

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Бакалавр

Освітній рівень

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему IoT - система керування автомобілем

КПТР.020057.01.07 ПЗ

Виконав:

студент 3 курсу, група ТР2с-20-1


підпис

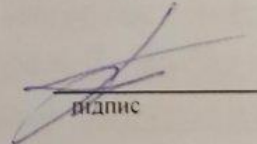
В.О.Племянік
Ініціали, прізвище

Керівник: канд. техн. наук, доц.


підпис

В.С.Петрушак
Ініціали, прізвище

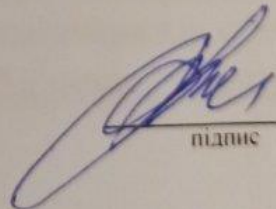
Нормоконтроль


підпис

О.С.Павлов
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.


підпис

С.К.Підченко
Ініціали, прізвище

2 06 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ТМІТ

Олена Нігеміа С.К.

Підпис: дата

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ**

Племяніку Вячеславу Олександровичу

(Прізвище, ім'я, по батькові студента)

1 Тема проекту: IoT - система керування автомийкою

керівник проекту Петрушак Володимир Степанович, к.т.н., доцент

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

Затверджено наказом ректора університету від «8» березня 2023р. № 5.

2 Строк подання здобувачем проекту на кафедру: 01.06.2023р.


3 Вихідні дані до проекту Ескіз схеми електричної принципової

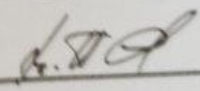
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Огляд літературних джерел. 2. Вибір і техніко-економічне обґрунтування структури IoT - системи керування авто мийкою. 3. Розробка і розрахунок блоків принципової схеми IoT - системи керування авто мийкою. 4. Розробка алгоритму роботи і програмного забезпечення IoT - система керування автомийкою

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)



1. Схеми електрична структурна. 2. Схеми електрична принципова.

3. Алгоритм.

Завдання отримав 

Науковий керівник 

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вступ. Аналітичний огляд літературних джерел по темі кваліфікаційного проєкту	20.03.23	Вик. 
2	Вибір і обґрунтування структурної схеми пристрою	15.04.23	Вик. 
3	Розрахунок системи позиціонування за стандартом IEEE 802.11az	30.04.23	Вик. 
4	Висновки. Підготовка презентаційних матеріалів за результатами виконання кваліфікаційного проєкту.	20.05.2023	Вик. 

Здобувач

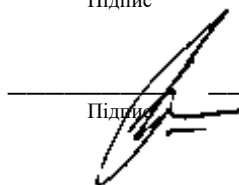


М.В. Крижовий

Підпис

Ініціали, прізвище

Керівник проєкту



Ю.М. Бойко

Підпис

Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту: «Пристрій позиціонування Wi-Fi».

Автор роботи: Крижовий Максим Володимирович

Керівник роботи: доктор техн., проф. Бойко Юлій Миколайович

Пояснювальна записка: 74 сторінки, 25 рисунків, 16 джерел.

Графічна частина: 3 креслень, 12 презентаційних слайдів

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Wi-Fi ПОЗИЦІЮВАННЯ, ТРИЛАТЕРАЦІЯ, АЛГОРИТМ МНОЖИННОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ СИГНАЛІВ (MUSIC), МАТРИЦЯ КОРЕЛЯЦІЇ, ПРОФІЛЬ ЗАТРИМКИ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

Метою кваліфікаційного проекту є дослідження принципів побудови, розрахунки і моделювання пристрою позиціонування Wi-Fi.

Розглянуто технології і принципи визначення місця знаходження абонента. Досліджено алгоритм оцінки часу прибуття за допомогою множинної класифікації сигналів (MUSIC), виконана оцінка діапазону відстаней. Проведена імітація мережі, що складається з мобільної станції та кількох точок доступу. Проведений аналіз вхідних і вихідних сигналів каналу зв'язку між мобільною станцією і точкою доступу, отриманий профіль затримки каналу. Виконано ранжування і позиціонування мобільної станції для кількох ітерацій і відношень сигнал-шум. Проведена трилатерація місця знаходження мобільної станції. Проведений розрахунок помилок визначення місця розташування від відношення сигнал-шум, кількості повторень довгого тренувального поля, кількості просторових потоків.

М. В. Крижовий

Ініціали, прізвище здобувача



22.05.23

Підпис, Дата

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Аналітичний огляд літературних джерел по темі кваліфікаційного проекту.	8
1.1 Геопозиціонування за допомогою Wi-Fi.....	8
1.2 Метод позиціонування за точкою доступу	13
1.3 Стандарт 802.11.....	17
1.4 Реалізація та тестування системи позиціонування в мережах Wi-Fi.....	20
1.5 Сфери застосування геопозиціювання на допомогою Wi-Fi	23
Висновки до першого розділу.....	25
2 Вибір і обґрунтування структурної схеми пристрою.....	26
2.1 Методи надвисокої роздільної здатності.....	26
2.2 Методи спектральних оцінок.....	28
2.3 Проблеми практичної реалізації	32
2.4 Оцінка матриці кореляції з обмеженими даними вимірювань.....	34
2.5 Метод власних векторів.....	38
Висновки до другого розділу.....	45
3 Розрахунок системи позиціонування за стандартом IEEE 802.11az.....	46
3.1 Позиціонування на основі оцінки часу прибуття	46
3.2 Визначення діапазону відстаней.....	48
3.3 Визначення помилок позиціонування.....	53
3.4 Технологія Wi-Fi позиціонування.....	61
Висновки до третього розділу.....	69
Висновки.....	70
Перелік джерел посилання.....	71

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ			
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Пристрій позиціонування Wi-Fi Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив	КрижовийМ.						5	
Перевірив	БойкоЮМ.							
Н. контр.	Стецюк В.І.							
Затв.	Підченко С.К							ХНУ, гр. ТР2с-20-1

ВСТУП

З появою нових додатків, таких як виявлення присутності, розпізнавання активності, локалізація та відстеження місця знаходження людей, тривимірний зір та охорона здоров'я – необхідно розширювати функції локальних та персональних бездротових технологій. Крім того, точне позиціонування також є важливим для обробної промисловості, щоб гарантувати правильну роботу машин, роботів та обладнання; отже, запобігання нещасним випадкам і скорочення часу простою.

Позиціонування - це проблема прогнозування, в якій місце розташування мобільної станції є кінцевим результатом. Однак позиціонування може передбачити точне розташування користувача в порівнянні з локалізацією; він може мати велику помилку для позицій у всьому регіоні. Кінцевим завданням локалізації є оцінена мітка моделі для місця на карті, де знаходиться мобільна станція. Здатність точно оцінити загальне розташування користувача більш важлива, ніж можливість точно визначити його місцезнаходження для таких дій, як пошук спальні в кімнаті в магазині або на поверсі будівлі. Стандарт Wi-Fi, IEEE 802.11az виначається як наступне покоління позиціонування (NPG), що забезпечує характеристики фізичного рівня, які дозволяють позиціонувати та покращувати дальність з використанням класичних методів. Класичні методи залежать від умов прямої видимості (LOS) для успішного отримання послідовної інформації, такої як кут приходу (AoA), просторова інформація або час приходу (ToA) з багатопроменими сигналами для розрахунку дальності або відстані між вузлами мережі. Коли є можливість виміряти дальність серед трьох пристроїв, можна використовувати трилатерацію для розрахунку оцінок розташування.

Системи глибокого навчання та зняття відбитків пальців використовуються для методів локалізації Wi-Fi для отримання точності менше метра, включаючи середовища з багатопроменим поширенням поза прямою видимістю.

Зняття відбитків зазвичай включає інформацію про стан каналу (CSI), таку як оцінки каналу або індикатори рівня сигналу (RSSI) з отриманих сигналів,

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		6

виміряних у навколишньому середовищі або в певному місці [5]. На етапі навчання мережі цей метод генерує набір даних шляхом вибірки відбитків каналів середовища у численних ідентифікованих місцях. Оцінки розташування користувачів у мережі базуються на отриманих сигналах невідомих положень і спираються на довідкову базу даних.

Важливо створити набір даних про відбитки імпульсних відгуків каналу (CIR) у приміщенні на основі сигналів 802.11az і помітити всі відбитки за даними їх розташування. Ці набори даних навчаються за допомогою згорткової нейронної мережі з глибоким навчанням (CNN) для оцінки положення STA на основі частини набору даних для відбитків пальців. Продуктивність навченої моделі оцінюється шляхом створення оцінок для мобільної станції розташування відповідно до їх залишкових відбитків CIR в наборі даних.

Таким чином, дослідження принципів і технологій позиціонування у середовищі Matlab є актуальним завданням.

Метою кваліфікаційного проекту є дослідження принципів побудови пристрою позиціонування Wi-Fi. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- провести огляд принципів побудови систем позиціонування;
- провести розрахунки і моделювання пристрою позиціонування у Matlab;
- дослідити похибки визначення місця розташування мобільної станції від відношення сигнал-шум.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПО ТЕМІ КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЄКТУ

1.1 Геопозиціонування за допомогою Wi-Fi

Ключовою технологією, що застосовується у Wi-Fi Indoor Location є визначення дальності за часом прольоту хвилі від передавача до приймача (TOF), визначених у IEEE 802.11, оскільки відстані між пристроями можуть використовуватися для визначення розташування пристрою.

Позиціонування за допомогою базових станцій операторів стільникового зв'язку. Реалізація системи позиціонування абонента заснована на технологіях:

- технології, що використовують мережу базових станцій мережі GSM та географічні координати у місці спостереження;

- технології, що використовують супутникову навігацію (GPS, ГЛОНАСС).

Технології позиціонування, що використовуються в GSM-мережах, працюють на основі трьох даних методів:

- метод інтеграції номера стільника (CellID) ґрунтується на визначенні координати пристрою за коміркою, в якій знаходиться. Ця інформація може бути передана за допомогою SMS - повідомлення. Точність даного методу позиціонування обмежується – до 150 м у населеному пункті з тісно розставленими стільниками та до 35 км за містом;

- метод вимірювання часу приходу (TOA) реалізований на вимірі інтервалу часу, за який сигнали з пристрою абонента досягають трьох і більше точок, обладнаних модулями, що вимірюють положення LMU. Обчислення положення користувача здійснює центр розрахунків положення MLC, який надсилає запит найближчому до абонента LMU та вимірюється на основі часу прийому сигналів

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ			
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Крижовий М.			Пристрій позиціонування Wi-Fi Аналітичний огляд літературних джерел Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Бойко Ю.М					8	
Н. контр.		Стецюк В.І.				ХНУ, гр. ТР2с-20-1		
Затв.		Підченко С.К						

у певних пунктах. Точність визначення координати абонента дорівнює близько 125 м. Мінусами даного методу є висока вартість додаткового обладнання, витрати на обслуговування, потрібна висока щільність мережі;

- метод вимірювання різниці затримки сигналу до трьох та більше базових станцій (E-OTD). В його основі лежить вимірювання різниці часу приходу сигналу на базову станцію, до складу якої входить LMU, а також дві комірки з тим же обладнанням. Обчисленням координати користувача займається MLC. Метод забезпечує точність позиціонування до 100 м.

Недоліки – невисока точність (БС може бути віддалена на відстань 35 км від користувача; деякі БС є мобільними, що постійно змінюють свою дислокацію).

Системи позиціонування Wi-Fi (WPS) використовується у випадках, коли немає сигналу GPS або позиціонування стільниковим оператором через блокування сигналу або сильні перешкоди в приміщенні або під землею. Позиціонування Wi-Fi ґрунтується на тому, що мережі Wi-Fi швидко зростають у кількості, і тому інфраструктура Wi-Fi може використовуватися як для доступу до мережі, так і для позиціонування, що знижує потребу в інвестиціях в інфраструктуру. Великою перевагою в порівнянні з GPS є те, що розташування Wi-Fi дозволяє визначати поверх будівлі.

Перевага полягає в тому, що користувачу необов'язково підключатися до точок доступу, достатньо включити Wi-Fi.

Точність Wi-Fi, що використовується для внутрішнього позиціонування, варіюється від 1 до 15 м – залежно від попередніх умов. Великою перевагою в порівнянні з GPS є те, що у більшості користувачів модуль Wi-Fi увімкнений постійно і не так сильно витрачає заряд батареї [4].

Проаналізувавши вищеописані технології, можна дійти висновку, що Wi-Fi позиціонування має більшу точністю у порівнянні з іншими технологіями. Винятком може бути Bluetooth, але для реалізації потрібні радіо-маячки, коли для системи позиціонування Wi-Fi потрібні лише точки доступу. Супутникова навігація та геомагнітне позиціонування поступаються WPS у плані складності в

експлуатації та великої похибки при вимірюванні координат пристрою через непостійні фактори, пов'язані з часом та магнітними аномаліями. GSM складна в реалізації через можливу сильну віддаленість базової станції. Таким чином, позиціонування в мережах Wi-Fi - найкраще рішення для проектування системи визначення розташування пристроїв в приміщеннях. На рис. 1.1 показаний приклад рівнів сигналу Wi-Fi від трьох точок доступу.

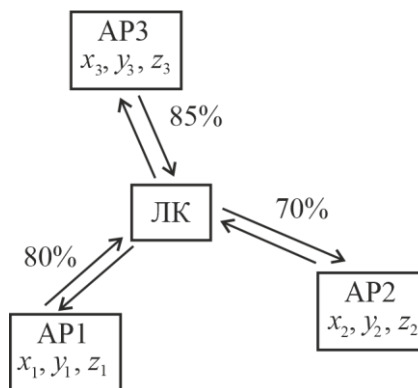


Рисунок 1.1 – Ілюстрація рівня сигналу Wi-Fi від трьох точок доступу

Розглянемо методи позиціонування мереж Wi-Fi. На даний момент існує кілька актуальних технологій, які застосовуються у методах позиціонування мереж Wi-Fi [5]. На підставі технічних можливостей обраного обладнання для реалізації системи позиціонування використовуються наступні варіанти або їх поєднання для аналізу позиційної інформації:

- AOA (angle of arrival) – технологія визначення координат користувача за кутом падіння сигналів на поверхню точок доступу.
 - RSSI (received signal strength indicator) – технологія дозволяє визначити відстань до пристрою, завдяки рівню (потужності) сигналу.
 - TOA (time of arrival) – технологія виміру відстані до користувача за рахунок часу розповсюдження сигналу від пристрою до точки доступу.
 - TDOA (time difference of arrival) – технологія дозволяє визначити відстань до користувача завдяки різниці часу приходу сигналу на доступні точки доступу.
- Технологія застосовується в системі, що має три і більше точок доступу [1].

Методи на основі АОА, традиційно більш пов'язані зі спостереженням (наприклад, радаром) і суміжними областями, в даний час викликають новий інтерес через поширення технологій МІМО в стільникових мережах 4G і стають ще більш привабливими для сценаріїв 5G mmWave, в яких розмір масиву значно зменшується, що дозволяє інтегрувати їх у мобільні термінали (смартфони) [1]. Ця технологічна еволюція у стільниковому зв'язку разом із широкою доступністю сенсорних модулів (наприклад, кінематичних датчиків, таких як INS) та обчислювальних можливостей сучасних мобільних пристроїв прокладає шлях для інноваційних парадигм локалізації. Крім того, знання розташування дуже важливе для автономних транспортних засобів, робототехніки та інших транспортних засобів, в яких одні й ті ж технологічні інновації стають дедалі доступнішими.

Керуючись наведеними вище міркуваннями, ми розглянемо налаштування локалізації, в якій сигнали низхідної лінії зв'язку від однієї або кількох базових станцій використовуються мобільним вузлом, оснащеним антенною решіткою для оцінки власного розташування. На відміну від більш традиційного налаштування висхідної лінії зв'язку, в якій базові станції отримують сигнал від вузла в невідомому положенні, виконують деяку обробку (наприклад, оцінку АОА), а потім відправляють таку локальну інформацію на центральний вузол для оцінки позиції, що розглядається низхідною лінією зв'язку У сценарії вся процедура виконується на мобільному вузлі з використанням ширококомовних радіосигналів, а також доступними оцінками швидкості від бортового давача. Перевага цього полягає в тому, що не потрібний подальший зв'язок, що значно знижує споживання смуги пропускання. Крім того, на базовій станції не потрібні антенні решітки, оскільки останні не відіграють жодної активної ролі у задачі оцінювання.

Для цього налаштування локалізації ми більш конкретно звертаємося до проблеми локалізації мобільного вузла, якщо враховувати структуру з багатьма шляхами розповсюдження хвиль. Проводиться локалізація на основі АОА, де багатопророменеve поширення розглядається тільки як (стохастичне) обурення і розглядається один знімок середовища, тобто статичний сценарій, як у «нерухомий кадр» . Як правило, локалізація мобільного об'єкта натомість

перетворюється на проблему відстеження його траєкторії у часі: зокрема, у фільтрі Калмана (KF) використовується байєсовський (MMSE) підхід до оцінки, в якому поточна оцінка положення оновлюється рекурсивно у виваженій комбінації з новою (зашумленою) оцінкою положення (або іншою інформацією про місце розташування в розширеному KF, такий як діапазон [1] або АОА [2] і, можливо, також вимірювання швидкості), беручи до уваги обмеження, викликані обраною кінематичною моделлю (наприклад, модель майже постійної швидкості [3]). Ми обробляємо пакет сигналів масиву, отриманих у попередні моменти часу, які, таким чином, схильні до впливу мобільності, і розробляємо псевдооцінку положення максимальної правдоподібності. При такому підході параметри, що заважають, усуваються шляхом «заміни їх оцінками і розв'язанні редукованої системи рівнянь правдоподібності.

Цей метод є розумним у завданнях, у яких можлива оцінка максимальної правдоподібності нижчої розмірності, тоді як оцінка максимальної правдоподібності вищої розмірності нерозв'язна».

Для проблеми, багато невідомих параметрів, що відіграють роль у середовищах з багатопроменевим поширенням, не можуть бути оцінені в сенсі максимальної правдоподібності (ML); слідує логіці псевдо максимальної правдоподібності, натомість ми використовуємо інші оцінки: зокрема, як буде краще пояснено пізніше, комбінація просторового згладжування та адаптивного формування променя дозволяє нам отримати оцінки проєкційних матриць (де з'являються параметри, що заважають), які максимізують ймовірність.

Крім того, мобільність використовується в задачі локалізації, щоб зменшити обчислювальну складність, пов'язану з остаточною оцінкою розташування, і в той же час ввести вигоду від інтеграції, корисний для максимальної точності локалізації. Варто наголосити, що запропонований алгоритм не передбачає будь-якої конкретної моделі мобільності, тобто його можна застосовувати в цілому незалежно від фактичної траєкторії руху мобільного терміналу.

1.2 Метод позиціонування за точкою доступу

В основі цього методу позиціонування лежить аналіз сигналів від точок доступу, координати яких відомі. Суть у тому, що пристрій заміряє рівні сигналів з Wi-Fi станціями, які знаходяться поряд. В залежності від обладнання, Wi-Fi сигнал від якого надходить з найбільшою потужністю, є найближчим. Коли визначено найближчу точку доступу, її координата присвоюється пристрою. Якщо ж пристрій приймає кілька сигналів, що мають однаковий рівень, координатою користувача є середина між цими Wi-Fi станціями.

Плюсом даного методу є точність позиціонування в приміщенні порівняно з тим, що пропонує позиціонування в мережі оператора зв'язку або супутникова навігація (GPS, ГЛОНАСС). Але якщо порівнювати точність з іншими методами позиціонування мереж Wi-Fi, вона буде вважатися невисокою.

Недоліками методу є похибка позиціонування пристроїв, яка у певних випадках досягає дальності розподілу сигналів від точок доступу, а також для коректної роботи методу буде потрібно велике число точок доступу.

Метод розпізнавання шаблону. Реалізація цього методу складається з чотирьох етапів:

- Створення шаблону;
- Отримання даних RSS від точок доступу;
- аналіз даних RSS та даних точок калібрування;
- Визначення місця розташування.

Щоб спроектувати шаблон, необхідно нанести на карту радіообстановку приміщення. Для цього потрібно зробити сканування ефіру в приміщенні, в результаті якого будуть отримані унікальні дані. Завдяки їм складається радіокарта приміщення, розбита на квадрати із власними координатами.

Коли картку повністю спроектовано, створюється шаблон у базі даних.

Далі вноситься пристрій користувача у приміщення, він сканує радіообстановку, в результаті чого отримує інформацію про назви точок доступу і рівень сигналу від них.

Ці дані звіряються з шаблоном у базі даних і, таким чином, визначаються координати пристрою у просторі [1].

Єдиним плюсом цього методу є низька вартість обладнання. Мінусами ж є висока вартість володіння цією системою, складність в експлуатації, викликана постійним внесенням коригувань у шаблони, які зазвичай виробляються фахівцями, а також невисока точність визначення розташування пристрою, пов'язана з впливом багатьох факторів.

Метод триангуляції. Метод триангуляції полягає в тому, щоб на підставі прийнятого рівня сигналу пристрою від трьох точок доступу, в області перетину можливої координати користувача робити висновок по відношенню до кожної точки позиціонування користувача.

Для коректної роботи системи потрібно розмістити точки доступу так, щоб у кожній точці простору в приміщенні пристрій знаходився в області дії трьох і більше точок доступу, в результаті чого буде отримано точне позиціонування з мінімальною похибкою.

Істотний вплив на точність позиціонування користувача надають перешкоди на шляху поширення сигналів. Статичні об'єкти потрібно змодельовати і врахувати в алгоритмі геопозиціонування, а динамічні обов'язково мають знизити точність у визначенні координати пристрою.

Плюсами цього методу є висока точність позиціонування пристроїв та середні витрати на експлуатацію системи. Мінусами є складність у реалізації системи, оскільки необхідно ретельно побудувати модель розповсюдження сигналу, а також витрати на побудову системи та реальні умови у приміщеннях (багатопронемове поширення, поглинання стінами та перешкодами).

Метод ануляції. Метод ануляції або позиціонування з визначенням кута вхідного сигналу заснований на визначенні розташування користувача завдяки куту, при якому сигнали надходять на точку доступу. Даний метод – це революційна розробка компанії Cisco, що дозволяє досягти найвищої точності позиціонування пристрою в мережах Wi-Fi. Спроектуювавши систему на основі цього методу, можна досягти похибки 1 м при визначенні координати

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		14

користувача. В основі лежать покази зовнішнього модуля точкового позиціонування Cisco Aironet.

Пристрій являє собою точку доступу Cisco, що має модуль точного позиціонування та спеціальну антену. Антена – це масив із 32 антен, кожна з яких приймає сигнал інакше, ніж сусідня [2]. Алгоритм надає можливість із зібраної інформації розрахувати кут, під яким сигнал прийшов на точки доступу та звузити сегмент можливого знаходження Wi-Fi користувача до променя. Потім використовують геометричні розрахунки для оцінки розташування пристрою.

