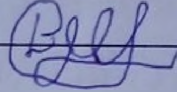


Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

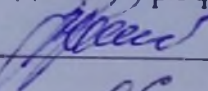
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

ПРОГРАМА ВИЯВЛЕННЯ ЗНАЧЕННЯ АЗИМУТУ ДЛЯ СИСТЕМИ ДВОХ
ВИПРОМІНЮВАЧІВ З ДОВІЛЬНИМ ФАЗОВИМ ЗСУВОМ

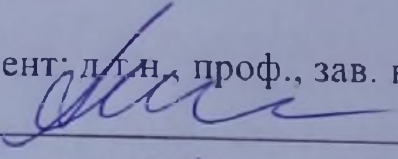
Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-23мс
спеціальності 172 – Електронні комунікації та
радіотехніка

 Давискиба В. І.

Керівник: д.т.н., проф., проф. каф. ІКСТ

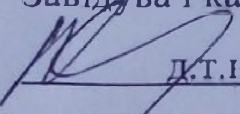
 Крижановський В. Г.
« 12 » 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., проф., зав. каф. ІРТС

 Осадчук О. В.
« 12 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В. М.

« 12 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
«5» / 05 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Давискибі Владиславу Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Програма виявлення значення азимуту для системи двох випромінювачів з довільним фазовим зсувом

керівник роботи Крижановський Володимир Григорович д.т.н., проф. каф ІКСТ

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

затверджені наказом ВНТУ від “20” березня 2025 року № 97

2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

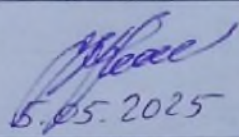
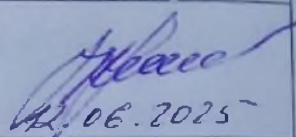
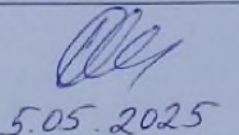
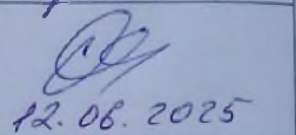
3. Вихідні дані до роботи: кількість випромінювачів – 2, визначення азимуту- з використанням генетичного алгоритму, наявність довільного фазового зсуву..

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, загальні відомості про радіонавігаційні системи, загальні відомості про радіотехнічні методи та засоби навігації, визначення азимуту для систем двох випромінювачів, використання генетичного алгоритму для визначення азимуту приходу сигналу, охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): локальна система координат, класифікація радіонавігаційних систем за типом

вимірювання, структура RLBІ систем для 2D визначення напрямку, зв'язки між спектральними властивостями та двовимірними напрямками, вигляд генетичного алгоритму, генетичний алгоритм потокових обчислень.

6. Консультанти розділів роботи

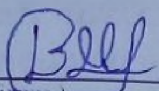
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Крижановський В.Г. д.т.н, проф. каф ІКСТ	 5.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцка С.В. проф. каф. ЕМДПБ	 5.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

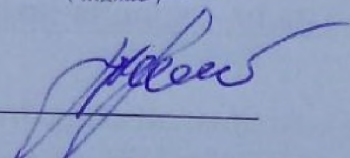
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р	
8	Захист БКР	13.06.2025р	

Студент


(підпис)

Давискиба В.І.

Керівник роботи



Крижановський В.Г.

АННОТАЦІЯ

Давискиба В.І. Програма виявлення значення азимуту для системи двох випромінювачів з довільним фазовим зсувом. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 - Електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 90с. Укр. Мовою Бібліогр.: 28 назв; рис.: 15; табл.. 8.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню процесу визначення азимуту для двох випромінювачів з довільним фазовим зсувом. Робота включає огляд методів визначення азимуту для радіонавігаційних систем, опис методу визначення азимуту для двох випромінювачів, наведено опис запропонованого генетичного алгоритму для визначення азимуту випромінювача. Наведено огляд питань охорони праці при проведенні досліджень.

Ключові слова: генетичний алгоритм, визначення азимуту, фазовий зсув, радіонавігаційні системи.

ANNOTATION

Davyskyba V.I. Program for determining the azimuth value for a system of two radiators with an arbitrary phase shift. Bachelor's qualification work in the specialty 172 - Electronic communications and radio engineering, educational program - software for telecommunication systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 90p. Ukrainian. In the language Bibliography: 28 titles; Fig.: 15; Table. 8.

The bachelor's qualification work is devoted to the study of the process of determining the azimuth for two radiators with an arbitrary phase shift. The work includes a review of methods for determining the azimuth for radio navigation systems, a description of the method for determining the azimuth for two radiators, a description of the proposed genetic algorithm for determining the azimuth of the radiator. An overview of labor protection issues during research is provided.

Keywords: genetic algorithm, azimuth determination, phase shift, radio navigation systems.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАДІОНАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ.....	11
1.1 Основи теорії навігації.....	12
1.2 Елементи руху для аналізу навігаційними системами.....	13
1.3 Особливості використання системи координат для опису параметрів траєкторій руху.....	22
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАДІОТЕХНІЧНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ НАВІГАЦІЇ	24
2.1 Основи радіотехнічних методів навігації.....	24
2.2 Класифікація радіонавігаційних систем.....	28
3. ВИЗНАЧЕННЯ АЗИМУТА ДЛЯ СИСТЕМ ДВОХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ.....	31
3.1 Загальні положення	31
3.2 Формулювання моделі	32
3.3 Властивості оцінки DOA системи RLBI.....	35
3.4 Оцінка азимуту та напрямку	40
4 ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АЗИМУТУ ПРИХОДУ СИГНАЛУ.....	52
4.1 Загальні положення	52
4.2 Задача оцінки параметрів сигналу.....	53
4.3 Генетичний алгоритм, застосований у задачі оцінки параметрів сигналу...	54
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	66
5.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи.....	67
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	69
5.3 Пожежна безпека.....	76
ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	83
Додаток Б ПОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	90

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЗ – азимут

ВЧ – високочастотний

ГДК – гранично допустима концентрація

ГА – генетичний алгоритм

ЗН – значення напрямку

ІК – істинний курс

ІПР – істинний пеленг радіоорієнтира

ІПЛ – істинний пеленг літака

ККР – курсовий кут орієнтиру

ЛЧМ – лінійно-частотна модуляція

МК – магнітний курс

МПР – магнітний пеленг радіоорієнтира

МПЛ – магнітний пеленг літака

ОК – ортодромічний курс

ПЗ – програмне забезпечення

ПК – персональний комп'ютер

ПЛ – пеленг літака

РЛС – радіолокаційна станція

РНС – радіонавігаційна система

СРНС – супутникова радіонавігаційна система

SDR – software-defined radio (радіо з програмно визначеними характеристиками)

SNR – signal-to-noise ratio (відношення сигнал/шум)

USB – універсальна послідовна шина

VSM – Virtual System Modeling (віртуальне моделювання систем)

ВСТУП

Актуальність теми.

Визначення азимуту є важливим завданням у багатьох сферах, зокрема в радіолокації, навігації, геодезії та системах зв'язку. У випадку систем двох випромінювачів із довільним фазовим зсувом, точне визначення азимуту дозволяє підвищити ефективність позиціонування та корекції сигналів, що особливо важливо для автономних систем, військових технологій та аерокосмічних досліджень.

Обґрунтування актуальності

1. Зростання потреби у високоточних вимірюваннях

- Сучасні радіотехнічні системи вимагають точного визначення напрямку сигналу для коректної роботи.

- Використання двох випромінювачів дозволяє зменшити похибки та підвищити точність азимутальних вимірювань.

2. Розвиток автономних систем

- Безпілотні апарати, роботизовані платформи та навігаційні системи потребують надійних алгоритмів визначення азимуту для коректного орієнтування у просторі.

- Впровадження адаптивних методів обробки фазового зсуву дозволяє підвищити точність навігації навіть у складних умовах.

3. Оптимізація систем зв'язку та радіолокації

- Військові та цивільні радіолокаційні системи використовують азимутальні вимірювання для ідентифікації та відстеження об'єктів.

- Корекція фазового зсуву дозволяє зменшити вплив перешкод та підвищити якість сигналу.

Аналіз останніх досліджень.

Останні дослідження у сфері визначення азимуту для систем двох випромінювачів із довільним фазовим зсувом зосереджені на підвищенні точності вимірювань, оптимізації алгоритмів обробки сигналів та зменшенні впливу перешкод.

Основні напрями досліджень:

1. Розробка програмних алгоритмів для визначення азимуту
 - У дослідженні[2] розглядається архітектура програмного забезпечення, що дозволяє відображати радіолокаційну інформацію та аналізувати азимутальні параметри.
2. Методи обчислення географічного та магнітного азимуту
 - У роботі[3] аналізуються математичні моделі, що враховують схилення магнітної стрілки та зближення меридіанів, що важливо для точного визначення напрямку.
3. Практичні методи визначення азимуту на місцевості
 - Дослідження[4] розглядають методи польових вимірювань, включаючи використання компасів та геодезичних інструментів для корекції фазового зсуву.

