

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Літвін Олексій
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
**« Аналіз точності одностатного позиціонування за допомогою
супутникової системи Galileo »**
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

О. Літвін, студент групи ГЗ-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: к.т.н. доцент Ірина Боднарук
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(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 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**

Літвін Олексій

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Аналіз точності одностотного позиціонування за допомогою супутникової системи Galileo»

керівник роботи: к.т.н. доцент Ірина Боднарук

(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. Дослідження алгоритмів позиціонування

2. Оцінювання ефективності одностотного позиційного підходу

3. Виявлення зміни позиції

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Дослідження алгоритмів позиціонування		
2	Оцінювання ефективності одночастотного позиційного підходу		
3	Виявлення зміни позиції		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ ***Літвін О.***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ ***Боднарук І.***

Анотація

Дослідження можливостей одночастотного позиціонування з використанням широкосмугового сигналу Galileo E5 для досягнення високоточної просторової прив'язки, аналіз впливу іоносфери та фазових неоднозначностей на точність визначення координат, а також апробація алгоритмів фільтрації, зокрема фільтру Калмана, для прискорення конвергенції результатів.

Актуальність теми:

У сучасних умовах спостерігається зростаючий інтерес до високоточного супутникового позиціонування, зокрема в сфері моніторингу деформацій природного та інженерного середовища.

Проте висока вартість багаточастотних GNSS-приймачів суттєво обмежує їх широке застосування в практиці.

У зв'язку з цим актуальним є пошук альтернативних рішень, зокрема використання одночастотних приймачів у поєднанні з новітніми широкосмуговими сигналами, такими як Galileo E5, які відкривають нові можливості для точного позиціонування без значних фінансових витрат.

Наукова новизна:

У роботі запропоновано використання одночастотного приймача в поєднанні з широкосмуговим сигналом Galileo E5 як потенційної альтернативи дорогим багаточастотним системам.

Досліджено можливість досягнення сантиметрової точності за рахунок комплексного використання кодових і фазових вимірювань, а також впроваджено алгоритм фільтра Калмана для підвищення швидкості та точності позиціонування при коротких сеансах спостережень.

Практична цінність:

Результати дослідження можуть бути використані при розробці недорогих, але ефективних рішень для високоточного GNSS-моніторингу в

геодезії, будівництві, сільському господарстві, моніторингу гірських схилів і критичних інфраструктур.

Це дозволить значно знизити вартість впровадження систем просторового позиціонування без втрати точності, що особливо важливо для країн з обмеженим бюджетом на технологічне оснащення.

Ключові слова:

GNSS, Galileo E5, одночастотне позиціонування, фазові неоднозначності, фільтр Калмана, моніторинг деформацій, іоносферні впливи, широкосмуговий сигнал, сантиметрова точність, супутникова навігація.

Abstract

Investigation of the possibilities of single-frequency positioning using the Galileo E5 broadband signal to achieve high-precision spatial reference, analysis of the influence of the ionosphere and phase ambiguities on the accuracy of coordinate determination, as well as testing of filtering algorithms, in particular the Kalman filter, to accelerate the convergence of results.

Topic relevance:

In modern conditions, there is a growing interest in high-precision satellite positioning, in particular in the field of monitoring deformations of the natural and engineered environment.

However, the high cost of multi-frequency GNSS receivers significantly limits their widespread use in practice.

In this regard, the search for alternative solutions is relevant, in particular the use of single-frequency receivers in combination with the latest broadband signals, such as Galileo E5, which open up new opportunities for accurate positioning without significant financial costs.

Scientific novelty:

The work proposes the use of a single-frequency receiver in combination with the Galileo E5 broadband signal as a potential alternative to expensive multi-frequency systems.

The possibility of achieving centimeter accuracy through the integrated use of code and phase measurements has been investigated, and the Kalman filter algorithm has been implemented to increase the speed and accuracy of positioning during short observation sessions.

Practical value:

The results of the study can be used in the development of inexpensive but effective solutions for high-precision GNSS monitoring in geodesy,

construction, agriculture, monitoring of mountain slopes and critical infrastructures.

This will significantly reduce the cost of implementing spatial positioning systems without loss of accuracy, which is especially important for countries with a limited budget for technological equipment.

Keywords:

GNSS, Galileo E5, single-frequency positioning, phase ambiguities, Kalman filter, deformation monitoring, ionospheric effects, broadband signal, centimeter accuracy, satellite navigation.

Зміст

Вступ

1. Дослідження алгоритмів позиціонування

1.1 Позиціонування коду-плюс-носія

1.2 Алгоритм швидкої конвергенції

2 Оцінювання ефективності одночастотного позиційного підходу

2.1 Етапи обробки

2.2 Результати позиціонування

2.2.1 Результати позиціонування Galileo E5 та GPS L1 - L5

2.3 Аналіз даних Galileo E5 в порівнянні з обробкою фази несучої частоти

2.4 Результати фільтрації швидкої конвергенції

3 Виявлення зміни позиції

3.1 Моніторинг гірського схилу з використанням одночастотного позиціонування Galileo E5

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Основною ціллю цього бакалаврського дослідження є встановлення рівня точності, який можна отримати, використовуючи одночастотне позиціонування з урахуванням усіх технічних аспектів широкосмугового сигналу Galileo E5.

Задля досягнення окресленої мети, планується провести два окремі експерименти.

Перший експеримент має на меті оцінити ефективність методу у забезпеченні високоточного визначення тривимірних координат.

Другий експеримент передбачає вивчення можливості виявлення змін просторового розташування об'єкта протягом певного періоду спостереження.

У межах цього дослідження планується використання виключно багаточастотного GNSS-приймача.

Це дозволить здійснювати оцінку іоносферної затримки, а також мінімізувати її негативний вплив, що є одним з основних факторів похибок під час визначення координат.

Серйозною перешкодою для широкого застосування багаточастотних приймачів в наукових та прикладних розробках є їхня порівняно висока вартість.

З огляду на це, в минулі роки було здійснено чимало спроб досягти високої точності позиціонування, використовуючи одночастотні підходи та більш доступні за ціною GNSS-приймачі.

Основною трудностю, яка ускладнювала досягнення високої точності при одночастотному позиціонуванні, з використанням звичних сигналів (наприклад, GPS або GLONASS), був значний рівень шуму в кодових вимірюваннях, що іноді сягав кількох десятків сантиметрів.

Перспективним розв'язанням цієї задачі є використання сигналу системи Galileo, а саме, широкосмугового каналу E5, що має ширину смуги 90 МГц.

В порівнянні зі стандартними сигналами, прикладом якого є GPS L1, цей сигнал демонструє втричі менший рівень шумових спотворень кодування та знижений вплив багатопроменевих відображень, що значно підвищує потенціал точності одночастотних рішень.

Завдяки широкій смузі Galileo E5, стає можливим кодове вимірювання з точністю до сантиметрів.

Це суттєво зменшує вплив багатопроменевих сигналів, покращуючи загальну якість даних.

Підвищення точності визначення кодового діапазону, обумовлене наднизьким рівнем шуму сигналу E5, сприяє формуванню більш точних інтегрованих спостережень.

Ці спостереження формуються на основі комбінування кодових та фазових вимірювань.

Введення кодового діапазону в фазу носія дозволяє повністю компенсувати вплив іоносферної затримки.

Це відбувається завдяки її частотно-залежному, або дисперсійному, характеру.

Проте, отримане нове спостереження ще включає невизначеності, зокрема неоднозначності фази.

Їх точне визначення вимагає тривалого часу спостереження для досягнення стабільності та достовірності.

Коли необхідно отримати результати в обмежені терміни, використовують алгоритми швидкого зближення, засновані на фільтраційних методах.

Вони забезпечують спільну обробку фазових і кодових спостережень, що прискорює процес отримання точних даних про положення.

У минулому вже пробували застосовувати подібні методики для GPS-сигналів, комбінуючи дані про фазу та код.

Однак через надмірний шум у кодових вимірюваннях GPS, точність здобутих результатів не відповідала потребам складних завдань.

В межах цієї бакалаврської роботи ми розглянемо підхід, що базується на одночастотному позиціонуванні, використовуючи сигнал Galileo E5.

Цей сигнал, завдяки своїм властивостям, здатен забезпечити точність, яка досі була досяжною лише з використанням багаточастотних приймачів.

