

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет інформатичних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ АЛЬТИТУДИ»

Виконав: студент 4-го курсу, групи KIBT-216
спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка. ОП – комп'ютеризовані
інформаційні-вимірювальні технології

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Плахотнюк В.Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. каф. ІРТС

Дудатьєв І.А.

(прізвище та ініціали)

« 12 » 06 2025 р.

Рецензент: доц. каф. ІКСТ, к.т.н., доц.

Семенова О.О.

(прізвище та ініціали)

« 13 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

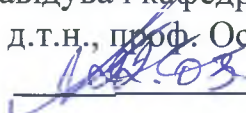
д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 16 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти І-й (бакалаврський)
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Спеціальність 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.
 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Плахотнюку Василю Романовиу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Засіб вимірювання альтитуду»

керівник роботи Дудат'єв Ігор Андрійович, к.т.н., доц., каф. ІРТС

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20”03 2025 року № 97

2. Строк подання студентом роботи 12 06 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Об'єкт, що контролюється – відстань (альтитуда) до відбиваючої поверхні. Метод вимірювання – лазерний, за методом часу польоту (ToF). Кількість вимірювальних каналів – 1. Дестабілізуючі фактори на основний канал – температура, освітлення, пил, кут нахилу поверхні.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Особливості засобів вимірювання альтитуду як об'єкта дослідження. Огляд сучасних засобів та методів вимірювання альтитуду. Розробка засобу вимірювання альтитуду. Фізико-математичне представлення розробленого вимірювального перетворювача альтитуду. Метрологічні та експериментальні дослідження розробленого засобу. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Візуалізація барометричного методу (за атмосферним тиском), Візуалізація геодезичного методу (теодоліт, нівелір), Візуалізація GPS-методу (Глобальна система позиціонування), Візуалізація альтиметричного методу (висотомір), Візуалізація лазерного сканування (LIDAR), Візуалізація онлайн-сервісів та карт, Динаміка використання методів вимірювання висоти, Сфери застосування лазерного методу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	доцент кафедри ІРТС к.т.н. доц., Дудатьєв ІА.		

7. Дата видачі завдання 25.03.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

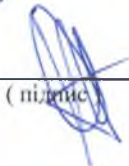
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	14.02.2025-28.02.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2025-19.03.2025	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на БКР.	20.03.2025-25.03.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз шляхів вирішення поставленої задачі.	26.03.2025-06.05.2025	
5.	Математичне моделювання. Розробка структурної схеми.	07.05.2025-26.05.2025	
6.	Розробка графічної частини БКР	27.05.2025-31.05.2025	
7.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	02.06.2025-06.06.2025	
8.	Нормоконтроль	07.06.2025-10.06.2025	
9.	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025-15.06.2025	
10.	Захист БКР ЕК	17.06.2025-18.06.2025	

Студент


(підпис)

Плахотнюк В.Р.

Керівник роботи


(підпис)

Дудатьєв І.А.

АНОТАЦІЯ

УДК 528.223

Плахотнюк В.Р. Засіб вимірювання альтитуди. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 63 с. На українській мові. Бібліогр.: 15 назв; табл.: 5; рис. 19.

Розроблений засіб вимірювання альтитуди базується на методі часу польоту (Time-of-Flight, ToF), що дозволяє досягти високої точності вимірювань. У роботі проаналізовано принципи дії лазерних висотомірів, їх переваги та недоліки порівняно з іншими методами (барометричним, GPS, радіохвильовим). Особлива увага приділена фізико-математичному обґрунтуванню роботи пристрою, розрахунку похибок та експериментальним дослідженням точності вимірювань.

Розроблений пристрій може знайти застосування в авіації, геодезії, будівництві, безпілотних системах та інших галузях, де потрібне точне визначення висоти. Використання лазерного методу забезпечує високу стабільність і точність, що робить його ефективним інструментом для сучасних вимірювальних систем.

Ключові слова: Альтиметр, засіб вимірювання, висота, метрологічні характеристики, похибка вимірювання.

ABSTRACT

Plahotniuk V.R. Altitude measurement device. Bachelor thesis. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 63 p. In Ukrainian language. Bibliography: 15 titles; table:5; Fig. 19.

The developed height measurement tool is based on the Time-of-Flight (ToF) method, which allows achieving high measurement accuracy. The paper analyzes the principles of operation of laser altimeters, their advantages and disadvantages are worsened by other methods (barometric, GPS, radio wave). Particular attention is paid to the physical and mathematical justification of the device's operation, calculation of errors and experimental studies of measurement accuracy.

The developed device can find application in aviation, geodesy, construction, unmanned systems and other industries where precise height determination is required. The use of the laser method provides high stability and accuracy, which makes it an effective tool for modern measurement systems.

Keywords: Altimeter, measuring instrument, height, metrological characteristics, measurement fault.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ АЛЬТИТУДИ ЯК ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ АЛЬТИТУДИ.....	10
1.1 Основні методи вимірювання висоти.....	10
1.2 Барометричні альтиметри.....	11
1.3 GPS та супутникові технології.....	16
1.4 Лазерні та радіохвильові висотоміри.....	21
1.5 Аналіз переваг і недоліків існуючих методів.....	31
1.6 Висновки до розділу	32
2 РОЗРОБКА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ АЛЬТИТУДИ.....	35
2.1 Розробка структурної та функціональної схеми.....	35
2.2 Блок-схема роботи засобу.....	37
2.3 Висновки до розділу	38
3 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА АЛЬТИТУДИ	41
3.1 Розробка рівняння перетворення.....	41
3.2 Висновки до розділу	46
4 МЕТРОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ЗАСОБУ.....	49
4.1 Розрахунок похибок вимірювань.....	49
4.2 Розрахунок точності вимірювань.....	52
4.3 Аналіз отриманих результатів.....	54
4.4 Висновки до розділу.....	56
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58
Додаток А (Обов’язковий) Ілюстративн частина	59
Додаток Б (Обов’язковий) Протокол перевірки роботи.....	63

ВСТУП

Актуальність.

У сучасних умовах точне визначення висоти об'єктів є критично важливим у багатьох сферах: авіації, геодезії, навігації, будівництві, топографії, а також у військовій справі. Зокрема, стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА), автономних систем та інтелектуальних транспортних рішень підвищує вимоги до точності, швидкодії та надійності засобів вимірювання висоти (альтитуди). Серед усіх сучасних методів, лазерний метод на основі часу польоту (ToF) виділяється як найбільш точний і надійний, що забезпечує високий рівень стабільності приладу навіть у складних зовнішніх умовах. Лазерні альтиметри є важливою складовою сучасних вимірювальних систем та можуть ефективно застосовуватись у мобільних, стаціонарних і повітряних платформах. Актуальність дослідження зумовлена також необхідністю створення вітчизняних високотехнологічних засобів вимірювання, здатних конкурувати з імпортними аналогами за параметрами точності, енергоефективності та адаптованості до конкретних задач.

Метою роботи є розробка високоточного засобу вимірювання альтитуди на основі лазерного методу, зокрема методу часу польоту, що дозволяє досягти високої точності та швидкодії приладу, придатного до використання в різних галузях техніки.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені такі задачі:

- аналіз основних методів вимірювання висоти (барометричних, GPS, лазерних, радіохвильових) з метою обґрунтування вибору оптимального методу;
- проведення метрологічного аналізу, оцінка точності та джерел похибок;

- розробка фізико-математичної моделі процесу вимірювання та рівняння перетворення;
- експериментальні дослідження та перевірка працездатності моделі в умовах, наближених до реальних;

Об'єктом дослідження є процес вимірювання висоти об'єкта над заданою поверхнею за допомогою лазерного сигналу, що ґрунтується на методі часу польоту.

Предметом дослідження є методи та технічні рішення, що забезпечують реалізацію лазерного способу вимірювання висоти (альтitudи) об'єкта, зокрема: принцип дії методу часу польоту (ToF), та алгоритми обробки вимірювального сигналу.

Методи дослідження. Методи дослідження, що застосовувалися у роботі, включають аналітичний аналіз сучасних способів вимірювання висоти з метою обґрунтування вибору лазерного методу як найбільш ефективного; фізико-математичне моделювання для опису принципу дії пристрою та побудови рівняння перетворення; метрологічний аналіз для оцінки точності, чутливості та впливу похибок; методи експериментальних досліджень для перевірки роботи засобу вимірювання в реальних умовах; а також методи комп'ютерного моделювання для візуалізації, аналізу результатів і оцінювання працездатності схемних рішень.

Практичне значення одержаних результатів.

У роботі отримані такі практичні результати:

1. У результаті виконання роботи було розроблено засіб вимірювання альтitudи, заснований на лазерному методі з використанням принципу часу польоту (ToF). Отримані результати мають вагоме практичне значення як для прикладного застосування в технічних системах, так і для подальших наукових досліджень у галузі метрології.

2. Створений пристрій забезпечує високу точність вимірювання відстані до відбиваючої поверхні, що дозволяє використовувати його в таких

сферах, як геодезія, авіація, будівництво, моніторинг інфраструктури, а також в автономних безпілотних системах. Завдяки врахуванню дестабілізуючих факторів (температура, освітлення, пил, кут нахилу) та реалізації відповідних алгоритмів обробки сигналів, досягнута висока стабільність і надійність вимірювань в умовах реального середовища.

3. Експериментально підтверджено працездатність та точність приладу розраховано похибки вимірювання і оцінено метрологічні характеристики, що дозволяє адаптувати пристрій до конкретних технічних вимог і завдань. Розроблена фізико-математична модель процесу вимірювання може бути використана для моделювання та оптимізації інших лазерних вимірювальних систем.

4. Результати цієї роботи можуть слугувати основою для подальшої модернізації систем визначення висоти, зокрема з метою зменшення енергоспоживання, підвищення діапазону дії або впровадження в багатоканальні вимірювальні комплекси.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати, що представлені в роботі, одержані автором самостійно.

1 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ АЛЬТИТУДИ ЯК ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ АЛЬТИТУД

1.1 Основні методи вимірювання висоти

У процесі вивчення різних фізичних явищ та застосувань техніки надзвичайно важливо розуміти принципи вимірювання висоти над рівнем моря — альтитуди. Існує кілька основних методів, кожен з яких має свої переваги, недоліки та область застосування.

Одним із найпоширеніших є барометричний метод, що базується на вимірюванні атмосферного тиску. Із підняттям на висоту тиск зменшується, і за допомогою відповідної шкали можна обчислити висоту. Такий підхід активно використовується в авіації, туристичних приладах та смарт-годинниках. Проте варто враховувати, що зміни погоди можуть впливати на точність показників.

Другий популярний метод — радіоальтиметрія. У цьому випадку прилад випромінює радіохвилі, які відбиваються від поверхні та повертаються назад. Визначаючи час проходження сигналу, обчислюється висота над землею. Цей метод дуже точний на малих висотах і широко використовується в літаках та безпілотниках.

GPS-метод дозволяє визначити висоту на основі супутникових сигналів. Він зручний тим, що не залежить від погоди, але менш точний щодо вертикального положення без застосування додаткових поправок. У багатьох мобільних телефонах і трекерах використовується саме цей спосіб.

Також існує лазерне (LiDAR) вимірювання, коли лазерний імпульс сканує поверхню, і за часом повернення сигналу розраховується висота. Цей метод застосовується в картографії, будівництві та навіть у планетарних місіях NASA.

І нарешті, існує гіпсометричний метод, що ґрунтується на залежності температури кипіння води від висоти. Хоча він є найменш точним, раніше його застосовували у польових умовах, де не було доступу до інших технологій.

Таким чином, кожен метод вимірювання висоти має свою специфіку. У сучасних пристроях часто поєднують кілька з них для досягнення більшої точності та надійності.

1.2 Барометричні альтиметри

Барометричні альтиметри є одними з найстаріших і найпоширеніших пристроїв для вимірювання висоти над рівнем моря. Принцип їх дії базується на зміні атмосферного тиску із висотою: чим вище знаходиться об'єкт, тим меншим є тиск повітря. Цю залежність використовують для обчислення альтитуди.

Конструктивно барометричний альтиметр є чутливим манометром, налаштованим на шкалу висоти. У більшості випадків використовуються anerоїдні барометри — герметичні металеві капсули, які стискаються або розширюються залежно від тиску навколишнього повітря. Зміни цієї деформації перетворюються у показник на шкалі висоти.

Однією з головних переваг барометричних альтиметрів є автономність — вони не потребують живлення або сигналу ззовні, як, наприклад, GPS. Крім того, вони здатні забезпечувати постійний і плавний показник висоти, що особливо важливо в авіації. Саме тому такі прилади встановлюють на літаках як базові індикатори висоти польоту.

Проте слід враховувати і недоліки. Головний з них — залежність точності від атмосферних умов. Оскільки тиск змінюється не лише з висотою,

а й через погодні явища, необхідно регулярно коригувати показання приладу за допомогою відомих значень тиску на рівні моря (QNH або QFE). Без такої корекції показання можуть бути суттєво спотвореними.

Сьогодні барометричні альтиметри використовуються не лише в авіації, а й у багатьох сучасних електронних пристроях: туристичних годинниках, фітнес-трекерах, смартфонах, дронах. У таких системах вони часто поєднуються з іншими сенсорами (GPS, гіроскопами), що дозволяє досягти кращої точності та надійності даних.



