

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”  
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

кафедра РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

“На правах рукопису”  
УДК \_\_\_\_\_

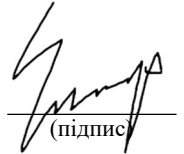
“До захисту допущено”  
Завідувач кафедри РТС  
\_\_\_\_\_ Сергій ЖУК

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
за освітньо-професійною програмою  
“Радіотехнічні комп’ютеризовані системи”  
зі спеціальності 172 “Телекомунікації та радіотехніка”  
на тему: Алгоритм визначення місцезнаходження джерела  
радіовипромінювання на основі системи SDR приймачів

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи РС-321

ЧМИР Роман Володимирович  
(прізвище, ім’я, по батькові)

  
(підпис)

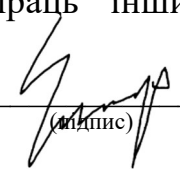
Науковий керівник: ст. викладач кафедри радіотехнічних систем  
к.т.н. , Товкач Ігор Олегович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім’я, по батькові)

  
(підпис)

Рецензент: ст.викладач кафедри прикладної радіоелектроніки  
Адаменко Володимир Олексійович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім’я, по батькові)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає  
запозичень з праць інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент (-ка)   
(підпис)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри РТС  
\_\_\_\_\_ Сергій ЖУК

«13» листопада 2023 року

## ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту (тці)

Чмир Роман Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Алгоритм визначення місцеположення  
джерела радіовипромінювання на основі системи SDR приймачів

науковий керівник дисертації

Товкач Ігор Олегович, к.т.н.

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

затверджені наказом по університету від «09» листопада 2023 р. №5206-с

2. Термін подання студентом дисертації 08 січня 2024 року

3. Об'єкт дослідження: процес визначення місцеположення джерел радіовипромінювання.

4. Вихідні дані: Методи пасивної локації, приймачі SDR, програмне середовище MATLAB.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Розглянути сучасні системи позиціонування;
2. Аналіз проблем визначення місцеположення джерела радіовипромінювання;
3. Проаналізувати підходи щодо визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі системи SDR приймачів;
4. Розглянути існуючі методи визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання;
5. Розглянути кореляційну функцію визначення різниці часу для методу TDOA;
6. Розробити алгоритм визначення місцеположення джерела

радіовипромінювання на основі системи SDR приймачів

7. Проаналізувати розроблений алгоритм

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: слайди для презентації результатів роботи над магістерською дисертацією.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1 тези доповіді на науково-практичній конференції.

8. Консультанти розділів дисертації: науково-педагогічні працівники радіотехнічного факультету.

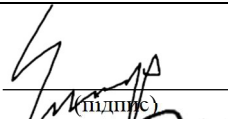
9. Дата видачі завдання: 14 листопада 2023 р.

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації                                                                                                                                         | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------|
| 1     | Усвідомлення завдання на виконання кваліфікаційної роботи                                                                                                                               | 1 вересня по 8 вересня 2023р.                    |          |
| 2     | Робота над 1 розділом кваліфікаційної роботи.<br>Обґрунтування актуальності теми роботи, дослідження існуючих систем та методів визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання | 8 вересня 2023р. по 8 жовтня 2023 р.             |          |
| 3     | Робота над 2 розділом кваліфікаційної роботи<br>Аналіз існуючих систем на SDR приймачів на основі методу мультилатерації. Аналіз математичної моделі методу TDOA.                       | 8 жовтня 2023 р по 8 листопада 2023 року         |          |
| 4     | Синтез алгоритму визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання за допомогою системи SDR приймачів.                                                                            | 8 листопада 2023 року по 8 грудня 2023 року      |          |
| 5     | Аналіз розробленого алгоритму визначення місцезнаходження джерела                                                                                                                       | 8 грудня 2023 року по 25 грудня 2023             |          |

|    |                                                                                       |                                            |  |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--|
|    | радіовипромінювання за допомогою системи SDR приймачів.                               |                                            |  |
| 6  | Оформлення кваліфікаційної роботи у відповідності до вимог та методичних рекомендацій | 25 грудня 2023 р.<br>по 05 січня 2024 року |  |
| 7  | Подання кваліфікаційної роботи керівнику на підготовку відгука                        | 05 січня 2024 року                         |  |
| 8  | Підготовка матеріалів та результатів роботи до попереднього захисту                   | 06 по 07 січня 2023 року                   |  |
| 9  | Попередній захист результатів дисертаційних досліджень                                | 08 січня 2024р.                            |  |
| 10 | Подання кваліфікаційної роботи на рецензію                                            | 09 січня 2024 р.                           |  |
| 11 | Подання кваліфікаційної роботи для перевірки на дотримання академічної доброчесності  | 10 січня 2024 р.                           |  |

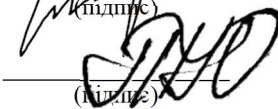
Студент

  
(підпис)

Роман ЧМИР

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник

  
(підпис)

Ігор ТОВКАЧ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Визначення місцезнаходження ДВР є актуальною проблемою в таких сферах як навігація, військова справа, охорона правопорядку. Зазвичай, існуючі системи визначення місцезнаходження мають високу собівартість та є важкими для освоєння.

Тому створення алгоритму визначення місцезнаходження радіопередавача на основі системи програмно визначених радіосистем (software defined radio, SDR), що є відносно дешевими, легкими до освоєння, та гнучкими для масштабування мережі (зони покриття) є актуальним та має практичне значення.

Метою роботи є синтез алгоритму визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі системи SDR приймачів.

Завданнями дослідження є:

1. порівняння існуючих систем визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання;
2. аналіз існуючих методів визначення місцеположення джерела радіовипромінювання;
3. аналіз кореляції вимірювань SDR приймачів для визначення затримки часу;
4. синтез алгоритму визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі SDR приймачів;
5. аналіз синтезованого алгоритму.

Об'єкт дослідження - процес визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі SDR приймачів.

Предмет дослідження - методи визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі різниці часових вимірювань (Time difference of arrival, TDOA) отриманих SDR-приймачами.

Апробація результатів дисертації. Основні положення даної роботи доповідались та обговорювались на:

-V Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів та аспірантів «Радіoeлектроніка в ХХІ столітті», 10-12 травня 2023 року м. Київ, Україна.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів та висновків. Повний обсяг дисертації складає 83 сторінки, 8 таблиць, 41 рисунок, 2 сторінки списку використаних джерел у кількості 20 найменувань, 1 додатку.

Практична цінність: запропонований в даній роботі алгоритм, та спосіб налаштування мережі приймачів дозволить створювати легкі в розгортанні, фінансово доступні, та гнучкі, з точки зору масштабування периметри (точки), які вказуватимуть місцезнаходження ДРВ у зоні досяжності, що може бути корисним для протидії радіохуліганам, виявлення наближення до периметру та його перетину БПЛА, роботу несанкціонованого радіопередавача, тощо.

Ключові слова: визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання, мультилатерація (TDOA), метод найменших квадратів, software defined reciever (SDR), кореляція.

## ANNOTATION

Topic actuality: Localization of radioemission source is actual problem in such spheres as navigation, military, law enforcement. Usually present day localization systems are expensive and are complicated to work with for non-professionals.

Thus, creation of the algorithm for localization of radioemission source based on the system of SDR receivers is actual and practically important.

Purpose: to synthesize algorithm for localization of radioemission source based on the system of SDR receivers

Research tasks:

1. comparison of existing radioemitters localization systems;
2. analysis of existing emitters localization methods;
3. correlation analysis of SDR measurements to determine time delay of arrival;
4. synthesis of the algorithm for determining the location of the radio emission source based on SDR receivers;
5. analysis of the developed algorithm.

Research object - the process of determining the location of the radio radiation source based on SDR receivers.

Subject of study - methods of determining the location based on time difference of arrival (TDOA) by SDR receivers.

Approbation of the results of the dissertation. The main provisions of this work were reported and discussed at:

- V All-Ukrainian scientific and technical conference of students and postgraduates "Radioelectronics in the XXI century", May 10-12, 2023, Kyiv, Ukraine.

The dissertation consists of an introduction, 5 chapters and conclusions. The total volume of the dissertation is 83 pages, 5 tables, 41 figures, the list of used sources in the amount of 20 names, 1 appendix.

Practical value: the algorithm proposed in this paper and the method of setting up the

network of receivers will make it possible to create easy-to-deploy, financially affordable, and flexible, from the point of view of scaling, perimeters (points) that will indicate the location of the radio emission source in the reach zone, which can be useful for countering radio hooligans , detection of UAV approaching and crossing the perimeter, operation of an unauthorized radio transmitter, etc.

Key words: determining the location of the radio radiation source, multilateration (TDOA), least squares method, software defined receiver (SDR), correlation.



## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ЗАВДАННЯ.....</b>                                                                                                                           | <b>2</b>  |
| <b>РЕФЕРАТ.....</b>                                                                                                                            | <b>5</b>  |
| <b>ANNOTATION .....</b>                                                                                                                        | <b>7</b>  |
| <b>ЗМІСТ.....</b>                                                                                                                              | <b>9</b>  |
| <b>ВСТУП.....</b>                                                                                                                              | <b>12</b> |
| <b>1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ<br/>ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ. ІСНУЮЧІ СИСТЕМИ ТА<br/>МЕТОДИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ.....</b> | <b>15</b> |
| <b>1.1 Сфери застосування систем визначення місцезнаходження ДРВ .....</b>                                                                     | <b>15</b> |
| 1.1.1 Служби надзвичайних ситуацій.....                                                                                                        | 17        |
| 1.1.2 Пошукові операції .....                                                                                                                  | 18        |
| 1.1.3 Пошук викраденого транспортного засобу .....                                                                                             | 19        |
| 1.1.4 Застосування у військовій справі .....                                                                                                   | 20        |
| 1.1.5 Застосування в навігації .....                                                                                                           | 21        |
| <b>1.2 Системи визначення місцезнаходження ДРВ .....</b>                                                                                       | <b>22</b> |
| 1.2.1 Kraken SDR .....                                                                                                                         | 22        |
| 1.2.2 Signal shark .....                                                                                                                       | 25        |
| 1.2.3 GPS-маяк BI 310 CICADA.....                                                                                                              | 27        |
| 1.2.3 R820T2 .....                                                                                                                             | 29        |
| <b>1.3 Принципи визначення місцезнаходження ДРВ.....</b>                                                                                       | <b>30</b> |
| 1.3.1 TDOA .....                                                                                                                               | 30        |
| 1.3.2 AOA .....                                                                                                                                | 34        |
| 1.3.3 RSS .....                                                                                                                                | 35        |
| <b>1.4 Висновки розділу .....</b>                                                                                                              | <b>38</b> |
| <b>2. АЛГОРИТМИ ТА МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ<br/>ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ SDR-ПРИЙМАЧІВ<br/>40</b>                       |           |
| <b>2.1 Системи визначення місцезнаходження на основі SDR приймачів.....</b>                                                                    | <b>40</b> |
| 2.1.1 Система визначення місцезнаходження SDR приймача в мережі LTE.....                                                                       | 40        |
| 2.1.2 Система визначення місцезнаходження ДРВ шляхом енергодетекції та<br>циклостационарних функцій на основі спектрального зондування .....   | 45        |

|                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.3 Система визначення місцезнаходження ДРВ на основі SDR приймачів та мікрокомп'ютерів Raspberry .....     | 49        |
| <b>2.2 Методи визначення місцезнаходження ДРВ .....</b>                                                       | <b>51</b> |
| 2.2.1 Визначення місцезнаходження SDR-приймача за допомогою OTDOA ...                                         | 51        |
| 2.2.2 Метод енергодетекції на основі SDR приймача .....                                                       | 53        |
| 2.2.3 Виявлення енергії та циклостационарних функцій на основі спектрального зондування .....                 | 55        |
| 2.2.4 AOA .....                                                                                               | 58        |
| 2.2.5 TDOA .....                                                                                              | 59        |
| <b>2.3 Кореляційна функція .....</b>                                                                          | <b>61</b> |
| <b>2.4 Висновки розділу .....</b>                                                                             | <b>64</b> |
| <b>3.СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ<br/>ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ SDR ПРИЙМАЧІВ</b> | <b>65</b> |
| 3.1 Вимірювання часових затримок надходження сигналів на приймачі.....                                        | 65        |
| 3.2 Визначення місцезнаходження ДРВ.....                                                                      | 67        |
| 3.3 Висновки розділу.....                                                                                     | 69        |
| <b>4.АНАЛІЗ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ<br/>ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ SDR ПРИЙМАЧІВ</b> | <b>70</b> |
| 4.1 Симуляція алгоритму.....                                                                                  | 70        |
| 4.2 Висновки розділу.....                                                                                     | 74        |
| <b>5.РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....</b>                                                                       | <b>76</b> |
| 5.1 Аналіз наявної ідеї .....                                                                                 | 76        |
| 5.2 Створення маркетингової концепції продукту.....                                                           | 76        |
| 5.3 Визначення перспектив реалізації та маркетингова стратегія.....                                           | 78        |
| 5.4 Висновки розділу.....                                                                                     | 78        |
| <b>ВИСНОВКИ .....</b>                                                                                         | <b>80</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>                                                                       | <b>82</b> |
| <b>ДОДАТОК А.....</b>                                                                                         | <b>84</b> |

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

SDR - software defined radio програмно визначена радіосистема

TDOA - time difference of arrival – часова різниця надходження

ДРВ – джерело радіовипромінювання

БПЛА - Безпілотний літальний апарат

IDA - Interference and Direction Analyzer - аналізатор завад та напрямку

GNSS - Global Navigation Satellite System - глобальної системи супутникової навігації

AoA - Angle of Arrival - визначення кута надходження радіохвилі

RSSI – received signal strength indicator – індикація сили отриманого сигналу

LTE - Long Term Evolution - мережа довготермінового розвитку

МНК – метод найменших квадратів

PRS - Positioning Reference Signal - Опорний сигнал позиціонування

ISD - inter-site distance відстань між вузлами

MCL - minimum couple loss мінімальна втрата між антенами

АБГШ - адитивний білий гауссівський шум

OTDOA - observed time difference of arrival - спостережену різницю часу надходження отриманих сигналів

SCF - spectrall correlation function - спектральної кореляційної функції

ЦП -циклічний префікс

ЧС - час сканування

ЧЗ - час зайнятості

ВЗ - Відсоток зайнятості

ПСГ - потужнісна спектральна густина

2 Msps - Megasamples per second - мегакадрів за секунду

ТСХО - Temperature Compensated Crystal Oscillator - Термокомпенсовані кварцеві генератори

## ВСТУП

З моменту винайдення людством радіопередавачів стала актуальною проблема визначення їхнього місцезнаходження, яка з часом лише прогресує та набирає своєї актуальності: починаючи з часів Першої та другої світових війн, коли радіостанцію противника виявляли за допомогою тріангуляції, і закінчуючи сьогоденням, коли технологія визначення місцезнаходження дозволяє виявити безпілотний літальний апарат по за межами поля зору, наприклад методом мультилатерації, вказати правоохоронцям де знаходиться викрадений транспортний засіб або радіохуліган, порівнявши потужності вхідних сигналів, тощо.

Метою роботи є синтез алгоритму визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі системи SDR приймачів. Для її досягнення було необхідним виконати наступні завдання: в першу чергу - порівняти існуючі системи визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання. За критерієм доступності для купівлі та розгортання, гнучкості в зміні параметрів (робочих частот, масштабів покриття місцевості), а також можливості налаштування такої системи для роботи користувача – не професіонала було обрано систему, на базі SDR приймачів. Другим завданням став аналіз та порівняння існуючих методів визначення місцезнаходження для систем SDR приймачів. Враховуючи можливість масштабування системи приймачів та можливість досягнення результатів локалізації з невеликими похибками було обрано метод мультилатерації. Третє завдання полягало в аналізі кореляції вимірювань і методу TDOA для роботи в системі SDR приймачів. Для кореляції було обрано метод найменших квадратів. Наступним завданням був синтез алгоритму, завдяки якому система SDR приймачів буде проводити кореляцію часових затримок сигналів за допомогою методу найменших квадратів. Такий алгоритм було створено в середовищі MATLAB. Останнім завданням роботи був аналіз розробленого алгоритму та порівняння результатів його роботи.

Об'єктом даного дослідження став процес визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі SDR приймачів. Предметом дослідження є методи визначення місцеположення на основі різниці часових вимірювань (TDOA) отриманих SDR-приймачами.

Для досягнення поставленої мети було проведено порівняння принципів дій існуючих систем локалізації різного призначення, розглянуто експерименти на практиці та теоретичні симуляції і відштовхуючись від масштабів території, що здатна система сканувати, та значень похибок під час таких тестів та симуляцій – обрано систему, та метод визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання. Для вибору методу кореляції було проведено порівняння існуючих методів кореляції, оцінено їхню складність та величину похибок, які ці методи забезпечують.

Завдяки результатам даного дослідження можливо виявляти джерела радіовипромінювання в зоні, по периметру якої знаходяться SDR приймачі підключені до мікрокомп'ютерів Raspberry Pi, та мають доступ до глобальної мережі. Така розробка дозволить виявляти появу в периметрі безпілотного літального апарата або виходи в ефір радіостанцій з простою формою сигналу, з точністю до 10ти метрів, в залежності від кількості приймачів в системі, положення ДРВ відносно системи, та похибки синхронізації.

Тези даної роботи оприлюднювались у рамках V Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів «Радіoeлектроніка в XXI столітті», 10-12 травня 2023 року у місті Київ, Україна.

Також автор є співавтором в роботі «Програмне забезпечення для побудови сенсорної мережі на основі Raspberry Pi» Ходаніцький О. О., Голодяєва П. В., Гайдай А. В., Чмир Р. В., V Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів «Радіoeлектроніка в XXI столітті», 10-12 травня 2023 року у місті Київ, Україна.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів та висновків. Повний обсяг дисертації

складає 83 сторінок, 8 таблиць, 41 рисунок, 2 сторінки списку використаних джерел у кількості 20 найменувань, 1 додатку.

## **1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ. ІСНУЮЧІ СИСТЕМИ ТА МЕТОДИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ**

Незадовго, від моменту винайдення радіозв'язку, перед людством постала проблема визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання (ДРВ). Сфери діяльності діяльності що потребують визначення місцезнаходження, існуючі системи та принципи визначення місцезнаходження ДРВ будуть описані в даному розділі.

### **1.1 Сфери застосування систем визначення місцезнаходження ДРВ**

Першим приладом, пов'язаним з визначенням місцезнаходження був прилад, призначений для пошуку напрямку з якого ведеться радіовипромінювання, розроблений у 1888 році Генріхом Герцем. Він являв собою провід натягнутий в не замкнуте кільце, який механічно повертався, і повертаючись в напрямку джерела радіосигналу – напруга на виході такої системи була максимальною.

З розвитком технологій, пов'язаних з радіозв'язком – потреба в визначенні місцеположення також розвивалась і збільшувалась. Системи радіолокації та пеленгації займали свою нішу в усіх сферах людської діяльності, де використовувалось радіомовлення: в мореплаванні та авіації середини XX століття часто застосовуються радіомаяки, джерела радіовипромінювання, наводячи на які антену користувач може зрозуміти свій напрям руху. Також значну роль радіопеленгація відіграла і в Другій світовій війні: прилад для визначення напрямку радіовипромінювання високої частоти на основі осцилографа, «Хаф-Даф» став причиною знищення приблизно чверті німецьких підводних човнів силами союзників.

На сьогоднішній день проблема визначення місцезнаходження радіопередавача є актуальною і в наступних сферах:

- служби надзвичайних ситуацій: в випадку екстреного виклику визначення місцезнаходження радіопередавача з якого даний виклик надійшов до служби порятунку може суттєво вплинути на своєчасність реакції на такий виклик відповідних служб;
- пошукові операції та операції порятунку: у випадку якщо хтось загубився або в небезпеці визначення точки, з якої надійшов сигнал про нещасний випадок – може відіграти значну роль;
- правоохоронна сфера: визначення місця з якого надходить радіосигнал у цьому випадку дозволяє припиняти діяльність «радіохуліганів» та виявляти вкрадені автомобілі за сигналами вмонтованих в системи сигналізації радіопередавачів;
- військова справа: в реаліях сучасної війни як ніколи актуальною є роль радіо-електронної боротьби та радіо-електронної розвідки. Своєчасне виявлення місцезнаходження джерела радіовипромінювання дозволяє ефективно протидіяти противнику: наносити вогневе ураження живій силі, техніці та пунктам управління військами противника, вживати заходів маскування від ворожих БПЛА, виявляти радіокеровані боєприпаси, тощо;
- навігація: в мореплавстві та авіації визначення місцезнаходження передавача необхідне для більш точного управління кораблем або повітряним судном;
- природознавство та натуралізм: науковці використовують радіопередавачі для відстежування поведінки та переміщення тварин у дикій природі ;
- інтернет речей: визначення місцезнаходження є надзвичайно важливим для смарт-дому.



