

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Грішненко Юліан  
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48  
(індекс)

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**  
**«Визначення координат точки з високою точністю у реальному часі за допомогою одночастотного сигналу кількох GNSS»**  
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій  
(шифр і назва спеціальності)

Ю. Грішненко, студент групи ГЗ-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: к.т.н. доцент Ростислав Пилип'юк  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри проф. Микола ПРИХОДЬКО  
(посада) (підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

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

*(повне найменування вищого навчального закладу)*

**Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА**

**Кафедра геодезії та землеустрою**

**Освітній рівень бакалавр**

**Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій**

*(шифр і назва)*

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри геодезії та землеустрою**

**проф. Микола ПРИХОДЬКО**

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

**Грішненко Юліан**

*(прізвище, ім'я, по батькові)*

**1. Тема роботи: « Визначення координат точки з високою точністю у реальному часі за допомогою одночастотного сигналу кількох GNSS»**

**керівник роботи: к.т.н. доцент Ростислав Пилип'юк**  
*(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)*

затверджена наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_

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

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

1. Одночастотна модель точного позиціонування
2. Методика виконання робіт
3. Результати досліджень

**5. Перелік графічного матеріалу:**

**6. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_**

## 7. Календарний план

<b>№ з/п</b>	<b>Назва етапів магістерської роботи</b>	<b>Термін виконання етапів роботи</b>	<b>Примітки</b>
<b>1</b>	<b>Одночастотна модель точного позиціонування</b>		
<b>2</b>	<b>Методика виконання робіт</b>		
<b>3</b>	<b>Результати досліджень</b>		
<b>4</b>	<b>Оформлення бакалаврської роботи</b>		

Студент

\_\_\_\_\_ ***Гришненко Ю.***  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ ***Пилип'юк Р.***

## Анотація

Точне позиціонування (PPP) – один з найпопулярніших методів обробки даних глобальної супутникової навігаційної системи (GNSS), що дозволяє визначати координати з високою точністю, не потребуючи наземної інфраструктури.

Одночастотне точне позиціонування (SF-PPP) являє собою подальшу розробку цього методу, завдяки чому вдається обійтися без використання дорогих двочастотних GNSS-приймачів, не втрачаючи при цьому в прийнятній точності.

Було вже доведено ефективність одночастотного прецизійного позиціонування для визначення положення смуг руху і складання карт автомагістралей.

Але дослідження засвідчили, що якість отриманих даних безпосередньо пов'язана з кількістю доступних супутників.

Це накладає обмеження на застосування цього методу в зонах, де прийом супутникових сигналів ускладнений – наприклад, у щільній забудові міст або лісових масивах.

У межах цієї бакалаврської роботи планується встановити, чи реально збільшити сферу використання одночастотного високоточного позиціонування, залучаючи кілька глобальних навігаційних супутникових систем спільно, замість обмеження однією GNSS.

З наявних навігаційних систем, система ГЛОНАСС, разом з GNSS, демонструє на сьогоднішній день повну функціональність, і тому була обрана для цього дослідження.

Очікується, що комбінування даних від декількох супутникових систем може забезпечити поліпшення точності та стійкості визначення місцезнаходження в умовах зі складними умовами прийому сигналу.

**Ключові слова:** Одна частота, точне позиціонування точки, мульти-GNSS, ГЛОНАСС.

## **Abstract**

Precise positioning (PPP) is one of the most popular methods of processing

Global Navigation Satellite System (GNSS) data, which allows determining coordinates with high accuracy without the need for ground infrastructure.

Single-frequency precise positioning (SF-PPP) is a further development of this method, which makes it possible to do without the use of expensive dual-frequency GNSS receivers, without losing acceptable accuracy.

The effectiveness of single-frequency precision positioning has already been proven for determining the position of traffic lanes and compiling highway maps.

However, studies have shown that the quality of the obtained data is directly related to the number of available satellites.

This imposes restrictions on the use of this method in areas where satellite signal reception is difficult - for example, in densely built-up cities or forests.

Within the framework of this bachelor's thesis, it is planned to establish whether it is realistic to increase the scope of single-frequency high-precision positioning by involving several global navigation satellite systems together, instead of being limited to one GNSS.

Of the available navigation systems, the GLONASS system, together with GNSS, demonstrates full functionality to date, and therefore was chosen for this study.

It is expected that combining data from several satellite systems can provide improved accuracy and stability of location determination in conditions with difficult signal reception conditions.

Keywords: Single frequency, precise point positioning, multi-GNSS, GLONASS.

# **Зміст**

## **Вступ**

### **1 Одночастотна модель точного позиціонування**

1.1 Лінеаризована модель

1.2 Стохастична модель

1.3 Шум вимірювання

1.4 Динамічна модель

1.5 Перевірка цілісності

1.6 Затінення і багатопроменевість

### **2. Методика виконання робіт**

### **3. Результати досліджень**

3.1 Стаціонарний дослід

3.2 Стаціонарні дослідження з обмеженою видимістю небосхилу

## **Висновок**

## **Список використаних джерел**

## Вступ

Методи точного позиціонування (PPP) є однією з найефективніших технік обробки інформації, отриманої від глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), адже вони надають змогу визначати координати з високою точністю, не вдаючись до створення додаткових наземних систем.

Одночастотне точне позиціонування (SF-PPP) значно розвиває цю концепцію, позбавляючи необхідності купувати дорогі двочастотні GNSS-приймачі, не втрачаючи при цьому у точності визначення місцезнаходження.

По суті, одночастотне точне позиціонування можна розцінювати як один з найточніших методів обробки GNSS-даних у режимі реального часу, який може працювати з доступним за ціною обладнанням, не вимагаючи застосування додаткових сенсорів чи супутньої інфраструктури.

Одним з ключових викликів у одночастотному високоточному позиціонуванні виступає корекція іоносферних затримок.[4],[5]

Розроблено різноманітні підходи до розв'язання цієї задачі, кожен з яких характеризується власними властивостями та продуктивністю:

1. Елімінування іоносферних впливів передбачає створення комбінації кодових та фазових вимірювань на несучих частотах, що не зазнають іоносферного впливу.

Проте такий підхід призводить до подовження часу збіжності для досягнення потрібної точності.

2. Параметризація іоносферної затримки – метод оцінки іоносферної затримки спільно з іншими невідомими параметрами.

3. Використання зовнішніх іоносферних даних: залучення попередньо визначеної іоносферної моделі чи даних з зовнішніх джерел з

метою забезпечення високої точності позиціонування та практичного усунення часу збіжності.

Цей метод широко застосовується в системах реального часу, зокрема в навігаційних задачах, таких як дорожній рух, де критично важливо точно визначати місцезнаходження транспортних засобів, наприклад, для ідентифікації смуги руху.

Попри перелічені вигоди, низка досліджень продемонструвала, що результативність SF-PPP безпосередньо корелює з числом доступних супутників.

Це накладає суттєві обмеження на застосування технології у місцях, де якість супутникового зв'язку може бути низькою – скажімо, у щільно забудованих, гірських або лісових зонах.[7]

Ймовірним рішенням цієї проблеми є впровадження мульти-GNSS концепції, що передбачає одночасне використання кількох глобальних навігаційних систем замість однієї.

Цей підхід включає об'єднання даних з різних навігаційних джерел, що сприяє збільшенню загальної кількості супутників у системі, а це, своєю чергою, веде до покращення точності визначення розташування.

В контексті нашої бакалаврської роботи, ми ставимо перед собою завдання з'ясувати, чи існує можливість покращення характеристик високоточного позиціонування в реальному часі на одній частоті, застосовуючи доступні за ціною GNSS-приймачі та інтегруючи дані з кількох навігаційних систем.

У процесі нашої роботи ми застосували методику одночастотного точного позиціонування, використовуючи кілька GNSS, та продемонстрували її результативність на основі серії експериментальних випробувань.