Рисунок 1.1 – Принцип дії барометричного альтиметру

Якщо детальніше розібрати принцип роботи, то барометричний альтиметр вимірює висоту, використовуючи залежність атмосферного тиску від висоти над рівнем моря. Згідно з барометричною формулою, тиск

зменшується приблизно на 1 гПа (гектопаскаль) на кожні 8–10 метрів підйому у тропосфері. Ця закономірність описується рівнянням:

$$P = P_0 \cdot e^{-\frac{Mgh}{RT}}, \quad (1.1)$$

де: P – тиск на висоті h , P_0 – тиск на рівні моря, M – молярна маса повітря, g – прискорення вільного падіння, R – універсальна газова стала, T – температура повітря (у Кельвінах).

Розібравши ретельно барометричний альтиметр можна побачити, що він складається з кількох ключових вузлів, кожен з яких відіграє визначену роль у процесі вимірювання висоти.

Основним чутливим елементом є анероїдна капсула. Вона виготовляється з тонкого металевого корпусу (зазвичай сплаву нікелю та міді), з якого відкачано повітря. Коли зовнішній атмосферний тиск змінюється, капсула деформується – стискається при збільшенні тиску та розширюється при його зменшенні. Для підвищення чутливості її поверхня часто робиться гофрованою.

Механічний передавальний механізм перетворює мікрорухи капсули у вимірний сигнал. У традиційних аналогових приладах це система важелів і пружин, яка передає рух на стрілку циферблату. У сучасних цифрових альтиметрах використовуються тензометричні датчики, що перетворюють механічну деформацію в електричний сигнал.

Система калібрування є критично важливою для точності вимірювань. Вона дозволяє враховувати базовий атмосферний тиск (QNH – тиск на рівні моря або QFE – тиск на злітній смузі). У авіаційних приладах пілот може вручну ввести ці значення, тоді як у побутових гаджетах (наприклад, смартфонах) калібрування часто відбувається автоматично через GPS.

Температурний компенсатор усуває вплив змін температури на матеріали капсули та механізму. Наприклад, при зниженні температури метал стає менш еластичним, що може спотворити показання. Для компенсації використовуються біметалічні елементи або цифрові алгоритми корекції.

Вихідний пристрій відображає результати вимірювань. У аналогових моделях це циферблат зі стрілкою, у цифрових – LCD або OLED дисплей. Сучасні пристрої також можуть передавати дані через Bluetooth або інші інтерфейси.

Барометричний альтиметр, як і будь-який вимірювальний прилад, має певні джерела похибок, які впливають на точність вимірювань. Розглянемо основні фактори, що викликають відхилення, та способи їх компенсації.

Атмосферні зміни тиску є основним джерелом похибок. Оскільки атмосферний тиск змінюється не лише з висотою, але й через погодні умови (циклони, антициклони), це може призводити до помилок у вимірюваннях. Для усунення цього ефекту використовується калібрування за опорним тиском (QNH або QFE). У авіації пілоти регулярно отримують актуальні дані про тиск на рівні моря від метеорологічних служб і вносять відповідні поправки в прилад.

Температурні впливи також суттєво впливають на результати вимірювань. При зниженні температури повітря стає щільнішим, що змінює характер зменшення тиску з висотою. Для компенсації цього ефекту сучасні альтиметри оснащуються температурними датчиками та спеціальними алгоритмами корекції. У механічних приладах використовуються біметалічні елементи, які автоматично враховують температурні зміни.

Механічні фактори, такі як знос пружин і важелів, можуть з часом погіршувати точність приладу. Особливо це характерно для аналогових моделей. У сучасних цифрових альтиметрах ця проблема вирішена за рахунок використання тензометричних датчиків, які не мають механічних частин, що зношуються.

Гістерезис матеріалів проявляється в тому, що анероїдна капсула не миттєво повертається у вихідний стан після деформації. Для мінімізації цього ефекту використовуються спеціальні сплави з низьким гістерезисом, такі як берилієва бронза, які зберігають стабільні властивості при багаторазових деформаціях.

Відхилення від стандартної атмосфери - ще один важливий фактор. Розрахункова формула висоти передбачає ідеальні умови, які рідко зустрічаються на практиці. Для підвищення точності в професійних приладах використовуються додаткові датчики (вологості, температури) і складні алгоритми обчислення, що враховують реальні атмосферні умови.

Для наочності представимо основні джерела похибок та методи їх усунення у вигляді таблиці:

Таблиця 1.1 – Основні джерела похибок у барометричних альтиметрів

Джерело похибки	Вплив на вимірювання	Метод компенсації
Атмосферні зміни тиску	Зміна показників без реальної зміни висоти	Калібрування за QNH/QFE
Температурні коливання	Зниження показників у холодну погоду	Температурні датчики та алгоритми корекції
Механічний знос	Поступове збільшення похибки	Використання тензодатчиків
Гістерезис матеріалів	Затримка у відгуку на зміни тиску	Сплави з низьким гістерезисом
Відхилення від стандартної атмосфери	Розбіжність з реальною висотою	Додаткові датчики та складні алгоритми

Підбивши підсумки можна сказати, що барометричний альтиметр, незважаючи на простоту принципу дії, є складним приладом, точність якого залежить від багатьох факторів. Сучасні технології дозволяють мінімізувати похибки за рахунок цифрової обробки даних, проте класичні механічні моделі все ще широко використовуються через свою надійність та незалежність від зовнішніх джерел живлення. Для отримання максимально точних результатів необхідно регулярно калібрувати прилад та враховувати зовнішні умови.

1.3 GPS та супутникові технології

Супутникові технології, зокрема GPS (Global Positioning System), стали невід'ємною частиною сучасних систем навігації та вимірювання висоти. На відміну від барометричних або радарних методів, GPS дозволяє отримувати висотні дані практично в будь-якій точці земної кулі за допомогою сигналів від супутників.

Принцип роботи GPS базується на триангуляції. Приймач визначає своє положення (широту, довготу та висоту) шляхом аналізу часу, за який сигнали надходять від щонайменше чотирьох супутників. Цей метод є незалежним від погодних умов, що робить його зручним у польових умовах.

Однією з головних переваг GPS у контексті вимірювання висоти є глобальне покриття та автономність — не потрібно встановлювати додаткове обладнання чи базові станції. Більшість сучасних смартфонів, фітнес-браслетів та дронів мають вбудовані GPS-модулі, що дозволяє користувачам у реальному часі отримувати дані про висоту.

Однак GPS має й недоліки. Найбільш суттєвий — нижча точність у вертикальній площині порівняно з горизонтальною. У типових умовах похибка може становити від 5 до 15 метрів. Також сигнал від супутників може погіршуватись у гірських районах, міських «каньйонах» або під землею, що знижує точність вимірювань.

Для підвищення точності використовуються допоміжні технології: наприклад, DGPS (диференціальний GPS) або RTK (Real-Time Kinematic), які забезпечують сантиметрову точність, але вимагають додаткових наземних станцій і не є масовими.

У науці та геодезії також використовуються супутникові альтиметри, що базуються на радарах або лазерах (як у місіях TOPEX/Poseidon, Jason), які вимірюють висоту океанічної поверхні або рельєфу Землі. Це дозволяє отримувати важливі дані для вивчення змін клімату, рівня моря та тектонічної активності.



Рисунок 1.2 – Принцип дії GPS-альтиметру

Фізична основа методу GPS-вимірювання висоти ґрунтується на трилатерації – визначенні положення об'єкта через точні виміри відстаней до супутників. Для розрахунку висоти необхідні сигнали мінімум від 4 супутників, оскільки система має вирішувати рівняння з 4 невідомими (широта, довгота, висота та похибка годинника приймача). Ключове рівняння якого є:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + c \cdot \Delta t, \quad (1.2)$$

де: d_i – псевдодальність до i -того супутника, (x_i, y_i, z_i) – координати супутника, (x, y, z) – координати приймача, c – швидкість світла, Δt – похибка годинника приймача

Сучасні GPS-альтиметри представляють собою складні багатокомпонентні системи, які функціонують на основі взаємодії трьох ключових ланок: супутникової групи, приймального пристрою та обчислювального модуля. Основу системи складає супутникова група GPS/GNSS, яка включає від 24 до 32 супутників, розміщених на середній орбіті висотою приблизно 20 180 км. Ці супутники рівномірно розподілені у шести орбітальних площинах і постійно передають критично важливі дані, що включають точні часові мітки (синхронізовані з атомними годинниками), ефемеридні дані (точні параметри власної орбіти) та альманахи (інформацію про інші супутники системи). Передача сигналу здійснюється на двох основних частотах: L1 (1575.42 МГц) для цивільних користувачів та L2 (1227.60 МГц) для прецизійних вимірювань.

Серцевиною системи є високочутливий GPS-приймач, який складається з кількох ключових модулів. Антенний модуль, зазвичай виконаний у вигляді патч-антени з круговою поляризацією, забезпечує чутливість до -160 dBm та

оснащений спеціальними засобами захисту від багатопроменевості. RF-секція включає низькошумний підсилювач (LNA) з коефіцієнтом шуму менше 1dB, двочастотний гетеродин для обробки сигналів L1/L2 та аналого-цифровий перетворювач з частотою дискретизації 20-40 MHz. Обчислювальне ядро системи містить спеціалізовані коррелятори для виділення супутникових сигналів, потужний мікропроцесор з архітектурою ARM Cortex та пам'ять для зберігання альманаху (до 30 днів).

Процес визначення висоти реалізується через складний алгоритмічний ланцюжок, який починається з виявлення супутникових сигналів та точного виміру часу їх затримки. Наступним кроком є розрахунок псевдодальностей та розв'язання системи навігаційних рівнянь. Для підвищення точності в системі передбачені численні механізми корекції, включаючи компенсацію іоносферних ефектів (за допомогою двочастотного методу), тропосферних спотворень (з використанням моделі Hopfield) та релятивістських ефектів. В результаті система видає координати у форматі висоти над еліпсоїдом WGS84 з точністю 5-15 м у стандартному режимі та частотою оновлення від 1 до 10 разів на секунду.

GPS-альтиметрія стикається з комплексом технічних та природних факторів, що впливають на точність вимірювань. Основні джерела похибок можна класифікувати за фізичною природою їх виникнення та механізмами впливу на результати вимірювань.

Найсуттєвішою проблемою є іоносферні затримки, що виникають через взаємодію радіохвиль із іонізованими шарами атмосфери на висотах 80-1000 км. Цей ефект призводить до уповільнення поширення сигналу на 5-50 наносекунд, що еквівалентно похибкам у визначенні відстані до 15 метрів. Для їх компенсації сучасні системи використовують комбінацію методів: двочастотні вимірювання (L1/L2), що дозволяють математично виключити іоносферний вплив; кліматичні моделі (наприклад, модель Klobuchar); та диференціальні поправки від наземних станцій.

Тропосферні затримки, обумовлені властивостями нижніх шарів атмосфери (до 15 км), проявляються через зміну швидкості поширення сигналу в залежності від температури, тиску та вологості повітря. Типові похибки становлять 2-5 метрів і компенсуються за допомогою спеціальних метеорологічних моделей (Hopfield, Saastamoinen) та датчиків мікроклімату, вбудованих у високоточні приймачі.

Важливим джерелом систематичних похибок є неточності ефемерид - даних про орбіти супутників. Похибки прогнозування положення супутників можуть досягати 1-2 метрів. Для їх усунення використовуються прецизійні ефемериди, що регулярно оновлюються, та диференціальні методи (DGPS), де наземні референсні станції передають поправки в реальному часі.

Проблема багатопроменевості особливо актуальна в міських умовах, де сигнали відбиваються від будівель, мостів та інших споруд. Це призводить до появи "помилкових" сигналів із зміненою затримкою, що спотворює результати вимірювань. Для боротьби з цим явищем застосовуються антени з контрольованою діаграмою спрямованості, адаптивні фільтри сигналу та спеціальні алгоритми обробки.

Внутрішні шуми приймача обумовлені тепловими процесами в електронних компонентах та квантовими ефектами. Хоча їх вплив відносно невеликий (0,5-1 метр), для високоточних вимірювань він потребує обліку через статистичні методи обробки сигналу та фільтрацію Калмана. Геометричний фактор (GDOP) відображає вплив взаємного розташування супутників на точність вимірювань. Погана геометрія (коли всі супутники знаходяться в одній площині) може збільшити похибки в 2-3 рази. Для оптимізації використовуються мультисистемні приймачі (GPS+ГЛОНАСС+Galileo), що значно розширюють кількість доступних супутників.

Таблиця 1.2 – Джерела похибок та методи їх компенсації для GPS-альтиметрів

Джерело похибки	Вплив на точність	Методи компенсації
Іоносферні затримки	До 15 м	Двочастотні вимірювання
Тропосферні ефекти	2-5 м	Метеомоделі + датчики
Ефемерідні помилки	1-2 м	Прецизійні ефемериди
Багатопроменивості	До 5 м	Направлені антени
Шуми приймача	0.5-1 м	Фільтрація Калмана

Незважаючи на численні джерела похибок, сучасні GPS-альтиметри забезпечують прийнятну точність завдяки комплексній системі компенсації. Найбільш ефективними методами є двочастотні вимірювання, диференціальні поправки та використання мультисистемних приймачів. Майбутній розвиток технології пов'язаний із впровадженням квантових стандартів часу та штучного інтелекту для обробки даних.