Перевагами даного методу є висока точність позиціонування пристроїв та низькі витрати на експлуатацію, а недоліками будуть висока вартість розгортання системи та чутливість до пасивних завад. Реалізована система добре працює в ситуаціях з прямою видимістю, але за наявності перешкод втрачається точність, коли потрібно відображати сигнал від навколишніх об'єктів.

Метод трилатерації. В основі методу лежить визначення розташування пристрою в приміщенні у вигляді координат точки перетину трьох сфер, в центрі яких розташовані точки доступу AP1, AP2 та AP3 з відомими координатами. Як вхідні дані використовуються характеристики мережі Wi-Fi, наприклад, частота сигналу, потужність сигналу, Wi-Fi канал, що використовується, мережева MAC-адреса і координата точки доступу. Для реалізації методу повинні використовуватися як мінімум три Wi-Fi точки, що знаходяться на одному поверсі.

Потрібно враховувати, що рівень сигналу від точки доступу зменшується в залежності від коефіцієнта шуму каналу зв'язку, а також відстаней між передавачем та приймачем, тому відстань між точками доступу має бути малою.

Розрахунок координати пристрою може бути здійснено рішенням системи рівнянь трьох сфер, з урахуванням наведеної системи координат:

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

$$r_2^2 = (x - x_2)^2 + y^2 + z^2$$

$$r_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + z^2$$

Досліджуваний метод визначає відстань за рівнем сигналу на вході приймального пристрою для мобільного обладнання.

Перевагою даного методу є висока точність позиціонування, відносно невисока складність реалізації та вартість розгортання. Недоліком є шум каналу зв'язку, який може вплинути на точність визначення розташування пристроїв.

Метод ідентифікації на основі штучної нейронної мережі. Метод ідентифікації на основі штучної нейронної мережі будується на вимірі потужності сигналів від найближчих за рівнем сигналу точок доступу в певному масиві точок, які називають опорними.

Пристрій, місце розташування якого потрібно визначити, збирає дані про навколишні Wi-Fi точки шляхом аналізу карти покриття. Ці дані використовуються вже на навченій та протестованій заздалегідь нейронній мережі, призначеній для визначення поточного розташування пристрою клієнта на основі даних радіосигналу. Спеціально розроблений додаток готує дані, «навчає» та тестує нейронну мережу. Це можна реалізувати у різний спосіб, у деяких наукових працях це реалізується на алгоритмі під назвою «Resilient Propagation» (Rprop) – алгоритм із зворотним поширенням помилки.

Таким чином, метод позиціонування на основі штучної нейронної мережі має високу точність та можливість обробки великої кількості даних, але складність реалізації та експлуатації обійдеться дорого для підприємства. Справа в тому, що за будь-якої зміни статичної обстановки приміщення доведеться знову «навчати» штучну нейронну мережу через те, що значення потужності сигналу мають пряму залежність від перешкоди, що зустрічається на шляху сигналу до точки доступу. Оскільки цей процес має проводитися під контролем оператора, будуть потрібні регулярні фінансові вкладення з боку підприємства. Крім

навчання, також потрібно створити програмне або апаратне рішення для самої нейронної мережі, розробити алгоритм позиціонування, закупити обладнання та інше. Тому проектування та реалізація системи на основі даного методу виправдано лише за великої площі приміщення з невеликою кількістю інженерних конструкцій, які майже не пересуватимуться [3].

Метод позиціонування на основі Wi-Fi міток. Цей метод позиціонування заснований на активних пристроях, які можуть являти собою браслет на зап'ястя. Наразі Wi-Fi мітки найбільш потрібні в організаціях із суворим контролем доступу на територію, а точніше на підприємствах, у яких введено заборону використання мобільних пристроїв на території об'єкта. Позиціонування реалізується будь-якою із розглянутих раніше технологій з умовою, що об'єктами мають бути пристрої, надані підприємством.

Проектування та реалізація такої системи має високі витрати через те, що організації потрібно купити кожному співробітнику по одному пристрою, а також необхідно закупити комплекти для людей, які не працюють на об'єкті, але за певних обставин мають отримати доступ на територію підприємства, наприклад, різного роду комісії. Ще одним недоліком методу є складність в організаційному аспекті, тому що потрібно буде провести навчання людей по роботі з мітками та розгорнути пропускний пункт, який прийматиме, видаватиме та налаштовуватиме їх. Точність визначення координати пристроїв буде залежати від вибраного алгоритму позиціонування.

1.3. Стандарт 802.11

Стандарт 802.11az отримує точну інформацію про місцезнаходження, за стандартом 802.11ay з використанням технології розширеного спрямованого мульти-гігабітного (Enhanced Directional Multi-Gigabit - EDMG) формування

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		17

променя, а також точні звіти про стан каналу (CSI). З орієнтацією променя mmWave та звітами CSI стандарт 802.11az уточнює кутові оцінки, що базуються на точності визначення дальності для смуг частот у декілька ГГц.

На відміну від рішень, заснованих на індикаторі рівня сигналу (RSSI) [3], стандарт 802.11az поєднує оцінки кута на основі міліметрових хвиль з часом прольоту (ToF) для досягнення високоточного позиціонування. Обмін оцінками ToF та кута здійснюється з використанням процедури точного вимірювання часу (FTM – Fine Timing Measurement), представленої в стандарті 802.11mc, а мобільні станції (STA) використовують отримані оцінки для визначення відстані, азимуту та висоти між STA, як показано на рис. 1.2.

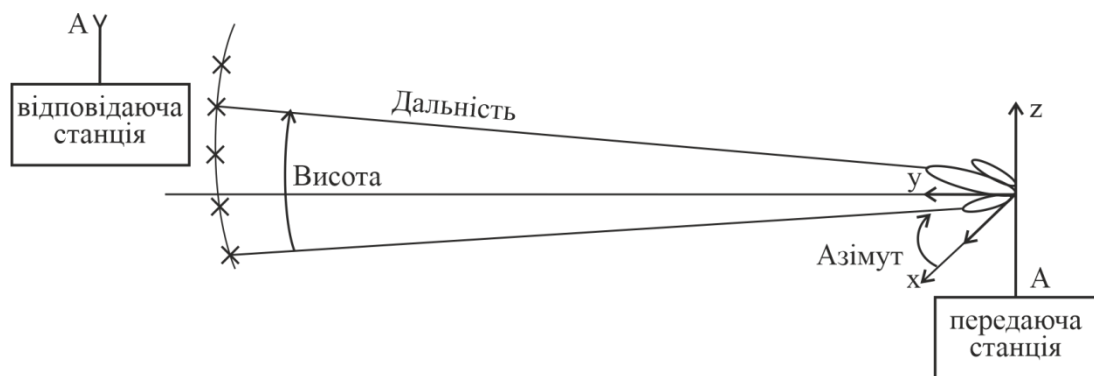


Рисунок 1.2 – Схематичне позначення використання формування променя для отримання азимуту та висоти між пристроями

Використання міліметрових хвиль дає можливість підвищити точність позиціонування з метрового рівня до сантиметрового рівня;

У застарілій процедурі FTM, мобільні станції обмінюються оцінками часу розповсюдження (ToF – Time Of Flight) сигналу від передавача до приймача, отже отримуючи приблизну відстань. 802.11az виконує процедуру FTM через EDMG, щоб обмінюватися оцінками кутів, отриманими зі звітів CSI (Channel State Information – інформація про стан каналу). А саме, мобільні станції (STA) обмінюються кутами, під якими сигнали відправляються та надходять у STA,

тобто кутом відправлення (AOD) та кутом прибуття (AOA). За допомогою оцінок відстані та кута можна отримати точне положення мобільної станції (рис.1).

Для визначення інформації про стан каналу (CSI) мобільна станція має проаналізувати наступні сигнали:

- індикатор якості каналу (CQI);
- індикатор матриці попереднього кодування (PMI);
- індикатор типу попереднього кодування (PTI)
- індикація рангу (RI).

Однією з найважливіших цілей CSI для мобільної станції є оцінка якості каналу та вибір належної матриці попереднього кодування для мережі. Більша частина оцінки та звіту CSI тісно пов'язана з різними наборами матриць попереднього кодування.

Розглянемо принцип формування променя

Точка доступу (AP) ініціює MU-MIMO BFT із групою станцій (STA). Як AP, і STA мають архітектуру гібридного BF, як показано на рис. 1.3 [2]. Для досягнення ефекту просторового мультиплексування потоки даних порівнюються з різними радіочастотними (РЧ) ланцюгами. Після проходження через відповідний радіочастотний ланцюжок кожен потік даних, нарешті, передається антеною або решіткою, пов'язаною з відповідним радіочастотним ланцюжком. Кожна антена/підрешітка сконфігурована для покриття просторових секторів, що перекриваються або неперекриваються, і генерує один промінь для передачі потоку даних.

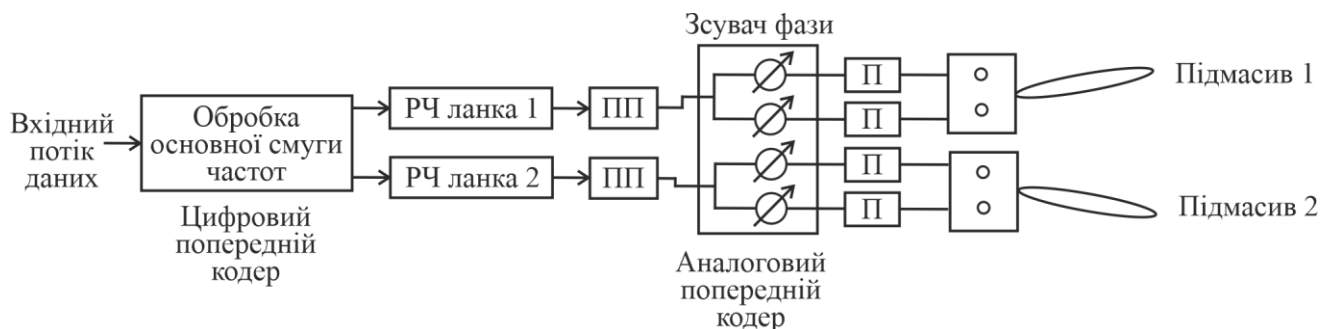


Рисунок 1.3 – Принцип формування променя

1.4 Реалізація та тестування системи позиціонування в мережах Wi-Fi

Метод трилатерації використовує сигнал бездротової мережі передачі даних. Основна проблема – це розробка способу визначення відстані між пристроєм користувача і точкою доступу.

Початкові дані: канал, рівень сигналу, частота Wi-Fi, мережева MAC-адреса і координати самої Wi-Fi станції. Завдяки прийнятому рівню сигналу можна оцінити відстань між користувачем та Wi-Fi обладнанням.

При реалізації методу трилатерації користувачу необхідно перебувати у зоні дії трьох та більше Wi-Fi станцій, що знаходяться на одному поверсі будівлі. Рівень сигналу цих точок доступу знижується експоненційно щодо відстані між передавачем та приймачем, а також фактора шуму. Тому цю залежність можна розглянути як функцію від відстані.

За оцінкою рівня сигналу, відстань представляється як кола, у центрі якого знаходиться Wi-Fi станція. Перетин кіл трьох точок доступу визначає точку або зону знаходження мобільного пристрою. Цю модель можна у вигляді системи рівнянь [10]:

$$d_1^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2$$

$$d_2^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2$$

$$d_3^2 = (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2,$$

де: x_0, y_0 – координата пристрою позиціонування; $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ – координати обладнання; d_1, d_2, d_3 – відстані від пристрою до точок доступу.

Перетворивши систему рівнянь, можна отримати:

$$(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 = d_1^2 - d_3^2$$

$$(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 = d_2^2 - d_3^2$$

Розгорнувши два наведені вище рівняння, можна отримати:

$$2x_0(x_1 - x_3)^2 - 2y_0(y_1 - y_3)^2 = d_1^2 - d_3^2 - (x_1^2 - x_3^2)^2 - (y_1^2 - y_3^2)^2$$

$$2x_0(x_2 - x_3)^2 - 2y_0(y_2 - y_3)^2 = d_2^2 - d_3^2 - (x_2^2 - x_3^2)^2 - (y_2^2 - y_3^2)^2$$

Рішенням системи рівнянь є точка перетину кіл, в якій знаходиться пристрій. Модель роботи методу показано на рис. 1.4.

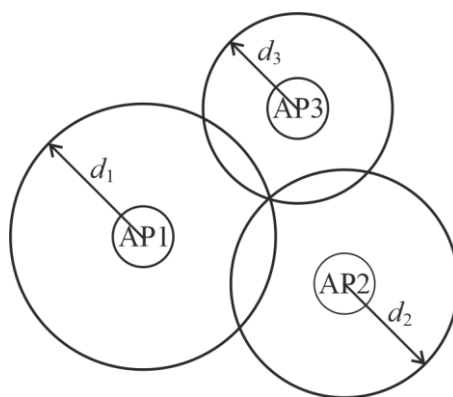


Рисунок 1.4 – Модель роботи пристрою позиціонування Wi-Fi

Для того, щоб визначити точку перетину, потрібно визначити відстань між користувачем та Wi-Fi станцією на основі інформації про рівень сигналу. На рис. 3 радіуси відповідають рівням сигналу кожної точки доступу всередині кіл. Це завдання вирішується завдяки створенню моделі розповсюдження сигналу усередині приміщення. Відображення та поглинання сигналу перешкодами є головною причиною виникнення похибок при визначенні розташування

пристрою. Згасання сигналу залежить від багатьох факторів, таких, як частота сигналу і розташування користувача щодо поверхонь і перешкод, що відбивають. Застосований у даній роботі спосіб оцінювання відстані від пристрою до Wi-Fi обладнання - це модель поширення сигналу у вільному просторі, що має формулу втрати рівня сигналу у вільному просторі [4]:

$$Pr(d) = Pr(d_0) - 10n \lg(d)$$

де: $Pr(d)$ - рівень сигналу, що приймається на відстані d ; $Pr(d_0)$ – рівень сигналу, що приймається на відстані d_0 від точки доступу, що дорівнює -35 dBm на відстані 1 м; n - коефіцієнт загасання, для внутрішнього середовища рівний від 2 до 6; d – відстань від приймача до передавача.

Для проведення тестування було використано систему у діапазон частот – 2,4 ГГц. Для першого тесту було обрано аудиторію, яка має велику площу в 91 м² і малу кількість об'єктів, які могли б сильно вплинути на загасання сигналу. Під час першого тестування системи було використано три точки доступу.

В результаті тесту була отримана висока точність позиціонування з похибкою вимірювань до 1 м. Це було досягнуто завдяки тому, що всі Wi-Fi станції перекривали одна одну, тим самим у кожній точці приміщення можна було коректно розрахувати розташування пристрою. А також точність обумовлена тим, що сигналу не потрібно було проходити через стіни, які б внесли серйозне згасання сигналу. Система показала високу ефективність та якість роботи у відкритому просторі, що дає змогу провести тестування з кількома приміщеннями для більш точного аналізу її роботи.

Для проведення другого тестування обрано приміщення на базі НОЦ «ВІС» та використані чотири точки доступу.

В результаті тесту знизилася точність позиціонування, похибка у визначенні місцезнаходження пристрою склала до 3 м. На точність вплинуло загасання сигналу, так як його потужність значно знижується при проходженні через стіни,

а тим більше несучі, що згубно впливає на результати. А також вплинуло те, що точки доступу не перекривають одна одну, тому вся площа приміщень не може бути покрита, через що в певних місцях програма зовсім не зможе визначити місцезнаходження пристрою.

1.5 Сфери застосування геопозиціювання на допомогою Wi-Fi

Абоненти мобільного зв'язку за стандартом IEEE 802.11az можуть визначити місцезнаходження за допомогою телефону.

Проблема: Чи можемо ми відстежувати різних колег/пристроїв через офіс?

Рішення: Існує досить багато рішень. Деякі комерційні, деякі безкоштовні, але було б не так весело просто встановити один, тому ми мали 24 години, щоб створити його з нуля.

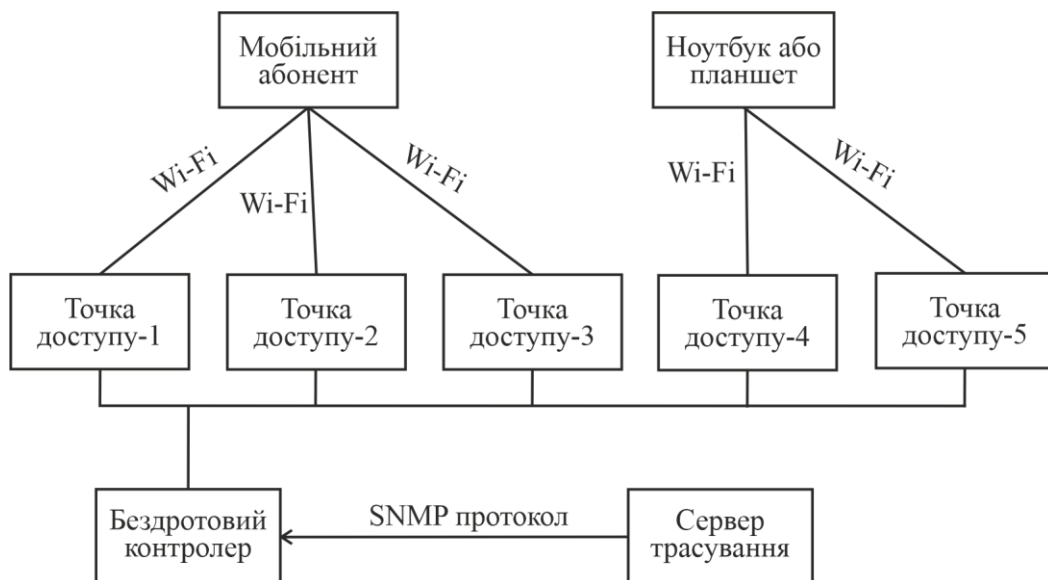


Рисунок 1.5 – Структура системи позиціонування

В останні роки система Wi-Fi Positioning System знаходить все більшого застосування у багатьох господарських сферах. Її використовують не тільки на вулицях, а й усередині приміщень, де навігація GPS не здатна працювати через блокування сигналу, багатопроменеве поширення та ряд інших причин. Wi-Fi забезпечує точне визначення розташування людей та об'єктів, що сприяє оптимізації бізнес-процесів та підвищенню прибутку компаній.

Система працює за принципом визначення координат за допомогою Wi-Fi точок, які можуть передавати певні дані. Використовуючи RSSI (індикатор рівня прийнятого сигналу) та MAC-адресу (контроль доступу до середовища), система може точно розраховувати поточне розташування пристрою користувача, використовуючи підхід мультилатерації.

Точність визначення місця розташування за допомогою Wi-Fi залежить від кількості точок доступу, топології будівлі та типу смартфона. Сучасні смартфони можуть забезпечити позиціонування у приміщенні з точністю до 2-3 м.

Позиціонування на основі Wi-Fi RSSI добре працює на Android пристроях. Проте в останній версії Android (див. таблицю нижче) є деякі зміни, що обмежують можливості сканування Wi-Fi.

На жаль, зараз неможливо використовувати Wi-Fi для позиціонування в приміщенні на пристроях iPhone/iPad, оскільки Apple не дозволяє програмам отримувати дані Wi-Fi оточення через проблеми з конфіденційністю.

Позиціонування на базі Wi-Fi стає все більш актуальним на тлі створення численних мобільних додатків для моніторингу розташування активів та людей на підприємствах. Вибір на користь технології WPS обумовлений багатьма її перевагами:

- можливість використання вже встановленої інфраструктури Wi-Fi;
- можливість масштабування майже без ручного втручання;
- висока дальність розповсюдження сигналу – до 150 метрів;
- немає потреби у додатковому обладнанні та обслуговуванні інфраструктури;

- можливість комбінування з іншими технологіями для підвищення точності та гнучкого розгортання.

Висновки до першого розділу

Метод трилатерації у порівнянні іншими має високу точність. Аналогічних результатів можна досягти, використовуючи методи ангуляції та ідентифікації на основі штучної нейронної мережі, але їх реалізація досить складна і витрати на експлуатацію будуть високі. Трилатерація має відносно невисоку складність у проектуванні та реалізації системи, а також невисоку вартість експлуатації, цього можна досягти, використовуючи методи розпізнавання шаблону і позиціонування по точці доступу, але тоді точність не буде такою високою. Можна зробити висновок, що оптимальним способом реалізації системи позиціонування у приміщенні є трилатерація.

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ	Арк.
						25
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		

2 ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ

2.1 Методи надвисокої роздільної здатності

З появою додатків для позиціонування та бездротових мереж наступного покоління з визначенням місцезнаходження методи позиціонування стають все більш важливими [1]. Визначення місцезнаходження на основі часу прибуття (TOA) є найпопулярнішим методом для систем точного позиціонування.

Основна проблема в методах на основі TOA полягає в точній оцінці затримки поширення радіосигналу, що надходить із шляху розповсюдження прямої лінії видимості (DLOS). Однак у закритих приміщеннях та у міських районах через серйозні багатопроменеві умови та складність поширення радіохвиль не завжди вдається точно виявити DLOS [2], [3]. Підвищення роздільної здатності каналу в області часу для визначення шляху DLOS підвищує продуктивність систем позиціонування, що використовують методи оцінки TOA.

Методи надвисокої роздільної здатності вивчалися у сфері спектральної оцінки [4]. Останнім часом низка дослідників застосували методи спектральної оцінки надвисокої роздільної здатності для аналізу в області часу для різних додатків. Ці програми включають вимірювання параметрів електронних пристроїв [5], [6] та дослідження багатопроменевого поширення радіохвиль [7]–[11]. У [7] метод надвисокої роздільної здатності використовувався в частотній області для оцінки параметрів часової дисперсії багатопроменевості, таких як середня надлишкова затримка та розкид середньоквадратичної затримки.

Аналогічний метод був використаний у [2] для моделювання внутрішніх каналів поширення радіохвиль за допомогою параметричних моделей

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ		
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Крижовий М.				Пристрій позиціонування Wi-Fi		
Перевірив	Бойко Ю.М						
Н. контр.	Стецюк В.І.				Літера	Аркуш	Аркушів
Затв.	Підченко С.К					26	
					ХНУ, гр. ТР2с-20-1		

гармонійних сигналів.

