

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Комарніцька Анастасія Михайлівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Порівняльний аналіз різних методів GNSS-позиціонування для геодезичних та
землевпорядних робіт в Україні

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня

А.М. Комарніцька

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Кравець Олена Ярославівна, к.т.н, доцент

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

(посада)

(підпис) (дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
Освітньо-професійна програма Геодезія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ГКЗ
Приходько М. М.

«__» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Комарніцькій Анастасії Михайлівні

1. Тема роботи **«Порівняльний аналіз різних методів GNSS-позиціонування для геодезичних та землевпорядних робіт в Україні»**

Керівник роботи доц. Кравець О.Я.

Наказ ректора від «8» червня _____ 2026 року №292/7.

2. Термін подання студентом роботи – 24 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи:

Матеріали надані керівником

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1. Методика інтегрованої зйомки та просторової орієнтації

2. Математичні моделі

3. Проведення дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Залежність часу фіксації від базової лінії

2. Точність RTK при зніманні базової лінії

6. Дата видачі завдання – «01» квітня 2026 року.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Методика інтегрованої зйомки та просторової орієнтації	04.04.2026-01.05.2026	
2	Математичні моделі	01.05.2026-29.05.2026	
3	Проведення дослідження	29.05.2026-12.06.2026	
4	Оформлення бакалаврської роботи	12.06.2026-22.06.2026	

Студент _____ ***Комарніцька А.М.***
(підпис) (розшифровка підпису)

Керівник роботи _____ ***Кравець О.Я.***
(підпис) (розшифровка підпису)

АНОТАЦІЯ

Актуальність теми. Супутникові навігаційні системи (GNSS) світового охоплення на сьогодні є наріжним каменем у сучасних геодезичних вимірюваннях та землепорядній практиці, забезпечуючи високу оперативність та точність визначення просторових координат.

На практиці застосовуються різні методи позиціонування: від автономного та диференціального до кінематики в реальному часі (RTK) та високоточного точкового позиціонування (PPP), які відрізняються типом даних, апаратним забезпеченням та алгоритмами опрацювання. Більшість існуючих наукових праць зосереджена на оцінці точності автономних навігаційних рішень, тоді як комплексне зіставлення точних геодезичних GNSS-методів для виконання специфічних завдань геодезії та землеустрою в сучасних фізико-географічних та координатно-часових реаліях України є недостатньо висвітленим.

Необхідність обґрунтування оптимальних параметрів зйомки на довгих базових лініях та ефективного вирішення фазової неоднозначності зумовлює актуальність даного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась як самостійне дослідження у межах науково-дослідних напрямків кафедри геодезії та землеустрою Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Об'єкт дослідження: процес визначення просторових координат точок земної поверхні за допомогою супутникових навігаційних технологій (GNSS) у геодезії та землеустрої.

Предмет дослідження: точність, надійність та ефективність сучасних методів GNSS-позиціонування (зокрема кінематичного в

реальному часі – RTK, та фазових комбінацій) залежно від довжини базових ліній та умов спостережень.

Мета дослідження: комплексна оцінка та порівняльний аналіз ефективності ключових методів GNSS-позиціонування для оптимізації геодезичних та землепорядних робіт в Україні, з особливим акцентом на підвищення точності ініціалізації на довгих базових лініях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан та теоретичні основи застосування GNSS-технологій у геодезичній практиці.
2. Провести експериментальну апробацію та порівняльний аналіз різних методів супутникових спостережень (автономних, диференціальних, кінематичних).
3. Дослідити вплив довжини базової лінії (відстані від опорної станції до мобільного приймача) на час фіксації фазової неоднозначності (time-to-fix) та підсумкову точність координатного визначення.
4. Оцінити ефективність використання широкосмугових та вузькосмугових лінійних комбінацій супутникових сигналів порівняно зі стандартними частотами L1 та L2 на відстанях понад 20 км.
5. Розробити практичні рекомендації щодо інтеграції оптимізованих GNSS-методик у виробничу діяльність землепорядних та геодезичних підприємств України.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використано: методи математичної обробки геодезичних вимірювань, статистичний аналіз метрик якості (точності, надійності, доступності рішення).

Ключові слова: GNSS, кінематичне позиціонування, методи GNSS-визначень, точність позиціонування, геодезичні та землепорядні роботи.

ABSTRACT

Relevance of the topic. Global navigation satellite systems (GNSS) are currently the cornerstone of modern geodetic measurements and land management practice, providing high efficiency and accuracy in determining spatial coordinates.

In practice, various positioning methods are used: from autonomous and differential to real-time kinematics (RTK) and high-precision point positioning (PPP), which differ in data type, hardware and processing algorithms.

Most existing scientific works focus on assessing the accuracy of autonomous navigation solutions, while a comprehensive comparison of accurate geodetic GNSS methods for performing specific tasks of geodesy and land management in modern physical-geographical and coordinate-time realities of Ukraine is insufficiently covered.

The need to substantiate the optimal survey parameters on long baselines and effectively resolve phase ambiguity determines the relevance of this study.

Relationship of work with scientific programs, plans, topics. The work was carried out as an independent study within the research areas of the Department of Geodesy and Land Management of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Object of research: the process of determining the spatial coordinates of points on the earth's surface using satellite navigation technologies (GNSS) in geodesy and land management.

Subject of research: accuracy, reliability and efficiency of modern GNSS positioning methods (in particular, real-time kinematic - RTK, and phase combinations) depending on the length of baselines and observation conditions.

Purpose of the study: comprehensive assessment and comparative analysis of the effectiveness of key GNSS positioning methods for optimizing

geodetic and land management works in Ukraine, with a special emphasis on increasing the accuracy of initialization on long baselines.

To achieve the goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. Analyze the current state and theoretical foundations of the application of GNSS technologies in geodetic practice.
2. Conduct experimental testing and comparative analysis of various methods of satellite observations (autonomous, differential, kinematic).
3. Investigate the influence of the length of the baseline (distance from the reference station to the mobile receiver) on the time of fixation of the phase ambiguity (time-to-fix) and the final accuracy of coordinate determination.
4. Assess the effectiveness of using broadband and narrowband linear combinations of satellite signals compared to standard frequencies L1 and L2 at distances over 20 km.
5. Develop practical recommendations for the integration of optimized GNSS methods into the production activities of land surveying and geodetic enterprises of Ukraine.

Research methods. To solve the tasks set, the following methods were used: methods of mathematical processing of geodetic measurements, statistical analysis of quality metrics (accuracy, reliability, availability of the solution).

Keywords: GNSS, kinematic positioning, GNSS determination methods, positioning accuracy, geodetic and land surveying works.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТИВНОСТІ.....	14
1.1 Системи кінематичного позиціонування в режимі реального часу.....	14
2. ЛІНІЙНІ РІВНЯННЯ ДЛЯ РОЗВ’ЯЗАННЯ ФАЗОВИХ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ШИРОКОСМУГОВИХ ТА ВУЗЬКОСМУГОВИХ ВИМІРЮВАНЬ...	23
2.1 Подвійні різниці кодових та фазових спостережень.....	25
2.2 Матричний запис системи рівнянь.....	26
2.3 Широкопasmугова та вузькопasmугова комбінації.....	26
3. АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ RTK- РІШЕНЬ.....	30
3.1 Продуктивність RTK системи.....	30
3.2 Аналіз продуктивності запропонованих моделей та алгоритмів RTK- позиціонування.....	37
ВИСНОВКИ.....	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	43

ВСТУП

Визначення місцезнаходження за допомогою глобальних супутникових навігаційних систем (GNSS) включає низку способів знаходження координат, які різняться залежно від того, як обробляються отримані дані та які технічні аспекти застосовуються.

Зазвичай, поділ методів GNSS-позиціонування базується на трьох ключових критеріях:

1. Використовувані типи вимірювань для розрахунку координат.
2. Обсяг даних або часовий проміжок спостережень, потрібних для отримання результату визначення позиції.
3. Число приймальних пристроїв, задіяних під час процесу визначення розташування.

Найделікатнішим способом вважається позиціонування в одній точці (СПП — Single Point Positioning), яке ще зветь незалежним визначенням місця.

Воно ґрунтується на даних про хибні відстані, зібраних одним приймачем системи GNSS протягом єдиного інтервалу спостережень, і дає змогу отримати навігаційні результати з помірною точністю.

Наступним методом, який застосовується, є точне точкове позиціонування (PPP — Precise Point Positioning), що спирається на одночасне використання як вимірювань коду, так і фази носійної частоти, отриманих з одного приймача.