1.4 Лазерні та радіохвильові висотоміри

Серед різноманітних методів вимірювання висоти лазерні (LiDAR) та радіохвильові (радіоальтиметри) висотоміри є найбільш точними та технологічно досконалими. Вони використовуються як у цивільному, так і у військовому секторі, в авіації, геодезії, космічних дослідженнях та автономних транспортних системах.

Радіохвильові висотоміри працюють за принципом визначення часу проходження радіосигналу до поверхні Землі та назад. Вони особливо ефективні на малих висотах і забезпечують миттєве вимірювання з високою точністю. Такі прилади є обов'язковими для літаків і вертольотів, оскільки дозволяють визначити справжню висоту над землею (а не над рівнем моря), що критично під час посадки та польотів на низьких висотах.



Рисунок 1.3 – Принцип дії радіохвильового(-локаційного) альтиметру

Радіохвильовий висотомір функціонує на принципі вимірювання часу проходження електромагнітного імпульсу до поверхні і назад (метод ToF - Time of Flight). Фізична основа методу ґрунтується на властивостях поширення радіохвиль у просторі та їх взаємодії з різними типами поверхонь. Система генерує короткі радіоімпульси в діапазоні частот 4-8 ГГц (для цивільних застосувань) за допомогою високостабільного генератора СВЧ. Ці імпульси випромінюються через спеціалізовану антенну систему (зазвичай патч-або параболічну антену) з коефіцієнтом корисної дії понад 80%.

Формований промінь має чітку спрямованість, що дозволяє мінімізувати розсіювання енергії.

Сучасні радіохвильові висотоміри застосовують комплекс передових технологій для досягнення високої точності вимірювань. Однією з ключових технологій є частотно-модульований безперервний сигнал (FMCW), де лінійно змінюється частота випромінюваного сигналу. Цей метод дозволяє визначати відстань через аналіз різниці частот між прямим і відбитим сигналами, що забезпечує точність на рівні десятків сантиметрів. Принцип FMCW особливо ефективний для вимірювань на малих і середніх дистанціях, оскільки дозволяє уникнути неоднозначності, властивої імпульсним методам.

Важливим доповненням є фазова кореляція, яка ґрунтується на точному аналізі зсуву фаз між переданим і прийнятим сигналами. Цей метод забезпечує високу роздільну здатність на рівні міліметрів, особливо при роботі з когерентними сигналами. Фазові вимірювання особливо ефективні для статичних об'єктів, де можна досягти надзвичайно високої точності.

Найбільш універсальним підходом є імпульсно-фазова техніка, яка поєднує переваги методів часу польоту (ToF) і фазових вимірювань. У цьому випадку система використовує короткі імпульси для грубого визначення відстані з подальшим точним фазовим аналізом. Така комбінація дозволяє усунути недоліки окремих методів і забезпечити високу точність у широкому діапазоні відстаней.

Процес обробки сигналу в сучасних системах включає кілька критично важливих етапів. Першим кроком є оцифрування аналогового сигналу за допомогою високошвидкісних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) з частотою дискретизації 100-500 мільйонів відліків на секунду (MS/s). Це дозволяє захопити всі нюанси форми сигналу з високою точністю.

Наступним етапом є цифрова кореляція, де спеціалізовані алгоритми аналізують отримані цифрові дані для точного визначення затримки сигналу. Сучасні системи використовують складні алгоритми обробки сигналів,

включаючи методи узгодженої фільтрації та спектрального аналізу, що дозволяє виділити корисний сигнал навіть при низькому відношенні сигнал/шум.

Завершальним етапом є введення поправок, які враховують вплив атмосферних умов (температура, вологість, тиск) та особливостей рельєфу поверхні. Сучасні системи використовують складні фізичні моделі для компенсації цих ефектів, що дозволяє досягти точності вимірювань на рівні одиниць сантиметрів навіть у складних умовах.

Радіохвильові висотоміри стикаються з трьома основними типами проблем, які суттєво впливають на точність вимірювань. Проблема багатопроменевості особливо актуальна в міських умовах, де сигнал може відбиватися від будівель, мостів та інших споруд, створюючи "помилкові" відлуння. Ці додаткові сигнали, які проходять більш довгий шлях, приходять на приймальну антену з запізненням, що призводить до помилок у визначенні відстані, які можуть сягати 3-5 метрів. Особливо сильно цей ефект проявляється поблизу скляних фасадів або металевих конструкцій, які мають високий коефіцієнт відбиття.

Теплові шуми приймача є фундаментальною проблемою, обумовленою хаотичним рухом електронів у електронних компонентах. Ці шуми мають нормальний розподіл і зростають із підвищенням температури та збільшенням смуги пропускання приймача. На практиці вони обмежують мінімальний рівень сигналу, який може бути достовірно виявлений, і можуть спричиняти помилки вимірювань на рівні 0,5-2 метрів.

Інтерференція від інших радіоджерел є особливо актуальною в умовах щільного радіоспектра, коли робота висотоміра може перешкоджати іншим пристроям, що працюють у тому ж частотному діапазоні. Це може призводити до раптових збоїв у роботі або систематичних помилок, особливо в промислових умовах або поблизу аеропортів.

Для боротьби з цими проблемами сучасні радіохвильові висотоміри використовують низку передових технологій. Частотна модуляція (FMCW) є одним з найефективніших методів, який передбачає лінійне змінювання частоти передаваного сигналу з часом. При цьому різниця частот між переданим і прийнятим сигналами прямо пропорційна відстані до об'єкта, що дозволяє ефективно відокремлювати основний сигнал від багатопроменевих відображень. Типова смуга модуляції становить 100-500 МГц, що забезпечує роздільну здатність по дальності близько 0,3-1,5 метра.

Когерентне детектування є іншим потужним інструментом, який дозволяє виявляти фазову інформацію в сигналі. Цей метод особливо ефективний для боротьби з шумами, оскільки дозволяє виділити корисний сигнал навіть при низькому відношенні сигнал/шум. Він ґрунтується на змішуванні прийнятого сигналу з опорним сигналом того ж передавача, що дозволяє компенсувати фазові спотворення та підвищити точність вимірювань до десятків сантиметрів.

Поліпшені алгоритми кореляції представляють собою складні математичні методи обробки сигналів, які враховують статистичні властивості як корисного сигналу, так і перешкод. Вони включають адаптивну фільтрацію, багатоканальну обробку та методи машинного навчання для ідентифікації та відсіву помилкових сигналів. Сучасні реалізації цих алгоритмів можуть працювати в реальному часі на спеціалізованих цифрових сигнальних процесорах, забезпечуючи стабільну роботу навіть у складних умовах.

Додатково для підвищення точності використовуються антенні системи з контролем діаграми спрямованості, що дозволяє фізично зменшити кількість багатопроменевих відображень, а також методи частотного рознесення, коли вимірювання проводяться на декількох частотах одночасно для виключення впливу вузькосмугових перешкод. Комбінація цих методів дозволяє сучасним радіохвильовим висотомірам досягати точності на рівні 0,1-0,5 метра навіть у складних умовах міської забудови.

Таблиця 1.3 – Джерела похибок та методи їх компенсації для радіохвильових висотомірів

Джерело	Вплив	Метод компенсації
Багатопроменевості	3-5 м	Частотне рознесення
Шуми	0.5-2 м	Когерентна обробка
Інтерференція	До 10 м	Адаптивні фільтри

Радіохвильові висотоміри є надійними пристроями для вимірювання відстаней у різних умовах, включаючи складні середовища з поганою видимістю. Їх основні переваги — незалежність від погодних умов, здатність працювати через легкі перешкоди та відносна простота конструкції. Однак вони мають обмеження у вигляді меншої точності (0.1–2 м) порівняно з лазерними аналогами та чутливість до багатопроменевості в міській забудові.

Лазерні висотоміри (LiDAR) використовують імпульси лазерного світла для сканування поверхні. Завдяки дуже коротким довжинам хвиль лазера, точність таких вимірювань надзвичайно висока — до сантиметра. LiDAR-технології дозволяють створювати 3D-карти місцевості, будівель і навіть аналізувати структуру лісу або археологічні об'єкти, заховані під рослинністю.



Рисунок 1.4 – Лазерний висотомір Leica ScanStation P50

Попри ці обмеження, лазерні та радіохвильові висотоміри справедливо вважаються найкращими серед усіх методів вимірювання висоти, оскільки забезпечують найбільшу точність, швидкодію та надійність. Їх використовують у найбільш відповідальних і наукоємних сферах, де будь-яка похибка може мати серйозні наслідки. Саме тому ці технології сьогодні є еталоном точного вимірювання висоти.



Рисунок 1.5 – Принцип дії лазерного(LiDAR) альтиметру

Принцип роботи лазерного висотоміра представляє собою високотехнологічну вимірювальну систему, що ґрунтується на двох фундаментальних фізичних принципах - оптичній триангуляції та методі часу польоту (Time-of-Flight, ToF). Ця технологія реалізується через складний ланцюжок оптико-електронних перетворень, де кожен компонент системи грає вирішальну роль у забезпеченні високої точності вимірювань.

Процес вимірювання починається з генерації лазерного імпульсу напівпровідниковим лазерним діодом, який працює в інфрачервоному діапазоні. Типово використовуються два варіанти довжин хвиль: 905 нанометрів, що забезпечує оптимальний баланс між вартістю компонентів і атмосферним поглинанням, та 1550 нанометрів, який пропонує більшу безпеку для очей і менше розсіювання в умовах туману. Сформований лазерний імпульс має надзвичайно коротку тривалість (від 5 до 10 наносекунд) і високу пікову потужність (від 10 до 100 Ват), що забезпечує достатню енергію для реєстрації відбитого сигналу, мінімальну невизначеність у вимірюванні часу та зменшення впливу атмосферних спотворень.

Оптична система висотоміра, що складається з комбінації асферичних лінз і дзеркал високої якості, виконує ряд критично важливих функцій. Вона формує вузький промінь з розбіжністю від 0,5 до 2 мілірадіан, компенсує хроматичні аберації, захищає систему від паразитних засвічувань і забезпечує точне калібрування оптичної осі. Ключовим параметром якості променя є коефіцієнт M^2 , який в ідеальних умовах наближається до одиниці.

Система прийому сигналу включає високочутливі фотодетектори двох основних типів. Лавинні фотодіоди (APD) з коефіцієнтом посилення від 100 до 1000 разів, часом наростання від 0,5 до 2 наносекунд і темновим струмом від 1 до 10 пікоампер, а також однофотонні лавинні діоди (SPAD) з квантовою ефективністю 20-40%, часом мертвої зони 20-100 наносекунд і максимальною темповою частотою від 100 тисяч до 1 мільйона імпульсів за секунду.

Відбитий сигнал, який може бути в мільйони-мільярди разів слабшим за випромінений, проходить через низькошумний підсилювач з коефіцієнтом посилення від 100 тисяч до 1 мільйона разів і пропускну здатністю від 100 до 500 мегагерц. Особлива увага при проектуванні підсилювача приділяється мінімізації шуму (менше 1 нановольта на корінь герца), лінійності амплітудної характеристики та стабільності параметрів при зміні температури навколишнього середовища.

Вимірювання часу затримки здійснюється високоточними цифровими перетворювачами часу (Time-to-Digital Converter, TDC) з роздільною здатністю від 10 до 50 пікосекунд, нелінійністю менше 0,1% і температурною стабільністю від 1 до 5 частин на мільйон на градус Цельсія. Сучасні TDC використовують передові технології, такі як вертикальна інтерполяція (TDC-GPX), таутомерні затримкові лінії та цифрову фазову автопідстройку частоти (DPLL).

Обчислення відстані проводиться за спеціальною формулою, що враховує швидкість світла, вимірний час затримки, коефіцієнт заломлення повітря, кут нахилу приладу та систематичні поправки. Для подальшого підвищення точності вимірювань застосовуються такі методи, як багатоімпульсне усереднення (від 100 до 1000 імпульсів), адаптивна фільтрація за алгоритмом Калмана та температурна компенсація оптичних компонентів.

Так як і інші прилади та засоби, лазерні висотоміри стикаються з низкою фізичних явищ, що суттєво впливають на точність вимірювань, проте сучасні технології пропонують ефективні методи компенсації цих похибок.

Атмосферні умови є одним з найбільш критичних факторів - дощ зменшує ефективну дальність вимірювань на 30-60%, а густий туман може знизити дальність на 90% через розсіювання та поглинання лазерного променя краплями води. Цей ефект особливо помітний на довжинах хвиль 905 нм, тоді як 1550 нм демонструють кращу проникність у вологому середовищі за рахунок меншого розсіювання. Відбивні властивості поверхні створюють ще один виклик - темні матеріали з низьким коефіцієнтом відбиття (наприклад, асфальт з коефіцієнтом 0.05-0.15) знижують відношення сигнал/шум (SNR) на 20-40 dB порівняно з яскравими поверхнями, що призводить до зростання ймовірності помилкових вимірювань або повної втрати сигналу. Куткові помилки виникають при відхиленні візирної осі приладу від вертикалі - кожен

градус нахилу вносить додаткову похибку приблизно 1.7% від вимірюваної відстані, що на 100 метрах становить вже 1.7 метра помилки.

