

УДК 521.93

А. О. Корсунь¹, Г. С. Курбасова²

¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

² Кримська астрофізична обсерваторія

РЕАЛІЗАЦІЯ GPS-ЧАСУ І ГЛОНАСС-ЧАСУ: ПОРІВНЯННЯ ЧАСОВИХ ДАНИХ НА ІНТЕРВАЛІ 2009—2012 РОКІВ

GPS і ГЛОНАСС — дві незалежні глобальні навігаційні супутникові системи. Кожна забезпечує, незалежно одна від іншої, визначення точного місця розташування і часу у будь-якій точці світу. Зсув часу між GPS і ГЛОНАСС є важливим параметром у комбінованій обробці GPS/ГЛОНАСС-вимірювань. Високоточна система оцінки різниці у часі може забезпечити сантиметрову точність визначення місця розташування. Супутники GPS і ГЛОНАСС широко використовуються, зокрема ВІРМ, для синхронізації атомних годинників різних лабораторій світу. Точність синхронізації становить 2 нс для відстаней до 1000 км і 6 нс — понад 1000 км. Мета цієї роботи полягає у зіставленні вимірювань C0 (GPS-час) і C1 (ГЛОНАСС-час) на інтервалі 2009 — 2012 рр.

ВСТУП

У зв'язку із запуском супутників Глобальної позиційної системи GPS (Global Positioning System) та Глобальної навігаційної системи (ГЛОНАСС), оснащених атомними годинниками (цезієвими стандартами частоти, або квантовими генераторами), з'явилися нові реалізації шкал часу: GPS-час і ГЛОНАСС-час, які належать до атомних шкал часу. Бортові атомні годинники мають точність приблизно 1 нс та 1 нс на добу за темпом їхнього ходу.

Космічні сегменти обох систем містять по 24 навігаційні супутники, які безперервно випромінюють радіонавігаційні сигнали. Прийняті спеціальним приймачем, сигнали навігаційних супутників дають змогу визначити місцеположення, швидкість і поточний час споживача, а також отримати інформацію про дієздатність супутникових систем. Для розв'язання поставлених завдань потрібно, щоб у зоні радіовидимості приймача перебували щонайменше чотири супутники, які належать до одного сузір'я, або п'ять супутників, що належать до різних сузір'їв (конфігурацій) супутників.

Атомні годинники GPS регулюються на Землі перед запуском так, щоб після виходу на орбіту годинники відмічали цілі секунди з тією ж самою середньою швидкістю, що і годинники на Землі. Тому здається, що годинники GPS перед запуском на орбіту з відповідною висотою ідуть з тією ж самою швидкістю, що і годинники на Землі.

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ НА СУПУТНИКАХ І ЇХНІЙ ЗВ'ЯЗОК З НАЗЕМНИМ ЧАСОМ

GPS-час має сталий зсув на 19 с відносно міжнародного атомного часу (TAI) та збігається із всесвітнім координованим часом (UTC) на стандартну GPS-епоху: 1980 січень 6.0. Шкала GPS-часу відтворює безперервний час, який не коригується стрибком секунди, як це робиться в шкалі UTC.

Шкалу GPS-часу спочатку встановив Контрольний відділ морської обсерваторії США (USNO), який базувався в Колорадо-Спринг (штат Колорадо, США). Ця шкала складалася з невеликого ансамблю цезієвих годинників на супутниках GPS. Спочатку шкалу GPS-час синхронізували зі шкалою всесвітнього координованого часу UTC (USNO) Морської обсерваторії США. Тепер шкала GPS-часу контролюється у

Паризькій обсерваторії, а уточнені добові значення публікуються в Бюлетенях Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM).

Для GPS-часу та TAI прийнято таке співвідношення:

$$[TAI - \text{GPS-час}] = 19 \text{ с} + C_0,$$

де різниця 19 с утримується сталою, а C_0 (порядку десятка наносекунд) змінюється з часом.

