

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

\_\_\_\_\_  
Навчально-науковий центр заочної форми навчання

(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Інформаційних управляючих систем

(повна назва)

## АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський)

Дослідження методів і технологій позиціонування мобільного об'єкту в  
віртуальних просторах великих публічних центрів

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ІУСТзм-18-1

Коваленко О. І.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційні управляючі системи та технології

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Саєнко В. І.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

2019р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

(повна назва)

Кафедра Інформаційних управляючих систем

(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційні управляючі системи та технології

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Коваленко Олександру Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів і технологій позиціонування мобільного об'єкту в віртуальних просторах великих публічних центрів

затверджена наказом по університету від 11 жовтня 2019 р. № 198 Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи методи знаходження дистанції - за допомогою обчислень потужності прийнятих Bluetooth сигналів, обчислення координат – за рахунок трилатерації.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Проаналізувати сучасні методи та технології локального позиціонування, удосконалити існуючі алгоритми визначення місцезрештування користувача та розробити нові на основі вимірювань потужності сигналів маяків і даних про їх місцезнаходження. Розробити приклад мобільного додатку, що забезпечує відображення місця розташування користувача на карті приміщення. Розробити тестові програмні засоби забезпечуючи конфігурацію маячків і оцінку похибки визначення місцеположення.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на атестаційну роботу	15.10.2019	
2	Попереднє дослідження галузі завдання	16.10.2019 – 23.10.2019	
3	Аналіз предметної області та постановка завдання	24.10.2019 – 31.10.2019	
4	Формування результатів дослідження моделей наскрізних бізнес процесів	1.11.2019 – 19.11.2019	
5	Дослідження отриманих наукових результатів	20.11.2019 – 27.11.2019	
6	Практичне використання результатів дослідження	28.11.2019 – 5.12.2019	
7	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	6.12.2019 – 10.12.2019	
8	Попередній захист	11.12.19	
9	Рецензування роботи	12.12.19	

Дата видачі завдання   15     жовтня   2019 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. Саєнко В. І.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціал)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до курсового проекту: 81 с., 40 рис., 6 табл., 2 додатка, 20 джерел.

**GPS-НАВІГАЦІЯ, ГЕОМАГНІТНА КАРТА, BLUETOOTH МІТКИ, ТЕХНОЛОГІЇ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ, МОБІЛЬНИЙ ОБ'ЄКТ, ВІРТУАЛЬНИЙ ПРОСТОР ВЕЛИКИХ ТОРГОВИХ ЦЕНТРІВ.**

Тема роботи є актуальною через те, що сьогодні майже кожен телефон має вбудований модуль GPS-навігації, що вирішує багато проблем пов'язаних з позиціонуванням користувача, але проблема локального позиціонування залишається. Особливо гостро вона проявляється при рішенні завдання навігації усередині будівлі з розподіленою мережею проходів, кімнат, поверхів, корпусів та об'єктів у них. Традиційні системи GPS-навігації не можуть вирішити дану проблему через досить великі похибки визначення координат, а також неможливістю отримання даних з супутника всередині приміщень.

Головною метою роботи є дослідження поточного процесу позиціонування мобільного об'єкта для різних віртуальних просторів великих торгових центрів.

Аналіз аналогічних систем показав, що існує досить велика кількість варіантів розв'язання задачі. Однак, кожен із запропонованих методів, має свої недоліки, які не дозволяють використовувати їх на практиці. Найбільш поширеними технологіями локального позиціонування є технології на основі: QR міток, Wi-Fi, Bluetooth міток, позиціонування в стільникових мережах, методів побудови геомагнітної карти та інші.

Результат виконання роботи – дослідження та удосконалення методів і технологій позиціонування мобільного об'єкта для різних віртуальних просторів великих торгових центрів, досягнення прийнятної вартості проекту та мінімізація їх погрішності.

## ABSTRACT

Explanatory note to the course project: 81 pages, 40 figures, 6 tables, 2 supplements, 20 sources.

GPS NAVIGATION, GEOMAGNETIC MAP, BLUETOOTH LABELS, LOCAL POSITIONING TECHNOLOGY, MOBILE OBJECT, VIRTUAL SPACE OF LARGE SHOPPING CENTERS.

The topic of work is relevant because today almost every phone has a GPS module, which solves many problems related to user positioning, but the problem of local positioning remains. It is particularly acute when solving the problem of navigating inside a building with a distributed network of passageways, rooms, floors, buildings and objects in them. Traditional GPS navigation systems cannot solve this problem due to the large errors in coordinate determination and the inability to receive satellite data indoors.

The main purpose of this work is to study the current process of positioning a mobile object for different virtual spaces of large shopping centers.

Analysis of similar systems showed that there are quite number of options for solving the problem. However, each of the proposed methods has its disadvantages that do not allow them to be put into practice. The most common local positioning technologies are technologies based on: QR tags, Wi-Fi, Bluetooth tags, cellular positioning, geomagnetic map construction methods and more.

The result of the work is the research and improvement of methods and technologies of positioning the mobile object for different virtual spaces of large shopping centers, achieving acceptable project cost and minimizing their error.

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ .....	4
ABSTRACT .....	5
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП .....	8
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ .....	10
1.1. Огляд і аналіз сучасного стану проблеми, з яким зв'язана задача.....	10
1.2. Формування цілі і задачі дослідження, постановка задачі.....	11
1.3. Огляд і аналіз існуючих методів і засобів рішення поставленої наукової задачі.....	13
2 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ У РАМКАХ НАУКОВОЇ ЗАДАЧІ .....	38
2.1. Опис цільової технології Beacon.....	38
2.2. Структура даних Beacon маячків .....	39
2.3. Опис методів визначення місцезнаходження з використання Beacon- маячків.....	41
2.3.1. Опис методу визначення місцезнаходження з використанням значень RSSI та методу триангуляції .....	43
2.3.2. Опис методу визначення місцезнаходження з використанням фільтра Калмана .....	44
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ .....	48
3.1. Двовимірне тестування .....	48
3.2. Тривимірне тестування .....	50
3.3. Тестування з використанням фільтра.....	53
4 ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	55
4.1. Приклад загальної архітектури додатку.....	55
4.2. Приклади документів, що створюються в системі.....	57
4.3. Опис програми .....	57
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	60
ДОДАТОК А.....	62
ДОДАТОК В.....	65

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ  
І ТЕРМІНІВ

БД – база даних;

ІС – інформаційна система;

ІУС – інформаційно управляюча система;

КТС – комплекс технічних засобів;

ПЗ – програмне забезпечення;

ІНС – інерціальна навігаційна система;

СУБД – система управління базами даних;

АПС - акустична паркувальна система;

Wi-Fi – торгова марка Wi-Fi Alliance, сімейство стандартів передачі  
цифрових потоків даних по радіоканалах;

RSSI (англ. Received signal strength indicator) – Показник рівня сигналу;

УЗ – ультразвуковий;

GPS – система глобального позиціонування;

Bluetooth LE (англ. Bluetooth low energy) – Бездротова технологія Bluetooth з  
низьким енергоспоживанням;

## ВСТУП

Ми живемо у часи стрімкого інформаційного і технологічного прогресу, у всіх сферах діяльності людини з'являються нові методики, які використовують інформаційні системи та обчислювальні потужності сучасних комп'ютерів. Людина ж повинна бути мобільною, що передбачає бути завжди на зв'язку і мати під рукою необхідну інформацію. І це стосується не тільки повсякденного спілкування, але й роботи. Для цього використовуються соціальні мережі, електронна пошта, мобільний телефон і т. д. Звичайний мобільний телефон розширює свої функції до персонального комп'ютеру (ПК). Це відбувається у зв'язку з тим, що важливо мати можливість завжди скористатися необхідною інформацією і використовувати для цього всі можливі способи.

Системи визначення місцезнаходження в приміщенні стали дуже популярними в останні роки. Ці системи забезпечують новий рівень автоматизації, званий автоматичним визначенням місця розташування об'єкта. Реально існуючі програми, що використовують подібну автоматизацію, численні. Як приклади можна розглянути виявлення місця розташування продуктів, що зберігаються на складі, визначення місця розташування медичного персоналу або обладнання в лікарні, виявлення місця розташування пожежників в палаючому будинку, виявлення місця розташування поліцейських собак, навчених знаходити вибухові речовини в будівлях, і знаходження засобів обслуговування і устаткування, розкиданих по всьому заводу.

Також варто згадати про те, що розвиваються сервіси, заснованих на місцезнаходженні відвідувача. Прикладами таких можуть бути автоматизовані екскурсії по музеям, пошук вільного місця на парковці, відділу і полки з цікавлять товаром в магазині, просування геоконтекстної реклами.

Також, все більше можна спостерігати підвищення попиту до автоматизації існуючих виробничих процесів. Будь-які галузі, від

автомобільних та машинобудувальницьких до енергогенеруючих та харчових промисловостей використовують роботи-маніпулятори для збірки машин, зварювальні роботи та інше. Особливо корисною автоматизація може бути при перевірці складних конструкцій, наприклад фюзеляж, трубопровід, автомобільний корпус, турбіна на тепловій або атомній електростанції та інше. Процес контролю у цьому типі виробництва є дуже трудомісткою та складною задачею для людини. Тому були придумані різні типи контролю, такі як радіографічний, візуальний, вихрострумний, ультразвуковий, капілярний тощо. Але потрібно зауважити, що процес контролю може зіткнутися з труднощами або зовсім не вирішувати всі проблеми. Саме тому, автоматизовані системи виглядають гарним рішенням. У випадках неможливості повної автоматизації процесу контролю, світові компанії інвестують у так званих “коллаборативних роботів”. Це пристрої, призначені для виготовлення та контролю продукції спільно або поряд з людиною. Тому автоматизації існуючих виробничих процесів та систем контролю є актуальною темою на сьогодні, а в системах виконуючих автоматизацію особливо гостро стоїть питання орієнтації у просторі. Адже для якісного виробничого процесу та контролю якості недостатньо проводити діагностику швидко, потрібно як мінімум фіксувати координати та тип дефектів в продукції.

Саме тому, завдяки великим комерційним перспективам, напрямок indoor-навігації стає все більш затребуваним і все більш привертає увагу великих брендів, тому у даній роботі буде проводитися дослідження методів і технологій позиціонування мобільного об'єкту в віртуальних просторах великих публічних центрів.

# 1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

## 1.1. Огляд і аналіз сучасного стану проблеми, з яким зв'язана задача

Як відомо, принцип GPS (Global Positioning System) заснований на розрахунку радіосигнал, що приймається з декількох супутників в повітрі. Ми можемо виділити три основних сегмента системи: космічний сегмент, що містить супутники, сегмент управління, який є станцією моніторингу на суші, та сегмент користувача - пристрої, які приймають та інтерпретують радіосигнали, що транслюються супутниками [2]. Необхідною умовою позиціонування є те, що наземний приймач може приймати радіосигнали з визначеною частотою. Слабка потужність утруднює проникнення сигналу в будівлі через стіни, дахи, підлоги та інше. Навіть з деякими підсилювачами, деякі з радіосигналів можуть бути спотворені і приймач буде трактувати їх з неприпустимими помилками. Отже GPS з точністю позиціонування 10 метрів на відкритому повітрі не працюють належним чином у приміщенні, особливо у будівлях хмарочосів та підземних інфраструктурах, де укриття досить товсті, щоб змінити шлях сигналів GPS або навіть їх ретельно блокувати. Успішні комерційні програми GPS приносять мільярди доларів і мільйони робочих місць, те ж саме, можливо, станеться і в приміщенні. Люди, використовують GPS в галузях наземного транспорту, авіації, машинного управління, відстеження людей, залізниці, картографуванні, автомобільній галузі, рекреаційній, військовій та інших [3]. Аналогічна система для позиціонування в приміщенні може бути ще однією золотою шахтою в майбутньому. Також, ці системи можуть бути використанні не тільки для надання користувачу інформації про поточне місцезнаходження, але й для надання інформації щодо оточуючих інфраструктурних об'єктів, пошуку найкоротшого маршруту до потрібного місця та пошуку друзів, машин, дітей.

Саме тому, тема роботи є актуальною, бо хоч і кожен телефон сьогодні має вбудований модуль GPS-навігації, що вирішує багато проблем пов'язаних з позиціонуванням користувача, але проблема локального позиціонування залишається. Як і впливає з назви, системи локального позиціонування - це системи розроблені для контролю за співробітниками, транспортом, обладнанням і в цілому за всієї ситуації в строго заданих межах. Це можуть бути офісні та виробничі приміщення, склади та логістичні комплекси, медичні організації, підземні споруди, шахти та особливо великі торгові центри. В даному випадку використовуються бездротові і радіочастотні технології, а також інфрачервоні, ультразвукові, оптичні, інерційні та ряд інших. Особливо гостро проблема локального позиціонування проявляється при рішенні завдання навігації усередині будівлі з розподіленою мережею проходів, кімнат, поверхів і корпусів, таких як великі торгові центри, бо, як було сказано раніше, традиційні системи GPS-навігації не можуть вирішити дану проблему через досить великі похибки визначення координат (близько 10 м), а також неможливістю отримання даних з супутника всередині приміщень.

## 1.2. Формування цілі і задачі дослідження, постановка задачі

Таблиця 1 - Цілі і задачі дослідження

Предметна область	Системи визначення місцезнаходження
Об'єкт дослідження	Поточний процес позиціонування мобільного об'єкта у різних віртуальних просторів великих торгових центрів.
Предмет дослідження	Системи та технології позиціонування мобільного об'єкта для різних віртуальних просторів великих торгових центрів.