Щоб досягти високого рівня точності, цей спосіб вимагає значно довших сеансів спостереження — від кількох десятків хвилин аж до декількох годин, незалежно від того, чи проводиться робота у статичному чи кінематичному режимі.

Методи визначення координат, що базуються на різницевих вимірюваннях, зокрема Диференціальна Глобальна Навігаційна

Супутникова Система (DGPS), також спираються на вимірювання коду, зняті у межах одного етапу, але вони оперують поправками, які надходять від референсної (базової) станції або системи таких станцій.

Завдяки цьому, відносно автономного режиму, можна досягти значного покращення точності.

Для досягнення максимальної точності застосовується кінематичне позиціонування у режимі реального часу (RTK — Real-Time Kinematic), що ґрунтується на фазових замірах несучої хвилі з використанням диференціального методу.

Хоча RTK у теорії здатне дати фіксоване рішення за одиницю часу (епоху), на ділі ж для стабільного визначення початкових фазових значень зазвичай потрібна серія послідовних епох або певний короткий період збору даних.

При цьому місцезнаходження абонента обчислюється, спираючись на дані вимірювань у поточному режимі.

Аби мати змогу належно зіставити різноманітні підходи до GNSS-визначення місця, слід застосовувати набір метрик, які б відображали ефективність їхньої роботи.

Методи, що базуються на вимірюванні коду, як-от просте точкове позиціонування (SPP) та диференціальний GPS (DGPS), вирізняються певною простотою та стійкістю; однак, визначити рівень їхньої навігаційної спроможності може бути досить непросто.

У контексті застосування в авіаційній галузі, для цієї мети заведено використовувати критерії на кшталт точності визначення, рівня забезпечення обслуговування, неперервності функціонування та гарантії надійності даних.

Наявність послуги вимірюється тим часом, у який навігаційна спроможність доступна з визначеною точністю.

Цілісність же описує ступінь надійності навігаційних відомостей та охоплює спроможність системи оперативно сповіщати споживача, якщо дані стають непридатними через помилки.

Базова версія супутникової системи GPS (Global Positioning System) не надає користувачеві прямих даних щодо її цілісності.

У парадигмі цілісності виокремлюють три ключові аспекти: імовірність порушення цілісності, проміжок часу до інформування та встановлений рівень тривоги.

Щодо забезпечення контролю цілісності самостійних навігаційних рішень на основі GNSS, напрацьовано низку методів, серед яких:

- зовнішній нагляд, що реалізується через залучення мережі станцій на землі, які здатні ідентифікувати некоректно працюючі супутники та надсилати сповіщення кінцевим споживачам.

Прикладом таких систем слугують системи супутникового доповнення з великим радіусом дії (WAAS — Wide Area Augmentation System);

- моніторинг цілісності самостійно апаратурою користувача (RAIM — Receiver Autonomous Integrity Monitoring), що вбудований безпосередньо у прилад користувача і має на меті знайти хибні вимірювання та визначити некоректні супутники.

На противагу кодовим методикам, визначення місця розташування за допомогою RTK-технології являє собою процес, який є набагато заплутанішим і більш вразливим до зовнішніх чинників.

Ключова мета тут полягає в отриманні координат із точністю до сантиметра в режимі, що відбувається тут і зараз, мінімізуючи при цьому необхідний час накопичення даних вимірювань, незалежно від траєкторії руху особи, яка використовує систему.

З огляду на це, для фахового використання — такого як геодезичні вимірювання, роботи із землеустрою, запровадження високоточного

сільського господарства, впровадження автоматизованого керування машинами на будівництві та у видобувній промисловості, а також для майбутніх навігаційних систем для транспорту — аспекти щодо того, наскільки легко отримати доступ до RTK-рішень, їхня стабільність роботи та гарантії їхньої коректності, є настільки ж критичними, як і їхня здатність забезпечувати високу точність.

В умовах низки виробничих процесів, наприклад, при роботі у відкритих видобувних кар'єрах, навіть тимчасова втрата працездатності системи RTK здатна спричинити істотні фінансові збитки.

При цьому, показники ефективності роботи RTK досі опрацьовані меншою мірою, якщо порівнювати їх із повноцінними автономними системами на базі GNSS.

Дана праця містить упорядкований аналіз параметрів роботи кінематичного позиціонування у дійсному часі, а також проведено апробацію процедури визначення початкових фазових значень (швидкість досягнення стійкого визначення неоднозначностей – Ambiguity Resolution) та рівня точності визначення координат (PE – Position Estimation), спираючись на отримані дані GNSS-вимірювань.

Нижче подано опис основних показників ефективності, що стосуються швидкості фіксації невизначеностей та отримання RTK-рішень.

Після цього прокоментовано лінійні математичні апарати, що використовуються для знаходження цих невизначеностей та визначення координат, а саме, з огляду на застосування як широкосмугових, так і вузькосмугових груп сигналів.

Це дасть змогу продемонструвати, як вибір конкретних моделей та методів впливає на точність.

На завершення, будуть розглянуті кількісні дані, здобуті в ході тестів із комерційними та експериментальними RTK-установками на

різноманітних базах, використовуючи повні денні записи у форматі RINEX (Receiver Independent Exchange Format).

Наприкінці ж, було підбито підсумки головних здобутків, отриманих у процесі аналізу продуктивності RTK-визначення місцезнаходження, та сформульовано заключення стосовно дієвості використання новітніх GNSS-систем.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТИВНОСТІ

1.1 Системи кінематичного позиціонування в режимі реального часу

Система кінематичного позиціонування у добу реальному часі (RTK — англ. Real-Time Kinematic) — це ансамбль апаратурних та програмних складників.

Він охоплює постійно діючу розгалужену мережу референцних GNSS-станцій, центральний вузол для обробки отриманих відомостей, а також шляхи сполучення для обміну даними між цими станціями, сервером та кінцевими споживчими пристроями.

Завдяки такій будові можливе формування та надсилання у режимі реального часу коригувальних даних (диференціальних поправок), що дає змогу вимірювати географічні координати з винятковою точністю.

Фундаментальна частина системи RTK, як правило, складається з однієї чи кількох постійно розташованих станцій (баз), які взаємодіють через сервер мережі.

Цей сервер відповідає за комплектування, аналіз та подальше доведення виправних відомостей.

Надсилання цих поправок до приймачів кінцевих споживачів реалізується за допомогою галузевих стандартів, типово формату RTCM (що розшифровується як Radio Technical Commission for Maritime Services), використовуючи стільникові мережі або будь-які інші сучасні цифрові шляхи комунікації.

Типова апаратура користувача зазвичай охоплює GNSS-приймач з функціоналом RTK-визначення координат, апаратуру для отримання поправок, а також панель керування та програмне забезпечення, де RTK-результати або напряду вбудовуються, або слугують вихідними даними для

застосунків (таких як геодезичні виміри, земельно-кадастрові роботи, системи управління технікою тощо).

Щоб всебічно оцінити, наскільки ефективно працює RTK-система, слід брати до уваги набір основних характеристик, які безпосередньо формують точність та надійність визначення місця розташування.

Ключовим критерієм виступає проміжок у просторі, що розділяє базову вишку та приймач кінцевого споживача (ровер), — цей проміжок диктує максимальний радіус зони, де послуга RTK працюватиме належним чином.

У межах такого охоплення базова станція має можливість транслювати потік даних RTCM без критичного збільшення часу затримки, завдяки чому приймач може розраховувати RTK-координати для кожного моменту фіксації даних.

Якщо ж мова йде про мережевий варіант RTK, то еквівалентним має значення проміжок між будь-якими двома сусідніми опорними геодезичними пунктами цієї мережі.

Щодо конфігурацій мереж, зокрема систем, що використовують віртуальну опорну станцію (BPC), дистанцію (позначимо її як D) між базовою та рухомою станціями можна вирахувати, спираючись на відстань між станціями, яку ми позначимо як S .

З практичної точки зору, зазвичай вважається, що величина D становить приблизно 57,7% від значення S .

Як ілюстрація: якщо відстань між станціями дорівнює 70 кілометрів, то відповідна гранично допустима відстань між віртуальною базою та ровером обмежується приблизно 40 кілометрами.

Ліміт на робочу дистанцію передусім визначається просторовими змінами в затримках, спричинених іоносферою, чий вплив посилюється пропорційно зростанню рознесення між приймачами.

Окрім того, наявні тропосферні похибки, які не були усунені навіть після застосування моделей для корекції атмосфери, також відіграють свою роль.