Співвідношення між GPS-часом і часом UTC містить змінну кількість секунд як результат зміни останнього стрибками на одну секунду та має такий вигляд:

від моменту 2009 січень 1, 0 годин UTC до моменту 2012 липень 1, 0 год UTC

$$[UTC - \text{GPS-час}] = -15 \text{ с} + C_0,$$

від моменту 2012 липень 1, 0 год UTC до повідомлення

$$[UTC - \text{GPS-час}] = -16 \text{ с} + C_0.$$

У Паризькій обсерваторії отримують добові значення C_0 з урахуванням у GPS-спостереженнях високих супутників поправок елементів орбіт супутників та іоносферних затримок, а потім ці значення згладжують для отримання різниць UTC(OP) – GPS-час на 0 год UTC. Середня квадратична похибка добових значень C_0 становить 10 нс.

Система ГЛОНАСС, аналогічна GPS, розроблялася в колишньому СРСР, зараз підпорядкована Росії. Згідно з «Інтерфейсним контрольним документом» ред. 5-1 система ГЛОНАСС повністю розгорнута з 2008 р. Ця система складається з 24 супутників (включаючи три активні запасні), рівномірно розташованих у трьох орбітальних площинах з нахилом 64.8° до екватора. Орбіти супутників цієї системи близькі до колових з висотою 19100 км та періодом 11 год 15 хв, тобто подібні до GPS-орбіт. На відміну від GPS супутники ГЛОНАСС мають різні несучі частоти. Відмінною є також структура навігаційного повідомлення. Крім того, у ГЛОНАСС застосовуються інші системи координат і часу.

Розроблено приймачі, які можуть одночасно реєструвати сигнали як від GPS-, так і від ГЛОНАСС-супутників, і обидві системи разом використовуються для розв'язання різних наукових задач. Основна відмінність системи ГЛОНАСС від GPS у тому, що супутники ГЛОНАСС

в своєму орбітальному русі не мають резонансу (синхронності) з обертанням Землі, що забезпечує їм більшу стабільність. Таким чином, угруповання космічних апаратів ГЛОНАСС не вимагає додаткових коригувань протягом усього терміну активного існування. ГЛОНАСС дає корисну додаткову інформацію: більший в порівнянні з GPS нахил орбіт супутників ГЛОНАСС дозволяє досягати вищих положень над горизонтом, що дуже важливо для користувачів у вищих географічних широтах, особливо у полярній області, причому більш точно визначення висоти може бути отримане для геоїда. Крім того, усі супутники ГЛОНАСС оснащені світловідбивачами для їхньої лазерної локації, у той же час станом на 2014 р. GPS не має супутника з кутовими відбивачами.

ГЛОНАСС-супутники поширюють загальну часову шкалу, визначену як ГЛОНАСС-час. ГЛОНАСС-час з 1 січня 1999 р. має сталий зсув відносно TAI на 32 с. Співвідношення між ГЛОНАСС-часом і UTC має вигляд

$$[UTC - \text{ГЛОНАСС-час}] = 0 \text{ с} + C_1,$$

де часова різниця 0 с є сталою, а величина C_1 змінюється з часом (порядку декількох сотен наносекунд з моменту липень 1977 р.).

Співвідношення між ГЛОНАСС-часом і TAI включає змінне число секунд і є таким:

від моменту 2009 січень 1, 0 год UTC до моменту 2012 липень 1, 0 год UTC

$$[TAI - \text{ГЛОНАСС-час}] = 34 \text{ с} + C_1;$$

від моменту 2012 липень 1, 0 год UTC:

$$[TAI - \text{ГЛОНАСС-час}] = 35 \text{ с} + C_1,$$

де C_1 подано на 0 год UTC кожного дня.

Величини C_1 обчислюються за даними спостережень ГЛОНАСС у астрогеодинамічній обсерваторії в Боровці (Польща), середня квадратична похибка добових значень C_1 становить декілька сотень наносекунд.

Щодобові значення C_0 і C_1 публікуються у щомісячних Циркулярах Міжнародного бюро ваг і вимірів (BIPM). Інформація про співвідношення шкал часу UTC і TAI із шкалами GPS-час та ГЛОНАСС-час надається в BIPM, а також на сайті <http://www.bipm.org>.

В Річних звітах BIPM з 2011 р. також публікуються значення C_0' і C_1' , які стосуються від-

повідно обробки спостережень GPS у Морській обсерваторії США (USNO) та спостережень ГЛОНАСС в Інституті метрології часу і простору (ВНПФТРІ) Росії.