Продовження табл. 1

Ціль роботи	Підвищення інформаційної зручності відвідувачів великих торгових центрів за допомогою надання особливих інформаційних сервісів.
Наукова задача	Дослідження методів і технологій позиціонування мобільного об'єкта для різних віртуальних просторів великих торгових центрів.
Наукова новизна	Поліпшення методів і технологій позиціонування мобільного об'єкта для різних віртуальних просторів великих торгових центрів за рахунок впровадження методів на основі вимірювань потужності сигналів маячків і даних про їх місцезнаходження без фільтрації та з використанням фільтра Калмана.
Практична цінність	Результатами дослідження можливо користуватися на різних періодах життєвого циклу системи позиціонування мобільного об'єкта для різних віртуальних просторів - від проектування до розробки та впровадження.
Перелік задач	<p>Проаналізувати сучасні методи та технології локального позиціонування.</p> <p>Удосконалити існуючі алгоритми визначення місцезнаходження користувача та розробити нові на основі вимірювань потужності сигналів маяків і даних про їх місцезнаходження.</p> <p>Розробити приклад мобільного додатку, що забезпечує відображення місця розташування користувача на карті приміщення.</p> <p>Розробити тестові програмні засоби забезпечуючи конфігурацію маячків і оцінку похибки.</p>

### 1.3. Огляд і аналіз існуючих методів і засобів рішення поставленої наукової задачі

Аналіз аналогічних систем показав, що існує досить велика кількість варіантів розв'язання задачі. Однак, кожен із запропонованих методів, має свої недоліки, які не дозволяють використовувати їх на практиці. Існують деякі системи позиціонування в приміщенні, які стверджують, що їх похибка не більше одного міліметра. Це такі системи як вимірювальна машина координат, лазерний трекер та iGPS. Однак вони зазвичай вимагають складних інфраструктур і дорогих інструментів, які призводять до високої вартості. Також вони мають обмежену зону покриття або ручну настройку великих розмірів, що займає занадто багато часу та додає величезні витрати. З іншого боку, системи, які коштують дешевше і мають менш складну інфраструктуру не можуть досягти задовільної точності, мають проблеми у розгортанні та у більшості випадків і не знаходять способу комерціалізуватися.

Тому основним завданням дослідження та розробки систем локального позиціонування є пошук найкращої системи з найвищою точністю, найменшим часом установки, витратами та мінімальним споживанням. Далі ми розглянемо принципи роботи існуючих методів та технологій позиціонування та оберемо найбільш відповідну для навігації в приміщенні.

### 1.4. Технології засновані на використанні акустичних коливань

Одні з найпоширеніших технологій орієнтації та визначення відстані до об'єктів, поверхонь та їх частин є такі, в яких використовуються акустичні, а точніше ультразвукові датчики. Це такі системи, як системи визначення координат по шуму від певних джерел, акустичні паркувальні системи та інші локаційні ультразвукові системи. Далі розглянемо принципи їх роботи.

#### 1.4.1. Технології для визначення координат джерела звуку

Одними з перспективніших та потрібних розробок на сьогодні є технології визначення координат за звуком від джерела. Вони знаходять своє застосування у багатьох сферах діяльності людини [4].

Принцип дії таких технологій можна описати у наступній послідовності дій. Перший крок – реєстрація акустичної хвилі від джерела звуку, такого як звук двигуна, літака, вибух, постріл. Тобто джерело звуку, яке ми очікуємо. Фіксація відбувається різними мікрофонами, розташованими на відомій відстані один від одного.

Другий крок – визначення затримки між отриманням звуку мікрофонами. Програмна частина отримує наявні дані і визначає відстань і напрям до шуканого звуку з врахуванням відомих координат кожного з мікрофонів.

Виділимо два методи визначення затримки у часі, що використовуються у даному випадку:

1. Метод кореляції в часовій області
2. Метод з застосуванням адаптивного фільтру

Метод кореляції в часовій області засновано на знаходженні максимуму функції взаємної кореляції двох сигналів за формулою (1):

$$\hat{R}_{ij}(t, \tau) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} s_i(t) * s_j(t + \tau) dt \quad (1)$$

де  $\tau$  – часова затримка,  $s_i$  і  $s_j$  – сигнали з  $i$  та  $j$  каналів.

Також у більш складних умовах можливе застосування формули (2) адже зашумлені сигнали можуть вплинути на попередній розрахунок та видати невірну відповідь. Щоб запобігти це, використаємо формулу кореляції нормалізовану за енергією сигналів:

$$\hat{R}_{ij}(t, \tau) = \frac{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} s_i(t) * s_j(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t-T/2}^{t+T/2} s_i(t)^2 dt} * \sqrt{\int_{t-T/2}^{t+T/2} s_j(t + \tau)^2 dt}} \quad (2)$$

де  $\tau$  – часова затримка,  $s_i$  і  $s_j$  – сигнали з  $i$  та  $j$  каналів.

Але великим недоліком у цьому випадку може бути поява побічних максимумів кореляційної функції при аналізі періодичних сигналів.

Метод з застосуванням адаптивного фільтру спрямований на використання фільтру для автоматичного підбору коефіцієнтів, що дає можливість мінімізувати величину середньоквадратичної похибки між сигналами на вході. Похибки зменшуються алгоритмом ітеративно, що призводить до зсування сигнали на величину, рівну затримці. Коефіцієнт фільтру відповідаючий дійсній затримці буде рівен одиниці, а інші – нулю в ідеальному випадку [5].

На наступному рисунку відображено результат обробки сигналу з шумом (1.а), кореляційним алгоритмом (1.б) і адаптивним фільтром (1.в). З рисунка 1 можна зробити висновок, що для періодичних сигналів кореляційна функція теж буде періодичною та буде мати декілька піків, що ускладнює аналіз періодичних сигналів, бо рухомі джерела сигналів недостатньо добре обробляються адаптивним фільтром.

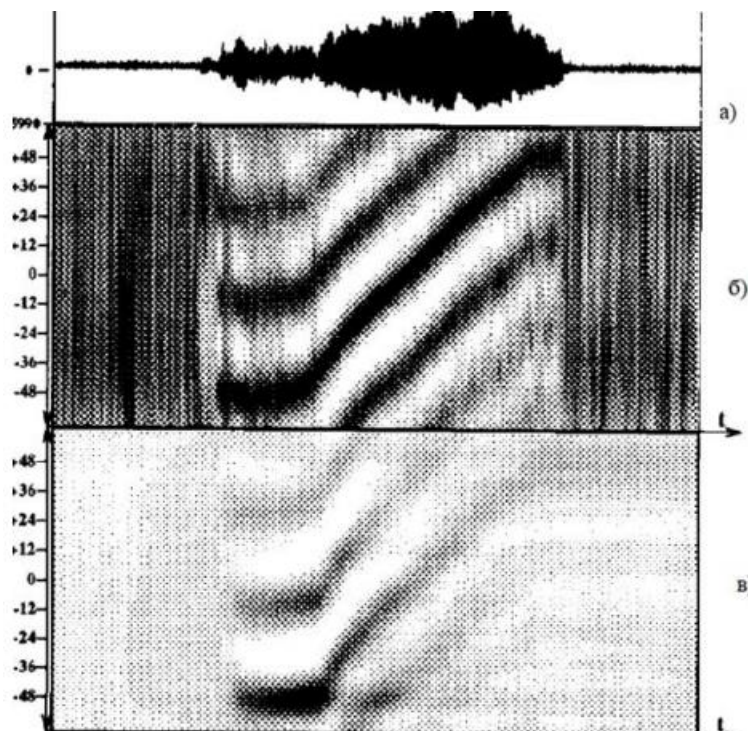


Рис. 1 - Обробка сигналу з шумами, кореляційним алгоритмом і адаптивним фільтром

При відомих координатах розташування мікрофонів в просторі та відомій затримці на кожній парі, з'являється можливість розрахунку локації джерела.

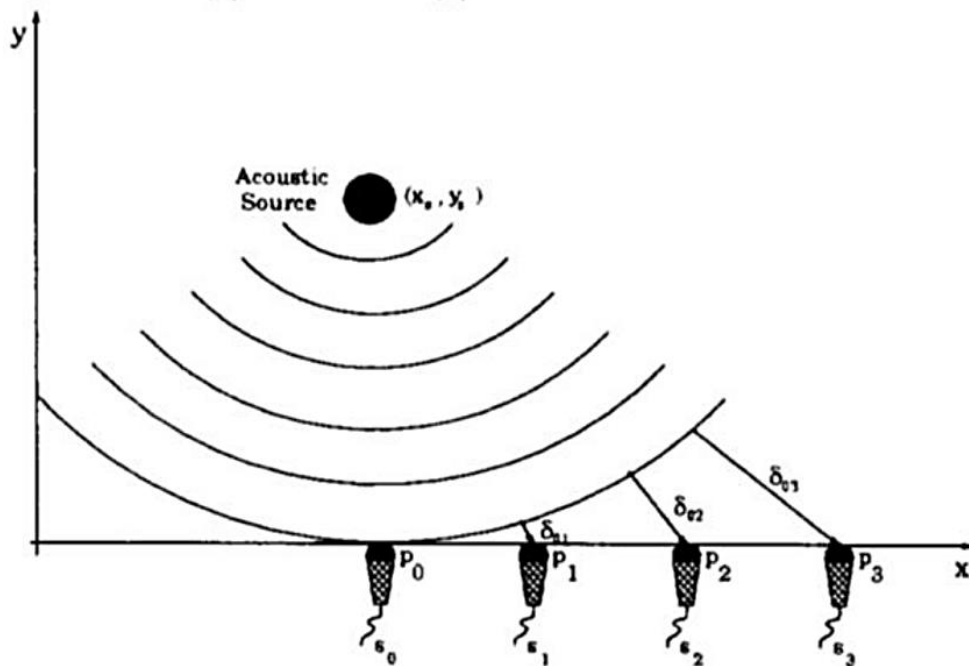


Рис. 2 - Приклад поширення акустичної хвилі в просторі

Через те, що координати мікрофонів вже відомі, на вхід програма отримує часові затримки приходу сигналу до інших мікрофонів, що надходять від мікроконтролера. Нехай  $I = \{x; y\}$  – координати джерела звуку.  $\{x_i; y_i\}$  – координати одного з мікрофонів, де  $i = 1 \dots n$ . Тоді за наступною формулою знайдемо відстань від джерела звуку до мікрофона з індексом  $i$ .

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (3)$$

де  $x_i, y_i, z_i$  – відомі координати джерела звуку,  $x, y, z$  – невідомі координати джерела звуку.

Від джерела до  $i$ -го мікрофона час поширення звуку знаходиться за швидкістю звуку  $V_{зв}$ :

$$t_i = \frac{R_i}{V_{зв}} \quad (4)$$

де  $V_{зв}$  – швидкість звуку в повітрі,  $R$  – відстань до джерела.

Також має дотримуватися наступне співвідношення для кожної пари мікрофонів:

$$R_i - R_j - V_{зв} * t_{ij} = 0 \quad (5)$$

де  $t_{ij}$  – різниця ходу між парою мікрофонів,  $R_i, R_j$  – відстань від джерела до кожного з мікрофонів.

Похибкою вимірювань визначається відхилення від точної рівності нулю, знак відхилення може бути будь-яким. Запишемо співвідношення у вигляді суми, що прагне до нуля при відсутності похибок вимірювань:

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M (R_i - R_j - V_{зв} * t_{ij}) \quad (6)$$

Як правило, надалі в розрахунках використовують знакопостійний функціонал оцінки сумарної похибки. Представимо його у наступному вигляді:

$$\Phi_2 = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M (R_i - R_j - V_{зв} * t_{ij})^2 \quad (7)$$

Функціонал  $\Phi_2$  при відомих координатах джерела звуку і відсутності похибки має значення близьке до нуля та залежить від координат джерела звуку ( $x, y, z$ ). В разі відсутності відомих координат, здійснюється підбір цих координат з критерієм правильності, який є мінімізацією значення функціоналу  $\Phi_2$ . Тому процес отримання координат зводиться до пошуку мінімуму цієї функції. Тоді на вхід розрахункова програма приймає числа, які є значеннями затримки спрацьовування мікрофонів  $i$  та  $j$ , а також координати кожного з мікрофонів [6].

#### 1.4.2. Акустичні паркувальні системи

АПС (Акустичні паркувальні системи) – прості та добре розповсюджені системи, що використовуються для орієнтації автомобілів. Ці системи також можуть називати паркувальними радарми, хоча це зовсім коректно, бо основою систем є лише знаходження відстані до найближчої перешкоди до кожного вбудованого датчика.

У режимі випромінення ультразвуковий датчик випромінює акустичні коливання з частотою 20КГц і більше. Коливання відбиваються від перешкод та повертаються до датчика в режимі приймача. Тому можна розрахувати відстань до об'єкта, знаючи скільки часу минуло між випроміненням та прийманням УЗ хвилі.

Наприклад, система відомого автовиробника Bayerische Motoren Werke AG (BMW) має інтегровані в бампер задньої частині авто ультразвукові датчики [7]. Датчики використовуються для вимірювання відстані до найближчого об'єкта позаду автомобіля. При виконанні заднього руху назад збільшується частота сигналу попередження. На відстані 30 см від машини чи іншої перешкоди сигнал попередження починає звучати безперервно, сигналізуючи про необхідність гальмування.



Рис. 3 - Приклад роботи АПС

АПС найчастіше користується двома або чотирма УЗ датчиками, розташованими позаду автомобіля. Велика кількість датчиків запобігає пропусканню перешкод. Далі наведено спрощену структурну схему АПС системи, до якої входять ультразвукові приймачі і випромінювачі, пристрої для виводу інформації та блоки для її приймання та обробки.

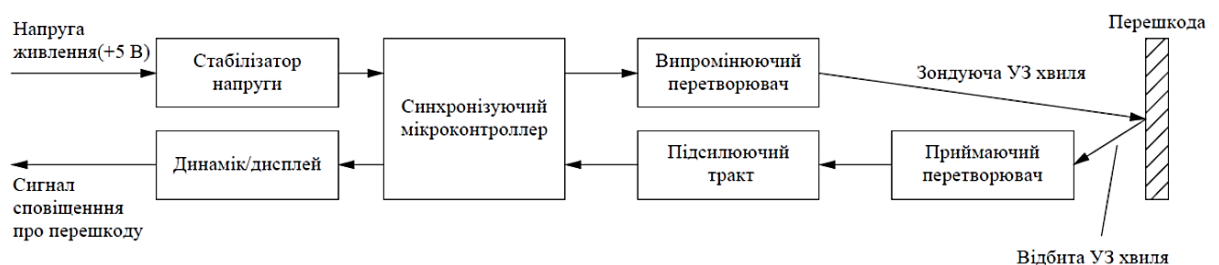


Рис. 4 - Структурна схема АПС

При розрахунку відстані використаємо наступну формулу:

$$S = \frac{c \cdot t}{2} \quad (8)$$

де  $c$  – швидкість ультразвуку на заданій частоті,  $t$  – затримка між випроміненим та прийнятим сигналом,  $S$  – шукана відстань.

