

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Бойко Андрій
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
« Картографування складних лісових територій з використанням
інтегрованих технологій GNSS та LiDAR »
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

А. Бойко, студент групи ГЗ-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: ***к.т.н. доцент Володимир Романюк***
(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.

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Бойко Андрій

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Картографування складних лісових територій з використанням інтегрованих технологій GNSS та LiDAR»

керівник роботи: к.т.н. доцент Володимир Романюк

(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. Методи дослідження
2. Польові спостереження
3. Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Методи дослідження		
2	Польові спостереження		
3	Результати дослідження		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ ***Бойко А.***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ ***Романюк В.***

Анотація

Метою даної бакалаврської роботи є підвищення точності позиціонування мобільних систем лазерного сканування (MLS) у лісистій місцевості шляхом інтеграції інерціальних навігаційних систем (INS), глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) та алгоритмів SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

Актуальність теми:

У зв'язку з підвищеним попитом на точну інвентаризацію лісів і картографування природних ресурсів, технології мобільного лазерного сканування стають невід'ємною частиною сучасних геоінформаційних досліджень.

Проблема точного позиціонування у складних умовах, зокрема в лісових масивах, залишається актуальною через обмежену доступність сигналів GNSS.

Це зумовлює потребу в розробці ефективних інтегрованих рішень на основі комбінації SLAM, INS та GNSS.

Наукова новизна:

У роботі реалізовано та порівняно два підходи до покращення точності SLAM-орієнтованого позиціонування: SLAM з підтримкою курсу та розширений SLAM з урахуванням швидкості руху.

Вперше в межах польових лісових умов здійснено інтеграцію GNSS/INS-даних до SLAM-алгоритму з подальшим аналізом ефективності, що дозволило зменшити похибку горизонтального позиціонування до 0,13 м на траєкторії довжиною 800 м.

Практична цінність:

Результати дослідження можуть бути використані для розробки високоточних мобільних лазерних сканувальних систем, які працюють у складних GNSS-середовищах, таких як лісові масиви.

Використані методи покращення позиціонування є актуальними для потреб лісового господарства, екологічного моніторингу та тривимірного картографування природних об'єктів.

Ключові слова:

мобільне лазерне сканування, SLAM, GNSS, INS, лісове картографування, позиціонування, точність, LiDAR, інвентаризація лісів.

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to improve the positioning accuracy of mobile laser scanning systems (MLS) in forested areas by integrating inertial navigation systems (INS), global navigation satellite systems (GNSS) and SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algorithms.

Topic relevance:

Due to the increased demand for accurate forest inventory and mapping of natural resources, mobile laser scanning technologies are becoming an integral part of modern geoinformation research.

The problem of accurate positioning in difficult conditions, in particular in forest areas, remains relevant due to the limited availability of GNSS signals.

This necessitates the development of effective integrated solutions based on a combination of SLAM, INS and GNSS.

Scientific novelty:

The work implements and compares two approaches to improving the accuracy of SLAM-oriented positioning: SLAM with course support and extended SLAM taking into account speed.

For the first time, within the field forest conditions, the integration of GNSS/INS data into the SLAM algorithm was carried out with subsequent analysis of the effectiveness, which allowed reducing the horizontal positioning error to 0.13 m on a trajectory 800 m long.

Practical value:

The results of the study can be used to develop high-precision mobile laser scanning systems that operate in complex GNSS environments, such as forests.

The methods used to improve positioning are relevant for the needs of forestry, environmental monitoring and three-dimensional mapping of natural objects.

Keywords:

mobile laser scanning, SLAM, GNSS, INS, forest mapping, positioning, accuracy, LiDAR, forest inventory.

Зміст

Вступ

1. Методи дослідження

1.1. GNSS в поєднанні з інерціальною навігаційною системою у середовищі з проблемами GNSS

1.2. SLAM у лісових масивах

1.3. Прилади для виконання дослідження

1.4. Метод інтеграції в лісах

2. Польові спостереження

3 Результати дослідження

3.1. Оцінювання методів GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою та методу оцінювання максимальної правдоподібності SLAM

3.2. Результати методу максимальної правдоподібності SLAM за допомогою кута руху

3.3. Результат методу максимальної правдоподібності SLAM за допомогою кута курсу та швидкості

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Швидкий розвиток технологій і сенсорних можливостей призвів до сплеску застосування методів лазерного сканування для збору важливих даних під час інвентаризації лісів.

Ключові технології в цій галузі включають повітряне лазерне сканування, наземне лазерне сканування та мобільне лазерне сканування.

Мобільні лазерні системи сканування, зокрема, набули популярності завдяки своїй здатності підвищувати ефективність збору даних під час польових операцій.

Останнім часом було проведено значну кількість досліджень, спрямованих на аналіз мобільних систем лазерного сканування та оцінку їх точності.

Якість даних, отриманих за допомогою мобільного лазерного сканування, безпосередньо залежить від точності визначення положення та орієнтації.

Ці параметри зазвичай забезпечуються системою позиціонування та орієнтації (POS), яка об'єднує інерціальну навігаційну систему з глобальною навігаційною супутниковою системою (GNSS).

Діапазон сканування визначається датчиком лазерного сканування або самою мобільною системою лазерного сканування.

Однак у лісистому середовищі сигнал GNSS часто перешкоджають дерева, що призводить до втрати супутникового зв'язку.

Крім того, ефекти багатопроменевого поширення сигналу додатково негативно впливають на точність позиціонування.

Знижена точність позиціонування є одним із основних обмежень, що ускладнює застосування мобільного лазерного сканування в лісах.

Численні дослідження були присвячені оцінці продуктивності GNSS, а також її інтеграції з інерціальною навігаційною системою в складних лісових умовах.

Як правило, автономна GNSS, незалежно від того, використовує вона точне позиціонування точки чи кінематичні методи реального часу (RTK), забезпечує точність позиціонування в районі одного метра в густих лісах.

Інтеграція GNSS з інерціальною навігаційною системою може досягти субметрових рівнів точності.

Тим не менш, автоматизоване високоточне рішення позиціонування, засноване на взаємодії цих систем, наразі залишається недоступним для використання в густих лісах.

Одночасна локалізація та картографування (SLAM) забезпечує метод створення карти оточення з одночасним визначенням положення мобільної платформи.

Спочатку він був представлений у сфері робототехніки ще у 1980-х роках.

Більшість досліджень SLAM спрямовані на внутрішні приміщення, де відсутні сигнали GNSS, але є велика кількість об'єктів, доступних для виявлення та позиціонування.

Застосування SLAM у лісовому середовищі також було предметом різноманітних наукових досліджень.

Зокрема, значна частина робіт була зосереджена на оцінці ефективності SLAM для мобільного лазерного сканування в лісових умовах.

Варто зазначити, що природне середовище лісів помітно відрізняється від внутрішнього середовища.

Об'єкти лісового середовища не є статичними чи однорідними – їх щільність різна, а рельєф характеризується значною нерівністю.

Крім того, сигнали супутникової навігації можуть періодично з'являтися, особливо у відкритих лісових масивах, створюючи проблеми для методу SLAM.

У таких випадках система може неправильно зіставляти скановані дані, що призводить до накопичення помилок і значних неточностей у позиціонуванні.

Основною причиною цих помилок є неточне визначення кута напрямку, оскільки часто існує дефіцит чітких об'єктів для точного вирівнювання сканування в лісі.

Крім того, помилки, пов'язані з дрейфом, швидко накопичуються під час руху, що призводить до значних відхилень у визначенні відносного положення об'єкта на різних етапах сканування.

Незважаючи на обмежену точність позиціонування, яку забезпечує GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою, така комбінація може надати корисну навігаційну інформацію, враховуючи, що певну кількість супутників час від часу видно в лісах.

Зокрема, точні дані про місцезнаходження та швидкість руху можна отримати навіть із зменшеною кількістю доступних супутників.

Точний кут курсу, обчислений на основі GNSS, інтегрованої з інерціальною навігаційною системою, може суттєво пом'якшити проблеми, пов'язані з дрейфом у районах із недостатньою кількістю орієнтирів.

Крім того, використання точних оцінок швидкості дозволяє контролювати грубі помилки відносного позиціонування.

Інтеграція даних, отриманих від GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою, поряд із системою SLAM, може значно зменшити дрейф, усунути грубі помилки та підвищити точність позиціонування в лісовому середовищі.

Отже, навігаційна інформація, яка використовується в мобільних лазерних системах сканування, зазвичай формується на основі даних,

отриманих окремо від GNSS, інтегрованої з інерціальною навігаційною системою.

Однак мобільне лазерне сканування зазвичай використовує комбінацію датчика LiDAR із GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою, отже, їхні дані мають бути інтегровані, щоб забезпечити отримання найточнішої навігаційної інформації.

1. Методи дослідження

1.1. GNSS в поєднанні з інерціальною навігаційною системою у середовищі з проблемами GNSS

Тісний зв'язаний підхід передбачає подачу псевдодальностей, доплерівських зсувів та інших параметрів початкової фази несучої, отриманих із приймача GNSS, у фільтр Калмана.

