

УДК 53.083.91

ЭТАЛОН-ПЕРЕНОСЧИК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО СРАВНЕНИЯ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

Ф.Р. Смирнов, А.И. Жариков

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

В работе рассмотрены общие характеристики средств измерений времени и частоты, кратко изложен метод сравнения шкал времени с помощью перевозимых квантовых часов в качестве эталона-переносчика, представлен анализ влияющих факторов. По результатам исследования характеристик существующих образцов перевозимых квантовых часов разработаны предложения по созданию эталона-переносчика нового поколения.

An article describes general characteristics of time and frequency measurements. Also the method of comparing time scales by means of transported quantum clocks and its influencing factors analysis are briefly presented. Finally some proposals for developing of a new generation transportable standard based on the results of existing portable clock performances study are given.

Ключевые слова: сравнение шкал времени, эталон-переносчик единиц времени и частоты, метрологические характеристики, водородный генератор.

Key words: comparing time scales, transportable time and frequency units standard, metrological characteristics, hydrogen maser.

Введение

Международное сотрудничество в сферах науки и техники является надёжным фундаментом для появления новых направлений их развития, совершенствования уже существующих областей и успешного применения полученных результатов. Область измерений времени и частоты служит характерным примером продуктивного взаимодействия (рис. 1).



Рис. 1. Межгосударственное сотрудничество в сфере калибровки ГНСС аппаратуры

Измерения времени и частоты являются важной областью обеспечения единства измерений, поскольку время является основной величиной Международной системы величин СИ. Кроме того, единица длины метр определена в СИ посредством универсальной мировой константы — скорости света, что значит, что она также выражается с помощью измерений в области времени и частоты.

Взаимосвязь повышения точности измерений времени с развитием технологий в современном мире, на первый взгляд, кажется не очевидной. Однако существуют конкретные примеры применения технологий высокоточного сравнения шкал времени (ШВ) (рис. 2). Так, совмещение метода триангуляции с реализацией единой системной шкалы времени позволяет глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС), таким как ГЛОНАСС и GPS, однозначно, с точностью порядка нескольких миллиметров, определять координаты фазового центра антенны навигационного приёмника потребителя. Чем точнее при этом измерено время распространения сигнала от спутника до потребителя, тем с меньшей погрешностью будут определены значения навигационных параметров при прочих равных условиях [1].

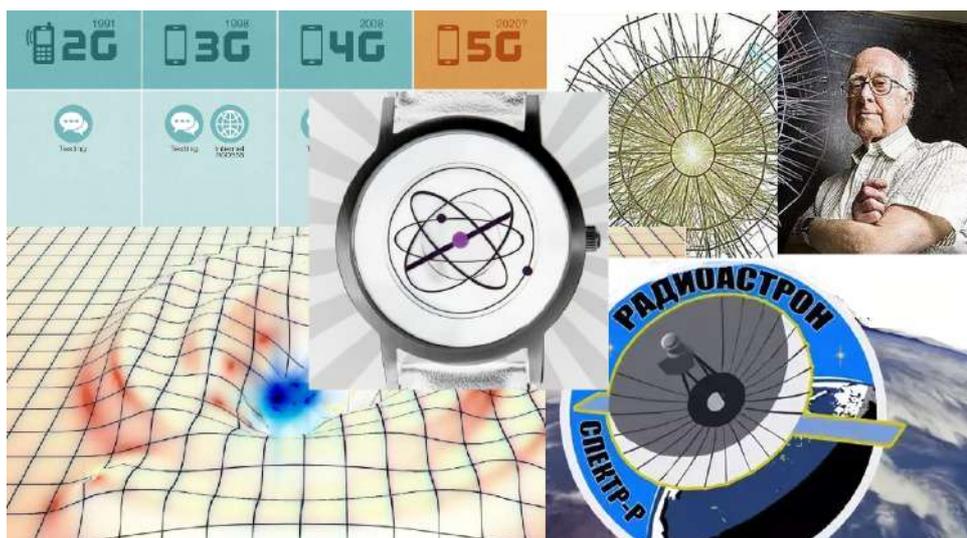


Рис. 2. Сферы применения точного времени

Кроме того, успешное внедрение новых технологий позволило снизить погрешность сравнения разнесённых шкал времени [2, 3], что, в свою очередь, оказало влияние на значительное развитие различных сфер человеческой деятельности. Практическое внедрение стандарта мобильной связи 5 поколения [4] и последующее повышение пропускной способности канала передачи данных до 35 Гбит/с [5]; открытие бозонов Хиггса на Большом адронном

коллайдере [6]; создание РСДБ-системы «Радиоастрон» с беспрецедентной разрешающей способностью до 1 мкс дуги [7]; регистрация гравитационных волн впервые в истории установками LIGO и VIRGO [8] — лишь малый список достижений, не последнюю роль в которых сыграло прецизионное сравнение шкал времени.

