

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР. ШМ - 17.00.00.000 ПЗ

Група ШМ-24-1

Данилів Ростислав

2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Данилів Ростислав Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 004.9
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Моделі та методи задач сенсорно базованої локації

транспортних засобів

(назва роботи)

Інженерія програмного забезпечення

(назва освітньої програми)

121 - Інженерія програмного забезпечення

(шифр і назва спеціальності)

Данилів Р.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Піх Володимир Ярославович, к.т.н., доцент

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доц.

Бандура В.В.

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль

доц.

Вовк Р.Б.

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Освітній рівень магістр

Спеціальність 121 – Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою

ІПЗ

доц.

В.В. Бандура

“ 04 ” вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Даниліву Ростиславу Васильовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема магістерської роботи “ **Моделі та методи задач сенсорно базованої локації транспортних засобів**”

керівник проекту (роботи) Піх Володимир Ярославович к.т.н., доцент

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 05 ” листопада 2025 р. № 695/7

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Теоретичні концепції та формальні моделі побудови та функціонування програмних технологій обробки сенсорних даних

4. Зміст розрахунково - пояснювальної записки(перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз предметної області задач сенсорно базованої локації транспортних засобів

2. Методи та підходи реалізації задач сенсорно базованої локації транспортних засобів

3. Критичний аналіз існуючих рішень для інтелектуального паркування транспортних засобів

4. Імплементация моделей побудови системи сенсорно базованої локації транспортних засобів

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Принцип роботи гіроскопа та акселерометра (рис. 1.1)

2. Представлення алгоритму системи Fastprk (рис. 1.2)

3. Ілюстрація роботи рішення моніторингу вільних місць і паркування (рис. 1.3)

4. Представлення спотворення магнітного поля біля автомобіля (рис. 2.1)

5. Основні компоненти та логіку роботи системи паркування на базі RFID (рис. 2.2)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Консультант	Підпис, дата
Перевірка на плагіат	доц., к.т.н. Вовк Р.Б.	

7. Дата видачі завдання 04 вересня 2025 р.

Керівник _____

(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назви етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір і вивчення літератури по темі магістерської роботи	13.09.2025	виконано
2	Аналіз предметної області задач сенсорно базованої локації транспортних засобів	28.09.2025	виконано
3	Методи та підходи реалізації задач сенсорно базованої локації транспортних засобів	20.10.2025	виконано
4	Критичний аналіз існуючих рішень для інтелектуального паркування транспортних засобів	15.11.2025	виконано
5	Імплементация моделей побудови системи сенсорно базованої локації транспортних засобів	29.11.2025	виконано
6	Затвердження пояснювальної записки роботи завідувачем кафедри	15.12.2025	виконано

Студент – магістр _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота: 76 с., 20 рис., 4 табл., 37 джерел.

Тема: Моделі та методи задач сенсорно базованої локації транспортних засобів

Мета магістерської роботи - розроблення моделей, методів і архітектурних рішень для сенсорно базованої локації транспортних засобів із використанням мобільних сенсорів.

Об'єкт дослідження - процес сенсорно базованої локації транспортних засобів у міських умовах.

Предмет дослідження - моделі, методи та алгоритми обробки даних мобільних сенсорів для визначення просторово-часового положення та стану транспортних засобів.

Результати дослідження

В роботі розроблено архітектуру системи сенсорної локалізації з багаторівневою обробкою даних, яка забезпечує підвищення точності визначення стану транспортного засобу.

Висновок

Досліджено та удосконалено методи виявлення подій паркування на основі магнітометричних даних і алгоритмів класифікації, що дозволяють зменшити похибку ідентифікації.

СЕНСОРНА ЛОКАЦІЯ, МОБІЛЬНІ СЕНСОРИ, МАГНІТОМЕТР, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПАРКУВАННЯ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, АНАЛІЗ ДАНИХ, СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, ТРАНСПОРТНА АНАЛІТИКА, АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ.

ABSTRACT

Master Thesis: 76 pp., 20 fig., 4 tab., 37 sources.

Topic: Models and methods of sensor-based vehicle location problems

The purpose of the master's thesis is to develop models, methods and architectural solutions for sensor-based vehicle location using mobile sensors.

The object of the study is the process of sensor-based vehicle location in urban conditions.

The subject of the study is models, methods and algorithms for processing mobile sensor data to determine the spatio-temporal position and state of vehicles.

Research results

The work developed the architecture of a sensor localization system with multi-level data processing, which provides increased accuracy in determining the state of the vehicle.

Conclusion

Methods for detecting parking events based on magnetometric data and classification algorithms that allow reducing the identification error have been studied and improved.

SENSOR LOCATION, MOBILE SENSORS, MAGNETOMETER, INTELLIGENT PARKING, MACHINE LEARNING, DATA ANALYSIS, MONITORING SYSTEM, TRANSPORT ANALYTICS, SYSTEM ARCHITECTURE.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ЗАДАЧ СЕНСОРНО БАЗОВАНОЇ ЛОКАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	15
1.1. Проблема урбаністичного навантаження та управління паркуванням транспортних засобів.....	15
1.1.1. Концептуалізація та реалізація рішення.....	15
1.1.2. Емпірична оцінка та переваги	16
1.2. Застосування мобільних сенсорів у розробці програмного забезпечення.....	16
1.2.1. Характеристики та функціональність вбудованих сенсорів	16
1.2.2. Потенціал для наукових досліджень та майбутні напрямки	19
1.3. Категоризація та функціональні можливості сенсорів мобільної платформи Android	19
1.4. Аналіз ефективності сенсорних систем у регулюванні паркування та визначення локації транспортних засобів	21
1.4.1. Фактори, що посилюють проблему надмірного пошуку.....	21
1.4.2. Сучасні технологічні рішення та їх обмеження.....	22
1.4.3. Економічний бар'єр для широкого впровадження	24
1.5. Концепція рішення для моніторингу паркування транспортних засобів на основі сенсорів мобільних пристроїв.....	25
1.5.1. Методологічна основа та принцип дії	25
1.5.2. Науковий внесок дослідження	26
Висновки до розділу	27
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАЧ СЕНСОРНО БАЗОВАНОЇ ЛОКАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	29

2.1. Аналіз чутливості та застосування мобільних магнітометрів у детекції транспортних засобів.....	29
2.1.1. Принцип магнітного спотворення	29
2.1.2. Застосування магнітометрів у навігації та моніторингу.....	30
2.1.3. Використання мобільного магнітометра для виявлення паркування	30
2.2. Огляд та критичний аналіз існуючих рішень для інтелектуального паркування транспортних засобів.....	31
2.2.1 Технологія на основі радіочастотної ідентифікації (RFID).....	31
2.2.2 Інтелектуальне паркування на основі оптичних та світлодіодних систем.....	33
2.2.3 Підхід на основі міжтранспортних мереж (VANET).....	35
Принцип роботи:	36
2.2.4 Моделі на основі централізованих баз даних доступних місць	38
2.2.5 Розумне паркування на основі обробки зображень та ультразвуку. 38	
2.2.6. Переваги пропонованого проекту.....	42
Висновки до розділу	42

РОЗДІЛ 3. ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ

СЕНСОРНО БАЗОВАНОЇ ЛОКАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	44
3.1. Основна ідея пропонованого рішення	44
3.2. Розробка архітектури системи.....	45
3.2.1 Опис рівня збору даних	46
3.2.2. Рівень обробки та зберігання даних	47
3.2.3. Рівень відображення даних	47
3.3. Опис функціональності компонентів системи та збору даних.....	48
3.3.1. Етап збору даних.....	49
3.3.2. Визначення швидкості ходьби та напрямку	50
3.3.3 Обробка даних та видобування ознак.....	52
3.3.4. Навчання та оцінка класифікаційної моделі	56

3.3.5. Функціональність рівнів обробки та зберігання даних	58
3.4. Методологія експериментальної оцінки та збору даних	58
3.5. Висновки щодо проведених експериментів	68
Висновки до розділу	70
ВИСНОВКИ	71
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЦХП - центральна хмарна платформа

МПЗ - магнітне поле Землі

FD - First Derivative - перша похідна

FFT2 - Second FFT Component - друга компонента швидкого перетворення

Фур'є

GT - Ground Truth - еталонна істина (або істина)

c – car - автомобіль

n – not car - не автомобіль

VANET - Vehicular Ad-hoc Networks

LIDAR - Light Detection and Ranging

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасний розвиток урбанізованих територій супроводжується інтенсивним зростанням кількості транспортних засобів, що зумовлює підвищене навантаження на інфраструктуру міст, ускладнення транспортних потоків і хронічну нестачу паркувальних місць. Ефективне управління міським транспортом вимагає застосування інтелектуальних систем, здатних у реальному часі збирати, аналізувати та інтерпретувати дані про стан дорожнього руху і місцезнаходження транспортних засобів. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є сенсорно базовані системи локації, що використовують вбудовані датчики мобільних пристроїв для визначення положення, руху та стану транспортних об'єктів.

Традиційні підходи до організації моніторингу транспорту передбачають встановлення стаціонарних пристроїв (камер, ультразвукових сенсорів, RFID-міток), які є дорогими у впровадженні та обслуговуванні. У цьому контексті мобільні сенсори (акселерометри, гіроскопи, магнітометри, GPS-модулі) виступають як гнучка, масштабована та економічно ефективна альтернатива. Їх використання дає змогу створювати системи збору інформації з великої кількості джерел без додаткових інфраструктурних витрат, що відкриває нові можливості для побудови розумних міських екосистем.

Дослідження, представлене у цій роботі, спрямоване на розроблення моделей і методів сенсорно базованої локації транспортних засобів, здатних забезпечити точне визначення стану автомобіля (рух, зупинка, паркування) на основі аналізу даних з мобільних сенсорів. Отримані результати можуть бути використані для створення інтелектуальних систем управління паркуванням, моніторингу транспортних потоків і підвищення ефективності міської мобільності.

Актуальність теми зумовлена потребою у вдосконаленні підходів до управління міським транспортом в умовах зростання щільності автомобільного руху та обмеженості простору. Згідно з даними урбаністичних досліджень, до 30% дорожнього руху в центральних частинах міст пов'язано з пошуком паркувального місця. Це призводить до зниження швидкості руху, зростання викидів CO₂, перевитрат палива та підвищення рівня стресу учасників дорожнього руху.

Використання сенсорних систем у мобільних пристроях для визначення локації та стану транспортних засобів відкриває можливості створення масштабованих і доступних систем моніторингу, що не потребують спеціалізованої апаратної інфраструктури. Такий підхід відповідає світовим тенденціям розвитку технологій “розумного міста” (Smart City), спрямованих на раціоналізацію транспортних потоків і підвищення якості міського життя.

Наукова значущість роботи полягає у розробленні моделей і методів, які поєднують сенсорні дані різних типів із алгоритмами машинного навчання для виявлення подій, пов'язаних із рухом і паркуванням транспортних засобів. Практична важливість дослідження визначається можливістю використання розроблених підходів у системах міського моніторингу, що сприятиме зменшенню транспортного навантаження та підвищенню екологічної стійкості міських середовищ.

Метою магістерської роботи є розроблення моделей, методів і архітектурних рішень для сенсорно базованої локації транспортних засобів із використанням мобільних сенсорів.

Об'єктом дослідження є процес сенсорно базованої локації транспортних засобів у міських умовах.

Предметом дослідження є моделі, методи та алгоритми обробки даних мобільних сенсорів для визначення просторово-часового положення та стану транспортних засобів.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішено такі основні завдання:

- Провести аналіз предметної області сенсорно базованих систем локації та визначити актуальні проблеми управління паркуванням у містах.
- Дослідити функціональні можливості сенсорів мобільних пристроїв платформи Android для виявлення та моніторингу транспортних засобів.
- Проаналізувати існуючі методи та технології інтелектуального паркування й визначити їхні переваги та обмеження.
- Розробити архітектуру системи сенсорно базованої локації транспортних засобів, що включає рівні збору, обробки та візуалізації даних.
- Побудувати алгоритми обробки сенсорних даних, видобування ознак та навчання класифікаційних моделей для розпізнавання станів транспортних засобів.
- Провести експериментальну оцінку точності запропонованої системи та обґрунтувати її практичну ефективність.

У роботі використано комплекс методів:

- аналітичні методи — для вивчення сучасних підходів до сенсорної локації та аналізу існуючих технологій моніторингу транспорту;
- методи статистичного аналізу та обробки сигналів — для дослідження поведінки сенсорних даних і фільтрації шумів;
- методи машинного навчання — для побудови моделей класифікації станів транспортних засобів;
- експериментальні методи — для перевірки працездатності прототипу системи й оцінки точності результатів;
- моделювання — для формалізації процесів збору, обробки та інтеграції сенсорних даних у межах системи.

Наукова новизна отриманих результатів

Запропоновано комплексну модель сенсорно базованої локації транспортних засобів, що інтегрує дані з різних типів сенсорів мобільних пристроїв. Розроблено підхід до інтеграції сенсорних даних у системах

міської мобільності, який може бути застосований у межах концепції Smart City.

Практичне застосування результатів

Результати дослідження можуть бути використані для створення систем інтелектуального паркування та моніторингу вільних місць, модулів аналітики транспортних потоків у рамках міських інформаційних платформ, мобільних застосунків для виявлення подій паркування.

Структура магістерської роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів та висновків. Загальний обсяг роботи становить 76 сторінок, і містить 20 рисунків, 4 таблиці, список використаних джерел із 37 найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ЗАДАЧ СЕНСОРНО БАЗОВАНОЇ ЛОКАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

1.1. Проблема урбаністичного навантаження та управління паркуванням транспортних засобів

Швидкий приріст населення у високоурбанізованих агломераціях актуалізує низку комплексних викликів, що стосуються якості життя, утилізації відходів, функціонування систем громадського транспорту та забезпечення доступу до критично важливих ресурсів. Незважаючи на мультиспектральність впливу демографічного зростання, особливої уваги вимагає сфера управління міським паркуванням. Дослідження (наприклад, [3]) підтверджують, що водії витрачають значний часовий ресурс на пошук вільних паркувальних місць, що має негативний економічний та екологічний ефект.

1.1.1. Концептуалізація та реалізація рішення

З огляду на зазначену проблематику, пропонується концепція краудсорсингового підходу для ідентифікації та моніторингу загальнодоступних вільних паркувальних місць, які, як правило, є безкоштовними. Це рішення реалізується як додаток для смартфонів, що використовує вбудовані сенсори мобільних пристроїв для детекції вільних просторів.

Ключовим технічним елементом є використання магнітометра мобільного телефону. Під час руху пішохода тротуаром, зміни амплітуди та швидкості магнітного поля фіксуються при наближенні або проходженні повз припарковані транспортні засоби (металеві об'єкти). Ці різкі зміни слугують надійною основою для визначення локації та статусу зайнятості паркувального місця.

1.1.2. Емпірична оцінка та переваги

Емпірична валідація демонструє, що розроблене рішення становить суттєвий прогрес у контексті економічно ефективного управління паркувальними ресурсами. Порівняно з традиційними сенсорними системами, цей підхід характеризується значно вищою енергоефективністю при збереженні еквівалентного рівня точності виявлення. Це робить його перспективною альтернативою для масштабованого впровадження в умовах інтенсивного міського трафіку.

1.2. Застосування мобільних сенсорів у розробці програмного забезпечення

Мобільні сенсори та їх інтеграція у розробку мобільних додатків є однією з найактуальніших науково-технічних сфер завдяки їхньому повсюдному використанню у повсякденній діяльності користувачів. Сучасні смартфони функціонують як універсальні платформи для широкого спектру додатків, включаючи геолокаційну навігацію, моніторинг метеорологічних умов, відстеження фізичної активності, інтерактивні розваги та цифровий запис даних.

1.2.1. Характеристики та функціональність вбудованих сенсорів

Більшість вбудованих мобільних сенсорів призначені для вимірювання кінематичних параметрів (рух, прискорення, орієнтація, вібрація), а також різних параметрів навколишнього середовища (наприклад, освітленість, магнітне поле, атмосферний тиск).

Ці сенсори є високоточними інструментами, здатними збирати сирі дані про тривимірний рух та позиціонування з високою роздільною здатністю. Важливою характеристикою є можливість гнучкого налаштування частоти дискретизації (sampling rate) зібраних даних відповідно до специфічних вимог програмного забезпечення та сценаріїв використання.

Точність і надійність сучасних мобільних сенсорів корелюють із розробкою інноваційних застосунків, що залежать від руху (motion-dependent applications).

Наведемо приклади використання сенсорів.

Гравітаційний сенсор (акселерометр/гіроскоп) - використовується в мобільних іграх для детекції жестів, нахилів та інших кінематичних команд користувача, що забезпечує імерсивну взаємодію.

Акселерометр - може застосовуватися в системах захищеного обміну даними для передачі повідомлень або секретних кодів шляхом модуляції вібрації пристрою, перетворюючи механічні коливання на цифрові сигнали.

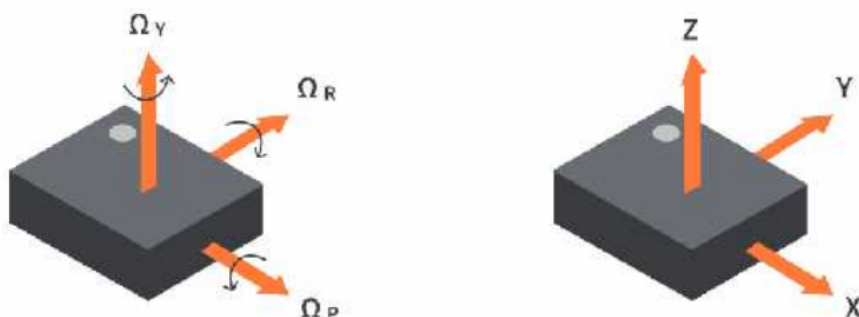


Рис. 1.1. Принцип роботи гіроскопа та акселерометра

Комплементарний фільтр — це ефективний та обчислювально недорогий метод для об'єднання (злиття) даних від двох або більше сенсорів, що мають комплементарні характеристики (наприклад, один точний на короткому часовому проміжку, інший — на довгому). У мобільних пристроях він використовується для стабільного вимірювання кутів нахилу (крену та тангажу) шляхом комбінування даних акселерометра та гіроскопа.