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є створення алгоритму, що забезпечує високу точність визначення напрямку сигналу, оптимізацію обробки фазових параметрів та мінімізацію похибок у вимірюванні азимуту.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

Аналіз методів визначення азимуту

- дослідження існуючих алгоритмів розрахунку азимуту.
- визначення оптимальних методів для роботи із двома випромінювачами та змінним фазовим зсувом.

Розробка математичної моделі

- формування рівнянь, що враховують взаємодію випромінювачів.
- оцінка впливу фазового зсуву та перешкод на точність вимірювання.

Створення програмного алгоритму

- реалізація алгоритму визначення азимуту на основі розрахованих математичних моделей.

- оптимізація обчислювальної складності для швидкої обробки даних.

Моделювання та тестування

- перевірка роботи алгоритму на віртуальних та реальних даних.

- аналіз похибок та розробка методів їх компенсації.

Розробка програмного забезпечення

- створення інтерфейсу користувача для інтерактивної роботи із програмою.

- забезпечення можливості візуалізації отриманих результатів.

Впровадження у практичні системи

- аналіз можливостей інтеграції програми у радіолокаційні та навігаційні системи.

- оцінка продуктивності алгоритму для різних умов експлуатації.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАДІОНАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ

Навігаційні системи мають критичне значення для авіації, космонавтики, морського та річкового транспорту, оскільки їх точність і надійність безпосередньо впливають на ефективність керування рухомими об'єктами. Сучасні радіонавігаційні технології вирізняються високою точністю та дальністю дії, а супутникові системи (СРНС) займають особливе місце завдяки глобальному покриттю та стабільності сигналу[1].

Навігація у загальному розумінні — це процес керування рухомим об'єктом у просторі. Вона охоплює два основні аспекти:

1. Теоретичне обґрунтування та методи контролю траєкторії руху.
2. Маршрутизацію та вибір оптимального маршруту, що забезпечує точне переміщення об'єкта.

Як наука, навігація досліджує методи збору, обробки та використання даних про рух об'єктів, дозволяючи визначати місцезнаходження та напрямок руху у визначений момент часу.

Особливу роль відіграє радіонавігація, яка базується на радіотехнічних методах визначення координат, швидкості та напрямку руху. Вона включає алгоритми супроводження об'єктів у просторі на основі обробки радіосигналів.

Радіонавігаційні системи — це комплекси радіотехнічних засобів, що забезпечують отримання інформації про місцезнаходження об'єктів шляхом випромінювання, прийому та обробки радіосигналів. Вони є універсальним джерелом даних про координати та швидкість рухомих об'єктів.

Залежно від місця розташування, навігаційні системи поділяються на:

- Бортові, розміщені на рухомих об'єктах.
- Наземні або супутникові, які працюють з фіксованих точок.

За способом використання вони можуть бути автономними або неавтономними, залежно від потреби у зовнішніх даних для корекції траєкторії.

Визначення напрямку на джерело сигналу

У сучасних радіотехнічних системах важливе значення має точне визначення напрямку на джерело випромінювання. Це критично для

радіолокаційних станцій, навігаційних комплексів, систем радіоелектронної боротьби та спостереження.

Один із найбільш ефективних методів визначення напрямку — аналіз фази сигналу, прийнятого двома або більше антенами. Такі системи вирізняються:

- Високою точністю визначення азимуту.
- Спрощеною конструкцією, що робить їх зручними для практичного застосування.

1.1 Основи теорії навігації

Основні завдання навігації

Навігація виконує критично важливу функцію управління переміщенням рухомого об'єкта, забезпечуючи його точне слідування заданою траєкторією та прибуття у визначену точку у встановлений час з урахуванням оптимальних умов[2].

Для досягнення цих цілей необхідно:

- Визначити поточні координати об'єкта та його висоту у відповідній системі координат.
- Враховувати динамічні параметри руху не лише цільового об'єкта, а й оточуючих елементів (швидкість, прискорення, кутові координати та їх похідні).
- Розрахувати додаткові параметри, що забезпечують точність прибуття в призначену точку та гарантують безпеку переміщення.

Сукупність координатних і часових характеристик об'єкта, а також їх похідних у часі, визначаються як параметри руху, що вимірюються протягом навігаційного процесу[3].

Види навігації

Залежно від рівня деталізації контролю розрізняють три основні типи:

- Двомірна (2D) – забезпечує контроль маршруту, без урахування висоти.

- Тривимірна (3D) – включає контроль профілю польоту, враховуючи просторові координати.
- Чотиривимірна (4D) – має жорстку прив'язку до часу, контролюючи момент проходження ключових точок маршруту.

1.2 Елементи руху для аналізу навігаційними системами

Параметри, що визначають просторове положення об'єкта (координати) та його динамічні характеристики (напрямок переміщення, швидкість), називаються навігаційними елементами руху або навігаційними параметрами[1,3,4].

Для літальних апаратів (ЛА) до основних навігаційних параметрів належать:

- Місцеположення – поточні координати ЛА у просторі.
- Висота – вертикальне положення відносно земної поверхні або іншої опорної точки.
- Курс – напрямок руху літального апарата у горизонтальній площині.
- Курсовий кут орієнтиру – відносне положення ЛА щодо заданого орієнтира.
- Пеленг – напрямок на радіолокаційне або навігаційне джерело.
- Повітряна швидкість – швидкість ЛА відносно навколишнього повітряного середовища.
- Шляхова швидкість – швидкість руху ЛА у координатній системі з урахуванням вітрових умов.
- Шляховий кут – напрямок руху літального апарата відносно земної поверхні.
- Кут зносу – відхилення траєкторії ЛА через вплив вітру.
- Час руху – загальний період переміщення з точки старту до кінцевої точки маршруту.

Курс — це кут у горизонтальній площині між північним напрямком меридіана, що проходить через центр маси літального апарата (ЛА), та

проекцією його поздовжньої осі. Вимірювання здійснюється за годинниковою стрілкою, починаючи від півночі.

Ця величина є ключовим параметром навігації та управління польотом, використовується для корекції траєкторії та визначення загального напрямку руху.

У навігації розрізняють кілька типів курсу (рис. 1.1), кожен з яких має власні орієнтири для відрахунку напрямку руху:

- Істинний курс (ІК) – визначається щодо географічного меридіана (N_i), тобто напрямку на географічну північ.
- Магнітний курс (МК) – відраховується від магнітного меридіана (N_m), що враховує магнітне схилення у конкретній місцевості.
- Компасний курс (КК) – базується на показаннях магнітного компаса літака (N_k), який може мати похибки через магнітні аномалії та вплив навколишніх електромагнітних полів[2].

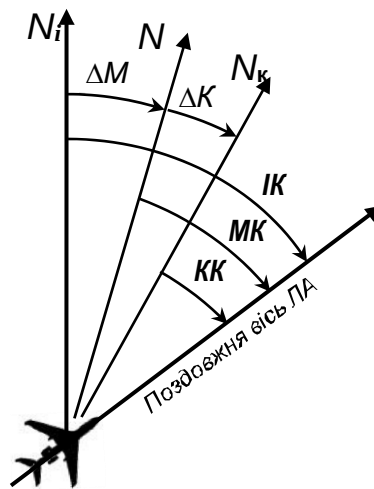


Рисунок 1.1 – Вигляд різновидів курсу

Магнітне схилення (ΔM) – це кутова різниця між істинним курсом і магнітним курсом, що виникає через відмінність географічного та магнітного полюсів Землі.

Ця величина змінюється залежно від місця розташування і може бути західною або східною:

- Західне схилення – коли магнітний меридіан відхиляється ліворуч від географічного.
- Східне схилення – коли магнітний меридіан відхиляється праворуч від географічного.

Магнітне схилення є важливим фактором корекції курсу при навігації літальних апаратів і морських суден, оскільки впливає на точність орієнтування.

$$IK=MK\pm\Delta M.$$

Девіація компаса (ΔK) — це різниця між магнітним курсом і компасним курсом, що виникає через спотворення магнітного поля Землі.

Основні причини девіації:

- Вплив феромагнітних матеріалів у конструкції літального апарата або судна.
- Інструментальна похибка компаса, спричинена його конструктивними особливостями або механічними факторами.

Для корекції девіації застосовуються калібрування компаса та спеціальні методи компенсації впливу зовнішніх факторів.

$$MK=KK\pm\Delta K; IK=KK\pm\Delta M\pm\Delta K.$$

Курсовий кут орієнтиру (ККР) – це кут між проекцією поздовжньої осі літального апарата (ЛА) на горизонтальну площину та напрямком на заданий орієнтир.

У радіонавігації та навігаційних системах визначають напрямок на радіоорієнтир, яким може бути:

- радіостанція
- радіомаяк
- радіонавігаційна точка (РНТ)

Цей параметр має важливе значення для корекції курсу, виконання навігаційних розрахунків та забезпечення точного визначення місцеположення об'єкта у просторі.

