

Особенности формирования достоверной шкалы времени в сетях связи

© С. Ю. Медведев¹, К. Г. Мишагин^{1, 2}, А. В. Рыжков³, Б. А. Сахаров¹, М. Л. Шварц³

¹АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

²ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

³МТУСИ, г. Москва, Россия

Реферат

Для обеспечения функционирования современных сетей связи реализуются специальные системы частотной (тактовой) и временной (фазовой) синхронизации, которые, как правило, основаны на использовании приёмников ГНСС. Однако такие системы нельзя считать надёжным из-за различных помех, воздействующих на приемники ГНСС и приводящих к полной потере синхронизации. Требуется альтернативные решения для систем частотно-временного обеспечения. Одно из таких решений предлагается в данной работе.

В работе анализируются доступные технологии и требования для частотно-временного обеспечения современных систем связи. С помощью численного моделирования и качественных оценок исследуется ожидаемое время автономного хранения шкалы атомных часов для заданной точности.

В результате проведенного анализа сделан вывод о том, что перспективным решением проблемы обеспечения надёжности системы частотно-временной синхронизации является применение ведущих сетевых часов на основе прецизионных хранителей времени — квантовых стандартов частоты, корректируемых относительно UTC с достаточно большим периодом при контроле качества принимаемого сигнала. Использование пассивных водородных стандартов частоты позволит осуществлять коррекции приблизительно раз в две недели либо реже при требовании допустимого отклонения шкалы времени от UTC не более 100 нс. Для повышения надёжности системы предлагается использовать два стандарта частоты и дополнительное устройство обнаружения помех типа spoofing. Рассмотренная структура системы формирования и коррекции шкалы времени ведущих сетевых часов на основе технологии APNT может лечь в основу будущих когерентных систем частотно-временного обеспечения, которые позволят повысить надёжность формирования единых шкал времени и эталонной частоты для сети связи общего пользования.

Ключевые слова: цифровая связь, тактовая сетевая синхронизация, фазовая синхронизация, шкала времени, стандарт частоты, эталон времени и частоты, спуфинг.

Контакты для связи: Мишагин Константин Геннадьевич (mishagin@vremya-ch.com).

Для цитирования: Медведев С. Ю., Мишагин К. Г., Рыжков А. В., Сахаров Б. А., Шварц М. Л. Особенности формирования достоверной шкалы времени в сетях связи // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 70. С. 19–24.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.19-24>

Features of Assured Timing Systems for Communication Networks

S. Yu. Medvedev¹, K. G. Mishagin^{1, 2}, A. V. Ryzhkov³, B. A. Sakharov¹, M. L. Schwartz³

¹"Vremya-CH" JSC, Nizhniy Novgorod, Russia

²Lobachevsky University, Nizhniy Novgorod, Russia

³MTUCI, Moscow, Russia

Abstract

To ensure the functioning of modern communication networks, special systems of frequency (clock) and time (phase) synchronization are implemented, which are usually based on the use of global navigation satellite systems (GNSS) receivers. However, such systems cannot be considered reliable due to various interferences that affect GNSS receivers and lead to a complete loss of synchronization. Alternative solutions for high-precision time-frequency systems are required. One such solution is proposed in this paper.

The paper analyzes available technologies and requirements for time-frequency support of modern communication systems. Using numerical simulation and qualitative estimates, the expected time of autonomous keeping of the atomic time scale for a given accuracy is studied.

As a result of the analysis, it was concluded that a promising solution to the problem of ensuring the reliability of the frequency-time synchronization system is the use of a leading network clock based on precision time keepers – quantum frequency standards corrected relative to UTC with a sufficiently long period while monitoring the quality of the received signal. The use of passive hydrogen frequency standards will make it possible to carry out corrections approximately once every two weeks, or less frequently, if the allowable deviation of the time scale from UTC is not more than 100 ns. To improve the reliability of the system, it is proposed to use two frequency standards and an additional spoofing interference detection device. The considered structure of the system for forming and correcting the time scale of the leading network

clock based on APNT technology can form the basis for future coherent time-frequency systems that will improve the reliability of the formation of a single time scale and reference frequency for a public communication network.

