

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

Кафедра геодезії та землеустрою

**Баран Володимир Тарасович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48

(індекс)

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Аналіз факторів, що впливають на точність позиціонування в мережах  
постійно діючих референтних GNSS-станцій

(назва роботи)

Геодезія

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

к.т.н., доц. Ільків Євгеній Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

м. Івано – Франківськ

2025р.

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА  
Кафедра геодезії та землеустрою  
Освітній рівень магістр  
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

**Баран Володимир Тарасович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи** Аналіз факторів, що впливають на точність позиціонування в мережах постійно діючих референтних GNSS-станцій

Керівник роботи к.т.н., доц. Ільків Євгеній Юрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від " \_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 року №

**2. Строк подання студентом роботи** \_\_\_\_\_

**3. Вихідні дані до роботи** Звіт з переддипломної практики, матеріали польових досліджень

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)**

Концепція мережевого позиціонування

Від концепції до реалізації

Інтерполяція зміщень

Проведення дослідження

**5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)**

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2,3,4	Ільків Є. Ю.		

7.Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Концепція мережевого позиціонування		
2	Від концепції до реалізації		
3	Інтерполяція зміщень		
4	Проведення дослідження		

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )  
Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

Баран В.  
(прізвище та ініціали)  
Ільків Є. Ю.  
(прізвище та ініціали)

## Анотація

Магістерське дослідження зосереджене на аналізі чинників, які впливають на рівень точності позиціонування у мережах постійно функціонуючих референтних GNSS станцій (CORS).

У сучасних геодезичних, картографічних та інженерних проектах висока точність координат є головною вимогою для забезпечення достовірності просторових даних.

Незважаючи на швидкий прогрес технологій глобальних навігаційних супутникових систем, реальна точність позиціонування значною мірою зумовлена сукупністю зовнішніх і внутрішніх факторів, що стосуються як обладнання, так і методик обробки отриманої інформації.

У даній роботі розглянуто ключові фактори, що визначають точність отримання координатних даних: розташування супутників у сузір'ї, технічні характеристики приймального пристрою, атмосферні впливи (затримки в іоносфері та тропосфері), мультипасивні ефекти, відстань до базової станції, а також параметри алгоритмів мережевої корекції.

Окрему увагу приділено порівнянню точності позиціонування методів RTK, NRTK і PPP, а також їхній доцільності при вирішенні конкретних геодезичних задач.

У практичній фазі дослідження використано експериментальне дослідження даних, зібраних у певній українській мережі CORS.

Було проведено оцінку впливу просторової щільності референтних станцій на якість позиціонування та виявлено залежність точності від величини базових ліній.

Таким чином отримані дані слугують основою для створення рекомендацій з оптимізації експлуатації мережі GNSS-станцій, що дозволяє забезпечити високу точність позиціонування в різноманітних

галузях — від інженерних зйомок і моніторингу деформацій до навігаційних систем.

Наукова новизна цього дослідження виражається у комплексному аналізі впливових факторів і встановленні їх взаємозв'язків на основі фактичних даних, що дозволяє обґрунтувати ефективні підходи до підвищення точності GNSS-позиціонування.

Практичне значення полягає в можливості впровадження отриманих результатів у геодезичну практику, зокрема для удосконалення систем моніторингу та інженерних рішень, які потребують достовірного просторового забезпечення.

## **Abstract**

The master's research focuses on the analysis of factors that affect the level of positioning accuracy in networks of continuously operating reference GNSS stations (CORS).

In modern geodetic, cartographic and engineering projects, high coordinate accuracy is the main requirement for ensuring the reliability of spatial data.

Despite the rapid progress of global navigation satellite systems technologies, the actual positioning accuracy is largely determined by a combination of external and internal factors related to both equipment and methods of processing the received information.

This work considers the key factors that determine the accuracy of obtaining coordinate data: the location of satellites in the constellation, the technical characteristics of the receiving device, atmospheric effects (delays in the ionosphere and troposphere), multipass effects, distance to the base station, as well as parameters of network correction algorithms.

Special attention is paid to comparing the positioning accuracy of RTK, NRTK and PPP methods, as well as their feasibility in solving specific geodetic problems.

In the practical phase of the study, an experimental study of data collected in a certain Ukrainian CORS network was used.

The impact of the spatial density of reference stations on the quality of positioning was assessed and the dependence of accuracy on the size of the baselines was revealed.

Thus, the data obtained serve as the basis for creating recommendations for optimizing the operation of the GNSS station network, which allows ensuring

high positioning accuracy in various industries - from engineering surveys and deformation monitoring to navigation systems.

The scientific novelty of this study is expressed in a comprehensive analysis of influential factors and establishing their relationships based on actual data, which allows us to substantiate effective approaches to increasing the accuracy of GNSS positioning.

The practical significance lies in the possibility of implementing the obtained results into geodetic practice, in particular for improving monitoring systems and engineering solutions that require reliable spatial support.

## **Зміст**

### **Вступ**

#### **1. Концепція мережевого позиціонування**

#### **2. Від концепції до реалізації**

##### 2.1 Недиференціальна модель

#### **3. Інтерполяція зміщень**

##### 3.1 Позиціонування віртуальна опорна станція

##### 3.2 Позиціонування параметр корекції площі

##### 3.3 Позиціонування за допомогою концепції головної допоміжної станції

##### 3.4 Розвиток та проблеми NRTK

#### **4 Проведення дослідження**

##### 4.1 Точність позиціонування в режимі реального часу

###### 4.1.1 Геодезичні приймачі

###### 4.1.2 Позиціонування віртуальна опорна станція

###### 4.1.3 Позиціонування концепція головного допоміжного пристрою

###### 4.1.4 Позиціонування параметр корекції площі

##### 4.2 ГІС-приймачі

###### 4.2.1 Позиціонування віртуальна опорна станція

##### 4.3 Точність позиціонування після обробки

###### 4.3.1 Геодезичні приймачі

###### 4.3.2 ГІС-приймачі

### **Висновки**

### **Список використаних джерел**

## Вступ

Нинішнє мережеве кінематичне позиціонування в режимі реального часу (NRTK) широко застосовується і в науці, і в практиці.

З моменту свого зародження, який датується понад десятьма роками, цей метод поступово набув популярності і сьогодні використовується не лише у топографії, а й у управлінні транспортними системами, точному землеробстві, моніторингу земельних ресурсів та ін.

Щоб забезпечити користувачів потрібними сервісами, створено мережі постійно діючих контрольних опорних станцій (CORS).

Подібні мережі дозволяють виконувати NRTK-позиціонування в режимі реального часу, забезпечуючи координати з точністю до сантиметра при типових відстанях між станціями 25–35 км.

Виникає питання: якою є максимально можлива відстань між опорними пунктами, яка ще гарантує потрібний рівень точності в режимі реального часу для геодезичних і землеустроєвих задач?

Як впливає збільшення відстані між станціями на якість отриманих результатів?

Чи здатні геостаціонарні супутникові системи, наприклад європейська EGNOS, замінити пристрої середнього та економічного цінових класів?

У даній магістерській дослідницькій роботі проведено спробу дати відповіді на поставлені питання.

Спершу виконано аналіз принципів функціонування мереж GNSS, приділивши особливу увагу диференціальним корекціям, а також розглянуто концепції головного допоміжного центру (MAC), віртуальної референційної станції (VRS) і параметра корекції площі (FKP).

На основі розгляду теоретичних аспектів представлено результати досліджень, які спрямовані на оцінку якості та можливостей сучасних сервісів позиціонування в режимі реального часу та післяобробки.

Зокрема, аналізу піддавалися впливи на точність таких параметрів, як конфігурація мережі, тип застосованого приймача, тривалість вимірювального процесу, а також використання різних GNSS-систем, доступних у досліджуваній області.

Експериментальна частина була проведена за участі вже діючих референтних станцій.

У ході випробувань розглядалися три мережі, у яких інтервали між станціями складали приблизно 50, 100 та 150 км.

Контрольні вимірювання здійснювалися протягом 24 годин на фіксованій точці, застосовуючи одночасно геодезичні та GIS-приймачі різних брендів.

Тривала тривалість спостережень дала змогу нейтралізувати вплив конфігурації супутникових сузір'їв і забезпечити порівнянність отриманих даних.

Крім аналізу корекцій у режимі реального часу, проведено дослідження потенціалу постпроцесінгу, що базувалося на використанні сирих даних, отриманих від геодезичних і GIS-пристроїв.

Отримані вимірювання об'єднувалися з RINEX-файлами, наданими найближчими базовими станціями, а також з RINEX-даними, сформованими віртуальними станціями за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Головна мета роботи – кількісно оцінити точність, яку сьогодні можна отримати, використовуючи різні типи приймачів у межах мереж CORS.

Крім того, необхідно визначити, чи дозволить подальший розвиток супутникових технологій і алгоритмів обробки у майбутньому ефективно

застосування мереж, де відстані між референтними станціями є великими, для високоточного позиціонування в режимі реального часу.

## 1. Концепція мережевого позиціонування

У проміжку з 1990 по 1995 рік методи диференціального позиціонування, які працюють з фазовим параметром несучої хвилі, зазнали значного вдосконалення завдяки впровадженню технології «в реальному часі» розв'язання фазових неоднозначностей.

Завдяки цьому підходу вдалося ефективно усунути циклічне ковзання, навіть під час спостереження за рухомими об'єктами.

Однак питання точного визначення координат при відстанях у діапазоні 10–15 км між базовою станцією та наземним приймачем залишалося відкритим.

Отже, до кінця 1990-х років була впроваджена технологія мережевого кінематичного позиціонування у режимі реального часу (NRTK), яка також відома під назвою наземна система доповнень (GBAS).

Для того, аби повністю усвідомити сутність мережевого позиціонування, спочатку доцільно оновити розуміння фундаментальних принципів диференціального способу визначення координат.

Зокрема, рівняння фази несучої частоти можна представити у метричному вигляді:

$$\phi_k^p = \rho_k^p - cdT_k + cdt^p - \alpha_i I_k^p + T_k^p + Mt_k^p + E_k^p + \lambda_i Ni_k^p + \varepsilon_k^p \quad (1)$$

У наведеному рівнянні символ  $\phi_k^p(i)$  означає виміряну фазу несучої на частоті  $i$ .

У правій частині рівняння, разом із геометричною відстанню  $\rho_k^p$  між супутником  $p$  і приймачем  $k$ , враховуються корекції, що виникають через неточності годинників супутника та приймача, і множаться на швидкість світла ( $cdT_k$  та  $cdt^p$ ). [8]

Крім того, враховується іоносферна затримка  $\alpha_i I_k^p$ , величина якої задається відомим коефіцієнтом, який залежить від обраної частоти  $i$ , а також тропосферна затримка  $T_k^p$ .

У приведеному виразі показник  $\phi_k^p(i)$  описує виміряну фазу несучої на  $i$ -й хвилі.

Крім того, у рівнянні враховуються похиби, спричинені багатосигнальною складовою  $M i_k^p$ , невизначеністю ефемерид  $E_k^p$ , фазовою неоднозначністю, яка множить на довжину хвилі  $\lambda_i N i_k^p$ , а також випадковими погрішностями  $\varepsilon_k^p$ .

Якщо знехтувати впливом багатопроменевості, яка залежить від локальних умов приймача та, відповідно, не може бути точно змодельована, рівняння можна подати у такій спрощеній формі:

$$\phi_{hk}^p(i) = \phi_h^p(i) + \phi_k^p(i) = \rho_{kh}^p + \lambda_i N i_{hk}^p - cdT_{hk} - \alpha_i I_{hk}^p + T_{hk}^p + E_{hk}^p + \varepsilon_k^p \quad (2)$$

На наступному кроці можна вивести формули для подвійних різниць, коли в системі працює два приймачі ( $h$  і  $k$ ) та два супутники ( $p$  і  $q$ ).

Якщо відняти рівняння одиничної різниці, складене для супутника  $q$ , від аналогічного рівняння для супутника  $p$ , отримаємо вираз, що описує подвійні різниці.

У цьому випадку випадкові похибки вважаються надзвичайно малими, тому їх вплив можна ігнорувати.

$$\phi_{hk}^{pq}(i) = \phi_{hk}^p(i) + \phi_{hk}^q(i) = \rho_{kh}^{pq} + \lambda_i N i_{hk}^{pq} - \alpha_i I_{hk}^{pq} + T_{hk}^{pq} + E_{hk}^{pq} \quad (3)$$

Коли відстань між двома приймачами не перевищує 10 км, вплив атмосферних затримок і помилок ефемерид залишається мінімальним, що дозволяє визначати координати з точністю до сантиметрів.