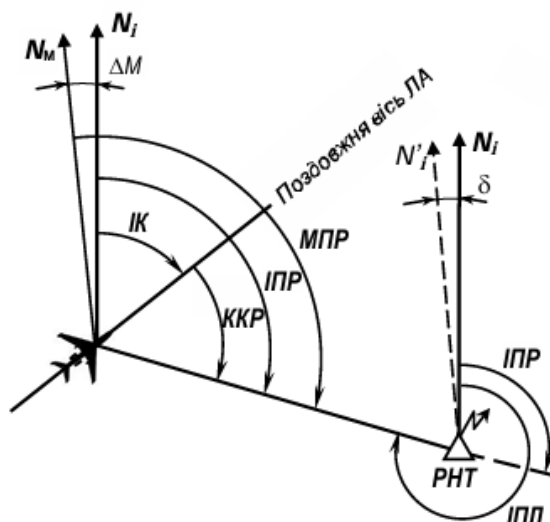


Рисунок 1.2 - Пеленгування радіо орієнтира

Пеленг (азимут) радіоорієнтира (ПР) — це кут у горизонтальній площині між північним напрямком меридіана, що проходить через центр маси літального апарата (ЛА), та напрямком на радіоорієнтир.

Розрізняють два типи пеленгу:

- істинний пеленг радіоорієнтира (ІПР) — вимірюється від географічного меридіана, тобто відносно істинного північного напрямку.
- магнітний пеленг (МПР) — визначається від магнітного меридіана, враховуючи магнітне схилення місцевості.

Пеленг використовується для навігаційних розрахунків, визначення положення ЛА та корекції траєкторії руху відносно радіоорієнтира.

$$ІПР = МПР \pm \Delta M = MK \pm \Delta M + ККР = ІК + ККР.$$

Пеленг літака (ПЛ) — це кут у горизонтальній площині, що визначається між північним напрямком меридіана, який проходить через наземну радіонавігаційну точку (РНТ), та напрямком на літак.

Розрізняють два види пеленгу:

- Істинний пеленг літака (ІПЛ) — вимірюється від географічного меридіана, орієнтованого на істинну північ.
- Магнітний пеленг літака (МПЛ) — визначається від магнітного меридіана, враховуючи магнітне схилення місцевості.

Пеленг літака є важливим параметром навігації та визначення місцезнаходження ЛА відносно радіоорієнтира, використовується для корекції курсу та забезпечення точного маршруту.

$$ІПЛ = ІПР \pm 180^\circ \pm \delta, \text{де} \quad \delta - \text{кут сходження меридіанів.}$$

Пеленг літака (ПЛ) — це кут у горизонтальній площині, що визначається між північним напрямком меридіана, який проходить через наземну радіонавігаційну точку (РНТ), та напрямком на літак.

Розрізняють два види пеленгу:

- істинний пеленг літака (ІПЛ) — вимірюється від географічного меридіана, орієнтованого на істинну північ.
- іагнітний пеленг літака (МПЛ) — визначається від магнітного меридіана, враховуючи магнітне схилення місцевості.

Пеленг літака є важливим параметром навігації та визначення місцезнаходження ЛА відносно радіоорієнтира, використовується для корекції курсу та забезпечення точного маршруту.

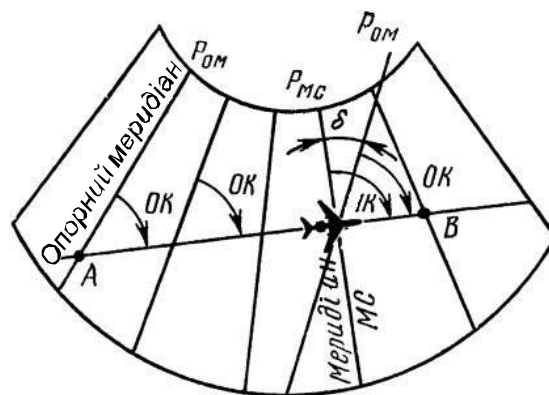


Рисунок 1.3 – Визначення ортодромічного курсу

Кут сходження меридіанів (δ) — це кут між напрямком опорного меридіана (РОМ) та меридіаном місцеположення літака (РМС)[2].

Він вважається:

- Позитивним, якщо меридіан місця літака (РМС) розгорнуто за годинниковою стрілкою відносно РОМ.
- Негативним, якщо РМС повернуто у протилежному напрямку, як показано на рисунку 1.3.

Якщо перенести напрямок РОМ у точку МС (місцеположення літака), то можна коректно визначити його положення відносно опорного меридіана, що має значення у навігаційних розрахунках.

$$OK=IK\pm\delta.$$

Кут сходження меридіанів на коротких ділянках маршруту (до 500–600 км) можна наближено обчислити за такою формулою:

$$\delta=(\lambda_{\text{ом}}-\lambda_{\text{мс}})\sin\varphi,$$

Кут сходження меридіанів (δ) на довгих маршрутах визначається за складнішими формулами сферичної тригонометрії, а для коротких відстаней — наближено.

Висота польоту (H)

Висота — це вертикальна відстань між літальним апаратом (ЛА) і земною поверхнею, яка залежить від навігаційних умов та етапу польоту. Розрізняють кілька типів висоти:

- Абсолютна (Набс) — вимірюється відносно рівня моря.
- Істинна (Ніст) — відстань до реальної земної поверхні безпосередньо під ЛА.
- Відносна (Нвід) — висота щодо заданої контрольної точки або об'єкта.
- Барометрична (Нбар) — визначається за атмосферним тиском за допомогою висотоміра.

Істинна швидкість V визначається за показаннями аеродинамічного показника швидкості, що працює на основі вимірювання динамічного тиску зустрічного потоку повітря.

$$V = \sqrt{\frac{2(\rho_{\text{повн}} - \rho_{\text{ст}})}{\rho_{\text{ст}}} g c T_H},$$

де $\rho_{\text{повн}}$ – повний тиск; $\rho_{\text{ст}}$ – статичний тиск; g – прискорення вільного падіння ($9,8 \text{ м/с}^2$); $c = 29,37 \text{ м/град}$; T_H – абсолютна температура на висоті польоту H .

Дійсну повітряну швидкість визначають за формулою

$$V = V_{\text{ind}} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} k_c,$$

У формулі визначення істинної повітряної швидкості враховуються такі параметри:

ρ_0 – щільність повітря на рівні моря в умовах стандартної атмосфери.

ρ – щільність повітря на заданій висоті польоту.

k_c – коефіцієнт, що коригує стисливість повітря при русі літального апарата.

Ці змінні дозволяють скоригувати розрахунок швидкості відповідно до атмосферного тиску та температури на конкретній висоті, що забезпечує точне аеродинамічне моделювання польоту.

Число Маха (M) визначається як відношення істинної повітряної швидкості до швидкості звуку у даних атмосферних умовах: де:

Цей параметр використовується для класифікації режимів польоту:

- Субзвуковий ($M < 1$) – швидкість нижча за звуковий бар'єр.
- Транзвуковий ($M \approx 1$) – наближення до швидкості звуку.
- Надзвуковий ($M > 1$) – перевищення звукової швидкості.
- Гіперзвуковий ($M > 5$) – надзвичайно високі швидкості польоту.

Шляхова швидкість (W)

Шляхова швидкість (W) характеризує швидкість руху літального апарата відносно земної поверхні та залежить від повітряної швидкості та впливу вітру.

Навігаційний трикутник швидкостей

На рисунку 1.5 представлений навігаційний трикутник швидкостей, який використовується для розрахунку траєкторії польоту з урахуванням:

- Шляхової швидкості (W),
- Повітряної швидкості (V),
- Вітрового впливу.

Ця схема дозволяє визначити фактичний курс літального апарата з урахуванням корекції на вітер[6].

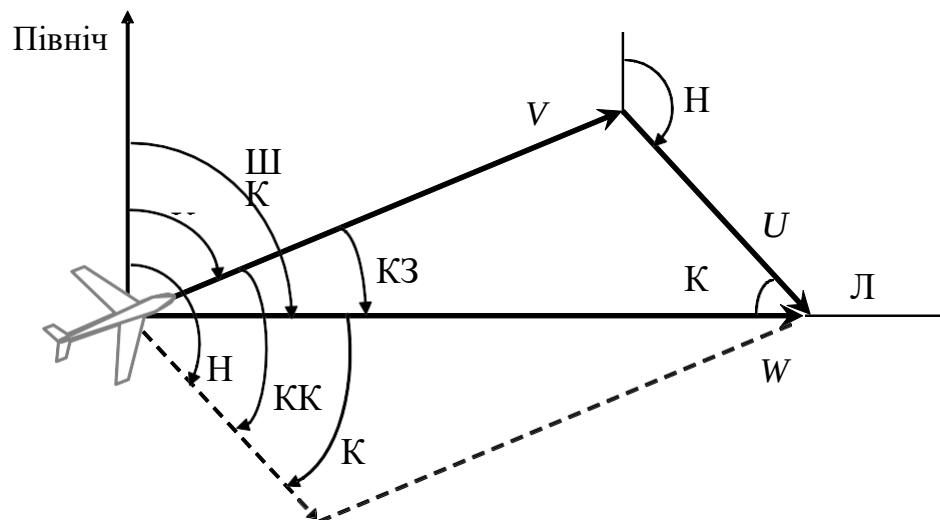


Рисунок 1.5 – Вигляд навігаційного трикутника швидкостей

K – курс літального апарата.

