояние свыше 5 тысяч километров показало, что практически реализуемый уровень погрешности релятивистской синхронизации на таких расстояниях не превышает 150 пикосекунд. Это является новым результатом при передаче шкал времени с помощью ПКЧ на большие расстояния и обеспечивает суточную стабильность хранения шкалы времени лучше $1 \cdot 10^{-15}$.

Обладая методической погрешностью в несколько раз меньшей, чем у других независимых методов синхронизации (спутниковой метод, дуплексный метод, метод с использованием РСДБ), метод релятивистской синхронизации становится перспективным средством высокоточной синхронизации на основе транспортирования ПКЧ на глобальные расстояния.

По мнению авторов, особые перспективы метод имеет при транспортировании оптических стандартов частоты и времени, имеющих нестабильность 10^{-17} – 10^{-18} .

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

Список литературы

1. Борисова Л.Б., Мельников В.Н. Релятивистские поправки в показаниях транспортируемых эталонов времени // Измерительная техника. 1988. № 4. С. 13–15; Borisova L.B., Mel'nikov V.N. Relativistic corrections to readings from a portable clock // Measurement Techniques. 1988. V. 31. No. 4. P. 323–327.
2. Медведев Ю.Н., Смирнов Ю.Ф. Оценка релятивистских и гравитационных поправок при транспортировании перевозимых квантовых часов // Метрология времени пространства: тр. 5-го Рос. симп. Менделеево: ВНИИФТРИ, 1994. С. 342–343.
3. Гайгеров Б.А., Сысоев В.П. Учёт релятивистских эффектов при сличении шкал времени с помощью перевозимых квантовых часов // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 25–29.
4. Фатеев В.Ф., Сысоев В.П. Релятивистские эффекты в мобильных часах // Измерительная техника. 2014. № 8. С. 31–35; Fateev V.F., Sysoev V.P. Relativistic effects on moving clocks // Measurement Techniques. November, 2014. V. 57. No. 8.
5. Фатеев В.Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени: монография. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. 439 с.
6. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А., Смирнов Ф.Р. Метод релятивистской синхронизации мобильных атомных часов и его экспериментальная проверка // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 10. С. 3–11.

7. Фатеев В.Ф., Сысоев В.П. Компенсация релятивистских эффектов в движущихся квантовых часах // Метрология времени пространства: тр. 7-го Рос. симп. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015. С. 130–144.
8. Бюллетень Е-09-2019/Е5 Государственного вторичного эталона единиц времени и частоты ВЭТ 1-5 [Электронный ресурс]. URL: ftp://ftp.vniiftri.ru/Atomic_Time/Im/BULLETINS/E/2019/be0919-5

Статья поступила в редакцию: 24.11.2020 г.

Статья прошла рецензирование: 14.12.2020 г.

Статья принята в работу: 21.12.2020 г.