

УДК 520.272.2: 621.396.677.494

ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ СИСТЕМИ ЧАСУ ТА ЧАСТОТИ РНДБ РАДІОТЕЛЕСКОПА В НАЦІОНАЛЬНУ СЛУЖБУ ЄДИНОГО ЧАСУ ТА ЕТАЛОННИХ ЧАСТОТ

DOI 10 36994 / 2788- 5518- 2022-02-04-03

Гайдаманчук В.А., к.т.н. WIRCOM, Київ, Україна. gva@wircom.ua

Матвієнко М.В. WIRCOM, Київ, Україна. mnv@wircom.ua

Пастушенко І.М. WIRCOM, Київ, Україна. inp@wircom.ua

Анотація: Статтю присвячено особливостям модернізації Національної служби єдиного часу та еталонних частот (НСЄЧЕЧ) для підвищення її надійності та доступності для користувачів за рахунок включення в її склад системи часу та частоти, яка розроблена для забезпечення потреб РНДБ (Радіоінтерферометрія з НадДовгою Базою) радіотелескопа. В роботі подано характеристики, які повинна забезпечувати система частоти та часу РНДБ радіотелескопа. Розглянуто основні принципи побудови системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа RT-32 на базі антенної системи MARK-4B та технічні передумови для її інтеграції в НСЄЧЕЧ. Наведені приклади технічних рішень з побудови системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа, можливостей обміну сигналами точного часу по оптичній мережі загального користування між такою системою та еталонами частоти та часу, які входять до складу НСЄЧЕЧ.

Ключові слова: радіотелескоп, синхронізація часу, синхронізація частоти, служба єдиного часу та еталонних частот, мазер, РНДБ, RT-32, VLBI, EVN, BIPM, GPS, GNSS, PTP, PTSS, UTC, ITU.

FEATURES OF THE VLBI RADIO TELESCOPE PRECISE TIME SCALE SYSTEM INTEGRATION INTO THE NATIONAL TIME SYNCHRONIZATION AND REFERENCE FREQUENCIES SERVICE

Viktor Gaidamanchuk, Ph.D. WIRCOM, Kyiv, Ukraine. gva@wircom.ua

Mykola Matvienko. WIRCOM, Kyiv, Ukraine. mnv@wircom.ua

Ihor Pastushenko. WIRCOM, Kyiv, Ukraine. inp@wircom.ua

Abstract: The article is devoted to the problems of the possibility of expanding the time synchronization and reference frequencies service by including in its composition a time and frequency system designed to meet the needs of the VLBI radio telescope. The paper presents the characteristics provided by the frequency and time system of the VLBI (Very Long Baseline Interferometry) radio telescope. The basic principles of building the frequency and time system of the VLBI radio telescope and the technical prerequisites for its integration into the time synchronization and reference frequencies service were considered. Examples of technical solutions for building frequency and time system for VLBI radio telescope RT-32 Zolochiv and delivering accurate time signals to remote users based on modern ITU-T and IEEE recommendations are given. These technical solutions can be successfully taken into account during the development and modernization of the time synchronization and reference frequencies service. The main factors that ensure the compatibility of the time and frequency system of the VLBI radio telescope and time synchronization and reference frequencies service are considered. The need to improve the frequency and time system of the VLBI radio telescope by means of the addition of atomic standards and the use of system solutions for the organization of the group time scale is substantiated, which makes it possible to achieve the level of characteristics that provide both the requirements for the frequency and time stability of radio telescopes of the European VLBI Network (EVN) level and allow to integrate into the National time synchronization and reference frequencies service. The results of the research also demonstrate the possibility of integrating the frequency and time systems of the VLBI radio telescope and National time synchronization and reference frequencies service using PTP IEEE 1588-2008 protocol (Profile PTP unicast ITU-T G.8275.2) and the DWDM public optical network «Eurotranstelecom» (Ukraine) for their connection at distances up to 760 km.