Зі збільшенням цієї дистанції зазначені неточності різко зростають і вже не підлягають ігнору.

У більшості випадків такі похибки мають сильну просторову кореляцію, що створює можливість їх просторового моделювання.

Щоби в режимі реального часу здійснювати прогнозування і урахування подібних зсувів, слід забезпечити виконання кількох вимог:

1. координати опорних станцій повинні бути визначені з точністю до сантиметра;
2. необхідний центр управління, який може обробляти дані з усіх станцій в режимі реального часу;
3. важливим є постійне та надійне визначення фазових неоднозначностей, навіть коли відстані між станціями досягають 80–100 км.

Суть цієї ідеї полягає у тому, що перші два доданки правої частини рівняння (3) переносяться в його ліву частину, розглядаючи їх як відомі величини:

$$\phi_{hk}^{pq}(i) - \rho_{kh}^{pq} - \lambda_i N i_{hk}^{pq} = \alpha_i I_{hk}^{pq} + T_{hk}^{pq} + E_{hk}^{pq} \quad (4)$$

Отже, можна розробляти моделі залишкових іоносферних та тропосферних зсувів, а також похибок ефемерид не лише між приймачами  $h$  і  $k$ , а й між усіма базовими станціями мережі.

Після створення цих моделей відповідні корекції можна застосовувати до будь-якого rover-приймача.

## 2. Від концепції до реалізації

По-першу, слід підкреслити, що формула (4) отримана за умови, що в системі присутні лише два супутника.

Проте в системі базових станцій GNSS ті супутники, які одночасно спостерігаються хоча б двома станціями, не обов'язково можуть бути у розпорядженні наземного приймача.

Отже, виправдано перейти від розгляду іоносферних і тропосферних затримок, які залежать від сукупності супутників, до індивідуальних параметрів, розрахованих для кожного з них окремо.

Виправлення мережі можна отримувати в режимі реального часу, використовуючи методи подвійних різниць, одиничних різниць чи недиференціальні рівняння.

Найголовнішою умовою залишається узгодженість фазових неоднозначностей.

Теоретично доведено, що диференційний і недиференційний підходи є еквівалентними.

Застосування диференційного способу несе як плюси, так і мінуси.

Головна вигода — скорочення числа невизначених параметрів.

Недолік полягає у ризику появи кореляції між помилками.

Незважаючи на те, що обидва підходи за своєю суттю схожі, останнім часом дедалі частіше використовується недиференційний варіант.

Стан мережі визначається за допомогою Калманового фільтра.

Цей підхід вважається більш складним, оскільки вектор стану включає як дисперсійні, так і недисперсійні елементи кожної станції, які розглядаються як невідомі.

Однак зазначену складність компенсує велика кількість переваг.

Зокрема, застосування Калманового фільтра дозволяє збільшити кількість рівнянь, що використовуються на кожному кроці спостереження.

Більше того, можна залучати вимірювальні дані супутників, які не покриваються усіма станціями, що підвищує надійність оцінки мережі, навіть коли одна або декілька постійних станцій тимчасово недоступні через проблеми з передачею даних.

## 2.1 Недиференціальна модель

Враховуючи рівняння псевдовідстані та фазової складової, записані для GPS частот L1 ( $P_k^p$  та  $\phi_k^p$ ) та L2 ( $P_k^p$  та  $\phi_k^p$ ), і розглядаючи випадок лише одного приймача ( $k$ ) і одного супутника ( $p$ ), можна виділити невідомі параметри, які залежать окремо від приймача та від супутника:

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_k^p \\ \bar{P}_k^p \\ \bar{\phi}_k^p \\ \bar{\phi}_k^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & \alpha & 0 & 0 \\ 1 & -1 & \lambda_1 & 0 \\ 1 & -\alpha & 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} [\rho_k^p + cdt^p - cdT_k + T_k^p] \quad (5)$$

Незважаючи на те, що логічно передбачити переваги вимірювань псевдовідстані для оцінки невідомих параметрів, у цьому випадку аналізується лише рівняння фази несучої.

Крім того, доцільно перемістити геометричну відстань  $\rho_k^p$  у ліву частину рівняння.

$$\begin{bmatrix} \bar{\phi}_k^p - \rho_k^p \\ \bar{\phi}_k^p - \rho_k^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \lambda_1 & 0 \\ 1 & -\alpha & 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} [cdt^p - cdT_k + T_k^p] \quad (6)$$

У подальшому, у правій частині рівняння, можна виділити затримку в тропосфері окремо від похибок годинника:

$$\begin{bmatrix} \bar{\phi}_k^p - \rho_k^p \\ \bar{\phi}_k^p - \rho_k^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & \lambda_1 & 0 \\ 1 & 1 & -\alpha & 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} [cdT_k + T_k^p] \quad (7)$$

Використовуючи рівняння (7) та здійснивши ряд проміжних математичних трансформацій, які у цьому тексті не розписані докладно, стає можливим відокремити тропосферну затримку від годинникових похибок, здійснюючи оцінку параметрів мережі методом недиференціального підходу.

### 3. Інтерполяція зміщень

Після розрахунку дисперсійних і недисперсійних похибок можливо застосувати один із трьох варіантів:

- використання інформації від усіх базових станцій мережі з подальшою інтерполяцією до позиції рухомого приймача, що дозволяє сформувати віртуальну базову станцію поруч з ровером (VRS – віртуальна опорна станція);
- побудова моделі залишкових зсувів у вигляді площини та передача параметрів цієї моделі до ровера (FKP – параметр корекції площини);
- надсилання роверу оцінених зсувів разом із даними від головної базової станції мережі (MAC – концепція головного допоміжного пристрою).

#### 3.1 Позиціонування віртуальна опорна станція

Після аналізу попередніх зміщень одним із найпростіших і найстаріших методів передачі диференціальних поправок є застосування віртуальної базової станції.

Як вже зазначалося, цей підхід полягає у створенні синтетичної корекції, яка імітує розташування базової станції безпосередньо поблизу rover □ приймача.

У цьому випадку rover посилає своє орієнтовне місцезнаходження, наприклад у вигляді NMEA □ повідомлення GGA.

На підставі отриманої позиції дані можна інтерполювати різними підходами, наприклад:

- конструювання площинних трикутників;
- виконання зваженої інверсної оцінки відстаней;

- використання методу найменших квадратів для обчислення коефіцієнтів поліноміальних функцій;
- застосування колокаційного методу.

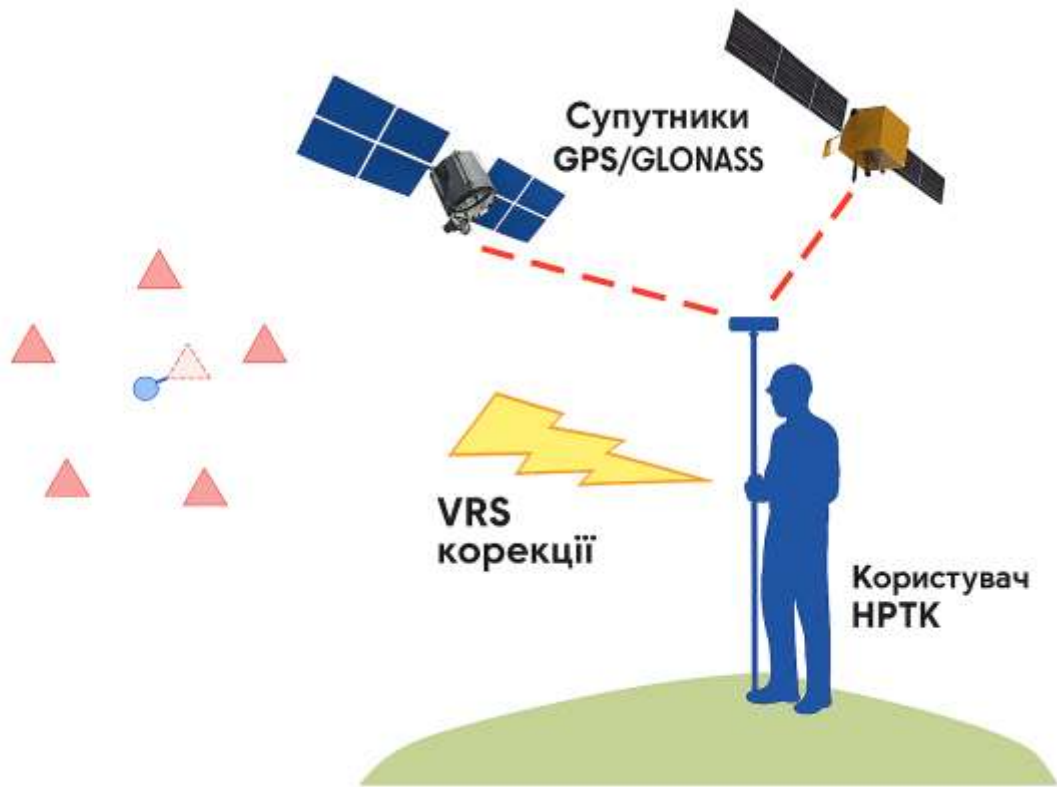


Рисунок 1 Позичіонування за допомогою віртуальної опорної станції

Даний метод також придатний для постобробки позиціонування за допомогою віртуального файлу даних, зазвичай у форматі RINEX.

У такому файлі зберігаються спостереження, які віртуальна опорна станція могла б зафіксувати у добре відомій точці, обраній користувачем мережі.

Як вже зазначалося, підхід VRS (віртуальна опорна станція) становить одну з найдавніших стратегій мережевого позиціонування.

Попри те, що він володіє деякими перевагами і широко використовується, існують і обмеження.

Зокрема, ця технологія не підтримує багато базових способів позиціонування, характерних для інших методів, і іноді її результати важко регулювати або відтворювати.

### 3.2 Позиціонування параметр корекції площі

Іншим способом у диференціальній мережевій локалізації є обрахунок параметрів інтерполяційної зони та їх надсилання спільно з даними, отриманими від однієї базової станції.

Ця схема дає змогу створити однонаправлену зв'язкову систему і при цьому мінімізує навантаження на канал передачі інформації.

Вперше дану ідею впроваджували в 1996 і 2002 роках, застосовуючи площинну модель для інтерполяції залишкових зсувів мережі на визначеній ділянці.

Метод отримав назву FKP (коефіцієнт корекції площі) і також називають плоскими параметрами корекції.

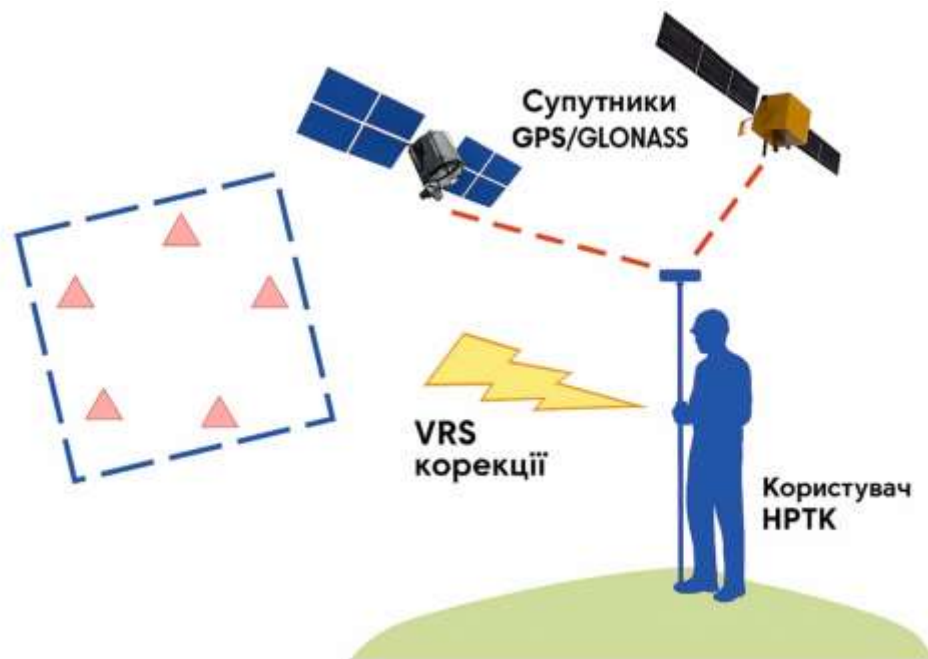


Рисунок 2 Концепція позиціонування з параметрами корекції площі

Використання методу МАС є доволі простим. Чотири величини —  $E_0$ ,  $N_0$ ,  $E_1$  і  $N_1$  — розраховуються, спираючись на оцінені геометричні та іоносферні затримки, з урахуванням заданої орієнтовної координати ( $\varphi_R$ ,  $\lambda_R$ ).