Keywords: digital communications, clock synchronization, time scale, frequency standard, PRTC (Primary Reference Time Clock), APNT (Assured Positioning, Navigation and Timing), spoofing.

Contacts: Konstantin G. Mishagin (mishagin@vremya-ch.com).

For citation: Medvedev S. Yu., Mishagin K. G., Ryzhkov A. V., Sakharov B. A., Schwartz M. L. Features of assured timing systems for communication networks // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 70. P. 19–24. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.19-24>

Введение

Современные системы связи основываются на кодовом или временном разделении каналов, предполагающем высокоточную синхронизацию начальной фазы. Для обеспечения их функционирования в сетях реализуются системы частотно-временного обеспечения, т. е. совместного использования частотной и временной (фазовой) синхронизации. Более того, прецизионная синхронизация шкал времени является основой для таких задач как позиционирование и навигация, а также востребована «сквозными» цифровыми технологиями, беспилотным транспортом, энергетикой, различными автоматизированными системами управления и т. п.

Понятие синхронизации шкалы времени включает в себя три основные составляющие:

1. Синхронизация интервала времени 1 с, т. е. единицы времени.
2. Синхронизация кода времени, т. е. текущих значений даты (год/месяц/день) и времени (часы/минуты/секунды).
3. Синхронизация момента начала отсчёта новой секунды или начальной фазы отсчёта интервала 1 с.

Для обеспечения межсетевое взаимодействия, а также совместимости результатов фиксации событий независимыми системами или устройствами, необходимо наличие единых шкал времени во всех конечных устройствах, работающих со шкалой времени, т. е. синхронность работы часов в любой точке сети.

Для достижения единства шкал времени необходимо иметь привязку к единой эталонной шкале времени. В качестве такой шкалы принято использовать универсальную всемирную координированную шкалу времени UTC ([Panfilo, Arias 2019](#)). Эта шкала формируется и поддерживается системой национальных стандартов частоты и времени (лабораториями UTC). Общая координация и управление данным процессом обеспечивается администрацией UTC, функционирующей под эгидой международного бюро мер и весов. Таким образом, ведущие сетевые часы должны работать синхронно со шкалой UTC, т. е. ведущие часы должны воспроизводить шкалу UTC с заданной точностью и обеспечивать соответствующую синхронизацию ведомых часов.

Основная проблема воспроизведения и формирования шкалы времени связана с тем, что код времени и начальная фаза отсчёта новой секунды не являются физическими величинами, а назначены административно. При этом интервал времени 1 с, т. е. частота 1 Гц, может формироваться и автономными эталонами частоты с заданной точностью. Это означает, что ведущие сетевые часы должны иметь канал приёма данных о шкале времени непосредственно от национальных эталонов или лабораторий UTC. При отсутствии такого канала невозможно обеспечить единство шкал времени и межсетевое взаимодействие. Особенно это касается пользователей сетей связи — мобильных устройств и транспорта — в части решения задач навигации и позиционирования.

Наиболее простым решением задачи частотно-временного обеспечения является использование данных о шкале времени, получаемых на выходе приёмников ГНСС: ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou и т. п. ([Tavella, Petit 2020](#)). Однако в последние годы во всём мире наблюдается процесс снижения надёжности данного метода в связи с помехами различного рода (промышленными, помехами радиопередающих устройств, преднамеренными, широкополосными шумовыми помехами (jamming)) и подменой сигналов ГНСС ложными (spoofing) ([Wu, et al., 2020](#)). Причины этих помех могут быть разными: плотная городская застройка, охранные зоны, временная постановка для охраны кортежей или криминальные действия. В любом случае это приводит к существенному снижению надёжности приёма сигналов ГНСС, которые в конечном итоге выливаются в серьёзные ошибки в работе систем связи, вплоть до полного нарушения работы информационных сервисов или системы синхронизации в сетях связи. Таким образом, появилась настоятельная необходимость применения наземных каналов для приёма данных о шкале времени от национальных стандартов частоты и времени или лабораторий UTC.