Алгоритм роботи комплементарного фільтра для визначення орієнтації полягає в наступних етапах:

1. Вхідні дані (сенсори)

Характеристики сенсорів

Сенсор	Характеристика	Обмеження
Акселерометр (Низька частота)	Точний для визначення абсолютного нахилу (гравітації) у довгостроковій перспективі.	Сприйнятливий до високочастотного шуму та вібрацій (руху пристрою).
Гіроскоп (Висока частота)	Точний для вимірювання швидкості обертання у короткостроковій перспективі.	Схильний до накопичення помилки дрейфу (drift error) з часом.

2. Процес Злиття (Фільтрація)

Алгоритм використовує два паралельні фільтри для обробки сигналів:

1. Обробка гіроскопа (Високочастотний тракт):

- Дані про кутову швидкість, отримані від гіроскопа, інтегруються для отримання поточної орієнтації.

- До цього інтегрованого значення застосовується Фільтр високих частот (High-Pass Filter). Він відкидає низькочастотний дрейф гіроскопа, зберігаючи лише швидкі та точні зміни орієнтації.

2. Обробка акселерометра (Низькочастотний тракт):

- Дані про орієнтацію, отримані з Акселерометра (вектор гравітації), є точними щодо довгострокового нахилу.

- До цього значення застосовується Фільтр нижніх частот (Low-Pass Filter). Він відкидає високочастотний шум, викликаний лінійним рухом пристрою.

3. Комбінування (Зважування):

- Результати обох трактів сумуються з використанням коефіцієнтів зважування (наприклад, α та $1-\alpha$).

- Орієнтація від гіроскопа отримує більшу вагу (α) для короткочасних (швидких) змін.

- Орієнтація від акселерометра отримує меншу вагу ($1-\alpha$) і слугує для корекції довгострокового дрейфу.

3. Вихідні дані

Вихідний вектор орієнтації є стабільним (не дрейфує) і чутливим (реагує на швидкі рухи), забезпечуючи точне позиціонування пристрою для навігації, доповненої реальності (AR) та ігор.

1.2.2. Потенціал для наукових досліджень та майбутні напрямки

Здатність мобільних пристроїв до повсюдного та безперервного збору даних високої якості відкриває значні перспективи для наукових досліджень, зокрема у сфері персоналізованої медицини, моніторингу довкілля (environmental sensing) та досліджень поведінки людини (human behavior studies). Подальший розвиток технологій мобільних сенсорів спрямований на підвищення енергоефективності, мініатюризацію та розширення спектру вимірюваних фізичних величин, що забезпечить створення ще більш складних та інтелектуальних мобільних систем. Це включає розробку нових алгоритмів злиття даних (sensor fusion) для підвищення точності позиціонування та контекстної обізнаності пристрою.

1.3. Категоризація та функціональні можливості сенсорів мобільної платформи Android

Платформа Android надає доступ до широкого спектру вбудованих сенсорів, які класифікуються за їхніми основними функціональними можливостями на три ключові категорії.

1. Сенсори руху (Motion Sensors)

Ця категорія охоплює пристрої, призначені для вимірювання прискорення та кутових рухів об'єкта у тривимірному просторі (уздовж осей X, Y, Z). Їхні дані критично важливі для відстеження кінематики пристрою.

Акселерометр (Accelerometer) - вимірює лінійне прискорення, включаючи гравітаційну складову.

Гіроскоп (Gyroscope) - визначає кутову швидкість обертання пристрою.

Сенсор гравітації (Gravity Sensor) - обчислює вектор сили тяжіння, що допомагає у визначенні орієнтації без впливу лінійного руху.

2. Сенсори навколишнього середовища (Environmental Sensors)

Дані, зібрані цими сенсорами, характеризують фізичні параметри довкілля, в якому функціонує мобільний пристрій.

Барометр (Barometer/Pressure Sensor) - вимірює атмосферний тиск, що використовується для уточнення висоти (альтиметрія).

Фотометр (Photometer/Light Sensor) - визначає рівень освітленості (люкс), забезпечуючи автоматичне регулювання яскравості екрана.

Термометр (Thermometer) - моніторинг температури (хоча часто використовується для внутрішніх потреб пристрою, а не зовнішнього середовища).

Гігрометр (Hygrometer/Humidity Sensor) - вимірює відносну вологість навколишнього повітря.

3. Сенсори позиції (Position Sensors)

Ці сенсори спеціалізовані для визначення фізичного положення мобільного пристрою відносно магнітного поля Землі або інших об'єктів.

Магнітометр (Magnetometer) - вимірює напруженість і напрямок навколишнього магнітного поля, що є основою для функції компаса та виявлення металевих об'єктів.

Сенсор орієнтації (Orientation Sensor) - забезпечує інтегровану інформацію про орієнтацію (азимут, тангаж, крен), часто є віртуальним сенсором, що отримує дані шляхом злиття (fusion) акселерометра, гіроскопа та магнітометра.

Представлена робота зосереджена на прикладному використанні обраної комбінації внутрішніх мобільних сенсорів для вирішення актуальної проблеми міського середовища. Основна мета дослідження полягає у розробці мобільного додатку, здатного ідентифікувати та локалізувати вільні паркувальні місця на узбіччі доріг (краудсорсинговий підхід).

Зокрема, для досягнення поставленої мети найбільш релевантним є використання сенсорів позиції (зокрема, магнітометра) та сенсорів руху (для визначення траєкторії руху користувача), оскільки вони дозволяють виявляти аномалії магнітного поля, спричинені припаркованими автомобілями (металевими об'єктами), і точно визначати їхнє географічне положення. Таким чином, проєкт концентрується на інноваційній сенсорній обробці для підвищення ефективності міського паркувального менеджменту.

1.4. Аналіз ефективності сенсорних систем у регулюванні паркування та визначення локації транспортних засобів

У межах великих урбанізованих територій паркомісця є одночасно коштовним та високодефіцитним ресурсом. Значна частка транспортного потоку у міському середовищі складається з автомобілів, водії яких перебувають у пошуку вільного місця для паркування. Хоча інтенсивність цієї проблеми є контекстуально залежною (варіюється залежно від географічного розташування та часу доби), вона становить системний виклик.

1.4.1. Фактори, що посилюють проблему надмірного пошуку

Емпіричні дані (наприклад, [3]) свідчать, що у великих мегаполісах середній час пошуку паркувального місця може сягати 15 хвилин. Надмірний час пошуку переважно спричинений двома основними чинниками:

1. Поведінкові преференції водіїв.

Водії мають стійку тенденцію пріоритезувати безкоштовне паркування на узбіччі, особливо якщо воно розташоване в безпосередній близькості до кінцевого пункту призначення. Це створює точкове перевантаження у зонах найвищого попиту.

2. Невизначеність та інерція.

У ситуації, коли всі пріоритетні місця зайняті, проблема поглиблюється. Незнання водіями про альтернативні доступні місця (платні стоянки, гаражі) призводить до інерційного очікування або тривалого активного пошуку. Це посилює вихідну проблему через:

- Непродуктивне використання часового ресурсу водія.
- Збільшення транспортних заторів (конгестії).
- Негативний вплив на екологію та здоров'я населення через підвищені викиди від автомобілів, що повільно рухаються [3].

1.4.2. Сучасні технологічні рішення та їх обмеження

Визнаючи, що ця проблема є довготривалою і лише зростає в густонаселених центрах, урбаністичні адміністрації інвестують у впровадження інтелектуальних систем управління паркуванням. Прикладами таких інфраструктурних рішень є Fastprk та SENSIT.

Таблиця 1.2.

Особливості систем Fastprk та SENSIT

Система	Принцип роботи	Заявлені переваги
Fastprk	Сенсорна система, що інтегрується з громадськими платіжними та сповіщувальними платформами.	Зменшення часу паркування на 35%
SENSIT	Сенсорна система.	Зменшення порушень паркування на 64% та зниження рівня зайнятості

Алгоритм Fastprk є двоетапним процесом, що включає збір даних на рівні інфраструктури та диспетчеризацію на рівні платформ.

Етап 1: Збір та агрегація даних (інфраструктурний рівень)

1. Детекція (сенсор). Сенсори, встановлені в асфальті (або на ньому) на кожному паркувальному місці, постійно моніторять свою зону.

- Фізичний сенсор, використовуючи магнітну та ІЧ технології, реєструє зміну параметрів, викликану прибуттям/відбуттям автомобіля.

- Застосовується енергоефективний алгоритм детекції для підтвердження статусу: "ЗАЙНЯТО" або "ВІЛЬНО".

2. Передача (IoT Мережа). Сформований статус паркомісця бездротово (наприклад, через LoRaWAN) передається на найближчий шлюз (Gateway/U-Blox).

3. Агрегація (платформа). Шлюз збирає дані від десятків сенсорів і надсилає їх через стільникову мережу (наприклад, 4G) до центральної хмарної платформи (ЦХП).

Етап 2: Обробка та навігація (платформний рівень)

4. Обробка та аналітика (ЦХП): ЦХП валідує, зберігає та аналізує вхідні дані про статус усіх місць у місті.

- Використовуються алгоритми для визначення рівня зайнятості паркувальних зон, вулиць чи районів.

- ЦХП може застосовувати алгоритми динамічного ціноутворення залежно від попиту.

5. Формування "Мапи вірогідності" (алгоритм навігації). На основі актуальних даних про зайнятість і трафік, система обчислює вірогідність того, що місце буде вільним на момент прибуття водія.

Складається карта вільних місць або маршрутів з високою ймовірністю успішного паркування.

6. Диспетчеризація (інтерфейс користувача). Оброблені дані передаються водіям через:

- Мобільний додаток (надає покрокову навігацію до найближчого вільного місця).

- Електронні табло на вулицях (показують кількість вільних місць у зоні).

Контроль (API для міської влади): Інформація про порушення (наприклад, про перевищення часу паркування, відсутність оплати)

передається в реальному часі до служб контролю для ефективного застосування штрафних санкцій.

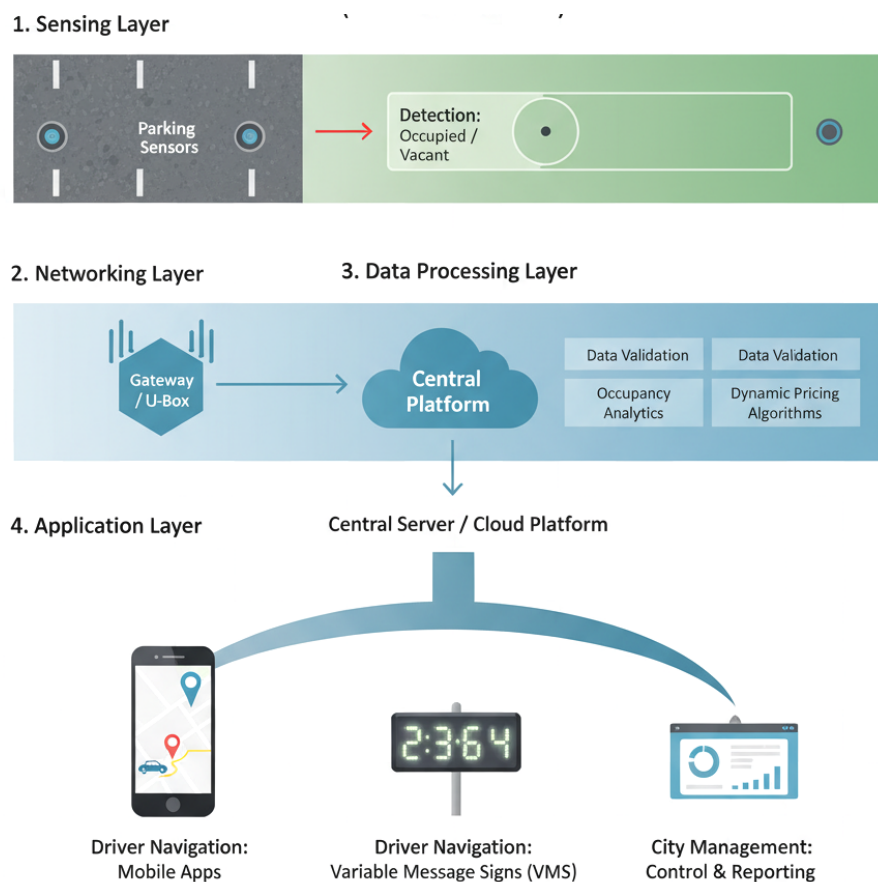


Рис. 1.2. Представлення алгоритму системи Fastprk

Обидві системи спрямовані на визначення статусу зайнятості місць та надання навігації водіям, сприяючи оптимізації міського управління та підвищенню задоволеності користувачів.

1.4.3. Економічний бар'єр для широкого впровадження

Ключовим обмеженням зазначених вище рішень є їхня інфраструктурна залежність від фізичного обладнання (встановлення сенсорів). Це робить їх ефективними та рентабельними переважно для місць, що генерують дохід (платне вуличне паркування).

Проте, технології для безкоштовного паркування на узбіччі залишаються менш розвиненими та впровадженими. Для міст з обмеженим бюджетом, покриття значної кількості вулиць інфраструктурними сенсорами, як, наприклад, у Чикаго чи Нью-Йорку, де кількість потенційно завантажених зон є екстенсивною, може швидко стати фінансово непідйомним тягарем, вимагаючи значної частини муніципального бюджету для повного переоснащення.

Цей економічний бар'єр актуалізує необхідність розробки енергоефективних та високомасштабованих рішень, які не вимагають капітальних інвестицій у вуличну інфраструктуру.

1.5. Концепція рішення для моніторингу паркування транспортних засобів на основі сенсорів мобільних пристроїв

З огляду на існуючі проблеми дефіциту паркувальних місць, пропонується інноваційне рішення, яке експлуатує повсюдну наявність смарт-пристроїв у міському середовищі для підвищення ефективності виявлення вільних паркомісць.

1.5.1. Методологічна основа та принцип дії

Рішення ґрунтується на обробці сирих даних від вбудованих мобільних сенсорів, а саме магнітометра, гіроскопа та акселерометра. Використовуючи природний кінематичний рух пішоходів, що пересуваються тротуарами, здійснюється детекція паркувальних місць.

Система використовує зміни магнітного поля (фіксовані магнітометром) поблизу припаркованих транспортних засобів (великих металевих об'єктів) та аналізує рух самого пішохода (акселерометр, гіроскоп) для класифікації статусу паркувального місця на узбіччі як "зайняте" або "вільне".

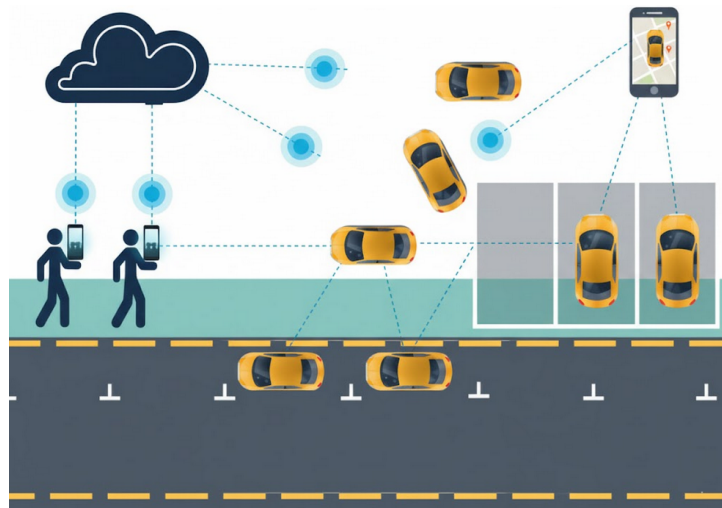


Рис. 1.3. Ілюстрація роботи рішення моніторингу вільних місць і паркування

Згідно з даними [14], значна частина міського населення постійно носить із собою смарт-пристрої. Пропонована система використовує цей постійний потік пішоходів (crowdsensing) як розподілену сенсорну мережу для неявного обміну інформацією про вільні місця. Crowdsensing є потужною методологією, що дозволяє створювати динамічні, великомасштабні карти навколишнього середовища та соціальних процесів, використовуючи вже існуючу цифрову інфраструктуру. Точність функціонування системи прямо корелює з інтенсивністю пішохідного трафіку. З огляду на прогнозоване зростання кількості смарт-пристроїв у майбутньому, передбачається безперервне підвищення точності та операційної цінності рішення.

1.5.2. Науковий внесок дослідження

Ключові результати та внесок даного дослідження можна систематизувати таким чином:

1. Створення високоточної системи локалізації паркомісць, що функціонує виключно на базі внутрішніх сенсорів смартфонів.
2. Алгоритмічна розробка. Проектування спеціалізованого алгоритму для виявлення та оцінки кінематичних параметрів користувача (кроки, швидкість, зміна напрямку), що є критичним для точної прив'язки сенсорних даних.

3. Побудова класифікаційної моделі. Створення моделі машинного навчання, що використовує ознаки, видобуті із сирих даних мобільних сенсорів, для надійної класифікації статусу паркомісця.

4. Емпірична валідація. Проведення всебічного тестування та оцінки ефективності системи у різноманітних географічних локаціях, міських сценаріях та при різних характеристиках користувачів (різні звички та швидкість ходьби).

5. Архітектура обміну даними. Впровадження механізму відправки класифікованих даних до хмарного сховища для подальшого оперативного використання водіями.