Key words: radio telescope, timing, time synchronization and reference frequencies service, time scale system, maser, VLBI, RT-32, EVN, BIPM, GPS, GNSS, PTP, PTSS, UTC, ITU.

Вступ

Поряд з підвищенням вимог до точності часу підвищуються також вимоги до надійності забезпечення сигналами синхронізації часу в різних галузях критичної інфраструктури. Як відомо, найбільш розповсюдженим та доступним джерелом сигналів синхронізації точного часу є сигнали GPS, але вони, як і сигнали інших систем GNSS, вразливі до різноманітних перешкод, що не забезпечує високої надійності доставки сигналів синхронізації точного часу до критично чутливих до точності споживачів. Крім того, вони вразливі також до природних дестабілізуючих факторів, таких як влучання блискавки, обмерзання антен, сонячні спалахи, атмосферні явища. Загрозу для систем GNSS становлять також навмисні перешкоди, які можуть спеціально застосовуватися зловмисниками.

Асоціація телекомунікаційних організацій США (ATIS) для збільшення надійності систем синхронізації часу рекомендує використовувати в якості резервних сигнали від альтернативних до GNSS джерел часу відповідної якості [1]. Одним із вирішень проблеми є використання сигналів точного часу Національної служби єдиного часу і еталонних частот (НСЄЧЕЧ) [2]. Для цього мережа, по якій необхідно доставити сигнал синхронізації часу до серверів часу з мінімальною похибкою, повинна охоплювати велику площу і затримка сигналу по лінії зв'язку (оптичному волокну) має бути мінімальною, а тому є доцільним прагнути до побудови НСЄЧЕЧ на основі ансамблю еталонів з їх оптимальним наближенням до споживачів сигналів в регіонах. При цьому дуже важливим стає або створення додаткових еталонів для досягнення цієї мети або інтеграція в НСЄЧЕЧ вже наявних в країні технічних рішень, якщо їх рівень характеристик відповідає вимогам до еталонів, з яких складається НСЄЧЕЧ.

Безумовно, до одних з найбільш відповідних для досягнення такої мети технічних рішень належать системи частоти та часу, які застосовуються в РНДБ радіотелескопів. Тому у разі наявності в країні РНДБ радіотелескопів є раціональним розглядати їх системи частоти та часу як наявний резерв для інтеграції в НСЄЧЕЧ з метою підвищення як її надійності, так і регіональної доступності її сервісів, зважаючи на певні мережеві обмеження доставки прецизійних сигналів часу споживачам.

Виконання досліджень

На рис. 1 представлені характеристики атомних стандартів частоти, на основі яких працюють системи частоти та часу радіотелескопів РНДБ [3] і які також входять як еталони до складу НСЄЧЕЧ. Системи частоти та часу РНДБ радіотелескопів, а також первинні та вторинні еталони частоти та часу НСЄЧЕЧ базуються на формуванні автономної атомної групової шкали часу з використанням атомних (Maser, Cs) стандартів частоти з можливістю зв'язування цієї шкали з Національною шкалою часу або шкалою часу UTC з високою точністю. Відомим технічним рішенням побудови таких систем є розробка компанії Symmetricom – Precise Time Scale System (PTSS) [4].

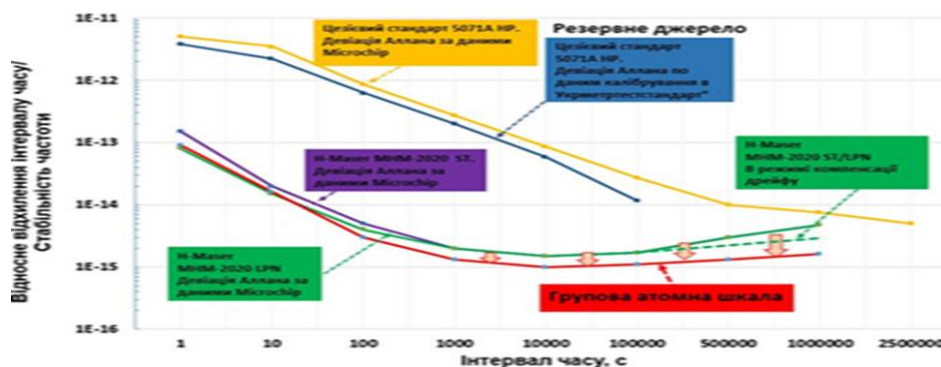


Рис.1. Характеристики атомних стандартів та групової атомної шкали часу системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа після її удосконалення

