



УДК 681.516.75

Особливості модернізації національної мережі єдиного часу з урахуванням досвіду впровадження сучасних технологій синхронізації часу в корпоративних мережах

М.В. Матвієнко, В.А. Гайдаманчук, І.М. ПастушенкоТОВ "ВІРКОМ", вул. Волоська, 23, оф. 1, 04070, Київ, Україна
mnv@wircom.ua**Анотація**

Статтю присвячено проблемам модернізації національної мережі єдиного часу (Служби єдиного часу і еталонних частот) в умовах зростання вимог до якості синхронізації часу та частоти в галузях, критичних до точності часу. Наразі забезпечення потреб різних споживачів у сигналах синхронізації точного часу є актуальним метрологічним завданням. Постановою Кабінету Міністрів України від 2 вересня 2015 року № 664 "Питання Служби єдиного часу і еталонних частот" затверджено Положення про Службу єдиного часу і еталонних частот, де визначено основні пріоритети щодо забезпечення споживачів України достовірною інформацією про точний час за допомогою державних еталонів одиниць часу і частоти. Головним центром Служби єдиного часу і еталонних частот визначено Національний науковий центр "Інститут метрології", м. Харків, де й знаходиться національний первинний еталон одиниць часу і частоти.

Подано порівняльний аналіз вимог до точності синхронізації часу в основних критичних галузях промисловості. Розглянуто способи доставки точних сигналів часу від національних еталонів часу в умовах вразливості прийому сигналів GNSS, а також наведено приклади технічних рішень з доставки сигналів точного часу віддаленим користувачам, що базуються на сучасних рекомендаціях ІТУ-Т та IEEE. Ці технічні рішення з успіхом можуть бути враховані при розбудові та модернізації Служби єдиного часу і еталонних частот. Наведено варіанти вирішення проблеми доставки сигналів синхронізації від національних еталонів частоти та часу до користувачів (клієнтів) із найменшою похибкою на основі сучасного обладнання з урахуванням можливостей протоколу RTP IEEE 1588–2008 як найбільш ефективного та точного способу синхронізації часу. Розглянуто основні фактори, які негативно впливають на точність мережі синхронізації часу, побудованої згідно з протоколом RTP 1588–2008, та надано рекомендації щодо мінімізації їх дії при модернізації Служби єдиного часу.

Наведено приклади використання різних типів обладнання синхронізації, ґрунтуючись на наявному досвіді при вирішенні подібних завдань у сучасних корпоративних (галузевих) мережах синхронізації, таких як мобільний зв'язок, енергетика та фінанси.

Ключові слова: синхронізація часу, RTP, Служба єдиного часу, UTC, NTP.

Отримано: 13.12.2018

Відредаговано: 28.01.2019

Схвалено до друку: 04.02.2019

Вступ

Сьогодні в різних галузях промисловості все частіше виникає необхідність забезпечення споживачів точними сигналами синхронізації часу та частоти. Поряд із підвищенням вимог до точності часу підвищилися також вимоги до надійності забезпечення сигналами синхронізації часу. Вирішення проблеми розповсюдження сигналів точного часу та частоти для забезпечення діяльності сучасної промисловості вимагає термінової модернізації Служби єдиного часу і еталонних частот України.

Положенням про Службу єдиного часу і еталонних частот, затвердженим Постановою Кабінету Міністрів України від 2 вересня 2015 року № 664 "Питання Служби єдиного часу і еталонних частот", визначено основні завдання Служби, які покладено на структурний підрозділ Національного наукового центру "Інститут метрології" (м. Харків), серед яких — відтворення та зберігання національної шкали часу UTC (UA), порівняння її зі шкалою Всесвітнього координованого часу UTC, формування та передавання еталонних сигналів каналами радіо, телебачення, зв'язку та Інтернету,

© ННЦ «Інститут метрології», 2019

і забезпечення споживачів цих сигналів необхідною інформацією довідкового характеру.

Найбільш розповсюдженим джерелом сигналів синхронізації точного часу в Україні є GPS, але вони, так само як інші системи GNSS, вразливі до різноманітних навмисних і ненавмисних перешкод, що не забезпечує високої надійності доставки сигналів синхронізації точного часу до критично чутливих до точності споживачів. Для забезпечення надійності отримання сигналів точного часу як джерела сигналів синхронізації доцільно використовувати національні еталони часу та частоти. В цьому випадку важливим є вибір оптимальних методів доставки сигналів синхронізації часу та частоти від національних еталонів часу до споживача та їх надійного резервування.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Корпоративні системи синхронізації часу, а це — зв'язок, енергетика, фінансові установи, системи оборони, аварійні служби, навігація, транспорт, накопичили значний позитивний досвід зі створення інфраструктури для доставки сигналів синхронізації віддаленим користувачам із гарантованою якістю. Принципи побудови таких систем ураховують також фактор вразливості прийому GNSS сигналів.