Вплив неточностей у ефемеридах супутників, що транслюються у широкомовному режимі, здебільшого не такий суттєвий, і у переважній більшості практичних сценаріїв ними цілком можна нехтувати.

У цілому, RTK-систему розцінюють як більш потужну, коли вона здатна підтримувати стійкість визначення координат на більш віддалених дистанціях між опорною станцією та мобільним приймачем.

Однією з ключових метрик у контексті продуктивності є пунктуальність отримання повідомлень RTCM, що вимірюється у часовій відстані від генерації виправлень до їх застосування приймачем для розрахунку позиції.

Щоб нівелювати цей часовий лаг, апаратне забезпечення користувача мусить екстраполювати ці поправки на поточну мить, до якої якраз і обчислюється фінальне RTK-рішення.

Сукупна тривалість затримки при пересиланні відомостей охоплює інтервал часу, потрібний для опрацювання даних на головній точці чи у вузлі мережі, усі проміжки часу, витрачені на рух інформації між точками та головним комп'ютером, а також час, необхідний для надходження виправлень до апарату кінцевого користувача.

Як правило, у більшості робочих систем загальна затримка перевищує за одну, сягаючи кількох секунд, і це значною мірою визначається робочими обставинами та властивостями лінії зв'язку.

Ще однією опцією, що має тісний зв'язок із часом затримки, є швидкість, з якою посилаються виправлювальні дані, як правило, це 1, 5 чи 10 оновлень за секунду.

Для умов, де об'єкт рухається активно і є потреба у частих корекціях координат та збільшенні точності визначення його позиції у цю ж мить, потрібна більша частота цих оновлень.

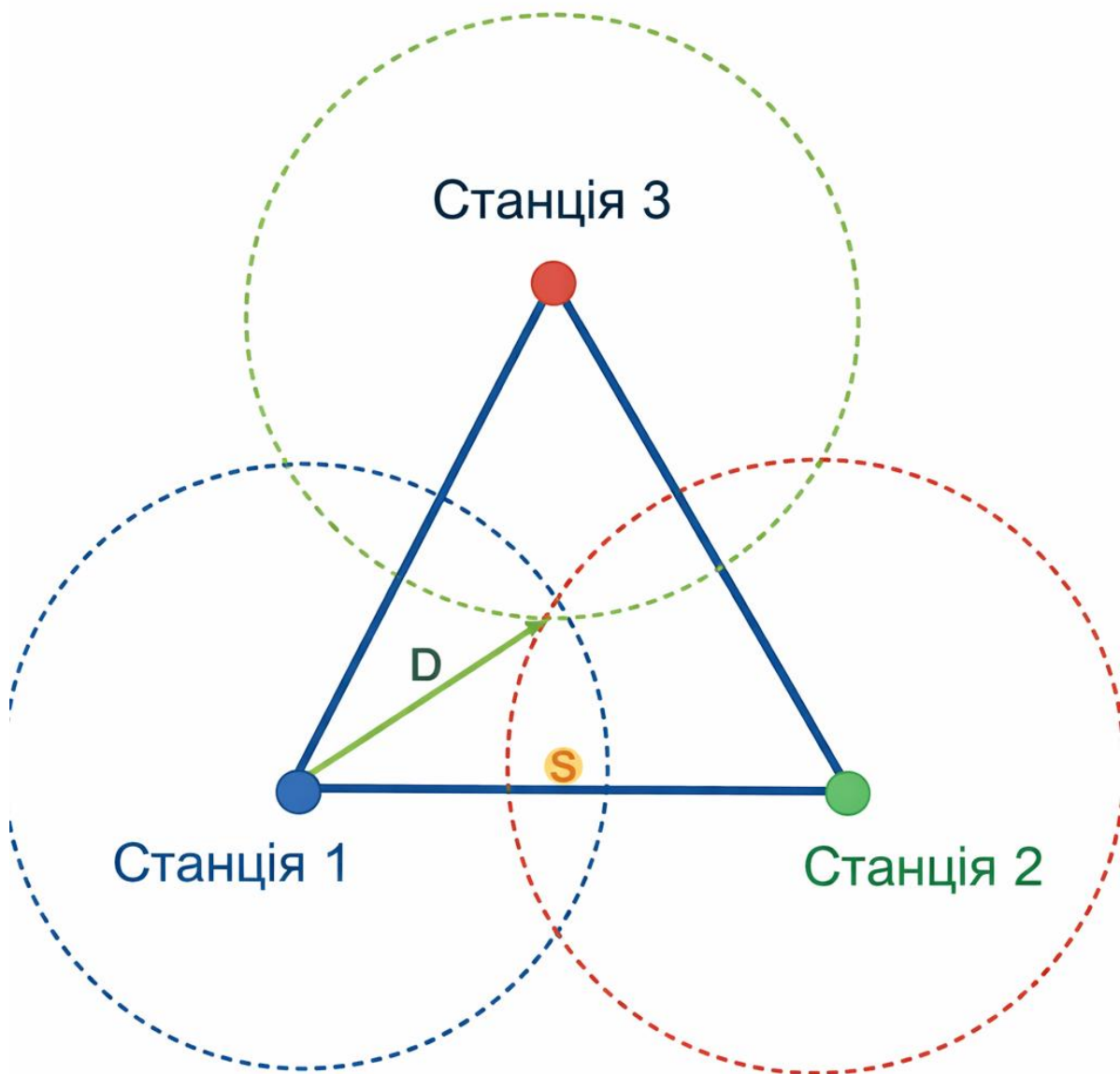


Рисунок 1 Зв'язок міжстанційної відстані S та еквівалентної відстані між базовою станцією і ровером D

Нижчеописані показники слугують для визначення якості роботи системи кінематичного позиціонування в режимі реального часу (RTK) на загальносистемному рівні.

Однак, якщо дивитися з точки зору кінцевого користувача, ефективність послуги RTK можливо оцінити за допомогою низки інших числових характеристик.

Ці характеристики, у свою чергу, обумовлені робочими параметрами самої системи, середовищем, в якому проводяться вимірювання, а також архітектурою розгорнутої мережі базових станцій.

Ключовою рисою слугує відрізок часу, потрібний задля досягнення першого підтвердженого визначення місця розташування (Time To First Fix, TTFF).

Оцей показник вказує на тривалість, яку вимагає успішне подолання необхідної кількості цілочисельних невизначеностей у системі лінійних рівнянь, що є передумовою для подальшого обчислення координат споживача.

У наукових працях його також можуть іменувати як «час на залагодження неоднозначностей» (Time To Ambiguity Fix) чи «період стартування» для RTK-установок.

Термін "час до появи однозначності" (або "час фіксації невизначеностей") є ширшим поняттям, яке використовується тоді, коли значення цілочислових параметрів встановлюються та закріплюються окремо для кожної часової доби (епохи), ґрунтуючись на даних спостережень, отриманих у цій чи попередніх епохах.

Найкращим сценарієм функціонування системи RTK вважається стан, коли для всіх фазових вимірювань поточної епохи, оброблених подвійною диференціацією, значення цілочислових невідомих визначено коректно.

Такий стан забезпечує найкраще зменшення помилок у визначенні координатних значень після того, як стаються стрибки фази або відбувається втрата зв'язку із супутниками.

Водночас, у реальних обставинах, може бути доречним використання часткового усунення невизначеностей.

Тут ключовим моментом стає, чи є фазові вимірювання з частково визначеними невизначеностями спроможними гарантувати стійку та високу точність визначення місця розташування користувача.

Далі, не менш значущим параметром виступає темп вирішення невизначеностей, або ж швидкість їх фіксації.

Цей показник ілюструє оперативну спроможність системи й обчислюється як відношення кількості періодів, коли цілочисельні невизначеності були успішно закріплені.

Можливість швидкого визначення невідомих цілих чисел інколи може бути обмежена через гіршу конфігурацію супутників, малу кількість супутників, які потрапляють у зону видимості, або відчутний вплив неврахованих помилок, спричинених іоносферою та тропосферою.

Зазвичай, показник доступності цього швидкого визначення вимірюється як співвідношення епох, де цілочисельні невідомі подвійної різниці (DD) були успішно визначені, до загальної кількості часових відрізків протягом одного сеансу вимірювань.

Варто підкреслити, що процедура перевірки цілочисельних результатів іноді дає збій: трапляються ситуації, коли некоректні дані приймаються, або ж коректні відкидаються.

З огляду на це, запроваджується така характеристика, як показник довіри до фіксації невизначеностей, або ж коефіцієнт успішності у розв'язанні неоднозначностей.

Він розраховується як частка правильно визначених цілочисельних невизначеностей, виражена у відсотках від загальної кількості зафіксованих значень.

