

УДК 528.3

С. САВЧУК, В. КЕРКЕР

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: ssavchuk@polynet.lviv.ua

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ PPP-AR ЗА ДАНИМИ GNSS ВИМІРЮВАНЬ НА ПЕРМАНЕНТНИХ СТАНЦІЯХ

Актуальність технології PPP істотно зросла протягом останніх десяти років. Якщо сантиметровий рівень точності уже практично забезпечено у більшості сфер господарської діяльності, насамперед у геодезії, то міліметровий рівень для наукових завдань, пов'язаних із вивченням впливу геофізичних факторів на навколишнє середовище, все ще є предметом досліджень. **Мета** цієї роботи – виявлення реальної точності модифікації методу PPP – PPP-AR на прикладі даних із чотирьох перманентних GNSS-станцій: Sulp (Львів), FRAN (Івано-Франківськ), RAHI (Рахів), TERN (Тернопіль), що входять у Європейську мережу EPN (**EUREF Permanent GNSS Network**). **Методика.** Для виконання поставленого завдання ми використали дані із чотирьох перманентних GNSS-станцій. Опрацьовано три тижні спостережень: один у липні (2217 GPS-тиждень), один у серпні (2222 GPS-тиждень) та один у вересні (2226 GPS-тиждень). Файли спостережень опрацьовано у програмному середовищі PRIDE PPP-AR, попередньо інсталюваному на сервер з операційною системою Ubuntu. Координати кожної станції обчислено з однаковими вхідними параметрами, а саме з урахуванням іоносферної корекції другого порядку та функцією відображення похилих зенітних затримок сигналів від супутників у напрямі зеніту VMF3. Отримані набори координат ми порівнювали із контрольними координатами цих станцій. Для вибраних часових періодів як контрольні приймали координати, обчислені відносним методом на основі утворення фазових різниць у комбінованому центрі опрацювання EPN. **Результати.** Основними результатами наших досліджень стали різниці координат (порівняння отриманих координат із контрольними). Для кожної станції одержані різниці однонаправлені й мало змінюються для різних станцій. Середнє значення різниць координат становило 0,6–7,2 мм і практично не залежало від часового інтервалу опрацювання. Середньоквадратичні похибки (СКП) різниць координат на рівні 1,5–3 мм і теж мало змінюються з часом. Виявлено, що точність визначення координат на основі опрацювання даних GNSS-вимірювань на перманентних станціях Sulp, TERN, FRAN, RAHI методом PPP-AR достатньо висока, проте помітно систематичну різницю у декілька міліметрів, яка може бути зумовлена недостатнім урахуванням деяких факторів геофізичного походження. **Наукова новизна та практична значущість.** Показано, що метод PPP-AR на сучасному етапі розвитку GNSS-технологій досягає точності методу визначень координат, що ґрунтується на фазових різницях, і може бути застосований не тільки у задачах геодезії, але й у геодинамічних дослідженнях за умови використання результатів добових GNSS-спостережень. Перспективним напрямом подальших досліджень є виявлення неврахованих джерел систематичних похибок.

Ключові слова: GNSS; Precise Point Positioning; технологія PPP-AR; PRIDE PPP-AR; точність координат.

Вступ

Справді революційні зміни у технологіях позиціонування відбулися наприкінці XX в. після запуску достатньої кількості супутників глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Хоча ці системи спочатку розроблялися для військових додатків, проте їх широко застосовують і для цивільних цілей навігації, і для високоточного позиціонування на геодезичному рівні точності (до декількох сантиметрів) чи навіть геодинамічному (до декількох міліметрів) залежно від технологій спостережень.

Удосконалення технологій та апаратури GNSS-вимірювань привело до появи на рубежі століть технології RTK (від англ. Real Time Kinematic – кінематика в реальному часі). Її сутність ґрунтується на обміні

коригувальною інформацією між референсною станцією (нерухомим GNSS-приймачем на точці з відомими координатами) і мобільним приймачем, що пересувається відносно неї. Для забезпечення стабільного покриття територій коригувальною інформацією створено технологію мереж високоточного позиціонування, основу на розвитку інфраструктури постійнодіючих референсних GNSS-станцій. Проте технологія RTK має і низку недоліків. Насправді є безліч умов, за яких реалізація процесу визначення координат стає або неможливою, або недоцільною (наприклад, референсні станції відсутні або розташовані на значній відстані від місця знаходження мобільного приймача, інформація від референсних станцій недоступна внаслідок порушення засобів комунікації під час військових дій, природних катаклізмів і техногенних катастроф тощо).

Протягом останнього десятиліття активно розвивався ще один метод GNSS-позионування, Precise Point Positioning – метод точного позионування, або просто PPP. Його принципова відмінність від інших загальноприйнятих методів GNSS-спостережень полягає у тому, що він не потребує наявності другого GNSS-приймача, який би виконував синхронні статичні спостереження, або каналу зв'язку з референчною станцією для передавання RTK-поправок. Інакше кажучи, окремо взятий GNSS-приймач практично в будь-якій точці земної кулі може визначити своє місце розташування із точністю понад 10 см за доволі короткий інтервал часу (10–15 хв).