Отримані результати підтверджують суттєві переваги мульти-GNSS підходу над одночастотними методами позиціонування з використанням

тільки однієї супутникової системи, особливо в умовах обмеженого прийому сигналів GNSS.

# 1 Одночастотна модель точного позиціонування

## 1.1 Лінеаризована модель

Нелінійні рівняння GNSS-позиціонування, зазвичай, описуються наступним чином:

$$y = h(x) + v \quad (1)$$

де:

- $y$  — вектор спостережень (наприклад, виміряні псевдовідстані або фази несучої частоти);
- $x$  — вектор невідомих параметрів (наприклад, координати приймача, похибка годинника тощо);
- $h(x)$  — нелінійна функція спостережень, яка пов'язує параметри стану  $x$  із вимірюваннями;
- $v$  — вектор шумів і похибок вимірювань (наприклад, похибки викликані іоносферними і тропосферними затримками, мультипуттом, шумом приймача).

Модель можливо лінеаризувати, використовуючи розклад у ряд Тейлора поблизу стартового наближення  $x_0$ , після чого застосувати обчислювальні техніки розв'язання, зокрема фільтр Калмана та ітераційний метод найменших квадратів (ILS).

Лінеаризовану модель можна представити в такому вигляді:

$$\Delta y = A \Delta x + \varepsilon \quad (2)$$

де  $\Delta y$  представляє різницю між зафіксованими та розрахованими величинами,  $\Delta x$  відображає корекцію до приблизного розв'язку, а матриця  $A$  складається з часткових похідних.

В одночастотній моделі точного позиціонування використовуються спостереження від усіх супутників, зокрема вимірювання псевдодальностей  $pp$  і фази несучої хвилі.

Невідомими змінними виступають координати положення приймача та часові зсуви.

Зважаючи на розгляд як GNSS, так і GLONASS, існує міжсистемне зміщення, що визначається як різниця між псевдодальностями GLONASS та GNSS на приймальному пристрої.[4]

У даному випадку GNSS виступає еталонною системою, а відповідне зміщення або похибка визначається для GLONASS.

Відхилення спостережених величин від розрахованих описується наступним рівнянням:

$$\begin{aligned}\Delta p &= p - p_0 \\ \Delta \phi &= \phi - \phi_0\end{aligned}\quad (3)$$

де  $p_0$  і  $\phi_0$  - обчислені спостереження:

$$\begin{aligned}p_0 &= r^s - r_{r,0} + t_{r,0} - t^s - v + i + d^s \\ \phi_0 &= r^s - r_{r,0} + t_{r,0} - t^s - v + n - i + \varphi_s - \varphi^s\end{aligned}\quad (4)$$

В умовах визначення позицій з високою точністю, важливо пам'ятати, що окрім лінеаризації навколо вихідних наближень  $r_{r,0}$  і  $t_{r,0}$ , обчислені дані містять низку вихідних параметрів, які не оцінюються в процесі.

До них належать:

- GNSS, позиції супутників та корекції часу визначаються на основі кеплерівських елементів.

- Стосовно ГЛОНАСС, ці параметри розраховуються через числове інтегрування, застосовуючи алгоритм Рунге-Кутти четвертого порядку.

- Позиції супутників і корекції часу для обох систем пізніше коригуються з використанням даних поправок IGS, що отримуються в режимі реального часу через безперервно працюючі станції.

- Тропосферна затримка  $t_p$  моделюється на основі попередньої моделі, де використовуються функції відбиття та стандартні параметри атмосфери.

- Іоносферні затримки  $t_i$  та диференціальні кодові зміщення супутників  $d^s$ .

Іоносферні затримки попередньо обчислюються, спираючись на глобальні іоносферні карти, що прогнозуються на 1 добу, взяті з Європейського центру визначення орбіт, разом з відповідними диференціальними кодовими зрушеннями.

- Фаза несучої частоти коригується шляхом усунення фазової згортки, враховуючи обидва: приймач і супутник.

Шлях користувача визначається через аналіз змін у положенні в часі.

Слід зауважити, що модель не враховує явних апаратних затримок, окрім диференціального кодового зсуву супутника та міжсистемного зсуву між GNSS та ГЛОНАСС на приймальному обладнанні.[8]

Це обумовлено неможливістю їхнього роздільного оцінювання.

Так звана апаратна затримка дальності компенсується через зміщення годинника, як на приймачі (модель помилки годинника приймача), так і на супутнику (коректний годинник супутника).

Апаратне запізнення фази несучої частоти приймача та супутника приймається як сталие та корегується з огляду на оцінену невизначеність.

Такий метод є реалізовуваним, бо невизначеність трактується як "мінливий" показник.

Окрім даних спостережень, оцінки невизначеності з попередніх етапів вимірювань можуть бути включені до поточного періоду як додаткові дані спостережень для кожного космічного апарату.[7]

Отже, оцінювання параметрів, застосовуючи метод найменших квадратів, відбувається згідно з частково стаціонарною моделлю.

Функціональна модель для часового відрізка вимірювання, що включає псевдодані спостережень, виміри фази несучої частоти та оцінку невизначеності вектора  $a$  (за виключенням шуму), демонструється як:

$$\begin{bmatrix} \Delta_p \\ \Delta_\phi \\ \bar{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G & u & \delta \\ -G & u & \delta \\ I & I & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta r_r \\ \Delta t_t \\ b \\ a \end{bmatrix} \quad (5)$$

де:

$G$  представляє собою матрицю, де кожний стовпець — одиничний вектор, що вказує напрям з приймача на відповідний супутник.

$u$  — вектор, що складається лише з одиниць.

$d$  — вектор індикаторів: 1 для супутників ГЛОНАСС, 0 для супутників інших GNSS-систем.

$I$  — одинична (тотожна) матриця.

Обчислені координати, що є результатом, піддаються додатковому уточненню з використанням ефективної числової моделі, яка враховує різноманітні похибки та корекції.

Визначені позиції виражаються у формі координат, що відповідають системі УСК-2000.

## 1.2 Стохастична модель

Розподіл матриці спостережень, що відповідає періоду, визначається рівнянням:

$$\begin{bmatrix} Q_{pp} & Q_{p\phi} & 0 \\ Q_{\phi p} & Q_{\phi\phi} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{\overline{aa}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Матриці  $Q_{pp}$  та  $Q_{\phi\phi}$  демонструють варіативність різниці між спостереженою та розрахованою псевдо-відстанню, а також фазою несучої частоти відповідно, тоді як  $Q_{p\phi}$  показує їх взаємну коваріацію.

Загальна матриця розподілу невизначеності  $Q_{aa}$ , переноситься з попереднього часового інтервалу та відображає точність прогнозних оцінок.

Спостереження, зібрані в різні періоди, вважаються незалежними, отже невизначеності, обчислені раніше, не мають статистичного взаємозв'язку з актуальними вимірами.[4]

Діагональні компоненти цих матриць повинні враховувати не лише шум вимірювань, але й невизначеність поправок та апіорних моделей, що застосовуються.

З огляду на це, вони можуть бути представлені як сума складових дисперсії:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta p}^2 &= \sigma_{r^s}^2 + \sigma_{t^s}^2 + \sigma_n^2 \cos^2(z_i) + \sigma_p^2 \cos^2(z) \\ \sigma_{\Delta \phi}^2 &= \sigma_{r^s}^2 + \sigma_{t^s}^2 + \sigma_n^2 \cos^2(z_i) + \sigma_\phi^2 \cos^2(z) \\ \sigma_{p\phi}^2 &= \sigma_{r^s}^2 + \sigma_{t^s}^2 + \sigma_n^2 \cos^2(z_i) + \sigma_i^2 \cos^2(z_i) \end{aligned} \quad (7)$$

Деякі з цих факторів мають залежність від зенітного кута  $z$  космічного апарата стосовно антени приймача та місця входження сигналу в іоносферний шар  $z_i$ .