Після цього можна обчислити необхідні члени рівняння:

$$\begin{aligned}\delta_{r_0} &= 6.35(N_0(\varphi - \varphi_R) + E_R(\lambda - \lambda_R)\cos\varphi_R) \\ \delta_{r_1} &= 6.35H(N_1(\varphi - \varphi_R) + E_1(\lambda - \lambda_R)\cos\varphi_R)\end{aligned}\quad (8)$$

де

$$H = 1 + 15\left(0.55 - \frac{E}{\pi}\right)^3 \quad (9)$$

де  $E$  – кут піднесення супутника (у радіанах).

Нарешті, дві поправки фази несучої частоти (у метрах) такі:

$$\begin{aligned}\delta_{r_{f_1}} &= \delta_{r_0} + \left(\frac{60}{77}\right)\delta_I \\ \delta_{r_{f_2}} &= \delta_{r_0} + \left(\frac{60}{77}\right)\delta_{r_1}\end{aligned}\quad (10)$$

### **3.3 Позиціонування за допомогою концепції головної допоміжної станції**

У 2001 році був розроблений інноваційний метод використання та передачі мережевих корекцій, який отримав назву концепції головної допоміжної станції (МАС – концепція головного допоміжного пристрою).

Принцип функціонування даного методу нагадує попередні підходи: спочатку оцінюється загальний рівень усунення фазових неоднозначностей у мережі, після чого сформовані корекції передаються роверному приймачу, розрізняючи їх на дисперсійні та недисперсійні компоненти.

При реалізації МАС координати та зсув однієї опорної станції, яка виконує функції головної, передаються роверному приймачу разом з одиничними різницями (корекціями та координатами) решти опорних станцій мережі, які слугують допоміжними.



Рисунок 3 Позичіонування за допомогою головного допоміжного пристрою

Слід підкреслити, що ці різниці за числовими величинами мізерні і не потребують високої швидкості передачі даних.

Наприклад, дані щодо тропосферних поправок можна надсилати з інтервалом у  $2 \times 5$  секунд, що скорочує час порівняно з іоносферними поправками.

У даній стратегії мережеве ПЗ не здійснює інтерполяцію отриманих зсувів – цю функцію виконує роверний приймач, який самостійно обирає різні підходи до інтерполяції чи реалізує декілька базових методів позиціонування.

Через це роверний приймач потребує більшої обчислювальної потужності, і такий спосіб позиціонування не завжди є ефективним для застарілих пристроїв.

Для надзвичайно великих мереж можливе передавання даних лише від обраної підмножини станцій (підмережі чи комірки).

Навіть у цьому випадку позиціонування, здійснене роботизованим приймачем, залишається точним і швидким, причому результати не залежать від конкретної обраної комірки.

### **3.4 Розвиток та проблеми NRTK**

З'являється запитання, чи залишиться актуальним позиціонування NRTK у контексті модернізації GPS та ГЛОНАСС, а також розширення супутникових систем BeiDou і Galileo.

Протягом останнього десятиліття це питання аналізували кілька дослідників.

Підсумовуючи їхні результати, можна виділити такі аспекти:

- Багатократні моделювання доводять, що під час диференціального позиціонування у режимі реального часу між головним блоком та ровер-приймачем розв'язання фазових неоднозначностей відбувається практично миттєво, що суттєво зменшує необхідність у застосуванні мережі опорних станцій GNSS. Однак у періоди підвищеної іоносферної активності ймовірність успішної фіксації фазових неоднозначностей без використання

мережі різко падає. Наявність такої мережі сприяє зниженню впливу іоносферних зсувів.

- Завдяки впровадженню диференціального позиціонування відстань між базовою станцією та роверним приймачем може збільшитися з 10 км до 20 км, при цьому надійність лишається незмінною. При використанні більшої кількості частот також зростає відстань між мережами (до 80–100 км), а роверний приймач покращує стабільність фіксації фазових неоднозначностей.

- Навіть при застосуванні трьох і більше частот тропосферні зміщення залишаються. Однак розширення числа супутників, які спостерігає мережа базових станцій, дає можливість більш точно визначати ці помилки.

- Попри покращення GNSS, багатопромінні похибки мобільного приймача будуть присутні. Проте їх можна змодельовати за допомогою опорних станцій, що підвищує достовірність оцінки інших зсувів.

- Щоб забезпечити високу точність позиціонування в режимі реального часу, слід застосовувати мережевий підхід. Сучасні супутникові сузір'я скорочують час уточнення фазових неоднозначностей як у базових станціях мережі, так і в мобільному приймачі.

Головною технічною перешкодою у мережевому позиціонуванні є передача коригуючого сигналу.

На ділянці зйомки часто немає забезпечення GPRS/GSM; у такій ситуації зазвичай застосовують радіозв'язок між головним блоком і рухомих приймачем.

Якщо ж цього немає, мережеве позиціонування не може бути виконане.

У випадку масштабних мереж можливим варіантом є впровадження корекцій NRTK у рамках системи SBAS.

Така реалізація не вимагає додаткових антен і обмежується лише оплатою за доступ до супутникового сигналу.

Цей метод безперешкодно вписується, наприклад, у концепцію головного допоміжного пристрою (МАС).

Крім того, двостороннє інтернет-з'єднання дозволяє адміністратору мережі надавати додаткові послуги, які зазвичай недоступні.

Зокрема, можна передавати дані про кількість супутників з фіксованими фазовими неоднозначностями, карти місцевості, геоїдні дані та інше.

Водночас користувач мережі має можливість посилати вимірювальні дані в режимі реального часу, оновлювати якість спостережень, фіксовані фазові неоднозначності та інші параметри, що підсилюють надійність GNSS-положення.

## 4 Проведення дослідження

У попередньому дописі розглядалися засади мережевого позиціонування та різні способи передачі корекційних даних.

Проте залишаються практичні питання: яка відстань між контрольними пунктами є оптимальною, щоб забезпечити потрібну точність позиціонування в режимі реального часу при використанні як геодезичних, так і ГС□приймачів?

Як змінюється точність визначення позиції, коли збільшується відстань між постійно працюючими референтними станціями?

Для отримання відповідей на поставлені запитання дослідження здійснили на трьох різних мережах, що відрізняються за щільністю станцій:

- у першій мережі відстань між станціями становить приблизно 50 км;
- у другій – інтервал близько 100 км;
- у третій – орієнтовно 150 км, і її використали для оцінки перспективи впровадження менш густих мереж.

Випробування проведено за допомогою базової референтної станції, що слугувала опорою для ровера, розташованої на даху будівлі Івано□Франківського національного технічного університету нафти і газу (рис. 4).



Рисунок 4 Опорна референтна станція

Отже, задля проведення експериментальних випробувань були обрані інші базові референтні станції, розміщуючи ровер майже в центрі трьох окремих мереж GNSS (рис. 5).

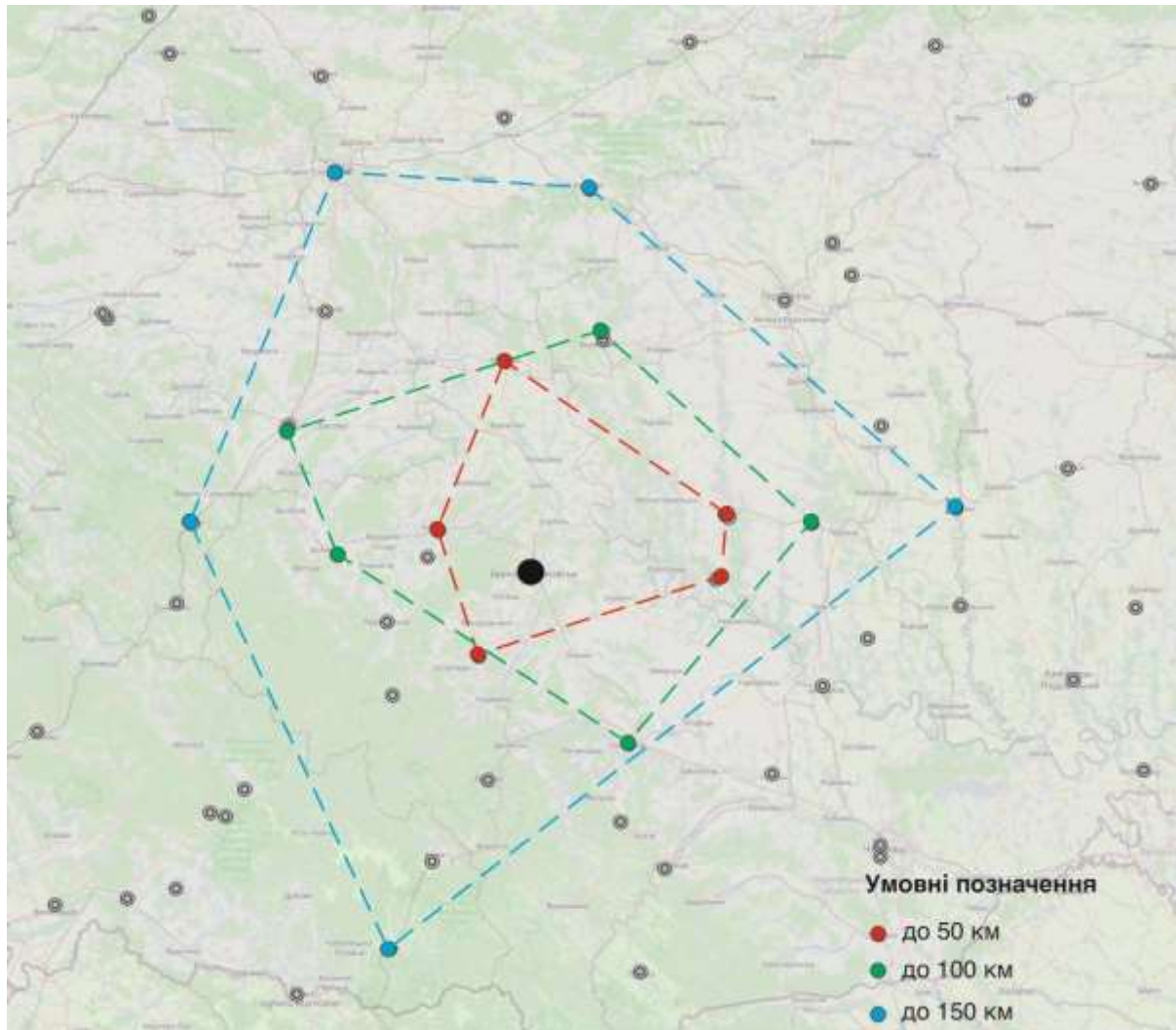


Рисунок 5 Типи мереж

У дослідженні застосовані опорні станції (див. таблицю 1) входять до складу мереж, які обслуговуються як державними, так і приватними організаціями.

Таблиця 1. Характеристики референтних станцій

	ID станції	Назва станції	Тип приймача	Тип антени
Червона мережа (до 50 км)	ROGT	Рогатин	LeicaGRX1200+GNSS	LeicaR25.R3
	KLSH	Калуш	LeicaGRX1200+GNSS	LeicaR25.R3
	HORL	Солотвин	LeicaGRX1200+GNSS	LeicaR25.R3
	BUCH	Золотий потік	TPSNET G3	TPSCR.G3
	BYCH	Бучач	TPSNET G3	TPSCR.G3
Зелена мережа (до 100 км)	BRGN	Бережани	LeicaGRX1200+GNSS	LeicaR25.R3
	STRA	Стрий	TPSNET G3	TPSCR.G3
	DLNA	Долина	TPSNET G3	TPSCR.G3
	KOLM	Коломия	TPSNET G3	TPSCR.G3
	BLBZ	Білобожниця	TPSNET G3	TPSCR.G3
Синя мережа (до 150 км)	LVRS	Львів	LeicaGRX1200+GNSS	LeicaR25.R3
	ZOLH	Золочів	LeicaGRX1200+GNSS	LeicaR25.R3
	GUSI	Гусятин	TPSNET G3	TPSCR.G3
	SOLT	Солотвино	TPSNET G3	TPSCR.G3
	SKOL	Сколе	TPSNET G3	TPSCR.G3




За допомогою програми Bernese GPS було проведено обробку даних спостережень протягом 15 днів, внаслідок чого визначено координати опорних точок усіх станцій та прив'язано їх до системи УСК2000.

У експериментах застосовували різноманітні антени, які сумісні з роверними GNSS-приймачами.