Відмітимо також, що супутники GPS і ГЛОНАСС широко використовуються, зокрема у ВІРМ, для синхронізації атомних годинників різних лабораторій світу. Точність синхронізації становить 2 нс для відстаней до 1000 км і 6 нс — для відстаней понад 1000 км.

Глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС), до якої належать системи GPS і ГЛОНАСС, насамперед покликана забезпечити глобальну просторово-часову і навігаційну підтримку з високою точністю і надійністю. З метою забезпечення високої точності вимірювань регулярно виконується коригування похибки годинників приймача та багатьох інших ефектів, але є ще залишкові похибки, що не виправлені.

Постійно діюча мережа ГНСС спільно із перманентними опорними станціями систем спостережень має таку щільність, яка дозволить фахівцям використовувати її як геодезичну референцну систему для визначення географічних координат та проведення наукових досліджень у галузі геодинаміки, фізики іоносфери і тропосфери. При цьому для наукових досліджень особливо важливі дані за тривалий проміжок часу. Однією з найважливіших наукових проблем є експериментальна перевірка загальної та спеціальної теорій відносності. Подальше підвищення точності синхронізації годин дозволить вирішувати питання про експериментальну перевірку уповільнення часу на супутниках ГНСС.

ВИХІДНІ ДАНІ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Вихідні дані для аналізу та порівняння взяті такі:

— часові ряди **C0** і **C1** за період з 30 листопада 2008 р. по 29 грудня 2012 р. [3];

— часовий ряд відхилень тривалості доби від стандартної [www.iers.org/IERS/].

На рис. 1 наведені графіки вихідних даних і тенденції їхніх змін з часом. T_0 є тренд в даних **C0**; T_1 , T_2 , T_3 — тренди на окремих ділянках даних **C1** відповідно до знаку тенденцій. Математичний опис трендів має вигляд:

$$T_0 = -4.0028 \text{ нс} + 0.0034 \text{ нс/добу} \cdot dt_0,$$

$$T_1 = 35.91 \text{ нс} + 0.1838 \text{ нс/добу} \cdot dt_1,$$

$$T_2 = -231.4 \text{ нс} + 0.3000 \text{ нс/добу} \cdot dt_2,$$

$$T_3 = -156.3 \text{ нс} - 0.0089 \text{ нс/добу} \cdot dt_3,$$

де $dt_0 = 1459$ діб, $dt_1 = 260$ діб, $dt_2 = 260$ діб, $dt_3 = 890$ діб.

Методи аналізу даних **C0** і **C1** обрано з урахуванням специфіки вихідних даних: обмежений обсяг, нерегулярний характер змін, наявність прихованих періодичностей і нерегулярною на різних ділянках часової осі складовою шуму. Для зіставлення послідовностей даних **C0** і **C1** були обрані: двоканалний спектральний авторегресійний аналіз (АР-аналіз) і дискретний вейвлет-аналіз. Суть цих методів полягає в наступному.

Двоканалний спектральний АР-аналіз полягає в обчисленні та АР-оцінці взаємної спектральної щільності потужності (СЩП) для двох послідовностей (два канали) даних. Спектральна щільність потужності у разі авторегресійних коефіцієнтів передбачення вперед і спектральна щільність у разі авторегресійних коефіцієнтів передбачення назад має вигляд [2]

$$P_{AP} = T[\mathbf{A}(f)]^{-1} \mathbf{P}_p^f [\mathbf{A}(f)]^{-H}, \quad (1)$$

$$P_{AP} = T[\mathbf{B}(f)]^{-1} \mathbf{P}_p^b [\mathbf{B}(f)]^{-H}, \quad (2)$$

де

$$\mathbf{A}(f) = 1 + \sum_{k=1}^p \mathbf{A}[k] \exp(-j2\pi f k T), \quad (3)$$

$$\mathbf{B}(f) = \exp(-j2\pi f p T) \left[1 + \sum_{k=1}^p \mathbf{B}[k] \exp(-j2\pi f k T) \right]. \quad (4)$$

Визначення порядку двоканалної АР-моделі виконується за допомогою АІК-критерію Акаїке:

$$\text{АІК}[p] = \text{Mn}(\det \mathbf{P}_p^f) + 8p, \quad (5)$$

де p — порядок моделі, N — число відліків даних у каналі. Оптимальний порядок той, при якому вираз (5) має мінімум.