Взаємозв'язок між результатами реальних вимірювань після віднімання передбачених значень псевдодальності та фазовими

вимірюваннями несучої частоти спричиняє розповсюдження похибок у результатах оцінки.

Цифрові показники кожного елемента дисперсії, зокрема середнє квадратичне відхилення  $r$ , виражене в метрах, представлені в таблиці 1, де зображені складові дисперсії стохастичної моделі.[4]

Таблиця 1: Стандартне відхилення кожного компонента дисперсії стохастичної моделі  $r$  (м)

GPS		ГЛОНАС		Супутник		Атмосфера	
Код	Фаза	Код	Фаза	Орбіта	Годинник	Тропосфера	Іоносфера
$\sigma_p$	$\sigma_\phi$	$\sigma_p$	$\sigma_\phi$	$\sigma_{r^s}$	$\sigma_{t^s}$	$\sigma_n$	$\sigma_i$
0.4	0.004	1.4	0.0065	0.023	0.027	0.06	0.2

### 1.3 Шум вимірювання

Шум вимірювання – це розкид даних про псевдодальність і фазу несучої хвилі, який передбачається, коли супутник розташований прямо над спостерігачем, тобто у зеніті.

Величина цього шуму, що визначається типом спостереження, прямо залежить від квадрату псевдодальності або довжини хвилі несучої частоти, а також обернено пропорційна до відношення сигналу до шуму несучої частоти.

$$\sigma^2 = k \cdot \frac{\lambda^2}{p^2} \cdot \left(\frac{f}{N}\right) \quad (8)$$

де:

- $\sigma^2$  – розкид вимірювань;
- $k$  – коефіцієнт, що описує взаємозв'язок між шумом та довжиною хвилі;
- $\lambda$  – довжина хвилі коливної частоти;
- $p$  – псевдовідстань;

- $f$  – частота несучої хвилі;
- $N$  – показник шуму, що визначає точність вимірювання.

Інакше кажучи, чим коротша псевдовідстань та довжина хвилі коливної частоти, тим значніший шум, тоді як збільшення щільності коливної частоти корелює зі зменшенням рівня шуму.

У рамках нашого дослідження, середній рівень шуму сигналу в зеніті для GNSS-супутників виявився у 3,5 рази вищим, ніж для супутників ГЛОНАСС (дивіться рис. 1).[4]

Це спричиняє відмінності у коефіцієнті середньоквадратичного відхилення при вимірюваннях з обох типів супутників.

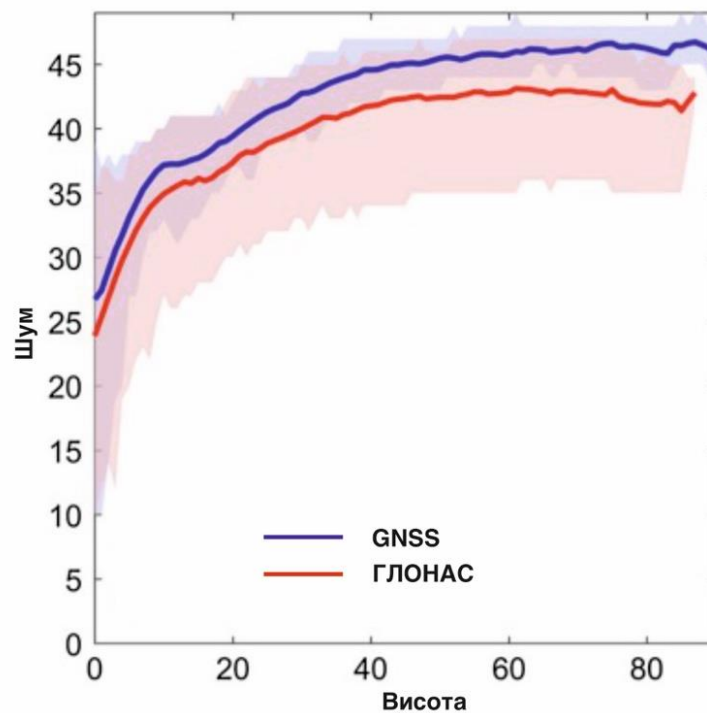


Рисунок 1. Виміряне відношення несучої частоти до шуму

Супутники GNSS зазвичай транслюють сигнал, який у 3,5 рази потужніший за сигнал супутників ГЛОНАСС в зенітній точці (для кутів відносно поверхні Землі, більших за 60 градусів).

Стосовно псевдодальностей, кодова хвиля системи ГЛОНАСС суттєво довша – у два рази, ніж у GNSS (587 метрів проти 293 метрів), і це додатково впливає на величину стандартного відхилення.

Довжини хвиль несучих частот L1 для обох систем практично однакові, їх значення наближається до 19 сантиметрів.[4], [6]

Це впливає на очікувану дистанцію між ГЛОНАСС та GNSS, а також на загальне стандартне відхилення вимірювань несучої хвилі.

Враховуючи різну ступінь точності вимірювань, розглянемо спрощений сценарій для оцінки потенційного покращення точності, якщо до моделі, що базується лише на GNSS, додати ГЛОНАСС.

Припустімо, що при вимірюванні з використанням GNSS отримуємо невідомий параметр.

Дисперсія оцінки цього параметра буде дорівнювати дисперсії самого вимірювання.

Якщо ми додамо вимірювання ГЛОНАСС, в якому очікуване стандартне відхилення в три рази більше, і об'єднаємо обидва виміри за методом найменших квадратів, дисперсія оцінки зменшиться на 10% (а отже, стандартне відхилення – на 5%).[4]

Проте, це вдосконалення не виглядає суттєвим, якщо порівнювати з результатами, що досягаються при одиночному вимірюванні.

З іншого боку, не можна ігнорувати деякі важливі аспекти.

Насамперед, ми працювали тільки з сирим шумом вимірювань псевдовідстані.

У більш розширеній стохастичній моделі враховуються фаза несучої частоти та корекції, пов'язані з кореляцією, зокрема, для вимірювань фази несучої частоти.

Це дозволяє наблизити показники точності ГНСС і ГЛОНАСС.

По-друге, моделі, що описують спостереження, де передбачається безпосереднє спостереження одного параметра, виглядають дещо надто оптимістично.

У реальних умовах кількість доступних супутників може бути недостатньою або їхня геометрія може бути несприятливою для отримання точних координат.

У подібних ситуаціях інтеграція супутників ГЛОНАСС може значно покращити ситуацію.

Проте, аналіз графіка на рис.2 демонструє, що середній показник доступних супутників ГЛОНАСС, як правило, нижчий у порівнянні з кількістю супутників GNSS загалом, що певним чином обмежує позитивний вплив ГЛОНАСС на точність локалізації.[4]

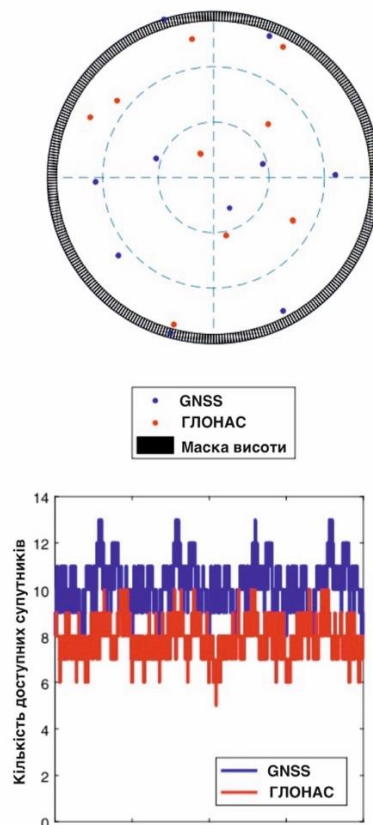


Рисунок 2: Типовий графік положення об'єктів на небі

Переваги ідеального розташування космічних апаратів стають відчутними, якщо для обчислення координат доступна велика кількість супутників, які добре розташовані геометрично.

