

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Радіотехнічних пристроїв та систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЖУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою

«Радіотехнічні інформаційні технології»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Алгоритм позиціонування об'єкта з використанням кутомір-
них вимірювань Wi-Fi роутерів»**

Виконав:

Студент 4 курсу, групи РТ-71

Матушенко Ігор Валерійович



Керівник:

Завідувач кафедри РТПС, професор

Жук Сергій Якович



Рецензент:

ст.в. каф. ТОР Булашенко А.В.

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Радіотехнічних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні інформаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій ЖУК

«12» квітня 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Алгоритм позиціонування об'єкта з використанням кутомірних вимірювань Wi-Fi роутерів», науковий керівник дипломної роботи Жук Сергій Якович, д.т.н., проф., затверджені наказом по університету від «18» травня 2021 р. №1205-с
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи тактико-технічні характеристики Wi-Fi роутерів. Особливості побудови. Алгоритми позиціонування. Кутомірні виміри Wi-Fi роутера.
4. Зміст роботи: розглянути задачі, структурну схему Wi-Fi роутера, провести аналіз тактико-технічних характеристик. Вивчити методи оцінки місцезнаходження об'єкту за допомогою бездротових мереж. Дослідити знаходження кутових вимірів роутера. Вивчення алгоритму MUSIC для визначення кутових координат.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 34 ілюстрації, презентація 17 слайдів

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 12 квітня 2021р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз підготовленого матеріалу	25.04.2021	
2	Аналіз актуальності теми	06.05.2021	
3	Вивчення особливостей побудови пристрою. Аналіз характеристик.	13.05.2021	
4	Дослідження алгоритмів позиціонування. Аналіз методу триангуляції.	19.05.2021	
5	Аналіз вимірювання кутових координат за допомогою Wi-Fi роутеру.	27.05.2021	
6	Вивчення точносних характеристик, визначення положення об'єкта з використанням кутомірних вимірювань.	02.06.2021	
7	Моделювання за допомогою розробленого алгоритму	08.06.2021	

Студент



Ігор Матушенко

Керівник



Сергій Жук

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа на тему «Алгоритм позиционирования объекта с использованием угломерных измерений Wi-Fi роутеров» выполнена на 46 страницах, что включает 34 иллюстрации 2 таблицы, 8 ссылок.

Учитывая распространенность сетей Wi-Fi и пользователей, владеющих устройствами данного типа, актуальной задачей является позиционирование объектов с помощью технологии Wi-Fi.

Целью работы является разработка и анализ точностных характеристик алгоритма позиционирования объекта с использованием угломерных измерений Wi-Fi роутеров.

Объектом исследования является процесс позиционирования объекта с использованием беспроводных сетей Wi-Fi.

Предметом исследования являются методы позиционирования объекта с использованием беспроводных сетей Wi-Fi.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

- провести анализ систем внутренней навигации в помещении с помощью Wi-Fi;
- рассмотреть особенности построения Wi-Fi роутеров;
- провести анализ алгоритмов позиционирования на основании измерений Wi-Fi роутеров;
- рассмотреть алгоритм измерений угловых координат с использованием Wi-Fi роутеров;
- провести анализ точностных характеристик, определить положение с использованием угломерных измерений Wi-Fi роутеров;

Ключевые слова: Wi-Fi, роутер, WLAN, WPS, AoA, позиционирование.

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота на тему «Алгоритм позиціонування об'єкта із використанням користування кутомірних вимірювань Wi-Fi роутерів» виконана на 46 сторінках, що включає 34 ілюстрації 2 таблиці, 8 посилань.

З огляду на розповсюдження мереж Wi-Fi і користувачів, які володіють пристроями даного типу, актуальним завданням є позиціонування об'єктів за допомогою технології Wi-Fi.

Метою роботи є розробка та аналіз точностних характеристик алгоритму позиціонування об'єкта з використанням кутомірних вимірювань-ний Wi-Fi роутерів.

Об'єктом дослідження є процес позиціонування об'єкта з використанням бездротових мереж Wi-Fi.

Предметом дослідження є методи позиціонування об'єкта з використанням бездротових мереж Wi-Fi.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз систем внутрішньої навігації в приміщенні за допомогою Wi-Fi;
- розглянути особливості побудови Wi-Fi роутерів;
- провести аналіз алгоритмів позиціонування на підставі вимірів Wi-Fi роутерів;
- розглянути алгоритм вимірювань кутових координат з використанням Wi-Fi роутерів;
- провести аналіз точностних характеристик, визначити положення з використанням кутомірних вимірювань Wi-Fi роутерів;

Ключові слова: Wi-Fi, роутер, WLAN, WPS, AoA, позиціонування.

ANNOTATION

The diploma work on the topic "Algorithm of object positioning using goniometric measurements of Wi-Fi routers" is made on 46 pages, which includes 34 illustrations 2 tables, 8 links.

Given the prevalence of Wi-Fi networks and users who own devices of this type, the actual task is to position objects using Wi-Fi technology.

The aim of the work is to develop and analyze the accuracy characteristics of an object positioning algorithm using goniometric measurements of Wi-Fi routers.

The object of research is the process of object positioning using wireless Wi-Fi networks.

The subject of the research is the methods of object positioning using wireless Wi-Fi networks.

To reach this target, it is necessary to solve the following tasks:

- to analyze indoor navigation systems using Wi-Fi;
- consider the features of building Wi-Fi routers
- analyze positioning algorithms based on measurements of Wi-Fi routers;
- consider an algorithm for measuring angular coordinates using Wi-Fi routers;
- analyze the accuracy characteristics, determine the position using goniometric measurements of Wi-Fi routers;

Keywords: Wi-Fi, router, WLAN, WPS, AoA, positioning.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи

на тему: *Алгоритм позиціонування об'єкта з використанням кутомірних вимірювань Wi-Fi роутерів*

Київ — 2021 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ	10
1 Актуальність задачі позиціонування об'єкта з використанням вимірювань Wi-Fi роутерів	11
1.1 Переваги внутрішньої навігації в приміщенні за допомогою Wi-Fi	12
1.2 Сфери застосування внутрішнього позиціонування і навігації за допомогою Wi-Fi	13
2 Особливості побудови Wi-fi роутерів (основні задачі, структурні схеми, характеристики і т.д.)	15
2.1 Аналіз структури типового Wi-Fi роутера:	15
2.2 Особливості конструкції Wi-Fi роутера	18
2.3 Радіус дії Wi-Fi роутера	19
2.4 Антени Wi-Fi роутера	20
3 Алгоритми позиціонування на основі вимірювань wi-fi роутерів	23
3.1 Реалізація позиціонування в бездротових мережах:	24
4 Алгоритми Вимірювання кутових координат з використанням Wi-Fi роутерів	30
5 Аналіз Точносних характеристик, визначення положення з використанням кутомірних вимірювань Wi-Fi роутерів	36
Висновки	45
Перелік джерел посилань	46
Додаток А. Програма	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

WLAN – (Wireless Local Area Network) - бездротова локальна мережа

WPS – (Wi-Fi Protected Setup) - стандарт напівавтоматичного створення бездротової мережі Wi-Fi

AoA – (angle of arrival) – кут прийому

MSE – Mobility Services Engine

ТД – точка доступу

RTLS – Real-time Locating Systems

ELM – (Enhanced Local Mode) режим сканування ефіру

ВСТУП

На сьогодні кількість пристроїв, зареєстрованих в бездротових мережах зростає, а сфера їх використання не має обмежень. Починаючи від звичайного користувача мобільного девайсу, закінчуючи розумною технікою на складах великих підприємств, автоматизованих процесів і т.д. Будь-яка розвинена компанія намагається аналізувати своїх клієнтів, організувати своїх співробітників і тому великого розвитку набула сфера позиціонування об'єктів. Така технологія має перспективи в усіх напрямках, цивільних і військових. Тому дослідження цього напрямку є цікавим та корисним для людини, як користувача в першу чергу. Досліджуючи даний напрям легко дійти висновків, що чим більше прогресує техніка, тим більше потрібно контролю і організації. Йдучи по вулиці, на сьогодні, кожна людина автоматично дивиться в онлайн-мапу, щоб перевірити вірний напрям. Тому дослідження таких алгоритмів є достатньо актуальним.

Метою роботи є дослідження можливостей сучасних алгоритмів позиціонування, їх залежність від певних умов і засобів, а також можливість удосконалення таких алгоритмів позиціонування.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було виконати наступні завдання: – проаналізувати принципи функціонування Wi-Fi мережі, Wi-Fi роутерів, особливості побудови та використання.

Об'єктом дослідження є процес позиціонування об'єкта з використанням бездротових мереж Wi-Fi.

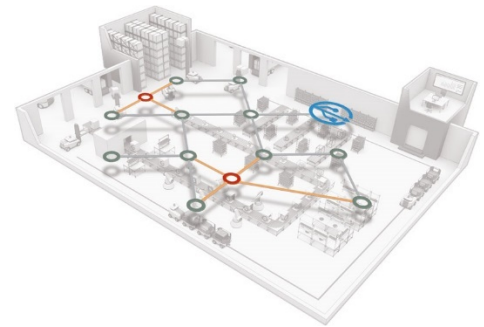
Предмет дослідження є методи позиціонування об'єкта з використанням бездротових мереж Wi-Fi.

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАДАЧІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТА З ВИКОРИСТАННЯМ ВИМІРЮВАНЬ WI-FI РОУТЕРІВ

RTLS (Real-time Locating Systems) – система позиціонування в реальному часі. Надає можливість ідентифікувати, виявити координати, показати місцезнаходження об'єкту на певній території. RTLS накопичує, опрацьовує та зберігає всю цю інформацію. Існують різноманітні RTLS рішення, як по підходу до визначення місцезнаходження з технологічної точки зору, так і по використовуваній мережевій інфраструктурі.

Приклади RTLS технологій:

- Пасивні RFID рішення(без використання джерела живлення)
- Wi-Fi
- Bluetooth
- Інфрачервоне випромінювання
- Ультразвук
- Широкопasmові рішення



За час активного розвитку технологічного процесу система позиціонування Wi-Fi (WPS Wi-Fi Protected Setup) знаходить все більше використання у багатьох господарських сферах. Використання стало можливим не тільки на вулиці, але і в приміщеннях, де навігація GPS не здатна працювати через блокування сигналу, багатопроменевого розповсюдження і т.д. Wi-Fi здатен забезпечити достатньо точне позиціонування місцезнаходження людей і об'єктів, що є корисним для оптимізації процесів, а також підвищенню доходів підприємств.

1.1 Переваги внутрішньої навігації в приміщенні за допомогою Wi-Fi

WPS працює за принципом визначення координат за допомогою Wi-Fi точок, які здатні передавати певні дані. Використовуючи RSSI (індикатор рівня прийнятого сигналу) і MAC-адресу (контроль доступу до середовища), система може точно розраховувати поточне місцезнаходження користувача. На точність розрахунків впливає кількість точок доступу.

Залежно від того, підключено пристрій до мережі Wi-Fi чи ні, на локалізацію впливають різні обмеження. Через випадково згенерований MAC-адрес (рандомізація MAC) інтелектуальний пристрій або фактична кількість пристроїв в межах досяжності не завжди можуть бути однозначно визначені. Якщо Wi-Fi не підключений, час затримки до 5 хвилин є результатом нерегулярної відправки «пробного запиту» (сканування доступних точок доступу), який контролюється мобільною операційною системою. Якщо ж смартфон підключений до мережі Wi-Fi, час затримки буде значно нижче.