Тут ми розглядаємо застосування методів надвисокої роздільної здатності для точної оцінки ТОА для геолокації всередині приміщень. У літературі проблема оцінки часової затримки вивчалася за допомогою різних методів надвисокої роздільної здатності, таких як метод мінімальної норми [2], класифікація кореневих множинних сигналів (MUSIC) [3] та повна оцінка параметрів сигналу за методом найменших квадратів за допомогою методів обертальної інваріантності (TLS-ESPRIT) [3]. Хоча методи надвисокої роздільної здатності можуть збільшити роздільну здатність у часовій області, вони також ускладнюють реалізацію системи. Розглянемо методи оцінки ТОА із надвисокою роздільною здатністю в частотній області для геолокації всередині приміщень.

Ми представляємо та оцінюємо методи, які можна використовувати у практичній реалізації для підвищення ефективності оцінки ТОА. Щоб продемонструвати продуктивність методів надвисокої роздільної здатності порівнюється з двома звичайними методами оцінки ТОА. Крім того, представлені дві схеми об'єднання рознесення для методів оцінки ТОА надвисокої роздільної здатності, і ефекти методів рознесення оцінюються на основі цих двох схем.

У літературі продуктивність методів надвисокої роздільної здатності для аналізу у часовій області зазвичай оцінюється або за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням простої моделі каналу з двома шляхами, або з використанням спеціально розроблених простих схем [3]. Ефективність методів оцінки ТОА із надвисокою роздільною здатністю вивчається за допомогою комп'ютерного моделювання на основі вимірювань внутрішніх каналів поширення радіохвиль. Через складність багатопроменевих внутрішніх радіоканалів аналіз продуктивності на основі експериментальних даних вимірювань каналів дає набагато реалістичніші статистичні результати, ніж комп'ютерне моделювання з використанням простих теоретичних моделей каналів. Крім того, оскільки система вимірювання каналів, яку ми використовували, забезпечує зручний засіб для проведення великих вимірювань усередині приміщень, методи вимірювання та моделювання, представлені в цій

статті, можуть бути використані для зручного встановлення емпіричних меж продуктивності для реальної реалізації внутрішніх систем геолокації.

2.2 Методи спектральних оцінок

Багатопроменевий внутрішній радіоканал розповсюдження зазвичай моделюється як комплексна еквівалентна імпульсна характеристика в області нижніх частот, що визначається виразом:

$$h(t) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k \delta(t - \tau_k) \quad (2.1)$$

де L_p - кількість багатопроменевих компонентів, $\alpha_k = |\alpha_k| e^{j\theta_k}$ і τ_k - комплексне згасання і затримка поширення на k -ому шляху відповідно, в той час як багатопроменеві компоненти пронумеровані так, що затримки поширення τ_k , $0 \leq k \leq L_p - 1$ розташовані у зростаючому порядку. В результаті τ_0 у моделі позначається затримка поширення шляху DLOS, тобто TOA, яку необхідно виявити для цілей геолокації всередині приміщень.

Використовуючи перетворення Фур'є (2.1), характеристику каналу в частотній області можна виразити наступним чином:

$$H(f) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k e^{-j2\pi f \tau_k} \quad (2.2)$$

Параметри α_k і τ_k є випадковими функціями, що змінюються в часі через рух людей і обладнання в будівлях і навколо них. Однак, оскільки швидкість їх зміни дуже мала порівняно з інтервалом часу вимірювання, ці параметри можна розглядати як випадкові стаціонарні величини в межах одного знімка

вимірювання [12]. Фаза комплексного загасання зазвичай вважається випадковою від одного знімка до іншого з рівномірною функцією густини ймовірності $U(0,2\pi)$ [3]. З іншого боку, ці параметри залежать від частоти, оскільки пов'язані з характеристиками радіосигналу, такими як коефіцієнти передачі та відображення. Однак, як показано в [14], для смуг частот, що використовуються в даній роботі ці параметри можна вважати не залежними від частоти.

Розглянемо оцінку TOA із надвисокою роздільною здатністю, засновану на вимірюванні характеристик внутрішнього каналу в частотній області. На практиці дискретні вибірки відгуку каналу в частотній області можуть бути отримані шляхом свипування каналу на різних частотах [1], з використанням методу модуляції з декількома несучими, такого як мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (OFDM), або розширення спектра з прямою послідовністю. (DSSS) шляхом деконволюції прийнятого сигналу в смузі частот із високим відношенням сигнал/шум [1].

Якщо ми змінимо позначки часу і частотних змінних (2.2), ми можемо помітити, що вона стає моделлю гармонійного сигналу:

$$H(\tau) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k e^{-j2\pi f_k \tau} \quad (2.3)$$

який добре відомий у сфері спектральних оцінок [4]. Отже, будь-які методи спектральної оцінки, придатні для моделі гармонічного сигналу, можуть бути застосовані до частотної характеристики променевого внутрішнього радіоканалу для виконання аналізу в часовій області. У роботі ми використовуємо алгоритм MUSIC [6] як приклад методів надвисокої роздільної здатності при оцінці TOA для додатків геолокації всередині приміщень.

Дискретні дані вимірювань одержують шляхом дискретизації частотної характеристики каналу $H(f)$ на L рівновіддалених частотах. З урахуванням адитивного білого шуму в процесі вимірювання дискретна характеристика каналу в частотній області задається виразом:

$$x(l) = H(f_l) + w(l) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k e^{-j2\pi(f_0+l\Delta f)\tau_k} + w(l) \quad (2.4)$$

де $l=0,1,K,L-1$ і $w(l)$ позначає адитивний білий шум виміру з нульовим середнім значенням та дисперсією σ_w^2 . Потім ми можемо записати цю модель сигналу у векторній формі

$$x = H + w = Va + w \quad (2.5)$$

$$\text{де } x = [x(0) \ x(1) \ K \ x(L-1)]^T$$

$$H = [H(f_0) \ H(f_1) \ K \ H(f_{L-1})]^T$$

$$w = [w(0) \ w(1) \ K \ w(L-1)]^T$$

$$V = [v(\tau_0) \ v(\tau_1) \ K \ v(\tau_{L-1})]^T$$

$$v(\tau_k) = [1 \ e^{-j2\pi\Delta f\tau_k} \ K \ e^{-j2\pi(L-1)\Delta f\tau_k}]^T$$

$$a = [\alpha'_0 \ \alpha'_1 \ K \ \alpha'_{L-1}]^T$$

$$\alpha'_k = \alpha_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k}$$

а верхній індекс T означає операцію транспонування матриці.

Методи надвисокої роздільної здатності MUSIC засновані на власному розкладанні матриці автокореляції попередньої моделі сигналу (2.5)

$$R_{xx} = E\{xx^H\} = VAV^H + \sigma_w^2 I \quad (2.6)$$

де $A = E\{aa^H\}$ і верхній індекс H позначає пов'язану операцію транспонування, тобто ермітову матрицю. Оскільки затримки поширення τ_k у (2.1) теоретично можна вважати різними, а матриця V має повний стовпцевий ранг, тобто вектори-стовпці у V лінійно незалежні. Якщо ми припускаємо, що величина параметрів α_k постійна, а фаза є однорідною випадковою величиною у діапазоні $[0, 2\pi]$, $L_p \times L_p$ коваріаційна матриця A не вироджена. Тоді з теорії лінійної алгебри випливає, що за умови $L > L_p$, ранг матриці VAV^H дорівнює L_p , або, що те саме $L - L_p$, найменші власні значення R_{xx} рівні σ_w^2 . Власні вектори (EV), що відповідають $L - L_p$ найменшим власним значенням R_{xx} , називаються EV шуму, а EV, що відповідають L_p найбільшим власним значенням, називаються EV сигналу. Таким чином, L -мірний підпростір, який містить вектор сигналу x , може бути розділений на два ортогональних підпростори, відомих як підпростір сигналу і підпростір шуму, за допомогою EV сигналу і EV шуму відповідно. Потім матриця проєкції шумового підпростору визначається виразом

$$P_w = Q_w (Q_w^H Q_w)^{-1} Q_w^H = Q_w Q_w^H \quad (2.7)$$

де $Q_w = [q_{L_p} \ q_{L_p+1} \ \dots \ q_{L-1}]$ і q_k , $L_p \leq k \leq L-1$ є шумом EV. Оскільки вектор $v(\tau_k)$, $0 \leq k \leq L_p - 1$ має лежати у сигнальному підпросторі, маємо

$$P_w v(\tau_k) = 0 \quad (2.8)$$

Таким чином, багатопроменеві затримки τ_k , $0 \leq k \leq L_p - 1$ можна визначити, знайшовши значення затримки, при яких наступний псевдоспектр MUSIC досягає максимального значення:

$$S_{\text{MUSIC}}(\tau) = \frac{1}{\|\mathbf{P}_w \mathbf{v}(\tau)\|^2} = \frac{1}{\mathbf{v}^H(\tau) \mathbf{P}_w \mathbf{v}(\tau)} = \frac{1}{\|\mathbf{Q}_w^H \mathbf{v}(\tau)\|^2} \quad (2.9)$$

На рис. 2.1 показана функціональна блок-схема приймача систем оцінки ТОА надвисокої роздільної здатності.

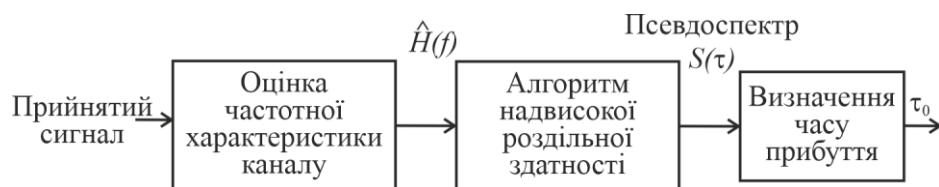


Рисунок 2.1 – Структурна схема приймача з системою оцінки часу прибуття високої роздільної здатності

Отриманий сигнал спочатку використовується для оцінки частотної характеристики каналу. Потім використовується алгоритм надвисокої роздільної здатності для перетворення частотної характеристики каналу в псевдоспектр у часовій області, як визначено (2.9). Потім оцінка ТОА утворюється шляхом виявлення першого піку псевдоспектра на осі затримки з використанням алгоритму виявлення піків. У наступному розділі будуть розглянуті питання практичної реалізації методів оцінки ТОА із надвисокою роздільною здатністю.

2.3 Проблеми практичної реалізації

Під час аналізу ми розглядали теоретичну чи справжню кореляційну матрицю \mathbf{R}_{xx} . На практиці кореляційна матриця повинна оцінюватися з урахуванням вимірних вибірок даних. На рис. 2.2 показана функціональна блок-схема алгоритму оцінки ТОА з надвисокою роздільною здатністю MUSIC.



Рисунок 2.2 – Структурна схема алгоритма оцінки часу прибуття з надвисокою роздільною здатністю MUSIC

Вектор вхідних даних, тобто оцінка частотної характеристики каналу, задана (2.5), спочатку використовується для оцінки кореляційної матриці R_{xx} . Потім обчислюються власні значення, і навіть відповідні EV кореляційної матриці. Параметр L_p визначається за допомогою аналізу власних значень та EV кореляційної матриці. Псевдоспектр визначається за допомогою виразу (2.9).

Якщо ми маємо P моментальних знімків даних вимірювань, оцінка кореляційної матриці виходить з виразу:

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P X^{(k)} X^{(k)H} \quad (2.10)$$

але якщо доступний лише один знімок даних вимірювання довжини N , послідовність даних ділиться на M послідовних сегментів довжини L , а потім кореляційна матриця оцінюється за допомогою виразу:

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M X^{(k)} X^{(k)H} \quad (2.11)$$

де $M = N - L + 1$ і $\mathbf{x}(k) = [x(k) \dots x(k + L - 1)]^T$. У цьому розділі ми зосередимося на другому методі, де для оцінки матриці кореляції даних використовується лише один знімок даних вимірювань, як (2.11).

Як ми згадували раніше, для методів оцінки ТОА із надвисокою роздільною здатністю вектор \mathbf{x} даних вимірювань виходить шляхом однорідної дискретизації частотної характеристики каналу в заданій смузі частот. Щоб уникнути аліасингу

в часовій області, подібно до теореми вибірки Найквіста в часовій області, інтервал вибірки в частотній області Δf визначається так, щоб задовольняти умову $1/\Delta f \geq 2\tau_{\max}$, де $\tau_{\max} = \max(\tau_L - 1)$ – максимальна затримка вимірюного багатопроменевого каналу поширення радіохвиль. Наприклад, для додатків геолокації всередині приміщень інтервал вибірки частоти Δf зазвичай встановлюється рівним 1 МГц, що відповідає сценаріям додатків, в яких максимальна затримка τ_{\max} становить менше 500 нс або, що еквівалентно, максимальна довжина шляху поширення багатопроменевого сигналу становить менше 150 м. Таким чином, при смузі пропускання 20 МГц довжина однієї послідовності даних вимірювань становить 21, що дуже мало для точної оцінки матриці кореляції. В цьому випадку виникає низка проблем, і можна використовувати методи для підвищення продуктивності, коли оцінка кореляційної матриці використовується при реалізації методів надвисокої роздільної здатності.

2.4 Оцінка матриці кореляції з обмеженими даними вимірювань

Дані вимірів передбачаються стаціонарними. Таким чином, кореляційна матриця даних є ермітовою (сполучено-симетричною) і матрицею Теплиця (однакові елементи по всіх діагоналях). Однак оцінка кореляційної матриці $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$, заснована на даних вимірювань кінцевої довжини N , не є матрицею Теплиця.

Оцінку кореляційної матриці можна покращити, використовуючи наступну пряму-зворотну кореляційну матрицю (FBСМ):

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{(FB)} = \frac{1}{2}(\hat{\mathbf{R}}_{xx} + \mathcal{J}\hat{\mathbf{R}}_{xx}^*\mathcal{J}) \quad (2.12)$$

де верхній індекс позначає сполучення, верхній індекс позначає оцінку вперед-назад і $J \in L \times L$ обмінною матрицею, компоненти якої рівні нулю, за винятком одиниць на антидіагоналі. Легко показати, що $\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{(FB)}$ є персиметричною матрицею, тобто $\mathbf{J}\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{(FB)}\mathbf{J} = \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{(FB)*}$, та її елементи пов'язані симетрично щодо обох головних діагоналей. Цей метод широко використовується в спектральній оцінці під назвою «модифікований метод коваріації» [4], в лінійній оцінці сигналу методом найменших квадратів під назвою «пряма-зворотна лінійна предикація» [4] та в обробці сигналів решітки антени під назвою «модифікована попередня обробка просторового згладжування». [1]. Тут ми називаємо кореляційну матрицю (2.11) прямою кореляційною матрицею (FCM).

При розробці основних теорій ми припускали, що величина параметрів (2.1) постійна, а фаза є рівномірно розподіленою випадковою величиною, так що кореляційна матриця в (2.6) є повноранговою (несингулярною), але якщо фаза не випадкова, що справедливо, якщо при оцінці кореляційної матриці використовується лише один знімок даних вимірювань, ранг кореляційної матриці зменшується до одиниці і матриця стає сингулярною. У такій ситуації алгоритм MUSIC не працює належним чином, але для моделі сигналу (2.4) оцінка матриці кореляції даних з використанням (2.11) має ефект декореляції. Для методу прямої оцінки, виходячи з [3] для моделі з двома джерелами, коефіцієнт кореляції між α'_i і α'_j , тобто i -th і j -th елемент \mathbf{a} , може бути отриманий за допомогою виразу:

$$p_{ij}^{(FCM)} = \frac{A_{ij}}{\sqrt{A_{ii}A_{jj}}} = Ke^{-j\varphi}, \quad (2.13)$$

$$\text{де } K = \frac{\sin\left[M\pi\Delta f(\tau_i - \tau_j)\right]}{M \sin\left[\pi\Delta f(\tau_i - \tau_j)\right]},$$

$$\varphi = -(\Theta_i - \Theta_j) + 2\pi f_0(\tau_i - \tau_j) + \pi(M-1)\Delta f(\tau_i - \tau_j)$$

і A_{ij} є (i, j) -им елементом кореляційної матриці параметрів. Зазначено, що ефекти декореляції методу прямої оцінки залежить від кількості сегментів M , інтервалу частотної вибірки Δf і різниці часових затримок $(\tau_i - \tau_j)$. Так само коефіцієнт кореляції методу прямої та зворотної оцінки може бути отриманий як

$$\rho_{ij}^{(FBCM)} = K \cos\left(\varphi + \frac{\psi}{2}\right) e^{j\psi/2} \quad (2.14)$$

$$\text{де } \psi = 2\pi(L-1)\Delta f(\tau_i - \tau_j),$$

що залежить, крім того, від довжини відрізків L , різниці фаз параметрів $(\Theta_i - \Theta_j)$ та нижчої частоти спектра f_0 . Детальні висновки (13) та (14) можна визначити з виразів:

$$|\rho_{ij}^{(FBCM)}| = |\rho_{ij}^{(FCM)}| \times \cos\left(\varphi + \frac{\psi}{2}\right) \quad (2.15)$$

ми можемо ясно бачити, що FBCM має кращі ефекти декореляції, ніж FCM. Показані приклади ефектів декореляції в залежності від кількості сегментів, розрахованих за формулами (2.13) та (2.14) відповідно.

Виконаємо порівняння ефективності методів прямого та прямого і зворотного оцінювання за допомогою комп'ютерного моделювання. Якщо ми використовуємо лише один моментальний знімок даних вимірювань точок довжини N для оцінки ТОА, першим кроком є визначення значення L , для оцінки $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ як у (2.11). При великих значеннях L потенціал для більш високої роздільної здатності алгоритму MUSIC збільшується, що аналогічно обробці сигналів масиву, де збільшення L означає збільшення апертури подрешітки і,

таким чином, збільшення роздільної здатності [8]. З іншого боку, з виразу (2.11) видно, що при фіксованому значенні N значення M зменшується зі збільшенням L . Зменшення M збільшує флуктуації в матриці $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$, що призводить до великих обурень власних значень і EV у \mathbf{R}_{xx} і зменшує кількість когерентних α_k , які можуть бути виявлені [8]. Отже, значення L необхідно вибирати так, щоб воно забезпечувало баланс між роздільною здатністю та стійкістю алгоритму. У літературі використовувалися різні значення L ; наприклад, [8] використовував $N/2$ і $N/3$, [9] використовував $3N/4$ і прийняв $3N/5$. У роботі ми використовуємо значення $2N/3$, що було визначено за допомогою комп'ютерного моделювання.

Ще одним параметром, який необхідно визначити при використанні методу надвисокої роздільної здатності, є кількість компонентів багатопроменевості L_p . Якщо справжня кореляційна матриця \mathbf{R}_{xx} доступна, її L_p можна легко визначити, спостерігаючи за власними значеннями кореляційної матриці, оскільки теоретично всі $L - L_p$ найменші власні значення рівні, а всі інші власні значення більше, але на практиці, особливо коли кореляційна матриця оцінюється за обмеженою кількістю вибірок даних, всі власні значення шуму різні, що ускладнює чітке розрізнення власних значень сигналу та власних значень шуму. У [3] до цієї проблеми застосовуються теоретико-інформаційні критерії для вибору моделі, включаючи теоретико-інформаційні критерії Акаїки та критерії мінімальної дескриптивної довжини (MDL) Рісанена. У цій статті використовується критерій MDL для оцінки, який визначається з виразу:

$$MDL(k) = -\lg \left(\frac{\prod_{i=k}^{L-1} \lambda_i^{1/(L-k)}}{\frac{1}{L-k} \sum_{i=k}^{L-1} \lambda_i} \right) + \frac{1}{2} k(2L-k) \lg M \quad (2.16)$$

де λ_i , $0 \leq i \leq L-1$ - Власні значення кореляційної матриці в порядку зменшення. Оцінка L_p визначається у вигляді значення $k \in [0, L-1]$ у випадку, якщо MDL мінімізується.

У [4] було показано, що при використанні методу прямо-зворотного оцінювання критерії MDL (2.16) не можуть застосовуватися безпосередньо, і другий член критеріїв повинен бути змінений на $(1/4)k(2L-k+1)\lg M$.

2.5 Метод власних векторів

Одним із неявних припущень у методі MUSIC є те, що всі власні значення шуму рівні, тобто $\lambda_k = \sigma_w^2$ для $L_p \leq k \leq L-1$, тобто шум є білим. Однак, як ми щойно обговорювали, коли на практиці кореляційна матриця оцінюється з обмеженої кількості вибірок даних, власні значення шуму не є рівними.

Невелика варіація алгоритму MUSIC, відома як метод EV, може бути використана для врахування потенційно різних власних значень шуму [4], [25]. Псевдоспектр алгоритму EV визначається за допомогою виразу:

$$S_{EV}(\tau) = \frac{1}{\sum_{k=L_p}^{L-1} \frac{1}{\lambda_k} |q_k^H v(\tau)|^2}, \quad (2.17)$$

де λ_k , $L_p \leq k \leq L-1$ – власні значення шуму. По суті, псевдоспектр кожного EV нормалізується його відповідним власним значенням. Якщо власні значення шуму рівні, методи EV і методи MUSIC є ідентичними. Ефективність методів MUSIC і EV порівнювалася в [5], і було показано, що метод EV менш чутливий до неточної оцінки параметра L_p , що є дуже бажаним у практичній реалізації. Комп'ютерне моделювання показало, що ефективність методу EV є дещо кращою, ніж метод MUSIC. Проведемо дослідження методів різноманітності, які

можна використовувати для подальшого покращення продуктивності методів оцінки часу прибуття пакету (ТОВА) із високою роздільною здатністю.

Методи рознесення, такі як часове рознесення, просторове рознесення та частотне рознесення, широко використовуються в системах бездротового зв'язку для покращення продуктивності зв'язку [1], [3].

Методи рознесення використовують переваги каналу розповсюдження радіохвиль шляхом пошуку та комбінування некорельованих шляхів сигналу випадкового характеру. По суті, усі методи рознесення, що використовуються для систем бездротового зв'язку, можуть бути використані для систем оцінки ТОВА із загальною структурою, де система рознесення має розгалуження. ТОВА оцінюється незалежно в кожній гілці рознесеного приймача, а потім використовується алгоритм об'єднання для обробки оцінок ТОВА з усіх гілок для отримання оптимальної оцінки. Різноманітність різних алгоритмів об'єднання може бути розроблено для різних методів різноманітності. Найпростішим є алгоритм об'єднання з рівним підсиленням:

$$\hat{\tau}_0 = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \hat{\tau}_0^{(k)} \quad (2.18)$$

У деяких випадках також можливе більш складне комбінування змінного підсилення, де оцінка кожної гілки рознесеності зважується за допомогою коефіцієнта, який відображає якість оцінки часової затримки на кожній гілці.