Варто зазначити, що цей приклад аналізує дані лише за один період часу.

Якщо ми враховуємо інформацію з декількох періодів, то шум від вимірювань (ГЛОНАСС) має можливість стабілізуватися, і ГЛОНАСС зможе суттєвіше впливати на зменшення похибок визначення позиції з плином часу.

#### **1.4 Динамічна модель**

У стандартній моделі визначення положення невідомість фази несучої частоти є єдиним чинником, що переноситься з попереднього періоду в наступний.

Координати розташування приймача, відхилення тактового генератора приймача та міжсистемні зсуви перераховуються кожної епохи.

Проте, щоб оцінити вплив оновлення часу на точність позиціонування, розглядаються дві інші моделі.

Перша модель - статична, яка враховує фіксовані координати приймача, які переносяться з попередньої епохи до поточної.

Це найбезпечніша модель для динаміки позиції, бо вона не додає залежної від часу непевності та гарантує найменшу можливу невизначеність позиції у межах цієї моделі.

Інша модель - це одночасова модель, де ані непевність, ані координати позиції не передаються, а всі невідомі параметри розраховуються з використанням даних лише однієї епохи.

У цій моделі вимірювання фази несучої частоти не впливають на оцінку координат, тобто вона фактично є моделлю лише псевдодалекоміра.

## 1.5 Перевірка цілісності

Поряд з фільтрами позицій, що спрямовані на максимально точне встановлення координат, вагому роль у виявленні та корекції похибок спостережень відіграє перевірка статистичних гіпотез.

Зокрема, йдеться про ідентифікацію поширених невизначеностей, спричинених багатопроменевістю та дрейфом сигналу, адже вони здатні суттєво впливати на вірогідність оцінки.

У разі, якщо у вимірюванні дальності виявлено помилку, це вимірювання виключається з моделі, щоб не впливати на подальші обчислення.

У випадку, коли трапляється похибка у вимірюванні фази сигналу-носія, або коли виникає невизначеність, пов'язана з цією фазою, відповідна невизначеність супутника ліквідується, що усуває вплив цієї похибки на загальну невизначеність.[5]

Це рішення нейтралізує помилки, які виникають при одночасній обробці численних сигналів, суттєво збільшуючи точність визначення положення.

Варто підкреслити, що така перевірка статистичних гіпотез виконується безперервно, як невід'ємна складова процесу обробки інформації в реальному часі, гарантуючи надійність та стійкість системи до можливих похибок, які можуть виникнути при зборі даних.

## 1.6 Затінення і багатопроменевість

Застосування ГЛОНАСС разом з широким використанням одночастотного точного позиціонування здатне суттєво посилити стійкість визначення місця розташування до проблем багатопроменевості, включно з віддзеркаленнями сигналів в умовах міста та між високими будівлями.

До того ж, поєднання супутників GNSS і ГЛОНАСС скорочує тривалість ініціалізації системи, гарантуючи швидше, стабільніше та точніше визначення місцязнаходження, навіть за умови тимчасової втрати супутників системи через локальні перешкоди або тіні.

Вона ж надає можливість надзвичайно точного визначення місцезнаходження на одній єдиній частоті, особливо якщо кількість доступних супутників ГНСС недостатня.

Це актуально, наприклад, у щільній міській забудові, у підземних переходах, тунелях та інших просторах, де сигнал обмежений.

Навіть в умовах суттєвих перешкод, залучення додаткових супутників ГЛОНАСС може гарантувати достатній рівень точності, необхідний для виконання широкого спектру завдань: від створення мап місцевості до забезпечення навігації транспортних засобів.[6]

Застосування такого підходу позитивно впливає не тільки на покращення розташування супутників, але й на стабільність всієї системи в цілому, роблячи її більш стійкою до впливу зовнішніх факторів.

Попри збереження високої точності визначення місцезнаходження, відтепер час відгуку на зміни у навколишньому середовищі зазнав суттєвого скорочення.

Це робить систему значно придатною до застосування в реальних умовах, зокрема в міських зонах, а також під час швидких переміщень різними видами транспорту.[4]

## 2. Методика виконання робіт

Аби глибше збагнути значущість впровадження ГЛОНАСС у мульти-GNSS навігацію, необхідно детальніше проаналізувати, як різні умови впливають на точність визначення координат у практичному застосуванні.

Наприклад, у випадку використання приймачем лише однієї навігаційної системи, суттєві перешкоди, як-от затінення супутників будівлями, відбиття сигналу від поверхонь, а також радіозавади в міських умовах, здатні помітно погіршити точність визначення місцезнаходження.

В ситуаціях, коли застосовується тільки одна супутникова система, зменшується кількість отриманих сигналів.

Це, в свою чергу, погіршує геометричні показники вимірювань, що відбивається на точності визначення координат.

Включення до системи супутників ГЛОНАСС може розв'язати цю проблему.

Їхнє розташування на орбіті сприяє збільшенню різноманітності даних і дає змогу здійснити більше вимірювань для встановлення місця знаходження.

Цей ефект особливо корисний в середовищах з обмеженою видимістю або значною кількістю перешкод, які можуть суттєво ускладнити функціонування ГНСС.

У випадках, коли огляд на супутники GNSS обмежений, додавання супутників ГЛОНАСС здатне суттєво поліпшити геометричний аспект визначення позиції, забезпечуючи тим самим практичне позиціонування.

Порівняльний аналіз результатів двох досліджень, що здійснювалися в різноманітних умовах, демонструє зменшення впливу багатопроменевості та затінення при використанні кількох ГНСС для позиціонування.[4]

У випадках, коли використовується лише одна ГНСС, скажімо, в транспортному засобі, кількість доступних супутників значно обмежується через проблеми з оглядом, що може спричинити зниження точності.

Це також здатне призвести до зниження точності визначення місцезнаходження.

Впровадження методу ГЛОНАСС, з іншого боку, не лише сприяло стабілізації показників, а й їх покращенню у подібних ситуаціях.

Адже, що більша кількість супутників задіяна, то точніше і надійніше визначається позиція.

Ще одним ключовим елементом є опрацювання та коригування орбітальних параметрів разом з корекцією зсувів синхронізації.

Система коригування орбітальних параметрів і тактових зсувів застосовується для нівелювання незначних помилок, що здатні виникати через неточності у відомостях про відстань або супутники.[5]

У процесі наших досліджень, де використовувалися практичні дані з ефемерид ГНСС та ГЛОНАСС, вдалося отримати результати з високою точністю визначення координат. Це є критично важливим параметром для багатьох практичних задач.

Окрім цього, суттєвий вплив на точність вимірювання фази несучої частоти чинять іоносферні затримки.

Ці затримки стають причиною значних похибок у процесі обчислень.

Проте, негативний вплив цього фактора на загальну точність позиціонування можна значно мінімізувати, вдаючись до використання попередньо завантажених розрахункових іоносферних карт.

Іоносферні корекції відіграють важливу роль у забезпеченні надійності та точності сигналу.[6]

Справа в тому, що іоносферні варіації можуть приводити до значних відхилень у розрахованому положенні, особливо коли відстань до супутника значна.

Також необхідно використовувати дані з поточного моменту часу для оцінки поточного стану.

Негативний вплив похибок позиціонування можливо суттєво зменшити, беручи до уваги тільки доступну інформацію, без попередніх розрахунків.

Такий підхід забезпечує отримання більш коректних даних, адже він враховує будь-які зміни, що впливають на результат, наприклад, варіації в геометрії розташування супутників або зміни в навколишньому середовищі, здатні спотворити точність сигналу.

Загалом, результати експерименту демонструють значний потенціал використання мульти-GNSS системи з ГЛОНАСС для покращення точності визначення положення в умовах, коли звичайне GNSS позиціонування обмежене через недостатню видимість супутників або сторонні перешкоди.