Це повноцінний апаратно-програмний комплекс з можливістю формування автономної атомної шкали часу на базі атомних стандартів частоти (Maser, Cs), функцією звірення цієї шкали з шкалами часу UTC з високою точністю та базою даних розходження цих шкал. Враховуючи це, система частоти та часу РНДБ радіотелескопа при застосуванні відповідного рівня обладнання технічно може забезпечити рівень параметрів, який задовольнить вимогам НСЄЧЕЧ [5]. Структурна схема базового технічного рішення такої системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа RT-32 [6,7], реалізованого на основі обладнання Microchip, представлена на рис. 2. Зовнішній вигляд стенда з обладнанням, яке входить до складу системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа RT-32 – на рис. 3.

Результати визначення похибки вимірювання розходження автономної шкали часу (на основі цезієвого стандарту 5071A) та шкали часу UTC, сформованої PTP сервером TimeProvider 4100 (вихід 1PPS) протягом 11-ти діб в процесі дослідної експлуатації (СКВ похибки, не більше 8,48 нс) подані на рис. 4.

В подальшому така система часу та частоти може бути вдосконалена за рахунок додавання атомних стандартів та використання групової шкали часу (рис. 5, 6), що дозволить при такій реалізації досягнути рівня характеристики «Групова атомна шкала», поданої на рис. 1, і ефективно забезпечувати як вимоги до стабільності частоти та часу сучасних мереж РНДБ радіотелескопів, таких як EVN (European VLBI Network), так і вимоги до Національних еталонів частоти та часу відповідно до вимог BIPM [8].