Для аналізу використовували мережеву програму GNSMART (GNSS State Monitoring and Representation Technique), яка дає можливість кількісно розраховувати тропосферні і іоносферні помилки, моделювати ефемеридні неточності супутників, а також брати до уваги багатопроменевий сигнал та похибки годинників як супутника, так і приймача.

У дослідженнях застосовували двочастотні геодезичні GNSS-приймачі, їх технічні характеристики викладені в таблиці 2.


Таблиця 2. Геодезичні приймачі

Виробник	Leica GX1230	Topcon GRS-1	Stonex S9GNSS
Зображення приладів			
Антенa	LEIAX1230+GNSS	TPSPG_A1	TRM55970.00
Кількість каналів	120	73	220
Сузір'я	GPS+GLONSSS	GPS+GLONSSS	GPS+GLONSSS
Частота оновлення позиції	20Hz	N/A	1 Yz
Тип протоколів	RTCM 2.x, RTCM 3	RTCM 2.x, RTCM 3	RTCM 2.x, RTCM 3
Внутрішній модем	Так	Так	Так
Тип з'єднання	GSM	GSM	GSM/GPRS

Крім геодезичних приймачів, у рамках досліджень використовували GIS-приймачі L1, оснащені зовнішніми антенами.

Технічні параметри цих пристроїв подано у таблиці 3.

Таблиця 3. Інструменти ГІС

Виробник	Leica Zeno10	Topcon GRS-1	Trimble GeoXH
Зображення приладів			
Антенa	LEIAT502	TPSPG_A5	TRM53406.00
Кількість каналів	14	72	220
Сузір'я	GPS+GLONSSS	GPS+GLONSSS	GPS
Частота оновлення позиції	5Hz	N/A	1 Yz
Тип протоколів	RTCM 2.x, RTCM 3	RTCM 2.x, RTCM 3	RTCM 2.x, RTCM 3
Корекція фази	Так	Так	Так
Час позиціонування	35-120с.	N/A	45с.
Внутрішній модем	Так	Так	Так
Тип з'єднання	GSM	GSM	GSM/GPRS

## 4.1 Точність позиціонування в режимі реального часу

Нижче представлено усереднені результати, які відповідають типовим показникам двох груп реципієнтів, що брали участь у дослідженні.

Усі дані, отримані під час експерименту, були проаналізовані за допомогою двох типів графіків:

- Кумулятивна функція розподілу (CDF) — ілюструє ймовірність того, що випадкова величина  $X$  з певним розподілом прийме значення, не вище заданого порогу.
- Середня кумулятивна функція — це арифметичне середнє послідовності накопичуваних значень у часі, що оновлюються з кожною новою вибіркою.

При рівномірному розташуванні моментів спостереження або вибірок, середнє обчислюється як сума всіх значень за певний інтервал, поділена на кількість цих значень.

### 4.1.1 Геодезичні приймачі

Для вивчення геодезичних приймачів застосовували три різновиди NRTK-корекцій: віртуальну референтну станцію (VRS), схему головного допоміжного модуля (MAC) та корекційний параметр площі (FKP).

У випадку кожного пристрою і кожного типу NRTK-корекції протягом доби збирали послідовність результатів позиціонування у режимі реального часу.

Подальший аналіз базувався лише на тих вимірах, де були зафіксовані фазові неоднозначності, а значення горизонтальної розведеності (HDOP) не перевищувало 4.

З отриманих даних можна проаналізувати, як поводиться кожен приймач залежно від обраного методу диференціальної корекції.

На рисунку 6 показано якість планіметричного та висотного позиціонування одного з геодезичних приймачів у так званій «червоній» мережі.

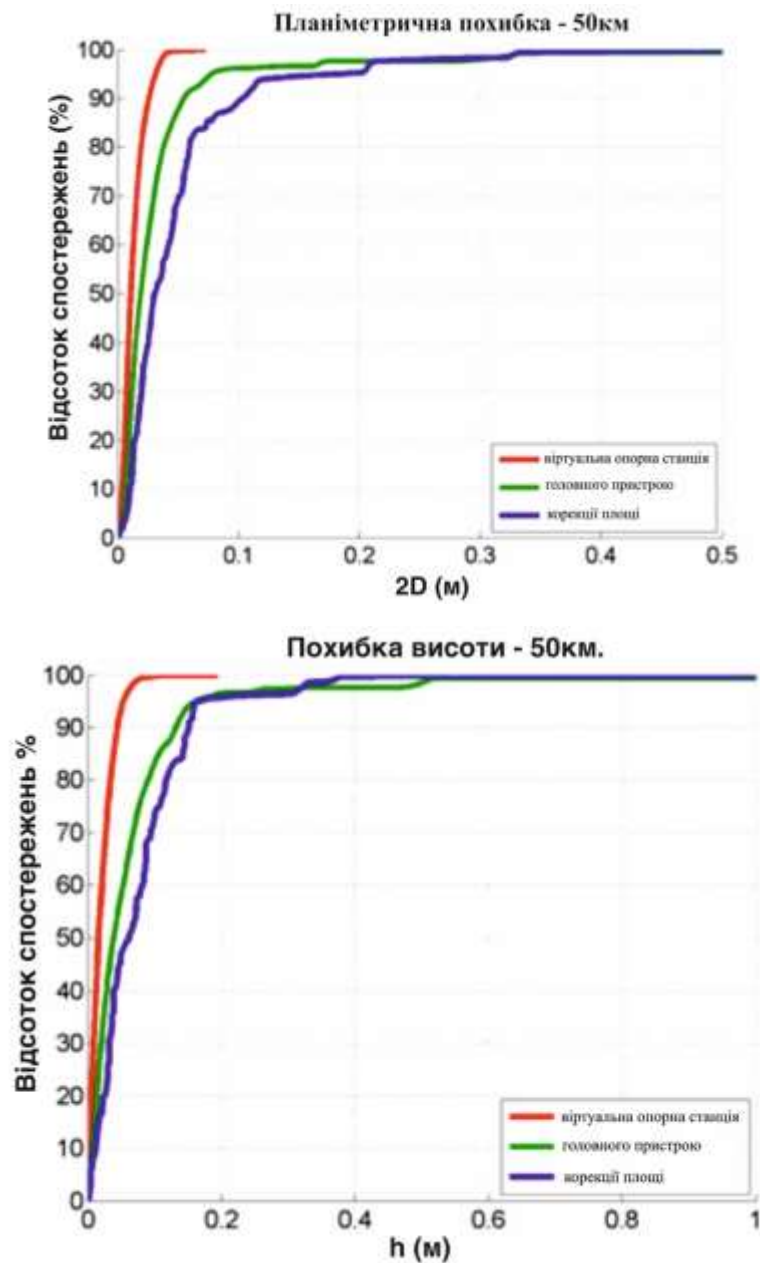


Рисунок 6. Якість планіметричних (зверху) та висотних (знизу) похибок геодезичного приймача

Крім того, що різні приймачі реагують по-різному на вид диференціальної корекції, необхідно також брати до уваги зміну точності позиціонування між різними пристроями.

На рисунку 7 зображено розподіл планіметричних і висотних похибок для трьох геодезичних приймачів (список їх вказано у таблиці 2), які працювали з VRS-корекцією, що передається через «зелену» мережу.

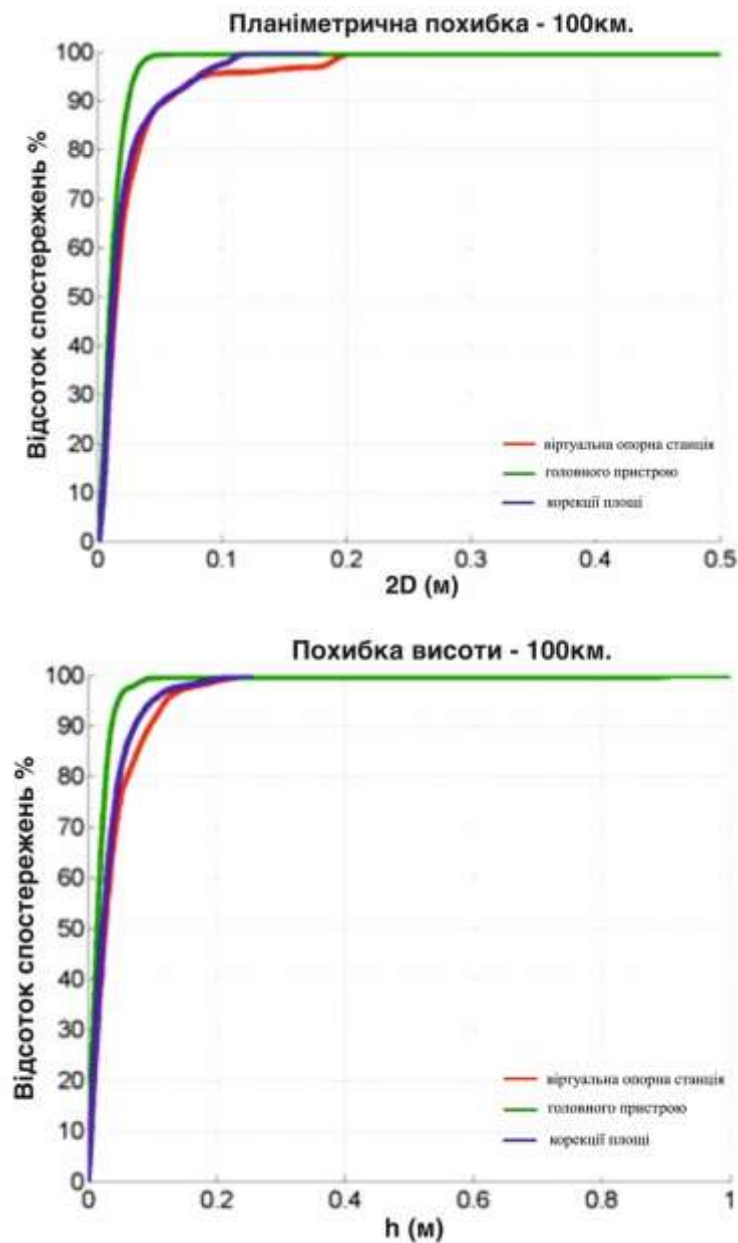


Рис. 7. Розподіл планіметричної (зверху) та висоти (знизу) похибок трьох геодезичних приймачів

З огляду на це, варто аналізувати поведінку «середнього» приймача, приділяючи увагу зміні точності позиціонування у залежності від розміру мережі.

Дослідження поданих кривих виявляє однорідність реакції більшості приймачів; відхилення спостерігаються лише у верхній частині розподілу, приблизно при 85 % ймовірності.

Як приклад, планіметрична точність варіює від приблизно 2 см (за 95 % ймовірністю) у випадку «Приймача 2» до близько 7 см для «Приймача 1» та «Приймача 3».[8],[16]

#### **4.1.2 Позиціонування віртуальна опорна станція**

Віртуальна референтна станція (VRS) безперечно залишається найпопулярнішим методом диференціальної корекції для реального часового позиціонування та, одночасно, є найзручнішою для будь-якого приймача.

Як було зазначено раніше, даний метод корекції ґрунтується на формуванні віртуальної референтної станції в безпосередній близькості до точки вимірювання, причому для цього застосовуються дані мережевих референтних станцій.

Передбачається, що точність позиціонування погіршується зі збільшенням відстані між станціями, оскільки під час інтерполяції, необхідної для створення VRS-корекції, зростає число можливих помилок.

На рисунку 8 продемонстровано середнє поведіння геодезичного приймача при застосуванні VRS-корекції, переданої мережами різних розмірів.