Точне позиціонування на базі Wi-Fi стає все більш актуальним на тлі створення численних мобільних додатків для моніторингу та особистого відстеження на підприємствах.

Вибір на користь технології WPS обумовлений наступними перевагами:

- використання широкого спектру різних типів існуючих точок доступу Wi-Fi;
- можливість масштабування практично без ручного втручання;
- висока дальність поширення сигналу – сотні метрів;
- немає необхідності в додатковому обладнанні і обслуговуванні інфраструктури;
- можливість комбінування з іншими технологіями позиціонування для підвищення точності і гнучкого розгортання.

1.2 Сфери застосування внутрішнього позиціонування і навігації за допомогою Wi-Fi

Внутрішнє відстеження місця розташування за допомогою Wi-Fi застосовується в багатьох сферах - від транспорту і логістики до промисловості, офісів, виставок і музеїв.

Транспортна сфера

Технологія сприяє оптимізації процесів транспортування і дозволяє пасажиром швидко знайти шлях до потрібного місця всередині будівель аеропортів, залізничних вокзалів. З її допомогою можна будувати інтерактивні карти з точками інтересу, відстежувати потоки людей, забезпечувати навігацію персоналу транспортних вузлів. Постійний моніторинг пасажирських перевезень дозволяє швидко реагувати на мінливі умови і покращувати якість обслуговування пасажирів.

Логістика і склади

Компанії, які займаються логістикою і складуванням, можуть використовувати WPS для відстеження переміщення транспорту, вантажів і персоналу. Система надає детальну інформацію про місцезнаходження активів і допомагає автоматизувати багато складських операцій. За рахунок постійної навігації співробітників складу можна коригувати повсякденні завдання в реальному часі, підвищувати продуктивність праці, без зволікань реагувати на позаштатні ситуації.

Промисловість:

- підвищувати безпеку співробітників;
 - скорочувати витрати на простій транспортних засобів;
 - знижувати кількість позаштатних ситуацій;
- коригувати маршрути спецтехніки в реальному часі;

- фіксувати історію переміщень працівників (час приходу, звільнення з роботи та ін.);

- виконувати аналітику для прийняття ефективних управлінських рішень.

Офіси

Wi-Fi може успішно впроваджуватися в позиціонування всередині приміщень при експлуатації великих адміністративних будівель. Система забезпечує побудову покрокових маршрутів до потрібного кабінету, відправляє повідомлення і підказки, які орієнтовані на місце розташування людини. При використанні технології WPS керівництво підприємства отримує можливість контролювати пересування офісних працівників і при необхідності делегувати завдання або обов'язки. Завдяки безперервному збору інформації про переміщення в офісі можна виконувати точну аналітику і оптимізувати роботу офісних систем.

Музеї та виставки

За допомогою Wi-Fi можна створювати гідів і мобільні додатки, які поліпшують роботу виставок і музеїв. Бездротова система позиціонування в приміщенні допомагає скласти інтерактивні карти залів, розробляти короткі маршрути до потрібного експонату. Організатори виставок можуть збирати годинне по відвідувачах і ретельно вивчати їх поведінку, щоб більш раціонально планувати експозиції.

Доповнена та віртуальна реальність (AR, VR)

Сучасний стан розвитку мобільних пристроїв дали змогу реалізувати ряд амбіційних ідей по створенню нових навігаційних систем. Завдяки цьому стає реальним створення алгоритмів для уточненого позиціонування на місцевості, що використовують як вхідні дані не лише GPS координати пристрою, а і його локальні зміщення.

2 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ WI-FI РОУТЕРІВ (основні задачі, структурні схеми, характеристики і т.д.)

Найпопулярніші моделі Wi-Fi роутерів:

- Tenda F3.
 - D-Link DIR-615S.
 - TP-Link TL-WR940N.
 - Asus RT-AC51U.
 - TP-Link Archer C50 AC1200.
 - Asus RT-AC1200.
 - Asus RT-AC58U.
- 

Найпрогресивніші Wi-Fi роутери на сьогодні:

- ASUS RT-AX88U
 - Keenetic Giga (KN-1010)
 - MikroTik hAP AC
 - Keenetic Viva (KN-1910)
- 

2.1 Аналіз структури типового маршрутизатора

Типовий маршрутизатор має наступні складові:

- Друкована плата - основа, на яку монтуються всі інші компоненти.
- Оперативна пам'ять - запам'ятовує тимчасові дані, тобто відправляються пакети, перед відправкою їх одержувачу.
- Флеш-пам'ять - ПЗУ роутера, в яку записані таблиці маршрутизації, прошивка, налаштування та інші важливі дані.
- Блок живлення - постачає електричну енергію на всі інші пристрої. Може бути винесено за межі корпусу окремим модулем.
- Процесор комутатора - відповідає за правильний розподіл надходять пакетів.

- Процесор точки доступу Wi-Fi - управляє роботою антени і всіх інших задіяних в бездротовій передачі компонентів.

- Блоки посилення сигналу - підсилюють сигнал перед його трансляцією антеною або передачею по кабелю.

- Антена - відправляє дані «по повітрю» споживачам. Може бути кілька антен, як вбудованих, так і виносних.

- Блок портів. Тут знаходяться слоти для підключення USB, LAN і Ethernet- кабелів. Як правило, виносяться на тильну панель.

Wi-Fi чіп повинен відповідати таким вимогам:

1) Підтримувати взаємодію з мікро контролером Atmega328 по інтерфейсу SPI, що є найкращим при програмуванні.

2) Працювати за стандартом бездротових мереж IEEE 802.11. Це дає можливість взаємодіяти з системою зі звичайного ноутбука або wi-fi роутера без додаткового трансивера.

3) Підтримувати передачу даних відповідно до швидкості

4) Енергоспоживання має бути раціональним для забезпечення працездатності системи тривалий час.

5) Вартість повинна відповідати якості.

На сьогоднішній день найбільш популярними чіпами Wi-Fi для мікроконтролерів є чіпи фірми ZigBee, Microchip. Чіпи фірми Zigbee працюють за стандартом IEEE 802.15. Для взаємодії за стандартом Wi-Fi IEEE 802.11 необхідно реалізувати роботу системи управління за наступною схемою, представленої на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1- Система роботи бездротового віддаленого управління з використанням чіпа фірми Zigbee

2.2 Особливості конструкції Wi-Fi роутера

Для створення паралельного інформаційного потоку, на кожен канал необхідний один приймач і один передавач. Для хвиль Wi-Fi виділено два частотні діапазони: *2.4 і 5 ГГц*, які використовуються в різних версіях протоколу. Зовнішній вигляд роутерів дуже різноманітний, але всі вони працюють за одним принципом - отримавши порцію інформації, будь то з Інтернету або локальної мережі, він аналізує її і відправляє саме тому комп'ютера, для якого вона призначалася.

Локальна комп'ютерна мережа

Природно, якщо до маршрутизатора підключено більше, ніж два комп'ютери, і саме провідним з'єднанням. У випадку з бездротовою передачею Wi-Fi дещо інша ситуація - інформацію отримую все в зоні дії Wi-Fi мережі, але все її ігнорують, крім одержувача.

Комп'ютери при провідній мережі підключаються до LAN портів маршрутизатора, розташованого в більшості випадків на задній стороні.

Порти маршрутизатора

У середині роутера розташовується невеликий комп'ютер - центральний процесор, оперативна і постійна пам'ять, керуючі дротової і бездротової мережею контролери та багато-багато іншого електроніки.

Апаратна частина маршрутизатора

Складні, часом багат шарові друковані плати, на яких розташовуються складові апаратної начинки.

Програмне забезпечення маршрутизатора

Зробити маршрутизатор - це пів справи, ще необхідно, щоб усіма процесорами і чіпами щось управляло, тобто необхідний програмний код. І такі програми назвали прошивками, або мікропрограмами.

Від прошивки залежить робота маршрутизатора в цілому. На ринку чимало моделей з досить високою якістю апаратних складових, але «сирими» нестабільними мікропрограмами, які зводять роботи роутера «нанівець». Постійні розриви зв'язку, зависання і нестабільність роботи - і всьому вина програмного коду. З цієї причини розробники ведуть постійні роботи по виправленню помилок, і нові версії не тільки покращують роботу роутера, а й додають новий функціонал.

2.3 Радіус дії Wi-Fi роутера

Дальність Wi-Fi роутера стандарту 802.11n, зі штатною антеною (посилення близько 5 дБ) приблизно дорівнює сто п'ятдесят метрів в умовах місцевості без перешкод і в приміщенні - 50 м. Але такі перешкоди, як цегляні стіни і металеві елементи можуть зменшити радіус дії більш ніж на 25%. Для стандарту 802.11a /ac використовуються частоти вище, ніж для стандартів

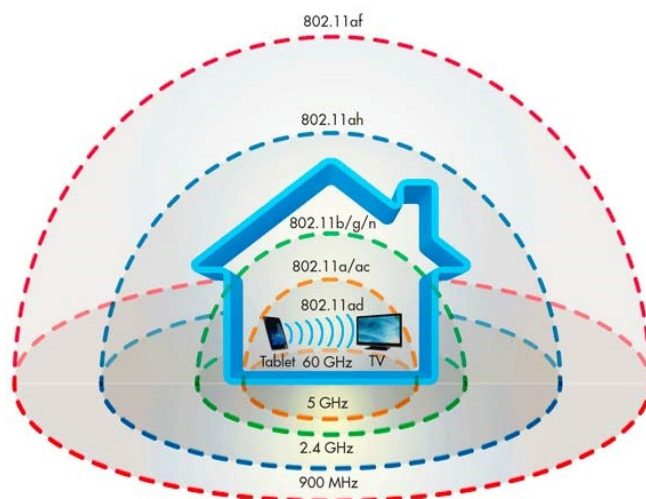


Рисунок 2.4 Різниця між зонами дії різних стандартів

802.11b / g, тому він більш чутливий до різних перешкод. Крім того, на радіус дії Wi-Fi мереж стандарту 802.11b або 802.11g сильно впливають перешкоди від мікрохвильових печей. Навіть листя дерев є сильною перешкодою, тому що містить воду, яка поглинає мікрохвильове випромінювання даного діапазону. Наприклад, проливний дощ послаблює сигнал в діапазоні 2.4 ГГц

до 0.05 дБ / км, густий туман - 0.02 дБ / км, а ліс (густе листя, гілки) - до 0.5 дБ / метр.

Якщо створювати радіоміст між двома мережами, то потрібно враховувати, що простір навколо прямої лінії, проведеної від приймача до передавача повинен бути вільним від поглинаючих і відображають перешкод в радіусі, рівним 0.6 радіусу першої зони Френеля.

В реальних умовах рівень сигналу на різній відстані від передавального пристрою можна вимірювати спеціальним пристроєм (Wi-Fi детектором).

Для того, щоб збільшити дальність Wi-Fi роутера потрібно об'єднати в ланцюг декілька роутерів або бездротових точок доступу, або замінити штатні антени на більш потужні.

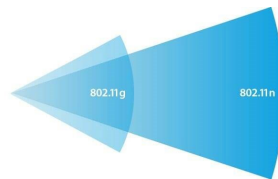


Рисунок 2.5

2.4 Антени Wi-Fi роутера

Роутери зазвичай комплектуються зовнішніми штатними штировими антенами Wi-Fi, які можуть бути як знімними, так і стаціонарними. Як правило, ці антени є всеспрямованими.

Всеспрямована - антена, що має покриття 360 градусів в горизонтальній площині (тобто забезпечує проходження сигналу у всіх напрямках по горизонталі).