У певних наукових роботах цей параметр трактується як співвідношення кількості періодів спостереження, де фіксація

невизначеностей була абсолютно бездоганною, до сумарної тривалості сесії спостереження.

Окрім того, що ми розглядаємо, як швидко виявляються невизначеності, надзвичайно вагомим елементом є дослідження ефективності визначення положення за допомогою технології RTK, коли задіяні фазові вимірювання, обчислені з подвійною різницею, і коли неоднозначності вже вирішені.

За своєю суттю, визначення координат у режимі RTK має багато спільного з тим, як розраховуються положення у автономному режимі за допомогою кодових вимірювань, а це, своєю чергою, дає змогу використовувати схожі метрики для оцінки якості.

Ступінь наближеності обчислених координат користувача до його еталонного, або ж "справжнього", значення, здобутого за допомогою незалежної, більш точної методики, і зветься точністю RTK-визначення положення.

Як правило, точність, досягнута за допомогою RTK, виражається у вигляді залежності від відстані, що розділяє базову станцію та рухому одиницю (ровер), наприклад: $\sigma = 1,0\text{см} + 0,5\text{ppm}$.

Що стосується точності, показник доступності RTK-визначення положення вказує на відсоток часового інтервалу, протягом якого користувачеві надаються координати з певною точністю, при цьому не має значення, чи були неоднозначності розв'язані як фіксовані, чи як плаваючі.

З погляду стійкості роботи RTK-систем, надійність позиціонування визначається за показником швидкості фіксації неоднозначностей, який являє собою ту частку часу, коли визначення місця розташування ґрунтується виключно на фазових вимірюваннях, де на кожному кроці (в кожній епосі) цілочисельні неоднозначності визначені коректно.

Припускається, що подібні висновки дають потрібну точність.

Необхідно зосередитися на цілісності RTK-визначення місця розташування, яка демонструє, наскільки можна покладатися на дані, що видаються системою.

Сутність цілісності полягає у можливості RTK-служби вчасно повідомити споживача про випадки, коли апаратне забезпечення непридатне для очікуваного застосування.

Наприклад, апаратна платформа з функцією моніторингу цілісності здатна подати сигнал про перевищення реальних похибок у визначенні координат допустимих меж горизонтального та вертикального захисних рівнів (HPL/VPL) у межах заданого часу до сповіщення (TTA) при встановленому ризику цілісності (IR).

Ризик цілісності RTK визначається як імовірність того, що система перебуває в аномальному стані (наприклад, через неправильну фіксацію неоднозначностей), але при цьому не сигналізує про перевищення допустимих похибок.

Ще одним важливим показником є безперервність RTK-позиціонування, яка описує здатність системи забезпечувати заданий рівень сервісу протягом визначеного експлуатаційного періоду та за конкретних умов.

На безперервність безпосередньо впливають як час ініціалізації, так і доступність та надійність швидкість фіксації неоднозначностей.

Даний показник має надзвичайну вагу для клієнтів, чутливих до перебоїв у роботі послуг.

Приміром, у секторі видобутку корисних копалин та у сфері цивільного будівництва гранично допустимий термін припинення обслуговування RTK, як правило, не повинен перевищувати 1–2 хвилини протягом доби, що еквівалентно рівню безперебійної роботи приблизно 99,9 %.

Описані тут параметри можуть бути використані як у сукупності, так і окремо, з метою визначення ефективності роботи RTK-комплексів.

Серед усіх цих критеріїв, найбільшу практичну цінність для фахівців, які використовують ці системи, становлять: дистанція, що розділяє базову станцію та приймач (ровер), часовий інтервал, необхідний для вирішення невизначеностей, а також надійність і темпи вирішення цих невизначеностей, ступінь доступності та точність, з якою здійснюється просторове визначення (позиціонування) за допомогою RTK.

Тим часом, ідея цілісності набуває першочергового значення у випадках, де йдеться про підвищену відповідальність, наприклад, при впровадженні автоматизації у сфері агротехніки чи будівельних робіт, де дозволені відхилення HPL та VPL можуть вимірюватися всього кількома сантиметрами.

При цьому, переважна частина нині доступних на ринку RTK-систем у технічних описах досі не розкриває повного спектру показників їхньої функціональності.

З огляду на вищевикладене, ретельне вивчення робочих параметрів RTK-систем стає обов'язковою умовою для прийняття зваженого рішення щодо вибору найкращого варіанту, здатного задовольнити специфічні потреби конкретних завдань у частині забезпечення необхідної точності, рівня доступності, безперервності роботи та цілісності даних.

2. ЛІНІЙНІ РІВНЯННЯ ДЛЯ РОЗВ’ЯЗАННЯ ФАЗОВИХ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ШИРОКОСМУГОВИХ ТА ВУЗЬКОСМУГОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

У проблематиці кінематичного визначення координат у дійсному часі (РТК) одне з найважливіших питань полягає у правильному та стійкому визначенні цілих значень фазових невідомих у вимірах.

З цією метою застосовуються рівняння спостережень, які були лінеаризовані; ці рівняння конструюються на базі оцінок псевдодальностей та фаз сигналів від супутників, що використовуються.

Для стандартної схеми реалізації РТК з однією станцією (базовою) та одним мобільним приймачем (ровером), лінеаризовані співвідношення для спостережень створюються шляхом використання апаратів подвійних різниць у цих вимірах.

Завдяки такому методу досягається успішна елімінація або суттєве зниження впливу помилок, спричинених нестабільністю годинників як на супутниках, так і на приймальній апаратурі, а також часткова нейтралізація розбіжностей, пов'язаних з орбітальними параметрами та атмосферними явищами.

Згідно з цим підходом, задіяні псевдовипадкові коди обох типів – первинний (P1, він же C/A) та вторинний (P2), разом із вимірюваннями фази носіїв, отриманими на частотних діапазонах L1 і L2.

Як наслідок формування подвійних різниць для групи з n супутників, система рівнянь спроможна бути виражена у векторній формі розмірності $n \times 1$, що значно спрощує процес подальшої математичної інтерпретації та визначення невідомих параметрів.

Рівняння спрощуються (лінеаризуються) стосовно початкового (апріорного) припущення про розташування ровера.

Завдяки цьому формується модель спостережень, яка відображає кореляцію між поправками у координатах, не виправленими похибками, спричиненими атмосферою, та цілими значеннями фазових невизначеностей.

Саме у такому форматі ці рівняння слугують фундаментом для використання методології найменших квадратів і наступного визначення як позиції, так і невідомих цілочисельних фазових значень.

Для того, аби зробити процес розв'язання невизначеностей у актуальних RTK-методиках більш дієвим, активно використовують лінійні поєднання вимірів фаз, а саме: ті, що стосуються широкої смуги, та ті, що належать до вузької смуги.

Комбінації широкої смуги мають більшу ефективну довжину хвилі, що полегшує початкове визначення цілочисельних невизначеностей, особливо якщо йдеться про значні відстані між точками.

Натомість, комбінації вузької смуги дають змогу досягти вищої точності після того, як невизначеності закріплені, проте вони більш схильні до впливу залишків помилок.

Отож, вибудовування та дослідження спрощених рівнянь, що описують спостереження для вимірювань коду та фази, а також застосування як широкого, так і вузького спектру комбінацій сигналів, закладають концептуальний фундамент для впевненого подолання проблеми невизначеності фази та здобуття субсантиметрової точності при визначенні місця розташування за допомогою технології RTK.

Нижче, у наступних параграфах, буде представлено формалізований вираз цих рівнянь та проаналізовано їхні характеристики стосовно ефективності та стійкості методів їх опрацювання.

2.1 Подвійні різниці кодових та фазових спостережень

Щодо задачі RTK, що оперує однією базовою станцією, то після того, як ми отримали подвійні різниці (DD), лінеаризовані рівняння спостережень для вимірювань кодової псевдодальності та фази носія набувають такого вигляду:

Кодові спостереження (P1, P2):

$$\Delta\nabla P_f^{ij} = \mathbf{A} \delta\mathbf{x} + \Delta\nabla T^{ij} + \Delta\nabla I_f^{ij} + \varepsilon_{P_f}^{ij}, \quad f = 1, 2$$

Фазові спостереження (L1, L2):

$$\Delta\nabla L_f^{ij} = \mathbf{A} \delta\mathbf{x} + \Delta\nabla T^{ij} - \Delta\nabla I_f^{ij} + \lambda_f \Delta\nabla N_f^{ij} + \varepsilon_{L_f}^{ij}, \quad f = 1, 2$$

де:

- $\Delta\nabla$ — оператор подвійної різниці;
- P_f^{ij} — кодова псевдодальність на частоті f ;
- L_f^{ij} — фазове спостереження (у метрах);
- $\mathbf{A}$ — матриця коефіцієнтів геометрії (матриця напрямних косинусів);
- $\delta\mathbf{x} = [\delta X, \delta Y, \delta Z]^T$ — поправки до координат ровера;
- T^{ij} — залишкові тропосферні похибки;
- I_f^{ij} — іоносферні похибки на частоті f ;
- λ_f — довжина хвилі сигналу на частоті f ;
- N_f^{ij} — цілочисельна фазова неоднозначність;
- ε — шум вимірювань та мультипас.