$ШК$ – шляховий кут, напрямок фактичного руху ЛА відносно земної поверхні.

$НВ$ – навігаційний вітер, що впливає на траєкторію польоту.

$ККВ$ – курсовий кут вітру, відхилення напрямку польоту через вплив вітру.

$КВ$ – кут вітру, що визначає ефект зносу літального апарата.

$ЛШ$ – лінія шляху, фактична траєкторія руху ЛА.

$KЗ$ – кут зносу, що показує відхилення від запланованого курсу.

U – вітер, що впливає на аеродинамічні характеристики польоту.

1.3 Особливості використання системи координат для опису параметрів траєкторій руху

При польотах на порівняно невеликі відстані, коли кривизною Землі можна знехтувати, використовують горизонтальні системи координат:

- Прямокутну декартову систему
- Полярну або сферичну систему

Прямокутна декартова система

У цій системі положення центру маси ЛА відносно радіонавігаційної станції (РНС) визначається координатами x , y та висотою польоту h .

Сферична система координат

Просторове положення ЛА описується через:

- Відстань R від початку координат до ЛА.
- Кут місця (β) — між площиною горизонту та радіусом-вектором, проведеним від початку координат до ЛА.
- Азимут (θ) — кут між північним напрямком меридіана початку координат та проекцією радіуса-вектора R у горизонтальній площині.

У практичних навігаційних розрахунках сферичну систему координат часто замінюють на полярну площинну (R, θ) для спрощення обчислень.



Рисунок 1.6 – Локальна система координат

Сукупність координат літального апарата (ЛА) та їх похідних за часом називають параметрами руху.

Для вирішення навігаційних задач необхідно:

1. Вимірювати параметри дійсного руху об'єкта.
2. Зіставляти отримані дані з параметрами заданої траєкторії.

Цей процес є основою навігації, оскільки дозволяє коригувати курс, забезпечуючи точне проходження запланованого маршруту.

Лінія шляху

Проекція траєкторії польоту ЛА на земну поверхню називається лінією шляху.

Розрізняють:

- Лінію заданого шляху (ЛЗШ) – відповідає запланованій траєкторії руху ЛА.
- Лінію фактичного шляху (ЛФШ) – визначає реальну траєкторію польоту ЛА.

Положення ЛА при польоті між проміжними пунктами маршруту (ППМ1 – ППМ2) визначається лінійними координатами:

- s – пройдена відстань,
- z – бічне ухилення,
- h – висота польоту.

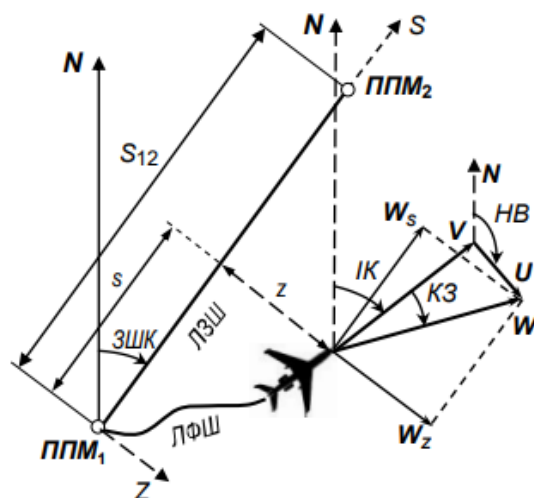


Рисунок 1.7 – Вигляд лінії шляху

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАДІОТЕХНІЧНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ НАВІГАЦІЇ

2.1 Основи радіотехнічних методів навігації

У радіонавігаційних системах визначення параметрів ґрунтується на фізичних властивостях електромагнітних полів і хвиль радіотехнічного діапазону, що поширюються від передавача до приймача[2,5,6].

Зв'язок навігаційних параметрів з електромагнітними сигналами

Для вирішення навігаційних задач необхідно встановити відповідність між параметрами електромагнітних сигналів та просторово-часовим положенням об'єкта.

Положення об'єкта відносно наземної радіонавігаційної системи (РНС) в сферичній системі координат (рис. 2.1) описується:

- Відстанню (R) від початку координат до об'єкта.
- Кутом місця (β) між горизонтом і радіусом-вектором до ЛА.
- Азимутом (θ) між північним напрямком меридіана та горизонтальною проекцією R .

Динаміка координат та параметри сигналу

Якщо об'єкт рухається, його координати змінюються з часом. Параметри сигналів, що випромінюються передавачем наземної РНС та приймаються приймачем на ЛА, залежать від:

- Відносного положення передавача і приймача
- Взаємного руху цих систем

До змінних параметрів електромагнітного поля належать:

- Фаза сигналу
- Амплітуда
- Частота
- Час надходження сигналу

Двостороння радіолінія зв'язку

Наземна РНС та бортова РНС можуть використовувати приймальну та передавальну апаратуру, залежно від методу радіонавігації. На рис. 2.1 схематично зображена двостороння радіолінія, що з'єднує передавач і приймач.

Напруженість електромагнітного поля

Для встановлення зв'язку між параметрами електромагнітного поля та навігаційною інформацією розглядають електричну складову напруженості: $e(t)$ яку створює точковий випромінювач РНС.

$$\vec{e}(t) = \text{Re} E_m(t) \exp(-j[\omega_0 t + \varphi(t)]), \quad (2.1)$$

де $E_m(t)$ – амплітуда в залежності від часу, що визначається амплітудною модуляцією; ω_0 – несуча частота; $\theta(t)$ – фаза сигналу в залежності від часу, що визначається фазовою або частотною модуляцією.

При зміні взаємного положення передавача і приймача змінюється:

- Довжина радіолінії (R) – відстань між передавачем та приймачем.
- Кутові координати (β, θ) – орієнтація приймача, встановленого на рухомому об'єкті.

Ця модель використовується для аналізу змін характеристик радіосигналу, враховуючи рух об'єкта, взаємну орієнтацію передавача і приймача та зміни умов розповсюдження хвиль.

$$\vec{e}_s(t-\tau, \beta, \theta) = \text{Re} E_{ms}(t-\tau, \beta, \theta) \exp(-j[\omega_0(t-\tau) + \varphi(t-\tau, \beta, \theta)]), \quad (2.2)$$

де $\eta = R(t)/c$ – запізнення сигналу на час, що несе інформацію про відстань між передавачем і приймачем; c – швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі.

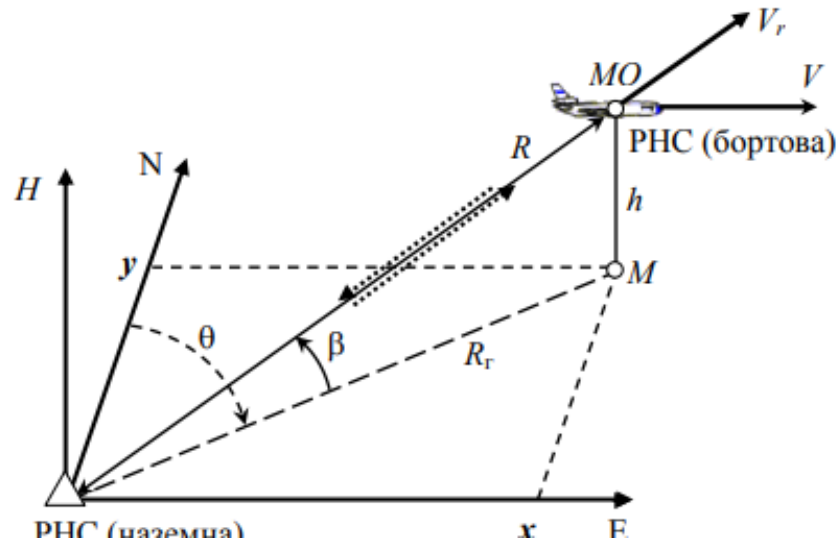


Рисунок 2.1 – Положення елементів РНС в просторі

Амплітуда сигналу, що приймається антеною з нормованою діаграмою спрямованості, може бути представлена у вигляді математичної залежності, яка враховує вплив просторового розташування та зменшення сигналу під час його розповсюдження.

$$U_{ms}(t-\tau, \beta, \theta) = U_{smax}(t-\tau)G(\beta)G(\theta), \quad (2.3)$$

де U_{smax} – це максимальне значення амплітуди сигналу, яке може бути прийняте антеною. $G(\theta)$ – діаграма спрямованості антени у горизонтальній площині, що залежить від кута θ . $G(\beta)$ – діаграма спрямованості антени у вертикальній площині, пов'язана з кутом β .