Висновки до розділу

У першому розділі було здійснено всебічний аналіз предметної області задач сенсорно базованої локації транспортних засобів, з урахуванням урбаністичних викликів, пов'язаних із зростанням транспортного навантаження, нестачею паркувальних місць та потребою у підвищенні ефективності управління міським рухом. Визначено, що проблема пошуку вільного паркомісця є суттєвим чинником збільшення заторів, викидів шкідливих речовин і нераціонального використання міського простору.

Проаналізовано можливості мобільних сенсорів, зокрема акселерометрів, гіроскопів, магнітометрів та GPS-модулів, як засобів для реалізації алгоритмів детекції транспортних засобів і фіксації їхнього просторового положення. Здійснено категоризацію сенсорів мобільних пристроїв платформи Android, окреслено їхні технічні характеристики, діапазони точності та обмеження під час застосування в задачах моніторингу. Встановлено, що мобільні сенсори, завдяки своїй доступності та енергоефективності, становлять перспективну основу для побудови масштабованих систем спостереження.

Оцінено сучасні технологічні рішення у сфері інтелектуального паркування — зокрема системи на основі IoT, ультразвукових датчиків, оптичних систем та централізованих баз даних. Виявлено, що більшість комерційних рішень мають високу вартість впровадження, потребують спеціалізованого обладнання й не забезпечують достатньої гнучкості при масштабуванні. На основі аналізу запропоновано концепцію сенсорно базованої системи моніторингу паркування, що використовує ресурси мобільних пристроїв, а також сформульовано наукову новизну підходу — інтеграцію даних різних типів сенсорів для покращення точності визначення локації транспортного засобу.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАЧ СЕНСОРНО БАЗОВАНОЇ ЛОКАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

2.1. Аналіз чутливості та застосування мобільних магнітометрів у детекції транспортних засобів

Магнітометри є високочутливими сенсорами до наявності феромагнітних матеріалів (як м'яке, так і тверде залізо), що пояснюється спотворенням (аномалією) локального магнітного поля Землі (МПЗ).

2.1.1. Принцип магнітного спотворення

Виявлення змін МПЗ, викликаних металевими об'єктами, ґрунтується на фізичному явищі: магнітна проникність феромагнітних матеріалів значно вища, ніж у повітря.

Цей ефект призводить до того, що лінії магнітного поля Землі концентруються та викривляються (деформуються) навколо великих металевих об'єктів, таких як автомобілі, конструкції яких містять значну кількість заліза [1].

Магнітні датчики здатні безконтактно реєструвати ці зміни. Сучасні розробки розширили застосування магнітних сенсорів, включаючи виявлення не лише аномалій МПЗ, але й полів, генерованих електричними струмами та постійними магнітами.

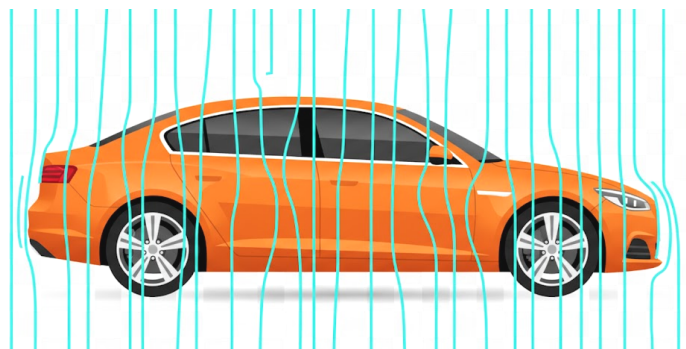


Рис. 2.1. Представлення спотворення магнітного поля біля автомобіля

На рисунку 2.1 показано, як спотворюється магнітне поле Землі в присутності металевих об'єктів. Тут вертикальні лінії представляють магнітне поле Землі, яке майже паралельне, і наявність великого металевих автомобіля змушує ці паралельні лінії викривлятися та спотворюватися.

2.1.2. Застосування магнітометрів у навігації та моніторингу

Чутливість до магнітних аномалій активно використовується у складних системах:

1. Навігаційні системи

Багато систем управління рухом та навігації (наприклад, для підводних і надводних транспортних засобів) використовують функцію магнітометра для корекції магнітного відхилення, спричиненого як твердим, так і м'яким залізом у конструкції самого об'єкта. Для досягнення високої точності відстеження в цих системах застосовуються потужні алгоритми, зокрема фільтр Калмана, для компенсації виявлених спотворень.

2. Транспортний моніторинг.

Розвиваються портативні та стаціонарні сенсорні системи, розміщені вздовж доріг, для підрахунку, класифікації та вимірювання швидкості транспортних засобів на основі магнітних сигнатур.

2.1.3. Використання мобільного магнітометра для виявлення паркування

Спостереження за вищезазначеними характеристиками лягло в основу ідеї використання внутрішнього магнітометра смарт-пристроїв для детекції присутності або відсутності транспортного засобу.

Ідея ґрунтується на фіксації значних змін в амплітуді магнітного поля, що виникають при проходженні пішохода повз припаркований автомобіль. На відміну від традиційних підходів, які можуть нехтувати магнітометром через його високу варіативність та чутливість до зовнішніх шумів, ми перетворюємо цю варіативність на ключову ознаку. Ця ознака

використовується в краудсорсинговій системі для локалізації вільних паркомісць на узбіччі, надаючи актуальну інформацію водіям, які здійснюють пошук.

2.2. Огляд та критичний аналіз існуючих рішень для інтелектуального паркування транспортних засобів

Сучасні підходи до вирішення проблеми дефіциту паркувальних місць у міському середовищі класифікуються за використаною технологією та архітектурою. Кожен з них має унікальні переваги та суттєві обмеження щодо вартості, точності та безпеки.

2.2.1 Технологія на основі радіочастотної ідентифікації (RFID)

Одним із поширених методів є застосування технології RFID, де кожен транспортний засіб оснащується невеликим пристроєм для зв'язку з базовою станцією. Це дозволяє ідентифікувати окремі ТЗ за їхнім унікальним ідентифікатором, забезпечуючи системам управління точний підрахунок зайнятих та вільних місць.

Виконаємо опис технології RFID.

RFID-тег (Transponder) - це невеликий пристрій, що містить мікрочип та антену. Він може бути пасивним (без власного джерела живлення, живиться від поля рідера) або активним (з власним акумулятором, що дозволяє більшу дальність дії та додаткові функції). У системах паркування теги зазвичай встановлюються на лобовому склі, номерному знаку або іншому зручному місці на транспортному засобі. Тег зберігає унікальний ідентифікатор автомобіля.

RFID-рідер (Interrogator/Reader) - цей пристрій випромінює радіочастотні хвилі, створюючи електромагнітне поле. Коли RFID-тег потрапляє в поле рідера, він активується (якщо пасивний) і надсилає свій ідентифікатор у відповідь. Рідери зазвичай встановлюються на в'їздах/виїздах

з парковок, над кожним паркувальним місцем або в стратегічних точках контролю.

Антенна - компонент, який дозволяє рідеру та тегу передавати та приймати радіохвилі.

Система обробки даних. Отримані від рідерів ідентифікатори передаються на центральний сервер або в хмарну платформу, де вони обробляються. Система визначає, який автомобіль прибув або покинув парковку, і оновлює статус зайнятості місць.

Розглянемо принцип роботи в системах паркування

На в'їзді/виїзді коли транспортний засіб з RFID-тегом проїжджає повз рідер на в'їзді на парковку, рідер зчитує унікальний ідентифікатор тега. Ця інформація передається до центральної системи, яка реєструє прибуття автомобіля та, якщо є вільні місця, дозволяє в'їзд. Аналогічно відбувається на виїзді.

У більш складних реалізаціях RFID-рідери можуть бути інтегровані в кожне паркувальне місце. Коли автомобіль паркується на місці, розташований під ним рідер зчитує тег, реєструючи місце як зайняте.

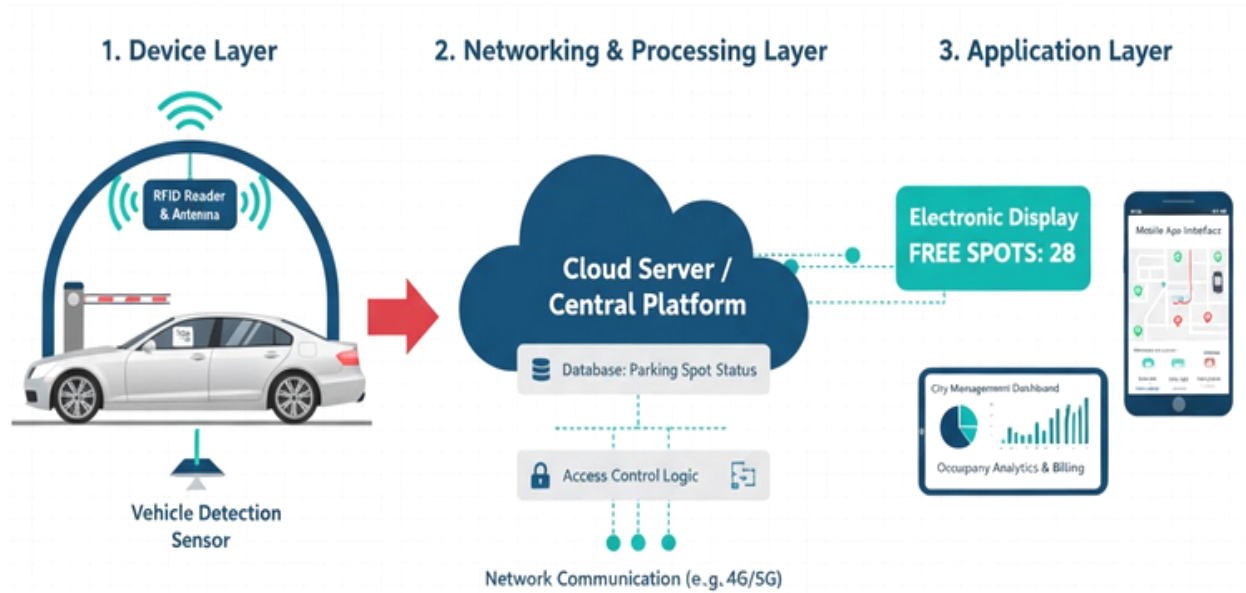


Рис. 2.2. Основні компоненти та логіку роботи системи паркування на базі RFID

Переваги RFID у паркуванні:

- Усуває потребу в ручному контролі, прискорюючи в'їзд/виїзд.
- Швидка ідентифікація сприяє плавнішому руху.
- Не вимагає фізичного контакту між водієм та системою.

Хоча ця система сприяє зниженню часу очікування та транспортної конгестії, вона має три основні недоліки:

1. Висока вартість впровадження, оскільки система вимагає оснащення всіх ТЗ, що потребує значних початкових інвестицій та подальших витрат на обслуговування інфраструктури.

2. Проблеми з точністю (Accuracy), бо у зонах високої щільності ТЗ (густонаселені райони) існує висока ймовірність колізій мовлення, що може перешкоджати одночасному входу кількох ТЗ і, відповідно, знижувати точність моніторингу.

3. Вразливість до безпеки (Security), оскільки система схильна до ризиків безпеки, оскільки обмежені запобіжні заходи можуть не гарантувати захист унікальних ідентифікаторів пристроїв від фальсифікації чи підробки.

2.2.2 Інтелектуальне паркування на основі оптичних та світлодіодних систем

Ці рішення використовують світлові сенсори для ідентифікації статусу паркомісць. Наприклад, у [8] розроблено систему LIDAR (Light Detection and Ranging), яка відстежує рух усіх вхідних ТЗ. Шляхом вимірювання пройденої відстані та аналізу траєкторії руху формується карта, що дозволяє оцінити статус зайнятості місць.

LIDAR – це технологія дистанційного зондування, яка вимірює відстань до об'єкта, освітлюючи його лазером і аналізуючи відбите світло.

Система LIDAR випромінює імпульси лазерного світла у напрямку паркувальної зони. Сенсор вимірює час, необхідний світлу для повернення після відбиття від об'єктів (наприклад, даху автомобіля або поверхні асфальту).

Завдяки вимірюванню тисяч точок за секунду, LIDAR створює точну тривимірну "хмару точок" (point cloud), що є детальною цифровою моделлю відсканованої області. Центральний обчислювальний модуль аналізує цю хмару точок. Шляхом порівняння сканованої моделі з еталонною моделлю порожньої парковки, алгоритми детектори можуть точно визначити:

- Наявність стороннього об'єкта (автомобіля).
- Розміри та позицію об'єкта.
- Статус кожного паркувального місця ("Зайнято" / "Вільно").

Сенсори LIDAR встановлюються на високих точках (наприклад, на ліхтарних стовпах або даху паркінгів) для сканування великої площі. У деяких реалізаціях, як описано у [8], система відстежує рух усіх транспортних засобів, що проїжджають певною ділянкою. На основі аналізу траєкторій та кінцевого положення формується карта, що дозволяє оцінити, які місця більше не є вільними.

Наступний алгоритм ілюструє, як технологія LIDAR взаємодіє з паркувальною зоною та як відбувається процес обробки даних:

1. Випромінювання (Emission).

Сенсор LIDAR, розташований високо (наприклад, на стовпі), випромінює лазерні імпульси, скануючи паркувальну зону.

2. Збір даних (Data Acquisition).

Відбите світло повертається до сенсора, який вимірює відстань до кожної точки, формуючи хмару точок.

3. Обробка (Processing).

Хмарна платформа або локальний процесор отримує хмару точок.

4. Аналіз (Analysis).

Алгоритми обробки хмар точок порівнюють поточну модель з еталонною (порожні місця). Виявляються аномалії (підвищення висоти), що відповідають припаркованим автомобілям.

5. Класифікація.

Кожне місце класифікується як "Зайнято" або "Вільно".

6. Диспетчеризація.

Інформація передається користувачам через додатки та табло, направляючи їх до вільних місць.

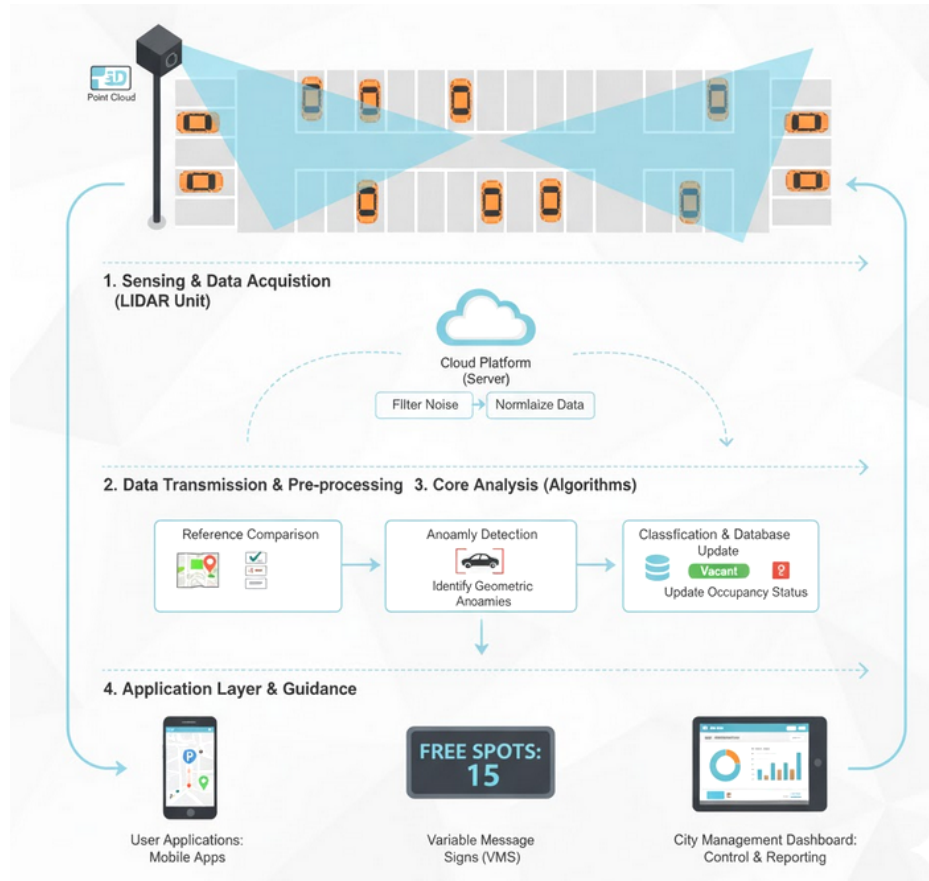


Рис. 2.3. Графічна інтерпретація алгоритму LIDAR-моніторингу

Аналогічний підхід описано в [10]. Хоча ці системи забезпечують високу точність, вони є витратними через необхідність встановлення значної кількості дорогого обладнання та інфраструктури.

2.2.3 Підхід на основі міжтранспортних мереж (VANET)

Цей підхід використовує архітектуру VANET (Vehicular Ad-hoc Networks), моделюючи зв'язок транспортного засобу з інфраструктурою (V2I). Міжтранспортні мережі – це спеціалізований вид мобільних ad-hoc мереж (MANETs), де вузлами мережі виступають транспортні засоби, оснащені комунікаційним обладнанням. У контексті інтелектуального

паркування, VANETs пропонують розподілене та кооперативне рішення для обміну інформацією про доступність паркувальних місць.