2.2 Матричний запис системи рівнянь

Щодо n супутників, система рівнянь у векторному вигляді виглядає наступним чином:

Код:

$$\mathbf{y}_{P_f} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \mathbf{T} + \mathbf{I}_f + \boldsymbol{\varepsilon}_{P_f}$$

Фаза:

$$\mathbf{y}_{L_f} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \mathbf{T} - \mathbf{I}_f + \lambda_f \mathbf{N}_f + \boldsymbol{\varepsilon}_{L_f}$$

де $\mathbf{y}$ являє собою вектор, що містить розбіжності між виміряними та попередньо розрахованими відстанями у просторі.

2.3 Широкопосмугова та вузькопосмугова комбінації

Широкопосмугова комбінація:

$$L_{WL} = L_1 - L_2$$

$$\lambda_{WL} = \frac{c}{f_1 - f_2}$$

$$N_{WL} = N_1 - N_2$$

Лінеаризоване рівняння:

$$\Delta \nabla L_{WL} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \Delta \nabla T - \Delta \nabla I_{WL} + \lambda_{WL} \Delta \nabla N_{WL} + \boldsymbol{\varepsilon}_{WL}$$

Вузькопосмугова комбінація:

$$L_{NL} = L_1 + L_2$$

$$\lambda_{NL} = \frac{c}{f_1 + f_2}$$

$$N_{NL} = N_1 + N_2$$

Лінеаризоване рівняння:

$$\Delta \nabla L_{NL} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \Delta \nabla T - \Delta \nabla I_{NL} + \lambda_{NL} \Delta \nabla N_{NL} + \varepsilon_{NL}$$

Окремі лінеаризовані рівняння формуються для кожної епохи спостережень.

Внаслідок цього, параметри стану користувача, включно з фазовими неоднозначностями, оцінюються, а за потреби, обмежуються виключно тими вимірюваннями, що належать поточній епосі.

Завдяки такій методології вдається досягти кінематичних визначань позиції у режимі реального часу, виключаючи потребу у будь-яких додаткових постулатах стосовно безперервності фазових даних чи сталості частоти дискретизації.

Моделювання виступає першочерговою та вирішальною стадією у роботі системи кінематичного визначення просторового положення (позиціонування) у дійсному часі.

Цей етап передбачає формування необхідних сукупностей вимірів (комбінацій та різниць), впровадження геометричних та фізичних обмежень, серед яких значущими є відомі координати вихідних точок (базових станцій) та цілочисельне значення невизначеності фаз, а також інтегрування поправок, що стосуються затримок сигналу через іоносферу та тропосферу.

Правильне моделювання значно нівелює систематичну складову похибок і закладає фундамент для стабільного визначення координат.

Ключовим елементом даної процедури є застосування стохастичного моделювання, що дозволяє сформулювати статистичні очікування стосовно помилок, що залишаються, і шуму, властивого вимірювальним даним.

Як правило, подібні невдачі характеризуються відповідно до моделей шумових процесів, які є білим шумом і мають нульове середнє значення.

При цьому існує можливість обліку взаємозв'язків (кореляцій) між даними, отриманими у різні часові інтервали.

Якісне відображення стохастичної природи вимірювань має прямий вплив на точність, з якою визначаються параметри, а також на успішність вирішення проблем, пов'язаних із неоднозначністю визначення фази.

Далі, необхідно здійснити вирішення невизначеностей щодо фази й одразу ж визначити розташування споживача (це називається Оцінювання Позиції, або PE).

Для досягнення цієї мети використовуються різноманітні методики фіксації цих неоднозначностей, серед яких варто виділити підхід найменших квадратів із декореляцією (як-от LAMBDA) або ж алгоритми, спрямовані на знаходження мінімумів серед набору потенційних цілочисельних варіантів.

Сучасні RTK-установки отримують значну перевагу від впровадження модифікованих чи більш ефективних реалізацій подібних методів.

Сам процес визначення виходу складається, по суті, з двох ключових частин: апарату для оцінювання, що базується на мінімізації квадратів, та алгоритму пошуку дискретних значень.

На відправній точці цей апарат створює первинні, так звані «плаваючі» (нецілочисельні) величини для параметрів стану та невизначеностей фази, а також матрицю, що описує кореляцію цих величин.

Далі, ці дані передаються на вхід процедури цілочисельного пошуку, котрим визначається та верифікується найбільш вірогідний набір цілих значень для цих неоднозначностей.

У випадку успішної фіксації цих дискретних значень здійснюється фіналізація визначення положення, вже з істотно вищим рівнем точності.

У практичних застосуваннях особливої важливості набувають дії, спрямовані на мінімізацію ефекту багатопроменевості, а також запровадження методик верифікації та гарантування достовірності вхідних даних протягом усього циклу моделювання та подальшої обробки.

Запровадження подібних кроків суттєво зміцнює стійкість та достовірність результатів, отриманих за допомогою технології RTK, особливо у скрутних умовах збору інформації.

Слід зазначити, що загальна продуктивність системи кінематичного визначення координат у режимі безперервного часу значною мірою залежить від тонких нюансів у розробці та впровадженні алгоритмів, які застосовуються для обробки даних.

Окремі програмні розробки демонструють вищий рівень віддачі завдяки вдосконаленим методам пошуку серед цілих чисел, у той час, як інші надають переваги завдяки більш вивіреному детермінованому та випадковому моделюванню.

Найбільш ефективні програмні пакети знаходять золоту середину між цими методологіями, що набуває неабиякої ваги для сучасних GPS-систем, де для подолання невизначеності фази звично оперують лише сигналами на частотах L1 та L2.

3. АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ RTK-РІШЕНЬ

У цій частині представлено висновки числових досліджень щодо функціональності тих рішень кінематичного позиціонування у плинні реального часу (RTK), які були здобуті як завдяки комерційній RTK-установці, так і з допомогою усовершенствованих методів обробки, про які йшлося раніше.

Оцінка здійснювалася на основі набору критеріїв ефективності, перелічених у розділі 2, а саме: часовий інтервал, необхідний для закріплення невизначеностей фази, можливість і стійкість їхнього вирішення, а також ступінь точності визначення координат у площинах горизонталі та вертикалі.

Ключовим завданням цього аналізу є з'ясування, як саме довжина опорної лінії, якість реєстрованих даних та обрані методики обробки впливають на кінцеві результати RTK-визначення місцезнаходження, а також встановлення кореляції між окремими параметрами роботи системи.

3.1 Продуктивність RTK системи

З метою здійснення оцінки ефективності, ми залучили комерційний зразок системи високоточної кінематичної локації у форматі RTK (HD-RTK), що була нам надана для дослідницьких потреб.

Це забезпечило можливість ілюструвати основні характеристики роботи RTK-системи, а також відповідно, показати методику їхнього визначення через експериментування та взаємозв'язок між цими характеристиками.

Експериментальні відомості були зібрані шляхом застосування двох приймачів GNSS моделі NovAtel, які функціонували у схемі "базова станція – рухома точка".

Вимірювання супутникової системи GPS проводились на семи фіксованих відрізках, що простягалися на відстані від 2,5 до 31 кілометра, у межах міста Львів.

Здобуті дані були піддані обробці за допомогою програмного комплексу HD-RTK, де застосовувалися усталені методики для усунення початкових невизначеностей фази та визначення координат.

На рисунку 2 відображено, як час, потрібний для досягнення стабільного рішення, змінюється залежно від довжини базової лінії у вивчених експериментальних умовах.

Якщо проаналізувати отримані дані, стає очевидним, що час для початку роботи (ініціалізації) RTK-рішень збільшується зі зростанням дистанції між опорною станцією та рухомим приймачем.

Це цілком відповідає теоретичним очікуванням щодо того, як помилки, спричинені іоносферою та тропосферою, впливають на процес фіксації фазових невизначеностей.