Для вимірювання подібності (як функції частоти) двох сигналів обчислюється квадрат модуля когерентності (КМК)

$$\text{КМК}(f) = |P_{xy}(f)| / (P_{xx}(f)P_{yy}(f)), \quad (6)$$

де $P_{xx}(f)$, $P_{yy}(f)$, $P_{xy}(f)$ — елементи матриці когерентності.

Величина КМК повинна лежати між нулем (для частот, на яких немає когерентності між ка-

налами) і одиницею (для частот, на яких канали повністю когерентні).

Вирази (1) — (6) складають основу алгоритму програми MСARPSD [2], яка використовувалася нами для проведення АР-аналізу.

Неоднорідність на різних часових інтервалах, наявність стрибків потребує застосування методу локального аналізу для зіставлення даних. Тому ми застосовували вейвлет-аналіз.

Вейвлет-метод має перевагу наданої вейвлетами — можливість виконувати локальний аналіз, тобто аналіз локалізованої області більшого сигналу. Вейвлет-аналіз дозволяє використовувати тривалі проміжки часу, де ми хочемо отримати точнішу низькочастотну інформацію і короткі проміжки для виявлення високочастотної інформації.

На відміну від звичайних методів, вейвлет-розклад породжує сімейство ієрархічно організованих розкладень. Вибір відповідного рівня ієрархії залежатиме від характеристик даних і постановки конкретного завдання: перший рівень розкладу можна використати для усунення більшої частини шуму, скачки і неоднорідності частіше видно на вищому рівні розкладання. Математичний опис одновимірного вейвлета має вигляд

$$\frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right),$$

де $a > 0$, $b \in R$, R — область визначення функції сигналу.

Послідовності даних C_0 і C_1 — дискретні, тому не всі значення вейвлет-розкладання необхідні для розподілу вихідного сигналу на складові: відновлений сигнал і шум. З двох типів вейвлет-перетворення (неперервного і дискретного) в цьому випадку доречно застосувати дискретне вейвлет-перетворення. При цьому вейвлет повинен задовольняти деякі умови допустимості. Ці умови задовольняють всі вейвлети сімейства Добеши [1]. Для вирішення задачі відновлення сигналу і аналізу складової шуму ми використовували програми пакетного вейвлет-аналізу зі складу програмного забезпечення МАТЛАБ.

Для встановлення складу низькочастотних коливань використовувався фур'є-аналіз.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

На рис. 2 приведено графіки періодограм вихідних даних, обчислені за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Максимальні значення потужності на обох графіках визначаються на частоті $f = 0.004883$ циклів на добу, що відповідає періоду коливань 204.8 доби.

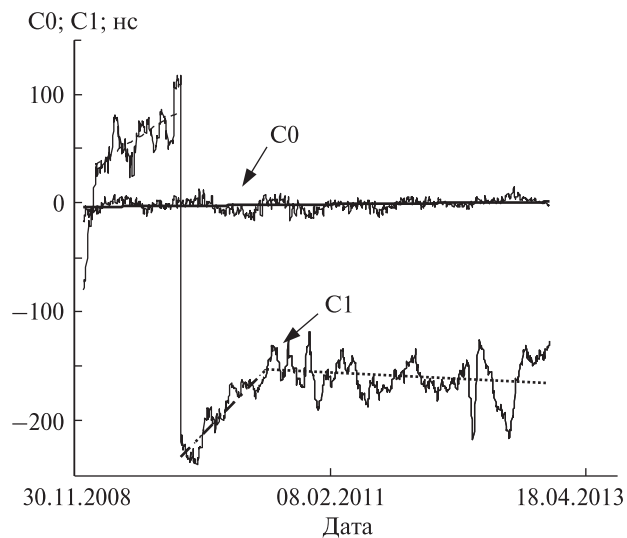


Рис. 1. Вихідні дані C_0 , C_1 та їхні тренди T_0 , T_1 , T_2 , T_3 на інтервалі часу 30.11.2008 — 28.12.2012