Головною умовою реалізації цієї технології є використання дво/мультиспостережного GNSS-приймача та отримання коригувальної інформації (переважно поправок годинників/ефемерид) від спеціальних сервісів. Однак цей справді революційний метод позионування досі ще не здобув належного визнання та поширення у нашій країні.

Постановка проблеми

Під час визначення координат станцій опорних GNSS-мереж, зокрема для вивчення рухів і деформацій земної поверхні, використовують, як правило, відносний метод супутникових спостережень, оснований на складанні фазових різниць. Цей метод традиційно вважають найточнішим, оскільки фазові різниці дають можливість виключити або звести до мінімуму вплив похибок, спричинених затримками під час проходження сигналу від супутника до приймача через іоносферу та тропосферу Землі, а також випадкові зміщення шкал часу супутника та приймача щодо системних шкал GNSS-часу. У спостереженнях беруть участь два і більше GNSS-приймачі і визначають не просторове положення кожної точки окремо, а компоненти просторового базового вектора ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$), що їх з'єднує.

Як ми вже зазначали, перспективним є метод позионування з використанням технології PPP, яка не потребує використання мережі GNSS-станцій. Це знижує вартість позионування та спрощує всю систему обслуговування користувачів супутникової інформації.

Під час реалізації методу PPP принципового значення, на відміну від відносного (різницевого) методу, набуває врахування (компенсація) впливу специфічних джерел похибок, таких як геодинамічні (припливні тощо) ефекти, ефекти додаткового фазового зміщення, зумовленого обертянням антен супутника та приймача (“wind-up”-ефекту), нерівномірності фазових характеристик антен супутників та приймачів тощо.

Отже, принцип роботи PPP оснований на кодових і фазових вимірюваннях та зовнішній ефемеридно-часовій інформації. Тобто сама технологія PPP спирається

на два загальні джерела інформації: прямі спостереження та ефемеридно-часову інформацію, а також всебічно враховує та ретельно моделює різні помилки, породжені багатьма додатковими факторами, особливо середовищем поширення супутникових сигналів. Порівняно з відносним позионуванням (RTK), перевага PPP полягає у тому, що не потрібні сусідні референційні станції, користувач може досягти високої точності позионування лише з одним приймачем [Savchuk et al., 2020]. Головним недоліком є те, що навіть незначні зміщення фази (phase bias), спричинені апаратною затримкою у тракті супутника та в тракті приймача, поглинатимуться неоднозначністю, через що відповідна неоднозначність не буде цілим числом. І, власне, складність PPP полягає у тому, щоб відокремити фазове зміщення від неоднозначності й тим самим однозначно її розв'язати (ambiguity resolution – AR) [Kouba and Héroux, 2001; Ge et al., 2008; Geng et al., 2019]. Звідси і походить сучасний підхід до високоточного абсолютного визначення місця розташування з вирішенням цілочислової неоднозначності псевдофазових вимірювань – PPP-AR. Цей підхід передбачає використання глобальної мережі перманентних GNSS-станцій для оцінювання зміщень коду та фази на додаток до коригування орбіт та поправок годинників [Banville et al., 2020]. Спеціалізоване програмне забезпечення декодує та застосовує ці оцінки та корекції для забезпечення покращеної продуктивності. За останніх декілька років розроблено низку програмних продуктів для реалізації технології PPP-AR. Одним із них є програмний пакет PRIDE PPP-AR [Geng et al., 2019], розроблений у 2019 р. та кілька разів вже модифікований. Остання його версія з'явилася у жовтні 2022 р. PRIDE PPP-AR – програмний пакет, розроблений на базі ОС Linux, що дає змогу опрацьовувати спостереження від усіх доступних сьогодні систем GNSS [PRIDELab: PRIDE PPP-AR II MANUAL, 2022].

У цьому дослідженні узагальнено опубліковані та власні оцінки точності методу PPP-AR з метою визначення можливості його застосування для геодезичних та геодинамічних досліджень. Ми аналізували результати лише добових спостережень у статичному режимі як такі, що забезпечують найвищу точність.

Аналіз останніх досліджень

Метод точного позионування PPP у традиційній реалізації забезпечує абсолютне визначення координат і оснований на використанні супутникової коригувальної інформації, що містить поправки до ефемерид і часу бортових годинників навігаційних супутників та атмосферних поправок у межах локальної області, що дає змогу визначати просторові координати об'єктів із доволі високою точністю [Liu et al., 2017].

Крім цього, існує кілька модифікацій методу PPP, а саме: PPP (Float PPP) – реалізація методу без

розв'язування цілочислової неоднозначності псевдофазових вимірювань; PPP-AR (Integer PPP) – з розв'язуванням цілочислової неоднозначності псевдофазових вимірювань; PPP-RTK – з розв'язуванням цілочислової неоднозначності псевдофазових вимірювань та використанням атмосферних корекцій у межах локальної області.

Дослідження точності методу PPP та його модифікацій ґрунтується на оцінці впливу різних факторів, що спричиняють систематичні похибки, та пошуку методів їх усунення. Усе це описано у багатьох публікаціях і методичних матеріалах, наприклад [Teunissen and Khodabandeh, 2015; Gandolfi et al., 2017; Zhang et al., 2022]. Загальні принципи роботи GNSS-позиціонування методом PPP викладено в [Hofmann-Wellenhof B. et. al., 2008].