ГЛОНАСС здатна залучити більше супутників для розрахунку координат, що значно покращує стабільність та достовірність даних, особливо в умовах міста чи під час переміщення транспорту.[4]

Це підвищує рівень надійності та точність визначення, одночасно мінімізуючи ризик похибок, спричинених незадовільною конфігурацією супутників або зовнішніми перешкодами.

### 3. Результати досліджень

#### 3.1 Стаціонарний дослід

Для досягнення найвищої точності у цьому дослідженні, було використано референтну станцію FRKV (рис.2), що знаходиться на території Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

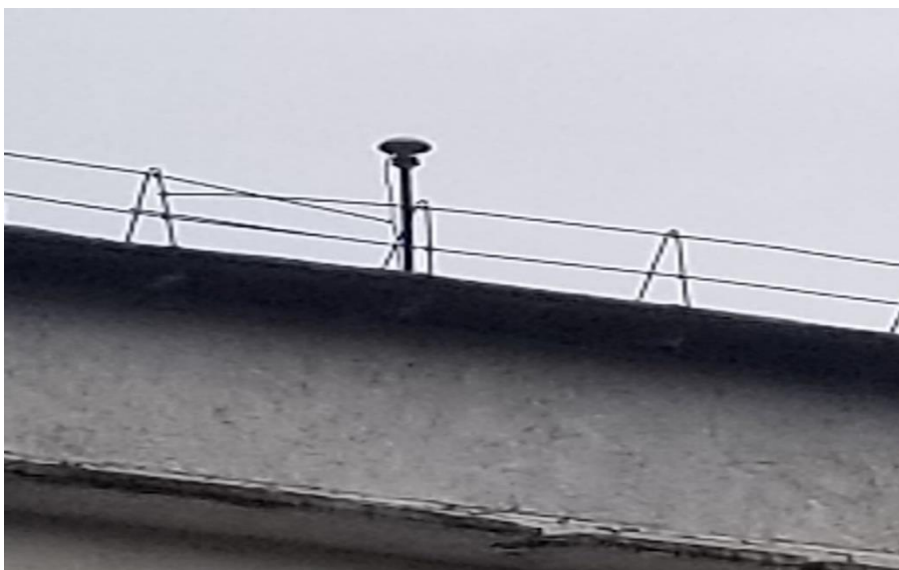


Рисунок 2 Референтна станція FRKV

Антенна знаходиться на даху будівлі.

Це дає змогу мінімізації будь-яких перешкод та негативного впливу на якість сигналу від навколишніх факторів, зокрема високих будівель та дерев.

Положення антени є точно визначене.

Це дозволило отримати надзвичайно точні базові координати, які використовуватимуться для порівняння результатів позиціонування, забезпечуючи таким чином надійність отриманих даних.

Дані збиралися з частотою 10 Герц, що давало змогу фіксувати навіть незначні зміни положення об'єкта навіть на великій швидкості.

Отримані дані було піддано обробці за допомогою спеціального програмного забезпечення, з 30-секундними часовими інтервалами.

Це дозволило обчислити координати в кожен одиницю часу, що, у свою чергу, давало можливість відслідковувати стабільність положення та точність розрахунків протягом усього експерименту.

Для оцінювання якості отриманих результатів було виконано порівняння з координатами, які було визначено з високою точністю за допомогою приймача Leica GR10.

Такий підхід дав можливість виявити та проаналізувати потенційні помилки та слабкі місця позиціонування, що виникають при застосуванні менш прецизійних GNSS-приймачів.[4]

Аналіз прилеглої місцевості, демонструє незначну наявність перешкод на лінії горизонту.

Більшість супутників доступні з висот понад 5 градусів, що є мінімальним кутом піднесення, який використовується під час обробки даних.

Ця геометрія сприяє відмінній видимості для прийому супутникового сигналу та мінімізує вплив багатопроменевого відбиття й ореолів, котрі здатні виникати в закритих умовах, як-от в міських забудовах.

У середньому, для визначення місцезнаходження ми мали змогу використовувати 10 супутників GNSS та 8 супутників ГЛОНАСС, разом близько 18 супутників.

Це суттєво покращило геометрію і, як наслідок, точність вимірювань, у порівнянні з випадком застосування лише однієї системи.

Дієвість визначення координат оцінювали, зіставляючи обчислене місцезнаходження з його високоточним еталонним відповідником, що дозволяло дати кількісну оцінку похибки визначення координат.

На рисунку 3 візуалізовано взаємозв'язок між помилкою у позиціонуванні та часом, охоплюючи весь цикл вимірювань.[4]

На верхньому графічному блоці представлено ці помилки, а також динаміку їх змін у процесі дослідження.

Це надає можливість оцінити, наскільки стабільним та точним є позиціонування за умови інтеграції супутникових систем GNSS та ГЛОНАСС.

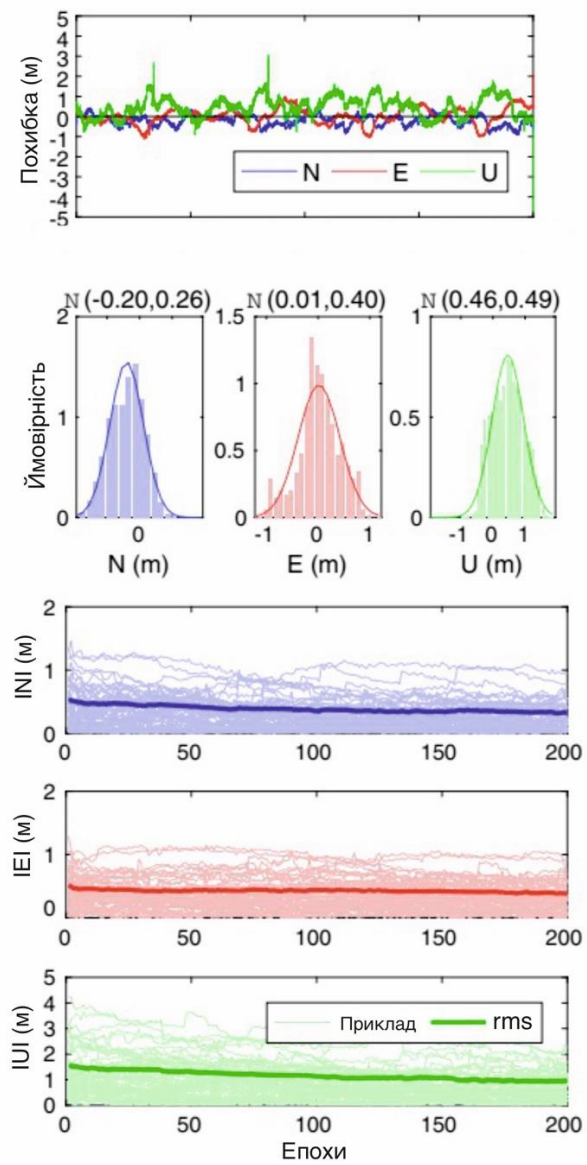


Рисунок 3 Багатократні похибки GNSS при одночастотному точному позиціонуванні.

Горизонтальна складова похибки позиціонування, в середньому, не перевищує 1,22 м.

Це вказує на високу точність визначення положення в горизонтальній площині.

Проте, похибка за висотою демонструє значення трохи нижче 2,75 м.

На другому рядку графіка представлено гістограми і нормальний розподіл даних для кожного з компонентів (північного, східного та вертикального напрямків).

Північна складова демонструє середнє значення у 20 см та стандартне відхилення у 26 см.[4]

Це свідчить про незначний зсув у північному напрямку, але високу ступінь точності вимірювань.

Східний компонент, натомість, характеризується майже нульовим зміщенням, проте стандартне відхилення дещо більше – 40 см.