Технически такие каналы могут быть реализованы на базе современных систем связи или с помощью выделенных волоконно-оптических линий связи с применением протокола прецизионного времени — PTP совместно с системой синхронного Ethernet (SyncE). Также могут применяться специализированные устройства передачи шкалы времени в потоках E1, E2 в сетях связи

синхронной цифровой иерархии (Рыжков и др., 2022). Однако практика их применения показала, что и эти системы не обладают достаточной надёжностью, не исключая снижения точности приёма и формирования шкалы на выходах ведущих сетевых часов, которые связаны с возможными отказами в оборудовании синхронизации времени или систем передачи. Особо тяжёлые последствия наблюдаются при возникновении отказов, которые не могут быть диагностированы встроенными средствами мониторинга.

Таким образом, при создании комплексов ведущих сетевых часов необходимо учитывать, что приём данных о шкале времени UTC через ГНСС или наземные каналы не является абсолютно достаточным решением. Важно и то, что формирование шкалы на основе встроенных (автономных) эталонов времени невозможно, т. к. начальная фаза и код времени не могут быть ими воспроизведены.

Описание системы на основе атомных часов

Оптимальным решением могут служить системы на основе высокоточных атомных стандартов частоты (Рыжков и др., 2022), которые будут выступать в роли хранителей шкалы времени (рис. 1). При запуске в работу таких часов необходимы период начальной установки шкалы времени с помощью приёмников сигналов ГНСС или наземных систем связи с национальными эталонами, а затем переключение в режим хранения. В дальнейшем с заданной периодичностью ведущие часы должны синхронизироваться со шкалой UTC. При этом для определения достоверности необходимо иметь инструмент сравнения принятой шкалы времени с рабочей шкалой, формируемой хранителем на основе атомного стандарта частоты. Для повышения надёжности может применяться система резервированных стандартов.

Следовательно, в составе комплекса ведущих часов должна применяться встроенная система сличения принятых шкал времени и рабочей шкалы времени. При этом рабочая шкала принимается за эталонную шкалу для сличения (сравнения) с принятыми шкалами от ГНСС или по наземным системам связи. Если наблюдается существенная разница между рабочей и принятой шкалой, то принятая шкала подлежит отбраковке (запрещению) для коррекции рабочей шкалы. Такой подход обеспечит защиту рабочей шкалы от использования ложных данных (spoofing) и недостоверной шкалы из-за отказов в канале приёма данных от лабораторий UTC и/или соседних ведущих часов. Дополнением к этой структуре может и должно служить устройство обнаружения помехи типа spoofing. При обнаружении ложных сигналов такое устройство в автоматическом режиме блокирует соответствующий канал приёма.

Подобные системы получили название APNT — Assured Position, Navigation and Timing (Swaszek et al., 2017). Их идея заключается в построении рабочего эталона частоты и времени, который сличается и подстраивает свою шкалу по данным о шкале UTC с относительно большой периодичностью. Время усреднения и контроля принимаемых внешних данных определяется качеством и точностью стандартов (хранителей) и может составлять от нескольких часов до нескольких месяцев. При обнаружении недостоверных данных такие часы переходят в режим автономного хранения шкалы до получения очередных корректных данных. Технология APNT основана на контроле достоверности шкалы времени, принятой как минимум по трём независимым каналам (ГНСС, наземные каналы связи). При этом основным режимом формирования шкалы времени является режим хранения шкалы времени с периодической подстройкой или коррекцией по принятым данным от лабораторий UTC.

Для стационарных наземных сетей связи в качестве хранителей могут применяться цезиевые или водородные стандарты, период подстройки которых может составлять до полугода. Для мобильных объектов бортовые хранители могут выполняться на базе группы из нескольких (обычно трёх) рубидиевых стандартов или высокостабильных кварцевых генераторов. При этом при потере приёма шкалы мобильные часы переводятся в режим хранения шкалы времени, что фактически означает переход системы навигации в инерциальный (автономный) режим. И в любом варианте реализации после включения питания должна осуществляться установка шкалы времени по данным от приёмников ГНСС или наземного канала связи с лабораторией UTC. Для мобильных систем источником начальной установки шкалы могут служить стационарные ведущие часы.