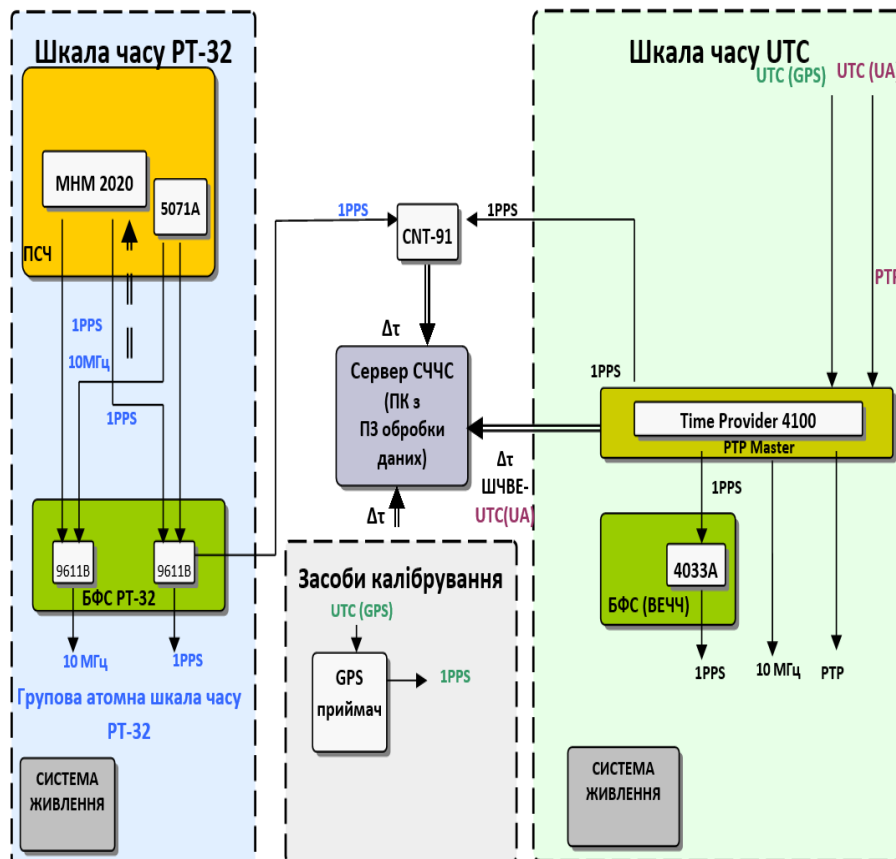


Рис. 2. Структурна схема системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа RT-32



Рис. 3. Зовнішній вигляд системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа RT-32 Золочів

Важливим технічним завданням, яке необхідно вирішити для реалізації інтеграції системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа в НСЄЧЕЧ, є її під'єднання за допомогою оптичних чи супутникових технологій до одного з Національних еталонів для проведення періодичних сеансів звірення їх шкал часу [9].

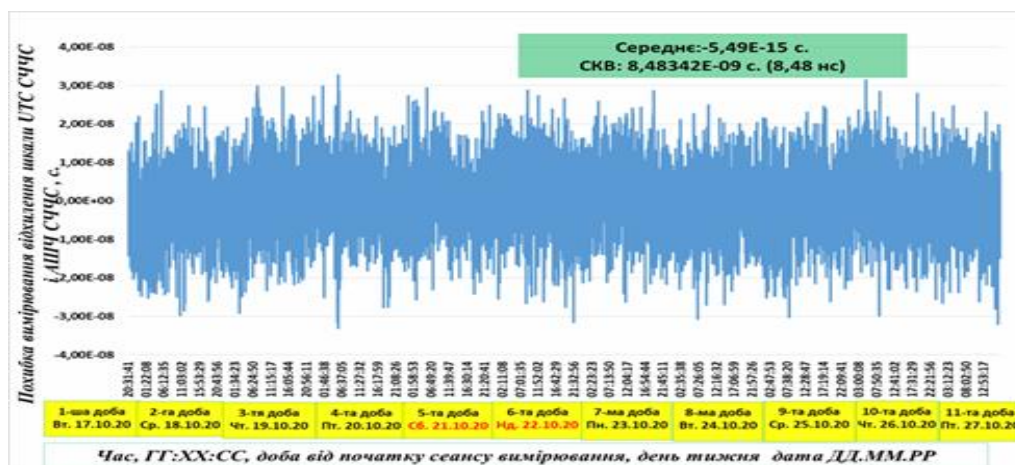


Рис. 4. Похибка вимірювання розходження автономної шкали часу та шкали часу UTC в процесі дослідної експлуатації системи часу та частоти РНДБ радіотелескопа RT-32 Золочів

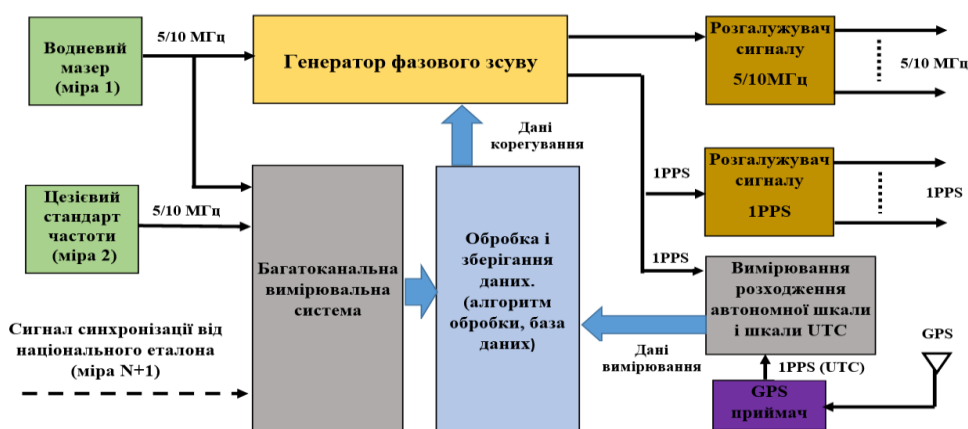


Рис. 5. Структурна схема формування групової атомної шкали часу РНДБ радіотелескопа