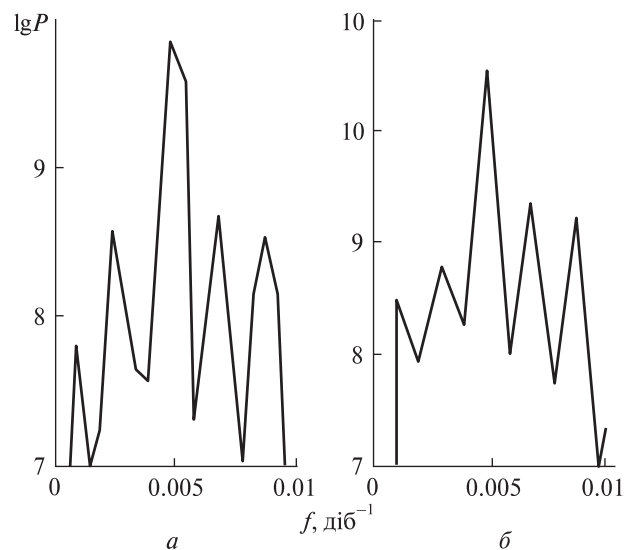


Рис. 2. Періодограми вихідних даних: a — дані C_0 , b — дані C_1 (f — частота, P — потужність)

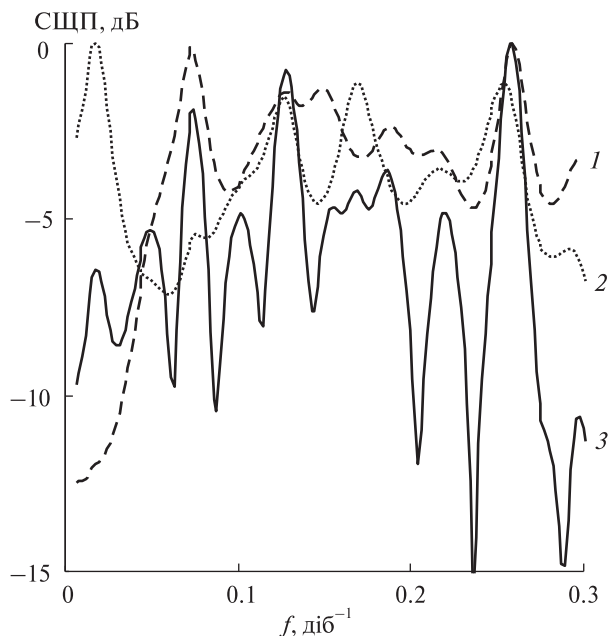


Рис. 3. Двоканальний періодограмний АР-аналіз даних dC0 і dC1: 1 — автоспектр даних dC0, 2 — автоспектр даних dC1, 3 — взаємна спектральна щільність потужності даних dC0 і dC1

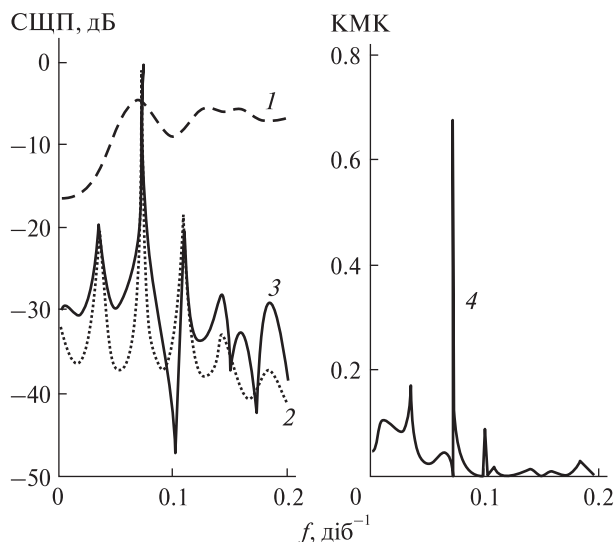


Рис. 4. Двоканальний періодограмний АР-аналіз даних про зміни день у день даних С0 і відхилень тривалості доби від стандартних (LOD): 1 — автоспектр даних dC0, 2 — автоспектр даних dLOD, 3 — взаємна спектральна щільність потужності даних dC0 і dLOD, 4 — амплітуда квадрата модуля когерентності