Коли кількість доступних супутників коливається від 0 до 4, оновлення вимірювань у фільтрі Калмана можуть зменшити накопичення помилок інерціальної навігаційної системи.

Отже, цей метод виявляється вигідним у міському середовищі та інших регіонах, що характеризуються поганою якістю сигналу GNSS і обмеженою кількістю доступних супутників.

Попередні дослідження також показали, що тісно пов'язані навігаційні системи виявляють більшу стійкість до грубих помилок.

Лісове середовище схоже з міським середовищем; кількість видимих супутників зменшується через перешкоди, створені густими кронами дерев, а ефекти багатопроменевого поширення сприяють значним помилкам визначення місця розташування.

Використання тісно пов'язаної навігаційної системи пропонує ефективно вирішення цих проблем, створюючи більш точні навігаційні дані в лісистих районах.

Для нашого дослідження використовується система NovAtel SPAN (рис. 1) для збору даних GNSS, інтегрована з інерціальною навігаційною системою.[4]

Отримані дані обробляються за допомогою програмного забезпечення Waypoint Inertial Explorer, що дозволяє комбінувати постобробку інформації з GNSS та інерціальної навігаційної системи для створення високоточних навігаційних рішень.



Рисунок 1 Система NovAtel SPAN

Система SPAN — це інтегроване рішення, поєднання технології GNSS з інерціальною навігаційною системою (INS), що забезпечує постійний потік даних про місцезнаходження об'єкта, його швидкість і положення.

Включаючи інформацію з інерціальною навігаційною системою разом із даними GNSS, система SPAN сприяє досягненню більш точних результатів у визначенні координат, швидкості та положення, таким чином ефективно зменшуючи збої в прийомі сигналу GNSS.[4]

Набір програмного забезпечення Inertial Explorer підтримує як слабозв'язані, так і тісно пов'язані моделі об'єднання даних, дозволяючи об'єднувати інформацію GNSS – отриману як від базових, так і від мобільних станцій – з даними інерціальною навігаційною системою для виконання диференціальної обробки.

Згідно з дослідженнями NovAtel, середньоквадратична похибка швидкості в міських умовах досягає рівня в межах одного сантиметра на секунду, а середньоквадратична похибка визначення орієнтації по всіх трьох осях залишається нижче 0,1 градуса.

Наше дослідження додатково підтверджує виняткову точність визначення швидкості навіть у лісистій місцевості.

Як показано на малюнку 2, під час польових випробувань стандартне відхилення швидкості не перевищувало 5 см/с.[4],[5]

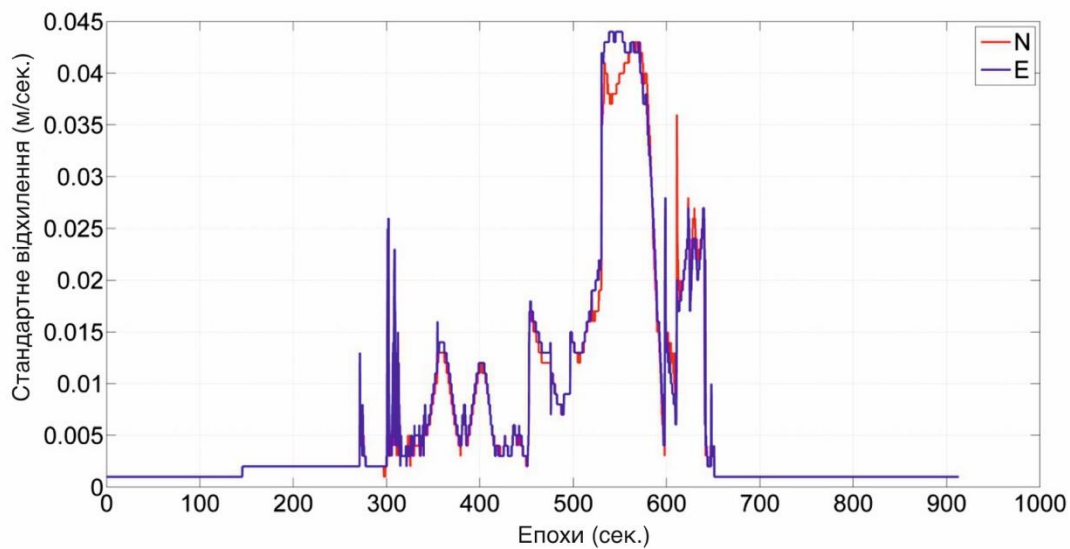


Рисунок 2. Стандартне відхилення швидкості за допомогою Inertial Explorer у лісі

1.2. SLAM у лісових масивах

SLAM, або одночасна локалізація та картографування, передбачає як створення, так і постійне оновлення карти невідомого середовища, покладаючись на дані діапазону, зібрані з датчиків.

Серед сучасних методів SLAM на основі LiDAR знайшов широке застосування в аналізі середовища та визначенні місця розташування.

Алгоритм ітераційної найближчої точки (ICP) представляє традиційний підхід до вирівнювання лазерних сканувань. Він досягає вирівнювання, мінімізуючи сукупну відстань, яка існує між двома хмарами точок.

Цей метод спонукав до розробки кількох удосконалень, зокрема таких методів, як полярне сканування (PSM) та методи ітеративної найближчої лінії (ICL), серед інших.[4]

Ці методи зазвичай покладаються на послідовні пари сканувань для збігу та нехтують минулими скануваннями, що спричиняє накопичення помилок з часом.

Запропонований підхід для усунення цього використовує карту сітки під час процесу вирівнювання лазерного сканування.

Цей метод не потребує вилучення функцій або асоціації даних, оскільки він повністю використовує всі попередні сканування.

Це передбачає створення ймовірнісної карти, отриманої з накопичених сканів, з подальшим обчисленням перетворення, яке вирівнює нові скани з картою.

Одним із особливо ефективних методів у рамках підходу на основі сіткової карти є оцінка максимальної правдоподібності (MLE).

Деякі дослідники використовують розширений варіант цього, відомий як покращена оцінка максимальної ймовірності (IMLE), щоб досягти високої точності під час позиціонування в складних областях, таких як густі ліси.

Цей підхід формує сіткову карту, що включає ймовірнісні моделі та невизначеність щодо характеристик середовища.

Після цього механізм вирівнювання визначає оптимальну трансформацію для сканування на карті.

Складне лісове середовище, особливо підлісок і зміни рельєфу, можуть спричинити шум у даних хмари точок.

Більш точні початкові параметри разом з оптимізованими межами пошуку підвищують стабільність методу.

Це свідчить про те, що інтеграція навігаційних даних GNSS разом з інерціальною навігаційною системою може значно підвищити точність позиціонування в умовах лісу.

Враховуючи це, наша дисертація бакалавра заглиблюється в алгоритм, який поєднує дані GNSS з інерціальною навігаційною системою та методом покращеної оцінки максимальної правдоподібності SLAM, щоб підвищити точність позиціонування, особливо в лісовому середовищі.

Метод покращеної оцінки максимальної правдоподібності SLAM спрямований на виявлення оптимального перетворення, що забезпечує найвищу ймовірність точного позиціонування.[4]

Крім того, при розробці алгоритму враховувалися додаткові міркування, такі як використання багатосегментного лазерного сканування.

1.3. Прилади для виконання дослідження

У нашій бакалаврській роботі використовується мобільна картографічна система з інтегрованою системою NovAtel SPAN, лазерним сканером FARO Focus3D X330 і антеною GNSS.

Інтегрованим компонентом навігаційної системи, який поєднує функції GNSS з інерціальною навігаційною системою, є система NovAtel Synchronized Position Attitude Navigation (SPAN).

У цій конфігурації SPAN використовується GNSS-приймач NovAtel Flexpak6 разом із інерціальним вимірювальним пристроєм NovAtel UIMU-LCI.

У розслідуванні SLAM використовується лазерний сканер FARO Focus3D X330.[4]

Цей пристрій має здатність генерувати хмару точок зі швидкістю, що наближається до 1 мільйона точок щосекунди.



Рисунок 3. Прилади для виконання дослідження NovAtel SPAN з антеною SMART2 dual-frequency GNSS і FARO Focus3D X330.

Усі сенсорні пристрої надійно закріплені на жорсткій платформі.

Лазерний промінь FARO Focus3D X330 має розбіжність 0,011 градуса, а його вихідний діаметр становить 2,25 мм.

Найдальша відстань вимірювання, яка використовується в цьому дослідженні, становить 25 метрів.

На цій відстані максимальний відбиток променя становить 7,3 мм.

Цей слід значно менший, ніж 10–20 см слідів, які зазвичай зустрічаються в моделях, які демонструють більшу розбіжність променя на еквівалентній відстані.[4]

Необроблені дані лазерного сканування, які представлені в локальній системі координат сканера, зазнають трансформації.

Це перетворення перетворює дані у світову систему координат шляхом застосування позиційних та орієнтаційних параметрів транспортного засобу.