Для забезпечення необхідної точності часу на рівні кінцевого споживача потрібно враховувати основні фактори, які впливають на точність часу, а саме: точність джерела часу, тип мережевого протоколу часу, архітектуру мережі синхронізації та досконалість задіяного обладнання.

Найбільш розповсюдженими джерелами опорних сигналів для серверів часу в мережах синхронізації є GNSS приймачі. Але системи GNSS вразливі до ненавмисних відключень, викликаних механічними пошкодженнями, а також до дії різноманітних завад, що виникають унаслідок електромагнітного випромінювання промислових та побутових пристроїв, устаткування та кабельних ліній. Вони вразливі також до природних дестабілізуючих факторів, таких як влучання блискавки, обмерзання антен, сонячні спалахи, різні атмосферні явища. Загрозу для систем GNSS становлять і навмисні перешкоди та підміни сигналу від супутників GNSS (Jamming та Spoofing), які можуть застосовуватися зловмисниками.

Асоціація телекомунікаційних організацій США (ATIS) [1] для збільшення надійності систем синхронізації часу рекомендує використовувати сигнали від альтернативних джерел часу, які передаються по альтернативних каналах зв'язку (супутникового, волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ)).

Одним із перспективних вирішень проблеми є отримання сигналу точного часу від національного еталона часу. Мережа, по якій необхідно доставити сигнал синхронізації часу до серверів часу з мінімальною похибкою, може охоплювати велику площу, а затримка сигналу по волокну має бути мінімальною. Також має бути мінімальною і асиметрія мережі. Експериментальні результати підтверджують, що, наприклад, при використанні ВОЛЗ довжиною декілька сотень кілометрів можна досягти точності часу < 1 нс [2, 3].