1. Дослідження алгоритмів позиціонування

1.1 Позиціонування коду-плюс-носія

Традиційний спосіб визначення координат з високою точністю на значній відстані від базової станції базується на комбінації вимірювань коду та фази несучої хвилі сигналу.

Одночастотні GNSS-приймачі здатні вимірювати як код, що дозволяє визначити дальність, так і фазу хвилі, яка передає сигнал від супутника.

У фаховій науковій літературі розглядаються основні рівняння спостережень, які використовуються у цьому підході, з урахуванням певних спрощень для моделювання реальних вимірювань GNSS.[4]

$$\rho = r + \delta I + \delta T + \delta M_{\text{код}} + \varepsilon_{\text{код}} \quad (1)$$

$$\phi = r - \lambda \cdot N - \delta I + \delta T + \delta M_{\text{фаза}} + \varepsilon_{\text{фаза}} \quad (2)$$

Де

ρ - вимірювання діапазону коду

ϕ - вимірювання фази носія

R - геометрична відстань

λ - довжина хвилі сигналу носія

N - термін неоднозначності

δI - іоносферна затримка

δT - тропосферна затримка

δM - багатостороння помилка

ε - немодельовані помилки

Іоносферне гальмування дає про себе знати у супутникових вимірюваннях, чи то дані з кодом, чи з фазою.

Важливо, що у випадку фази, вплив має зворотній знак.

Через цю рису, спільне використання обох видів даних сприяє ефективному зменшенню впливу іоносфери.

Метод, заснований на поєднанні кодових вимірів та фази несучої, полягає в складанні інформації з обох типів спостережень, що призводить до усунення помилок, викликаних іоносферою.[5]

Такий різновид спостережень називається "код плюс носій" (code + carrier observation).

$$\frac{\rho + \phi}{2} = r - \frac{\lambda}{2} \cdot N + \delta T + \delta M_{\text{код.сиг.}} + \varepsilon_{\text{код.сиг.}} \quad (3)$$

Описаний метод найбільш доцільний для корекції впливу іоносфери першого порядку.

Втім, вплив іоносфери вищих порядків також здатний впливати на точність позиціонування, і його можна змоделювати за допомогою таких математичних виразів:

$$\rho = r + \left(\frac{c_1}{f^2} + \frac{c_2}{f^3} + \frac{c_3}{f^4} \right) \quad (4)$$

$$\phi = r - N \cdot \lambda - \left(\frac{c_1}{f^2} + \frac{c_2}{2 \cdot f^3} + \frac{c_3}{3 \cdot f^4} \right) \quad (5)$$

Де коефіцієнти c_1 , c_2 , c_3 залежать винятково від сумарного рівня іоносферної затримки, котра впливає на сигнал.

Разом з тим, залишкові компоненти затримок, що зумовлені розповсюдженням сигналу крізь іоносферу, у ході вимірювань кодом та фазою, можна представити таким чином:

$$\frac{\rho+\phi}{2} = r - \frac{\lambda}{2} \cdot N + \left(\frac{c_1}{2 \cdot f^3} + \frac{c_3}{4 \cdot f^4} \right) \quad (6)$$

У рівняннях, що застосовуються для аналізу даних, враховуються лише ефекти іоносфери, які не описуються в першому порядку наближення.

На противагу усталеним методам, що покладаються на кодові виміри для визначення положення, тут розробляються нові види спостережень.

У цих спостереженнях, крім просторових координат, також необхідно розв'язувати невизначеності фаз.

Для отримання надійного рішення потрібно подовжене вікно спостережень.

Це сприяє стабільній збіжності параметрів фазової невизначеності.

Метод ґрунтується на використанні подвійних різниць, що є ефективним способом усунення похибок, що виникають через неточності годинників, як на супутниках, так і на приймачі.[4]

Для практичного впровадження цього підходу потрібен доступ до локальної або глобальної GNSS-мережі.

Практика засвідчує, що застосування локальних мереж із короткою довжиною бази не зумовлює суттєвого підвищення точності.

Хиби, пов'язані з тропосферною затримкою, здатні значно впливати на точність визначення координат.

Отже, задля компенсації цього ефекту, варто вдаватися або до зовнішніх джерел із точними атмосферними виправленнями (наприклад, чисельних моделей погоди), або ж вводити додаткові параметри тропосферної корекції безпосередньо у процес оцінювання положення.

Значну роль відіграють також багатопроменеві завади, що залежать від особливостей місця спостереження.

Ці труднощі стають особливо відчутними під час оцінки коду.

В цьому сенсі сигнал Galileo E5 виділяється істотною перевагою: завдяки великій смузі пропускання, він демонструє надзвичайно малий рівень похибок від багатопроменевості, у порівнянні з іншими сигналами GNSS.

Визначення стандартного відхилення для нової комбінації "код + несуча" може бути подане таким чином:

$$\sigma_{\text{код.сиг.}} = \frac{2}{4} \cdot \sqrt{\sigma_{\rho}^2 + \sigma_{\phi}^2} \approx \frac{\sigma_{\rho}}{2} \quad (7)$$

Стандартне відхилення, яке ми отримали, є майже удвічі меншим за шум, що властивий вимірюванням кодового діапазону.

Метод, який було використано, передбачає акумуляцію даних протягом мінімум півгодини або більше.

Підвищена точність вимірювань сигналу Galileo E5, порівняно з GPS L1, веде до значного скорочення часу, потрібного для досягнення збіжності параметрів.

З огляду на вищезазначене, метод виявляє високу ефективність для застосування у галузях моніторингу, де забезпечення безперебійної та стабільної роботи обладнання є критичним завданням.

1.2 Алгоритм швидкої конвергенції

Багато додатків потребують суттєвого скорочення часу до першої локалізації, тобто необхідно встановити точне місцезнаходження за проміжок від 30 секунд до 20 хвилин.

Для досягнення максимальної адаптивності було обрано метод вирішення проблеми невизначеності, який базується на алгоритмі

послідовної фільтрації, знаний як комплексний послідовний оцінювач невизначеності.

У цьому підході використовується фільтр Калмана для оцінки параметрів результатів, наприклад, невизначеності, попереднього положення ровера та інших важливих параметрів.

На відміну від стратегії "спостереження кодового сигналу плюсносія", цей алгоритм здійснює спільну обробку спостережень дальності та фази несучої частоти, а невизначеність вихідних частот визначається відразу.

Рівняння для спостереження дальності на частоті L можна представити таким чином:[4]

$$L = \begin{bmatrix} \nabla \Delta PR_{AB}^{ij} \\ \vdots \\ \nabla \Delta \varphi_{AB}^{ij} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (8)$$

L - вектор спостереження

$\nabla \Delta PR_{AB}^{ij}$ - псевдодальність

$\nabla \Delta \varphi_{AB}^{ij}$ - фаза несучої частоти

Вектор стану X:

$$X = \begin{bmatrix} (x_A y_A z_A) \\ (\nabla \Delta N_{ABL1}^{ij})^T \\ Z_A \\ (\nabla \Delta ION_{ABE5}^{ij})^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

Вектор стану X містить:

1. Три компоненти декартових координат x_A , y_A , z_A , які використовуватимуться для обчислення координат еталонних станцій.
2. Початкові величини неоднозначностей для кожного супутника на несучій частоті (L), що визначатимуться як вихідні параметри.
3. Залишкова затримка поширення сигналу в тропосфері в зенітному напрямку Z_A .

Азимутальні варіації не враховуються, що є стандартним припущенням.

Використання моделювання для конкретної станції дає змогу значно зменшити кількість параметрів.

4. Залишкова затримка розповсюдження сигналу в іоносфері.

Проводиться моделювання супутникової іоносфери, бо пункти спостереження в іоносфері можуть віддалятися один від одного на відстані до 1000 км, у той час як тропосферні станції розташовані значно ближче.

Часові зміни всіх станів повністю змодельовані, відтак, для періоду k матриця переходу дорівнює одиничній:

$$T_k = E \quad (10)$$

Очікувані зміни параметрів з часом впроваджуються у фільтр шляхом розширення області коваріаційної матриці прогнозованих станів.