Ці параметри виводяться з навігаційної системи, яка об'єднує як GNSS, так і інерціальну навігаційну систему.[6]

Отже, точність результуючої хмари точок безпосередньо залежить від точності, з якою визначаються положення та орієнтація.

Це визначення забезпечує інтегрована GNSS та інерціальна навігаційна система.

1.4. Метод інтеграції в лісах

Як обговорювалося раніше, лісове середовище має певні риси, характерні для міських територій, зокрема щодо потенційного перешкод супутниковим сигналам.

Кількість видимих супутників коливається, тенденція, показана на малюнку 4, хоча повної втрати супутникового зв'язку не спостерігається.

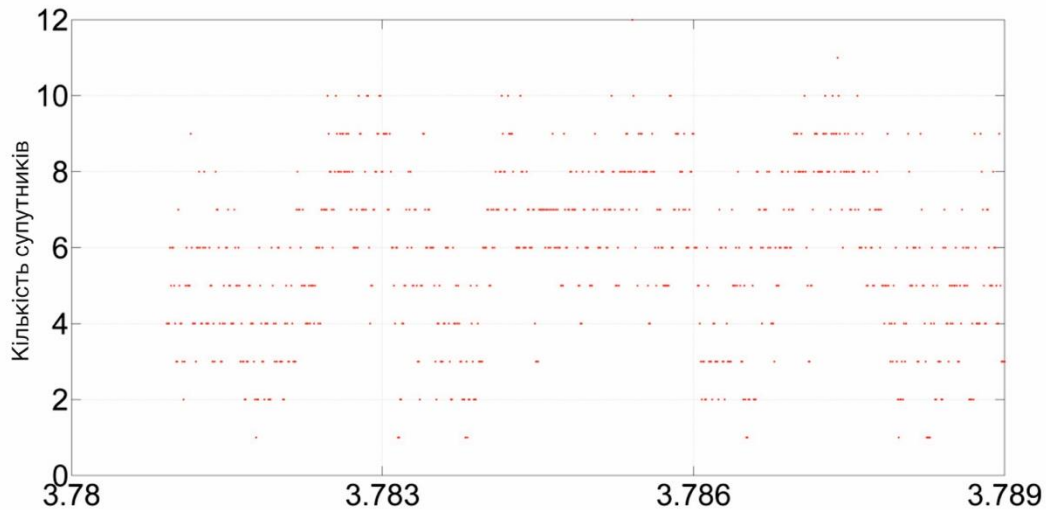


Рисунок 4. Кількість видимих супутників у лісі

Тісна інтеграція системи GNSS з інерціальною навігаційною системою виявилася ефективною для оновлення вимірювань, тим самим зменшує накопичення помилок.

Незважаючи на потенційне зниження точності позиціонування через обмежену видимість супутника та виражений ефект багатопроменевості, оцінки швидкості та положення зберігають задовільний рівень точності.

Покращений алгоритм SLAM, заснований на максимальній оцінці ймовірності, є ключовим елементом цього підходу.[4]

Ця техніка визначає ймовірність поточного сканування за допомогою карти сітки, яка генерується з попередніх сканувань, які мають різні перетворення.

Оскільки цей підхід використовує максимальну оцінку ймовірності, точність позиціонування на рівні сантиметра стає досяжною навіть при тривалих роботах у середовищах із слабким сигналом.

Це дозволяє створювати більш точні та детальні карти.

Однак метод має властиві недоліки.

Це значною мірою залежить від унікальних особливостей самого середовища.

У двовимірній системі координат перетворення містять два параметри, що представляють положення, і один для орієнтації в напрямку.

Це згодом розширює простір пошуку до тривимірної сфери.

Крім того, багатовимірний простір пошуку негативно впливає на надійність алгоритму.

Коли апостериорна ймовірність розглядається як функція позиції та дирекційного кута, метод пошуку шукає екстремуми функції в тривимірній області.

Це може призвести до кількох помилкових рішень, що впливають із складності навколишнього середовища та шумових перешкод.

Ці проблеми стають більш актуальними в лісистій місцевості.

Тим не менш, зменшення розмірності простору пошуку значно підвищує як надійність, так і ефективність обчислень.[4]

Більш точні параметри пошуку дозволяють зменшити шумовий вплив.

Між системою GNSS, інтегрованою з інерціальною навігаційною системою, і розширеним алгоритмом SLAM існує сильна взаємодія.

Навіть якщо точність позиціонування комбінації GNSS/інерціальної навігаційної системи може бути лише субметровою або, в кращому випадку, метровою в лісистих районах, її точності направлення достатньо для покращеного алгоритму SLAM, тоді як точні оцінки швидкості сприяють точнішому визначенню відносних переміщень за короткі часові проміжки.

Удосконалена методологія SLAM може використовувати дані про орієнтацію з комбінованої GNSS та інерціальної навігаційної системи, згодом мінімізуючи розмірність простору пошуку.

Це, у свою чергу, обмежує зону занепокоєння, використовуючи точні відносні зміщення, отримані за допомогою високих швидкостей передачі даних.

Візуальне зображення обробки даних, пов'язаної з інтеграцією GNSS та інерціальної навігаційної системи з розширеним підходом SLAM, наведено на рисунку 5.[4]

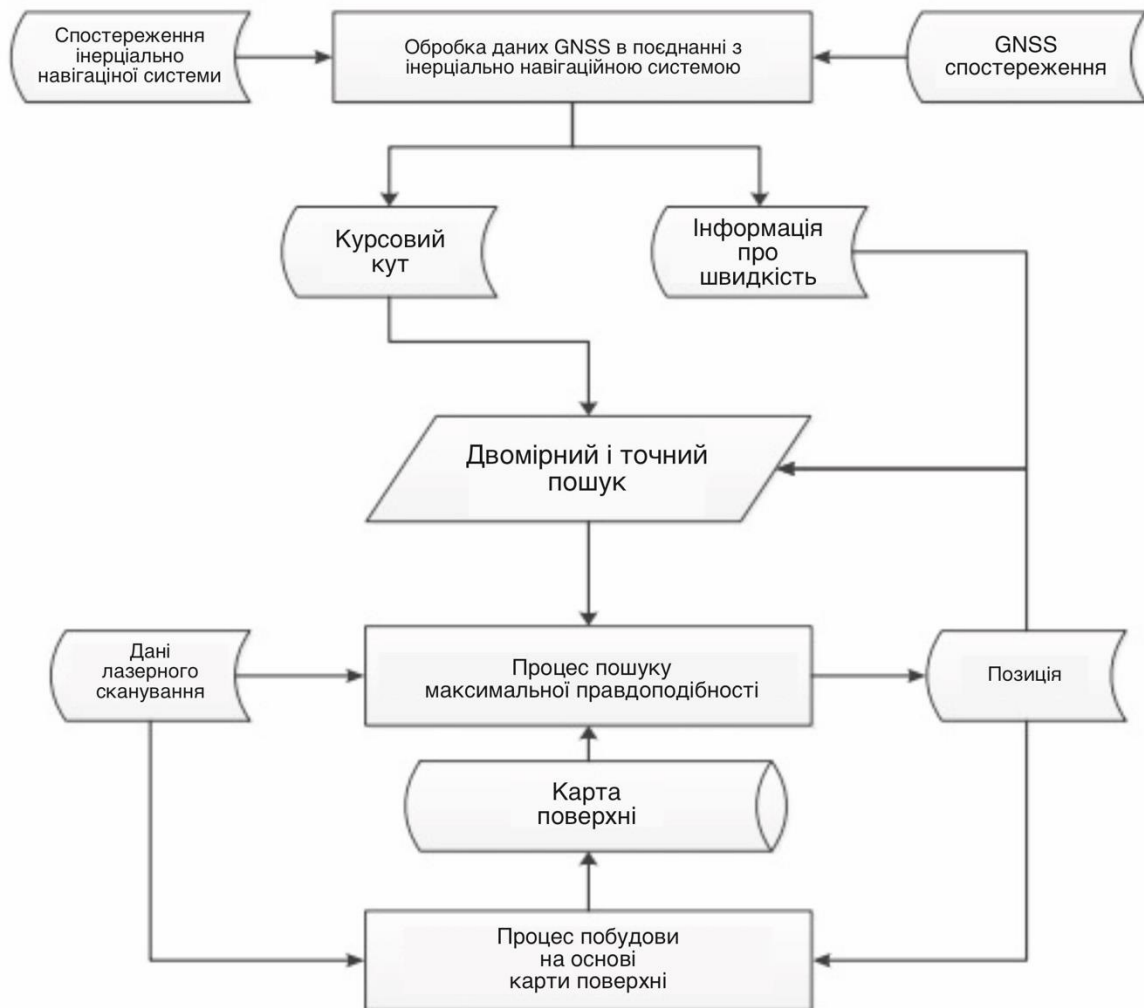


Рисунок 5. Робочий процес високоточної обробки даних

Спочатку дані GNSS та інерціальної навігаційної системи обробляються для визначення швидкості та кута курсу для кожного конкретного моменту часу.