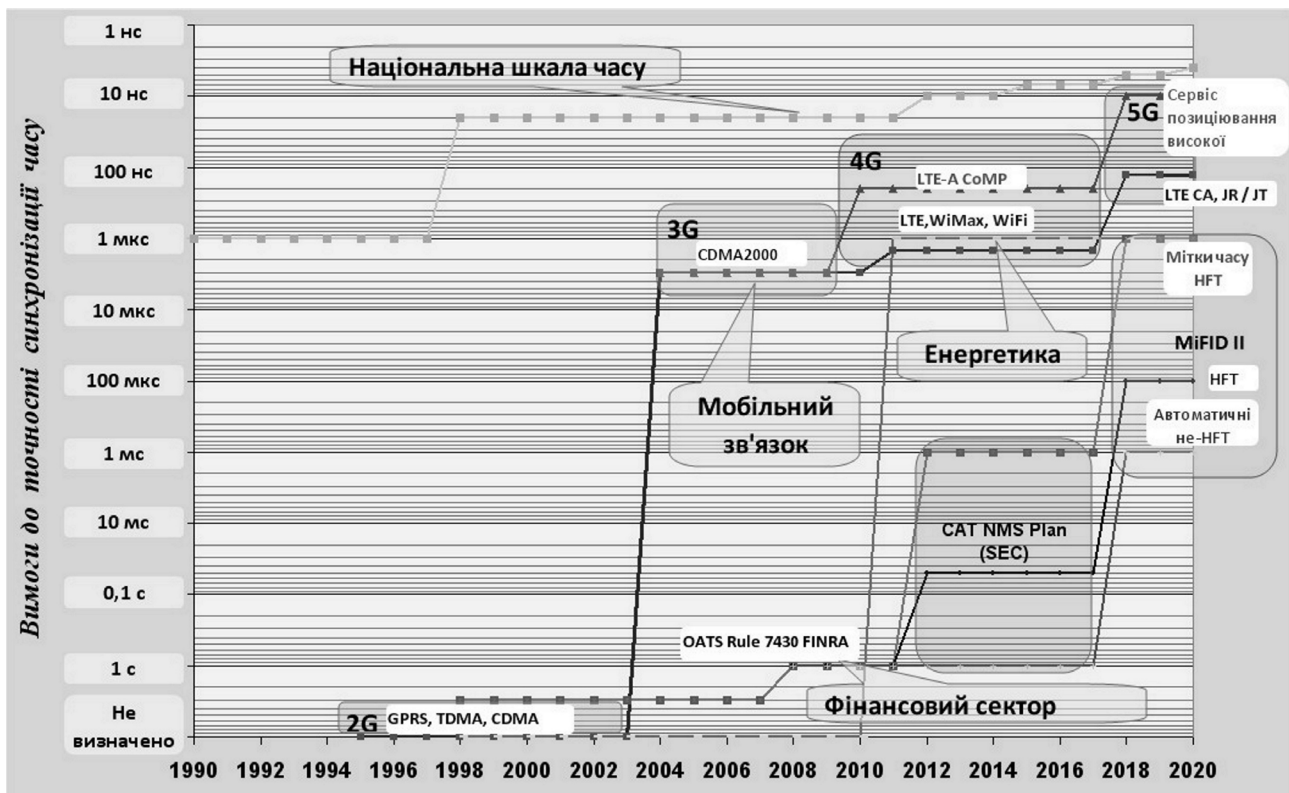


Рис. 1. Зростання вимог до точності синхронізації часу в основних галузях, критичних до точності синхронізації часу

У процесі модернізації національної мережі єдиного часу проблеми доставки сигналу точного часу від джерела національних еталонів часу до кінцевого споживача досліджуються та вимагають оптимального рішення з урахуванням специфічних вимог сервісів споживачів. На рис. 1 наведено графік зростання вимог до точності синхронізації часу в основних галузях, критичних до точності синхронізації часу, а саме у зв'язку, енергетиці, промислових системах керування, фінансових установах. З діаграми видно, що особливо зросли вимоги до точності синхронізації часу з упровадженням новітніх технологій мобільного зв'язку. Так, як резервне джерело синхронізації точного часу при впровадженні стандарту мобільного зв'язку 5G можуть бути задіяні національні еталони часу [2], оскільки лише вони за межами мережі синхронізації мобільного зв'язку мають необхідну для 5G точність часу.

У зв'язку з різким збільшенням попиту на забезпечення сигналами синхронізації точного часу в різних галузях (урядові мережі, потреби оборони та ін.) з точністю не гірше, ніж 1 мкс, виникає потреба в модернізації національної мережі єдиного часу та вирішенні проблеми доставки сигналу точного часу від національного еталона часу до кінцевого споживача з урахуванням специфічних вимог кінцевих споживачів державних, а також комерційних установ із забезпеченням високої точності шкали часу.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження можливості використання технічних рішень і профайлів РТР ІТУ-Т та ІЕЕЕ, розроблених для корпоративних служб єдиного часу в сферах зв'язку та енергетики у відповідності до протоколу ІЕЕЕ 1588–2008, при розбудові національної мережі єдиного часу.

Модернізація національної мережі єдиного часу з урахуванням досвіду розбудови сучасних корпоративних мереж синхронізації часу

Використання ВОЛЗ для доставки міток часу до споживача є найбільш розповсюдженим. Для передачі сигналів синхронізації часу по оптичних волокнах використовуються як односторонні протоколи (1PPS та IRIG-B), так і двосторонні (NTP та РТР). При використанні односторонніх протоколів необхідне тільки одне волокно, але в цьому випадку на точність часу впливає залежність дисперсії у волокні від температури, й тому ці протоколи використовуються при передачі сигналів часу на короткі відстані. Двосторонні ж протоколи дозволяють компенсувати асиметрію волокон та коливання дисперсії у волокні. Для передачі сигналу синхронізації часу з високою точністю від національних еталонів часу можуть бути використані як спеціально розроблені для цього двосторонні

протоколи, так і протоколи, призначені для синхронізації часу в пакетних мережах.

Для передачі сигналів синхронізації по пакетній мережі застосовують протоколи NTP та РТР. NTP протокол використовується у випадках, якщо потрібна точність синхронізації часу не менше ніж 1 мс. Наприклад, NTP протокол використовується у системах із застосуванням електронного підпису, де час, який використовується в електронній позначці часу, має бути синхронізований із Всесвітнім координованим часом (UTC) з точністю до однієї секунди (Постанова Кабінету Міністрів України від 26 травня 2004 року № 680 “Про затвердження Порядку засвідчення наявності електронного документа (електронних даних) на певний момент часу”). У випадку ж, коли необхідно передавати сигнали синхронізації часу точніше ніж 1 мс, потрібно використовувати протокол РТР.