### 1.1.1 Служби надзвичайних ситуацій

Прикладом потреби в визначенні місцезнаходження радіопередавача в службі надзвичайних ситуацій є визначення місцезнаходження мобільного телефону з якого надійшов виклик до служби порятунку 911. Під дією екстремальних обставин користувач не завжди здатен адекватно вказати де саме він знаходиться, саме тому з розвитком мобільних технологій виникли і постійно підвищувалися вимоги локалізації постраждалого. В середині 1990х років в Північній Америці до мобільних операторів було висунуто вимогу впровадити сервіс Enhanced 911 (E911) (аналогічний в Європейському союзі E112) . Станом на 2019 рік вимоги визначення точності E911 становили: адресу будівлі, поверх, номер кімнати, горизонтальну точність 50 метрів, та часові рамки першого визначення (Time to first fix, TTFF) 30 секунд [1]. Досягалося це наступним чином: виклик з стільникового телефону приймався на базову станцію стільникового зв'язку центрами комутації мобільного зв'язку (MSC). Центр комутації автоматично присвоює унікальний ідентифікатор кожному виклику екстреної допомоги стільникової мережі відомий як «псевдо-АНІ». Селективний маршрутизатор з'єднує виклик з PSAP (public safety answering point – точкою відповіді на звернення) в залежності від розташування базової станції стільникового зв'язку (Рис. 1.1).

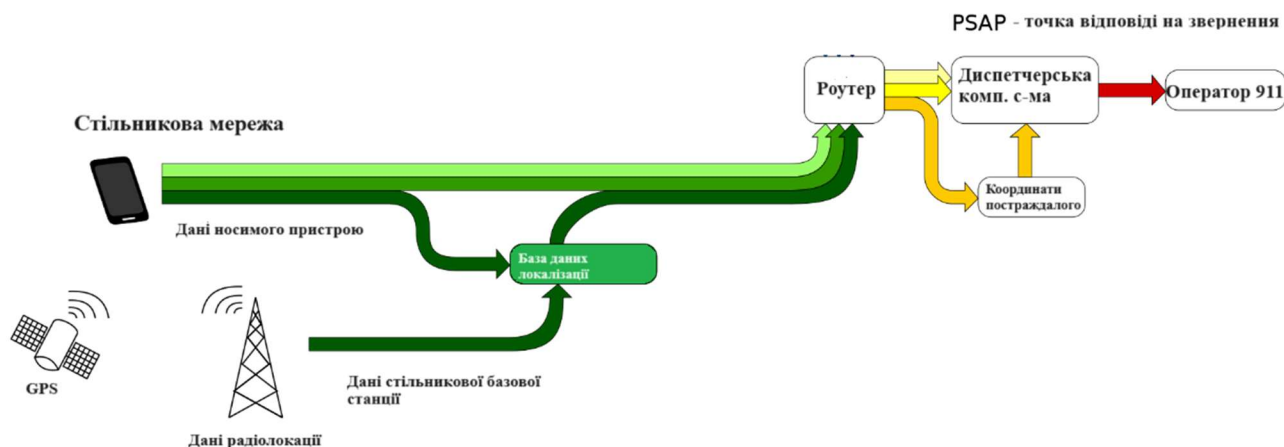


Рисунок 1.1 Схема передачі інформації місцезнаходження постраждалого

Мобільна мережа визначає місцеположення абонента шляхом тріангуляції. Також джерелом інформації є користувацький телефон: вбудований GPS приймач автоматично вмикається в тому разі, якщо він був вимкнений, та одночасно з передачею голосового трафіку телефон передає інформацію про своє знаходження на спеціально виділений сервер.

### 1.1.2 Пошукові операції

В сфері гірського туризму та лижного спорту частою проблемою є лавини, які вкривають собою великі площі, водночас ховаючи заживо під собою людей, що опинилися на шляху їхнього сходження. Оскільки пошук людини на великій площі під снігом може зайняти тривалий час, критично важливий для порятунку жертви, – у 1968 році доктором Джоном Лютоном було розроблено перший лавинний передавач «Скаді», який функціонував на частоті 2.275 кГц, і мав звуковий індикатор наближення до цілі: по мірі наближення та зростання рівню сигналу наростав тон в навушниках. Подальша модернізація призвела до виникнення аналогових та цифрових приймально-передавальних пристроїв подібного призначення. Перед виходом в гори усі члени групи включають свої пристрої в режим передачі. У разі потрапляння під завал – ті, що не потрапили під завал переключають пристрої в режим пошуку. З 1996-го року новою загальноприйнятою в світі частотою стає частота 457 кГц. Аналогові пристрої обладнані звуковою індикацією та LED індикаторами, що візуалізують рівень сигналу по мірі наближення до потерпілого. Цифрові пристрої зазвичай мають кілька вбудованих антен, які за прийнятим рівнем сигналу дозволяють визначити з якого напрямку сигнал надходить, та цифровий дисплей з стрілками, які вказують напрямок, та повідомляють якщо шукач рухається не в той бік (Рис. 1.2).



Рисунок 1.2 Цифровий приймач Barryvox

Новітньою технологією в сфері пошуку під завалом став прилад W-Link [2], цифровий сигнал якого містить інформацію про життєво важливі показники користувача, що дозволяє надати пріоритет в відкопуванні спершу тих, хто залишився живим.

### 1.1.3 Пошук викраденого транспортного засобу

Часті випадки викрадення особистих транспортних засобів в Північній Америці спричинили потребу в розширенні способів пошуку викрадених машин, і в 1979 році відставний полісмен Вільям Рейган розробляє систему, що дозволяє виявляти викрадені автомобілі [3]. Система LoJack складалася з радіопередавача розміром з канцелярську гумку, що ховався в випадковому місці в автомобілі і активувався на передачу 200 мілісекунд сигналу кожні 10 секунд на частоті 173.075 МГц дистанційною командою з поліцейської радіомережі, або не санкціонованим запуском стартера (інший спосіб, окрім оригінального ключа запалювання). Поліцейські машини обладнувалися приймачами, які отримуючи унікальний сигнал передавача в викраденій машині присвоювали йому буквено-цифровий ідентифікатор, за яким диспетчер міг назвати правоохоронцю марку, модель, номерний знак, VIN-код, та іншу інформацію про викрадену машину (Рис. 1.3). Також на поліцейських

машинах встановлювались фазовані антенні решітки, системи з чотирьох антен, за допомогою яких можливо було визначити приблизний напрямок та відстань до викраденої машини.



Рисунок 1.3 Приймач LoJack

На даний момент такі системи практично витіснені з ринку системами, що використовують GPS та передачу даних місцезнаходження користуючись стільниковою мережею [4].

#### 1.1.4 Застосування у військовій справі

Зі збільшенням ролі ДРВ у військовій справі – важливішою стає проблема визначення їхнього місцезнаходження. Найбільш актуальною на даний момент з точки зору військової справи є виявлення сигналу безпілотних літальних апаратів (БПЛА). За останній рік за допомогою комплексів БПЛА мультироторного типу на полі бою часто проводяться розвідувальні дії, наведення артилерії, ураження живої сили за допомогою скиду боєприпасів, БПЛА-боєприпаси. Наприклад система радіочастотного БПЛА-виявлення Aaronia Drone Detector, яка має 8-ми або 16-ти секторальну антену, аналізатор спектру та програмне забезпечення для обробки сигналів, що здатна виявляти БПЛА, що працюють в діапазоні від 9кГц до 20ГГц в радіусі 2х кілометрів, опираючись на специфіку сигналу, який транслює на пульт вбудований передавач БПЛА [5]. Також поширеною системою для відстежування БПЛА є DJI Aeroscope. Специфіка даної системи полягає в тому, що будучи виготовленою власне фірмою-

виробником БПЛА марки DJI – дана система виявляє місцезнаходження БПЛА не лише за дальністю і потужністю прийнятого сигналу, а також розшифровує задовану в ньому інформацію щодо попередньо пройденого маршруту, точки зльоту, місцезнаходження пульта оператора і т.д. Складається дана система з системи антен, блоку управління та програмного забезпечення, що розшифровує та візуалізує інформацію передану апаратом (Рис 1.4).



Рисунок 1.4 Система DJI AeroScope G-8

Наприклад класична система на базі антен Aeroscope G-8 складається з 4 антен G-8 (кожна з яких перекриває сектор в 90 градусів), блоку управління та програмного забезпечення та здатна виявляти (для БПЛА фірми DJI виявлення та зчитування службової інформації, для БПЛА інших фірм виявлення приблизного місцезнаходження на основі радіосигналу) на відстані 18-25 км, в частотних діапазонах 2.4-2.5 ГГц, 5.7-5.85 ГГц [6].

#### 1.1.5 Застосування в навігації

В морській навігації, та авіації використовувались так звані радіомаяки: передавачі в певних місцях які постійно транслювали в ефір сигнал на частотах КХ та

УКХ діапазону, транслюючи в ефір також зазвичай свої координати, дані телеметрії, або метеорологічну інформацію, були призначені для роботи в сумісності з системами визначення напрямку на джерело випромінювання, встановленими на кораблях та літаках. На даний момент їх витіснила система GPS і дана технологія застосовується на невеликих аеропортах та злітних ділянках для вертольотів. Також дана технологія застосовується в позначенні посадочних смуг для літаків на частоті 75 МГц.

## **1.2 Системи визначення місцезнаходження ДРВ**

### **1.2.1 Kraken SDR**

KrakenSDR – п'яти каналний SDR радіоприймач, на основі RTL-SDR. Має 5 когерентних каналів прийому, що зазвичай еквівалентні п'ятьом дешевим RTL-SDR антенам на основі чіпу R820T2 з однією платою під'єднаною до п'яти антен.

KrakenSDR працює в діапазоні від 24 МГц до 1766 МГц і приєднується через USB до системи забезпечення, бажано Raspberry Pi4, оскільки відкрите програмне забезпечення Core DAQ і DSP розроблялися для комп'ютера з однією платою.

Властивості системи:

- П'яти канална, когерентноспроможна RTL-SDR (5x R820T2 тюнери + RTL2832U ADCs) під'єднані до одного осцилографа
- 5 SMA антенних входів
- Смуга частот від 24 МГц до 1766 МГц – стандарт R820T2 RTL-SDR, а також можливості ширшої смуги (при зломі драйверів)
- Вбудовані елементи автоматичної когерентної синхронізації
- Автоматизовані управління та когерентна синхронізація забезпечуються ПЗ Linux
- Інтерфейс з'єднання з хостом - USB Type-C порт (тільки передача даних)

- Трійник зміщення 4.5 В на кожному порту
- DIP перемикач увімкнення\вимкнення тюнера
- Живлення – 5В/2.4А та через USB Type-C

Для роботи системи необхідні набір антен, USB Type-C кабель, Raspberry Pi 4 або інший пристрій, здатний обробляти дані сигналу, та джерело живлення 5В/2.4А. Оброблена інформація передається через Wi-Fi або Ethernet на Android або комп'ютер. Зібрану систему наведено на (Рис. 1.5).

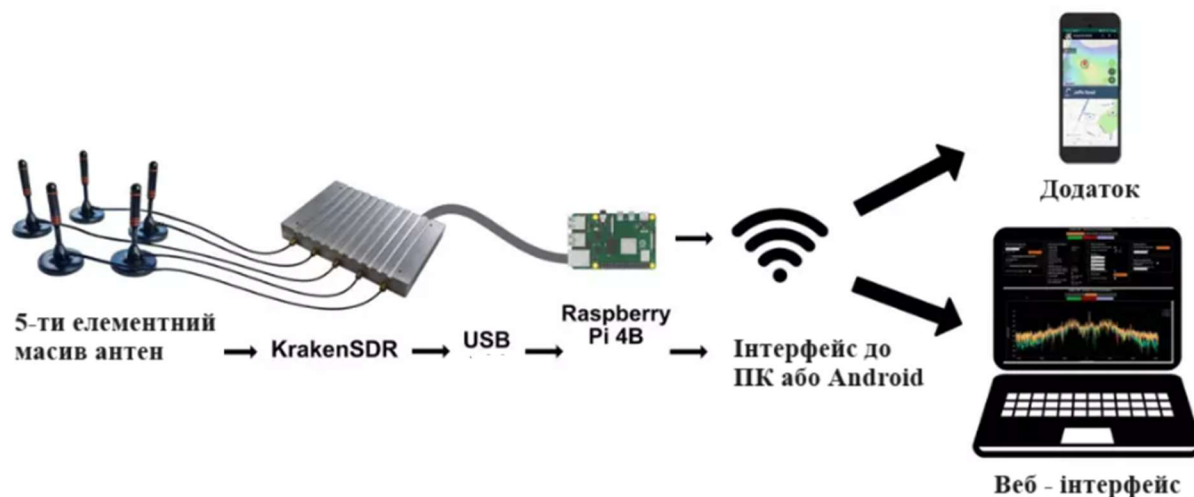


Рисунок 1.5 Система KrakenSDR у зібраному вигляді

KrakenSDR також має веб-інтерфейс, для налаштування системи визначення напрямку на радіопередавач, налаштування робочої частоти, підсилення та інших, розширених налаштувань. Інтерфейс також включає графічне відображення частотного сканера і вивід інформації з системи визначення напрямку.

KrakenRF також розробили додаток для визначення напрямку на радіопередавач, що може автоматично визначати місцезнаходження передавача використовуючи датчики, дані підключення, GPS, і мапінг що є складовою сучасних смартфонів (Рис 1.6).

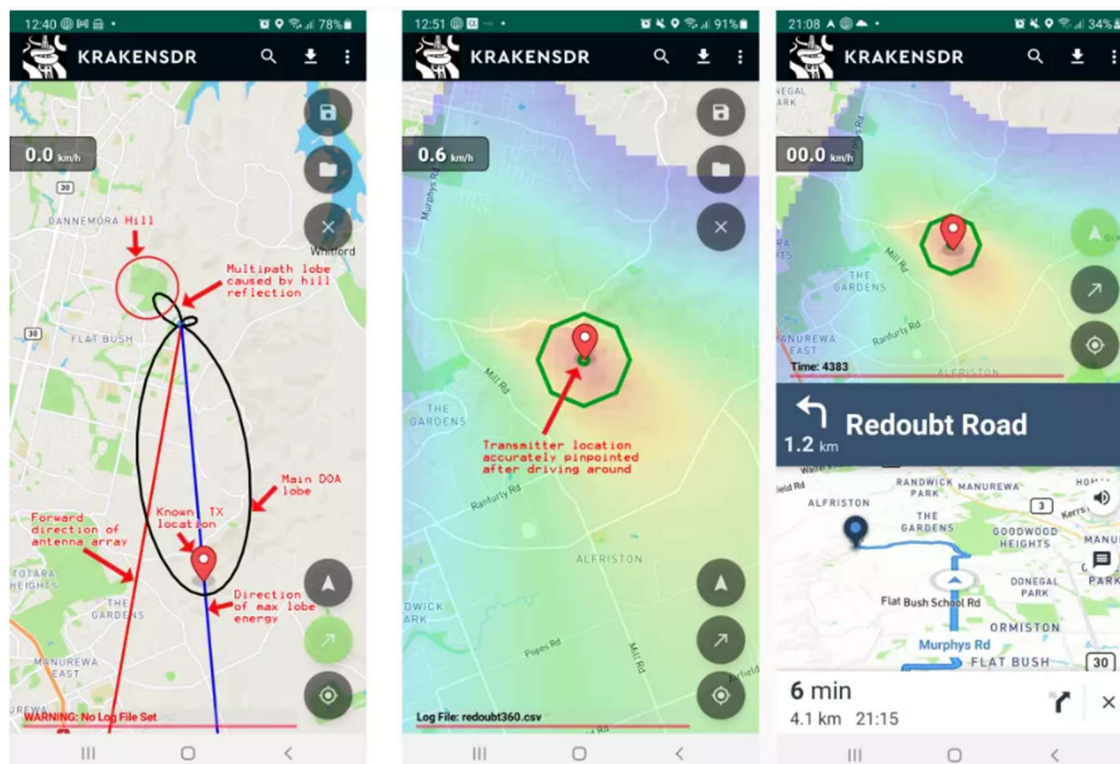


Рисунок 1.6 Інтерфейс додатку KrakenSDR

Сфери застосування:

- Визначення місцезнаходження невідомого передавача, що представляє інтерес (нелегальні трансляції, що створюють завади, генератори завад і т.д.)
- Відстежування диких та домашніх тварин з радіомаяками
- Визначення місцезнаходження екстрених маяків в рятувальних операціях
- Пошук загублених кораблів з УКХ радіостанціями
- Пасивний радар виявлення літаків, човнів, БПЛА
- Визначення рівня завад для радіо-астрономії

Типова система визначення напрямку на радіопередавач може коштувати дорого, наприклад система Rhode & Schwarz DDF007/PR200 коштує близько 150000\$

Систему збору інформації і визначення напрямку можна знайти на GitHub, додаток на Android коштуватиме 50\$.

Для порівняння KrakenSDR коштує близько 300 доларів, 5 антен з магнітною подушкою 99 доларів, і доставка до 20 доларів.



Для використання системи для пошуку джерела радіовипромінювання антени можна розмістити на даху машини на відстані 20 см одна від одної. Додаток андроїд по ходу руху машини буде вказувати на карті напрямок на джерело радіовипромінювання, його вірогідне місцезнаходження та рівень вірогідності (наскільки точна інформація, що джерело знаходиться саме там)[7].

Також дану систему можливо використовувати як пасивний радар, а саме: використовуючи дві антени направленої дії направити їх таким чином, щоб одна була спрямована на джерело радіовипромінювання (наприклад телебашту), опорний сигнал, а друга в бік з якого очікується наближення об'єкту (сигнал спостереження). Порівнюючи в реальному часі потужності сигналів та час прибуття прямої хвилі (опорного сигналу) та відбитої від об'єкта пошуку (сигнал спостереження) – можна визначити місцезнаходження такого об'єкта. За фазовим зсувом можливо визначити швидкість руху об'єкта до або від антен.

### 1.2.2 Signal shark

Іншим засобом, здатним виявляти напрямок з якого надходить радіовипромінювання є засіб SignalShark. Даний комплекс використовує направлену антену (Рис 1.7).



Рисунок 1.7 Система SignalShark та ДН направленої антени

Потужність сигналу отриманого направленою антеною залежить від куту надходження сигналу. Максимальна потужність досягається вздовж основної осі. Для визначення кута надходження радіосигналу, направлена антена обертається горизонтально так, що головна вісь антени сканує повністю азимут на 360 градусів, і створюється графік прийнятої потужності відповідно азимутальному куту. Таке сканування може відбуватись вручну або автоматично.

Засоби NARDA забезпечують це наступним чином: активна антенна ручка, що працює в комплексі з аналізатором завад та напрямку (Interference and Direction Analyzer, IDA) і SignalShark. Ручка має вбудований електронний компас, завдяки якому завжди «знає» напрямок, в якому спрямована направлена антена. Користувач може визначити напрямок максимальної отриманої потужності, наприклад рухаючи антену і слухаючи звуковий сигнал, що змінює тональність пропорційно до вхідної потужності. Коли система впевнена що кут надходження сигналу було знайдено, натискання кнопки на ручці фіксує орієнтацію (азимут, зенітний кут і поляризацію) разом з місцезнаходженням визначеним за допомогою глобальної системи супутникової навігації (Global Navigation Satellite System, GNSS) приймачів в IDA або SignalShark. Таким є процес виявлення напрямку на передавач вручну.

Другим засобом є підтримка інструментом систематичного визначення напрямку за рахунок сканування. Користувач повільно сканує простір в горизонтальній площині антеною. Коли сканування закінчено IDA або SignalShark автоматично підраховують кут надходження сигналу і зберігають його в пакунок даних «горизонтальних сканувань».

Характеристики комплексу SignalShark:

- смуга частот 8кГц – 8ГГц;
- 40 МГц смуга частот сканування в реальному часі;
- 100 % вірогідність виявлення сигналів довших за 3.125 мс;

- два цифрових деконвертори що забезпечують одночасні заміри та демодуляцію;
- можливість роботи як з ручною антеною так і з автоматичною;
- загалом комплекс стійкий до впливу зовнішнього електромагнітного поля, температур, вологи, ударостійкий [8].

### 1.2.3 GPS-маяк BI 310 CICADA

З розвитком мереж стільникового зв'язку, радіопередавачі для пошуку викраденого транспортного засобу пережили декілька принципових змін. Вище згаданий передавач LoJack працював за принципом визначення кута надходження радіохвилі (Angle of Arrival) AoA. На сьогоднішній день яскравим прикладом радіопередавачів призначених полегшити пошук викраденого транспортного засобу (вантажу, загубленої людини або крупної свійської тварини) є GPS маяк BI 310 CICADA вітчизняного виробництва.

Монтується даний пристрій( у разі монтажу на транспортний засіб) за допомогою магнітної подушки або кріплення болтами, передньою частиною до неба ( оскільки там розташована приймальна частина)(Рис. 1.8).