При зіставленні лазерних сканувань в межах однієї епохи напрямок розглядається як відомий параметр, що використовується для грубого пошуку, а швидкість інтегрується по тривалості епохи.

Згодом до оціненої позиції з попередньої епохи застосовується зсув, будуючи початкову позицію для поточної епохи.

Ця початкова точка визначає область пошуку, що містить певний ступінь невизначеності.

Ця невизначеність насамперед пов'язана з максимальною роздільною здатністю, властивою карті сітки.

2. Польові спостереження

Наші польові дослідження проходили в Карпатському національному природному парку, де характеризуються переважно сосна звичайна та ялина звичайна.

По всьому досліджуваному району 224 маркери, встановлені на деревах, були прикріплені на висоті грудей, вздовж траєкторії спостереження.

Координати цих маркерів були ретельно визначені за допомогою тахеометра та RTK GNSS.

Позиції цих маркерів, встановлені в двовимірній системі координат, служили точними контрольними точками, які використовуються для оцінки точності позиціонування.[4]

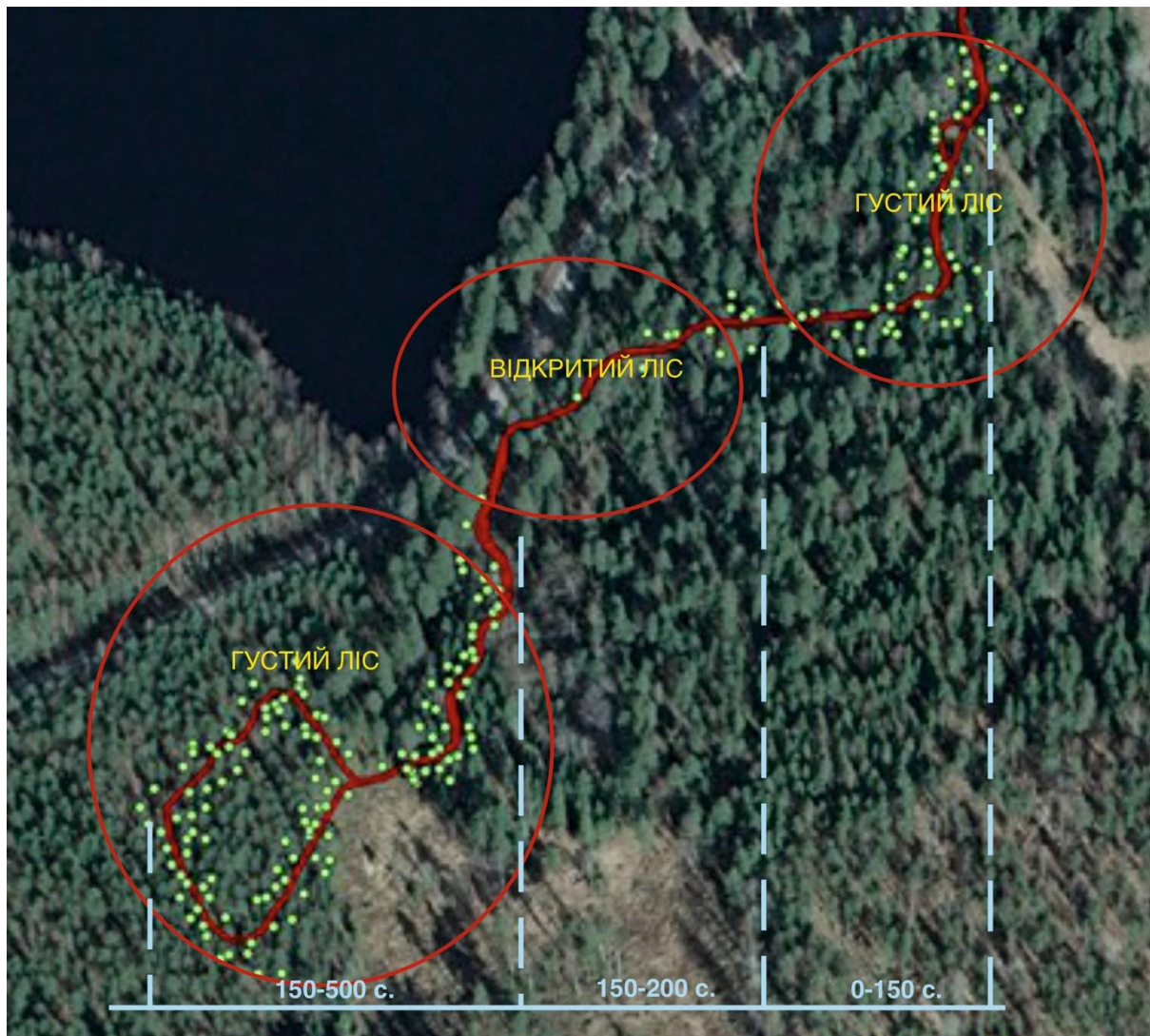
Коли мобільна картографічна система перетинала цю територію, були записані спостереження GNSS, інтегровані з інерціальною навігаційною системою та дані лазерного сканування.

Отриману хмару точок було створено з використанням даних про позицію та орієнтацію, отриманих від мобільного лазерного сканера, що дозволило точно визначити положення еталонних маркерів.

Оцінку точності позиціонування та орієнтації мобільного лазерного сканування проводили шляхом порівняння з положеннями еталонних маркерів.

Експерименти включали середню швидкість руху приблизно 4 км/год, довжину пройденої траєкторії близько 800 метрів.

Орієнтири та траєкторія транспортного засобу показані на малюнку 6.[4]



Малюнок 6. Маршрут автомобіля (червоний) і контрольні марки (зелений)

Полеове дослідження складається з трьох окремих етапів.

Початковий етап включає проходження густого лісового середовища; зокрема, через 150 секунд вправи учасник переходить у зону, що характеризується відкритим лісом.

Проходить ще 50 секунд, перш ніж знову потрапити в зону густого лісу.

У межах густого лісу система SLAM використовує значну кількість даних функцій для узгодження результатів сканування.

Однак, як наслідок перешкод сигналу, що впливає на прийом супутника, точність позиціонування GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою (INS) зазнає значного погіршення.

Фаза відкритого лісу вносить зміни в експлуатаційні умови.

У той час як система SLAM все ще може демонструвати погіршення продуктивності через змінені фактори навколишнього середовища, GNSS у поєднанні з INS підтримує стабільність завдяки постійній доступності багатьох видимих супутників.[4]

Оцінка результатів картографування та оцінка позиції залежить від еталонних маркерів.

Пряме спостереження наземної істинної траєкторії під час фактичних польових експериментів є обмеженням, що вимагає використання довідкових даних.

Точне розташування цих опорних маркерів визначається за допомогою карти поширення.

Ця карта створена з використанням даних хмари точок, отриманих із системи лазерного сканування (LiDAR).

Оцінка точності позиціонування відбувається шляхом перехресного порівняння отриманих результатів позиціонування з положеннями встановлених опорних маркерів.

Точність позиціонування для конкретного часового кроку або епохи визначається кількісно з використанням помилок позиціонування відносно контрольних маркерів, зокрема тих маркерів, розташованих у межах ефективного діапазону системи LiDAR.

Ця релевантна область візуалізується у вигляді кола, де робочий діапазон LiDAR служить радіусом, а його центр визначає точку початку.

Це конкретне зображення включено до малюнка 7.[4]

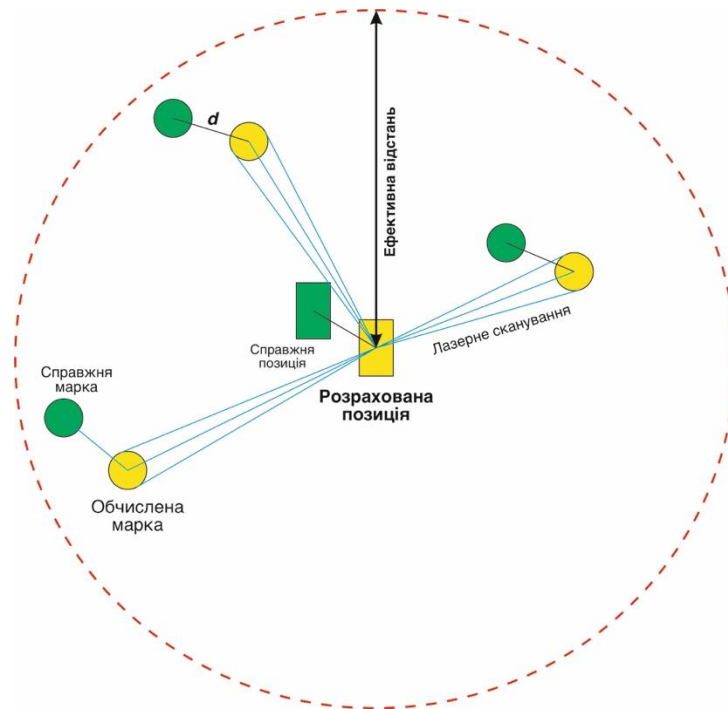


Рисунок 7. Принципова діаграма для оцінки точності позиціонування за допомогою еталонних марок

Середньоквадратична похибка позиції визначається за допомогою еталонної мережі маркерів за такою формулою:

$$СКП = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i - x_{ет})^2 + (y_i - y_{ет})^2 + (z_i - z_{ет})^2]}$$

де:

- *СКП* — середньоквадратичне значення похибки позиції,
- *N* — кількість марок,
- x_i, y_i, z_i — координати марок, отримані в результаті картографування,
- $x_{ет}, y_{ет}, z_{ет}$ — еталонні координати марок, отримані за допомогою точних методів, таких як тахеометрія або RTK GNSS.