При передачі сигналів синхронізації по пакетній мережі слід ураховувати можливі складові похибки, які виникають при проходженні пакетів по мережі — постійну складову похибки, яка виникає за рахунок наявності мережевої асиметрії та затримки буферизації пакетів, і динамічну складову похибки. При передачі сигналів синхронізації за протоколом РТР асиметрія затримки пакетів виникає й унаслідок зміни швидкості інтерфейсу елементів мережі РТР. В рекомендаціях ІТУ-Т G.8271 [4] розглянуто випадок, коли сервер РТР ввімкнений у мережу GE (1000 Мбіт/с), а клієнт — у мережу FE (100 Мбіт/с). У цьому випадку виникає асиметрія, сформована за рахунок буферизації кадрів. Очікувану асиметрію можна оцінити, спираючись на розмір пакета повідомлень РТР та швидкість інтерфейсів. У цьому випадку вона становить 2952 нс [4]. Таку асиметрію можна компенсувати за допомогою механізму компенсації асиметрії, визначеного в розділі 11.6 ІЕЕЕ 1588–2008 [5].

Причинами виникнення асиметрії також є:

- використання різних довжин хвиль у прямому та зворотному напрямках при застосуванні технології DWDM в оптичній мережі (20–100 нс на 100 км);
- при передачі сигналів синхронізації окремими волокнами (40–80 нс на 100 км);
- різна довжина волокна (для 1 % різниці в довжині на проміжку 100 км — 4,9 мкс);
- через різний показник заломлення волокон (до 3 мкс на 100 км — стандартне волокно G.652).

Відповідно до висунутих вимог щодо точності синхронізації часу при модернізації національної мережі єдиного часу необхідно врахувати вищенаведені причини виникнення похибки синхронізації часу і в разі необхідності застосовувати технології компенсації асиметрії (APTS) та різноманітні режими, передбачені протоколами РТР ІЕЕЕ 1588–2008 [5].

Приклад реалізації мережі синхронізації часу (фрагмент) національної мережі єдиного часу за допомогою протоколу РТР зображено на рис. 2.

Національна система шкали точного часу

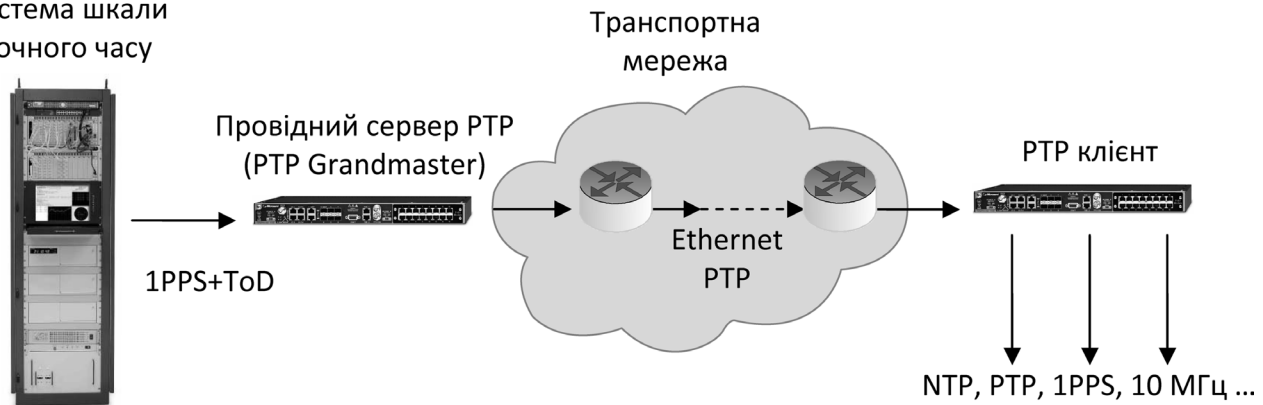


Рис. 2. Приклад мережі синхронізації часу (фрагмент) національної мережі єдиного часу, реалізованої за допомогою протоколу PTP

Від національного еталона часу провідний сервер PTP (PTP Grandmaster) одержує сигнал 1PPS і код часу та дати ToD і забезпечує взаємобмін із клієнтом PTP (PTP Client) пакетами по оптичній мережі. PTP клієнт формує необхідні для споживачів сигнали точного часу або частоти (NTP, PTP, 1PPS, 10 МГц та ін.). Точність часу споживача, як зазначено вище, в цьому випадку буде залежати від архітектури мережі та розподілу похибки часу між елементами мережі й відповідного класу точності обладнання. Для забезпечення найвищої точності передачі сигналів синхронізації провідний сервер PTP, PTP клієнт та елементи транспортної мережі мають підтримувати один і той же галузевий профайл PTP, який гарантує необхідну точність часу в мережі (наприклад, один з наступних профайлів: Telecom profile або Power profile). Елементи транспортної мережі, крім цього, мають виконувати функції граничного (Boundary clock) або прозорого шлюзу (Transparent clock) для PTP. Для досягнення нормативної точності часу в мережі відповідний профайл PTP забезпечує необхідні для цього налаштування всіх елементів мережі синхронізації, встановлює обмеження та розширення в мережі, дозволені та заборонені пристрої в мережі.

