

Д.П. Побігайло, аспірант, асистент
Державний університет «Житомирська політехніка»
А.К. Камбуров, доцент
University of Mining and Geology «Saint Ivan Rilski»
Д.В. Мітченко, аспірант
Криворізький національний університет

Оцінка точності GNSS-вимірювань у режимі RTK із використанням комерційних та некомерційних мереж поправок

У статті представлено порівняльний аналіз точності GNSS-вимірювань (Global Navigation Satellite System) у режимі RTK (Real-Time Kinematic) із використанням корекційних сервісів мереж GeoNet, IYocto, EUREF (European Reference Frame) та EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) в індивідуальних режимах та з використанням VRS (Virtual Reference Station). Координати, отримані за допомогою приймачів CHCNAV i50 та Trimble R4, були зіставлені з еталонними значеннями, визначеними роботизованим тахеометром Trimble S6. Оцінка виконувалася на основі розрахунку горизонтальних та вертикальних похибок, а також СКП (середньої квадратичної похибки) для кожної з мереж. За результатами дослідження найменшу СКП продемонструвала мережа GeoNet (0,026 м загальна похибка), що підтверджує її високу ефективність у реальних умовах. Мережі IYocto і EUREF показали гірші результати, а EGNOS виявилася найменш придатною для високоточної геодезії через значні вертикальні та планові похибки. Додатково було проаналізовано результати PPK (Post-Processed Kinematic), однак через коротку тривалість фіксації ці дані розглядаються лише як орієнтовні. Отримані результати засвідчують потенціал комерційних RTK-мереж для досягнення сантиметрової точності, що відповідає вимогам сучасної геодезичної практики.

Ключові слова: GNSS; VRS; Network RTK; PPK; CORS networks.

Актуальність теми. Високоточне GNSS-позиціонування є критично важливим для сучасних геодезичних та маркшейдерських задач. RTK-метод забезпечує сантиметрову точність у реальному часі, однак його ефективність суттєво залежить від характеристик мережі поправок. Сьогодні доступні як комерційні, так і некомерційні RTK-мережі, проте питання їх порівняльної точності в реальних умовах недостатньо вивчене. Це дослідження дозволяє оцінити надійність таких мереж, як GeoNet, IYocto, EUREF та EGNOS, з метою вибору оптимального рішення для польових робіт, що є актуальним для практикуючих геодезистів та маркшейдерів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Аналіз наукових праць і джерел, покладених в основу дослідження, свідчить про активний розвиток технологій супутникового позиціонування та важливість оцінки точності RTK- і PPK-методів у практичній геодезії. Теоретичні засади функціонування GNSS та методів обробки вимірювань детально викладено у працях B.Hofmann-Wellenhof та співавторів [1], а також С.Д. Ghilani [3]. Питання точності позиціонування, зокрема у контексті використання віртуальних референтних станцій, висвітлено у роботі L.Wanninger [5]. Аспекти практичного застосування швидких статичних спостережень проаналізовано в дослідженні S.Meneses III [6]. Інформацію щодо функціонування та технічних характеристик GNSS-мереж GeoNet і IYocto подано на офіційних сайтах [2, 10, 11], а особливості роботи некомерційних систем EUREF та EGNOS – у відповідних публікаціях і документах [7–9]. Рекомендації щодо застосування GNSS для досягнення високої точності вказано також у технічному ресурсі компанії «Trimble» [4].

Мета статті – визначити, яка з RTK-мереж забезпечує найменшу похибку позиціонування в умовах практичного застосування.

Викладення основного матеріалу

1. Вступ

Сучасні маркшейдерські, геодезичні, картографічні та інженерні задачі все частіше потребують точного позиціонування в реальному часі. GNSS-технології, зокрема метод RTK, широко застосовуються для досягнення сантиметрової точності в польових умовах. Проте рівень точності суттєво залежить від обраної мережі поправок.

У цій роботі проведено порівняння точності позиціонування при використанні чотирьох RTK-мереж: GeoNet, IYocto, EUREF та EGNOS. Комерційні та некомерційні сервіси значно відрізняються за щільністю базових станцій, якістю переданих поправок та стабільністю сигналу. Додатково проаналізовано орієнтовні результати у режимі PPK, однак із урахуванням обмеженої тривалості фіксації.

Еталонні координати контрольних точок були отримані за допомогою роботизованого тахеометра Trimble S6, що дозволило об'єктивно оцінити точність GNSS-вимірювань. Дані збиралися в місті Софія (Болгарія) з використанням приймачів Trimble R4 та CHCNAV i50, а обробка виконувалася у Trimble Business Center (TBC).

Основні завдання:

- 1) зібрати координати контрольних точок у режимі RTK з використанням мереж GeoNet, 1Yocto, EGNOS та EUREF;
- 2) провести спостереження в режимі PPK (GeoNet);
- 3) порівняти отримані координати з еталонними значеннями;
- 4) встановити, яка мережа забезпечує найвищу точність для застосування в інженерній геодезії.

2. Літературний огляд

2.1. Принцип дії RTK і фактори точності

Метод RTK ґрунтується на диференційному визначенні координат у режимі реального часу за допомогою двох GNSS-приймачів – базового та роверного. Базова станція розташована на точці з відомими координатами та паралельно з ровером виконує вимірювання фаз несучої частоти та псевдовідстаней до супутників [1]. На основі різниці між спостереженнями і відомим положенням бази обчислюються поправки, що передаються роверному приймачу через радіоканал або інтернет-з'єднання [2].

