

МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
другого (магістерського) рівня

на тему **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО
ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖІ WI-FI/INDOOR**

Виконала: студентка 2 курсу, групи - ІКК-2.1
Спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

Заволока М.В.

Керівник Соловська І.М.

Рецензент Григор'єва Т.І.

ДОВІДКА

кафедри КІ та ІТ про виконану магістерську роботу

студентки 2 курсу ФКПІ та КН групи ІКК-2.1

Заволоки Марії Володимирівни

на тему Порівняльний аналіз методів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor

Висновок нормоконтролера Пояснювальна записка до валидизаційної роботи виконано з керуваннями порушеннями ДСТУ. Оформлено згідно вимог внутрішнього положення ІТІУ
Нормоконтролер к.т.н., доцент Переш В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і.б. прізвище)

Висновок відповідального за перевірку на наявність академічного плагіату згідно з сервісним програмом ІР уникальних роботи підтверджено
Відповідальна особа к.т.н., доцент Переш В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і.б. прізвище)

Попередня експертиза (захист) _____ магістерської роботи _____

студ. Заволоки М.В. проведена " 26 " листопада 2023 р.
(прізвище і.б.) (бакалаврської роботи чи магістерської роботи)

Висновки Кваліфікаційна робота виконана у повному обсязі. В роботі наведено дослідження методів локального позиціонування користувача в мережі Wi-Fi/Indoor на базі методу Fingerprinting. Запропоновано використання комплексної онлайн-апроксимаційного методу k-найближчих сусідів та Байєсівського методу для визначення координат місця знаходження користувача. Кваліфікаційна робота відповідає вимогам до викуських кваліфікаційних робіт зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія та рекомендована до захисту.

Члени комісії

[Підпис]
(підпис)
[Підпис]
(підпис)
[Підпис]
(підпис)

к.т.н., доцент Цюпа Л.П.
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)
к.т.н., доцент Переш В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)
в.к.н. каф. КІ та ІТ Рибель О.В.
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

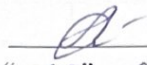
МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій
Освітній ступінь магістр
Галузь знань 12 Інформаційні технології
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІ та ІТ

к.т.н., доц.

 Л.Г. Йона

"25" 09 2023 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Заволоці Марії Володимирівні

1. Тема роботи: Порівняльний аналіз методів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor

керівник роботи к.т.н., доцент каф. комп'ютерних наук Соловська І.М.

затверджені наказом закладу вищої освіти від 25 вересня 2023 р. №1953

2. Строк подання студентом роботи 11.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: 1) Методи позиціонування в мережі Wi-Fi (IEEE 802.11x).

2) Технічні характеристики стандартів IEEE 802.11ac/ad. 3) Алгоритми та методи локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor (стандартів IEEE 802.11ac/ad).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки

Розділ 1: Аналіз технологій мереж радіодоступу Wi-Fi/Indoor (стандартів IEEE 802.11n/ac/ad)

Розділ 2: Аналіз методів локального позиціонування користувача в мережі Wi-Fi/Indoor (стандартів IEEE 802.11n/ac/ad)

Розділ 3: Порівняльний аналіз методів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor

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

Слайд 1 – Порівняння технологій мереж радіодоступу Wi-Fi/Indoor (стандартів IEEE 802.11n/ac/ad)

Слайд 2 – Узагальнена архітектура мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor (стандартів IEEE 802.11n/ac/ad)

Слайд 3 – Аналіз методів локального позиціонування в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor

Слайд 4 – Метод Fingerprinting локального позиціонування в мережі радіодоступу

Слайд 5 – Порівняльний аналіз методів локального позиціонування

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 25.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	25.09.2023-29.09.2023	Вик
2	Аналіз технологій мереж радіодоступу Wi-Fi/Indoor (стандартів IEEE 802.11ac/ad)	2.10.2023-23.10.2023	Вик
3	Аналіз методів локального позиціонування користувача в мережі Wi-Fi/Indoor (стандартів IEEE 802.11ac/ad)	24.10.2023 – 10.11.2023	Вик
4	Порівняльний аналіз методів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor	13.11.2023-24.11.2024	Вик
5	Висновки та рекомендації	27.11.2023-30.11.2023	Вик
6	Перелік посилань	1.12.2023-5.12.2023	Вик
7	Додаток А. Перелік демонстраційного матеріалів	6.12.2023-10.12.2023	Вик

Студент

M. B. Zolotko
(підпис)

М.В. Заволока

Керівник роботи

I. M. Solovska
(підпис)

І.М. Соловська

ВІДГУК КЕРІВНИКА

на кваліфікаційну роботу здобувачки другого (магістерського) рівня
Заволоки Марії Володимирівни
на тему: «Порівняльний аналіз методів локального позиціонування в мережі
Wi-Fi/Indoor»

Розвиток сервісів та додатків LBS сьогодні затребуваний через активне впровадження технологій та пристроїв Інтернет речей IoT, а також подальше вдосконалення пристроїв користувача для визначення місцезнаходження, геолокації, локального пошуку та цільової реклами. Сервіси LBS досить критичні до точності позиціонування, особливо для позиціонування у приміщеннях, тому вони можуть бути надані користувачеві тільки за умови точного визначення його місцезнаходження. Важливим і актуальним завданням є вибір методу локального позиціонування, який дозволив би досягти високої точності позиціонування, саме цьому питанню присвячена магістерська робота.

У магістерській роботі проведено дослідження методів локального позиціонування користувача в мережі Wi-Fi/Indoor на базі методу Fingerprinting. Запропоновано використання комплексної сплайн-апроксимації, методу k-найближчих сусідів та Байєсівського методу для визначення координат місцезнаходження користувача. Результати дослідження дозволяють забезпечити необхідну точність визначення координат користувача за рахунок вибору методу позиціонування.

Під час написання магістерської роботи здобувачка Заволока М.В. відповідально і дисципліновано ставилася до поставлених завдань, проявила працьовитість і цілеспрямованість при проведенні дослідження та оформленні пояснювальної записки.

Кваліфікаційна робота відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт другого (магістерського) рівня та заслуговує оцінки «добре».

Здобувачка Заволока М.В. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з комп'ютерної інженерії за заявленою спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія».

Керівник,
к.т.н., доцент
кафедри комп'ютерних наук

I.M. Соловська

РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну роботу здобувачки другого (магістерського) рівня
Заволоки Марії Володимирівни
на тему: «Порівняльний аналіз методів локального позиціонування в мережі
Wi-Fi/Indoor»

Магістерська робота здобувачки Заволоки М.В. присвячена дослідженню методів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor.

Актуальність теми безсумнівна, адже сьогодні надання послуг та сервісів в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor зазвичай пов'язане з необхідністю визначенням місцезнаходження користувача.

Магістерська робота виконана у повному обсязі у відповідності з завданням.

У роботі розглянуті питання порівняння методів локального позиціонування користувача в мережі Wi-Fi/Indoor на базі методу Fingerprinting. Отримані результати використання комплексної сплайн-апроксимації, методу k-найближчих сусідів та Байєсівського методу для визначення координат місцезнаходження користувача. Визначено похибку використання різних методів та прийнято обґрунтоване рішення про вибір методу позиціонування.

Текстова частина магістерської роботи викладена науковим лаконічним стилем, послідовно, чітко, технічно грамотно.

До недоліків магістерської роботи варто віднести:

1. Доцільно було б при дослідженні позиціонування за допомогою методу k-найближчих сусідів обрати різну кількість «сусідів».
2. При порівнянні методів локального позиціонування, доцільно було б розглянути ще методи нейронної мережі.

Вказані недоліки не знижують цінності виконаної роботи.

У цілому, кваліфікаційна робота здобувачки Заволоки М.В. відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт здобувачів другого (магістерського) рівня та заслуговує оцінки «добре».

Здобувачка Заволока М.В. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з комп'ютерної інженерії за заявленою спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія».

Рецензент, завідувачка кафедри
інформаційних технологій
к.т.н., доцент



Т.І. Григор'єва

Имя пользователя:
Анна Серединко

Дата проверки:
28.12.2023 10:50:22 EET

Дата отчета:
28.12.2023 10:50:50 EET

ID проверки:
1016039517

Тип проверки:
Doc vs Internet + Library

ID пользователя:
100001433

Название файла: МР Заволока М. 2023 25.12.2023

Количество страниц: 56 Количество слов: 9413 Количество символов: 71644 Размер файла: 2.72 MB ID файла: 1015733304

12.4% Совпадения

Наибольшее совпадение: 3.36% с Интернет-источником (<https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/46666a>).

10.9% Источники из Интернета 658 Страница 58

3.68% Источники из Библиотеки 45 Страница 60

0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

0% Исключений

Нет исключенных источников

Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 71

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 58 с., 9 рис., 12 табл., 11 джерел.

МЕРЕЖА WI-FI, СТАНДАРТ IEEE 802.11X, INDOOR, ЛОКАЛЬНЕ ПОЗИЦІОНУВАННЯ, МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ, КООРДИНАТИ КОРИСТУВАЧА, МЕТОД FINGERPRINTING, МЕТОД К-НАЙБЛИЖЧИХ СУСІДІВ, БАЙЕСІВСЬКИЙ МЕТОД, КВАДРАТИЧНІ ПЛОСКІ СПЛАЙНИ, КОМПЛЕКСНА СПЛАЙН-АПРОКСИМАЦІЯ, ПОХИБКА,

Об'єкт дослідження – мережа радіодоступу Wi-Fi/Indoor.

Мета дослідження – порівняння результатів точності знаходження координат користувача в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor на основі методу Fingerprinting з використанням методу k-найближчих сусідів, Байєсівського методу та комплексної сплайн-апроксимації.

Методи дослідження – метод Fingerprinting, метод k-найближчих сусідів, байєсівський метод.

У магістерській роботі проведено дослідження методів локального позиціонування користувача в мережі Wi-Fi/Indoor на базі методу Fingerprinting. Запропоновано використання комплексної сплайн-апроксимації, методу k-найближчих сусідів та Байєсівського методу для визначення координат місцезнаходження користувача. Результати дослідження дозволять забезпечити необхідну точність визначення координат користувача за рахунок вибору методу позиціонування.

ABSTRACT

Text part of the master's thesis: 58 p., 9 figures, 12 tables, 11 sources.

WI-FI NETWORK, 802.11X STANDARD, INDOOR, LOCAL POSITIONING, LOCATION, USER COORDINATES, FINGERPRINTING METHOD, K-NEAREST NEIGHBOURS METHOD, BAYESIAN METHOD, QUADRATIC FLAT SPLINES, COMPLEX SPLINE APPROXIMATION, ERROR,

The object of study is a Wi-Fi/Indoor radio access network.

The purpose of the study is to compare the results of the accuracy of finding the user's coordinates in a Wi-Fi/Indoor radio access network based on the Fingerprinting method using the k-nearest neighbours method, the Bayesian method and the complex spline approximation.

Research methods - Fingerprinting method, k-nearest neighbours method, Bayesian method.

In the master's thesis, a study of methods for local positioning of a user in a Wi-Fi/Indoor network based on the Fingerprinting method was conducted. It is proposed to use complex spline approximation, k-nearest neighbours method and Bayesian method to determine the user's location coordinates. The results of the study will ensure the required accuracy of determining the user's coordinates by choosing a positioning method.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ МЕРЕЖ РАДІОДОСТУПУ WI-FI/INDOOR (СТАНДАРТІВ IEEE 802.11N/AC/AD).....	11
1.1 Класифікація та характеристики технологій радіодоступу	11
1.2 Огляд технологій стандартів IEEE 802.11x.....	13
1.3 Технології IEEE 802.11n та 802.11ac.....	15
1.4 Узагальнена архітектура мережі Wi-Fi (стандарту IEEE 802.11 n/ac)	17
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ КОРИСТУВАЧА В МЕРЕЖІ WI- FI/INDOOR (СТАНДАРТІВ IEEE 802.11N/AC/AD).....	21
2.1 Класифікація методів локального позиціонування.....	21
2.2 Метод Fingerprinting	28
2.3 Метод k-найближчих сусідів	31
2.4 Комплексна сплайн-апроксимація на базі комплексних квадратичних плоских сплайнів	34
2.5 Метод Байеса	36
3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖІ WI-FI/INDOOR	38
3.1 Вихідні дані для дослідження	38
3.2 Вирішення задачі порівняння результатів позиціонування користувача за допомогою різних методів	41
3.3 Визначення похибки позиціонування.....	44
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	47
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	48
Додаток А ПЕРЕЛІК ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ	50

ВСТУП

Розвиток сервісів та додатків LBS (Location-based Services) сьогодні затребуваний через активне впровадження технологій та пристроїв Інтернет речей IoT (Internet of Things), а також подальше вдосконалення абонентських пристроїв UE (User Equipment) мобільного зв'язку для визначення розташування користувача, геолокації, локального пошуку та цільової реклами.

Відомо, що сервіси та додатки LBS досить критичні до точності позиціонування та відповідного вибору технології радіодоступу, особливо для визначення розташування у приміщеннях IPS (Indoor Positioning System). Послуги сервісів та додатків LBS можуть бути надані користувачеві тільки за умови точного визначення його місцезнаходження, а навіть незначні похибки у місцезнаходженні користувача не дозволяють реалізувати сервіс.

Важливим і актуальним завданням сьогодні є вибір методу локального позиціонування, який дозволив би досягти високої точності позиціонування, а враховуючи необхідність реалізації на смартфонах, задовольняв би умовам значних і серйозних обмежень з точки зору потужності, пам'яті, безпеки та обчислювальних ресурсів.

Використання методу Fingerprinting для позиціонування користувачів в мережі Wi-Fi дозволяє розглянути низку алгоритмів для визначення координат місцезнаходження користувача, серед яких: алгоритм k-найближчих сусідів, Байєсівський підхід та комплексна сплайн-апроксимація.

В цьому змісті й розрахована магістерська робота, яка розглядає порівняння порівняння результатів точності локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor на основі методу Fingerprinting з використанням методу k-найближчих сусідів, квадратичних комплексних плоских сплайнів та Байєсівського підходу з метою підвищення точності місцезнаходження користувача.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ МЕРЕЖ РАДІОДОСТУПУ WI-FI/INDOOR (СТАНДАРТІВ IEEE 802.11AC/AD)

1.1 Класифікація та характеристики технологій радіодоступу

Розвиток мереж радіодоступу в Україні основним напрямком розвитку має впровадження технологій широкопasmового радіодоступу BWA (Broadband Wireless Access) для надання сучасної номенклатури мультисервісних послуг для користувачів (передачі мови, даних та відеозображень), пов'язаних з високошвидкісним доступом до мережі Інтернет.

Сьогодні найбільш популярними серед користувачів є технології широкопasmового радіодоступу. Це пов'язано насамперед з абонентським обладнанням користувачів, яке має значну кількість радіоінтерфейсів та можливостями швидкого доступу до широкопasmового передавання даних.

Виконаємо порівняння різних технологій широкопasmового та мобільного радіодоступу з точки зору використання для реалізації за показниками швидкості, ширини каналу, технології доступу, радіусу дії та інше. В табл. 1.1 приведена порівняльна характеристика основних технічних характеристик технологій Wi-Fi стандартів IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac та IEEE 802.11ax, стандарту UMTS/WCDMA та технології LTE [1].