Якщо провідний сервер PTP (PTP Grandmaster) територіально розташований на деякій відстані від місця розташування національної системи шкали точного часу, й у цьому випадку неможливо забезпечити якісну передачу сигналів 1PPS+ToD по електричних лініях зв'язку, то доцільно їх передавати по оптичних лініях із застосуванням репітерів TTL- Fiber та Fiber-TTL (медіаконвертерів). Схему реалізації оптичної лінії для передачі сигналів синхронізації від національних еталонів часу до сервера PTP зображено на рис. 3. Оскільки лінія одностороння, то необхідно провести калібрування лінії та ввести поправку часу. Звичайно, при проектуванні такої лінії необхідно враховувати також динамічну складову похибки та вибрати відповідне обладнання з необхідними характеристиками.

Серед прикладів практичної реалізації національної мережі єдиного часу за допомогою PTP протоколу по оптичних волокнах є дослідження можливості передачі сигналів часу по телекомунікаційній мережі в США [6]. CRADA з NIST, CENTRY LINC за підтримки Microsemi в 2016 р. провели дослідження з передачі сигналів синхронізації часу за допомогою протоколу PTP по оптичній мережі OTN від пункту Боулдер (NIST) до пункту Шрайвер (USNO) на відстань 150 км (рис. 4).

Національна система шкали точного часу

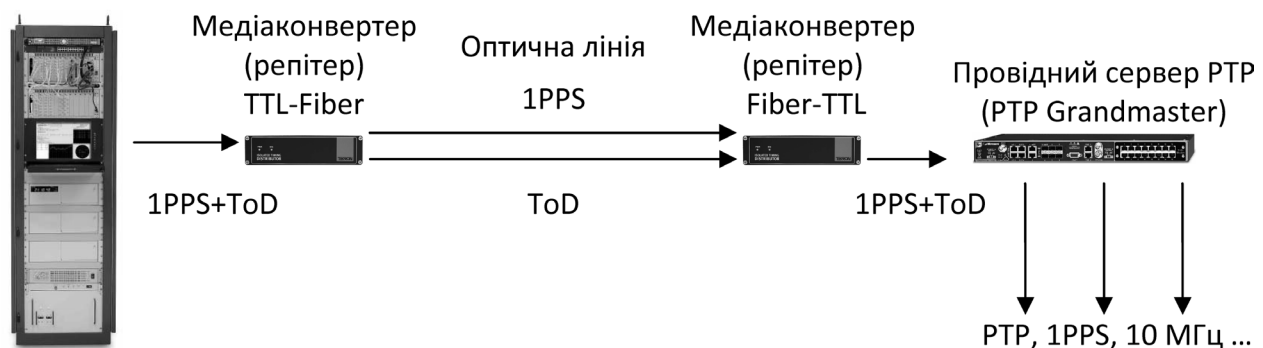


Рис. 3. Схеми реалізації оптичної лінії для передачі сигналів синхронізації від національних еталонів часу до провідного сервера PTP

