

УДК 621.396

М.Л. Троцько

Військова частина А0785, Харків

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ШКАЛ ЧАСУ, ІСНУЮЧИХ В УКРАЇНІ

В роботі представлено результати аналізу методів та засобів синхронізації шкал часу, існуючих в Україні, що застосовуються для міжлабораторних звірень та синхронізації мір часу та частоти. Показано наявність можливості зменшення вкладу методичної похибки синхронізації шкал часу, що обумовлена неадекватністю фізичної моделі об'єкту вимірювання при виключенні обмежень на характер змін у часі частоти міри та застосування нових методів апроксимації часового ряду виміряних розбіжностей шкал часу.

**Ключові слова:** шкали часу, еталонні сигнали часу, робочий еталон часу та частоти.

### Вступ

**Актуальність задачі.** На теперішній час існує широке коло споживачів частотно-часової інформації, що потребують синхронізації своїх шкал часу (ШЧ), а єдність вимірювань часу та частоти у світі забезпечується в основному за допомогою еталонних сигналів часу та частоти (ЕСЧЧ), що передаються різноманітними каналами [1].

**Аналіз літератури.** Використання ЕСЧЧ у системах телекомунікацій дозволяє забезпечувати, наприклад, в системах з імпульсно-кодовою модуляцією якість та надійність зв'язку [2–4]. Складна інфраструктура цифрових мереж зв'язку, що мають різну топологію, вимагає забезпечення передачі усім вузлам мережі інформації про розмір одиничного інтервалу послідовності синхронізуючих імпульсів, сформованого на основі одиничного інтервалу ШЧ робочого еталону часу та частоти (РЕЧЧ) головного вузла (центру) мережі. Сполучення цих мереж обумовлює необхідність створення плезіохронного режиму їх функціонування, тобто приведення із заданою похибкою розміру одиничних (тактових) інтервалів часу РЕЧЧ локальних мереж, що сполучаються, до одиничного інтервалу ШЧ ведучого (основного) РЕЧЧ головного вузла мережі. В зв'язку з цим засоби синхронізації мереж цифрового зв'язку розділяються на автономні та “датчики точного часу”, які синхронізують власну ШЧ за сигналами зовнішніх джерел.

**Мета статті** – проведення аналізу методів та засобів синхронізації шкал часу, що можуть бути застосовані в Україні, для виявлення шляхів підвищення точності передачі одиниці часу та частоти споживачам частотно-часової інформації.

### Основний матеріал досліджень

В табл. 1 наведені всі відомі канали синхронізації та похибки методів синхронізації, що їх використовують [5–10].

Відповідно до даних табл. 1 радіометеорний метод має високі показники не тільки точності синхронізації ШЧ, а й вартості апаратури прив'язки ШЧ, тому не отримав широкого розповсюдження та використовується на даний час у ДЕЧЧ України для звірянь з Державним еталонном часу та частоти Російської Федерації.

Таблиця 1

Аналіз відомих каналів синхронізації

Канали синхронізації	Похибка синхронізації	Масштаби використання	Вартість (умовна)	Можливість використання споживачем в Україні
Радіометеорний канал	(20-30) нс	локальний	висока	–
Перевозимий квантовий годинник	(1-10) нс	локальний	висока	–
Радіоканали	(1-10) мкс	локальний	низька	+
Супутники зв'язку	(1-100) нс	локальний	висока	–
Телебачення	(10-100) нс	глобальний	низька	+
Супутникові радіонавігаційні системи	(1-50) нс	глобальний	низька	+

Таким чином, найбільш точними та вигідними для використання є СРНС та телевізійні канали.

Найбільш поширеним є поєднання високостабільних РЕЧЧ з приймачами сигналів СРНС, яке отримало назву “PRC” – “Primary Reference Clock (Первинний опорний годинник)”.

Методична складова похибки синхронізації системних ШЧ сигналами СРНС GPS

“NAVSTAR” обумовлена неадекватністю фізичної моделі об’єкта вимірювань, вона спотворює вимірювальну інформацію й призводить до використання грубих оцінок при обчисленні відповідних поправок для отримання виправленого результату вимірювань. Система GPS “NAVSTAR” використовує поліноміальну модель розбіжностей ШЧ апаратури споживача і навігаційного штучного супутника Землі, при цьому показник ступеня апроксимуючого поліному дорівнює двом, що відповідає квадратичному характеру розбіжностей ШЧ.