Підхід на основі VANETs для визначення доступності паркомісць фокусується на безперервній комунікації між автомобілями та дорожньою інфраструктурою. Ключові компоненти та взаємодія:

1. Бортові блоки (On-Board Units, OBU): Кожен транспортний засіб, що бере участь у мережі, оснащений OBU. Цей пристрій відповідає за:
 - Збір інформації про поточне місцезнаходження (GPS), швидкість, а також використання вбудованих сенсорів автомобіля (наприклад, парктроніків, камер, ультразвукових датчиків) для виявлення об'єктів на близькій відстані та визначення статусу паркомісць у безпосередній близькості.
 - Обмін інформацією з іншими OBU та RSU.
2. Дорожні статичні блоки (Road-Side Units, RSU): Це стаціонарні інфраструктурні вузли, встановлені вздовж доріг, на перехрестях або поблизу паркувальних зон. RSU діють як:
 - Агрегатори збирають інформацію від OBU у своїй зоні покриття.
 - Релейні станції передають дані до центрального сервера або іншим RSU.
 - Бази даних можуть підтримувати актуальний стан зайнятості паркомісць у певній зоні.
3. Комунікаційні канали: Взаємодія відбувається через різні стандарти бездротового зв'язку, такі як DSRC (Dedicated Short-Range Communications), Wi-Fi, 4G/5G.
 - V2I (Vehicle-to-Infrastructure): Зв'язок між OBU та RSU.
 - V2V (Vehicle-to-Vehicle): Безпосередній зв'язок між OBU різних автомобілів.

Принцип роботи:

- Модель з перекривними зонами: Місто поділяється на безліч перекривних паркувальних зон. RSU відповідає за підтримку стану

зайнятості паркомісць у своїй зоні. Коли ТЗ наближається до певної зони, його OBU запитує RSU, надаючи свої GPS-координати. RSU відповідає, надсилаючи інформацію про стан парковок, що знаходяться ближче до водія.

- MURAT (Grid Tree Algorithm): У цьому підході вся територія міста поділяється на ієрархічну структуру Grid Tree. Кожен ТЗ (через свій OBU) підтримує:

- Звіт про ресурси (Resource Report): Інформація про зайнятість місць, які він сам виявив.

- Агрегований звіт (Aggregated Report): Зведені дані про потужність та зайнятість парковок у межах своєї "сітки", які він отримує від інших ТЗ або RSU. Це дозволяє ТЗ кооперативно ділитися інформацією та оновлювати загальну картину доступності паркування.

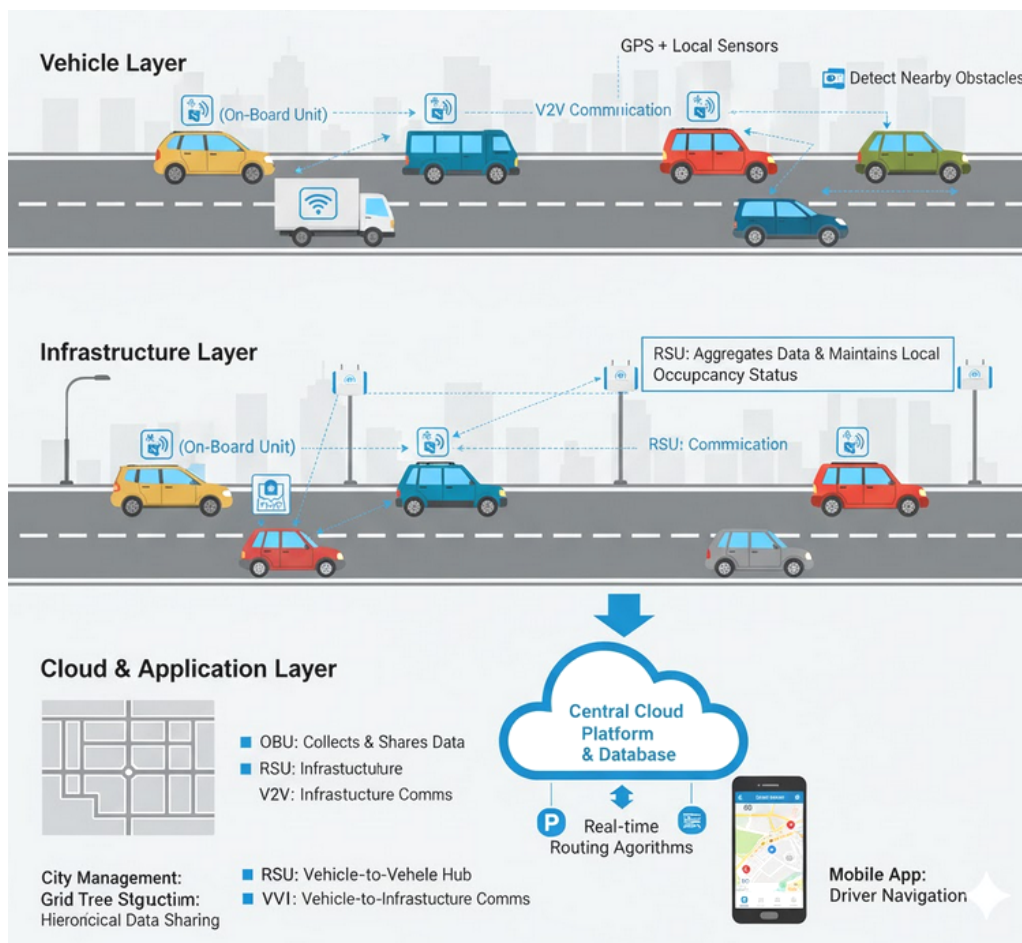


Рис. 2.4. Графічна інтерпретація підходу на основі VANET

На рис. 2.4 подана графічна ілюстрація, яка демонструє архітектуру та взаємодію компонентів у системі інтелектуального паркування на базі VANET:

В [13] застосовується мережева модель. Пропонується розділення паркувальної зони на перекривні ділянки. ТЗ, оснащені бортовими блоками (OBU) та всебічними сенсорами, взаємодіють зі статичними дорожніми блоками (RSU). RSU підтримують актуальний стан зайнятості паркомісць. OBU запитує RSU про стан найближчих парковок, використовуючи поточні GPS-координати.

Алгоритм MURAT [6], що поділяє територію на ієрархічну структуру Grid Tree. Кожен ТЗ підтримує локальні та агреговані звіти, що містять інформацію про поточну потужність і зайнятість паркувальних місць у межах своєї сітки.

2.2.4 Моделі на основі централізованих баз даних доступних місць

Цей підхід [11] передбачає використання централізованої бази даних, яка зберігає актуалізовану інформацію про доступність паркувальних місць. Комунікаційний канал забезпечує збір даних про статус місць та їх подальшу передачу транспортним засобам. Система обробляє збережені дані для надання водіям інформації про найближчі вільні місця.

2.2.5 Розумне паркування на основі обробки зображень та ультразвуку

Інші дослідницькі рішення, наведені в [5], включають обробку відео та зображень, а також використання ультразвукових хвиль та мікрохвиль у поєднанні з вузлами передавача. Ці технології, як правило, є енергоємними, дорогими у розгортанні та обслуговуванні, а також можуть демонструвати низьку точність у складних міських умовах.

Розумне паркування на основі обробки зображень (Image Processing) та ультразвуку (Ultrasonic) представляє клас технологій, що використовують різні фізичні принципи для моніторингу статусу паркувальних місць. Ці

підходи часто є альтернативою або доповненням до індуктивних петель та магнітних сенсорів.

Системи, що використовують обробку зображень, застосовують камери відеоспостереження для візуального моніторингу паркувальних зон.

1. Збір даних. Відеокамери високої роздільної здатності встановлюються над паркувальними місцями (на стелях критих паркінгів або на стовпах на відкритих майданчиках). Вони безперервно знімають відеопотік або серію зображень.

2. Обробка зображень. Відеопотік або зображення передаються на сервер, де спеціалізовані алгоритми комп'ютерного зору аналізують кожен кадр. Ці алгоритми:

- Виявляють транспортні засоби на зображенні.
- Розпізнають їхні контури та розміри.
- Класифікують статус кожного паркувального місця ("Зайнято" / "Вільно") шляхом порівняння поточного зображення з еталонним зображенням порожнього місця.
- Можуть також розпізнавати номерні знаки (ANPR - Automatic Number Plate Recognition).

Перевагами є висока точність (за належного освітлення), можливість одночасного моніторингу багатьох місць однією камерою, надання додаткової інформації (тип ТЗ, номерний знак).

До недоліків можна віднести чутливість до умов освітлення (тіні, нічний час, прямі сонячні промені), залежність від кута огляду, високі вимоги до обчислювальної потужності, проблеми конфіденційності, висока вартість камер та обробного обладнання [5].

Наведемо опис технології на основі ультразвуку. Ультразвукові сенсори є одними з найпростіших і найпоширеніших датчиків присутності об'єктів.

Принцип дії наступний - ультразвуковий датчик випромінює високочастотні звукові хвилі (ультразвук) і вимірює час, необхідний для

повернення відбитого сигналу. Якщо перед датчиком знаходиться об'єкт (наприклад, автомобіль), ультразвукові хвилі відбиваються від нього раніше, ніж якби об'єкта не було. Залежно від вимірюного часу повернення сигналу, датчик визначає, чи є паркувальне місце зайнятим.

Ці датчики часто встановлюються на стелях критих паркінгів над кожним паркувальним місцем. Світлодіодний індикатор, інтегрований із датчиком, візуально інформує водіїв.

Перевага - висока точність у закритих просторах, відносно низька вартість (порівняно з LIDAR або камерами), простота реалізації.

Недоліки - обмежений діапазон дії (вимагає одного датчика на кожне місце), чутливість до перешкод та сторонніх шумів, не придатні для відкритого паркування під дощем, снігом, при сильному вітрі.

Наведемо принцип роботи ультразвукової системи паркування. Ультразвукові сенсори використовуються для моніторингу зайнятості паркувальних місць, особливо в критих паркінгах.

Ключові компоненти та процес:

1. Ультразвуковий Сенсор (Ultrasonic Sensor):

- Розташовується над кожним паркувальним місцем.
- Випромінює ультразвукові хвилі.
- Приймає відбиті хвилі.

2. Детекція присутності (Presence Detection):

- Сенсор вимірює час повернення відбитого сигналу.
- Якщо час короткий (сигнал відбився від поверхні, що знаходиться близько), це означає, що автомобіль присутній.

- Якщо час довший (сигнал дійшов до поверхні підлоги), це означає, що місце вільне.

3. Візуальна Індикація (Visual Indication):

Часто інтегрований світлодіодний індикатор змінює колір: червоний для зайнятого місця, зелений для вільного. Це надає водіям миттєву візуальну інформацію.

4. Комунікація та центральна платформа (Communication & Central Platform):

- Дані від кожного сенсора передаються на центральний контролер або в хмарну платформу.
- Центральна система агрегує ці дані, формуючи загальну карту зайнятості паркінгу.
- Ця інформація використовується для оновлення електронних табло та мобільних додатків, що направляють водіїв до вільних зон.

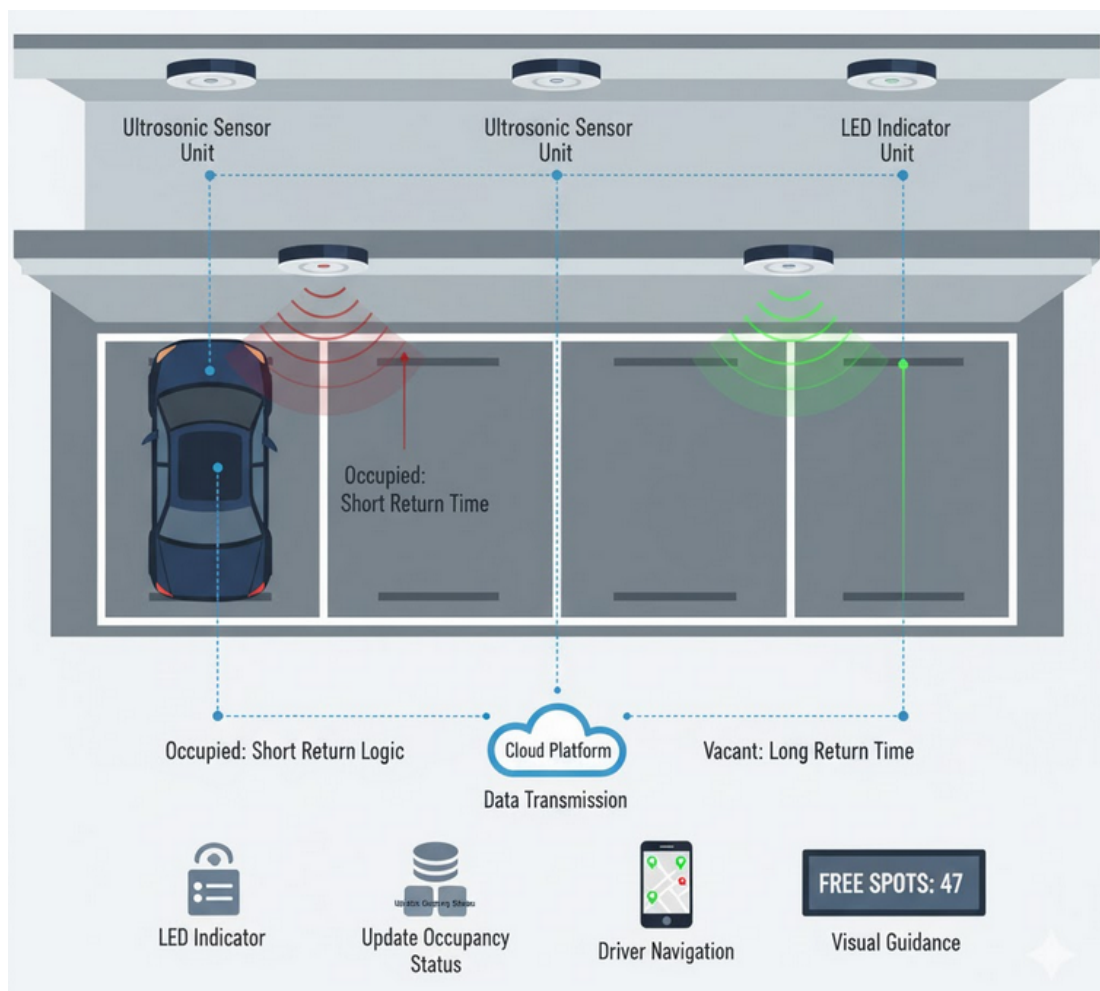


Рис. 2.5. Принцип роботи ультразвукової системи паркування

Сучасні дослідження активно зосереджені на розробці нових методів моніторингу паркування, що зменшують негативні наслідки транспортної конгесії. Проте, спостерігається чітка дихотомія між точністю та вартістю

впровадження, де фінансові аспекти часто визначають рівень операційної продуктивності.

2.2.6. Переваги пропонованого проекту

На противагу цим рішенням, пропозитивний проект пропозитивує парадигмально інший підхід, який зберігає високу точність при істотно нижчих фінансових витратах. Система використовує лише економічно ефективні внутрішні сенсори смартфонів (краудсорсинг). Єдиним енергоємним компонентом є використання GPS, яке обмежується лише етапом передачі класифікованих даних до хмарного сервісу для подальшої диспетчеризації водіям.

Висновки до розділу

Другий розділ присвячено аналізу методів і підходів реалізації задач сенсорно базованої локації транспортних засобів. Проведено дослідження принципів роботи мобільних магнітометрів, які використовуються для виявлення транспортних засобів через спотворення магнітного поля. Встановлено, що магнітометр може ефективно виконувати функції пасивного сенсора, не потребує додаткових енергозатрат, що робить його перспективним для побудови низьковартісних рішень.

Виконано критичний аналіз сучасних технологій інтелектуального паркування — RFID-систем, оптичних, світлодіодних та ультразвукових технологій, міжтранспортних мереж (VANET) і централізованих баз даних доступних місць. Визначено їхні переваги та недоліки, а також обмеження у сфері масштабованості, точності, вартості та необхідності високорівневої інфраструктури. Зроблено висновок, що комбіноване використання сенсорів мобільних пристроїв і машинного навчання дозволяє створити адаптивну систему, здатну самостійно ідентифікувати ситуації паркування та руху без потреби у зовнішніх пристроях.

Обґрунтовано переваги запропонованого підходу, який полягає у використанні мобільних сенсорів як універсальних детекторів стану транспортного засобу, що забезпечує економічність, простоту інтеграції та можливість збору даних у реальному часі. Визначено, що така система може бути основою для побудови інтелектуальних міських платформ моніторингу паркування, заснованих на принципах сталого розвитку та ефективного використання інформаційних ресурсів.

РОЗДІЛ 3. ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ СЕНСОРНО БАЗОВАНОЇ ЛОКАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

3.1. Основна ідея пропонованого рішення

Основною метою розробки пропонованого програмного рішення є створення економічно ефективного алгоритму для сприяння водіям у пошуку доступних вуличних паркувальних місць. Цей підхід використовує внутрішні мобільні датчики (зокрема, магнітометр), які є недорогими, ефективними, точними та простими у використанні. У контексті великих, густонаселених міст, де пошук вуличного паркування традиційно є часовитратним, дорогим і обтяжливим завданням, це рішення пропонує дешевшу альтернативу порівняно з комерційними паркінгами.

Розробка пропонованого програмного рішення зосереджена на оптимізації двох ключових параметрів: вартості додатка та точності визначення наявності паркомісця. Існуючі додатки для пошуку паркування часто покладаються на обчислення на пристрої користувача та використання глобальної системи позиціонування (GPS). Такий підхід є фінансово затратним і недостатньо точним для вирішення цієї чутливої проблеми, особливо в умовах щільної міської забудови.

Концептуальна ідея цієї роботи полягає у використанні економічно ефективного підходу, який перетворює негативний аспект постійно завантажених міських вулиць на позитивне джерело даних. Враховуючи високу поширеність мобільних телефонів серед пішоходів, пропоноване програмне забезпечення використовує датчики мобільних пристроїв пішоходів для реєстрації змін магнітометричного поля при проходженні повз припарковані транспортні засоби.