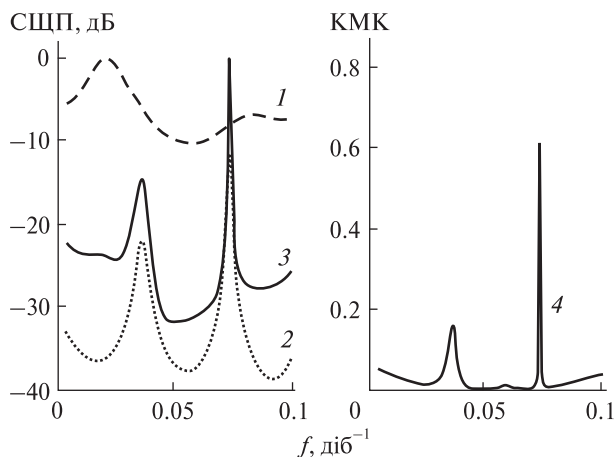


Рис. 5. Те ж для даних С1

GPS-час і ГЛОНАСС-час є дві незалежні один від одного системи вимірювань. Тим не менш їхні зміни день у день мають когерентні коливання.

За допомогою двоканального АР-аналізу встановлено кореляції між деякими варіаціями dC0 і dC1. Результати аналізу наведено на рис. 3. Згідно з формулою (5) обрано оптимальний порядок АР-моделі $p = 27$. Наведені на рис. 3 взаємний спектр dC0 і dC1 і автоспектри показують на кореляцію між варіаціями.

Графік взаємної спектральної щільності потужності показує наявність кореляцій між окремими варіаціями даних dC0 і dC1 (рис. 3), що робить доцільним встановлення кореляцій між dC0, dC1 і змінами день у день відхилень тривалості доби від стандартної доби dLOD (Long of Days). На рис. 4, а наведені графіки автоспектрів і взаємного спектру даних про зміни dC0 і dLOD. Когерентність виявляється лише на одній частоті 0.0733 циклів за добу (13.64 діб за цикл). На цій частоті, як показано на рис. 4, б, КМК = 0.68, що свідчить про можливість зв'язку швидкості обертання Землі і змін день у день відліків в даних С0.

Встановлення когерентності між даними dC1 і dLOD проведено з 2010 р. (рис. 1). Відповідні графіки показано на рис. 5. Істотна когерентність (КМК = 0.64) виявляється на частоті 0.0733 циклів/добу (13.64 діб/цикл). Результати АР-аналізу свідчать про можливість зв'язку швидкості обертання Землі і змін день у день відліків