Це досягається через включення матриці системного шуму, тому коваріаційна матриця передбаченого вектора стану буде виглядати так:

$$\Sigma_{X_k} = T \Sigma_{X_{k-1}} + \Sigma_S(k-1) \quad (11)$$

Σ_{X_k} - коваріаційна матриця прогнозованого вектора стану (за період k)

$\Sigma_{X_{k-1}}$ - оновлена коваріаційна матриця вектора стану (епоха $k - 1$)

Σ_s - матриця системного шуму

T - матриця переходу

Окремі дисперсії матриці системного шуму розраховуються для кожного з координатних компонентів.

Зважаючи на різні набори параметрів, додатково розглядаються наступні шуми процесу:

- шум процесу позиціювання,
- шум процесу невизначеностей,
- шум процесу тропосфери,
- шум процесу подвійної диференціації іоносфери.

Завдяки цьому ви можете адаптуватись до різних умов, корегуючи коефіцієнт шуму процесу відповідно:

а) У випадку нерухомого приймача GNSS, або, простіше кажучи, розкид координат параметра стрімко скорочується з плином часу через накопичення даних з високою точністю (швидка збіжність).[6]

б) Відповідно необхідно враховувати можливі зміни атмосферних умов.

Зокрема, тропосфера зазвичай демонструє незначні коливання у зенітному напрямку впродовж години.

Оцінка впливу іоносфери є більш комплексною, оскільки залежить від висоти, і при певних обставинах можуть спостерігатися суттєві варіації.

Окрім системного шуму, важливе значення має також початкове налаштування фільтра.

2 Оцінювання ефективності одночастотного позиційного підходу

Оцінка ґрунтується на порівнянні покращеного одночастотного позиціювання, що використовує сигнал Galileo E5, з одночастотними підходами GPS L1 або L5.

Водночас здійснюється зіставлення з уже існуючими двочастотними методиками, а також з майбутніми багаточастотними способами обробки фази несучої.

Крім того, було використано дані спостережень за гірським схилом.

Метою було показати потенціал визначення змін положення протягом визначеного періоду моніторингу, використовуючи одночастотне позиціювання на основі Galileo E5.[4]

Зважаючи на те, що через відстрочення запуску супутників дані Galileo були відсутні для обчислення 3D-координат, підсумкові результати одночастотного позиціювання було отримано з використанням імітованих даних.

Дані, що вийшли, підлягають аналізу із застосуванням різноманітних статистичних методів, що дозволяють оцінити рівень досяжної точності одночастотних алгоритмів визначення позиції.

На завершення, отримані результати співставляються з даними інших систем GNSS та різними способами визначення положення.

2.1 Етапи обробки

Одним з ключових викликів, який потребує вирішення, є нестача супутників Galileo, що веде до певних обмежень у наданні сервісів визначення місцезнаходження.

Відповідно, на даний момент, єдиним способом для проведення тестувань є використання даних альманаху.

Для опрацювання даних спостережень потрібні файли з орбітальними параметрами космічних апаратів.

З метою обчислення координат супутників Galileo, використовуємо альманахові дані з документації Galileo ICD (Interface Control Document), що містить інформацію про всі супутники.[4]

Спостереження були здійснені для трьох дослідних станцій: FRKV, SULP, TERP з мережі референцних станцій "Систем Солюшнс" для відповідних епох часу.

- GPS-тиждень 1494, день 206
- GPS-тиждень 1512, день 332
- GPS-тиждень 1729, день 086

Позиційні дані було здобуто з щоденних інформаційних наборів, які згодом стискалися до 6-годинних та погодинних інтервалів для подальшого опрацювання.

Щоб досягти успішного розв'язання неоднозначностей, додатково провели зменшення розміру інформаційних пакетів.

Опрацювання даних реалізувалося з використанням програмних засобів пакету Leica Infinity.

Leica Infinity — це автономний програмний продукт для GNSS, створений для забезпечення надзвичайно точного знімання у статичному, напівкінематичному та кінематичному режимах, де максимальна точність реалізується через використання фаз несучих частот GNSS протягом короткого періоду часу.

Воно успішно використовувалось в алгоритмах одночастотного позиціонування та для розрахунку кінематичних орбіт супутників, а також у високоточних багаточастотних алгоритмах обробки фаз несучої частоти,

що дає можливість вибрати між обробкою даних з одностотного діапазону та фази, або обмежитися лише фазою несучої частоти.

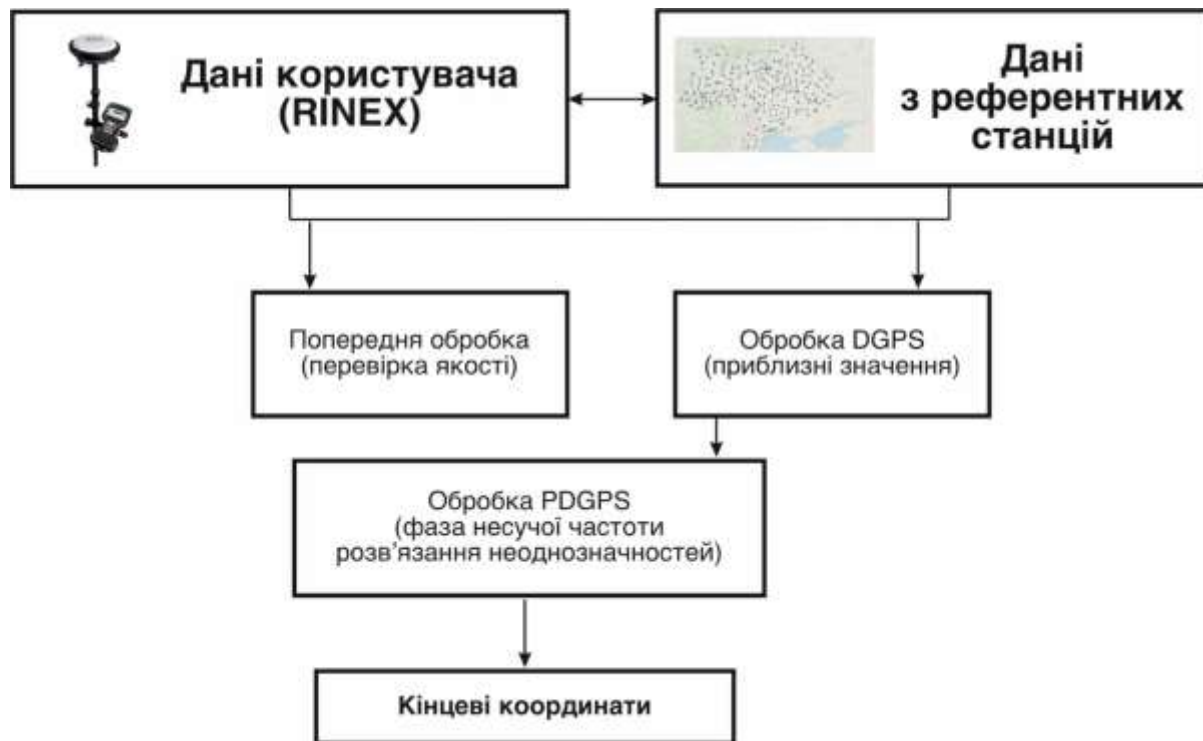


Рисунок 1: Кроки обробки за допомогою програми Leica Infinity

На рисунку 1 подано схематичне зображення етапів обробки даних.

Усі функції точного позиціювання інтегровані у цей процес обробки, що забезпечує отримання високоточних результатів.

Для забезпечення достатньої кількості точних результатів аналізуються часові ряди спостережень тривалістю від 1 до 24 годин.

У цьому контексті використовується частота вибірки 5 секунд для кожного спостереження.

Крім того, застосовується маска горизонту з кутом 15° .

Це сприяє уникненню небажаних ефектів багатопроменевості, що виникає через відбиття сигналів від землі або навколишніх об'єктів.

Для мінімізації впливу тропосфери використовується модель TropGrid, котра слугує як апіорна модель для корекції цих впливів.[4]

Вона дозволяє зменшити негативний вплив змін тропосферних умов на точність визначення позиції.

Моделювання тропосферних впливів дає змогу враховувати зміни атмосферних умов, здатних спотворювати сигнал.

Невизначеності, що виникають в процесі обробки даних GNSS, мають бути зведені до цілих, фіксованих значень.

Відтак, аби дістати високоточні результати позиціонування, необхідно збільшити тривалість збіжності цих цілих значень.

Відповідно, для гарантії точності позиції, потрібен триваліший період спостережень, адже збіжність вимагає часу через потребу правильного встановлення невизначеностей, наявних у зібраних даних.