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика технологій BWA

Технологія	Клас	Стандарт	Швидкість, Мбіт/с	Дальність дії	Частотний діапазон
UWB	WPAN	802.15.3a	110-480	10 м	7,5 ГГц
Bluetooth®	WPAN	802.15.1x	0,720	10 м	2,4 ГГц
Wi-Fi	WLAN	802.11n	300	100 м	2,4-5 ГГц
Wi-Fi	WLAN	802.11ac	1,3 Гбіт/с	70 м	5 ГГц
Wi-Fi	WLAN	802.11ax	5 Гбіт/с	50 м	2,4-5 ГГц
WCDMA/ UMTS	WWAN	3G, 3,5G	2 (HSPDA 10)	1 км	2100 МГц
LTE	WWAN	4G	300	від 800 м до 5 км	від 700 МГц до 2,7 ГГц

Існуючі безпроводові мережі різних технологій мають достатньо широкую номенклатуру надаваних абонентських послуг. Їх відрізняє безпрецедентна гнучкість в досягненні оптимального співвідношення між продуктивністю і вартістю рішення. Такі мережі дають можливість надання множинного доступу, забезпечують високі швидкості передачі даних, мінімальний час очікування і якнайкраща якість послуг зв'язку з рухомими об'єктами та мобільними користувачами [1].

Технології Wi-Fi відрізняються значною кількістю стандартів з різними характеристиками швидкості передавання від 300 Мбіт/с до 1,3 Гбіт/с, радіусами дії та принципами використання. В табл. 1.1 приведені найбільш використовувані сьогодні IEEE 802.11n/ac, які реалізовані в обладнанні користувачів (смартфони, планшети, ноутбуки, нетбуки та інш.). Використання технології Wi-Fi сьогодні досить активне, як в межах приміщень Wi-Fi/Indoor, так і в межах міських мереж Wi-Fi/Outdoor [1].

Стрімкий розвиток мереж технології Wi-Fi сьогодні, згідно [], показаний на рис. 1.1. Переважно до 2025 року затребуваною технологією розвитку є IEEE 802.11ac та IEEE 802.11n, а розвиток високошвидкісної технології IEEE 802.11ax – майже незначним [1].

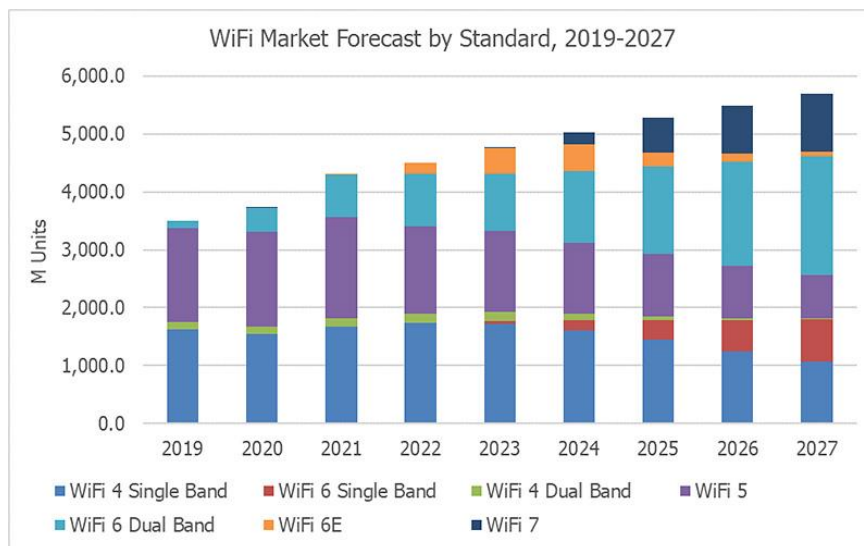


Рисунок 1.1 – Розвиток мереж технології Wi-Fi [1]

Стандарт UMTS/WCDMA використовується для організації радіодоступу мобільних мереж GSM/GPRS/EDGE, шляхом покриття території базовими станціями WCDMA для забезпечення швидкості передавання до 42 Мбіт/с.

Кожна з технологій може використовуватися для реалізації мережі широкосмугового радіодоступу. Однак, слід відмітити важливу перевагу технології Wi-Fi IEEE 802.11n/ac в порівнянні з а іншими безпроводними технологіями. Насамперед, це швидкісні показники – до 1,3 Гбіт/с, та достатньо висока швидкість розгортання мережі, яка не потребує капітального будівництва. Повсемісне поширення технології та наявність її у бідь-якому пристрої робить технологію IEEE 802.11n/ac основною щодо надання радіодоступу до мережі [1].

1.2 Огляд технологій стандартів IEEE 802.11x

Мікрохвильова технологія доступу Wi-Fi (група стандартів IEEE 802.11x) працює у діапазонах 2,400...2,4835 ГГц, або 5,150...5,350 ГГц та 5,620...5,850 ГГц, які не потребують ліцензування. Максимальна швидкість передачі даних в радіомережі – від 300 Мбіт/с для діапазону 2,4 ГГц до 1,3 Гбіт/с для діапазону 5 ГГц. Мережа радіодоступу розгортається за стільниковою топологією. В сегменті одного оператора підтримуються функції мобільності. Передбачено стандартизовані надійні механізми WEP (Wired Equivalent Privacy) забезпечення конфіденційності шляхом автентифікації користувачів, шифрування інформації, захисту від її перехоплення та від несанкціонованого доступу.

Основні стандарти, що регламентують технологію Wi-Fi, це [1-4]:

Стандарт IEEE 802.11n – повністю сумісний з IEEE 802.11g і забезпечує швидкість передавання до 300 Мбіт/с в діапазоні 2,4 ГГц за рахунок використання МІМО антен.

Стандарт IEEE 802.11ac - повністю сумісний з IEEE 802.11n і забезпечує швидкість передавання до 1,3 Гбіт/с в діапазоні 5 ГГц за рахунок використання МІМО антен.

Стандарт IEEE 802.11ax - повністю сумісний з IEEE 802.11ac і забезпечує швидкість передавання до 5 Гбіт/с в діапазоні 5 ГГц за рахунок використання МІМО антен.

Порівняльна характеристика стандартів IEEE 802.11x приведена у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика стандартів IEEE 802.11x

Стандарт	IEEE 802.11n (Wi-Fi 4)	IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)	IEEE 802.11ax/ad (Wi-Fi 6)
Частотний діапазон, ГГц	2,4	5	2,4/5 ГГц
Швидкість передавання (один 1 Spatial Stream), Мбіт/с	150	866,7	1,2
Швидкість передавання (один 2 Spatial Stream), Мбіт/с	300	1,73	2,5
Ширина смуги, МГц	20,40	20,40,80,160	20,40,80,160
Вид модуляції	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
Дальність дії, м	100	70	50
Макс. кількість SU- потоків	4	8	8
Макс. кількість MU- потоків	NA	4	8
Вид кодування	64-QAM 5/6	256-QAM 5/6	1024-QAM 5/6
Максимальна кількість OFDM	128	512	2048

Існуюча класифікація частіше класифікує стандарти IEEE за класами Wi-Fi, коли IEEE 802.11n – це клас Wi-Fi 4, IEEE 802.11ac – це клас Wi-Fi 5, а IEEE 802.11ax/ad – це клас Wi-Fi 6 [1-4].

Технологія найбільш ефективна для побудови безпроводових локальних комп'ютерних мереж WLAN (Wireless Local Access Node) та для організації активних зон Hot Spot – пунктів доступу в місцях концентрованого перебування потенційних користувачів.

Такі пункти можуть розгортатися в місцях громадського харчування, клієнтську базу яких складають представники малого і середнього бізнесу, в готелях, залах очікування аеропортів, великих залізничних та автовокзалів. Тому важливим фактором при проектуванні мереж IEEE 802.11x є особливості використання різних стандартів при проектуванні мережі у приміщеннях, або поза приміщеннями.

1.3 Технології IEEE 802.11n та 802.11ac

Стандарт IEEE 802.11n заснований на технології OFDM-MIMO (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Multiple Input Multiple Output) ортогонального частотного мультиплексування з множинними входами та виходами. Стандарт IEEE 802.11n використовує частотний діапазон 5 або 2,4 ГГц [1-4]. Особливістю стандарту IEEE 802.11n є збільшення швидкості передачі даних за рахунок збільшенню ширини смуги частот каналу з 20 до 40 МГц та реалізації технології MIMO.

Використання технології MIMO передбачає застосування N передавальних та N приймаючих антен, тоді здатна забезпечити пропускну здатність в N раз більшу, у порівнянні з існуючими антенними системами. В цьому випадку потік даних розподіляється на незалежні послідовності біт, це дозволяє пересилати їх одночасно, використовуючи масив N антен [1-4]. При передачі використовується просторове мультиплексування, дозволяючи передавати дані за допомогою антен незалежно одна від одної в одному тому самому частотному діапазоні. Для прикладу розглянемо систему MIMO, яка складається з N передавальних й M приймаючих антен, яка показана на рис. 1.2. Побудова технології використовується за допомогою приймальних та передавальних антен, які обслуговують потоки даних $b_1, b_4, b_5, \dots, b_k, b_2, b_2, \dots, b_{k+1}, b_3, b_6, \dots, b_{k+1}$ за допомогою приймально-передавальних пристроїв h_{11}, \dots, h_{nm} .

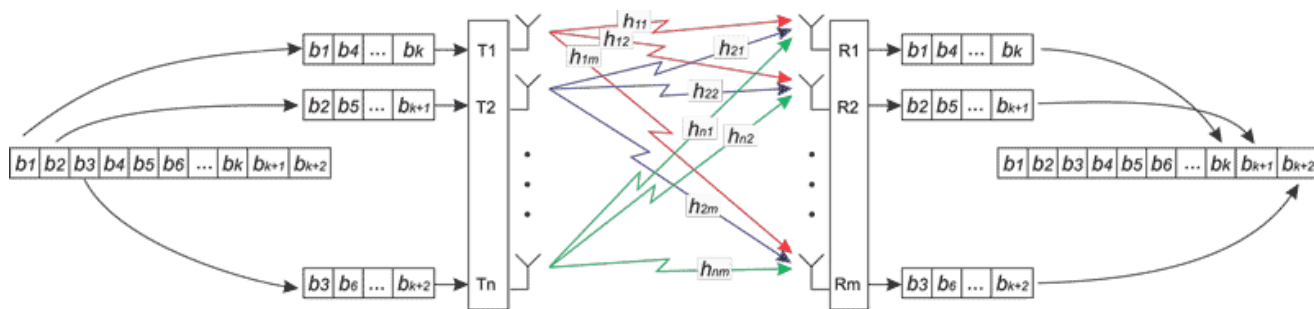


Рисунок 1.2 – Приклад технології MIMO

Особливістю технології MIMO є застосування визначеної кількості передавальних і приймаючих антен, що дозволяє значно підвищити пропускну здатність радіоканалу за рахунок використання декількох просторово-рознесених підканалів, при цьому дані передаються в тому самому частотному діапазоні. Важливим є відмітити, що технологія MIMO не змінює метод кодування даних та

може бути використана разом з будь-якими методами фізичного й логічного кодування даних [1-4]. З точки зору апаратної реалізації стандарт IEEE 802.11n може використовувати MIMO 4x4 для кожної точки доступу та роутера, при цьому обов'язково має підтримувати дві антени MIMO для точки доступу та одну антену для роутера.

Стандарт IEEE 802.11n використовує стандартні канали з шириною смуги 20 МГц та канали 40 МГц. Для функціонування стандарту IEEE 802.11n передбачено два режими передачі: традиційний L і режим з високою пропускнуою здатністю HT (High Throughput). Для традиційного режиму використано 52 частотних OFDM-підканала, з яких 48 використано для даних, а 4 – для службових даних. При роботі у режимі з підвищеною пропускнуою здатністю (ширина смуги каналу 20 МГц) використовується 56 частотних підканалів, з яких 52 - для передачі даних, 4 – пілотні [1-4]. В цілому, при використанні каналу з шириною смуги 20 МГц збільшення частотних підканалів з 48 до 52 забезпечує підвищення швидкості передачі на 10%.

При застосуванні каналу шириною смуги 40 МГц, у традиційному режимі передачі використовується два канали шириною смуги 20 МГц. Відповідно кількість піднесучих частот, збільшується вдвічі (104 підканала, з яких 96 є інформаційними, а 8 - сигнальними).

При використанні каналу 40 МГц та режиму з високою пропускнуою здатністю використовується 114 частотних підканалів, з яких 108 підканалів – інформаційні, а шість – пілотні, тоді швидкість в каналі може бути збільшена на 125% [1-4]. Попри все, в стандарті IEEE 802.11n збільшення швидкості передачі відбувається за рахунок скорочення часу інтервалу GI у OFDM-символах з 0,8 до 0,4 мкс і підвищення швидкості згорткового кодування. Максимальна швидкість згорткового кодування дорівнює 5/6, тобто кожні п'ять вхідних біт у згортковому кодері перетворюються в шість вихідних [1-4].

На відміну від стандарту IEEE 802.11n, стандарт мереж радіодоступу 802.11ac працює тільки у діапазоні частот 5 ГГц. Використання частотного діапазону 5 ГГц забезпечує вільніший радіоефір, що надає можливості підвищення швидкості з'єднання [1-4].

Для стандарту IEEE 802.11ac максимальна теоретична швидкість становить до 6,9 Гбіт/с, однак пристрої стандарту IEEE 802.11ac мають можливість працювати зі швидкістю передачі даних до 1,3 Гбіт/с. Це можливо за рахунок збільшення ширини смуги каналу до 80 МГц та збільшення кількості просторових потоків і підтримки виду модуляції 256-QAM [1-4].

У порівнянні зі стандартом IEEE 802.11n, який використовує до 4 просторових потоків SU, в стандарті IEEE 802.11ac просторових потоків SU становить 8. Така побудова дає можливість при одночасному передаванні даних уникнути колізій при передачі через роздільні просторові потоки SS (Spatial Streams) [1-4].

Для стандарту IEEE 802.11ac використовується модуляція 256-QAM, яка забезпечує збільшення пропускної спроможності в мережі радіодоступу. Модуляція 256-QAM в порівнянні з 64-QAM для стандарту 802.11n значно збільшити швидкість передачі даних [1-4].

В стандарті IEEE 802.11ac при ширині каналу 40 МГц, якщо використовується один просторовий потік для модуляції 256-QAM максимальна швидкість в каналі складає до 200 Мбіт/с, а для стандарту IEEE 802.11n для таких же параметрів для модуляції 64-QAM він становить 150 Мбіт/с.

Особливістю стандарту IEEE 802.11ac є робота технології формування спрямованого сигналу Beamforming (Transmit Beamforming або Tx Beamforming). Використання технології Beamforming дозволяє вирішити проблему падіння потужності сигналу, яка викликана його відображенням від різних предметів і поверхонь.

1.4 Узагальнена архітектура мережі Wi-Fi (стандарту IEEE 802.11 n/ac)

Широкосмугова мережа радіодоступу, так звана активна зона Hot Spot (HS) технології Wi-Fi утворюється з застосуванням значної кількості стандартних апаратно-програмних засобів локальних мереж Ethernet, тому мережа радіодоступу розгортається швидко і з відносно невеликими витратами [1-4].