У роботі [Katsigianni et al., 2019] детально описано принцип методу PPP-AR, а основний акцент зроблено на три базові методи розв'язання цілочислової фазової неоднозначності та аналізі їх переваг та недоліків.

У публікації [Khodabandeh, 2021] описано комбінацію PPP із мережею перманентних станцій, PPP-RTK. Автор порівняв точність цього методу під час роботи у великих і малих мережах GNSS-станцій.

Ми проаналізували також ще чимало робіт, що дало змогу узагальнити результати оцінок точності методу PPP, які отримали різні автори. У результаті ми отримали усереднені значення середніх квадратичних помилок (СКП) різниць “істинних” і вимірних значень GNSS-PPP координат (зовнішня збіжність), які дорівнювали 10 мм у плані та 15 мм за висотою; СКП положення точки за результатами оцінки внутрішньої збіжності становили 5 і 8 мм у плані й за висотою відповідно. Зіставленням з “істинними” значеннями вважали як різниці референціальних (опорних) і визначених PPP-методом координат, так і різниці координат, отриманих методом PPP та відносним методом подвійних фазових різниць.

Мета

Мета роботи – виявлення реальної точності однієї із модифікацій методу PPP – PPP-AR на прикладі даних з чотирьох перманентних GNSS-станцій: SULP (Львів), FRAN (Івано-Франківськ), RAH1 (Рахів), TERN (Тернопіль), що входять у Європейську мережу EPN.

Методика

Стандартне високоточне абсолютне місцевизначення у GNSS здійснюється із використанням високоточної ефемеридно-часової інформації, компенсації низки систематичних зміщень у вимірюваннях та використанні точних, але неоднозначних псевдофазових вимірів. Однією з характерних особливостей визначення місцезнаходження у режимі PPP є те, що всі необхідні для його реалізації продукти мережевого

розв'язку обмежуються високоточними координатами супутників і поправками у показаннях годинників супутників, які становлять необхідну ефемеридно-часову інформацію (необхідні коефіцієнти гармонік для розрахунку зміщень, пов'язаних з океанічними припливними ефектами), а також коефіцієнти руху полюсів Землі на дату проведення вимірювань не є продуктами мережевого розв'язку і розглядаються як доступні сторонні дані). В цьому випадку точність абсолютних координат у режимі PPP та оперативність їх отримання залежать від точності ефемеридно-часової інформації, умов приймання сигналу та математичної моделі вимірювань, що використовуються, і може становити від сантиметра і менше і до дециметрів. Класичним чи стандартним можна назвати режим високоточного абсолютного визначення, у якому не враховано цілочислової природи неоднозначностей псевдофазових вимірів, тобто відсутня процедура отримання цілочислової неоднозначності. Цей режим з'явився першим і в англійській літературі позначається як Float PPP. У разі використання процедури визначення цілочислової неоднозначності псевдофазових вимірювань режим високоточного абсолютного позиціонування прийнято називати Integer PPP (PPP-AR).

Цілочислова неоднозначність, або просто “Integer” PPP, – синонім, який зазвичай використовують щодо PPP із підтримкою AR (ambiguity resolution). У межах IGS PPP-AR (PPP with AR) використовується як загальний термін, що стосується цієї конкретної модифікації PPP та результатів його аналізу. Істотною особливістю PPP-AR є те, що це, за суттю, відносна техніка, коли єдиний приймач обробляється стосовно розв'язку глобальної мережі, що забезпечує корекцію супутникового годинника. У контексті PPP-AR це означає, що цілочислові неоднозначності фази для одного приймача фактично відповідають неоднозначності подвійних різниць (Teunissen and Khodabandeh 2015). Отже, PPP-AR потрібно розглядати як стратегію недиференційованого опрацювання, яка безпосередньо конкурує з традиційним опрацюванням подвійних різниць із фіксованою неоднозначністю. Це одна з причин, чому PPP-AR стає ключовим інструментом для користувачів із одним приймачем, які опрацьовують дані GNSS-спостережень, що надходять від віддалених приймачів.

Загальна невизначеність стосується питання про те, яку необхідну інформацію про зміщення фази (phase bias) необхідно надавати користувачеві PPP-AR [Schaer et al., 2021]. До цього часу кожен метод подання зміщень (годинників/зміщення фази), що підтримує AR, мав власну практику надання необхідної інформації про зміщення. Тепер подання зміщень покладається на формат даних GNSS-зміщення, офіційно затверджений IGS [Banville et al., 2020; Schaer, 2018].

Як зазначено вище, за останніх декілька років (2018–2023) розроблено низку програмних некомерційних продуктів для реалізації технології PPP-AR. Функціонал таких програм найчастіше відповідає науковому програмному забезпеченню. Їх вихідний код, як правило, відкритий, його може редагувати користувач, що надзвичайно цінно для різноманітних досліджень. Такі програми найчастіше розробляють науково-дослідні та освітні організації. Серед них: PPPH [Bahadur and Nohutcu, 2018], PPP-ARISEN [Zhang et al., 2023], MG-APP

[Xiao et al., 2020], PPPLib [Chen and Chang, 2021] тощо. Одним із них є також програмний пакет PRIDE PPP-AR [Geng et al., 2019], що був розроблений у 2019 р. та кілька разів вже модифіковувався. Остання його версія з'явилася у жовтні 2022 р. PRIDE PPP-AR – програмний пакет, розроблений на базі ОС Linux, що дає змогу опрацювати спостереження від усіх доступних сьогодні систем GNSS [PRIDELab, 2022]. У табл. 1 наведено основні характерні параметри для вибору стратегії опрацювання програмним пакетом PRIDE PPP-AR.