Ця формула забезпечує середнє значення квадратів різниць між координатами позначок і еталонними значеннями.

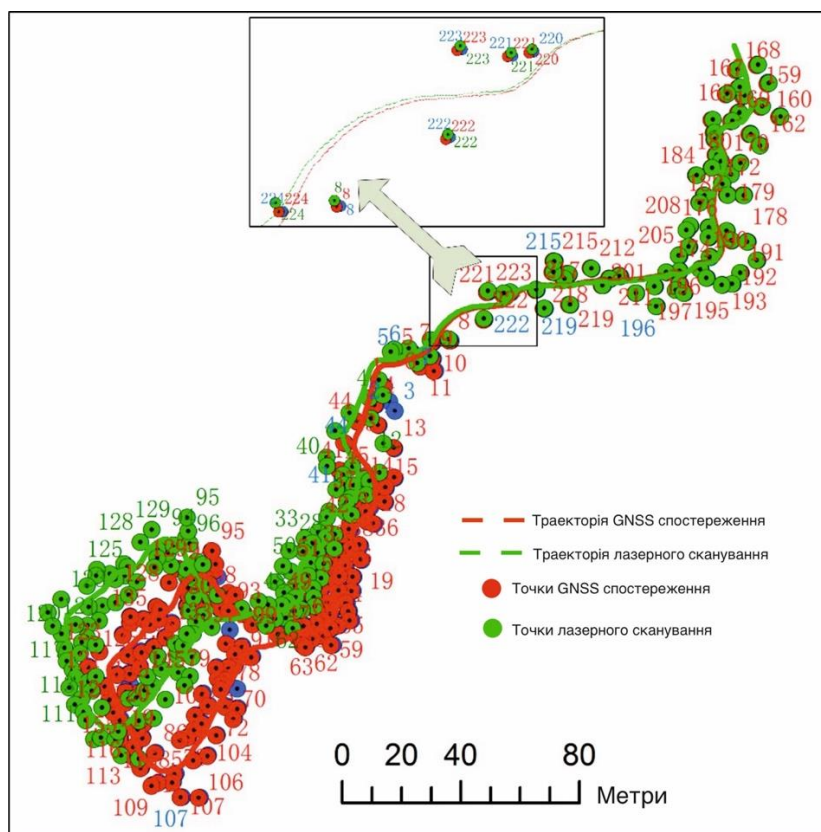
Це дозволяє оцінити точність позиціонування.

3 Результати дослідження

3.1. Оцінювання методів GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою та методу оцінювання максимальної правдоподібності SLAM

Траєкторії та позиційні дані, отримані за допомогою методів GNSS, інтегрованих з інерціальною навігаційною системою, разом із підходом SLAM із використанням оцінки максимальної правдоподібності, зображені на малюнку 8а для повної тривалості тестування.

Ці висновки ефективно ілюструють спосіб, у який кожна техніка характеризує рух і розташування об'єкта в експериментальному середовищі, враховуючи різноманітні впливи, охоплюючи як зміни навколишнього середовища, так і варіації характеристик супутникового сигналу.[4]



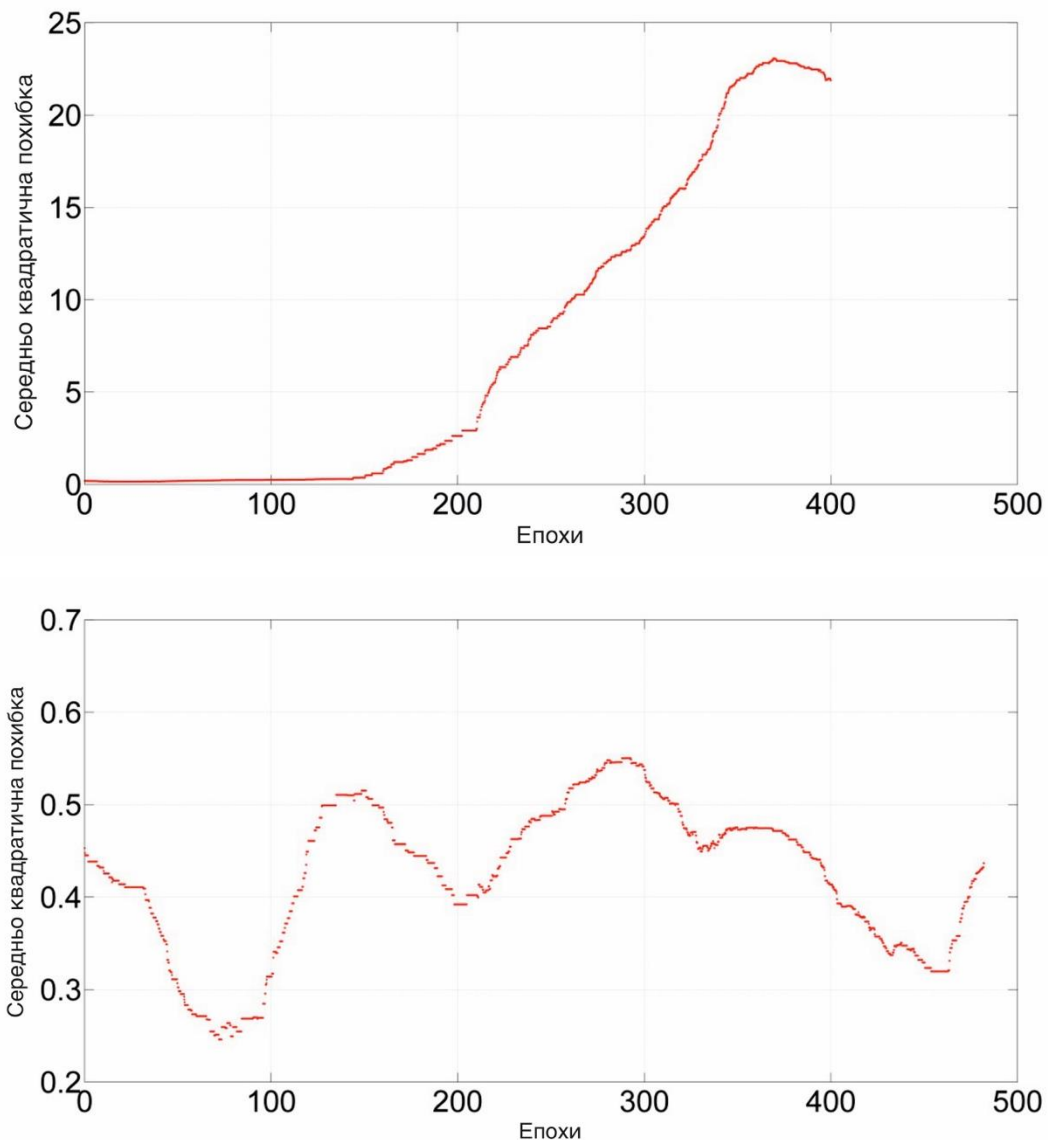


Рисунок 8. Траєкторії та положення для всього тесту за допомогою методів IMLE-SLAM та GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою. (

Середньоквадратичні значення похибок позиціонування траєкторії для GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою (INS) разом із методом оцінки максимальної правдоподібності SLAM представлені для всього тесту на рисунку 8.

Як показано на рисунку 8, метод оцінки максимальної правдоподібності SLAM виявляється ефективним у середовищі густих лісів, де помилки позиціонування демонструють зменшення.[4]

Тим не менш, в умовах відкритого лісу помилки позиціонування швидко накопичуються без подальшого зменшення, навіть після повторного входу в більш густі лісисті райони.

Рішення GNSS, інтегроване з інерціальною навігаційною системою, забезпечує безперервну та послідовну продуктивність протягом усього випробування, зберігаючи похибки позиціонування в межах метрового діапазону.

Зведення середньоквадратичних значень для помилок траєкторії, порівнюючи GNSS інтегроване з інерціальною навігаційною системою і SLAM, можна знайти в таблиці 1.

Таблиця 1. Середньоквадратичні значення траєкторії

Середньо квадратична похибка	Схід	Нічого	2D
GNSS в поєднанні з інерціальною навігаційною системою	0.32	0.21	0.35
Метод оцінки максимальної правдоподібності SLAM	7.85	5.98	10.09

Як показано на малюнку 9, напрямок, визначений за допомогою підходу оцінки максимальної правдоподібності SLAM, демонструє помітну нестабільність порівняно з кутом, отриманим за допомогою GNSS, інтегрованої з інерціальною навігаційною системою.