Отже, основоположним у цьому підході є накопичення значного обсягу даних протягом тривалого проміжку часу задля досягнення високої точності позиціонування, а також застосування корекційних моделей для нівелювання впливу тропосферних та інших атмосферних явищ.

2.2 Результати позиціонування

2.2.1 Результати позиціонування Galileo E5 та GPS L1 - L5

У цьому розділі буде проведено пряме зіставлення позиціонування на одній частоті з застосуванням комбінованих вимірів коду та несучої частоти для сигналів Galileo E5 та GPS L1, L5.

Мета такого порівняння – визначити вплив різних частотних сигналів на точність та ефективність визначення позиції.

У таблиці 1 наведено результати цього зіставлення, де продемонстровано дані щодо точності позиціонування при використанні одночастотних вимірювань для кожного з вказаних сигналів.

Таблиця 1: Порівняння точності позиціонування GPS L1 та Galileo E5 для станції FRKV

Час (год)	Горизонтальна точність (м)		Вертикальна точність (м)		Точність 3D (м)	
	GPS L1	Galileo E5	GPS L1	Galileo E5	GPS L1	Galileo E5
1	0.57	0.27	0.79	0.25	0.98	0.38
2	0.31	0.18	0.35	0.14	0.47	0.19
3	0.25	0.08	0.33	0.07	0.40	0.10
4	0.21	0.06	0.30	0.06	0.35	0.08
5	0.18	0.04	0.27	0.05	0.32	0.06
6	0.12	0.03	0.22	0.04	0.23	0.05
12	0.09	0.02	0.02	0.003	0.17	0.04
18	0.08	0.01	0.014	0.002	0.15	0.03
24	0.06	0.01	0.01	0.01	0.13	0.02

Враховано такі чинники, як точність визначення 3D-координат, вплив іоносферних та тропосферних явищ, а також швидкість збіжності алгоритмів.

Зіставляючи різні частотні діапазони, можливо визначити позитивні та негативні сторони кожної системи.

Таке порівняння дає розуміння того, наскільки застосування сигналу Galileo E5 здатне підвищити точність позиціонування, якщо порівнювати з класичними GPS-сигналами, на кшталт L1 і L5, особливо коли наявні значні шуми та багатопроменевість.

Результати з Galileo E5 демонструють первинну горизонтальну точність близько 3 дм, що значно краще, ніж з GPS L1, де показники вдвічі гірші.

Щодо вертикальної складової, результати Galileo E5 навіть утричі перевершують показники GPS L1, свідчаючи про вищу точність та стабільність при вимірюванні висоти.[4]

Окремо виділяється швидше збігання отриманих даних при використанні сигналу Galileo E5.

Наприклад, зафіксувавши дані протягом 6 годин, використовуючи пакет для E5, маємо 3D СКП 5 см.

Натомість, для GPS L1 показник досягає 20 см.

Це підкреслює здатність сигналу Galileo E5 видавати більш точні результати відчутно швидше, навіть при короткому періоді спостережень.

Під час обробки щоденної інформації з об'єднаними вимірюваннями коду та несучої частоти, використання одночастотного сигналу Galileo E5 дозволяє досягти СКП 3 см, що значно випереджає 13 см, отриманих для GPS L1.[4], [7]

Подані показники безсумнівно ілюструють перевагу Galileo E5 у забезпеченні вищої точності визначення місцезнаходження.

На рисунку 2 представлено безпосереднє порівняння двох часових рядів, що демонструє різницю в точності та швидкості збігу між Galileo E5 та GPS L1.

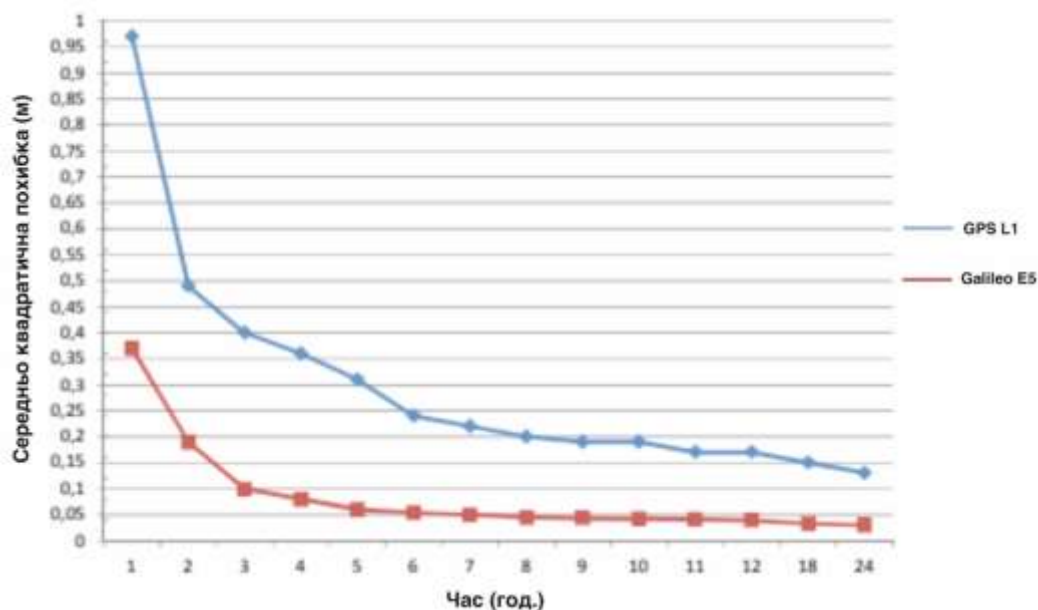


Рисунок 2: Середньоквадратичні похибки для одночастотних вимірювань Galileo E5 та GPS L1

Модернізація системи GPS відкрила шлях до транслявання нового цивільного сигналу L5, створеного задля поліпшення точності та надійності навігаційних систем.

Сигнал L5 зводить до мінімуму помилки, спричинені іоносферним заломленням, та пропонує вдосконалену структуру сигналу з більшою потужністю та розширеною кодовою структурою, у порівнянні зі старими цивільними сигналами GPS.

Це дає можливість значно покращити якість навігації, що надходить від GPS, особливо у випадках, коли вкрай необхідна надзвичайно точна локалізація.[6]

У таблиці 2 показані середньоквадратичні похибки сигналів Galileo E5 та GPS L5.

Це дає змогу провести порівняльний аналіз їхньої точності та ефективності в реальних умовах використання.

Таблиця 2: Порівняння точності позиціонування GPS L5 та Galileo E5 для станції SULP

Час (год)	Горизонтальна точність (м)		Вертикальна точність (м)		Загальна точність (м)	
	GPS L5	Galileo E5	GPS L5	Galileo E5	GPS L5	Galileo E5
1	0.31	0.18	0.22	0.100	0.38	0.21
2	0.14	0.09	0.113	0.053	0.17	0.06
3	0.10	0.04	0.100	0.04	0.14	0.05
4	0.07	0.03	0.09	0.032	0.99	0.04
5	0.06	0.03	0.08	0.03	0.10	0.032
6	0.04	0.02	0.07	0.028	0.08	0.031
12	0.03	0.009	0.05	0.02	0.05	0.02
18	0.02	0.007	0.04	0.014	0.04	0.016
24	0.01	0.006	0.03	0.012	0.037	0.012

Важливо підкреслити, що сигнал L5, подібно до європейського Galileo E5, функціонує на центральній частоті 1176,45 МГц, маючи ширину смуги 24 МГц.

Це створює перспективи для аналогічного підходу до визначення координат.

Слід зауважити, що сигнал L5 зазнав вдосконалень, порівняно з L1, і за певними характеристиками він досить близький до Galileo E5.

Представлена таблиця демонструє, що сигнал GPS L5 забезпечує кращі результати, ніж GPS L1.

Це свідчить про зменшення впливу кодових шумів та, як наслідок, підвищення точності визначення положення.

Однак, зіставляючи ці відомості з сигналом Galileo E5, стає очевидним, що E5 продовжує видавати кращі показники, навіть враховуючи вдосконалення GPS L5.

Графік, що візуалізує тривимірні середньоквадратичні похибки для трьох сигналів (GPS L1, GPS L5 та Galileo E5), ще більш наочно підкреслює перевагу Galileo E5.[4]

Виявлено, що E5 не просто перевершує GPS L1 та L5, а й забезпечує більш чітке визначення місця розташування з меншими погрішностями, що робить його кориснішим для високоточних вимірювань та різноманітних задач.