Діаграма спрямованості:



Дані антени не є спрямованими (інші типи антен, які створюють вузький пучок сигналу в одному напрямку), тому не потрібно направляти антену роутера на іншій пристрій бездротової мережі (це одна з найчастіших помилок користувачів).

У горизонтальній площині (перпендикулярній власній осі) антена буде випромінювати сигнал в усі боки рівномірно.

Саме вертикальне розташування антен на роутері дозволить передавати сигнал на більшу відстань по горизонталі з максимальною потужністю.

При кріпленні роутера до стіни, рекомендується також розташовувати антени вертикально (в даному випадку неважливо куди будуть спрямовані антени - вниз або вгору).



Рисунок 2.6

Кругові антени розподіляють сигнал рівномірно. Якщо потрібно мати доступ до мережі зі всіх напрямків, варто купувати саме таку антену. Вона підходить в більшості випадків. Наприклад, її зручно використовувати в будинку або офісі, коли і зверху, і знизу, і справа, і зліва від роутера є люди, яким знадобиться Wi-Fi.

Якщо пристрої, які будуть підключатися до мережі, розташовані по одну сторону від роутера, краще вибрати спрямовану антену. Сигнал буде передаватися тільки туди, але зате він буде куди сильніше. При виборі антени необхідно мати на увазі, що будь-які перешкоди на шляху поширення сигналу знижують його якість. У розташованій нижче таблиці наведені значення ступеня ослаблення радіосигналу в залежності від матеріалу перегородки.

Таблиця 2.1 Вплив перешкод на рівень сигналу

Перешкода	Зниження якості сигналу, %
Вікно	30
Дерев'яна стіна	70
Бетонна стіна	80
Несуча бетонна стіна	90

Поляризація

Існує три види поляризації: вертикальна, горизонтальна і кругова. Антена поширює хвилі, а вони можуть коливатися як у вертикальній, так і в горизонтальній площині. Кругові антени закручують хвилі по спіралі.



Рисунок 2.7

Важливий момент.

Навколо нас живуть інші користувачі Інтернету, які налаштовують свої точки доступу. Роутери сусідів створюють певні перешкоди в ефірі. Уявіть, що мінімум в трьох квартирах поруч з вашою встановлені роутери з потужними передавачами, що працюють на одному (або близьких) каналах в діапазоні 2,4 ГГц (досить типова ситуація, до речі). Навіть впевнений прийом сигналу в цьому випадку не гарантує стабільної швидкості підключення.

3 АЛГОРИТМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАНЬ WI-FI РОУТЕРІВ

Одна з найпопулярніших категорій мобільних додатків сьогодні та, що надає послуги з визначенням місця розташування пристрою. Багато людей використовують системи позиціонування на своїх навігаційних пристроях, смартфонах і планшетах. Слабка сторона цих рішень в тому, що використання системи Global Positioning System (GPS) недоступно всередині приміщень через сильне погашення сигналів стінами і перекриттями будівель. Таким чином відкривається ніша для надійних рішень з позиціонуванням в приміщеннях.

Сьогодні існує ряд підходів і технологій для вирішення цього завдання. Компанія Cisco вже багато років працює над позиціонуванням за допомогою технології Wi-Fi, з огляду на поширеність мереж (практично в кожному приміщенні) і пристроїв (практично у кожної людини).

Перші розробки почалися в 2007 року, коли була придбана компанія Cognio, чий механізм спектрального аналізу був вбудований в точки доступу Wi-Fi Cisco Aironet. Можливість аналізувати ефір на наявність перешкод і визначати їх вплив на продуктивність мережі Wi-Fi відкрила нові можливості по забезпеченню надійності і продуктивності бездротових мереж. З'явилися і нові завдання - зрозуміти де знаходяться джерела перешкод, тому що знайти їх не завжди просто, особливо якщо перешкоди навмисно створюються зловмисниками.

З тих пір алгоритм рішень багаторазово вдосконалилися, починаючи з 2015 року, Cisco пропонує новітнє рішення позиціонування з високою точністю, що дозволяє визначити координату Wi-Fi з точністю до 1м.

В ході конференції HUAWEI CONNECT 2018 компанія Huawei представила високоточні бездротові рішення для визначення місця розташування об'єктів. Рішення для комерційних сценаріїв, що забезпечують точність геолокації на метровому рівні, допомагають підприємствам досягати оптималь-

ної ефективності бізнесу, виходячи з потреб споживачів, і підвищувати рівень клієнтської задоволеності в супермаркетах, аеропортах і т.д. Бездротові рішення для визначення місця розташування з сантиметровою точністю призначені для промислових кампусів і дозволяють підприємствам виробничої, логістичної і інших галузей постійно контролювати місцезнаходження персоналу, транспортних засобів та інших об'єктів, сприяючи підвищенню продуктивності праці за допомогою візуалізованого аналізу локації і належної оптимізації.

Кращий варіант для комерційних підприємств - використовувати одне WLAN-рішення як для забезпечення бездротового мережевого покриття, так і для надання сервісів геопозиціонування з різним ступенем точності.

3.1 Реалізація позиціонування в бездротових мережах:

1. Метод розпізнавання шаблону.

Даний метод виходить з того, що в кожній точці пристрій бачить унікальну радіо картину. Пристрій сканує радіо обстановку - точки доступу та рівень їх сигналів, звіряє отриману схему радіосигналів зі списком шаблонів і знаходить координату пристрою. Для настройки всієї мережі необхідно провести тривалий процес сканування ефіру всього приміщення, на практиці кілька разів, а також проводити регулярну калібрування даних, тому що в реальності в приміщеннях постійно відбуваються зміни.

Метод має перевагу низьких витрат на обладнання, але при цьому вартість володіння таким рішенням буде високою, а точність позиціонування низькою.

2. По точці доступу, до якої приєднаний клієнт

Даний метод має перевагу простоти, але в точності страждає. Дійсно, зона дії бездротової мережі може бути досить великий, діаметр плями засвітки може бути 50м і більше. Т.ч. цей метод - краще, ніж нічого, проте він на-

вряд чи дозволить нам зібрати аналітику, що представляє цінність для розуміння наших клієнтів.

Метод швидше дозволяє визначити присутність клієнта, позиціонувати його.

3. Триангуляція.

Метод полягає у тому, щоб визначити силу сигналу від клієнта на 3х-4х точках доступу Wi-Fi і в зоні перетину можливого розташування клієнта щодо кожної точки спозиціонувати пристрій. Даний метод є досить інформативним. При правильному розташуванні точок доступу він дозволяє з високою ймовірністю визначити координату клієнта з точністю 5-7м. Вдалий сценарій - це точки доступу по периметру приміщення і в центрі таким чином, щоб кожна точка в просторі «чулася» 3-ма-4-ма точками доступу Wi-Fi. Перешкоди на шляху радіосигналу будуть заважати точності визначення координати. Статичні перешкоди необхідно змодельовати, а рухомі неминуче будуть чинити негативний вплив на точність.

Для підвищення точності позиціонування в мережі Wi-Fi точки доступу необхідно ставити частіше, тому що згасання сигналу і відстань від точки доступу мають експонентну залежність. Поруч з точкою доступу при видаленні від неї зниження рівня сигналу значне, на віддалі - при видаленні зниження рівня сигналу на одиницю відстані менше і обчислити координату стає складніше.

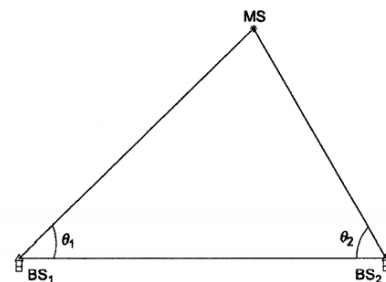
Мережа Wi-Fi з можливостями позиціонування крім точок доступу і контролера бездротової мережі отримує ще один елемент, який буде робити обчислення координат і накопичувати дані для аналітики - Mobility Services Engine (MSE). Сьогодні ємність MSE дозволяє накопичувати дані зі 100 000 клієнтських пристроїв протягом 2-8 років (залежно від кількості генеруються даних, зазвичай це відповідає частоті переміщення пристроїв, і типу MSE).

Однак з огляду на що відкриваються завдань, пов'язаних з позиціонуванням в мережах Wi-Fi, MSE в наступних версіях придбає розподілену архітектуру, що дозволяє збирати дані з мільйона пристроїв. При цьому зібрана інформація може подаватися на зовнішній аналітичний движок по API практично в реальному часі.

Реалізація позиціонування на мережі Wi-Fi веде до додаткових витрат на розгортання інфраструктури, при цьому низькі витрати на експлуатацію мережі.

4. Триангуляція або позиціонування з визначенням кута вхідного сигналу.

Метод заснований на вимірі кутів. Використовується AoA. Метод є революційною розробкою, що дозволяє домогтися високої точності позиціонування Wi-Fi клієнта. Зовнішній модуль точного позиціонування, підключений до модульної точки доступу зі спеціальною антеною дозволяє додатково визначити кут, під яким прийшов сигнал і звузити сегмент можливого знаходження Wi-Fi клієнта до променя. Застосовуючи метод триангуляції до такої інформації від 3-4х точок доступу, ми отримуємо координату, з високою ймовірністю дає точність до 1м.



Фізично пристрій вдає із себе точку доступу з включеним модулем точного позиціонування і спеціальною антеною. Антена є масивом з 32 антен, кожна з яких отримує сигнал інакше, ніж сусідня. Алгоритм дозволяє зібраних даних розрахувати кут, під яким прийшов сигнал.

Популярним стає використання радіомаячків, що використовують Bluetooth Low Energy (BLE) - енергоефективні пристрої, що здатні подібно пожежного датчика періодично подавати сигнали. Радіомаячки здатні визначити наближення до них пристроїв з включеним BLE і повідомити про це

сервера мобільного додатка, який цю інформацію використовує як координату пристрою.

Радіомаячки привабливі своєю низькою ціною, проте вартість експлуатації такого рішення буде суттєвою, тому що необхідно відстежувати реальне місце розташування і заряд батареї маячків, при чому робити це шляхом фізичної присутності фахівця на об'єктах.

Однак при інтеграції двох підходів може виникнути цікаве рішення. Інфраструктура Wi-Fi забезпечує загальне позиціонування, уточнення координати у певного об'єкта, для якого принципово важлива дистанція в 1м від нього пристрій або в 3х - музейного експоната, каси, входу - відбувається за допомогою радіомаячка. Інтеграція мереж Wi-Fi і BLE при цьому дозволяє домогтися зниження витрат на експлуатацію гібридної мережі. На інтерфейсі MSE вже сьогодні можна відстежувати реальне місцезнаходження радіомаячка, а модуль точного позиціонування має в собі вбудований радіомаячок, в якому батарея не закінчиться. У плані розвитку вирішення точного позиціонування є також можливість моніторингу заряду батареї і використання об'єднаної інформації від Wi-Fi мережі і BLE пристроїв для позиціонування та аналітики.

Частота оновлення координати

Позиціонування пристрою в мережі Wi-Fi може використовуватися для цілого ряду додатків:

- А) виявлення активів, позначених мітками Wi-Fi
- Б) підключення до Wi-Fi з урахуванням місцезнаходження клієнта
- В) навігація по приміщенню
- Г) відправка вискоєфективних пропозицій з урахуванням місцезнаходження клієнта
- Д) збір аналітики поведінки клієнтів

Для додатків В) -Д) крім точності позиціонування важлива частота, з якою ця координата визначається.

Поки клієнтський пристрій не підключений до мережі Wi-Fi, координата може визначатися по пробам (probe requests), які періодично відправляє пристрій. Пристрій не підключений до мережі Wi-Fi, але ми вже отримуємо інформацію про його пересуванні. Проби відправляються бродкастом, тобто за всіма частотним каналам - усі точки доступу можуть їх почути і тріангуляція по пробам прекрасно працює.

