

УДК 529.781:621.317

Г. С. Сидоренко, В. С. Соловійов, О. О. Ткачук, О. С. Клейман

Харківський державний науково-дослідний інститут метрології

Використання сигналів супутникових радіонавігаційних систем для порівняння шкал часу

Наведено результати використання сигналів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) GPS і ГЛОНАСС для порівняння національної шкали часу України з Міжнародною шкалою координованого часу та національною шкалою часу Російської Федерації. Показано, що при застосуванні наявних приймачів сигналів СРНС цей метод порівняння шкал часу забезпечує досить мале значення випадкової складової похибки вимірювань, але може мати суттєву систематичну похибку вимірювань, яка залежить від багатьох факторів.

З метою забезпечення єдності вимірювань часу здійснюються регулярні порівняння національних шкал часу багатьох країн. Для цього у різні роки застосовувались різноманітні методи: транспортований квантовий годинник, телевізійний метод, використання сигналів спеціалізованих радіостанцій, наземних та супутникових радіонавігаційних систем, дуплексних каналів супутникових систем зв'язку та радіометеорний метод. Кожному з цих методів притаманні певні систематичні та випадкові складові похибок вимірювань, а також окремі переваги та недоліки. Протягом останніх років найбільше застосування в усьому світі знайшов метод порівняння шкал часу з використанням сигналів супутникових радіонавігаційних систем GPS та ГЛОНАСС. Відомо [4], що прецизійні спеціалізовані приймачі сигналів СРНС при відповідній методиці їхнього застосування спроможні забезпечити граничну точність порівняння шкал часу приблизно 2 нс для коротких відстаней і 4 нс для довгих. Однак застосування лише одного методу чи лише однієї СРНС не може завжди гарантувати вірогідність результатів вимірювань, оскільки існує імовірність значної невилученої систематичної похибки вимірювань. Тому в Харківському державному науково-дослідному інституті метрології (ХДНДІМ) для порівняння шкал часу еталоні вже багато років регулярно застосовують сигнали як СРНС ГЛОНАСС, так і СРНС GPS, а також альтернативний високоточний метод — радіометеорний. У цьому методі використовується радіоме-

теорний канал зв'язку (РМК), що утворюється при відбитті радіохвиль метрового діапазону від іонізованих метеорних слідів. Через цей канал передаються в обох напрямках радіосигнали, синхронізовані сигналами шкал часу, що порівнюються.

Державний первинний еталон одиниць часу і частота України, що знаходиться в ХДНДІМ, у період його атестації у 1996 році включав до свого складу дев'ять водневих стандартів частоти і часу різних типів (Ч1-80, Ч1-76 та Ч1-70), які складали групову міру частоти еталона [1]. У процесі функціонування еталона основний склад групової міри змінюється в залежності від результатів визначення метрологічних характеристик окремих мір.

Метрологічні характеристики еталона визначаються за результатами внутрішніх звірень водневих стандартів частоти і часу між собою та за результатами зовнішніх звірень національної шкали координованого часу UTC(UA) і частоти групової міри еталона зі шкалами та частотами, що відтворюються національними еталонами інших держав.

За результатами внутрішніх звірень добова нестабільність частоти водневих стандартів, яку можна характеризувати середнім квадратичним відносним відхиленням частоти $\delta_{\text{доб}}$ від середнього за місяць значення, протягом останніх років оцінюється значеннями від $5 \cdot 10^{-15}$ до $3 \cdot 10^{-14}$ для різних стандартів. Місячна нестабільність частоти водневих стандартів оцінюється значеннями $\delta_{\text{міс}}$ від $1 \cdot 10^{-14}$ до $5 \cdot 10^{-14}$. Найкращим за цими характеристиками є один з водневих генераторів стандарту

Ч1-80 (міра ВС 609). Найменше за модулем значення середньої відносної зміни частоти ν , яке становило $-1 \cdot 10^{-15}$ за місяць, було відмічено у одного з пасивних стандартів Ч1-76 (міра ВС 610).

Для підтвердження метрологічних характеристик еталона, що визначаються за результатами внутрішніх звірень, для забезпечення єдності вимірювань часу і частоти у глобальному масштабі дуже важливими є міжнародні звірення національного еталона з іншими еталонами близького за метрологічними характеристиками рівня. Особливо важливими є звірення з тими еталонами, на базі яких формується Міжнародна шкала атомного часу ТАІ та шкала координованого часу UTC.