На рисунку 3, у трьох нижніх панелях, представлено динаміку зміни похибки позиціонування вздовж усіх трьох осей координат (північ, схід та вгору) протягом початкового періоду спостережень.

Показники північного та верхнього компонентів виявляють величини зсуву у 20 см та 46 см відповідно, при цьому стандартне відхилення не перевищує 50 см.

Це слід вважати позитивним результатом для відносно короткого періоду, протягом якого проводилась оцінка.

Середньоквадратична похибка позиціонування зменшується після застосування фільтра та виходить на стійкий рівень після 10 ітерацій, що демонструє коректність методу і результативність фільтра.

Щоб запобігти накопиченню помилок, фільтр повторно запускається кожні 20 ітерацій.

Цей процес візуалізовано жирними лініями на графіку, де відображено середньоквадратичне значення для кожної ітерації.

Враховуючи, що вимірювання фази несучої частоти позитивно впливає на точність, розрахована позиція з часом неухильно наближається до справжньої.

Однак, похибка в оцінках не значна, та стає меншою з часом, що свідчить про обмежене подальше поліпшення після достатньої кількості ітерацій.

Такий ефект, можливо, зумовлений впливом атмосфери: багатопроменевістю, затримками обладнання, а також впливом іоносфери й тропосфери.

У таблиці 2 представлено результати роботи трьох типів динамічних моделей (синхронної, кінематичної та статичної) із застосуванням маски висоти 5 після 100 епох фільтрації.[4]

Це дає можливість зіставити ефективність різних моделей та вибрати найбільш оптимальний метод для отримання точних координат.

Таблиця 2. Якість визначення координат для фіксованої точки.

Єдина епоха				Кінематика				Статика			
Середнє значення	Стандартне значення	СКП	95%	Середнє значення	Стандартне значення	СКП	95%	Середнє значення	Стандартне значення	СКП	95%
0.06	0.40	0.40	0.95	-0.06	0.34	0.32	0.68	-0.03	0.25	0.24	0.51
-0.10	0.39	0.40	0.97	-0.07	0.40	0.41	0.88	-0.09	0.41	0.45	0.84
1.05	1.03	1.45	2.75	0.79	0.76	1.04	2.15	0.76	0.48	0.82	1.55
0.16	2.34	2.34	4.98	-0.13	1.16	1.16	2.34	-0.05	0.87	0.84	1.28
-0.08	2.24	2.33	4.78	-0.04	1.87	1.79	3.87	-0.08	1.43	1.33	2.54
1.20	5.32	5.44	10.71	0.89	2.89	3.06	6.12	0.59	1.66	1.53	2.76
0.04	0.55	0.55	1.01	-0.04	0.44	0.44	0.88	-0.54	0.29	0.33	0.66
-0.10	0.45	0.45	0.98	-0.04	0.43	0.43	0.76	-0.08	0.36	0.39	0.76
1.07	1.10	1.54	2.99	0.78	1.23	2.23	2.23	0.60	0.88	0.88	1.44

Як і передбачалося, статичне позиціонування підтвердило свою лідерську позицію в точності, суттєво випередивши кінематичний метод.

Найвищі показники точності гарантуються саме статичним позиціонуванням, що обумовлено значною кількістю видимих супутників та стабільною геометрією їх розташування.

При застосуванні лише однієї супутникової системи, перевагу демонструє GNSS, поступаючись ГЛОНАСС.

Цілком можливо, це пояснюється більшою щільністю та потужністю сигналу, який випромінюють супутники GNSS.

Використання мульти-GNSS (GNSS + ГЛОНАСС) не приносить відчутної користі у порівнянні з позиціонуванням, яке здійснюється виключно на базі GNSS.[5]

Це свідчить про те, що за сприятливих обставин функціонування (скажімо, відкриті території та оптимальна геометрія) інтеграція ГЛОНАСС не забезпечує суттєвих плюсів.

Малоймовірно, щоб фільтри зійшлися за 50 хвилин, особливо у випадках дорожніх випробувань, де обставини позиціонування набагато важчі (обмежений трафік і огляд супутників).

Такий метод не надто продуктивний у рухливому середовищі, адже оцінювання невизначеності, як правило, триває, коли кількість доступних супутників зазнає змін.

Наступним кроком є обчислення показників результативності для всієї часової послідовності без повторного запуску фільтра.

Це дає можливість брати до уваги увесь контекст наявних даних та результати позиціонування, навіть у змінних обставинах.

Варіація кількості доступних супутників здатна вплинути на результати, проте передбачається, що працездатність моделі зазнаватиме мінімальних змін протягом часу виконання.

У таблиці 3 представлено показники ефективності, але цього разу для кожної епохи, без врахування збіжності фільтра та без повторного запуску фільтра.[4]

Таблиця 3 Ефективність позиціонування обчислених статичних досліджень (маска висоти 5) для кожної епохи.

Єдина епоха				Кінематика				Статика			
Середнє значення	Стандартне значення	СКП	95%	Середнє значення	Стандартне значення	СКП	95%	Середнє значення	Стандартне значення	СКП	95%
0.08	0.50	0.50	0.99	-0.20	0.22	0.33	0.65	-0.11	0.35	0.34	1.51
-0.12	0.49	0.49	0.95	0.01	0.40	0.40	0.85	0.02	0.31	0.35	0.94
1.07	1.02	1.49	2.77	0.49	0.46	0.74	1.15	0.36	0.38	1.22	1.45
0.12	2.35	2.37	4.65	-0.01	0.99	0.99	1.94	-0.15	0.67	0.64	1.38
-0.15	2.29	2.30	4.58	-0.02	0.87	0.79	1.87	-0.12	1.33	1.52	2.76
1.25	5.12	5.14	10.28	0.39	0.89	0.06	2.12	0.49	1.26	1.44	2.96
0.08	0.54	0.55	1.12	1.14	1.34	1.35	0.98	-0.12	0.59	1.13	1.66
-0.12	0.35	0.35	1.98	-0.04	0.43	0.43	0.76	-0.08	0.56	1.39	1.76
1.04	1.10	1.54	2.96	0.48	0.53	0.23	0.23	1.69	0.48	0.48	1.44

Як і передбачалося, дані одночасних спостережень, наведені у двох таблицях, демонструють аналогічні величини невизначеності, хоча суттєвих відмінностей між ними немає, адже вони базуються на різних масивах даних.

Це вказує на те, що з огляду на точність, результати обчислень для окремо взятої епохи з використанням одного ГНСС або декількох ГНСС-систем суттєво не розрізняються.

Кінематична модель свідчить про близьку продуктивність обох підходів - як позиціонування виключно на даних GNSS, так і на комбінації кількох GNSS, особливо коли мова йде про горизонтальну складову.

Це підкреслює переваги інтеграції даних з різних супутникових мереж, забезпечуючи стабільну точність визначення координат, незалежно від швидкості та зовнішніх факторів.

Фінальна статична похибка демонструє аналогічний порядок величин до середньої кінематичної похибки, що стає зрозумілим, враховуючи спільне використання одних і тих самих даних в обох обчисленнях.

Метод усереднення кінематично обчислених позицій дає той самий результат, як і пряме обчислення статичного положення.

У статичних обставинах (коли положення не змінюється) кінематичний підхід демонструє високу точність, навіть після багатьох епох.

На малюнку 4 представлено кумулятивний розподіл похибок горизонтального положення для кінематичної моделі.[4]

Це дозволяє візуально оцінити, як розподіляються помилки між усіма вимірами та як вони еволюціонують з часом, надаючи розуміння точності та стабільності позиціонування в умовах реального світу.