Для методів оцінки ТОВА з високою роздільною здатністю, наведених у цьому документі, також можна застосувати методи рознесення. Замість комбінування незалежних оцінок затримки часу, дані вимірювань на гілках рознесення об'єднуються для оцінити кореляційну матрицю за допомогою (10). У техніках оцінки ТОВА із високою роздільною здатністю основне обчислювальне навантаження полягає в аналізі власних значень, тобто обчисленні власних значень і EV кореляційної матриці. У результаті CMDCS перевершує GDCS в

обчислювальному плані, оскільки схема CMDCS виконує аналіз власних значень один раз, але схема GDCS має виконувати незалежний аналіз власних значень.

З іншого боку, застосовуючи схему CMDCS, основне припущення щодо каналу розповсюдження радіосигналу полягає в тому, що загасання амплітуди та час затримки для кожного шляху, а також кількість шляхів сигналу однакові від передавача до всіх рознесених гілок приймача. Це обмежує CMDCS лише квазістаціонарними сценаріями, де канал залишається незмінним, поки збираються дані вимірювання рознесеності. Це є одним із недоліків схеми CMDCS порівняно зі схемою GDCS, яка не має такого обмеження у застосуванні. Ця умова застосовності також ускладнює використання CMDCS для космічного рознесення, оскільки в ситуаціях космічного рознесення канал поширення радіохвиль від передавача до рознесених гілок приймача, швидше за все, не є однаковим. Так само CMDCS не підходить для часового рознесення.

Ми розглядаємо базову станцію (БС) N_{BS} , розташовані у фіксованих відомих положеннях, та мобільну станцію (МС) з невідомим положенням. МС рухається довільною траєкторією з (як правило, непостійною) швидкістю, яка вимірюється за допомогою інерційного датчика (як правило, є в автомобілі або смартфоні). Таким чином, ми припускатимемо на етапі проектування, що швидкості відомі, але при реалізації будуть використовуватися (зашумлені) виміри.

Положення b -ї БС та МС у момент часу t позначаються через $p_{BS}^b = [x_{BS}^b \ y_{BS}^b]^T$ та $p(t) = [x(t) \ y(t)]^T$ (де T - оператор транспонування), відповідно, де $b \in B$ та $B = \{1, 2, K, N_{BS}\}$ - множина однозначних ідентифікаторів базових станцій. Як уже згадувалося, на відміну від інших систем локалізації, БС призначені тільки для передачі (з однією, як правило, всепрямованою антеною), в той час як МС призначена тільки для прийому та оснащена однорідними лінійними антенами ґратами (ULA) з M -елементами. Зокрема кожна БС передає сигнал з поданням основної смуги частот $s(t) = \sum_h c_h g(t - hT)$, де $g(\cdot)$ позначає

сигнальний імпульс з піднятим косинусом (RRCR), відомий приймачеві, $c_h s$ символи, що передаються, а $B = (1 + \alpha_{RRCR}) / 2T$ - одностороння смуга пропускання з коефіцієнт спаду $\alpha_{RRCR} \in [0,1]$. Зверніть увагу, що висновки можна застосувати також до зворотної ситуації, в якій MS передає, а BS приймає; це, однак, менш привабливо, оскільки вимагає додаткових механізмів для координації збору даних, включаючи синхронізацію BS, як було обговорено.

MS, що виконує алгоритм локалізації, збирає та обробляє зустрічні сигнали, що надходять від передавальних БС, що знаходяться поблизу (передбачається, що вони знаходяться в далекому полі). Більш конкретно, нехай $p_0 = [x_0 \ y_0]^T = p(t_0)$ - (Невідоме) положення МС в момент часу t_0 , коли починається процедура локалізації. Більше того, нехай $t_i, i > 0$ – момент часу, коли було прийнято сигнал, переданий однією з БС; позначимо через $b_i \in B$ ідентифікатор такої БС. Оскільки існує відповідність між i -им прийнятим сигналом і передаючою базовою станцією b_i , надалі ми будемо використовувати тільки t_i , опускаючи b_i з позначень. Що стосується багатопроменевого каналу, ми припускаємо, що (i) T набагато більше, ніж розкид затримки каналу τ_s , тому канал демонструє постійну комплексну характеристику підсилення; (ii) B набагато більше, ніж доплерівське розширення каналу B_D , викликане рухливістю MS, тому можна припустити, що характеристика каналу залежить від часу протягом дрібномасштабного періоду спостереження T_{obs} . Результируючий прийнятий сигнал загальний інтервал часу $[t_i, t_i + T_{obs}]$ після понижуючого перетворення може бути виражено відновлення зміщення тактової частоти та частоти/фази у відповідності з виразом:

$$x(t) = \gamma_i (x_i^{LOS} + x_i^{NLOS}) s(t) + n(t), \quad (2.19)$$

де $t_i \leq t \leq t_i + T_{obs}$

$$x_i^{LOS} = \alpha(\Theta_i^{LOS}) \quad (2.20)$$

$$x_i^{NLOS} = \sum_{m=1}^D \beta_i^m \alpha(\Theta_i^m) \quad (2.21)$$

де $n(t)$ - тепловий шум, а $\alpha(\Theta)$ - Керуючий вектор, що представляє відгук масиву на сигнал, що потрапляє під кутом Θ . Що стосується γ_i і Θ_i^{LOS} , то вони є коефіцієнтом комплексної амплітуди, пов'язаний з великомасштабним завмиранням (або втратами на трасі) і УА траси LOS в момент часу t_i відповідно, тоді як β_i^m і Θ_i^m є комплексні малі завмирання. масштабний коефіцієнт завмирань і кут атаки m -го багатопроменевого компонента поза трас D_i поза прямою видимістю (NLOS). Значення D_i може змінюватися у кожний момент часу t_i і зазвичай невідомо; надалі ми припускаємо фіксований розрахунковий параметр D_{\max} , який може бути встановлений (навіть консервативним чином) на основі попередніх міркувань і, отже, зазвичай відрізняється від фактичного D_i , де D_i в сигналах, що генеруються, не відповідають фіксованому розрахунковому значенню D_{\max} , пропонується підхід стійкий до неправильного знання таких параметрів.

Варто підкреслити, що наведена вище модель описує багатопроменевий канал з ефектами плоского та повільного завмирання. Зверніть увагу, що $T \gg \tau_s$ рівнозначно нехтування затримками $\tau_i^m s$, пов'язаними з шляхами D_i NLOS, тобто $s(t - \tau_i^m) \approx s(t) \forall m$, тоді як В? B_D гарантує, що комплексні коефіцієнти $\beta_i^m s$ не змінюються у період спостереження T_{obs} . Також передбачається, що T_{obs} досить короткий, щоб положення та швидкість МС залишалися приблизно постійними, тобто геометрія багатопроменевої з точки зору Θ_i^{LOS} і $\Theta_i^m s$ не змінилася. Як параметри В та T_{obs} буде обговорюватися в чисельному аналізі, де розглядається реалістичний сценарій локалізації МС у багатопроменевих середовищах.

Для $n(t)$ ми розглядаємо класичну білу нормальну комплексну модель. Більш того, якщо припустити, що ULA з ізотропними антенами (і без взаємного зв'язку), вектор управління дорівнює

$$\alpha(\Theta) = \left[1 \ e^{j\omega d \sin\Theta} \ \mathbf{K} \ e^{j(M-1)\omega d \sin\Theta} \right]^T \quad (2.22)$$

де $\omega = 2\pi / \lambda$ представляє число падаючої хвилі, $\lambda = c / f_c$ - довжина хвилі несучої, f_c - частота несучої, c - швидкість світла, а $d = \lambda / 2$ - відстань між елементами ULA. Діаграма спрямованості ULA має симетрію обертання щодо лінії, де розташовані антени; як наслідок, кути поза $(-\pi/2, \pi/2)$ так чи інакше «бачаться» як такі, що належать такому інтервалу, зокрема, як відповідний симетричний кут щодо лінії решітки. Хоча це вносить невід'ємну неоднозначність оцінки АОА, ми покажемо, що пропонуваний підхід долає обмеження напівплощини ULA завдяки правильно розробленому механізму асоціації.

У приймачі $x(t)$ проходить через узгоджений фільтр.

$$y(t) = \int_{t_i}^{t_i+T} g^*(\tau - t) x(\tau) d\tau \quad (2.23)$$

де $*$ - комплексно-спряжений оператор), вихідний сигнал якого потім дискретизується з частотою $f_s = 1/T$, що призводить до наступної послідовності отриманих вибірок

$$y_{i,n} = \mathcal{Y}_i(x_i^{LOS} + x_i^{NLOS})c_{i,n} + v_{i,n}, \quad n=0, \mathbf{K}, N-1 \quad (2.24)$$

де $N = \frac{T_{obs}}{T}$ - кількість відліків, $c_{i,n}$.

Ми припускаємо, що символи відомі приймачеві, який зазвичай виходить при розгляді першої частини передачі, де відома послідовність, що навчає, вставляється для оцінки каналу і цілей синхронізації.

Для MS у певний момент часу та даної БС забезпечує зв'язок між абсолютними положеннями в системі відліку x_u і відповідним кутом, який, таким чином, виражається в тій же системі відліку, що і число $(-\pi/2, \pi/2)$.

Варто відзначити, що антенну решітку можна переналаштувати на таку глобальну систему відліку, враховуючи в кожний момент часу ті повороти, що дорівнює вектору курсу, отриманому з вимірюваної швидкості $v(t_i)$. Для досить високої швидкості передачі БС (наприклад, RBS 10 Гц) розумно припустити, що інтервал між будь-якими двома послідовними спостереженнями відносно короткий (100 мс).

На відміну від більшості сучасних рішень, заснованих на одному знімку середовища, наш підхід додає до процедури локалізації ще один вимір, а саме зміна часу. Таким чином, хоча може знадобитися оцінка більшої кількості невідомих параметрів, кожен зібраний Y_i приносить нову інформацію про місцезнаходження, яка може допомогти MS відновити її найімовірнішу траєкторію з часом.

Висновки до другого розділу

Ми використовували способи спектральної оцінки надвисокої роздільної здатності до вимірюваної частотної характеристики каналу, щоб точно оцінити час прибуття (TOA) для геолокації додатків всередині приміщень. Результати показують, що методи надвисокої роздільної здатності можуть значно підвищити ефективність оцінки TOA порівняно з традиційними методами, включаючи прямі методи взаємної кореляції на основі сигналів IFT та DSSS. Показано, що ряд методів може ще більше підвищити продуктивність методів надвисокої роздільної здатності, включаючи метод EV, пряме та зворотне оцінювання кореляційної матриці, часове та частотне рознесення. Для часового рознесення краща схема з урахуванням кореляційної матриці. Іншим важливим чинником, що впливає на ефективність оцінки TOA, є смуга пропускання сигналу. Для всіх методів продуктивність покращується зі збільшенням смуги пропускання сигналу. З іншого боку, зі зростанням пропускну здатності різниця у продуктивності між різними методами стає менше. Крім того, слід зазначити, що через можливість наявності умов NLOS між передавачем і приймачем використання методів надвисокої роздільної здатності та широкої смуги пропускання не може усунути великих помилок вимірювання дальності в деяких місцях.

3 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗА СТАНДАРТОМ IEEE 802.11az

3.1 Позичіонування на основі оцінки часу прибуття

Розглянемо, яким чином можна оцінити місце знаходження мобільної станції (STA) у середовищі з багатопрореневим поширенням за допомогою алгоритму позиціонування на основі часу прибуття (на основі ToA), визначеного в стандарті IEEE 802.11az для Wi-Fi. Приклад оцінює ToA за допомогою підходу з надвисокою роздільною здатністю множинної класифікації сигналів (MUSIC), а потім оцінює двовимірне положення мобільної станції за допомогою трилатерації. Потім приклад оцінює і порівнює продуктивність алгоритму позиціонування у кількох точках відношення сигнал-шум (SNR).

Стандарт 802.11az [1], який називають позиціонуванням наступного покоління (NGP), дозволяє мобільній станції (STA) ідентифікувати своє положення щодо кількох точок доступу (AP). Цей стандарт підтримує два формати блоку даних протоколу (PPDU) високоефективного (HE) діапазону фізичного рівня (PHY):

- порожній пакет даних високо ефективного діапазону (HE) (NDP);
- пакет нульових даних діапазону високої ефективності на основі тригера;

Пакет нульових даних високоефективного діапазону та високоефективний пакет нульових даних ранжирування на основі тригера є відповідними аналогами високоефективного зондувального нульового пакета даних і високоефективного тригерного пакета нульових даних зі зворотним зв'язком. Формати блоків даних фізичного протоколу, як визначено у стандарті 802.11ax.

Високоефективний (HE) ранжований нульовий пакет даних (NDP)

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ					
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Пристрій позиціонування Wi-Fi Модель каналу зв'язку Пояснювальна записка			Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив	Крижовий М.								46	
Перевірив	Бойко Ю.М									
Н. контр.	Стецюк В.І.							ХНУ, гр. ТР2с-20-1		
Затв.	Підченко С.К									

підтримує позиціонування одного або кількох користувачів з додатковою послідовністю довгого навчального поля HE (HE-LTF). Сигнал дальності HE для одного користувача містить символи HE-LTF для одного користувача, які підтримують додаткову безпечну послідовність HE-LTF. Розрахована на багато користувачів форма сигналу дальності HE дозволяє використовувати тільки безпечні символи HE-LTF для декількох користувачів. Для підвищення точності оцінки положення однокористувацькі та розраховані на багато користувачів сигнали можуть містити кілька повторень символів HE-LTF. Для параметризації та генерування порожнього пакету даних діапазону з високою роздільною здатністю.

Проведена імітація мережі за стандартом 802.11az, що складається з STA та кількох точок доступу. Для оцінки положення STA мережі потрібно як мінімум три точки доступу. Приклад імітує обмін вимірами дальності кожної пари STA-AP, потім відбувається трилатерація положення STA за допомогою цих вимірів. Симуляція повторюється для кількох ітерацій та відношення сигнал-шум (SNR).

Розглянемо пакетну передачу та приймання. На рис. 3.1 показано обробку для кожного каналу мобільна станція – точка доступу.



Рисунок 3.1 – Структурна схема обробки каналу мобільна станція – точка доступу (ВДТП – високоефективне довге тренувальне поле)

Відбувається обмін вимірюваннями між мобільною станцією (STA) та точкою доступу (AP), виконуючи наступні кроки:

1. Генерація діапазону нульового пакету даних (NDP)

2. Затримка нульового пакету даних (NDP) відповідно до випадково згенерованої відстані між мобільною станцією і точкою доступу, додаванням дробової і цілочисленної затримки вибірки

3. Пропустіть сигнал через внутрішній канал зв'язку TGax. Надається можливість моделювати різні реалізації каналу зв'язку для різних пакетів.

4. Додайте адитивний білий гаусовий шум (AWGN) до отриманого сигналу. Використовується однакове відношення сигнал-шум (SNR) для всіх з'єднань між мобільною станцією (STA) і точками доступу.

5. Виконайте синхронізацію та корекцію частоти отриманого сигналу

6. Демодулюйте високоефективне довге навчальне поле (HE-LTF)

7. Оцініть частотну характеристику каналу від HE-LTF

8. Оцініть відстань за допомогою алгоритму надвисокої роздільної здатності класифікації множинних сигналів (MUSIC – multiple signal classification).

9. Поєднайте оцінки відстані від інших пар STA-AP та виконайте трилатерацію положення мобільної станції (STA)

3.2 Визначення діапазону відстаней

Приклад вимірює діапазон відстані між мобільною станцією і кожною точкою доступу шляхом захоплення часових міток порожнього пакету даних (NDP) – рис. 3.2. Мобільна станція записує час t_1 (UL ToD – Time of Departures – час відправлення висхідної лінії зв'язку), яким він передає NDP висхідної лінії зв'язку (UL NDP). Потім точка доступу фіксує час t_2 (UL ToA – Time of Arrival – час прибуття висхідної лінії зв'язку), який він отримує UL NDP (null data packet) і записує час t_3 (DL ToD – час відправлення низхідної лінії зв'язку), яким він передає NDP по низхідній лінії зв'язку (DL NDP (null data packet)). Потім STA фіксує час t_4 (DL ToA – час прибуття низхідної лінії зв'язку), де він отримує

пустий пакет даних низхідної лінії зв'язку (DL NDP). Ця діаграма ілюструє фазу зондування вимірювань між мобільною станцією та однією точкою доступу [1].

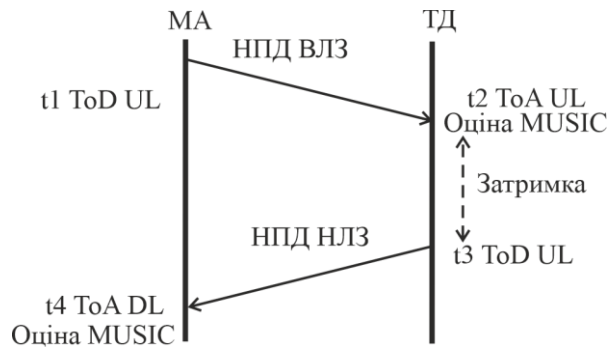


Рисунок 3.2 – Схематичне позначення діапазону відстаней (МА – мобільний абонент; ТД – точка доступу; НПД ВЛЗ – пустий пакет даних висхідної лінії зв'язку; НПД НЛЗ – пустий пакет даних низхідної лінії зв'язку)

Вираз, який оцінює T_{RTT} час прийому-передачі (RTT) шляхом поєднання цих міток часу.

$$T_{RTT} = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)$$

Приклад потім обчислює відстань d між мобільною станцією (STA) і точкою доступу (AP) за допомогою цього рівняння.

$$d = \frac{T_{RTT}}{2} \cdot c, \text{ де } c - \text{швидкість світла}$$

Приклад оцінює час t_2 і t_4 за допомогою високої роздільної здатності MUSIC. Щоб визначити ці оцінки, необхідно виконати наступні кроки:

- Інтерполювати за відсутніми піднесучими з частотної характеристики каналу (CFR), припускаючи однаковий інтервал між піднесучими.
- Оцінити матрицю кореляції CFR

- Декорелювати багатопроменеве приймання за допомогою просторового згладжування

- Поліпшити оцінку матриці кореляції, виконавши усереднення вперед-назад. У прикладі передбачається, що оцінки CFR з декількох просторових потоків є різними миттєвими знімками CFR, і всі ці моментальні знімки використовуються для оцінки кореляції матриці.

- Запустіть алгоритм MUSIC. Виконайте власне спектральне розкладання кореляційної матриці, щоб поділити її на сигнальні та шумові підпростори. Оцініть профіль затримки в часовій області, знайшовши всі екземпляри, де підпростор сигналу і шуму ортогональні.

- Визначте оцінку часу прибуття, знайшовши перший пік відновлених множинних шляхів у профілі затримки, який, як передбачається, є шляхом прямої видимості (DLOS).

Проаналізуємо канал зв'язку.

Канал зв'язку WlanTGaxChannel фільтрує вхідний сигнал через внутрішній канал MIMO 802.11ax (TGax), дотримуючись підходу до моделювання MIMO.

Обробка завмирань передбачає однакові параметри всіх каналів NT-by-NR каналу TGax, де NT — кількість передаючих антен, а NR — кількість приймальних антен у приймально-передавальному тракті.

Канал зв'язку має наступну передаточну характеристику (рис. 3.3).

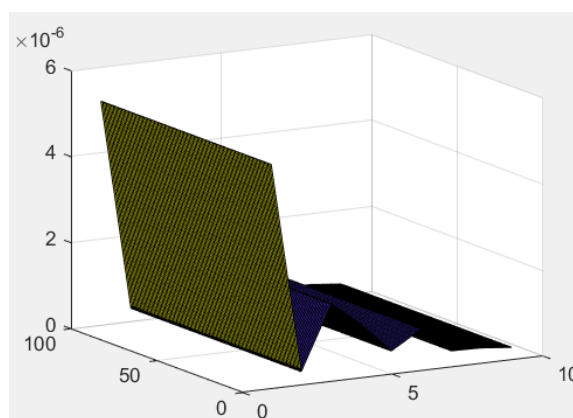


Рисунок 3.3 – Передаточна характеристика каналу зв'язку

Для знаходження профіля затримок була визначена імпульсна характеристика каналу зв'язку, що приведена на рисунку 3.4.

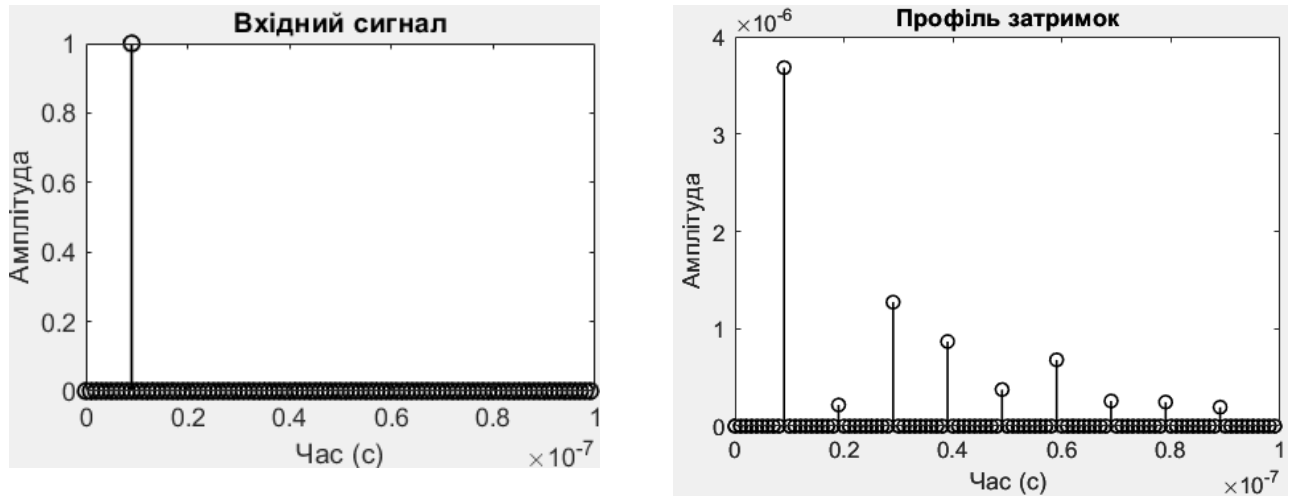


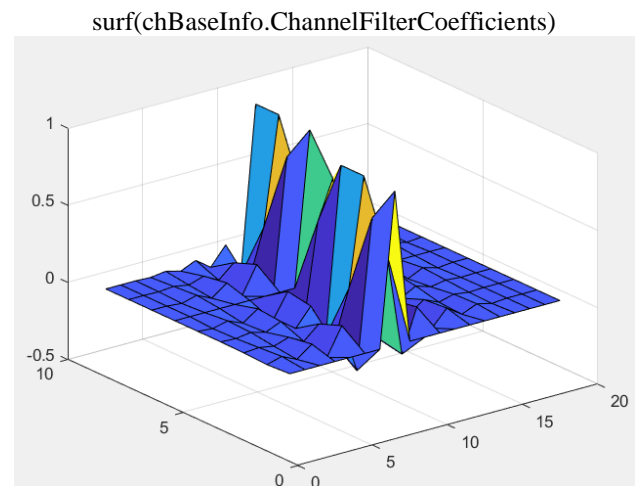
Рисунок 3.4 – Імпульсна характеристика каналу зв'язку

Канал зв'язку wlanTGaxChannel має наступні властивості (рис. 3.5):

```

SampleRate: 1.0000e+09
DelayProfile: 'Model-B'
ChannelBandwidth: 'CBW20'
CarrierFrequency: 5.2500e+09
EnvironmentalSpeed: 0.0890
TransmitReceiveDistance: 3
NormalizePathGains: true
    UserIndex: 0
TransmissionDirection: 'Downlink'
    NumTransmitAntennas: 4
TransmitAntennaSpacing: 0.5000
    NumReceiveAntennas: 2
ReceiveAntennaSpacing: 0.5000
LargeScaleFadingEffect: 'Pathloss'
    NumPenetratedFloors: 4
    NumPenetratedWalls: 0
WallPenetrationLoss: 5
NormalizeChannelOutputs: true
ChannelFiltering: true
    
```

а)



б)

Рисунок 3.5 – Властивості каналу зв'язку (а). Тривимірна характеристика коефіцієнтів каналу зв'язку (б)

Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата

Оцінка каналу зв'язку виконується програмно має наступну характеристику, приведену на рисунку 3.6.