У ХДНДІМ створено й вже багато років успішно експлуатується автоматизована система (далі називатимемо її просто система) зовнішніх звірень еталонів часу і частоти з використанням сигналів СРНС ГЛОНАСС [3]. Система призначена для прийому радіосигналів певних космічних апаратів (КА) системи ГЛОНАСС, проведення вимірювань відповідно до графіка спостережень, реєстрації даних і обробки інформації з метою визначення різниці шкал часу еталонів.

Систему створено на базі приймача А-724М-01, персонального комп'ютера і технічних та програмних засобів автоматизації, розроблених у Російському інституті радіонавігації та часу (Санкт-Петербург). Вона дозволила суттєво розширити функціональні можливості застосування базового приймача, а при певних режимах спостережень — зменшити окремі складові похибок вимірювань.

У системі передбачено такі варіанти її застосування:

- автономна робота користувача, коли він працює за власним планом, і забезпечується визначення шкали часу користувача відносно національної шкали координованого часу Російської Федерації UTC(SU) і шкали часу системи (ШЧС) ГЛОНАСС;
- централізована робота користувача, коли він працює разом з іншими користувачами у мережі пунктів, один із яких є провідним, а інші відомими.

Синхронність роботи пунктів забезпечується планом робіт, формованим на провідному пункті і передаваним на усі відомі пункти мережі. У цьому випадку забезпечується можливість визначення взаємної різниці шкал часу користувачів один відносно одного.

Система забезпечує визначення розбіжності шкали часу місцевого еталона відносно шкали часу UTC(SU) за добу з похибкою, яка характеризується середнім квадратичним відхиленням (СКВ) не більше 50 нс і визначення взаємного розходжен-

ня шкал часу еталонів у пунктах спостережень з похибкою за добу не більше 20 нс. Приведені характеристики забезпечуються при штатному функціонуванні системи ГЛОНАСС і похибках звадання координат користувача не більше 3 м.

Для порівняння національної шкали часу України UTC(UA) з національною шкалою часу Російської Федерації UTC(SU), а також зі шкалами часу UTC(IM) еталона-копії (Іркутськ) і UTC(RIRT) еталона Російського інституту радіонавігації та часу використовувалась саме ця апаратура. Спостереження здійснювались за методом «common-views», коли сигнали одного й того ж супутника приймаються одночасно в усіх пунктах спостережень згідно з технологічними графіками, які розробляє Центр управління системою ГЛОНАСС. Ці графіки передбачають по два сеанси спостережень за сигналами двох певних супутників щодобово.

Попередні оцінки похибок порівняння шкал часу різними методами за результатами досліджень протягом 1998 року наведено в роботі [2]. На рис. 1 зображено результат визначення цим же методом різниці шкал часу UTC(UA) і UTC(SU) протягом 2000 року. По осі абсцис відкладено модифіковану юліанську дату MJD. Стрибок на графіку різниці шкал часу (значенням 500 нс) обумовлений коректуванням шкали часу UTC(UA), яке було здійснено 04.06.2000 р. (MJD 51699).

Графік різниці шкал координованого часу UTC(UA) – UTC(SU) на інтервалі часу спостережень 60 діб визначеної тим ж методом, зображено на рис. 2. Там же показано апроксимацію експери-

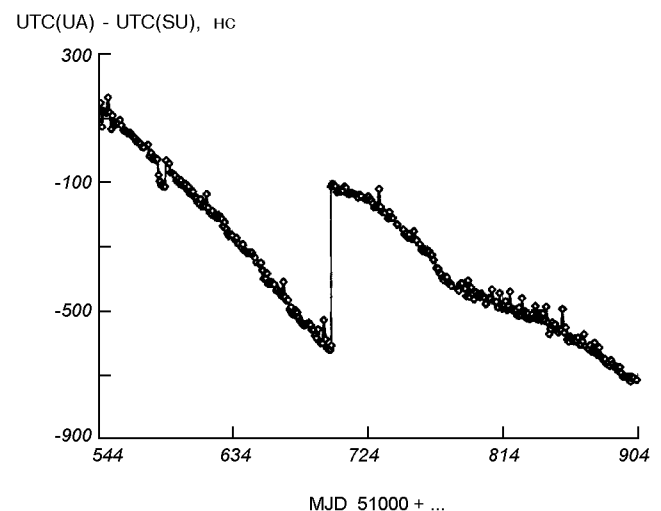


Рис. 1. Порівняння шкал координованого часу державних еталонів України та Росії за даними прийому сигналу ГЛОНАСС у 2000 р.