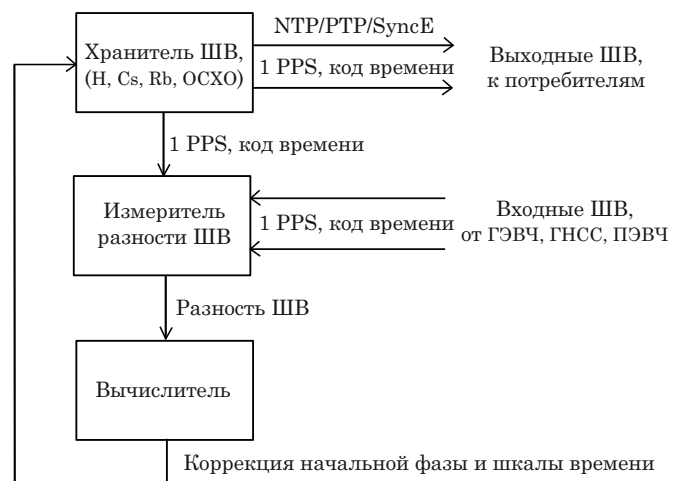


Рис. 1. Структура формирования и коррекции шкалы времени ведущих сетевых часов на основе технологии APNT

Эта идеология положена в основу перспективных когерентных систем частотно-временного обеспечения, описанных в приложении № 6 к рекомендации G.8275. Такие системы предполагают формирование групповой шкалы времени и опорной частоты на базе пространственно-разнесённых когерентных первичных эталонов времени и частоты — кгПЭВЧ (снPRTC) (Шварц, Рыжков, 2021, Cosart et al., 2022). Другими словами, речь о формировании единых шкал времени и опорной частоты для систем частотно-временного обеспечения сетей связи в целом с использованием привязки к национальным эталонам частоты и времени, а также организацией взаимных связей между кгПЭВЧ, установленных на сетях различных операторов на пространственно-разнесённых объектах. Данное решение позволит обеспечивать согласованность протекания процессов в различных точках сети связи общего пользования, совпадающих по фазе (частоте) или сохраняющих разность фаз (частот) постоянной во времени с заданной точностью.

Оценка времени автономной работы системы

Для обеспечения точности хранения шкалы времени на больших интервалах времени должны применяться водородные мазеры или цезиевые стандарты частоты. Эти источники частоты должны соответствовать требованиям рекомендации МСЭ-Т G.811.1, что позволяет реализовывать устройства ePRTC в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.8271.1. Например, в качестве хранителей могут использоваться пассивные водородные стандарты типа VCH-1008C или VCH-1008. На рис. 2 представлена типичная характеристика нестабильности частоты для этих мазеров, измеренная относительно активного водородного стандарта Ч1-1003М, обладающего значительно меньшей нестабильностью. Заметный подъем графика, рассчитанного по данным без исключения линейного дрейфа частоты, свидетельствует о том, что долговременная нестабильность определяется дрейфом частоты, а не шумовым вкладом. В данном примере нестабильность частоты на интервале времени измерения 1 сут. составляет 1.7×10^{-15} , а суточный дрейф частоты 6.8×10^{-16} . Как правило, пассивные водородные стандарты частоты при поддержании стабильной температуры окружающей среды в установившемся режиме работы демонстрируют суточную нестабильность частоты менее 2×10^{-15} и суточный дрейф частоты менее 1×10^{-15} .

Выполним оценку времени автономной работы системы APNT, основанной на пассивных водородных стандартах, при заданном максимально допустимом отклонении шкалы относительно UTC. Используем стандартную модель прогноза ухода шкалы времени атомных часов (Allan, Hellwig, 1978):

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{dt^2}{2} + \sigma_y(t) \frac{t}{\sqrt{3}},$$

где x_0 — это начальное отклонение шкалы времени (в дальнейших оценках будем считать $x_0 = 0$), y_0 — начальное отклонение относительной частоты, t — время в секундах, d — линейный дрейф частоты, $\sigma_y(t)$ — характеристика нестабильности частоты (модифицированная девиация Аллана).