Ці поправки дозволяють компенсувати основні похибки GNSS-сигналу (наприклад, іоносферні та тропосферні затримки, похибки супутникових годинників), завдяки чому RTK забезпечує сантиметрову точність у реальному часі [1, 3]. Метод передбачає розв'язання цілих фазових неоднозначностей «на льоту», що дає змогу оперативно визначати координати у вибраній системі координат [1].

Важливою умовою стабільної роботи RTK є постійна передача поправок з частотою щонайменше 1 Гц [1]. Одним із ключових обмежень точності є відстань між базовою та роверною станцією: зі збільшенням цієї відстані точність знижується через ріст некорельованих похибок, насамперед іоносферних. Типова точність RTK у межах 30 км становить $\approx 8 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$ по горизонталі та $\approx 15 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$ по вертикалі (СКП) [4].

Практично RTK забезпечує надійну роботу при базових лініях до 20–30 км. При перевищенні цього порога значно зростає час ініціалізації та погіршується якість фіксованого рішення [4]. Для покращення точності та збільшення зони покриття використовують мережеві RTK-рішення, зокрема технологію VRS [5]. Метод VRS створює віртуальну базу поблизу ровера на основі інтерполяції поправок з кількох реальних референтних станцій, що ефективно скорочує довжину базової лінії до кількох кілометрів, забезпечуючи високу точність навіть на великих відстанях від фізичної бази [5].

2.2. PPK: методика, переваги та обмеження

Метод PPK дозволяє досягати високої точності позиціонування без потреби у постійному зв'язку між базовим і роверним GNSS-приймачами під час польових робіт. На відміну від RTK, у якому поправки передаються в реальному часі, у PPK ці поправки застосовуються офлайн – під час обробки, що виконується після завершення спостережень [1].

Як і RTK, PPK базується на диференційному аналізі фазових вимірів. Базова та роверна станції синхронно реєструють необроблені дані, які потім комбінуються у програмному забезпеченні для обчислення відносного положення ровера щодо бази [1]. У процесі обробки враховуються точні супутникові орбіти, моделі затримок у середовищі, виконується розв'язання фазових неоднозначностей. Завдяки можливості використання обчислень у прямому та зворотному часі, метод демонструє підвищену стійкість до перешкод та втрат сигналу.

При успішній фіксації фазових циклів, точність PPK може досягати $2,5 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$ по горизонталі, що відповідає точності класу В у класичній геодезії [1, 6]. Однією з головних переваг PPK є незалежність від стабільного зв'язку з базовою станцією – ровер може перебувати навіть на відстані понад 50 км за умови якісного запису спостережень [1].

Однак слабким місцем методу є те, що координати обчислюються лише після польових робіт – необхідна додаткова постобробка, що збільшує загальний час отримання результату та потребує відповідного програмного забезпечення.

2.3. Мережі поправок: комерційні та некомерційні сервіси, характеристики і надійність

Для підвищення ефективності та доступності високоточного GNSS-позиціонування створено мережі референтних станцій, що безперервно працюють і надають поправки користувачам. За охопленням і призначенням такі мережі поділяють на глобальні / континентальні, призначені в основному для наукових і навігаційних цілей, та регіональні / локальні, орієнтовані на практичні задачі землеустрою, будівництва, транспорту тощо. Некомерційні мережі, як правило, створюються державними або науковими установами і надають дані відкрито або на пільгових умовах. Прикладом є європейська континентальна мережа EPN (EUREF Permanent GNSS Network), що об'єднує понад 300 постійно діючих станцій по всій Європі [7]. Дані усіх станцій EPN (щоденні та годинні файли спостережень, потоки реального часу) доступні безкоштовно через відкриті центри даних, а результати їх обробки – точні координати, швидкості та

параметри тропосфери – регулярно публікуються для користувачів [7]. Таким чином, мережа EUREF забезпечує фундамент геодезичної прив'язки і довгострокову стабільність відлікових систем координат в Європі. Втім, вона не була створена спеціально для оперативного сервісу RTK-корекцій кінцевим користувачам; її основна мета – підтримка єдиної високоточної референційної системи і науковий моніторинг (наприклад, геодинаміки та клімату) [7]. Для практичного застосування дані EPN можуть використовуватися у постобробці або для розбудови національних служб диференційного позиціонування.

Іншим прикладом некомерційної служби є супутникова система диференційних поправок EGNOS. EGNOS – це європейська SBAS-система (Satellite-Based Augmentation System), яка складається з мережі наземних станцій та геостационарних супутників, що передають поправки до сигналів GPS (Global Positioning System) / GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) з метою покращення точності та забезпечення цілісності для користувачів у Європі [8, 9]. Сигнал EGNOS надає поправки до орбіт та годинників GPS, а також до іоносферної затримки, що дозволяє зменшити помилки визначення координат. EGNOS використовується для забезпечення заходу літаків на посадку, морської навігації та інших задач, що не потребують сантиметрової точності. Однак для геодезичних робіт точності EGNOS недостатньо; тому професійні землевпорядні служби надають перевагу наземним мережам GNSS, які забезпечують сантиметрову точність.

На національному та регіональному рівні у багатьох країнах розгорнуті комерційні мережі референтних GNSS-станцій, що надають підписникам послуги RTK/PPK. Такі мережі зазвичай обслуговуються приватними компаніями або державними геодезичними установами на платній основі, але пропонують користувачам високу точність і зручність без потреби розгортання власної базової станції на місцевості. Прикладом є загальнонаціональні мережі GeoNet та IYocto в Болгарії. Мережа GeoNet покриває всю територію Болгарії і забезпечує доступ до RTK-поправок з сантиметровою точністю, необхідних для геодезичних робіт [11]. GeoNet сертифікована Агентством геодезії, картографії і кадастру Болгарії, тобто відповідає офіційним вимогам до виконання GNSS-вимірювань для кадастрових цілей [11]. В основі мережі – сучасне апаратне та програмне забезпечення Trimble, що гарантує надійність сервісу; заявлена доступність сигналу близька до 100 %, оскільки кожна станція мережі під'єднана до центру керування, що контролює якість даних і безперервність роботи системи.