Більшу частинку помилок у результаті вносять похибки при вимірюванні відстані, що утворюються при вимірюванні часу, що минув з моменту випромінення ультразвукового коливання до прийняття датчиком-приймачем відбитого коливання [8]. Виділимо основні похибки в цьому випадку:

1. Похибка, обумовлена дискретністю блоків обробки інформації
2. Похибка, обумовлена різним часом затримки сигналу в каналі реєстрації імпульсів.
3. Похибка реєстрації часу імпульсів випромінювання

З великою ймовірністю похибку можливо врахувати при вимірюванні часового інтервалу або мінізувати. При схемній компенсації досягається зменшення величини похибки, а саме при поданні стартових і кінцевих імпульсів на один приймач. Цей випадок демонструє її повну компенсацію. Також, шляхом багаторазового виміру калібрувальної відстані теж можна врахувати цю похибку [9].

Важливо врахувати вплив дискретності вимірювача часових інтервалів при розсинхронізації його моментів випромінення скануючої УЗ хвилі та його внутрішньої частоти, що можна оцінити по дисперсії пов'язаної похибки:

$$D = \frac{\Delta d}{6} \quad (9)$$

Де  $\Delta d$  – дискретність вимірювача в одиницях діяльності.

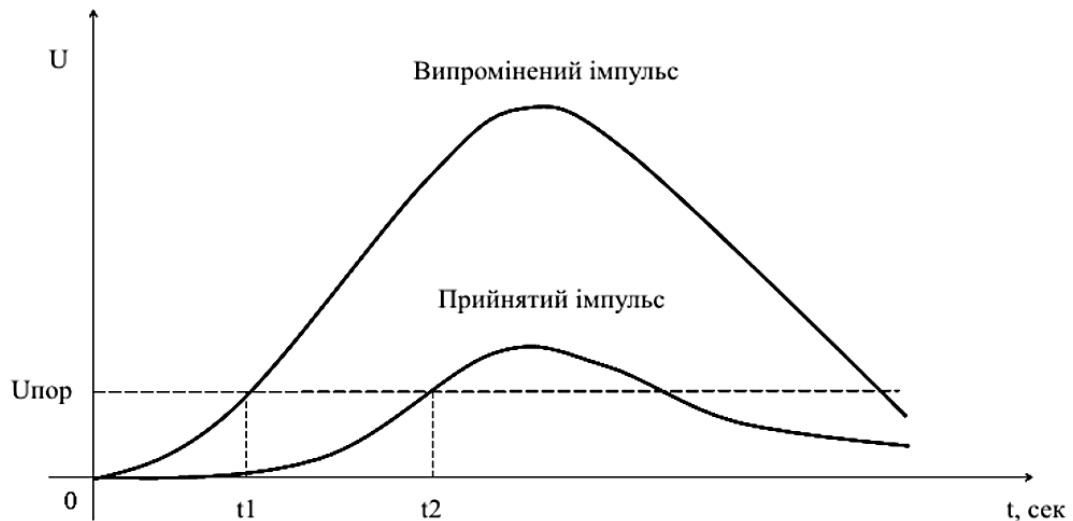


Рис. 5 - Часова діаграма фіксації імпульсів

Де  $U_{\text{пор}}$  - поріг спрацьовування,  $t_1, t_2$  – моменти фіксації імпульсів.

Основою методу є визначення тривалості часу, протягом якого імпульс повинен пройти від далекоміра до відбивача, що знижує вимогу щодо отримання задовільної стікої роздільної здатності, що спрощує вимоги до вимірювача часових інтервалів.

Також існують певні обмеження такого виду систем, виділимо основні:

1. При знаходженні в повітрі низько дисперсних частинок робота системи ускладнюється.
2. Під час руху по нерівній поверхні або пересічній місцевості результати можуть бути спотворені.
3. Поряд з джерелами сильного шуму одержання об'єктивного результату виміру значно ускладнюється
4. Поглинаючі УЗ коливання невеликі перешкоди, предмети, або інші об'єкти розташовані нижче рівня УЗ датчиків можуть залишитись нерозпізнаними. Також важливим фактором систем орієнтації заснованих на ультразвукових хвилях є коефіцієнт затухання УЗ коливань в повітрі та залежність коефіцієнту від вологості повітря. Приклад на рисунку

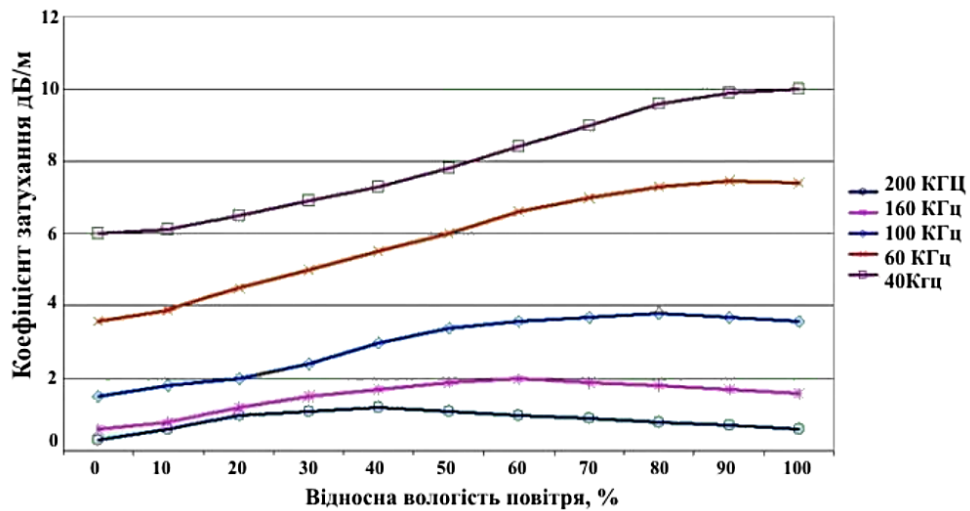


Рис. 6 - Залежність коефіцієнту затухання від вологості повітря

В даному випадку виникає проблема вимірів в умовах зміни вологості повітря, що впливає на коефіцієнт затухання. Основним методом розв'язання проблеми є включення в систему підсилювального тракту зі змінним коефіцієнтом підсилення, який керується на основі даних про вологість повітря, але це значно ускладнює програмну та апаратну частину рішення.

#### 1.5. Технології засновані на використанні оптичного випромінювання

Іншим важливим та перспективним напрямком серед технологій орієнтації у просторі є такі, що аналізують та оброблюють отримане оптичне зображення. Достатньо часто подібні рішення містять функції порівняння та розпізнавання отриманого зображення з власним або додавання на зображення калібрувальних ліній [10]. Нейронні мережі мають широке розповсюдження в цій категорії рішень.

##### 1.5.1. Технології для визначення координат камер у просторі

Камера має безліч прикладів використання, таких як колаборативні роботи, котрі скорочують процес контролю на підприємстві в декілька разів.

Технології засновані на використанні камери можна умовно поділити 2D, 3D та 1D калібрувальних цілях. Калібрування виконане по одновимірним цілям працює наступним чином: навколо осі для калібрування повертається об'єкт, що має нанесні маркери [11]. Параметри камери визначаються за рахунок обертання навколо якогось маркера, що рухається в одній площині.

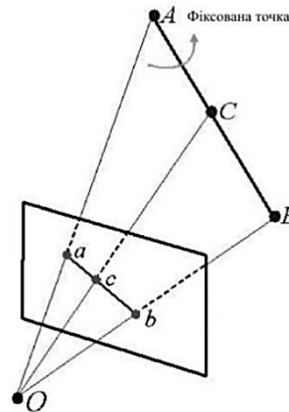


Рис. 7 - Калібрування за 1D об'єктами

Як видно з рисунку 7, відрізок АВ обертається навколо зафіксованої точки А. Далі проводяться розрахунки, виводиться обчислюване апаратом камери рівняння координат відносно точки А та визначення її положення.

1В метод калібрації забезпечує простоту обчислень та структурної схеми, але через недостатність інформації, що зчитується з одновимірної панелі точність методу достатньо мала.

Тому 2D та 3D методи калібрування набагато популярніші.

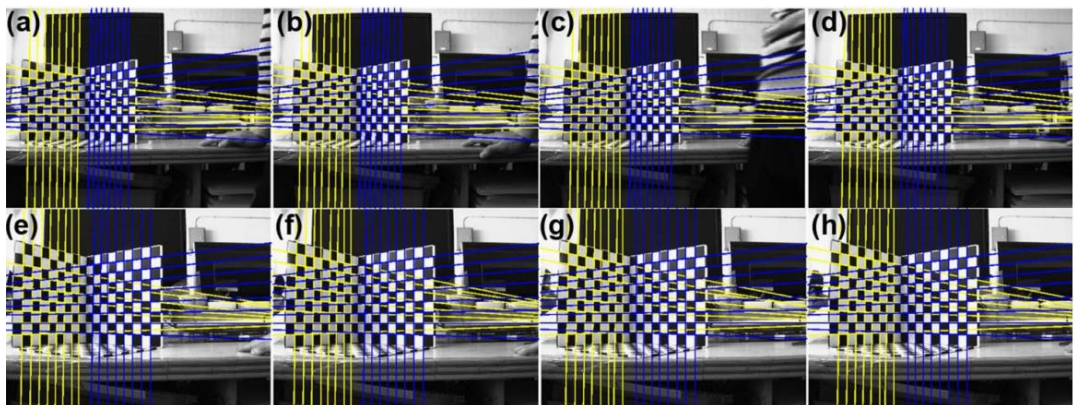


Рис. 8 - 3D калібрування камери з поступовим наближенням на 10 мм

Як видно з рисунку 8, що відображає візуальне калібрування камери по накладеним на зображення лініям, різні шаблони можуть бути використані на об'єктах калібрування, такі як кола, лінії, кольорові візерунки, або точки. Найчастіше калібрування отримують певні точки цілі в якості вхідних даних. За допомогою аналізу й порівняння одержаних зображень, при відомому положенні цілі у просторі, програма розраховує координати камери відносно цілі.

З огляду на все вищесказане, можна зробити висновок, що подібні технології мають багато переваг, проте в них доволі вузьке коло застосування, наприклад колаборативні роботи. Для пошуку місця розташування користувач повинен знати координати цілі та мати пряму видимість з нею. Тому ці технології не відповідають вимогам повної автономності приладу [12]. Ще варто зазначити, що подібні технології потребують складного програмного забезпечення, що виконує розрахунки в режимі реального часу. Ці фактори підвищують вимоги до апаратної частини та збільшують ціну рішення.

#### 1.5.2. Технології зі скануючими лідарами

Подібні технології найчастіше зустрічаються як технології позиціонування автономних роботів, особливо для пошуку початкового місця розташування об'єкта у просторі. Основу метода становлять такі кроки, як отримання вхідних даних з зображенням приміщення, картою висот та інше, сканування навколишньої середовища, зіставлення вхідних даних з наявними у базі та обробка результату.

Схожі задачі є типовим завданням початкового визначення положення шляхом розпізнавання та пошуку орієнтирів в середовищі робота. Будь-який елемент середовища, що зберігається в системі орієнтації робота, за яким можливо спостерігати та опис якого можливо порівняти з аналогічним, може бути орієнтиром.

Щодо розвитку цієї технології, головною складністю є доволі низька точність вимірювання дистанцій та відстаней. Сучасні системи, що

користуються високоточними далекомірами зазвичай мають часткове або повне вирішення проблеми [13].

Далі розглянемо основні методи виміру часових затримок та принципи дії лазерної дальнометрії.

Лазерні далекоміри можна поділити на три основних види:

1. Фазові далекоміри
2. Інтерференційні далекоміри
3. Імпульсні далекоміри

Розглянемо Імпульсні далекоміри, що знаходять відстань за допомогою вимірювання часу польоту променю. Випромінювач відправляє лазерний промінь, котрий повертається до приймача після відбиття від поверхні. При відомому часу затримки між прийомом та випромінюванням імпульсу можливо знайти відстань до перешкоди. Цей метод достатньо часто ігнорується при малих відстанях до потенційних перешкод через дуже високу швидкість світла, бо реєстрацію малого інтервалу можна виконати лише точними та дорогими мікросхемами.

Визначення відстані у фазових далекомірах відбувається відносно до опорного коливання, через знаходження зсуву фази гармонійно модульованого оптичного випромінювання світлодіода, твердотільного лазера.

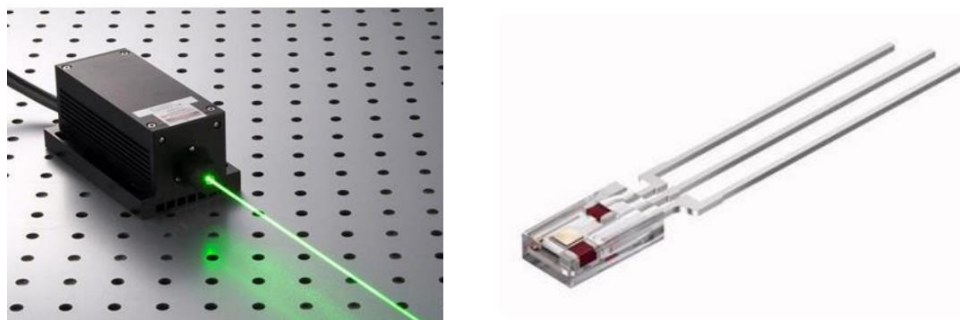


Рис. 9 - Джерела оптичного випромінювання

Різниця фаз визначається за наступним чином:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \arcsin\left(\frac{8}{\pi^2} \frac{\overline{S_1 S_2}}{S_{1\text{мод}} S_{2\text{мод}}}\right) \quad (10)$$

Приклад методу цифрового обчислення різниці фаз між робочим і опорним коливаннями зображено у вигляді структурної схеми на рисунку 10.