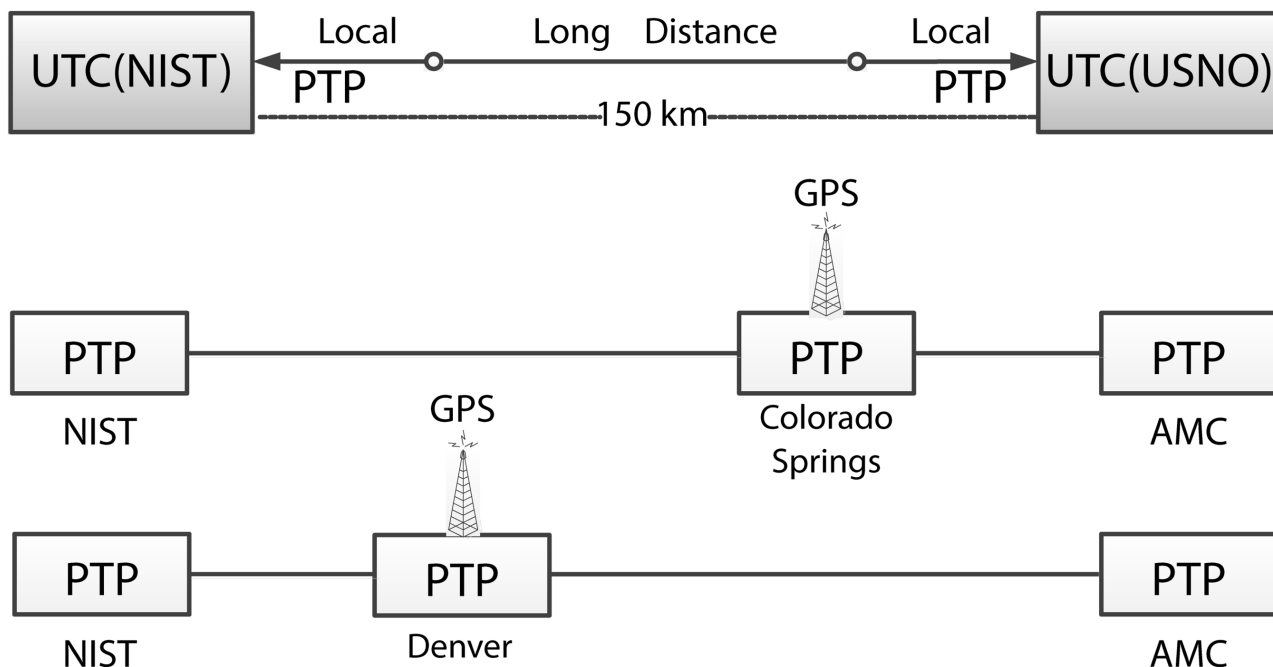


Рис. 4. Схема дослідження можливості передачі сигналів часу по корпоративній мережі оператора зв'язку

При вимірюванні якості сигналів синхронізації часу на цій мережі асиметрія в мережі становила 14 мкс, затримка сигналу синхронізації — 2,7 мс, максимальна похибка часу із застосуванням технології компенсації асиметрії APTS (встановлені граничні шлюзи (Boundary clock) у містах Колорадо-Спрінгз та Денвер) та профайлу PTP ITU-T G.8275.2 (Telecom profile) становила 36 нс.

Дані дослідження показали, що за допомогою протоколу PTP по оптичній мережі OTN можна створити мережу синхронізації часу за умови дотримання мережами зв'язку вимог ITU-T. Похибка часу при передачі сигналів синхронізації може становити <100 нс за умови компенсації мережевої асиметрії за допомогою технології APTS.

Іншим прикладом практичної реалізації національної мережі єдиного часу за допомогою PTP протоколу по ВОЛЗ є мережа на основі національного стандарту Великої Британії — NPL [7–9], створеного відповідно до вимог MiFID II RTS 25 для забезпечення фінансових структур сигналами синхронізації часу. Сервіс NPLTime® використовує національну шкалу часу Великої Британії UTC (NPL) для поширення сигналу часу по ВОЛЗ безпосередньо клієнтам у місті Лондон. Таким чином повністю усунуто залежність фінансових закладів від вразливості GNSS. Система використовує волоконно-оптичні канали, забезпечуючи максимальну стійкість та безпеку. Всі елементи мережі синхронізації (провідний сервер PTP (PTP Grandmaster), комутатори, граничний шлюз (Boundary clock)) використовують профайл PTP IEEE C38.238 (Power profile). Від національної шкали часу Великої Британії UTC (NPL) сигнали синхронізації часу по ВОЛЗ довжиною 74 км передаються на сайт телеко-

мунікаційної компанії TELEHAUSE і далі по ВОЛЗ довжиною близько 80 км — у дата-центр компанії Intercontinental Exchange (ICE). Сервіс забезпечує точність синхронізації часу між провідним сервером PTP, розташованим в NPL, та граничним шлюзом PTP, розташованим на сайті компанії TELEHAUSE, не гірше ніж 200 нс. Таку точність часу забезпечено і між сайтом компанії TELEHAUSE та дата-центром компанії ICE. Для забезпечення надійності по всій мережі використовується “гаряче” резервування, а у випадку пошкодження лінії точність часу мережі забезпечується цезієвим стандартом частоти Microsemi 5071A. Таким чином, сервіс NPLTime® забезпечує точність синхронізації часу клієнтів компанії ICE на рівні не гірше ніж 1 мкс, як того і вимагає норматив MiFID II RTS 25.