Точність визначення координат за допомогою RTK, виражена через стандартне відхилення (STD) для горизонтальної та вертикальної площин, представлена на рисунку 3.

Отримані дані цілковито підтверджують заявлені експлуатаційні параметри системи.

Зокрема, зафіксовано досягнення горизонтальної точності в межах 1 см із додатковим допуском 0,5 частин на мільйон (ppm) і вертикальної точності, що наближається до 2 см плюс коефіцієнт 1 ppm.

Водночас, вертикальні складові координат демонструють дещо вищу мінливість.

Це є звичним явищем у сфері високоточного супутникового позиціонування (GNSS) і пояснюється особливостями розташування супутників та впливом некомпенсованих атмосферних похибок.

У підсумку, отримані результати випробувань свідчать про значну стійкість та продуктивність HD-RTK-системи при роботі на різноманітних базах, а також легітимізують застосування проаналізованих критеріїв оцінки для всебічного визначення якості RTK-продуктів у реальних геодезичних та будівельних роботах.

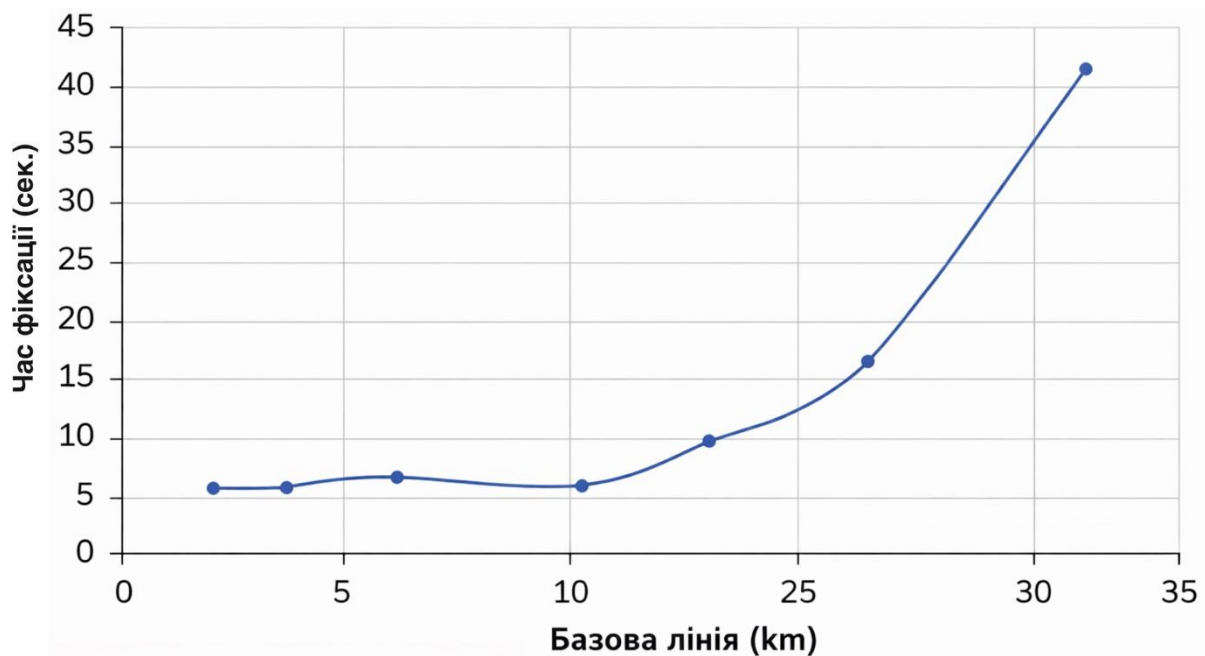


Рисунок 2. Залежність часу фіксації від базової лінії

Окрім вивчення часових витрат на запуск, у рамках цього дослідження також було проведено апробацію того, наскільки надійно та стабільно вдається зафіксувати невизначеності фази, і як це залежить від відстані між приймачами.

Для цілей цього ми застосували реальні GPS-виміри, отримані вздовж 16 нерухомих ліній, базова довжина яких коливалася від 2 до 45 кілометрів, а час реєстрації даних сягав від 60 до 400 годин.

Кожен масив даних піддавався окремій обробці з кроком у 300 секунд, завдяки чому ми отримали більш ніж 250 000 незалежних визначень RTK.

Такий метод дозволив сформувати вибірку, достатню для статистичної достовірності, і водночас суттєво зменшив вплив непередбачуваних елементів, таких як розташування супутників, стан атмосфери та рівень шуму у вимірювальних даних.

З огляду на значну кількість проаналізованої інформації, досягнуті метрики щодо того, наскільки добре система фіксує фазові невизначеності та наскільки вона є надійною, дають змогу формувати ґрунтовніше та всебічніше уявлення про ефективність роботи випробуваної комплектації RTK.

Конкретно, отримані наслідки демонструють фактичний потенціал системи в плані усталеного здобуття фіксованих результатів при різноманітних дистанціях між базою та ровером, і ці дані придатні для проведення зіставлення з іншими підходами до RTK або ж із відмінними методами обробки даних.

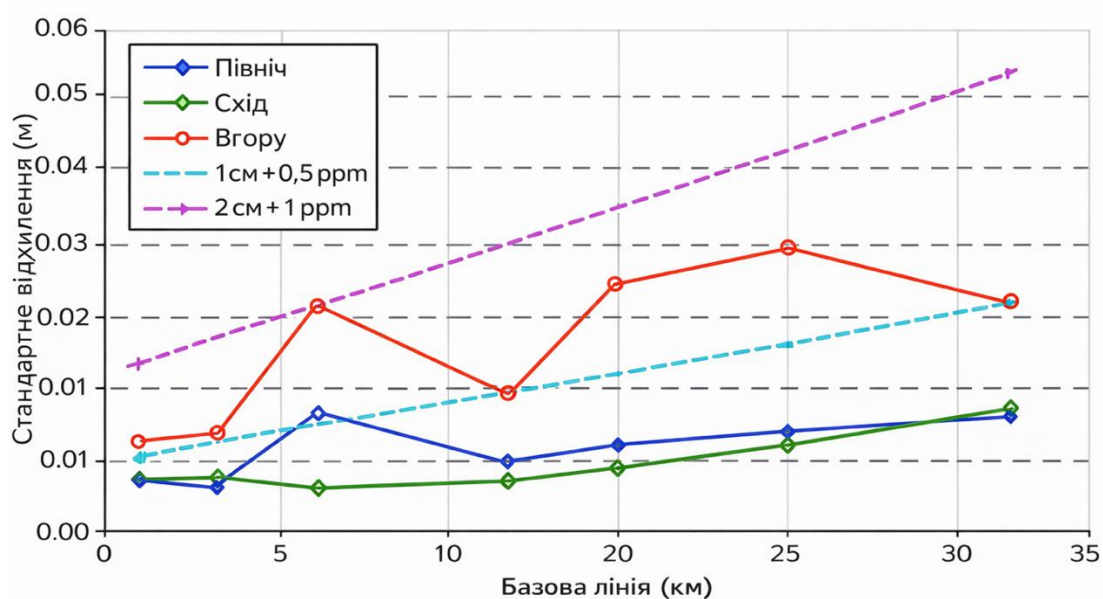


Рисунок 3 Точність RTK при зніманні базової лінії

На рисунку 4 відображено, як змінюється можливість успішного визначення фазових невизначеностей залежно від протяжності базису вимірювання, тоді як рисунок 5 ілюструє зв'язок між достовірністю цього визначення і тією ж самою величиною.

Зіставлення представлених діаграм дає змогу виявити як спільні аспекти, так і розбіжності у цих двох метриках ефективності роботи системи.

Дослідження отриманих даних вказує на те, що рівень достовірності визначення фазових неоднозначностей необов'язково поступається їхній доступності.

У певних ситуаціях, навіть коли частота знаходження коректних визначень знижується, точність їх фіксації зберігається досить високою.

Це слугує доказом того, що можливість отримати визначення та його коректність є взаємозалежними, проте ця пара характеристик не є тотожною.

Однак, простежується певний загальний напрямок: чим більшою є довжина відрізка, що слугує базою, тим меншою стає як імовірність, так і міцність закріплення фазових невідомих.

Така залежність зумовлена тим, що похибки, викликані залишками змін в іоносфері та тропосфері, накопичуються; погіршується кореляція між інформацією, зібраною базовою станцією та приймачем, а також ускладнюється геометричне розміщення, що чинить вплив на процес розв'язання задачі визначення фазових невідомих величин.