Таблиця 1

Стратегії опрацювання PRIDE PPP-AR

Table 1

PRIDE PPP-AR processing strategies

Стратегія	PPP-AR
Модель опрацювання	Статика та кінематика
Зовнішні продукти [Geng et al., 2019; Precise products]	Satellite orbit = *.EPH Satellite clock = *.CLK ERP = *.ERP Quaternions = *.OBX Code/phase bias = *.BIA
Підтримка RINEX 3.04	+
Тропосферна затримка	Суха компонента: коригується за допомогою моделі GPT3 Волога компонента оцінюється як процес випадкового блукання Функції відображення: NIE/GMF/VM1/VM3
Сузір'я	GPS/Galileo/BDS-2/BDS-3/QZSS
Тривалість часу для розв'язування фазової неоднозначності [с]	600
Геофізичні зміщення станцій	Коригується згідно з IERS convention 2010 [Petit and Luzum, 2010]
Мінімальний кут нахилу супутника	5°
Модель іоносфери	Іоносферна корекція другого порядку
Система відліку	ITRF 2014
Корекції фазового центра антен	IGS14.atx [ANTEX file]

Оскільки таке програмне забезпечення працює на основі відкритого коду, це дає можливість користувачеві вносити необхідні параметри та правки для опрацювання. Наприклад, для коригування за вплив тропосфери можна використовувати функції відображення *Neil Model (NIE)*, *Global Mapping Function (GMF)*, *Vienna Mapping Function (VMF1/VMF3)*, а вхідні параметри для них визначають на основі метеорологічної моделі GPT3.

Для досягнення поставленої мети ми використали дані із перманентних GNSS-станцій Європейської мережі [Regional Data Centre of EUREF Permanent GNSS Network (EPN)], координати яких були відомі з найвищою можливою точністю. Для дослідження ми вибрали три повні тижні GNSS-спостережень у 2022 р.: один у липні (2217 GPS-тиждень), один у серпні (2222

GPS-тиждень) та один у вересні (2226 GPS-тиждень). Дані спостережень з вибраних станцій фіксували у форматі Rinex 3.04 [Gurtner and Estey, 2018], що автоматично передбачало використання всіх доступних сьогодні GNSS-сузір'їв.

Наступним кроком було опрацювання файлів Rinex у програмному середовищі PRIDE PPP-AR, попередньо інстальованому на сервер з операційною системою Ubuntu. Координати кожної станції були обчислені з однаковими вхідними параметрами, а саме з урахуванням іоносферної корекції другого порядку та функцією відображення похилих зенітних затримок сигналів від супутників у напрям зеніту VMF3. Отримані набори координат ми порівнювали із контрольними координатами цих станцій. Для вибраних часових періодів за

контрольні ми приймали координати, обчислені у комбінованому центрі опрацювання EPN [Product of EUREF Permanent GNSS Network (EPN)].

Результати

Порівняння отриманих координат із контрольними дало змогу визначити їх різниці $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$. Вказані різниці координат для кожної із станцій подано на рис. 1–4 у вигляді їх часової зміни.

Ці графіки наочно демонструють наявність однонаправлених постійних похибок. Розглядаючи зміни координат між окремими станціями на наведених графіках, а також на підставі табл. 2 та її діаграмного аналога (рис. 5), бачимо, що вони незначні (1–2 мм).

Як показують табл. 2 та рис. 5, середнє значення різниць координат – близько 6 мм для складових X та Z і до 1,6 мм для складової Y , а середньоквадратична похибка (СКП) – на рівні 3 мм та 1,3 мм відповідно.