На 2021 р. мережа IYocto включала 43 постійні GNSS-станції останнього покоління по всій країні, які відслідковують усі глобальні навігаційні системи (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)) [2]. Ця система також сертифікована національною кадастровою агенцією, підтверджуючи відповідність вимогам до точності і надійності [2]. Мережевий центр IYocto забезпечує користувачам кілька режимів роботи: реальний час – із можливістю отримувати поправки від найближчої фізичної станції, від віртуальної референтної станції (VRS) поблизу користувача або від вибраної станції за бажанням, у різних форматах (RTCM, CMR) [2]. Для потреб постобробки IYocto надає архіви даних: користувач може завантажити файли RINEX (Receiver Independent Exchange Format) з сирими вимірами як реальних базових станцій, так і згенерованих віртуальних (за запитом для заданих координат), з довільним інтервалом реєстрації [11]. Таким чином, сервіс охоплює повний спектр потреб – від кінематичного позиціонування «в полі» до високоточного статичного вимірювання і наступної обробки.

Доступ до ресурсів мереж GeoNet і IYocto надається за передплатою; різні тарифні плани дозволяють обрати оптимальний режим користування (погодинний, місячний, річний тощо) [10, 11].

Територіальне покриття розглянутих мереж показано на картах розміщення станцій в Болгарії (рис. 1).

При порівнянні комерційних і некомерційних мереж GNSS можна зазначити таке: комерційні (GeoNet, IYocto) орієнтовані на оперативне надання поправок з максимальною точністю і зручністю для кінцевого споживача, натомість некомерційні (EUREF, EGNOS) здебільшого зосереджені на забезпеченні фундаментальної інфраструктури та широкого кола навігаційних послуг. Вибір конкретного сервісу залежить від вимог до точності і бюджету: наприклад, для моніторингу техногенних деформацій необхідний сантиметровий рівень, що досягається лише з RTK/PPK-мереж, у той час як для GIS-картування (Geographic Information System) чи навігації транспорту достатньо субметрових поправок EGNOS [8]. Усі розглянуті мережі – і комерційні, і безкоштовні – відіграють важливу роль у сучасній структурі GNSS-навігації, доповнюючи одна одну та забезпечуючи користувачів різних категорій необхідним рівнем точності та надійності.

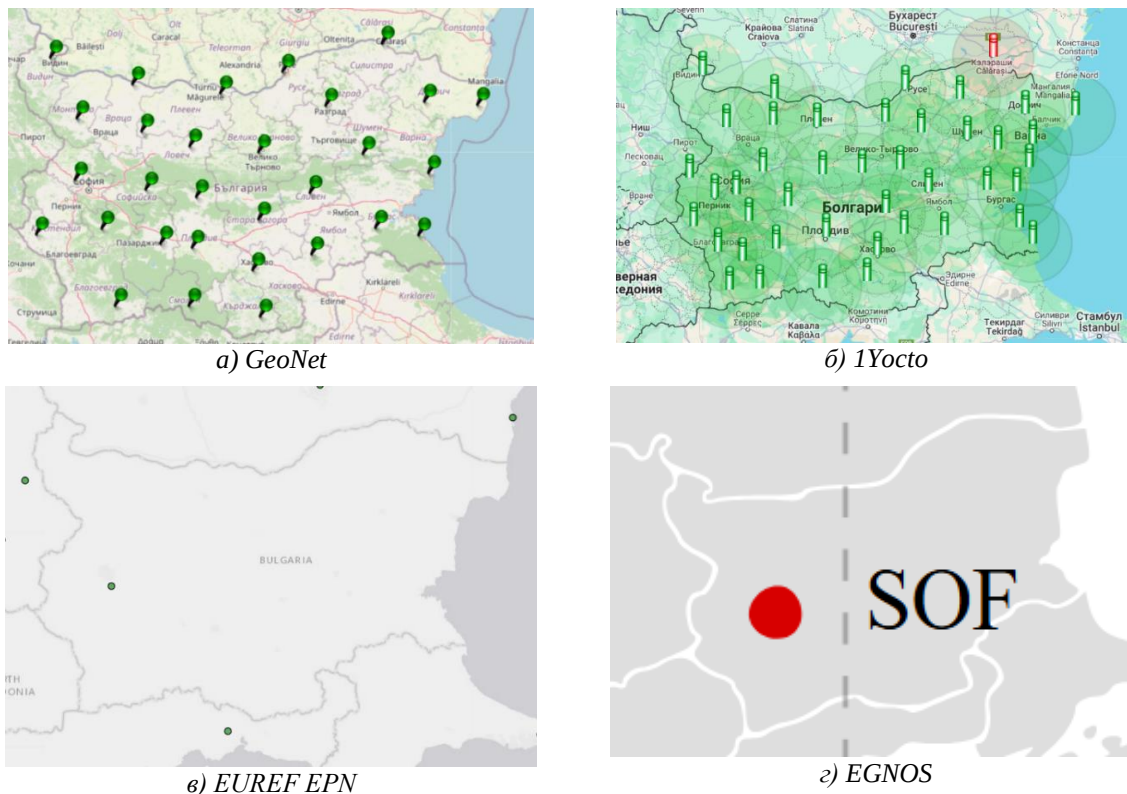


Рис. 1. Карти розміщення станцій комерційних та некомерційних мереж у Болгарії

2. Методика

2.1. Інструменти і обладнання

Польові вимірювання виконувалися із застосуванням сучасного геодезичного обладнання. Для кутових і лінійних вимірювань використовувався роботизований електронний тахеометр Trimble S6 (рис. 2). Цей прилад оснащений системою автосупроводу цілі, що забезпечує плавне та швидке наведення. Trimble S6 має високоточні кутомірні датчики (точність до 3"). Для GNSS-спостережень залучено два приймачі: Trimble R4 та CHCNAV i50 (рис. 2).