Отримані результати підкреслюють, наскільки важливим є вибір довжини базової лінії для оцінки ефективності функціонування систем RTK, а також сигналізують про необхідність впровадження рішень типу мережевий RTK або ж удосконалення методів опрацювання даних задля забезпечення надійної фіксації невідомих на великих відстанях.

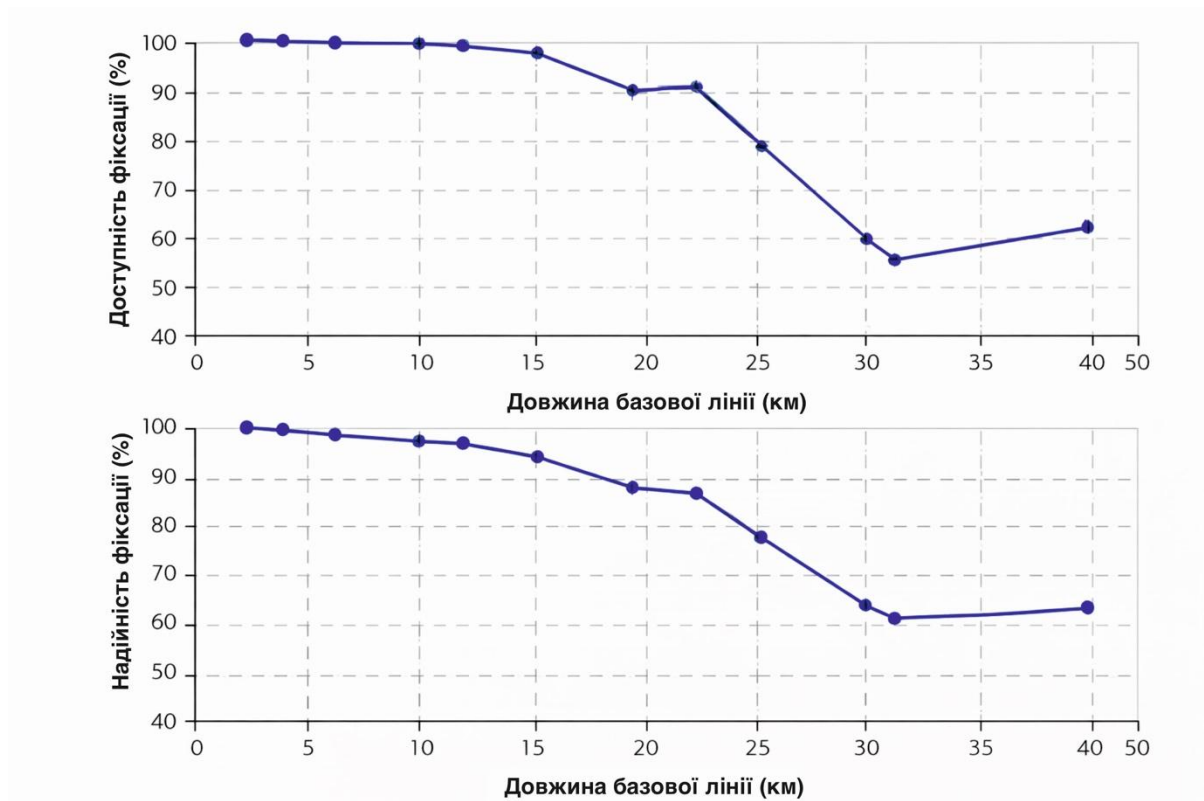


Рис. 4. Графіки доступності фіксації неоднозначностей та надійності

Підсумовуючи висновки, отримані з проведених експериментів, доцільно констатувати, що система виявляє відмінні показники ефективності стосовно завдань кінематичного позиціювання, які виконуються у часі реального перебігу подій.

Здобуті дані чітко демонструють здатність апаратної платформи надавати миттєві рішення RTK (Real-Time Kinematic) на відрізках вимірювань до двадцяти кілометрів, а також підтримувати стабільне, "зафіксоване" визначення координат шляхом вирішення невизначеностей фази на дистанціях, що досягають п'ятдесяти кілометрів.

Ступінь довіри до закріплення неоднозначностей фази для зафіксованих розв'язків перевищує дев'яносто дев'ять відсотків при малих базах (до двадцяти кілометрів) і тримається на рівні приблизно дев'яноload вісім відсотків навіть на далеких лініях зв'язку (п'ятдесят кілометрів), чим

доводиться значна стійкість використаних методів обробки даних у ситуаціях з ускладненими умовами прийому сигналів.

Щодо визначення координат для стаціонарних розв'язків із цілими числами, їхня похибка сягає близько $1 \text{ см} + 0,5 \text{ частки на мільйон (ppm)}$ у горизонтальній проєкції та $2 \text{ см} + 1 \text{ ppm}$ по висоті, що цілком задовольняє критеріям, необхідним у сфері високоточного геодезичного, будівельного та земельно-кадастрового забезпечення.

Сформовані показники роботи системи виявилися більш змістовними та вагомими для тих, хто безпосередньо користується обладнанням, порівняно зі звичайними значеннями, заявленими у технічних описах переважної більшості комерційних рішень на базі RTK.

Це, своєю чергою, обґрунтовує застосування апаратно-програмного комплексу RTK у робочих умовах, де критично важливими чинниками є досяжна висока точність, стійкість функціонування та незмінність якості динамічного визначення позиції навіть на великих відстанях між приймачами.

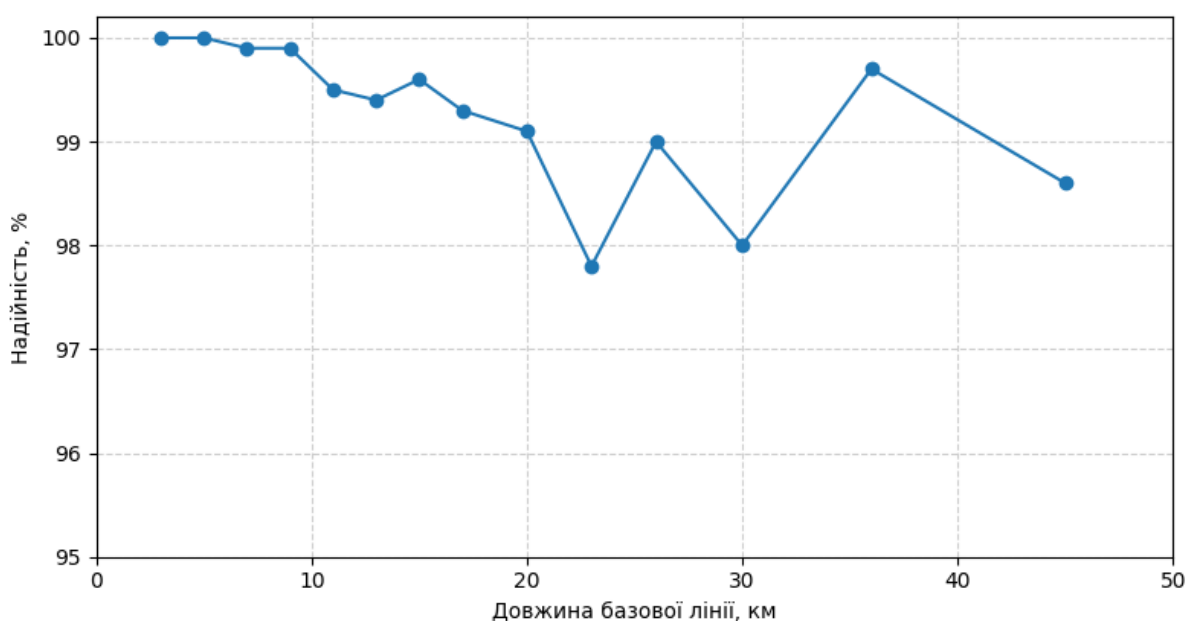


Рисунок 5 Залежність надійності від довжини базової лінії

3.2 Аналіз продуктивності запропонованих моделей та алгоритмів РТК-позиціонування

Застосування спеціалізованого програмного забезпечення для визначення кінематичних координат у темпі реального часу дає змогу ретельно перевіряти робочі параметри різноманітних моделей оцінки, методів усунення невизначеності фази, стохастичних засад та підходів до обробки інформації, звіряючи їх із критеріями ефективності, окресленими у другому розділі.

У рамках нашої роботи акцент зроблено на зіставленні початкової моделі, яка оперує безпосередньо фазовими даними на частотах L1 та L2, із більш складною моделлю, розробленою на базі лінійних комбінацій фазових вимірювань, охоплюючи як широкосмугові (зокрема $L(1,-1)L(1,-1)$), так і вузькосмугові (як-от $L(4,-3)L(4,-3)$) варіанти.