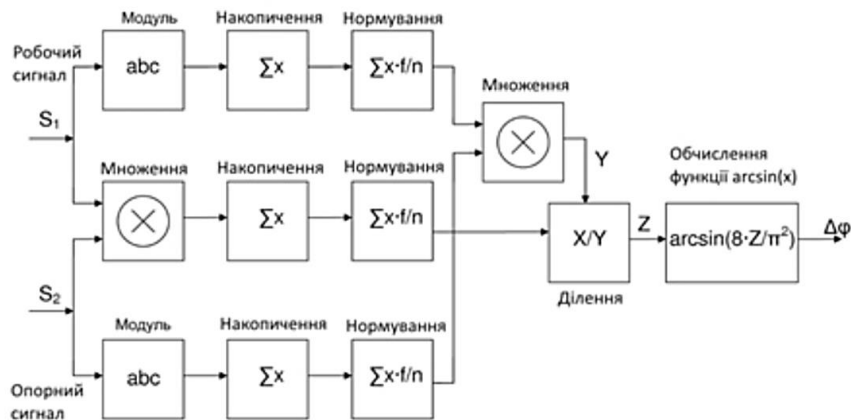


Рис. 10 - Обчислення різниці фаз у далекомірах

Фазомер або електронний вимірювач фази є значним джерелом похибок при вимірюванні дальності. Існує декілька методів для вирішення завдань пов'язаних з вимірюванням різниці фаз: цифровий метод підрахунку кількості імпульсів, метод перетворення інтервалу часу в напругу, метод компенсації фази, метод вимірювання фази з перетворенням частоти, метод перетворень Фур'є з виділенням фазових складових, квадратурний метод вимірювань фазового зсуву та користування зв'язком між фазочастотною та амплітудно-частотною характеристиками з використанням перетворення Гілберта для мінімально-фазових ланцюгів [14]. Фазовими далекомірами нерационально користуватись на дистанціях, що будуть більше ніж декілька десятків метрів, незважаючи на кращі результати при вимірюванні малих дистанцій.

Щодо системи, які користуються далекометрією, низький рівень точності перших з далекомірів визначив розвиток технологій інтерпретуючої навігації. Основою технології є зіставлення розпізнаних видимих орієнтирів, оточуючих робота з наявною у пам'яті картою.

Технології достатньо вміти розпізнавати лише кілька типів орієнтирів, наприклад “стрибок до”, “стіна”, “опуклий кут” та інші при розв'язанні проблем позиційної прив'язки.

Після обробки дані з лазерного сканера перетворюються в моделі видимої частини середовища робота.

Основою математичного апарату технології є виділення з оточення робота обрисів кутових точок предметів. З'єднуючі точки відрізки прямих ліній є “відмінними ознаками” видимої частини середовища робота. Щодо всієї сукупності відмінностей, генерується набір параметрів цих ознак. В цей набір входять величини, які позначають геометричні особливості оточуючих об'єктів. Тому, за допомогою цього набору генерується інформація, яка описує геометрію навколишнього оточення.

Також математичний опис оточення знаходиться в пам'яті системи. В ньому відмінним вектором позначають місця переходу до інших приміщень та певними векторними лініями позначають перешкоди та межі кімнат.

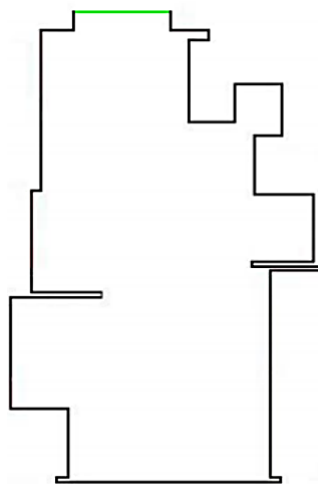


Рис. 11 - Зображення на основі математичного опису приміщення

Для розв'язання завдання орієнтації у просторі виконується порівняння геометричних особливостей оточення з картою збереженою у базі даних.

Першим кроком виконується обробка драйвером сканера, який знаходить набір чисел, що виражає відстані від сканера до поверхні перешкод, які розташовані в області видимості сканера [15]. Отриманий набір відстаней відсортован по підвищенню кута повороту сканера. Далі за допомогою фільтрування шумів та апроксимації з одержаної карти виділяються відмінні ознаки та карта зіставляється з наявною у базі даних.

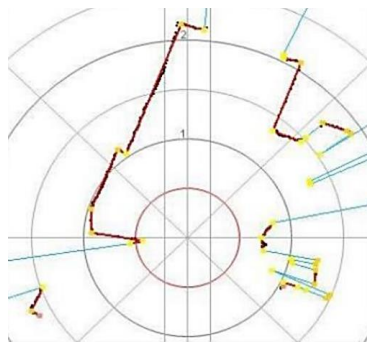


Рис. 12 - Карта виконана за принципом визначення відстані до перешкод

Як видно з рисунку 12, червоні лінії та жовті точки – це математичні вектори, що характеризують відстань до перешкод та їх положення, а радіальні лінії – це кут повороту сканера.

Після того як недостовірні вектори та похибні значення були видалені, генерується робоча модель за допомогою якої виконується зіставлення з даними про кімнату наявними у пам'яті.



Рис. 13 - Частина кімнати після фільтрації

Наступним кроком є зіставлення відфільтрованої моделі з наявною в базі даних та пошук відповідного до поточних координат у просторі схожого фрагменту. Також формується набір ознак цієї моделі.

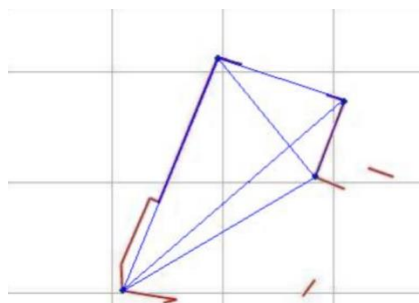


Рис. 14 Інтерпретація відмінностей в моделі

Відрізки, що поєднують опорні точки в моделі виступають як відмінні ознаки. Характеристиками виступають сформований для кожної з ознак набір параметрів.

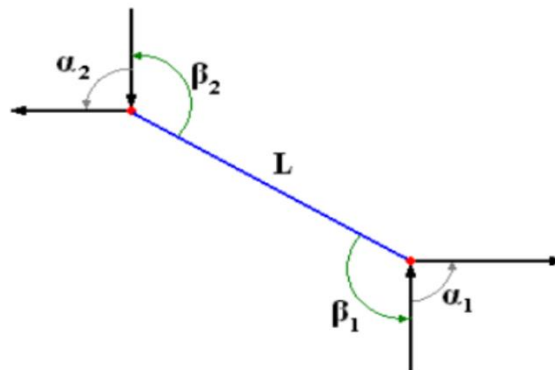


Рис. 15 Кути базових точок

Зіставлення на основі отриманого набору параметрів проводять у наступному вигляді. По перше фільтруються схожі параметри за рахунок порівняння довжини відрізків:

$$\Delta L = (L_1 - L_2) < K(11)$$

де  $L_1$  – довжина відрізка одержанної моделі,  $L_2$  – довжина відрізка карти, що порівнюється з моделлю,  $\Delta L$  – різниця довжин,  $K$  – емпіричний коефіцієнт. При перевищенні різницею певного значення коефіцієнта  $K$ , відміна ознака відкидається.

Аналогічно зіставляються всі інші параметри та визначається відповідність певному положенню в приміщенні

### 1.6. Технології засновані на використанні радіохвиль

Не менш багатообіцяючими та цікавими є технології користуючіися електромагнітними хвилями радіо діапазону для орієнтації в просторі. Саме ці системи найчастіше обираються для пошуку координат об'єкту в приміщенні, що можна віднести до “indoor” навігації або для навігації ззовні – наприклад GPS навігація.

Виділимо основні технології зовнішньої навігації:

1. Технології працюючі за рахунок GPS або ГЛОНАСС
2. Технології, що визначають координати об'єкта за допомогою базових станцій в стільникових мережах
3. Технології працюючі за рахунок геомагнітного позиціонування

#### 1.6.1. Технології працюючі за рахунок GPS або ГЛОНАСС

Технології супутникової навігації функціонують за рахунок отримання сигналу від систем супутникової навігації та його зіставленні з даними інерціальних навігаційних систем. ІНС оброблюють дані з різних датчиків, таких як акселерометр, магнітометр, гіроскоп та інші.

Технології періодично одержують супутниковий сигнал та продовжують працювати користуючись даними від ІНС навіть при відсутності видимості супутників. Наприклад, при потраплянні автомобілю, що керується GPS в тунель система продовжує працювати, корегуя положення користувача на мапі, бо приймаються дані від ІНС. Початковими координатами слугують останні дані з GPS до розриву зв'язку та дані з датчиків про напрямок руху, поточну швидкість та прискорення. До тих пір пока зв'язок не відновився генерується координата на карті [16]. Але потрібно враховувати, що значення сумарної помилки в ІНС зростає та з часом дані з ІНС втрачають свою актуальністю

#### 1.6.2. Технології, що визначають координати об'єкта за допомогою базових станцій в стільникових мережах

Точність позиціонування при такому методі визначається радіусом дії стільники. І якщо для так званих «пікосотах» вона становить від 100 до 150 м, то в більшості випадків це кілометр і більше. При використанні методу Angle of arrival можна досягти точності від 100 до 200 м. У напрямку на абонента обчислюється приблизне місцезнаходження в межах площі,

утвореної перетином секторів обслуговування антенних решіток, для цього використовуються базові станції (БС), забезпечені декількома антенами, що обертається антеною або фазованими антенними ґратами. Після одержання джерела сигналу від БС, розраховується його місцезнаходження. Чим більше кількість БС, тим точніше можна визначити цю зону. Розташування базових станцій завжди відоме за допомогою навігаційних сервісів, наприклад додаток може одержувати поточне положення та видимі телефоном базові станції від GPS та відсилати цю інформацію до серверу, на якому знаходиться база відповідей, доступ до якої надається окремо. Якщо використовувати метод Time of arrival, який ґрунтується на вимірюванні часу проходження сигналу від мобільного терміналу до трьох найближчих базових станцій, мобільний пристрій відправляє сигнал в точно відоме БС час, а БС вимірює часовий інтервал між відправленням сигналу мобільним пристроєм і отриманням його, то точність визначення позиції об'єкта може скласти 100 м. Використовуючи гібридний метод мобільного позиціонування (використання мобільного телефону, доповненого системою GPS) можна досягти точності від 15 до 50 м на відкритій місцевості.

Тому основними перевагами цього підходу є його незалежність від стороннього обладнання, а недоліки – доволі низька точність, від 15 до 50 м на відкритій місцевості, бо віддалення базової станція може бути достатньо великим, наприклад більш ніж 30 км від пристрою, а також іноді базові станції можуть змінювати своє положення.

### 1.6.3. Технології працюючі за рахунок геомагнітного позиціонування

Технології побудови геомагнітної карти працюють орієнтуючись по магнітному полю Землі. Основою даної технології є геомагнітні аномалії як критерій для позиціонування. Геомагнітні аномалії, це аномалії виникаючі через неоднорідність геомагнітного поля. Основу технології становить фіксація та нанесення геомагнітних аномалій на карту місцевості,

потребуючий впровадження навігації. Подальше позиціонування працює за згенерованою пристроєм картою та вбудованим у пристрій магнітометром.

Один з найвідоміших прикладів реалізації технології є проект IndoorAtlas. Над ним працюють вчені фінського університету Оулу.

Основними недоліками технології є складність її реалізації та високий вплив мінливих магнітних аномалій. Наприклад, електропроводка, що змінює поле при навантаженні мережі може достатньо кардинально змінити навколишню конфігурацію магнітного поля. Також відвідувачі зі приміщень можуть вплинути своїми радіоелектронними пристроями, та інше.

Альтернативою технологіям зовнішньої навігації можуть бути технології, що найчастіше використовуються всередині приміщень. Це такі технології, як:

1. Технології навігації працюючі за рахунок Wi-Fi сигналу
2. Технології ідентифікації радіочастот (RFID)
3. Технології навігації працюючі за рахунок Bluetooth сигналу

#### 1.6.4. Технології навігації працюючі за рахунок Wi-Fi сигналу

Безпроводні мережі є одними з найпопулярніших технологій визначення місцезрештування, оскільки сучасна Wi-Fi-інфраструктура є доволі потужною та складною, а Wi-Fi-приймачі зазвичай є практично у всіх сучасних мобільних комп'ютерних пристроях. Математичний апарат, що використовується при обчисленні координат схожий на той, що працює в ультразвуковій орієнтації [17].

Розглянемо метод навігації на базі Wi-Fi-відбитків – значень, що ґрунтуються на обчисленнях потужності прийнятого сигналу (англ. received signal strength, RSS) залежно від місцезрештування його джерела. Цей метод завоював широку популярність, оскільки з його використанням можна визначити місце перебування користувача, не використовуючи інформацію про розташування точки доступу або моделі пристрою поширення сигналу. Локалізація пристрою за допомогою відбитків мережевих сигналів

складається з двох окремих фаз – навчання та локалізації. Під час фази навчання, також відомої як фаза калібрування, відбувається запис значення RSS із позначеннями позицій, що надалі використовуються для створення моделі відношення RSS до позиції. Оскільки отримані значення є змінними та містять шум, необхідно здійснювати якомога більше вимірювань у кожній локації залежно від потреб точності визначення місцезнаходження користувачького пристрою. Якість та точність отриманих даних під час фази навчання суттєво впливає на функціонування системи надалі. Під час фази локалізації система опрацьовує поточну RSS за допомогою моделей, створених під час фази навчання, що, своєю чергою, надає інформацію про місцезнаходження пристрою.

В підсумку основні переваги метода полягають в поширеності обладнання, а недоліки даного методу полягають в значній похибці визначення координат користувачького пристрою – до 25 метрів. При створенні спеціальної інфраструктури точність може бути збільшена до 3-5 метрів, але це вимагає суттєвих витрат. Це обумовлено рядом причин: різна чутливість Wi-Fi приймачів мобільних пристроїв, нестабільність стану радіоефіру, нерівномірність загасання Wi-Fi сигналу всередині будівлі.

Також недоліком є недостатня можливість адаптації до динаміки навколишнього середовища. З метою досягти необхідної точності при визначенні місцезнаходження користувачького пристрою відбитки Wi-Fi RSS з різних точок доступу необхідно вимірювати за допомогою відповідної кількості точок калібрування. Тому створення та обслуговування зазначеної навігаційної системи вимагає значних затрат часу та людських ресурсів під час фази офлайн-калібрування.

Ще однією суттєвою проблемою, яка потребує вирішення при обслуговуванні зазначеної навігаційної системи, є налаштування під вимоги щодо змін навколишнього середовища. Це зумовлено тим, що база даних відбитків Wi-Fi RSS будується та наповнюється офлайн, тому наявні в системі дані карти Wi-Fi-сигналів можуть не відповідати інформації,

отриманій на етапі функціонування системи. Фактори навколишнього середовища, такі як наявність людей, двері, що відкриваються та закриваються та навіть зміна вологості повітря помітно впливають на RSS безпроводних мереж, що призводить до серйозних похибок при визначенні місцерозташування користувачького пристрою.