Характеристики средств измерений времени и частоты

Современные достижения в сфере разработки и производства атомных стандартов времени и частоты позволяют осуществлять хранение национальных шкал времени с точностью до нескольких наносекунд. Принцип работы таких стандартов основан на использовании квантовых переходов между определёнными энергетическими состояниями атомов химических элементов, таких как цезий, водород, рубидий, ртуть и др. В настоящее время цезиевые и водородные хранители частоты и времени стоят в основе формирования большинства национальных эталонов времени и частоты, их показания используются при расчётах национальных и международной шкал атомного времени.

Основными характеристиками атомных стандартов являются нестабильность и точность. Типовое значение нестабильности используемых на практике атомных часов составляет 10^{-15} на интервалах времени измерения 100–1000 с. Лучшей нестабильностью обладают стандарты, принцип действия которых основан на использовании цезиевого атомного фонтана, с нестабильностью частоты на уровне нескольких единиц 10^{-16} на интервале времени измерений порядка нескольких суток.

Перспективные разработки стандартов частоты проводятся на базе оптических атомных часов на ультрахолодных атомах (например, иттербия, магния) [9], захваченных в оптическую ловушку, и лазерной спектроскопией так называемого часового перехода между их энергетическими уровнями. Неопределённость получаемой с помощью таких устройств частоты существенно снижается за счёт снижения влияния возмущающих факторов и становится обусловлена эффектом Штарка (расщеплением спектральных линий под действием электрического поля), столкновениями между атомами в ловушке, неоднородным возбуждением уровней и шумом лазера. Темпы совершенствования высокостабильных генераторов частоты оцениваются ориентировочно уменьшением нестабильности на один порядок в течение пяти лет, что позволяет прогнозировать в ближайшей перспективе создание стандартов частоты и времени с нестабильностью в пределах 10^{-17} – 10^{-18} на аналогичных интервалах времени измерений [10–12] (рис. 3).



Рис. 3. Прогресс области измерений времени и частоты

Однако существующие средства и методы сравнения шкал времени традиционно уступают по точности атомным часам. Данное обстоятельство в значительной мере определяет характеристики систем, работающих по единой ШВ [13–16]. В связи с этим повышается актуальность работ, направленных на совершенствование методов сравнения ШВ территориально распределённых стандартов частоты и хранителей времени.

Сравнение удалённых шкал времени с помощью эталона-переносчика единиц времени и частоты

Сравнения шкал времени пространственно распределённых ШВ выполняются следующими стандартными методами:

- с помощью эталонов-переносчиков единиц времени и частоты;
- с использованием сигналов времени и частоты, передаваемых глобальными навигационными спутниковыми системами;
- с использованием сигналов времени и частоты, передаваемых через дуплексный канал космической связи (двухпутевой метод);
- с использованием сигналов времени и частоты, передаваемых по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС).

Все вышеперечисленные методы основаны на различных принципах, имеют свои особенности, отличаются погрешностью, особенностями применения и рядом ограничений. На практике для средств сравнений ШВ нормируемыми метрологическими характеристиками являются систематическая и случайная погрешности сравнений. Остановимся более подробно на методе сравнений ШВ с помощью эталона-переносчика единиц времени и частоты (ЭП).

Эталон-переносчик единиц времени и частоты представляет собой транспортируемый эталон специальной конструкции, предназначенный для проверки (калибровки) СИ или сличений эталонов, основным элементом которого является атомный стандарт времени и частоты. Сравнение шкал времени с помощью ЭП позволяет получить абсолютное значение смещений исследуемой ШВ относительно эталонной путём последовательного сравнения их непосредственно со шкалой времени ЭП. При этом типовая методика измерений, применяемая на практике для сравнения ШВ, включает в себя выполнение следующих операций:

- измерения на исходном эталоне;
- транспортирование ЭП на объект сравнения ШВ;
- измерения на объекте сравнения ШВ;
- транспортирование ЭП на исходный эталон;
- измерения на исходном эталоне;
- определение смещений сравниваемых ШВ;
- оценка погрешностей результатов измерений.