Рис. 2. Інструменти і обладнання

Приймач Trimble R4 підтримує GPS L1/L2. Він може працювати як у статичному режимі, так і в кінематичному з прийманням RTK-поправок через внутрішній UHF-радіомодем (Ultra High Frequency) або GSM-модуль (Global System for Mobile Communications). Другий приймач, CHCNAV i50, належить до нового покоління GNSS-обладнання: вбудований 624-канальний приймач забезпечує одночасне відстеження всіх основних сузір'їв (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), швидкий пошук сигналів та фіксацію RTK-розв'язку навіть у складних умовах прийому. Приймач CHCNAV i50 оснащений 4G-модемом для підключення до

інтернет-сервісів диференційних поправок. Всі GNSS-приймачі встановлювалися на стандартні віхи з рівнем та вимірною шкалою для визначення висоти антени над точкою.

2.2. Розташування точок

Дослідження проведено на території університету, що має відкритий простір серед кількох будівель. Було закладено декілька реперних точок на поверхні (асфальті / ґрунті), на яких здійснювалися спостереження. Для закладання пунктів буди використані дерев'яні реperi та металеві дюбелі. На супутниковому знімку (рис. 3) показано схему розташування цих пунктів.



Рис. 3. Схема розташування пунктів

Як видно з рисунка 3, пункти згруповані в межах ділянки $\sim 50 \times 50$ м, що дозволило виконувати їх взаємну прив'язку як GNSS-засобами, так і тахеометром. Пункт «Station» обрано як опорний для встановлення тахеометра. Інші точки розміщені таким чином, щоб бути у полі зору для тахеометра.

2.3. Процедура спостережень

Вимірювання складалося з трьох етапів у різні дні, із застосуванням методів RTK і PPK для визначення координат. Під час GNSS-спостережень використовувалися декілька джерел поправок: мережеві комерційні сервіси GeoNet, IYocto та некомерційні сервіси EUREF, EGNOS. Окрім цього, було використано роботизований тахеометр для отримання еталонних координат пунктів. Усі вимірювання виконувалися в системі координат UTM34N (Universal Transverse Mercator, zone 34 North) / WGS84 (World Geodetic System 1984). Нижче описано хід робіт для кожного етапу.

2.3.1. Етап I (07.03.2025)

На першому етапі було закладено 3 пункти: «Station», «Orient 1», «Orient 2». Через невелике розташування пункту «Orient 2», біля будівлі, не вдалося визначити його точні координати за допомогою приймача Trimble R4, тому цей пункт буде виключений у подальшому дослідженні. Координати пунктів «Station» та «Orient 2» були визначені у режимі RTK та PPK (час для спостереження PPK методом > 10 хв). Дані, отримані на першому етапі, не включені у загальні розрахунки, оскільки час спостережень на першому етапі в режимі PPK відрізняється від часу спостережень на наступних етапах, а також еталонні координати цих пунктів не були виміряні.

2.3.2. Етап II (20.03.2025)

На другому етапі було закладено додаткові пункти: '2', '3', '4', '5', '6', '7'. Було застосовано приймач Trimble R4, який працював у режимі RTK і PPK, використовуючи мережу поправок GeoNet. Одночасно було задіяно роботизований тахеометр Trimble S6 для вимірювання традиційних лінійно-кутових прив'язок між пунктами. Ці дані надалі використовувалися для спільної обробки та взаємного контролю.

2.3.3. Етап III (26.03.2025)

На заключному етапі проведено контрольні RTK-вимірювання з використанням багаточастотного приймача CHCNAV i50. Метою було порівняти точність різних мереж диференційних поправок. Приймач CHCNAV i50 послідовно підключався до трьох сервісів: IYocto, EUREF (найближча станція EPN) та EGNOS/EDAS (EGNOS Data Access Service). На кожному пункті виконували кілька незалежних вимірів координат, переключуючи джерело поправок. У ході виконання третього етапу виникла втрата репера пункт 5. Тому даний пункт надалі виключено з розрахунків.

2.4. Обробка даних у Trimble Business Center

Для опрацювання результатів використано програмне забезпечення Trimble Business Center версії 5.xx. Trimble Business Center – це професійне програмне забезпечення для обробки геодезичних даних, яке дозволяє імпортувати, редагувати та аналізувати GNSS- і тахеометричні вимірювання. Програма підтримує постобробку РРК, створення віртуальних базових станцій, візуалізацію координат і точний експорт результатів у різні формати.

Всі зібрані польові дані було імпортовано в ТБС: файли GNSS-спостережень, а також журнал вимірювань тахеометра. Для постобробки GNSS-даних у режимі РРК імпортовано зовнішні референційні дані. Під час обробки даних використовувалися VRS по-різним мережевим серверам. Було автоматично створено по одній VRS для мережесерверів GeoNet та 1Yocto, які дали можливість точного визначення координат в режимі РТК. Окрім того, для некомерційних серверів EGNOS та EUREF використовувалися дані з реальних базових станцій.