При цьому для забезпечення відповідної нормативам НСЄЧЕЧ якості передачі міток часу по пакетній мережі слід враховувати 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. Також треба враховувати, що при використанні протоколу PTP IEEE 1588–2008 асиметрія затримки пакетів виникає й внаслідок зміни швидкості інтерфейсу елементів мережі PTP.

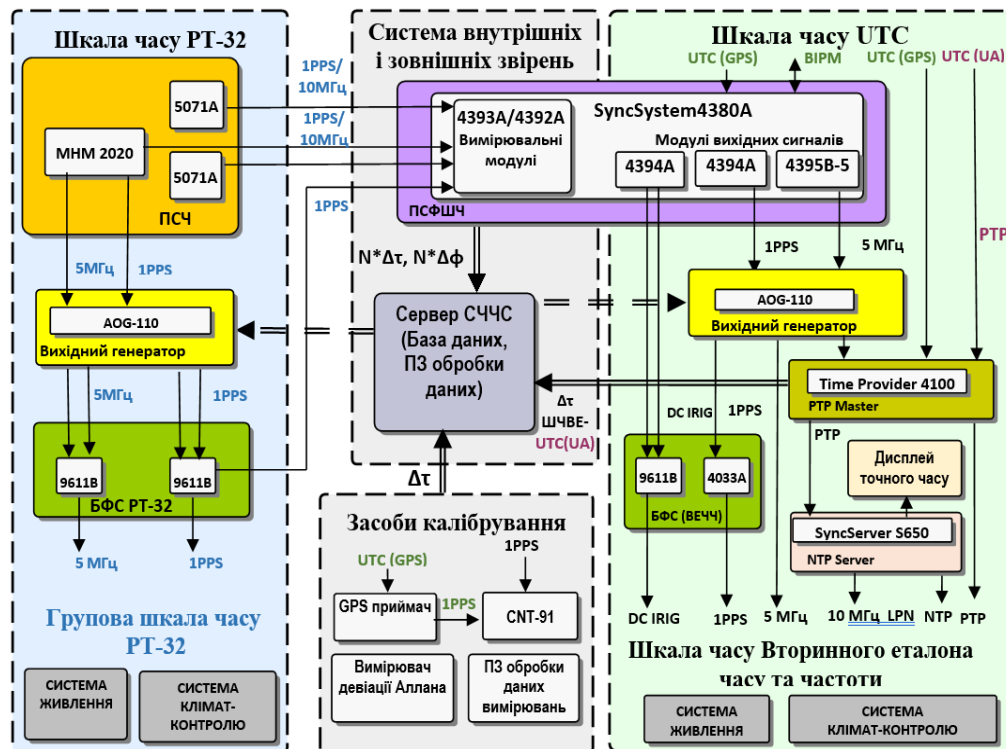


Рис.6. Структурна схема системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа з використанням групової атомної шкали часу

Інтеграція систем часу та частоти РНДБ радіотелескопів в НСЄЧЕЧ активно впроваджується в різних країнах ЄС [10]. Передача еталонних сигналів часу та частоти від РНДБ радіотелескопів до національних еталонів часу та частоти і в зворотному напрямку може здійснюватись по оптичній лінії зв'язку різними методами (одно- або двосторонньою передачею опорних сигналів частоти несучої або модульованої, за протоколом PTP з процедурою калібрування та компенсації асиметрії). Для зв'язку між РНДБ радіотелескопами та національними еталонами використовуються «темне» оптичне волокно та DWDM канал.

В рекомендаціях ITU-T G.8271 [11] передбачені засоби для компенсації асиметрії, яка виникла за рахунок буферизації кадрів. Очікувану асиметрію можна оцінити, спираючись на розмір пакета повідомлень PTP та швидкість інтерфейсів.