Публікації дослідників властивостей СРНС GPS “NAVSTAR” містять оцінки верхньої межі похибки синхронізації ШЧ приймача СРНС на інтервалі вимірювань 15 хвилин з темпом вимірювань 1 с та знаходяться у межах (5–10) нс. Реально досяжний рівень точності синхронізації ШЧ приймачів СРНС оцінюється в межах (10–50) нс [10]. Практично ці викладки підтверджуються в публікаціях, присвячених міжлабораторним звіренням United States Naval Observatory (USNO) та National Institute of Standardization (NIST). При оцінюванні похибок міжлабораторних звірень водневих стандартів часу і частоти для отримання виправлених результатів у виміряні розбіжності ШЧ вносились поправки, що відповідали виділенню прогресуючої систематичної похибки, яка змінюється у часі за лінійним законом. Виділення цього лінійного тренду проводилося за допомогою метода найменших квадратів (МНК). Опубліковані в [11] результати показали, що невиключена систематична похибка (НСП) результатів міжлабораторних звірень має не флуктуативний, відповідний білому шуму, характер, а змінюється в часі за складним законом. Таким чином, припущення про лінійний характер прогресуючої систематичної похибки синхронізації ШЧ АП СРНС призводить до використання закруглених оцінок систематичної похибки та не дозволяє підвищити реальний рівень точності синхронізації ШЧ СРНС до 1 нс й вище.

Як відомо з [10], багатоканальний приймач СРНС GPS “NAVSTAR” вимірює затримку прийнятих навігаційних сигналів від усіх супутників сузір’я орбітальної групіровки (режим “all-in-view”), що використовується в даний момент. Виміряні затримки та отримані відповідні їм координати НШСЗ сузір’я підставляють до системи рівнянь, розв’язання якої є координати приймача СРНС. Це рішення обчислюється за допомогою МНК ітеративно (в середньому за 4 ітерації при використанні як початкового наближення координат приймача СРНС координат центру Землі). На другому етапі розраховані координати знов підставляються в указану вище систему рівнянь, та обчислюються поправки до частоти кварцового генератора (КГ) приймача СРНС. Далі, враховуючи поправки до ШЧ НШСЗ

відносно ШЧ системи GPS “NAVSTAR” та обчислені поправки до частоти КГ приймача СРНС виконується його підстроювання та синхронізація ШЧ приймача СРНС. Вплив таких факторів як концентрація електронів зрізу іоносфери в напрямку НШСЗ–приймач СРНС, що має добовий і сезонний характер флуктуацій, багатошляховість розповсюдження й затримки у самому приймачі СРНС, спотворює результат вимірювання псевдовідстані до НШСЗ, що, в свою чергу, впливає на зростання похибки визначення поправки до частоти КГ приймача СРНС і похибки синхронізації ШЧ користувача. Застосування одного НШСЗ для міжлабораторних звірень (режим “common-view”) зменшує кількість рівнянь системи, але не зменшує впливу таких факторів, як затримка сигналу в іоносфері та багатошляховість його розповсюдження.

За оцінками дослідників [10], внесок таких складових, як затримки в іоносфері й багатошляховість розповсюдження, складає (50–75)% загального бюджету похибок методу синхронізації ШЧ по сигналах СРНС GPS “NAVSTAR”. Крім того, ці оцінки підтверджуються результатами міжлабораторних звірень USNO и NIST [11].

Важливим моментом, що впливає на точність прив’язки ШЧ споживача за сигналами СРНС, є алгоритмічна залежність похибки прив’язки ШЧ приймача від похибок місцевизначення [10]. Це означає, що спочатку навігаційний обчислювач приймача виконує розрахунок координат споживача за виміряними псевдовідстанями до супутників робочого сузір’я, а на другому етапі обчислює поправку ШЧ приймача відповідно ШЧ СРНС. Таким чином, при порушенні безперервності навігаційних визначень, спричиненому, наприклад, виходом за межі допустимих значень похибки синхронізації бортової ШЧ супутника відносно ШЧ СРНС, чи впливом перешкод, що зривають роботу каналу спостереження за затримкою приймального тракту приймача сигналів СРНС, з’являється та накопичується у часі похибка місцевизначення, отже, відповідно, і похибка прив’язки ШЧ приймача. Приведена ситуація може бути критичною при застосуванні одноканального приймача сигналів СРНС, але застосування багатоканальних приймачів з відповідним програмним забезпеченням, що дозволяє здійснювати контроль цілісності навігаційних визначень (“integrity monitoring”), та виявляти супутники, бортові зберігачі часу яких мають похибку синхронізації бортової шкали, що перевищує допустиме значення.

Але у будь-якому випадку буде існувати ще одна значуща складова похибки, обумовлена похибкою моделі розбіжностей бортової ШЧ супутника та ШЧ СРНС.