Для простоты оценки в качестве шумовой составляющей, доминирующей на длительных интервалах времени измерения более суток, примем фликкерный частотный шум с уровнем $\sigma_y(t) = 2 \times 10^{-15}$. Максимально допустимое отклонение шкалы времени выберем равным 100 нс. Данная величина является характерной для задачи синхронизации в современных системах связи.

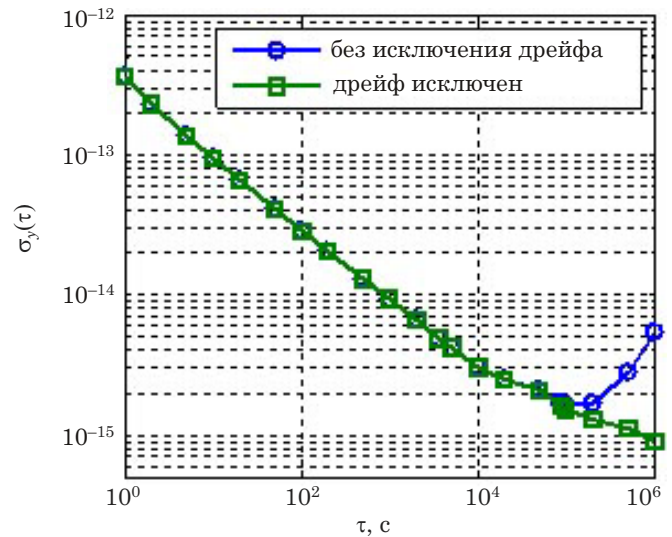


Рис. 2. Графики нестабильности частоты пассивного водородного стандарта (VCH-1008C № 121, 20.08.2022–24.09.2022)

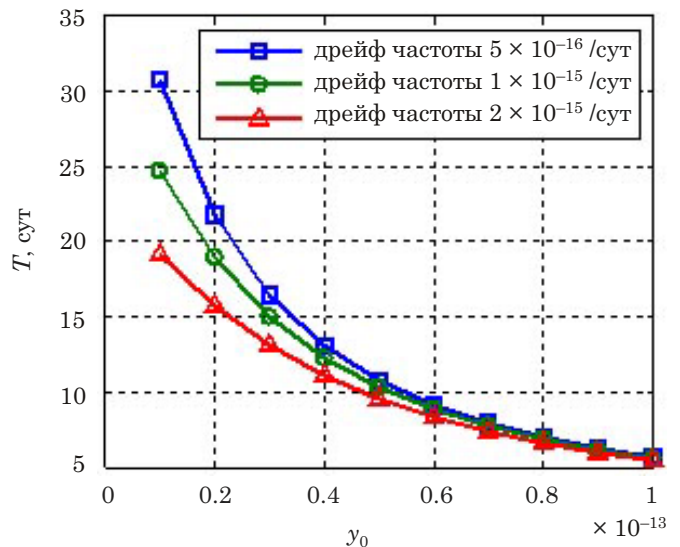


Рис. 3. Время хранения T шкалы для VCH-1008C в пределах 100 нс в зависимости от начальной ошибки установки частоты

При использовании приведенного выражения с указанными выше параметрами, получены графики зависимости времени автономной работы системы на основе пассивного водородного стандарта от величины начальной ошибки по частоте для различных значений дрейфа частоты (рис. 2). Из графика видно, что при относительно большом значении суточного дрейфа 2×10^{-15} и начальной ошибке по частоте 2×10^{-14} время хранения шкалы в пределах 100 нс составит 15 дней. Аналогичный расчет для времени хранения в пределах 1 мкс дает результат 65 дней.

Отметим, что современные многочастотные приемники сигналов ГНСС позволяют формировать шкалу времени со случайной погрешностью порядка 5 нс на уровне 1 σ , что обеспечивает значительно меньшую погрешность оценки отклонения частоты, чем 2×10^{-14} , на интервале измерения 15 суток. При высокой точности сличений и оптимальной оценке отклонения и дрейфа частоты пассивные водородные стандарты должны обеспечить более длительные интервалы хранения шкалы времени.