Невелика проблема полягає в тому, що проби відправляються пристроєм кожні 15-30-60 секунд в залежності від алгоритму, заданого виробником пристрою. Крім того, виробники мобільних пристроїв прагнуть до скорочення кількості відправлених проб, тому що це збільшує енергоефективність пристрою. Збираючи дані таким чином ми знаємо, що клієнт був у точці А і через, наприклад, 30 секунд в точці Б, але не маємо інформації про те, що він робив між А і Б. Для навігації в приміщенні, а також збору аналітики про поведінку клієнтів такі проміжки часу також завеликі.

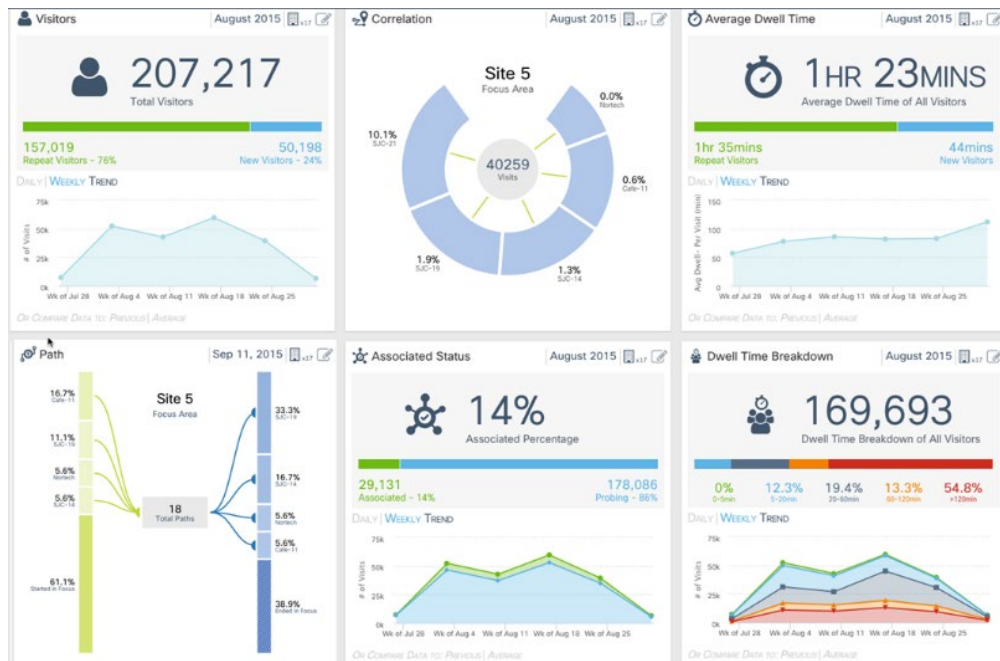
Для підвищення частоти визначення координати реалізовано метод позиціонування пристрою по трафіку даних, що дозволило збільшити частоту збору даних до 10 разів на хвилину - FastLocate.

Модуль WSM буде сканувати ефір і збирати інформацію для розрахунку координат пристроїв приблизно кожні 8 секунд.

Другий варіант використання FastLocate підходить для будь-яких точок доступу і не вимагає додаткового модуля. Точка доступу на короткий проміжок часу виходить з режиму обслуговування клієнтів і перемикається в режим сканування ефіру (Enhanced Local Mode - ELM). У ELM точка, як і в попередньому випадку, збирає інформацію для розрахунку координат пристроїв і перемикається назад в режим обслуговування клієнтів. Такий метод має ціну у вигляді зниження продуктивності мережі Wi-Fi приблизно на 15%, тому що точки доступу не можуть обслуговувати клієнтів 100% часу.

Клієнтський пристрій має бути підключений до мережі Wi-Fi, тобто в інтересах власника приміщення стає пропонувати клієнтам Wi-Fi підключення, мотивуючи клієнтів інформативністю додатку і спеціальними пропозиціями.

Якщо в результаті велика частка клієнтів підключиться, то адміністратор зможе витягти для себе багато інформації з подібною аналітикою:



4 АЛГОРИТМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВИХ КООРДИНАТ З ВИКОРИСТАННЯМ WI-FI РОУТЕРІВ

Для локалізації користувача досить визначити його відстань до точки доступу (ТД) і кут, під яким на неї падає Wi-Fi-випромінювання від смартфона. Це просто зробити у відкритому просторі, проте в приміщенні завдання набагато ускладнюється. Розглянемо коротко фізичні основи, на які спираються існуючі методи локалізації, їх обмеження, і які удосконалення запропонувала HP Labs в своїй технології Capturing User Positioning Including Direct Path (CUPID). Забігаючи трохи наперед, відзначимо, що головна ідея технології полягає у використанні Direct Path, або «прямого шляху».

Радіосигнал від клієнта бездротової мережі приходить на ТД під різними кутами. Якщо вдасться знайти кут прямого шляху ANDP (Angle of the Direct Path), то можна об'єднати з його відстанню, що, в кінцевому підсумку, визначить локалізацію клієнта.

Оцінка кута прийому (AoA) поступаючих сигналів відбувається за наявності направленої антени, наприклад адаптованої фазированої антенної решітки з двох, або більшої кількості антенних елементів. Даний простий метод полягає у вимірюванні різниці фаз між сигналами падаючих на різні елементи антени і перетворенні цього значення в оцінку AoA.

Приклад цієї концепції:

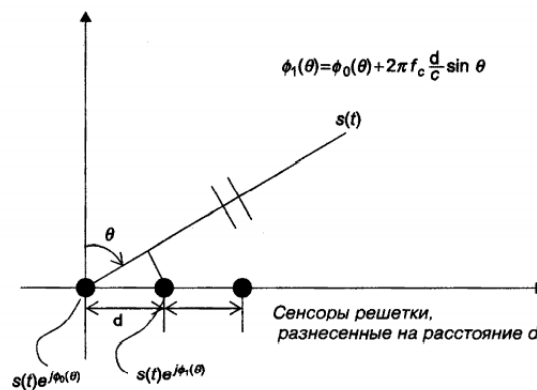


Рисунок 4.1 Сигнал, що падає на антенну решітку

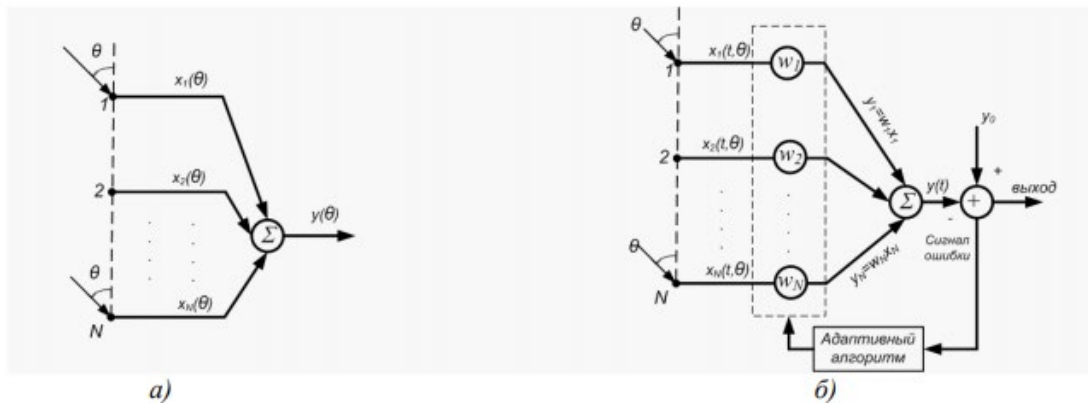


Рисунок 4.2 Звичайна(а) і адаптивна(б) решітки

Для знаходження кутової складової сигналу існуючі алгоритми оцінки кута приходу (Angle-of-Arrival, AoA) аналізують отриманий декількома антенами сигнал. Ключова ідея полягає в аналізі фази одержуваного сигналу, значення якої змінюється лінійно з коефіцієнтом 2π для кожної довжини хвилі (λ) приходить сигналу. Для спрощення пояснення розглянемо один промінь, що приходить на дві антени ТД, розташованих на відстані $\lambda / 2$ (рис. 4.3).

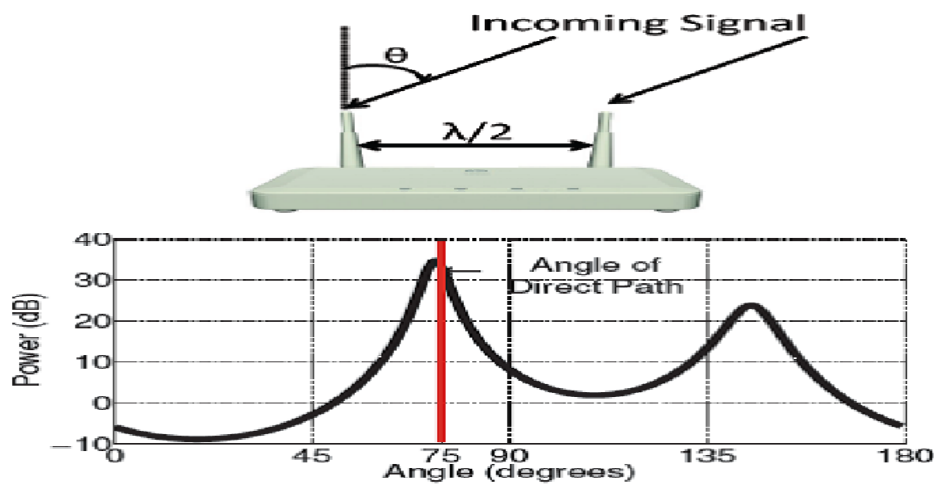


Рисунок 4.3. (а) Сигнал, що надходить під кутом Θ на ТД з двома антенами. (Б) Результат роботи алгоритму MUSIC

Нехай промінь приходить під кутом Θ . До другої антени йому потрібно пройти кілька більшу відстань:

$$\Delta d = \lambda / 2 \sin \theta.$$

Це призведе до запізнювання фази на другій антени на величину:

$$\Delta\varphi=2\pi\Delta d/\lambda.$$

Виключаючи Δd з цих двох рівнянь, після нескладних перетворень отримаємо:

$$\theta = \arcsin (\Delta\varphi / \pi)$$

Міркування вище припускали, що приходить сигнал має тільки одну кутову компоненту. Насправді бездротової сигнал буде поширюватися по безлічі шляхів. Алгоритм оцінки АоА може ідентифікувати кути багатьох променів, використовуючи кілька антен. Відповідний алгоритм називається MUSIC (Multiple Signal Classification) і базується на складному математичному апараті.

Результатом роботи MUSIC є так званий псевдоспектр, приклад якого для розглянутого вище випадку представлений на рис. 4.1 б. Кожен пік псевдоспектра є оцінкою АоА. Безліч піків на рис. 4.1 б обумовлено приходять сигналами з різних напрямків, включаючи прямі і відбиті промені.