За значенням амплітуди сигналу (максимуму або мінімуму) можна визначити кутові координати β та θ , а затримка сигналу τ містить інформацію про відстань до об'єкта.

Характеристики радіосигналу змінюються під впливом відносного руху передавача і приймача. Коли бортовий приймач переміщується відносно передавача РНС зі швидкістю V_r , яка відповідає радіальній складовій швидкості об'єкта V , довжина радіолінії змінюється згідно з наступним виразом.

$$R(t) = R_0 + V_r t + V_r^2 t^2 / 2, \quad (2.4)$$

де $V_r = dR/dt$ – радіальна швидкість, $V_r = d^2 R / dt^2$ – радіальне прискорення.

У цьому випадку спостерігається ефект Доплера, при якому несуча частота ω_0 змінюється на величину доплерівського приросту Ω_d . Для рис. 2.1 цей приріст має від'ємне значення, що свідчить про зниження частоти у процесі руху об'єкта.

$$\Omega_d = \omega_0 + V_r / c + \omega_0 \dot{V}_r / 2c \quad (2.5)$$

Переносниками навігаційної інформації можуть бути як немодульовані, так і модульовані сигнали. Так, якщо приймається сигнал, модульований за амплітудою низькочастотною огибаючою Ω_M , то його можна записати

$$U_s(t) = U_{ms} [1 + m \cos \Omega_M(t - \tau)] \cos [\omega_0(t - \tau) + \varphi(t - \tau)], \quad (2.6)$$

де t – коефіцієнт глибини амплітудної модуляції, що визначає рівень зміни амплітуди сигналу. τ – час запізнювання сигналу, що залежить від відстані $R(t)$, на яку він поширюється.

Зміна амплітуди прийнятого сигналу розраховується за відповідною математичною залежністю, що враховує параметри модуляції та поширення хвиль у просторі.

$$U_{ms}(t - \tau) = U_{ms} [1 + m \cos (\Omega_M t - \Omega_M R_0 / c - \Omega_d t)]. \quad (2.7)$$

При низьких частотах ($\Omega_M \leq \omega_0$) вплив Доплерівського ефекту є незначним, тому в огибаючій зберігається інформація про відстань.

Кутові координати визначаються за допомогою приймальної антени, яка складається із сукупності елементарних вібраторів відповідно до (1.3).

Для визначення координат рухомих об'єктів часто використовують огибаючу модульованих коливань, оскільки фазові зсуви є найпростішими для вимірювання та забезпечують високу точність на низьких частотах [6].

Для визначення швидкості об'єкта застосовують високочастотні несучі коливання, що спричиняють значний Доплерівський зсув частоти.

Таким чином, зміни параметрів радіосигналу РНС (фази, амплітуди, частоти, часової затримки) дають інформацію про навігаційні параметри:

- Відстань,
- Кутове положення,
- Швидкість,
- Прискорення у русі.

Ці параметри використовуються для розв'язання навігаційних задач[5].

2.2 Класифікація радіонавігаційних систем

Методи та засоби радіонавігації класифікуються за типом вимірюваного навігаційного параметра:

- Кутомірні (пеленгаційні) – визначають напрямок на навігаційний об'єкт.
- Далекомірні – вимірюють відстань до орієнтирів чи передавачів.
- Різницево-daleкомірні – розраховують різницю відстаней до кількох передавачів.
- Вимірювачі лінійних (радіальних) і кутових швидкостей – визначають динамічні параметри руху об'єкта.
- Комбіновані системи – інтегрують кілька параметрів, наприклад кутомірно-daleкомірні методи.

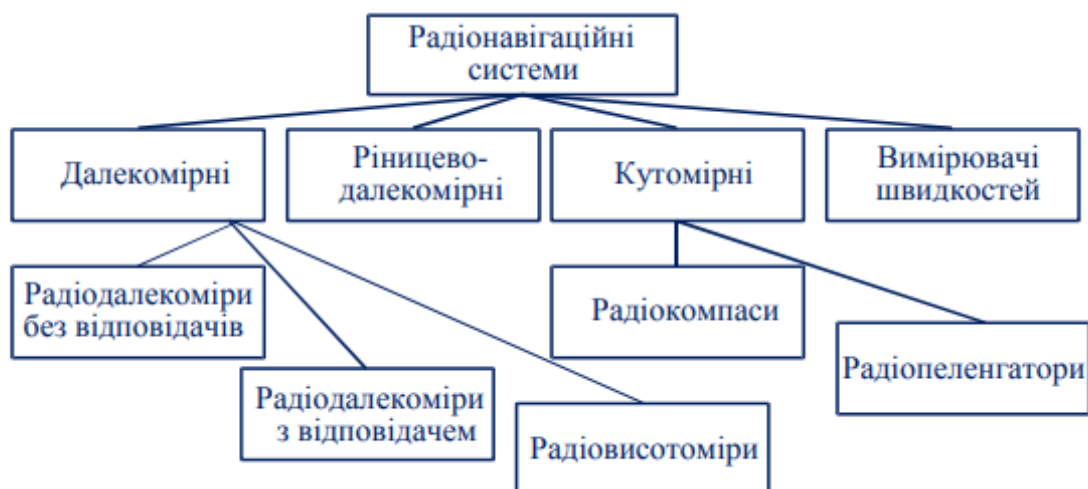


Рисунок 2.2 - Класифікація радіонавігаційних систем

Класифікація радіотехнічних вимірювань залежно від типу вимірюваного параметра радіосигналу, який використовується для визначення навігаційних параметрів, включає:

- Фазові – засновані на вимірюванні зсуву фази сигналу.
- Амплітудні – базуються на аналізі амплітудних змін сигналу.
- Частотні – використовують варіації частоти для визначення параметрів руху.
- Часові – вимірюють затримку сигналу для розрахунку відстані та координат.
- Кореляційні – ґрунтуються на порівнянні статистичних характеристик радіонавігаційних сигналів.

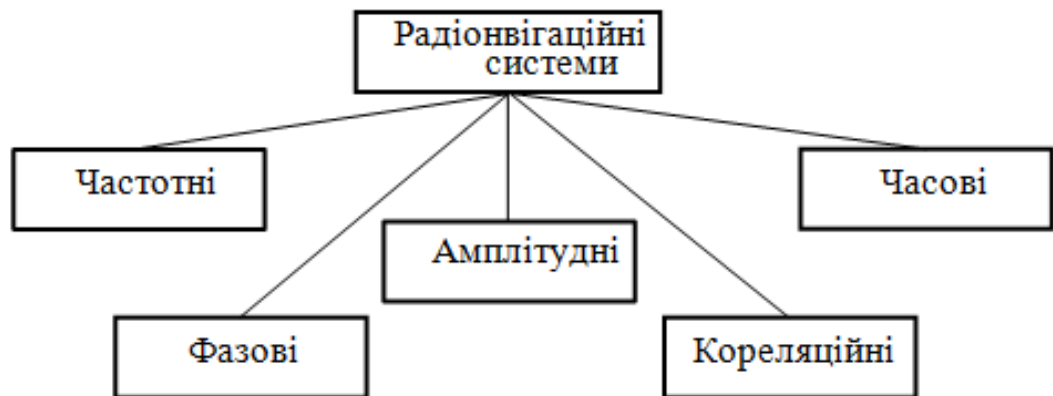


Рисунок 2.3 - Класифікація радіонавігаційних систем за типом вимірювання

Радіонавігаційні засоби класифікуються за призначенням на:

- Системи посадки – забезпечують точний захід на посадку.
- Навігаційні системи – трасові та зональні для контролю маршруту.
- Системи керування рухом – використовуються у комплексах керування.
- Системи попередження зіткнень – допомагають уникнути аварійних ситуацій.

- Системи вимірювання шляхової швидкості – визначають фактичну швидкість польоту.

- Системи розпізнавання – ідентифікують об'єкти у просторі.

За дальністю дії поділяються на:

- Глобальні – забезпечують визначення місця об'єкта у будь-якій точці планети або навколоземного простору.

- Дальньої навігації – працюють на відстані до 2500–3000 км від радіонавігаційних точок.

- Ближньої навігації – діють на 350–400 км від РНТ.

Радіонавігаційні методи та засоби класифікують також:

- За характером випромінювання – безперервні та імпульсні.

- За ступенем автономності – автономні та неавтономні.

- За рівнем автоматизації – автоматичні, напіваавтоматичні та неавтоматичні.

- За способом індикації – візуальні (стрілочні прилади, цифрові табло, ЕПТ) та слухові.