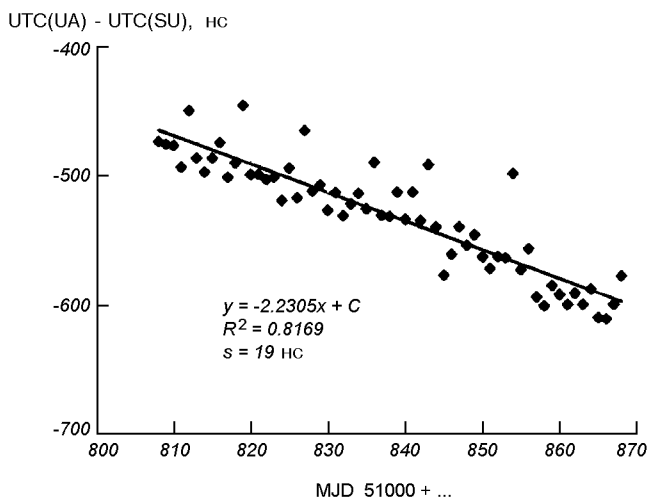


Рис. 2. Лінійна апроксимація експериментальних даних порівняння шкал часу державних еталонів України та Росії за даними прийому сигналів ГЛОНАСС на інтервали часу спостережень 60 діб

ментальних даних прямою лінією та наведено рівняння апроксимуючої лінії (лінії регресії). Середнє квадратичне відхилення s результатів вимірювань від лінії регресії складає 19 нс. Ця величина характеризує похибку апроксимації, яка включає до себе відміну реальної різниці шкал часу еталонів від прямої лінії та похибку метода звірень. Параметр R^2 характеризує вірогідність апроксимації.

Треба відмітити, що вказаний графік спостережень не дозволяє використати усі можливості системи. Наявне програмне забезпечення системи дозволяє застосувати оптимальні графіки спостережень, які розробляє Міжнародне бюро мір та ваг (BIPM). При виконанні вимірювань за цими графіками можна збільшити статистику даних вимірювань і тим самим зменшити випадкову складову похибки вимірювань при порівнянні шкал часу до одиниць наносекунд.

Прийом сигналів СРНС GPS з метою порівняння шкали часу UTC(UA) з Міжнародною шкалою часу UTC проводився за допомогою приймача геодезичного призначення типу «Trimble 4000SSi». Головна астрономічна обсерваторія (ГАО) НАНУ у 1997 р. придбала кілька зразків цих приймачів з метою оснащення ними фундаментальних координатно-часових станцій для перманентних GPS-спостережень. Один з таких приймачів був переданий тимчасово ХДНДІМ.

Приймач «Trimble 4000SSi» — це 9-каналний (з можливістю розширення до 12 каналів) двочастотний (частоти $L1$ і $L2$) приймач сигналів GPS, у якому використовується технологія «Super-track™» для підвищення перешкодостійкості при прийомі

слабких сигналів, дозволяє проводити вимірювання по C/A і P -кодах, а також визначати повну фазу несучих хвиль. При статичній зйомці приймач з відповідним прикладним програмним забезпеченням дозволяє визначати довжину бази з міліметровою похибкою. Приймач має також вихід сигналів часу з частотою 1 Гц, синхронізованих з Міжнародною шкалою координованого часу UTC з граничним відхиленням від неї не більше 1 мкс. Приймач цього типу не дозволяє реалізувати режим спостережень «common-view», коли відносна прив'язка шкал часу станцій здійснюється шляхом одночасних спостережень сигналів того самого заданого супутника, а використовує режим спостережень «all-in-view», коли обробляються сигнали від усіх видимих у даний момент супутників. Потенційно цей приймач має більш високі метрологічні характеристики в порівнянні з одночастотними приймачами. Вивченню можливості використання таких приймачів для порівняння шкал часу зараз приділяється велика увага спеціалістами різних країн.