Таку асиметрію може бути компенсовано за допомогою механізму компенсації асиметрії (розділ 11.6 IEEE 1588-2), алгоритм якого використовують сучасні сервери часу, наприклад, TimeProvider 4100, який був використаний в ході досліджень.

Причинами виникнення асиметрії, наприклад, при застосуванні оптичних мереж також є:

- використання різних довжин хвиль в прямому та зворотному напрямках при застосуванні технології DWDM в оптичній мережі;

- передача сигналів синхронізації різними волокнами;

різний показник заломлення волокон. Проведені тестування якості передачі міток часу на загальну відстань 760 км (рис. 7) з використанням технологій DWDM та APTS дозволяють на основі отриманих результатів стверджувати про можливість забезпечити передачу міток часу на рівні, що відповідає вимогам до НСЄЧЕЧ. Для тестування було використано обладнання Microchip TimeProvider 4100 Software Version 1.0.5 з використанням Profile PTP unicast ITU-T

G.8275.2 мережевого протоколу синхронізації часу PTP IEEE 1588-2008 з налаштуваннями: (one-step, Sync–64/s, Delay-reg–64/s, Announce–4/s). Один з двох TimeProvider 4100 використовувався як «*Grandmaster PTP*», а інший як «*Client PTP*». Контроль точності синхронізації часу здійснювався за допомогою вбудованої функції TimeProvider 4100 – моніторингу точності синхронізації часу. Пакетне навантаження Ethernet мережі при тестуванні не перевищувало 20%.

Відповідно до висунутих вимог з точності синхронізації часу при модернізації національної мережі єдиного часу необхідно врахувати вище наведені причини виникнення похибки часу та в разі необхідності застосовувати технології компенсації асиметрії (APTS) та різноманітні режими, передбачені протоколами PTP IEEE 1588-2008 [12].

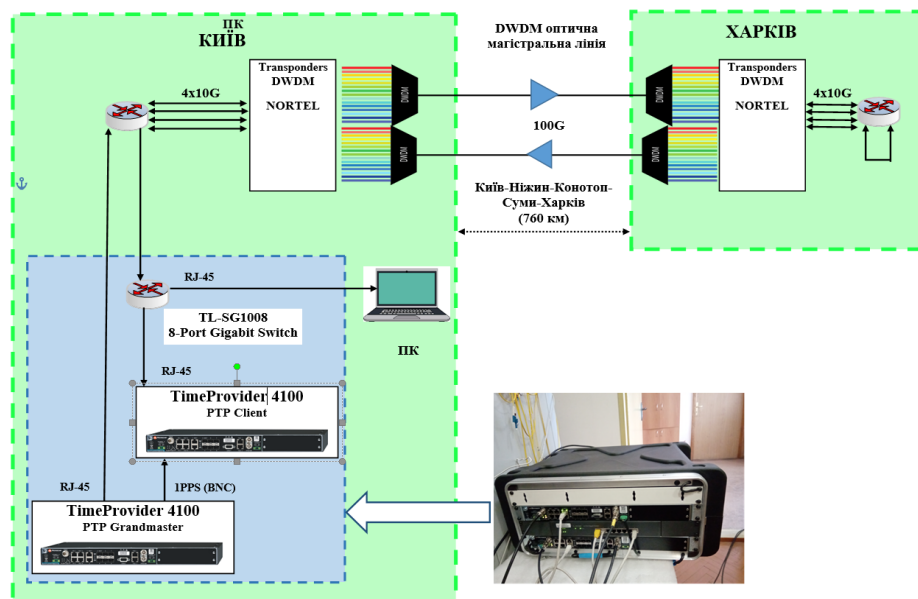


Рис.7.Схема вимірювання похибки синхронізації часу при використанні протоколу PTP 1588 на магістральній оптичній мережі DWDM «Євротранстелеком»