Дослідження показує, що як планіметричні, так і висотні похибки збільшуються зі зростанням масштабів GNSS-мережі. Так, планіметрична

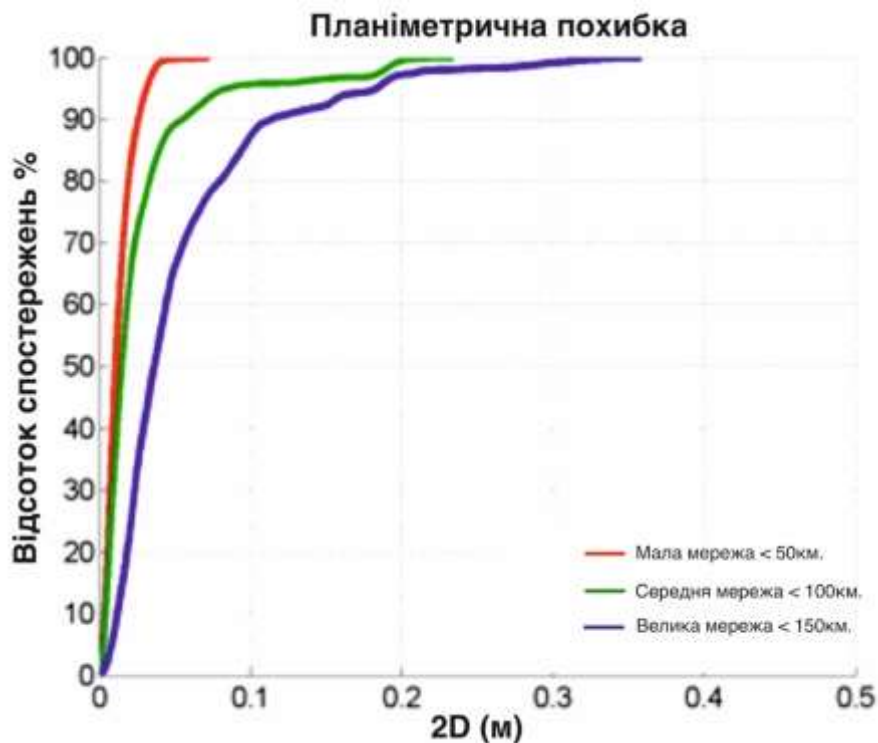
точність варіює від менш ніж 5 см (при 95 % довірчому рівні) у «червоній» мережі до 10 см і 15 см для «зеленої» і «синьої» відповідно.

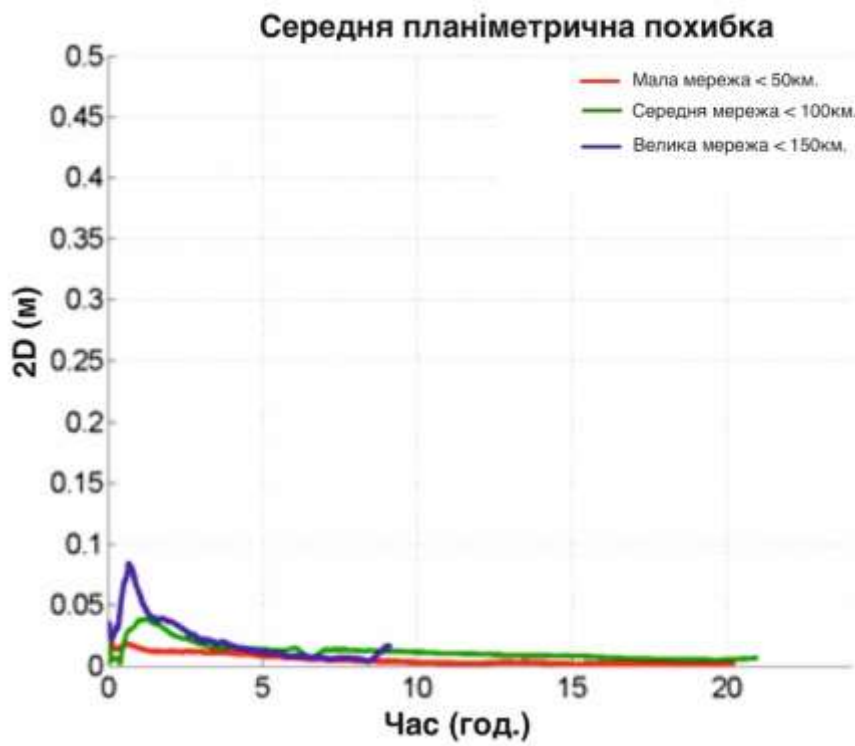
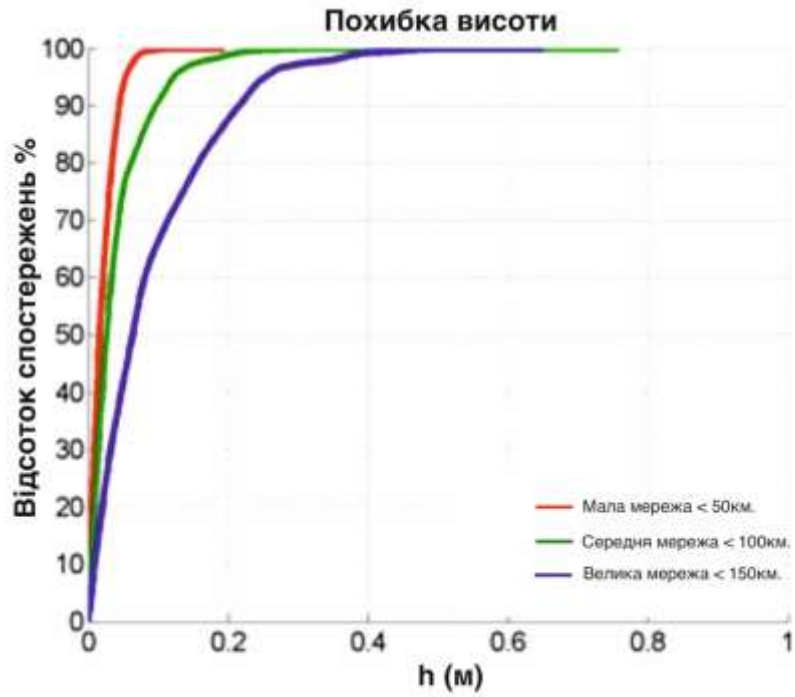
Подібна динаміка спостерігається і у висотних похибках: від 6 см у «червоній» мережі, до 10 см у «зеленій» і близько 25 см у «синій» мережі.

Навіть коли використовується кумулятивне ковзне середнє, система позиціонування, що працює з «червоною» мережею, вже за кілька хвилин досягає точності в сантиметри і надалі демонструє стабільний тренд.

Варто також звернути увагу на розвиток кумулятивного ковзного середнього у «зеленій» і «синій» мережах: у кожному з цих випадків точність позиціонування значно зростає з продовженням вимірювань, що дає можливість досягти сантиметрової точності за декілька годин.

Особливу виразність таке явище демонструє «синя» мережа: вплив окремих аномальних позицій, які не реєструються приймачем миттєво, зникає лише після приблизно п'яти годин вимірювань.





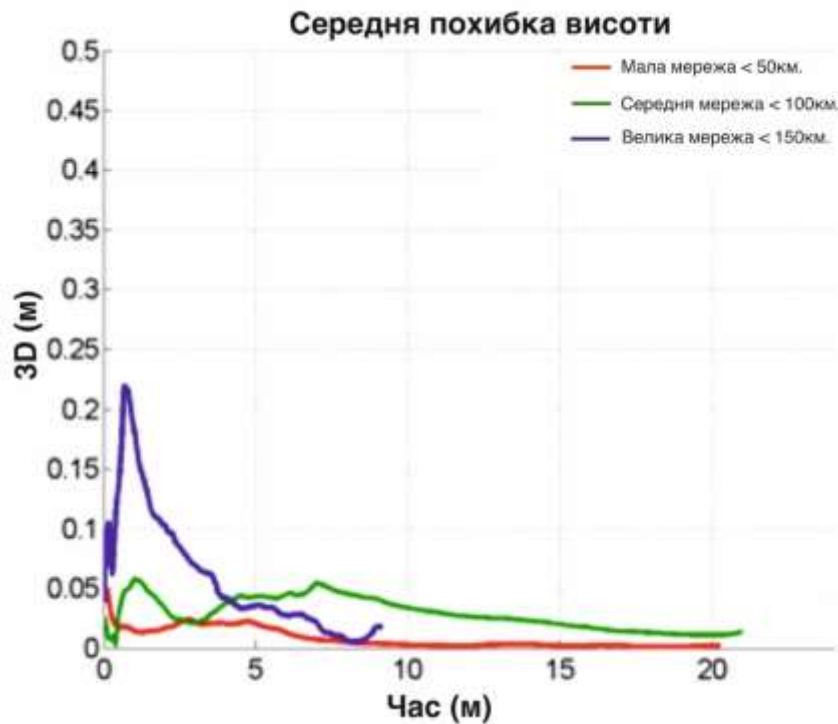


Рисунок 8 Якість позиціонування геодезичного приймача

#### 4.1.3 Позиціонування концепція головного допоміжного пристрою

Як було зазначено, MAC-корекція формується на основі спостережень однієї головної референтної станції у поєднанні з даними від інших станцій, розташованих у певній ділянці мережі (допоміжних станцій).

Отже, такий спосіб корекції менш вразливий до змін розмірів GNSS-мережі.

При умові, що відстань між головною станцією і ровером знаходиться в межах, дозволених для диференціального позиціонування у режимі реального часу, масштабні зміни мережі впливають на диференціальну корекцію лише незначно (тобто внесок допоміжних станцій лишається мінімальним).

Підсумкові результати зображені на рисунку 9.

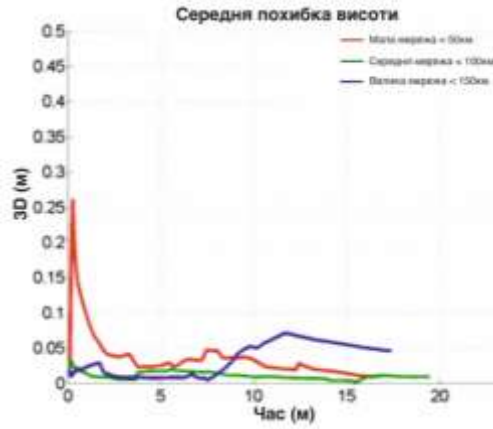
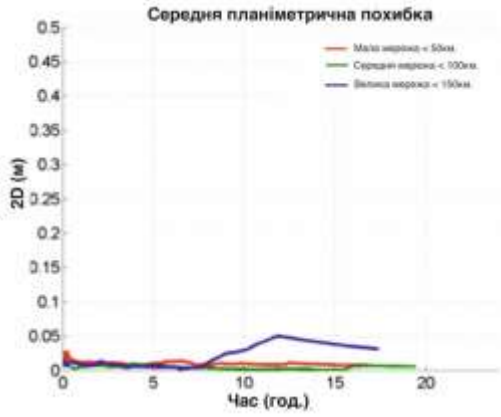
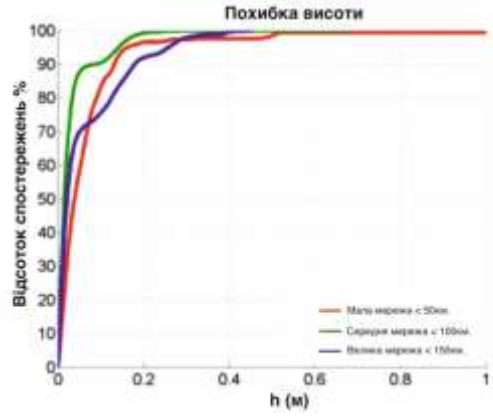
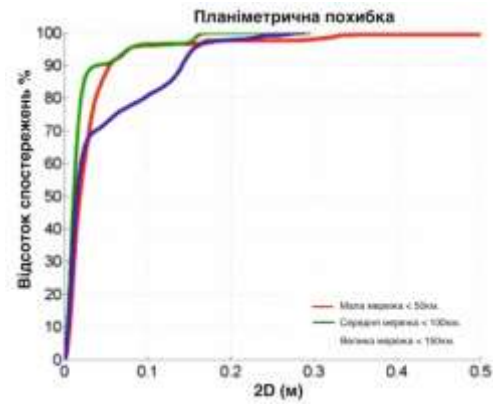


Рисунок 9 Якість позионування геодезичного приймача при використанні корекції головного допоміжного пристрою

Ще один спосіб, що застосовується в мережевому позиціонуванні, — це метод корекції площі (FKP).

На відміну від MAC, FKP дозволяє інтерполювати зсув мережі, спираючись на параметри, отримані у певній ділянці, і передавати їх роверу разом з даними однієї базової станції.

Таке рішення забезпечує більш однорідну якість позиціонування, незалежно від того, наскільки віддалені головна станція і ровер, за умови, що ровер знаходиться в межах області моделювання.

Дослідження результатів показує, що корекції FRKV гарантують стабільну точність у планіметрії та висотному вимірюванні навіть при використанні великих мереж («зелена» і «синя» мережі).

За оцінкою, планіметрична похибка становить приблизно 5–7 см при довірчому рівні 95 %, тоді як висотна погрішність — близько 10–12 см.

Додатково, кумулятивне середнє показує, що стабільну сантиметрову точність можна отримати вже за кілька хвилин вимірювання.