У жовтні 1997 р. у ХДНДІМ було почато експериментальні прийоми сигналів GPS з метою відпрацювання оптимальної методики спостережень і оцінки похибки вимірювань при порівнянні шкал часу з використанням даного приймача. При дослідженнях використовувався державний первинний еталон одиниць часу і частоти. Вимірювання проводилися за допомогою частотоміра ЧЗ-64, що має розподільну здатність та випадкову похибку при вимірюванні одиночних інтервалів часу не більше 1 нс. Управління частотоміром, реєстрація інформації та її наступна обробка здійснювалися за допомогою ПЕОМ. У програмі вимірювань передбачено проведення серії з десяти вимірів, відбракування аномальних результатів вимірювань і обчислення середнього значення. За результат одного вимірювання приймається середнє значення у серії вимірів.

Спочатку спостереження здійснювалися по такому графіку: сеанси прийому сигналів GPS проводилися через кожні 30 хв цілодобово. Потім у дані вимірювань вводилися поправки до робочої шкали часу еталона і визначалося середнє значення за кожну добу різниці шкал часу UTC(UA) – UTC. Як показали дослідження, випадкова похибка порівняння шкал часу при такому графіку спостережень була неприпустимо великою: середнє квадратичне відхилення (СКВ) добових оцінок різниці шкал часу досягало 200 нс.

Тоді інтервал часу вибірки τ_b був істотно зменшений (до 2 хв), і протягом трьох тижнів були проведені спостереження з метою визначення оптимального інтервалу часу вибірки. Для цього весь масив даних був розбитий на окремі підмасиви з

інтервалами часу вибірки 2, 4, 6 і 10 хв, і для кожного підмасиву проведено статистичну обробку і аналіз часових рядів. Було встановлено, що для зазначених інтервалів часу вибірки СКВ результатів одиничних вимірів від середнього значення за добу практично однакове (приблизно 100 нс). Похибка оцінок середніх за добу значень різниці шкал часу зменшується зі збільшенням частоти повторення сеансів вимірювань, але при цьому збільшується обсяг масиву даних, які необхідно зберігати в пам'яті ПЕОМ. Аналіз результатів спостережень показав, що при зміні τ_b від 2 до 10 хв СКВ результатів вимірювань (середніх значень за добу) від лінії регресії збільшується від 6 до 12 нс. Тому для подальших регулярних спостережень оптимальним вважалось значення $\tau_b = 5$ хв.

Для прикладу можна навести результати порівняння національної шкали часу UTC(UA) з Міжнародною шкалою координованого часу UTC протягом 1998 р. із застосуванням приймача сигналів GPS типу «Trimble 4000SSI» [2]. Ці результати свідчать, що при використанні прийнятої методики спостережень і обробки результатів випадкова похибка порівняння шкал часу не перевищує 10 нс. Однак зіставлення з результатами, отриманими в той же час іншими способами, показало наявність значної невилученої систематичної похибки вимірювань. Тому при наступних дослідженнях цікаво оцінити всі складові похибок вимірювань.

З метою визначення апаратурної похибки вимірювань приймачами цього типу при порівнянні шкал часу у червні 1998 р. були проведені спостереження одночасно на двох комплектах апаратури «Trimble 4000SSI». Обидві антени були розташовані поруч, всі сполучні кабелі обох комплектів було зроблено однакової довжини. Спостереження були розділені на кілька окремих сеансів. У перших трьох сеансах вимірювання здійснювалися таким чином. У кожному циклі вимірювань, що повторювалися через п'ять хвилин, спочатку 10 разів вимірювався інтервал часу між сигналами робочої шкали часу еталона і сигналами часу з виходу першого приймача (інтервал часу вибірки 2 с), потім такі ж вимірювання проводилися із сигналами часу з виходу другого приймача.

Аналіз результатів вимірювань, здобутих у цих трьох вибірках, показав, що приймачі розрізняються як за середнім значенням величини, що визначається, $\Delta T = UTC(UA) - UTC$, так і за значенням СКВ результатів вимірювань. Різниця середніх значень ΔT складала 65—77 нс, а СКВ результатів одиничних вимірів складало 84—97 нс для першого приймача і 30—34 нс для другого.

У четвертому сеансі спостережень інтервал часу між початком вимірювань з використанням одного

і другого приймача був зменшений з 20 до 2 с з метою забезпечення більшої синхронності вимірювань (вимірювання проводилися по черзі). Сеанси вимірювань повторювалися також через кожні 5 хв. Але це не привело до істотного зменшення різниці середніх значень ΔT , визначених за допомогою двох приймачів.