#### 1.6.5. Технології ідентифікації радіочастот (RFID)

Ще однією порівняно новою технологією ідентифікації та відстеження переміщення об'єктів у закритих приміщеннях з точністю до декількох метрів є метод ідентифікації радіочастот. RFID (Radio Frequency Identification, RFID) – спосіб автоматичної ідентифікації об'єктів, за яким за допомогою радіосигналів зчитуються або записуються дані, що зберігаються в так званих транспондерах; у фаховій літературі їх ще називають RFID-мітками. Будь-яка RFID-система складається з пристрою, що зчитує (зчитувач, рідер) і транспондера (він же RFID-мітка, іноді застосовується термін RFID-тег). RFID-система інтегрує антену з електричною схемою, що і формує транспондери, які при отриманні даних з віддалених RFID-зчитувачів зворотно передають ідентифікаційний номер. Точність позиціонування при використанні зазначеної технології залежить від типу RFID-зчитувача, кількості та типу міток RFID та від того, чи вони є пасивними чи активними. Активні мітки є більш вартісними, оскільки додатково обладнані пристроями електроживлення. Безпроводна система RFID має такі переваги, як можливість ідентифікації на відстані, керування системою у форматі “вільні руки” та гнучкі вимоги до пам'яті та опрацювання даних [17]. Проте точність цієї технології позиціонування є меншою порівняно, наприклад, із технологіями Wi-Fi, та це підхід потребує покупки спеціальних RFID-міток.

### 1.6.6. Технології навігації працюючі за рахунок Bluetooth сигналу

Технології засновані на використанні Bluetooth сигналу взагалі схожі за алгоритмом роботи, але вони мають суттєву перевагу – енерговитрати Bluetooth модулів з 4го покоління в 1000 раз менші за Wi-Fi. Це відкриває великі можливості щодо використання дешевих та маленьких джерел випромінювання Bluetooth сигналу та сильно здешевшує та спрощує подібні рішення. Позичування пристроїв або об'єктів у просторі з використання Bluetooth маячків є одною з найперспективніших технологій на сьогодні. Маячки – спеціальна автономні пристрої, зазвичай працюючі з власного джерела живлення, як батарейка, випромінюють певні сигнали, котрі містять необхідні розрахункові дані з встановленою періодичністю.

### 1.7. Обґрунтування вибору технології для позиціонування мобільного об'єкту

Враховуючи визначенні вище переваги та недоліки переглянемо існуючі методи і засоби рішення поставленої задачі, та виділимо відповідні до роботи напрямки до табл. 1. та табл. 2.

Таблиця 2 - Загальний порівняльний аналіз технологій

Технології	Типова точність	Типове покриття (м)	Типові методи вимірювання	Типове застосування
WLAN WiFi Bluetooth	м	20-50	fingerprinting	Пішохідна навігація та інші сервіси працюючі на основі місцезнаходження користувача.

Продовження табл. 3

Радіонавігаційні	см-м	1-1000	proximity detection, fingerprinting, body reflection, time of arrival	Пішохідна навігація, робототехніка та інша автоматизація.
З використанням CCTV камер	0.1м м-дм	1-10	angle measurements from images	Метрологія, навігація роботів.
Інфрачервоні	см-м	1-5	thermal imaging, active beacons	Виявлення та відстеження людей.
Акустичні	см	2-10	distance from time of arrival	Лікарні та спостереження, паркувальні системи
Високочутливі GNSS	10м	глобальне	parallel correlation, assistant GPS	Послуги на основі місцезнаходження
Геомагнітні	мм-см	1-20	fingerprinting and ranging	Лікарні, шахти, пішохідна навігація
Tactile & Polar Systems	мкм-мм	3-2000	mechanical, interferometry	Автомобілебудування, метрологія.

З таблиць 3 та 4 видно, що всі існуючі технології мають свої переваги, та недоліки, але переважно до останнього часу більшість комерційних програм, доступних на ринку покладається на WLAN / WiFi або Bluetooth, які мають більшу площу покриття порівняно з іншими підходами. Також важливим є фактор зручності розгортання обладнання. Технології використовуючи WiFi та Bluetooth не вимагають жодних додаткових вкладень у апаратне забезпечення зі сторони кінцевого користувача та можуть просто

використовуватися на мобільних телефонах, тому розглянемо найбільш відповідні технології більш детально у таблиці 5.

Таблиця 3 - Порівняльний аналіз найбільш відповідних технологій позиціонування

Характеристика	Wi-Fi	Beacon	Промислові RTLS	Геомагнітне позиціонування
Вартість	Низька (залежить від наявності покриття)	Середня	Велика	Низька
Точність	Середня (залежить від покриття)	Добра	Дуже добра	Низька
Можливість використання на мобільних пристроях	Так	Так	Ні	Так
Технологія спрямована на визначення місцезнаходження	Ні	Ні	Так	Так
Можливість точно ідентифікувати конкретний об'єкт в просторі	Ні	Так	Так	Ні

Висновок: Внаслідок огляду обраних технологій позиціонування, основний вибір припав між технологіями заснованими на Wi-Fi та Bluetooth. Системи позиціонування в приміщенні на основі WiFi можуть бути дешевшим рішенням, однак, деякі характерні для WiFi риси – послаблення

сигналу через перешкоди та різноманітні точки доступу можуть мати серйозні наслідки для точності позиціонування. Системи ж засновані на роботі з Bluetooth сигналом надають більш простоти у процесі роботи та обробки даних та більше гнучкості в підтримці цього рішення [18].

Саме тому технології позиціонування засновані на маячках Beacon є доцільними для досягнення прийнятної вартості проекту та мінімізації погрішності позиціонування та цей підхід буде розглянуто у роботі далі, бо він добре підходить до використання у різних віртуальних просторах великих торгових центрів та його можна використати як основний так і як доповнення до системи локального позиціонування на основі WLAN / WiFi для поліпшення точності.

## 2 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ У РАМКАХ НАУКОВОЇ ЗАДАЧІ

### 2.1. Опис цільової технології Beacon

Пропонується використання підходу заснованого на Bluetooth-маячках Beacon. Він полягає в установці маячків з відомими координатами по периметру приміщення. Маячки виконують трансляцію, яка містить ідентифікуючу їх інформацію із заданою періодичністю. Додаток користувача циклічно отримує всі дані та визначає координати маячків по базі даних щодо приміщення та базуючись на силі сигналу визначає своє місцезнаходження. Також даний підхід дозволяє додавати Beacon на об'єкти, що вимагають окремої ідентифікації.

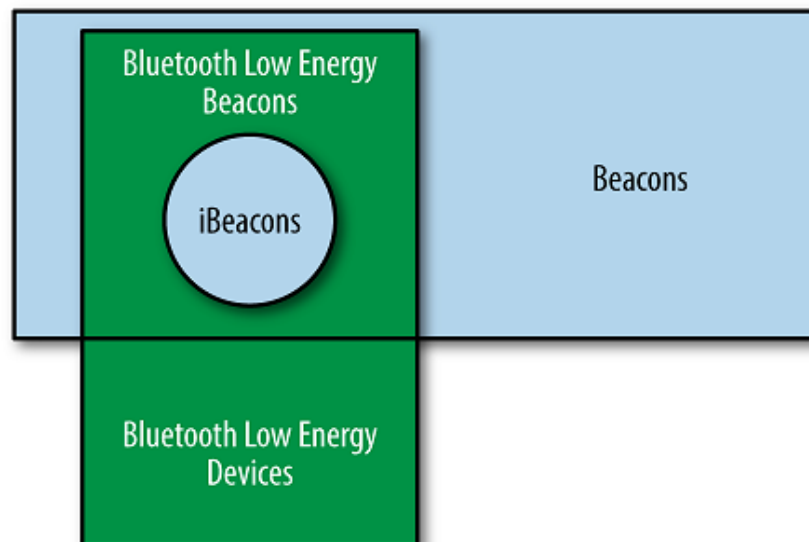


Рис. 16 - Приклад технології позиціонування від компанії Apple заснованої на використанні маячків - iBeacon

Маяки Beacon засновані на використанні Bluetooth 4.0 Low Energy (BLE). Тому будь-який пристрій, що має BLE чіп може виконувати роль маяка. Це може бути ноутбук, смартфон на базі iOS чи Android чи стаціонарний ПК з Bluetooth адаптером [19]. Але для роботи у режимі Beacon-маяка пристрій повинен мати встановленим спеціальний додаток, реалізуючий ці функції.



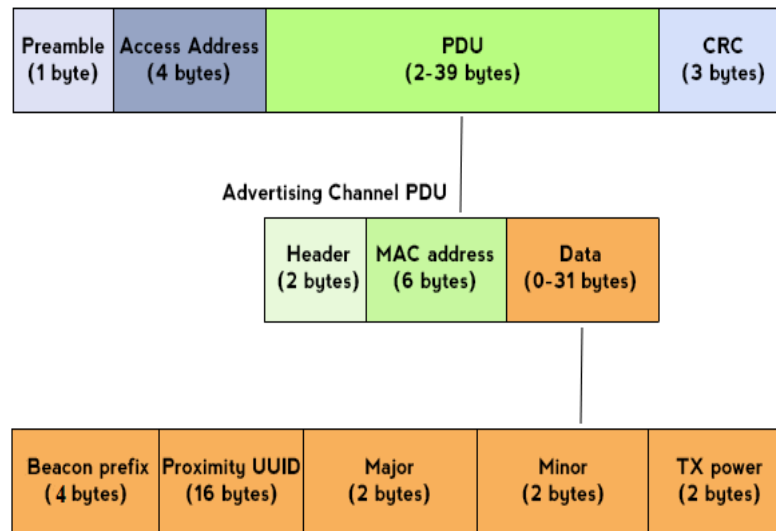


Рис. 18 - Структура Bluetooth пакету Beacon

Розглянемо структуру пакету детальніше.

Першою частиною пакету є преамбула. Преамбула займає 4 байти в пам'яті та є стандартною для Bluetooth-маячків. Вона використовується для ідентифікації пристрою саме як маяка. Преамбулу можна поділити на 4 частини, такі як ідентифікатор виробника займаючий 2 байти та тип з довжиною даних займаючих по 1 байту.

UUID (Ідентифікатор групи Beacon-маячків) – груповий ідентифікатор, присвоюється набору маячків працюючим у певному приміщенні чи зоні. Займає 16 байт в пам'яті.

Major (Ідентифікатор набору всередині однієї групи) – ідентифікатор, що дає можливість виділити маячок з UUID групи. Дозволяє організувати підгрупи серед маячків зі спільним груповим ідентифікатором. Займає в пам'яті 2 байти. Може бути використаний для позначення поверхів або будівель.

Minor (Номер маячка всередині Major) – аналогічно Major дає можливість виділити маячок з Major групи та створювати підгрупи. Займає в пам'яті 2 байти. Часто використовується як кінцевий ідентифікатор маячку для порівняння з координатами з бази даних.

TX Power (Еталонне значення потужності маячка, що представляє собою силу сигналу на відстані в 1 метр від маячка, вимірюється на виробництві). Значення знаходиться тільки один раз і є константним, займає в пам'яті 2 байти, пре знаковому першому біті.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – індикатор потужності одержуваного сигналу тісно зв'язан з поняттям еталонної потужності маячка. Вимірюється у децибеллміліватах та служить для відображення сили затухання сигналу на шляху від випромінювача до приймача. Розраховується за формулою:

$$RSSI = -(10n \log_{10} d - Tx) \quad (12)$$

де  $n$  – константа затухання сигналу,  $Tx$  – еталонне значення потужності,  $d$  – відстань до маячка,  $RSSI$  – потужність одержаного сигналу в дБ.

Для визначення дистанції до певного маячка використаємо параметр TX. Наприклад на рисунку 17 TX рівен 0xBE, що у десятковій системі буде дорівнюватися 190. Розрахуємо потужність сигналу на 1 м відстані від маячка за допомогою формули:

$$P = 256 - TX \quad (13)$$

де  $P$  – величина потужності на 1 м відстані.

### 2.3. Опис методів визначення місцезнаходження з використання Beacon-маячків

Перейдемо до опису методів визначення місцезнаходження з використання Beacon-маячків. Для знаходження місцерозташування об'єкту з приймачем в просторі програмна частина повинна обробити отримані з бази дані про розположення маячків надіславших сигнал, проаналізувати їх ідентифікаційну інформацію і знайти дистанцію до кожного з маячків

Дистанція визначається за допомогою еталонного значення TX Power та параметру RSSI, що автоматично розраховується на основі сили сигналу

Bluetooth приймачем на основі формули 12. Значення параметра відповідно зростає при наближенні до маячка, та відображається в метрах.

Приклад програмної реалізації наведений у додатку А.

В приміщенні маячки потрібно розміщувати максимально рівномірно, покриваючи всю площу. Наступним кроком потрібно знайти місцезнаходження маячків та нанести на координатну сітку на карті приміщення. Початкова координата може бути будь-якою, наприклад кут кімнати чи положення певного маячка. Далі відображено приклад встановлення набору маячків у приміщенні.

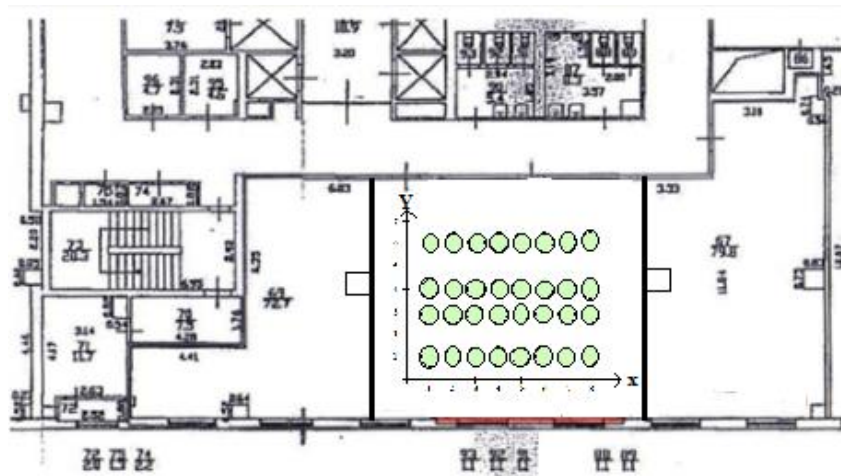


Рис. 19 - Приклад встановлення набору маячків у приміщенні

Одною з основних проблем точного визначення місцезнаходження є змінення значення RSSI в умовах прямої видимості маячка, що призводить до необхідності застосування математичного апарату для мінімізації похибки. Ця проблема може виникати з наступних причин:

1. Наявність екрануючих радіохвилі об'єктів на шляху між маяком та приймачем.
2. Присутність біля приймача або маячка відзеркалюючих радіосигнал поверхонь та виникнення реверберації. Ця проблема присутня у більшості методів навігації користуючихся радіохвилями.
3. Величезна кількість Beacon маячків в одному місці, що призведе до інтерференції з основним променем.