При обробці даних отриманих РРК-методом було створено дві VRS станції з ручним вибором їх місцезнаходження та використано одну реальну базову станцію. У результаті обробки РРК-даних у програмному середовищі Trimble Business Center для деяких точок було сформовано кілька розв'язків через варіативність геометрії супутників або зміну режиму фіксації. Для подальшого аналізу було обрано рішення з найменшим PDOP (Position Dilution of Precision) та максимальним числом супутників, як найбільш стабільне. Таким чином були усунуті помилки (червні прапорці), побудовані базисні лінії до станцій, обрані найстабільніші сигнали GNSS як для РТК, так і для РРК-вимірювань. Отримані дані зведено в таблиці 1 та використано для аналізу точності кожного з методів. Після завершення обчислень всі дані експортували в формат Excel для зручності подальшого аналізу.

Таблиця 1

Координати виміряних точок у WGS84 UTM 34N-проекції

Метод	Мережа	Назва точки	Координати		
			Northing	Easting	Height
1	2	3	4	5	6
РТК	1Yocto	2	4725693,721	692882,486	635,950
		3	4725713,199	692865,237	635,580
		4	4725723,393	692859,674	635,415
		5	-	-	-
		6	4725710,588	692856,015	635,455
		7	4725680,867	692856,444	636,306
	GeoNet	2	4725693,715	692882,456	635,935
		3	4725713,187	692865,204	635,565
		4	4725723,396	692859,645	635,460
		5	-	-	-
		6	4725710,579	692855,973	635,421
		7	4725680,841	692856,437	636,289
	EGNOS	2	4725698,643	692881,379	638,614
		3	4725717,086	692865,795	632,579
		4	4725727,452	692860,314	632,194
		5	-	-	-
		6	4725714,481	692856,592	631,900
		7	4725685,828	692855,328	638,977
	EUREF	2	4725693,789	692882,503	635,769
		3	4725713,262	692865,272	635,502
		4	4725723,501	692859,718	635,338
		5	-	-	-
		6	4725710,675	692856,051	635,335
		7	4725680,906	692856,461	636,088

1	2	3	4	5	6
PPK	GeoNet	2	4725693,679	692882,492	635,925
		3	4725713,172	692865,260	635,578
		4	-	-	-
		5	4725717,594	692845,941	635,457
		6	4725710,632	692856,017	635,436
		7	4725680,834	692856,458	636,292
Координати, виміряні за допомогою тахеометра	-	2	4725693,688	692882,465	635,928
		3	4725713,189	692865,225	635,561
		4	4725723,407	692859,656	635,433
		5	4725717,549	692845,907	635,421
		6	4725710,562	692855,989	635,434
		7	4725680,852	692856,431	636,271

3. Результати та аналіз

3.1. Вступ та мета аналізу

У цьому розділі наведено аналіз точності GNSS-вимірювань, виконаних за допомогою приймачів CHCNAV i50 та Trimble R4, зіставлених із еталонними координатами, отриманими роботизованим тахеометром Trimble S6. Усі координати наведено в системі UTM34N (WGS84). Дослідження охоплює чотири RTK-мережі: GeoNet, 1Yocto, EGNOS та EUREF.

Для кожної мережі визначено горизонтальні та вертикальні похибки, після чого обчислено RMS за набором точок. Це дало змогу оцінити, яка мережа забезпечує найкращу точність позиціонування.

Також виконано порівняння між методами RTK і PPK, однак через обмежену тривалість спостережень у режимі PPK, результати цього порівняння розглядаються лише в межах даного дослідження та не можуть вважатися узагальненими.

3.2. Обчислення горизонтальних та вертикальних похибок

Для оцінки точності GNSS-вимірювань були розраховані горизонтальні та вертикальні похибки для кожної точки в усіх методах спостереження, зіставляючи отримані координати з еталонними, визначеними роботизованим тахеометром Trimble S6. Надалі для кожної мережі (GeoNet, 1Yocto, EUREF, EGNOS у режимі RTK, а також GeoNet у режимі PPK) було RMS за всіма точками, які увійшли до аналізу.

Горизонтальна похибка визначається як відстань у плані між GNSS-виміром і еталонною координатою:

$$\Delta_{hor} = \sqrt{(E - E_{ref})^2 + (N - N_{ref})^2}, \quad (1)$$

де E, N – східна та північна координати вимірюваної точки;

E_{ref}, N_{ref} – відповідні еталонні координати.

Вертикальна похибка визначається як абсолютна різниця між висотою вимірюваної точки та еталоном:

$$\Delta_{vert} = |H - H_{ref}|, \quad (2)$$

де H – еліпсоїдна висота вимірювання;

H_{ref} – еліпсоїдна висота з тахеометра.

Після цього, для кожної мережі поправок окремо розраховувалася середня квадратична похибка:

$$RMS_{hor} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_{hor,i}^2)}, \quad (3)$$

$$RMS_{vert} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_{vert,i}^2)}, \quad (4)$$

де n – кількість точок, що увійшли до розрахунку для відповідної мережі.

У розрахунках не використовувалася точка 5 для RTK, оскільки вона була втрачена до моменту проведення відповідних вимірювань. Водночас для режиму PPK точка 5 включена до аналізу, оскільки її координати були отримані під час другого етапу спостережень, коли вона ще була на місці.