Під час порівняння трьох варіантів NRTK (VRS, MAC і FKP) отримано такі результати:

- VRS пропонує найпростіший спосіб керування і швидке досягнення сантиметрової точності, проте її точність значною мірою визначається розташуванням станцій мережі; з ростом відстані між ними спостерігаються збільшені помилки.

- MAC менш залежить від масштабів мережі, проте його ефективність різко знижується, коли головна станція знаходиться на великій відстані від ровера.

- FKP показує найвищу стабільність у великих мережах і забезпечує збереження постійної сантиметрової точності навіть у віддалених ділянках, хоча потребує певних обчислювальних ресурсів на боці ровера.

Отже, у мережах невеликих і середніх розмірів VRS залишається ефективним та зручним варіантом, тоді як FKP гарантує найвищу

стабільність результатів у великих мережах, а МАС використовується, коли треба знизити обчислювальне навантаження на ровера при доволі коротких відстанях між станціями.

Кумулятивні середні демонструють, що МАС-корекція функціонує стабільно в «червоній» та «зеленій» мережах (рис. 9).[8]

Однак, для «синьої» мережі кумулятивне середнє показує менш стабільну точність позиціонування: після приблизно восьми годин спостережень спостерігається зниження якості тривимірного визначення координат через коливання похибок, які складно відтворити у такій масштабній мережі.

#### **4.1.4 Позиціонування параметр корекції площі**

Підхід до визначення позиції з використанням параметра корекції площини, згідно з викладеним раніше у розділах, передбачає, що роверу передають дані моделі горизонтального зміщення, які обчислює мережеве GNSS-програмне забезпечення.

Ідея про те, що просторові варіації затримки можна представити у вигляді площини, показала гарну ефективність у випадках малих мереж.

Проте коли відстані між приймальними пунктами значно збільшуються, ця модель втрачає точність, оскільки вона не враховує локальні атмосферні процеси, що можуть суттєво впливати на GNSS-спостереження.

На рисунку 10 показані результати позиціонування геодезичного приймача, отримані при застосуванні моделі корекції площинного параметра.

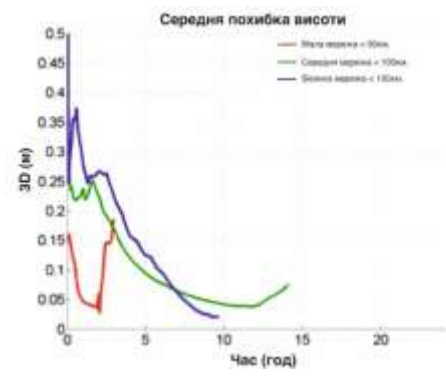
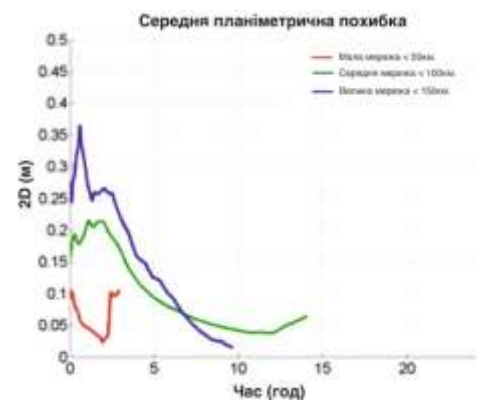
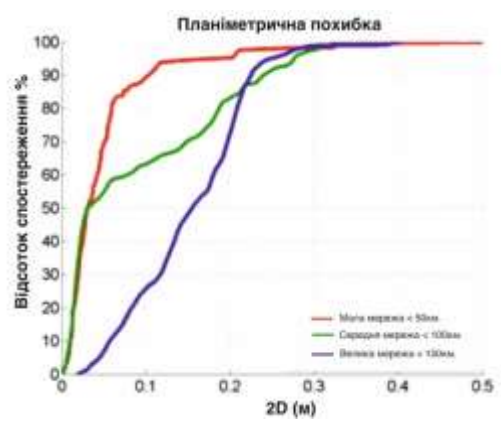
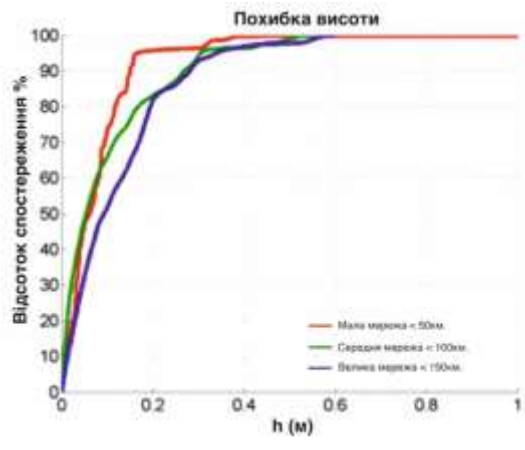


Рисунок 10 Якість позиціонування геодезичного приймача при використанні корекції параметр площі

З попередніх діаграм видно, що застосування одношарової інтерполяційної моделі для корекції площинних параметрів дозволяє досягти планіметричної невизначеності близько 10 см/с (з довірчим інтервалом 95 %) лише у компактних мережах, наприклад у «червоній».

Для мереж середньої та великої величини («зелена» і «синя») середня планіметрична похибка вже перевищує 20 см/с.

Така ж тенденція помітна і у вертикальних похибок: їх значення піднімаються з 15 см/с у «червоній» мережі до понад 30 см/с у «зеленій» та «синій».

Варто підкреслити, що розрив між середньою та великою мережею є незначним, що свідчить про знижену дієвість плоскої моделі при збільшенні відстаней між пунктами.

Для отримання кумулятивного середнього, точність позиціонування в межах 5 см можлива лише при агрегуванні даних протягом кількох годин.

Дослідження тривалості епох, у яких спостерігаються сталі фазові неоднозначності, виявило, що їхній відсоток залишається доволі малим — переважно нижче половини загального часу спостереження.

Причина не в недоліках передачі NRTK-корекцій, а у вбудованих обмеженнях приймача, який застосовує спрощену площинну модель корекційного параметра; ця модель не здатна адекватно відтворити локальні атмосферні та багатопроменеві похибки, характерні для конкретної точки вимірювання.

Отже, прості інтерполяційні підходи ефективні в умовах компактних мереж, проте їхня точність знижується зі збільшенням дистанції між станціями, особливо у вимірюванні висотних координат.

Тому важливо ретельно підбирати метод корекції, орієнтуючись на розмір мережі та специфічні умови місцевості.

## 4.2 ГІС-приймачі

Тести, виконані на трьох ГІС-приймачах, що наведені у Таблиці 3, мали на меті визначити їх точність у GNSS-мережах з різними інтер-станційними дистанціями.

При випробуванні застосовували два головних підходи до диференціальної корекції: віртуальна референтна станція, спільна для всіх пристроїв даного типу, і корекції, отримані від найблизької референтної станції.

Враховуючи специфікації ГІС-приймачів і передбачуваний рівень метричної точності, було додатково введено поправки, щоб з'ясувати, чи використання мережі GNSS-референтних станцій дає переваги над плоскими поправками, що передаються геостаціонарними супутниками.

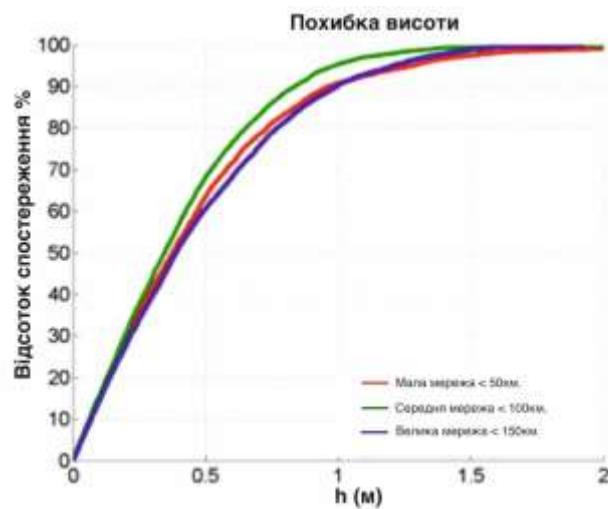
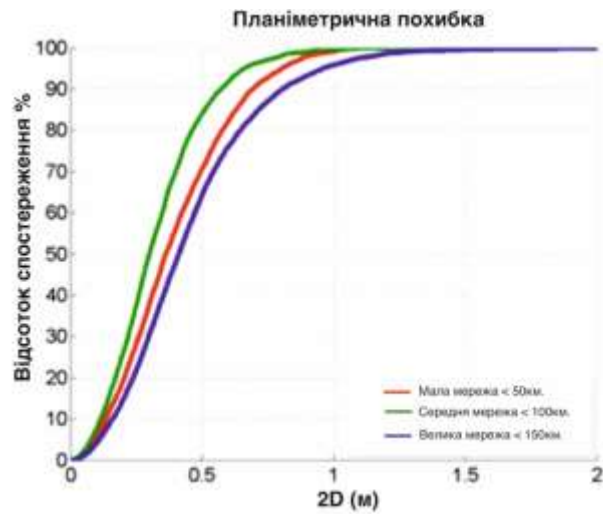
Таке дослідження дозволяє оцінити дієвість мережевих рішень для середньокласових приймачів, що зазвичай застосовуються у ГІС-зйомках, і визначити практичне підвищення ефективності завдяки впровадженню багатоточкових мережевих корекцій.

### 4.2.1 Позиціонування віртуальна опорна станція

На початку здійснили дослідження планіметричної й вертикальної точності, яку можна отримати з використанням ГІС-приймача у GNSS-мережах з різними дистанціями між станціями.

Для цього було зібрано дані протягом 24-годинного сеансу, що дало змогу знизити вплив супутникової геометрії; при аналізі брали до уваги лише ті позиції, у яких індекс HDOP був  $\leq 4$ , аби відкинути аномальні та нетипові вимірювання.

У рисунку 11 показані результати роботи «середнього» приймача, які ілюструють типові закономірності точності у різних мережах і дають можливість оцінити ефективність застосування різних диференціальних корекційних стратегій для ГС-приймачів.



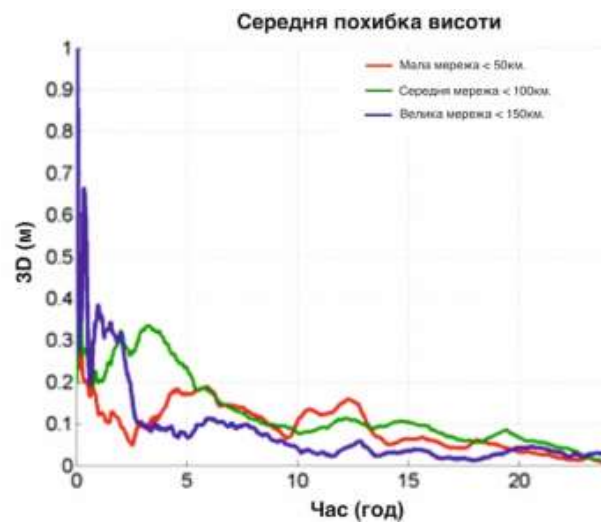
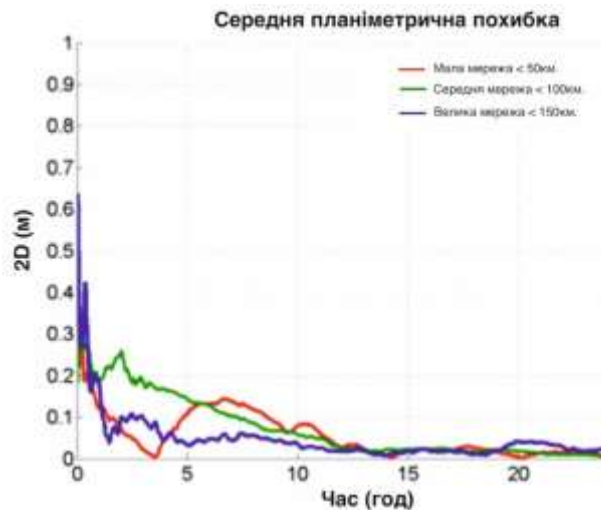


Рисунок 11 Якість позиціонування ГІС-приймача при використанні корекції віртуальна опорна станція

Отримані результати аналізу вказують, що точність позиціонування змінюється у залежності від збільшення відстані між базовими станціями.

Проте, на відміну від геодезичних приймачів, у випадку ГІС-приймачів не спостерігається значного погіршення точності при розширенні мережі від «червоних» до «синіх» сегментів.

Наприклад, 95-відповідна похибка планіметрії варіюється приблизно від 80 см у «червоній» мережі до 60 см у «зеленій» та становить близько 1 м у «синій» мережі.