Пропонується дизайн, реалізація та оцінка системи, що інтегрує інтерфейс збору даних від пішоходів, які пересуваються тротуаром, та їхніх мобільних пристроїв, обладнаних сенсорами. Зібрана інформація передається

на хмарний сервер для подальшої обробки та збереження. Ці дані використовуються водіями, які шукають вільні паркомісця на узбіччі.

Розроблено модель класифікації, яка визначає доступність паркомісця. Цей класифікатор виконується частково на мобільних телефонах пішоходів (для первинного збору) та частково на серверній частині (для фінальної обробки), що дозволяє досягти відображених результатів. Після обробки система інформує водіїв, які запитують найближче вільне місце. Запропонована структура дозволяє ефективно збирати дані від усіх пішоходів, що проходять вулицею, використовуючи при цьому мінімальні обчислювальні ресурси та спрощений кодовий процес.

У рамках даного дослідження розроблена система використовує мобільність пішоходів як джерело даних для оцінки стану паркувальних місць на узбіччі. Збір даних здійснюється за допомогою внутрішніх датчиків руху та глобальної системи позиціонування (GPS) мобільних пристроїв. Застосування простого та прямого алгоритму дозволило досягти високої точності в диференціації між вільними та зайнятими паркувальними місцями.

Система демонструє здатність до класифікації виявлених проміжків, розрізняючи доступне паркувальне місце від невеликого інтервалу між двома послідовно припаркованими автомобілями. Шляхом ретельного відбору навчальних даних та аналізу поведінки сенсорів був розроблений класифікатор, який не тільки ідентифікує транспортні засоби, але й здатний диференціювати їх від інших металевих об'єктів (наприклад, стовпів). Це забезпечує високу точність визначення довжини металевої поверхні (довжини автомобіля).

3.2. Розробка архітектури системи

Загальна архітектура запропонованого програмного рішення (як проілюстровано на рисунку 3.1 і складається з трьох ключових взаємодіючих компонентів:

- Компонент пішохода (клієнтський рівень збору даних)
- Компонент хмарного сервера (серверний рівень обробки та зберігання)
- Компонент водія (клієнтський рівень відображення)

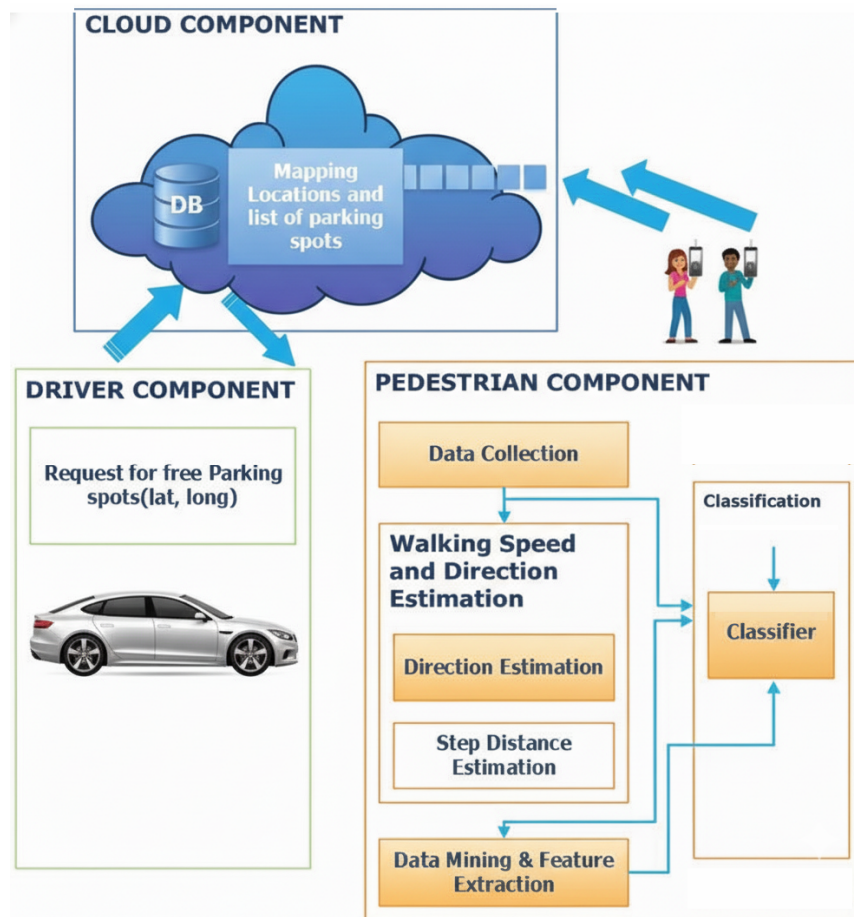


Рис. 3.1. Архітектура системи

3.2.1 Опис рівня збору даних

Після ініціалізації системи на мобільному пристрої пішохода, розпочинається збір сирих даних з наступних сенсорів: акселерометр, гіроскоп, магнітометр та GPS.

Дані GPS необхідні для визначення географічного місцеположення користувача та подальшого відображення класифікованих даних на хмарному сервері.

Дані акселерометра та гіроскопа використовуються для оцінки стану активності користувача (наприклад, ходьба чи статичне положення).

Основні дані для класифікації отримуються зі змін магнітометричного поля. Застосовується датчик магнітометра для обчислення зміни величини його сирого тривісного вектора, що є критичним для виявлення припаркованих транспортних засобів. Обчислення величини вектора дозволяє мінімізувати вплив орієнтації мобільного пристрою на точність розрахунків.

Крім того, дані гіроскопа та акселерометра залучаються до розрахунку довжини кроку користувача. Ця змінна використовується для оцінки швидкості ходьби, що є важливим для диференціації активності користувача та подальшої оцінки довжини виявлених автомобілів. Гіроскоп також використовується для виявлення зміни напрямку руху користувача, що запобігає подвійному виявленню одного і того ж паркувального місця у випадках розвороту пішохода.

На основі інтеграції даних з усіх зазначених датчиків руху розробляється алгоритм для ідентифікації транспортних засобів, припаркованих біля узбіччя, що, своєю чергою, дозволяє визначити наявні паркувальні місця.

3.2.2. Рівень обробки та зберігання даних

На серверному рівні відбувається агрегація, обробка та відображення усіх класифікованих даних, отриманих від пішоходів, разом із відповідними координатами GPS. Відображені результати про стан паркування зберігаються та періодично оновлюються на сервері.

3.2.3. Рівень відображення даних

Компонент водія функціонує як клієнтський модуль, де водій, використовуючи GPS мобільного пристрою, надсилає запит на сервер щодо наявності найближчих паркувальних місць. У відповідь водій отримує список

доступних місць, які маркуються на локальній карті. Це дозволяє користувачу вибрати місце та прокласти до нього маршрут.

В архітектурі пропонованого програмного рішення обчислення щодо локалізації паркувальних місць здійснюються локально на смартфоні пішохода. Система не вимагає взаємодії (співпраці) з сусідніми пристроями. Компонент пішохода не задіяний у процесах картографування та відображення. Його функція обмежується передачею фінального результату класифікації до хмарного середовища. Така особливість архітектури гарантує, що клієнтський додаток пішохода не здійснює прямого обміну інформацією з клієнтами водіїв, тим самим забезпечуючи збереження безпеки та конфіденційності користувача. Детальний огляд кожного компонента буде представлено у наступному розділі.

3.3. Опис функціональності компонентів системи та збору даних

Компонент пішохода (клієнтський рівень збору даних) в архітектурі пропонованого програмного рішення складається з шести основних модулів (як показано на рисунку 3.2). Цей компонент відповідає за збір сенсорних даних, вилучення ознак та первинну класифікацію.

На початковому етапі відбувається збір даних з внутрішніх датчиків руху мобільного пристрою та GPS. Зібрані дані, разом із відповідними часовими мітками, використовуються для вилучення інформативних ознак для класифікації. Зокрема, алгоритм використовує дані акселерометра та гіроскопа для детекції кроків пішохода та оцінки швидкості ходьби. Крім того, гіроскоп залучається для виявлення змін у напрямку руху. Це дозволяє системі ідентифікувати ситуації, коли користувач змінює напрямок руху та повторно проходить повз вже проаналізовану ділянку.

Критично важливим є розрахунок швидкості ходьби для правильної інтерпретації даних магнітометра. Це необхідно для диференціації між тривалим проходженням повз великий автомобіль та короткочасною

зупинкою користувача біля невеликого автомобіля, оскільки обидві ситуації можуть генерувати схожі магнітометричні сигнали.

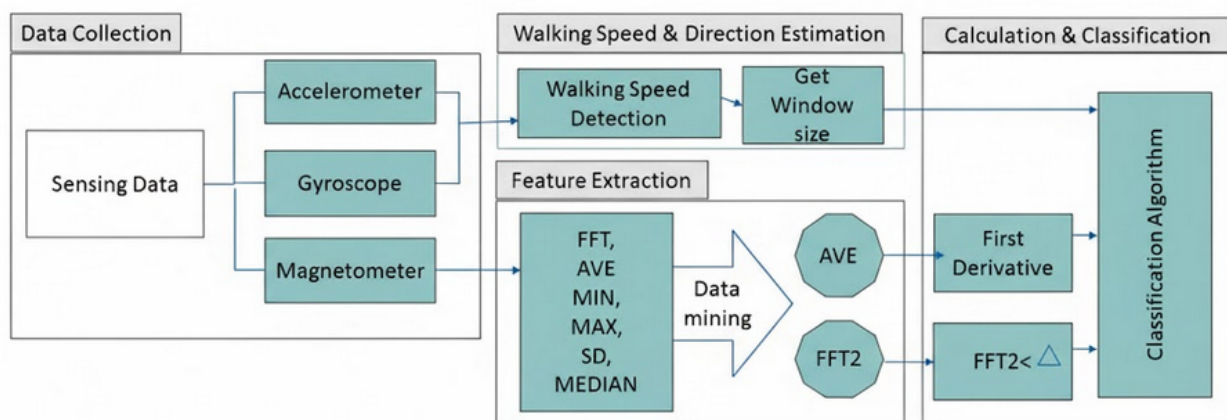


Рис. 3.2. Модулі рівня збору даних

3.3.1. Етап збору даних

Для збору даних внутрішніх сенсорів використовується додаток для платформи Android. Система фіксує показники з акселерометра, гіроскопа, магнітометра та GPS.

З метою забезпечення незалежності алгоритму від орієнтації мобільного пристрою, використовується величина вектора тривісного датчика магнітометра, яка реєструє зміни магнітного поля під час руху пішохода тротуаром. Такий підхід дозволяє збирати надійні дані, незалежно від того, чи пристрій знаходиться в руці, кишені або сумці користувача, що значно підвищує зручність використання системи, усуваючи необхідність підтримки фіксованої позиції чи орієнтації телефону.

Дані магнітометра збираються з частотою 100 Гц, що є достатнім для виявлення мінімальних змін магнітного поля. Дані гіроскопа необхідні для розрізнення між зміною орієнтації телефону та фактичним наближенням до припаркованого транспортного засобу. Акселерометр використовується для розрахунку швидкості ходьби та, у поєднанні зі змінами магнітометра, для оцінки довжини припаркованих автомобілів. Визначення швидкості ходьби користувача є визначальним для встановлення оптимального розміру

часового вікна для детекції транспортного засобу та вимірювання його довжини. Крім того, на основі аналізу швидкості акселерометра можна оцінити кількість доступних вільних місць. Дані GPS збираються для подальшого використання, зокрема для завантаження координат (широти та довготи) вільного паркувального місця до хмарного сховища для картографічного відображення.

3.3.2. Визначення швидкості ходьби та напрямку

Цей модуль складається з двох основних під модулів.

Модуль оцінки відстані призначений для оцінки відстані, пройденої пішоходом під час кожного кроку. Для виявлення та відстеження кроків використовуються дані акселерометра та гіроскопа. Рух користувача ініціюється перевищенням показників гіроскопа певного порогового значення (у даному дослідженні - 0,3). Після виявлення руху активується захоплення даних акселерометра.

Оскільки довжина кроку користувача корелює з його швидкістю [9], для аналізу використовуються два параметри, m_{max} та m_{min} , які представляють максимальну та мінімальну довжину кроку в кількості зразків:

$$m_{max} = V_{max} / S_{max} \cdot fa$$

$$m_{min} = V_{min} / S_{min} \cdot fa$$

де S – довжина кроку, V – швидкість ходьби, а fa – частота збору зразків акселерометра.

Після збору m_{max} рядків зразків акселерометра, обчислюється величина тривісного зразка акселерометра для забезпечення незалежності від орієнтації мобільного пристрою. Далі застосовується фільтр низьких частот (FIR) для видалення шуму та подальша нормалізація. Зразки подаються на вхід алгоритму динамічного часового вирівнювання (DTW). DTW розглядає вікно розміром m_{max} і перевіряє наявність заздалегідь визначеного шаблону

кроку (розміром n) в межах цього вікна. При виявленні кроку вікно зсувається до наступного зразка. DTW здатний виявляти кроки незалежно від індивідуальної варіативності їхньої довжини серед різних користувачів [16]. Загальний огляд алгоритму представлено на рисунку 3.3.

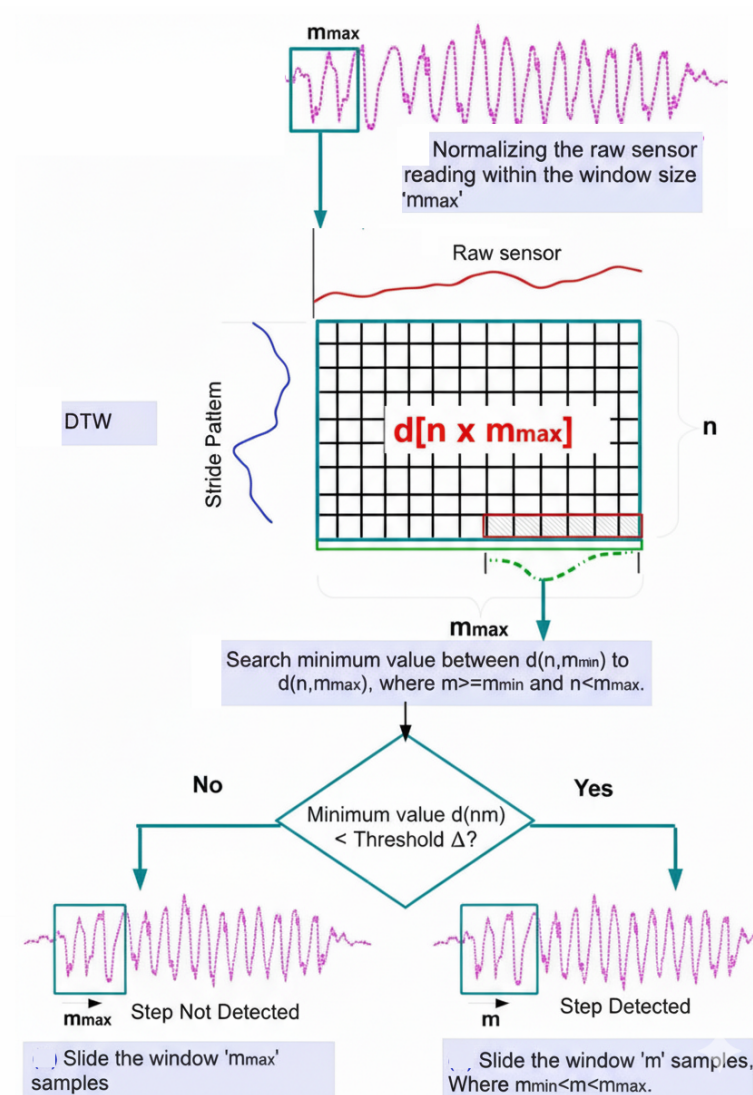


Рис. 3.3. Алгоритм виявлення кроку

Модуль оцінка напрямку. Необхідним є відстеження напрямку руху користувача для уникнення помилкового дублювання детекції паркувального місця, а також для диференціації між станом стояння біля паркомісця та проходженням повз кілька послідовних місць.

Для оцінки напрямку необхідно вирівняти три системи координат (як показано на рисунку 3.4): систему координат мобільного телефону, систему координат ходьби користувача та глобальну систему координат [11].

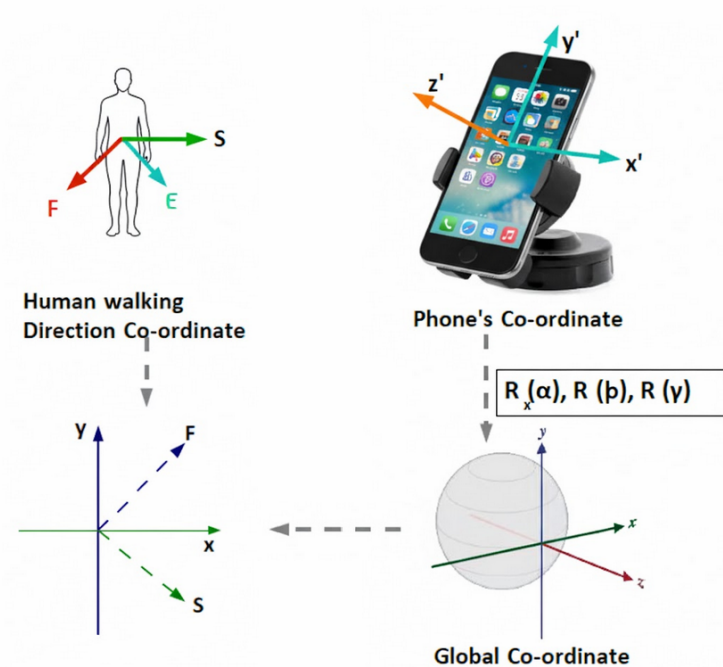


Рис. 3.4. Взаємозв'язок між системами координат

Оскільки глобальна координатна система є фіксованою, координати користувача та мобільного телефону відображаються на неї. Після вирівнювання цих трьох систем, напрямок ходьби користувача визначається за найбільшою зміною показників лінійного прискорення. Для визначення напрямку обличчя користувача, який відповідає одній із його систем координат, застосовується аналіз головних компонентів (РСА).