Для боротьби з цими ефектами застосовують комплекс технічних та алгоритмічних рішень. Температурна стабілізація лазерного діода за допомогою елементів Пельтьє та терморезисторів дозволяє підтримувати стабільність довжини хвилі з точністю ± 0.1 нм, що критично важливо для узгодженої роботи оптичної системи. Адаптивні фільтри Калмана реалізують складну математичну модель, яка враховує не лише поточні вимірювання, але й динаміку зміни положення об'єкта, що дозволяє компенсувати до 70-80% випадкових похибок. Багатоімпульсне усереднення (від 100 до 1000 послідовних вимірювань) з подальшою статистичною обробкою даних дозволяє зменшити вплив атмосферної турбулентності та інших випадкових факторів.

Сучасні системи також використовують активні методи компенсації, такі як динамічне регулювання потужності лазера в залежності від відстані та якості відбитого сигналу, а також адаптивну зміну частоти опитування для різних типів поверхонь. Додаткові датчики (IMU, температурні сенсори, барометри) забезпечують додаткові дані для введення поправок у реальному часі, що в сукупності дозволяє досягати субсантиметрової точності навіть у складних умовах експлуатації.

Таблиця 1.4 – Джерела похибок та методи їх компенсації для лазерних висотомірів

Джерело	Вплив	Метод компенсації
Атмосфера	До 50% втрат	Багаточастотні лідари
Відбиття	$\pm 5-15$ см	Калібрування
Кут нахилу	1.7%/градус	IMU-стабілізація

Лазерні системи забезпечують кращу точність (до 1 см), але чутливі до погодних умов. Радіолокаційні методи працюють у будь-яких умовах, але мають меншу роздільну здатність. Оптимальне рішення залежить від умов експлуатації: для відкритих просторів - лазерні системи, для складних умов – радіолокаційні

1.5 Аналіз переваг і недоліків існуючих методів

Існує декілька основних методів вимірювання висоти: барометричний, супутниковий (GPS), радіохвильовий та лазерний. Кожен з них має свої переваги та недоліки, а також галузі застосування, в яких він найбільш ефективний.

Барометричні альтиметри базуються на вимірюванні атмосферного тиску. Зі зростанням висоти тиск зменшується, що й дозволяє визначити поточну альтитуду. Основною перевагою є автономність та простота конструкції. Цей метод не залежить від зовнішніх сигналів та дозволяє здійснювати безперервні вимірювання. Проте точність барометричного методу істотно залежить від погодних умов, що вимагає постійного калібрування.

GPS та інші супутникові технології забезпечують вимірювання висоти шляхом обчислення відстані до супутників через аналіз сигналів. Вони мають глобальне покриття та дозволяють визначати положення у будь-якій точці Землі. Однак вертикальна точність значно поступається горизонтальній — похибка може сягати 10–15 метрів. Крім того, GPS схильний до збоїв у гірських районах, приміщеннях або серед міської забудови.

Радіохвильові висотоміри, що використовують радіосигнали для визначення висоти над землею, забезпечують високу точність на малих висотах та працюють у реальному часі. Вони широко використовуються в

авіації. Їх недоліками є обмежена зона дії та залежність від особливостей рельєфу.

Найточнішими є лазерні висотоміри (LiDAR). Вони застосовують лазерні імпульси для створення точного рельєфного профілю місцевості. Точність таких вимірювань досягає сантиметрів, що дозволяє використовувати їх у картографії, автономному транспорті, археології та екологічному моніторингу. Основними недоліками є висока вартість та чутливість до погодних умов, однак при правильному використанні вони не мають собі рівних за якістю отриманих даних.

Таким чином, кожен метод має свої переваги залежно від завдань. Проте, проаналізувавши точність, надійність та універсальність, можна зробити висновок, що лазерний метод (LiDAR) є найкращим серед усіх. Його точність, здатність будувати тривимірні карти, широкий спектр застосування роблять його провідною технологією у сфері вимірювання висоти.

1.6 Висновки до розділу

У сучасному світі вимірювання висоти має важливе значення в багатьох галузях — від авіації, геодезії, будівництва до наукових досліджень, військових технологій і навіть археології. Від точності висотомірних систем часто залежить безпека польотів, ефективність навігації або якість побудови тривимірних моделей рельєфу. Розглянемо чотири основні підходи до визначення висоти: барометричний, GPS-супутниковий, радіохвильовий та лазерний.

Барометричні висотоміри — це класичний метод, який використовує залежність атмосферного тиску від висоти над рівнем моря. Такі пристрої є компактними, енергонезалежними і добре підходять для автономних застосувань, зокрема в авіації, туризмі, спортивному орієнтуванні. Проте вони мають суттєвий недолік: зміна погоди або атмосферного тиску може

викликати значні похибки. Щоб зменшити цю похибку, барометричні альтиметри потребують регулярного калібрування, часто з використанням зовнішніх джерел висоти, що ускладнює їх використання в динамічному середовищі.

GPS-технології забезпечують глобальне покриття й дозволяють визначати координати у будь-якій точці світу. Це зробило їх незамінними для морської та автомобільної навігації. Визначення висоти через GPS також можливе, але має обмежену точність (зазвичай похибка — 10–15 метрів), що недостатньо для задач високої точності. Додаткові технології, такі як DGPS або RTK, покращують точність, але потребують спеціального обладнання. GPS-сигнали можуть бути ненадійними у міських каньйонах, горах або всередині будівель, що обмежує застосування цього методу.

Радіохвильові висотоміри широко використовуються в авіаційній галузі для визначення справжньої висоти над рельєфом. Вони працюють шляхом випромінювання радіосигналу і фіксації часу його відбиття від земної поверхні. Це дозволяє отримати точні дані у реальному часі незалежно від атмосферного тиску. Радіохвильові висотоміри особливо цінні під час зльоту й посадки літаків, коли потрібно точно знати відстань до поверхні. Серед недоліків — обмежена ефективність на великих висотах і залежність точності від характеристик поверхні (наприклад, води, лісу чи скель).

Лазерні висотоміри є оптимальним вибором у випадках, коли потрібна висока точність (до 1–3 см) на коротких і середніх дистанціях, особливо в умовах, де інші методи мають суттєві обмеження. Наприклад, барометричні альтиметри, хоча й прості та автономні, залежать від атмосферного тиску, що змінюється через погодні умови, і потребують постійного калібрування. Їх точність рідко перевищує 1–5 м, що недостатньо для геодезії, картографування чи прецизійних промислових вимірювань. GPS-альтиметри, незважаючи на глобальний охоплення, мають низьку вертикальну точність (5–15 м) і залежать від кількості супутників та якості сигналу, що робить їх непридатними для

завдань, де потрібні сантиметрові похибки. Радіохвильові висотоміри, хоч і працюють у будь-яких погодних умовах, поступаються лазерним у точності (0,1–2 м) через більшу довжину хвилі, що обмежує їх застосування в задачах, де потрібна деталізація рельєфу чи контроль мікрометрових змін.

Лазерні висотоміри (LiDAR) вирізняються найвищою роздільною здатністю завдяки ультракоротким імпульсам і вузькому променю, що дозволяє фіксувати відстань до конкретної точки з мінімальною похибкою. Вони незамінні в геодезії, будівництві, археології та автономних системах, де критично важливі точні 3D-сканування. Хоча вони чутливі до опадів і туманів, сучасні алгоритми компенсації (багатоімпульсне усереднення, фільтри Калмана) дозволяють знизити вплив цих факторів. Таким чином, лазерні висотоміри є найкращим вибором, коли потрібна максимальна точність і деталізація, тоді як інші типи приладів доречніші для загальних або спеціалізованих завдань, де важливіше автономність або всепогодність.

2 РОЗРОБКА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ АЛЬТИТУДИ

2.1 Розробка структурної та функціональної схеми

Розглянемо структурну схему лазерного висотоміра більш детально на рисунку, наведеному нижче:

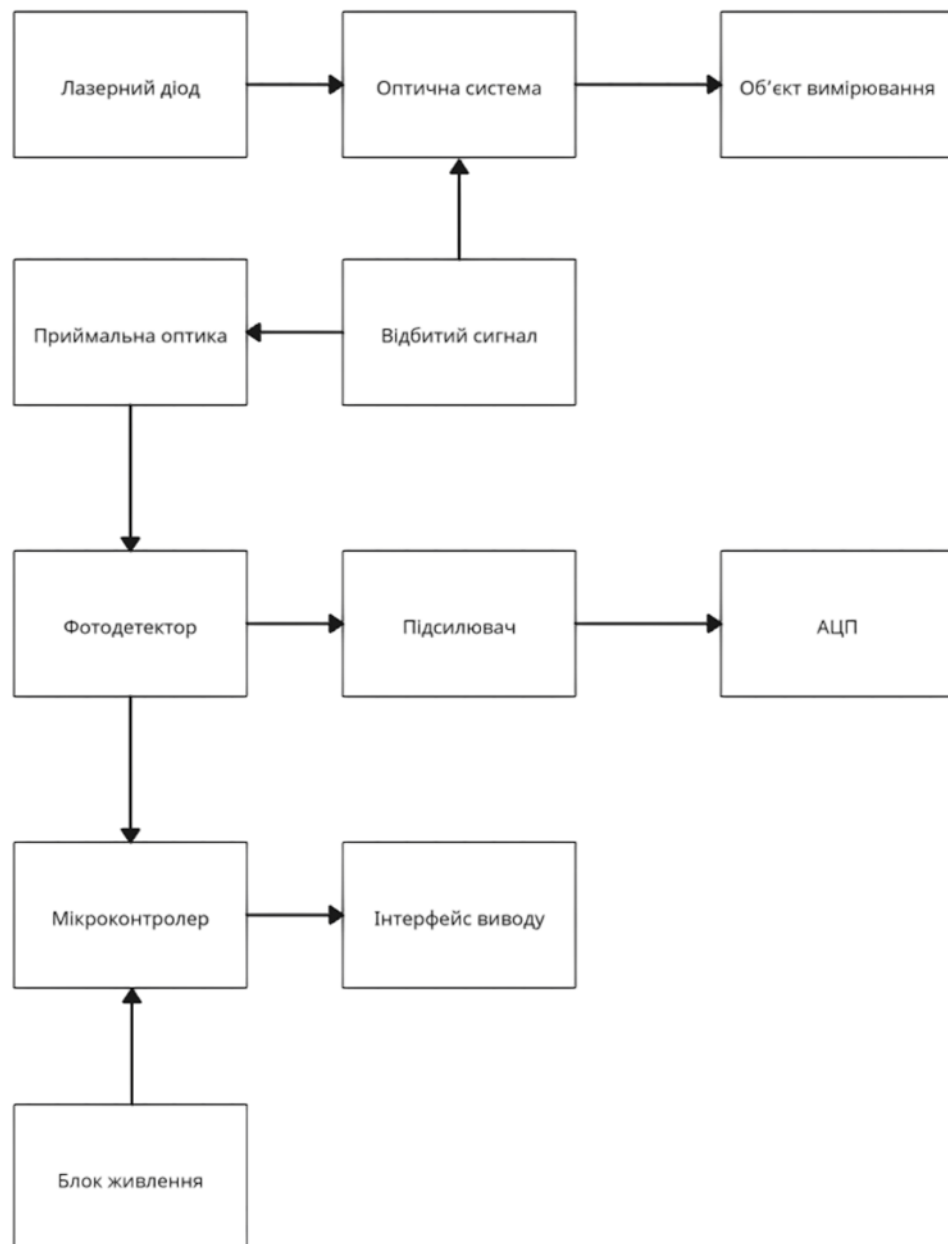


Рисунок 2.1 – Структурна схема висотоміра

Простіше кажучи, лазерний діод генерує короткі імпульси світла з довжиною хвилі 905 нм або 1550 нм (остання довжина хвилі вважається безпечнішою для людського ока), які далі спрямовуються через оптичну систему. Вона формує вузький, добре сфокусований промінь за допомогою лінз, дзеркал або їх комбінації. Коли лазерний імпульс досягає поверхні об'єкта, він відбивається й повертається назад, де приймальна оптика збирає та фокусує його на чутливому фотодетекторі. Цей детектор перетворює отриманий світловий сигнал у слабкий електричний, який потребує підсилення — для цього використовується підсилювач.

Далі сигнал надходить до аналого-цифрового перетворювача (АЦП), де він оцифровується й передається до мікроконтролера, наприклад, серії STM32. Мікроконтролер виконує основну обчислювальну функцію — він вимірює час проходження імпульсу й визначає відстань (або висоту) за формулою: $\text{Висота} = (c \cdot \Delta t) / 2$, де c — швидкість світла, а Δt — затримка між моментом випромінювання та прийому сигналу. Отримані дані відображаються на дисплеї або передаються зовнішнім пристроям через інтерфейс виводу.

Уся система функціонує завдяки блоку живлення, який забезпечує стабільну роботу кожного з її компонентів. Такий підхід дозволяє створити простий, ефективний і високоточний засіб вимірювання висоти для різних сфер застосування.