Рисунок 1.8 Загальний вигляд приладу BI 310 Cicada та додатку Android

Живлення даний прилад може отримувати від бортових електросистем транспортного засобу, або від змінних батарейок CR123A, доступних для купівлі у вільному доступі. Час автономної роботи залежить від режиму роботи передавача, частоти надсилання сигналу про власне місцезнаходження, та згідно з виробником – до 3х років автономної роботи.

Передача місцезнаходження відбувається наступним чином: прилад визначає своє місцеположення згідно системи GPS з точністю 5 – 20 метрів, знаходячись під відкритим небом, або системи LBS (визначення місцезнаходження опираючись на вежі стільникового зв'язку) в закритому просторі (підземний паркінг, умови придушення сигналу GPS). Прилад має роз'єм для SIM-карти та передає зібрану інформацію через стільникову мережу на сервер компанії, звідки інформація щодо передавача надходить на смартфон користувача через веб-інтерфейс або додаток. У разі втрати зв'язку з GPS, LBS та покриття стільникової мережі – прилад починає надсилати сигнали тривоги на частотах Bluetooth, що може бути додатковим засобом виявлення викраденого транспортного засобу на відносно близьких відстанях.

Прилад має вбудований акселерометр та може взаємодіяти з бортовими системами транспортного засобу (датчик пального, блокування двигуна, тощо) [9].

Характеристики BI 310 CICADA:

- стандарт передачі даних GSM 900/1800
- зв'язок з стільниковою мережею GPRS (клас 10)
- GPS та LBS навігація
- АКБ 3200 мА
- розмір: 55x70x22 мм, маса 90 грамів
- захист корпусу IP 64.

### 1.2.3 R820T2

Важливим завданням визначення місцезнаходження – є визначення точного місцезнаходження передавача в приміщенні. Це може бути необхідним для інтернету речей, для визначення місцезнаходження посилки в складському приміщенні з певним рівнем автоматизації, або, як у нижченаведеному експерименті, в разі пошуку нелегальних джерел радіовипромінювання в приміщенні, де їх бути не має (наприклад смартфони, або інші радіоприлади під час здачі екзаменів).

Експеримент проводився в закритому приміщенні в місті. Як приймачі було використано 3 різних RTL-SDR приймачі E4000 та R820T2 (Рис 1.9) з різними антенами та один пристрій HackRF як передавач. Через передавач було запущено запис радіоефіру однієї з місцевих радіостанцій на частоті 433.92 МГц. Для трансляції було використано GNU Radio Companion, для прийому скрипт на мові python, для підрахунку дистанцій до передавача.



Рисунок 1.9 Комплект SDR приймача RTL2832U + R820T2

Потужність прийнятого сигналу усереднювалась за часом, тому потреби в синхронізації приймачів не було, також, оскільки приймачі були підключені до одного обчислювального приладу через USB3 – затримок в передачі даних бути не мало.

За допомогою програмного забезпечення на мові python було автоматизовано наступні процеси (яким передувало одне калібрування приймачів користувачем і одне калібрування комп'ютером):

- Налаштування конфігурації приймачів

- Калібрування приймачів
- Поточковий синхронізований збір прийнятих даних
- Оцінка відстані за потужністю
- Звуковий користувацький інтерфейс

Проведений експеримент дав результат 20 – 30 % відсотків точності визначення місцезнаходження радіопередавача у приміщенні, але теоретично, вищі показники є досяжними за рахунок: використання більш досконалих та дорогих SDR приймачів з однаковими антенами, моніторинг визначеної частоти (частот, що використовуються провайдерами стільникового зв'язку в регіоні, на яких найбільш ймовірно працюватиме «нелегальний» передавач), монтаж усіх приймальних приладів на віддалі від металевих конструкцій (чого не було зроблено протягом проведення експерименту)[10].

Нижче наведені характеристики SDR приймача використаного в експерименті[11]:

- Діапазон частот: 24 – 1750 МГц
- Розрядність АЦП: 8 біт
- Мікросхема – тюнер R820T2

### **1.3 Принципи визначення місцезнаходження ДРВ**

#### **1.3.1 TDOA**

Метод визначення місцезнаходження радіопередавача шляхом порівняння часової затримки отриманого сигналу, TDOA (Time difference of arrival), також відомий як мультилатерація полягає в визначенні місцезнаходження передавача трьома (або більше) приймачами шляхом порівняння часу, який був необхідним радіохвилі для досягнення усіх приймачів системи. Даний метод забезпечує локалізацію передавача

з похибкою до кількох десятків метрів, яка залежить від певних факторів, пов'язаних з принципом роботи даного методу.

Оскільки мова йде про порівняння часових показників – усі приймаючі пристрої потребують чітку синхронізацію за часом. Зазвичай, синхронізація між рознесеними в просторі приймачами забезпечується завдяки GPS (або іншій мережі локалізації, такій як GLONASS або BeiDou). Даний метод суттєво залежить від якості прийнятого сигналу GPS: дуже хороша якість сигналу GPS забезпечує синхронізацію з точністю до 30 нс. Така синхронізація здатна забезпечити наступну точність:

$$d = c * t = 3 * 10^8 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right) * 30 \text{ (нс)} = 9 \text{ (м)}, \quad (1.1)$$

де  $d$  - відстань,  $c$  – швидкість світла,  $t$  – час.

З формули (1.1) видно, що при точності 30 нс точність визначення позиції передавача дорівнюватиме 9 метрів, що є доволі точним показником (за нормальних умов задовільним є результат в кілька десятків метрів).

У разі відсутності сигналу GPS (через сонячні спалахи, або штучне придушення сигналу GPS) необхідне альтернативне джерело синхронізації. Якщо втрата GPS тимчасова – це може бути час GPS збережений до моменту втрати сигналу (синхронізація з плином часу буде послаблюватися). Також необхідність в зовнішній синхронізації зникає, якщо приймачі об'єднані між собою в одну мережу (наприклад оптоволоконна лінія здатна забезпечити точність синхронізації до 25 нс).

Наступним фактором що впливає на точність визначення місцезнаходження є частота вибірки та ширина смуги. Часова та просторова роздільна здатність, що забезпечується мультилатерацією залежить від частоти вибірки наступним чином: вибірка сигналу з частотою 10 МГц дає наступну роздільну здатність:

$$t = \frac{1}{f} = \frac{1}{10(\text{МГц})} = 0.1 \text{ (мс)}, \quad (1.2)$$

де  $f$  – частота.

Часова роздільна здатність з формули (1.2) в 1 мс відповідає просторовій роздільній здатності :

$$d = c * f = 3 * 10^8 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right) * 0.1 (\text{мс}) \sim 30 (\text{м}) \quad (1.3)$$

З (1.3) бачимо що похибка в 0.1 мс відповідає похибці в 30 м. Збільшення частоти дискретизації має позитивний вплив на точність, але у випадку коли частота дискретизації значно більша за швидкість модуляції, або більша за смугу пропускання сигналу – точність спадатиме, оскільки під вибірку підпадатимуть шуми, а не корисний сигнал. Оптимальна частота дискретизації буде наближена до ширини смуги сигналу, приблизна точність визначатиметься за формулою:

$$v = \frac{c}{4} * (f_2 - f_1) = 3 * 10^8 (\text{мс}) * (f_2 - f_1), \quad (1.4)$$

де  $v$  - похибка,  $f_2 - f_1$  – ширина смуги.

З (1.4) бачимо, що для ширини смуги 10 МГц точність буде 10 м, 1 МГц – 100 м, 100 кГц – 1 км.

Метод мультилатерації обчислює місцезнаходження об'єкта між двома приймачами порівнюючи місцезнаходження піків двох графіків функції кореляції, і чим ширшою буде смуга частот сигналу – тим вужчим буде пік графіка функції кореляції. Ширший пік – відповідає більшій похибці (Рис 1.10).

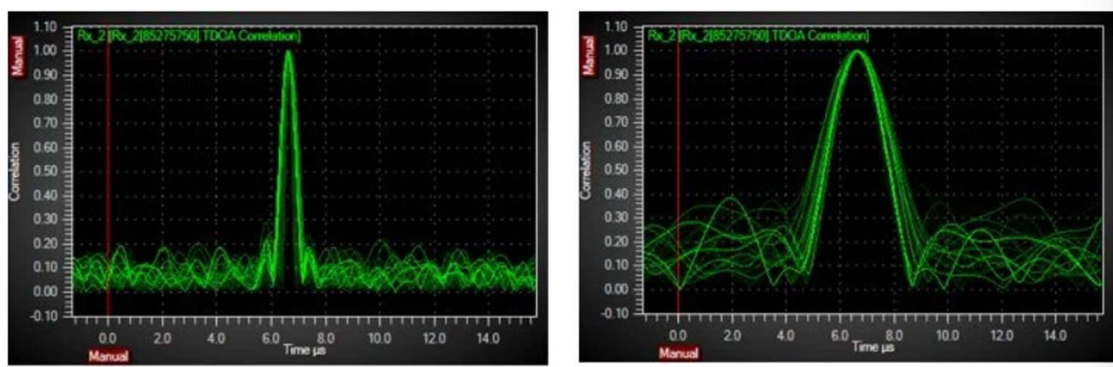


Рисунок 1.10 Порівняння графіків кореляції для сигналу з шириною смуги в 4 МГц (зліва) та 1 МГц (зправа)



Враховуючи специфіку даного методу також «вразливістю» мультилатерації є періодичність сигналу. Якщо сигнал періодично повторюватиметься – це створюватиме кілька піків на графіку функції кореляції, а отже і потребу у розрізненні двох піків сигналу №1 та двох піків сигналу №2. Мультилатерація є ефективною якщо період сигналу є декілька мілісекунд і більше.

Положення в просторі передавача є також важливим фактором для TDOA: похибка буде меншою в тому разі, якщо малій зміні положення в просторі відповідатиме мала зміна в різниці часу (більша похибка у разі якщо для такої ж незначної зміни часу надходження сигналу потрібно переміщення на більші дистанції). Також місцезнаходження визначається значно точніше, якщо передавач знаходиться всередині периметру умовно утвореного приймачами, в порівнянні з ситуацією коли пробують визначити положення за межами цього периметру (Рис 1.11).

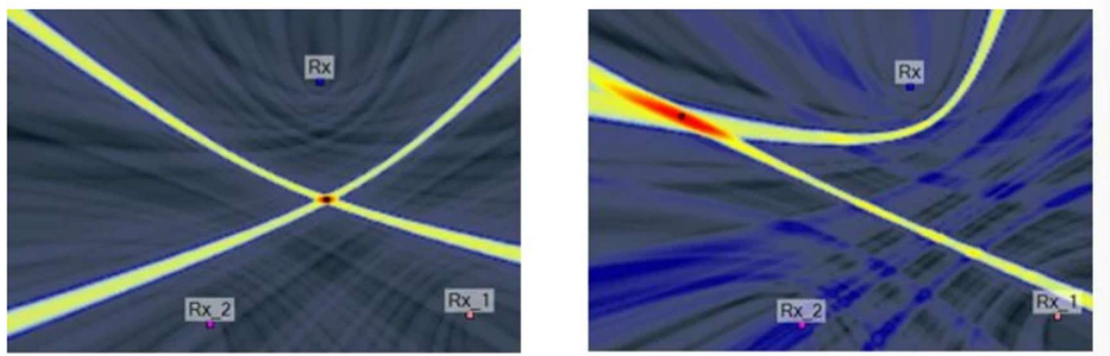


Рисунок 1.11 Порівняння точності локалізації для ДРВ в межах та за межами периметру, утвореного приймачами

Вразливим (але у порівнянні з АОА в меншій мірі) метод мультилатерації є до перешкод між передавачем та приймачем. Відбита хвиля, багатопромєневість, ускладнюють процес визначення місцезнаходження[12].

### 1.3.2 AOA

На сьогоднішній день визначення місцезнаходження радіопередавача за кутом надходження сигналу є особливо актуальним для закритих приміщень, тому принцип роботи даного методу буде описано на прикладі системи для використання в приміщенні.

AOA (angle of arrival, визначення кута надходження радіохвилі) – працює за принципом вимірювання різниці фаз сигналу, що надходить на антенну решітку (зазвичай антени рознесені одна від одної в решітці на пів довжини хвилі). Сигнал надходить на антенну решітку з відстані, достатньої щоб тракт до різних елементів антенної решітки можна було вважати паралельними лініями, тому, під прямим кутом до напрямку руху сигнал є синфазним (Рис 1.12).

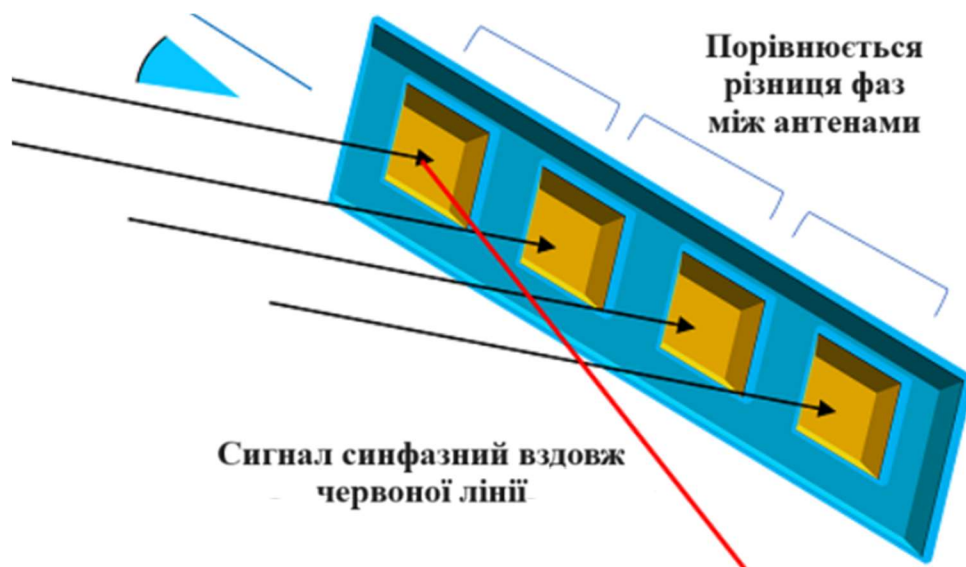


Рисунок 1.12 Надходження сигналу на антенну решітку

Точність даного методу залежить від ширини антенної решітки та точності виміру фаз на кожній антені.

Загальна ширина антенної решітки, зазвичай обчислюється за формулою:

$$(N - 1) * \frac{\lambda}{2}, \quad (1.5)$$

де  $N$  – кількість лінійно рознесених антен,  $\lambda$  – довжина хвилі

З (1.5) бачимо залежність розміру антенної решітки від довжини хвилі.

Зазвичай в приміщеннях встановлюють кілька «опорних» передавачів, які дають приймаючому пристрою «уявлення» про його положення в просторі, та «тег» - передавач, яким безпосередньо позначено об'єкт зацікавлення.

Точність, з якою можна виміряти фазу, залежить від точності дискретизації приймача, на яку впливає внутрішня точність демодулятора приймача і короткочасний дрейф частоти кварцевих осциляторів, що використовуються як в тегах, так і в опорних передавачах.

Для випадку, коли приймач здатен вимірювати фазу сигналу, що надходить на різні антени з точністю  $\pm 10^\circ$ , геометричні підрахунки для двох антенних решіток дають похибку у  $\pm 3^\circ$  якщо передавач знаходиться під невеликим кутом до осі нормалі антенної решітки, і  $\pm 5^\circ$  якщо кут близький до  $45^\circ$ . У разі використання чотирьох антенних решіток точність збільшиться до  $\pm 1^\circ$  близько до осі, та  $\pm 1.5^\circ$  при куті у  $45^\circ$

Якщо орієнтуватись на більш реалістичну кутову точність в  $\pm 5^\circ$ , тоді точність визначення місцезнаходження:

$$d * \tan(5^\circ) \quad (1.6)$$

Отже відповідно до (1.6) на 25 метрів похибка становитиме  $\pm 2$  метри. Таким чином маючи кілька опорних передавачів можливо локалізувати об'єкт з точністю до 1-2х метрів, в залежності від відстані до опорного передавача[13].

### 1.3.3 RSS

RSSI – (received signal strength indicator) – індикація сили отриманого сигналу – метод визначення місцезнаходження, що працює шляхом виміру енергії отриманої

радіохвилі (отриманої антеною або сенсором) в медіапристроях, та в більшості безпроводних пристроїв є функція такого виміру.

Теоретично RSSI – функція дистанції, на яку загалом впливає навколишнє середовище (і багато факторів у навколишньому середовищі). В методі RSSI, невідомий вузол транслює пакети на всю мережу і інші вузли в зоні досяжності обчислюють відстань виходячи з значень RSSI. Пакет має наступну структуру(Рис 1.13):

|             |         |      |       |
|-------------|---------|------|-------|
| Packet_Type | Node_ID | RSSI | Other |
|-------------|---------|------|-------|

Рисунок 1.13 Структура пакету вхідного сигналу

Де Packet\_Type – вказує тип пакету, Node\_ID – виражає ідентифікатор передавача, RSSI відображає значення RSSI, яке невідомий передавач надсилає, і поле Other – використовується для надсилання іншої важливої інформації.

Коли дистанція між невідомими вузлами та опорним вузлом збільшується, значення RSSI буде зменшуватись і коли невідомий вузол наближається до опорних вузлів – значення RSSI буде збільшуватись. Базуючись на теорії отриманого сигналу – функція буде монотонно спадати за наступним рівнянням:

$$Pr(D) = Pt + Gt + Gr + 20 \log_{10}(\lambda/4\pi D), \quad (1.7)$$

де  $Pt$  і  $Gt$  – потужність передавальної антени і підсилення переданого сигналу в дБм,  $Pr$  і  $Gr$  – отримана потужність і коефіцієнт підсилення приймальної антени.  $\lambda$  – довжина хвилі,  $D$  - відстань між приймальною та передавальною антенами.

Формула (1.7) використовується для вимірювання дистанції. В умовах експериментів з визначення місцезнаходження радіопередавача за допомогою методу RSSI – така локалізація не є дуже точною, оскільки вплив зовнішнього середовища, та зміни в ньому впливають на значення RSSI і визначити коефіцієнти підсилення антен

– важко. Тому, використовується наступна спрощена формула для вираження відношення відстані до потужності отриманого сигналу:

$$Pr(D) = Pr1 - \beta \cdot \log_{10}(D), \quad (1.8)$$

де  $Pr1$  - вхідна потужність на відомій дистанції (один метр) в дБм,  $\beta$  – втрати на шляху сигналу,  $D$  – дистанція між передавачем та приймачем.

На рисунку 1.14 наведено графік, який візуалізує формулу (1.8):

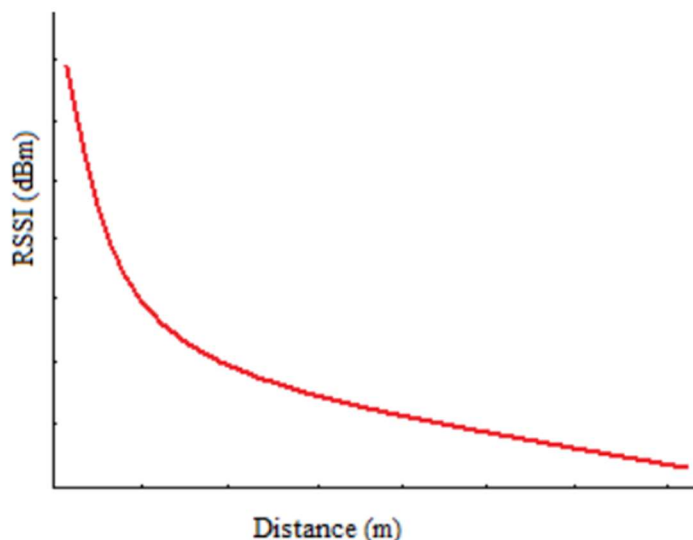


Рисунок 1.14 Відношення рівня вхідного сигналу до відстані до ДРВ

Фактично метод RSSI заснований на порівнянні різниці вихідної потужності та потужності прийнятої, яка називається «втратами на шляху», або атенюацією сигналу. В реальному світі, з різним навколишнім середовищем, коефіцієнт втрат різний на різних відстанях. Така властивість середовища може бути виражена як «експонента втрати на шляху  $\beta$ » в формулі RSSI. Цей параметр є одним із головних і його зміна суттєво впливає на ефект визначення місцезнаходження. Графік на рисунку 1.15 ілюструє відношення між значенням RSSI і відстанню при різних значеннях  $\beta$ .