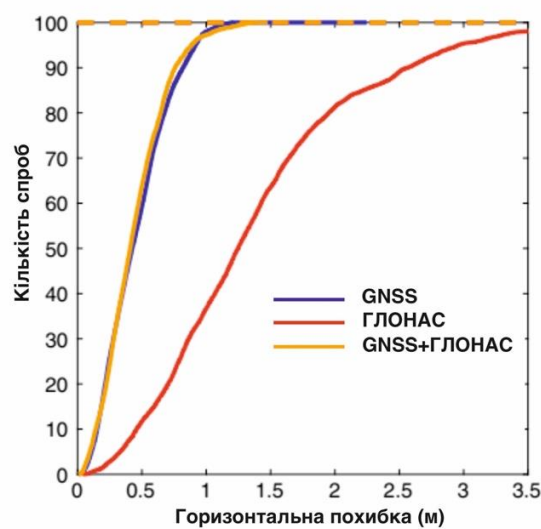


Рисунок 4 Кумулятивний розподіл горизонтальних похибок позиціонування в кінематичній обробці

Похибки позиціонування не перевищують 1,75 м протягом всього періоду, незалежно від того, чи використовується обробка даних тільки з ГНСС, або здійснюється комбінована обробка даних з декількох ГНСС систем.

Це підкреслює, що застосування даних з багатьох супутникових систем забезпечує стабільно високу точність результатів, навіть якщо умови видимості супутників змінюються.

Зокрема, коли оперуємо лише даними ГЛОНАСС, похибки фіксуються менше 1,75 м для 74% всіх часових відтинків.

Це варто відзначити як великий успіх для системи, беручи до уваги відносно скромну кількість супутників та потенційну вразливість до геометрії сузір'я.

Аналіз підтверджує, що обробка даних ГЛОНАСС демонструє результати, аналогічні GNSS, і обидва підходи суттєво переважають показники, отримані виключно з використанням даних ГЛОНАСС.

Це акцентує ключову роль багатосистемності GNSS для збільшення точності визначення положення.

Це зумовлено тим, що інтеграція інформації з різних джерел здатна покращити загальний результат, особливо коли умови ускладнені, наприклад, обмежена кількість супутників або обмежена зона видимості.

Отримані дані чітко демонструють, що сумісне застосування GNSS та ГЛОНАСС надає значно вищі показники точності при визначенні координат порівняно з використанням кожної системи окремо.

### 3.2 Стационарні дослідження з обмеженою видимістю небосхилу

Наявні показники визначення координат, які вже демонструють добрі результати із застосуванням однієї GNSS системи, можливо поліпшити.

Сигнали ГЛОНАСС не розглядались як ключовий аспект цього дослідження, адже суттєвого покращення не передбачалося, враховуючи певні обмеження точності сигналу.

Першочергове завдання полягало у забезпеченні стабільного рівня продуктивності за умов обмеженої видимості неба, з чим можна зіткнутися в умовах щільної забудови міст або в гірській місцевості.

Для реалізації поставленої задачі, обробка даних також проводилася з використанням маски висоти  $30^\circ$ , що імітувала погіршення видимості.

Це унеможливило врахування тих супутників, що перебували під певним кутом, як то може бути, якщо горизонт закритий спорудами або природними бар'єрами.

На рисунку 5 продемонстровано небесну карту за початковий період, котра відображає доступні супутники на конкретний час, а також їх розміщення на небесній сфері.[4]

Це дає змогу проаналізувати, як коливалася кількість доступних супутників та їх геометричне розташування, що є критичним для коректності визначення місця розташування в умовах обмеженої видимості.

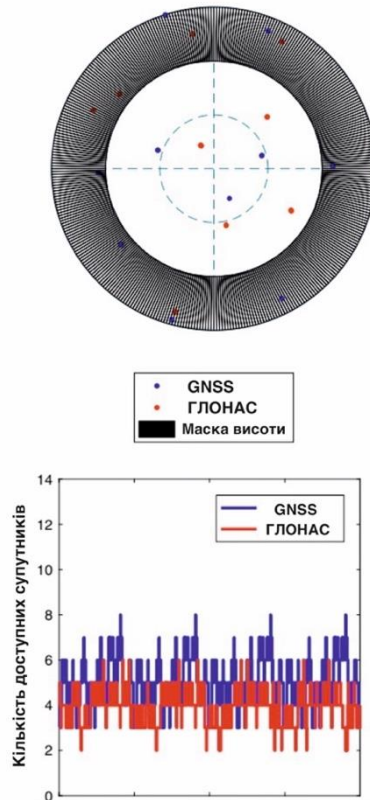


Рисунок 5 Типова картина неба (згори) та кількість наявних супутників (знизу)

За умови максимального кута піднесення  $50^\circ$ , кількість доступних супутників скорочується приблизно вдвічі, як чітко видно з рисунка 5.

В цій точці відсікання, в середньому, доступно п'ять супутників GNSS та чотири супутники ГЛОНАСС, тобто в цілому дев'ять супутників, придатних для обробки.

Перші три графіки на малюнку 6 представляють часові ряди помилок позиціонування, характерні для різних конфігурацій: перший графік демонструє результати лише для GNSS, другий – для ГЛОНАСС, а третій – для одночастотного точного позиціонування, що використовує декілька GNSS систем.

Такий аналіз дозволяє вивчити, як варіації у кількості доступних супутників та їхніх комбінаціях відбиваються на точності визначення координат в умовах, коли видимість обмежена.[4]

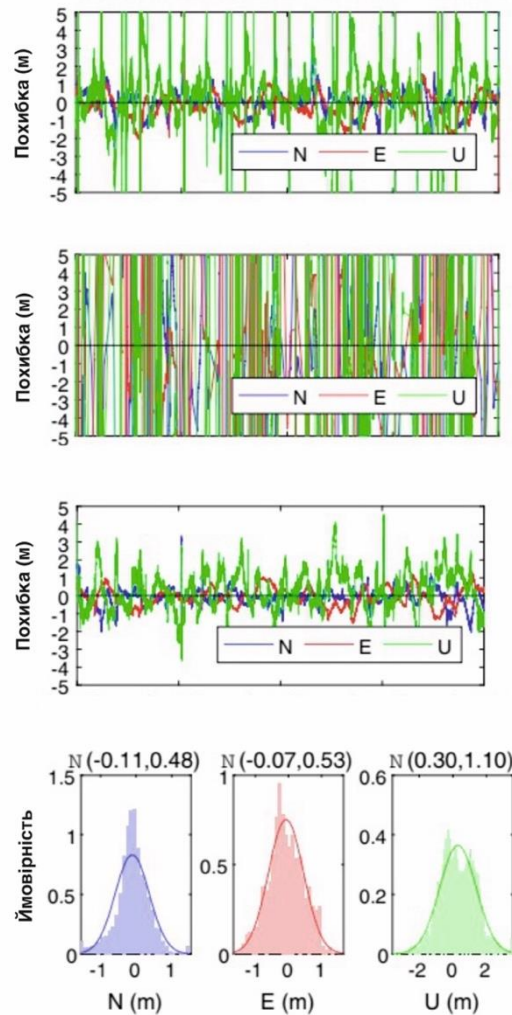


Рисунок 6. Часові ряди похибок у напрямках північ, схід та вгору: ГНСС, ГЛОНАСС окремо та ГНСС разом.

Водночас, аналіз даних лише з ГЛОНАСС демонструє збереження високої точності визначення координат.

За таких умов, похибка зберігається на рівні менше 5 метрів, а горизонтальна складова переважно не перевищує 1 метр.

Нижня частина рисунка 8 представляє розподіл похибок, де середнє арифметичне та стандартне відхилення кожної складової відповідають нормальному розподілу.

Горизонтальна складова похибки сягає приблизно 10 см, зі стандартним відхиленням біля 50 см.[4]

Для даних обставин, це вважається позитивним показником.

У таблиці 4 представлено розгорнутий аналіз характеристик позиціонування стаціонарних приймачів.

Обчислення виконано для кожної епохи, застосовуючи маску горизонту у 30°.

Такий підхід дає змогу оцінити функціональність системи в ситуаціях з обмеженою видимістю та обмеженою кількістю доступних супутників.