Покращення точності, характерне для мережі середнього розміру («зеленої»), можна пов'язати з особливостями функціонування приймачів, зокрема їх внутрішньою обробкою сигналу та шумовою фільтрацією.

Загалом, така динаміка свідчить про стабільність позиціонування, яке залишається в межах метричних величин незалежно від розміру мережі.

Цей ефект стає ще виразнішим при аналізі похибки висоти, де коливання теж залишаються доволі незначними.

### 4.3 Точність позиціонування після обробки

Необроблені дані у форматі RINEX зберігалися з метою оцінки потенційної точності, яку можна досягти під час постобробки, а також для дослідження впливу збільшення середньої відстані між референтними станціями на ефективність позиціонування.

Кожен 24-годинний файл розбивали на безліч коротших фрагментів різної тривалості, що надало можливість здійснити детальний статистичний аналіз планіметричної та висотної точності.



Рисунок 12. Схема розділення файлів даних

Для обробки файлів даних застосували комерційне програмне забезпечення Leica Geomatics Office, використовуючи метод подвійних різниць.

У ролі головної станції обирали найближчу постійну опорну станцію для кожної мережі та вводили віртуальну опорну станцію, яку сформувало мережеве ПЗ неподалік від місця вимірювання.

Після етапу постобробки встановили, що різниця у точності трьох геодезичних приймачів була практично незначною, що зумовлено високою якістю вхідних даних.

Таку ж стабільність спостерігали і при аналізі трьох ГІС-приймачів, отже в подальших розділах, задля спрощення аналізу, буде використано «середній» приймач для кожної групи інструментів.

#### **4.3.1 Геодезичні приймачі**

Вихідні дані геодезичного приймача розбили на безліч підфайлів довжиною по 5 і 10 хвилин, після чого їх обробили згідно з наведеною раніше методикою.

Для кожного сеансу розраховували середні планіметричну і висотну помилки, що дає змогу оцінити стабільність позиціонування у короткостроковій та середньостроковій перспективі.

Рисунок 13 ілюструє результати обробки, коли в якості опорної станції використано найближчу, для трьох різних мереж.

Лише в разі, коли в ролі головних вибрано станції, розташовані на великій відстані від ровера, спостерігається незначне зниження точності позиціонування.

Таке спостереження вказує на те, що короткострокові похибки практично не залежать від розміру мережі й відстані до головної станції, особливо коли застосовуються високоякісні геодезичні приймачі.

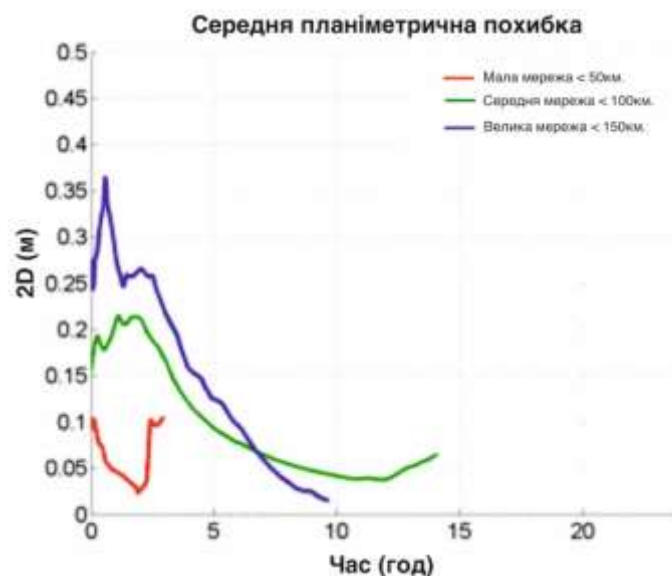
Наприклад, коли розглядаємо планіметричну точність у 5-хвилинних сеансах для «зеленої» та «синьої» мереж, видно, що помітне зниження обмежується лише верхніми 10 % розподілу, що вказує на окремі аномальні епохи.

При обробці 10-хвилинних записів не спостерігається суттєвого підвищення точності у «червоній» мережі, тоді як у «зеленій» і «синій» мережах є помітне поліпшення, що підкреслює важливість усереднення похибок при подовженні тривалості сеансу.

Частка епох, в яких зафіксовано фазові неоднозначності, залишається високою і схожою для «червоній» і «зеленій» мереж: 98-99 % у 5-хвилинних сеансах і 99-100 % у 10-хвилинних.

У випадку «синьої» мережі ці значення трохи нижчі — 92 % і 97 % відповідно.

Тому, при значному збільшенні відстані між базовими станціями, виявлення фазових неоднозначностей у режимі реального часу може ускладнюватися, хоча загальна стабільність позиціонування залишається високою.



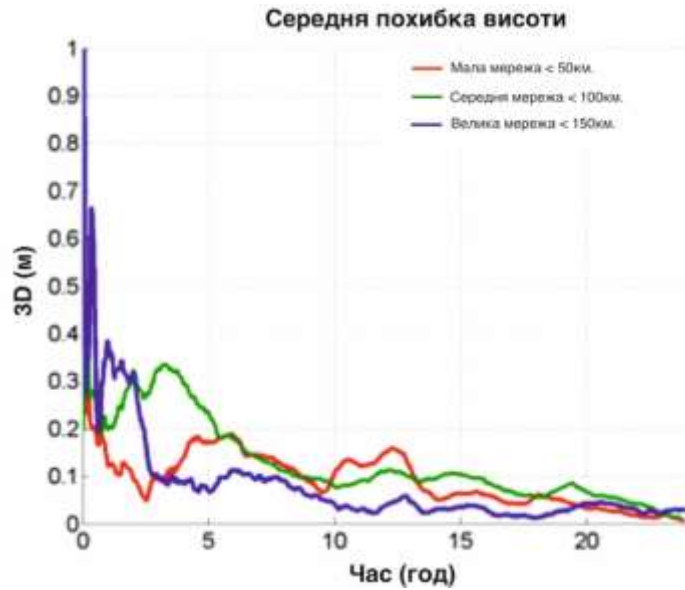


Рисунок 13. Якість позиціонування геодезичного приймача після постобробки з найближчою опорною станцією.

Отримані дані однозначно вказують, що гранична точність післяобробки становить близько 2 см, якщо головна станція розташована на відстані понад 25–30 км від ровера.

Сьогодні така дистанція збігається з реальними міжстанційними відстанями у багатьох GNSS-мережах.

Для досягнення точності нижче 2 см при задовільній надійності можна використати два головних підходи:

- Подовження часу статичного спостереження, що, проте, знижує швидкість роботи та ефективність виконання;
- Застосування мережевого засобу постобробки, а саме віртуального RINEX-файлу, сформованого на підставі моделей помилок, отриманих від GNSS-мережі.

У другому сценарії користувач отримує головну вигоду – файл сирих даних генерується безпосередньо поруч із зазначеною точкою, що істотно

підвищує шанс коректного усунення фазових неоднозначностей за допомогою ровера.

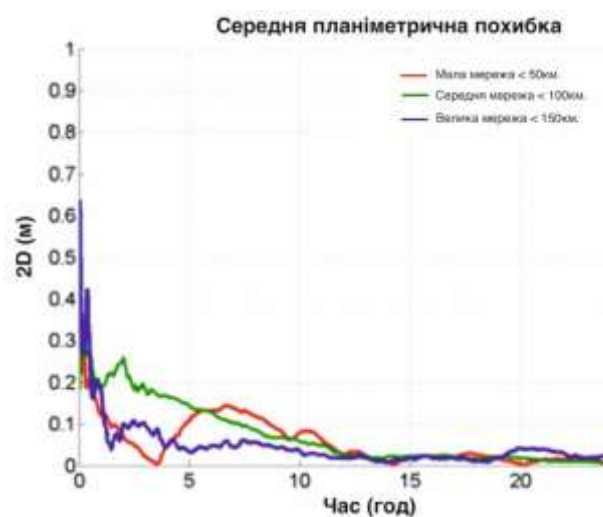
У протилежному випадку виникають труднощі, схожі на ті, що вже розглядалися при позиціонуванні за допомогою віртуальної опорної станції в режимі реального часу.

Файли віртуальної опорної станції у форматі RINEX створюються шляхом інтерполяції моделей помилок, отриманих за допомогою програмного забезпечення мережі.

При збільшенні дистанції між станціями можна очікувати певне зниження точності позиціонування через розтягнення, здійснене під час інтерполяції на більшій площі.

У рисунку 14 показані результати, отримані під час використання файлу віртуальної базової станції у форматі RINEX як головного.

Як видно, ці дані підтверджують очікувану тенденцію: збільшення відстані між станціями призводить до незначного зниження точності, проте загальна стабільність позиціонування залишається на високому рівні.



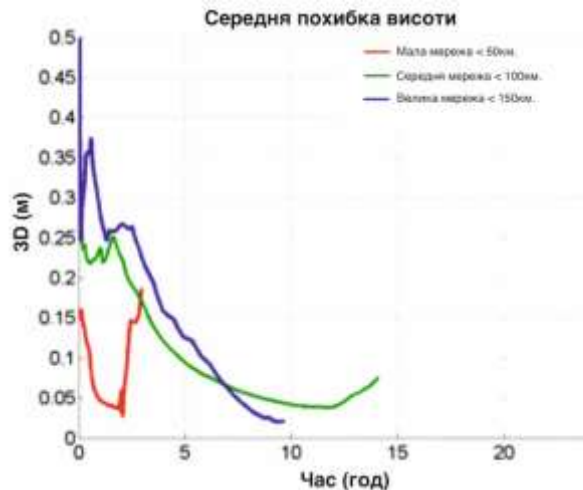


Рисунок 14 Якість позиціонування геодезичного приймача після постобробки за допомогою віртуальної опорної станції

Зрозуміло, що використання постобробки позиціонування за рахунок віртуальної опорної станції підвищує планіметричну та висотну точність лише у малих («червоній») і середніх («зеленої») мережах, забезпечуючи приблизно 1 см і 4 см планіметричної помилки відповідно.

Такі дані свідчать про високий рівень якості цього підходу за умови застосування постійних GNSS-станцій, розташованих на відстані близько 50–100 км одна від іншої.

Якщо ж відстані між станціями перевищують 100 км, точність позиціонування стає подібною або навіть трохи гіршою, ніж при використанні найближчої опорної станції як головної.

Щодо частки епох з виправленими фазовими неоднозначностями, у «червоній» мережі вона майже досягає 100 % при роботі з файлами тривалістю 5–10 хв.

У «зеленої» мережі цей показник становить близько 50 %, а в «синій» лише 12 %, що вказує на суттєве зниження ефективності при великих відстанях між станціями.

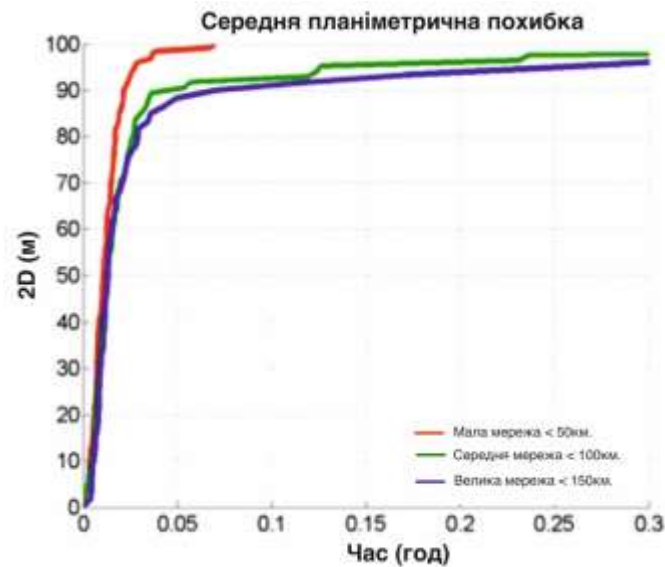
### 4.3.2 ГІС-приймачі

Подібно до попередніх частин, для аналізу застосовували «середній» ГІС-приймач і ті ж методи обробки даних.

Проте, задля досягнення субдециметрової точності, прийняли рішення продовжити тривалість статичної обробки, розділивши необроблені записи на частини тривалістю 10 та 20 хвилин.

Такі інтервали відповідають середньому часу, який оператор готовий приділити для отримання субдециметрової позиційної точності при використанні недорогого приймача.

На рисунку 15 зображені результати пост-обробки фрагментів необроблених даних з урахуванням найближчої опорної станції, що дозволяє оцінити, у який спосіб збільшення тривалості сеансу впливає на покращення планіметричної та висотної точності позиціонування.