На мережі Wi-Fi стандарту IEEE 802.11ac повинні застосовуватись програмно-апаратні засоби, показані на рис. 2.2.

На кожному пункті радіодоступу має встановлюватись джерело безперебійного живлення (UPS) на випадок збоїв у зовнішній електромережі, тільки у разі використання обладнання, яке не підтримує живлення завдяки технології PoE (Power over Ethernet).

Для організації мережі необхідні точки доступу AP (Access Point), які забезпечать доступ до мережі передавання даних і великої кількості абонентських станцій.

Точки доступу AP забезпечують взаємодію по радіоканалу з абонентськими станціями (мобільними телефонами, ноутбуками, нетбуками) через радіоінтерфейс стандарту IEEE 802.11ac і взаємодію з мережею передачі даних по протоколу Ethernet. Точки радіодоступу AP – базові станції (БС) мають стандартні інтерфейси Ethernet 10/100Base-T.

Кожна точка доступу забезпечує покриття зони обслуговування Радіус зони обслуговування залежить від параметрів фізичного рівня і залежить від створююмого навантаження[1-3].

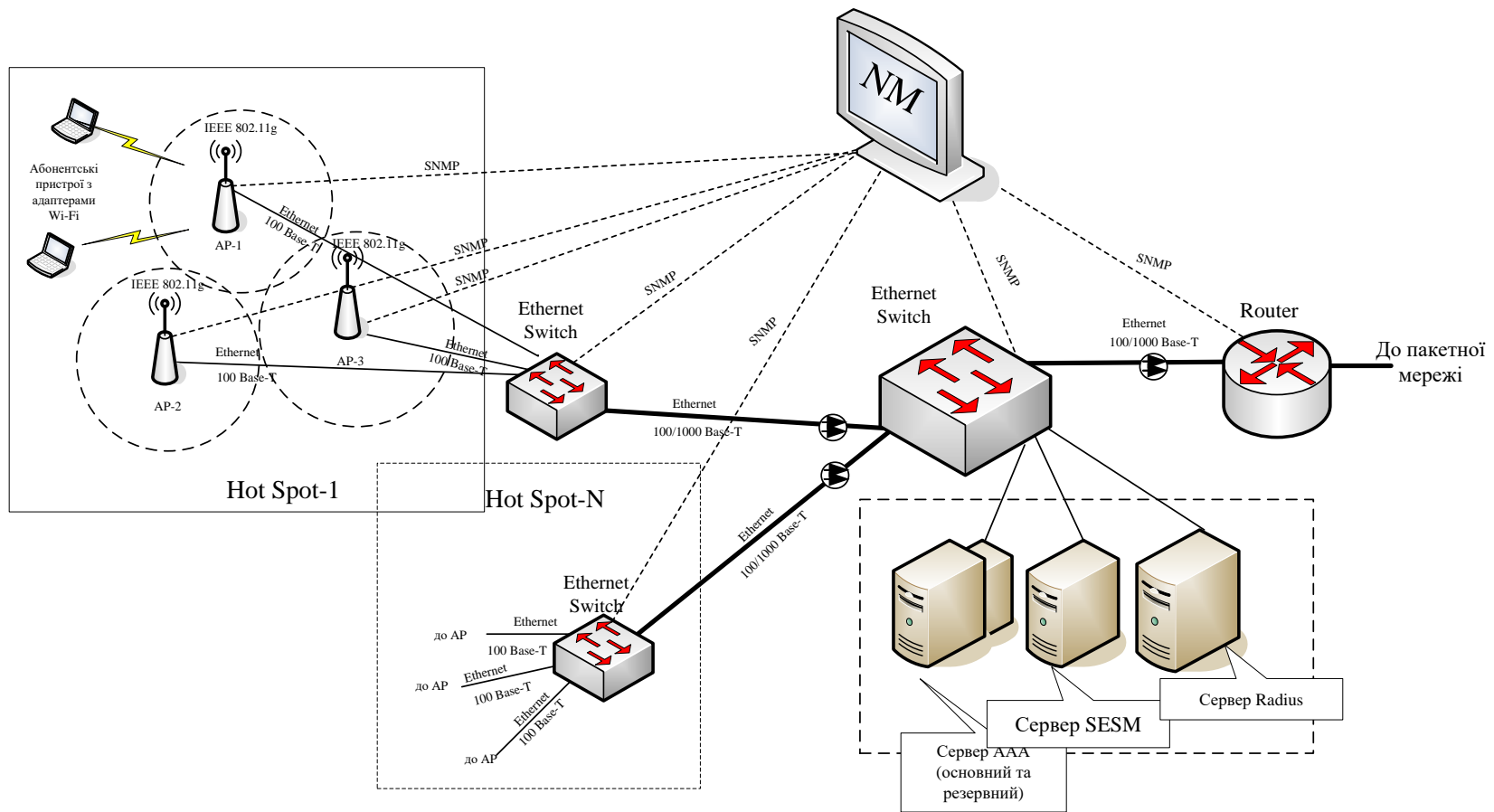


Рисунок 1.2 – Структурна схема активних зон Hot Spot технології Wi-Fi

Всі точки доступу AP однієї активної зони Hot Spot з'єднуються одна з одною та зі службовими серверами за допомогою концентратора або комутатора Ethernet. Концентратор використовують у разі невеликого, а комутатор – у разі значного очікуваного навантаження.

Оскільки основним для мережі Wi-Fi (стандарту IEEE 802.11ac) є масовий доступ до мережі Internet, то на ділянці доступу до транспортної мережі доцільні лінії зі значною пропускною спроможністю – Gigabit Ethernet.

Рекомендація MCE Y.1231 передбачає такі елементи мережі доступу Wi-Fi (стандарту IEEE 802.11) [1-4]:

- основний та резервний сервери AAA (Authorization, Authentication, Accounting) автентифікування користувачів, санкціонування доступу і нарахування плати, інформація та функції яких дублюються; автентифікація користувачів можлива за поширеним протоколом RADIUS;

- сервер SESM (Subscriber Edge Services Manager) управління послугами на абонентському боці для реєстрації користувачів і відвідувачів мережі, що дозволяє відрізнити власних користувачів мережі радіодоступу від користувачів інших мереж, які поточно користуються даною мережею, і відповідно нараховувати плату за надані їм послуги.

При організації активної зони Wi-Fi оплата наданих послуг повинна організовуватися за передплаченими картками для масового доступу до Internet та за рахунками для готелів, пунктів громадського харчування тощо з забезпеченням можливості надання єдиного рахунку за послуги основної діяльності і за телекомунікаційні послуги, отримані через мережу радіодоступу.

Для активної зони Wi-Fi (стандарту IEEE 802.11), передбачається підтримка віртуальних локальних мереж VLAN та можливість регулювання параметрів якості обслуговування.

Для централізації технічного обслуговування і управління мережею Wi-Fi (стандарту IEEE 802.11x) включно з дистанційним конфігуруванням обладнання застосовується протокол SNMPv2 простого управління мережею.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ КОРИСТУВАЧА В МЕРЕЖІ WI-FI/INDOOR (СТАНДАРТІВ IEEE 802.11N/AC/AD)

2.1 Класифікація методів локального позиціонування

Розвиток та впровадження сучасних додатків, які засновані на визначенні місцезнаходження користувача, передбачають використання двох основних підходи: глобального позиціонування GPS (Global Positioning System) та локального позиціонування LPS (Local Positioning System). Використання глобального позиціонування GPS, як правило відбувається поза приміщеннями Outdoor на відкритому просторі, але досить часто неможливе при знаходженні користувача всередині приміщення Indoor, через сильне погашення сигналів у стінах та перекриттях будівель, тоді використовується локальне позиціонування [2].

Глобальне позиціонування GPS має велике охоплення та дозволяє отримати досить високу точність позиціонування, а в приміщеннях системи GPS мають низьку точність. Системи локального позиціонування, навпаки, дозволяють отримати точні значення координат озволяють досить точно визначати місце розташування в приміщеннях [2-3].

В якості технологій, які забезпечують можливості локального позиціонування частіше розглядаються технології Wi-Fi (IEEE 802.11n/ac/ad), ZigBee чи Bluetooth Low Energy (IEEE 802.15x standards), пасивні технології RFID (Radio Frequency Identification) або надширокосмугові UWB (Ultra WideBand) [2-5]. Зважаючи на найширше поширення саме технологій Wi-Fi в приміщеннях Indoor доцільно розглядати саме цю технологію. Позиціонування в мережі Wi-Fi (IEEE 802.11n/ac/ad) відбувається з використанням існуючого обладнання - точок доступу AP (Access Point) мережі Wi-Fi [3].

Позиціонування в мережі технології Wi-Fi/Indoor (IEEE 802.11n/ac/ad) дозволяє визначати місцезнаходження користувача без необхідності додаткового обладнання та складного обслуговування інфраструктури. Точка доступу Access Point мережі Wi-Fi/Indoor у приміщенні виконує виміри і обчислює положення користувача. Завдяки використанню локального позиціонування на базі Wi-Fi/Indoor мережі можна обчислювати місцезнаходження з досить високою точністю близько 2-3 метри.

Позиціонування на базі технології BLE (Bluetooth Low Energy) дозволяє визначати місцезнаходження користувача з точністю 2-5 метрів. Для позиціонування в мережі BLE використовуються iBeacon-маячки, які передають свої ідентифікатори на зчитувачі всередині приміщень. Серверна система приймає передану інформацію і відразу обчислює місцезнаходження. Особливістю BLE вважається не вимогливість до великої кількості зчитувачів, а iBeacon-маячки в процесі роботи витрачають мінімум енергії [3].

Позиціонування на базі технології UWB враховує, що технологія відноситься до бездротових, що функціонують на невеликих відстанях із мінімальними витратами енергії. Завдяки тому, що UWB має надзвичайно широкі сигнали, вона є однією з найточніших технологій для позиціонування всередині приміщення. Але в той же час є найдорожчою з точки зору реалізації.

Серед технологій, які також можуть бути долучені до визначення місцезнаходження слід віднести технології, що використовують лазерні далекоміри та датчики, що вимірюють орієнтацію у просторі – альтиметри, гіроскопи та 3D-акселерометри [3]. Однак, відомо, що сучасний технологічний рівень не дозволяє використовувати інерційні датчики як основу системи визначення місцезнаходження в приміщеннях внаслідок ефекту накопичення помилки за короткостроковий період.

Технології з урахуванням сигналів GSM/CDMA/3G/LTE мають низьку точність для вирішення задачі визначення місцезнаходження, адже використовують власні системи позиціонування. Ультразвукові методи, методи радіочастотної ідентифікації RFID не дозволяють організувати захищений канал управління, а деякі з них не забезпечують, у тому числі, ідентифікацію пристрою користувача [3].

Залежно від технічних характеристик обладнання мереж радіодоступу Wi-Fi для позиціонування може використовуватися низка методів, які засновані на фізичних характеристиках радіосигналу (рис. 2.1) [2-5]:

- AOA (Angle of Arrival) – використання кутового сигналу, отриманого відносно точки доступу Access Point за допомогою діаграми спрямованості антени;

- RSS (Received Signal Strength) – використовує вимірювання рівня потужності прийнятого сигналу;

- TOA (Time of Arrival) та TDoA (Time Difference of Arrival) – використовують метод трилатерації, згідно з якими місцезнаходження користувача визначається за вимірами затримки поширення радіосигналу між

пристроєм користувача та точкою доступу Access Point.

Системи локального позиціонування мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor (рис. 2.1) базуються на трьох основних принципах функціонування: триангуляції, трилатерації та аналізу сцени.

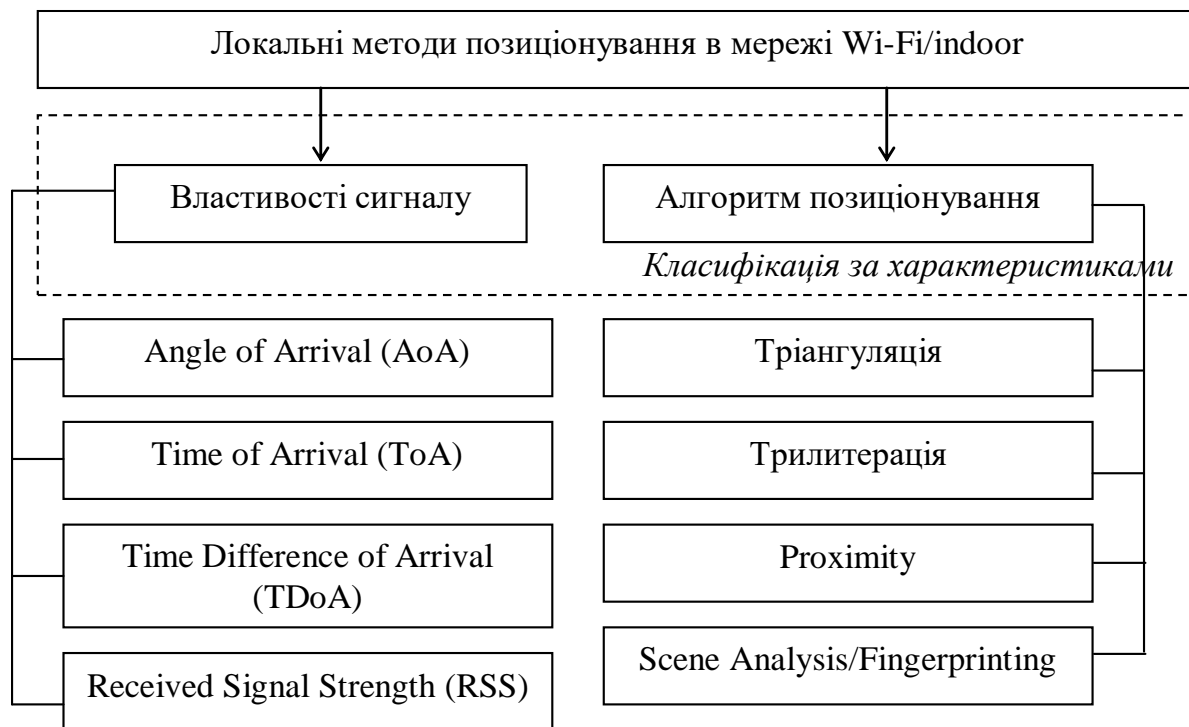


Рисунок 2.1 – Класифікація методів локального позиціонування

Метод трилатерації (Trilateration) використовує оцінки координат з урахуванням обчислення точки перетину геометричних фігур. Для дальномірного методу ToA, заснованого на визначенні часу поширення радіосигналу, вимірний час приходу сигналу на площині утворює кола, а просторі – сфери.

Для різницево-дальномірного методу TDoA, заснованого на визначенні різниці часу прибуття радіосигналу, – виміри різниці часу приходу сигналу на площині утворює гіперболи, а просторі – гіперболоїди. Крім часу приходу, можна вимірювати рівень потужності сигналу RSS (Received Signal Strength) або різницю потужності рівнів DRSS (Difference of RSS) [5].