Зіставлення підкреслює переваги широкосмугових сигналів, таких як Galileo E5, порівняно зі стандартними сигналами GNSS, наприклад, GPS L1 чи L5, підтверджуючи їхню вищу надійність та точність у сфері точного позиціонування.

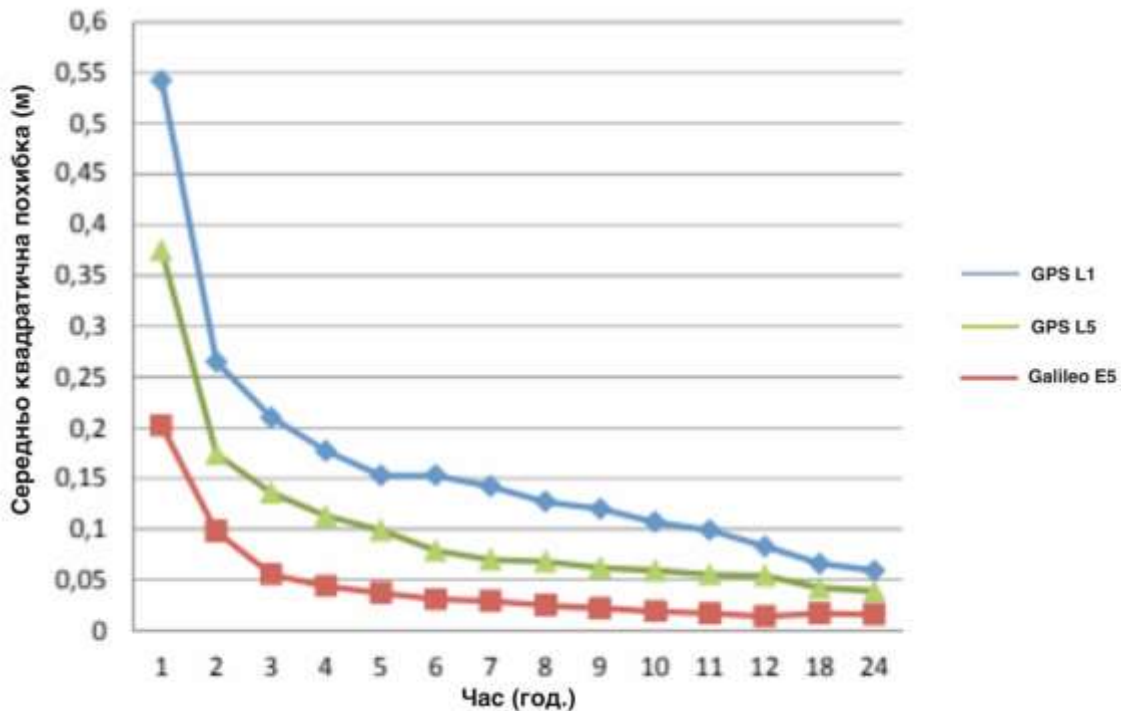


Рисунок 3: Середньоквадратичні значення похибок для одночастотних результатів GPS L1, GPS L5 і Galileo E5

Виконані випробування продемонстрували, що Galileo E5 вражає точністю визначення місцезнаходження.

В умовах, які висувають найбільші вимоги, зокрема, на станції з великою кількістю відбитих сигналів (як, наприклад, FRKV), похибка не перевищує 5 см.

При цьому, в типових умовах експлуатації, похибка позиціонування може становити 1-2 см, відповідно до зібраних за день даних.

Ці показники точності у 3-4 рази перевищують можливості GPS L1 і у 2 рази кращі за GPS L5.

Первинні дані, що надійшли, вказують на надзвичайну перспективність концепції одночастотного визначення координат, використовуючи потенціал Galileo E5.[4]

Найважливішою перевагою Galileo E5 є надзвичайно низький рівень шуму в кодовій області, а також мінімальний вплив багатопроменевості на результати позиціонування.

Це виразна відмінність порівняно з іншими сигналами GNSS, як GPS L1 або L5.

Завдяки цим перевагам, одночастотні результати, що отримуються з Galileo E5, здатні відповідати найвищим вимогам точності в різних областях позиціонування.

Це обіцяє широке та ефективне застосування у різноманітних галузях.

2.3 Аналіз даних Galileo E5 в порівнянні з обробкою фази несучої частоти

Обробка фази несучої частоти - один з найбільш точних способів визначення координат, адже дозволяє визначати положення, спираючись на виміри фази сигналу несучої частоти, отриманого від супутників.

Вимірювання фази несучої частоти вирізняються низьким рівнем шумів та мінімальним впливом багатопроменевості, що зумовлює надзвичайну точність цього методу.

Завдяки цим перевагам точність визначення координат за допомогою обробки фази несучої частоти може досягати міліметрового діапазону.

Окрім того, багатосмугові GNSS-приймачі дозволяють оцінювати похибки в іоносфері, зокрема, затримку груп та випередження фази.

Використання цих вимірів відкриває можливість нівелювати ефекти іоносфери, які провокують помилки.

Методом, обраним в цій роботі для остаточного усунення іоносферних похибок, є відносне фазове позиціювання несучої без урахування іоносферних спотворень, базоване на подвійних різницях.

Для визначення точності опрацювання фази несучої частоти були залучені дані за добу, отримані з багаточастотних даних GPS та Galileo.

Результати співставлялися з інформацією, здобутою завдяки комбінованому підходу "код плюс носій", застосованому до сигналу Galileo E5.[4]

У Таблиці 3 подано результати порівняльного аналізу горизонтальної складової, вертикальної складової та сумарної середньоквадратичної похибки (СКП).

Таблиця 3 Похибки складової координат

Тип спостереження	Горизонтальна точність (м)	Вертикальна точність (м)	Загальна точність (м)
Galileo E5	0.014	0.017	0.0243
Комбінація L1+L2	0.0013	0.0015	0.0018
Комбінація L1+L5	0.0010	0.0014	0.0017
Комбінація E1+E5	0.0008	0.0013	0.0016
Комбінація L5+E5	0.0008	0.0012	0.0014
Комбінація L1+L5+E1+E5	0.0006	0.0010	0.0012

На рисунку 4 представлено графік, що візуально порівнює точність визначення місцезнаходження, досягнуту за допомогою одночастотного сигналу Galileo E5, та показники, одержані при суміщенні сигналів різних супутникових систем GNSS.

Розглядаються комбінації, такі як GPS L1+L2, GPS L1+L5, Galileo E1+E5, а також багаточастотні конфігурації, включаючи L1L5+E1E5.

Графік наочно демонструє залежність точності позиціонування від обраних комбінацій сигналів та частот, що використовуються.

Одночастотне позиціонування, що базується на сигналі Galileo E5, демонструє кращі результати з точки зору точності у порівнянні зі стандартними методами, основаними на GPS L1, та іншими варіантами поєднання частот.[5]

Цей факт підкреслює важливість сигналу Galileo E5 в ситуаціях, де потрібна максимально висока точність визначення координат.