Очевидні значні помилки, зокрема різкі стрибки між епохами з інтервалами в 100 і 200 секунд, коли транспортний засіб переходить із середовища густого лісу до більш відкритої лісистій місцевості.

Ці неточності в куті нахилу, як наслідок, вносять значні помилки в розрахунки позиціонування.

Отже, коли оцінка максимальної ймовірності SLAM включає дані про курс і позицію, вплив характеристик середовища на результати помітно посилюється.

Крім того, неточне визначення кута напрямку потенційно може спричинити значні помилки у визначенні позиції, сценарій, візуально зображений на малюнку 8b і зведений числово в таблиці 1.[4]

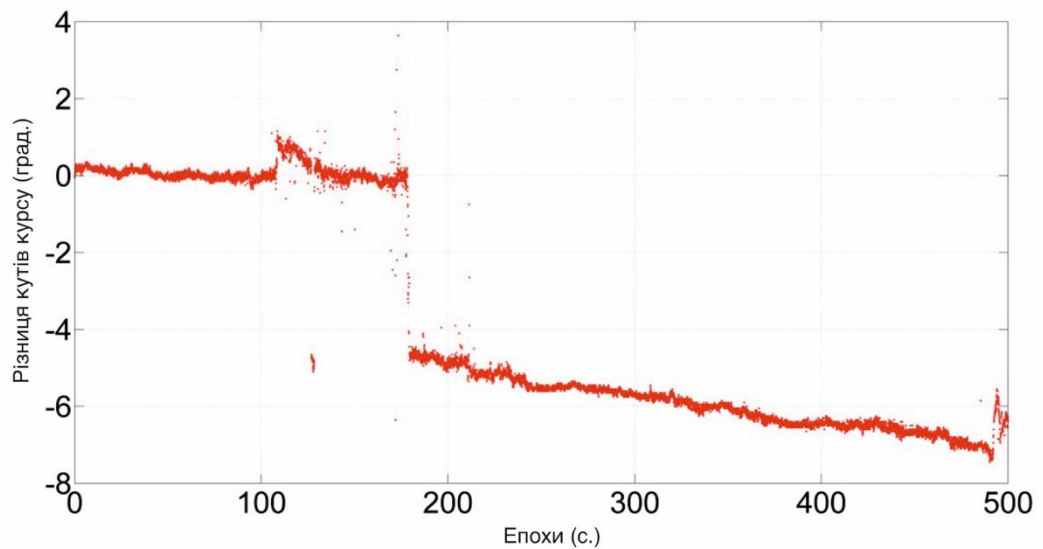


Рисунок 9. Різниця кутів курсу

Помилки оцінки кута напрямку в рамках SLAM, засновані на методах максимальної правдоподібності, швидко накопичуються.

Насамперед це пов'язано з дефіцитом орієнтуючих засобів у відкритому лісовому середовищі.

Отже, це призводить до зростання неточностей у визначенні позиції.

Сприйнятливість SLAM до помилок орієнтації пов'язана з його залежністю як від кількості, так і від особливостей навколишнього середовища, а також від його чутливості до шумових перешкод.

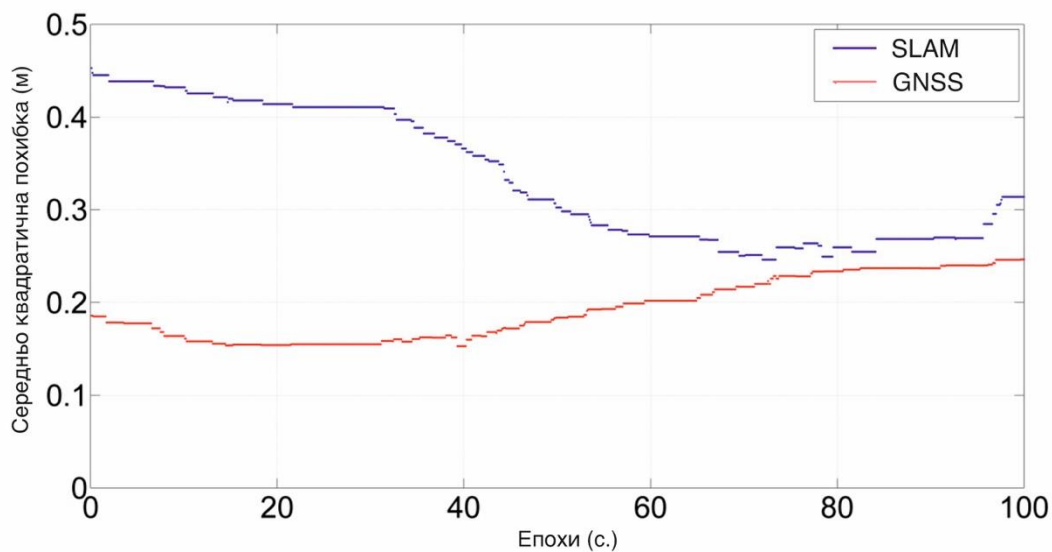
При визначенні дирекційних кутів простір пошуку розширюється, що значно знижує стійкість сигналу, особливо при роботі в складних умовах.

Цей ефект згодом поширюється, впливаючи на точність визначення остаточного положення.

Незважаючи на помірну продуктивність у середовищі густих лісів, продуктивність SLAM суттєво знижується на більш відкритих і відкритих ділянках.

Статистичні дані, що охоплюють позиційні похибки як методу SLAM максимальної правдоподібності, так і системи GNSS, поєднаної з інерціальною навігаційною системою (INS), у зоні густого лісу, представлені на рисунку 10.[4]

Варіації дирекційних кутів, що спостерігаються в цій конкретній зоні, детально описано на рисунку 10, тоді як середньоквадратичні (RMS) помилки, пов'язані з траєкторіями позиціонування, отриманими як за допомогою методів GNSS поєднаної з інерціальною навігаційною системою, так і методів SLAM максимальної правдоподібності в густому лісі, відображені в таблиці 2.



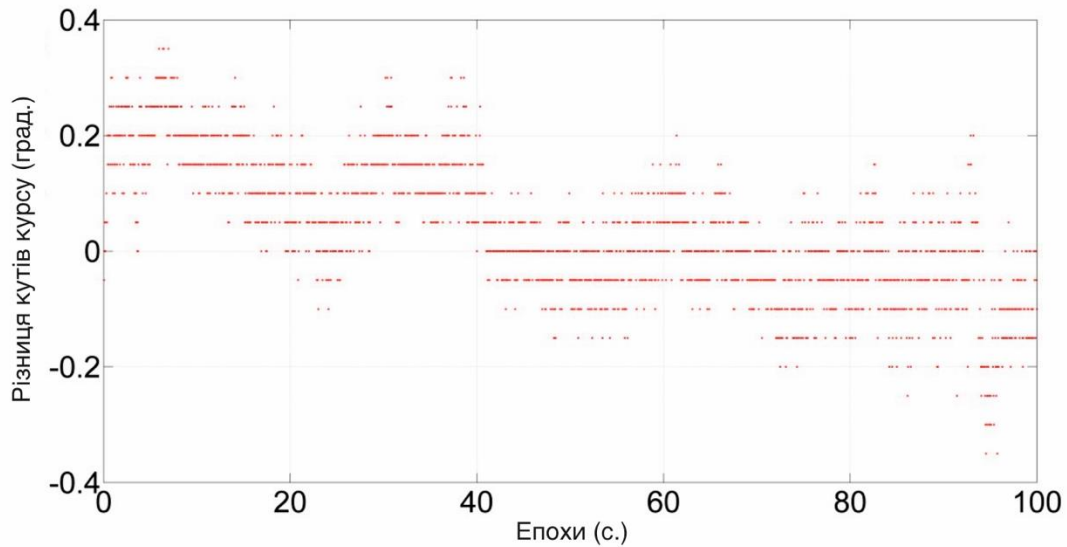


Рисунок 10. Помилки позиціонування під час розгортання IMLE-SLAM разом із GNSS та інерціальною навігаційною системою в густих лісах.

Таблиця 2. Точність траєкторій позиціонування

Середньо квадратична похибка	Схід	Нічого	2D
GNSS в поєднанні з інерціальною навігаційною системою	0.23	0.16	0.31
Метод оцінки максимальної правдоподібності SLAM	0.15	0.08	0.17

Як показано на рисунку 10, підхід SLAM (одночасна локалізація та картографування), який використовує оцінку максимальної правдоподібності, перевершує GNSS (глобальну навігаційну супутникову систему) у поєднанні з інерціальною навігаційною системою в середовищі з густим лісом щодо точності позиціонування.

Крім того, дирекційні кути, отримані як за допомогою методу максимальної правдоподібності SLAM, так і за допомогою комбінованої

GNSS та інерціальної навігаційної системи, демонструють близький ступінь вирівнювання, як показано на рисунку 10.