3.3.3 Обробка даних та видобування ознак

Після визначення швидкості ходьби користувача необхідно адаптивно встановити розмір вікна аналізу для точної класифікації сенсорних даних. Основна мета динамічного вікна полягає в забезпеченні коректної оцінки

довжини транспортних засобів та розрахунку кількості доступних паркувальних місць.

Наприклад, при типовій швидкості ходьби (приблизно 1 м/с), проходження повз середньостатистичний автомобіль (довжиною 3–3,5 м) займає близько 3 секунд. Однак, у випадку зниження швидкості, наприклад, до 0,5 м/с, час проходження тієї ж самої довжини збільшиться до 6 секунд. Слід зазначити, що при нормальній швидкості ходьби 6 секунд займає проходження повз великогабаритний транспорт (автобус або вантажівка). Отже, швидкість ходьби є критично важливою ознакою, що впливає на тривалість магнітометричного сигналу від об'єкта. Аналогічна залежність спостерігається при детекції паркувальних місць: повільна швидкість ходьби може призвести до хибної ідентифікації одного великого паркомісця як двох послідовних. Тому точне встановлення розміру вікна, пропорційного швидкості, є необхідною умовою для подальшої точної класифікації.

Окрім сирих даних сенсорів та розрахунку швидкості ходьби, для підвищення ефективності детекції автомобілів було витягнуто низку інформативних ознак. Дані магнітометра збиралися з частотою 100 Гц. Для кожного інтервалу в 100 зразків (що відповідає 1 секунді) було розраховано наступні п'ять базових статистичних ознак на основі величини тривісного магнітометричного вектора:

- Медіана (Median)
- Мінімум (Min)
- Максимум (Max)
- Стандартне відхилення (SD):

$$SD = 1/100 * \sum (X_i - \text{середнє})^2$$

Середнє квадратичне (RMS):

$$\text{Average} = 1/100 * \sum_{i=1}^n (X_i)^2$$

Для розширення набору ознак було застосовано швидке перетворення Фур'є (FFT) до усереднених зразків величини магнітометра для отримання частотного спектра. Через незначущість амплітуд вищих частот, до списку ознак було включено перші 10 перетворених значень FFT. Таким чином, сформовано вихідний вектор з 15 загальних ознак:

$$[Avg(Mag), Min(Mag), Max(Mag), Mean(Mag), SD(Mag), FFT1, \dots, FFT10]$$

Для оптимізації класифікатора та виявлення ознак з найбільшою прогностичною цінністю були використані алгоритми дерева рішень (Decision Tree) та Наївного Баєса (Naive Bayes). Усі 15 розрахованих ознак подавалися до модуля вилучення помітних ознак (рисунок 3.1). Аналіз, проведений за допомогою інструментів добування даних Weka та Microsoft Excel SQL, дозволив ідентифікувати найбільш ефективні ознаки для класифікації вуличних просторів на класи "вільне" та "зайняте" паркомісце.

До найбільш значущих ознак належать:

- Avg(Mag) (середнє значення величини магнітометра)
- Перша похідна(Mag)
- Віднімання вікна (Win-subtraction)
- FFT2

Як приклад, рисунок 3.4 ілюструє, що понад 60% зразків магнітометра, для яких значення FFT2 перевищувало певний поріг (2.296), були зібрані під час проходження користувача повз транспортний засіб. Хоча ця ознака є ефективною для виявлення значної частини автомобілів, необхідне вилучення більш надійних та стійких ознак для підвищення загальної точності системи.

На рис. 3.5 показано витягнення ознак за допомогою інструменту добування даних Excel SQL (алгоритм дерева рішень). Темно синій сегмент у першому блоці представляє транспортні засоби. Він демонструє, що значення fft2 для близько 60% автомобілів становить менше ніж 2,296.

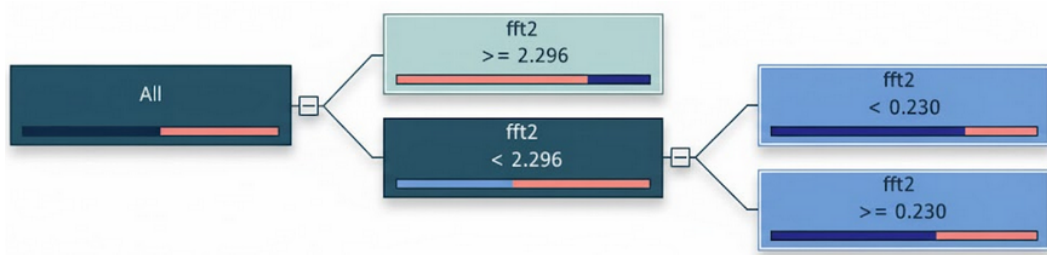


Рис. 3.5. Алгоритм дерева рішень витягнення ознак

Аналіз, виконаний за допомогою алгоритму дерева рішень, підтвердив, що різкі зміни середнього значення величини магнітометра мають найбільш виражений вплив на детекцію. Відповідно, замість використання сирого середнього значення, основною прогностичною ознакою була визначена перша похідна величини магнітометра (FD):

$$FD_n = \frac{AVE(\text{величина})_n - AVE(\text{величина})_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}$$

Оскільки частота збору даних становить 100 Гц, інтервал часу $\Delta t = (t_n - t_{n-1})$ дорівнює 0.01 секунди.

Також було емпірично встановлено, що зміна першої похідної на початку та в кінці проходження повз транспортний засіб є значно більшою, ніж значення FD під час проходження повз вільне паркувальне місце. Ця поведінка магнітометра дозволила витягти ще одну ефективну ознаку — "віднімання вікна" (Win-subtraction). Ця ознака являє собою різницю між останнім та першим значеннями першої похідної в межах встановленого динамічного вікна. Наприклад, при нормальній швидкості ходьби та розмірі вікна $W=3$:

$$\text{Win-subtraction}_n = FD_{n+W} - FD_n = FD_{n+3} - FD_n$$

Найбільш ефективні ознаки — перша похідна величини (FD) та віднімання вікна (Win-subtraction) — передаються до модуля розрахунку та

класифікації. Комбіноване використання цих двох ознак дозволило розробити алгоритм, що досягає точності детекції місць розташування автомобілів та паркувальних просторів на рівні 98%.

Класифіковані дані, разом із відповідними координатами GPS, відправляються на хмарний сервер для подальшої агрегації, відображення та оновлення статусу паркування.

Оброблена інформація зберігається в базі даних сервера для використання водіями при надсиланні запитів.

3.3.4. Навчання та оцінка класифікаційної моделі

Даний розділ присвячений опису процедур навчання та тестування розробленої класифікаційної моделі, призначеної для диференціації між зразками даних, що відповідають транспортному засобу (клас C) або вільному паркувальному місцю (клас NC — "не автомобіль").

Зібраний масив даних було поділено на два підмножини: навчальний набір та тестовий набір. Вісімдесят відсотків (80%) усіх об'єднаних даних було використано для побудови моделі класифікації, тоді як решта двадцять відсотків (20%) застосовувалися для оцінки (валідації) її ефективності.

Під час навчання моделі розмір вікна аналізу адаптивно встановлювався на основі розрахованої швидкості ходьби пішохода. Типовий (за замовчуванням) розмір вікна, що відповідає нормальній швидкості ходьби, було визначено як три зразки.

Для кожного зразка в наборі даних було витягнуто наступний вектор ознак F:

$$F = \{Avg \text{ (величина)}, \text{ перша похідна (FD)}, \text{ (Win-sub)}, FFT2\}$$

Для класифікації витягнутих ознак F було застосовано пряму модель бінарної класифікації, представлену на рисунку 3.6. Ця модель класифікує зразки як C (автомобіль) або NC (не автомобіль) згідно з наступним правилом:

$$\text{Classify}(C, NC) = \begin{cases} C, & \text{якщо Умова 1 виконана} \\ NC, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де Умова 1 визначається як:

$$(\text{Win-sub}_{n+1} \gg \text{Win-sub}_n) \wedge ([\text{FD}_n, \text{FD}_{n+3}] > 0.1) \vee (\text{FFT}_2 > \text{Поріг}_{\text{fft}})$$

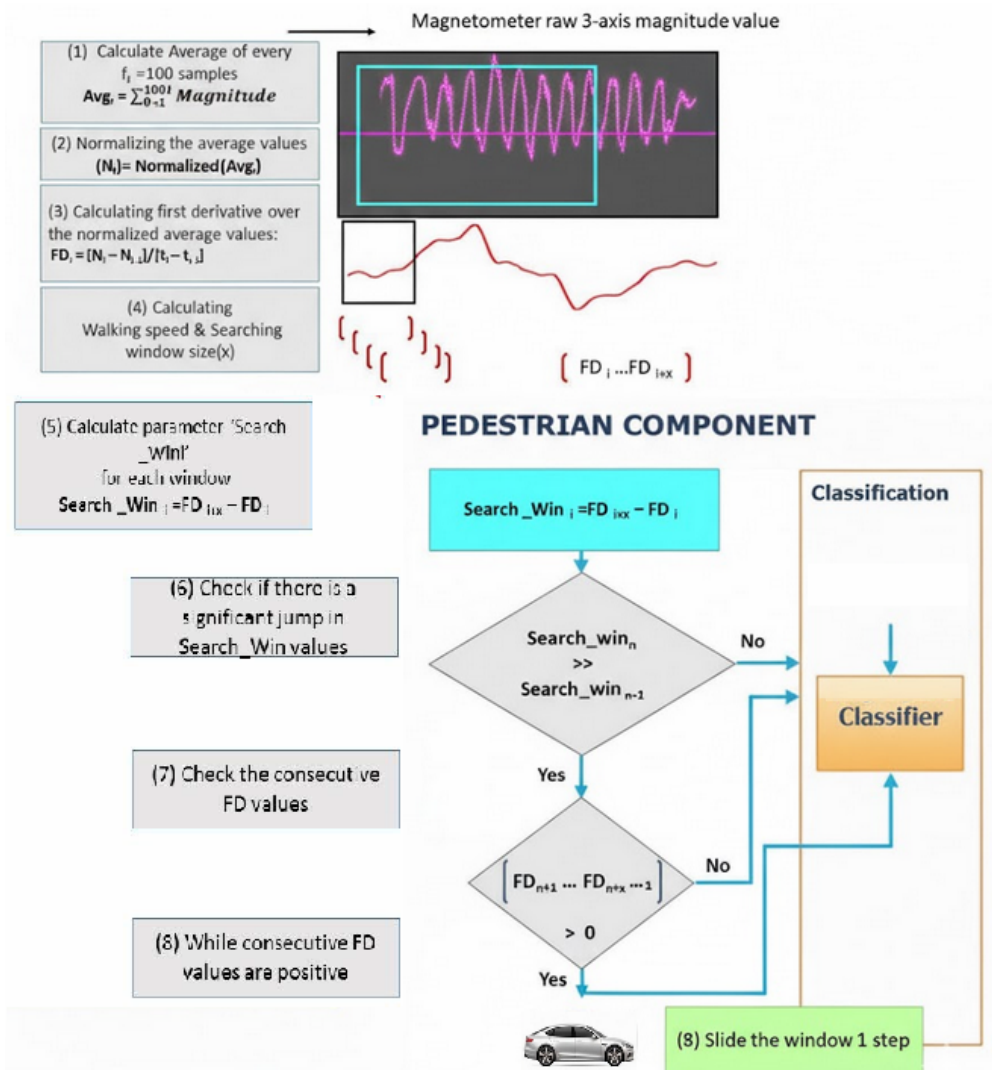


Рис. 3.6. Алгоритм класифікації

Ця модель використовує комбінацію емпірично визначених порогових значень та відношень між послідовними значеннями ключових ознак для ідентифікації наявності транспортного засобу. Розроблений прямий класифікатор продемонстрував високу ефективність, досягнувши точності виявлення паркувальних місць, що перевищує 96%.

3.3.5. Функціональність рівнів обробки та зберігання даних

Усі класифіковані дані пішоходів разом із відповідними GPS-координатами агрегуються на хмарному сервері. Дані обробляються, відображаються, зберігаються в базі даних та періодично оновлюються для забезпечення актуальності інформації, необхідної для обслуговування запитів водіїв.

Компонент водія складається з одного модуля, що дозволяє водію за допомогою GPS мобільного пристрою надсилати запит на сервер щодо найближчих доступних паркувальних місць. У відповідь система надає список локацій, позначених на карті, з можливістю вибору маршруту.

3.4. Методологія експериментальної оцінки та збору даних

Для оцінки ефективності та точності розробленої системи була застосована строга методологія збору даних та їх валідації.

В усіх експериментальних сценаріях користувачам було дозволено довільне розташування мобільного пристрою (незалежно від орієнтації). Це підтверджує інваріантність алгоритму щодо положення телефону, досягнуту використанням величини тривісного вектора магнітометра.

Для встановлення істини щодо розташування транспортних засобів, був використаний спеціалізований додаток для збору даних, оснащений функцією реєстрації часових міток. Користувачам було доручено фіксувати точний час досягнення початкової точки (голови) та кінцевої точки (хвоста) кожного автомобіля. Ці часові мітки слугували еталонними даними для визначення фактичних діапазонів зайнятих місць. Відеозапис не використовувався як основний метод встановлення істини через його недостатню точність у фіксації точних моментів проходження повз об'єкти.

Особлива увага приділялася двом ключовим проблемам класифікації:

1. Диференціація об'єктів. Необхідно було розрізняти сигнали від автомобілів та від інших металевих об'єктів (наприклад, металевих стовпів),

які можуть бути помилково класифіковані як невеликі транспортні засоби. Для збору еталонних даних у таких випадках камера використовувалася як допоміжний засіб для ідентифікації приблизних часових інтервалів проходження повз неавтомобільні об'єкти. У фінальному, комерційному додатку використання камери не передбачається.

2. Розрізнення сценаріїв паркування. Була проведена оцінка здатності системи диференціювати між двома послідовно припаркованими автомобілями та одним великогабаритним транспортним засобом (наприклад, вантажівкою або автобусом), оскільки їхня магнітометрична поведінка є суттєво різною.

Забезпечення надійності та узагальнюваності:

- Незалежність від пристрою - дані збиралися на різних мобільних пристроях для оцінки апаратної незалежності системи.

- Повторюваність та варіативність користувачів - для забезпечення точності та послідовності кожен експеримент виконувався користувачами двічі або тричі. Крім того, різні користувачі з різними звичками та швидкостями ходьби повторювали ідентичні експерименти для перевірки узагальнюваності алгоритму.

- Незалежність від місця - експерименти проводилися в широкому діапазоні локацій, включаючи паркувальні майданчики, приватні та завантажені вулиці, а також зони без присутності транспортних засобів.

- Калібрування сенсорів - для мінімізації впливу помилок датчика та магнітних спотворень користувачам було необхідно провести калібрування магнітометра шляхом обертання пристрою навколо трьох осей перед початком збору даних.

Сценарій 1. Поведінка магнітометра за відсутності транспортних засобів.

Мета першого експерименту полягала у підтвердженні того, що значні зміни магнітометричного поля (рис. 3.7) корелюють саме з наявністю автомобілів.

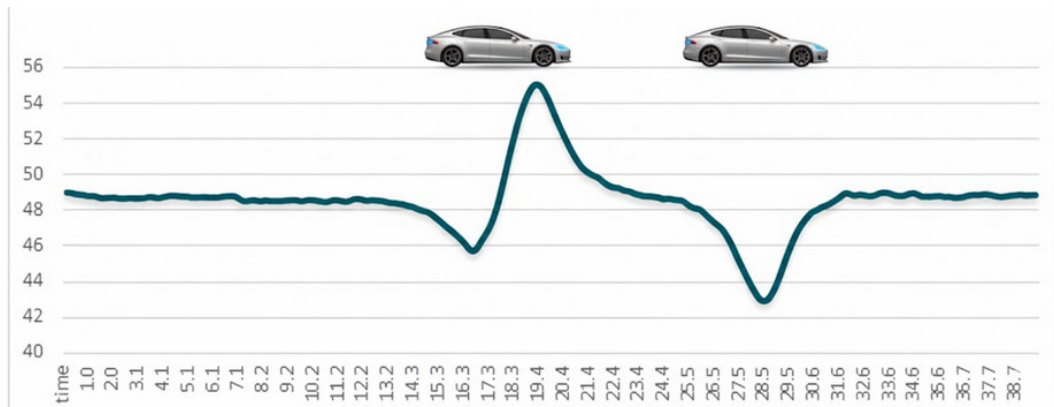


Рис. 3.7. Зміна показників магнітометра під час проходження повз два автомобілі з одним паркувальним місцем між ними

Збір даних проводився в зоні, вільній від припаркованих транспортних засобів, під час прямолінійного руху користувачів. Додатковий тест було проведено на торговій вулиці без зони паркування на узбіччі.

Представлення результатів. На рисунках. 3.8 (без транспортних засобів) та 3.9 (без зони паркування попереду) продемонстровано, що величина сирого тривісного магнітометра залишається відносно стабільною в обох сценаріях. Хоча абсолютне базове значення на торговій вулиці було вищим, що пояснюється впливом стаціонарних металевих конструкцій (магазини, металеві смуги), варіативність залишалася низькою.