У режимі RTK з використанням мережі EGNOS із розрахунків було виключено точки 3, 4 і 6, оскільки в цих місцях приймач не досягнув фіксованого рішення (було лише «float»-положення). Ймовірною причиною є наявність поруч будівель (на відстані 20–30 м) та деревної рослинності, що могли погіршити якість супутникового сигналу. Можливо, це також пов'язано з архітектурою самої системи EGNOS, яка використовує лише одну геостационарну супутникову базу, і, на відміну від мереж із щільною базовою сіткою, вимагає максимально відкритої ділянки спостережень.

Результати індивідуальних розрахунків горизонтальних і вертикальних похибок для кожної точки подано в таблиці 2, де наведено також значення різниці вимірних значень з еталонами, що використовувалися для обчислення середньої квадратичної похибки. Узагальнені значення RMS для кожної мережі RTK та методу PPK подано окремо – у таблиці 3, що дозволяє провести порівняльний аналіз точності застосованих технологій.

Таблиця 2

Індивідуальні горизонтальні та вертикальні похибки GNSS-вимірювань для кожної точки

Метод	Мережа	Назва пункту	H. Precision	V. Precision	Δ		
					Northing	Easting	Height
RTK	1Yocto	2	0,039	0,022	0,033	0,021	0,022
		3	0,016	0,019	0,010	0,012	0,019
		4	0,023	0,018	-0,014	0,018	-0,018
		5					
		6	0,037	0,021	0,026	0,026	0,021
		7	0,020	0,035	0,015	0,013	0,035
	GeoNet	2	0,028	0,007	0,027	-0,009	0,007
		3	0,021	0,004	-0,002	-0,021	0,004
		4	0,016	0,027	-0,011	-0,011	0,027
		5					
		6	0,023	0,013	0,017	-0,016	-0,013
		7	0,013	0,018	-0,011	0,006	0,018
	EGNOS	2	5,073	2,686	4,955	-1,086	2,686
		3	3,938	2,982	3,897	0,570	-2,982
		4	4,098	3,239	4,045	0,658	-3,239
		5					
		6	3,965	3,534	3,919	0,603	-3,534
		7	5,097	2,706	4,976	-1,103	2,706
	EUREF	2	0,108	0,159	0,101	0,038	-0,159
		3	0,087	0,059	0,073	0,047	-0,059
		4	0,113	0,095	0,094	0,062	-0,095
		5					
		6	0,129	0,099	0,113	0,062	-0,099
		7	0,062	0,183	0,054	0,030	-0,183
PPK	GeoNet	2	0,028	0,003	-0,009	0,027	-0,003
		3	0,039	0,017	-0,017	0,035	0,017
		4					
		5	0,056	0,036	0,045	0,034	0,036
		6	0,075	0,002	0,070	0,028	0,002
		7	0,032	0,021	-0,018	0,027	0,021

Таблиця 3

Середні квадратичні похибки по кожній мережі та GNSS-методу

СКП	RTK				PPK
	1Yocto	GeoNet	EUREF	EGNOS	GeoNet
Northing	0,021	0,016	0,089	4,965	0,039
Easting	0,019	0,014	0,049	1,094	0,030
Height	0,024	0,016	0,127	2,696	0,020
Горизонтальна	0,028	0,021	0,102	5,085	0,049
Загальна	0,037	0,026	0,163	5,755	0,053

РРК виконано лише з використанням мережі GeoNet. Через обмежену тривалість фіксації точки, результати РРК наведено для загального орієнтування в межах цього дослідження

3.3. Порівняння результатів вимірювання за різними мережами та методами

Для візуальної оцінки точності позиціювання були побудовані три окремі діаграми (рис. 4–6).



Рис. 4. СКП за координатами Northing (N), Easting (E) та Height (H) для всіх RTK-мереж

На рисунку 5 чітко видно, що мережа GeoNet забезпечила найнижчі значення СКП серед усіх RTK-мереж, зокрема: 0,014 м по східній координаті (E), 0,016 м по північній (N), 0,016 м по висоті (H), загальна СКП становить лише 0,026 м.

Мережі 1Yocto та EUREF продемонстрували дещо гірші результати (0,037 і 0,163 м відповідно). EGNOS своєю чергою показав суттєво вищі похибки – до 5,76 м загальної СКП, що робить його малопридатним для високоточної геодезії в умовах часткового перекриття неба. Варто зазначити, що з розрахунків для EGNOS були виключені точки 3, 4 та 6 через відсутність фіксованого рішення, що ймовірно пов'язано з впливом навколишніх будівель і дерев.

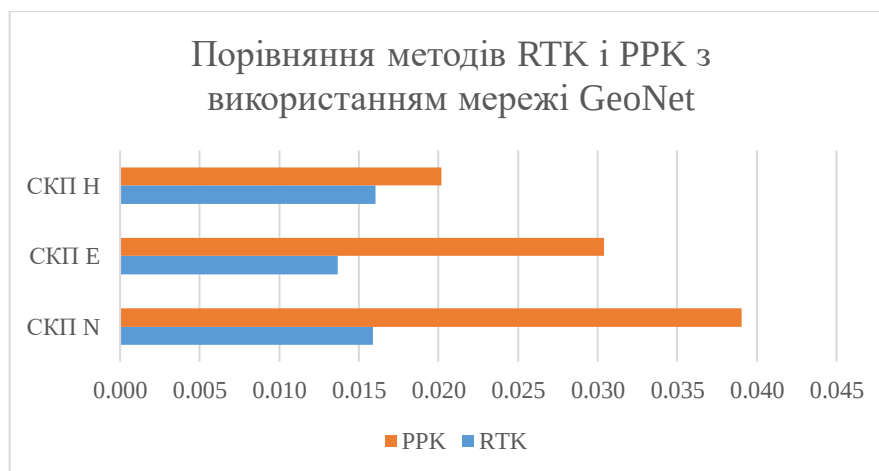


Рис. 5. СКП за координатами Northing (N), Easting (E) та Height (H) для всіх RTK-мереж, але без EGNOS, щоб покращити читабельність решти даних