У п'ятому сеансі спостережень на обидва входи вимірювача інтервалів часу подавалися сигнали часу з виходів двох приймачів, тобто забезпечувалася повна синхронність вимірювань і безпосередньо вимірювалася різниця моментів сигналів часу $T_1 - T_2$, що видаються споживачам з двох приймачів. У цьому експерименті середнє значення величини $T_1 - T_2 = 86$ нс при СКВ, рівному 143 нс.

Проведені дослідження показали, що навіть у випадку, коли два приймачі типу «Trimble 4000SSI» знаходяться в тому самому пункті спостережень (нульова база), в однакових умовах і синхронізовані одним і тим ж самим сигналом еталонної частоти, невилучена систематична апаратурна похибка вимірювань складає 50...100 нс, а за випадковою складовою похибки вимірювань окремі екземпляри приймачів відрізняються в два-три рази.

На рис. 3 зображено результати порівняння шкал часу UTC(UA) і UTC з використанням сигналів GPS протягом 2000 р., а на рис. 4 — на 60-добовому інтервалі спостережень. Кожна точка на цих рисунках — середнє значення величини UTC(UA) – UTC, яке визначено за добу спостережень. Середнє квадратичне відхилення даних від лінії регресії на місячному інтервалі спостережень складає лише 8 нс, що свідчить про малу випадкову похибку порівняння шкал часу при використанні

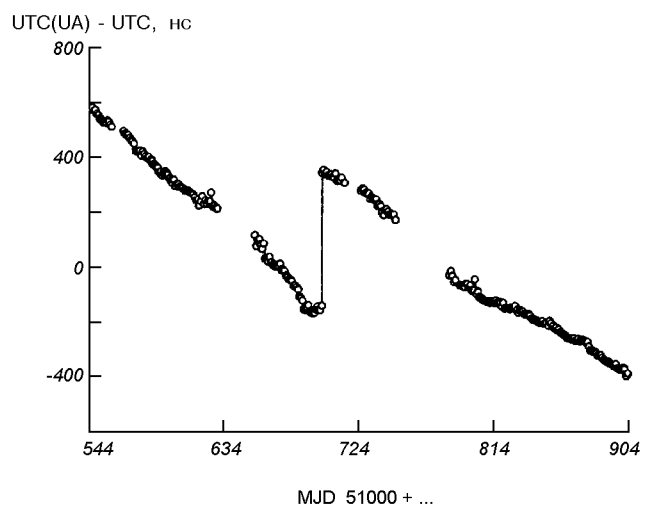


Рис. 3. Порівняння шкали координованого часу державного еталону України з Міжнародною шкалою координованого часу за даними прийому сигналів GPS у 2000 р.

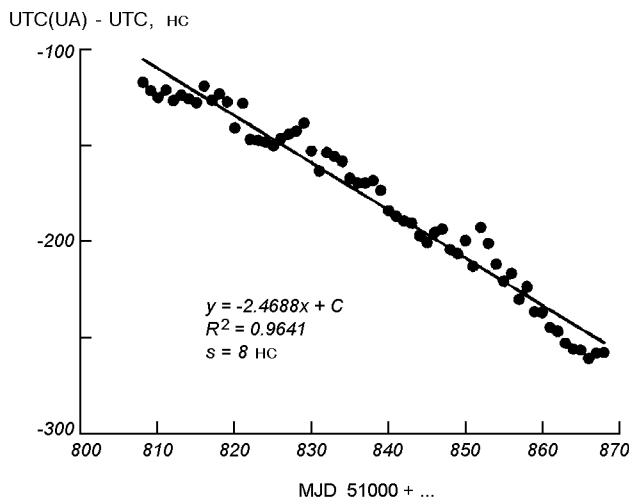


Рис. 4. Лінійна апроксимація експериментальних даних порівняння шкал часу UTC(UA) і UTC за даними прийому сигналу GPS на інтервалі часу спостережень 60 діб

приймача «Trimble 4000SSi» за вказаною вище методикою. Значення параметра R^2 близьке до одиниці, що говорить про високу вірогідність лінійної апроксимації експериментальних даних.

1 травня 2000 р. було обнародовано заяву президента США про те, що США припиняють погіршення сигналів GPS шляхом введення режиму вибіркової доступності (режиму SA) і надають можливість безоплатно і повністю використовувати GPS у мирних цілях для цивільного, комерційного і наукового застосування в усьому світі. Відповідно до цієї заяви, цивільні користувачі зможуть тепер визначати координати і час у десять разів точніше, ніж робили це раніше.