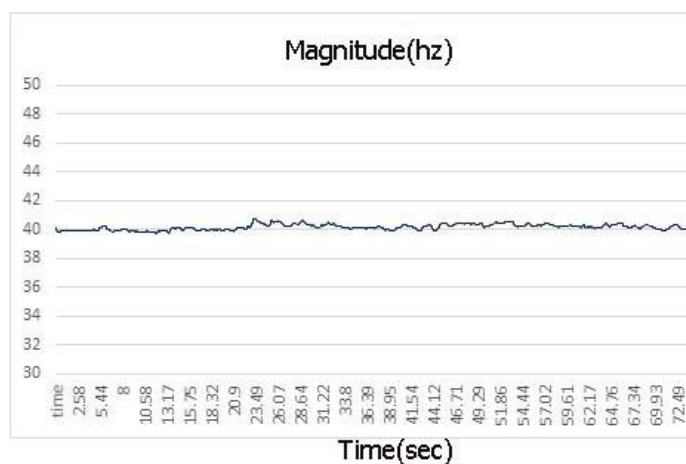


Рис. 3.8. Зміна показників магнітометра під час руху на території за відсутності автомобілів

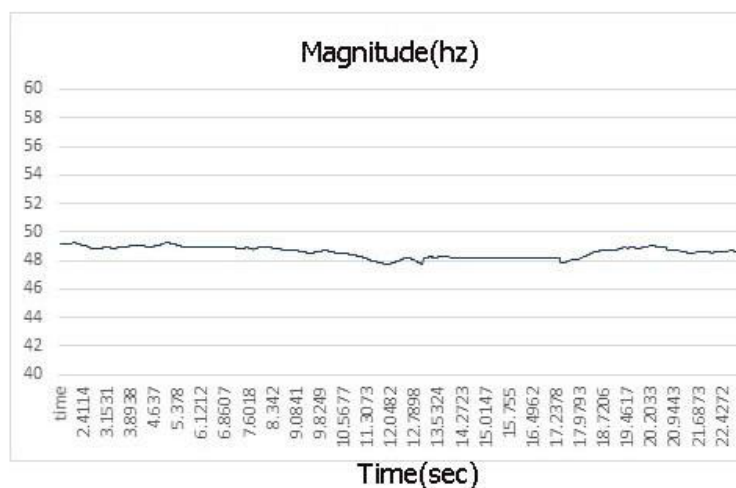


Рис. 3.9. Зміна показників магнітометра під час руху у зоні без зони паркування попереду.

Експеримент підтвердив, що транспортні засоби, які проїжджають по вулиці, не мають значного впливу на детекцію. Це пов'язано з оберненою залежністю між зміною магнітометричного поля та відстанню: зі збільшенням відстані між мобільним пристроєм (на тротуарі) та рухомими автомобілями вплив на сенсор мінімізується.

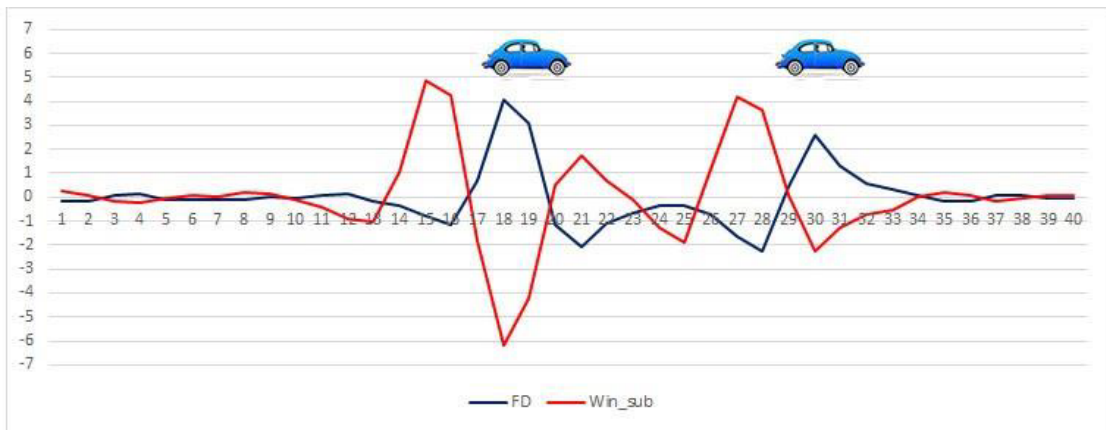
Сценарій 2. Дискримінація послідовних та великогабаритних транспортних засобів

Мета цього експерименту полягала у верифікації здатності системи розрізнити сигнали від кількох послідовних автомобілів та від одного великого транспортного засобу (наприклад, вантажівки або автобуса). Тестування проводилося за трьома основними сценаріями:

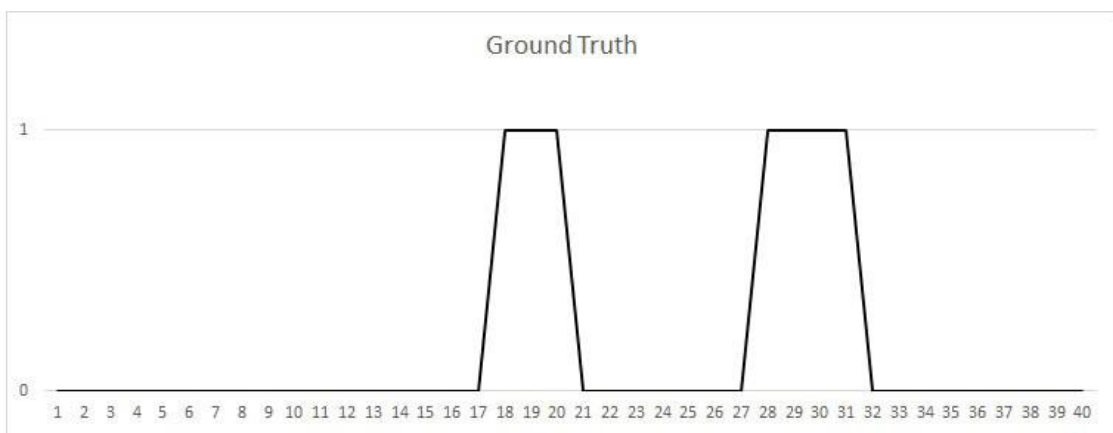
А. Автомобіль – паркомісце – автомобіль

Рисунок 3.10 (а) показує поведінку першої похідної величини (First Derivative) та розрахованого значення Віднімання Вікна (Win-sub). Чітко ідентифікуються два окремі піки, що відповідають проходженню повз кожен автомобіль.

Рисунок 3.10 (б) містить відповідну істину, де одиниці позначають діапазон присутності автомобілів.

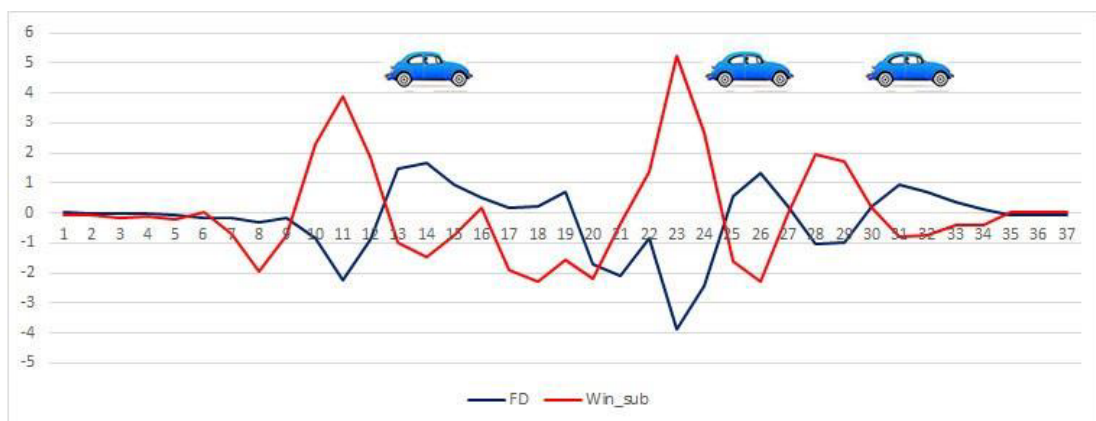


а)

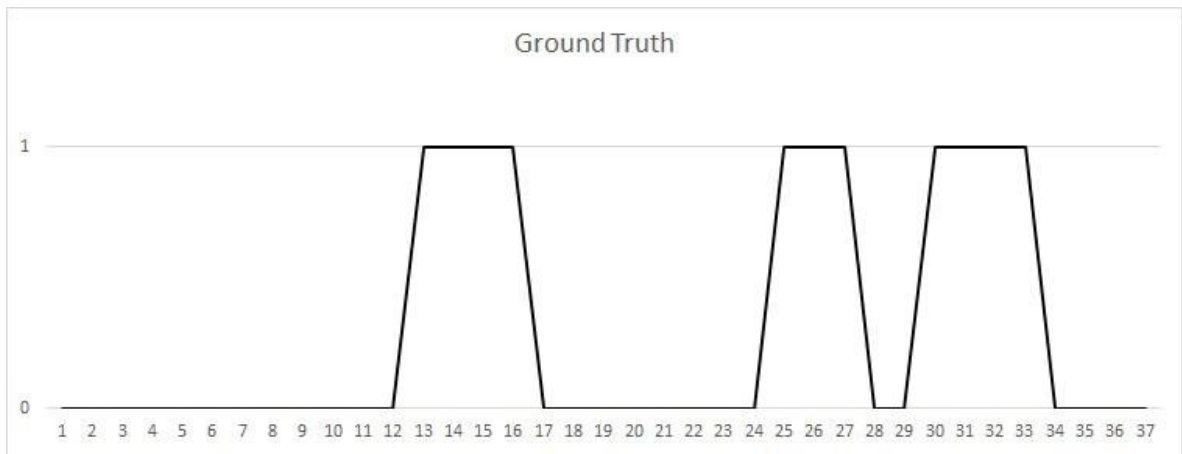


б)

Рис. 3.10. а) Зміна показників First Derivative та Win Subtraction величини магнітометра під час проходження повз два автомобілі з одним паркувальним місцем між ними. б) Відповідна еталонна істина (Ground Truth).



а)

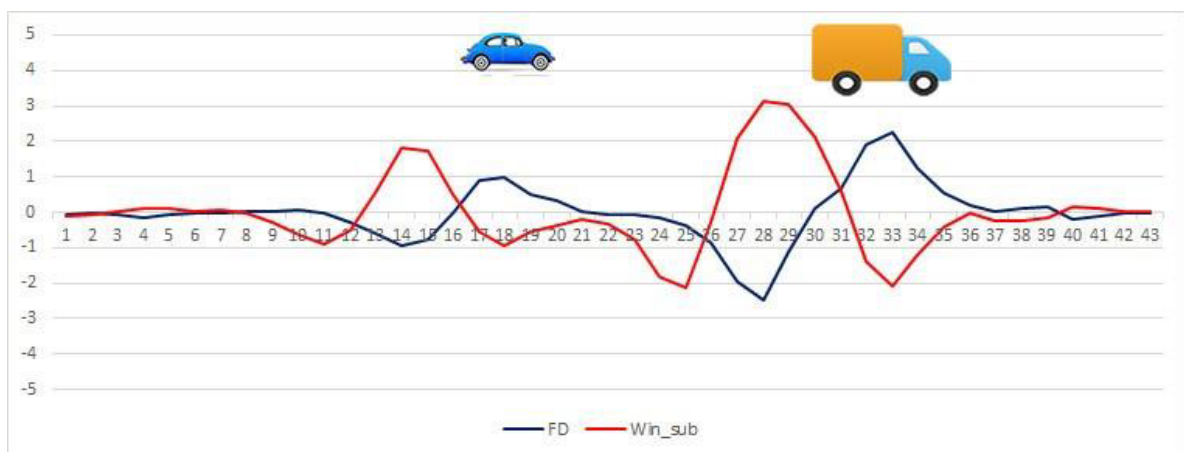


б)

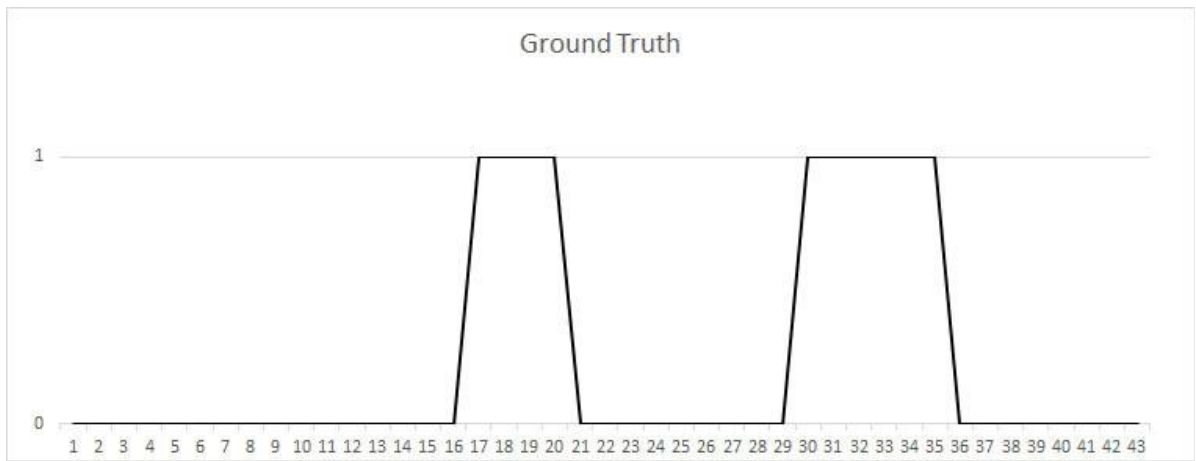
Рис. 3.11. а) Зміна показників First Derivative та Win Subtraction величини магнітометра під час проходження повз три послідовні автомобілі з одним паркувальним місцем між ними. б) Відповідна еталонна істина (Ground Truth)

Б. Автомобіль – автомобіль – паркомісце – автомобіль

Цей сценарій порівнює поведінку магнітометра при проходженні повз два послідовно припарковані автомобілі (без проміжку) та один автомобіль. Як показано на рис. 3.11 а), два послідовні автомобілі чітко виявляються окремо, що відображено двома близькими піками на графіку Win-sub (синя лінія) та наступним різким збільшенням FD (червона лінія). Рис. 3.11 б) надає відповідну істину.



а)



б)

Рис. 3.12. а) Зміна показників First Derivative та Win Subtraction величини магнітометра під час проходження повз автомобіль і вантажівку з паркувальним місцем між ними. б) Відповідна еталонна істина

В. Вантажівка – Паркомісце – Автомобіль

Метою цього сценарію було розрізнення сигналу від великого транспортного засобу (вантажівка/автобус) від сигналу послідовних легкових автомобілів. Рис. 3.12 (а) ілюструє поведінку FD та Win-sub при проходженні повз автомобіль, паркомісце та вантажівку.

Система не лише успішно розрізняє великий транспортний засіб від послідовних легкових автомобілів, але й алгоритм дозволяє вимірювати відповідну довжину об'єкта. Крім того, амплітуда піків на графіку Win-sub для вантажівки є вищою порівняно з піками для легкових автомобілів. Ця особливість може бути потенційно використана в майбутніх роботах для класифікації розмірів та типів транспортних засобів.

Таблиці 3.1, 3.2 надають деталізацію детекції, виконаної класифікаційною моделлю у цих трьох сценаріях. Наприклад, у Таблиці 3.1, значення Win-sub різко зростають до великих позитивних значень ("Межа виявлення") при наближенні до автомобіля (комірки з синім фоном). Після досягнення цього піку, алгоритм перевіряє значення FD та FFT2 протягом

встановленої довжини вікна. Позитивні значення FD протягом цього діапазону підтверджують наявність автомобіля.

Таблиця 3.1.

Проходження повз два автомобілі з одним паркувальним місцем між ними

Середнє (Avg(Mag))	Перша Похідна (FD)	Віднімання вікна (Win_Sub)	FFT2	Еталон (GT)	Результати
49.0587	-0.1539	0.2806	2.2211	0	n
48.9048	-0.1829	0.0885	2.1827	0	n
48.7219	0.0829	-0.1610	2.1743	0	n
48.8049	0.1268	-0.2088	2.1711	0	n
48.9317	-0.0944	-0.0272	2.2109	0	n
48.8373	-0.0780	0.0662	2.1680	0	n
48.7593	-0.0820	0.0354	2.1830	0	n
48.6772	-0.1215	0.1877	2.1643	0	n
48.5557	-0.0119	0.1270	2.1475	0	n
48.5438	-0.0467	-0.1220	2.1597	0	n
48.4972	0.0662	-0.4357	2.1381	0	n
48.5633	0.1151	-0.9083	2.1544	0	n
48.6785	-0.1687	-1.0053	2.1660	0	n
48.5098	-0.3695	1.0603	2.1426	0	n
48.1403	-0.7932	4.8835	2.1098	0	n
47.3471	-1.1740	4.2794	2.0210	0	n
46.1731	0.6907	-1.8141	1.9012	0	c
46.8638	4.0904	-6.1912	2.4628	1	c
50.9542	3.1054	-4.1947	3.0790	1	c
54.0596	-1.1234	0.4925	3.3100	1	n
52.9362	-2.1008	1.7410	2.6619	0	n
50.8354	-1.0892	0.7207	2.3962	0	n
49.7462	-0.6309	-0.0771	2.2704	0	n
49.1153	-0.3598	-1.2544	2.2061	0	n
48.7556	-0.3686	-1.9081	2.1837	0	n

Позначення в таблиці:

Avg(Mag) - Середнє значення величини магнітометра.

FD (Перша Похідна) - Швидкість зміни величини магнітометра.

Win_Sub (Віднімання Вікна) - Різниця FD на початку та в кінці вікна.

FFT2 - Друга компонента івидкого перетворення Фур'є.

GT (Еталон): Істина (1 = автомобіль, 0 = не автомобіль/паркувальне місце).