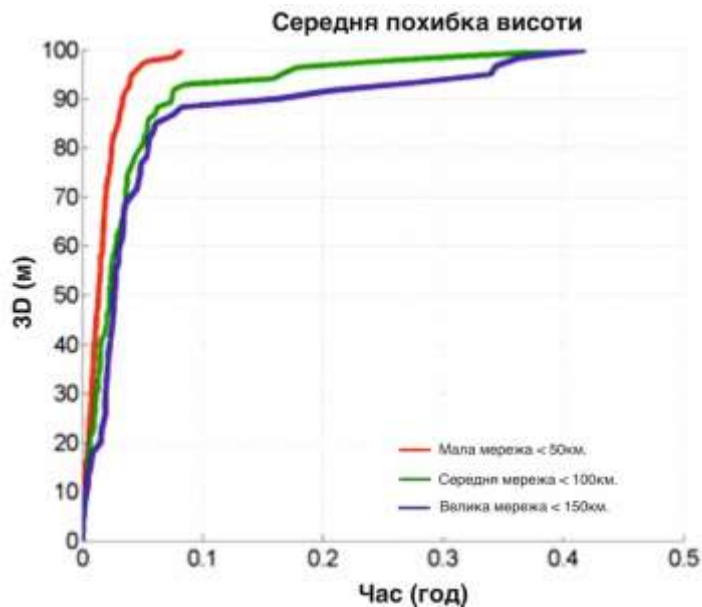


Рисунок 15 Якість позиціонування ГПС-приймача після пост-обробки з найближчою опорною станцією

Трохи знижується як горизонтальна, так і вертикальна точність, якщо головна базова станція розташована на відстані понад 30 км від ровера.

Це зниження не пов'язане з недосконалістю вхідних даних, а з обмеженою функціональністю GPS-приймачів, які не приймають сигнал L2.

Саме L2-сигнал дає можливість виконувати лінійне комбінування вимірювань, що дозволяє зменшити деякі систематичні помилки.

Збільшення тривалості обробки з 10 до 20 хвилин майже не впливає на точність визначення позиції: при 90 % рівні довіри вона залишається в діапазоні приблизно 2–3 см по планіметрі для «червоної» мережі і 7 см для «зеленої» мережі.

Найкращі досягнення отримуються шляхом використання RINEX-файлів віртуальної базової станції, які генерує мережеве програмне забезпечення.

Оцінка точності позиціонування, наведена у рисунку 16, підкреслює вже встановлені для геодезичних приймачів закономірності. Зокрема, спостерігається зменшення максимальної планіметричної та висотної похибки в «червоних» та «зелених» мережах — лише на декілька сантиметрів при 90 % довірчому рівні.

Частка сеансів, у яких успішно зафіксовані фазові неоднозначності, коливається: 68 % у «червоних», 48 % у «зелених» та всього 31 % у «синіх» мереж.

При розгляді 20-хвилинних файлів ці значення залишаються майже стабільними.

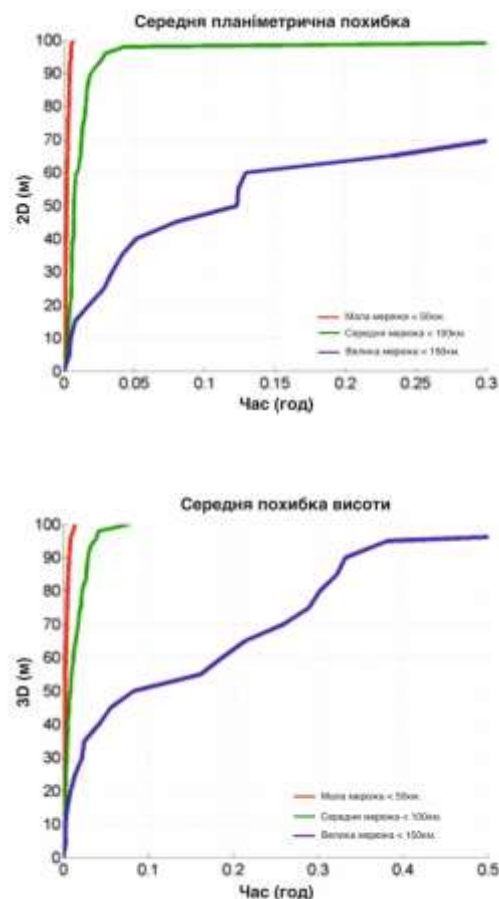


Рисунок 16 Якість позиціонування ГІС-приймача після пост-обробки за допомогою файлу віртуальна опорна станція

Застосування одночастотних ГІС-приймачів у поєднанні з віртуальними даними виявляє свою перевагу головно у «червоній» мережі.

У випадку більш розтягнутих мереж, зокрема «зеленої» та «синьої», використання віртуальних даних суттєво знижує точність визначення позиції, що наочно продемонстровано на рисунку 16.

Конкретно, при планіметричному позиціонуванні за допомогою файлу віртуальної опорної станції, створеного «синьою» мережею, приблизно 20–30 % вимірювань перевищують граничне значення помилки, яке становить близько 30 см/с.

Для «червоної» мережі 100 % сеансів має фіксовану фазову неоднозначність, тоді як у «зеленій» цей показник падає до 40 %, а у «синій» – лише до 10 %.

Отримані дані демонструють, що застосування одночастотних приймачів з віртуальними спостереженнями виправдане лише в щільній GNSS-мережі, коли відстані між станціями короткі; у протилежному випадку, при розрідженій мережі, вплив такої обробки майже не відчувається.

## Висновки

У цій магістерській дисертації проведено комплексний огляд точності геодезичних та ГІС-приймачів у GNSS-мережах різних розмірів — малих, середніх і великих — із порівнянням даних, отриманих різними мережевими рішеннями.

Оцінювання базувалось на вимірах, зібраних протягом 24-годинного періоду, а рівень точності визначався з 95 % довірчим інтервалом відносно відомих координат ровера.

У мережах, в яких інтервал між станціями не перевищує 100 км, геодезичні приймачі демонструють суттєву перевагу при використанні поправок віртуальної опорної станції.

За цих умов планіметрична точність коливається між 2 см і 8 см, а висотна — між 5 см і 12 см.

Таку ж ефективність показують поправки, засновані на концепції головного допоміжного пристрою, які дають схожі результати в мережах малого та середнього масштабів (приблизно 5 см у планіметрії та 10 см у висоті).

У випадку великих мереж NRTK-позиціонування втрачає частину своєї ефективності та надійності, бо існують труднощі в моделюванні зсувів на обширних ділянках.

Корекційні параметри площі не підходять навіть для мереж середньої величини, оскільки не досягають потрібної точності під час врахування локальних атмосферних ефектів.

У ГІС-приймачів робота в режимі реального часу практично не змінюється в залежності від розміру мережі.

Планіметрична похибка становить від 0,65 до 0,85 м, а висотна — приблизно 1 м, що суттєво перевершує результати автономного позиціонування (1,7 м і 4,5 м відповідно).

Застосування диференціальних поправок дозволяє отримати висотну точність приблизно 1 м (95 %) і планіметричну точність близько 75 см.

Середнє значення, обчислене за кілька хвилин реального часу, підвищує планіметричну точність до 50 см.

Після завершальної обробки не спостерігається суттєвих змін у точності: сеанси тривалістю 5–10 хв для геодезичних приймачів та 10–20 хв для ГІС-пристроїв дають схожі результати.

У малих мережах геодезичні прилади демонструють покращення точності за рахунок використання RINEX-файлів віртуальної опорної станції.

У великих мережах кращі результати досягаються шляхом обробки даних від найближчої реальної опорної станції, хоча частка виправлених фазових неоднозначностей може впасти до 30 %.

Найкращі показники для ГІС-приймачів отримуються, якщо використати дані найближчої станції, яка входить до мережі малих масштабів (відстань між станціями становить близько 50 км) і має планіметричну похибку 2 см та висотну — 3 см.

RINEX-файл віртуальної опорної станції, сформований великою мережею, не підвищує точності позиціонування у порівнянні з даними найближчої станції; натомість мережа середнього розміру дає певні переваги.

За таких умов планіметрична точність варіює від 10 см (дані найближчої станції) до приблизно 4 см (віртуальні дані GNSS-мережі).

Теж саме справедливо щодо вертикальної точності — від 15 см до 8 см.

## Список використаних джерел

1. Баран П.І. Інженерна геодезія — Київ: Віпол, 2012
2. Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. – Львів, 2008.
3. Волосецький Б.І. Інженерна геодезія. – Львів, 2003.
4. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – К.: ГКНТА, 1999.
5. Тартачинський Р.М., Дейнека Ю.П., Смірнова О.М. Практикум з інженерної геодезії – Львів, 2001.
6. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України "Інструкція з топографічної зйомки в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500", - Київ, 2001 рік.
7. Проф. Могильний С.Г. і д.т.н. Войтенко С.П. "Геодезія" (частина перша). Чернігів 2002р.
8. Dabove, Paolo & De Agostino, Mattia & Manzano, Ambrogio. (2012). Achievable Positioning Accuracies in a Network of GNSS Reference Stations. 10.5772/28666.
9. Чен, Х.; Воллат, У. та Ландау, Х. (2004). Чи стане GALILEO/модернізована GPS застарілою Мережа RTK, Матеріали ENC-GNSS 2004, Роттердам, Нідерланди, травень 2004.
10. Ойлер, Х.Й.; Кінан, К.Р.; Зебхаузер, Б.Е. та Вюббена Г. (2001). Дослідження спрощеного підходу до використання інформації з постійних решіток опорних станцій, Праці 14-ї Міжнародної технічної зустрічі Супутникового відділу

11. Ландау, Х. та Ойлер, Х.Й. (1992). Розв'язання неоднозначностей на льоту для точного диференціального позиціонування, Матеріали 5-ї Міжнародної технічної зустрічі Відділу супутникового зв'язку Інституту навігації (ION GPS 1992), Альбукерке (Нью-Мексико-США), вересень 1992 р.

12. Ландау, Х., Воллат, У. та Чен, Х. (2002). Системи віртуальних опорних станцій. Журнал глобальних систем позиціонування, том 1(2), с. 137-143.

13. Раке, Дж. та Лашапель, Г. (2001). Багатоетапне RTK позиціонування. GPS World, том 12(4), с. 48-53.

14. Раке, Дж.; Лашапель, Г. та Фортес, Л. (2001). Використання методу коваріаційного аналізу для прогнозування продуктивності регіональних мереж диференціального коду та мереж несучої фази. Навігація, том 48(1), с. 25-34.

15. Rizos, C. (2002). Дослідження та впровадження мережевого RTK – геодезична перспектива. Journal of Global Positioning Systems, том 1(2), с. 144-150.

16. Schaffrin, B. & Grafarend, E. (1986). Генерація класів еквівалентних лінійних моделей шляхом усунення параметрів заважання. Manuscripta Geodaetica, том 11, с. 262–271.

17. Stankov, S.M. & Jakovskia, N. (2007). Вплив іоносфери на цілісність опорної мережі GNSS. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, том 69 (4-5), с. 485-499.

18. Vollath, U.; Buecherl, A.; Landau, H.; Pagels, C. & Wagner, B. (2000). Використання Multi-Base RTK

19. Віртуальні опорні станції, Матеріали 13-ї міжнародної технічної наради супутниковий відділ Інституту навігації (ION GPS 2000), Солт-Лейк-Сіті (УТСША), вересень 2000 р.

20. Wübbena, G. & Bagge, A. (2002). Тип повідомлення RTCM 59–FKP для передачі FKP. Geo++ White paper, N.2002.01.

21. Вюббена, Г.; Багге, А.; Сібер, Г.; Böder, V. & Hankemeier, P. (1996). Зменшення залежних від відстані помилок для точних застосувань DGPS у реальному часі шляхом створення мереж опорних станцій, Матеріали 9-ї Міжнародної технічної зустрічі Відділу супутникового зв'язку Інституту навігації (ION GPS 1996), Канзас-Сіті (KS-США), вересень 1996 р.

22. Zhang, J. & Lachapelle, G. (2001). Точна оцінка залишкових тропосферних затримок за допомогою регіональної мережі GPS для кінематичних застосувань у реальному часі. Журнал геодезії, том 75 (5-6), с. 255-266.

## **БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА**

Тема магістерської роботи:

**«Комплексний підхід до аналізу стійкості  
скельних масивів на основі поєднання  
геодезичних та дистанційних методів»**

Обсяг пояснювальної записки: 64 аркушів.

24.12.25 рік

(дата)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)