Далі першим кроком буде усереднення значень одержаних приймачем. Проте точність ще не досягає прийнятних значень. Тому далі розглянемо повний алгоритм визначення місцезнаходження з використанням значень RSSI та методу триангуляції.

2.3.1. Опис методу визначення місцезнаходження з використанням значень RSSI та методу триангуляції

Усереднимо значення RSSI з кожного з маячків, налаштував їх на видачу даних з максимальною частотою, бо підвищення частоти збільшує кількість вхідних даних для усереднення, тим самим зростає точність в обмін на час роботи батареї. Після чого будемо накопичувати дані в буфері і з певною періодичністю рахувати середній показник RSSI. Наступним йде очищення буферу та повторне накопичення даних. Далі, при наявності, досить вибрати три маяка з кращими середніми показниками RSSI і визначити за координатами цих маячків положення в просторі за допомогою трилатерації. Кращими вважаються маячки з меншим показником затухання сигналу.

Так як розрахунки виконуються у двовимірному просторі, а відстань до маячків - в тривимірному, відповідно, якщо різниця по осі Z між спостерігачем і маячками відчутна, необхідно будувати проєкції на осі X, Y:

$$C = \sqrt{A^2 - B^2} \quad (14)$$

де A - це отримана відстань за допомогою RSSI, B - висота розташування маячка від двовимірної площини, C - відстань до маячка в даній площині, яке і потрібно знайти.

Оскільки утворений трикутник - прямокутний, то в такому випадку, відповідно до теореми Піфагора знайдемо шукану відстань, і застосуємо його в своїх розрахунках. Але обчислення такого роду обмежені і надають точність до трьох метрів.

Як приклад, при виборі кращого по показнику RSSI маячка раз на секунду при 10 вимірах маємо отримати наступні результати:

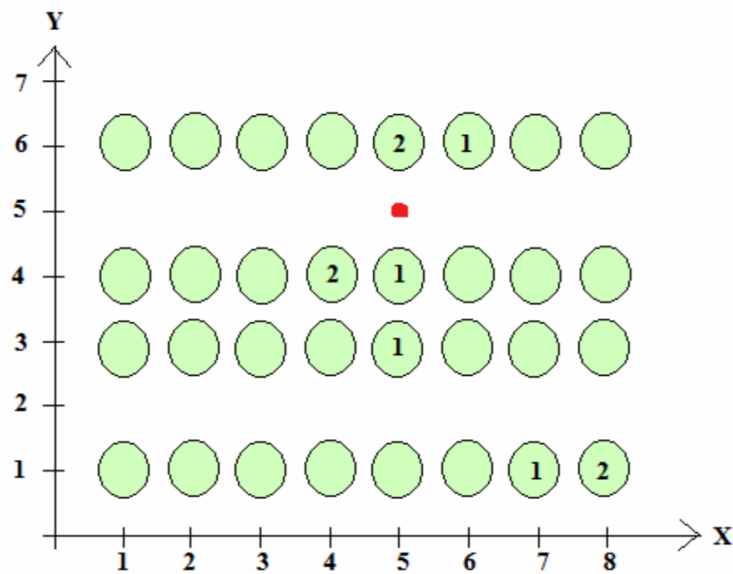


Рис. 20 - Приклад координатної системи з розташувань об'єкта

На рисунку 20 поділка сітки ставить 4 метри. Цифри у позначеннях свідчать про кількість кращих показників RSSI для маячку. Місцезнаходження користувача позначено червоною точкою. С цього можна зробити висновок у потребі наступної обробки результатів та прийнятності використання певного методу фільтрації. Треба пам'ятати, що на вимірювальний пристрій впливає багато сторонніх чинників, що призводить до зашумленої інформації та як наслідок, похибки. Саме тому виникає необхідність використання методів фільтрації, прибираючих зайву інформацію та шуми. Таким фільтром може бути фільтр Калмана, бо він дає можливість користуватися поточними передбачених результатами за рахунок минулих вимірів.

### 2.3.2. Опис методу визначення місцезнаходження з використанням фільтра Калмана

Достатньо новим та сучасним алгоритмом фільтрації є фільтр Калмана – рекурсивний фільтр, що користується популярністю в багатьох наукових та технічних галузях. В даній роботі було обрано саме фільтр Калмана через

високу ефективність, що підтверджується практичним застосуванням методу в різних системах управління, датчиках, GPS приймачах і т.д.

Фільтр Калмана має функції задання апріорних даних про зв'язок фізичних змінних та характер системи та користуючись цією інформацією знаходити точнішу оцінку [20]. Треба зауважити, що фільтр може сильно підвищити точність навіть у простих випадках.

Наприклад візьмемо гіпотетичний датчик, головним недоліком якого є вплив певних факторів, таких як інтерференція, на вимірювану координату. При необхідності контролювання будь-якої одної величини недоліки датчика сильно впливають на результати та дані з нього починають пилкоподібну форму сигналу з значною амплітудою розхилу.

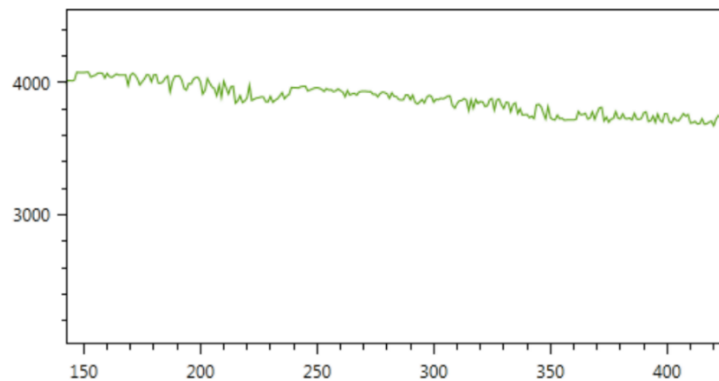


Рис. 21 - Показники абстрактних датчиків

Застосуємо фільтр Калмана. На початковій стадії - прогнозі розраховується стан системи в наступний період часу, а на другому - коригування, виправляється прогноз, застосовуючи результат чергового вимірювання:



Рис. 22 - Процес фільтрації системи

При початкових значеннях  $x_{k-1}$   $P_k^-$ , спершу розраховується прогноз стану системи

$$c_k = F c_{k-1} + B u_{k-1} \quad (15)$$

де  $c_k$  - це передбачення стану системи, в даний період часу,  $F$  - матриця переходу між станами (динамічна модель системи),  $c_{k-1}$  - стан системи в минулий період часу,  $B$  - матриця застосування керуючого впливу,  $u_{k-1}$  - керуючі вплив в минулий період часу.

Розрахунок передбачення помилки обчислюється:

$$P_k = F P_{k-1} F^T + Q \quad (16)$$

де  $P_k$ - пророкування помилки,  $P_{k-1}$ - помилка в минулий період часу,  $Q$  - коваріація шуму процесу.

На стадії коригування спочатку обчислюють посилення Калмана:

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} \quad (17)$$

де  $P_k$  - посилення Калмана,  $H$  - матриця вимірювань, що відображає ставлення вимірювань і станів,  $R$  - коваріація шуму вимірювання.

Після чого проводиться оновлення оцінки з урахуванням виміру в поточний момент часу як:

$$c^k = c_k + K_k (a_k - H c_k) \quad (18)$$

Далі визначається оновлення помилки коваріації:

$$P_k = (L - K_k H) P_k \quad (19)$$

де  $L$  - матриця ідентичності.

Програмна реалізація спрощеного методу надана у додатку А.

На рисунку 23 представлені результати фільтрації показників абстрактних датчиків з використанням фільтра Калмана.

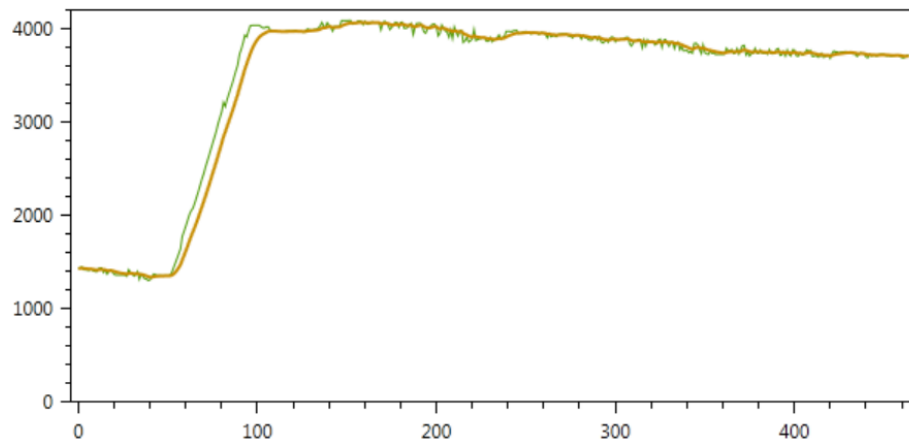


Рис. 23 - Показники абстрактних датчиків з використанням фільтра Калмана.

Висновок: Внаслідок огляду принципів визначення місцезнаходження об'єктів з використанням маячків Beacon та математичного апарату можна назвати фільтр Калмана відповідним вибором для розглядаємих рішень, бо фільтр дозволяє найбільш ефективно підвищити точність до прийнятного рівня в умовах спотворення та зашумлення інформаційних сигналів через різні перешкоди.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

#### 3.1. Двовимірне тестування

Програма буде розроблена в середовищі Xcode 11.2 за допомогою мови програмування Swift.

Для розрахунку відстані до кожного маячка висловимо з формули 12 відстань до маяка:

$$d = 10^{\frac{RSSI - Tx}{-10n}} \quad (20)$$

Реалізуємо програмну частину ґрунтуючись на вищепереліченій формулі. Зауважимо, що на основі наукових досліджень згукання сигналу значення  $n$  було встановлено дорівнюючим 4. Приклад реалізації зображено на рисунку 24.

```

// метод розрахунку відстані до маячка
static func getDistance(rssi: Double, tx: Double) -> Double {
    //У випадку, якщо значення прийнятої потужності = 0, повертаємо -1 (помилка)
    guard !rssi.isZero else { return -1 }
    //розрахунок ступеня для 10 за формулою 20
    let degree = (rssi - tx) / (-10 * 4)

    return pow(10, degree)
}

```

Рис. 24 - Функція визначення відстані

Наведемо приклад моделювання, де існує 3 маячка з кращими значеннями RSSI та Tx у таблиці 6.

Таблиця 4 - Координати та потужність сигналу гіпотетичних датчиків на відстані в 1м.

Маячок	Координати (x, y)	RSSI
1	0,0	-66 dB
2	0,a	-59 dB
3	b,c	-62 dB

При розгляді методу визначення координат були використані формули, виходячі з геометричних побудов (рисунок 25) та метод трилатерації.

Уявимо, що радіусом гіпотетичної сфери є дистанція до маячка та вона дорівнює:

$$r_1^2 = x^2 + y^2 \quad (21)$$

де  $x, y$  – розміщення об'єкта у просторі (координати).  $r_1$ - дистанція між приймачем та першим маячком. Положення першого маячка встановлено як початок координатної сітки.

Проведемо подібні обчислення для решти маячків (формули 22 - 23).

$$r_2^2 = (x - a)^2 + y^2 \quad (22)$$

де  $a$  – різниця координат між першим та розглядаємим маячком,  $r_2$  – дистанція до другого маячка.

$$r_3^2 = (x - c)^2 + (y - b)^2 \quad (23)$$

де  $a$  – різниця координат між першим та розглядаємим маячком,  $r_3$  – дистанція до третього маячка.

При об'єднанні рівнянь 21-23 отримуємо можливість знаходження координати в двох вимірах або місцезрештування об'єкта по осях  $x$  та  $y$ . Проте для зменшення перешкод гіпотетичні маячки знаходяться на одному рівні, а координати пристрою не обов'язково знаходяться в цій площині.

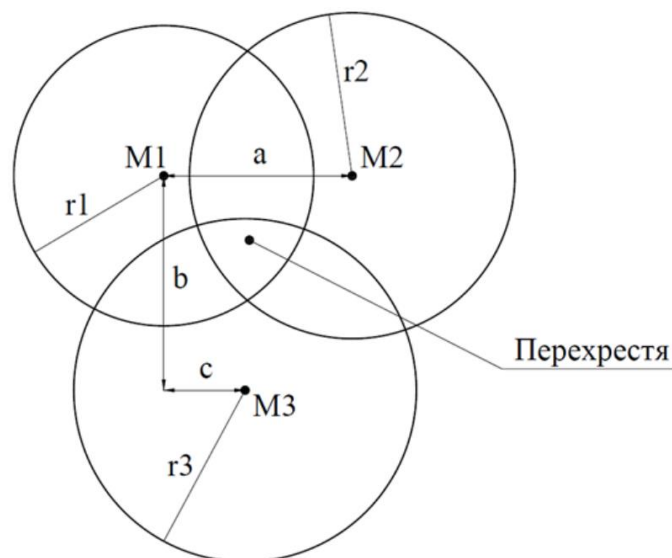


Рис. 25 - Геометричні побудови за алгоритмом трилатерації.

На рисунку 25 поточне місцезнаходження відображено як перехрестя, а додатне значення координати у прямує вниз.