Методика предусматривает выполнение на каждом этапе прямых измерений смещений ШВ эталонов и ЭП на местах соответствующего размещения эталонов, что полностью исключает возможное влияние на результаты измерений шумов альтернативных измерительных каналов. При этом моменты сравнений ШВ исходного и исследуемого эталонов со шкалой времени ЭП оказываются смещёнными друг относительно друга во времени, что обусловлено необходимостью доставки ЭП до мест выполнения измерений. Этот недостаток компенсируется высокой точностью получаемых результатов.

Метод сравнений шкал времени с помощью ЭП остаётся одним из наиболее точных и достоверных методов сравнения ШВ. Среди используемых в настоящее время для данных целей атомных стандартов самыми перспективными являются технические средства, выполненные на основе водородных стандартов частоты активного типа. Создание такого ЭП оказалось возможным за счёт использования в его составе малогабаритного водородного стандарта с уменьшенным объёмом резонатора и устойчивой ко внешним воздействиям конструкцией. Одним из таких оптимальных способов уменьшения размеров резонатора в настоящее время является размещение внутри резонатора параллельно его оси металлических пластин, расположенных вокруг накопительной колбы, и размещение внутри резонатора полого толсто-стенного диэлектрического цилиндра, внутренняя поверхность которого играет роль накопительной колбы [17].

Влияние внешних факторов на характеристики эталона-переносчика

Опыт эксплуатации ЭП позволяет определить влияние на его метрологические характеристики различных воздействующих факторов. Наиболее важной составной частью, определяющей метрологические характеристики ЭП, является входящий в их состав стандарт частоты и времени. Транспортные вибрации оказывают заметное влияние на долговременную стабильность частоты ЭП. Если в стационарных условиях, при поддержании температуры на месте размещения ЭП в пределах ± 1 °С, среднеквадратическое двухвыборочное отклонение частоты (СКДО) входящего в состав стандарта частоты на интервале времени измерения 1 час составляет $5 \cdot 10^{-15}$, то в условиях транспортирования оно оценивается на уровне $5 \cdot 10^{-14}$ [18], применение конструкции атомного стандарта, стойкой ко внешним механическим воздействиям, и наличие специальной амортизационной платформы позволяет уменьшить данный показатель до $1 \cdot 10^{-14}$ [17].

Давление и влажность воздуха влияют на диэлектрическую проницаемость внутренней среды резонатора и, соответственно, на его резонансную частоту. Влияние атмосферного давления и влажности воздуха устраняется путём герметизации или вакуумирования резонатора. Вакуумирование в данном случае является предпочтительным, поскольку полностью исключает влияние на резонатор в совокупности атмосферного давления и влажности воздуха.

Влияние температуры в первую очередь сказывается на стабильности частоты ЭП. Широко применяемые на практике неспециализированные автомобильные кондиционеры способны поддерживать в салоне нормальную температуру 20 ± 5 °С. Для достижения оптимальных характеристик сравнения ШВ с помощью ЭП удовлетворительным для практических целей показателем является не превышение дополнительного изменения шкалы времени, обусловленное влиянием температуры, значения 0,5 нс. При этом температурный коэффициент частоты водородного стандарта из состава ЭП принимает значение:

$$\text{ТКЧ} \leq \frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta \tau}{\tau} = \frac{1}{1 \cdot 24 \cdot 3600} \frac{0,5 \cdot 10^{-9}}{1} = 0,6 \cdot 10^{-15} \frac{1}{\text{С}}, \quad (1)$$

где ΔT — допустимое изменение температуры;

τ — интервал времени (сутки);

$\Delta \tau$ — допустимое изменение шкалы времени.

Следующим фактором, оказывающим влияние на характеристики ЭП, является напряжённость внешнего магнитного поля. Изменение частоты водородного стандарта из-за изменения величины внешнего магнитного поля может быть определено по формуле (2) и в количественном выражении равно:

$$\left(\frac{\Delta f_{BG}}{f_{BG}}\right)_H = 3,9 \cdot 10^{-6} H_0 \Delta H_0 = 3,9 \cdot 10^{-6} H_0 \frac{\Delta H_{внеш}}{K}, \quad (2)$$

где H_0 [Э] — средняя величина продольной составляющей напряжённости магнитного поля в области накопительной колбы;

ΔH_0 [Э] — изменение напряжённости магнитного поля в области накопительной колбы;

$\Delta H_{внеш}$ [Э] — изменение внешнего магнитного поля;

K — коэффициент экранирования системы магнитных экранов водородного генератора.

Исходя из стандартных условий эксплуатации, ЭП обеспечивает свои метрологические характеристики при любой ориентации их относительно магнитного поля Земли, приблизительно равного 0,4 Э. Кроме того, на практике ЭП зачастую подвержен к транспортированию в естественных условиях, в том числе в потоке автотранспорта, также обладающем намагниченностью. Исходя из этого, можно считать оптимальным диапазон изменения внешнего магнитного поля равным ± 1 Э.