3. ВИЗНАЧЕННЯ АЗИМУТА ДЛЯ СИСТЕМ ДВОХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

3.1 Загальні положення

У цьому розділі розглянуто особливості та рекомендації рекомендацій, як і в [4], щодо проектування обертового інтерферометра та створення спрощеної системи RLBI, розглянуті проблеми цього методу, запропонований метод оцінки DOA та отримані результати досить детально висвітлюють роботу систем, пов'язаних з RLBI.

1) проблема однозначної оцінки двовимірних напрямків руху (DOA) кількох перемежованих випромінювачів вирішується за допомогою обертового інтерферометра з довгою базою, при цьому кутова протяжність випромінювачів не є суттєво обмеженою.

2) Проведено явний аналіз CRLB для виявлення потенційної переваги RLBI в точності двовимірної оцінки DOA, враховуючи, що просторові неоднозначності були успішно вирішені. CRLB надає корисну інформацію про параметричні залежності ефективності оцінки напрямку та полегшує порівняння зі статичними CRLB інтерферометра.

3) Аналізовано властивість спостережуваності системи RLBI відносно кількості фазових вимірювань за відсутності фазових шумів, щоб підтвердити доцільність системної структури в однозначній двовимірній оцінці DOA.

4) Фазові вимірювання перетворюються для отримання вторинної послідовності даних у спектральній області, і проводяться аналізи, щоб показати, чому різні випромінювачі відрізняються від спектральних даних. Спектральні дані надають іншу перспективу для аналізу фазових вимірювань та готують до нового методу оцінки DOA. (або: Оцінка напрямку) скорочено за допомогою Spectral Orthogonal Matching Pursuit та DeSoMP, який використовує просторову розрідженість випромінювачів та здатний спільно оцінювати кількість випромінювачів. Що ще більш важливо, він не вимагає попереднього деперемежування імпульсів[7].

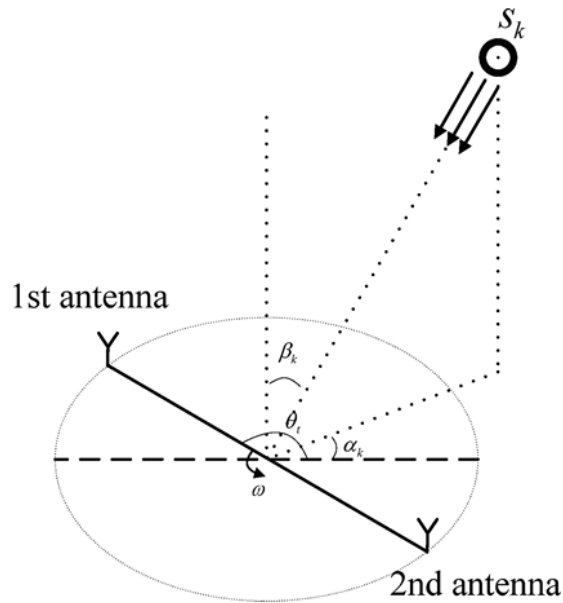


Рисунок 3.1 - Структура RLBI систем для 2D визначення напрямку

3.2 Формулювання моделі

У цьому підрозділі представлено структуру системи RLBI та встановлено модель фазових вимірювань.

Структура системи RLBI коротко зображена на рис. 3.1.

Дві антени закріплені на кінцях базової лінії, довжина якої, позначена як d , значно більша за довжину хвилі падаючого сигналу, позначену як λ . Базова лінія обертається з рівномірною кутовою швидкістю навколо свого центру, а період обертання становить T . Коли імпульсний сигнал виявляється обома антенними приймачами, вони дискретизують сигнал з однаковою швидкістю, і міжантенна неоднозначна різниця фаз всередині $(-\pi, \pi)$ збирається як вимірювання, пов'язане з цим імпульсом. Фазові вимірювання, зібрані в різні моменти часу, відповідають різним орієнтаціям базової лінії[8].

У період обертання система RLBI отримує часові чергувані фазові вимірювання випромінювачів далекого поля K , чий імпульсні сигнали мають однакову частоту, і цей сигнал позначено як S_k . Вважається, що напрямки

випромінювачів залишаються постійними протягом періоду обертання. Це м'яке припущення, оскільки кутова швидкість рухомих випромінювачів далекого поля, як правило, дуже мала відносно системи RLBI. Азимут k -го випромінювача визначається як кут між проекцією напрямку падіння сигналу на площину обертання базової лінії та орієнтацією базової лінії в момент часу 0 і позначається як $\alpha_k \in [0, 2\pi)$. Кут підйому, позначений як $\beta_k \in [0, \beta_{\max}]$, де $\beta_k \leq \pi/2$ є верхньою межею падіння β_k , визначається як кут між напрямком падіння сигналу та нормаллю до площини обертання базової лінії. Базова лінія обертається навколо свого центру за годинниковою стрілкою, якщо дивитися зверху, з рівномірною кутовою швидкістю ω у момент часу t , а кут між орієнтацією базової лінії і моментом часу 0 позначається як θ_t . Коли імпульсні сигнали у багатьох застосуваннях, таких як радар, гідролокатор та пакетний зв'язок, тривають лише дуже короткий час, зміною орієнтації базової лінії протягом тривалості імпульсу можна знехтувати, і кожне фазове вимірювання може бути індексоване певним моментом часу замість періоду імпульсу.

Фазові вимірювання

Прямокутну систему координат можна встановити згідно з рис. 3.1, де орієнтація базової лінії в момент часу 0 визначається як вісь X , а нормаль до площини обертання визначається як вісь Z .

Вектор напрямку падіння на одиницю норми дорівнює

$$u_k = [\cos \alpha_k \sin \beta_k, \sin \alpha_k \sin \beta_k, \cos \beta_k]^T, \quad (3.1)$$

де верхній індекс $(\cdot)^T$ позначає оператор транспонування. Базова орієнтація в момент часу t є

$$h(t) = [d \cos \theta_t, d \sin \theta_t, 0]^T, \quad (3.2)$$

Оскільки базова лінія обертається з рівномірною кутовою швидкістю ω орієнтації в момент часу t , це , де . Однозначна міжантенна різниця фаз сигналу в момент часу дорівнює $\theta_t = \omega t$ з $\omega = 2\pi/T$.

Однозначна міжантенна різниця фаз сигналу в момент часу k становить

$$\psi_k(t) = (2\pi/\lambda) \times u_k^T h(t) = (2\pi/\lambda) \times (d \sin \beta_k) \times \cos(\theta_t - \alpha_k) \quad (3.3)$$

(3.3) вказує на те, що протягом періоду обертання базової лінії,

однозначні фази випромінювача утворюють стандартну одноперіодну косинусоїдну криву, амплітуда та початкова фаза якої залежать від кута місця та азимута випромінювача відповідно.

Однак на практиці можна отримати лише неоднозначний аналог в межах однозначного вимірювання фази, що позначається як

$$\phi_k(t) = \text{mod}(\psi_k(t), 2\pi) = \psi_k(t) - c_k(t) \times (2\pi), \quad (3.4)$$

де $c_k(t)$ і $\text{mod}(\psi_k(t), 2\pi)$ позначає частку та залишок $\psi_k(t)$ при діленні на нижній індекс 2π . Якщо існує лише один випромінювач, його можна видалити для спрощення нотацій.

Щоб чіткіше описати зв'язок між фазовими вимірюваннями та напрямками випромінювача, нижче наведено приклад, в якому припускається, що довжина базової лінії в 20 разів більша за довжину хвилі сигналу. Фазові послідовності трьох випромінювачів, розташованих у напрямках $(\alpha_1, \beta_1) = (30^\circ, 60^\circ)$, $(\alpha_2, \beta_2) = (120^\circ, 30^\circ)$ і $(\alpha_3, \beta_3) = (150^\circ, 30^\circ)$ період обертання зображено на рис.3.2. Рисунок (а) описує однозначні фазові послідовності, тоді як (b) містить неоднозначні. Однозначні фази утворюють стандартні косинусоїдні кореляції, і дуже легко розрізняти різні випромінювачі та оцінювати їхні двовимірні напрямки відповідно до амплітуд та початкових фаз кривих. На жаль, косинусоїдна впорядкованість та чіткість однозначних фаз більше не зберігаються в неоднозначних фазових вимірюваннях. Неоднозначні фазові вимірювання різних випромінювачів чергуються одне з одним, що дуже ускладнює їх розрізнення та оцінку напрямків випромінювачів. Фазові шуми в практичних системах ще більше

ускладняють деперемежування фазових вимірювань та реалізацію двовимірної оцінки 2-D DOA.