Проведені тестування якості передачі міток часу на загальну відстань 760 км (див.рис. 7) з використанням технологій DWDM та APTS дозволяють на основі отриманих результатів стверджувати про можливість забезпечити передачу міток часу на рівні, що відповідає вимогам до НСЄЧЕЧ. Для тестування було використано обладнання Microchip TimeProvider 4100 Software Version 1.0.5 з використанням Profile PTP unicast ITU-T G.8275.2 мережевого протоколу синхронізації часу PTP IEEE 1588-2008 з налаштуваннями: (one-step, Sync–64/s, Delay-reg–64/s, Announce–4/s). Один з двох TimeProvider 4100 використовувався як «*Grandmaster PTP*», а інший як «*Client PTP*». Контроль точності синхронізації часу здійснювався за допомогою вбудованої функції TimeProvider 4100 – моніторингу точності синхронізації часу. Пакетне навантаження Ethernet мережі при тестуванні не перевищувало 20%.

Висновки

Розглянуті особливості інтеграції систем часу та частоти РНДБ радіотелескопів в НСЄЧЕЧ та проведені дослідження дозволяють стверджувати, що технічний рівень систем часу та частоти РНДБ радіотелескопів, сучасних оптичних мережевих технологій та досягнення в реалізації використання синхронізації часу відповідно до вимог протоколу PTP 1588 можуть ефективно розширити можливості НСЄЧЕЧ, особливо за рахунок резервування та покращення регіональної розгалуженості та наближення до користувачів.

Наведені результати демонструють, як за допомогою протоколу PTP 1588 та оптичної мережі загального користування можна реалізувати інтеграцію системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа та створити мережу синхронізації часу відповідно до вимог НСЄЧЕЧ.

Треба зазначити, що в процесі досліджень при забезпеченні вказаних умов та при використанні опцій High-Performance Boundary Clock та Enhanced Primary Reference Time Clocks, які доступні в сучасних серверах часу, похибка часу не перебільшувала 10 нс.

Розширення НСЄЧЕЧ за рахунок інтеграції в неї системи частоти та часу радіотелескопа РНДБ, використовуючи при цьому вже існуючу національну мережеву інфраструктуру на основі оптичних ліній зв'язку дозволить:

- забезпечити доступ критичних до точності часу галузей України, в тому числі оборонного призначення, до надійних сигналів точного часу НСЄЧЕЧ;
- підвищити надійність та точність як системи частоти та часу РНДБ радіотелескопа, так і еталонів НСЄЧЕЧ;
- в перспективі забезпечить можливість приєднання НСЄЧЕЧ до міждержавних мереж синхронізації часу і частоти.

Література

1. ATIS-0900005. GPS Vulnerability. Technical Report. Alliance for Telecommunications Industry Solutions. Approved September 7, 2017. 23 p.
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 2 вересня 2015 р. № 664 "Питання Служби єдиного часу і еталонних частот". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/664-2015-n>
3. Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) Report to the 20th Meeting of the CCTF INRIM's Time and Frequency Activities. September 2015. 16 p.
4. Symmetricom Datasheet «Precise Time Scale System». URL: <https://www.microsemi.com/product-directory/time-frequency-systems/4156-precise-time-scale-system#resources>
5. Michael A. Lombardi et. al. Accurate, Traceable, and Verifiable Time Synchronization for World Financial Markets. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. Volume 121, 2016. pp. 436-463.
6. Ульянов О., Чміль В., Яцків Я. и др. Создание радиотелескопа RT-32 на базе антенной системы MARK-4B. 1. Проект модернизации и первые результаты. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2019. Т. 24. № 2. С. 87–116.
7. Viktor Gaidamanchuk. Results of development VLBI time scale system RT-32 Zolochiv. *International Workshop "RT-32 Zolochiv: First Results, EU Collaboration, Radio Astronomy Frontiers"*. Zolochiv, Ukraine, 3-5 October 2021. URL: https://spacecenter.gov.ua/contents/uploads/2021/10/Viktor-Gaidamanchuk__Results-of-Development-VLBI-Time-Scale-System-RT-32-Zolochiv.pdf
8. Gerard Petit Atomic time scales TAI and TT (BIPM): Present status and prospects. *Proceedings of the 7th Symposium Frequency Standards and Metrology*. 2009. pp. 475–482.
9. Ł. Śliwczyński et. al. Remote synchronization of atomic clocks. 2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON 2016). *Physics*. Krakow, 9-11 May 2016. pp. 1–3.
10. K. Jaldehag, C. Rieck, S.-C. Ebenhag. Time and Frequency Activities at SP in Sweden. *41st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting*. 16-19 Nov 2009. pp. 231–252.
11. 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.
12. Солдатов В., Гаврилов А., Матвієнко М. та ін. Результати дослідної експлуатації підсистеми забезпечення єдиним часом військових споживачів на базі серверів точного часу Microsemi Time Provider 4100. *Український метрологічний журнал. Ukrainian Metrological Journal*. 2020. № 1. С. 68–78.