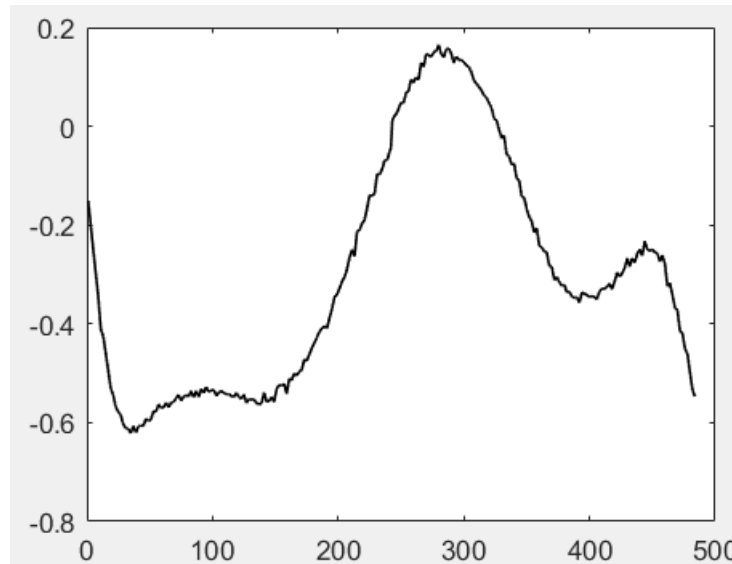


Рисунок 3.6 – Оцінка каналу зв'язку

Наступна діаграма ілюструє процес виміру відстані за алгоритмом MUSIC з надвисокою роздільною здатністю приведена на рисунку 3.7

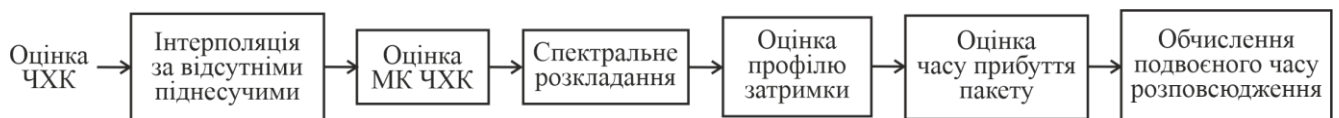


Рисунок 3.7 – Вимір відстані за алгоритмом MUSIC з надвисокою роздільною здатністю

На графіку рис. 3.8 порівнюється справжній профіль затримки при багатопробному поширенні та передбачуваний профіль затримки множинної класифікації сигналів (MUSIC) для моделювання каналу 802.11az, який називають позиціонуванням наступного покоління. Цей стандарт забезпечує покращення позиціонування для частот нижче 6 ГГц та міліметрових хвиль, висока точність

може бути отримана тільки в останньому діапазоні завдяки інформації про формування променя, доступної під час роботи міліметрових хвиль.

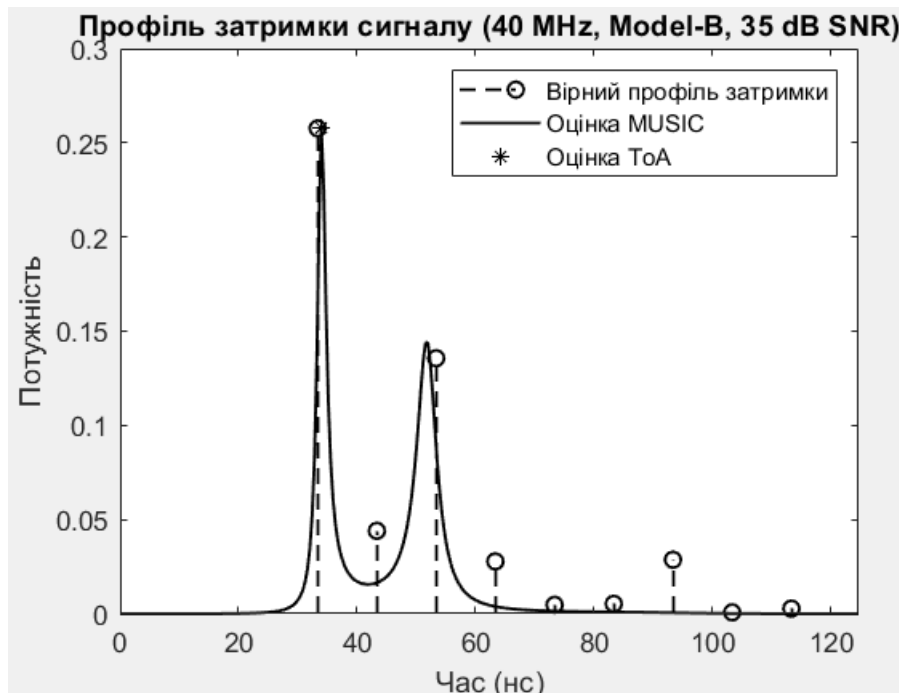


Рисунок 3.8 – Оцінка каналу зв'язку

3.3 Визначення помилок позиціонування

Виконаємо ранжування та позиціонування для кількох ітерацій та точок SNR. На кожній ітерації точка доступу (AP) і мобільна станція (STA) обмінюються кількома пакетами висхідної та низхідної ліній зв'язку. Оцінимо помилку ранжування між AP та STA для кожної ітерації шляхом порівняння розрахункової відстані між AP та STA з відомою відстанню.

Вкажіть кількість ітерацій, точок SNR та точок доступу в мережах. Для оцінки положення STA мережі потрібно як мінімум три точки доступу. Для кожної ітерації використовуйте інший випадковий набір позицій AP, іншу реалізацію каналу та інший профіль AWGN. У прикладі генерується кумулятивна

функція розподілу (CDF) для абсолютної помилки вибору діапазону за допомогою вимірювань діапазону всіх ітерацій і всіх пар STA-AP.

Розглянемо конфігурацію сигналу 802.11az. Налаштуємо генератори сигналів для кожної точки доступу та STA. Налаштуємо параметри високоефективного (HE) ранжування нульового пакета даних (NDP) положення станції (STA). Налаштуємо параметри NDP високоефективного діапазону для точок доступу. Розглянемо конфігурацію каналу.

Налаштуємо багатопроменевий канал зв'язку WLAN TGax за допомогою системного об'єкта wlanTGaxChannel. Цей Системний об'єкт може генерувати канал з домінуючим прямим шляхом, в якому шлях DLOS є найсильнішим шляхом, або канал з прямим домінуванням, для якого шлях DLOS присутній, але не є найсильнішим шляхом. Отримаємо розраховану затримку фільтра каналу та кількість шляхів розповсюдження сигналу.

Проведемо визначення діапазону за симуляцією ранжування з кількома ітераціями всіх пар STA-AP. Середня абсолютна помилка ранжирування (MAE) та CDF помилки ранжирування для кожної точки SNR приведено на рисунку 3.9.

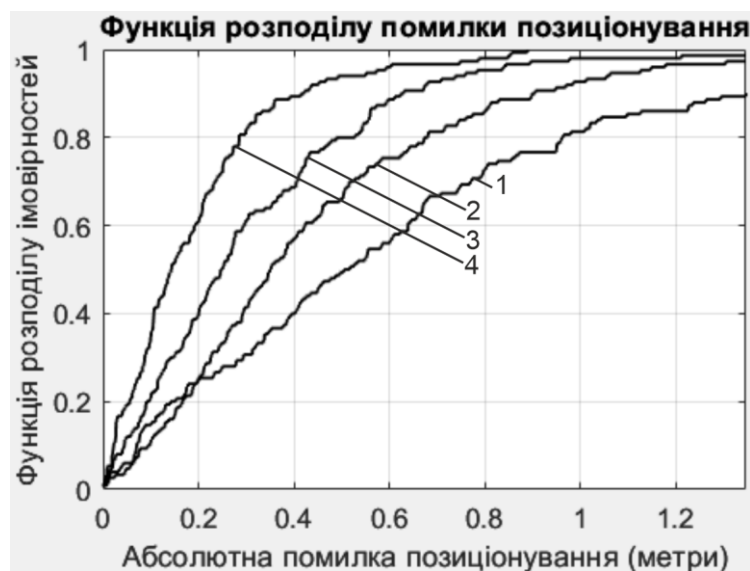


Рисунок 3.9 – Залежність функції розподілу імовірностей від абсолютної помилки позиціонування для 50 ітерацій (1 – SNR=10 дБ; 2 – SNR=20 дБ; 3 – SNR=30 дБ; 4 – SNR=40 дБ;)

Проведемо трилатерацію розташування мобільної станції (STA) у двох вимірах за допомогою оцінок відстані, потім обчислення середньоквадратичної помилки позиціонування (RMSE) для кожної ітерації за допомогою оцінки мобільної станції (STA). Середнє значення RMSE та його CDF для кожної точки SNR приведено на рисунку 3.10.

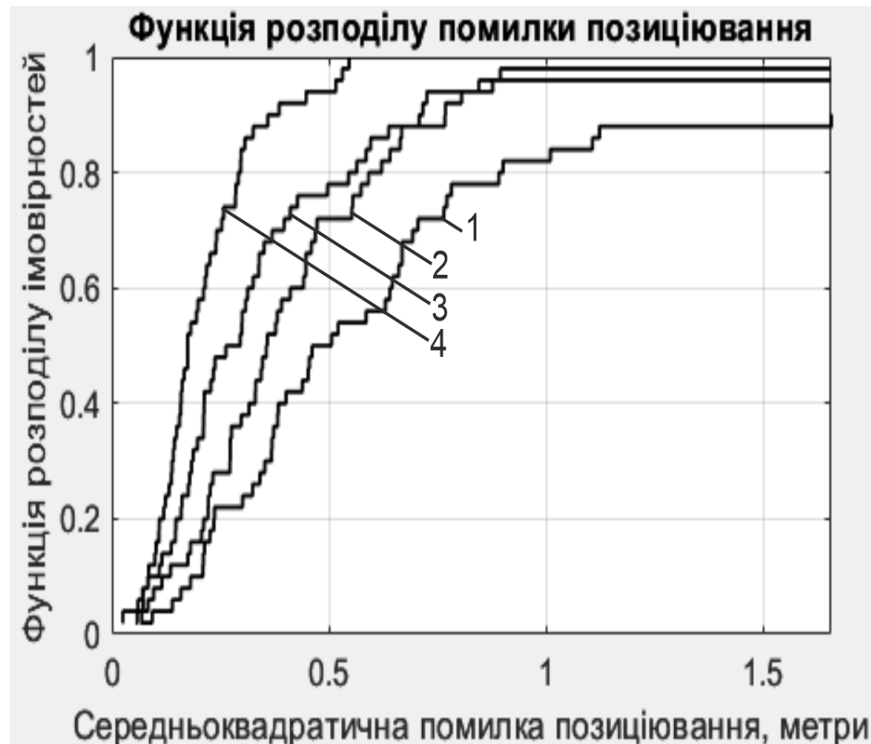


Рисунок 3.10 – Залежність функції розподілу імовірностей від середньоквадратичної помилки позиціонування (1 – SNR=10 дБ; 2 – SNR=20 дБ; 3 – SNR=30 дБ; 4 – SNR=40 дБ;)

Побудуємо результат оцінки розташування та кола трилатерації останньої ітерації, що приведено на рисунку 3.11.

Стандарт передбачає, що реалізації mmWave 802.11az дозволяють досягти помилок позиціонування менше 10 см.

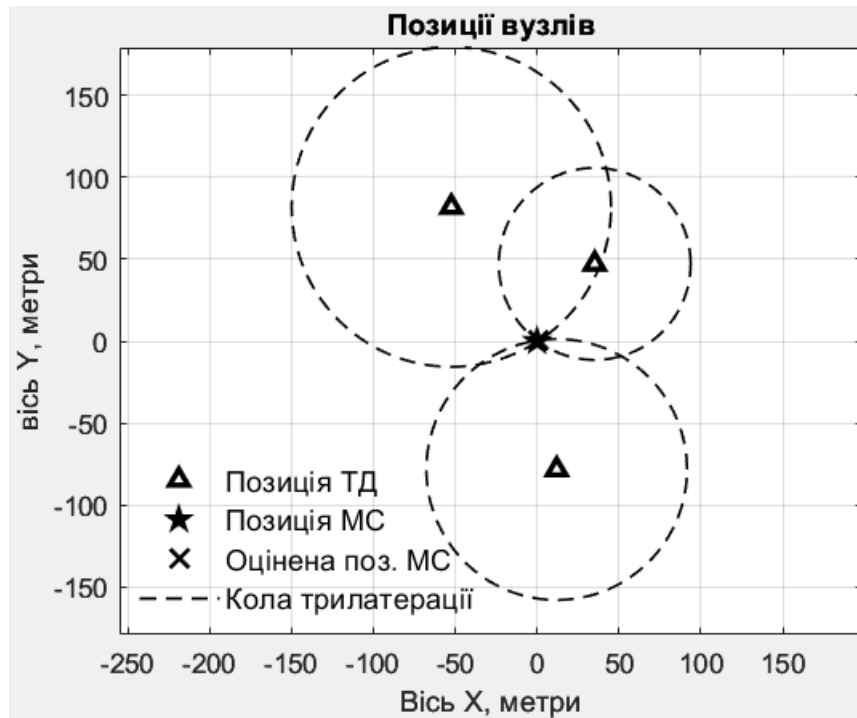


Рисунок 3.11 – Порівняння справжнього профілю затримки та оціненого профілю затримки за алгоритмом MUSIC

Крім SNR, на ефективність позиціонування впливають кілька важливих параметрів, таких як повторення HE-LTF (high-efficiency (HE) long training field (LTF)), кількість просторових потоків, більш висока пропускна здатність і профілі затримки каналу. На цьому малюнку показано вплив повторень HE-LTF на характеристики вимірювання місця розташування мобільного абонента. Щоб згенерувати цей малюнок, запусіть більш тривале моделювання з трьома випадково розміщеними точками доступу і 4000 ітерацій для Model-B 2×2 MIMO з частотою 20 МГц і відношенням сигнал-шум 20 дБ. На рисунку 3.12 показано, що помилка визначення дальності зменшується зі збільшенням числа повторень HE-LTF. Це зниження відбувається тому, що повторення HE-LTF ефективно зменшують шум CFR за рахунок усереднення декількох оцінок CFR.

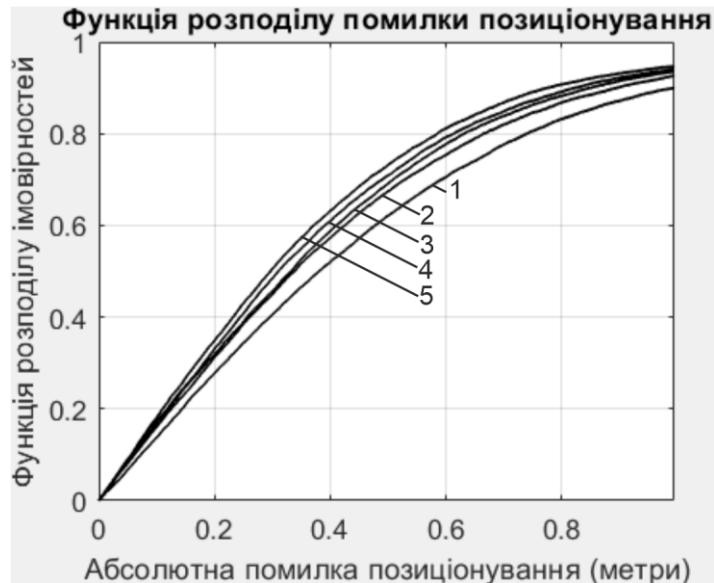


Рисунок 3.12 – Залежність функції розподілу імовірностей від абсолютної помилки позиціонування (1 – 1 HE-LTF; 2 – 2 HE-LTF; 3 – 3 HE-LTF; 4 – 4 HE-LTF; 5 – 5 HE-LTF;)

На рисунку 3.13 показано вплив різних конфігурацій MIMO на продуктивність діапазону.

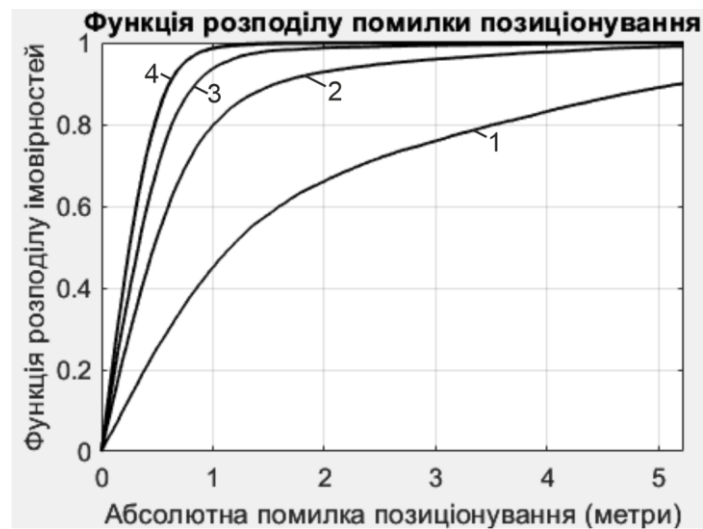


Рисунок 3.13 – Залежність функції розподілу імовірностей від абсолютної помилки позиціонування для різної кількості передаючих і приймаючих антен (1 – 1X1; 2 – 2 X2; 3 – 2X3; 4 – 3X3;)

Щоб згенерувати цей рисунок, необхідно запустити тривалішу симуляцію з трьома випадково розміщеними точками доступу і 4000 ітерацій, генеруючи пакети визначення дальності з трьома повтореннями HE-LTF на частоті 20 МГц і визначаючи канал моделі В з відношенням сигнал-шум 20 дБ. На рисунку показано, що помилка визначення дальності зменшується зі змінами MIMO вищого порядку. Це зниження відбувається через те, що конфігурації MIMO вищого порядку створюють більше моментальних знімків CFR з різних доступних просторових потоків. Більше знімків CFR дає найкращу оцінку матриці кореляції, яка дає найкращі оцінки ToA та відстані.

Функція розподілу в теорії ймовірностей (CDF) — функція, що характеризує розподіл випадкової величини або випадкового вектора; ймовірність того, що випадкова величина X прийме значення, яке менше x , де x — довільне дійсне число. Це повністю визначає випадкову величину.

Кумулятивна функція розподілу використовується для опису розподілу ймовірностей випадкових величин.

Кумулятивна функція розподілу (cdf) дає ймовірність того, що випадкова величина X менша або дорівнює x , і зазвичай позначається $F(x)$. Кумулятивна функція розподілу випадкової величини X - це функція, задана виразом:

$$F(x) = P[X \leq x]$$

пропозиція

Нехай X є випадковою величиною з кумулятивною функцією розподілу $F(x)$, тоді

$$P[a < X \leq b] = F(b) - F(a)$$

Кумулятивна функція розподілу безперервної випадкової величини

Нехай X - безперервна випадкова змінна з густиною розподілу $f(x)$

Тоді кумулятивна функція розподілу визначається виразом:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$$

Функція `rtmusic` реалізує алгоритм класифікації множинних сигналів (MUSIC) і повертає S , оцінку псевдоспектру вхідного сигналу x і вектор w_0 нормалізованих частот (у рад/відлік), на якому оцінюється псевдоспектр. Ви можете вказати розмірність підпростору сигналу за допомогою вхідного аргументу p . На рисунку 3.14 приведена залежність середньої абсолютної помилки позиціонування від відношення сигнал-шум

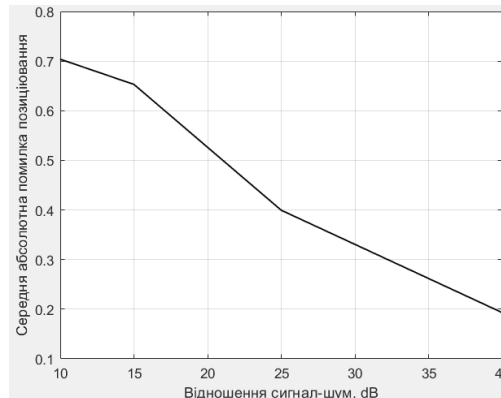


Рисунок 3.14 – Залежність середньої абсолютної помилки позиціонування від відношення сигнал-шум

На рисунку 3.15 приведена залежність середньоквадратичної помилки позиціонування від відношення сигнал-шум.

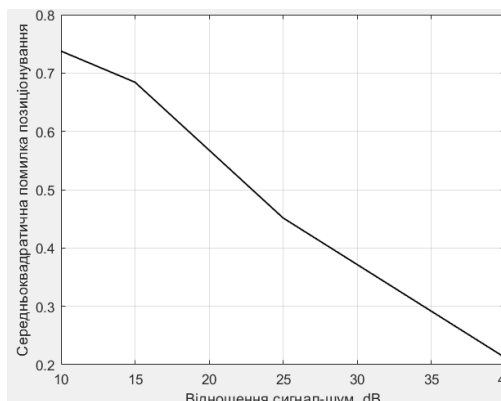


Рисунок 3.15 – Залежність середньоквадратичної помилки позиціонування від відношення сигнал-шум

Функція `heRangingCorrelationMatrixEstimate` оцінює просторово згладжену та усереднену у прямому та зворотному напрямку матрицю кореляції R з CFR (частотна характеристика каналу).