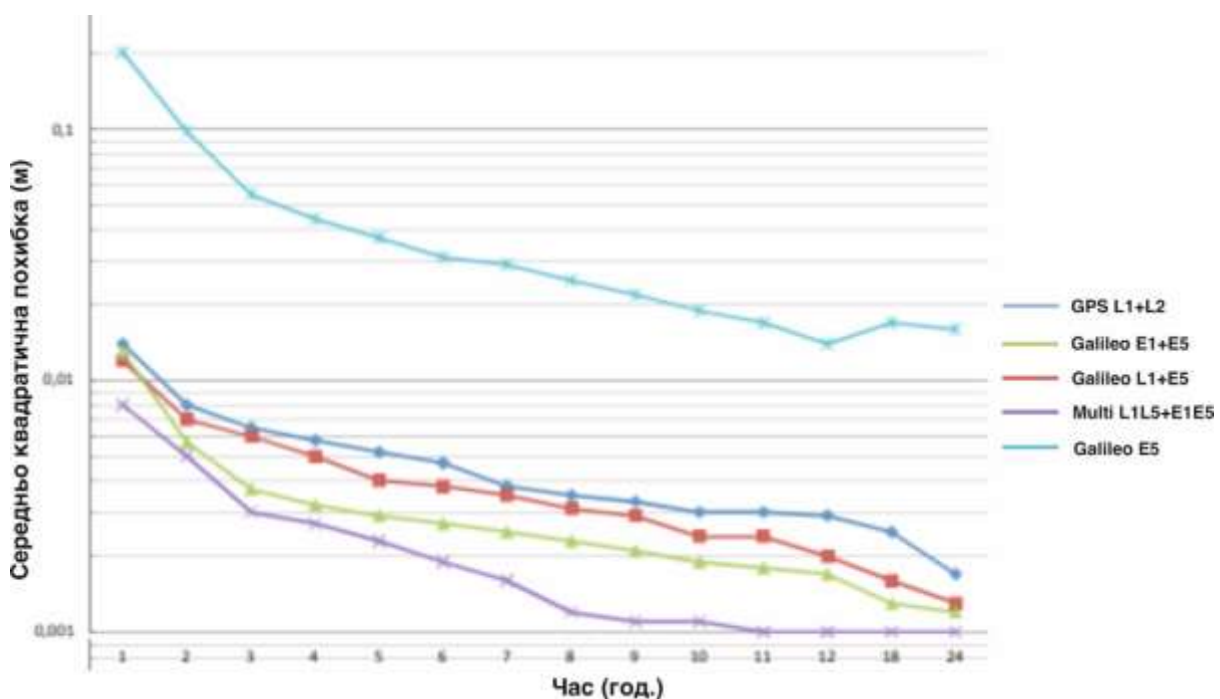


Рисунок 4 Загальна точність результатів на одній частоті з використанням Galileo E5

З аналізу представлених таблиць та графіків беззаперечно випливає, що опрацювання фази несучої хвилі, використовуючи багаточастотні вимірювання, забезпечує точність на рівні міліметрів.

Цей показник у десять разів кращий за той, що досягається одночастотним позиціонуванням, яке комбінує виміри коду та фази несучої.

Впровадження багаточастотної обробки дає змогу досягати результатів з похибкою лише кілька міліметрів, що є вагомим аргументом для використання цього підходу в численних високоточних GNSS-додатках.

Однак, варто зауважити про серйозний недолік: висока вартість багаточастотних приймачів, що може ускладнювати доступність для певних користувачів.

До того ж, не завжди для конкретних завдань з точним визначенням положення потрібна надзвичайно велика точність, яка вимірюється міліметрами.

Тому значна вартість багаточастотного обладнання може бути економічно невиправданою.

Незважаючи на те, що дані, отримані з Galileo E5, не зрівняються з багаточастотними вимірюваннями, точність визначення координат за допомогою цього сигналу здатна повністю задовольнити вимоги багатьох додатків, які потребують точного позиціонування з точністю в дециметри або сантиметри.

Отже, підхід, що базується на Galileo E5, може розглядатися як альтернативне рішення, яке заповнює проміжок між надточним багаточастотним позиціонуванням та стандартним одночастотним позиціонуванням.

2.4 Результати фільтрації швидкої конвергенції

Алгоритм швидкого сходження націлений на мінімізацію витрат часу, необхідного для отримання точних результатів одночастотного позиціонування, застосовуючи комбінацію вимірювань коду та фази несучої.

Він виокремлюється від класичних підходів завдяки спільному опрацюванню даних обох типів спостережень – відстані та фази несучої частоти.

Для оцінки продуктивності алгоритму використали мережу спостережень кафедри вищої геодезії та астрономії НУ «Львівська політехніка».

Перевагою використання даної локальної мережі є можливість обробки станцій, сполучених невеликими базовими лініями зі своїми контрольними пунктами.

Такий метод дозволяє значно зменшити вплив атмосферних затримок, оскільки дві станції з короткими базовими лініями відчувають схожі атмосферні ефекти.

Це дозволяє усунути затримки поширення в іоносфері та тропосфері завдяки використанню подвійних різниць.

Зазвичай, алгоритм обчислює іоносферні затримки як параметр, що змінюється в часі, вдаючись до зовнішніх даних, наприклад, карт іоносферних затримок, для забезпечення швидкого збігу з точними координатами.[7]

Тропосферні затримки також зазвичай враховуються, але в цьому конкретному випадку використання подібних підходів виявилось не виправданим через відносно невеликі довжини базових ліній.

Для тестових випробувань було використано набір даних, який тривав одну годину, з частотою семплювання в 1 секунду.

Розв'язки було отримано шляхом розрахунків з використанням фільтра Калмана з заздалегідь визначеними початковими значеннями.

Вихідне положення було встановлено з похибкою у 9 метрів, оскільки вплив атмосферних затримок було оцінено як незначний.

Всі виміри було скоректовано на початкові 3 міліметри.

На рисунку 5 представлено відфільтровані координати (X: червоний, Y: зелений, Z: синій) та розв'язок з фіксованими невизначеностями (жовті точки).

Спостерігається надзвичайно швидке збігання координат, а також усунення неоднозначностей за лічені ітерації, що підтверджує ефективність використаного алгоритму.[4]



Рисунок 5: Результати швидкої конвергенції

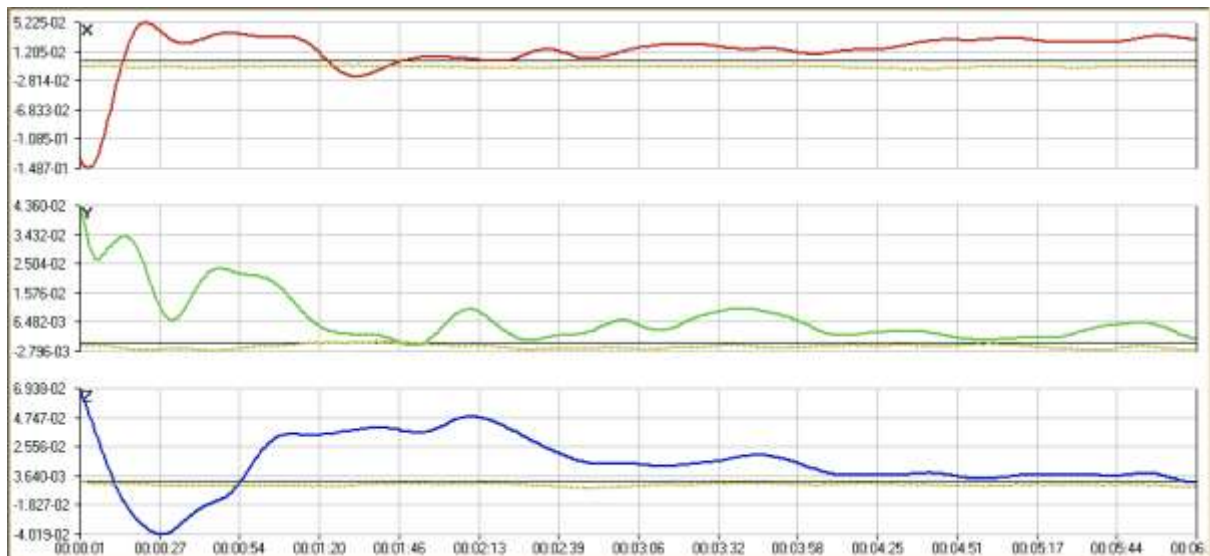


Рисунок 6: Результати перших 5 хвилин спостереження

Як бачимо, застосування фільтра за для швидкого визначення точних координат, надає очевидну користь.

Він значно прискорює процес сходимості й дозволяє досягти високої точності за короткий час.

Разом з тим, суттєвим мінусом є потреба у точних вихідних параметрах до початку обчислень.

У випадку невірної задачі цих даних, фільтрація може викликати дрейф отриманих величин, що зменшує точність.

Такий підхід особливо дієвий для коротких базових ліній, де атмосферні умови є стабільними й не сильно впливають на кінцевий результат.

Проте, для протяжних базових ліній (довше 10 км) виникають труднощі через відмінності атмосферних факторів на різних точках.

У подібних випадках вкрай складно, а іноді й зовсім неможливо коректно оцінити іоносферні та тропосферні затримки, особливо коли іоносфера демонструє нестабільність.

За таких умов метод фільтрації може виявитися не таким ефективним, і для отримання високоточного позиціонування необхідні додаткові методи коригування впливу атмосфери.