На рисунку 6 наведено порівняння RTK і PPK (обидва з GeoNet). Незважаючи на те, що PPK зазвичай дозволяє досягати вищої точності, у даному дослідженні RTK-режим дав кращі результати – загальна RMS становила 0,026 м для RTK проти 0,053 м для PPK. Основною причиною цього стала коротка тривалість фіксації у PPK – лише 20–25 секунд на точку, що обмежує ефективність вирішення фазових невизначеностей. RTK із віртуальними станціями GeoNet забезпечив стабільний фікс та високоякісні поправки.

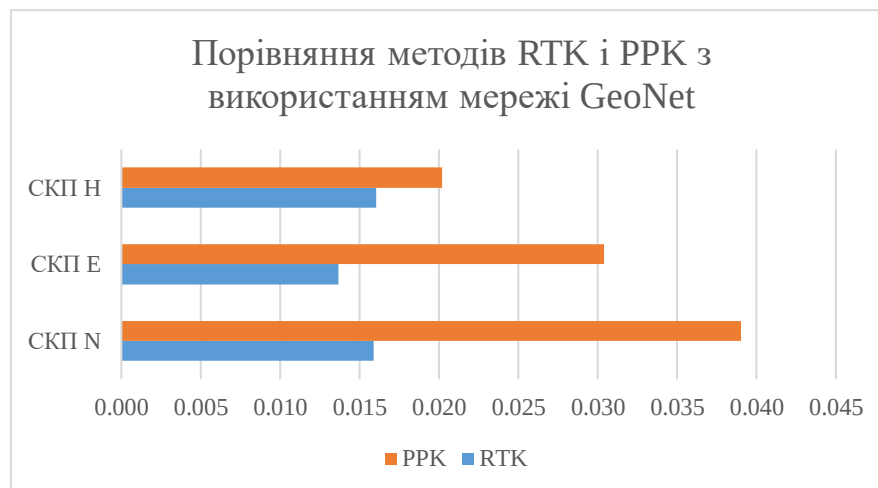


Рис. 6. Порівняння загальної СКП у режимах RTK (GeoNet) та PPK (GeoNet)

Таким чином, результати демонструють, що GeoNet є найнадійнішою мережею серед досліджених, а режим RTK за наявності стабільного зв'язку з базою може перевершити PPK у умовах недостатнього часу фіксації. Порівняльні значення всіх RMS подані в таблиці 3.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У межах цього дослідження було виконано порівняльну оцінку точності GNSS-вимірювань у режимі RTK, з використанням приймачів CHCNAV i50 та Trimble R4, порівняно з еталонними координатами, визначеними роботизованим тахеометром Trimble S6. Основна увага була зосереджена на визначенні того, яка з досліджуваних RTK-мереж (GeoNet, 1Yocto, EUREF, EGNOS) забезпечує найменші похибки позиціонування в реальних умовах. Для довідкового порівняння також були проаналізовані результати в режимі PPK, однак через обмежений час спостереження їх оцінку варто розглядати лише в контексті цього конкретного експерименту.

За результатами аналізу встановлено, що:

- 1) GeoNet забезпечила найвищу точність серед усіх RTK-мереж, з загальною RMS 0,026 м, враховуючи 0,014 м по східній координаті, 0,016 м по північній та 0,016 м по висоті;
- 2) 1Yocto та EUREF продемонстрували гірші результати – загальні RMS становили 0,037 м і 0,163 м відповідно;
- 3) EGNOS виявилася найменш придатною для високоточної геодезії, з загальною RMS на рівні 5,755 м, що пояснюється як впливом перешкод у зоні спостережень (будівлі, дерева), так і архітектурними обмеженнями системи (одна супутникова база, залежність від відкритого горизонту).

У процесі дослідження було також зафіксовано втрату точки 5 до моменту виконання RTK-вимірювань, тому вона не була включена до цього аналізу, але використана в PPK. Також неможливість отримати фіксоване рішення для окремих точок у режимі EGNOS, що вказує на важливість вибору місця вимірювань з урахуванням умов огляду неба. Варто врахувати, що точки 3, 4 та 6 не були враховані у випадку EGNOS через відсутність фіксованого рішення, що знижує довіру до результатів цієї мережі у складних умовах.

Отримані результати свідчать, що під час використання сучасних комерційних RTK-мереж (зокрема GeoNet), GNSS-вимірювання можуть повністю задовольняти вимоги високоточної геодезії, забезпечуючи сантиметрову точність у плані та по висоті. Водночас точність значною мірою залежить від стабільності зв'язку, кількості доступних базових станцій та якості корекцій.

Рекомендації для майбутніх досліджень:

- 1) збільшити час фіксації у режимі PPK до 10–15 хвилин для досягнення стабільного фазового розв'язку;
- 2) виконувати спостереження у максимально відкритій місцевості, особливо під час використання супутникових систем доповнення (EGNOS);
- 3) закладати резервні точки або дублювання реперів на місцевості для уникнення втрати даних;
- 4) розширити вибірку спостережень на різні географічні умови для підтвердження стабільності результатів;
- 5) аналізувати не лише точність, а й час до фіксації, стабільність фіксу та відновлення сигналу після втрат – як додаткові параметри оцінки GNSS-мереж.