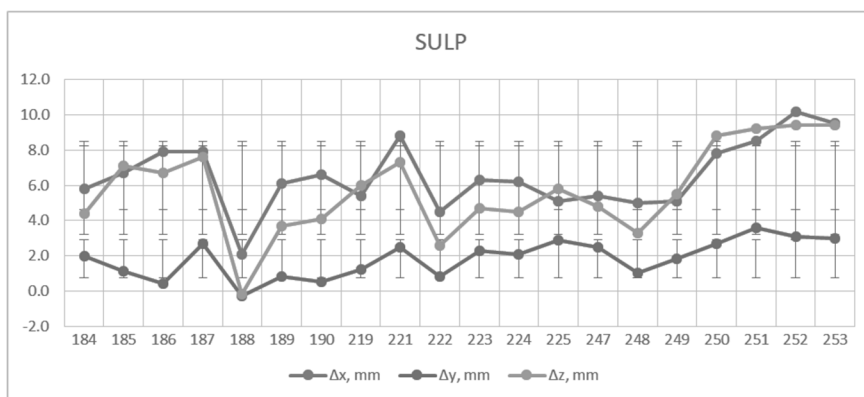


Рис. 1. Різниці координат для станції SULP

Fig. 1. Coordinate differences at the station SULP

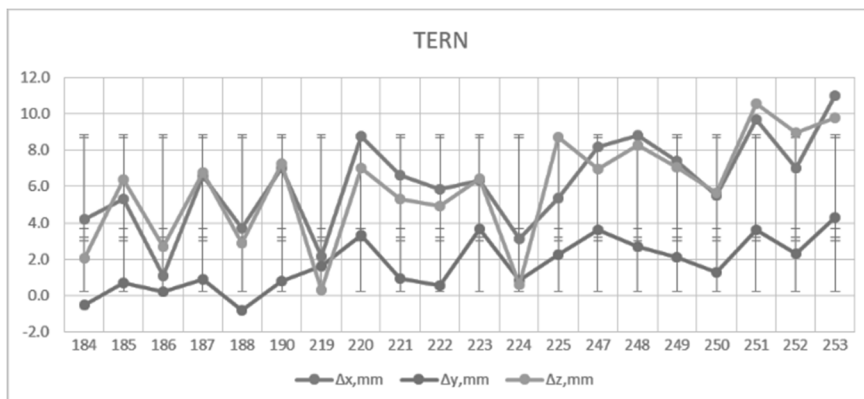


Рис. 2. Різниці координат для станції TERN

Fig. 2. Coordinate differences at the station TERN

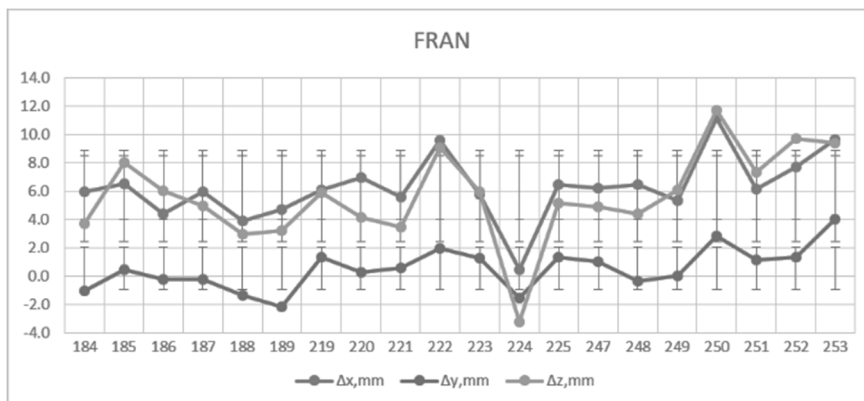


Рис. 3. Різниці координат для станції FRAN

Fig. 3. Coordinate differences at the station FRAN

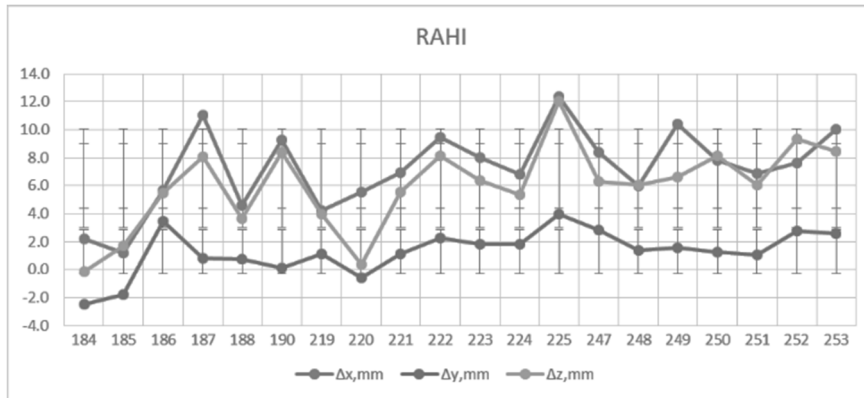


Рис. 4. Різниці координат для станції RAHI

Fig. 4. Coordinate differences at the station RAHI

Таблиця 2

Статистичні характеристики різниць координат

Table 2

Statistical characteristics of coordinate differences

Статистичні характеристики	X, мм				Y, мм				Z, мм			
	SULP	FRAN	TERN	RAHI	SULP	FRAN	TERN	RAHI	SULP	FRAN	TERN	RAHI
Середнє значення	6,5	6,3	6,2	7,2	1,8	0,6	1,7	1,3	5,7	5,7	5,9	6,0
Максимальне	10,2	11,1	11,0	12,3	3,6	4,1	4,3	3,9	9,4	11,7	10,6	12,1
Мінімальне	2,1	0,5	1,1	1,2	-0,3	-2,1	-0,8	-2,5	-0,2	-3,2	0,3	-0,1
СКП	1,9	2,2	2,4	2,8	1,1	1,5	1,4	1,6	2,5	3,1	2,8	2,9