3 Виявлення зміни позиції

GNSS безумовно є надзвичайно важливим засобом для спостереження за змінами у земній корі, гарантуючи максимально точні виміри на великих просторах.

Найбільша перевага GNSS в цій сфері - це відсутність необхідності прямого бачення між приймачами, що дозволяє використовувати систему у різноманітних ситуаціях, де класичні сенсори не справляються.

Крім того, система GNSS не вимагає постійного нагляду, що робить її надзвичайно зручною для довготривалих проектів спостереження.

Деформації земної поверхні проявляються в широкому діапазоні величин: від незначних зсувів, фіксованих на рівні міліметрів, до більш значних, котрі можуть сягати сантиметрів чи навіть метрів, все залежить від тривалості періоду спостережень.

Використання GNSS технологій надає змогу проводити моніторинг даних у двох основних форматах: в реальному часі (динамічний режим) та через регулярні вимірювання.[4]

Завдяки цьому стає можливим відслідковувати зміни як короткотермінового, так і довготермінового характеру.

У контексті вашого дослідження, застосування одночастотного позиціонування Galileo E5 виглядає доволі багатообіцяючим інструментом для моніторингу деформаційних процесів.

Завдяки інтеграції вимірювань коду та фази несучої хвилі, вдається досягти високої точності, достатньої для виявлення навіть мінімальних деформацій.

Це відкриває широкі можливості для використання таких систем у моніторингу деформацій у різноманітних масштабах – від точних вимірювань, з точністю до міліметрів, до аналізу більш глобальних змін.

3.1 Моніторинг гірського схилу з використанням одночастотного позиціонування Galileo E5

Моніторинг гірських схилів з використанням одночастотного позиціонування передбачає застосування GNSS-приймачів, що працюють виключно з одним сигналом супутників - L1.

Цей метод забезпечує можливість систематичного вимірювання зрушень на схилах, а вартість необхідного устаткування є загалом прийнятною.

Хоча точність поступається двочастотним системам, одночастотні приймачі виявляються ефективними при контролі повільних деформацій, особливо там, де якість прийому сигналу висока.

Основною метою моніторингу є своєчасне виявлення зсувів ґрунту, зміщення гірських порід та інших змін, здатних створити загрозу для об'єктів інфраструктури чи безпеки населення.

В межах цього дослідження визначаються оптимальні параметри для проведення вимірювань, розробляються способи обробки супутникових даних, включаючи постобробку в статичному режимі, та здійснюється оцінка точності здобутих результатів.[4]

Моніторинг здійснюється шляхом періодичного визначення координат контрольних точок, які надійно закріплені на схилі.

Зазначений метод виглядає економічно доцільним для місцевих моніторингових проєктів, зокрема у важкодоступних гірських районах, де використання інших методів (лазерного сканування, радарів, інклінометрів) є надскладним або потребує значних фінансових витрат.

Для створення моделі руху гірських масивів застосовано карту швидкостей земної поверхні, на базі якої було збудовано віртуальну мережу спостереження з п'ятьма пунктами (Пункт1, Пункт2, Пункт3, Пункт4, Пункт5).

Очікувані зміщення пунктів спостереження різняться від 0,1 м до 1,5 м щорічно.

На основі координат розташування пунктів, визначених за вимірюваннями, розраховано вектори швидкості для кожного з них.

Це дало змогу встановити складові швидкості руху (v_x , v_y та v_z) відповідно до осей X, Y та Z.[4]

З використанням цих векторів швидкості виконано інтерполяційне обчислення передбачуваної швидкості переміщення кожного пункту, що надало можливість оцінити зміщення контрольних точок на схилі.

Для розрахунку подвійних диференційованих розв'язків було використано референсну станцію, розміщену в Івано-Франківську (FRKV).

Віддаль від території, що вивчається, до вказаної станції дорівнює 89 кілометрам, що робить її оптимальним варіантом для еталонного зіставлення, оскільки вона розташована поза зоною потенційних зсувів та виступає стабільною точкою відліку.

Для встановлення можливих зміщень станцій було здійснено три вимірювальні цикли, кожен тривалістю в один день.

Ці цикли були сплановані на різні дати (GPS-тижні: 1494, день 206; 1512, день 332; 1729, день 086).

Кожен цикл включав ретельні спостереження та вимірювання, що дозволяло визначити, чи фіксується рух станцій в межах зони дослідження, та виявити можливі зміщення, котрі могли б свідчити про деформації або інші зміни у структурі гірського схилу.[6]



Рисунок 7 Мережа моніторингу

Визначення зміни місцеположення точки за допомогою даних GNSS-спостережень передбачає обчислення різниці між координатами, отриманими у два або більше періодів вимірювань.

Це дає можливість визначити переміщення точки в часовому проміжку.

Точність таких оцінок відіграє критичну роль, оскільки навіть незначні зміни можуть бути суттєвими під час моніторингу деформацій.

Відтак, для забезпечення високої точності, зазвичай застосовують вимірювання фази несучої частоти, оскільки вони дозволяють досягти міліметрової точності.

Ще одним важливим чинником є частота вибірки даних. Щоб отримати надійні результати, критично важливо, щоб усі спостереження мали однакову частоту дискретизації.

Це особливо важливо, якщо вимірювання проводяться в різні часові проміжки.

У разі моніторингу схилу гори, для гарантування точної відповідності даних, було встановлено частоту дискретизації кожні 5 секунд.

Для подальшого аналізу було обрано точку 5, де прогнозована швидкість переміщення становить приблизно 40 см на рік.[4]

Контрольний відрізок часу було встановлено на 206-й день GPS-тижня під номером 1494, а повторне спостереження на тому самому місці відбулося через 34 доби.

Здійснено обробку зібраної інформації для двох сузір'їв: GPS L1 та Galileo E5, застосовуючи одночастотний метод обчислень окремо для кожної.

На зображенні 8 представлено графіки розсіювання, що візуально демонструють результати спостережень, використовуючи різні супутникові системи, що дозволяє проаналізувати та порівняти їх точність і ефективність у визначенні зміщень.[4]

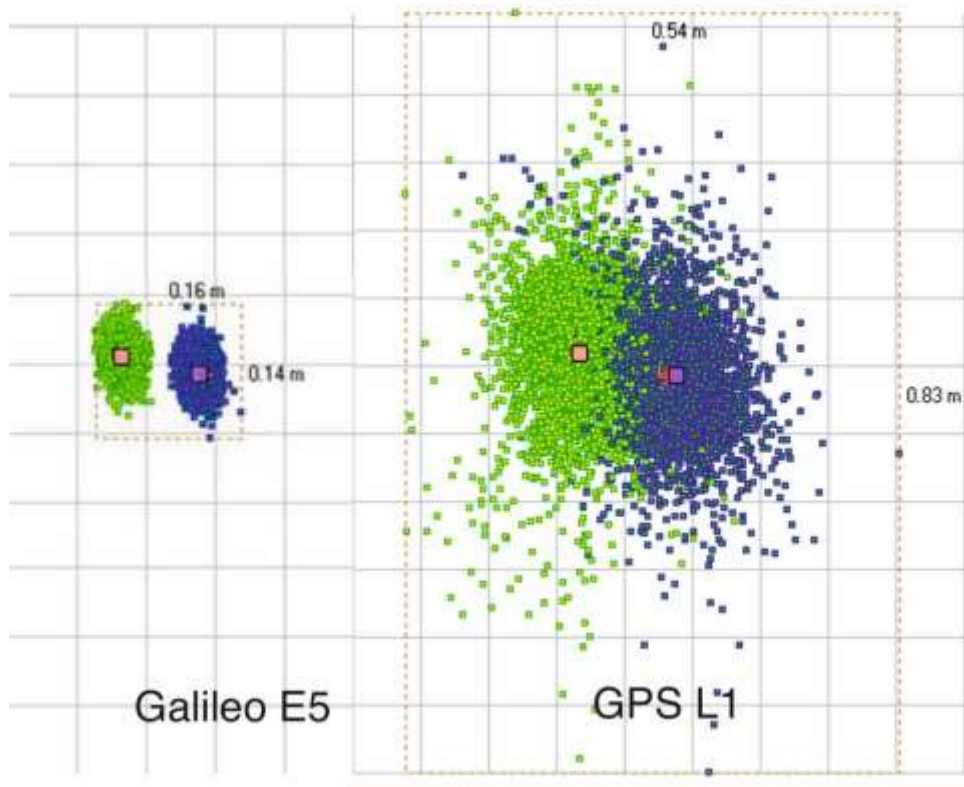


Рисунок 8. Результати зіставлення положень для двох відмінних періодів спостереження, використовуючи одночастотне позиціонування.