Однак розбіжності в напрямкових кутах між методом SLAM і комбінацією GNSS-інерціальної навігаційної системи все ще перевищують 0,1 градуса через певні проміжки часу.

Це може бути пов'язано з обмеженнями кутової роздільної здатності LiDAR (Light Detection and Ranging), які впливають на точність оцінки кута курсу.[4]

Щоб підвищити точність позиціонування, потенційне рішення полягає в інтеграції точних дирекційних кутів, отриманих від інерціальної навігаційної системи GNSS, із структурою SLAM максимальної ймовірності.

3.2. Результати методу максимальної правдоподібності SLAM за допомогою кута руху

Завдяки інтеграції кутів курсу, отриманих за допомогою GNSS, з інерціальною навігаційною системою та подальшому введенню цієї інформації в підхід SLAM з максимальною ймовірністю (також відомий як SLAM із підтримкою H), розмірність простору пошуку зменшується з трьох до двох.

На малюнку 11 наочно показано траєкторії та розташування маркерів протягом усієї фази тестування.

Крім того, на рисунку 11 також представлено середню квадратичну помилку (RMSE) даних позиційної траєкторії, що охоплює всю тривалість випробування.[4]

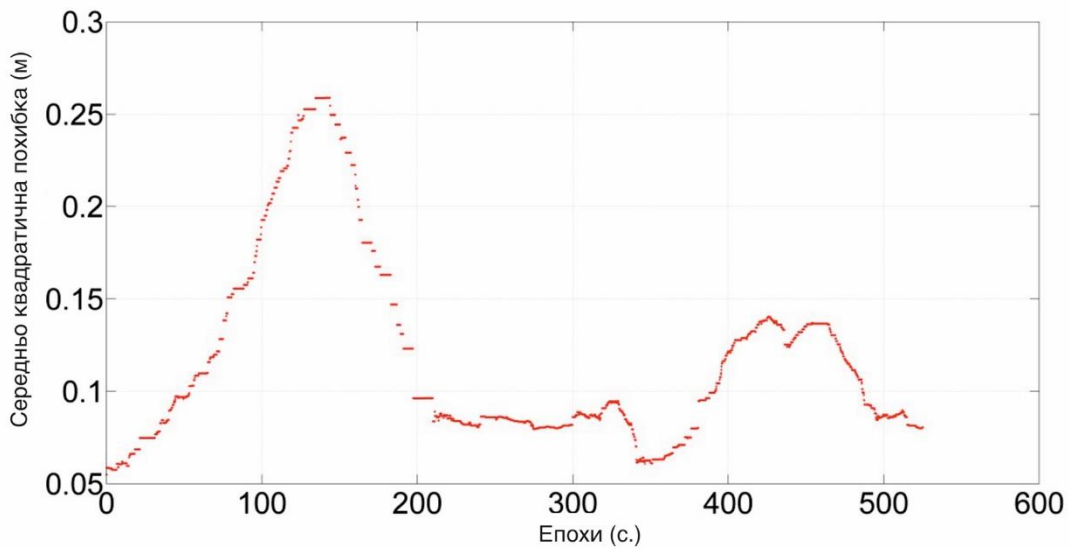
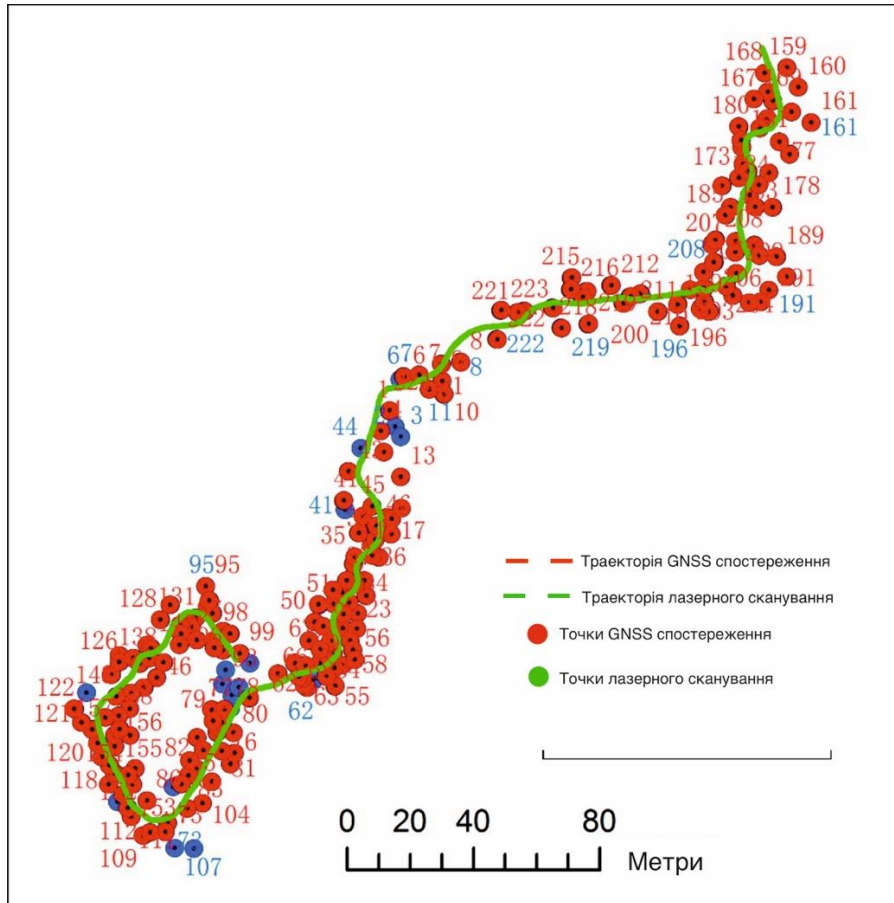


Рисунок 11. Помилки позиціонування рішення IMLE-SLAM для всього тесту.

Як показано на рисунку 11, інтеграція курсу, отриманого від GNSS, з інерціальною навігаційною системою в рамках Maximum Likelihood

SLAM ефективно пом'якшує швидкий дрейф під час переходів у відкрите лісове середовище.

Ця методологія SLAM забезпечує високоточну траєкторію протягом усього проведеного тесту.

Порівняно з точністю позиціонування, досягнутою комбінацією GNSS та інерціальної навігаційної системи, підхід SLAM, що включає дані про курс (H), демонструє значне підвищення точності позиціонування.

Середньоквадратична помилка (RMSE) для східної та північної осей становить 0,12 м та 0,05 м відповідно, що означає покращення на 66,7% та 75%.

Крім того, горизонтальна точність досягає значення 0,13 м, що відображає покращення, що наближається до 70%. [4]

3.3. Результат методу максимальної правдоподібності SLAM за допомогою кута курсу та швидкості

Завдяки включенню інформації про напрямок у підхід SLAM на основі максимальної правдоподібності точність позиційної оцінки значно підвищується.

Однак збільшення помилок позиціонування спостерігалось саме у відкритих лісових середовищах.

Посилаючись на малюнок 12b, хоча точність відновлюється після повторного входу в більш густі ліси, положення стебла залишається неточним у відкритому лісі через початкові помилки позиціонування.

Це виникає через труднощі в досягненні точного визначення положення, навіть при зменшенні області пошуку з використанням інформації про курс, особливо коли видимість обмежена.

Як правило, оптимальне положення визначається в межах визначеного діапазону пошуку, отриманого з положення попередньої епохи. Однак цьому діапазону часто бракує точності.

При обробці шумних даних такі області пошуку можуть призвести до помилкових оцінок позиції.

Використовуючи дані про швидкість, отримані через GNSS, інтегровану з інерціальною навігаційною системою, діапазон пошуку, що охоплює справжнє положення, можна уточнити на основі як швидкості, так і положення попереднього кроку.

Траєкторії, згенеровані за допомогою методу SLAM, який використовує дані курсу та підтримку швидкості, представлені на рисунку 12.

Крім того, малюнок 12 демонструє середню квадратичну помилку (RMSE) траєкторії для цього методу.

Як показано, доповнюючи процес SLAM даними про швидкість GNSS, інтегрованими з інерціальною навігаційною системою, щоб підвищити точність визначення зони пошуку, помилки позиціонування, які виникають через дефіцит характеристик у відкритому лісовому середовищі, мінімізуються.

Це зрештою призводить до більш точних траєкторій.

СКП для східного та північного напрямків повідомляється як 0,04 метра, що дає горизонтальну точність 0,06 метра.

Це означає підвищення точності на 86% порівняно з використанням виключно GNSS з інерціальною навігаційною системою.