3.3 Властивості оцінки DOA системи RLBI

Якщо довжина базової лінії перевищує половину довжини хвилі, фазові вимірювання стають складною, і проблема оцінки DOA стає набагато складнішою. Проведемо аналіз, щоб показати, що проблему просторової неоднозначності можна вирішити достатньою кількістю вимірювань, а підвищену точність оцінки DOA можна отримати на основі успішного вирішення неоднозначності. Спочатку, випадок з одним випромінювачем береться як приклад для виведення CRLB оцінки DOA за відсутності фазової неоднозначності, щоб виявити потенційне переважання RLBI в точності оцінки 2-D DOA, а також надати корисне розуміння параметричних залежностей ефективності оцінки напрямку.

По-друге, надається глибоке розуміння спостережуваності системи RLBI щодо кількості фазових вимірювань, щоб показати, що просторову неоднозначність можна успішно вирішити достатньою кількістю вимірювань, таким чином потенційне переважання системи RLBI в точності оцінки DOA може бути враховано.

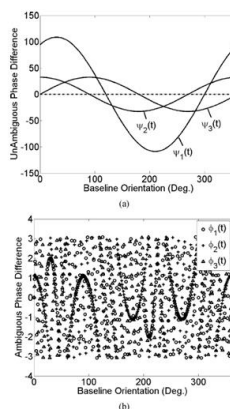


Рисунок 3. 2 - Фазові вимірювання трьох випромінювачів, розташованих у різних напрямках: (а) однозначні фази та (б) неоднозначні фази.

Оцінка DOA CRLB

Припустимо, що N імпульси від одного випромінювача приймаються RLBI в момент часу $t_1, \dots, t_N$ в періоді обертання, а вимірювання фази, забруднені шумом, позначені як

$$\varphi(t_n) = \phi(t_n) + \varepsilon(t_n), \quad n = 1, \dots, N, \quad (3.5)$$

де $\varepsilon(t_n)$ - представляє гауссові розподілені шуми фазових вимірювань з нульовим середнім значенням σ^2 та дисперсією, а фазові

шуми в різні моменти часу вважаються незалежними один від одного. Випадок, коли неточні фазові вимірювання $\varphi(t_n)$ можуть перевищувати область видимості $[-\pi, \pi)$, не розглядається в (5)

для зручності позначень, це є доцільним, оскільки спрощення не впливає на правильність теоретичних результатів та продуктивність запропонованого методу в решті статті.

Виходячи з наведеного вище опису моделі фазових вимірювань, функцію правдоподібності вимірювань $\varphi(t_1), \dots, \varphi(t_N)$, відносно невідомих параметрів можна отримати як

$$p(\{\varphi(t_n)\}_{n=1, \dots, N} | \alpha, \beta, \sigma^2, \{c(t_n)\}_{n=1, \dots, N}) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{N}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N \left[\varphi(t_n) - \frac{2\pi d \sin \beta}{\lambda} \times \cos(\theta_{t_n} - \alpha) + c(t_n) \times 2\pi \right]^2 \right\}. \quad (3.6)$$

Припустимо, що шуми фазових вимірювань відносно малі, $\sigma/2\pi \ll 1$ і спрямовані неоднозначності можна повністю вирішити, тоді розумно припустити, що $\{c(t_n)\}_{n=1, \dots, N}$ оцінюються правильно. Функцію правдоподібності, наведену в (6), можна спростити як $p(\{\varphi(t_n)\}_{n=1, \dots, N} | \alpha, \beta, \sigma^2)$ з $\{c(t_n)\}_{n=1, \dots, N}$ вважаються константами. Взяття логарифму спрощеної функції правдоподібності та нехтування постійними членами дає наступну логарифмічну функцію правдоподібності відносно набору параметрів $\{\alpha, \beta, \sigma^2\}$,

$$L(\alpha, \beta, \sigma^2) - \frac{N}{2} \ln \sigma^2 - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N \left[\varphi(t_n) - \frac{2\pi d \sin \beta}{\lambda} \times \cos(\theta_{t_n} - \alpha) + c(t_n) \times 2\pi \right]^2. \quad (3.7)$$

Прості математичні висновки, деталі яких наведено у Додатку А, можна виконати для отримання CRLB оцінок напрямку як

$$CRLB_{\{\alpha, \beta\}} - B^{-1} \propto \sigma^2 (d/\lambda)^{-2}, \quad (3.8)$$

де

$$B = \frac{1}{\sigma^2} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right)^2 \begin{bmatrix} b_1 (\sin \beta)^2 & b_3 \cos \beta \sin \beta \\ b_3 \cos \beta \sin \beta & b_2 (\cos \beta)^2 \end{bmatrix},$$

де

$$b_1 = \sum_{n=1}^N \sin^2(\theta_{t_n} - \alpha), \quad b_2 = \sum_{n=1}^N \cos^2(\theta_{t_n} - \alpha),$$

$$b_3 = \sum_{n=1}^N [\cos(\theta_{t_n} - \alpha) \sin(\theta_{t_n} - \alpha)]$$

і означає «пропорційно». Рівняння (8) показує, що нижні межі дисперсій оцінки напрямку пропорційні фазовій дисперсії вимірювання та обернено пропорційні квадрату базової довжини. Якщо $t_1, \dots, t_N$ щільно та (приблизно) рівномірно розподілені протягом періоду обертання, CRLB напрямків випромінювача можна переписати приблизно наступним чином, що також можна вважати асимптотичними CRLB у випадку достатньої кількості імпульсів,

$$CRLB_{\{\alpha, \beta\}} \approx \frac{2\sigma^2}{N} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right)^{-2} \begin{bmatrix} (\sin \beta)^{-2} & 0 \\ 0 & (\cos \beta)^{-2} \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

де представляє приблизну еквівалентність. Рівняння (9) показує, що, виходячи з додаткового часового розподілу як припущення про імпульси, нижні межі дисперсій оцінки DOA обернено пропорційні кількості імпульсів, приблизно, і вони також залежать від кута підйому випромінювача. Зі збільшенням кута підйому випромінювача дисперсія оцінки азимута зменшується, тоді як дисперсія кута підйому збільшується.

Встановити $\theta_{t_n} - \alpha = 0$ у (6) і (7), CRLB з 1-D DOA оцінку дисперсії за допомогою статичного інтерферометра можна отримати $\frac{2\sigma^2}{N} \left(\frac{2\pi d \cos \beta}{\lambda} \right)$ після аналогічних виведень, що вдвічі менше, ніж для CRLB висоти RLBI з такою ж довжиною базової лінії.

Однак статичні інтерферометри не здатні реалізувати 2-D оцінку напрямку, і їхня базова довжина не повинна перевищувати половину довжини хвилі, щоб уникнути неоднозначностей напрямку. Навпаки, обертовий інтерферометр може значно збільшити свою базову довжину, щоб покращити точність оцінки DOA, і можливість використання RLBI в однозначній 2-D оцінці DOA може бути частково продемонстрована спостережуваністю системи.

Спостережуваність

Аналізи в попередньому підрозділі показують, що, за умови успішного вирішення неоднозначностей напрямку, оцінка DOA CRLB зменшується зі збільшенням довжини базової лінії. Однак, оскільки базова лінія стає довшою, вплив неоднозначності напрямку значно посилюється для статичних інтерферометрів, і буде важче реалізувати вирішення неоднозначностей. У цьому підрозділі ми проводимо теоретичний аналіз, щоб уточнити спостережуваність системи RLBI, щоб продемонструвати її доцільність в однозначній 2-D оцінці DOA, та виявити вплив довжини базової лінії на доцільність.

Розглянуто два випадки, найгірший та середній, щоб висвітлити умови, за яких фазові вимірювання здатні успішно вирішити неоднозначність напрямку.

У найгіршому випадку передбачається, що часи приходу (TOA) імпульсів утворюють будь-який дискретний набір в $(0, T]$, і спостережуваність має на меті виявити обмеження на кількість імпульсів для розрізнення будь-яких двох випромінювачів, розташованих у різних напрямках. У середньому випадку передбачається, що TOA імпульсів встановлюються випадково, а не штучно, і спостережуваність показує обмеження на кількість імпульсів для розрізнення будь-яких двох випромінювачів.

Висновки щодо спостережуваності системи RLBI у найгіршому та середньому випадках наведено нижче, а детальний аналіз наведено в Додатках В та С.

Пропозиція 1 (Найгірший випадок спостережуваності): Протягом одного періоду обертання RLBI, коли кількість вимірювань фази без шуму перевищує Ξ_{max} , будь-які два випромінювачі, що падають з різних напрямків, можуть бути розділені системою RLBI, де Ξ_{max} задається формулою

$$\Xi_{max} = 4 \times [2d \sin \beta_{max} / \lambda] + 2 - 2Z(2d \sin \beta_{max} / \lambda) \quad (3.10)$$

де d та λ позначають довжину базової лінії d , а довжина хвилі сигналу β_{max} відповідно означає максимальну висоту випромінювачів, $[\bullet]$ являє собою найбільше ціле число, не більше заданої змінної, $Z(\bullet)$ є цілочисельним індикатором, він дорівнює 1, коли задана змінна є цілим числом, і дорівнює 0 в іншому випадку.