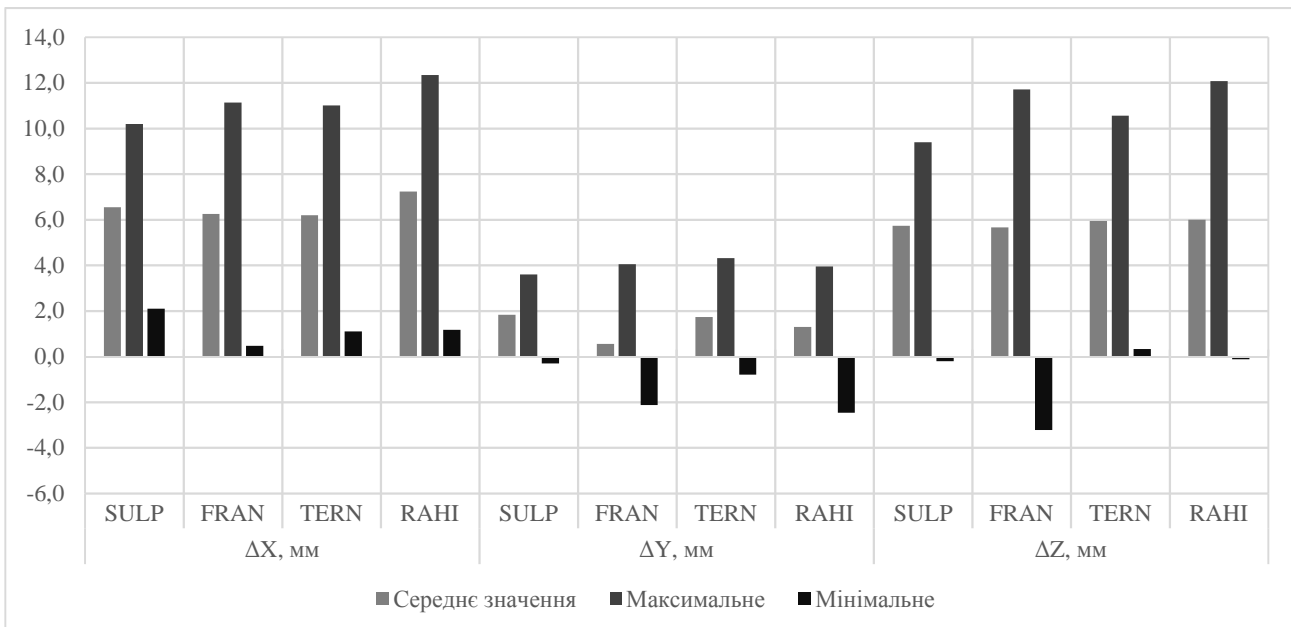


Рис. 5. Статистичні характеристики різниць координат

Fig. 5. Statistical characteristics of coordinate differences (chart)

Як свідчать отримані дані, метод PPP-AR на сучасному етапі розвитку GNSS-технологій за характеристиками досягає точності методу відносних визначень

координат. Його можна застосовувати не тільки у задачах геодезії, але й у геодинамічних дослідженнях за умови використання результатів добових GNSS-спостережень.

Певну зацікавленість викликає співвідношення оцінок внутрішньої (СКП) та зовнішньої збіжності (різниць координат), що є близьким до двох. Це співвідношення може бути ефективним у разі використання СКП, отриманої за внутрішньою збіжністю, для оцінок реальнішої точності координатних визначень. Причину такого ефекту можна пояснити високою кореляцією між багатократними визначеннями координат, що спостерігається, незважаючи на неперервне удосконалення технологій.

Висновки

У статті увагу зосереджено на PPP-AR-стратегії мульти-GNSS і мультичастотного опрацювання добових супутникових спостережень. Для перевірки алгоритмів програмного пакета PRIDE PPP-AR виконано експериментальні дослідження з використанням глобально розподілених станцій MGEX [Montenbruck et al., 2017] та вибраних перманентних станцій мережі EPN.

1. Виконаний аналіз точнісних можливостей методу абсолютних високоточних координатних визначень розширяє сферу його застосування в геодезії та суміжних науках.

2. Отримані оцінки за результатами опрацювання добових GNSS-спостережень обґрунтовують можливість застосування методу PPP-AR для виявлення та аналізу деформацій земної поверхні.

3. На основі опрацювання даних GNSS-вимірювань на перманентних станціях SULP, TERN, FRAN, RAN1 методом PPP-AR виявлено, що точність визначення координат достатньо висока, проте помітно систематичну різницю у декілька міліметрів. На наш погляд, це може бути спричинено недостатнім урахуванням деяких факторів геофізичного походження, наприклад, атмосферного навантаження.

4. Програмний пакет PRIDE PPP-AR для опрацювання супутникових спостережень відповідає найвищим вимогам щодо точності отримуваних результатів.