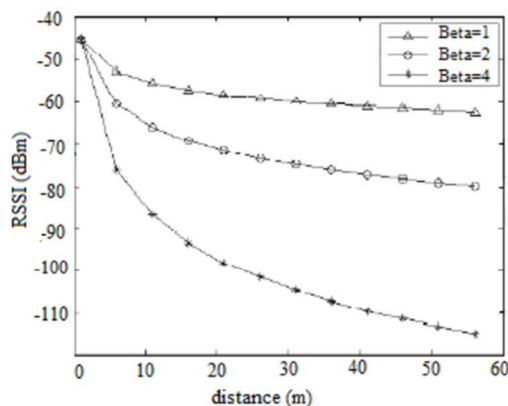


Рисунок 1.15 Відношення між значеннями RSSI та відстанню при різних  $\beta$

Як видно з графіку, всі криві стартують з однакової стартової точки (точка  $Pr1$ ) з формули (1.8). Тому  $Pr1$  також важливий параметр який залежить від навколишнього середовища.

В методі RSSI також є важливою умова проведення виміру: в закритому приміщенні чи на відкритому просторі, оскільки це впливає на модель втрат на шляху (лінійні \ не лінійні), точності (в закритому приміщенні значно вища), розгортанні системи (виконання обчислень суттєво полегшується установкою опорних передавачів в ключових ділянках місцевості), карти та потужності передачі (мінімальна потужність у відкритому середовищі вища, у зв'язку з необхідною якістю безпроводного каналу. Також важливо налаштувати адекватну потужність в разі роботи в приміщенні для уникнення створення вузлами радіозавод один-одному)[14].

## 1.4 Висновки розділу

Визначення місцезнаходження радіопередавача на сьогоднішній день є актуальною проблемою, системи визначення місцезнаходження існують різних масштабів, рівнів точності, та принципів дії. В таблиці 1.1 наведено порівняння окремих параметрів принципів та умов, від яких вони залежать.

Таблиця 1.1 Таблиця порівнянь похибок розглянутих методів

| Назва принципу | Точність залежить від                                | Похибка (умови)                                                    |
|----------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| AOA            | дискретизації приймача                               | $\pm 5^\circ$ азимут (при вимірі вхідного з точн. $\pm 10^\circ$ ) |
| TDOA           | рівня синхронізації приймачів                        | 9 м (для 30 нс синхронізації)                                      |
| RSS            | навколишнього середовища (експонента втрат $\beta$ ) | 4 м ( парк, 60м x60м, $\beta = 2.7$ )                              |

Як базу для виконання роботи було обрано SDR приймачі, у зв'язку з їхньою доступністю для покупки в Україні, низькою вартістю та можливістю масштабування мережі (на відміну від Kraken SDR, який розгортається в одному конкретному місці, мережу на базі SDR приймачів можливо розгорнути у практично будь яких територіальних масштабах).

## **2. АЛГОРИТМИ ТА МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ SDR-ПРИЙМАЧІВ**

З точки зору фінансової доступності та гнучкості в плані характеристик та масштабів розгортання, як засіб для визначення місцезнаходження ДРВ було обрано систему SDR – приймачів. В даному розділі роботи будуть описані існуючі рішення на базі SDR – приймачів, математичні моделі та алгоритми їхньої роботи.

### **2.1 Системи визначення місцезнаходження на основі SDR приймачів**

#### **2.1.1 Система визначення місцезнаходження SDR приймача в мережі LTE**

Для визначення місцезнаходження є можливою система на основі SDR приймача та мережі довготермінового розвитку (Long Term Evolution, LTE). Користувачський приймач та базові станції розставлені в визначених місцях з метою визначення часової затримки та потужності кожного отриманого сигналу.

Розгортання експериментального сценарію відбувалося на основі емулятора LTE мережі, універсальної програмної платформи для радіоприймачів (Universal Software Radio Peripheral, USRP) платформи і SDR – приймача. LTE мережа симулюється за допомогою двох мережевих емуляторів Spirent E2010S. Ці емулятори генерують чотири синхронізовані LTE сигнали, кожен сигнал відповідає базовій станції. Чотири базові станції умовно належать одному оператору стільникового зв'язку, тому вони здійснюють передачу на однаковому частотному каналі, що призводить до між-частотних RSTD вимірювань. Обрано смугу частот band 3, 1800 МГц, для прийому трансляції, через те, що це найпопулярніший спектр для промислових LTE мереж. Частково, абсолютний радіочастотний номер каналу E-UTRA (Absolute Radio Frequency Channel Number, EARFCN) є 1750 МГц, що відповідає несучій центральній частоті в 1860 МГц.

Фізичний рівень мережевого емулятора утворено системою з шириною каналу в 1.4 МГц. Опорний сигнал позиціонування (Positioning Reference Signal PRS) передається в усій смузі кожні 160 мілісекунд для шести послідовних кадрів і двох



кадрів зміщення. В додачу, мережевий емулятор потребує дану вхідну потужність і час затримки для кожної базової станції. Тому в експерименті відтворено розгортання системи в умовах міської забудови макро-стілників з відстанню між вузлами (inter-site distance, ISD) 750 метрів. Розгортання базується на восьмикутній координатній сітці з 3-х секторними базовими станціями (діаграма спрямованості 3дБ на 65 градусів). Як зображено на рисунку 2.1, користувацька станція знаходиться за координатами  $\{x, y\} = \{ISD/2, 0\}$  в метрах, і базові станції за координатами  $\{x_i, y_i\} = ISD/2 \cdot \{0, 0; 1, \sqrt{3}; 2, 0; 1, -\sqrt{3}\}$ , також в метрах.

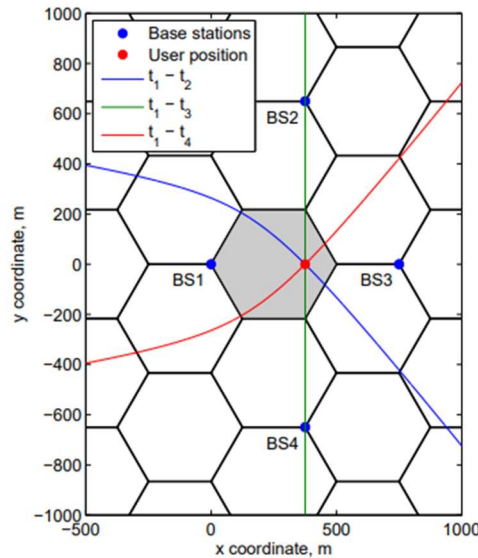


Рисунок 2.1 Перетин гіпербол вказує на місцезнаходження ДРВ

Враховуючи параметри наведені в таблиці 2.1, вхідна потужність сигналу базової станції розраховується за наступною формулою:

$$P_{rx,i} = P_{tx,i} - \max(L_i - G_{tx,i} - G_{rx}, \text{MCL}) \quad (2.1)$$

де  $P_{tx,i}$  – потужність переданого сигналу,  $L_i$  – макроскопічні втрати на шляху проходження сигналу,  $G_{tx,i}$  підсилення передавальної антени,  $G_{rx}$  підсилення приймальної антени і мінімальна втрата між антенами (minimum couple loss MCL), що визначається як мінімальні втрати на шляху між базовою станцією і конектером

антени. Керуючись (2.1) - результуюче значення потужності є  $P_{rx,i} = \{-54.08; -65.31; -64.31, -65.61\}$  (в дБм). Потенційні між-стільникові завади, створені розгортанням більшої кількості базових станцій не враховуються. Також в даному моделюванні до уваги не береться багатопроменевість та радіотінь, створені перешкодами.

Коли мережеві емулятори налаштовані, сигнал на частотах, на яких вони працюють, надходить до платформи USRP N210 встановленої з платою DBSRX2. USRP підключено до гігабітного ethernet порту і керується USRP hard drive (UHD) драйвером з комп'ютера. UHD дає команду запису комплексних вибірок основної смуги з коефіцієнтом дискретизації в 2 МГц. Далі вибірки завантажуються у MATLAB, та частота дискретизації знижується до 1.92 МГц, де LTE сигнали обробляються SDR приймачем. Емуляція базової станції сприяє SDR приймачу визначати комірки та часові затримки.

Таблиця 2.1 Параметри симуляції

|                                 |                                                                            |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Потужність сигналу БС           | $P_{tx} = 43 \text{ dBm}$                                                  |
| Патерн випромінювання антени БС | $G_{tx} = \bar{G}_{tx} - \min \{ 12 \cdot (\theta/\theta_{3dB})^2, A_m \}$ |
| Підсилення антени БС            | $\bar{G}_{tx} = 15 \text{ dBi}$                                            |
| Модель антени БС                | 3 dB beam width, $\theta_{3dB} = 65 \text{ degrees}$                       |
| MCL                             | MCL = 70 dB                                                                |
| Модель втрат                    | $L_i = 128.1 + 37.6 \log_{10}(R_i) \text{ dB}$                             |
| Модель антени UE                | Omnidirectional, $G_{rx} = 0 \text{ dBi}$                                  |

Спочатку отримується та виявляється службовий ідентифікатор робочого стільника (наприклад BS 1). Далі допоміжна інформація сприяє уникненню ідентифікації сусіднього стільника. З моменту як SDR приймач припиняє комунікацію з мережею, користувацькі дані не надсилаються емуляторами базових станцій. Через

це – досягається ефект опорного сигналу відповідного специфічному стільникові (cell-specific reference signal, CRS), без створення міжстільникових завад. Ці сигнали CRS використовуються з метою відстеження та перевірки модуля позиціонування, за відсутності інтерференції між комірками та багатопроменевого поширення, тобто лише в умовах адитивного білого гауссівського шуму (АБГШ).

У результаті SDR приймач може приймати та синхронізувати сигнали чотирьох базових станцій, що дає точну характеристику спектру рисунку 2.2.

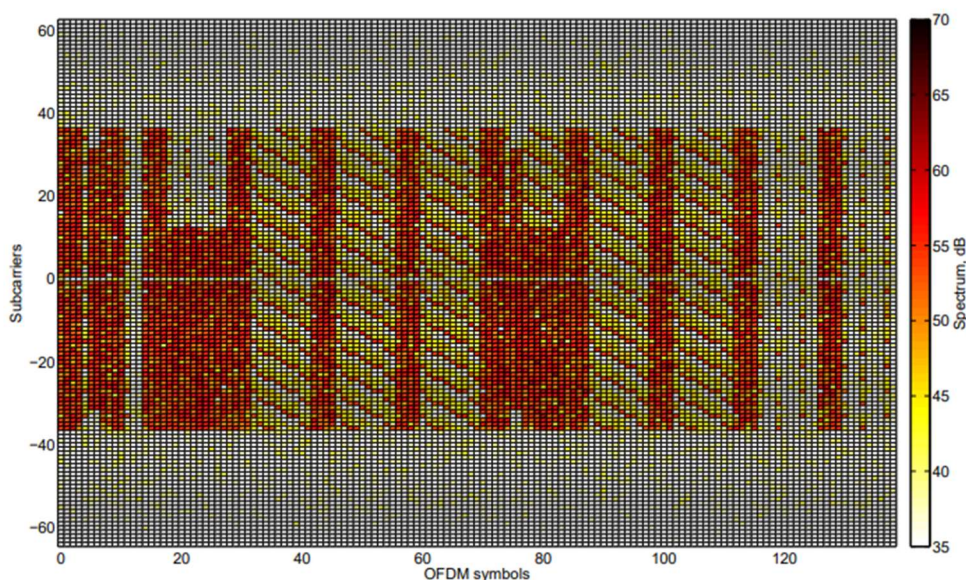


Рисунок 2.2 Часовий та частотний спектри кадру з PRS, для сценарію з 4ма базовими станціями

CRS та PRS сигнали, зміщуються по фазі відповідно до специфіки ідентифікатора стільника. Як очікувалося, стільник що обслуговує базову станцію 1 BS1 має вищу потужність від потужності сусідніх стільників.

Після прийому та процесу втягування цикли DLL (delay locked loop) і PLL (delay locked loop) відстежують частоту та спостережену різницю часу надходження отриманих сигналів (observed time difference of arrival, OTDOA), як проілюстровано на графіках на рисунку 2.3 а) та б). Смуга шуму  $B_L$  DLL і PLL встановлена як 1 Гц і 20

Гц. Оскільки CRS символи без завад використані лише для припущення, виміри беруться кожного слоту, тому період дискретизації циклу  $T_L$  дорівнює 0.5 мс.

Позиція користувача відносно передавачів визначається використовуючи OTDOA виміри, як показано на рисунку 2.3 с). Місцезнаходження отримується після калібрування часової затримки між LTE сигналами мережі емуляторів. Похибка місцезнаходження користувача дорівнює в середньому 34 см. Стандартні відхилення по  $x$  і  $y$  утворюють еліпс. Як видно з графіків помилкові місцезнаходження виникають частіше по осі  $y$  ніж по осі  $x$ .

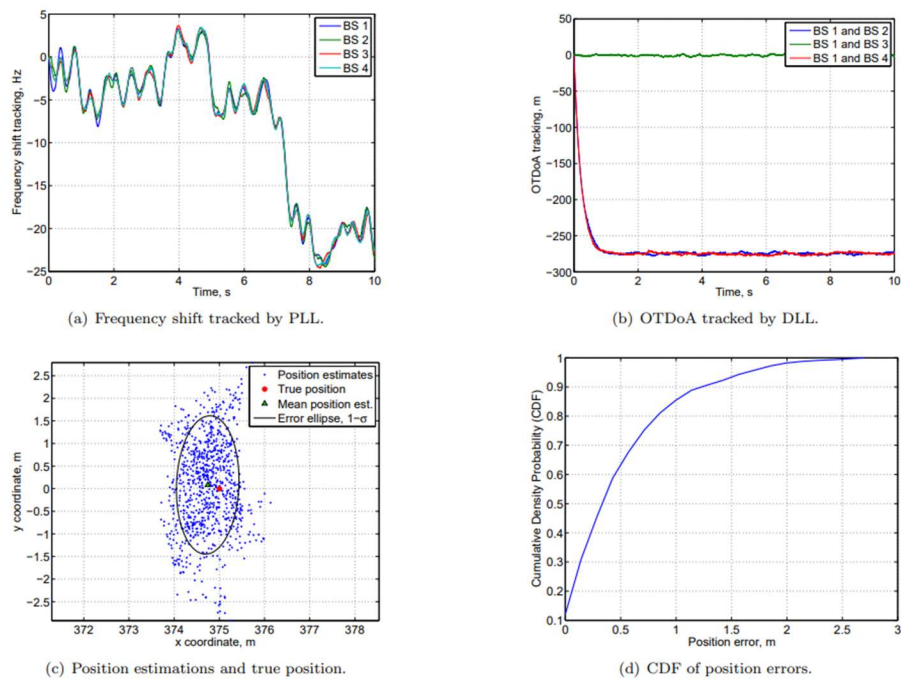


Рисунок 2.3 Виявлення та локалізація SDR LTE приймача, для чотирьох сигналів LTE (ширина смуги 1.08 МГц) а) Відстеження зсуву частот за допомогою PLL; б) Відстеження OTDoA за допомогою DLL; в) ймовірні місця знаходження; г) Графік вірогідності похибки

Це пов'язано з розташуванням базових станцій і користувача зображених на рисунку 2.1. Можна побачити, що точність місцезнаходження з похибкою меншою ніж три метри можлива при статичному АБГШ для сигналів з шириною 1.08 МГц[15].

### 2.1.2 Система визначення місцезнаходження ДРВ шляхом енергодетекції та циклостаціонарних функцій на основі спектрального зондування

Описаний нижче метод енергодетекції та циклостаціонарних функцій було застосовано з метою виявлення сигналу, визначення місцезнаходження його джерела та реалізовано за допомогою модульної радіоплатформи (МРП), як приймач, під'єднаний до комп'ютера, лабораторний векторний сигнальний генератор (ВСТ) і спектральний аналізатор. Як продемонстровано на рисунку 2.4.

Сигнал генерується ВСТ SIGLENT 5060X-V. На виході з ВСТ сигнал роздвоюється за допомогою подільника потужності для живлення SDR платформи і спектрального аналізатора.

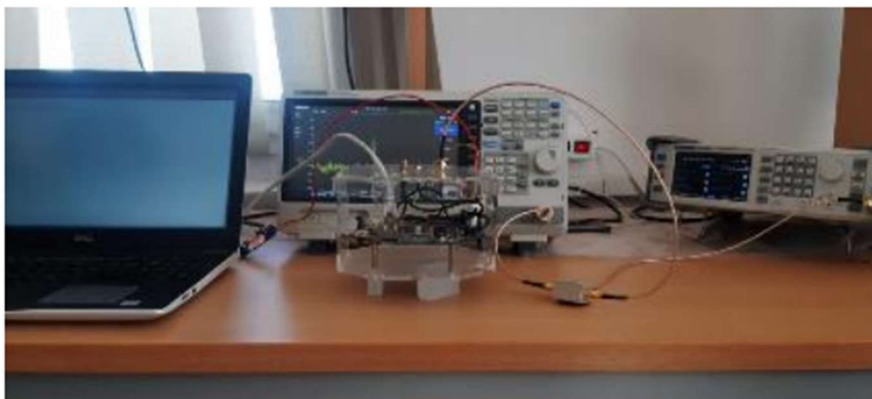


Рисунок 2.4 Зібрана експериментальна установка

В ході експерименту було згенеровано попередньо визначений GSM сигнал в ВСТ, з частотою передачі 902 МГц, і потужністю передачі -30 дБм. Через використання сплітера та втрати в кабелях та конектерах, отриманий рівень сигналу приблизно -36 дБм в аналізаторі спектру (рис. 2.5) і в SDR системі що використовує метод енергодетекції (ЕД).





Рисунок 2.5 PSD згенерованого GSM сигналу

Результати наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Результати детекції сигналів методом ЕД

| Frequency (MHz) | OR (%) | $max_{RSSI}$ (dBm) | ST (s) |
|-----------------|--------|--------------------|--------|
| 902             | 100    | -35                | 0.1431 |
| 902             | 100    | -36                | 0.1226 |
| 902             | 100    | -36                | 0.1388 |
| 902             | 100    | -36                | 0.1434 |
| 902             | 100    | -36                | 0.1237 |
| 902             | 100    | -36                | 0.1153 |
| 902             | 100    | -36                | 0.1434 |
| 902             | 100    | -35                | 0.1338 |
| 902             | 100    | -36                | 0.1242 |
| 902             | 100    | -35                | 0.1305 |

Наступний етап полягає в підключенні антен VSG та MRP замість кабелів. Вважаючи потужність попереднього сигналу -30 дБм, ЕД дало дані наведені на рисунку 2.6.

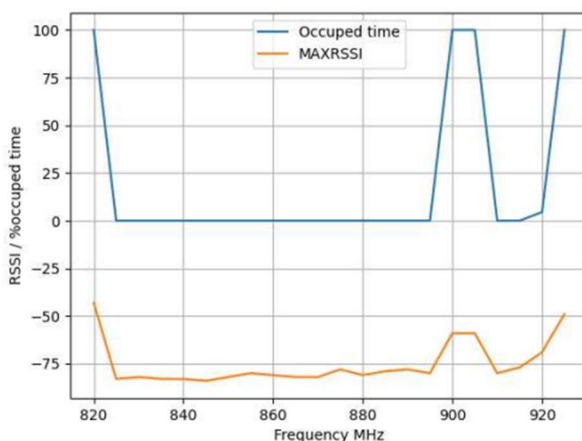


Рисунок 2.6 Результати виявлення сигналу -30 дБм ща допомогою ЕД

Ці дані відображають те, що канал зайнятий в даній смузі частот.

Зі зменшенням потужності сигналу, що видається ВСГ до -50 дБм, рисунок 2.7 ілюструє що результат хибно показує, що канал вільний.

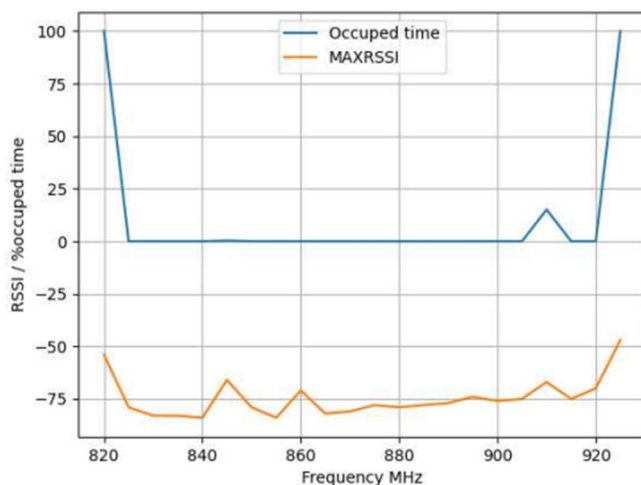


Рисунок 2.7 Результати виявлення сигналу -50 дБм за допомогою ЕД

Ця проблема хибного виявлення вирішується імплементацією другого алгоритму визначення місцезнаходження в підрозділі 2.1.3 , що поєднує техніки ЕД та циклостационарних функцій. Рисунок 2.8 ілюструє успішне виявлення цього низькопотужного сигналу з використанням спектральної кореляційної функції (spectral correlation function, SCF).