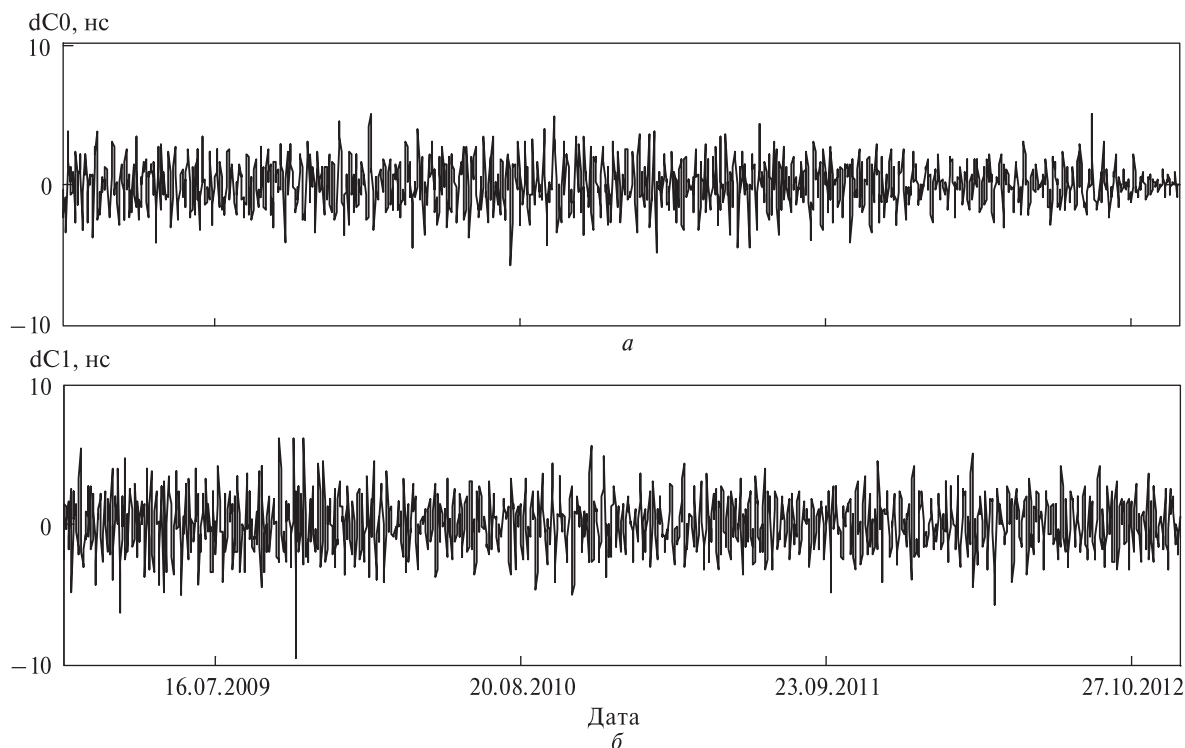


Рис. 6. Складова шумів dC0 і dC1 у відповідних даних

Статистики шуму в даних C0, C1

Дані	$X, 10^{-3}$ нс	M , нс	MM , нс	MAX , нс	MIN , нс	Σ	$L1$, нс	$L2$, нс	LL , нс
C0	-3.5	-0.004	0.175	5.062	-5.798	1.536	1767	58.7	5.798
C1	-2.5	-0.0011	0.0377	6.16	-9.538	1.863	2167	71.2	9.539

в даних C0 і C1 на частоті 0.0733. Оптимальний порядок AP-моделі відповідно до формули (5) дорівнює $p = 27$.

Для зіставлення експериментальних послідовностей даних слід насамперед зіставити їхні моделі. Ми будемо виходити з базової моделі для сигналу з шумом, яка має в основному вигляд [2]

$$s(n) = f(n) + \sigma e(n), \quad (7)$$

де n — рівновіддалені відліки часу.

У простій моделі ми припускаємо, що $e(n)$ є гауссівським білим шумом $N(0, 1)$, а рівень шуму повинен дорівнювати $\sigma = 1$. Складова $f(n)$ моделі (7) — сигнал, спектральна структура якого нами встановлена і зіставлена в даних C0 і C1 за допомогою фур'є- і AP-аналізу.

Виконаємо вейвлет-аналіз складової шуму в даних C0 і C1 за допомогою вейвлетів Добеші db4, де 4 — порядковий номер в сімействі вейвлетів Добеші [1]. Згідно з критерієм [4] оптимальний рівень розкладання для даних C0 і C1 дорівнює 3. Шумовий компонент визначався як різниця вхідного сигналу і сигналу, відновленого за допомогою вейвлет-перетворення. Аналіз графіків шумових компонентів (рис. 6) вказує на нерівномірний розподіл екстремальних відхилень від середнього на різних ділянках часової осі. На графіку рис. 6, б максимальне відхилення пов'язане зі стрибком у вихідних даних C1. Аналіз даних dC0 (рис. 6, а) вказує на істотне зменшення амплітуди відхилень від середнього у 2012 р., що свідчить про стабілізацію і зниження похибки вимірювань C0.

У таблиці наведено статистики шуму: X — середнє, M — медіана, MM — мода, MAX — максимальне відхилення від середнього значення, MIN — мінімальне відхилення від середнього значення, σ — стандартне відхилення від середнього значення, $L1$, $L2$ — верхній і нижній рівень відхилення від нормального розподілу, LL — максимальне відхилення від нормального розподілу.