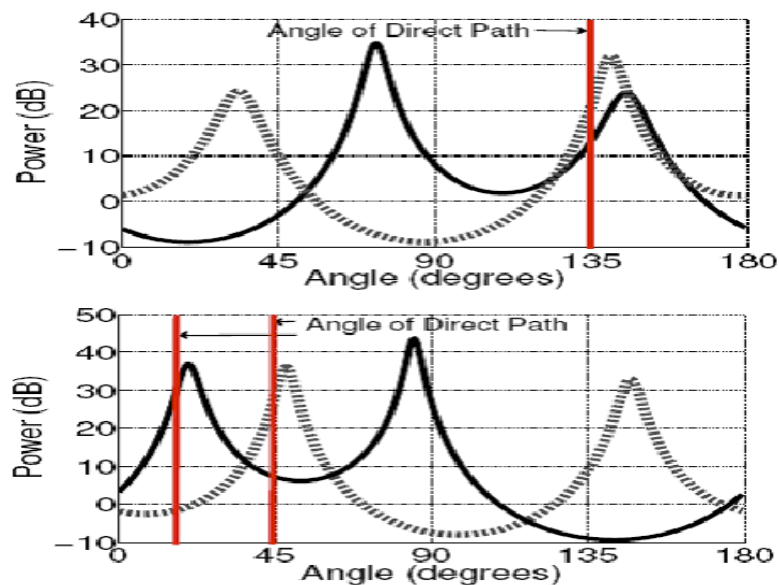
Однак постає питання, як виділити пік, який відповідає прямому шляху в псевдоспектрі MUSIC? Можна припустити, що висота піку пропорційна кількості падаючої на приймач енергії під відповідним кутом. Коли приймач розташований на лінії видимості передавача, сигнал по прямому шляху може часто давати найсильнішу компоненту. Однак всередині будівлі такий варіант реалізується рідко. Більш того, сильніший відбитий сигнал може прийти з будь-якого випадкового напрямку, який може бути абсолютно не пов'язане з кутом прямого променя ANDP. У той же час CUPID повинен використовувати для оцінки місця розташування клієнта тільки ANDP. Для цього технологія використовує переміщення клієнта спільно з оцінкою АОА, виконуваної MUSIC.

Як уже згадувалося вище, для оцінки локалізації на додачу до віддалі велике значення має кут приходу сигналу. Існуючі методи АОА, зокрема, MUSIC, можуть оцінити кути, під якими приходить сигнал, але не можуть

визначити, який з цих кутів відповідає розі прямого шляху (ANDP). Як вже обговорювалося раніше, вибір кута по максимальному піку псевдоспектра може привести до великої помилки в разі блокування прямого шляху. Тому HP Labs розробила власну схему оцінки ANDP, об'єднану з MUSIC.

В її основу покладено спостереження за допомогою аналізу значень AoA для двох різних точок, через які переміщується користувач, що дає можливість визначити ANDP.

ТД обчислює кути приходу за допомогою MUSIC, який, в свою чергу, використовує CSI отриманих пакетів від мобільних пристроїв користувача. Аналізуючи значення AoA від двох різних точок, можна виявити два різні сценарії. У першому можливо, що хоча відбиті промені є сильнішими в цих двох точках, їх кути падіння різні. Навпаки, більш слабкі прямі промені більш узгоджені, і, отже, ANDP може апроксимувати значенням AoA, яке залишається стабільним в псевдоспектрі (рис. 4.4).



Мал. 4.4 Псевдоспектр MUSIC від двох різних точок.

(А) ANDP стабільний в двох різних точках, проте кути відбитих променів різні. (Б) І ANDP і кути відбитих променів різні.

У другому - ні піки відображених, ні прямих променів в псевдоспектрі від двох точок не розташовані близько. У цьому сценарії CUPID визначає

ANDP, використовуючи навігаційне числення. Ключова ідея пояснюється за допомогою рис. 4.5.

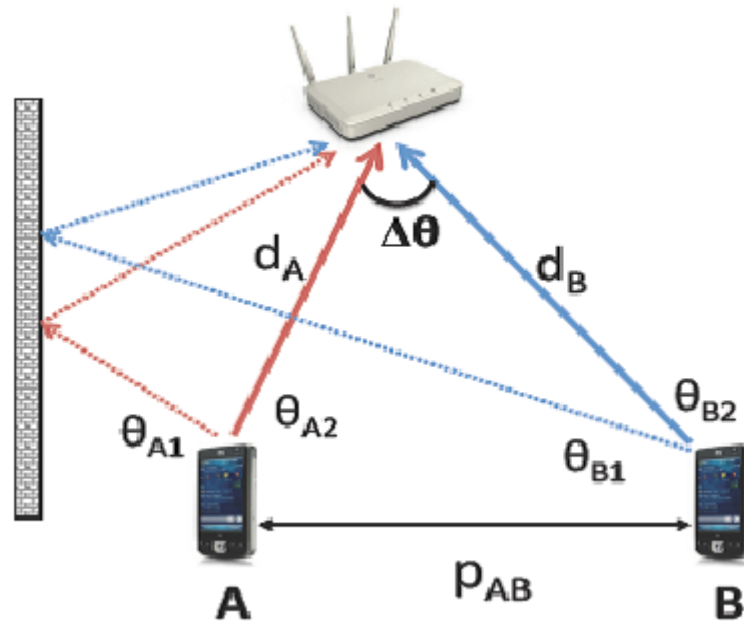


Рис 4.5 Визначення ANDP з використанням переміщення клієнта

Припустимо, що отримуваний сигнал приходить під двома різними кутами: одна компонента сигналу - по прямій колії, а друга - відбита. Якщо користувач знаходиться в точці А, то це будуть кути θ_{A2} і θ_{A1} відповідно. Аналогічно, для точки В це будуть кути θ_{B2} і θ_{B1} . Для цілей пояснення припустимо, що компонента сигналу, яка приходить під кутом θ_{A1} з точки А, падає під кутом θ_{B1} з точки В і аналогічно - θ_{A2} і θ_{B2} для двох інших компонент. Нехай відстані від точок А і В до ТД, певні на основі EDP, будуть d_A і d_B відповідно. Коли користувач переміщається з точки А в точку В, відстань між ними P_{AB} може бути обчислено на підставі показань акселерометра і гіроскопа його смартфона - методу, званого навігаційним численням. Тоді зміна ANDP ($\Delta\theta$) є не що інше як:

$$\Delta\theta = \arccos((d_A^2 + d_B^2 - P_{AB}^2) / 2 * d_A * d_B)$$

(Тут використана формула квадрата сторони трикутника, що лежить проти кута θ). Тепер ми можемо визначити АОА (θ_{Bk}) як кут, який зазнав таке ж зміну $\Delta\theta$.

Для визначення ANDP ТД відстежує виміряні AoA в початковій точці і в усіх наступних точках, через які переміщується користувач. дослідники спостерігали, що псевдоспектри від двох сусідніх точок (в межах відстані 2-3 м) мають подібні значення AoA. Таким чином, можна об'єднувати попарно AoA, виміряний в точці, з найближчим рогом, виміряним в наступних точках. У міру того як користувач переміщається, можна використовувати цю відповідність, щоб відстежувати кожен AoA в псевдоспектрі. AoA, який піддається таким же кутовим змінам, як промінь прямого шляху, і буде оцінюється CUPID для ANDP. Для більш точної оцінки ANDP алгоритм включається тільки тоді, коли зміна кута $\Delta\Theta$ перевищує 20° . Відзначається, що використання переміщення клієнта для оцінки ANDP потрібно тільки для його першого виміру. В подальшому ANDP тільки відстежується.

5 АНАЛІЗ ТОЧНОСИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КУТОМІРНИХ ВИМІРЮВАНЬ WI-FI РОУТЕРІВ

Систему позиціонування об'єкта з використанням кутомірних вимірювань Wi-Fi роутерів можна розглядати як систему з двома пеленгаторами, рознесеними у просторі. Кутіві координати цілі вимірюються прямим способом. При розв'язку задач вторинної обробки радіолокаційної інформації виконується перетворення координат цілі із сферичної системи координат у декартову. Тому актуальною задачею є визначення точнісних характеристик системи з двох пеленгаторів у прямокутній системі координат.

На рис. 5.1 показане розташування системи пеленгаторів та цілі у декартовій системі координат, що зв'язана з приймальною підсистемою O_1 .

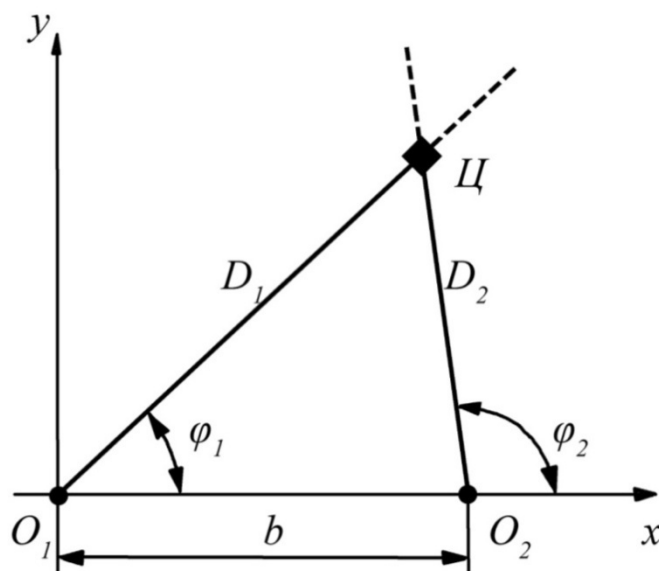


Рисунок. 5.1

Відстань від першого приймача до цілі знаходиться за допомогою вимірювання кутів φ_1 та φ_2 . За теоремою синусів:

$$D_1^B = \frac{b \sin(180 - \varphi_2^B)}{\sin(\varphi_2^B - \varphi_1^B)}, \quad (5.1)$$

де b – база системи (відстань між пеленгаторами).

Напрямок на об'єкт з приймачів вимірюється прямим способом. Рівняння вимірювання кутів мають наступний вигляд:

$$\varphi_1^{\text{н}} = \varphi_1 + \Delta\varphi_1; \quad (5.2)$$

$$\varphi_2^{\text{н}} = \varphi_2 + \Delta\varphi_2, \quad (5.3)$$

де $\varphi_1^{\text{н}}, \varphi_2^{\text{н}}$ – виміряні значення кутів, φ_1, φ_2 – істинні значення кутів, $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ – похибки вимірювання кутів.