Частотна характеристика каналу (CFR) є комплексною матрицею розміру N на P , де N - довжина БПФ одного моментального знімку CFR, а P - кількість моментальних знімків. CFR є частотною характеристикою каналу.

R є комплексною матрицею L -by- L , що представляє оцінену кореляційну матрицю, як це приведено на рисунку 3.16.

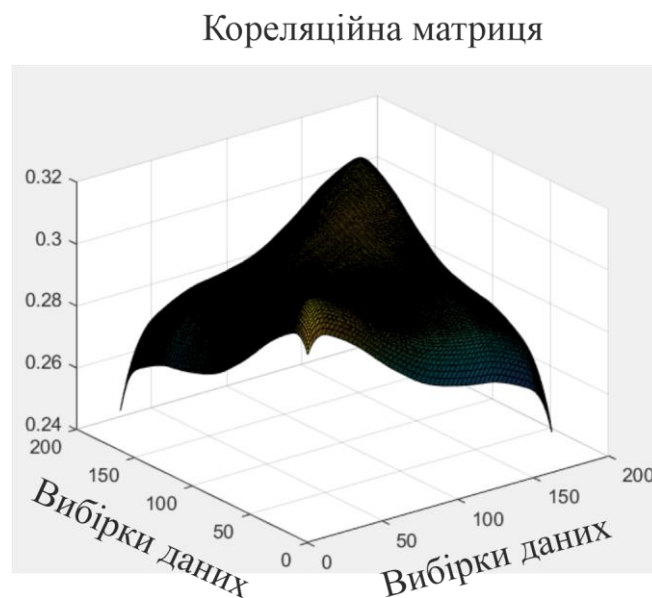


Рисунок 3.16 – Кореляційна матриця каналу

Інтерполяція оцінки частотної характеристики каналу зв'язку за відсутніми піднесучими (алгоритм MUSIC передбачає рівномірний інтервал).

Динамічний діапазон для порогової обробки в залежності від смуги пропускання каналу зв'язку (`dynamicRangeArray` визначається статистично для різних смуг пропускання шляхом запуску більш тривалих симуляцій та оцінки

значень, які повертають найменшу помилку вимірювання для кожної смуги пропускання). `dynamicRangeArray = [5 6 11 14]`.

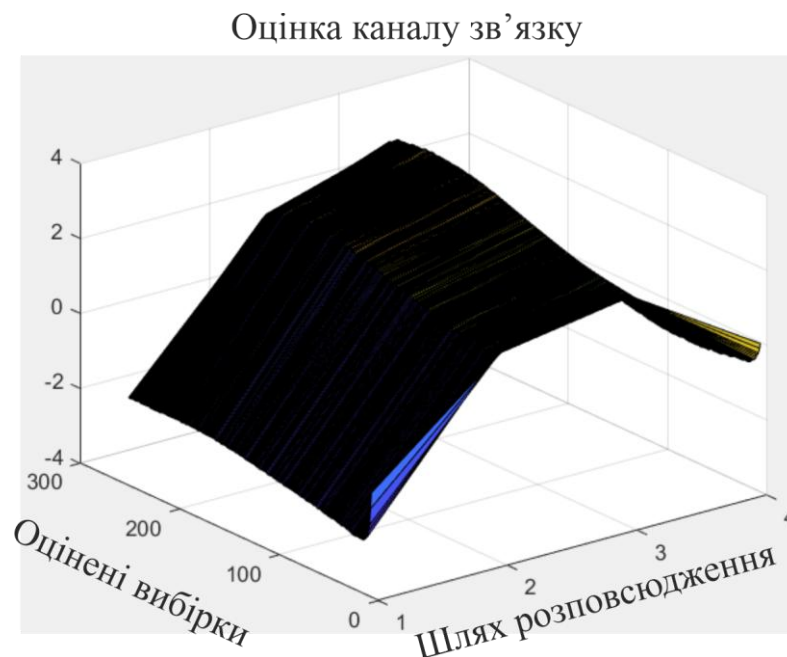


Рисунок 3.17 – Оцінка каналу зв'язку

3.4 Технологія Wi-Fi позиціонування

Оцінка лінії прямої видимості. Технологія внутрішнього позиціонування привернула широку увагу через зручність і потребу. Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS) [1] може реалізувати високоточне позиціонування у зовнішньому середовищі, що може надавати послуги на основі визначення місця розташування (LBS) для зовнішніх користувачів, такі як позиціонування користувача та навігація, навігація транспортних засобів, аварійно-рятувальна служба та захист від крадіжок. Однак іноді сигнали GNSS не можуть досягти внутрішнього середовища та визначити позиціонування, або отримані сигнали GNSS надто слабкі, щоб реалізувати високу точність позиціонування [2]. Таким

чином, користувачам у приміщенні, яким потрібен LBS, необхідно знайти заміну, щоб реалізувати високу точність позиціонування.

Коли мобільна станція не знаходиться на лінії прямої видимості (LOS), визначення її місцезнаходження ускладнюється через відбиття сигналу, наприклад, від стін. Таким чином, важливо визначити, чи знаходяться мобільні станції в зоні прямої видимості, щоб отримати точні оцінки розташування. Стандарт 802.11az вводить процедуру оцінки LOS, яка повідомляє, чи знаходяться STA в LOS, використовуючи подвійну поляризацію при передачі першим шляхом. У разі успіху оцінки LOS можна отримати точне положення STA. В іншому випадку слід враховувати відбиття сигналу.

Оскільки обміни Fine Timing Measurement (FTM) можуть запускатись без асоціації, зловмисні мобільні станції (STA) можуть визначати позицію користувачів. Щоб запобігти цьому, 802.11az пропонує попереднє узгодження безпеки (PASN) для обміну ключем, який використовується для захисту сеансів FTM між незв'язаними STA. Крім того, 802.11az підвищує конфіденційність розташування за рахунок фізичної безпеки, рандомізуючи підполя навчання (TRN), що використовуються в блоках даних фізичного протоколу (PPDU) – покращеної спрямованої багатогігабітної передачі даних (EDMG). Отже, жодна третя сторона не може отримати оцінки про місцезнаходження інших STA.

Розглянемо протокол FTM EDMG. 802.11az обмінюється інформацією про місцезнаходження з використанням протоколу Fine Timing Measurement (FTM) – точного вимірювання часу. Розглянемо, як 802.11az забезпечує позиціонування наступного покоління з використанням FTM поверх Enhanced Directional Multi-Gigabit (EDMG) – покращеної спрямованої багатогігабітної передачі даних, а також інкапсуляцію кадрів, процедуру узгодження та обміну вимірами.

Позиціонування наступного покоління у FTM та EDMG. Позиціонування 802.11az засноване на знанні відстані, висоті та азимуту між мобільними станціями. У той час як відстань обчислюється з використанням ToF обмінів FTM, азимут та кути піднесення виходять з використанням процедури формування променя mmWave, визначеної в 802.11ay EDMG.

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		62

При формуванні променя EDMG станція, яка ініціює обмін FTM (ISTA), пробує різні конфігурації вагового вектора антени (AWV) до тих пір, поки mmWave промінь не вкаже на відповідну станцію (RSTA). А саме, ініціююча станція (ISTA) вибирає AWV, який забезпечує найвищу якість вимірів відповідного каналу. За допомогою цієї процедури можна розрахувати орієнтацію кожної антени у ґратах, і ISTA може оцінити AOD променя міліметрового діапазону, тобто кут місця та азимут.

З оцінками відстані, висоти та азимуту; ISTA отримує відносне позиціонування з високою точністю щодо RSTA. У випадку, якщо STA надсилають інформацію про конфігурацію розташування (LCI) під час обміну FTM, також можна дізнатися абсолютне позиціонування — для LCI та звіти про місцезнаходження включають таку інформацію, як широта, довгота або місцезнаходження в будівлі або координати GPS.

В. Інкапсуляція FTM у EDMG Кадри FTM інкапсулюються як поля дій 802.11. Якщо FTM використовується між двома станціями EDMG STA, кадр FTM відправляється у складі EDMG PPDU, що дозволяє одночасно (i) отримувати оцінки позиціонування з використанням полі EDMG TRN; та (ii) обмін оцінками позиціонування у кадрі FTM.

Поле TRN в EDMG PPDU включає послідовності Голя, що мають корисні властивості автокореляції для вимірювань каналу. Зокрема, вимірювання каналу виходять шляхом порівняння отриманого поля TRN з очікуваною послідовністю Голя. Поправка 802.11az використовує вимірювання каналу на основі TRN для виконання оцінок позиціонування як оцінки AOA/AOD та LOS.

Оцінки каналу та кута, отримані за допомогою TRN, передаються в інкапсульованих кадрах FTM. Зокрема, поправка до стандарту 802.11az розширила кадри FTM для перенесення вимірювань каналу TRN, пов'язаних з AWV, оцінками кутів та ймовірністю LOS. Ці нові поля доповнені застарілими мітками часу, інформацією про локалізацію та синхронізацію для отримання точного позиціонування.

Узгодження сеансів FTM через EDMG Щоб розпочати сеанс FTM через EDMG, STA повинні узгодити такі параметри, як тривалість сеансу або кількість пакетів FTM у сеансі.

Узгодження починається з обміну початковим запитом FTM (IFTMR), де ISTA пропонує, наприклад, сеанс EDMG FTM першим шляхом з одним пакетом та оцінками AOD. Крім того, ISTA може запропонувати безпечний обмін з використанням певної смуги пропускання від 2,16 до 8,64 ГГц.

Якщо сеанс FTM проходить першим шляхом, STA повинні попередньо виконати навчання формуванню променя першого шляху (FPBT). Потім RSTA повинен прийняти або не прийняти запропоновані параметри нового Сесія ФТМ. Якщо RSTA приймає параметри отриманого IFTMR, він відправляє підтвердження (ACK), за яким слідує початковий кадр FTM (IFTM) менш ніж за 10 мс. У цьому останньому обміні RSTA може перевизначити деякі із запропонованих параметрів, наприклад, щоб зменшити запроповану тривалість сеансу. Узгодження не вдається, якщо RSTA не відповідає ACK або кадр IFTM повідомляє, що сеанс FTM не може розпочатися. Зокрема, сеанс не може розпочатись, якщо RSTA не може задовольнити запропоновані параметри або має внутрішній збій.

Обмін вимірюваннями FTM через EDMG Після успішного узгодження STA починають сеанс FTM для виконання вимірювань відстані та кута. Кожен сеанс складається з пакетів із множинними обмінами кадрами FTM, інкапсульованими в EDMG PPDU. Показаний сеанс FTM, що складається з одного пакета трьох обмінів FTM і ACK, кожен з яких розділений мінімальною дельтою секунд.

При кожному обміні STA мітять час відправлення (TOD) та час прибуття (TOA) відправлених та отриманих кадрів відповідно. В результаті можна оцінити відстань при першому обміні, помноживши швидкість світла на відповідний час в обидва кінці (RTT) (RTT1). Часові мітки, що використовуються при оцінці RTT.

Однак реальний час відправлення та прибуття кадрів може відрізнитись від відповідних тимчасових міток. Наприклад, кадр IFTM може бути відправлений за одну наносекунду нс, у той час як часова мітка годинника може бути $t1-1 = 1:1$ нс.

Таким чином, помилка TOD 0,1 нс. Через швидкість світла помилка тимчасової мітки в 0,1 нс призведе до помилки оцінки відстані 3 см. Отже, FTM повинен отримувати оцінки відстані, використовуючи біржу, тимчасові мітки якої мають найменшу помилку.

Щоб отримати кутові оцінки пакета, STA обчислюють вимірювання каналу, використовуючи поля EDMG TRN. Крім того, STA змінює свою AWPV під час сеансу, щоб випробувати кілька налаштувань, які можуть допомогти в оцінці кута. Показано, як ініціатор оцінює кут, під яким йде його сигнал, використовуючи вимірювання каналу та найкращу AWPV, що повідомляється відповідачем у кадрі FTM. Точність оцінок кута залежить від якості обмінного зворотного зв'язку вимірювання каналу.

У сеансі FTM можна керувати кількома оцінками AOD від ініціатора до відповідача (I2R) під час пакета. Але у випадку AOD Responder-to-Initiator (R2I) 802.11az вказує, що оцінки виконуються після завершення пакета. Зокрема, ініціатор обмінюється найкращими налаштуваннями AWPV, отриманими під час пакету, щоб респондент міг оцінити свою AOD. Зрештою, респондент відправляє назад ініціатору дві оцінки кута.

Пояснимо процедури оцінки FPBT та LOS. FPBT - це процедура, що використовується для визначення першого шляху, також відомого як шлях поширення між двома станціями. Щойно перший шлях ідентифікований, оцінка LOS визначає, чи має цей шлях пряму видимість чи відбитим шляхом.

А. Навчання формування променя першого шляху (FPBT) У процедурі FPBT STA пробують різні конфігурації антен міліметрового діапазону до тих пір, поки промінь не вкаже перший шлях. Зокрема, STA переглядають кілька конфігурацій AWPV і вибирають найкращу. Далі ми деталізуємо процедуру FPBT, подаючи (i) поля TRN EDMG; та (ii) процедура розгорнення AWPV. EDMG PPDU містять поле TRN, яке використовується для оцінки каналу в процедурі FPBT. Поле TRN містить L+1 TRN-Unit із підполями TRN усередині. Кожен блок TRN містить підполя P+M TRN, заповнені послідовностями Голея. Передача послідовності Голю всередині підполя TRN призводить до профілю затримки

потужності (PDP), який вимірює синфазність, квадратуру та відношення сигнал-шум (SNR) для кожного відгалуження - PDP підполів TRN P+1 та P+.

Процедура розгортки AWV змінює конфігурацію антени mmWave у пошуках першого шляху. Зокрема, він змінює AWV після передачі групи підполів TRN. Потім STA об'єднує PDP кожного підполя TRN у групу та вибирає відводи з найбільшою амплітудою. Якість комбінованого PDP вимірюється шляхом перевірки відводів поруч із відведенням із найбільшою амплітудою. Нарешті, STA порівнює комбіновані PDP у полі TRN і вибирає найкращий AWV, який вказує на перший шлях.

Оцінка лінії прямої видимості (LOS) Як тільки FPBT визначає найкращу AWV, ISTA ініціює обмін оцінкою FTM LOS. При обміні STA змінюють поляризацію антени, щоб визначити, чи перший шлях в LOS. Оскільки STA змінюють поляризацію антени, вони формують звіти про ймовірність LOS, включені до кадрів FTM. Оцінка LOS виконується в такий спосіб.

По-перше, STA передають і приймають, використовуючи ту саму поляризацію антени для підполя TRN P+1. Якщо STA перебувають у стані LOS, амплітуда основного відведення не змінюється. По-друге, ISTA передає підполя TRN P+2 з горизонтальною поляризацією, а RSTA приймає його з вертикальною поляризацією. В результаті амплітуда основного відведення втрачається при прийомі підполя TRN P+2 через неузгодженість поляризацій. Отже, STA знаходяться у стані LOS, оскільки основна амплітуда відводів не буде втрачена.

За допомогою 802.11az можна забезпечити безпеку під час обміну FTM навіть між незв'язаними STA, використовуючи процедуру PASN для захисту.

Узгодження безпеки перед асоціацією (PASN) PASN є протоколом, який досягає асоціації безпеки парного перехідного ключа (PTKSA) між точкою доступу (AP) і STA без попередньої асоціації. У цій ситуації PASN діє як протокол надійної мережевої асоціації безпеки (RSNA).

Щоб отримати ключ PTKSA, STA та AP обмінюються трьома елементами PASN (всередині кадрів аутентифікації). Спочатку STA відправляє AP ефемерний ключ та параметри для подальшого отримання РМК. По-друге, AP відправляє на

STA захищений кадр зі своїм ефемерним ключем та вибраними параметрами для отримання РМК. По-третє, STA підтверджує вибрані параметри, відправляючи АСК у захищеному кадрі.

Після підтвердження STA і AP використовують функцію формування ключа (KDF) для генерації ключа РТКСА з використанням параметрів, узгоджених в кадрах PASN, що обмінюються.

Безпечні сеанси FTM. Після того, як STA та AP досягають РТКСА, останній запитує безпечний сеанс FTM, видаючи початковий захищений запит FTM (IPFTMR). Потім STA та AP отримують своє відносне положення, обмінюючись EDMG безпечним ранжируванням PPDU. Обмінювані PPDU містять захищені кадри FTM (PFTM) та захищені підполя TRN для оцінки каналу та позиціонування. Для забезпечення безпеки підполя TRN та кадри PFTM шифруються наступним чином.

Кадр PFTM шифрується за допомогою РТКСА. У той час як безпечні підполя TRN заповнюються доповненими псевдовипадковими бітовими послідовностями, що згенеровані в два етапи. Спочатку STA створює псевдовипадковий ключ (PRK) за допомогою хеш-функції SHA-256, яка отримує секретний ключ та ідентифікатор РМК, раніше згенерований, наприклад, PASN. По-друге, STA створює псевдовипадкову безпечну послідовність TRN, передаючи заснованої на HMAC функції формування ключа (HKDF) (i) PRK; (ii) рядок "EDMG Secure RTT"; та (iii) довжина поля TRN.

Оцінимо точність позиціонування майбутніх реалізацій стандарту 802.11az на базі mmWave. Для експериментального аналізу ми використовуємо комерційні пристрої MikroTik AP 60G з mmWave антенами, застарілий 802.11mc FTM і OpenWrt. Удосконалення, що надаються стандартом 802.11az, оцінюються шляхом поєднання оцінок RTT застарілого FTM та оцінок кутів, що надаються адаптованою версією OpenWrt [8].

Ми оцінюємо точність позиціонування у сценаріях LOS та Non Line Of Sight (NLOS). У сценарії LOS STA розташовуються в LOS, тоді як сценарії NLOS STA розділені стіною, тому сигнал повинен відбиватися під кутом 60°, щоб досягти

інший STA – див. рис. 6 (вгорі). В обох сценаріях сигнал повинен пройти 2 м, 4 м та 8 м; незалежно від того, чи знаходяться STA в LOS або NLOS.

В експериментальному аналізі ми припускаємо, що обидві STA виконали FPBT перед обміном FTM. Однак, комерційні пристрої ще не реалізували 802.11az FPBT. Таким чином, ми стикаємося з тим, що антени STA знаходяться в зоні прямої видимості з 0° азимутом і кутом місця (сценарій прямої видимості) і в зоні прямої видимості з азимутом 60° і кутом місця 0° (сценарій NLOS). Щоб переконатися, що антени орієнтовані правильно, ми перевіряємо AOA, що повідомляється зламаною версією OpenWrt [8].

Як тільки STA налаштовані адекватно, ми запускаємо 50 застарілих FTM сеансів для отримання оцінок RTT. Після цього ми обчислюємо відносне положення в автономному режимі, використовуючи оцінку RTT та AOA сценаріїв LOS/NLOS, тобто використовуючи азимути 0 і 60° ; відповідно. В результаті ми отримуємо помилку положення, порівнюючи передбачуване становище з реальним STA.

Кумулятивна функція розподілу помилок розташування (CDF) у сценаріях LOS (суцільна лінія) та NLOS (штрихова лінія). Результати показують, що у сценарії LOS помилка позиціонування збільшується з відстанню між STA, завжди зберігаючи помилку нижче 8. Цікаво, що 75-й перцентиль помилки положення сценарію NLOS залишається найменшою, коли STA знаходяться на відстані 8 м. Явище пояснюється наявністю багатопроменевих складових відображення [9], від яких залежить точність позиціонування.

Можна визначити декілька проблем, з якими доведеться зіткнутися під час впровадження позиціонування 802.11az mmWave:

1. Зменшити ефект багатопроменевості. Коли пристрої перебувають у відсутності прямої видимості, помилка позиціонування збільшується через наявність багатопроменевих складових [4] у каналі mmWave. Хоча 802.11az пом'якшує проблему, використовуючи мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів з однією несучою (SC-OFDM) та послідовністю Голя,

компоненти багатопроменевого поширення залишаться. Можна використовувати канал нижче 6 ГГц для пом'якшення проблеми променевості.

2. Мінімізуйте споживання енергії та зменшіть перегрів. Пристрої 802.11az, що використовують mmWave, дуже вимогливі до енергоспоживання через вище енергоспоживання, властиве міліметровим хвилям, необхідної високої тактової частоти та виконання алгоритмів позиціонування, специфічних для постачальника. Виробники повинні будуть розробити енергоефективні чіпсети, щоб уникнути розряду батареї пристрою та зменшити перегрів.

3. Поліпшіть точне безпечне позиціонування. Захищені поля TRN використовують доповнені псевдовипадкові бітові послідовності, а не Голєві послідовності. Отже, вимірювання каналу будуть не такими точними та погіршать точність позиціонування. Виробники можуть подолати це обмеження, використовуючи послідовності Голєю, зашифровані гомеоморфізмами [10], які зберігають властивості автокореляції.

Висновки до третього розділу

У цьому розділі показано, як використовувати алгоритм позиціонування за стандартом IEEE 802.11az. Зокрема, у розділі показано, як оцінити відстань передачі-прийому між мобільною станцією (STA) і точкою доступу (AP), використовуючи надвисоку роздільну здатність MUSIC, і як знайти мобільні станції у двох вимірах, використовуючи виміри дальності від кількох пар STA-AP. Показано збільшення продуктивності системи позиціонування при вищих SNR шляхом обчислення оцінки позиціонування в декількох точках SNR.

ВИСНОВКИ

1. У роботі проведені розрахунки і моделювання алгоритму позиціонування на основі часу прибуття для оцінки місця знаходження мобільної станції, як визначено в стандарті IEEE 802.11az для Wi-Fi.

2. Проведені дослідження виміру відстані за допомогою алгоритму MUSIC і алгоритму позиціонування мережі з однією мобільною станцією і трьома точками доступу. Зроблений висновок, що для відношення сигнал-шум менше 10 дБ алгоритми не працездатні.

3. Досліджена помилка визначення місця розташування для різної кількості ітерацій і різних впливаючих факторів: відношення сигнал-шум, повторення довгого тренувального поля, кількість просторових потоків, більш висока пропускна здатність і профілі затримки каналу.

4. Зроблений висновок, що для зменшення помилки позиціонування необхідно підвищувати відношення сигнал-шум, використовувати режим MIMO.