Таким чином, дослідження підтвердило, що GeoNet є найбільш надійною серед досліджених RTK-мереж, а результати позиціонування відповідають практичним потребам точного геодезичного знімання. Правильна організація спостережень, вибір мережі та врахування особливостей місцевості залишаються ключовими чинниками для досягнення високої точності при GNSS-вимірюваннях.

Список використаної літератури:

1. Hofmann-Wellenhof B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more / B.Hofmann-Wellenhof, H.Lichtenegger, E.Wasle. – Berlin : Springer, 2007. – 518 p.
2. RTK корекції 1Yocto / Геоінформаційна компанія [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.geoinformation.bg/?page_id=338.
3. Ghilani C.D. Adjustment Computations: Spatial Data Analysis : 6th ed. / C.D. Ghilani. – NJ, Hoboken : John Wiley & Sons, 2017. – 720 p.
4. Trimble Inc. Siteworks Help – GNSS Positioning and Accuracy Guidelines [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://siteworkshelp.trimble.com/>.
5. Wanninger L. Virtual Reference Stations (VRS) for Centimeter-Level Kinematic Positioning / L.Wanninger // Proceedings of ION GPS. – Portland, OR, 2002. – P. 1400–1407.
6. Meneses III S.F.M. Rapid Testing: Analysis of GNSS Rapid Static Observations Suitability for Engineering Surveys in Urban Environments in the Time of COVID-19 / S.F.M. Meneses III // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2021. – Vol. XLVI-4/W6-2021. – P. 213–218 [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVI-4-W6-2021/213/2021/>.
7. EUREF Permanent GNSS Network / EPN Central Bureau [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://epncb.oma.be>.
8. European Satellite Services Provider – EGNOS Information / ESSP SAS [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.essp-sas.eu/>.
9. Battrick B. The European Geostationary Navigation Overlay System – A Cornerstone of Galileo / B.Batrick, D.Danesy. – Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications Division, 2006.
10. GeoNet Bulgaria [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.geonet.bg/>.
11. 1Yocto [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://1yocto.bg/>.

References:

1. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E., (2007), *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more*, Springer, Berlin.
2. Heoinformatsiina kompaniia, «RTK korektsii 1Yocto», [Online], available at: https://www.geoinformation.bg/?page_id=338
3. Ghilani, C.D. (2017), *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*, 6th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 720 p.
4. «Trimble Inc. Siteworks Help – GNSS Positioning and Accuracy», [Online], available at: <https://siteworkshelp.trimble.com/>
5. Wanninger, L. (2002), «Virtual Reference Stations (VRS) for Centimeter-Level Kinematic Positioning», *Proceedings of ION GPS*, OR, Portland, pp. 1400–1407.
6. Meneses III, S.F.M. (2021), «Rapid Testing: Analysis of GNSS Rapid Static Observations Suitability for Engineering Surveys in Urban Environments in the Time of COVID-19», *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLVI-4/W6-2021, pp. 213–218, [Online], available at: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVI-4-W6-2021/213/2021/>
7. «EUREF Permanent GNSS Network», *EPN Central Bureau*, [Online], available at: <http://epncb.oma.be>
8. «European Satellite Services Provider – EGNOS Information», *ESSP SAS*, [Online], available at: <https://www.essp-sas.eu/>
9. Battrick, B. and Danesy, D. (2006), *The European Geostationary Navigation Overlay System – A Cornerstone of Galileo*, ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands.
10. *GeoNet Bulgaria*, [Online], available at: <https://www.geonet.bg/>
11. *1Yocto*, [Online], available at: <https://1yocto.bg/>

Побігайло Діана Петрівна – аспірант, асистент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

– GNSS, супутникова навігація.

E-mail: km_pdp@ztu.edu.ua.

Камбуров Аспарух Красенов – доцент, Минно-геоложки университет «Св. Иван Рилски», катедра «Маркшайдерство и геодезия».

Наукові інтереси:

– GNSS, GIS;

– laser scanning.

E-mail: asparuh.kamburov@mgu.bg.

Мітченко Дмитро Володимирович – аспірант Криворізького національного університету.

<https://orcid.org/0009-0000-4647-906X>

Наукові інтереси:

– зрушення та деформації гірського масиву;

– маркшейдерські прилади та технології;

– сучасні методи виконання знімальних робіт.

E-mail: dmitrii.mitchenko@gmail.com.

Pobihailo D.P., Kamburov A.K., Mitchenko D.V.

Evaluating the accuracy of GNSS measurements in RTK mode using commercial and non-commercial correction network

The article presents a comparative analysis of the accuracy of GNSS (Global Navigation Satellite System) measurements in RTK (Real-Time Kinematic) mode using correction services from GeoNet, 1Yocto, EUREF (European Reference Frame) and EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) networks in single and VRS (Virtual Reference Station) modes. The coordinates obtained with the CHCNAV i50 and Trimble R4 receivers were compared with the reference values determined by the Trimble S6 robotic total station. The assessment was based on the calculation of horizontal and vertical errors, as well as the Root Mean Square Error (RMSE) for each of the networks. According to the results of the study, the GeoNet network demonstrated the lowest RMS (0.026 m total error), which confirms its high efficiency in real conditions. The 1Yocto and EUREF networks showed worse results, and EGNOS was the least suitable for high-precision geodesy due to significant vertical and plan errors. Additionally, the results of PPK (Post-Processed Kinematic) were analysed, but due to the short duration of fixation, these data are considered only indicative. The results obtained show the potential of commercial RTK networks to achieve centimetre accuracy, which meets the requirements of modern surveying practice.

Keywords: GNSS; VRS; Network RTK; PPK; CORS networks.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2025.