ВИСНОВКИ

1. Графіки вихідних даних за період 2009—2012 рр. (рис. 1) вказують на стабільний характер розвитку тенденції зменшення тренду відліків даних С0. Тенденції розвитку відліків даних С1, навпаки, нестабільні, тренди на окремих ділянках часової осі мають значний нахил.

2. Характеристики вихідних даних зумовили вибір методів порівняння даних С0 і С1: фур'є-аналіз, АР-аналіз, вейвлет-аналіз.

3. Зіставлення періодограм даних С0 і С1, обчислених методом швидкого перетворення Фур'є, виявляє максимальне значення потужності на обох графіках на частоті $f = 0.004883$ циклів на добу, що відповідає періоду коливаний 204.8 доби.

4. Висновки з проведеного двоканального АР-аналізу такі: спостерігається кореляція між змінами день у день даних С0 і змінами день у день даних С1, встановлено істотну когерентність (квадрат модуля когерентності КМК > 0.6) між змінами день у день даних С0 і С1 і змінами день у день відхилень тривалості доби від стандартних LOD (стандартна тривалість доби — Lengs of Day) для коливання з періодом 13.6 діб.

5. Вейвлет-аналіз виявляє неоднорідність розподілу шуму на різних дільницях часової осі. Аналіз графіка складової шуму даних С0 (рис. 6, а) показує на істотне зниження рівня шуму за 2012 рік.

6. Наведені в таблиці статистики свідчать про відхилення експериментального розподілу даних С0 і С1 від нормального. В цілому статистики даних С0 мають меншу розбіжність із статистиками нормального розподілу, ніж статистики даних С1.

7. Виявлення змін С0 і С1 з періодами 13.6 і 204.8 діб допускає можливість впливу на виміри припливних хвиль.

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 464 с.
2. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М: Мир, 1990. — 584 с.
3. BIPM Annual Report on Time Activities. — 2010—2013. — Vol. 5—8.
4. Coifman R. R., Wickerhauser M. V. Entropy-based algorithms for best basis selection // IEEE Trans. Inform. Theory. — 1992. — 38, N 2. — P. 713—718.

Стаття надійшла до редакції 13.02.14

А. А. Корсунь, Г. С. Курбасова

РЕАЛИЗАЦИЯ GPS-ВРЕМЕНИ И ГЛОНАСС-ВРЕМЕНИ: СРАВНЕНИЕ ЧАСОВЫХ ДАННЫХ НА ИНТЕРВАЛЕ 2009 — 2012 ЛЕТ

GPS и ГЛОНАСС — две независимые глобальные навигационные спутниковые системы. Каждая обеспечивает, независимо друг от друга, определение точного местоположения и времени в любой точке мира. Смещение времени между GPS и ГЛОНАСС является важным параметром в комбинированной обработке GPS/ГЛОНАСС-измерений. Высокоточная система оценки разницы во времени может обеспечить сантиметровую точность определения местоположения. Спутники GPS и ГЛОНАСС широко используются, в частности BIPM, для синхронизации атомных часов разных лабораторий мира. Точность синхронизации составляет 2 нс для расстояний до 1000 км и 6 нс — более 1000 км. Цель этой работы заключается в сопоставлении измерений С0 (GPS-время) и С1 (ГЛОНАСС-время) на интервале 2009—2012 гг.

А. А. Korsun', G. S. Kurbasova

REALIZATION OF GPS TIME AND GLONASS TIME: A COMPARISON OF CLOCK DATA IN THE INTERVAL FROM 2009 TO 2012

GPS and GLONASS are two independent global navigation satellite systems. Each of them provides, independently of one another, the determination of precise location and time moment for any point in the world. The time displacement between GPS and GLONASS is an important parameter in the combined processing of GPS / GLONASS measurements. A precise system of time difference evaluation can provide centimeter accuracy of the location. GPS and GLONASS satellites are widely used, particularly BIPM, to synchronize atomic clocks at various laboratories in the world. The synchronization accuracy is 2 and 6 ns for distances up to 1000 km and for ones more than 1000 km, respectively. We compare measurements of C0 (GPS time) and C1 (GLONASS time) for the interval from 2009 to 2012.