Література

- Banville S., Geng J., Loyer S., Schaer S., Springer T., Strasser S. (2020). On the interoperability of IGS products for precise point positioning with ambiguity resolution. *Journal of Geodesy*, 94:1–15.
- Geng J., Xingyu C., Pan Y., Zhao Q. (2019). A modified phase clock/bias model to improve PPP ambiguity resolution at Wuhan University. *Journal of Geodesy*, 93:2053–2067.
- Gurtner W., Estey L. (2018). RINEX: The receiver independent exchange format version 3.04. <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex304.pdf>.
- Schaer S. (2018). SINEX_BIAS—Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format for GNSS Biases Version 1.00. https://files.igs.org/pub/data/format/sinex_bias_100.pdf.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. (2008). GNSS-Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and More; Springer: Vienna, Austria, p. 59.
- Petit G., Luzum B. (2010). IERS Conventions; Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie: Frankfurt am Main, Germany, Vol. 36, p. 179.
- Savchuk S., Cwiklak J., Khoptar A. (2020). Precise Point Positioning Technique Versus Relative Positioning. *Baltic Surveying*, Vol. 12, 40–44.
- Geng J., Chen X., Pan Y. et al. (2019). PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions*, Vol. 23: 91.
- Chen C., Chang G. (2021). PPPLib: An open-source software for precise point positioning using GPS, BeiDou, Galileo, GLONASS, and QZSS with multi-frequency observations. *GPS Solutions*, Vol. 25:18.
- Xiao G., Liu G., Ou J., Liu G., Wang S., Guo A. (2020). MG-APP: an open-source software for multi-GNSS precise point positioning and application analysis. *GPS Solutions*, Vol. 22: 66.
- Bahadur B., Nohutcu M. (2018). PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS Solutions*. Vol. 22:113.
- Zhang C., Guo A., Ni S. et al. (2023). PPP-ARISEN: an open-source precise point positioning software with ambiguity resolution for interdisciplinary research of seismology, geodesy and geodynamics. *GPS Solutions*, Vol. 27:45.
- Geng, J., Chen, X., Pan, Y., Mao, S., Li, C., Zhou, J., Zhang, K. (2019). PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions*, Vol. 23:91.
- PRIDELab: PRIDE PPP-AR II MANUAL/PRIDELab – GNSS Research Center, Wuhan University, 2022.
- Product of EUREF Permanent GNSS Network (EPN). Available online: <ftp://epncb.oma.be/epncb/product/combin/> (accessed on 17.01.2023).
- Precise products. Available online: <ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/whu/phasebias/> (accessed on 17.01.2023).
- ANTEX file. Available online: https://files.igs.org/pub/station/general/pcv_archive/ (accessed on 17.01.2023).
- Kouba J., Héroux P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, Vol. 5:2, pp.12–28.
- Montenbruck O., Steigenberger P., Prange L. et al. (2017). The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research*, Vol. 59, 1671–1697.
- Teunissen P. J. G., Khodabandeh A. (2015). Review and principles of PPP-RTK methods. *Journal of Geodesy*, 89:217–240.

- Khodabandeh, A. (2021). Single-station PPP-RTK: Correction latency and ambiguity resolution performance. *Journal of Geodesy*, 95(4), 1–24.
- Liu T., Yuan Y., Zhang B., Wang N., Tan B., Chen Y. (2017). Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations. *Journal of Geodesy*, 91(3), 253–268.
- Ge M., Gendt G., Ma Rothacher, Shi C., Liu J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82(7):389–399.
- Zhang B., Hou P., Zha J. et al. (2022). PPP-RTK functional models formulated with undifferenced and uncombined GNSS observations. *Satellite Navigation*, 3, 3.
- Regional Data Centre of EUREF Permanent GNSS Network (EPN). Available online: <ftp://epncb.oma.be/epncb/obs/> (accessed on 17.01.2023).
- Gandolfi S., Tavasci L., Poluzzi L. (2017). Study on GPS-PPP precision for short observation sessions. *GPS Solutions*, Vol. 21:3, pp. 887–896.
- Katsigianni G., Loyer S., Perosanz F. (2019). PPP and PPP-AR Kinematic Post-Processed Performance of GPS-Only, Galileo-Only and Multi-GNSS. *Remote Sensing*, 11:21, 2477.
- Schaer S., Villiger A., Arnold D., Dach R., Prange L., Jäggi A. (2021). The CODE ambiguity-fixed clock and phase bias analysis products: generation, properties, and performance. *Journal of Geodesy*, 95: 81.

S. SAVCHUK, V. KERKER

Department of geodesy and astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail ssavchuk@polynet.lviv.ua

EXPERIMENTAL STUDIES OF PPP-AR TECHNOLOGY ACCORDING TO GNSS MEASUREMENT DATA AT A PERMANENT STATIONS

The relevance of PPP technology has greatly increased over the past 10 years. While the centimeter level of accuracy has already been practically ensured in most spheres of economic activity, first of all, in geodesy, the millimeter level for scientific tasks related to the study of the influence of geophysical factors on the environment is still the subject of research. The **purpose** of this work is to identify the real accuracy of the modification of the PPP-AR method using the example of data from four permanent GNSS stations: Sulp (Lviv), FRAN (Ivano-Frankivsk), RAHI (Rakhiv), TERN (Ternopil), included in the European the EPN network (EUREF Permanent GNSS Network). **Method.** To fulfill the given task, we used data from four permanent GNSS stations. 3 weeks of observations were processed: one in July (2217 GPS week), one in August (2222 GPS week) and one in September (2226 GPS week). Processing of the observation files was carried out in the PRIDE PPP-AR software environment, which was pre-installed on the server with the Ubuntu operating system. The coordinates of each station were calculated with the same input parameters, namely, taking into account the second-order ionospheric correction and the function of displaying inclined zenith delays of signals from satellites in the direction of the VMF3 zenith. We compared the obtained sets of coordinates with the control coordinates of these stations. For the time periods we chose, the coordinates calculated by the relative method based on the formation of phase differences in the combined EPN processing center were taken as control. **The results.** The main results of our research were the difference of coordinates (comparison of the received coordinates with control ones). For each station, the obtained differences are unidirectional in nature and vary little between stations. The average value of the coordinate differences was from 0.6 to 7.2 mm and practically does not depend on the processing time interval. The root mean square error (RMS) of the coordinate differences is at the level of 1.5–3 mm and also changes little over time. It was found that the accuracy of determining the coordinates based on the processing of GNSS measurement data at permanent stations Sulp, TERN, FRAN, RAHI using the PPP-AR method is quite high, but a systematic difference of several millimeters is noticeable, which may be caused by insufficient consideration of some factors of geophysical origin. **Scientific novelty and practical significance.** It is shown that the PPP-AR method at the current stage of development of GNSS technologies achieves the accuracy of the coordinate determination method based on phase differences and can be applied not only in geodesy tasks, but also in geodynamic studies, provided the results of daily GNSS observations are used. A promising direction for further research is the identification of unaccounted sources of systematic errors.