Підставимо (5.2), (5.3) в (5.1) і перетворимо:

$$\begin{aligned} \sin(\varphi_2^{\text{н}} - \varphi_1^{\text{н}}) &= \sin(\varphi_2 - \varphi_1 + \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1) \approx \\ &\approx \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + (\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1) \cos(\varphi_2 - \varphi_1); \\ \sin(180 - \varphi_2^{\text{н}}) &\approx \sin(180 - \varphi_2) - \Delta\varphi_2 \cos(180 - \varphi_2); \\ D_1 &= \frac{b \sin(180 - \varphi_2) - \Delta\varphi_2 \cos(180 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1) + (\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1) \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \approx \left| \frac{1}{1+x} \approx 1-x \right| \approx \\ &\approx \frac{b \sin(180 - \varphi_2) - \Delta\varphi_2 \cos(180 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \left[1 - (\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1) \frac{\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \right] = \\ &= \frac{b \sin(180 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} - \Delta\varphi_2 \frac{b \cos(180 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} - \\ &- \frac{b \sin(180 - \varphi_2) \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{(\sin(\varphi_2 - \varphi_1))^2} (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2). \end{aligned}$$

Звідси помилка вимірювання дальності:

$$\begin{aligned} \Delta D_1 &= -\Delta\varphi_2 \frac{b \cos(180 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} - \frac{b \sin(180 - \varphi_2) \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{(\sin(\varphi_2 - \varphi_1))^2} (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \\ &= \\ &= \left(-\frac{b \sin(180 - \varphi_2) \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{(\sin(\varphi_2 - \varphi_1))^2} \right) \Delta\varphi_1 - \\ &- \frac{b}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \left(\cos(180 - \varphi_2) - \frac{\sin(180 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} \right) \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \Delta\varphi_2; \\ \Delta D_1 &= c_1 \Delta\varphi_1 + c_2 \Delta\varphi_2, \quad (5.4) \end{aligned}$$

де c_1, c_2 – коефіцієнти, що визначаються за формулами

$$c_1(k) = -b \sin(180 - \varphi_2(k)) \cos(\varphi_2(k) - \varphi_1(k)) / \sin^2(\varphi_2(k) - \varphi_1(k));$$

$$c_2(k) = -b [\cos(180 - \varphi_2(k)) - \sin(180 - \varphi_2(k)) \cos(\varphi_2(k) - \varphi_1(k)) / \sin(\varphi_2(k) - \varphi_1(k))] / \sin(\varphi_2(k) - \varphi_1(k));$$

Координати об'єкта у декартовій системі координат визначаються по формулам:

$$y = D_1 \cos \varphi_1;$$

$$x = D_1 \sin \varphi_1;$$

Вимірювання x^s описується виразом:

$$x^s = (D + \Delta D) \cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_1);$$

Нелінійну функцію $\cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_1)$ можна приблизно представити лінеаризованим рівнянням:

$$\cos(\varphi_1 + \Delta\varphi_1) = \cos\varphi_1 - \Delta\varphi_1 \sin\varphi_1;$$

Знайдемо похибку по x :

$$x^s = (D + \Delta D)(\cos\varphi_1 - \Delta\varphi_1 \sin\varphi_1) = D \cos\varphi_1 + \Delta D \cos\varphi_1 - D \Delta\varphi_1 \sin\varphi_1.$$

$$x^s = D_1 \cos\varphi_1 + (c_2 \cos\varphi_1) \Delta\varphi_2 + (c_1 \cos\varphi_1 - D \sin\varphi_1) \Delta\varphi_1 = x + \Delta x$$

Похибка по x описується виразом:

$$\Delta x = \alpha_1 \Delta\varphi_1 + \alpha_2 \Delta\varphi_2; \tag{5.5}$$

Знайдемо похибку по y :

$$y^s = (D + \Delta D) \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_1) = \sin(\varphi_1 + \Delta\varphi_1) =$$

$$= \sin\varphi_1 + \Delta\varphi_1 \cos\varphi_1 = D \sin\varphi_1 + \Delta D \sin\varphi_1 + \Delta\varphi_1 D \cos\varphi_1;$$

$$y^s = D \sin\varphi_1 + c_1 \sin\varphi_1 \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_1 c_1 \cos\varphi_1 + D \cos\varphi_1 = y + \Delta y.$$

Похибка по y описується виразом:

$$\Delta y = \beta_1 \Delta\varphi_1 + \beta_2 \Delta\varphi_2. \tag{5.6}$$

З (5.4), (5.5), (5.6) дисперсії похибок вимірювання дальності та координат x і y описуються рівняннями:

$$\sigma_{D_1}^2 = c_1^2 \sigma_{\varphi_1}^2 + c_2^2 \sigma_{\varphi_2}^2; \tag{5.7}$$

$$\sigma_{x_1}^2 = \beta_1^2 \sigma_{\varphi_1}^2 + \beta_2^2 \sigma_{\varphi_2}^2; \quad (5.8)$$

$$\sigma_{y_1}^2 = \alpha_1^2 \sigma_{\varphi_1}^2 + \alpha_2^2 \sigma_{\varphi_2}^2, \quad (5.9)$$

де $\sigma_{\varphi_1}^2, \sigma_{\varphi_2}^2$ – дисперсії вимірювання кутових координат;

$$\alpha_1(k) = c_1(k) \cos \varphi_1(k) - d \sin \varphi_1(k); \quad \alpha_2(k) = c_2(k) \cos \varphi_1(k);$$

$$\beta_1(k) = c_1(k) \sin \varphi_1(k) + d \cos \varphi_1(k); \quad \beta_2(k) = c_2(k) \sin \varphi_1(k).$$

Взаємна кореляція похибок вимірювання по x та y :

$$\sigma_{xy} = E\{(\beta_1 \Delta \varphi_1 + \beta_2 \Delta \varphi_2)(\alpha_1 \Delta \varphi_1 + \alpha_2 \Delta \varphi_2)\} = \alpha_1 \beta_1 \sigma_{\varphi_1}^2 + \alpha_2 \beta_2 \sigma_{\varphi_2}^2. \quad (5.10)$$

Аналіз отриманих точносних характеристик системи позиціонування об'єкта з використанням кутомірних вимірювань Wi-Fi роутерів на площині XOY виконано шляхом статистичного моделювання на ЕОМ. Перший датчик Wi-Fi має координати (0,0) м і знаходиться на початку системи координат XOY. Другий датчик Wi-Fi має координати (0,25) м і знаходиться на осі OX рис.5.2. База кутомірної системи дорівнює 25 м. Об'єкт рухається по колу з радіусом 100 м рис.5.2. СКВ вимірювання кутових координат покладались однаковими $\sigma_{\varphi_1} = \sigma_{\varphi_2} = 0.1$ град.

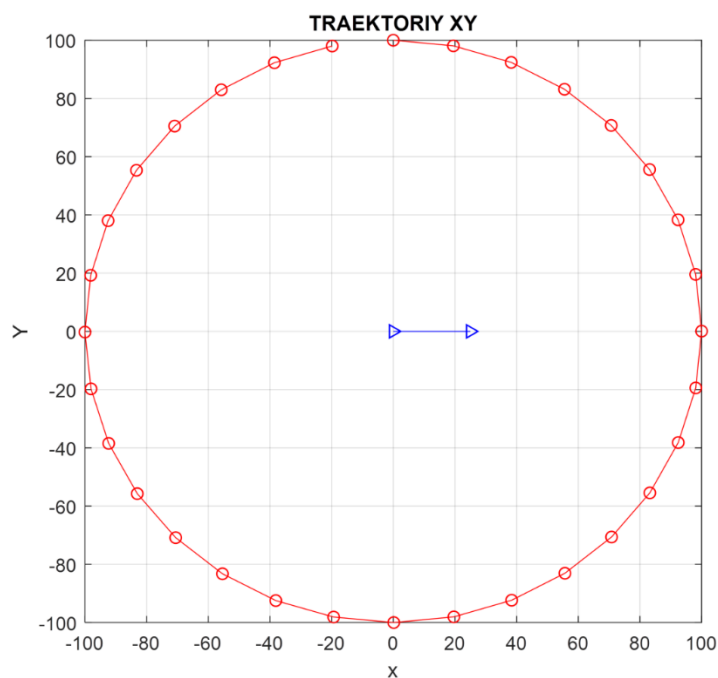


Рис. 5.2

На рис. 5.3.,а зображені залежності СКВ (крива 1) похибок визначення відстані до об'єкта σ_D по формулі (5.7), а також фактичні математичне очікування (крива 2), и СКВ (крива 3) цієї похибки в залежності від кута φ_1 в прямокутній системі координат, які отримані методом статистического моделювання. Теоретичні і фактичні СКВ похибок визначення відстані до об'єкта являються близькими, что свідчить про правильну роботу алгоритма.

На рис. 5.2.,б,в зображені залежності СКВ (кривая 1) похибок визначення координат об'єкта σ_x , σ_y по формулам (5.8), (5.9), а також фактичні математичне очікування (криві 2), и СКВ (криві 3) цих похибок в залежності від кута φ_1 в прямокутній системі координат, які отримані методом статистического моделювання. Теоретичні і фактичні СКВ похибок визначення координат об'єкта σ_{x_1} , σ_{y_1} являються близькими, что свідчить про правильну роботу алгоритма.

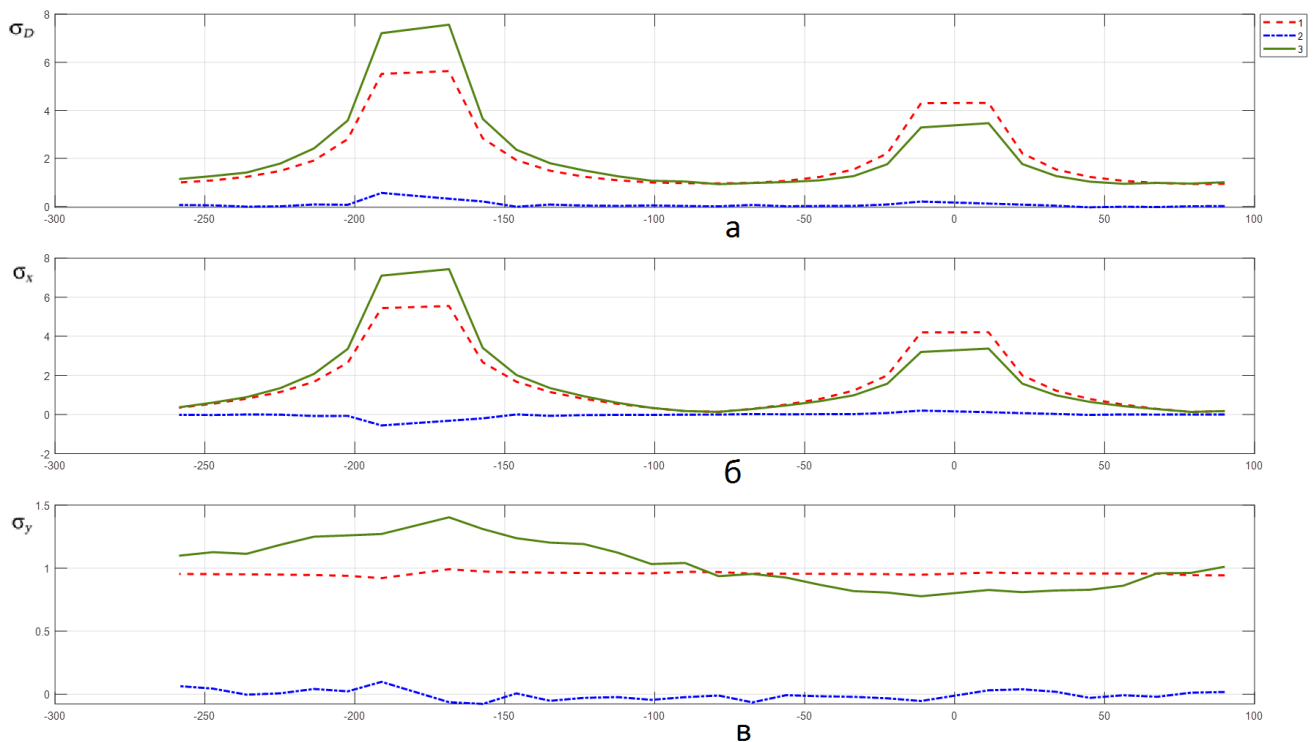


Рис. 5.3

Як впливає з рис. 5.3, коли об'єкт знаходиться на лінії бази, СКВ похибок визначення його місцеположення спрямовуються до нескінченності і і триангуляційний метод визначення місцеположення є непрацездатним.

На рис. 5.4 зображені залежності СКВ похибок визначення координат об'єкта σ_x , σ_y , відстані до об'єкта σ_D та коефіцієнт взаємної кореляція похибок вимірювання координат об'єкта σ_{xy} , від кута φ_1 в сферичній системі координат.