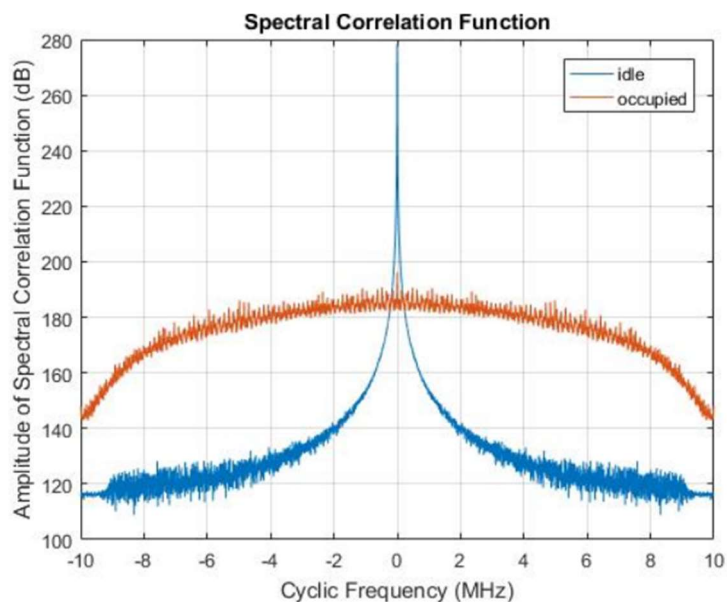


Рисунок 2.8 Результат спектральної кореляційної функції

В подальшому МРП платформу було використано як джерело сигналу, іншу – як детектор. Тест для відстаней в 1 та 2 метри між антенами дав результати наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Результати тесту в приміщенні

| Реальна дистанція | Виміряна дистанція |
|-------------------|--------------------|
| 1 м               | 1.02 м             |
| 2 м               | 2.025 м            |

В таблиці 2.4 наведено результати для системи з однією передавальною всенаправленою та однією приймальною спрямованою антенами на відстані 3 метри[17].

Таблиця 2.4 Тести проведені на відкритому повітрі

| Реальна дистанція | Виміряна дистанція |
|-------------------|--------------------|
| 1 м               | 1.008 м            |
| 3 м               | 3.19 м             |
| 5 м               | 5.5м               |



### 2.1.3 Система визначення місцезнаходження ДРВ на основі SDR приймачів та мікрокомп'ютерів Raspberry

Для обробки інформації що надходить з SDR приймачів необхідним елементом є сервер, яким може бути мікрокомп'ютер Raspberry Pi та керуючий комп'ютер. Оскільки важливою для системи визначення місцезнаходження є синхронізація – виникає необхідність у тому, щоб усі мікрокомп'ютери давали команду починати прийом приймачам синхронно (бажано в межах 100 мілісекунд), з метою досягнення цього команди необхідно подавати через SSH автентифікацію.

Можливі декілька сценаріїв розгортання такої системи:

*Усі приймачі в одній локальній мережі.*

До керуючого комп'ютера підключається роутер, до якого безпосередньо підключаються мікрокомп'ютери (Рис 2.9).

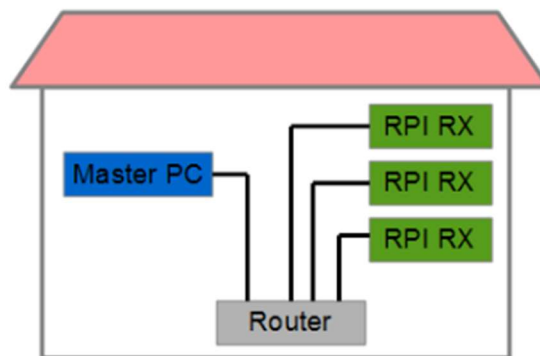


Рисунок 2.9 Розгортання системи на базі локальної мережі

*Керуючий комп'ютер та приймачі знаходяться в різних локальних мережах*

Налаштовується підключення керуючого комп'ютера до Raspberry Pi через інтернет, роутер та брандмауер роутера. Це виконується шляхом використання зовнішньої IP адреси роутера або використанням сервісу «динамічний DNS». Також таке підключення може бути налаштовано шляхом переадресації портів роутера

підмережі віддаленого приймача, що зробить його доступним для глобальної мережі. Мережа матиме вигляд як зображено на рисунку 2.10:

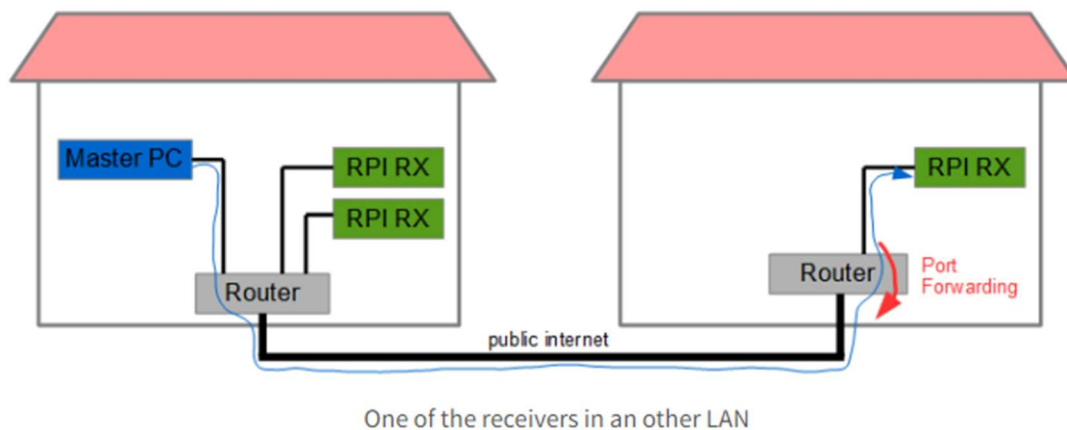


Рисунок 2.10 Керуючий комп'ютер та приймачі знаходяться в різних мережах

Якщо доступ до роутера в віддаленій мережі відсутній (мережа належить корпорації, або є мобільною LTE або 3G) налаштування SSH з'єднання може бути значно ускладненим. В таких випадках використовується зовнішній сервер до якого Raspberry Pi підключається для виконання «зворотного тунелінгу» (Рис 2.11).

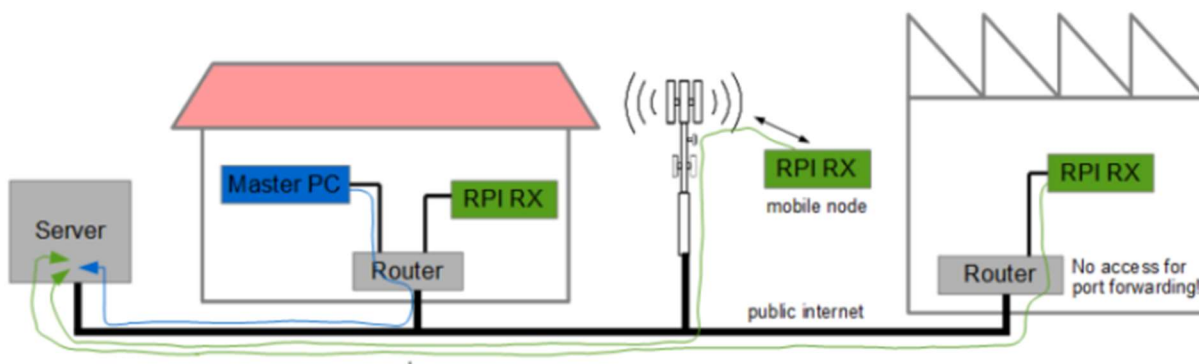


Рисунок 2.11 Система з використанням зовнішнього сервера

Обробка інформації відбувається загалом наступним чином: інформація записується одночасно трьома мікрокомп'ютерами Raspberry Pi, наступним кроком дана інформація копіюється на комп'ютер керування (що в свою чергу може висувати певні вимоги для пропускної спроможності інтернет з'єднання у зв'язку з великим

поток даних). На комп'ютері керування працює скрипт (Matlab або Octave), який генерує карту з нанесеною на неї інформацією позиціонування. Дана система може застосовуватись в збірці мікрокомп'ютерів для методу TDOA[17].

## 2.2 Методи визначення місцезнаходження ДРВ

### 2.2.1 Визначення місцезнаходження SDR-приймача за допомогою OTDOA

В LTE терміналі, синхронізація частоти і часу є найважливішими для підключення до стільника. Загалом, синхронізація частот має більше значення в зв'язку з чутливістю OFDM приймачів до розносу несучих частот, але помилки часу також мають бути усунуті, для уникнення зниження продуктивності. Тому, фаза підключення до стільника полягає в синхронізації часу та частоти і пошуку вільного стільника.

Спершу починається пошук циклічного префіксу за допомогою класичного алгоритму ван де Біка, у якому незалежний від даних визначник максимальної вірогідності записується як:

$$\hat{t}_0 = \operatorname{argmax}\{|\gamma(\tau)| - \rho\Phi(\tau)\}, \quad (2.2)$$

з

$$\gamma(k) = \sum_{m=k}^{k+L-1} x(m) * x^*(m+N), \quad (2.3)$$

$$\Phi(k) = \frac{1}{2} \sum_{m=k}^{k+L-1} |x(m)|^2 + |x(m+N)|^2 \quad (2.4)$$

де  $x(k)$  відображає вибірку сигналу в дискретному часі,  $m$  затримку кореляції,  $L$  нормальну довжину циклічного префіксу (ЦП),  $\rho$  - коефіцієнт кореляції, який прирівнюється до одиниці при високому рівні SNR.

Алгоритм, спираючись на , (2.3) і (2.4) використовує надлишковість створену ЦП для приблизної оцінки часу затримки, використовуючи автокореляційну функцію  $\gamma(k)$ , енергію  $\Phi(k)$  і змінний розмір кадру  $L$ . Алгоритм може бути спрощено

рекурсивним розрахунком  $\gamma(k)$  і  $\Phi(k)$ . Таким чином приблизний рознос частот може бути виражений як

$$\hat{\nu}_0 = -\frac{1}{2\pi T} \arg \{\gamma(\hat{\tau}_0)\}. \quad (2.5)$$

З урахуванням оцінок ЦП  $\hat{\tau}_0$  в (2.2) і  $\hat{\nu}_0$ , в (2.5) груба синхронізація досягається компенсацією цих часових і частотних зсувів вхідного сигналу. Тепер, виявлення стільника може починатись з видалення ЦП та аналізу сигналу в частотній області. Коли приймач в готовності до відстеження, його місцезнаходження може бути обчислено методом OTDOA.

Цей метод полягає в визначенні часової затримки між опорними базовими станціями і сусідніми базовими станціями для розрахунку місцезнаходження. Як показано на рисунку 2.1 - виміри різниці часу відповідають гіперболам, що пересікаються вказуючи місцезнаходження приймача, яке потім вираховується за допомогою трилатерації. Таким чином часова затримка між сигналом базової станції  $1$  та базової станції  $i$  буде:

$$t_1 - t_i = \frac{\sqrt{(x_1-x)^2+(y_1-y)^2} - \sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2}}{c}, \quad (2.6)$$

де  $x$  і  $y$  координати приймача,  $x_1$  і  $y_1$  – координати БС1,  $x_i$  і  $y_i$  – координати БС  $i$ , і  $c$  – швидкість поширення електромагнітних хвиль.

За (2.6) - місцезнаходження приймача може бути визначене за наявності як мінімум двох вимірів часових затримок. Цей розрахунок потребує знання місцезнаходження базових станцій та часових затримок між їхніми виходами на передачу. Але стандарт LTE не передбачає надсилання такої інформації на обладнання користувача. Тому, обладнання користувача надсилає інформацію щодо часових затримок на мережевий сервер, для визначення місцезнаходження. Коли сервер визначив місцезнаходження -він відсилає цю інформацію назад користувачеві. OTDOA працює в LTE мережі як засіб визначення місцезнаходження всередині мережі

базових станцій, сигнал яких надходить на SDR приймач, дозволяючи вирахувати його місцезнаходження [15].

### 2.2.2 Метод енергодетекції на основі SDR приймача

Для визначення доступності каналу застосовується визначення рівню сигналу (Received Signal Strength Indicator, RSSI), час сканування (ЧС), час зайнятості (ЧЗ) – параметри, що вимірюються AD9361 передавцем всередині SDR платформи. RSSI – відносна величина сили отриманого сигналу. ЧС – тривалість сканування обраного каналу. ЧЗ – період, протягом якого канал має RSSI вищий порогового. Відсоток зайнятості (ВЗ) – відношення часу зайнятості до часу сканування.

Як проілюстровано на рисунку 2.12, обирається цільовий канал визначеної ширини для прослуховування протягом ЧС. Потім отримується максимальна величина RSSI і відсоток зайнятості.

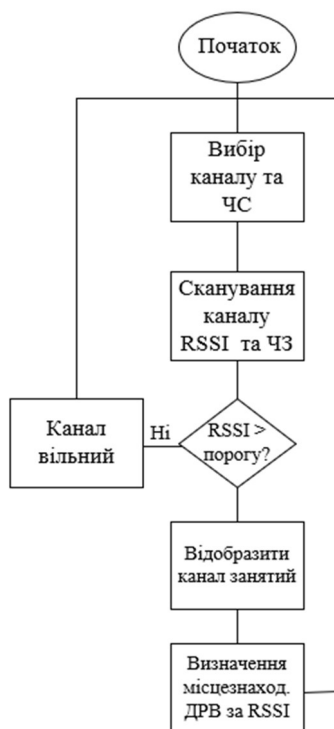


Рисунок 2.12 Алгоритм детекції сигналу за допомогою методу ЕД

Далі максимальний RSSI та ВЗ порівнюють з попередньо визначеним порогом зайнятості для прийняття рішення зайнятий канал чи ні.

Якщо максимальний RSSI вищий за пороговий RSSI і ВЗ вищий за пороговий ВЗ, приймається рішення що канал зайнятий. Визначення дистанції між виявленим передавачем та приймаючою антеною досягається використанням антен направленої дії та моделі втрат на шляху логарифмічної відстані. Алгоритм наведено на рисунку 2.13

```

while time <  $ST$  do
    Listen to the target channel
    Get  $RSSI$  and  $OT$ 
end while
Get  $max_{RSSI}$  and  $OR$ 
if  $max_{RSSI} < RSSI_{Th}$  &  $OR < OR_{Th}$  then
    Channel is idle
else
    Channel is occupied
    if antenna is directive then
         $d \leftarrow 10^{(max_{RSSI} - A)/(10n)}$ 
    end if
end if

```

---

Рисунок 2.13 Алгоритм сканування спектру методом ЕД

$A$  – RSSI виміряне на 1 м і  $n$  – втрати на шляху (ВШ), експонента визначена як емпірична константа, що залежить від прогнозованого середовища.  $N$  отримується з наступного рівняння:

$$n = \frac{PL(d) - PL(d_0)}{10 \log_{10}(\frac{d}{d_0})}, \quad (2.7)$$

де  $d_0$  – опорна дистанція, яку можна прирівняти до 1 м.

Описане формулою (2.7) рішення було випробувано на платформі SDR приймача та успішно виміряло потужність отриманого сигналу та визначило його полярні координати. Не зважаючи на це – сигнали з низьким SNR іноді випадково

виявляються, в такому випадку рішення з використанням ЕД не здатне розрізнити потужність сигналу та потужність шуму[17].

Тому для системи описаної в 2.1.2 було додано крок з ЦФД після ЕД.

### 2.2.3 Виявлення енергії та циклостаціонарних функцій на основі спектрального зондування

Більшість сигналів мають певні періодично повторювані параметри. Опираючись на ці характеристики, можливо виявити навіть малопотужні сигнали, приховані в шумах. Також рішення засновані на CFD є не когерентними методами виявлення, тому вони не потребують будь яких попередніх відомостей з приводу форми сигналу. За допомогою спектральної кореляційної функції характеризується циклостаціонарний сигнал. Це відбувається шляхом обчислення спектральної щільності усередненої за часом кореляції сигналу, згідно формули

$$S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi} d\tau, \quad (2.8)$$

де  $R_x(\tau)$  – змінна в часі автокореляційна функція періодичного сигналу  $x(t)$  з періодом  $T_0$  і  $\alpha = m/T_0$  є частотою циклу ( $m$  є цілим числом).

$$R_x(t, \tau) = E \left\{ x \left( t + \frac{\tau}{2} \right) x^* \left( t - \frac{\tau}{2} \right) \right\} = R_x(t + T_0, \tau + T_0), \quad (2.9)$$

Принциповою перевагою методу SCF є вирізнення сигналу на фоні енергії шуму за допомогою (2.8) і (2.9). Циклостаціонарні характеристики сигналу не дублюються в потужнісній спектральній густині (ПСГ), крім того вони відтворюються в СЦФ, який отримано перетворенням Фур'є шляхом циклічної автокореляції. Воно полягає в спектральній надмірності двох окремих компонент спектру.

Для прийняття рішення SCF, поріг  $C$  вимірюється коли сигнал відсутній наступним чином:

$$C_{TH} = \frac{\max [I(\alpha)]}{\sqrt{\sum_{\alpha=0}^N I^2(\alpha)/N}} \quad (2.10)$$

де  $N$  – довжина сигналу і  $I$  задано виразом:

$$I(\alpha) = \max |C_x^\alpha(f)|$$

де  $C_x^\alpha(f)$  визначає коефіцієнт кореляції і може бути виражений як

$$C_x^\alpha(f) = \frac{c_x^\alpha(f)}{\left[s\left(f+\frac{\alpha}{2}\right)s\left(f-\frac{\alpha}{2}\right)\right]^2} \quad (2.11)$$

Рішення виявлення / не виявлення сигналу приймається наступним чином :

якщо  $C_i \leq C_{TH}$ : сигнал присутній

якщо  $C_i > C_{TH}$ : сигнал відсутній

де  $C_i$  – коефіцієнт миттєвої кореляції функції  $C_x^\alpha(f)$  отриманого сигналу.

Вимірявши поріг за допомогою (2.10) та (2.11) стає зрозуміло, що задум зондування спектру полягає в комбінації ЕД і ЦФД. Також, в даному рішенні додано циклостационарний крок, у разі якщо рішення не є очевидним, що знижує складність та витрати часу для виконання алгоритму. Тому, якщо  $\max RSSI$  результуюче з ЕД спектрального зондування є достатньо високим – приймається рішення що канал зайнятий (низьким – канал є вільним відповідно). Але якщо відповідь є чимось середнім – запускається метод ЦФД.

Фактично є попередньо визначені порогові значення  $P_1$  і  $P_2$ , і якщо  $\max RSSI \leq P_1$  – канал вільний, інакше, якщо  $\max RSSI \geq P_2$  – канал зайнятий. У разі якщо  $P_1 < \max RSSI < P_2$  - потрібно пройти СЦФ перевірку, щоб визначити чи є сумнівне значення  $RSSI$  сигналом, чи шумом, порівнюючи  $C_i$  отриманого сигналу з  $C_{TH}$ .

Після цього  $P_1$  і  $P_2$  оновлюються відповідно до умов навколишнього середовища.



Після отримання результату SCF, отримані значення  $\max_{RSSI}$  зберігаються в буфер (буфер 1 і буфер 2 для  $P_1$  і  $P_2$  відповідно). Якщо буфер заповнюється – це значить що отримано відповідне порогове значення і нове значення  $\max_{RSSI}$  додається до буфера.

Для отримання точних розрахунків  $\max_{RSSI}$ , особливо для низьких рівнів SNR, застосовується фільтр Калмана до кожного виміру. Цей циклічний процес ефективний для не чітких, прийнятих з шумами даних[16]. Алгоритм наведено на рисунку 2.14.

---

```

Initialise  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $C_{TH}$  and empty Buffer1, Buffer2
while time < ST do
    Listen to the target channel
    Get  $RSSI$ 
end while
Get  $\max_{RSSI}$ 
 $RSSI_{filtered} \leftarrow$  Kalman filter ( $\max_{RSSI}$ )
if  $RSSI_{filtered} \leq P_1$  then
    Channel is idle
else if  $RSSI_{filtered} \geq P_2$  then
    Channel is occupied
else
     $R \leftarrow$  detected samples vector with SDR
    SCF( $R$ )
    if  $C_I < C_{TH}$  then
        Channel is idle
        add  $RSSI_{filtered}$  to Buffer1
        if Buffer1 is full then
             $P_1 \leftarrow$  mean (Buffer1)
        end if
    end if
    if  $C_I \geq C_{TH}$  then
        Channel is occupied
        add  $RSSI_{filtered}$  to Buffer2
        if Buffer2 is full then
             $P_2 \leftarrow$  mean (Buffer2)
        end if
    end if
end if
end if

```

---

Рисунок 2.14 Алгоритм сканування спектру методом ЕД та ЦФД

### 2.2.4 АОА

Багато алгоритмів АОА полягає в масиві кореляційних матриць. На рисунку 2.15 зображено отримання масивом антен випадкових сигналів з різних напрямків.