Використання подібних комплексів має, як очікується, покращити успішність подолання фазових невизначеностей, що досягається за рахунок подовження робочої довжини хвилі та мінімізації відносного впливу затримки, спричиненої іоносферою.

Згідно з теорією, застосування як широкого, так і вузького діапазону частот має гарантувати більш високу вірогідність та оперативність у визначенні початкових фазових значень, якщо порівнювати це з прямим застосуванням сигналів L1 та L2.

Це особливо стосується довгих ліній зв'язку, де головними чинниками стають помилки іоносфери, що змінюються у просторі.

Найбільш виразними переваги цього методу будуть там, де закріплення цих невизначеностей здійснюється миттєво, тобто лише на основі даних, отриманих в один момент часу, без використання попередніх вимірювань.

З метою верифікації висунутих тез було проведено дослідження ефективності вирішення проблеми фазових невизначеностей та визначення просторового розташування споживача (PE), ґрунтуючись на датасетах для трьох різних еталонних сценаріїв.

Пріоритетними параметрами оцінки виступали стійкість закріплення фазових невідомостей, можливість отримання RTK-вирішень та точність координат, досягнута після одноразової обробки задачі невизначеності.

Першого 1. 06. 2021р. було зафіксовано три повні доби GPS-вимірювань, одержаних із постійно функціонуючої мережі референцних приймачів від SystemSolution.

Усі лінії, що розглядалися, мали напрямок "південь-північ", а частота взяття проб становила одну точку кожні п'ятнадцять секунд. Завдяки такому налаштуванню вдалося зменшити вплив чинників, пов'язаних із геометрією, і гарантувати коректне зіставлення результатів, здобутих різними підходами.

Зведені статистичні дані щодо ефективності, розраховані для початкової та модернізованої моделей відповідно для відрізків завдовжки 21, 56 та 74 кілометри, представлено у Таблицях 2 та 3.

Таблиця 2. Статистичні показники продуктивності RTK для різних базових ліній

Параметр	21 км	56 км	74 км
Загальна кількість епох	5760	5760	5758
Кількість епох з помилковими цілими значеннями	82	727	1309
Кількість фазових DD-вимірювань	72562	72452	72310
Кількість помилкових ширококутових/вузькокутових неоднозначностей	12 / 180	134 / 2487	143 / 4668

Успішність AR (широкосмугових / вузькосмугових, середнє)	99.97% / 99.50% (99.74%)	99.63% / 93.13% (96.38%)	99.60% / 87.09% (93.35%)
Доступність RTK (правильна фіксація неоднозначностей)	98.58%	87.38%	77.27%
Доступність RTK (точність 0.025 / 0.025 / 0.05 м)	98.44% / 99.79% / 94.53%	84.81% / 90.73% / 90.90%	68.41% / 84.00% / 77.56%
Точність RTK (СКП X / Y / Z, м)	0.008 / 0.006 / 0.025	0.009 / 0.007 / 0.020	0.009 / 0.008 / 0.030

Таблиця 3. Статистичні показники продуктивності RTK (модель L1 та L2)

Параметр	21 км	56 км	74 км
Кількість епох	5760	5760	5758
Кількість епох з помилковими цілими неоднозначностями	123	1226	1877
Кількість фазових DD-вимірювань	72562	72452	72310
Кількість помилкових широкосмугових/вузькосмугових неоднозначностей	75 / 319	1158 / 4548	1671 / 7107
Успішність AR (широкосмугових / вузькосмугових, середнє)	99.79% / 99.12% (99.32%)	96.80% / 87.45% (92.12%)	95.38% / 80.34% (87.86%)
Доступність RTK (правильна фіксація неоднозначностей)	97.86%	78.66%	67.40%
Доступність RTK (точність 0.025 / 0.025 / 0.05 м)	98.14% / 99.10% / 94.32%	79.62% / 84.17% / 78.92%	58.98% / 75.22% / 65.18%
Точність RTK (СКП X / Y / Z, м)	0.008 / 0.006 / 0.025	0.008 / 0.007 / 0.020	0.009 / 0.008 / 0.031

Розгляд отриманих даних свідчить: чим довшою є базова лінія, тим значніше коливання надійності фіксації фазових невизначеностей та можливості отримання RTK-визначень залежать від того, яку саме модель спостережень було обрано.

При цьому розраховані показники спеціально створюють розбіжності між різними алгоритмами за однакових процедур обробки, і їхнє завдання — не презентувати найкращі можливі характеристики будь-якої окремої RTK-системи.

Слід мати на увазі, що при проведенні даного чисельного випробування було цілеспрямовано знехтувано певними додатковими компонентами моделювання, а саме: застосуванням загальновідомих обмежень на цілі числа та поглиблених методів стохастичного моделювання.

Подібна мінімізація складності дала змогу ясніше проаналізувати, як сама модель спостережень та спосіб подолання невизначеностей впливають на фінальні оцінки ефективності.

Водночас, цю саму методологію оцінки ефективності цілком слушно застосовувати й до дослідження інших імовірнісних моделей та підходів до роботи з даними GNSS.

Завдяки втіленню широких серій обчислювальних тестів за цією схемою, формується спільний ґрунт для зіставлення різноманітних алгоритмів RTK, що, своєю чергою, стимулює подальшу оптимізацію систем, призначених для високоточного визначення координат.

ВИСНОВКИ

У межах цієї дипломної роботи бакалавра було здійснено ґрунтовне вивчення експлуатаційних властивостей кінематичного позиціювання у дійсному часі (RTK) та процедур, пов'язаних із закріпленням фазових невизначеностей.

Під час реалізації дослідження було піддано аналізу низку важливих параметрів, серед яких: інтервал між референчною станцією та рухомим приймачем, оперативність отримання виправних даних (у форматі RTCM), тривалість, необхідна для досягнення першого стійкого розв'язку, показники доступності та стабільності фіксації фазових невизначеностей, загальна можливість отримання RTK-рішень, а також ступінь точності обчислення координат як у плані, так і за висотою.

Оцінені показники дають змогу проводити ґрунтовну й неупереджену експертизу роботи як RTK-систем загалом, так і специфічних варіантів вимірювань та методів опрацювання GNSS-інформації.

Розроблена методика дослідження дає змогу не лише зіставляти різні RTK-результати між собою, а й визначати їхню адекватність для впровадження у визначених геодезичних, будівельних та земельно-кадастрових роботах.

Продемонстровано, що ці параметри ефективності можуть слугувати доповненням до технічного опису комерційних RTK-комплексів.

Це суттєво полегшує користувачам процес підбору потрібного устаткування та програмного забезпечення, зважаючи на потреби у певному рівні точності, надійності та сталості визначення місця розташування.

Разом із цим, для виробників та споживачів відкривається можливість валідувати заявлені показники RTK-систем, проводячи

грунтовні експедиційні випробування у різноманітних умовах роботи та спостереження.

Взаємозв'язок між вивченими аспектами продуктивності та їх практичний прояв були показані на прикладі однієї RTK-системи.

Проведене статистичне дослідження GPS-вимірювань, зроблених для шістнадцяти нерухомих ліній завдовжки від двох до сорока п'яти кілометрів, а час вимірювань варіювався між шістдесятьма та чотирмастами годинами, засвідчило чудову результативність та стійкість функціонування цієї системи.

Це стосується низки аспектів, зокрема можливості використання, вагомості закріплення фазових невідомостей, а також точності визначення координат.

Додатково, згідно з результатами дослідження, отриманими завдяки обробці трьох парних комплектів GPS-вимірювань використання як широкосмугових, так і вузькосмугових зведень фазових даних дозволяє досягти кращої ефективності у визначенні початкових фазових невідомих, аніж при роботі із самими лише сигналами L1 та L2.

Ця перевага стає найбільш явною на віддаленостях понад 20 кілометрів, де значний вплив помилок, спричинених іоносферою, помітно ускладнює процес визначення цих фазових констант.

Отримані висновки засвідчують слушність застосування модернізованих систем моніторингу і методів опрацювання супутникових навігаційних даних, аби збільшити продуктивність RTK-визначення координат, і здатні слугувати як концептуальною, так і емпіричною базою для майбутніх наукових пошуків та інтеграції високої точності локалізації у сфері геодезії та землеустрою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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).

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**« Порівняльний аналіз різних методів GNSS-позиціонування для
геодезичних та землепорядних робіт в Україні »**

Обсяг пояснювальної записки: 43 аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)