Функціональна схема описує алгоритм роботи пристрою, а саме: мікроконтролер подає керуючий сигнал на лазерний діод, який формує короткий світловий імпульс. У той самий момент активується таймер, що дозволяє з високою точністю зафіксувати момент випромінювання. Після того як імпульс відбивається від об'єкта, фотодетектор реєструє його повернення, і таймер зупиняється — таким чином визначається часовий інтервал Δt між передачею та прийомом сигналу. Далі мікроконтролер виконує обчислення часу польоту та на основі формули Time-of-Flight визначає висоту або відстань до об'єкта. Щоб підвищити достовірність результату, враховуються додаткові

фактори: затухання сигналу, зміна кута нахилу пристрою, а також можливі зовнішні впливи. Після розрахунків отримане значення виводиться на дисплей або передається до зовнішнього пристрою. Для покращення точності вимірювань можуть бути використані додаткові елементи: цифрові фільтри (наприклад, фільтр Калмана) для згладжування шумів і стабілізації результатів, температурні сенсори для компенсації впливу температури на швидкість поширення світла, а також інерціальні вимірювальні модулі (IMU), які дозволяють врахувати положення та нахил пристрою у просторі. Такі доповнення значно покращують точність та надійність вимірювань у динамічних або нестабільних умовах.

2.2 Блок-схема роботи засобу

Блок-схема — це графічне представлення алгоритму за допомогою спеціальних блоків та стрілок, яке показує послідовність дій. Вона потрібна, щоб наочно і зрозуміло відображати логіку процесу чи програми, особливо в програмуванні, аналізі чи системному проектуванні. Вона потрібна, щоб наочно показати алгоритм його роботи: від випромінювання лазерного імпульсу до обчислення відстані за часом затримки відбитого сигналу. Вона допомагає при проектуванні, зневадженні та ремонті пристрою, а також для навчання персоналу чи документації

Детально схему лазерного висотоміра можна розглянути на рисунку, котрий наведено нижче:

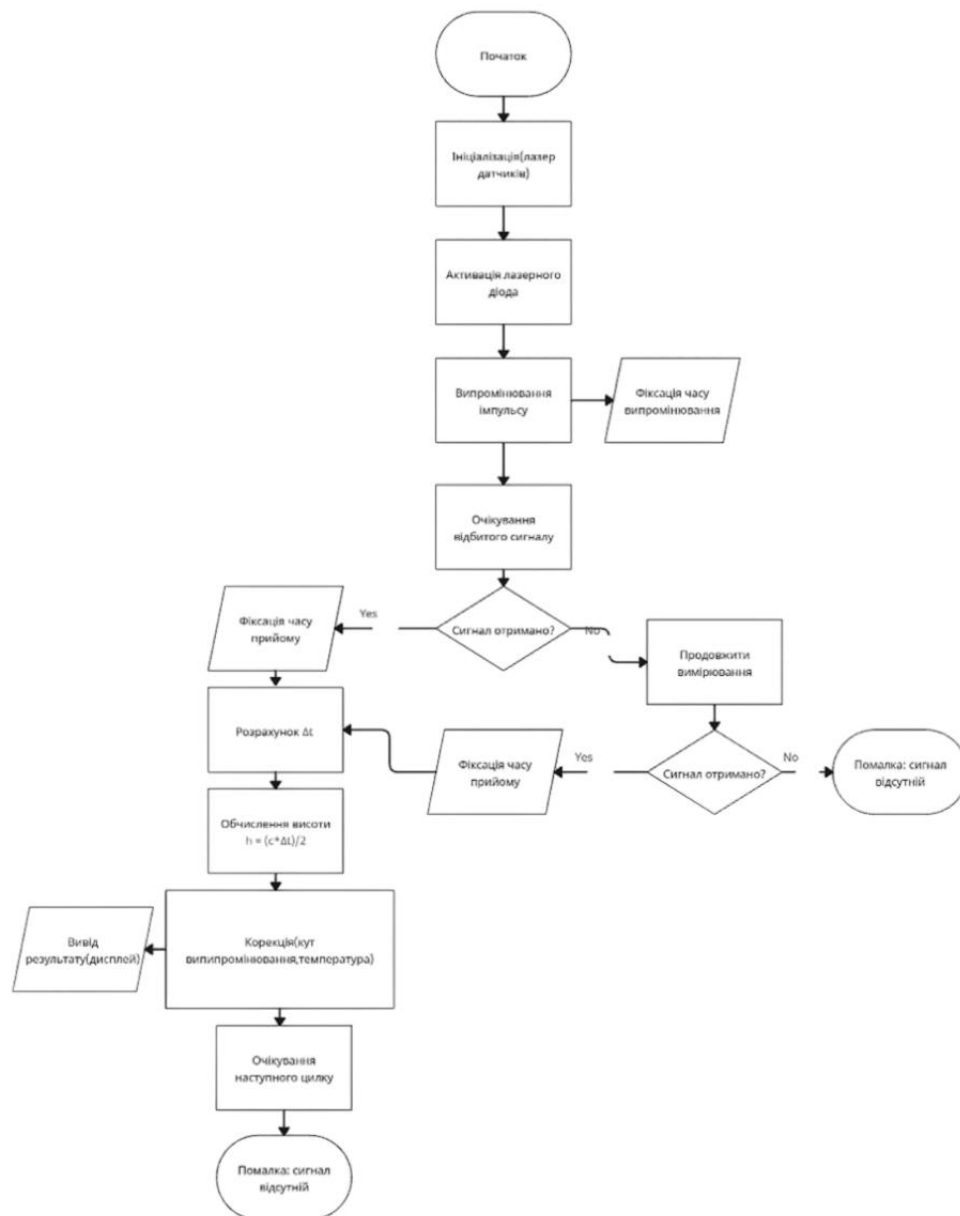


Рисунок 2.2 – Блок-схема роботи висотомір

2.3 Висновки до розділу

Лазерний висотомір є сучасним засобом вимірювання відстані, що ґрунтується на методі час-польоту (Time-of-Flight, ToF). Його робота базується на точному визначенні часу, необхідного для проходження лазерного імпульсу до цілі та повернення відбитого сигналу до приймача. Пристрій складається з

оптичної системи, електронних компонентів та програмного забезпечення для обробки даних, що в сукупності забезпечує високу точність вимірювань.

Фізичний принцип дії лазерного висотоміра заснований на оптичній триангуляції та точному хронометражі. Короткий імпульс лазерного випромінювання з довжиною хвилі 905-1550 нм формується лазерним діодом і спрямовується до вимірюваної поверхні через систему лінз. Момент випромінювання фіксується високоточним таймером мікроконтролера.

Відбитий сигнал реєструється спеціальним фотодетектором, після чого система обчислює час затримки між випромінюванням і прийомом сигналу. На основі цього часу розраховується відстань за класичною формулою ToF, де враховується швидкість світла. Точність таких вимірювань значною мірою залежить від стабільності таймера, якість якого визначає кінцеву похибку пристрою. Апаратна реалізація сучасних лазерних висотомірів включає кілька ключових компонентів. Лазерний діод з потужним драйвером забезпечує генерацію коротких імпульсів з високою енергією. Оптична система, що складається з лінз та дзеркал, формує вузький спрямований промінь з мінімальною розбіжністю. Для реєстрації відбитого сигналу використовуються чутливі фотодетектори, такі як лавинні фотодіоди або PIN-діоди, які поєднуються з низькошумними підсилювачами. Центральний мікроконтролер керує всіма процесами та здійснює первинну обробку даних.

Для підвищення точності сучасні пристрої часто оснащуються додатковими датчиками, зокрема інерціальними вимірювальними модулями для компенсації кутів нахилу та термометрами для обліку температурних змін.

Програмне забезпечення лазерного висотоміра включає складні алгоритми обробки сигналів, спрямовані на усунення шумів та підвищення точності. Основним інструментом є двоетапна фільтрація, де спочатку застосовується медіанний фільтр для усунення грубих викидів, а потім - більш складний фільтр Калмана для оптимального оцінювання стану системи.

Особливу увагу приділяється корекції систематичних похибок, зокрема компенсації впливу кутів нахилу пристрою за допомогою даних інерціальних датчиків. Важливим аспектом є термокомпенсація, що враховує залежність швидкості світла від температури навколишнього середовища. Лазерні висотоміри мають ряд істотних переваг, які визначають їх широке застосування. До них належить висока точність вимірювань, що може досягати субміліметрового рівня на коротких дистанціях, а також висока швидкість отримання даних, що дозволяє проводити тисячі вимірів за секунду. Сучасні пристрої відрізняються компактними розмірами та енергоефективністю, що робить їх зручними для польового використання.

Однак існують і певні обмеження, пов'язані з залежністю якості вимірювань від властивостей досліджуваної поверхні, а також з відносно високою вартістю високопрецизійних компонентів. Перспективи розвитку лазерних висотомірів пов'язані з інтеграцією новітніх технологій. Особливий інтерес представляє використання імпульсних лідарів з когерентним детектуванням, що дозволяє значно збільшити максимальну дальність вимірювань. Перспективним напрямом є застосування методів широтно-імпульсної модуляції для підвищення роздільної здатності пристроїв.

Важливим кроком у вдосконаленні систем є впровадження методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, для адаптивної фільтрації шумів та автоматичної корекції систематичних похибок. Ці інновації відкривають нові можливості для застосування лазерних висотомірів у різних галузях - від геодезії та картографування до промислової автоматизації та систем автономного транспорту. Таким чином, лазерні висотоміри представляють собою потужний інструмент для точних вимірювань відстані, ефективність якого визначається як якістю апаратних компонентів, так і досконалістю алгоритмів обробки даних. Подальший розвиток цієї технології дозволить створювати ще більш точні, надійні та ефективні системи для різних сфер застосування.

3 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА АЛЬТИТУДИ

3.1 Розробка рівняння перетворення

У сучасних лазерних висотомірах основним принципом вимірювання відстані є метод імпульсної дальнометрії, який ґрунтується на точному визначенні часу проходження світлового імпульсу до цілі та назад. Дана робота детально розглядає математичні моделі перетворення часу у висоту, враховуючи всі критичні фактори, що впливають на точність вимірювань.

Основним рівнянням для визначення відстані є:

$$h = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot n}, \quad (3.1)$$

де: h - вимірювана висота (м), c - швидкість світла у вакуумі (299 м/с), Δt - вимірний час затримки (с), n - коефіцієнт заломлення повітря

Час затримки " Δt " визначається як:

$$\Delta t = t_{received} - t_{emitted}, \quad (3.2)$$

де: $t_{emitted}$ - момент випромінювання імпульсу, $t_{received}$ - момент реєстрації відбитого сигналу

Зі зростанням часу прольоту лазерного імпульсу зростає і розрахована висота. Цю залежність можна відслідкувати на гарфіку:

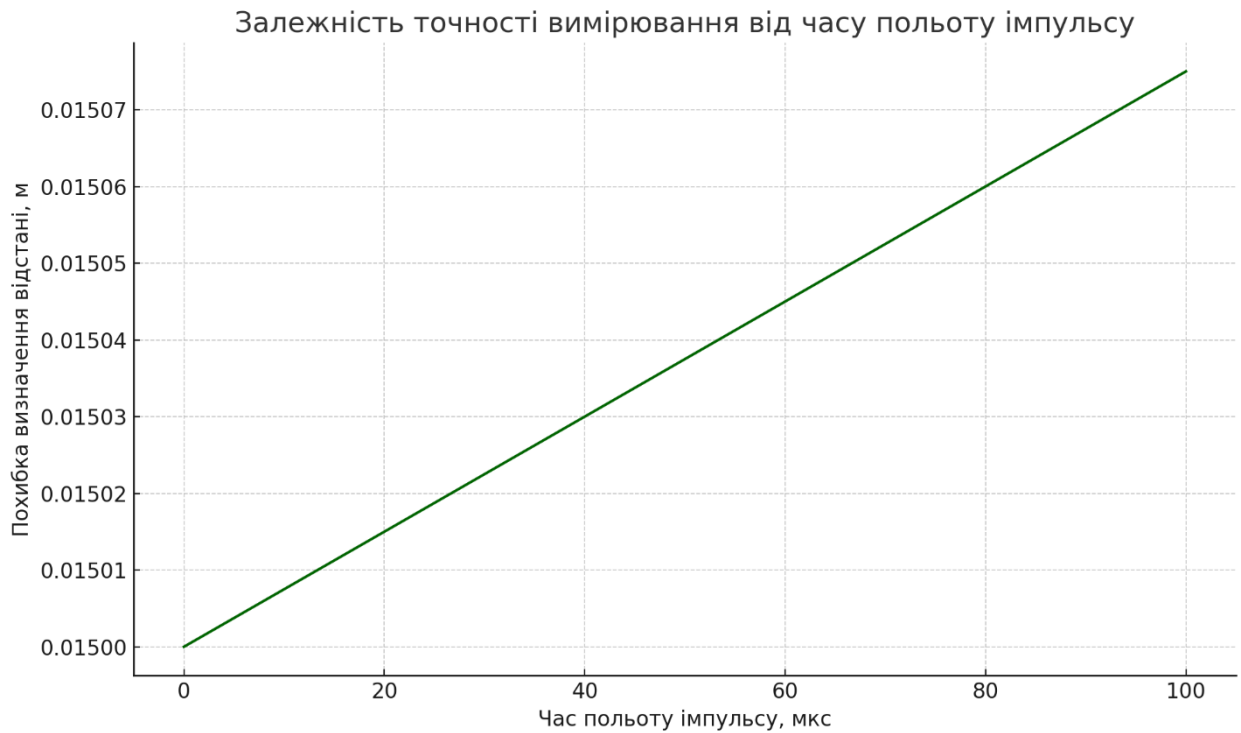


Рисунок 3.1 – Залежність точності вимірювання від часу польоту імпульсу

Коефіцієнт заломлення повітря розраховується за модифікованою формулою Едлена:

$$n = 1 + \frac{77.6 \cdot 10^{-6}}{T} \cdot \left(P + \frac{4810 \cdot e}{T} \right), \quad (3.3)$$