### 3.2. Тривимірне тестування

Для позиціонування в трьох вимірах потрібно врахувати координати висоти  $z$ , тому додамо змін до формул 21 – 23:

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + a^2}{2a} \quad (24)$$

де  $a$  - різниця розташувань по осі  $x$  між першим та розглядаємим маячком,  $r_{1,2}$  - дистанція від місцезнаходження до першого з розглядаємим маячком.

$$y = \frac{r_1^2 - r_2^2 + b^2 + c^2}{2b} - \frac{c}{b}x \quad (25)$$

де  $x$  – знайдена координата пристрою,  $b$  - різниця розташувань по осі  $y$  між першим та розглядаємим маячком,  $c$  - де  $b$  - різниця розташувань по осі  $x$  між першим та розглядаємим маячком,  $r_{1,3}$  – дистанції до першого з третім маячком.

Разом з використанням скорегованих рівнянь 24 – 25 формули радіусов сфер навколо маячків зміняться:

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (26)$$

де  $x, y, z$  – шукані координати по всіх осях,  $r_1$  – дистанція до першого маячка.

$$r_2^2 = (x - a)^2 + y^2 + z^2 \quad (27)$$

де  $a$  – різниця координат між першим та розглядаємим маячком,  $r_2$  – дистанція до другого маячка.

$$r_3^2 = (x - c)^2 + (y - b)^2 + z^2 \quad (28)$$

де  $a$  – різниця координат між першим та розглядаємим маячком,  $r_3$  – дистанція до третього маячка.

Таким чином рівняння для визначення координат об'єкта по вісі z має вигляд:

$$z = \pm\sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (29)$$

Перейдемо до моделювання користуючись отриманими формулами. Модифікована функція “forBeacon” для розрахунку відстані до маячка отримає випадкові та зашумовані значення RSSI. Проведемо усереднення кожні десять вимірювань.

Важливо відмітити використання функції “getDistance” для обчислень відстаней та запису одержаного результату до змінної “distance”, а також штучного зашумлення випадковими значеннями величини RSSI надісланої на вхід.

```

//Моделювання 10-ти вимірювань для i-го маячка
static func forBeacon(x: Int, rssiGiven: Double) -> Double {
    let realTxPower = rssiGiven
    var sum1 = 0.0

    print("|Параметр Tx_power \ \(x)-го маячка = \ \(realTxPower) дБ|\n")

    for i in 0..<10 {
        //Гіпотетична відстань до 1-го маячка
        let realRSSI = -66 - Double.random(in: 0...35) // Зашумлення показника RSSI
        //Розрахунок за формулою з розр. частини відстані до маячка
        let distance = getDistance(rssi: realRSSI, tx: realTxPower)

        print("При затуханні в \ \(realRSSI.rounded()) дБ")
        print("Відстань до \ \(x)-го маячка становить = \ \(distance.rounded()) (м) на \ \(i+1)-й ітерації")

        Thread.sleep(forTimeInterval: 1)
        sum1 += distance
    }
    //Визначення середнього значення відстані
    let midDistance = sum1 / 10
    print("\n Середнє значення відстані становитиме: \ \(midDistance.rounded()) м\n")

    return midDistance
}

```

Рис. 26 - Розрахунок та усереднення результатів вимірів дистанції

Результатом є отримання програмною частиною інформації з гіпотетичних маячків, розрахунок місцезнаходження об'єкта та опису кожної з десяти ітерацій розрахунку дистанцій. Після виконується осереднення значень та розрахунок координат з використанням формул 24 – 26.

```

static func main() {
    //Встановлення значень a,b, c які відповідають двох інших маячків до 1-го
    let a = 3.0, b = 5.0, c = 1.5

    //Вимірювання відстані до кожного з маяків
    let r1 = forBeacon(x: 1, rssiGiven: -66)
    let r2 = forBeacon(x: 2, rssiGiven: -59)
    let r3 = forBeacon(x: 3, rssiGiven: -62)

    //Визначення координати X приймача
    let x = (pow(r1, 2) - pow(r2, 2) + pow(a, 2)) / (2 * a)
    //Визначення координати Y
    let y = ((pow(r1, 2) - pow(r3, 2) + pow(b, 2) + pow(c, 2)) / (2 * b)) - (c * x) / b
    //Визначення координати Z
    let z = sqrt(pow(r1, 2) - pow(x, 2) - pow(y, 2))

    print("""
        Шуканий об'єкт знаходиться по координатам:
        \x.rounded() по осі X
        \y.rounded() по осі Y
        +-\(z.rounded()) по осі Z
        """)
}

```

Рис. 27 - Фінальна реалізація обчислення координат

На рисунках 28 - 29 представлено виведення результату обробки даних програмою на консоль.

```

!Параметр Tx_power 1-го маячка = -66.0 дБ!

При затуханні в -98.80 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 6.61 (м) на 1-й ітерації
При затуханні в -88.05 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 3.56 (м) на 2-й ітерації
При затуханні в -81.15 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 2.39 (м) на 3-й ітерації
При затуханні в -80.13 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 2.26 (м) на 4-й ітерації
При затуханні в -70.72 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 1.31 (м) на 5-й ітерації
При затуханні в -72.45 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 1.45 (м) на 6-й ітерації
При затуханні в -76.47 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 1.83 (м) на 7-й ітерації
При затуханні в -87.62 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 3.47 (м) на 8-й ітерації
При затуханні в -76.57 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 1.84 (м) на 9-й ітерації
При затуханні в -72.23 дБ
Відстань до 1-го маячка становить = 1.43 (м) на 10-й ітерації

Середнє значення відстані становитиме: 2.61 м

!Параметр Tx_power 2-го маячка = -59.0 дБ!

При затуханні в -73.23 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 2.27 (м) на 1-й ітерації
При затуханні в -67.16 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 1.60 (м) на 2-й ітерації
При затуханні в -68.53 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 1.73 (м) на 3-й ітерації
При затуханні в -95.00 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 7.94 (м) на 4-й ітерації
При затуханні в -76.49 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 2.74 (м) на 5-й ітерації
При затуханні в -86.85 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 4.97 (м) на 6-й ітерації
При затуханні в -72.59 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 2.19 (м) на 7-й ітерації
При затуханні в -71.07 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 2.00 (м) на 8-й ітерації
При затуханні в -87.53 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 5.17 (м) на 9-й ітерації
При затуханні в -87.14 дБ
Відстань до 2-го маячка становить = 5.05 (м) на 10-й ітерації

Середнє значення відстані становитиме: 3.57 м

```

Рис. 28 - Виведення даних на консоль

```

;Параметр Tx_power 3-го маячка = -62.0 дБ;

При затуханні в -89.07 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 4.75 (м) на 1-й ітерації
При затуханні в -79.50 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 2.74 (м) на 2-й ітерації
При затуханні в -71.83 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 1.76 (м) на 3-й ітерації
При затуханні в -88.68 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 4.65 (м) на 4-й ітерації
При затуханні в -69.97 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 1.58 (м) на 5-й ітерації
При затуханні в -95.44 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 6.85 (м) на 6-й ітерації
При затуханні в -75.72 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 2.20 (м) на 7-й ітерації
При затуханні в -91.96 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 5.61 (м) на 8-й ітерації
При затуханні в -81.87 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 3.14 (м) на 9-й ітерації
При затуханні в -94.11 дБ
Відстань до 3-го маячка становить = 6.35 (м) на 10-й ітерації

Середнє значення відстані становитиме: 3.96 м

Шуканий об'єкт знаходиться по координатам:
0.52 по осі X
1.68 по осі Y
+-1.93 по осі Z

```

Рис. 29 - Виведення даних на консоль (продовження)

Метод трилатерації вертає кілька точок перетину, що перетинають дві чи більше сфери. Саме тому виконується рівність 30.

$$a - r_1 < r_2 < a + r_1 \quad (30)$$

При невиконанні умови трилатерації система може пропускати значення RSSI від маячка, тому цей датчик буде відфільтровано при формуванні даних по дистанції.

### 3.3. Тестування з використанням фільтра

Змодельємо роботу фільтра Калмана та порівняємо з роботою медіанного та усереднюючого фільтра на рисунку. Приклад програмної реалізації фільтра наведено у додатку А.

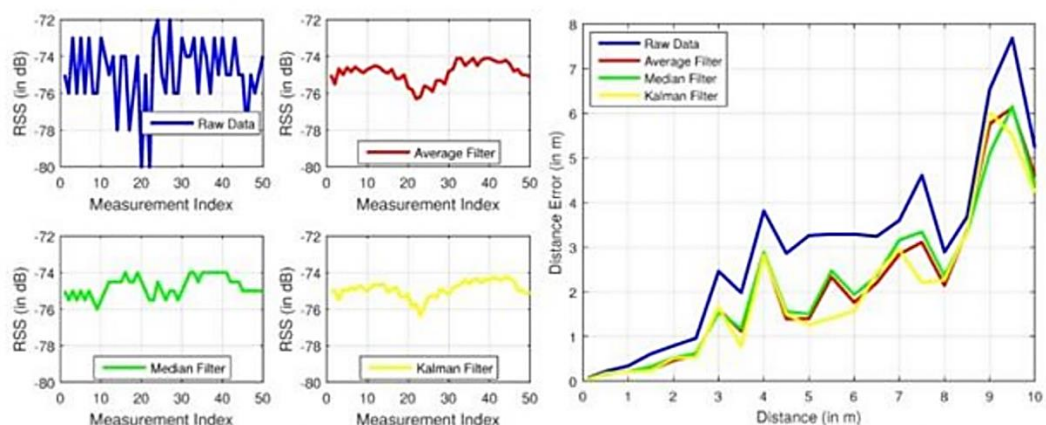


Рис. 30 - Приклади дії різних фільтрів

Рисунок 30 демонструє невідфільтровані дані позначені синім кольором, дані оброблені усереднюючим фільтром – червоним, дані оброблені медіанним фільтром позначені зеленим та жовтим позначені дані оброблені фільтром Калмана. З рисунку 30 можна зробити висновок, що фільтр Калмана краще фільтрує одержанні значення та мінімізує похибку.

На рисунку 31 була виконана обробка координат місцезнаходження по осях  $x$  та  $y$ , де гіпотетичне місцезнаходження позначено червоною точкою. Фільтрація була виконана за зашумленими величинами дистанції до маячків та після обчислення  $n$ -ної кількості координат. На кроці фільтрації була відкинута частина зашумлених величин.

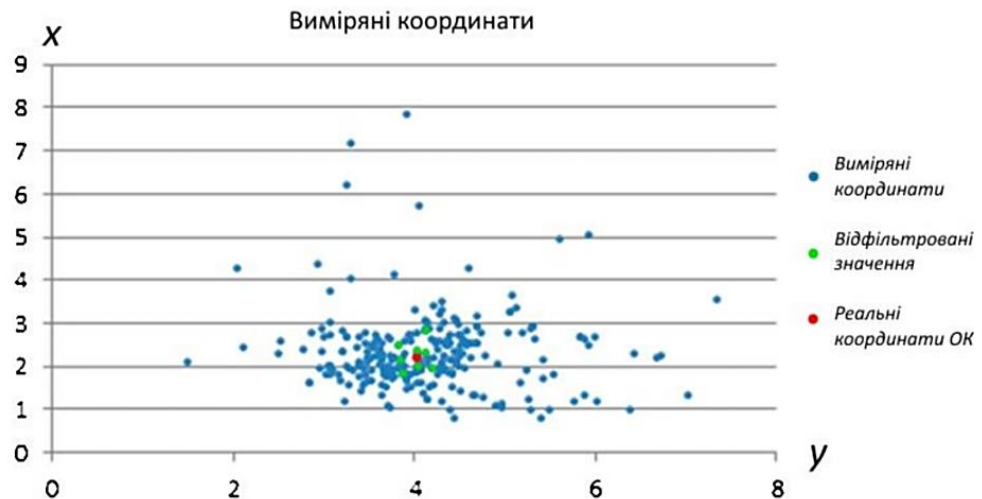


Рис. 31 - Фільтрація визначених координат

Висновок: В цьому розділі було протестовано дію системи в різноманітних умовах, наведено методи та результати вимірювань дистанцій до Beacon маячків та знаходження місцезнаходження користуючись визначеними показниками. Фільтр Калмана мінімізував похибку між вимірними і реальними величинами та зарекомендував себе як найбільш ефективне рішення. Підсумовуючи, корисність та ефективність використаної технології позиціонування було підтверджено, тому технологія відповідає існуючим технічним вимогам та може бути використана для позиціонування мобільного об'єкту в віртуальних просторах великих публічних центрів.

## 4 ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1. Приклад загальної архітектури додатку

Загальна архітектура системи надана на рисунку 32.

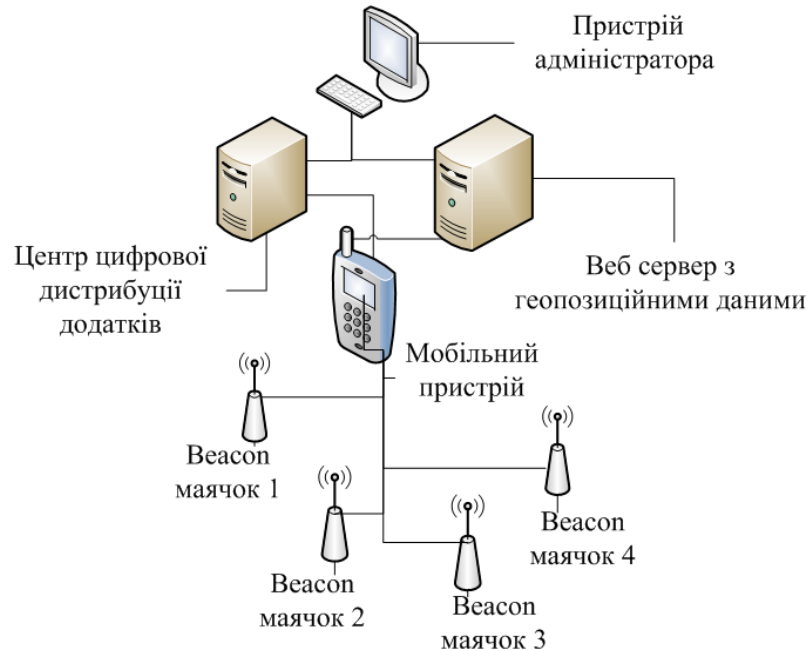


Рис. 32 - Схема архітектури системи

Оскільки питання побудови веб серверу не входить в завдання дослідження, тому у додатку буде реалізована можливість додавання сторонніх сервісів, зокрема в даній роботі буде використаний сервіс під назвою `indoo.rs`, що надає можливості для побудови маршрутів, збереження наборів маячків, їх координат та схем приміщень. Тому приклад діаграми розгортання системи наведено на рисунку 33.