Модель являє собою сукупність коефіцієнтів поліному [10]:

$$q_k = \left[ c_0, c_1 \cdot \Delta\tau_k, \dots, c_M \cdot \Delta\tau_k^v \right], \quad (1)$$

де  $c$  – вектор коефіцієнтів апроксимуючого полінома,  $c^T = c_0, c_1, \dots, c_M$ , що розраховується з системи рівнянь за МНК, яка побудована за загальним об'ємом обчислених поправок до бортової ШЧ приймача СРНС  $\Delta\tau_k$ :

$$\sum_{v=0}^2 c_v \sum_{k=1}^M \Delta\tau_k^v = \sum_{k=1}^M q_k, \quad (2)$$

при виконанні умови

$$\sum_{k=1}^M (q_k - u_k)^2 = \min;$$

де  $\Delta\tau$  – вектор  $\Delta\tau = \Delta\tau_1, \dots, \Delta\tau_k$  поправок до бортової ШЧ,

$$\Delta\tau_k = \tau_k - \tau_{kref};$$

$k$  – порядковий номер поправки,  $k = \overline{1, M}$ ;

$\tau_k$  – тривалість одиничного інтервалу бортової ШЧ супутника СРНС;

$\tau_{kref}$  – тривалість одиничного інтервалу системної ШЧ NAVSTAR/GPS, чи ГЛОНАСС;

$v$  – ступінь полінома, яка дорівнює  $v = 2$  для системи NAVSTAR/GPS та  $v = 1$  для системи ГЛОНАСС.

Коефіцієнти поліноміальної моделі описують систематичну зміну поправки бортової ШЧ відносно ШЧ СРНС і не рідше 1 разу на 15 хвилин обновлюються у складі навігаційного повідомлення. Екстраполяція моделі систематичної зміни поправки бортової ШЧ здійснюється шляхом обрахування коефіцієнтів апроксимуючого полінома за наявними результатами обчислень псевдовідстаней та має похибку, яку можна оцінити за допомогою СКВ похибки апроксимації за методом найменших квадратів  $\sigma_{МНК}$  [12]:

$$\sigma_{МНК} = \sqrt{\sigma_{01} + \sigma_{02}}, \quad (3)$$

де  $\sigma_{01}$  – варіація МНК-моделі;  $\sigma_{02}$  – зміщення МНК-моделі, при цьому

$$\sigma_{01} = \left\| \|q_k - \|q_k\| \right\|^2,$$

$$\sigma_{02} = \left\| \|q_k\| - \Delta\tau_k \right\|^2,$$

$\|\cdot\|$  – операція усереднення.

На відміну від  $\sigma_{02}$ , внесок складової  $\sigma_{01}$  є найбільшим та означає розкид значень коефіцієнтів поліноміальної моделі, обчислених з урахуванням мінімуму квадрату сумарної похибки у точках апроксимації. Такий розподіл на складові похибки апроксимації дозволяє встановити причину різкого зрос-

тання  $\sigma_{МНК}$  при додаванні до вихідного масиву вимірювальної інформації нового відліку. Збільшення обсягу вектору вимірюваних поправок бортової ШЧ чи зсув у часі даного вектору без зміни кількості точок апроксимації викликає зростання  $\sigma_{01}$ , та, як наслідок, і  $\sigma_{МНК}$ . Таким чином, використання поліноміальної апроксимації моделі систематичної зміни поправки бортової ШЧ відносно ШЧ СРНС обмежується зростанням СКВ  $\sigma_{01}$  та вимагає накопичення певного набору вимірювань і не дозволяє проводити обробку вимірювальної інформації у режимі реального часу. Такий стан може вважатися задовільним зважаючи на досить низькі значення відносної похибки по частоті для РЕЧЧ, що використовуються як бортові зберігачі часу супутників СРНС та входять до складу групового еталону часу та частоти системи [11].

Але при використанні інших типів РЕЧЧ з гіршими показниками, але більш доступними через меншу вартість, швидкість корегування систематичної складової похибки відтворення РЕЧЧ розміру одиничного інтервалу ШЧ впливає на її залишкове значення, що відбивається на невиключеній систематичній похибці РЕЧЧ [13].

Необхідність накопичення великих обсягів вимірювальної інформації при використанні часоімпульсного методу визначення метрологічних характеристик мір часу та частоти не дозволяє компенсувати систематичну похибку з необхідним рівнем точності введенням відповідних поправок систематичної зміни частоти міри часу та частоти, тому що чим вище встановлений рівень точності синхронізації ШЧ, тим частіше повинні вноситися відповідні поправки, тобто найвища точність синхронізації ШЧ теоретично є асимптотично досяжною при управлінні мірою часу та частоти (введенні поправок) в режимі реального часу.

## Висновок

Зменшення вкладу методичної похибки синхронізації ШЧ найбільш точним з доступних споживачу каналів, а саме СРНС, що обумовлена неадекватністю фізичної моделі об'єкту вимірювання є досяжним при виключенні обмежень на характер змін у часі частоти міри. Це означає необхідність апроксимації тренду вимірюваних розбіжностей ШЧ із встановленою похибкою оцінювання, максимально наближеною до нуля, тобто застосування нових методів апроксимації часового ряду вимірюваних розбіжностей ШЧ.