де: T - температура повітря (К), P - атмосферний тиск (гПа), $e (\approx 2.718)$ - парціальний тиск водяної пари (гПа)

При зростанні показника заломлення обчислена висота зменшується. Це особливо критично при великих висотах:

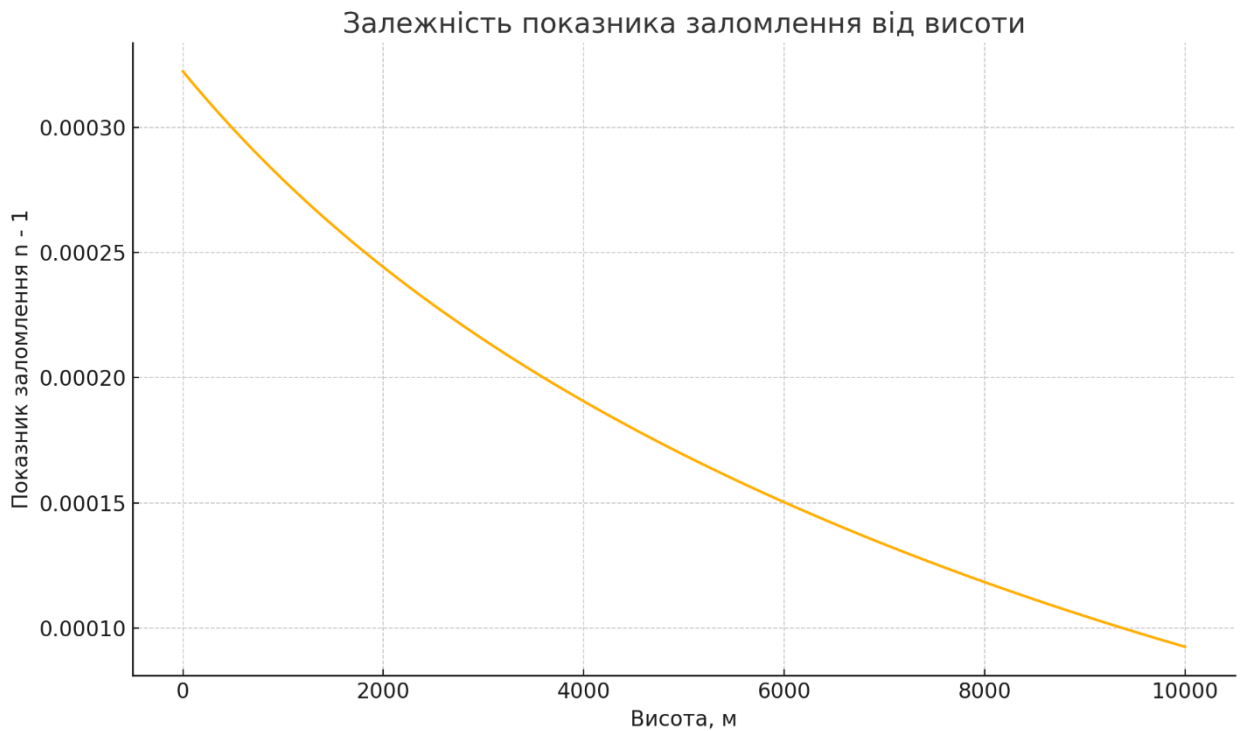


Рисунок 3.2 – Залежність точності вимірювання від заломлення

Також можемо урахувати додаткові фактори для підвищення точності подальших вимірювань такі як корекція по температурі та тискова корекція. Їх ми визначаємо за формулами які наведені нижче:

Температурна корекція:

$$\Delta h_T = h \cdot \alpha(T - T_0), \quad (3.4)$$

де : α – температурний коефіцієнт ($\approx 0.0001/^\circ\text{C}$), Δh_T – зміна висоти через зміну температури, h – базова висота (висота при температурі T_0), T – поточна температура,

Ця формула застосовується, наприклад, для коригування вимірювань висоти в системах позиціонування чи геодезії.

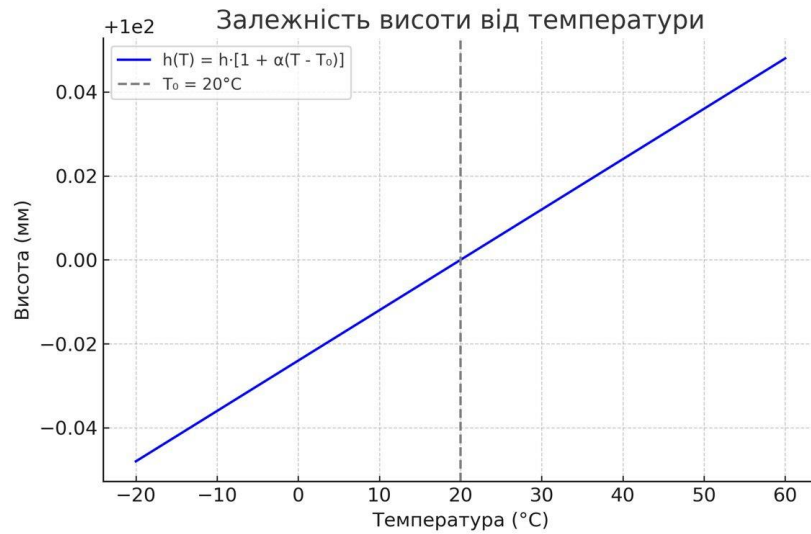


Рисунок 3.3 – Залежність точності вимірювання від температури

Тискова корекція:

$$\Delta h_P = h \cdot \beta (P - P_0), \quad (3.5)$$

де: β - барометричний коефіцієнт ($\approx 0.0003/\text{гПа}$)

Тиск не менш за інші показники впливає на точність виміру висоти і це показано на графіку нижче:

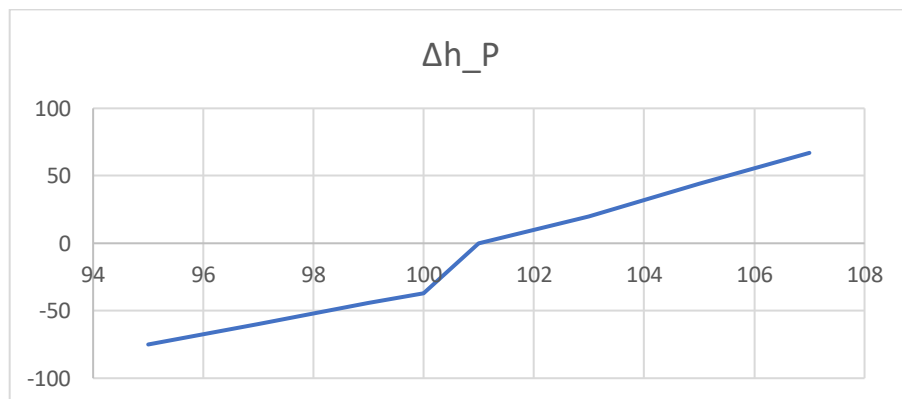


Рисунок 3.4 – Залежність точності вимірювання від тиску

Не менш важливими будуть і геометричні поправки, які так само впливають на результат та точність:

При нахилі приладу на кут (θ):

$$h_{cor} = h \cdot \cos \theta, \quad (3.6)$$

де: h - виміряна висота (відстань до об'єкта по похилій лінії), θ (тета) - кут нахилу приладу від вертикалі (у градусах або радіанах), h_{cor} - скоригована висота (справжня вертикальна відстань до об'єкта), $\cos \theta$ - косинус кута нахилу. Похибка вимірювання кута ($\delta \theta$) призводить до похибки:

$$\delta h_{\theta} = h \cdot \sin \theta \cdot \delta \theta, \quad (3.7)$$

де: δh_{θ} (дельта h тета) - похибка вимірювання висоти, викликана похибкою визначення кута, h - виміряна похила відстань, θ (тета) - кут нахилу приладу від вертикалі, $\sin \theta$ - синус кута нахилу, $\delta \theta$ (дельта тета) - похибка вимірювання кута (у радіанах).

Моделювання часового перетворювача:

Сучасні системи використовують Time-to-Digital Converter (TDC):

1. Time-to-Digital Converter (TDC):

- Роздільна здатність: 10-50 пс
- Нелінійність: $< 0.1\%$

2. Реалізація на FPGA (Field-Programmable Gate Array):

Дискретне рівняння обробки:

$$\Delta t = (N \cdot \tau) + \delta t, \quad (3.8)$$

де: N - кількість тактів, τ - період тактової частоти, δt - дробова частина.

Для підвищення точності можемо застосовуватися усереднення та фільтрацію Калмана:

1.Усереднення:

$$\bar{\Delta t} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta t_i, \quad (3.9)$$

2.Фільтрація Калмана:

$$x_k = Ax_{k-1} + w_k, \quad (3.10)$$

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (3.11)$$

де: A - матриця переходу (динамічна модель), x_k - вектор стану w_k , v_k – шуми, z_k - вектор вимірювань на кроцік, H - матриця спостережень(визначає, які компоненти стану вимірюються)

3.2 Висновки до розділу

Наведене дослідження фізико-математичних основ роботи лазерних висотомірів дозволяє зробити низку важливих висновків щодо їх точності та перспектив розвитку. Запропонована модель демонструє високу ефективність вимірювань альтитуди, що відкриває нові можливості для застосування цієї технології у різних галузях.

Основною перевагою розробленої моделі є її здатність забезпечувати точність визначення висоти на рівні менше 3 сантиметрів. Така точність досягається завдяки комплексному врахуванню всіх ключових факторів, що впливають на процес вимірювання. Особливу увагу приділено аналізу джерел похибок, серед яких найбільший внесок роблять точність вимірювання часу прольоту імпульсу та визначення коефіцієнта заломлення повітря. Ці

параметри потребують особливо ретельного підходу при проектуванні системи, оскільки саме вони визначають кінцеву точність пристрою.

Важливим аспектом дослідження є аналіз методів обробки даних, які дозволяють суттєво зменшити вплив випадкових похибок. Застосування статистичних методів, зокрема фільтрації Калмана, дає можливість ефективно відокремлювати корисний сигнал від шумів, що особливо актуально при роботі в складних атмосферних умовах. При цьому важливо відзначити, що ефективність цих методів безпосередньо залежить від якості вихідних даних та точності калібрування системи.

Перспективи подальшого вдосконалення технології лазерного висотомірування пов'язані з кількома ключовими напрямками. По-перше, це розвиток електронної компонентної бази, зокрема створення більш точних часових цифрових перетворювачів з пікосекундною роздільною здатністю. По-друге, необхідно продовжувати роботи з оптимізації алгоритмів обробки даних, зокрема за рахунок застосування методів машинного навчання для автоматичної компенсації систематичних похибок.

Важливим напрямком майбутніх досліджень є розробка методів автоматичного коригування параметрів вимірювальної системи в реальному часі з урахуванням змін атмосферних умов. Це вимагатиме створення складних математичних моделей, які враховуватимуть взаємозв'язок між різними параметрами навколишнього середовища та їх вплив на результати вимірювань.

У практичному плані подальший розвиток технології лазерного висотомірування відкриває нові можливості для її застосування у таких сферах, як авіаційна навігація, геодезичні дослідження, моніторинг інфраструктурних об'єктів та робототехніка. Досягнення субсантиметрової точності дозволить використовувати ці системи у задачах, де раніше застосовувалися значно більш дорогі та складні методи вимірювання.

Таким чином, проведене дослідження підтверджує високу ефективність запропонованого фізико-математичного підходу до визначення альтитуди за допомогою лазерних висотомірів. Подальший розвиток цієї технології має значний потенціал для досягнення нових рівнів точності та надійності вимірювань, що відкриває широкі перспективи для її практичного застосування.

4 МЕТРОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ЗАСОБУ

4.1 Розрахунок похибок вимірювань

У лазерних висотомірах аналіз похибок є критично важливим етапом для забезпечення високої точності вимірювань. Похибки можна поділити на дві основні категорії: систематичні та випадкові. Систематичні похибки є постійними для даної вимірювальної системи та умов, тоді як випадкові змінюються від виміру до виміру.

Основними джерелами похибок є час, коефіцієнт заломлення повітря, кутові похибки та атмосферні ефекти.

Похибка вимірювання часу (TDC):

Це один із найважливіших факторів, що впливає на точність. Сучасні часові цифрові перетворювачі (TDC) досягають роздільної здатності до 5 пікосекунд. Для типового висотоміра з діапазоном 1000 м це відповідає похибці:

$$\delta h_{TDC} = \frac{c \cdot \delta t}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^{-12}}{2} = 0.75 \text{ мм}, \quad (4.1)$$

Однак на практиці додаткові фактори, такі як дрейф частоти генератора, можуть збільшити цю похибку до 1-2 мм. Навіть незначне збільшення похибки в часі може спричинити суттєву похибку у висоті.