У зв'язку зі скасуванням застосування режиму SA становить великий інтерес, як це відбилося на точності порівняння шкал часу з використанням сигналів GPS. Проведені дослідження з застосуванням приймача «Trimble 4000SSi» показали, що похибка одиничних вимірів відразу знизилася з 100 нс (СКВ) до значення кроку дискретизації (40 нс) сигналів часу, що видаються користувачеві з приймача (рис. 5). Оскільки дані вимірювань перестали носити випадковий характер, збільшення числа вимірів стало мало впливати на точність середнього значення результатів вимірювань при усередненні даних. Тому випадкова похибка середніх за добу значень оцінок результатів визначення різниці шкал часу UTC(UA) і UTC, якщо і зменшилася, то несуттєво (з 10 до 7 нс). Впливу скасування режиму SA на величину систематичної похибки вимірювань виявлено не було.

Як вже вказувалось вище, для порівняння шкал часу еталонів у ХДНДІМ регулярно застосовується,

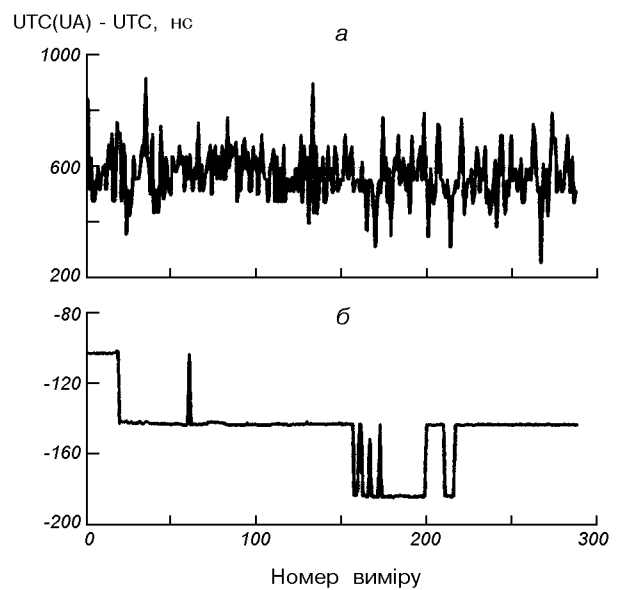


Рис. 5. Зразки даних вимірювань величини UTC(UA) – UTC з використанням сигналів GPS за допомогою приймача Trimble 4000SSi: а — при застосуванні режиму SA; б — після відміни режиму SA

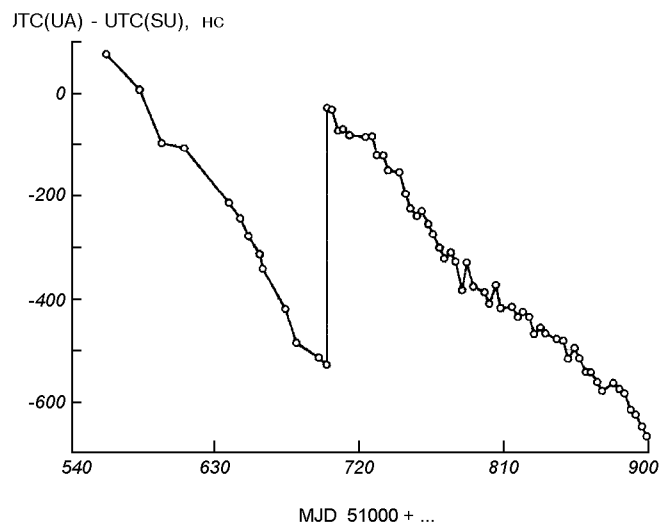


Рис. 6. Порівняння шкал координованого часу державних еталонів України та Росії радіометеорним методом у 2000 р.

крім методу з використанням сигналів СРНС, альтернативний високоточний метод з використанням радіометеорного каналу зв'язку за допомогою апаратури «Метка-6М».