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		70

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1 Julien Lesouple, Thierry Robert, Mohamed Sahmoudi, Jean-Yves Tournet, Willy Vigneau. Multipath Mitigation for GNSS Positioning in an Urban Environment Using Sparse Estimation. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20 (4), pp.1316-1328. ff10.1109/TITS.2018.2848461ff. ffhal-02096509f

2. Wi-Fi Location-Based Services - Design and Deployment Considerations // Book Wi-Fi Location-Based Services - Design and Deployment Considerations / EditorCisco Systems, Inc., 2017.

3. Lindner, Thomas; Fritsch, Lothar; Plank, Kilian; Rannenber, Kai (2004). Lamersdorf, Winfried; Tschammer, Volker; Amarger, Stéphane (eds.). "Exploitation of Public and Private WiFi Coverage for New Business Models". Building the E-Service Society. IFIP International Federation for Information Processing. Springer US. 146: 131–148. doi:10.1007/1-4020-8155-3_8.

4. Magda Chelly, Nel Samama. Detecting visibility in heterogeneous simulated environments for positioning purposes. IPIN 2010 : International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sep 2010, Hoenggerberg, Switzerland.

5. Magda Chelly, Nel Samama. New techniques for indoor positioning, combining deterministic and estimation methods. ENC-GNSS 2009 : European Navigation Conference - Global Navigation Satellite Systems, May 2009, Naples, Italy. pp.1 - 12.

6. Magda Chelly, Anca Fluerasu, Nel Samama. A universal and autonomous positioning system based on wireless networks connectivity. ENC 2011 : European Navigation Conference, Nov 2011, London, United Kingdom.

7. P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system," in Proceedings of 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '00), vol. 2, pp. 775–784, Tel Aviv, Israel, March 2000.

8. Y. Chen and H. Kobayashi, "Signal strength based indoor geolocation," in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '02), vol. 1, pp. 436–439, New York, NY, USA, April–May 2002.

9. Youssef, M. A.; Agrawala, A.; Shankar, A. Udaya (2003-03-01). WLAN location determination via clustering and probability distributions. Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003). pp. 143–150. CiteSeerX 10.1.1.13.4478. doi:10.1109/PERCOM.2003.1192736.

10. Danalet, Antonin; Farooq, Bilal; Bierlaire, Michel (2014). "A Bayesian approach to detect pedestrian destination-sequences from WiFi signatures". Transportation Research Part C: Emerging Technologies. doi:10.1016/j.trc.2014.03.015.

11. J. Xiong and K. Jamieson, "Arraytrack: A fine-grained indoor location system," NSDI '13.

12. Yang, Jie; Chen, Yingying (2009-11-01). Indoor Localization Using Improved RSS-Based Localization Methods. IEEE Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. pp. 1–6. CiteSeerX 10.1.1.386.4258. doi:10.1109/GLOCOM.2009.5425237.

13. Бойко Ю.М. Дослідження способів завадостійкого кодування для захисту від помилок у цифрових каналах передавання інформації /Ю.М. Бойко, Д.А. Макаришкін, С.В. Івчун // Вісник ХНУ. – 2013. - №2. С.188-195.

14. Енциклопедичний навчальний довідник : навч. посібник / за ред. Ю.Л. Мазора, Є.А. Мачуського, В. І. Правди. – К. : Вища школа, 1999. – 838 с.

15. Кваліфікаційний проєкт : методичні вказівки щодо його підготовки та виконання здобувачами вищої освіти (ОР «бакалавр») спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / уклад.: С. К. Підченко, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк, О. С. Пивовар. Хмельницький: ХНУ, 2021. – 71 с.

16. Бойко Ю.М. Текстові документи. Загальні вимоги СОУ 207.01:2017 / Ю.М. Бойко, Г.В. Красильникова, Л.І. Першина, Т.Ф. Косянчук. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – 45 с.

					КПТР.2020055.01.05 ПЗ	Арк.
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата		72

17. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko Farrow Interpolator Features in QPSK Telecommunication Devices // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET - 2020) Lviv-Slavske, Ukraine February 25-29, 2020 DOI: [10.1109/TCSET49122.2020.235410](https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235410)

18. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko. "Methodology for assessing synchronization conditions in telecommunication devices," *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, **5**(2), pp. 320-327, Mar. 2020. <https://doi.org/10.25046/aj050242>.

19. Boiko J. Method of the adaptive decoding of self-orthogonal codes in telecommunication // July Boiko, Ilya Pyatin, Oleksander Eromenko, Mykhailo Stepanov, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol 19, No3, pp 1287-1296, September 2020 DOI:

<http://doi.org/10.11591/ijeecs.v19.i3.pp%25p>

20. Пятін І.С. Дослідження енергетичної ефективності каналного кодування даних користувача кодами LDPC для систем зв'язку 5G /І.С. Пятін, Ю.М. Бойко // Вісник ХНУ. - 2020. – №3. - С.170-181

21. July Boiko, Ilya Pyatin and Oleksander Eromenko. Simulation of the Transport Channel with Polar Codes for the 5G Mobile Communication / 2020 IEEE International Conference on PROBLEMS OF INFOCOMMUNICATIONS. SCIENCE AND TECHNOLOGY PIC S&T'2020 6-9 October 2020 Kharkiv, pp. 182-186, doi: [10.1109/PICST51311.2020.9468013](https://doi.org/10.1109/PICST51311.2020.9468013).

22. Бойко Ю.М. Моделі систем завадостійкого кодування у телекомунікаціях / Ю.М. Бойко, І.С. Пятін// Вісник ХНУ. - 2020. - №4. - С. 174-183

23. Пятін І.С., Бойко Ю.М. Енергетична ефективність пропускнуої спроможності кодів 5G LDPC //IX Міжнародна НТК «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» 16-22 листопада 2020 року

24. Пятін І.С. Методи генерації перевірючих матриць LDPC коду /І.С. Пятін, В.В. Мішан // ВОТТП. – 2020. - №2. – С. 18-24.

25. Пятін І.С. Моделювання спотворень сигналу у каналі передачі/ І.С. Пятін, Д.А. Макаришкін // Вісник ХНУ. - 2020. - №5. – С. 39-44.

Хмельницький національний університет

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Кваліфікаційний проєкт

Пристрій позиціонування Wi-Fi



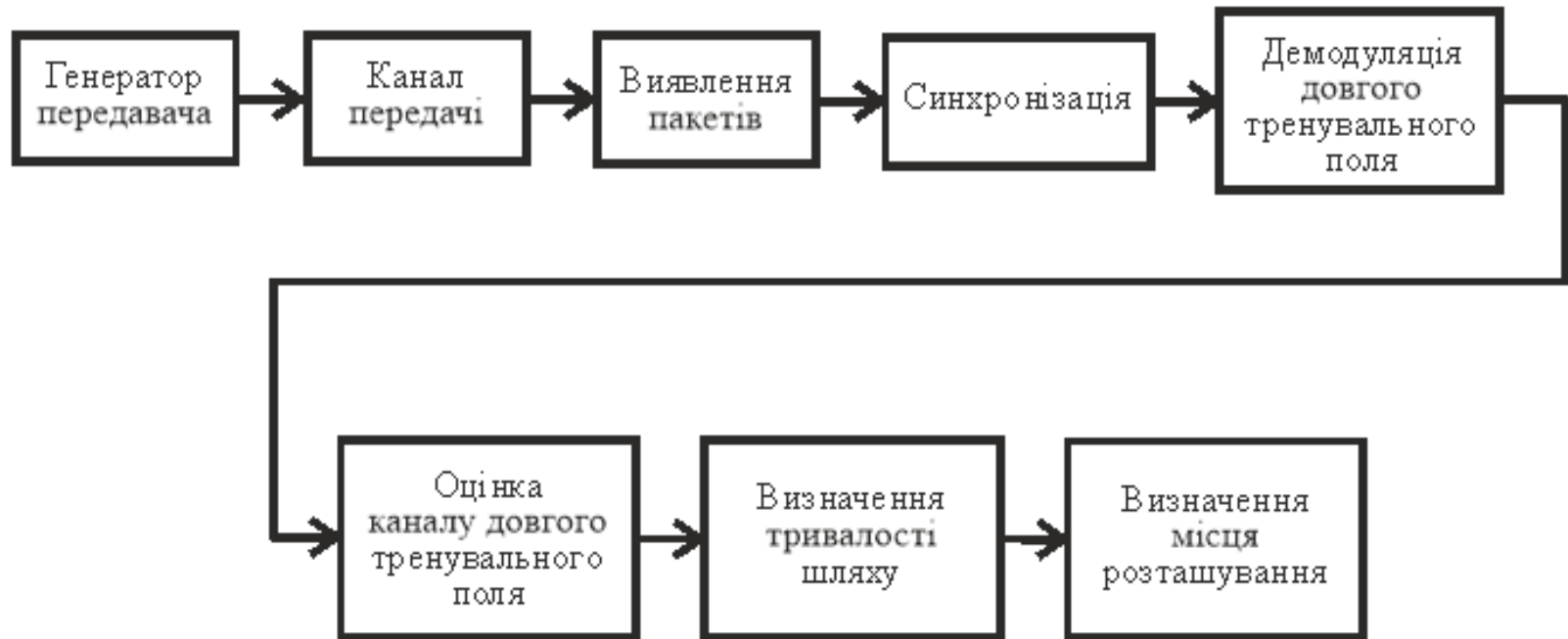
Виконав: студент гр. ТР2с-20-1
Крижовий Максим Володимирович

Керівник: д.т.н., професор
Бойко Юлій Миколайович

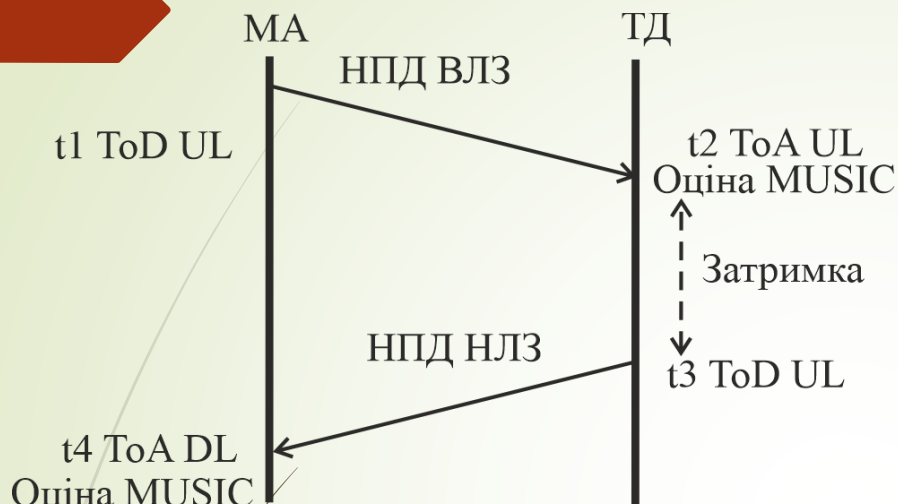
Метою кваліфікаційного проєкту є дослідження та розрахунок принципів побудови пристрою позиціонування Wi-Fi. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- провести огляд принципів побудови систем позиціонування;
- провести моделювання та розрахунок пристрою позиціонування у MATLAB;
- дослідити помилки визначення місця розташування мобільної станції від відношення сигнал-шум.

Принцип позиціонування на основі часу прибуття полягає в точній оцінці затримки поширення радіосигналу на шляху розповсюдження прямої видимості.



Оцінка діапазону відстаней



Відстань між мобільною станцією і точкою доступу

$$d = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \cdot c$$

c – швидкість світла

Рисунок 4.1 – Модель передачі сигналів між мобільним абонентом (МА) і точкою доступу (ТД) – (НПД ВЛЗ – пустий пакет даних висхідної лінії зв'язку; НПД НЛЗ – пустий пакет даних низхідної лінії зв'язку)



Рисунок 4.2 – Вимір відстані за допомогою алгоритму MUSIC з надвисокою роздільною здатністю (МК ЧХК – матриця кореляції частотної характеристики каналу)

Оцінка часу прибуття пакета

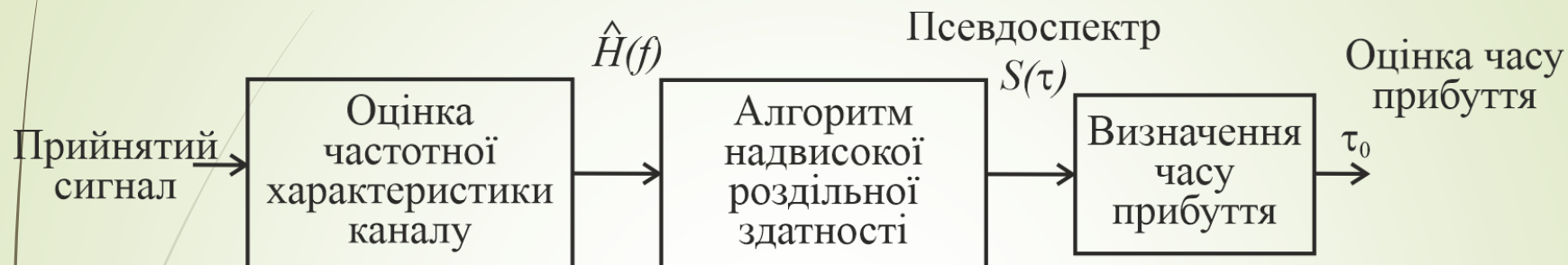


Рисунок 5.1 – Структурна схема приймача системи оцінки часу прибуття



Рисунок 5.2 – Структурна схема оцінки часу прибуття за алгоритмом MUSIC

Характеристики каналу зв'язку

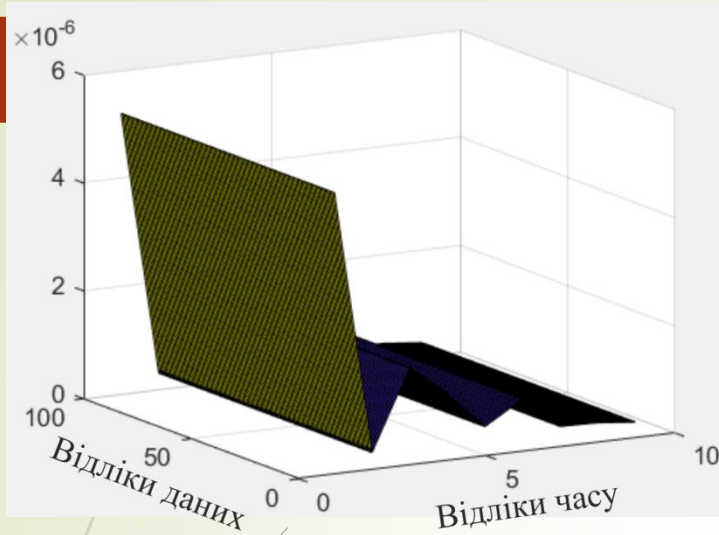


Рисунок 6.1 – Передаточна характеристика каналу

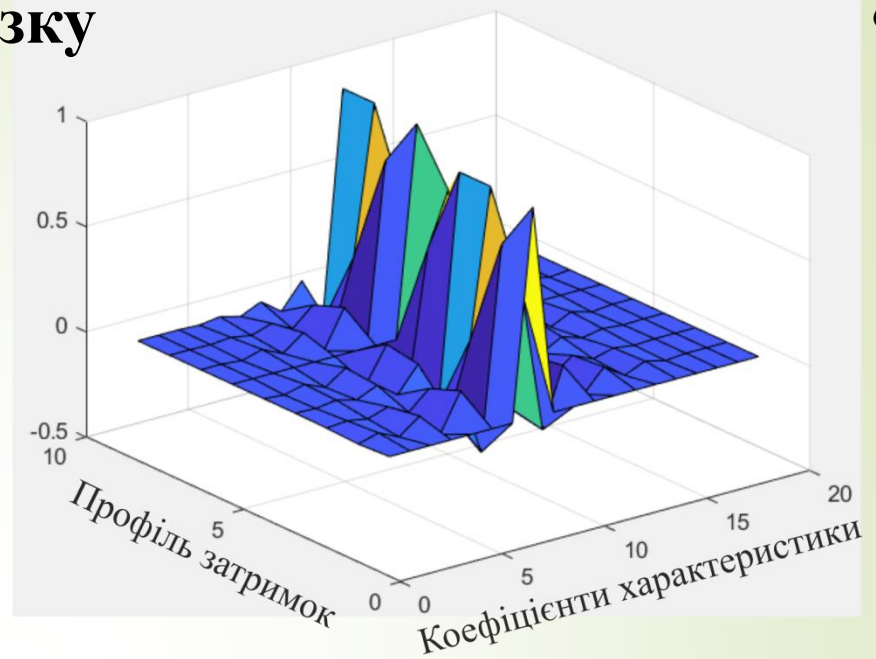


Рисунок 6.2 – Залежність коефіцієнтів каналу від затримок

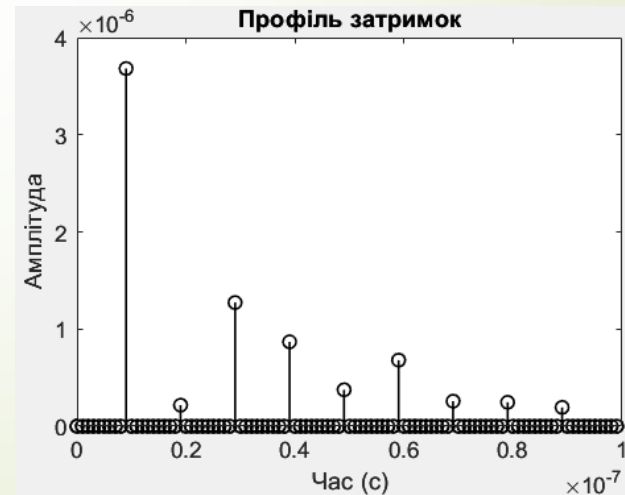
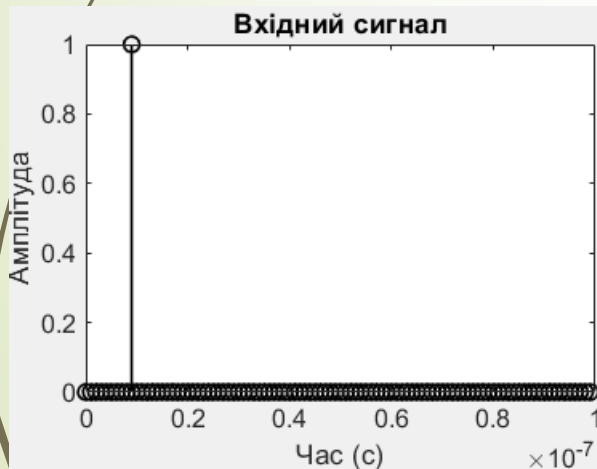


Рисунок 6.3 – Імпульсна характеристика каналу зв'язку

Профіль затримки каналу зв'язку

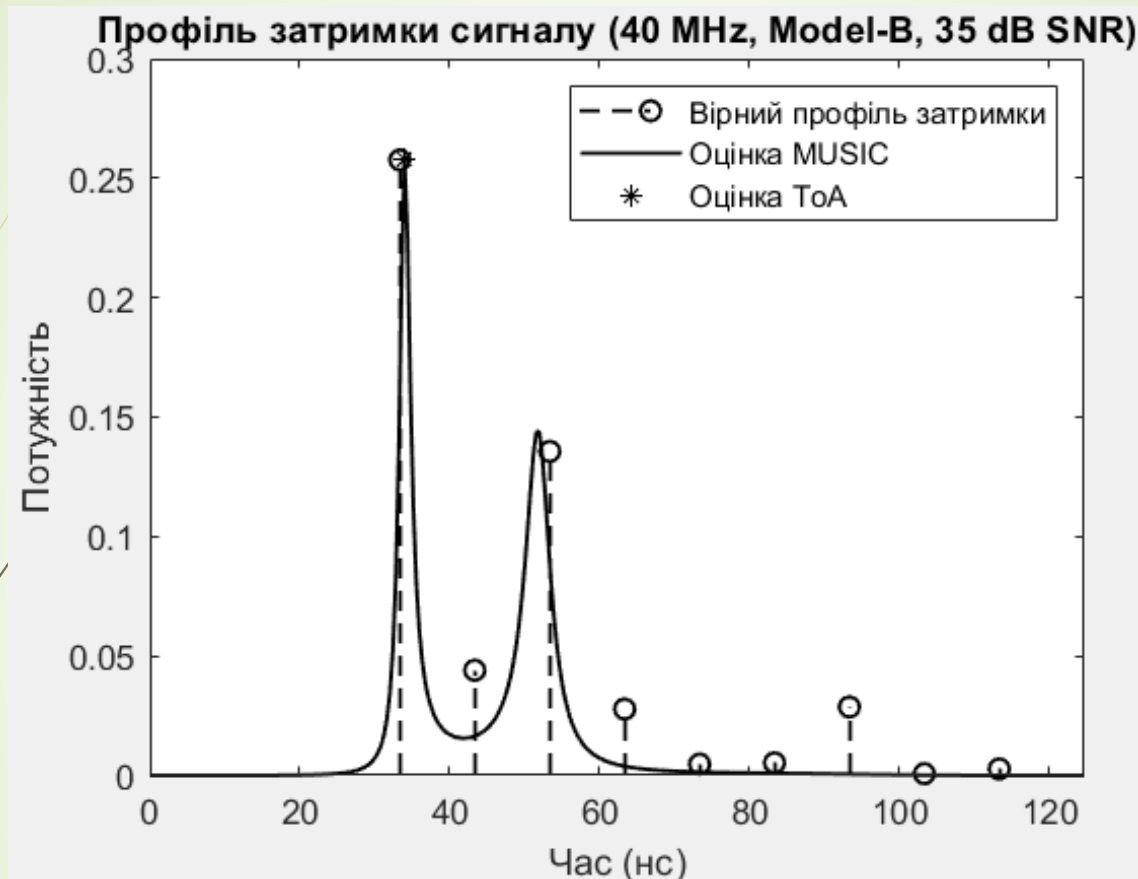


Рисунок 7.1 – Порівняння справжнього профілю затримки та оціненого профілю затримки за алгоритмом MUSIC

Оцінка визначення місця розташування

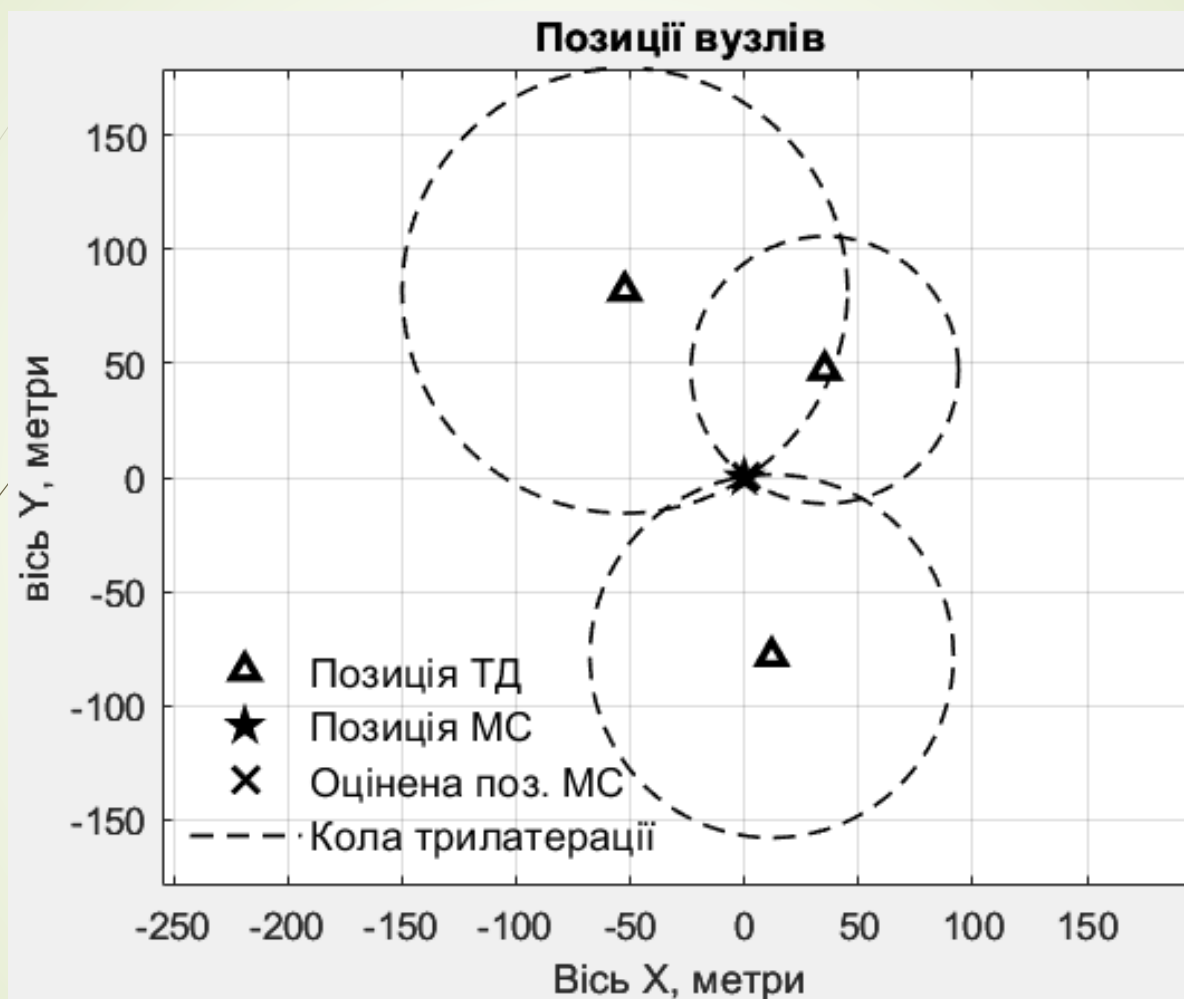


Рисунок 8.1 – Результати позиціонування мережі з однією мобільною станцією і трьома точками доступу.