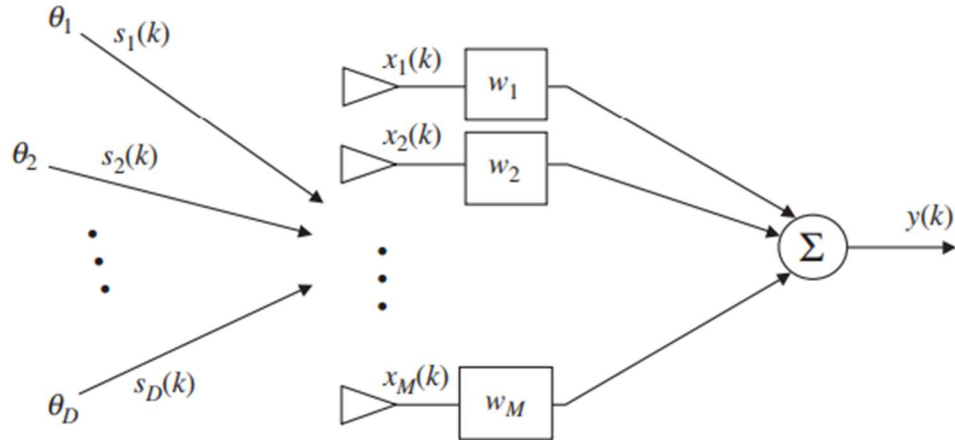


Рисунок 2.15 Надходження сигналів на антенну решітку

Зображено надходження  $D$  сигналів з  $D$  напрямків. Вони надходять на антенну решітку з кількістю в  $M$  елементів. Кожен сигнал  $x_m(k)$  містить Гаусівський шум. Час виражено як  $k$ th. Таким чином масив може бути відображено в наступному вигляді:

$$y(k) = \bar{w}^T * \bar{x}(k), \quad (2.12)$$

де

$$\bar{x}(k) = [\bar{a}(\theta_1) \quad \bar{a}(\theta_2) \quad \dots \quad \bar{a}(\theta_D)] * \begin{bmatrix} s_1(k) \\ s_2(k) \\ \dots \\ s_D(k) \end{bmatrix} + \bar{n}(k) = \bar{A} * \bar{s}(k) + \bar{n}(k), \quad (2.13)$$

і

$$\bar{w} = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_M]^T,$$

де  $\bar{w}$  – вага масиву,  $\bar{s}(k)$ - вектор комплексних монохроматичних сигналів в момент часу  $k$ ,  $\bar{n}(k)$ - вектор шуму в кожному елементі  $m$ ,  $\bar{a}(\theta_i)$  – вектор напрямку для  $\theta_i$  напрямків надходження сигналу,  $\bar{A}$  – матриця  $M \times D$  векторів напрямку  $\bar{a}(\theta_i)$

Кожен з сигналів наведених в (2.13) надходить під кутом  $\theta_i$  і його захоплює антенний елемент  $M$  масиву з (2.12). Від початку вважається, що сигнали монохроматичні і кількість вхідних сигналів  $D < M$ . Зрозуміло, що сигнали змінні в часі.

Якщо реальне співвідношення сигналу до шуму не відоме ми можемо виконати усереднену за часом кореляцію. таким чином матриці будуть визначатись як:

$$\hat{R}_{xx} \approx \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{x}(k) \bar{x}^H(k) \quad \hat{R}_{ss} \approx \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{s}(k) \bar{s}^H(k) \quad \hat{R}_{nn} \approx \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{n}(k) \bar{n}^H(k) \quad (2.14)$$

Метою визначення АОА є знайти функцію, яка визначає кути надходження покладаючись на максимуми і кут, враховуючи (2.14). Ця функція зазвичай називається псевдоспектром  $P_B(\theta)$  і вимірюється в енергії або в ватах. Існує безліч способів її визначення, наприклад спосіб Барлетта:

$$P_B(\theta) = \bar{\alpha}^H(\theta) \bar{R}_{xx} \bar{\alpha}(\theta), \quad (2.15)$$

Таким чином, наведений в (2.15) спосіб визначає просторову версію усередненої періодограми і визначає діаграму направленості АОА [18].

### 2.2.5 TDOA

В експерименті описаному в 2.1 було застосовано декілька методів для визначення часової затримки: лінійний пошук, алгоритм Фанга, метод найменших квадратів.

Метод лінійного пошуку полягає в дискретизації простору в сітку розміром  $M * N$  і розрахунку очікуваного значення TDOA для кожного квадрату в координатній сітці і для кожної пари сенсорів  $(\tau_{mn,ij})$ . Після цього розраховується середня квадратична похибка (Mean Squared Error, MSE) і порівнюється з виміряними значеннями TDOA :

$$e_{mn} = \sum_{i=0}^{N-2} \sum_{j>i}^{N-1} (\tau_{mn,ij} - \tau_{ij})^2 \quad (2.16)$$

виходячи з (2.16) - квадрат з найменшим значенням  $e_{mn}$  вважається місцезнаходженням радіопередавача. Перевага цього методу полягає в його простоті в реалізації та забезпеченні ним хороших результатів. Очевидно, що якщо  $M \sim N$ , часова складність є  $O(N)^2$ , або, іншими словами, росте квадратично з кількістю елементів, на яку поділено територію.

Алгоритм Фанга полягає в визначенні точки перетину гіпербол, з використанням 3х сенсорів (одного як опорного). Існує кілька варіантів, залежно від геометрії (плоский та сферичний). Нехай є 3 сенсори, розташовані за координатами

$x_1 = [0,0]^T$ ,  $x_2 = [b, 0]^T$  та  $x_3 = [x_3, y_3]^T$ , і невідомий передавач  $x = [x, y]^T$

$$\tau_{12} = \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{(x - b)^2 + y^2} \quad \tau_{13} = \sqrt{x^2 + y^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \quad (2.17)$$

Перевагою описаного в (2.17) алгоритму Фанга є те, що час, необхідний для обчислень, є меншим ніж у випадку методу лінійного пошуку. Основною проблемою даного алгоритму є те, що при виборі еталонного приймача побудова графіків буде дещо неточною (для будь – якого приймача). Для цього було проведено дослід, у якому усі три приймача виступали в ролі опорних. Як видно з рисунку 2.16 – лінії не пересікаються в одній точці і для визначення точної локації необхідні ще подальші техніки.

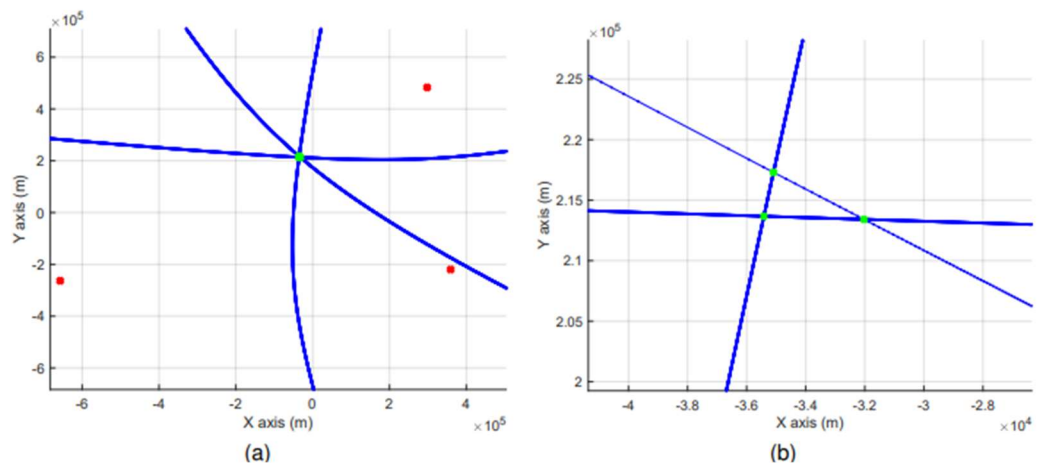


Рисунок 2.16 Алгоритм Фанга: зправа 3 точки перетину гіпербло, зліва вони зведені в одну точку зміною масштабу.

Метод найменших квадратів полягає в наступному: необхідно 4 сенсори, один з яких буде виступати в ролі опорного. TDOA між сенсором 1 та сенсором  $j$  розраховується як:

$$\tau_{1j} = d_1 - d_j = d_1 - \sqrt{(x_j - x_t)^2 + (y_j - y_t)^2} \quad (2.18)$$

Вираз (2.18) можна привести до вигляду:

$$2 * (\tau_{1j} * d_1 + (x_1 - x_j) * x_t + (y_1 - y_j) * y_t) = \tau_{1j}^2 + x_1^2 + y_1^2 - x_j^2 - y_j^2. \quad (2.19)$$

В виразі (2.19) можна вважати  $d_1$ , дистанцію між опорним сенсором та передавачем, іншою змінною і визначати наддетерміновану систему вигляду  $A * x = b$  Яку надалі розв'яжемо методом найменших квадратів:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (2.20)$$

Метод описаний формулою (2.20), як і алгоритм Фанга більш ефективний для підрахунків, але має бути обрано опорний сенсор, а також підхід з лінійним  $d_1$  може призвести до хибних результатів і потребує додаткових перевірок[19].

### 2.3 Кореляційна функція

Термокомпенсовані кварцеві генератори – (Temperature Compensated Crystal Oscillator , TCXO) SDR- приймачів найновіших версій мають гарантований  $\pm 1$  ppm (Parts per million), який має суттєвий вплив на результуючі виміри. За допомогою інструменту LTESS-Track може бути оцінено зсуви частот,  $\phi$  і можуть бути відрегульовані зсуви частоти центральної та частоти дискретизації.

Для корекції центральної частоти необхідно зауважити що реально виміряна центральна частота визначається як:

$$f'_c = (1 + \varphi) * f_c \quad (2.21)$$

Виходячи з (2.21) необхідно виконати фазовий зсув частоти кадрів оригінального сигналу позначеного як  $s[nT_s]$ . Кожен кадр отриманий за час  $n * T_s$  де  $T_s$  - період вибірки, що спостерігається, який відноситься до бажаного періоду вибірки,  $T_s$ , як  $T_s = \frac{T_s}{1+\varphi}$ .

Враховуючи вище наведені теоретичні викладки генерується новий сигнал на частоті, зміщеній до бажаної центральної частоти:

$$s''[nT_s] = s[nT_s] * e^{-j*2\pi*nT_s*\varphi f_c} \quad (2.22)$$

Тепер центральна частота відкоригована. Наступним після (2.22) кроком буде корекція частоти дискретизації. Для цього робиться перерозподіл масиву даних з бажаною швидкістю за допомогою інтерполяції між кадрами. Тому отримання зміненого сигналу  $s[nT_s]$  є наслідком зміни частоти дискретизації  $nT_s/(1+\varphi)$  до  $nT_s$ :

$$s[nT_s] = I(s''[nT_s], \frac{nT_s}{1+\varphi}, nT_s) \quad (2.23)$$

Після корекції сигналу описаної в (2.23) – необхідно визначити значення TDOA для кожної пари сенсорів. Для визначення затримки 2х сигналів, використовується функція взаємної кореляції. Для сигналів  $s_i$  і  $s_j$  вона визначається як:

$$(s_i * s_j)[\tau] = \sum_{n=0}^{N-1} \overline{s_i(nT_s)} s_j((n+\tau)T_s) \quad (2.24)$$

Після взаємної кореляції описаної в (2.24) для отримання затримки  $\tau_{ij}$  між сигналами береться максимальне значення результуючого вектора:

$$\tau_{ij} = \operatorname{argmax}[(s_i * s_j)[\tau]] \quad (2.25)$$

Окрім (2.24) і (2.25), існує три способи взаємної кореляції: використовуючи необроблені кадри IQ (iq), використовуючи абсолютні значення (abs) або фазову різницю (dphase). Якщо кожен кадр IQ відобразити як  $\alpha$  і  $\beta$ , відобразатись вищезгадані методи будуть як :

$$s_{i,iq}[nT_s] = \alpha[nT_s] + j\beta[nT_s], \quad s_{i,abs}[nT_s] = \sqrt{\alpha[nT_s]^2 + \beta[nT_s]^2}$$

$$s_{i,dpha}[nT_s] = \angle s_{i,iq}[nT_s] - \angle s_{i,iq}[(n-1)T_s]. \quad (2.26)$$

Для отримання TDOA з передавачем – ціллю, відбувається взаємна кореляція першої частини сигналу(2.26) , де знаходиться RS (рис. 2.17) і отримується затримка  $\tau_{ij,RS}$ . Знаючи місцезнаходження опорного передавача,  $p_{RS}$  і місцезнаходження сенсорів  $p_i$  і  $p_j$  стає можливим розрахунок очікуваної часової затримки прибуття:

$$T_{ij,RS} = \|p_{RS} - p_i\| - \|p_{RS} - p_j\| \quad (2.27)$$

З значеннями отриманими з (2.27) та з результатом взаємної кореляції можливо отримати значення TDOA невідомого передавача між  $i$  та  $j$  сенсорами:

$$\tau_{ij} = \tau_{ij,US} - (\tau_{ij,RS} - T_{ij,RS}) \quad (2.28)$$

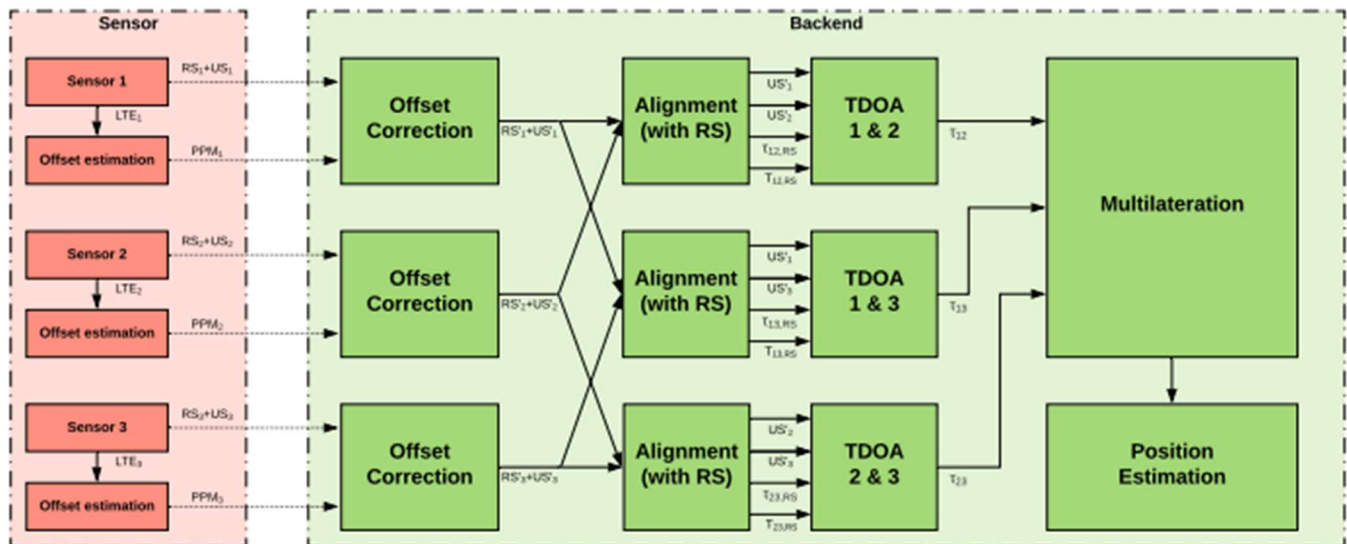


Рисунок 2.17 Загальна архітектура модуля локалізації TDOA

Окрім (2.28) також враховувати факт впливу помилки в 1 кадр при розрахунку TDOA. Для SDR приймачів, що здатні здійснювати вибірку з частотою 2 Msps (Megasamples per second, мегакадрів за секунду) , це значить що різниця в 1 кадр результуватиме помилці:

$$\frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^6} = 150 \text{ (м)} \quad (2.29)$$

Згідно (2.29) такий підхід спричиняє похибку близько 150 м. Район похибки можливо зменшити підвищивши частоту дискретизації та обчисливши взаємну кореляцію для версії з частішою дискретизацією. Рисунок 2.18 ілюструє як збільшення частоти дискретизації в 10 разів впливає на пік графіка. Таким чином можливо досягти більш точного визначення TDOA.

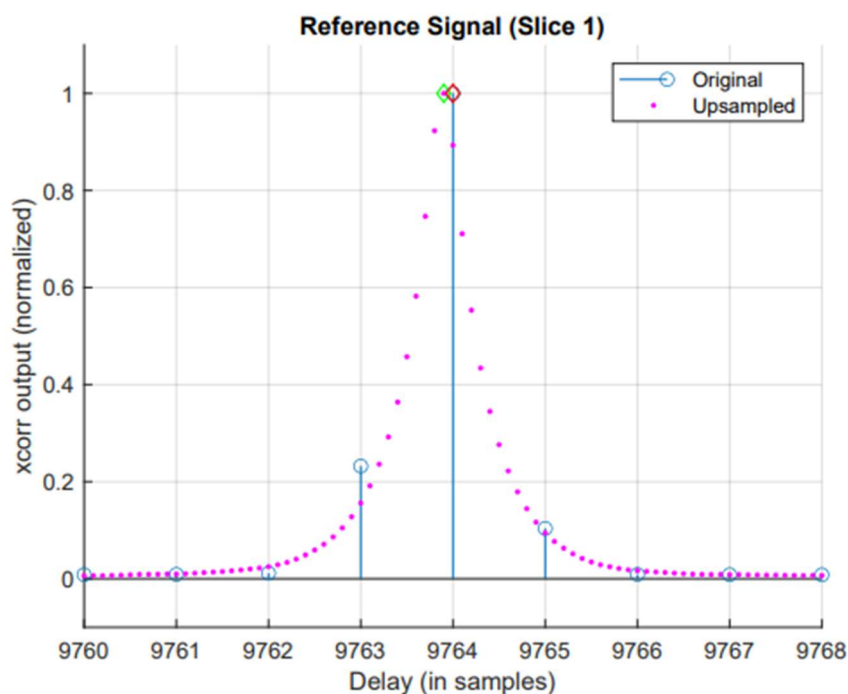


Рисунок 2.18 Крос-кореляція звичайного сигналу та сигналу з підвищеною частотою дискретизації

## 2.4 Висновки розділу

В даному розділі було розглянуто варіанти розгортання систем на основі SDR-приймачів, та вирішення завдань локалізації ДРВ за їхньою допомогою. Беручи до уваги викладене в розділі – найбільшу гнучкість з точки зору масштабів розгортання та роботи, та простоту досягнення результатів з відносно невеликою (150 м) похибкою – як метод для локалізації ДРВ обрано метод TDOA.



### 3. СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ SDR ПРИЙМАЧІВ

Для визначення місцезнаходження ДРВ було обрано на фізичному рівні систему SDR приймачів та мікрокомп'ютерів Raspberry Pi, для визначення місцезнаходження було обрано метод TDOA, для кореляції метод МНК. Обчислення даного алгоритму будуть проводитися за допомогою скрипта написаного в MATLAB та запущеного на Raspberry Pi.

Алгоритм для реалізації даного задуму буде синтезовано у даному розділі.

#### 3.1 Вимірювання часових затримок надходження сигналів на приймачі

Сигнал надходитиме на всенаправлену антену SDR приймача, підключеного по USB до Raspberry Pi. Система Raspberry Pi буде отримувати GPS синхронізацію та надсилатиме записаний сигнал на керуючий комп'ютер. Керуючий комп'ютер буде проводити оцінку сигналу методом мультилатерації та проводитиме кореляцію методом МНК (Рис. 3.1).

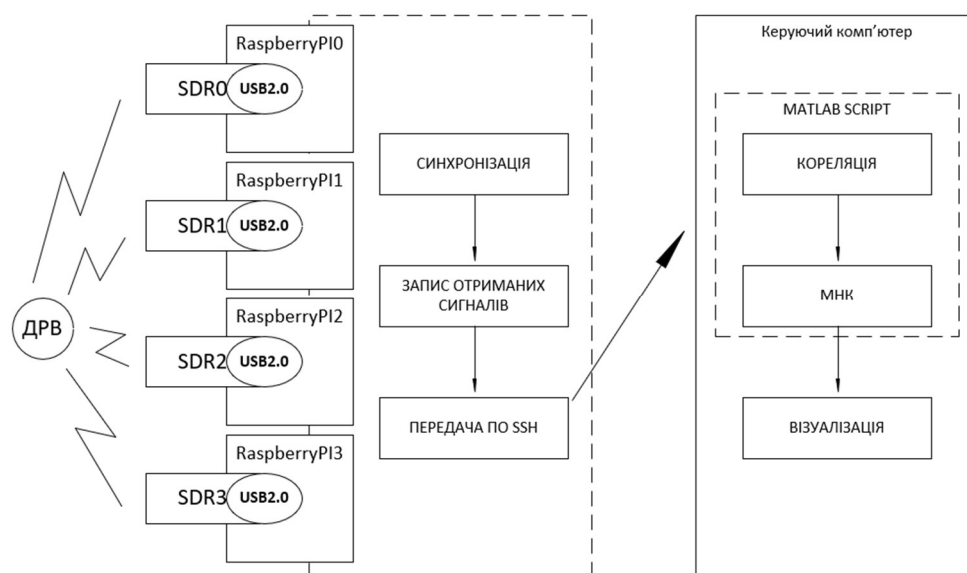


Рисунок 3.1 Структура системи, що базується на SDR приймачах

Порівняння часових затримок відбуватиметься шляхом кореляції :

$$\text{Corr}(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} S_1(t)S_2(t + \tau) \quad (3.1)$$

Таким чином за допомогою (3.1) порівнюються часові затримки сигналу на приймачі, прийнятому за опорний та на периферичному приймачі.