Діаграма розкиду, як інструмент, дає корисне уявлення про можливість визначення зсувів між двома масивами даних.

Щодо GPS L1, високий рівень шумів перешкодив виявленню зсуву станції протягом 34 днів спостережень.

Точки вимірювань на різних етапах (сині та зелені) майже повністю перекриваються, свідчаючи про обмежену точність у виявленні змін координат.

Очікувана відстань зміщення за 34 дні – близько 11 сантиметрів, але середньоквадратична похибка (СКП) для GPS L1 вимірювань дорівнює приблизно 30 сантиметрам, що вважається неприйнятним для точного визначення зсуву.[4]

Заміри Galileo E5 показують суттєво кращі результати.

У цьому чітко помітна різниця між двома періодами спостережень, яка вказує на зміщення станції.

Незважаючи на те, що точність виявлення залишається не дуже високою – близько 5 сантиметрів СКП, ці дані цілком задовільні для фіксації зсуву станції за короткий проміжок часу.

Через 96 діб було здійснено повторне дослідження для тієї ж станції, і результати представлено на графіку розсіювання, який можна побачити на малюнку 9.[4]

Це дозволяє проаналізувати, як еволюціонувала картина після тривалішого періоду спостережень і збільшення точності вимірювань.

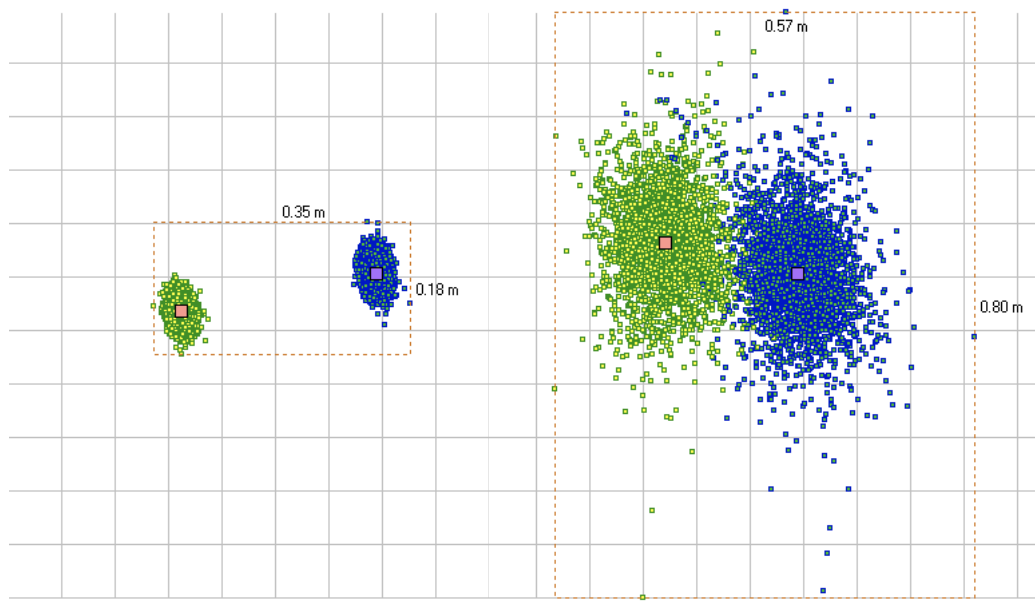


Рисунок 9. Результати зіставлення положень, отриманих протягом двох різних періодів спостереження, використовуючи одночастотне позиціонування (через 96 діб).

Одночастотне визначення місця розташування практичне для довгострокового спостереження, адже необхідний тривалий збір даних (20-30 хвилин).

Це дозволяє виявляти зміни в об'єктах лише після визначеного проміжку часу спостережень.

Використовуючи інформацію Galileo E5, нам вдалося зафіксувати деформацію в декілька сантиметрів.

У порівнянні з опрацюванням фази несучої частоти, одночастотне позиціонування з Galileo E5 має переваги, оскільки забезпечує прийнятну точність при менших витратах на апаратуру та зменшеній потребі в часі збору даних.

Висновки

У даній бакалаврській роботі ми здійснили дослідження результативності способу одночастотного позиціювання, використовуючи сигнал Galileo E5 у широкосмуговому спектрі.

Завдяки незначному рівню шуму в кодовій складовій сигналу, а також зниженій чутливості до багатопроменевості, яка впливає на точність визначення місця розташування (порівняно зі стандартними сигналами, наприклад, GPS L1), сукупність вимірювань коду та частоти несучої Galileo E5 сприяє отриманню високоточної інформації про координати.

Підсумки проведених експериментів засвідчили, що одночастотне позиціювання з використанням Galileo E5 дозволяє досягнути точності в декілька сантиметрів.

Зіставляючи ці показники з результатами GPS L1 (20 см) та L5 (1-6 см), стає очевидним значний потенціал запропонованого способу.

У той же час, присутній недолік: тривалий час збірки, що може сягати 20-30 хвилин задля визначення точної координати.

Щоб виправити цей недолік, ми застосували алгоритм прискореної збірки з фільтрацією, який паралельно опрацьовує код та виміри частоти несучої для оцінки параметрів.

Завдяки цьому, вдалось уникнути неоднозначностей за кілька секунд та визначити координати з субдециметровою точністю.

Наведені тести показали, що фаза несучої хвилі, як і раніше, видає більш точні результати (на порядок кращі), аніж одночастотний спосіб з Galileo E5, хоча цей варіант потребує недешевих багаточастотних приймачів.

Однак, не всі високоточні GNSS-застосунки вимагають таку ступінь точності, тому одночастотне визначення місцезнаходження з

використанням Galileo E5 може зайняти проміжну позицію між вимірами міліметрового рівня та звичайним одночастотним позиціонуванням.

Завдяки короткому часу збіжності та досягнутій точності, цей метод виявляється корисним у моніторингових програмах, де необхідні точні координати після певного періоду спостереження для виявлення будь-яких змін.

Ми застосували цей метод для моніторингу гірського схилу, порівнюючи показники одночастотної обробки GPS L1 та Galileo E5.

Зібрані дані показали, що з Galileo E5 нам вдалося зафіксувати зміщення координат моніторингової станції після короткого періоду спостережень, що не було досягнуто при використанні GPS L1.

З появою супутників IOV (In-Orbit Validation) ми очікуємо на покращення точності одночастотного позиціонування, адже увесь потенціал Galileo E5 дасть змогу отримати ще вагоміші результати з реальними вихідними даними.

Здатність досягти надзвичайно точного одночастотного позиціонування з похибкою в сантиметри, використовуючи сигнал Galileo E5, буде привабливою для багатьох GNSS-застосувань, що вимагають високої точності.

Наразі ці застосування вимушені використовувати багаточастотні приймачі, адже існує стійка думка, що лише приймачі з двома або більше частотами здатні забезпечити високу точність визначення місця розташування.

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. Diessongo, Herman & Junker, Stefan & Schueler, Torben. Performance Assessment of a Precise Single Frequency Positioning Approach. December 2011 Conference: Proceedings of the European Navigation Conference

5. ДЕЛАЛОЙ, Р., СТРОЦЦІ, Т., ЛАМБІЕЛЬ, К., ПЕРРУ-ШУД, РАЕТЦО, Х. (2007): Зсувоподібний розвиток 11 скельних льодовиків, виявлених за допомогою інтерферометрії ERS-1/2 SAR; Матеріали семінару FRINGE 2007, Фраскаті, Італія, 26–30 листопада 2007 р.

6. ЕРКЕР, С., ТЕЛЕРТ, С., ФЮРТНЕР, Й., МОЙРЕР, М. (2011): L5 – Новий сигнал GPS; IAIN 2009, 27-30 жовтня 2009 р., Стокгольм, Швеція.

7. ЮНКЕР, С., ДІЕССОНГО, Т.Х., ШУЛЕР, Т. (2011): Метод точного позиціонування на одній частоті з використанням повного потенціалу Galileo E5; Наукова конференція Galileo 2011, Копенгаген, Данія.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**« Аналіз точності одностотного позиціонування за допомогою
супутникової системи Galileo »**

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)