У методі RSSI використовуються всі звичайні вузли оснащені радіоприймачем, і всі якірні вузли (радіосигнали) періодично передають свої розташування, які використовуються для оцінки відстані [5]. Для оцінки відстані від передавача до приймача використовується: потужність сигналу, що передається і приймається; модель втрат під час передачі сигналу.

Після отримання цієї відстані положення вузлів датчиків можуть бути оцінені за допомогою трилатерації. Значення RSSI залежить не тільки від відстані, а й в значній мірі від довкілля, орієнтації антени, руху передавача, приймача та джерела живлення. Це означає, що інформація RSSI може бути непередбачуваною, тому що відображення та ослаблення, викликані об'єктами у навколишньому середовищі, можуть надавати набагато більше впливає на RSSI, ніж відстань. Тому досить складно отримати точну відстань методом RSSI. Однак, серед методів вимірювання на основі діапазону метод RSSI є найбільш поширеним, найдешевшим і простим, оскільки не потребує додаткового обладнання (наприклад, інфрачервоного або ультразвукового датчика). Крім того, в реальному середовищі RSSI дуже чутливий до шуму та перешкод, особливо для внутрішнього середовища. При цьому слід враховувати похибки вимірюваних значень, які можуть бути отримані через багатопроменеве поширення, ефектів згасання та відображення. З іншого боку, схема на основі RSSI вимагає більшої кількості даних по порівняно з іншими методами задля досягнення вищої точності [5].

Метод триангуляції (Triangulation) дозволяє виконати оцінки координат на основі обчислення точки перетину кутів приходу сигналу AoA або напрямів приходу сигналу DoA (Direction of Arrival). Метод триангуляції джерела заснований на визначенні кута приходу сигналу на кількох позиціях AoA. Для визначення кута приходу сигналів використовуються антенні решітки, що встановлюються на точці доступу Access Point мережі Wi-Fi/Indoor [6].

Метод визначення кута прийому AoA (Angle of Arrival) – це метод визначення напрямку поширення радіочастотної хвилі. Традиційний підхід до вимірювання кутів полягає у використанні спрямованих антен, що обертаються навколо своєї осі. Інший метод полягає у визначенні напрямку поширення радіочастотної хвилі, що падає на антенну. Цей підхід не може бути використаний у мережах, що складаються з малогабаритних датчиків, що мають лише одну настройку антени. Вимірювання AoA можуть бути отримані з використанням методу формування діаграми спрямованості, коли формування променя виходить за допомогою амплітудного відгуку приймальних антен. Промінь приймальної антени обертається електронним способом, що допомагає визначити напрямок передавача [3]. Особливістю використання методу AoA є значний вплив на точність вимірів комбінації факторів, включаючи багатопроменеве відображення та фоновий шум. Багатопроменеве відображення сигналу або деякий шум може з'являтися як сигнал, що надійшов з іншого вузла. Коли невідомий вузол отримує

цей сигнал (шум), метод AoA неправильно виявить необхідний йому вузол. Це призведе до великої похибки в оцінці кутів прийому сигналів.

Методи ToA та TDoA, засновані на вимірюванні затримки поширення радіосигналу, використовують трилатерацію, тоді як метод AoA використовує триангуляцію, а метод Fingerprinting використовує аналіз сцени.

Метод ToA використовує визначення відстані на основі часу, який сигнал витрачає на переміщення від передавача до приймача. Оскільки швидкість поширення радіосигналу відома як у вільному просторі, так і в повітрі, вона дає пряму оцінку відстані між передавачем і приймачем після оцінки часу проходження [3]. Коли розглядаються системи ToA, єдиним важливим параметром, який має бути правильно оцінений серед багатопроменевого поширення, є шлях.

Метод сусідства або близькості (Proximity) – дозволяє виконати оцінки координат на основі відомого місця розташування найближчого опорного вузла. При функціонуванні методу, заснованого на аналізі близькості, оцінка місцезнаходження користувача відбувається по близькості до приймача сигналу відносно інших. Прикладом може бути метод ідентифікатора стільника Cell ID в мережі мобільного зв'язку, який дозволяє визначити місцезнаходження користувача в мережі мобільного оператора з точністю до стільника.

Метод аналізу сцен (Scene Analysis, Fingerprinting) – це метод оцінки координат на основі аналізу відповідності поточних первинних вимірювань (RSS або ToA) наявних у наперед створеній базі даних, коли кожному набору вимірювань у базі даних відповідає своє місцезнаходження користувача. Як приклад, можна навести так званий «метод радіокарти», отриманої за вимірюваннями рівня сигналу RSS [3].

Даний метод вимагає заздалегідь побудови радіокарти для заданої ділянки, тобто попередні вимірювання потужності сигналу RSS слід занести в базу даних в залежності від розташування пристрою користувача. Однак, такий метод має недолік – будь-яка зміна обстановки на цій ділянці, здатна вплинути на умови поширення радіохвиль і таким чином на вимірювання потужності сигналу RSS, вимагає актуалізації радіокартки.

Для визначення місцезнаходження користувача в мережі Wi-Fi/Indoor за допомогою методу аналізу сцен, можуть бути використані різні методи, а саме: методи інтелектуального аналізу даних такі, як імовірнісні методи, метод k-найближчих сусідів, метод опорних векторів, байєсовський підхід або метод найменших квадратів та інші.

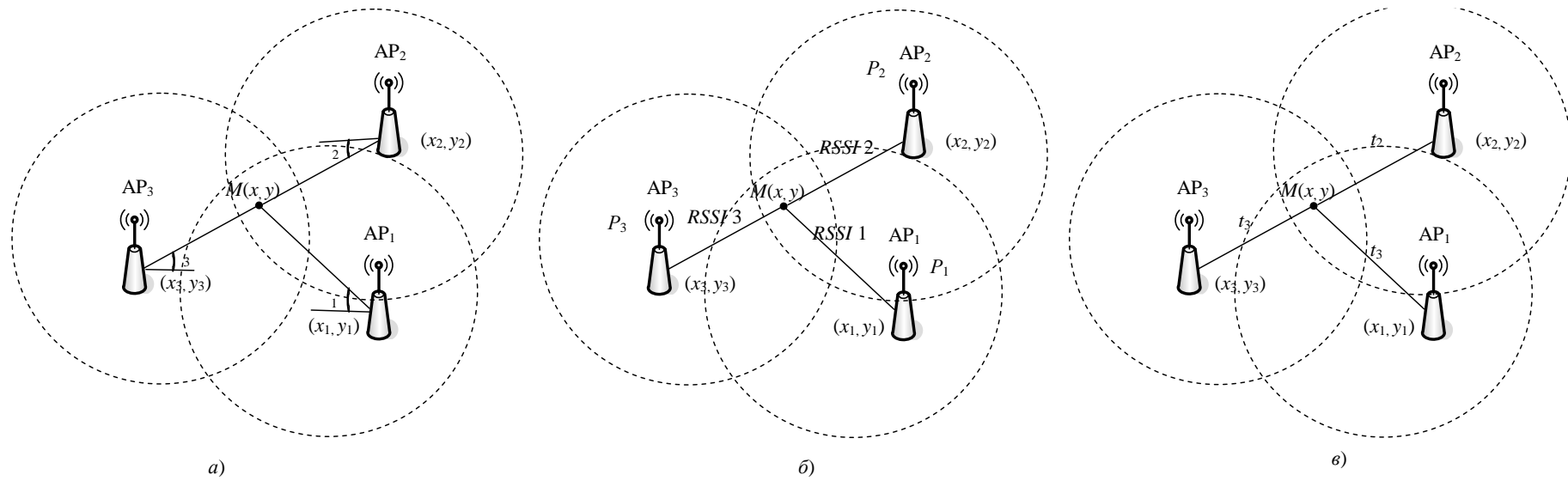


Рисунок 2.2 – Методи локального позиціонування

Тоді, можна стверджувати, що метод аналізу сцен (Scene Analysis, Fingerprinting) визначення місцезнаходження користувача, має можливість підвищення точності позиціонування за рахунок використання різних методів для визначення координат користувача.

Метод AoA використовує кутовий сигнал, отриманий відносно точки доступу, на основі діаграми спрямованості антени (рис. 2.2, а), щоб визначити місцезнаходження користувача. Для цього використовуються точки доступу Access Point, які оснащені обертовою антеною або фазованою антенною решіткою. Отримавши напрямлення джерело сигналу від точки доступу Access Point, можна визначити координати його місцезнаходження. Причому, важливим фактором є кількість точок доступу Access Point, чим більше таких точок, тим точнішим буде результат визначення координат користувача.

У мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor, яка використовує метод AoA, для визначення місцезнаходження користувача, точність визначення місцезнаходження залежить від кількості точок доступу AP. Основною перевагою методу AoA є простота алгоритму визначення місця розташування користувача та можливість працювати на різних фізичних принципах, великий радіус дії. Недоліками є вимоги до конструкції антени та низька точність позиціонування користувача [3-4].

Метод RSS (Received Signal Strength) базується на вимірюванні потужності отриманого сигналу та дозволяє визначити місцезнаходження пристрою на основі потужності сигналу, отриманого від точки доступу (рис. 2.2, б).

Основною перевагою цього методу є низьке енергоспоживання мобільного пристрою при позиціонуванні та низька вартість, але важливим недоліком є низька точність позиціонування на значних відстанях. Цей метод добре працює на малих відстанях, але має значні похибки при збільшенні дальності через специфіку передачі радіосигналу.

Методи TOA (Time of Arrival) і TDoA (Time Difference of Arrival) засновані на трилатерації, за допомогою якої місцезнаходження користувача визначається за результатами вимірювань затримки передачі радіосигналу між мобільним пристроєм користувача та AP (рис. 2.2, в).

Метод TOA заснований на вимірюванні часу проходження сигналу від пристрою до точки доступу, де відстань до цілі обчислюється на основі різниці між часом надсилання сигналу та часом його отримання. Однак цей метод вимагає суворої синхронізації часу в джерелі та пункті призначення, що важко отримати [3-4].

Метод TDoA вимірює різницю часу надходження сигналу від пристрою до кількох точок доступу. Як і в попередньому способі, потрібна сувора синхронізація часу, але тільки в точках доступу, для пристроїв користувачів таких вимог немає. Важливою перевагою цих методів є значний діапазон. Методи локального позиціонування наведені на рис. 2.2 [4].

2.2 Метод **Fingerprinting**

Розглянувши низку методів позиціонування для мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor слід зробити наступний висновок – всі методи, які можуть бути використані для позиціонування в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor використовують кореляцію між потужністю сигналу RSS і координатами місцезнаходження користувача. Оскільки моделювати поширення сигналу, особливо всередині приміщень Indoor, досить складно, доцільним є використання методу, який би оцінював положення користувача шляхом порівняння переліку поточних вимірювань індикатора потужності прийнятого RSSI сигналу або RSS точок доступу Access Point із заздалегіть сформованою базою даних таких «відбитків» точок доступу Access Point, що є потужністю сигналів, що відповідають значенням відомим значенням координат. Такий принцип закладений в метод Fingerprinting [6].

Метод Fingerprinting використовується для локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor і відомий як метод з найбільшою точністю позиціонування.

Функціонування методу виконується за два етапи (рис. 2.3), один з яких реалізується в автономному режимі і передбачає формування бази даних Fingerprinting DataBase, яка складається з результатів вимірюваних значень рівня потужності сигналу RSSI (Received Signal Strength Indicator) для розглядуваного приміщення RSSI на RPs в наперед заданих референтних точках RP (Reference Point) приміщення, які рівномірно розподілені по всьому приміщенню (Arrange Reference Point).

База даних Fingerprinting зберігає дані вимірюваних значень потужності сигналів RSSI і MAC-адреси точок доступу Access Point – AP_i , $i = 1, \dots, 3$, так звані «радіовідбитки»[6].

На другому етапі он-лайн при позиціонуванні користувача та визначенні координати його розташування, виконуються виміри поточних значень RSSI (On-line вимірювання RSSI оціночної позиції), які складаються зі значеннями RSSI, що зберігаються в базі даних, для визначення значень координат користувача [6].

Для визначення координат користувача в методі Fingerprinting може використовуватися метод k -наближених сусідів, який у якості оцінки місцезнаходження користувача визначає найближче значення RSSI з бази даних DataBase [5] або Байєсівський метод або нейронні мережі [7] або комплексної сплайн-апроксимації [9-10].

Згідно [6], функціонування методу Fingerprinting виконується в декілька наступних етапів:

1. Формування бази даних DataBase «радіовідбитків», яка зберігає значення вимірних потужностей сигналів RSSI точок доступу Access Point - AP_{*i*}, у заздалегідь заданих точках розміщення референтних точок RP (Reference Point) в приміщенні, значення потужностей сигналів RSSI в яких відомі. Умовою такого розміщення є рівні відстані між референтними точками та рівні умови вимірювань значень потужностей сигналів RSSI.

Для кожної референтної точки RP розглядається база даних мережі Wi-Fi, яка зберігає дані MAC-адрес пристроїв і значення рівня потужності прийнятого сигналу RSSI від усіх точок доступу Access Point AP_{*i*}, (MAC_{1,1}, RSSI_{1,1}), (MAC_{1,2}, RSSI_{1,2}), (MAC_{1,3}, RSSI_{1,3}) (рис. 2.3).

2. Запит на визначення місцезнаходження користувача від пристроїв користувача до найближчих трьох точок доступу Access Point AP_{*i*}, відповідно до яких кожна точка доступу Access Point AP_{*i*}, виконує вимірювання значення потужності сигналу вимірювання RSS для всіх точок доступу AP_{*i*}, і порівнює їх зі значеннями, що зберігаються в базі даних DataBase.

3. Визначення координат розташування користувача відбувається за допомогою обраного математичного методу обчислювання координат. Таким методом (рис. 2.3) може бути метод k -найближчих сусідів, Байєсівський метод або комплексна сплайн-апроксимація. Використання будь-якого з цих методів дозволяє отримати координати користувача, однак, точність отриманих результатів може вар'юватися залежно від обраного методу.

В результаті розрахунків визначається розташування користувача в мережі Wi-Fi з координатами $M(x,y)$.

4. Пошук помилок визначення координат локального розташування користувача. Визначення похибки координат місцезнаходження користувача дозволяє за допомогою середньої абсолютної MAE (Mean Absolute Error) або середньої відносної похибки MRE (Mean Relative Error).