Помилка визначення місця розташування

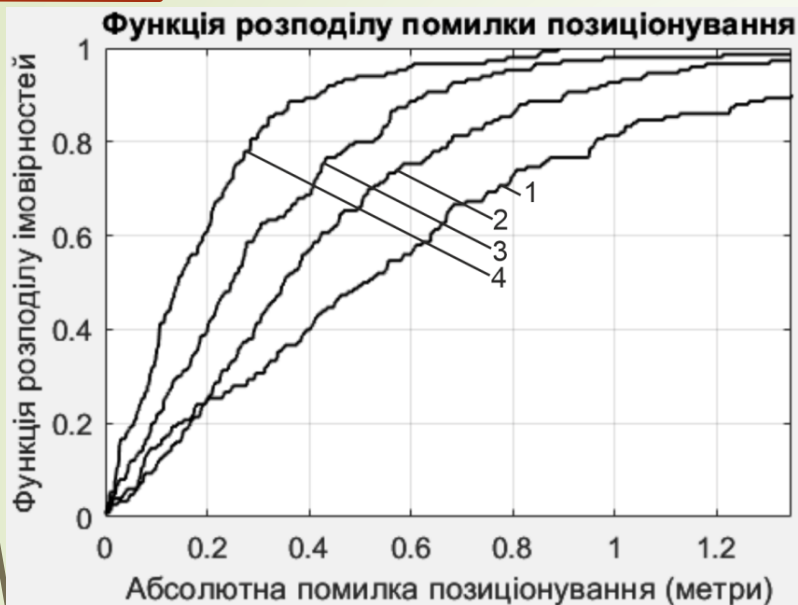


Рисунок 9.1 – Залежність функції розподілу імовірностей від абсолютної помилки позиціонування для 50 ітерацій (1 – SNR=10 дБ; 2 – SNR=20 дБ; 3 – SNR=30 дБ; 4 – SNR=40 дБ;)

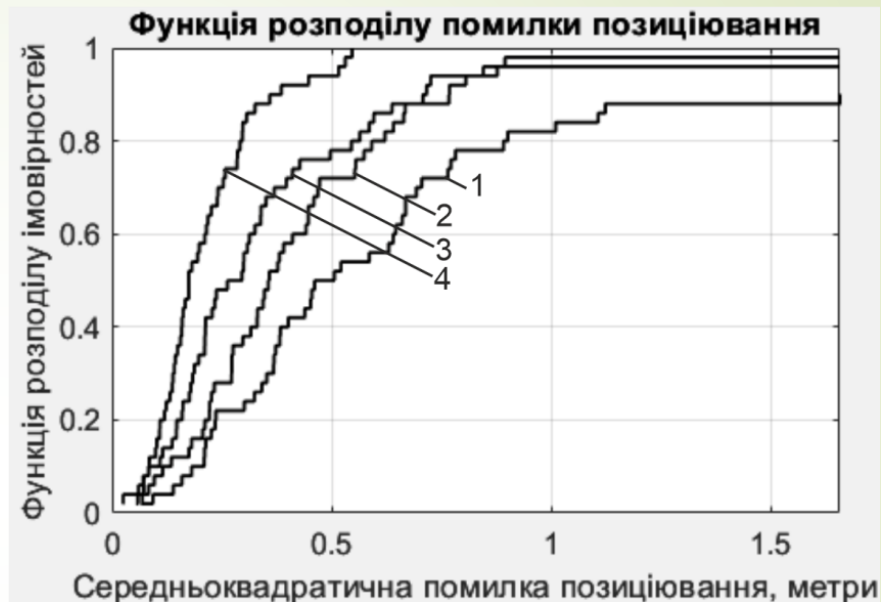


Рисунок 9.2 – Залежність функції розподілу імовірностей від середньоквадратичної помилки позиціонування для 50 ітерацій (1 – SNR=10 дБ; 2 – SNR=20 дБ; 3 – SNR=30 дБ; 4 – SNR=40 дБ;)

Помилка визначення місця розташування

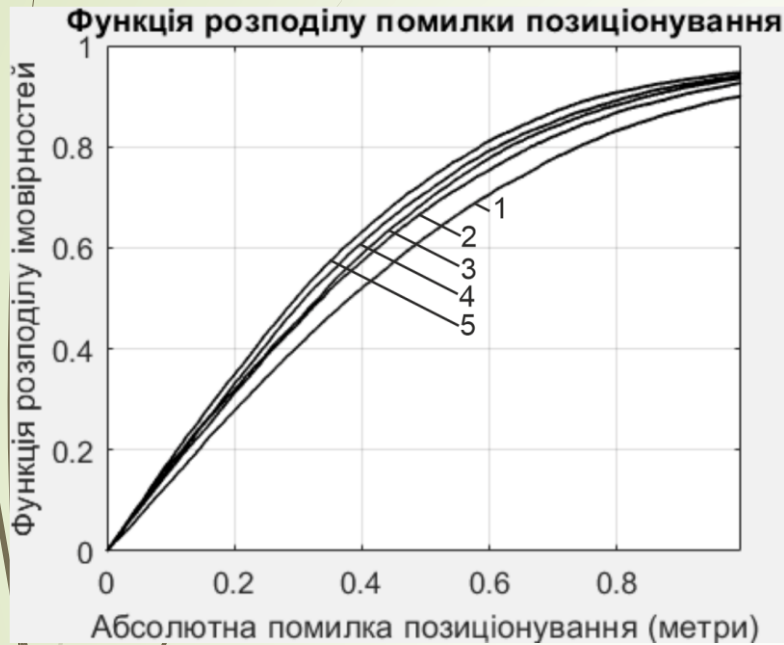


Рисунок 10.1 – Залежність функції розподілу імовірностей від абсолютної помилки позиціонування для 4000 ітерацій (1 – 1 HE-LTF; 2 – 2 HE-LTF; 3 – 3 HE-LTF; 4 – 4 HE-LTF; 5 – 5 HE-LTF;)

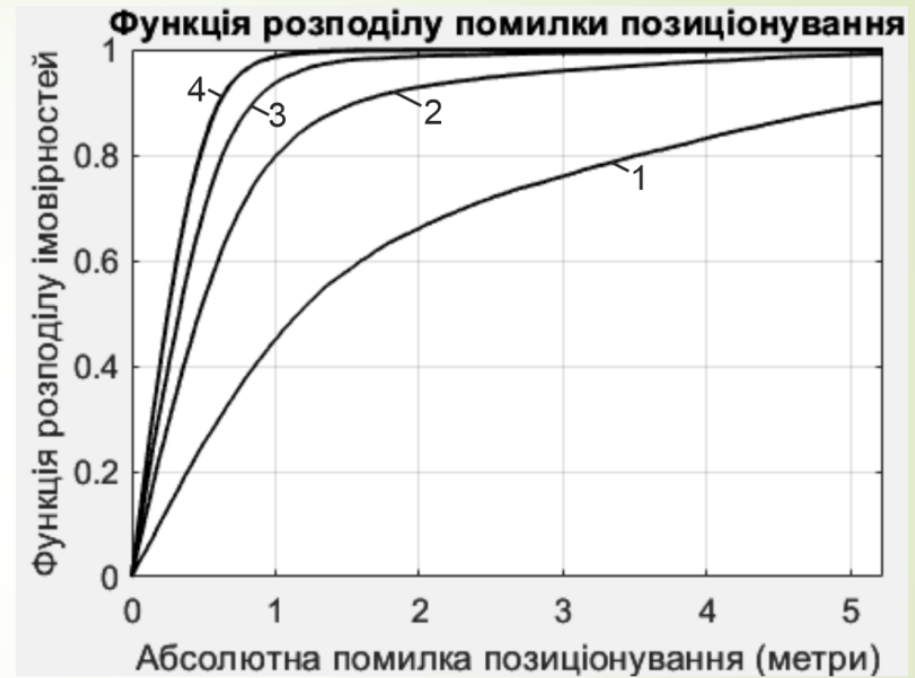


Рисунок 10.2 – Залежність функції розподілу імовірностей від абсолютної помилки позиціонування для різної кількості передаючих і приймаючих антен для 4000 ітерацій (1 – 1X1; 2 – 2 X2; 3 – 2X3; 4 – 3X3;)

Залежність помилки позиціонування від відношення сигнал-шум

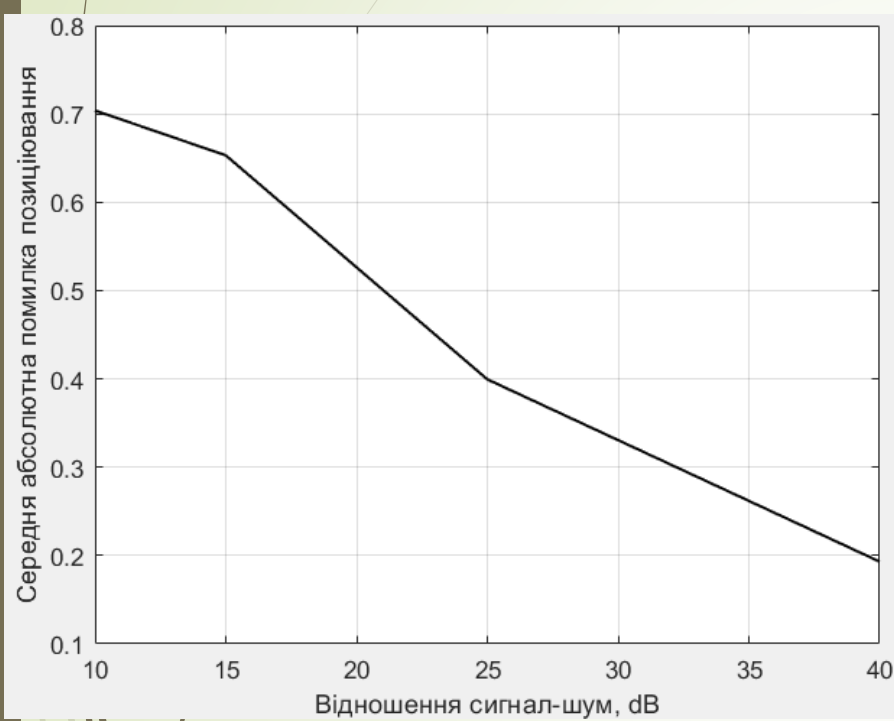


Рисунок 11.1 – Залежність середньої абсолютної помилки позиціонування від відношення сигнал-шум

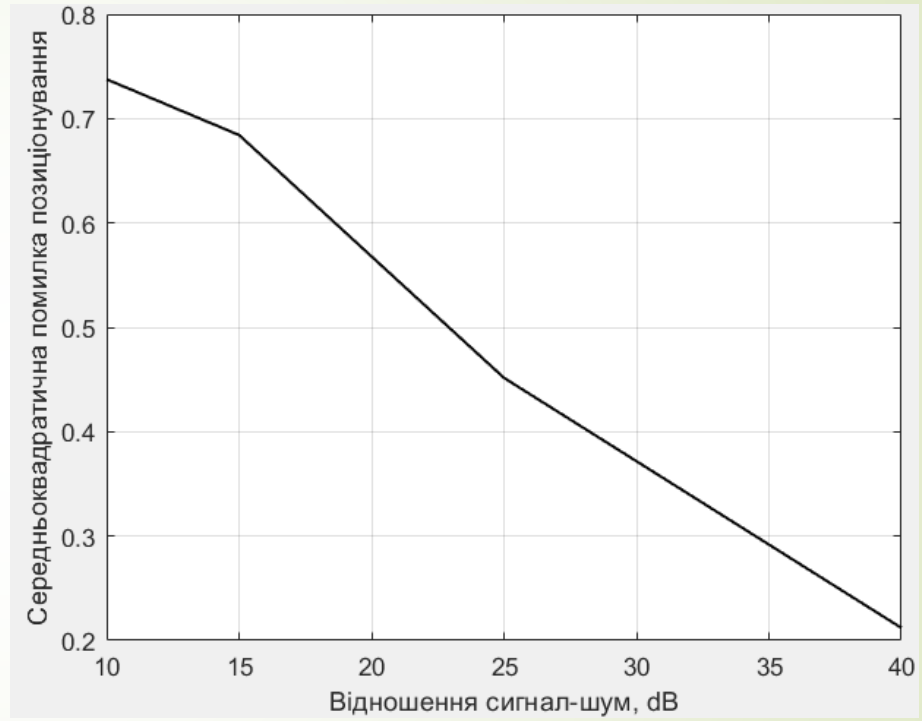


Рисунок 11.2 – Залежність середньоквадратичної помилки позиціонування від відношення сигнал-шум

ВИСНОВКИ

1. У роботі проведені розрахунки і моделювання алгоритму позиціонування на основі часу прибуття для оцінки місця знаходження мобільної станції, як визначено в стандарті IEEE 802.11az для Wi-Fi.

2. Проведені дослідження виміру відстані за допомогою алгоритму MUSIC і алгоритму позиціонування мережі з однією мобільною станцією і трьома точками доступу. Зроблений висновок, що для відношення сигнал-шум менше 10 дБ алгоритми не працездатні.

3. Досліджена помилка визначення місця розташування для різної кількості ітерацій і різних впливаючих факторів: відношення сигнал-шум, повторення довгого тренувального поля, кількість просторових потоків, більш висока пропускна здатність і профілі затримки каналу.

Зроблений висновок, що для зменшення помилки позиціонування необхідно підвищувати відношення сигнал-шум, використовувати режим MIMO.

Відгук на кваліфікаційну роботу виконану за темою
«Пристрій позиціонування Wi-Fi»
студента гр. TP2с-20-1 Крижового М.В.

З появою нових додатків, таких як виявлення присутності, розпізнавання активності, локалізація та відстеження місця знаходження людей, тривимірний зір та охорона здоров'я є потреба у розширенні можливостей локальних мереж Wi-Fi. Тому тема роботи є актуальною.

У кваліфікаційному проєкті студента Крижового М.В. проведений аналіз методів визначення місця знаходження мобільного абонента. Метод трилатерації має високу точність, низьку складність і вартість. У роботі розглянуто метод оцінки місця знаходження мобільної станції у середовищі з багатопробним поширенням за допомогою алгоритму позиціонування на основі часу прибуття, визначеного в стандарті IEEE 802.11az для Wi-Fi. Час прибуття оцінюється за допомогою підходу з надвисокою роздільною здатністю множинної класифікації сигналів (MUSIC), а потім оцінюється двовимірне положення мобільної станції за допомогою трилатерації. Потім оцінюється і порівнюється продуктивність алгоритму позиціонування у кількох точках відношення сигнал-шум (SNR). Зроблений висновок, що для відношення сигнал-шум менше 10 дБ алгоритми не працездатні. Досліджена помилка визначення місця розташування для різної кількості ітерацій і різних впливаючих факторів: відношення сигнал-шум, повторення довгого тренувального поля, кількість просторових потоків, більш висока пропускна здатність і профілі затримки каналу. Зроблений висновок, що для зменшення помилки позиціонування необхідно підвищувати відношення сигнал-шум, використовувати режим MIMO.

В цілому під час роботи над кваліфікаційним проєктом студент Крижовий М.В. проявив себе як грамотний спеціаліст в галузі телекомунікацій, показав вміння та навички і набуті компетентності в дослідженні методів трилатерації та розрахунках помилок.

Кваліфікаційний проєкт виконано на високому технічному рівні, він має безперечну актуальність в області сучасних телекомунікацій, а студент Крижовий М.В. заслуговує оцінки «відмінно».

Професор кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій



Бойко Ю.М.

РЕЦЕНЗІЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ)

Дипломник Крижовий М.В.
 Тема Пристрій позиціонування Wi-Fi
 Спеціальність Телекомунікації та радіотехніка

Обсяг дипломного проекту(роботи)

Кількість листів креслень 5 ; кількість сторінок записки 72

1. Короткий зміст проекту(роботи) та прийнятих рішень 1. Аналітичний огляд літературних джерел по темі відповідності цілю проекту. 2. Вибір і обґрунтування структурної схеми пристрою. 3. Розробка системи позиціонування за стандартом IEEE 802.11az

2. Висновок про відповідність проекту(роботи) дипломному завданню Збалансований, цілісний проект відповідає вимогам та кваліфікаційним критеріям проекту

3. Характеристика виконання кожного розділу проекту(роботи), ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: Розглянуті принципи створення системи позиціонування. Проаналізовані алгоритми позиціонування на основі часу прийому, виконати необхідні розрахунки. Використано підхід з трьох-висрового роздільного здатністю множинної класифікації сигналів (MUSIC). Подумав про двовимірне положення модальної статистики за допомогою кореляції. Розроблено і проаналізовано помилки, визначено місце знаходження модальної статистики

4. Позитивні сторони проекту(роботи) Своєчасно розв'язано задачі вивчення присутності, розділення активності, локалізації та відстеження місця знаходження. Цілісний, кваліфікаційний проект присвячений аналізу і критичній роботі нового стандарту Wi-Fi, що має безперерпню актуальність

5. Негативні сторони проекту(роботи) Проектаризовані новий стандарт Wi-Fi, але не розглядається діапазон частот, в якому працює пристрій, що позиціонується Wi-Fi

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки проекту(роботи) Графічне оформлення та пояснювальна записка виконані зя допомогою ЕСКД

7. Відгук про проект(роботу) в цілому Два ліриканці і один проєкт виконані на досвідченому інженерно-технічному рівні

8. Інші зауваження —

9. Оцінка проекту(роботи) Відмінно

РЕЦЕНЗЕНТ Грбачевско Олександр Іванович

Прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи

доцент кафедри фізики та електротехніки
Хмельницького національного університету

30 " 05 2023 р.


Підпис

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій ХНУ
Підченку Сергію Костянтиновичу _____
здобувача вищої освіти, студента Крижового
Максима Володимировича, факультету
інформаційних технологій, 3-го курсу, група
ТР2с-20-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу мого кваліфікаційного проекту виконаного за темою «Пристрій позиціонування Wi-Fi» для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

30.05.2023

дата



підпис

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 1.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибок в документах: 9%

ID: 114049 Название: Пристрій позиціонування Wi-Fi Добавлено в БД: 2023-05-26 Авторы: Крижовий Максим Володимирович Руководители: Бойко Юлій Миколайович Консультанты: Оponentы:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	83834	1283	1353 (2%)	21 (2%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы



Имя користувача:
Kafedra TMIT KhNU

ID перевірки:
1015268881

Дата перевірки:
26.05.2023 11:36:33 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
26.05.2023 12:06:15 EEST

ID користувача:
100005657

Назва документа: Крижовий TP2c-20-1

Кількість сторінок: 72 Кількість слів: 15365 Кількість символів: 112421 Розмір файлу: 3.37 MB ID файлу: 1014942840

5.97% Схожість

Найбільша схожість: 2.88% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1011269978)

5.3% Джерела з Інтернету

626

Сторінка 74

3.79% Джерела з Бібліотеки

138

Сторінка 77

**РІШЕННЯ КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ**

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: **Пристрій позиціонування Wi-Fi**

Автор: **Крижовий М.В.**

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Науковий керівник: **д.т.н., професор Бойко Ю.М.**

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	-
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
5	Інше:	-

Підтвердження: Виявлені запозичення не є плагіатом так як відносяться до термінологічних та загальноживаних типових фраз і складають 5.97%

02.06.2023

Дата

Підпис керівника

Члени комісії:

Ініціали, прізвище, підпис

Ініціали, прізвище, підпис

Підпис завідувача кафедри