Висновки

Національні еталони і стандарти частоти та часу тільки за наявності відповідної розгалуженої інфраструктури (мереж доставки сигналів частот та часу) можуть бути доступними, як основними, так і резервними, джерелами сигналів синхронізації часу та частоти для споживачів у критично важливих галузях діяльності країни.

При модернізації національної мережі єдиного часу для передачі сигналів синхронізації доцільно враховувати досвід вирішення подібних завдань на галузевому рівні (зв'язок, енергетика, фінанси).

Для зменшення впливу дестабілізуючих факторів, безумовно, доцільним є використання в таких мережах обладнання для підтримки доставки сигналів синхронізації, що відповідає рівню вимог стандартів ITU-T та IEEE різних профайлів.

Особенности модернизации национальной сети единого времени с учетом опыта внедрения современных технологий синхронизации времени в корпоративных сетях

Н.В. Матвиенко, В.А. Гайдаманчук, И.Н. Пастушенко

ООО "ВИРКОМ", ул. Волошская, 23, оф. 1, 04070, Киев, Украина
mnv@wircom.ua

Аннотация

Статья посвящена проблемам модернизации национальной сети единого времени (Службы единого времени и эталонных частот) в условиях роста требований к качеству синхронизации времени и частоты в отраслях, критичных к точности времени. Сейчас обеспечение потребностей различных потребителей в сигналах синхронизации точного времени является актуальной метрологической задачей. Постановлением Кабинета Министров Украины от 2 сентября 2015 № 664 "Вопросы Службы единого времени и эталонных частот" утверждено Положение о Службе единого времени и эталонных частот, где определены основные приоритеты по обеспечению потребителей Украины достоверной информацией о точном времени с помощью государственных эталонов единиц времени и частоты.

Представлен сравнительный анализ требований к точности синхронизации времени в основных критических отраслях промышленности. Рассмотрены способы доставки точных сигналов времени от национальных эталонов времени в условиях уязвимости приема сигналов GNSS, а также приведены примеры технических решений по доставке сигналов точного времени удаленным пользователям, основанные на современных рекомендациях ИТУ-Т и IEEE. Эти технические решения с успехом могут быть учтены при развитии и модернизации Службы единого времени и эталонных частот. Приведены варианты решения проблемы доставки сигналов синхронизации от национальных эталонов частоты и времени к пользователям (клиентам) с наименьшей погрешностью на основе современного оборудования с учетом возможностей протокола PTP IEEE 1588–2008 как наиболее эффективного и точного способа синхронизации времени. Рассмотрены основные факторы, которые негативно влияют на точность сети синхронизации времени, построенной по протоколу PTP 1588–2008, и даны рекомендации по минимизации их действия при модернизации Службы единого времени.

Приведены примеры использования различных типов оборудования синхронизации, основываясь на имеющемся опыте при решении подобных задач в современных корпоративных (отраслевых) сетях синхронизации, таких как мобильная связь, энергетика и финансы.

Ключевые слова: синхронизация времени, PTP, Служба единого времени, UTC, NTP.

Features of modernization of the National network of universal time based on the experience of introducing modern time synchronization solutions in corporate networks

M. Matvienko, V. Gaidamanchuk, I. Pastuschenko

"WIRCOM" LLC, Voloska Str., 23, off. 1, 04070, Kyiv, Ukraine
mnv@wircom.ua

Abstract

The article is devoted to the problems of modernization of the National network of universal time (The Service of universal time and reference frequencies) in the conditions of increasing requirements for the synchronization quality of time and frequency in sectors critical to the accuracy of time. At present, meeting the needs of different consumers in synchronization signals of the exact time is an urgent metrological task. The Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 664 "Issues of the Service of universal time and reference frequencies", dated September 2, 2015, approved the Regulations on the universal time and reference frequencies, which defines the main priorities for providing Ukrainian consumers with reliable information on the exact time using the state measurement standards of the units of time and frequency.

The paper presents a comparative analysis of time synchronization accuracy requirements in the main critical industry sectors.

Ways of delivering accurate time signals from national time measurement standards in the context of GNSS vulnerability are considered, an examples of technical solutions for delivering accurate time signals to remote users based on current ITU-T and IEEE recommendations are provided.