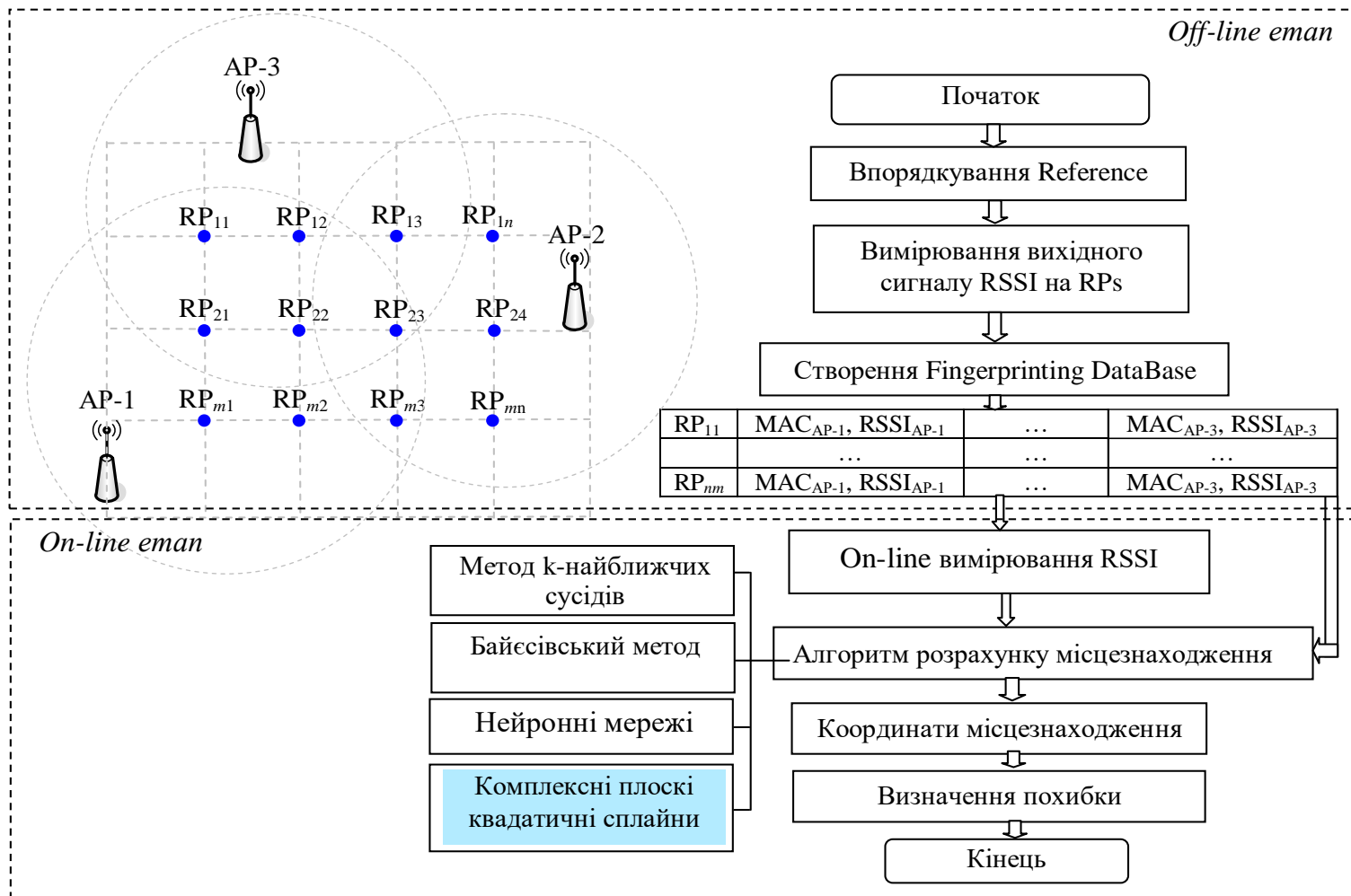


Рисунок 2.3 – Метод Fingerprinting локального позиціонування

Саме за результатами визначення похибки координат місцезнаходження може бути прийняте рішення про правильність знаходження місцезнаходження користувача.

2.3 Метод k -найближчих сусідів

Метод k -найближчих сусідів є одним з найпростіших алгоритмів машинного навчання. Цей метод відноситься до класу методів, робота яких ґрунтується на зберіганні даних для порівняння з новими елементами. При появі нових даних, знаходяться відхилення між цим записом і подібними наборами даних, і найбільш подібна (або близький сусід) ідентифікується [3].

При такому підході використовується термін k -близький сусід, який визначає, що вибирається до найближчих сусідів для їх розгляду як множина найближчих сусідів. Оскільки не завжди зручно зберігати всі дані, іноді зберігається тільки множина типових випадків. У такому разі використовуваний метод називають міркуванням за аналогією CBR (Case Based Reasoning).

Переваги методу є простота використання отриманих результатів, самі рішення не унікальні для конкретної ситуації, можливе їх використання для інших випадків та метою пошуку є не гарантовано вірне рішення, а краще з можливих [3].

Недоліками методу k -найближчих сусідів є те, що метод не потребує створення окремої моделі, яка використовує попередній досвід, бо при виборі рішення вони використовують існуючі дані. Також важлими недоліком є завжди складність вибору міри близькості (метрики). Обсяг множини записів, які необхідні для класифікації або прогнозу завжди вар'юється і залежить від обраної метрики. При використанні методу виникає необхідність повного перебору навчальної вибірки при розпізнаванні, наслідок цього – обчислювальна трудомісткість [5].

В задачах визначення місцезнаходження, на основі методу Fingerprinting [6], метод k -найближчих сусідів використовується для знаходження одного «радіовідбитка», найближчого до поточних значень індикатора рівня потужності сигналу RSSI і дозволяє ухвалити рішення, що поточні координати користувача збігаються з координатами референтних точок RP відомими значеннями потужності сигналу RSSI.

В якості метрики для визначення відстані $d_{\text{Euclidean}}$ між поточними значеннями рівня сигналу RSSI і значеннями, що зберігаються в Fingerprinting DataBase метод використовує метрику Евкліда [9-10]:

$$d_{\text{Euclidean}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{AP}}} (RSSI_{\text{curi},j} - RSSI_{\text{DBi},j})^2}, \quad (2.1)$$

де $RSSI_{\text{curi},j}$ – поточне значення рівня потужності сигналу RSSI $N_{\text{AP}i}$ точок доступу AP мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor для кожної референтної точки RP $N_{\text{RP}j}$ з відомими координатами,

$RSSI_{\text{DBi},j}$ – «радіовідбиток», значення рівня потужності сигналу RSSI, яке зберігається в базі даних Fingerprinting DataBase для $N_{\text{AP}i}$ AP мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor в кожній референтній точці RP $N_{\text{RP}j}$,

N_{AP} – кількість точок доступу AP в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor, $i = 1, \dots, N_{\text{AP}}$,

N_{RP} – кількість референтних точок RP в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor, $j = 1, \dots, N_{\text{RP}}$.

Для визначення координат місцезнаходження користувача в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor вважаємо, що в кожній точці мережі Wi-Fi/Indoor, що розглядається, пристрій користувача знаходиться в радіусі дії не менше трьох точок доступу AP_i , точки доступу AP мають координати: AP_1 , AP_2 , AP_3 , а координати користувача $M(x, y)$ [9-10].

Відстань від точок доступу AP_i до користувача $M(x, y)$ дорівнює r_1 , r_2 і r_3 відповідно. Для визначення відстаней r_1 , r_2 і r_3 використовується значення індикатора рівня потужності RSSI згідно з формулою [9-10]:

$$P_{d_i} = P_0 - 10n \lg \left(\frac{d_i}{d_0} \right), \quad (2.2)$$

де P_{d_i} – значення потужності приймаемого сигналу RSSI відповідної точки доступу мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor - AP_i , $i = \overline{1,3}$,

d_i – відстань від пристрою користувача M до передавача точки доступу мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor AP_i , $i = \overline{1,3}$,

d_0 – відстань від пристрою користувача M до точки доступу мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor AP_i , $i = \overline{1,3}$ на якій виконувалося вимірювання потужності сигналу P_0 , P_0 – потужність сигналу,

n – коефіцієнт втрат потужності сигналу при розповсюдженні в середовищі.

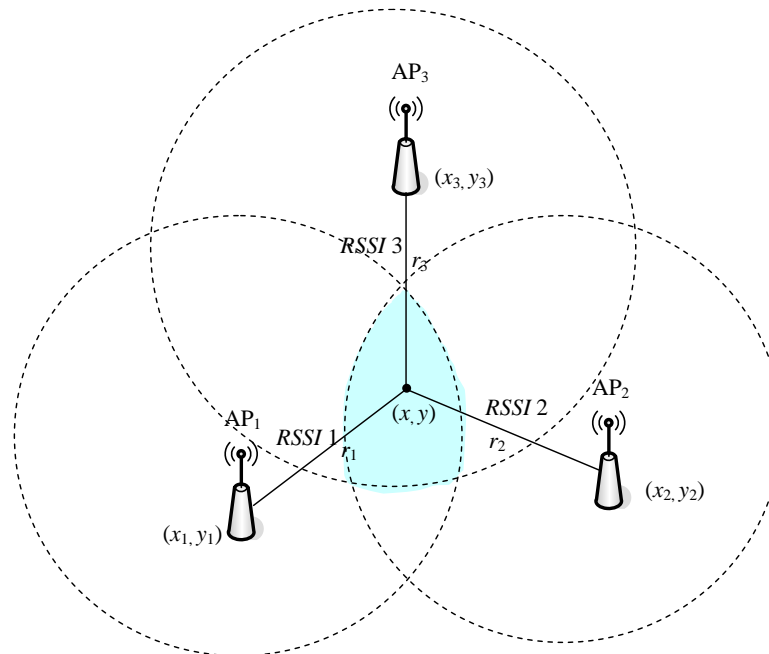


Рисунок 2.3 – Фрагмент мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor

Відповідно [9-10], для визначення координат місцезнаходження користувача використовуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}, \\ r_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}, \\ r_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2}. \end{cases} \quad (2.3)$$

де (x, y) – координати пристрою користувача (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) – координати точок доступу AP_1 , AP_2 и AP_3 , відповідно.

Координати місцезнаходження користувача можна визначити відповідно до виразів [9-10]:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i. \quad (2.4)$$

2.4 Комплексна сплайн-апроксимація на базі комплексних квадратичних плоских сплайнів

Розглянемо використання комплексної сплайн-апроксимації для визначення координат місцезнаходження користувача в мережі Wi-Fi/Indoor, запропонованої в роботах [9-10].

Нехай розглядається мережа радіодоступу Wi-Fi/Indoor, яка побудована на базі точок доступу Access Point AP_i , де i – кількість точок доступу AP_i , $i = \overline{1,3}$.

Для кожної точки доступу визначені координати, наприклад, $AP_1(x_1, y_1)$, $AP_2(x_2, y_2)$, $AP_3(x_3, y_3)$, а координати користувача $M(x, y)$.

Вважаємо, що за допомогою методу триангуляції в кожній точці мережі Wi-Fi/Indoor користувач завжди буде знаходитися в радіусі дії не менш ніж трьох точок доступу Access Point.

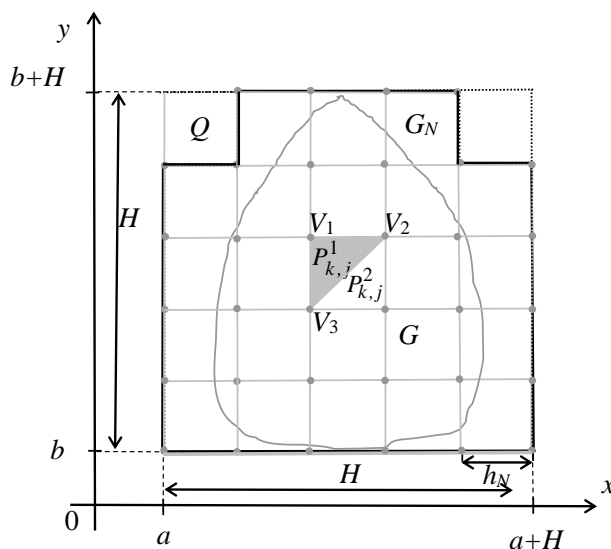
Знайдемо координати місцезнаходження користувача $M(x, y)$ з використанням комплексної сплайн-апроксимації на базі квадратичних плоских сплайн-функцій.

Розглянемо область \bar{G} – як мережу Wi-Fi, для якої $\bar{G} \subset Q$, де $\bar{G} = G \cup \partial G$, ∂G – границя області G . Розробимо сітку за допомогою квадрату $Q = [a, a + H] \times [b, b + H]$ зі стороною $H > 0$ (рис. 2.4) для області \bar{G} . Виконаємо розбиття на квадрати Q з кроком $h_N = \frac{H}{N}$, де N – натуральне число, $x_k = a + kh_N$, $y_j = b + jh_N$, $k, j = 0, 1, \dots, N$.

Отримаємо $Q = \bigcup_{k,j=0}^{N-1} Q_{k,j}$, де $Q_{k,j}$ – квадратні елементи розбиття з кроком h_N , $Q_{k,j} = \left\{ z = x + iy : x \in [x_k, x_{k+1}] , y \in [y_j, y_{j+1}] \right\}$. Позначимо розбиття як Δ_N .

Розглянемо область G_N як об'єднання усіх квадратних елементів розбиття $Q_{k,j}$, для яких $Q_{k,j} \cap G \neq \emptyset$. Тоді кожен квадрат $Q_{k,j} \subset G_N$ розібємо діагоналлю на два трикутники $P_{k,j}^1$ та $P_{k,j}^2$ (рис. 2.4). Таке розбиття позначимо Δ'_N .

Позначимо через G'_N – об'єднання усіх трикутників $P_{k,j}^1$ та $P_{k,j}^2$, для яких $P_{k,j}^1 \cap G \neq \emptyset$, $P_{k,j}^2 \cap G \neq \emptyset$ [9-10].

Рисунок 2.4 – Побудова області G

Розглянемо один із трикутників $P_{k,j}^1$ або $P_{k,j}^2$, який входить до області G_N з вершинами V_1, V_2, V_3 для яких виконуються наступні умови [9-10]:

$$\text{Im } V_1 = \text{Im } V_2, \quad \text{Re } V_2 = \text{Re } V_3.$$

Відповідно [9-10], побудуємо на сітковій області G_N комплексний квадратичний плоский сплайн $S_\Delta(z)$, який інтерполює функцію $f(z)$ (або її продовження) у вершинах квадратів $Q_{k,j}$, що входять до області G_N :

$$S_\Delta(z) = a + bz + c\bar{z} + d(z^2 - \bar{z}^2), \quad (2.5)$$

при $z \in Q_{k,j} \subset G_N$, де коефіцієнти a, b, c, d визначаються з інтерполяційної умови в точках $z_{k,j} = x_k + iy_j$:

$$\begin{aligned} S_\Delta(z_{k,j}) &= f(z_{k,j}), & S_\Delta(z_{k+1,j}) &= f(z_{k+1,j}), \\ S_\Delta(z_{k,j+1}) &= f(z_{k,j+1}), & S_\Delta(z_{k+1,j+1}) &= f(z_{k+1,j+1}). \end{aligned}$$

Функція $S_\Delta(z)$ – неперервна в області G_N [9-10].

2.5 Метод Байєса

В задачах визначення місцезнаходження, на основі методу Fingerprinting [9-10], метод Байєса використовується для знаходження поточних координат місцезнаходження користувача.

У процесі визначення місцезнаходження на основі Байєсівського методу використовуються дані про всі референтні точки RP та дані умовних ймовірностей спостереження рівнів потужності сигналу RSSI у референтних точках. Відмінність вихідних даних для Байєсівського методу полягає в тому, що в кожній точці будівлі з відомими координатами зберігаються дані про один вимір рівня сигналу RSSI, а статистика вимірювань рівнів сигналів RSSI. Рівень сигналу є стохастичною величиною, яка залежить від безлічі факторів, тому можна зробити обґрунтоване припущення, що облік статистики розподілу рівня сигналу в кожній точці з відомими координатами дозволить більш точно визначити місцезнаходження користувача.