Це веде до отримання більш точної карти, при цьому результуюча позиційна точність методу SLAM досягає сантиметрового рівня.[4]

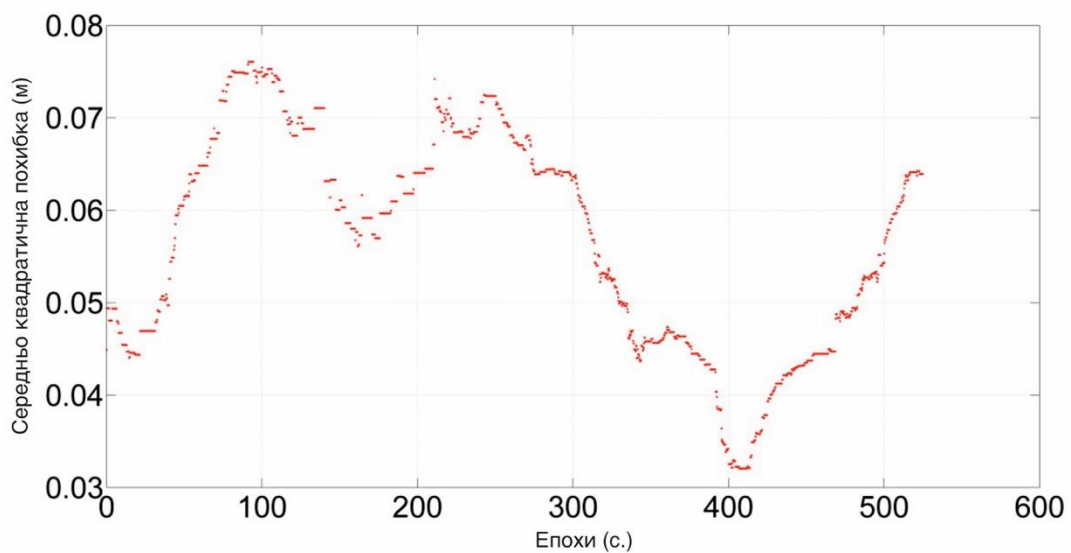
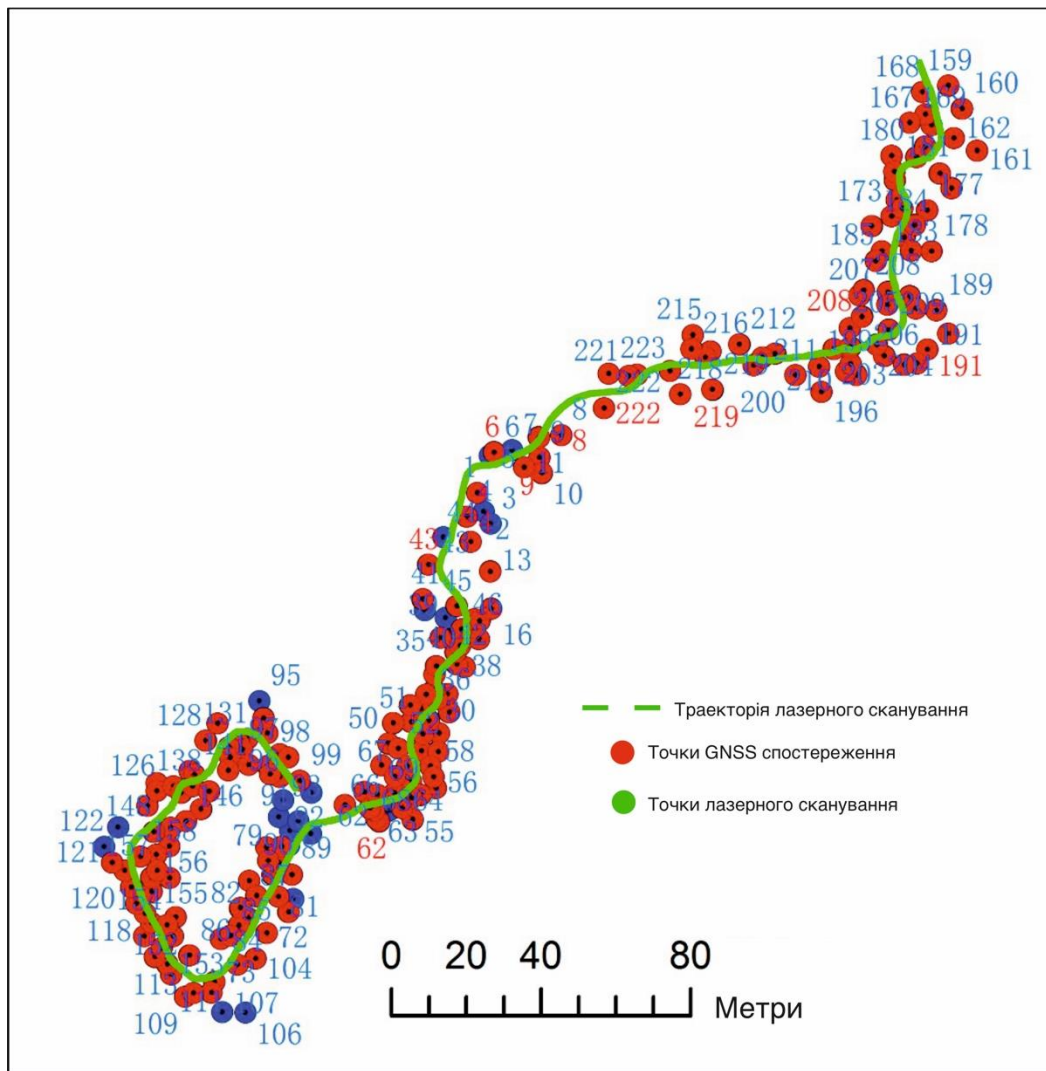


Рисунок 12. Помилки позиціонування всього тесту IMLE-SLAM

Висновки

Традиційно визначення положення та орієнтації в основному покладалося на системи GNSS у поєднанні з інерціальними навігаційними системами, які здатні досягати субметрової точності позиціонування в лісистому середовищі.

Останні дослідження підкреслили потенціал методу SLAM (одночасної локалізації та картографування) для надання навігаційної інформації та показали багатообіцяючі результати.

Більшість алгоритмів SLAM переважно використовуються в приміщеннях і інтегруються лише з інерціальними навігаційними системами, тоді як навігаційні дані GNSS рідко включаються в методи SLAM.

Лісове середовище створює значно більші труднощі, ніж внутрішні простори, оскільки для спостереження зазвичай доступна лише обмежена кількість супутників.

Тим не менш, точну інформацію про місцезнаходження та швидкість можна отримати за допомогою GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою.

У той час як метод SLAM може ефективно працювати в лісах з високою щільністю характерних точок, його продуктивність погіршується у відкритих лісових середовищах.

Інтеграція високоточних даних про місцезнаходження та швидкість від GNSS з інерціальною навігаційною системою в метод SLAM істотно підвищує точність і надійність позиціонування, особливо для високоточного позиціонування в лісах.

Результати польових досліджень показали, що метод максимальної правдоподібності SLAM у густому лісі дозволяє правильно оцінити кути курсу, а точність горизонтального положення досягає дециметрового рівня,

перевершуючи продуктивність GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою.

Однак у відкритих лісових районах погіршення кута напряму призводить до значних помилок позиціонування.

Завдяки інтеграції точних оцінок кута курсу від GNSS з інерціальною навігаційною системою метод SLAM може досягти надійних результатів позиціонування.

У цьому сценарії горизонтальна точність всієї траєкторії становить 0,13 метра, що на 69% покращено порівняно з GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою.

Однак у відкритих лісах похибка позиціонування залишається більшою, ніж у густих лісах.

Якщо додатково враховувати дані про швидкість, точність позиціонування методу SLAM у відкритих лісах значно підвищується, досягаючи горизонтальної точності 0,06 метра, що на 83% покращується порівняно з GNSS у поєднанні з інерціальною навігаційною системою.

Результати демонструють, що інтеграція GNSS з інерціальною навігаційною системою в метод SLAM дає високоточний метод навігації, здатний генерувати точні карти місцевості.

Хоча обладнання, що використовується, відносно дороге, ці методи інтеграції також можна застосувати до більш доступних пристроїв.

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. Qian, C.; Liu, H.; Tang, J.; Chen, Y.; Kaartinen, H.; Kukko, A.; Zhu, L.; Liang, X.; Chen, L.; Hyypä, J. An Integrated GNSS/INS/LiDAR-SLAM Positioning Method for Highly Accurate Forest Stem Mapping. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 3. <https://doi.org/10.3390/rs9010003>

5. Рутцінгер, М.; Пратіхаст, А.К.; Ауде Елберінк, С.; Воссельман, Г. Виявлення та моделювання 3D-дерев за даними мобільного лазерного сканування. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2010, *38*, 520–525.

6. Холопайнен, М.; Канкаре, В.; Вастаранта, М.; Лян, Х.; Лін, Ю.; Ваая, М.; Ю, Х.; Хюйппя, Й.; Хюйппя, Х.; Каартінен, Х.; та ін. Картування дерев за допомогою повітряного, наземного та мобільного лазерного сканування — тематичне дослідження гетерогенного міського лісу. *Urban For. Urban Green.* 2013, *12*, 546–553.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**« Картографування складних лісових територій з використанням
інтегрованих технологій GNSS та LiDAR ».**

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)