Полученные оценки определяют период выполнения коррекции шкалы времени хранителя в зависимости от его параметров и необходимой точности шкалы времени на выходе опорных часов системы. Периодичность сличений должна быть не меньше расчетного времени хранения шкалы с заданной точностью. Вычисление отклонения частоты атомных часов и дрейфа частоты целесообразно проводить на максимальном интервале времени, для которого выполняется условие стационарности ошибок оценивания. То есть интервал оценивания может быть больше периода коррекции. В этом случае коррекции фазы и частоты атомных часов учитываются при расчетах.

Применение хранителя, обеспечивающего высокую стабильность шкалы времени, позволяет реализовать ведущие часы с высокой степенью защиты от помех различного рода за счёт автономной работы хранителя и независимой системы сличения. Кроме того, применение специализированных систем обнаружения спуфинговой помехи также повышает устойчивость и защищённость данной системы ([Вексельман, 2022](#)).

Заключение

1. Основной проблемой систем частотно-временного обеспечения является недостаточная надёжность приёма сигналов эталонной шкалы времени ввиду весьма вероятного ухудшения помехозащищённости приёмников ГНСС, в том числе за счёт участвовавших ситуаций с постановкой преднамеренных помех, в первую очередь помех типа spoofing.

2. Наиболее перспективным решением проблемы обеспечения надёжности приёма шкалы

времени UTC является применение ведущих сетевых часов на основе прецизионных хранителей времени — квантовых стандартов частоты, т. е. технологии APNT. Для мобильных систем хранителями могут являться группы из рубидиевых стандартов частоты или высокостабильных кварцевых генераторов, собственная стабильность которых будет определять время автономной работы бортовой системы навигации и позиционирования.

3. Применение технологии APNT может быть положено в основу будущих когерентных систем частотно-временного обеспечения, которые позволят повысить надёжность формирования единых шкал времени и эталонной частоты для сети связи общего пользования.

4. Необходимо учитывать, что данные решения предполагают обязательный начальный этап установки шкалы времени UTC перед вводом в эксплуатацию. Длительность начальной синхронизации шкалы времени зависит от необходимой точности ведущих часов, а также от стабильности частоты хранителей и от времени автономного хранения шкалы. При этом в процессе начальной установки шкалы особое внимание должно уделяться контролю достоверности принимаемой шкалы UTC по всем независимым каналам приёма (не менее трех).

5. Для повышения надёжности работы с приемниками ГНСС следует использовать специализированные системы обнаружения помех типа spoofing, которые должны блокировать работу приёмников ГНСС на время постановки помехи.

Благодарность

Мишагин К. Г. выражает благодарность ННГУ им. Н. И. Лобачевского за финансовую поддержку по программе «Приоритет-2030».

Литература

- Вексельман М. И.* Безопасность систем синхронизации на основе ГНСС. Мониторинг качества навигационных систем // Радионавигация и время: труды СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ — АНТЕЙ». 2022. № 10 (18). С. 20–27.
- Рыжков А. В., Шварц М. Л., Аладин В. М., Исупов А. В.* Опыт внедрения систем частотно-временного обеспечения сетей связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 7. С. 21–28.
- Шварц М. Л., Рыжков А. В.* Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезиохронных до когерентных сетей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2021. Т. 4. С. 27–38.
- Allan D. W., Hellwig H.* Time deviation and time prediction error for clock specification, characterization, and application // IEEE 1978 Position Location and Navigation Symposium. 1978. P. 29–36.
- Cosart L., Imlau H., Zampetti G.* cnPRTC-coherent network primary reference time clock: a geographically distributed resilient timescale for telecommunications //

IEEE Communications Magazine. 2022. Vol. 61, no. 4. P. 28–32.

Panfilo G., Arias F. The coordinated universal time (UTC) // Metrologia. 2019. Vol. 56, no. 4. P. 042001.

Swaszek P. F., Hartnett R. J., Seals K. C. APNT for GNSS spoof detection // Proceedings of the 2017 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. 2017. P. 933–941.

Tavella P., Petit G. Precise time scales and navigation systems: mutual benefits of timekeeping and positioning // Satellite Navigation. 2020. Vol. 1. P. 1–12.

Wu Z., Zhang Y., Yang Y., et al. Spoofing and anti-spoofing technologies of global navigation satellite system: a survey // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 165444–165496.