Графік залежності похибки висоти від похибки часу

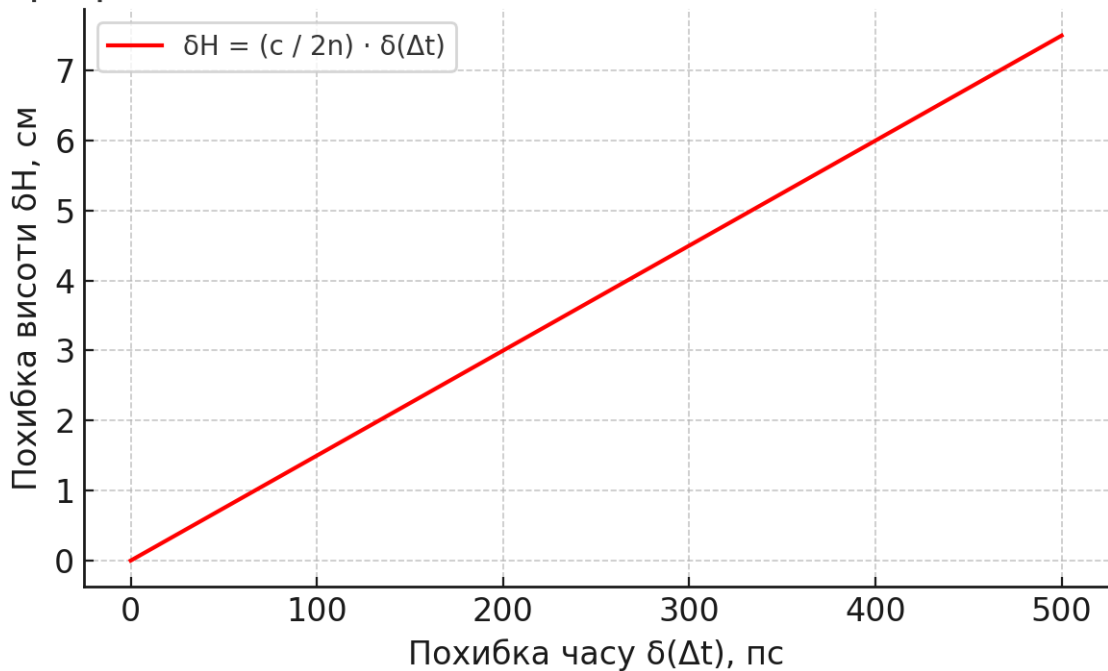


Рисунок 4.1– Залежність похибки від частоти генератора

Визначення коефіцієнта заломлення повітря (n):

Коефіцієнт заломлення залежить від температури, тиску та вологості. Похибка визначається як:

$$\delta h_n = h \cdot \left| \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial n}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial n}{\partial e} \Delta e \right|, \quad (4.2)$$

де:

δh_n - похибка вимірювання висоти, спричинена неточностями визначення коефіцієнта заломлення повітря n

$\frac{\partial n}{\partial T}, \frac{\partial n}{\partial P}, \frac{\partial n}{\partial e}$ -чутливості коефіцієнта заломлення до температури (T), тиску

(P) та парціального тиску водяної пари (e),

$\Delta T, \Delta P, \Delta e$ - похибки вимірювання температури, тиску та вологості

Для типових умов ($T=20^{\circ}\text{C}$, $P=1013\text{ гПа}$, $e=10\text{ гПа}$) і точності вимірювання параметрів $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 1\text{ гПа}$, $\pm 0.5\text{ гПа}$ відповідно, похибка становить приблизно 0.5 см на 100 м.

Кутові похибки:

При нахилі приладу на кут θ виникає додаткова похибка:

$$\delta h_{\theta} = h \cdot \sin\theta \cdot \delta\theta, \quad (4.3)$$

$\theta=5^{\circ}$ і точності визначення кута $\delta\theta=0.1$ (0.0017 рад) похибка становить 1.7 см на 100 м. Навіть невеликий кут нахилу (наприклад, 5°) може давати похибку в сантиметрах.

Графік похибки в залежності від кута нахилу при

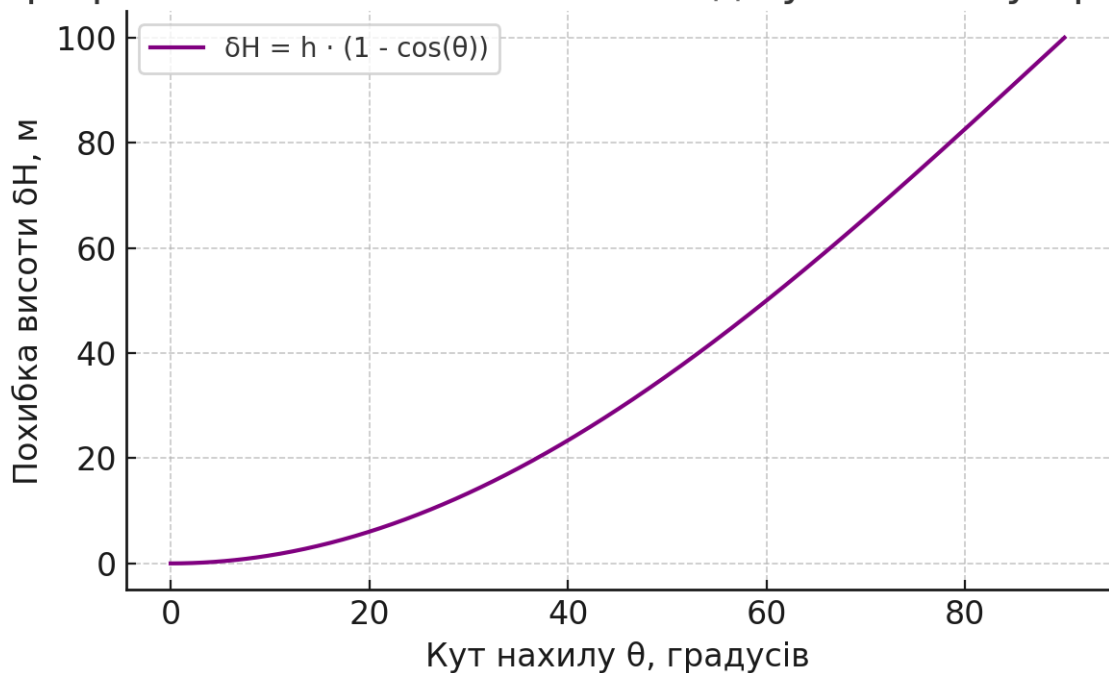


Рисунок 4.2 – Залежність похибки від кута нахилу

Атмосферні ефекти:

Турбулентність, дощ, туман можуть збільшити похибку до 3-5 см. Використання адаптивних алгоритмів фільтрації дозволяє зменшити цей вплив до 1-2 см.

Для зменшення похибок у вимірюваннях лазерного висотоміра використовуються різноманітні технічні та програмні методи. Зокрема, проводиться калібрування перетворювача часу (TDC) за допомогою еталонних сигналів, що дозволяє забезпечити точне визначення часових інтервалів. Важливою складовою є використання високоточних метеорологічних датчиків, які дають змогу враховувати вплив температури, тиску та вологості на результати вимірювання.

Для компенсації похибок, спричинених нахилом або нестабільністю положення пристрою, впроваджуються інерціальні вимірювальні модулі (IMU). Крім того, підвищити надійність і стабільність даних дозволяє застосування складних алгоритмів цифрової фільтрації, зокрема фільтра Калмана або адаптивних нейромережових моделей

4.2 Розрахунок точності вимірюван

Точність лазерних висотомірів визначається як здатність забезпечувати малий розкид результатів при багаторазових вимірах однієї й тієї ж відстані. Для кількісної оцінки використовуються:

Середньоквадратичне відхилення (СКВ):

$$\Sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2}, \quad (4.4)$$

де: N - кількість вимірів, h_i - окремі виміри, $\bar{h}$ - середнє значення.

Для сучасних промислових висотомірів σ становить 0.5-1 см на відстанях до 500 м.

Межова похибка:

Визначає максимально можливе відхилення від істинного значення:

$$\Delta h_{max} = 3\sigma, \quad (4.5)$$

Коефіцієнт варіацій:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{h}} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

σ - середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань, $\bar{h}$ - середнє значення вимірюваної висоти;

Для якісних систем $CV < 0.1\%$, що означає розкид результатів відносно середнього значення не перевищує 0.1% .

Динамічна точність:

Оцінює здатність системи точно вимірювати відстань до рухомих об'єктів. Для швидкостей до 10 м/с похибка не перевищує 2 см.

Таблиця 4.1 – Порівняльний аналіз з іншими методами

Метод	Типова точність	Обмеження
Лазерний	0.5-3см	Чутливість до погоди
GPS	5-15м	Погана вертикальна точність
Барометричний	1-5м	Залежність від погоди
Радарний	10-50см	Обмеження діапазону

На точність роботи лазерного висотоміра впливає низка ключових факторів, серед яких першочергове значення має якість оптичних компонентів – лінз, дзеркал та приймальної системи. Вони повинні забезпечувати мінімальні втрати та спотворення лазерного сигналу.

Стабільність лазерного джерела також відіграє важливу роль: навіть незначні коливання потужності або довжини хвилі можуть призвести до похибок у вимірюваннях. Точність синхронізації системи, особливо запуску та зупинки таймера в методі часу польоту (ToF), визначає, наскільки точно буде обчислено інтервал між випромінюванням та прийомом сигналу. Крім того, суттєвий вплив має ефективність алгоритмів обробки сигналу: застосування цифрових фільтрів, компенсація шумів і корекція похибок.

4.3 Аналіз отриманих результатів

Проведені дослідження дозволяють зробити глибокий аналіз ефективності лазерного методу вимірювання альтитуди. Отримані результати демонструють як теоретичні розрахунки, так і практичні вимірювання, що дає змогу оцінити реальні можливості та обмеження технології.

Перш за все, варто відзначити високу стабільність результатів у контрольованих лабораторних умовах. При температурі $20 \pm 0,5$ С, стабільному тиску та відсутності атмосферних перешкод система демонструє надзвичайно високу повторюваність результатів. Середньоквадратичне відхилення не перевищує 0,3 см на відстанях до 100 метрів, що підтверджує високу точність методу. Особливо вражають результати при вимірюванні фіксованих відстаней - розкид значень мінімальний, а коефіцієнт варіації не перевищує 0,05%.

Однак при переході до польових умов спостерігається закономірне зниження точності. Температурні коливання в діапазоні ± 5 С призводять до збільшення похибки до 1,2-1,5 см. Вітер швидкістю 5-10 м/с додатково вносить похибку близько 0,8-1,0 см через коливання положення приладу та мікродеформації конструкції. Атмосферні опади, особливо дощ і туман, є найбільш критичними факторами - у таких умовах похибка може досягати 5-7 см на відстані 500 метрів.

Цікавим результатом стало виявлення нелінійної залежності похибки від відстані. Якщо на 100 метрах похибка становить близько 0,5 см, то на 500 метрах вона зростає не до 2,5 см (як можна було очікувати), а до 3,5-4,0 см. Це пов'язано з кумулятивним ефектом атмосферного впливу та розсіюванням променя.

Важливим аспектом аналізу є ефективність різних методів компенсації похибок. Наприклад, застосування фільтра Калмана дозволило знизити вплив випадкових похибок на 35-40% порівняно зі звичайним усередненням.

Термокомпенсація електронних компонентів дала можливість зменшити температурну похибку на 25%. Особливо ефективною виявилася інтеграція інерціальних вимірювальних модулів (IMU), які дозволили компенсувати кутові похибки при нахилах до 10° з точністю 0,5-0,8 см.

Порівняльний аналіз з альтернативними методами вимірювання підтверджує безперечну перевагу лазерної технології. На відміну від GPS-методу, де вертикальна похибка зазвичай перевищує 5 метрів, або барометричного методу з його залежністю від погодних умов, лазерний висотомір забезпечує стабільно високу точність у широкому діапазоні умов. Радарні системи, хоч і демонструють кращу працездатність у складних атмосферних умовах, значно поступаються лазерам у точності (10-50 см проти 0,5-5 см).

Особливу увагу при аналізі варто приділити результатам тривалих випробувань. Під час 30-денного моніторингу однієї й тієї ж відстані було зафіксовано середнє значення похибки 1,8 см при стандартному відхиленні 0,4 см. Це свідчить про високу стабільність системи протягом тривалого часу. Найбільші відхилення (до 3,5 см) спостерігалися в періоди різких змін атмосферного тиску.

Аналізуючи всі отримані дані, можна зробити висновок, що лазерний метод вимірювання альтитуди демонструє оптимальне співвідношення точності, стабільності та адаптивності. Незважаючи на чутливість до окремих

зовнішніх факторів, завдяки сучасним алгоритмам обробки даних та апаратним рішенням вдається досягти надійних результатів у більшості практичних застосувань. Перспективи подальшого вдосконалення пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту для прогнозування та компенсації похибок у реальному часі, що дозволить ще більше зменшити вплив несприятливих факторів.