SDR приймачі знаходяться за відомими координатами  $(x_s, y_s)$ ,  $s = \overline{0, S}$ , на рисунку 3.2 зображено систему з чотирьох приймачів ( $S=4$ ). Джерело радіовипромінювання знаходиться за невідомими координатами  $(x, y)$ .

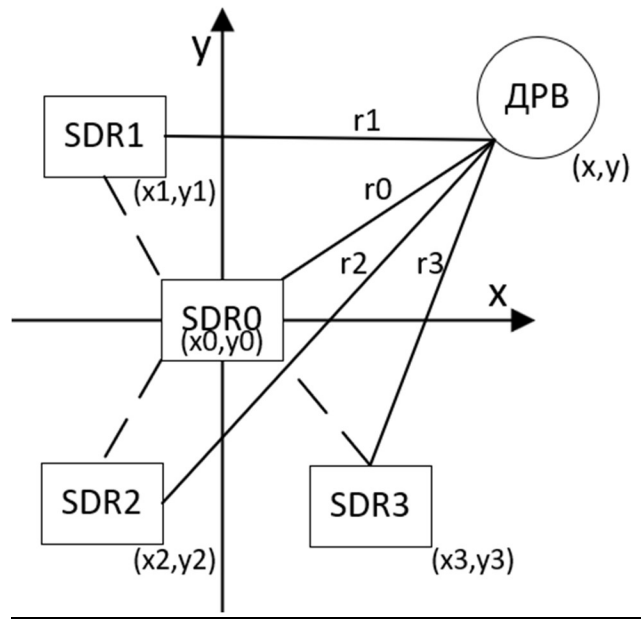


Рисунок 3.2 Система SDR приймачів

Щоб змодельовати часові затримки використовуються наступні формули: мультилатерація відбуватиметься шляхом порівняння часової затримки  $\tau_s$  надходження сигналу на датчики  $s = \overline{1, S}$  і датчиком  $s = 0$  (опорний приймач), що виражається формулою:

$$\tau_s = t_s - t_0 + v_s - v_0, s = \overline{1, S}, \quad (3.2)$$

де  $t_s$  – час прийому сигналу SDR приймачем,  $t_0$  – час прийому сигналу нульовим (опорним) SDR приймачем,  $v_s$  – некорельована похибка порівняння сигналу.

Для вимірювань часової затримки в мережі рівняння (3.2) доцільно привести до вигляду:

$$\Delta_s = c(t_s + v_s - t) - c(t_0 + v_0 - t) = r_s - r_0 + v_s - v_0 = r_s - r_0 + v_{s0}, s = \overline{1, S}, (3.2)$$

де  $\Delta_s$ - виміряна різниця дистанцій,  $c$  – швидкість світла,  $t$ - момент випромінювання сигналу  $r_s$ - дистанція між  $s$ -м приймачем та ДРВ,  $r_0$ - дистанція між опорним приймачем і ДРВ

У формулі (3.2) похибка вимірювання різниці дистанцій позначена як  $v_{s0}$ , та визначається за формулою

$$v_{s0} = v_s - v_0, (3.3)$$

$v_s$  – випадкові некорельовані величини, що дорівнюють похибці виміру дистанцій між ДРВ та SDR приймачами з дисперсією  $\sigma_{\Delta}^2 = c^2 \sigma^2$ .

Відстань між  $r_s$  та  $r_0$  знаходять як:

$$r_s - r_0 = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2} - \sqrt{x^2 + y^2}. (3.4)$$

Формула (3.4) набуває такого вигляду, оскільки координати опорного приймача SDR0 вважаються нульовими.

Похибки дистанцій  $v_{s0}$ ,  $s = \overline{1, S}$ , наведені в (3.3) є корельованими, через те, що містять похибку вимірювання опорного приймача  $v_0$ .

### 3.2 Визначення місцезнаходження ДРВ

Виконаємо перетворення (3.4) наступним чином:

Нехай

$$\Delta = r_s - r_0. (3.5)$$

Тоді  $r_s$  і  $r_0$  виразимо як:

$$r_s = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2}, r_0 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.6)$$

Подамо вираз (3.5) у вигляді:

$$(\Delta + r_0)^2 = r_s^2 \quad (3.7)$$

Розкривши дужки (3.7) маємо:

$$\Delta^2 + 2r_0\Delta + r_0^2 = r_s^2 \quad (3.8)$$

Підставивши в (3.8) вираз (3.6):

$$\Delta^2 + 2r_0\Delta + x^2 + y^2 = (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 \quad (3.9)$$

В (3.9) розкривши дужки та перенісши невідомі отримуємо:

$$\Delta^2 + 2r_0\Delta = -x^2 - y^2 + x^2 - 2xx_s + x_s^2 + y^2 - 2yy_s + y_s^2 \quad (3.10)$$

Скоротивши (3.10) та розділивши відому та невідому частину рівняння приходить до вигляду:

$$2r_0\Delta + 2xx_s + 2yy_s = x_s^2 + y_s^2 - \Delta^2 \quad (3.11)$$

Місцеположення джерела розраховуватись буде за допомогою методу найменших квадратів (МНК).

Результати, отримані з (3.11) попередніх розрахунків записується у вигляді

$$\text{системи рівнянь:} \begin{cases} x * x_1 + y * y_1 + \Delta_1 * r_0 = 0.5(x_1 + y_1 - \Delta_1^2) \\ x * x_2 + y * y_2 + \Delta_2 * r_0 = 0.5(x_2 + y_2 - \Delta_2^2) \\ x * x_s + y * y_s + \Delta_s * r_0 = 0.5(x_s + y_s - \Delta_s^2) \end{cases} \quad (3.12)$$

В матричній формулі система (3.12) матиме вигляд:

$$\omega = 0.5(A^T \Sigma^{-1} A)^{-1} A^T \Sigma^{-1} b, \quad (3.13)$$

де  $\omega^T = (x, y, r_0)$  – вектор, що включає оцінки координат ДРВ

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & \Delta_{10} \\ x_2 & y_2 & \Delta_{20} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i & y_i & \Delta_{s0} \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} x_1 + y_1 - \Delta_{10}^2 \\ x_2 + y_2 - \Delta_{20}^2 \\ \dots \\ x_s + y_i - \Delta_{s0}^2 \end{bmatrix}; \quad \Sigma = \begin{bmatrix} 2\sigma_v^2 & \sigma_v^2 & \dots & \sigma_v^2 \\ \sigma_v^2 & 2\sigma_v^2 & \dots & \sigma_v^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_v^2 & \sigma_v^2 & \dots & 2\sigma_v^2 \end{bmatrix}.$$

Кореляційна матриця похибки оцінки вектора  $\omega$  визначається рівнянням:

$$\Omega = ((\bar{A}^0)^T H^{-1} \bar{A}^0)^{-1}, \quad (3.7)$$

Де  $H$  – матриця визначається за формулою

$$H = B \Sigma B; \quad B = \text{diag}\{\hat{r}_1, \hat{r}_2, \dots, \hat{r}_s\}; \quad R_i = \sqrt{(\hat{x}_0 - x_s)^2 + (\hat{y}_0 - y_s)^2}; \quad s=1, S$$

### 3.3 Висновки розділу

В даному розділі було синтезовано алгоритм визначення місцезнаходження та усунення похибок.

Визначення місцезнаходження відбуватиметься шляхом порівняння часової затримки сигналу, що надійшов на периферичний та на опорний передавач.

## 4.АНАЛІЗ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ SDR ПРИЙМАЧІВ

У даному розділі буде проведено статистичне моделювання розробленого алгоритму (3.1 – 3.13) за допомогою MATLAB, а також виконано аналіз отриманих результатів.

### 4.1 Симуляція алгоритму

В рамках симуляції опорний приймач вважатиметься розташованим у початку координат, тобто  $x_0 = 0, y_0 = 0$ , ще три приймачі будуть розташовані рівновіддалено навколо нього. Першу симуляцію було проведено з похибкою вимірювання у 0.45 м. Відстань між приймачами моделюється у 100 метрів. Результати симуляції наведені на рисунку 4.1.

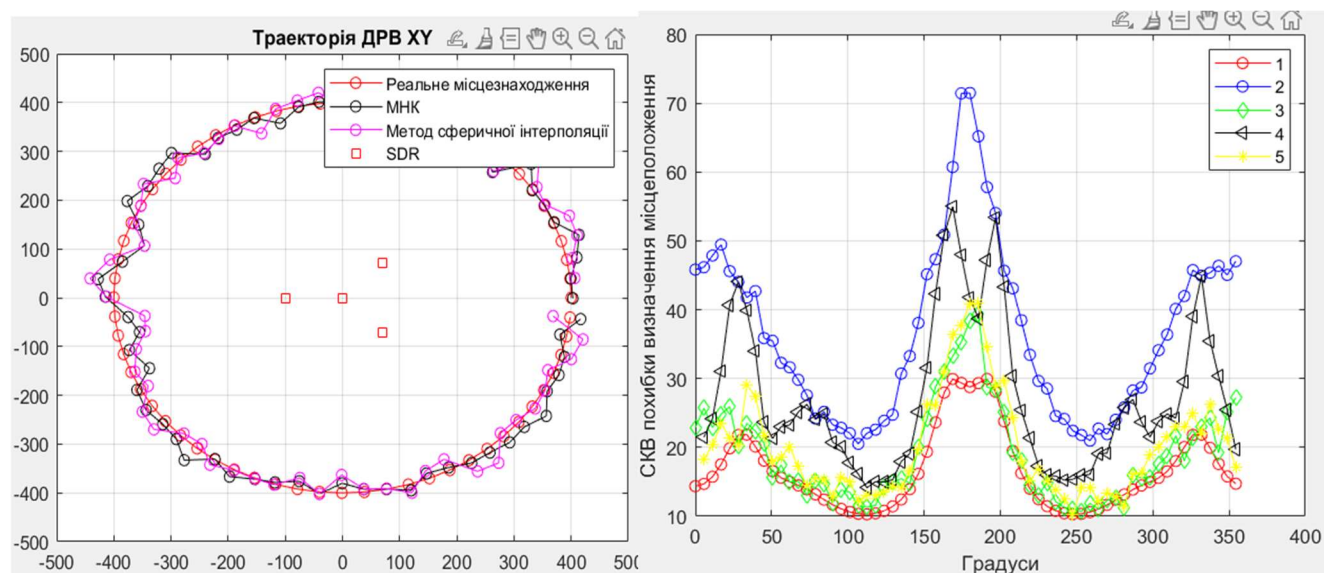


Рисунок 4.1 Вимір для системи з 4х приймачів, похибка вимірювання 0.45 м.

На рисунку 4.1 (і наступних рисунках наведених у розділі) зліва – графік реальних та розрахованих місць знаходження ДРВ. Справа графік кореляції де відповідними цифрам лініями позначено: 1 - нижня границя Рао-Крамера, 2 - Теоретичне значення похибки оцінки за МНК, 3 - СКВ похибки МНК, 4 – Теоретичне

значення похибки за методом сферичної інтерполяції, 5-реальне значення похибки за методом сферичної інтерполяції.

Як видно з першого результату моделювання похибка визначення місцезнаходження сягає до 50 метрів ( в залежності від положення ДРВ відносно приймачів, якщо опорний (нульовий) приймач і  $s$ -й приймач на одній лінії – похибка більша, що видно з графіку траєкторії та графіку кореляції)

Другу симуляцію було проведено з похибкою вимірювання у 0.9 м. Результати симуляції наведені на рисунку 4.2.

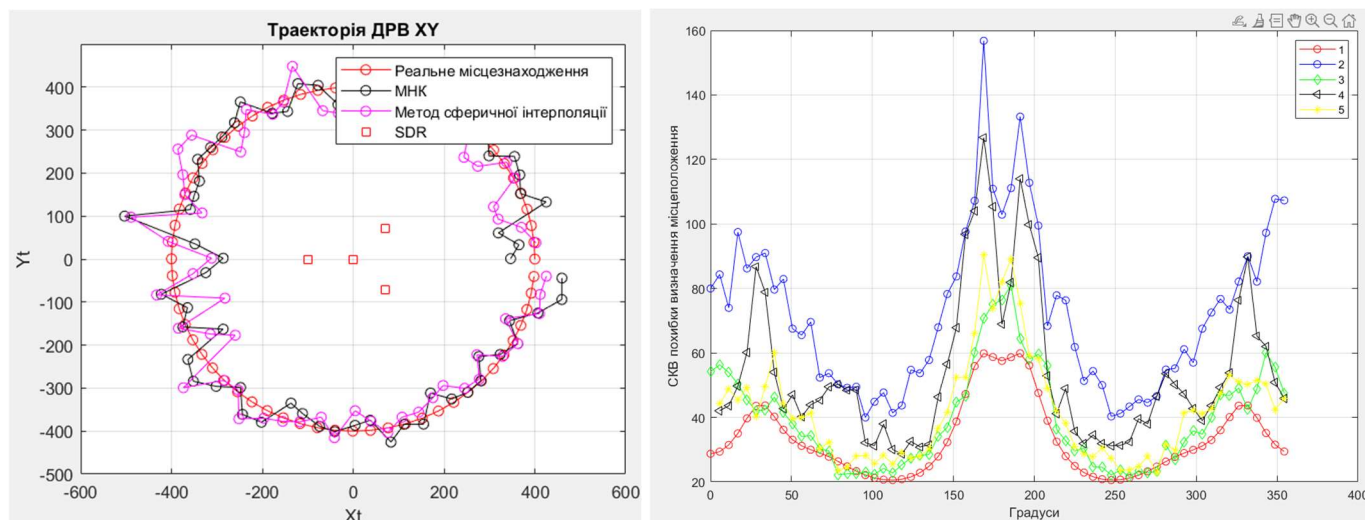


Рисунок 4.2 Вимір для системи з 4х приймачів, похибка вимірювання 0.9 м.

З рисунку 4.2 видно що похибка визначення місцезнаходження методом сферичної інтерполяції сягає до 100 метрів. Третю симуляцію було проведено з похибкою вимірювання до 2м (рис. 4.3)

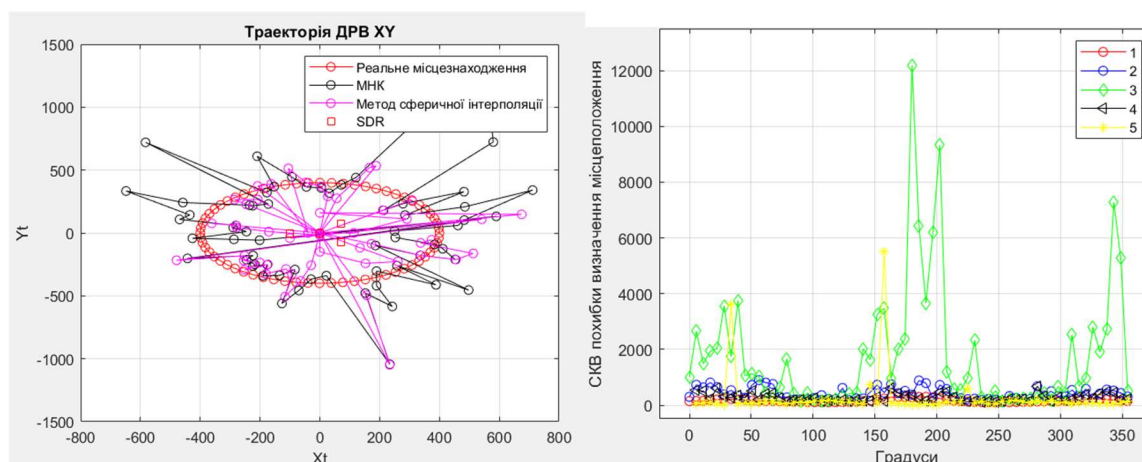


Рисунок 4.3 Вимір для системи з 4х приймачів, похибка вимірювання 2 м.

З рисунку 4.3 видно що похибка визначення місцезнаходження методом сферичної інтерполяції становить до 500 метрів. Також стає очевидним, що теоретичні значення за МСІ значно ближчі до СКВ за МСІ, ніж теоретичні та СКВ при МНК, тож для запуску подібного алгоритму на реальній системі доцільно використовувати МСІ. Найбільша похибка виникає в місцях, де опорний приймач знаходиться за робочим приймачем системи.

Наступні три симуляції було проведено за умови наявності дев'яти приймачів (один опорний, виступає в якості опорного приймача)

На рисунку 4.4 наведено симуляцію роботи дев'яти приймачів з похибкою вимірювань 0.45 м.

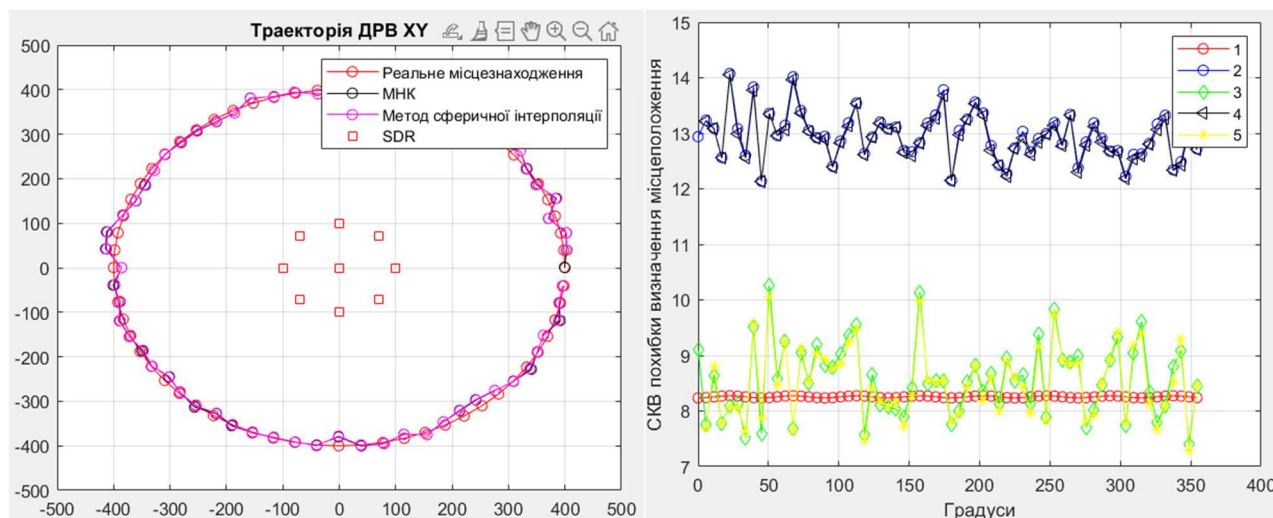


Рисунок 4.4 Вимір для системи з 9и приймачів, похибка вимірювання 0.45 м.



З рисунку 4.4 видно що похибка визначення місцезнаходження методом сферичної інтерполяції сягає до 10 метрів. Відсутність ділянок, опрацювання яких відбувається  $s$ -м приймачем та опорним приймачем, що знаходяться на одній лінії призвело до зникнення «сплесків» на графіках, ділянок з значно більшою похибкою.

На рисунку 4.5 наведено симуляцію роботи дев'яти приймачів з похибкою вимірювань 0.9 м.