These technical solutions can be successfully taken into account for the development and modernization of the Service of universal time and reference frequencies. Solutions to the problem of synchronization signals delivery from national time and frequency measurement standards to users (customers) with the smallest error, based on modern equipment and taking into account the capabilities of the PTP IEEE 1588–2008 protocol as the most efficient and accurate time synchronization method, are considered. The main factors that negatively affect the accuracy of the time synchronization network constructed in accordance with the PTP 1588–2008 protocol are considered, and recommendations are given to minimize their impact while modernizing the Service of universal time.

The paper presents examples of the use of various types of synchronization equipment, based on existing experience in solving such problems in modern corporate (sector) synchronization networks, such as mobile communications, energy and finance.

Keywords: time synchronization, PTP, Service of universal time, UTC, NTP.

Список літератури

1. ATIS-0900005. ATIS Technical Report on GPS Vulnerability [Approved September 7, 2017]. Washington, Alliance for Telecommunications Industry Solutions, 2017. 18 p.
2. Han Li, Liuyan Han, Ran Duan, Geoffrey M. Garner. Analysis of the Synchronization Requirements of 5G and Corresponding Solutions. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2017, vol. 1, issue 1, pp. 52–58.
3. Krehlik P. et al. ELSTAB-Fiber Optic Time and Frequency Distribution Technology: A General Characterization and Fundamental Limits. *IEEE Transactions of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, vol. 63, no. 7, pp. 993–1004.
4. Rec. ITU-T G.8271/Y.1366 (08/2017). Time and phase synchronization aspects of telecommunication networks. Appendix V. Delay asymmetry resulting from interface rate change in PTP-unaware network elements. Geneva, 2017, p. 31.
5. IEEE Std 1588–2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. July 2008. DOI: 10.1109/IEEESTD.2008.4579760
6. Weiss M., Cosart L., Hanssen J., Yao J. Precision Time Transfer using IEEE 1588 over OTN through a Commercial Optical Telecommunications Network: *Proceedings of 2016 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS 2016)* (Stockholm, Sweden, 4–9 September 2016). 112 p.
7. NPL Time[®]. A resilient, traceable and certified time distribution service for the financial sector that completely eliminates reliance on GPS. URL: <http://www.npl.co.uk/commercial-services/products-and-services/npltime>.
8. English E. UTC Traceable Time for the Financial Sector using PTP. URL: http://www.telecom-sync.com/files/pdfs/itsf/2015/day2/0855_NPL-UTC_Traceable_Time-upload.pdf
9. Whibberley P., Yates A., Owczarek W., English E., Lobo L. NPL Time[®] — certified time for the financial sector. URL: <https://www.mentadata.es/wp-content/uploads/2015/10/NPL-ICE-whitepaper-FINAL.pdf>

References

1. ATIS-0900005. ATIS Technical Report on GPS Vulnerability [Approved September 7, 2017]. Washington, Alliance for Telecommunications Industry Solutions, 2017. 18 p.
2. Han Li, Liuyan Han, Ran Duan, Geoffrey M. Garner. Analysis of the Synchronization Requirements of 5G and Corresponding Solutions. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 52–58.
3. Krehlik P. et al. ELSTAB-Fiber Optic Time and Frequency Distribution Technology: A General Characterization and Fundamental Limits. *IEEE Transactions of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, vol. 63, no. 7, pp. 993–1004.
4. Rec. ITU-T G.8271/Y.1366 (08/2017). Time and phase synchronization aspects of telecommunication networks. Appendix V. Delay asymmetry resulting from interface rate change in PTP-unaware network elements. Geneva, 2017, p. 31.
5. IEEE Std 1588–2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. July 2008. DOI: 10.1109/IEEESTD.2008.4579760
6. Weiss M., Cosart L., Hanssen J., Yao J. Precision Time Transfer using IEEE 1588 over OTN through a Commercial Optical Telecommunications Network: *Proceedings of 2016 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS 2016)* (Stockholm, Sweden, 4–9 September 2016). 112 p.
7. NPL Time[®]. A resilient, traceable and certified time distribution service for the financial sector that completely eliminates reliance on GPS. Available at: <http://www.npl.co.uk/commercial-services/products-and-services/npltime>
8. English E. UTC Traceable Time for the Financial Sector using PTP. Available at: http://www.telecom-sync.com/files/pdfs/itsf/2015/day2/0855_NPL-UTC_Traceable_Time-upload.pdf
9. Whibberley P., Yates A., Owczarek W., English E., Lobo L. NPL Time[®] — certified time for the financial sector. Available at: <https://www.mentadata.es/wp-content/uploads/2015/10/NPL-ICE-whitepaper-FINAL.pdf>