References

1. ATIS-0900005. GPS Vulnerability. Technical Report. Alliance for Telecommunications Industry Solutions. Approved September 7, 2017. 23 p.
2. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 2 veresnia 2015 r. № 664 "Pytannia Sluzhby yedynoho chasu i etalonnnykh chastot" [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated September 2, 2015 No. 664 "Issues of the Time Synchronization and Reference Frequencies Service "] [in Ukrainian]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/664-2015-n>
3. Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) Report to the 20th Meeting of the CCTF INRIM's Time and Frequency Activities. September 2015. 16 p.
4. Symmetricom Datasheet «Precise Time Scale System». URL: <https://www.microsemi.com/product-directory/time-frequency-systems/4156-precise-time-scale-system#r5>
5. Michael A. Lombardi et. al. Accurate, Traceable, and Verifiable Time Synchronization for World Financial Markets. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. Volume 121, 2016. pp. 436-463resources
6. Oleg Ulyanov , Volodymyr Chmil, Yaroslav Yatskiv et al. Sozdanie radioteleskopa RT-32 na baze antennoy sistemi MARK-4BK-4B. 1. Proekt modernizatsii i pervie rezultati. [Creation of the RT-32 radio telescope based on the MARK-4B antenna system. 1. Modernization project and first results]. *Radiofizika i radioastronomiya - Radiophysics and Radioastronomy*. 2019. T. 24. № 2. pp. 87–116. [in Russian].
7. Viktor Gaidamanchuk. Results of development VLBI time scale system RT-32 Zolochiv. *International Workshop "RT-32 Zolochiv: First Results, EU Collaboration, Radio Astronomy Frontiers"*. Zolochiv, Ukraine, 3-5 October 2021. URL: https://spacecenter.gov.ua/contents/uploads/2021/10/Viktor-Gaidamanchuk__Results-of-Development-VLBI-Time-Scale-System-RT-32-Zolochiv.pdf
8. Gerard Petit Atomic time scales TAI and TT (BIPM): Present status and prospects. *Proceedings of the 7th Symposium Frequency Standards and Metrology*. 2009. pp. 475–482.

9. Ł. Śliwczyński et. al. Remote synchronization of atomic clocks. 2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON 2016). *Physics*. Krakow, 9-11 May 2016. pp. 1–3.
10. K. Jaldehag, C. Rieck, S.-C. Ebenhag. Time and Frequency Activities at SP in Sweden. *41st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting*. 16-19 Nov 2009. pp. 231–252.
11. 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.
12. Soldatov V., Gavrilov A., Matvienko M. et al. Rezultaty doslidnoi ekspluatatsii pidsystemy zabezpechennia yedynym chasom viys'kovykh spozhyvachiv na bazi serveriv tochnoho chasu Microsemi Time Provider 4100 [The results of pilot operation of the subsystem of universal time provision for military consumers based on the precise time servers Microsemi Time Provider 4100]. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal – Ukrainian Metrological Journal*. 2020. № 1. pp. 68–78 [in Ukrainian].