Results: Результат класифікатора (с = автомобіль, n = не автомобіль).

Таблиця 3.2.

Проходження повз три автомобілі з одним паркувальним місцем між ними

Середнє (Avg(Mag))	Перша Похідна (FD)	Віднімання вікна (Win_Sub)	FFT2	Еталон (GT)	Результати
48.9314	0.0457	-0.0753	2.6939	0	n
48.9770	-0.0131	-0.0592	2.7117	0	n
48.9639	-0.0279	-0.1397	2.7489	0	n
48.9360	-0.0297	-0.1168	2.7077	0	n
48.9063	-0.0724	-0.2249	2.6929	0	n
48.8339	-0.1676	0.0068	2.7036	0	n
48.6663	-0.1465	-0.6737	2.6721	0	n
48.5199	-0.2972	-1.9371	2.6717	0	n
48.2226	-0.1608	-0.7389	2.6228	0	n
48.0619	-0.8201	2.3177	2.5433	0	n
47.2417	-2.2344	3.8875	2.5677	0	n
45.0074	-0.8997	1.8543	2.1384	0	n
44.1077	1.4976	-0.9646	2.0595	1	c
45.6053	1.6531	-1.4760	2.2589	1	c
47.2584	0.9546	-0.7312	2.5571	1	c
48.2130	0.5330	0.1521	2.5948	1	c
48.7459	0.1771	-1.8781	2.6738	0	n
48.9230	0.2234	-2.3034	2.6964	0	n
49.1464	0.6851	-1.5403	2.7016	0	n
49.8315	-1.7010	-2.1974	2.7930	0	n
51.5319	-2.0800	-0.3674	3.0351	0	n
53.5500	-0.8552	1.4017	3.4316	0	n
52.6948	-3.8984	5.2134	3.3699	0	n
48.7965	-2.4474	2.6874	2.5412	0	n
46.3491	0.5465	-1.6003	2.2846	1	c
46.8956	1.3150	-2.3069	2.4810	1	c
48.2106	0.2400	-0.0404	2.5989	1	c
48.4506	-1.0538	1.9805	2.6923	0	n
47.3968	-0.9918	1.6950	2.4727	0	n
46.4049	0.1996	0.1613	2.3501	1	c
46.6045	0.9267	-0.7889	2.3822	1	c
47.5313	0.7032	-0.7563	2.5095	1	c

Сценарій 3. Виявлення стаціонарних металевих об'єктів (стовпів)

Мета цього експерименту полягала у демонстрації здатності системи до дискримінації між транспортним засобом та невеликими стаціонарними металевими об'єктами, такими як електричні стовпи.

На рис. 3.13 проілюстровано виявлення стовпа (наприклад, у рядку №57). Таблиця 3.3 демонструє, що стовп ідентифікується як один рядок зразка (дуже короткий діапазон). Для підтвердження цієї істини використовувався записаний відеоматеріал. Таким чином, якщо система класифікує об'єкт, що займає лише один рядок зразка (або дуже невеликий діапазон), він ігнорується системою, оскільки це свідчить про наявність невеликого металевого об'єкта, а не транспортного засобу.



Рис. 3.13. Зміна показників магнітометра під час проходження повз автомобілі та електричні стовпи

Таблиця 3.3.

Проходження повз два автомобілі з одним паркувальним місцем між ними

Середнє (Avg(Mag))	Перша Похідна (FD)	Віднімання вікна (Win_Sub)	FFT2	Еталон (GT)	Результати
46.7682313	-1.963793424	2.06343135	2.935350751	0	n
44.804437	-2.489141527	3.154889176	2.696532245	0	n
42.31529635	-1.123448453	3.027878654	2.345485754	0	n
41.19184789	0.099637926	2.136493019	2.257551644	1	n
41.29148582	0.665747649	0.57255968	2.281155955	1	c
41.95723347	1.904430201	-1.376638049	2.305012224	1	c
43.86166367	2.236130945	-2.060822382	2.606422896	1	c
46.09779462	1.238307329	-1.202115486	2.858238318	1	c

47.33610194	0.527792151	-0.401065733	2.995262008	1	c
47.8638941	0.175308563	-0.040067386	3.069325192	0	n
48.03920266	0.036191843	-0.229029903	3.074683671	0	n
48.0753945	0.126726418	-0.236459464	3.075139221	0	n
48.20212092	0.135241177	-0.16873235	3.104006601	0	n
48.3373621	-0.19283806	0.109733046	3.116946922	0	n
48.14452404	-0.109733046	0.109733046	3.095782662	0	n
48.03479099	-0.033432058	0.033432058	3.076941555	0	n
48.00135893	-0.033432058	0.033432058	3.052888678	0	n
47.96792687	0.126726418	-0.236459464	3.116946922	0	n

Рядки, виділені зеленим (GT=1 та Results=c), підтверджують успішну детекцію автомобіля (рядки 5-9). Високі позитивні значення у стовпці Win_Sub, зокрема 3.154889176, 3.027878654, 2.136493019, слугують "Межею виявлення", сигналізуючи про різкий вхід у зону магнітного впливу об'єкта.

Після високих значень Win_Sub, алгоритм переходить до перевірки FD, яка у зоні детекції автомобіля набуває позитивних значень (0.665747649 до 2.236130945), підтверджуючи наявність транспортного засобу.

3.5. Висновки щодо проведених експериментів

У даному розділі були представлені та проаналізовані результати емпіричних досліджень. Початкові експерименти підтвердили, що варіації магнітометричного поля корелюють виключно з присутністю транспортних засобів, а не з впливом стаціонарних металевих об'єктів, які використовуються у будівництві споруд (наприклад, металевих смуг).

Для забезпечення узагальнюваності системи було проведено серію експериментів з різними користувачами та різними мобільними пристроями в одній локації, а також у різних місцях. Збір еталонних даних (ground truth) здійснювався за умови, що користувачі тримали мобільний телефон у довільній орієнтації, що підкреслює незалежність системи від орієнтації пристрою.

Система була протестована на точність виявлення послідовних автомобілів окремо та на здатність розрізняти великогабаритні та малогабаритні транспортні засоби. Отримані результати свідчать про те, що система демонструє високий рівень точності в усіх тестових сценаріях, незалежно від індивідуальних особливостей користувачів та моделі їхніх мобільних пристроїв.

Отже, було успішно оцінено технічну доцільність використання датчика магнітометра смартфона для детекції вуличних паркувальних місць. Запропонована архітектура базується на використанні мобільних телефонів пішоходів під час їхнього руху тротуаром, при цьому обчислювальний процес розподілений між мобільним клієнтом та хмарним сервером.

Ключовою перевагою є його незалежність від орієнтації мобільного пристрою: користувачі можуть тримати смартфон у будь-якому положенні (рука, кишеня, сумка). Експериментальна оцінка підтвердила, що цей підхід є життєздатним і перспективним.

Незважаючи на успішну реалізацію, використання магнітометра для виявлення транспортних засобів має низку притаманних викликів:

- Датчик реєструє не лише магнітне поле Землі, що призводить до неминучих помилкових оцінок. Повторне калібрування є критично необхідним при кожному запуску програми, оскільки невідкалібрований сенсор знижує точність системи.

- Вплив сторонніх джерел:

- Транспортні засоби, що проїжджають по вулиці, можуть впливати на магнітний датчик.

- Інші металеві об'єкти.

- Варіація сигналу обернено пропорційна відстані між пішоходом та автомобілем. Найвища точність досягається, коли відстань від пішохода до узбіччя не перевищує 1–1.5 метра.

Незважаючи на зазначені обмеження та виклики, система успішно використовує економічно ефективні та широкодоступні мобільні датчики для

точної диференціації між вільними та зайнятими паркувальними місцями. Комплексна оцінка, проведена в різних сценаріях з урахуванням варіативності користувачів та їхньої швидкості ходьби, показала, що точність системи перевищує 98% майже в усіх тестованих умовах.

Висновки до розділу

У третьому розділі розроблено архітектуру системи сенсорно базованої локації транспортних засобів, що реалізує три ключові рівні — збір, обробку та відображення даних. Створено детальну модель обміну інформацією між компонентами системи, що забезпечує безперервність отримання даних від сенсорів, їх фільтрацію, нормалізацію та подальше використання в алгоритмах класифікації.

Розроблено алгоритми збору й обробки сенсорних даних, які дозволяють визначати швидкість руху, напрямок, а також стан транспортного засобу — “рух”, “зупинка” або “паркування”. Запропоновано методи видобування ознак для машинного навчання, проведено експериментальне навчання класифікаційних моделей та оцінку їх ефективності. Результати експериментів підтвердили доцільність використання мобільних сенсорів для виявлення подій паркування, забезпечивши прийнятний рівень точності при мінімальних обчислювальних витратах.

Отримані результати демонструють можливість побудови гнучкої системи сенсорно базованої локації, здатної до адаптації в умовах змін навколишнього середовища. Запропонована архітектура може бути інтегрована у ширші системи “розумного міста”, а методологічні підходи, розроблені в роботі, мають потенціал для подальшого застосування у задачах транспортної аналітики, навігації та управління міською мобільністю.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено науково-прикладну задачу розроблення моделей і методів сенсорно базованої локації транспортних засобів із використанням мобільних пристроїв, що дало змогу запропонувати ефективне рішення проблеми моніторингу паркування та руху автомобілів у межах міських територій. На основі проведеного аналізу, теоретичних узагальнень та практичної реалізації було сформовано комплексну методологію побудови системи, здатної використовувати дані з вбудованих сенсорів для визначення просторово-часових характеристик транспортного засобу.

У першому розділі досліджено сучасний стан предметної області сенсорно базованої локації, проаналізовано ключові проблеми урбаністичного середовища, пов'язані з неефективним використанням паркувального простору та зростанням транспортного навантаження. Визначено, що пошук вільних місць для паркування суттєво впливає на рівень заторів, споживання палива й екологічну ситуацію у містах. Встановлено, що мобільні сенсори можуть виступати доступною альтернативою дорогим інфраструктурним рішенням, забезпечуючи можливість реалізації систем збору даних без додаткового обладнання. Проаналізовано технічні можливості сенсорів платформи Android, їхню функціональність, точність, енергоспоживання та перспективи застосування в задачах детекції транспортних засобів.

У другому розділі проведено аналіз і класифікацію існуючих технологій інтелектуального паркування — RFID, ультразвукових, оптичних, радіочастотних та мережевих рішень. Виконано порівняльну характеристику їх переваг і недоліків, що дозволило виявити обмеження, пов'язані з високою вартістю, складністю обслуговування та залежністю від інфраструктури. Запропоновано використання мобільних магнітометрів як базового елемента сенсорної системи, що здатен виявляти магнітні спотворення, спричинені

транспортними засобами. Такий підхід дає змогу реалізувати економічно ефективну модель визначення стану транспортного засобу (рух/зупинка/паркування) без необхідності зовнішніх сенсорних вузлів. Зроблено висновок, що поєднання сенсорних даних із методами машинного навчання створює основу для інтелектуального аналізу поведінкових патернів транспортних засобів і підвищує точність локаційних рішень.

У третьому розділі розроблено архітектурну модель системи сенсорно базованої локації транспортних засобів, що складається з трьох функціональних рівнів: збору даних, їх обробки та відображення. Описано алгоритми обробки сенсорної інформації, фільтрації шумів, видобування ознак і побудови класифікаційної моделі, здатної визначати стан транспортного засобу в реальному часі. Проведено експериментальні дослідження, результати яких підтвердили ефективність запропонованих методів — отримано стабільні показники точності класифікації при низькому рівні обчислювальних витрат. Запропоновану систему можна масштабувати для реалізації інтелектуальних сервісів міської мобільності, інтегрованих із концепцією “розумного міста”.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування запропонованих рішень для розроблення систем моніторингу паркування, оптимізації транспортних потоків та підвищення ефективності міського управління. Проведене дослідження підтвердило перспективність використання мобільних сенсорів як інструменту побудови дешевих, масштабованих і гнучких систем локації транспортних засобів. Результати роботи можуть бути використані у подальших наукових розробках, спрямованих на удосконалення алгоритмів аналізу сенсорних даних, інтеграцію з системами навігації, а також для створення інтелектуальних платформ міського моніторингу, орієнтованих на підвищення комфорту та безпеки транспортного середовища.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. L. Lou, J. Zhang, Y. Xiong and Y. Jin, “An Improved Roadside Parking Space Occupancy Detection Method Based on Magnetic Sensors and Wireless Signal Strength,” *Sensors*, vol. 19, no. 10, art. 2348, May 2019. doi:10.3390/s19102348.
2. P. Sarcevic, S. Pletl and Á. Odry, “Real-Time Vehicle Classification System Using a Single Magnetometer,” *Sensors*, vol. 22, no. 23, art. 9299, Nov. 2022. doi:10.3390/s22239299.
3. A. Floris, R. Girau, S. Porcu and G. Pettorru, “Implementation of a Magnetometer-based Vehicle Detection System for Smart Parking Applications,” in *Proc. 2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Sept. 2020, pp. 1–7. doi:10.1109/ISC251055.2020.9239005.
4. F. Al-Turjman, “Smart parking in IoT-enabled cities: A survey,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 54, art. 101973, Jul. 2020.
5. A. Fahim, et al., “Smart parking systems: comprehensive review based on technologies and sensors,” *Sustainable Cities and Society*, 2021
6. Z. Zhang, H. Yuan and L. Chen, “A Parking Vehicle Detection Algorithm Using Magnetic Sensor,” *Applied Mechanics and Materials*, vols. 409–410, pp. 1353–1356, 2013.
7. V. Fúra, V. Petrucha and A. Platil, “Construction of an AMR Magnetometer for Car Detection Experiments,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 108, 012028, 2016.
8. X. Zhu, et al., “Research on Vehicle Localization Based on Multiple Sensors Fusion System,” *Int. J. Adv. Netw., Monit. and Controls*, vol. 2, no. 4, pp. 186–189, Jan. 2017.
9. “Detection of vehicle tracks by a three-axis magnetometer,” (conference / technical report), 2018–2019

- 10.B. Koszteczyk and G. Simon, "Magnetic-based Vehicle Detection with Sensor Networks," in Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013.
11. "Smart Parking Systems: Reviewing the Literature" — C. Biyik, Smart Cities (MDPI / review), 2021.
12. "Smart parking systems: A comprehensive review of digitalization of parking services," S. S. Channamallu, S. Kermanshachi, J. M. Rosenberger, A. Pamidimukkala, Green Energy & Intelligent Transportation, preprint. DOI: 10.1016/j.geits.2025.100293.
13. "Long-term vehicle localization in urban environments based on pole landmarks extracted from 3-D LiDAR scans," Robotics and Autonomous Systems, vol. 136, 103709, Feb. 2021.
14. "Towards Autonomous Driving: Technologies and Data for..." — V. Ušinskis et al., review (2024)
15. "GPS-IMU Sensor Fusion for Reliable Autonomous Vehicle Position Estimation," (survey / arXiv technical report), 2023–2024
16. "BLE RSSI datasets and methods for vehicular localization and toll collection applications," dataset & methods paper (2024–2025)
- 17.V. Capuano et al., "Smartphone MEMS Accelerometer and Gyroscope: laboratory tests and error characterization," Scientific Reports / sensors review (2023)
18. "Location Tracking Using Smartphone Accelerometer and Magnetometer Traces" — conference paper / framework describing IMU+magnetometer approaches to passive route sensing with phones (2018–2019).
19. "An Improved Vehicle Detection Method Based on Combined Magnetic and RSS Features," (conference/journal paper), 2019
20. "Vehicle detection system using ultrasonic and magnetic field sensors based on LoRa communication," F. Afrizal and B. N. Prastowo, Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems (conference/journal), 2020.

21. "Distributed WSN for parking occupancy monitoring using magnetic sensors," conference paper / WSN deployment reports (2016–2020)
22. "Practical considerations for smartphone-based vehicle detection: sampling, orientation and calibration," (conference paper), 2019–2022
23. "In-vehicle localization based on multi-channel Bluetooth Low Energy RSSI," Gao Yuan et al., *Sensors / IEEE* (2020).
24. "Real-time localization solution for land vehicle application using low-cost integrated sensors with GPS," A. Eldesoky et al., *Journal of Applied Research and Technology*
25. "SenseMag: Enabling Low-Cost Traffic Monitoring using Non-invasive Magnetic Sensing," (preprint / conference), 2021
26. "Magnetometer sensor networks for vehicle trajectory monitoring," (journal article), 2024–2025
27. "Vehicle Localization: Performance Analysis and Challenges — A Survey," survey paper (2022–2023)
28. "BLE-based Indoor Localization: Analysis of Some RSSI-based Methods," *Sensors*, vol. 24, no. 2, art. 376, 2024.
29. "An electronic toll collection gateway BLE RSSI dataset for vehicle localization," A. Gil-Martínez et al., *Scientific Data*, 2025.
30. "Smartphone sensor datasets for road safety and driving behaviour analysis," Khandakar A., et al., *Scientific Data / Nature* (2025)
31. "RFID-based Smart Parking Systems: Implementation and Evaluation," *IJERT / IJAER* articles, 2018–2022
32. "Inertial sensor error models and compensation for smartphone IMUs," technical article / journal (2023)
33. "Explainable RSSI-based localization for BLE devices," *Journal of Network and Computer Applications*, 2023
34. "Implementation and evaluation of a magnetometer-based smart parking pilot," (case study / conference), 2021

35. "Automated parking detection with geomagnetic sensors: algorithmic approaches and field validation," (conference paper), 2020–2022.
36. "A Distributed Magnetic Sensor Network: Vehicle Trajectory Association and Monitoring," (journal / Hindawi), 2025
37. "Toward scalable smartphone-based traffic monitoring: datasets, methods and case studies," 2024–2025