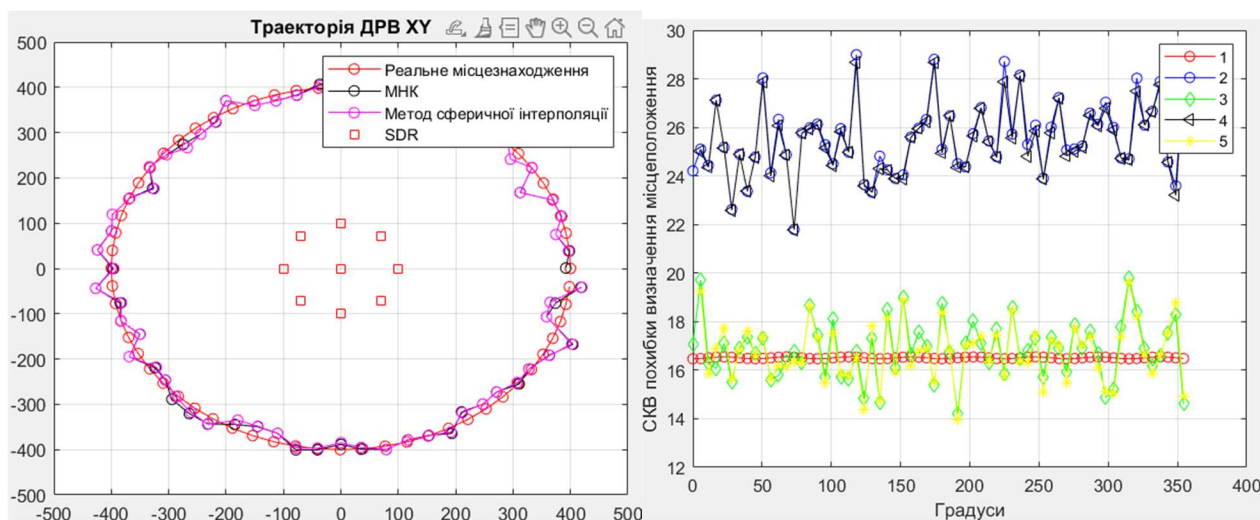


Рисунок 4.5 Вимір для системи з 9и приймачів, похибка вимірювання 0.9 м.

З рисунку 4.5 видно що похибка визначення місцезнаходження методом сферичної інтерполяції сягає до 20 метрів.

На рисунку 4.6 наведено симуляцію роботи дев'яти приймачів з похибкою вимірювань 0.9 м.

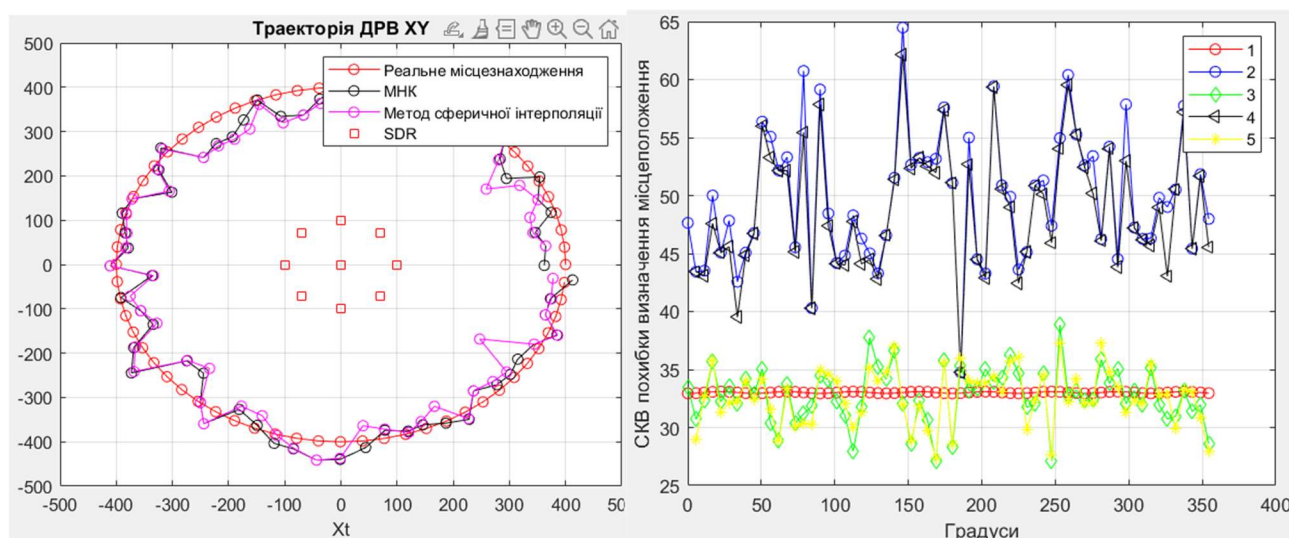


Рисунок 4.6 Вимір для системи з 9и приймачів, похибка вимірювання 1.8 м.

З рисунку 4.6 видно що похибка визначення місцезнаходження методом сферичної інтерполяції сягає до 40 метрів.

З проведених симуляцій стає очевидним що збільшення кількості приймачів суттєво збільшує точність визначення ДРВ.

Розроблений алгоритм було представлено в V Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів «Радіoeлектроніка в XXI столітті» [20].

## 4.2 Висновки розділу

Було проведено статистичне моделювання MATLAB, результати якого наведено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 результати симуляції MATLAB

| к-ть<br>вимірюв.<br>прм. | похибка | 0.45м (1.5 нс) | 0.9м (3 нс) | 1.8м (6 нс) |
|--------------------------|---------|----------------|-------------|-------------|
| 4 приймачі               |         | 50 м           | 100 м       | 500 м       |
| 9 приймачів              |         | 10 м           | 20 м        | 40 м        |

Оскільки при симуляції визначення місцеположення ДРВ теоретичне значення похибки суттєво відрізнялось від практичного – було застосовано метод сферичної інтерполяції, в якому застосовується матриця дисперсії похибок вимірювань.

Критичну роль відіграє кількість приймачів та їхнє положення відносно ДРВ. Знаходження опорного та приймача та іншого приймача на одній лінії відносно ДРВ суттєво знижує точність вимірів. Збільшення кількості приймачів точність вимірів збільшує.

Система є дуже залежною від рівня синхронізації, що частково може бути компенсовано кількістю та способом розміщення приймачів.

## 5.РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

В даному розділі буде розроблено стартап – проект виводу на ринок описаного в цій роботі продукту.

### 5.1 Аналіз наявної ідеї

Ідея полягає в розробці, з використанням синтезованого алгоритму системи SDR приймачів, легкої в використанні і гнучкої в розгортанні. Ідею буде описано в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 Аналіз ідеї проекту

| Зміст ідеї                                           | Напрямки застосування | Вигоди для користувача                     |
|------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|
| Система визначення місцезнаходження радіопередавачів | 1. Військова справа   | Радіоелектронна розвідка                   |
|                                                      | 2. Туризм             | Виявлення туристів що заблукали            |
|                                                      | 3. Охорона природи    | Пошук бракон'єрів за мобільними телефонами |

Існуючим аналогом можна вважати описану в даній роботі систему KrakenSDR. Принциповою відмінністю від системи KrakenSDR є те, що розроблена в цій роботі система допускає масштабування, тобто площа ефективного покриття буде залежати лише від кількості і способу розміщення приймачів, в той час як KrakenSDR є системою винятково точковою.

### 5.2 Створення маркетингової концепції продукту

Окрім системи KrakenSDR ( конкурент №1 )конкурентами продукту може бути ситема SignalShark (конкурент №2 ). Порівняльний аналіз проведено буде в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Порівняльний аналіз наявних на ринку аналогів запропонованого продукту

| № | Техніко-економічні характеристики ідеї | (потенційні) товари/концепції конкурентів |             |             | (слабк<br>а<br>сторо<br>на) | (нейт<br>ральн<br>а<br>сторо<br>на) | (силь<br>на<br>сторо<br>на) |
|---|----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
|   |                                        | Мій<br>проект                             | Конкурент 1 | Конкурент 2 |                             |                                     |                             |
| 1 | Доступність для покупки в Україні      | так                                       | можливо     | ні          |                             |                                     | +                           |
| 2 | Розмір капіталовкладень                | Невеликі                                  | Помірні     | Великі      |                             |                                     | +                           |
| 3 | Точність                               | Помірна                                   | Висока      | Висока      | -                           |                                     |                             |
| 4 | Швидкодія                              | Реальний час                              | Низька      | Помірна     |                             |                                     | +                           |
| 7 | Можливість масштабування мережі        | Так                                       | Ні          | Ні          |                             |                                     | +                           |

Таким чином стає очевидним, що розроблена система конкурентноспроможна за рахунок доступності, та дешевизни

### **5.3 Визначення перспектив реалізації та маркетингова стратегія**

З точки зору технології створення товару – розроблений алгоритм і програмний код до нього є інтелектуальною власністю автора роботи, тому доступні в повній мірі. SDR – приймачі та мікрокомп'ютери Raspberry Pi доступні для покупки в Україні.

Комплектуючі будуть в залежності від потреби з урахуванням цін наданих постачальником. Збір та програмування на початкових етапах не потребують окремих майстерень, лабораторій, додаткового обладнання, тощо.

Технологія може удосконалюватись розробкою та випробовуванням нових механізмів синхронізації окрім GPS, розроблятись та тестуватись нові канали зв'язку з сервером, розробка схеми збору системи від автономних елементів живлення, інтеграція нанесення ДРВ на карту в існуючих додатках ситуативної обізнаності.

На початкових етапах розповсюдження відбуватиметься через торгові майданчики в мережі інтернет, цільовою аудиторією будуть радіолюбители, та інші бажаючі встановити контроль над периметром на предмет виявлення ДРВ в даному периметрі. Надалі буде орендовано приміщення для проведення дослідів та збірки систем.

Перешкодою може стати розробка більш доступних та простіших для освоєння систем.

### **5.4 Висновки розділу**

Специфіка даного стартапу дозволяє почати виробництво та реалізацію з мінімальними капіталовкладеннями, а відповідно і мінімальними ризиками.

Подальшим напрямком розробок є інтеграція результату обчислень в існуючі додатки ситуативної обізнаності, налаштування системи для роботи з портативними елементами живлення, пошук альтернативних способів синхронізації.

Цільовою аудиторією є військові, туристичні агенства, та радіолюбители.

Є доцільним впроваджувати запропонований варіант для ринкової реалізації та доцільною є подальша імплементація проекту, з перспективою на створення глобальної централізованої мережі, здатної надавати інформацію про ДРВ.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішена задача визначення місцеположення джерела радіовипромінювання, яка полягала в розробці алгоритму локалізації на основі системи SDR приймачів.

Основні результати роботи полягають у:

1. Розглянуто сфери застосування систем визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання, відповідно до потреб користувачів різних галузей, порівняно їхні властивості та принципи роботи.
2. Проаналізовано принципи визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання з використанням системи SDR приймачів.
3. Розглянуто існуючі методи визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання, та обрано тип вимірювання TDOA, як такий, що дозволяє збільшувати кількість вимірювальних датчиків SDR в мережі, а відповідно і зону покриття такої мережі.
4. Розглянуто спосіб визначення різниці часів приходу сигналів на основі кореляційної функції.
5. Синтезовано алгоритм визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання на основі системи SDR датчиків.
6. За допомогою статистичного моделювання підтверджена правильність роботи розробленого алгоритму. Проведено аналіз для різної кількості приймачів SDR в системі, та при різній похибці вимірювань часових затримок. Точність визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання при похибці вимірювання в 3 нс та за використання чотирьох приймачів сягає 100 метрів. Для підвищення точності було збільшено кількість приймачів до дев'яти, що дозволило зменшити похибку до 20 метрів.
7. Запропонований в даній роботі алгоритм, та спосіб налаштування мережі



приймачів дозволить створювати легкі в розгортанні, фінансово доступні, та гнучкі, з точки зору масштабування периметри (точки), які вказуватимуть місцезнаходження ДРВ у зоні досяжності, що може бути корисним для протидії радіохуліганам, виявлення наближення до периметру та його перетину БПЛА, роботу несанкціонованого радіопередавача, тощо.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G / IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018; José A. del Peral-Rosado, Ronald Raulefs, José A. López-Salcedo, Gonzalo Seco-Granados; p. 10.
2. Avalanche Beacon Comparison / D.B.A. Beacon Reviews, 2012; Achelis, Steven.
3. Homing In on Hidden Transmitter: Radio Device Gives Police a Leg Up on Car Thieves / Los Angeles Times, 1987; Ted Appel.
4. Spireon Relaunches the LoJack Brand with Improved Technology and Connected-Car Functionality; Spireon, 2021; Irvine Calif.
5. Методи адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотного літального апарату на основі вимірювань сенсорної мережі / Монографія, Київ 2019; Жук С.Я., Товкач І.О.; ст. 11.
6. DJI's AeroScope Drone Detection Equipment, 2022. URL: <https://www.aerialarmor.com/drone-detection-equipment/dji-aeroscope>.
7. KrakenSDR is a 5-channel software-defined radio based on RTL-SDR/ Cnxsoft 2022; Jean-Luc Aufranc.
8. White paper 010 "RF Transmitter Localization" / Narda Safety Test Solutions GmbH SUBSIDIARY OF L3HARRIS TECHNOLOGIES, Pfullingen, Deutschland 2019; Helmut Keller; p. 2.
9. GPS-маяк BI 310 CICADA V2 / Техконтроль, URL: <https://www.tehkontrol.ua/ukr-bi-310-cicada.html>.
10. Close-range indoor transmitter localization using a system of low-cost SDR receivers / aDCAE, Faculty of Electronics, Telecommunication and Information Technology, Politehnica University of Bucharest, Bucharest, Romania 2023; Costin-Emanuel Vasilea, Calin Biraa; p.11.
11. RTL2832U Datasheet / Realtek Semiconductor Corp., Hsinchu, Taiwan 2010;
12. "How Accurate is TDOA Geolocation?" / CRFS, URL: [https://pages.crfs.com/blog/how-accurate-tdoa-geolocation#:~:text=TDOA%20\(Time%20Difference%20Of%20Arrival,arrival%20times%20at%20the%20receivers](https://pages.crfs.com/blog/how-accurate-tdoa-geolocation#:~:text=TDOA%20(Time%20Difference%20Of%20Arrival,arrival%20times%20at%20the%20receivers).
13. "Direction finding using Bluetooth Angle of Arrival" / Insight SiP, Sophia–Antipolis, France 2022; Nick Wood.
14. Evaluation and Improvement of the RSSI-based Localization Algorithm / Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden 2015; Alireza Shojaifar; p. 19-21.
15. Software-Defined Radio LTE Positioning Receiver Towards Future Hybrid Localization Systems / Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Cerdanyola del Vallès, Spain 2013; Jos'e A. del Peral-Rosado Jos'e A. L'opez-Salcedo, Gonzalo Seco-Granados.

16. Real Time Implementation of SDR based RF Source Detection and Localization in Restricted Area / Center for Military Research Aouina, Tunisia 2022; Feten Slimeni, Tijeni Dalleji, Ala Agrbi, Amin Trabilsi, Nouredine Boulejfen.
17. "Set Up a TDOA System" / - Panoradio SDR (panoradio-sdr.de), 2019, URL: <https://panoradio-sdr.de/set-up-a-tdoa-system/>
18. Angle-of-Arrival Estimation / King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia, 2005; Muhammad Abdul Hadi
19. Signal Transmitter Localization using Low-cost SDR receivers / Universidad Carlos III de Madrid, Spain 2020; Yago Lizarribar
20. «Алгоритм визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі системи SDR приймачів»/ V Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів «Радіoeлектроніка в XXI столітті», травня Київ, Україна, 2023; Чмир Р. В. (керівник Товкач І. О.).

ДОДАТОК А  
Код MATLAB для моделювання алгоритму

```

close('all')
clear
ts=100;
c=3*10^8;
d=0.000000003;
ck = 1/16;

typeK=false;

x1=0;      y1=0;
x2=0.707*100;    y2=0.707*100;
x3=0.707*100;    y3=0.707*-100;
x4=-100;      y4=0;

%Xk=[0; 0.707*100; 100; 0.707*100; 0; 0.707*-100; -100; 0.707*-100; 0]; %
положення датчиків
%Yk=[0; 0.707*100; 0; 0.707*-100; -100; 0.707*-100; 0; 0.707*100; 100];

%Xk=[0; 0.707*20; 20; 0.707*20; 0; 0.707*-20; -20 ];
%Yk=[0; 0.707*20; 0; 0.707*-20; -20; 0.707*-20; 0 ];

% Xk=[0; x2; x3; x4;];
% Yk=[0; y2; y3; y4;];

Ntr=100;
N=64;
M=64;
w=6.28/M;
R=400;

Ianom=0;
Kgrad=180/3.14;
Krad=3.14/180;

for step = 1:N
    at(step)=Kgrad*(step-1)*w;
    xt(step)= R*cos((step-1)*w);
    yt(step)= R*sin((step-1)*w);
end

```

```
t=(1:N);
```

```
figure(1)
plot(xt,yt,'-or',Xk,Yk,'-sb'),title('ТРАЕКТОРИЙ XY'),
xlabel('Xt'),ylabel('Yt'), grid on;
```

```
XYom_SP=zeros(1,N);
XYod_SP=zeros(1,N);
XYom_SI=zeros(1,N);
XYod_SI=zeros(1,N);
XYom_SI_2=zeros(1,N);
XYod_SI_2=zeros(1,N);
XYom_FK_nk=zeros(1,N);
XYod_FK_nk=zeros(1,N);
XYom_FK_k=zeros(1,N);
XYod_FK_k=zeros(1,N);
XYom_FK_k_2=zeros(1,N);
XYod_FK_k_2=zeros(1,N);
```

```
for j = 1:Ntr
for k = 1:N
```

```
    as=at(k);
    xs=xt(k);
    ys=yt(k);
```

```
%    xs=40;
%    ys=10;
```

```
%%Розрахунок дальностей датчиків до ДРВ
```

```
%R1=sqrt((xs-x1)^2+(ys-y1)^2);
```

```
for i=1:length(Xk)
```

```
    Rk(i)=sqrt((xs-Xk(i))^2+(ys-Yk(i))^2);
```

```
end
```

```
%% Розрахунок часу надходження сигналу від ДРВ до датчика
```

```
%t1=ts+R1/c; t1z=t1+d*randn;
```

```
for i=1:length(Xk)
```

```
    tk(i)=ts+Rk(i)/c; tkz(i)=tk(i)+d*randn;
```

```
end
```

```

%% Різниця відстаней
%R21 = t2z*c-t1z*c;
for i=1:length(Xk)
    if(typeK==false)
        RKK(i) = (tk(i)*c-tk(1)*c)+d*randn*c;
    else
        RKK(i) = tkz(i)*c-tkz(1)*c;
    end
end

%% Метод сферичної інтерполяції
[xi_p,yi_p,ri_p]=N_simakov_P(c,Xk,Yk,tkz,RKK);
x_SI(k)= xi_p;
y_SI(k)= yi_p;
[XYom_SI(k),XYod_SI(k)]=disper(j,sqrt(xi_p^2+yi_p^2)-
sqrt(xs^2+ys^2),XYom_SI(k),XYod_SI(k));

%% Теоретична точність сферичної інтерполяції
[R_Q_C]=N_QuadraticCorrection(xs,ys,c,Xk,Yk,Rk,RKK,d);
P0_SI(k) = sqrt(R_Q_C(1,1)+R_Q_C(2,2));

%% Теоретична точність і фактична точність алгоритму сферичної інтерполяції,
другий крок
[fiAB,fi2]=N_QuadraticCorrection_step_2(xi_p,yi_p,ri_p,c,xs,ys,Rk,RKK,d,R_Q_C);
x_SI_2(k)= fiAB(1);
y_SI_2(k)= fiAB(2);
[XYom_SI_2(k),XYod_SI_2(k)]=disper(j,sqrt(fiAB(1)^2+fiAB(2)^2)-
sqrt(xs^2+ys^2),XYom_SI_2(k),XYod_SI_2(k));
P0_SI_2(k) = sqrt(fi2(1,1)+fi2(2,2));

[R,RR]=N_KorMatr_RDM(xs,ys,c,Xk,Yk,Rk,d);
sigmX(k)=sqrt(RR(1,1));
sigmY(k)=sqrt(RR(2,2));
sigmXY(k) = sqrt(RR(1,1)+RR(2,2));

end
end

'Finish'

```

figure(2)

```
plot(xt,yt,'-or', x_SI,y_SI,'-ok', x_SI_2,y_SI_2,'-om', Xk,Yk,'sr'),
title('Траекторія ДРВ XY'),
legend('Реальне місцезнаходження','МНК','Метод сферичної інтерполяції','SDR'),
xlabel('Xt'),ylabel('Yt'), grid on;
```

figure(3)

```
plot(at,signXY,      '-or') %1
hold on
```

```
plot(at,P0_SI,      '-ob') %2
plot(at,sqrt(XYod_SI),  '-gd') %6
plot(at,P0_SI_2,      '-<k') %3
%plot(at,sqrt(XYod_SP),  '-xc') %5
```

```
plot(at,sqrt(XYod_SI_2), '-*y') %7
legend('1','2','3','4','5'), % 1 - нижня границя Рао-Крамера, 2 - Теоретичне значення
похибки оцінки за МНК 3 - СКВ похибки МНК 4 - 2 і 3 за методом сферичної
інтерполяції
```

```
xlabel('Градуси'),ylabel('СКВ похибки визначення місцеположення'), grid on;
hold off
```

```
% at=at.*Krad;  
% %subplot(2,2,1:2);  
% figure(6)  
% polar(at,sqrt(xod),'-r'); pause  
% %subplot(2,2,3);  
% figure(7)  
% polar(at,sqrt(yod),'-r');pause  
% %subplot(2,2,4);
```