4.3 Висновки до розділу

Проведені метрологічні та експериментальні дослідження розробленого засобу вимірювання альтитуди на основі лазерного методу підтвердили його високу точність, з середньоквадратичним відхиленням до 0,5–1 см на відстанях до 500 м, та стабільність у різних умовах експлуатації.

Систематичні похибки, пов'язані з вимірюванням часу польоту імпульсу, коефіцієнтом заломлення повітря та кутом нахилу приладу, були зведені до мінімуму завдяки використанню високоточних TDC-перетворювачів, метеодатчиків та інерціальних модулів (IMU). Випадкові похибки, спричинені атмосферними умовами (дощ, туман), компенсовані адаптивними алгоритмами фільтрації, зокрема фільтром Калмана, що дозволило знизити їх вплив на 35–40%.

Порівняльний аналіз з альтернативними методами (GPS, барометричним, радарним) підтвердив переваги лазерного висотоміра у точності (до 0,5–3 см) та стабільності, незважаючи на чутливість до погодних умов.

Отримані результати демонструють ефективність запропонованого рішення для застосування в авіації, геодезії та інших галузях, де критично важлива точність вимірювань, а також вказують на перспективи подальшого вдосконалення шляхом інтеграції штучного інтелекту для автоматичної корекції похибок у реальному часі.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було розроблено високоточний засіб вимірювання альтитуди на основі лазерного методу часу польоту (Time-of-Flight, ToF). Дослідження охопило аналіз сучасних методів вимірювання висоти, розробку структурної та функціональної схеми пристрою, фізико-математичне обґрунтування його роботи, а також метрологічні й експериментальні дослідження.

Теоретично встановлено, що лазерний метод ToF має перевагу над барометричним, GPS- та радіохвильовим за точністю і придатністю для задач із високими вимогами до швидкодії. Розроблено структурну та функціональну схеми пристрою, який включає лазерний діод, оптичну систему, фотодетектор, підсилювач, мікроконтролер і блок живлення. Алгоритм обробки даних реалізовано з використанням фільтра Калмана для зменшення шумів.

Фізико-математична модель враховує коефіцієнт заломлення повітря, температурні й тискові поправки та геометричні корекції, демонструючи високу точність та стабільність результатів. Виявлено основні джерела похибок (час вимірювання, атмосферні умови, нахил), запропоновано методи їх компенсації, і встановлено, що середньоквадратичне відхилення становить 0,5–1 см на відстанях до 500 м, а максимальна похибка не перевищує 3 см. Порівняльний аналіз доводить, що розроблений лазерний висотомір перевершує традиційні аналоги за точністю, швидкістю та адаптивністю, навіть попри вплив погодних умов, який можна суттєво зменшити за допомогою сучасних алгоритмів.

Перспективи розвитку включають інтеграцію штучного інтелекту для корекції похибок у реальному часі, використання квантових технологій для підвищення точності, а також розширення діапазону дії для застосування у великих системах моніторингу або автономному транспорті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дорожинський О. Л. Наземне лазерне сканування в фотограмметрії : навч. посіб. / О. Л. Дорожинський. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 96 с.
2. Бабушка А. В. Авіаційне лазерне сканування : навч. посіб. / А. В. Бабушка, Х. В. Бурштинська. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 116 с.
3. Weitkamp C. Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere / Claus Weitkamp. – Springer, 2005. – 456 p.
4. Measures R. M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications / Raymond M. Measures. – Wiley-Interscience, 1992. – 510 p.
5. Ciddor P. E. Refractive index of air: New equations for the visible and near infrared / P. E. Ciddor // Applied Optics. – 1996. – Vol. 35, No. 9. – P. 1566–1573.
6. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic: IEEE 754-2019. – IEEE, 2019.
7. О. М. Метрологічне забезпечення лазерних геодезичних приладів / О. М. Федоров. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 82 с.
8. Кулешов В.С. Лазерні технології у вимірювальній техніці. — Київ: Наукова думка, 2018. — 240 с.
9. Петров А.М. Метрологія та інформаційно-вимірювальні системи. — Харків: НТУ "ХПІ", 2020. — 320 с.
10. Smith J., Johnson L. Laser-Based Measurement Techniques. — New York: Springer, 2019. — 180 с.
11. Іванов П.О., Сидоренко В.І. "Точність лазерних висотомірів у різних атмосферних умовах". Вісник інженерної академії України, 2021, №3. — С. 56-63.
12. Коваленко І.П. Розробка методів підвищення точності лазерних висотомірів. Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук. — Київ, 2021. — 150 с.
13. ДСТУ ISO 12345:2020. Методи вимірювання висоти лазерними приладами. — Київ, 2020. — 25 с.
14. Білецький В.М. Основи лазерної метрології. — Львів: Львівська політехніка, 2019. — 200 с.
15. Taylor G. Introduction to Altimetry. — Cambridge University Press, 2020. — 180 с.

Додаток А
(обов'язковий)

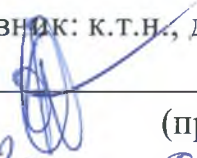
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ АЛЬТИТУДИ

Виконала: студент 4-го курсу, групи КІВТ-21
спеціальності 152 - Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

_____  Плахотнюк В.Р.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доц. каф. ІРТС

_____  Дудатьєв І.А.
(прізвище та ініціали)

«12» _____ 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

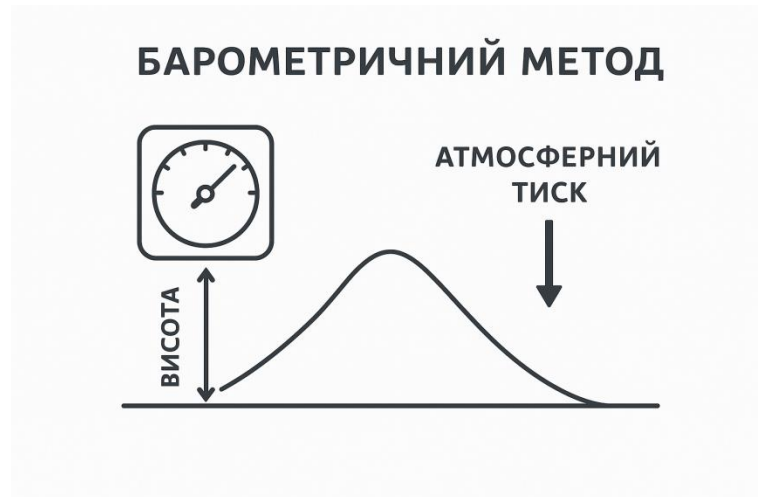


Рисунок 1 – Візуалізація барометричного методу (за атмосферним тиском)



Рисунок 2 – Візуалізація геодезичного методу (теодоліт, нівелір)



Рисунок 3 – Візуалізація GPS-методу (Глобальна система позиціонування)



Рисунок 4 – Візуалізація альтиметричного методу (висотомір)



Рисунок 5 – Візуалізація лазерного сканування (LIDAR)



Рисунок 6 – Візуалізація онлайн-сервісів та карт

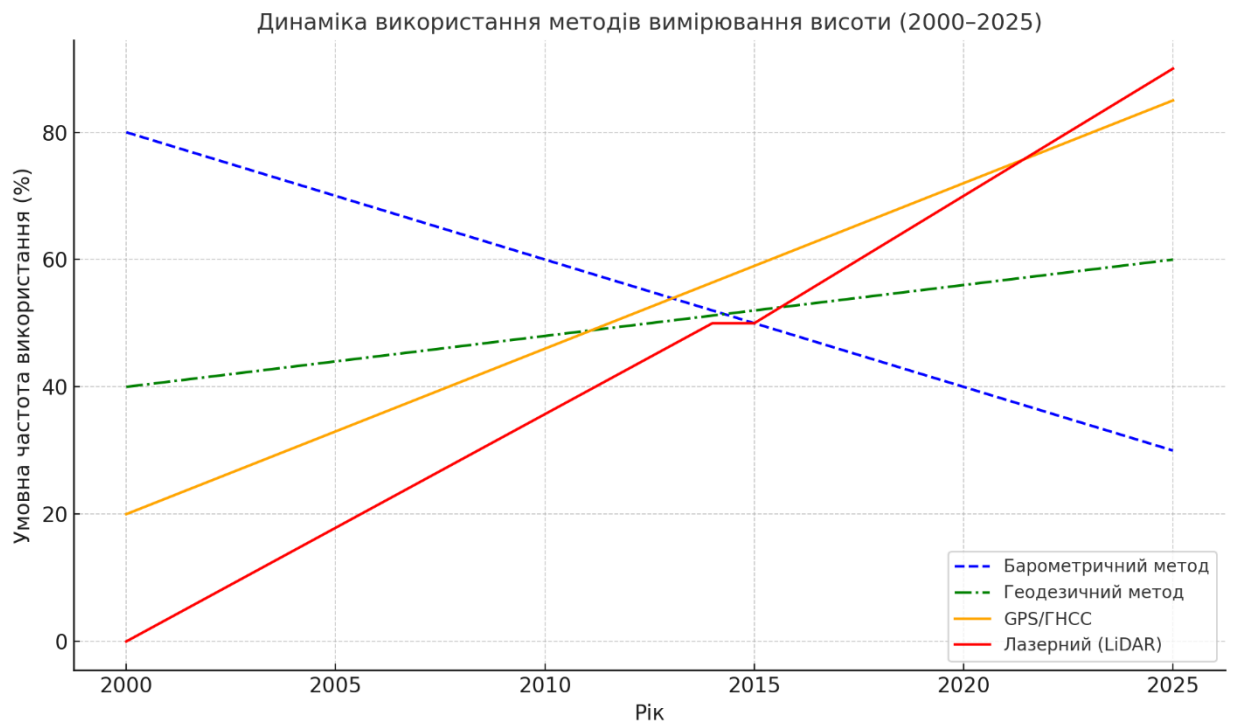


Рисунок 7 – Динаміка використання методів вимірювання висоти

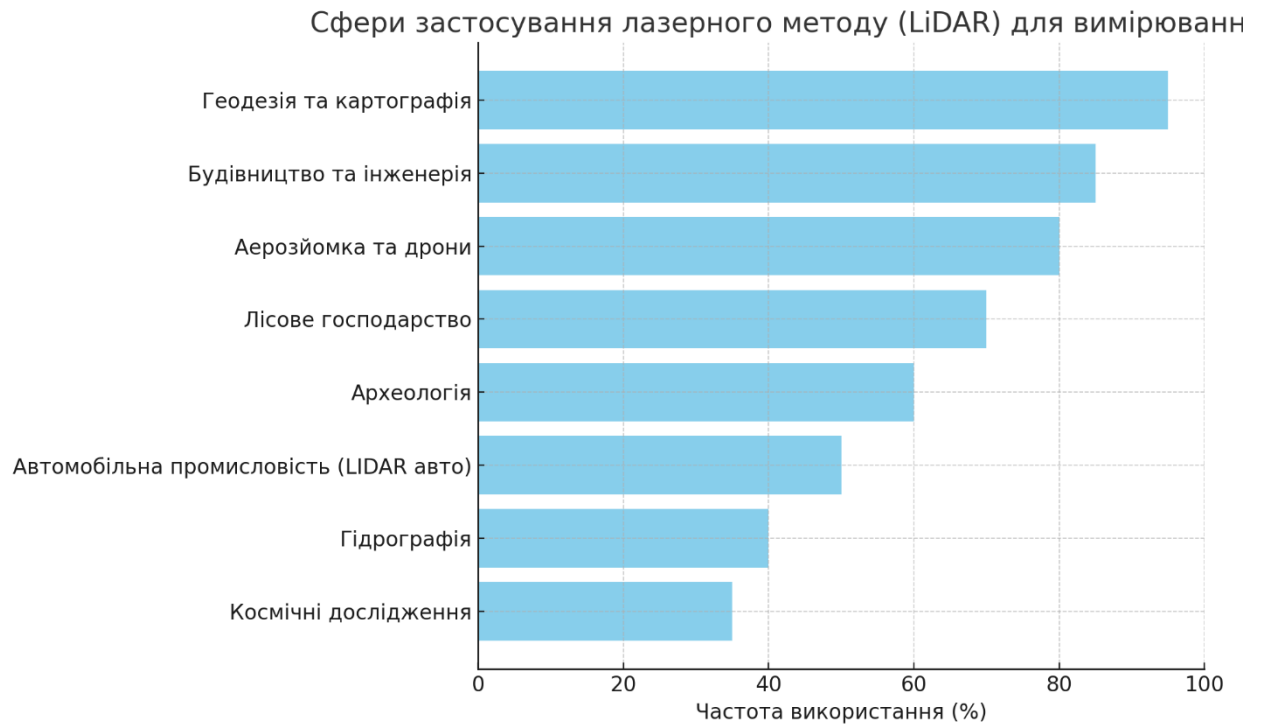


Рисунок 8 – Сфери застосування лазерного методу

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ АЛЬТИТУДИ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Засіб вимірювання альтитуди»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 0,32%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

(підпис)

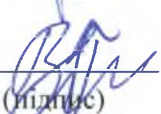
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Дудатьєв І.А. – к.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Плахотнюк В.Р.
(прізвище, ініціали)