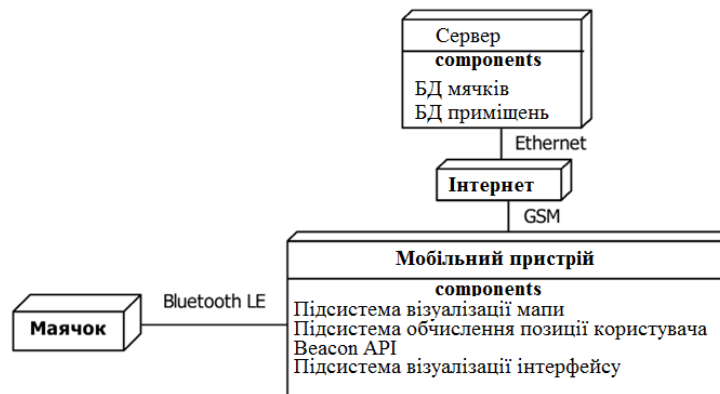


Рис. 33 - Схема архітектури системи

Далі перейдемо безпосередньо до структури мобільного додатку. Додаток складається з модуля роботи з мапою та модуля обробки даних місцезнаходження. Останній обробляє дані з зовнішніх Beacon маячків та містить алгоритми та методи пошуку місцезнаходження. Сам додаток взаємодіє з операційною системою за допомогою наданих виробником програмних інтерфейсів. Приклад структури мобільного додатку наведено на рисунку 34 та приклад програмної реалізації додатку на рисунку 35.

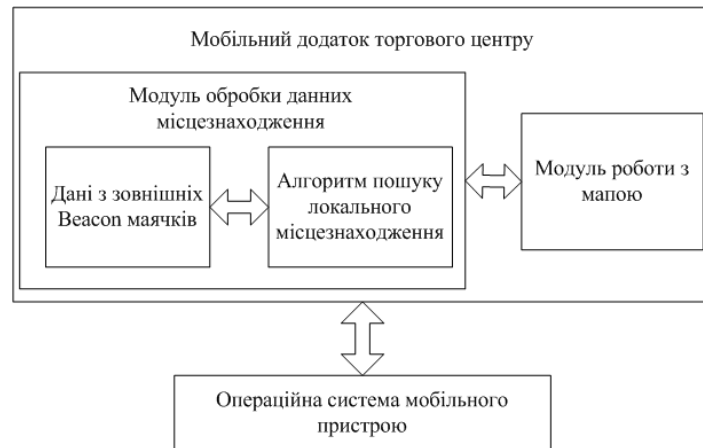


Рис. 34 - Схема структури мобільного додатку

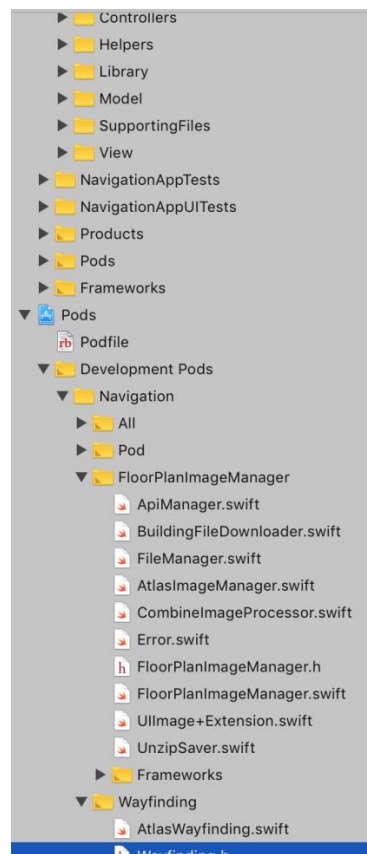


Рис. 35 - Приклад структури програмної реалізації мобільного додатку

## 4.2. Приклади документів, що створюються в системі

Мобільний додаток працює з двома основними типами файлів, файл опису приміщення наданий на рисунку 36 та файл з вхідними даними для побудови маршруту наданий на рисунку 37.

▼ Root	Array	(2 items)
▼ Item 0	Dictionary	(6 items)
wayfinding	String	{"nodes":[{"latitude":49.973716146460454,"longitude":36.2577447295189,"floor":3},{"latitude":49.97376617239459
uniqueMapId	String	Atlas_Demo
apiKey	String	2222222-1111-49e8-afbd-66ec4a5bf509
apiSecret	String	dfgjdfkjgjdjfgoedog-ohuOdG3Gs6uL8w6QNZY87Q/tovMOs3KD/3q8a56Mov7Bk558cnxuZB5KkamY1dEIKf/prO9atl4eKTI
floorId	String	11123-8f61-479b-bd9e-ba47aaed29e1
name	String	Atlas Demo
▼ Item 1	Dictionary	(6 items)
wayfinding	String	{"nodes":[{"latitude":49.973716146460454,"longitude":36.2577447295189,"floor":3},{"latitude":49.97376617239459
uniqueMapId	String	DemoVenue_338c0a46
apiKey	String	338c0a46-e9de-49e8-afbd-66ec4a5bf509
apiSecret	String	bifgfo4539453030f3r4Gs6uL8w6QNZY87Q/tovMOs3KD/3q8a56Mov7Bk558cnxuZB5KkamY1dEIKf/prO9atl4eKTIInrhZ6c
floorId	String	45lpfgerger-8f61-479b-bd9e-ba47aaed29e1
name	String	Atlas 3D Demo

Рис. 36 - Plist-документ, що описує кожне доступне приміщення

```
{
  "latitude": 49.97388433689461, "longitude": 36.257614642381675, "floor": 3},
  {"latitude": 49.97388347438106, "longitude": 36.257587820291526, "floor": 3},
  {"latitude": 49.97390158716233, "longitude": 36.257567703723915, "floor": 3},
  {"latitude": 49.97392314998825, "longitude": 36.25753685832024, "floor": 3},
  {"latitude": 49.97395161290367, "longitude": 36.257504671812065, "floor": 3},
  {"latitude": 49.97396282556272, "longitude": 36.257530152797706, "floor": 3},
  {"latitude": 49.973978350778594, "longitude": 36.25755831599236, "floor": 3}], "edges":
  [{"begin": 0, "end": 1}, {"begin": 1, "end": 2}, {"begin": 1, "end": 12}, {"begin": 1, "end": 13},
  {"begin": 2, "end": 3}, {"begin": 2, "end": 8}, {"begin": 2, "end": 13}, {"begin": 3, "end": 4},
  {"begin": 4, "end": 5}, {"begin": 5, "end": 36}, {"begin": 6, "end": 7}, {"begin": 7, "end": 8},
  {"begin": 7, "end": 12}, {"begin": 8, "end": 9}, {"begin": 9, "end": 10}, {"begin": 10, "end": 11},
  {"begin": 10, "end": 13}, {"begin": 10, "end": 14}, {"begin": 10, "end": 17}, {"begin": 11, "end": 19},
  {"begin": 11, "end": 20}, {"begin": 14, "end": 15}, {"begin": 15, "end": 16}, {"begin": 16, "end": 17},
  {"begin": 17, "end": 18}, {"begin": 18, "end": 19}, {"begin": 21, "end": 22}, {"begin": 22, "end": 23}]
```

Рис. 37 - JSON-документ, що описує створений маршрут

## 4.3. Опис програми

В ході роботи було створено мобільний додаток до платформи iOS 10.0+.

Основні типи сервісів мобільного додатку:

1. Надання користувачеві інформації про поточне місцезнаходження
2. Надання користувачеві інформації щодо оточуючих об'єктів інфраструктури
3. Надання користувачеві інформації про те, як дістатися до потрібного місця

Приклад зовнішнього вигляду мобільного додатку надано на рисунках 38 - 40.

Vodafone UA 00:05 58%

## Navigation App

Q Search

Atlas 3 Demo

Atlas Demo

Add own

Рис. 38 - Приклад зовнішнього вигляду головного вікна мобільного додатку

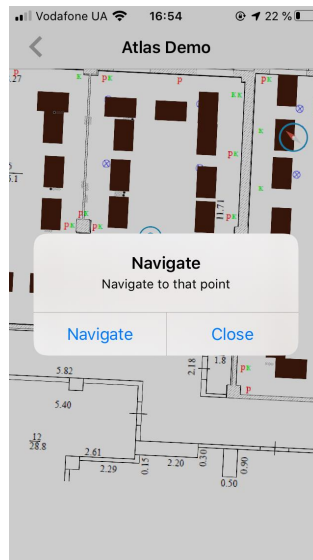


Рис. 39 - Приклад вибору точки для побудови маршруту

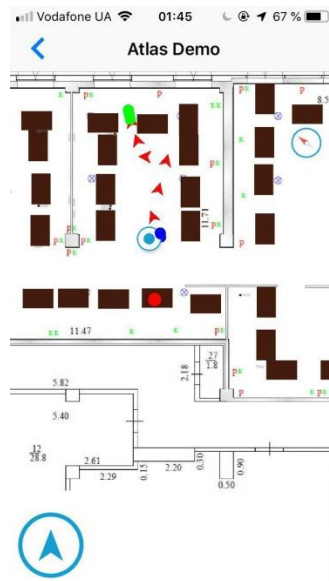


Рис. 40 - Приклад побудованого маршруту

## ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської атестаційної роботи було взято участь у аналізі існуючих методів та технологій позиціонування, моделюванні, розробці, проектуванні та тестуванні нового програмного забезпечення.

Результатами виконання поставлених задач був проведений аналіз предметної області, визначена актуальність проблеми, проведено аналіз існуючих методів і засобів рішення задачі, визначені цілі та задачі дослідження, описано загальний алгоритм і технології реалізації розроблених методів і моделей, продемонстрований опис програми, та створено прототип системи локального позиціонування мобільного об'єкта, що має працювати у додатку до мобільного телефону.

З існуючих технологій були обрані технології, що використовують радіохвилі для позиціонування, а саме технологію засновану на Beacon маячках. У процесі розробки було проаналізовано метод розрахунку дистанції заснований на потужності сигналу маячків та формула для знаходження розташування з використанням трилатерації.

З метою підтвердження точності та працездатності технології були промодельовані виміри координат та за результатами був розроблен реальний прототип.

В ході виконання роботи був перевірен вплив різних фільтрів на результати дії математичної частини. Фільтр Калмана було обрано серед набору фільтрів, як фільтр з кращими показниками виправлення точності результатів.

До автоматизації була вибрана система «Позиціонування мобільного об'єкта для різних віртуальних просторів великих торгових центрів».

Результати роботи покращать умови взаємодії користувача з великими торговими центрами завдяки інформації про місцезнаходження користувача у спеціальному додатку в його телефоні

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Методичні вказівки до передатестаційної практики для студентів денної та заочної форм навчання напряму 6.050101 - «Комп'ютерні науки» / Упоряд.: Левикін В.М., Алексеев Д.І. – Харків: ХНУРЕ, 2016
2. Организационная структура торгового центра : бэк-офис // Retail Online [Електронний ресурс]. – Режим доступа : [http:// retail-online.ru/ articles/org/](http://retail-online.ru/articles/org/) – Дата доступа : 03.10.2017.
3. Климов В.А. Экономическая эффективность IT-проектов. - LAP Lambert Academic Publishing, 2011.- 268
4. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. – Чинний від 22.06.2015. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 26 с.
5. Закон України «Про вищу освіту» від 01.07.2014 № 1556-VI.
6. Тимчасове положення про організацію освітнього процесу в Харківському національному університеті радіоелектроніки бакалаврів, спеціалістів та магістрів. Наказ ХНУРЕ від «02» грудня 2015 року № 346
7. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічні посилання. Загальні положення та правила складання. – Чинний від 04.03.2016. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 20 с.
8. Bahl, P. Radar: An in-building RF-based user location and tracking system / P. Bahl, V. Padmanabhan // IEEE INFOCOM. - Tel-Aviv, Israel. - Mar. 2000. - P.
9. Овчинников С. Технологии локального позиционирования / Сергей Овчинников. // Технологии и средства связи. – 2014. – №3. – С. 26–30.
10. Camera Calibration with One-Dimensional Objects/ Zhengyou Zhang – 2004, 10с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.175.1033&rep=rep1&type=pdf>
11. Seco, F., Jiménez, A. R., Prieto, C., Roa J., Koutsou, K. (2009): «A Survey of Mathematical Methods for Indoor Localization», 6th IEEE International

Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP 2009), Budapest, Hungary, pp. 9-14.

12. Josef Hallberg, Marcus Nilsson, and Kare Synnes, “Positioning with Bluetooth,” in Proceedings of the 10th International Conference on Telecommunications, 23 Feb–1 March 2003, pp. 954 – 958.

13. Kevin Curran, Eoghan Furey, Tom Lunney, Jose Santos, Derek Woods & Aiden Mc Caughey. 2011. An Evaluation of Indoor Location Determination Technologies. Journal of Location Based Services Vol. 5, No. 2, 61-78.

14. An indoor navigation system for visually impaired and elderly people based on Radio Frequency Identification (RFID) / Charalampos Tsirmpas, Alexander Rompas, Orsalia Fokou, Dimitris Koutsouris // Information Sciences. – 2015. – Vol. 320. – P. 286–305.

15. Rajakaruna N. Efficient and adaptive generic object detection method for indoor navigation / Nimali Rajakaruna, Iain Murray // Proc. of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 28–1 Oct 2013, France. – Thu, 2013

16. Пролетарский А. В., Баскаков И. В., Чирков Д. Н. Беспроводные сети Wi-Fi. – М. : БИНОМ, 2007. – С. 178.

17. Zou, T.; Li, Z.; Li, S.; Lin, S. Adaptive Energy-Efficient Target Detection Based on Mobile Wireless Sensor Networks. Sensors 2017, 17, 1028.

18. Sung, Y.; Kwak, J. Real-time beacon distance revision method in indoor. Adv. Sci. Technol. Lett. 2015, 106, 69–72.

19. Технологии позиционирования РТЛС [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.rtlsnet.ru/technology/view/2> (дата звернення 01.11.2018).

20. Li, B., Gallagher T., Dempster A. & Riao C. 2012. How Feasible is the Use of Magnetic Field Alone for Indoor Positioning?. In: Proc. IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 1-9.