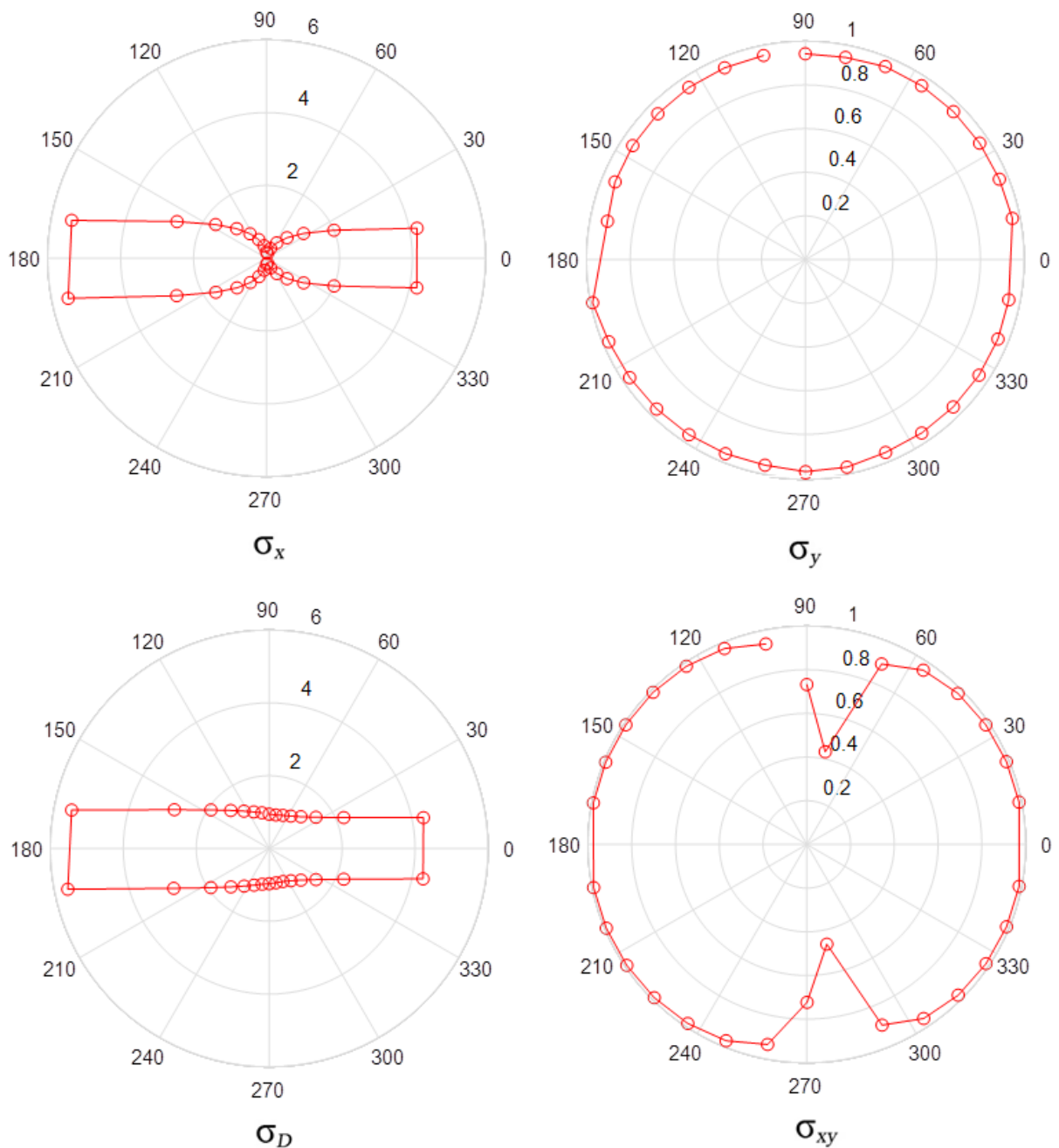


Рисунок. 5.4

СКВ σ_x змінюється в діапазоні від 0.2м до 5.5м. СКВ σ_y практично не змінюється і приймає значення 0.95м. СКВ похибок визначення відстані до об'єкта σ_D змінюється в діапазоні від 1м до 5.5м. Коефіцієнт взаємної кореляція похибок вимірювання координат цілі σ_{xy} приймає значення близькі до одиниці, тобто зв'язані лінійною функціональною залежністю.

На рис. 5.5 зображені залежності аналогічні наведеним на рис. 5.4 у випадку, коли об'єкт рухається по колу з радіусом 500 м.

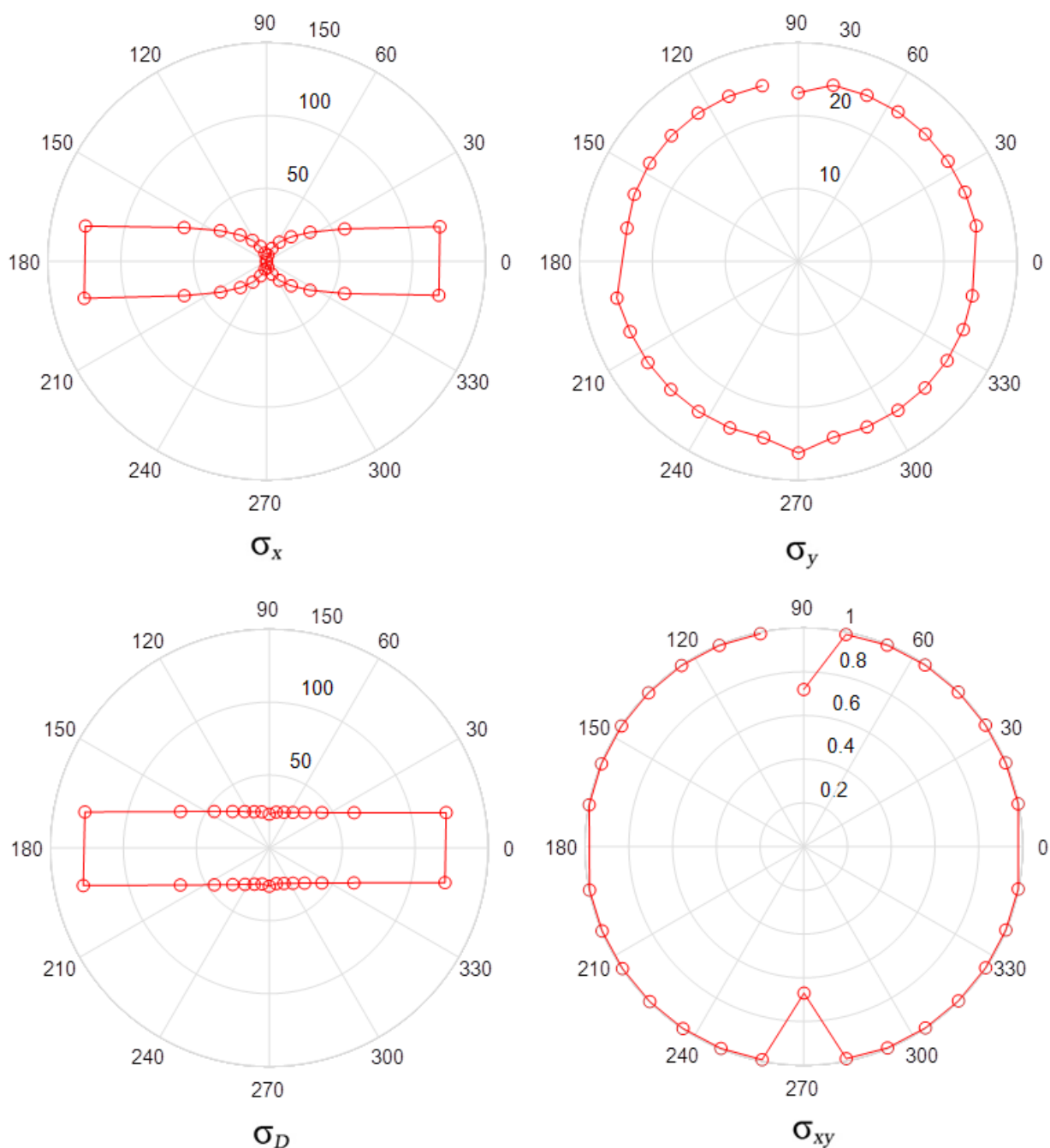


Рисунок. 5.5

СКВ похибок визначення координат об'єкта і σ_x , σ_y , відстані до об'єкта σ_D збільшились більше ніж в 20 разів. Це обумовлено тим, що на великих відстанях лінії рівних пеленгів $\varphi_1^И$, $\varphi_2^И$ перетинаються під гострими кутами, що значно збільшує похибку визначення точки їх перетину. Для зменшення похибки необхідно збільшувати базу системи.

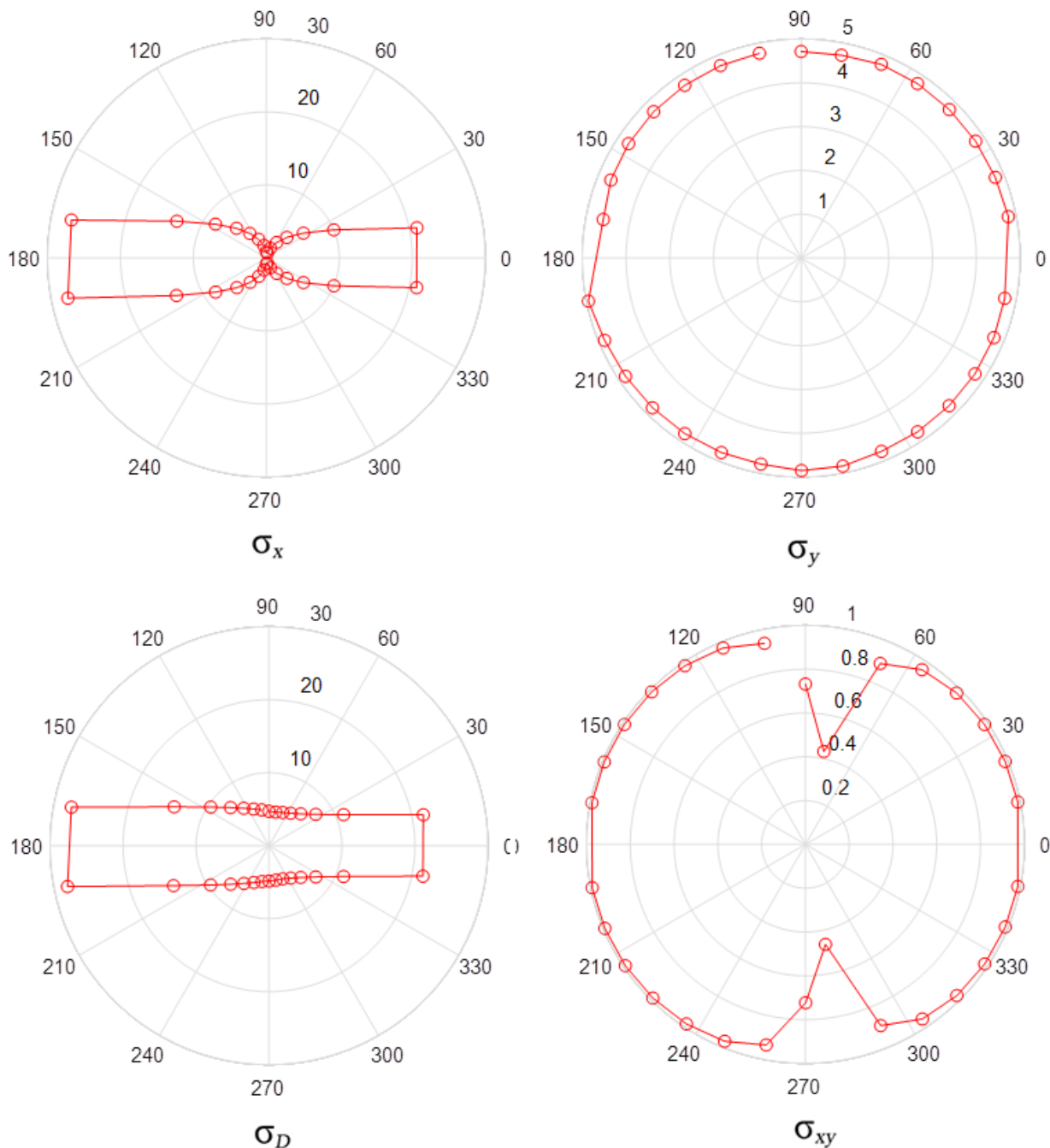


Рисунок. 5.6

На рис. 5.6 зображені залежності СКВ похибок визначення координат об'єкта σ_x , σ_y , відстані до об'єкта σ_D та коефіцієнт взаємної кореляція похибок вимірювання координат цілі σ_{xy} , від кута φ_1 в сферичній системі координат, які отримані при СКВ вимірювання кутових координат $\sigma_{\varphi_1} = \sigma_{\varphi_2} = 0.1$ град., у випадку, коли об'єкт рухається по колу з радіусом 100 м.