Використаємо формулу Байєса [6], яка дозволяє визначити апостеріорні ймовірності подій місцезнаходження користувача:

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i)P(A / H_i)}{\sum_{k=1}^n P(H_k)P(A / H_k)}, \quad (2.6)$$

де H_1, \dots, H_n – повна група несумісних подій, для яких виконуються умови $H_i \cup H_j = \Omega$,

Ω – простір елементарних подій, $H_i \cap H_j = \emptyset, i = j$,

H_i – подія, що визначає, що місцезнаходження користувача знаходиться в елементі розбиття області Q_i .

$P(H_i)$ – апіорна ймовірність знаходження користувача в елементі розбиття області Q_i ,

$P(A / H_i)$ – умовна ймовірність знаходження користувача в області Q_i ,

$P(H_i / A)$ – апостеріорна ймовірність знаходження користувача в елементі Q_i після експерименту.

Координати місцезнаходження користувача можна визначити відповідно до виразів:

$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{x_i} P(H_i / A), \quad \bar{y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{y_i} P(H_i / A). \quad (2.7)$$

Для вирішення поставленого завдання в дослідженні, порівняння результатів локального позиціонування за допомогою різних методів, а саме, методу k-найближчих сусідів, комплексної сплайн-апроксимації на базі квадратичних плоских сплайнів та Байєсівського методу розглянемо визначення координат користувача за допомогою визначених методів та порівняємо похибку їхнього використання.

3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖІ WI-FI/INDOOR

3.1 Вихідні дані для дослідження

Розглянемо вирішення задачі порівняння результатів знаходження місцезнаходження користувача в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor на основі методу Fingerprinting з використанням різних методів обчислення координат місцезнаходження користувача за допомогою наступних методів [11]:

- метод k -найближчих сусідів визначення координат місцезнаходження користувача в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor,
- метод Байеса для визначення координат місцезнаходження користувача в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor;
- комплексна сплайн-апроксимація на базі квадратичних плоских сплайнів.

Для рішення поставленого завдання використовуємо метод Fingerprinting. Вибір вищезазначених методів обчислення координат місцезнаходження користувача для дослідження обумовлений різною обчислювальною складністю методів, різними вимогами щодо виконання розрахунків та різною похибкою позиціонування.

Визначення місцезнаходження виконаємо для користувача з координатами $M(x, y)$, який знаходиться у мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor, в якій обладнання використовує метод Fingerprinting.

Приміщення Indoor розподілено на рівні квадрати на перетині яких розміщені дванадцять референтних точок RP ($RP_{11} \dots RP_{34}$), які умовно рівномірно розміщені на території приміщення.

Для проведення дослідження вважаємо відомими наступні вихідні дані [9-11]:

1) Фрагмент існуючої інфраструктури мережі Wi-Fi/Indoor, розгорнутий у підземному паркінгу (Indoor), який обслуговується трьома точками доступу Access Point $AP_i, i = 1, \dots, 3$. Обладнання точок доступу Access Point $AP_i, i = 1, \dots, 3$ має різні технічні характеристики та різні стандарти технології Wi-Fi. Обладнання точок доступу розміщено так, щоб утворити покриття, як показано на рис. 2.3. При цьому вважаємо, що за допомогою методу тріангуляції в кожній точці мережі Wi-Fi/Indoor користувач завжди буде знаходитися в радіусі дії не менш ніж трьох точок доступу Access Point. Характеристики обладнання наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики обладнання мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor

Точка доступу	Стандарт	Характеристики
AP-1, TP Link Tech	IEEE 802.11 ac/ad	80 МГц, 5180-5260 МГц
AP-2, TP Link Corp	IEEE 802.11ac	40 МГц, 2462 МГц
AP-3, TP Link Tech	IEEE 802.11ac	40 МГц, 2,457 ГГц

Слід зауважити, що обладнання точок доступу Wi-Fi/Indoor для експерименту має різну конфігурацію з точки зору використаного частотного діапазону та реалізацій стандарту, це як стандарт IEEE 802.11 ac, так і стандарт IEEE 802.11 ac/ad.

2) Схема фрагмента розташування обладнання точок доступу AP_i та розташування референтних точок RP у мережі Wi-Fi/Indoor, яка показана на рис. 3.1.

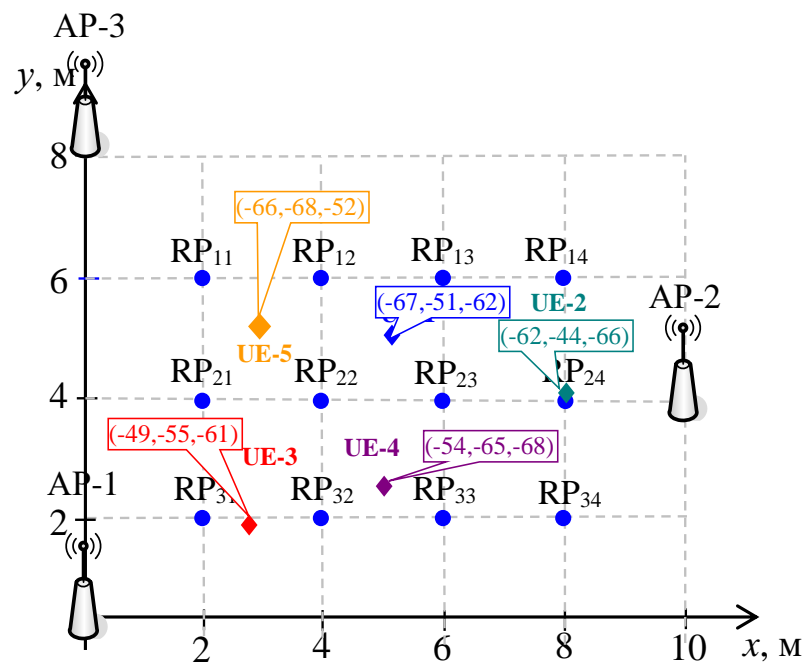


Рисунок 3.1 – Розміщення точок доступу AP_i , $i = 1, \dots, 3$ мережі Wi-Fi/Indoor та референтних точок Reference Point для приміщення

Відомі координати трьох точок доступу AP_i , $i = 1, \dots, 3$ мережі Wi-Fi/Indoor: AP-1 (0,0), AP-2 (10,4), AP-3 (0,8).

Розглянутий фрагмент (рис. 3.1) має дванадцять референтних точок RP ($RP_{11} \dots RP_{34}$), координати яких показані в табл. 3.2, розміщення RP для приміщення виконано з кроком 2×2 м.

Таблиця 3.2 – Координати референтних точок RP

Координати RP		Координати RP	
RP_{11}	(2,6)	RP_{23}	(6,4)
RP_{12}	(4,6)	RP_{24}	(8,4)
RP_{13}	(6,6)	RP_{31}	(2,2)
RP_{14}	(8,6)	RP_{32}	(4,2)
RP_{21}	(2,4)	RP_{33}	(6,2)
RP_{22}	(4,4)	RP_{34}	(8,2)

3) За допомогою Open Source програми Wi-Fi Analyzer в ході проведення експерименту в референтних точках RP приміщення, де розгорнута мережа радіодоступу Wi-Fi/Indoor, створений фрагмент бази даних, яка зберігає результати вимірювань значень потужності сигналу RSSI, отримані (рис. 3.1), показані в табл.3.3 [9-11].

Таблиця 3.3 – Вимірювання значень потужності сигналів RSSI для бази даних Fingerprinting

Координати RP		Значення RSSI, дБм			Координати RP		Значення RSSI, дБм		
		AP-1	AP-2	AP-3			AP-1	AP-2	AP-3
RP_{11}	(2,6)	-67	-70	-44	RP_{23}	(6,4)	-74	-52	-63
RP_{12}	(4,6)	-71	-55	-44	RP_{24}	(8,4)	-68	-45	-64
RP_{13}	(6,6)	-70	-53	-63	RP_{31}	(2,2)	-48	-58	-60
RP_{14}	(8,6)	-76	-52	-64	RP_{32}	(4,2)	-56	-67	-62
RP_{21}	(2,4)	-50	-57	-59	RP_{33}	(6,2)	-62	-65	-68
RP_{22}	(4,4)	-69	-55	-61	RP_{34}	(8,2)	-76	-49	-73

4) Відомі результати поточних вимірювань значень RSSI пристроїв для п'яти користувачів ($RSSI_{AP-1}$, $RSSI_{AP-2}$, $RSSI_{AP-3}$), які показані на рис. 3.1, наприклад, для Користувача-1 значення RSSI становлять – (-67, -51, -62) дБм.

Таблиця 3.4 – Вимірювання значень потужності сигналу RSSI для пристроїв користувачів

Координати користувачів		Значення потужності сигналу RSSI, дБм		
		Точка доступу AP-1	Точка доступу AP-2	Точка доступу AP-3
Користувач-1	(5;5)	-67	-51	-62
Користувач -2	(8;4)	-62	-44	-66
Користувач -3	(2,7;2)	-49	-55	-61
Користувач -4	(5;2,5)	-54	-65	-68
Користувач -5	(3;5)	-66	-68	-52

3.2 Вирішення задачі порівняння результатів позиціонування користувача за допомогою різних методів

Для вирішення поставленої задачі необхідно [9-11]:

- визначити координати місцезнаходження користувача $M(x,y)$ на базі метода Fingerprinting. Використати для обчислення координат місцезнаходження різні методи, такі як: метод k -найближчих сусідів, Байєсівський метод і комплексна сплайн-апроксимації на базі квадратичних плоских сплайнів;

- отримані результати розрахунків координат місцезнаходження користувача розрахувати значення середньоквадратичної похибки MSE визначення місцезнаходження.

В якості вихідних даних для дослідження необхідно скористатися проведеними вимірюваннями потужності сигналів RSSI для кожного пристрою з користувачів.

При розрахунках в експерименті прийнято деякі спрощення, а саме, не враховуються особливості поширення сигналів усередині приміщень, такі як, відображення від стін і стель, дифракція, багатопроменевість і завадна обстановка.

Для визначення координат пристроїв користувачів 1-5, використовуючи метод Fingerprinting на базі методу k -найближчих сусідів, використаємо підхід, запропонований в роботах [9-11].

Використовуючи вираз (2.1) та значення вимірювань рівня потужності сигналу RSSI для точок доступу мережі Wi-Fi/Indoor, показаної на рис. 3.1, Access Point – AP-1, AP-2 та AP-3 та відомих значень вимірювань рівня потужності

сигнала RSSI для референтних точок RP, що зберігаються в базі даних, визначені значення Евклідової відстані.

Розрахунки виконані для методу k-найближчих сусідів зі середнім значенням кількості найближчих «сусідів» $k = 3$. В такому випадку, для розрахунків обираємо три значення Евклідової відстані d_{Evkl} , за результатами розрахунків обираємо три координати, для яких використовуючи вирази (2.4) визначаються координати місцезнаходження користувача. Результати розрахунків запишемо в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Визначення координат користувача за допомогою методу Fingerprinting та методу k-найближчих сусідів

Вихідні координати користувачів		Координати користувачів визначені за допомогою методу k-найближчих сусідів	
Користувач -1	(5;5)	UE-1	(5,5;5,6)
Користувач -2	(8;4)	UE-2	(8,3;4,6)
Користувач -3	(2,7;2)	UE-3	(3;2,5)
Користувач -4	(5;2,5)	UE-4	(5,4;3)
Користувач -5	(3;5)	UE-5	(3,2;5,4)

Для визначення координат пристроїв користувачів з використанням методу Fingerprinting з обчислюванням координат місцезнаходження користувача на базі Байєсівського методу, використаємо координати користувачів 1-5 та результати вимірювання значень RSSI для пристроїв користувачів, наведені в табл. 3.4.

Використовуючи вираз (2.5) та методики визначення координат місцезнаходження згідно [9-11], отримаємо значення ймовірностей знаходження координат користувача.

Для обчислення координат місцезнаходження користувачів скористаємося виразом (2.6).

Отримані значення координат місцезнаходження користувачів за допомогою Байєсівського методу запишемо в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Визначення координат користувача за допомогою методу Fingerprinting та Байєвсівського методу

Вихідні координати UE		Координати користувачів визначені за допомогою Байєвсівського методу	
Користувач-1	(5;5)	UE-1	(5,3;5,5)
Користувач -2	(8;4)	UE-2	(8,4;4,3)
Користувач -3	(2,7;2)	UE-3	(3;2,4)
Користувач -4	(5;2,5)	UE-4	(5,25;2,75)
Користувач -5	(3;5)	UE-5	(3,3;5,2)

Для визначення координат користувачів 1-5 з використанням методу Fingerprinting на базі комплексної сплайн-апроксимації з використанням квадратичних плоских сплайнів, використаємо координати користувачів, які задані в табл. 3.4. Спираючись на результати вимірювання значень RSSI для пристроїв користувачів, які наведені в табл. 3.4, згідно формули (2.4) та методики визначення координат місцезнаходження згідно [], отримаємо координати місцезнаходження користувачів згідно виразу (2.4).

Отримані значення координат місцезнаходження користувачів за допомогою комплексної сплайн-апроксимації запишемо в табл. 3.6.

Таблиця 3.7 – Визначення координат користувача за допомогою методу Fingerprinting та комплексної сплайн-апроксимації на базі квадратичних плоских сплайнів

Вихідні координати UE		Координати UE визначені за допомогою комплексної сплайн-апроксимації	
Користувач-1	(5;5)	UE-1	(5,11;5,14)
Користувач -2	(8;4)	UE-2	(8,1;4,05)
Користувач -3	(2,7;2)	UE-3	(2,75;2,2)
Користувач -4	(5;2,5)	UE-4	(5,15;2,55)
Користувач -5	(3;5)	UE-5	(3,1;5,1)

3.3 Визначення похибки позиціонування

Для порівняння результатів різних методів локального позиціонування визначення координат місцезнаходження користувачів в мережі Wi-Fi/Indoor скористуємося значенням середньої абсолютної похибки MSE (Mean Squared Error) [9-11]:

$$MSE = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \sqrt{(x_{est} - x_{real})^2 + (y_{est} - y_{real})^2}, \quad (3.1)$$

де x_{est} , y_{est} – координати місцезнаходження користувача, визначенні в ході експерименту,

x_{real} , y_{real} – реальні координати місцезнаходження користувача,

L – кількість вимірювань.

Порівняння результатів різних методів локального позиціонування визначення координат місцезнаходження користувачів в мережі Wi-Fi/Indoor, за результати, що наведені в табл. 3.5 – табл. 3.7, наведені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Порівняння результатів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor за результати середньоквадратичної помилки MSE

Користувач	Користувач -1	Користувач -2	Користувач -3	Користувач -4	Користувач -5
Реальні координати користувача	(5;5)	(8;4)	(2,7;2)	(5;2,5)	(3;5)
Метод k -найближчих сусідів	(5,5;5,6)	(8,3;4,6)	(3;2,5)	(5,4;3)	(3,2;5,4)
Середньоквадратична помилка MSE, м	0,78	0,67	0,58	0,64	0,75
Байєсівський метод	(5,3;5,21)	(8,2;4,35)	(3;2,41)	(5,27;2,85)	(3,3;5,2)
Середньоквадратична помилка MSE, м	0,31	0,40	0,47	0,44	0,36
Комплексна сплайн-апроксимація	(5,11;5,14)	(8,1;4,05)	(2,75;2,2)	(5,15;2,6)	(3,1;5,1)
Середньоквадратична помилка MSE, м	0,17	0,11	0,20	0,19	0,15

Проведені розрахунки похибки визначення координат місцезнаходження користувача при використанні методу Fingerprinting на базі різних методів обчислення координат місцезнаходження користувача, таких як: метод k -найближчих сусідів, Байєсівський метод та комплексна сплайн-апроксимація на базі квадратичних плоских сплайнів за допомогою середньоквадратичної помилки MSE (3.1), показано на рис. 3.2.