**Напрямок подальших досліджень** є аналіз апроксимаційних властивостей математичних апаратів вейвлет-перетворення вимірюваних розбіжностей ШЧ та штучних нейронних мереж для використання при формуванні моделі об'єкту вимірювання.

## Список літератури

1. МІ 2188–92. ГСИ. Меры частоты и времени, методика поверки. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 43 с.
2. Базюта С.В. Метрологическое обеспечение систем распространения сигналов точного времени по цифровым сетям связи / С.В. Базюта, И.А. Дрига // *Вестник метролога*. – 2008. – № 2. – С. 16-19.
3. Система синхронизации OSA 5581CGPS на базе GPS-приемников – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.unities.com/meas\\_eq/oscillo/osa5581c.html](http://www.unities.com/meas_eq/oscillo/osa5581c.html). – 2007.
4. Система синхронизации MTG-3901 Master Timing Generator – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://leitchcenter.ru/> – 2005.
5. Оценки потенциальной точности синхронизации стандартного времени и частоты при использовании измерительного телевизионного сигнала / А.А. Костыря, Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, Е.П. Ермолаев, М.В. Милях, С.И. Носов, Е.Ю. Бондарь // *Системы управления, навигации та зв'язку*, 2009. – №2(10). – С. 40-45.
6. Романько В.М. Методика управління сигналами часу, що передаються з Києва по радіо / В.М. Романько, Н.Г. Смець, Г.І. Сагайдак // *Труди IV Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка"*, Харків, 12–14 жовтня 2004 р. – Х.: ХДНДІМ, 2004. – С. 229-231.
7. Макаренко Б.И. Система синхронизации и единого времени наземного автоматического комплекса управления космическими аппаратами Украины / Б.И. Макаренко, В.Ф. Кулишенко, А.Ф. Петров, К.Ф. Волох, Е.Т. Жуков // *Космична наука та технологія*. – 2001. – Т. 7, № 4. – С. 107-113.
8. Радиотехническая система единого времени / И.И. Акулов, В.П. Бреславец, Е.Т. Жуков, А.Ф. Петров, А.Г. Притычкин, Э.Н. Хомяков. – М.: МО СССР, 1971. – 236 с.
9. Клейман А.С. Метрологическое обеспечение время-частотных измерений в Украине / А.С. Клейман, А.И. Левенберг, В.С. Соловьев, А.А. Губин, П.А. Кравченко, Т.А. Усенко, Ю.А. Вараксин, С.А. Таламанов, С.И. Зуб // *Український метрологічний журнал*. – 2003. – № 2. – С. 10-19.
10. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебчаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.; под ред. В.С. Шебчаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
11. Allan D.W. Accuracy of International Time and Frequency Comparisons Via Global Positioning System Satellites in Common-View / D.W. Allan, D.D. Davis, M. Weiss, A. Clements, B. Guinot, M. Granveaud, K. Dorenwendt, B. Fischer, P. Hetzel, S. Aoki, M.-K. Fujimoto, L. Charron, N. Ashby // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-34, 1985. – №. 2. – P. 118-125.
12. Ососков Г.А. Современные методы обработки экспериментальных данных в физике высоких энергий / Г.А. Ососков, А.В. Полянский, И.В. Пузынин // *Физика высоких энергий*. – 2002. – Т. 33, вып. 3. – С. 676-745.
13. Чинков В.М. Основы метрології та вимірювальної техніки: навч. посібн. / В.М. Чинков. – Х.: НТУ «ХПИ», 2005. – 524 с.

Надійшла до редколегії 1.09.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.М. Чинков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

#### АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СИНХРОНИЗАЦИИ, СУЩЕСТВУЮЩИХ В УКРАИНЕ

М.Л. Троцко

В работе представлены результаты анализа методов и средств синхронизации шкал времени, существующих в Украине, которые используются для межлабораторных сличений и синхронизации мер времени и частоты. Показано наличие возможности уменьшения вклада методической погрешности синхронизации шкал времени, обусловленной неадекватностью физической модели объекта измерений при исключении ограничений на характер изменений во времени частоты меры и использования новых методов аппроксимации временного ряда измеренных расхождений шкал времени.

**Ключевые слова:** шкалы времени, эталонные сигналы времени, рабочий эталон времени и частоты.

#### AN ANALYSIS OF SYNCHRONIZATION MEANS AND METHODS AVAILABLE IN UKRAINE

M.L. Trotsko

In this work have introduced the results of an analysis of synchronization means and methods available in Ukraine and have shown a possibility of time scales synchronization methodical error reducing due to excepting the limitation of changing in time the output signal frequency of the frequency standard behavior and exploiting new methods of measured time scales residual's approximation.

**Keywords:** time scales, etalon timestamps, time and frequency standards.