На рис. 6 показано результати порівняння шкал часу еталонів UTC(UA) і UTC(SU) по РМК протягом 2000 року. При визначенні різниці шкал координованого часу еталонів UTC(UA) – UTC(SU)

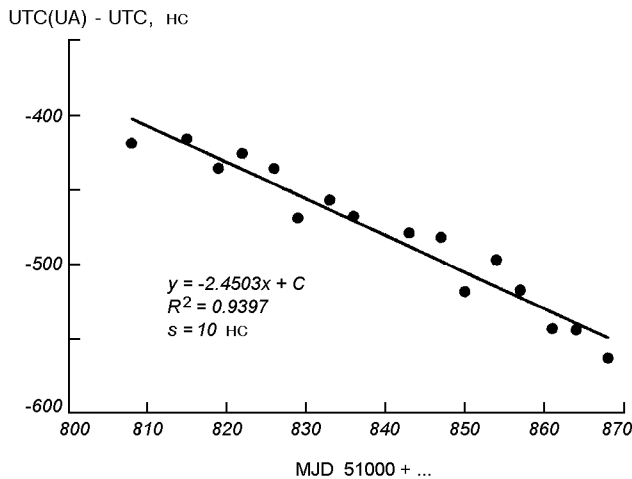


Рис. 7. Лінійна апроксимація експериментальних даних порівняння шкал часу державних еталонів України та Росії радіометеорним методом на інтервалі часу спостережень 60 діб

приймалось середнє з двох значень $\Delta T_{\text{вим}}$, що були отримані в обох пунктах, вводилися поправки до робочих шкал часу еталонів, враховувалась різниця затримок сигналів в апаратурі, яка застосовується в Харкові та в Москві. На перший погляд, цей графік практично не відрізняється від аналогічного графіку різниці шкал часу UTC(UA) – UTC(SU), визначеної за даними прийому сигналів ГЛОНАСС (рис. 1).

Графік різниці шкал координованого часу UTC(UA) – UTC(SU) на інтервалі часу спостережень 60 діб, визначеної радіометеорним методом, зображено на рис. 7. Середнє квадратичне відхилення s результатів вимірювань від лінії апроксимації складає 10 нс, що свідчить про високу точність радіометеорного методу порівняння шкал часу.

Ретельно зіставляючи результати визначення різниці шкал часу UTC(UA) – UTC(SU) двома методами одночасно, можна зробити висновок, що ці результати не так добре узгоджуються. Незважаючи на невеликі значення випадкових похибок вимірювань, середнє за рік значення розбіжності результатів, здобутих двома методами, складає від 50

до 200 нс в різні роки, а середнє квадратичне відхилення різниць добових оцінок величини UTC(UA) – UTC(SU) від середнього значення цієї величини за рік дорівнює 20–30 нс. Це свідчить про наявність невилучених систематичних похибок вимірювань. Радіометеорний метод порівняння шкал часу за своїм принципом не потребує знання часу розповсюдження радіосигналу на трасі, а радіометеорний канал зв'язку є дуплексним і не має джерел значних систематичних похибок вимірювань. Складніше з цими питаннями при використанні приймальної апаратури СРНС: тут складових похибок вимірювань значно більше, і не усі вони достатньо визначені. Тому є підстава вважати, що розбіжності в здобутих результатах обумовлена головним чином невилученою систематичною похибкою вимірювань, що повільно змінюється, при використанні сигналів СРНС ГЛОНАСС технічними засобами, які є у нашому розпорядженні.

1. Клейман О. С., Оголюк В. П., Сидоренко Г. С. та ін. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти // Український метрологічний журн.—1997.—Вип. 3.—С. 18—23.
2. Соловйов В. С. та ін. Оцінка похибок порівняння еталонних шкал часу за допомогою різних методів // Український метрологічний журн.—1999.—Вип. 3.—С. 5—8.
3. Ткачук А. А., Родионов В. Е., Сагайдак Г. И. Автоматизированная система приема сигналов СРНС ГЛОНАСС // Пр. II Міжнарод. науково-техн. конф. «Метрологія-99» Харків, 1999.—С. 154—156.
4. Schildknecht T., Dudle G. Time and frequency transfer: high precision using GPS phase measurements // GPS World.—2000.—Feb.—P. 48—52.

USING SIGNALS OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS FOR COMPARISON OF TIME SCALES

G. S. Sydorenko, V. S. Solovyov, A. A. Tkachuk, O. S. Kleyman

The results of using the signals of satellite radio navigation systems GPS and GLONASS for comparison of the Ukraine national time scale with International scale of Universal Time and the Russian national time scale are given. It is shown that the method of time scale comparison ensured rather small value of random composite measurement error when the available GPS & GLONASS receivers are used. However this method may have the systematic error depended on many factors.