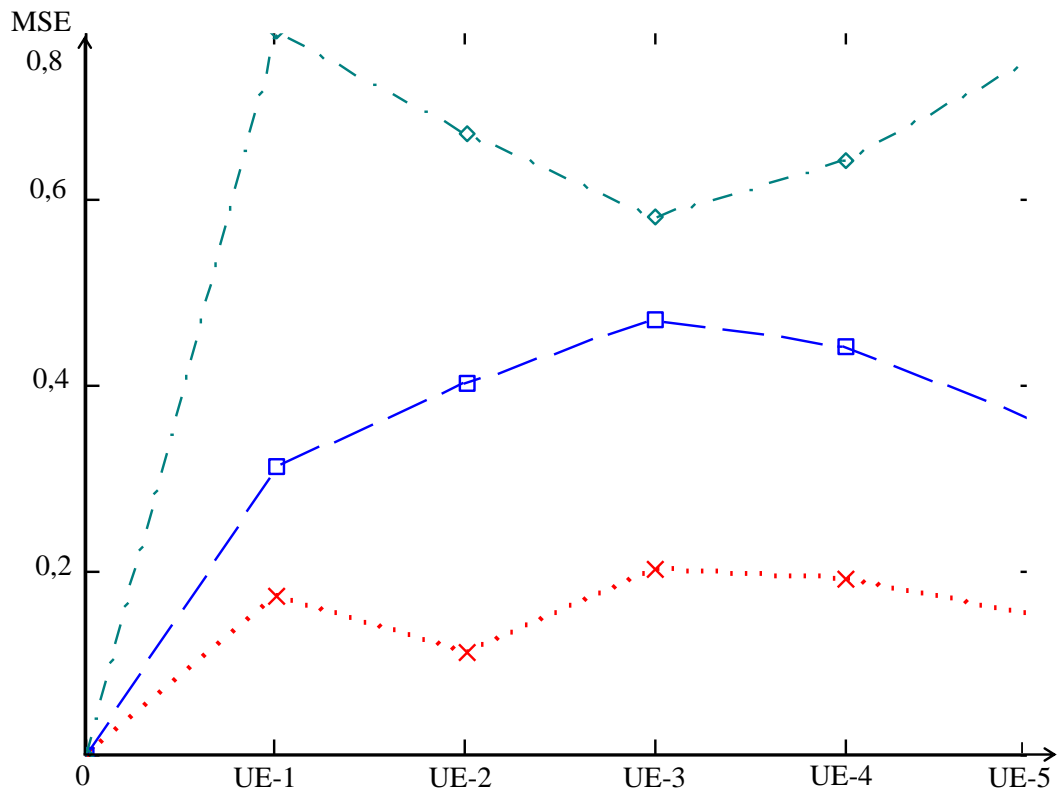


Рисунок 3.2 – Результати середньоквадратичної помилки MSE для позиціонування користувача за допомогою методу Fingerprinting на базі методу k -найближчих сусідів, Байєсівського методу та комплексної сплайн-апроксимації на базі квадратичних плоских сплайнів

Отримані результати дозволяють зробити висновки про те, що найбільшу точність визначення координат користувача мережі Wi-Fi/Indoor при використанні методу Fingerprinting дозволяє отримати комплексна сплайн-апроксимація на базі квадратичних плоских сплайнів, причому можна затверджувати згідно з рис. 3.2, що незалежно від розташування користувача похибка становить до 10%. Використання методу k -найближчих сусідів дозволяє досягти похибки позиціонування до 20%, а Байєвській метод – до 30%.

В цілому, значення похибки позиціонування при використанні методу k -найближчих сусідів можуть бути зменшені за рахунок використання більшої кількості найближчих «сусідів» $k = 6$ або $k = 9$, проте, згідно з [9-11] це значно збільшить обчислювальну складність методу та призведе до збільшення часу позиціонування.

Тому доцільним є рекомендація до використання методу Fingerprinting на базі комплексної сплайн-апроксимації на базі квадрітичних плоских сплайнів, експериментальна оцінка точності якого показала перевагу його використання в порівнянні з іншими методами з точки зору зниження помилки позиціонування не менше ніж на 10 %.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В роботі проведено дослідження різних методів локального позиціонування визначення координат місцезнаходження користувачів в мережі Wi-Fi/Indoor.

Результати роботи такі:

1. Проведено аналіз існуючих методів локального позиціонування користувача у мережі Wi-Fi/Indoor на базі методу Fingerprinting. Встановлено, що допустиму точність позиціонування дозволяє досягти методу Fingerprinting. Запропоновано використання для обчислювання координат користувача методу k-найближчих сусідів, Байєсівському методу або комплексної сплайн-апроксимації на базі квадратичних комплексних плоских сплайнів.

2. Проведене порівняння результатів використання різних методів для позиціонування користувача за допомогою методу Fingerprinting на базі методу k-найближчих сусідів, Байєсівського методу або комплексної сплайн-апроксимації на базі квадратичних комплексних плоских сплайнів.

3. Встановлено, що для розглянутої мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor, яка складається з трьох точок доступу AP та дванадцяти референтних точок RP для розглянутого приміщення використання методу Fingerprinting дозволяє отримати найменшу похибку до 10% за допомогою комплексної сплайн-апроксимації на базі квадратичних плоских сплайнів. Використання методу k-найближчих сусідів дозволяє досягти похибки позиціонування до 20%, а Байєвській метод – до 30%.

4. Проведене дослідження в роботі дозволяє сформулювати практичні рекомендації при виборі метода позиціонування користувача в мережі Wi-Fi/Indoor.


ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Morreale P. A., Terplan K. CRC Handbook of Modern Telecommunications. CRC Press, 2017.
2. Hameedah S.H. An Overview of Local Positioning System: Technologies, Techniques and Applications / S.H. Hameedah, M. Hussein, S.Mad Saad, M. A. Mat Dzahir // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7(3). P. 1-5.
3. Gu F. Indoor Localization Improved by Spatial Context – A Survey / F. Gu, X. Hu, M. Rmezani, J. Shang, D. Acharya, K. Khoshelham, S. Valaee // ACM Comp. Surv. 2019. Vol. 52(3):64. P. 1-35.
4. Yang Q. Research on Wi-Fi indoor positioning in a smart exhibition hall based on received signal strength indication / Q. Yang, S. Zheng, M. Liu // Jour. on Wir. Com. and Net. 2019. 275.
5. Li G. An Indoor Positioning Algorithm Based on RSSI Real-time Correction / G. Li, E. Geng, Z. Ye, H. Zhu // Signal Processing (ICSP): Conf., 2018, Beijing: proc. of conf. – 2018.
6. Rahmadini A. Optimization of Fingerprint Indoor Localization System for Multiple, Object Tracking Based on Iterated Weighting Constant – KNN Method / A. Rahmadini, P. Kristalina, A. Sudarsono // Intern. Journ. on Adv. Sci. Eng. Infor. Tech. 2018. Vol. 8(3). P. 998-1007.
7. P. Bráulio H.O.U.V. Factor Optimization for the Design of Indoor Positioning Systems Using a Probability-Based Algorithm / P. Bráulio H.O.U.V., Horácio A.B.F. de Oliveira, E. J.P. Souto // Journ. of Sensor and Actuator Netw. 2021. Vol. 10, No. 1:16.
8. Pirzada N. Comparative Analysis of Active and Passive Indoor Localization Systems / N. Pirzada, M. Y. Nayan, F. Subhan, M. F. Hassan, M. A. Khan // AASRI Procedia. – 2021. – Vol. 5. – P. 92 – 97.
9. I. Strelkovskaya, I. Solovskaya, J. Strelkovska Fingerprinting/Indoor positioning using complex planar splines. Journal of Electrical Engineering. 2021. Vol. 72, No. 6. P. 401-406.
10. I. Strelkovskaya, I. Solovskaya, J. Strelkovska Using quadratic complex planar splines in solving local positioning problems. Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering: Intern. Conf., 2022, Slavske: proc. of conf. P. 602-605.
11. Соловська І.М., Заволока М.В. Порівняльний аналіз методів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor. ІХ Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Гуманітарний і

інноваційний ракурс професійної майстерності: Пошуки молодих вчених»: матеріали конф., 15 грудні 2023 р.: тези доп. – Одеса: МГУ, 2023.

Додаток А

ПЕРЕЛІК КОПІЙ ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ



Міжнародний гуманітарний університет
Факультет кібербезпеки, програмної інженерії
та комп'ютерних наук

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА НА ТЕМУ

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО
ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖІ WI-FI/INDOOR**

Виконала: студентка 2 курсу, гр. ІКК-2.1 спеціальності
123 Комп'ютерна інженерія
Заволока М.В.
Керівник – к.т.н., доц. Соловська І.М.

Рисунок А1 – Титульний слайд

ВСТУП

- **Розвиток сервісів та додатків LBS**, базованих на місцезнаходженні, сьогодні затребуваний через активне впровадження технологій та пристроїв Інтернету речей IoT та подальше вдосконалення пристроїв UE мобільного зв'язку для визначення розташування користувача, геолокації, локального пошуку та цільової реклами.
- **Сервіси та додатки LBS** критичні до точності позиціонування та відповідного вибору технології радіодоступу, особливо для визначення розташування у приміщеннях IPS. Послуги можуть бути надані користувачеві тільки за умови точного визначення його місцезнаходження, а навіть незначні похибки у місцезнаходженні користувача не дозволять реалізувати сервіс.
- Актуальним є питання **вибору методу позиціонування Indoor**, який дозволив би досягти високої точності позиціонування та реалізацію на смартфонах, задовольняючи умовам значних обмежень з точки зору потужності, пам'яті, безпеки та обчислювальних ресурсів.

Рисунок А2 – Вступ

МЕТА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

- **Мета дослідження** – порівняння результатів точності локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor на основі методу Fingerprinting з використанням методу k-найближчих сусідів, Байєсівського методу та комплексної сплайн-апроксимації на базі квадратичних комплексних плоских сплайнів, який дозволить підвищити точність позиціонування користувача.
- **Метод Fingerprinting** – локального позиціонування, який функціонує на базі «радіовідбитків», формуючи базу даних Fingerprinting DataBase з результатів вимірюваних значень рівня потужності сигналу RSSI для розглядуваного приміщення (в наперед заданих референтних точках RP приміщення), позиціонування користувача виконується на базі вимірів поточних значень RSSI, які порівнюються зі значеннями RSSI з бази даних Fingerprinting DataBase.

Рисунок А3 – Мета та методи дослідження

Класифікація методів локального позиціонування

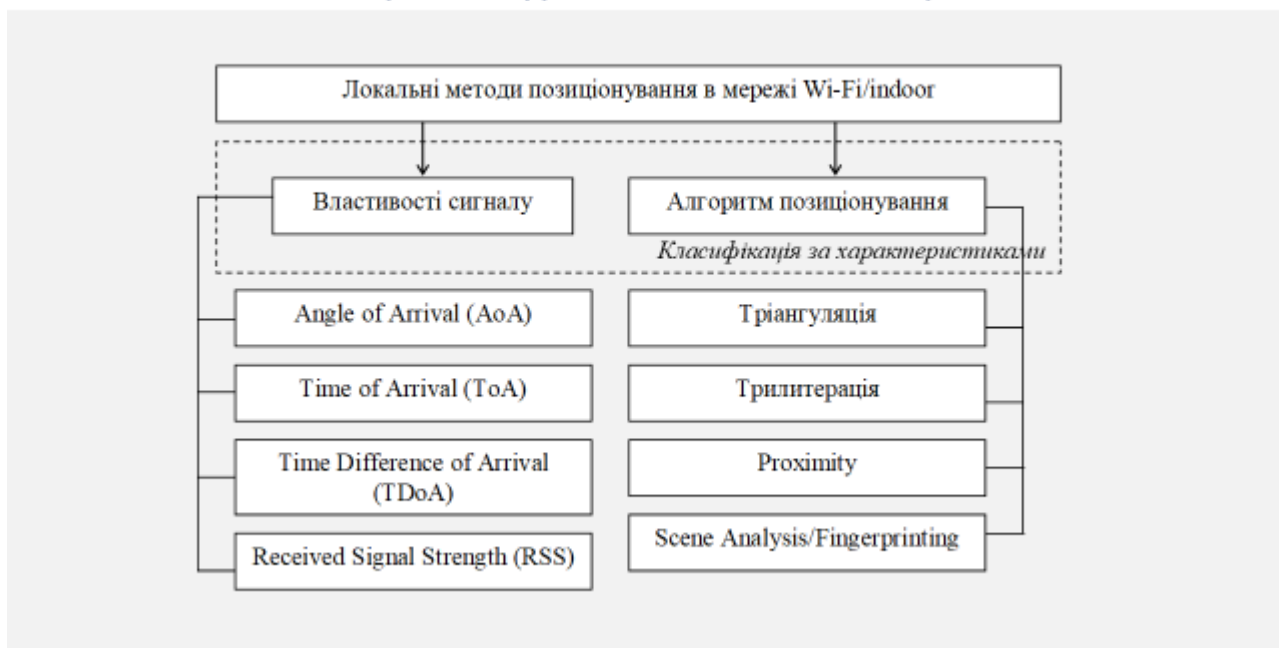


Рисунок А4 – Класифікація методів локального позиціонування

МЕТОД FINGERPRINTING

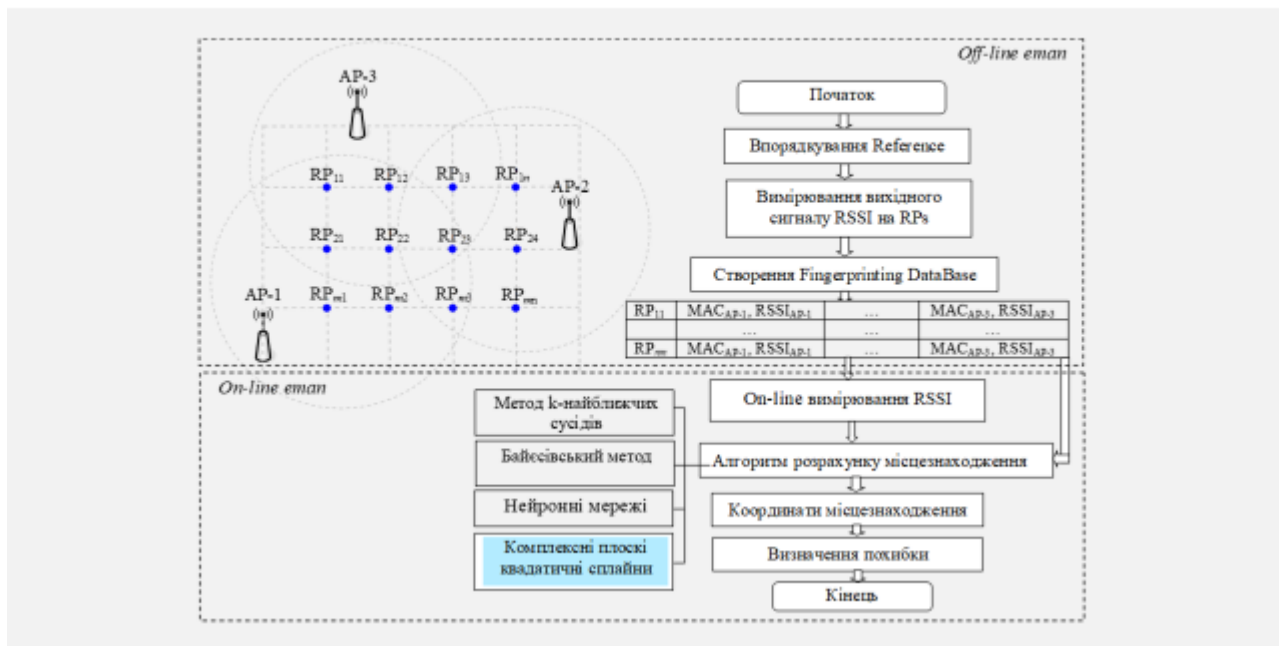


Рисунок А5 – Метод Fingerprinting

МЕТОД К-НАЙБЛИЖЧИХ СУСІДІВ

В задачах визначення місцезнаходження, на основі методу Fingerprinting, метод **k-найближчих сусідів** використовується для знаходження «радіовідбитка», найближчого до поточних значень індикатора рівня потужності сигналу RSSI і дозволяє ухвалити рішення, що поточні координати користувача збігаються з координатами референтних точок RP відомими значеннями потужності сигналу RSSI.