Збільшення СКВ вимірювання кутових координат в 5 разів призвело до збільшення СКВ похибок визначення координат цілі σ_x , σ_y , відстані до цілі σ_D також приблизно в 5 разів.

Таким чином, з отриманих результатів видно, що СКВ похибок визначення координати об'єкта σ_x і відстані до об'єкта σ_D залежать від кута приходу сигналу від об'єкта. Вони збільшуються коли φ_1 наближається до значень 0° і 180° . СКВ похибок визначення координати цілі σ_y приблизно однакове при різних φ_1 .

Зі збільшенням дальності до об'єкта СКВ похибок визначення координат об'єкта σ_x, σ_y збільшуються. Існує значна кореляція між похибками вимірювання у декартовій системі координат, що необхідно враховувати при розробці алгоритмів траєкторної обробки інформації.

ВИСНОВКИ

Вирішення та оптимізація задачі позиціонування за допомогою Wi-Fi роутера не втрачає актуальність враховуючи потенційний розвиток як існуючих алгоритмів так і баз, для них. Важливим аспектом для позиціонування є вплив перешкод на сигнал, а також положення самого роутера відносно об'єкту.

Аналізуючи доступні методи, метод триангуляції (геометричний) виявляється достатньо практичним і зрозумілим для реалізації.

Важливим аспектом є визначення кута прийому, що було розглянуто в даній роботі при дослідженні алгоритму MUSIC.

СКВ похибок визначення координати об'єкта σ_x і відстані до об'єкта σ_D залежать від кута приходу сигналу від об'єкта. Вони збільшуються коли φ_1 наближається до значень 0° і 180° . СКВ похибок визначення координати цілі σ_y приблизно однакове при різних φ_1 .

Зі збільшенням дальності до об'єкта СКВ похибок визначення координат об'єкта σ_x, σ_y збільшуються. Для зменшення похибок необхідно збільшувати базу системи.

Існує значна кореляція між похибками вимірювання у декартовій системі координат, що необхідно враховувати при розробці алгоритмів траєкторної обробки інформації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Аверин И.М. Positionирование пользователей с использованием инфраструктуры локальных беспроводных сетей // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». 2010.
2. Методы спутникового и наземного позиционирования / При поддержке ОАО «КНИИТМУ», пер. с англ. Е.Б. Махияновой под ред. к.т.н., доцента В.А.Турилова. Под редакцией Дардари Д., Луисе М., Фаллетти Э.
3. Конструирование и производство датчиков, приборов и систем. Позиционирование датчиков беспроводной сенсорной сети как способ энергосбережения. Л.С. Восков, М. М. Комаров. УДК 681.586:681.52
4. Радиоэлектроники. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов. Под ред. Д. Дардари, Э. Фаллетти, М. Луизе.
5. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління» № 2' (33) 2018 56 ISSN 1560-8956 УДК 004.021 В.В. Олійник, Є.А. Яременко
6. ISSN 1814-1196. Научный вестник НГТУ том 68, № 3, 2017, с. 104–125
Применение точек доступа Wi-Fi для регистрации движения на объекте. И.Л. РЕВА , А.А. БОГДАНОВ , Е.А. МАЛАХОВА. УДК004.056.53
7. Молодой учёный. Международный научный журнал № 14 (118) / 2016. Главный редактор: Ахметов Ильдар Геннадьевич.
8. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. А.В. Скворцов, Н.С. Мирза.

ДОДАТОК А

```
Ntr=1000;
M=32;
N=32;
w=6.28/M;
R=0.10;
p0=0;

Dpel=0.1;
dd=10;

Bazx2=0.025; Bazx1=0;
Bazy2=0; Bazy1=0;
Baz=sqrt((Bazy2-Bazy1)^2+(Bazx2-Bazx1)^2)

Kgrad=180/3.14;
Krad=3.14/180;
Dpelrad2=(Dpel*Krad)^2;

if (Bazy2-Bazy1>=0 & Bazx2-Bazx1>=0) Pb=90-
Kgrad*atan((Bazy2-Bazy1)/(Bazx2-Bazx1));end
if (Bazy2-Bazy1<0 & Bazx2-Bazx1>=0) Pb=90-
Kgrad*atan((Bazy2-Bazy1)/(Bazx2-Bazx1));end
if (Bazy2-Bazy1<0 & Bazx2-Bazx1<0) Pb=270-
Kgrad*atan((Bazy2-Bazy1)/(Bazx2-Bazx1));end
if (Bazy2-Bazy1>=0 & Bazx2-Bazx1<0) Pb=270-
Kgrad*atan((Bazy2-Bazy1)/(Bazx2-Bazx1));end
Pb

K=0;
for step = 1:N
a(step)=Kgrad*(step-1)*w;
y(step)= R*cos((step-1)*w);
x(step)= R*sin((step-1)*w);

if ((y(step)-Bazy1)>=0 & (x(step)-Bazx1)>=0) a1(step)=90-
Kgrad*atan((y(step)-Bazy1)/(x(step)-Bazx1));end
if ((y(step)-Bazy1)<0 & (x(step)-Bazx1)>=0) a1(step)=90-
Kgrad*atan((y(step)-Bazy1)/(x(step)-Bazx1));end
if ((y(step)-Bazy1)<0 & (x(step)-Bazx1)<0) a1(step)=270-
Kgrad*atan((y(step)-Bazy1)/(x(step)-Bazx1));end
if ((y(step)-Bazy1)>=0 & (x(step)-Bazx1)<0) a1(step)=270-
Kgrad*atan((y(step)-Bazy1)/(x(step)-Bazx1));end

if ((y(step)-Bazy2)>=0 & (x(step)-Bazx2)>=0) a2(step)=90-
Kgrad*atan((y(step)-Bazy2)/(x(step)-Bazx2));end
```

```

    if ((y(step)-Bazy2)<0 & (x(step)-Bazx2)>=0) a2(step)=90-
Kgrad*atan((y(step)-Bazy2)/(x(step)-Bazx2));end
    if ((y(step)-Bazy2)<0 & (x(step)-Bazx2)<0) a2(step)=270-
Kgrad*atan((y(step)-Bazy2)/(x(step)-Bazx2));end
    if ((y(step)-Bazy2)>=0 & (x(step)-Bazx2)<0) a2(step)=270-
Kgrad*atan((y(step)-Bazy2)/(x(step)-Bazx2));end

    if ((a(step)>=90-dd & a(step)<=90+dd) | (a(step)>=270-dd &
a(step)<=270+dd)) cc=0;
    else K=K+1; b1(K)=Pb-a1(step); b2(K)=Pb-a2(step);
a1K(K)=a1(step); end

end
K

t1=(1:K);
t=(1:N);
figure(1)
subplot(311);
plot(x,y,'-or'),title('TRAEKTORIY XY'),
xlabel('X'),ylabel('Y'), grid on;
%pause
subplot(312);
plot(t,a1,'-or',t,a2,'-ob'),title('a1-r a2-b'),
xlabel('i'),ylabel('a1 a2 '), grid on;
%pause
subplot(313);
plot(t1,b1,'-or',t1,b2,'-ob'),title('b1-r b2-b'),
xlabel('i'),ylabel('b1 b2 '), grid on;
a,
pause

dom=zeros(1,K);
dod=zeros(1,K)
xom=zeros(1,K);
xod=zeros(1,K);
yom=zeros(1,K);
yod=zeros(1,K);
for j = 1:Ntr
for i = 1:K
b1I(i)=b1(i)+ Dpel* randn;
b2I(i)=b2(i)+ Dpel* randn;
d(i)=Baz*sin((180-b2(i))*Krad)/sin((b2(i)-b1(i))*Krad);
xo(i)=d(i)*sin((Pb-b1(i))*Krad);
yo(i)=d(i)*cos((Pb-b1(i))*Krad);
dI(i)=Baz*sin((180-b2I(i))*Krad)/sin((b2I(i)-b1I(i))*Krad);
xI(i)=dI(i)*sin((Pb-b1I(i))*Krad);
yI(i)=dI(i)*cos((Pb-b1I(i))*Krad);

```



```

c1(i)=-Baz*sin((180-b2(i))*Krad)*cos((b2(i)-
b1(i))*Krad)/(sin((b2(i)-b1(i))*Krad))^2;
c2(i)=-Baz*(cos((180-b2(i))*Krad)-sin((180-
b2(i))*Krad)*cos((b2(i)-b1(i))*Krad)/sin((b2(i)-
b1(i))*Krad))/sin((b2(i)-b1(i))*Krad);
cx1(i)=c1(i)*sin(a1K(i)*Krad)+d(i)*cos(a1K(i)*Krad);
cy1(i)=c1(i)*cos(a1K(i)*Krad)-d(i)*sin(a1K(i)*Krad);
cx2(i)=c2(i)*sin(a1K(i)*Krad);
cy2(i)=c2(i)*cos(a1K(i)*Krad);
Rr(i)=Dpelrad2*(c1(i)^2+c2(i)^2);
Rx(i)=Dpelrad2*(cx1(i)^2+cx2(i)^2);
Ry(i)=Dpelrad2*(cy1(i)^2+cy2(i)^2);
Rxy(i)=Dpelrad2*(cx1(i)*cy1(i)+cx2(i)*cy2(i));
sigmRr(i)=sqrt(Rr(i));
sigmRx(i)=sqrt(Rx(i));
sigmRy(i)=sqrt(Ry(i));
RxyNorm(i)=Rxy(i)/(sigmRx(i)*sigmRy(i));
[dom(i),dod(i)]=disper(j,dI(i)-d(i),dom(i),dod(i));
[xom(i),xod(i)]=disper(j,xI(i)-xo(i),xom(i),xod(i));
[yom(i),yod(i)]=disper(j,yI(i)-yo(i),yom(i),yod(i));
end
end

```

```

sigmRr
figure(2)
subplot(311);
plot(a1K,sigmRr,'-or',a1K,dom,'b',a1K,sqrt(dod),'g');
subplot(312);
plot(a1K,sigmRx,'-or',a1K,xom,'b',a1K,sqrt(xod),'g');
subplot(313);
plot(a1K,sigmRy,'-or',a1K,yom,'b',a1K,sqrt(yod),'g');
pause
figure(3)
a1K=a1K.*Krad;
subplot(221);
polar(a1K,sigmRr,'-or');
subplot(222);
polar(a1K,sigmRx,'-or');
subplot(223);
polar(a1K,sigmRy,'-or');
subplot(224);
polar(a1K,abs(RxyNorm),'-or');

```