Таблиця 4 Ефективність визначення координат стаціонарних приймачів, проаналізована для всіх епох (маска висоти 30°)

Єдина епоха				Кінематика				Статика			
Середнє значення	Стандартне значення	СКП	95%	Середнє значення	Стандартне значення	СКП	95%	Середнє значення	Стандартне значення	СКП	95%
0.07	0.40	0.40	1.78	-0.10	0.12	0.53	0.85	-0.21	0.55	0.44	1.71
-0.22	0.79	0.79	2.95	0.21	0.20	0.20	1.85	0.22	0.21	0.25	1.94
0.87	1.82	1.89	1.54	0.29	0.26	1.04	1.05	0.16	0.18	0.22	1.77
0.12	2.35	2.37	4.65	-0.01	0.99	0.99	1.94	-0.15	0.67	0.64	1.38
-0.15	2.29	2.30	4.58	-0.02	0.87	0.79	1.87	-0.12	1.33	1.52	2.76
1.25	5.12	5.14	10.28	0.39	0.89	0.06	2.12	0.49	1.26	1.44	2.96
0.08	0.54	0.55	1.12	1.14	1.34	1.35	0.98	-0.12	0.59	1.13	1.66
-0.12	0.35	0.35	1.98	-0.04	0.43	0.43	0.76	-0.08	0.56	1.39	1.76
1.04	1.10	1.54	2.96	0.48	0.53	0.23	0.23	1.69	0.48	0.48	1.44

Застосування кількох систем GNSS пропонує беззаперечні переваги над використанням лише однієї GNSS або, скажімо, тільки ГЛОНАСС.

Суттєво зростає як точність, так і загальна надійність визначення місцезнаходження.

Отримані дані, використовуючи декілька GNSS, зокрема в північному та східному векторах, виявляються особливо корисними, демонструючи здатність до позиціонування з точністю, достатньою для визначення смуги руху; важливо підкреслити, що обробка даних ГЛОНАСС залишається ефективною навіть після введення маскуванню висоти.

Натомість, вертикальна компонента зазнала покращення.

Графік 7 зображує накопичувальний розподіл похибок горизонтального позиціонування для різних типів обробки даних і наочно підкреслює переваги застосування кількох систем GNSS в даному випадку.[4]

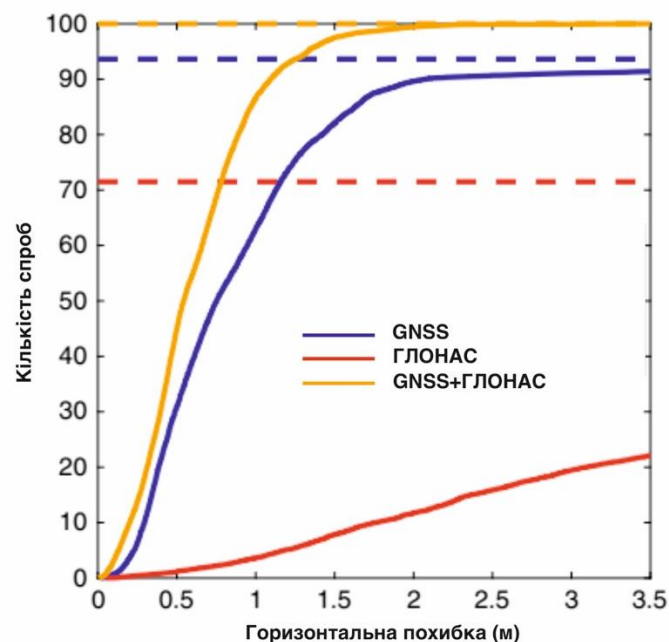


Рисунок 7 Кумулятивний розподіл горизонтальної похибки позиціонування

Отримані дані демонструють відчутні переваги мульти-GNSS підходу для точного визначення координат.

Зокрема, розв'язки, що використовують ГЛОНАСС, доступні для всіх періодів часу з похибкою менше 1,75 м у 98,7% випадків; для випадку, коли використовується лише GPS, ці показники досягають 93,7% для наявності розв'язку та 87,5% випадків з похибкою менше 1,75 м.

Проте, рішення, що базується виключно на ГЛОНАСС, демонструє нижчу ефективність: його доступність становила лише 71,5%, а горизонтальні похибки, що не перевищують 1,75 м, були зареєстровані лише в 9,9% випадків.[4]

Зроблені висновки переконливо свідчать про те, що інтеграція систем GNSS та ГЛОНАСС, реалізована у багатосистемному GNSS-підході, гарантує суттєво вищу точність та стабільність позиціонування порівняно з використанням лише однієї системи.

## Висновки

Результати в нашій бакалаврській роботі, засвідчують ефективність одночастотного прецизійного позиціонування з використанням мульти-ГНСС ГЛОНАСС за будь-яких обставин, які були проаналізовані в дослідженні.

Дослідження доводить, що для створення точних систем позиціонування інтеграція мульти-ГНСС технології, яка комбінує сигнали від ГНСС та ГЛОНАСС, набуває стратегічного значення, гарантуючи високий рівень точності та стійкості.

В умовах обмеженої видимості, таких як локації з високими будівлями або інші місця з затіненням, застосування мульти-ГНСС підходу здатне суттєво скоротити помилки при визначенні позиції.

Зокрема, у випадках, коли GNSS-системи вже демонструють зниження точності через недостатню кількість супутників або їх невдале розташування, включення ГЛОНАСС може суттєво збільшити кількість доступних супутників, зберігаючи високий рівень точності навіть при обмеженій видимості.

Отримані дані підкреслюють переваги інтеграції кількох GNSS-технологій для широкого спектру завдань: від створення карт місцевості до навігації у щільній міській забудові або на складних рельєфах, де використання стандартних GNSS-рішень може виявитися недостатнім.

Наше дослідження однозначно демонструє, що інтеграція ГЛОНАСС здатна значно покращити стабільність і точність визначення місцезнаходження за різноманітних умов експлуатації.

Варто також провести оцінку функціональності системи, застосовуючи різноманітні методи позиціонування, такі як кінематичний і статичний, щоб порівняти їхню ефективність у різних ситуаціях, беручи до уваги різні варіанти фільтрації та обробки отриманих даних.

Отже, беручи до уваги легкий доступ до кількох GNSS і їхню стійкість до несприятливих факторів, отримані дані дають перспективні можливості для подальших наукових розвідок.

Ці дослідження мають на меті покращити точність та надійність систем визначення координат у реальному середовищі.

## Список використаних джерел

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

4. de Bakker, P. F., & Tiberius, C. C. J. M. (2017). Real-time multi-GNSS single-frequency precise point positioning. *GPS Solutions*, 21(4), 1791-1803. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0653-2>

5. Angrisano A, Gaglione S, Gioia C (2013) Performance assessment of GPS/GLONASS single point positioning in an urban environment. *Acta Geod Geophys* 48:149–161. doi:10.1007/s40328-012-0010-4

6. Bona P, Tiberius CCJM (2000) An experimental comparison of noise characteristics of seven high-end dual frequency GPS receiversets. In: *Proceedings of IEEE PLANS2000*. Institute of Navigation ION, Manassas, Va., pp 237–244. doi:10.1109/PLANS.2000.838308

7. Braasch M, Van Dierendonck A (1999) GPS receiver architectures and measurements. *Proc IEEE* 87(1):48–64. doi:10.1109/5.736341

8. Cai C, Liu Z, Luo X (2013) Single-frequency ionosphere-free precise point positioning using combined GPS and GLONASS observations. *J Navig* 66(3):417–434. doi:10.1017/S0373463313000039

## **БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА**

Тема бакалаврської роботи:

**« Визначення координат точки з високою точністю у реальному часі за допомогою одночастотного сигналу кількох GNSS»**

Обсяг пояснювальної записки: \_\_\_\_ аркуша.

\_\_\_\_\_ рік  
(дата)

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)