В якості **метрики** для визначення відстані $d_{\text{Euclidean}}$ між поточними значеннями рівня сигналу RSSI і значеннями, що зберігаються в Fingerprinting DataBase метод використовує метрику Евкліда

$$d_{\text{Euclidean}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\text{AP}}} (RSSI_{\text{cur},j} - RSSI_{\text{DB},j})^2}$$

де $RSSI_{\text{cur},j}$ - поточне значення рівня потужності сигналу RSSI N_{AP} точок доступу AP мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor для кожної референтної точки RP N_{RP} з відомими координатами, $RSSI_{\text{DB},j}$ - «радіовідбиток», значення рівня потужності сигналу RSSI, яке зберігається в базі даних Fingerprinting DataBase для N_{AP} AP мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor в кожній референтній точці $RP_{N_{\text{RP}}}$

N_{AP} - кількість точок доступу AP в мережі Wi-Fi/Indoor,

N_{RP} - кількість референтних точок RP в мережі радіодоступу Wi-Fi/Indoor.

Рисунок А6 – Метод k-найближчих сусідів

МЕТОД К-НАЙБЛИЖЧИХ СУСІДІВ

Відстань від точок доступу AP_i до користувача $M - M(x, y)$ дорівнює r_1, r_2 і r_3 відповідно. Для визначення відстаней r_1, r_2 і r_3 використовується формула:

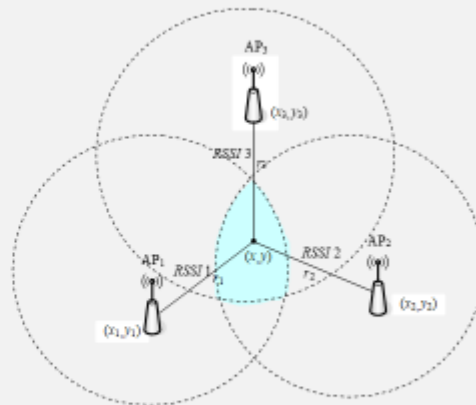
$$P_{d_i} = P_0 - 10n \lg \left(\frac{d_i}{d_0} \right)$$

де P_{d_i} – значення потужності сигналу RSSI відповідної точки доступу AP_i мережі Wi-Fi/Indoor,

d_i – відстань від пристрою користувача M до передавача точки доступу AP_i

d_0 – відстань від пристрою користувача M до точки доступу мережі AP_i , на якій виконувалося вимірювання потужності сигналу P_0 , P_0 – потужність сигналу,

n – коефіцієнт втрат потужності сигналу при розповсюдженні в середовищі.



$$\bar{x} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{x_i} P(H_i / A) \quad \bar{y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{y_i} P(H_i / A)$$

Рисунок А7 – Метод k-найближчих сусідів

МЕТОД БАЙЕСА

В задачах визначення місцезнаходження, на основі методу Fingerprinting, **метод Байєса** використовується для знаходження поточних координат місцезнаходження користувача.

Використаємо формулу Байєса, яка дозволяє визначити апостеріорні ймовірності подій місцезнаходження користувача:

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i)P(A / H_i)}{\sum_{k=1}^n P(H_k)P(A / H_k)}$$

де H_1, \dots, H_n – повна група несумісних подій, для яких виконуються такі умови $H_i \cup H_j = \Omega$,

Ω – простір елементарних подій, $H_i \cap H_j = \emptyset, i \neq j$

H_1 – подія, що визначає, що місцезнаходження користувача знаходиться в елементі розбиття області Q_i .

$P(H_i)$ – апіорна ймовірність знаходження користувача в елементі розбиття області Q_i ,

$P(A/H_i)$ умовна ймовірність знаходження користувача в області Q_i ,

$P(H_i/A)$ апостеріорна ймовірність знаходження користувача в елементі Q_i після експерименту.

Рисунок А8 – Метод Байєса

КОМПЛЕКСНА СПЛАЙН-АПРОКСИМАЦІЯ НА БАЗІ КВАДРАТИЧНИХ ПЛОСКИХ СПЛАЙНІВ

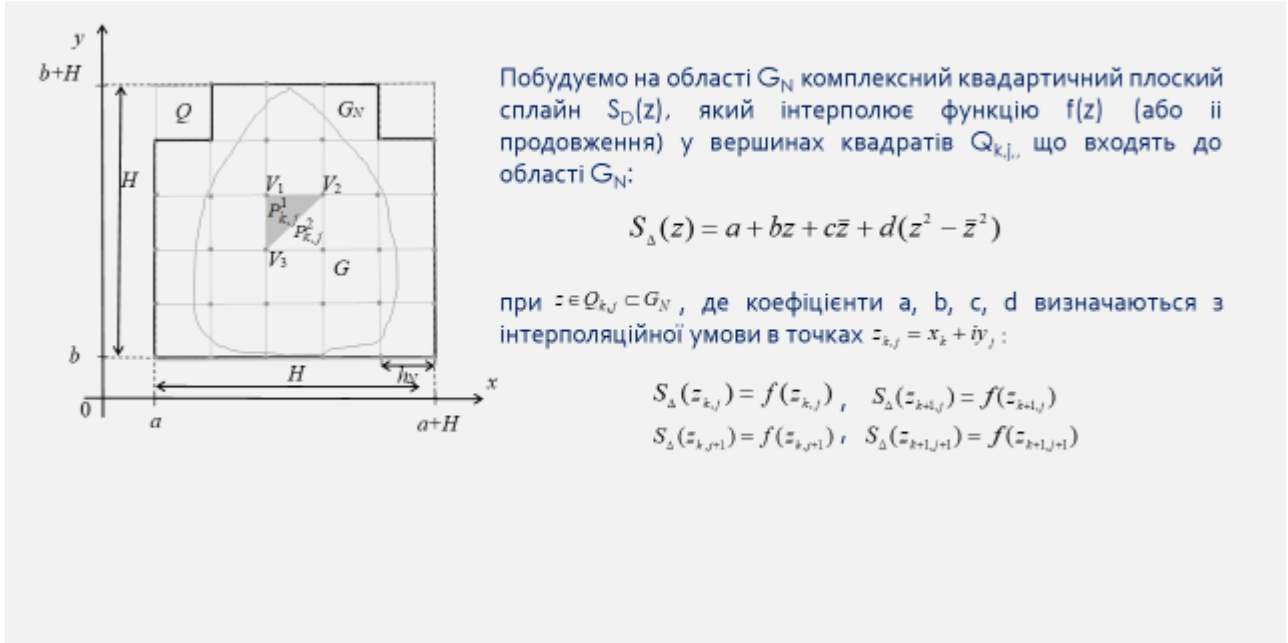


Рисунок А9 – Комплексна сплайн-апроксимація на базі квадратичних плоских сплайнів

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖІ WI-FI/INDOOR

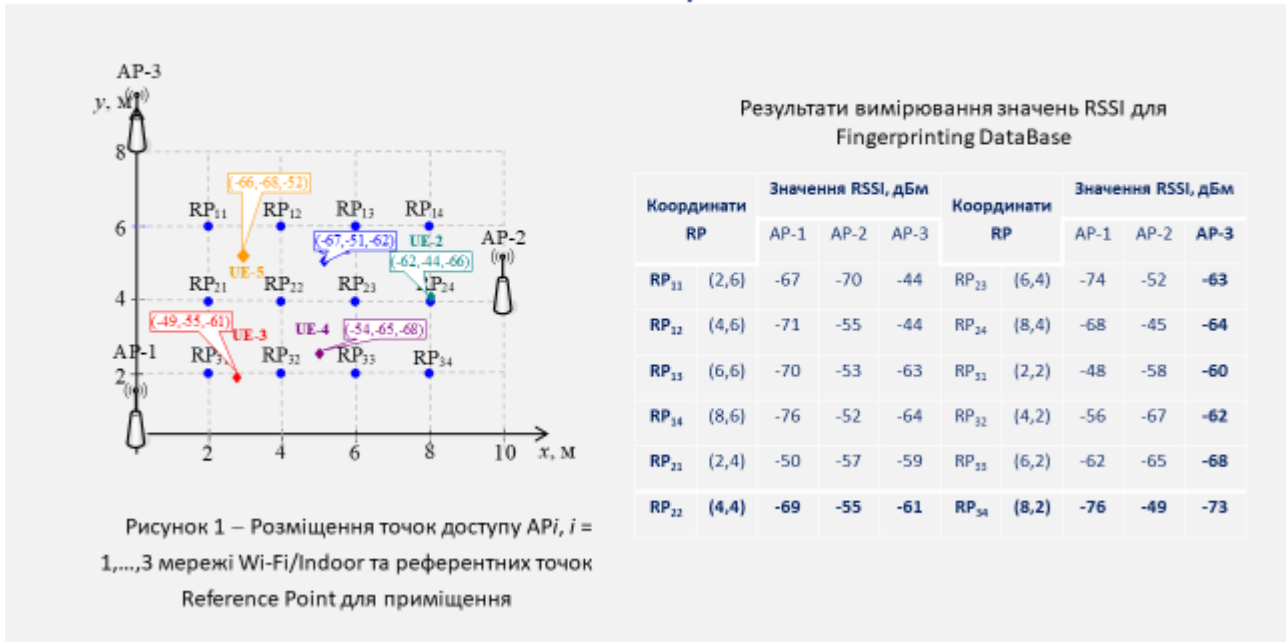


Рисунок А10 – Порівняльний аналіз методів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖІ WI-FI/INDOOR

Порівняння результатів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor за результатами середньоквадратичної помилки MSE

Пристрої користувача UE	UE-1	UE-2	UE-3	UE-4	UE-5
Реальні координати користувача	(5;5)	(8;4)	(2,7;2)	(5;2,5)	(3;5)
Експериментальні координати, отримані на базі методу k -найближчих сусідів k -NN	(5,5;5,6)	(8,3;4,6)	(3;2,5)	(5,4;3)	(3,2;5,4)
Значення середньоквадратичної похибки MSE, м	0,78	0,67	0,58	0,64	0,75
Експериментальні координати, отримані на базі Байєсівського методу	(5,3;5,21)	(8,2;4,35)	(3;2,41)	(5,27;2,85)	(3,3;5,2)
Значення середньоквадратичної похибки MSE, м	0,31	0,40	0,47	0,44	0,36
Експериментальні координати, отримані на базі комплексної сплайн-апроксимації	(5,11;5,14)	(8,1;4,05)	(2,75;2,2)	(5,15;2,6)	(3,1;5,1)
Значення середньоквадратичної похибки MSE, м	0,17	0,11	0,20	0,19	0,15

Значенням середньої абсолютної похибки MSE

$$MSE = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \sqrt{(x_{est} - x_{real})^2 + (y_{est} - y_{real})^2}$$

де x_{est} , y_{est} - координати місцезнаходження користувача, визначені в ході експерименту, x_{real} , y_{real} - реальні координати місцезнаходження користувача, L - кількість вимірювань.

Рисунок А11 – Таблиця порівняльного аналізу методів локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В МЕРЕЖІ WI-FI/INDOOR

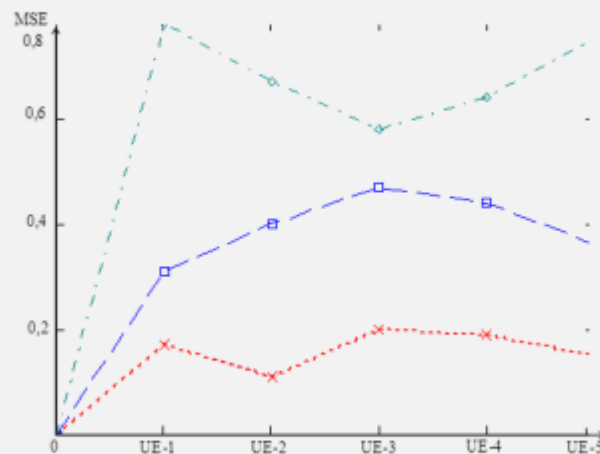


Рисунок 2 – Результати середньоквадратичної помилки MSE для позиціонування користувача за допомогою методу Fingerprinting на базі методу k -найближчих сусідів, Байєсівського методу та комплексної сплайн-апроксимації на базі квадратичних плоских сплайнів

Рисунок А12 – Результати середньоквадратичної помилки MSE локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих методів позиціонування користувача у мережі Wi-Fi/Indoor на базі методу Fingerprinting. Встановлено, що допустиму точність позиціонування дозволяє досягти методу Fingerprinting на базі методу k найближчих сусідів kNN, Байєсівському методу або комплексній сплайн-апроксимації на базі квадратичних комплексних плоских сплайнів.
2. Для підвищення точності локального позиціонування в мережі Wi-Fi/Indoor запропоновано проведення порівняння результатів позиціонування користувача за допомогою методу Fingerprinting на базі методу k найближчих сусідів, Байєсівському методу або комплексній сплайн-апроксимації на базі квадратичних комплексних плоских сплайнів.
3. Проведено експеримент, під час якого розглянуто функціонування методу Fingerprinting для інфраструктури мережі Wi-Fi/Indoor у паркінгу. Результати порівняння методів дозволили встановити, що найбільшу точність дозволяє отримати модифікований метод Fingerprinting на базі комплексній сплайн-апроксимації на базі квадратичних комплексних плоских сплайнів.

Рисунок А13 – Висновки