Key words: GNSS; Precise Point Positioning; Technology PPP-AR; PRIDE PPP-AR; coordinate precision.

References

- Banville S., Geng J., Loyer S., Schaer S., Springer T., Strasser S. (2020). On the interoperability of IGS products for precise point positioning with ambiguity resolution. *Journal of Geodesy*, 94:1–15.

- Geng J., Xingyu C., Pan Y., Zhao Q. (2019). A modified phase clock/bias model to improve PPP ambiguity resolution at Wuhan University. *Journal of Geodesy*, 93:2053–2067.
- Gurtner W., Estey L. (2018). RINEX: The receiver independent exchange format version 3.04. <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex304.pdf>.
- Schaer S. (2018). SINEX_BIAS – Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format for GNSS Biases Version 1.00. https://files.igs.org/pub/data/format/sinex_bias_100.pdf.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. (2008). GNSS-Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and More; Springer: Vienna, Austria, p. 59.
- Petit G., Luzum B. (2010). IERS Conventions; Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie: Frankfurt am Main, Germany, Vol. 36, p. 179.
- Savchuk S., Cwiklak J., Khoptar A. (2020). Precise Point Positioning Technique Versus Relative Positioning. *Baltic Surveying*, Vol. 12, pp. 40–44.
- Geng J., Chen X., Pan Y. et al. (2019). PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions*, Vol. 23:91.
- Chen C., Chang G. (2021). PPPLib: An open-source software for precise point positioning using GPS, BeiDou, Galileo, GLONASS, and QZSS with multi-frequency observations. *GPS Solutions*, Vol. 25:18.
- Xiao G., Liu G., Ou J., Liu G., Wang S., Guo A. (2020). MG-APP: an open-source software for multi-GNSS precise point positioning and application analysis. *GPS Solutions*, Vol. 22:66.
- Bahadur B., Nohutcu M. (2018). PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS Solutions*, Vol. 22:113.
- Zhang C., Guo A., Ni S. et al. (2023). PPP-ARISEN: an open-source precise point positioning software with ambiguity resolution for interdisciplinary research of seismology, geodesy and geodynamics. *GPS Solutions*, Vol. 27:45.
- Geng, J., Chen, X., Pan, Y., Mao, S., Li, C., Zhou, J., Zhang, K. (2019). PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions*, Vol. 23:91.
- PRIDELab – PRIDE PPP-AR II MANUAL / PRIDELab – GNSS Research Center, Wuhan University, 2022.
- Product of EUREF Permanent GNSS Network (EPN). Available online: <ftp://epncb.oma.be/epncb/product/combin/> (accessed on 17.01.2023).
- Precise products. Available online: <ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/whu/phasebias/>. (accessed on 17.01.2023).
- ANTEX file. Available online: https://files.igs.org/pub/station/general/pcv_archive/ (accessed on 17.01.2023).
- Kouba J., Héroux P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*. Vol. 5:2, pp.12–28.
- Montenbruck O., Steigenberger P., Prange L. et al. (2017). The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research*, Vol. 59, 1671–1697.
- Teunissen P. J. G., Khodabandeh A. (2015). Review and principles of PPP-RTK methods. *Journal of Geodesy*, 89:217–240.
- Khodabandeh, A. (2021). Single-station PPP–RTK: Correction latency and ambiguity resolution performance. *Journal of Geodesy*, 95(4), 1–24.
- Liu T., Yuan Y., Zhang B., Wang N., Tan B., Chen Y. (2017). Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations. *Journal of Geodesy*, 91(3), 253–268.
- Ge M., Gendt G., Ma Rothacher, Shi C., Liu J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82(7):389–399.
- Zhang B., Hou P., Zha J. et al. (2022). PPP–RTK functional models formulated with undifferenced and uncombined GNSS observations. *Satellite Navigation*, 3, 3.
- Regional Data Centre of EUREF Permanent GNSS Network (EPN). Available online: <ftp://epncb.oma.be/epncb/obs/> (accessed on 17.01.2023).
- Gandolfi S., Tavasci L., Poluzzi L. (2017). Study on GPS-PPP precision for short observation sessions. *GPS Solutions*, Vol. 21:3, 887–896.
- Katsigianni G., Loyer S., Perosanz F. (2019). PPP and PPP-AR Kinematic Post-Processed Performance of GPS-Only, Galileo-Only and Multi-GNSS. *Remote Sensing*, 11:21, 2477.
- Schaer S., Villiger A., Arnold D., Dach R., Prange L., Jäggi A. (2021). The CODE ambiguity-fixed clock and phase bias analysis products: generation, properties, and performance. *Journal of Geodesy*, 95: 81.