Напряжённость рабочего магнитного поля в типовых конструкциях активных водородных стандартов времени и частоты в области накопительной колбы составляет величину порядка $1 \cdot 10^{-3}$ Э (1 мЭ). Коэффициент экранирования магнитного поля в практических конструкциях равен 10^5 . Использование активной системы магнитного экранирования позволяет на порядок улучшить это значение. Таким образом, существует возможность практической реализации коэффициента экранирования $K = 10^6$. При этом нестабильность частоты ЭП, обусловленная изменением внешнего магнитного поля, равна:

$$\left(\frac{\Delta f_{BG}}{f_{BG}}\right)_H = 3,9 \cdot 10^{-6} H_0 \frac{\Delta H_{внеш}}{K} = 3,9 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{10^6} \approx 4 \cdot 10^{-15}, \quad (3)$$

что является приемлемым с точки зрения обеспечения оптимальных характеристик. При этом магнитный коэффициент частоты (изменение частоты ЭП при изменении напряжённости внешнего магнитного поля на 1 Э) составит МКЧ = $4 \cdot 10^{-15}$ 1/Э. Перечисленные выше факторы, влияющие на метрологические характеристики ЭП, могут учитываться в ходе их эксплуатации при сравнении ШВ на этапе оценки погрешностей результатов измерений.

В случаях транспортирования ЭП на значительные расстояния сказывается проявление так называемых релятивистских эффектов, влияние которых при отсутствии должного учёта приводит к увеличению погрешности сравнения ШВ, делая данный метод неконкурентным в сравнении с другими существующими. Перемещение часов в пространстве, в соответствии с общей

теорией относительности, сопровождается изменением их хода. Это связано с изменением тактовой частоты движущихся часов относительно тактовой частоты часов, находящихся неподвижно на поверхности Земли. Относительное отклонение частоты в общем случае вследствие релятивистских эффектов выражается формулой:

$$\frac{\Delta f}{f} = 6,86 \cdot 10^{-10} \frac{h}{R_3} - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 \pm \frac{1}{c^2} \omega_3 v_{\parallel} R_3 \cos \phi_{\text{ш}}, \quad (4)$$

где h — высота подъёма над уровнем Мирового океана ($h \ll R_3$);

R_3 — радиус Земли ($R_3 = 6300$ км);

v — скорость перемещения часов относительно поверхности Земли;

c — скорость света;

ω_3 — угловая скорость вращения Земли;

v_{\parallel} — проекция вектора скорости перемещения часов на касательную к параллели;

$\phi_{\text{ш}}$ — широта места.

Первый член выражения (4) характеризует изменение частоты ЭП вследствие изменения гравитационного потенциала Земли при вертикальном перемещении. В соответствии с ним на каждый километр подъёма частота ЭП изменяется на $+1 \cdot 10^{-13}$. Второй член выражения (4) характеризует изменение частоты вследствие эффекта Доплера второго порядка. В соответствии с ним перемещение ЭП со скоростью 100 км/час вызывает изменение частоты на $-4,28 \cdot 10^{-15}$. Третий член выражения (4) характеризует изменение частоты ЭП при их перемещении, связанном с вращением Земли вокруг оси. Знак зависит от направления перемещения часов: (+) при движении с запада на восток; (–) при движении с востока на запад. Значение сдвига зависит от тангенциальной составляющей скорости перемещения часов и широты места. На широте Москвы, например, движение на автомобиле на восток со скоростью 100 км/ч приводит к изменению частоты на $+8,7 \cdot 10^{-14}$, а на запад — на $-8,7 \cdot 10^{-14}$.

Такие изменения частоты при транспортировании ЭП в течение суток способны вызвать смещение их шкалы времени на величины до нескольких десятков наносекунд, что приведёт к значительному увеличению систематической погрешности сравнения ШВ и сделает выбор данного метода необоснованным. В силу данных причин необходимость учёта релятивистских эффектов при использовании метода ЭП для сравнения удалённых ШВ является актуальной задачей, требующей детального анализа на всём этапе эксплуатации ЭП. Одним из перспективных способов повышения оперативности и точности учёта данных эффектов является включение в состав ЭП системы измерения параметров движения и физических полей, в состав которой включён GPS/ГЛОНАСС приёмник, определяющий траекторию движения, по которой вычисляется релятивистская поправка к ШВ ЭП, связанная с его перемещением.