Твердження 2 (Середній випадок спостережуваності): Протягом одного періоду обертання RLBI припустимо, що TOA імпульсів розподіляються випадковим чином протягом періоду, коли кількість Якщо вимірювання фази без шуму більше за 3, будь-які два випромінювачі, що падають з різних напрямків, можуть бути розв'язані системою RLBI з ймовірністю 1.

Попереднє твердження показує, що потрібно більше імпульсів, щоб гарантувати розв'язання неоднозначностей для довших базових ліній, тоді як твердження 2 вказує, що незалежно від довжини базової лінії, потрібно лише три імпульси для розв'язання будь-яких двох випромінювачів з ймовірністю

1. Тим не менш, зі збільшенням базової лінії, послідовності неоднозначних фазових вимірювань різних випромінювачів будуть більш схожими одна на одну, і їх стає важче розрізнити. Проблема ще більше ускладнюється, коли враховуються практичні альфа-вимірювальні шуми. Тому слід знаходити компроміс між довжиною базової лінії та необхідною кількістю фазових вимірювань під час проектування системи RLBI[9].

3.4 Оцінка азимуту та напрямку

У попередньому розділі наведено позитивні докази точності оцінки RLBI та неоднозначності напрямку роздільної здатності, однак умова перемешування імпульсів від співіснуючих випромінювачів була проігнорована. За таких обставин нерозумно, якщо не неможливо, спочатку розділяти імпульси різних випромінювачів, а потім оцінювати їхні напрямки один за одним, оскільки перемешування імпульсів є NP-складною проблемою коли кількість імпульсів помірно велика. У цьому розділі ми пропонуємо обчислювально ефективний 2-D метод оцінки DOA під назвою DeSoMP для співіснуючих випромінювачів без попереднього деперемешування імпульсів. Спектральний вектор даних отримується з вихідних фазових вимірювань за допомогою певних перетворень. Перше перетворення полягає в проектуванні часово перемешованих фазових вимірювань на комплексну площину, щоб усунути вплив величини фаз. Друге перетворення полягає в обчисленні спектру проекційної послідовності. Після таких перетворень вихідні перемешовані фазові вимірювання повертаються до зваженої суми спектральних сигнальних компонентів, пов'язаних з кожним випромінювачем, забрудненої шумом. Потім проводиться глибокий аналіз, щоб показати, що азимут та висота випромінювача відрізняються від ширини смуги пропускання та спектральних фаз відповідного сигнального компонента. Просторова розрідженість випромінювачів нарешті використовується для оцінки кількості випромінювачів та

2-D напрямки шляхом розкладання вектора спектральних даних.

Формулювання спектральних даних

Фазова функція $\phi(t)$ є неоднозначним аналогом $\psi(t)$ з невідомим числом періоду неоднозначності 2π , але вони обидві мають однакові проекції на комплексній площині, тобто

$$s_k(t) = \exp\{j \times \phi_k(t)\} = \exp\{j \times \psi_k\}, k = 1, \dots, K. \quad (3.11)$$

де $j = \sqrt{-1}$ представляє номер емітера. Припустимо, що імпульси надходять у моменти часу $t_1 \dots t_N$ протягом періоду обертання, а вимірювання фази з шумом позначені як $\varphi(t_n) = \phi(t_n) + \varepsilon(t_n)$ для $n=1 \dots N$. Кількість імпульсів, що відповідають цьому посилювачу, вважається рівною N_k , а пов'язаний з ним набір ТОА

дорівнює $\Lambda_k = \{t_1^{(k)}, \dots, t_{N_k}^{(k)}\}$. Шуми вимірювання фази в різні моменти часу вважаються незалежними один від одного. Проекція фази, забрудненої шумом, у часі t_n на комплексній площині є

$$x(t_n) = \exp\{j \times [\phi(t_n) + \varepsilon(t_n)]\} = p(t_n) \sum_{k=1}^K s_k(t_n) Y(t_n, \Lambda_k) \quad (3.12)$$

Де $p(t_n) = \exp\{j \times \varepsilon(t_n)\}$, $Y(t_n, \Lambda_k)$ Шуми вимірювання фази в різні моменти часу вважаються незалежними один від одного. Проекція фази, забрудненої шумом, у часі на комплексній площині є індикаторною функцією, яка використовується для категоризації фазових вимірювань відповідно до випромінювачів, вона дорівнює 1, коли $t_n \in \Lambda_k$, та 0 в іншому випадку.

Обчислення спектру $x(t_1) \dots x(t_n)$ дає спектральні дані на частотах $f_1, \dots, f_M$ наступним чином:

$$y(f_m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(t_n) \exp\{-j2\pi f_m t_n\} = \sum_{k=1}^K \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_k} p(t_n^{(k)}) s_k(t_n^{(k)}) \exp\{-j2\pi f_m t_n^{(k)}\}, m = 1, \dots, M \quad (3.12)$$

Для k - випромінювача, $Y(t_n, \Lambda_k)$ дорівнює 1 лише тоді $t_n \in \Lambda_k$ коли в (12), таким чином, під час часово-частотного перетворення з (12) до (13), лише фазові вимірювання, пов'язані з цим випромінювачем, вносять свій внесок у відповідну спектральну складову сигналу. Отже, двокрокове перетворення успішно перетворило 2π -неоднозначні та часово чергуювані фазові вимірювання на зважену суму спектральних складових сигналу.

Припустимо, що співвідношення сигнал/шум (SNR) ударних імпульсних сигналів є помірно високим, і тому дисперсія фазових вимірювань не дуже суттєва, тоді $p(t_n)$ можна переписати у вигляді $1 + [p(t_n - 1)]$ з $p(t_n - 1)$, де представляє амплітудний шум $x(t_n)$. Рівняння (13) можна переписати у наступному вигляді

$$y(f_m) = \sum_{k=1}^K \frac{N_k}{N} y_k(f_m) + e(f_m), m = 1, \dots, M \quad (3.14)$$

$$\text{де } y_k(f_m) = \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^{N_k} s_k(t_n^{(k)}) \exp\{-j2\pi f_m t_n^{(k)}\} \text{ і}$$

$$e(f_m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [p(t_n) - 1] \exp\{j\phi(t_n)\} \exp\{-2\pi f_m t_n\}.$$

Рівняння М у (14) можна переписати у векторному вигляді

$$y = \sum_{k=1}^K \frac{N_k}{N} y_k + e, \quad (3.15)$$

$$\text{де } y = [y(f_1), \dots, y(f_M)]^T, y_k = [y_k(f_1), \dots, y_k(f_M)]^T$$

і

$$e = [e(f_1), \dots, e(f_M)]^T.$$

Оскільки період обертання базової лінії дорівнює T , неперервна в часі фазова функція кожного випромінювача періодично змінюється з періодом T , таким чином $f_0 = 1/T$, можна вважати базовою частотою спектральних компонентів

сигналу. Нелінійне перетворення $\exp\{j\phi(t)\}$, яке використовується при проектуванні вихідних фазових вимірювань, на комплексну площину, ще більше розширює спектральну ширину компонентів сигналу. Тому частота f_0 , береться як базова частота для опису спектру властивості компонентів сигналу та f_m налаштовані бути $(m-1)f_0 = \frac{(m-1)}{T}$.

Спектральні компоненти сигналу містяться у вторинному спектральному векторі даних у лінійній формі, що дозволяє уникнути проблеми NP-жорсткого депережування імпульсів.

Однак, двовимірні 2D напрямки випромінювачів можна оцінити шляхом розкладання вектора даних, лише якщо напрямки можна відрізнити виключно від компонентів сигналу.

Властивості спектральних компонентів сигналу та шуму

У цьому підрозділі ми надаємо уявлення про властивості спектральних компонентів сигналу, щоб показати, що випромінювачі, що падають з різних напрямків, можна розрізнити за шириною смуги та спектральними фазами компонентів. Властивості компонентів шуму також аналізуються для оптимізації методу оцінки DOA.

Компоненту сигналу k в (3.15), тобто, y_k , можна розглядати як спектральне перетворення часової фазової функції $s_k(t)$ при дискретизації з $P_k(t) = \sum_{n=1}^{N_k} \delta(t - t_n^{(k)})$, де $\delta(\bullet)$ дорівнює 1, коли вхід дорівнює 0, і дорівнює 0 в іншому випадку. У випадку, коли номер вибірки помірно великий N_k , а імпульсні ТОА (приблизно) рівномірно розподілені в межах періоду обертання, y_k добре апроксимує спектральне перетворення $s_k(t)$. Оскільки підпоследовність фазових вимірювань, пов'язана з кожним випромінювачем, заздалегідь не відома, її y_k важко точно обчислити, і її можна апроксимувати за допомогою спектрального перетворення $s_k(t)$. На основі формулювання фазових вимірювань, наведеного в (3.3), спектральну компоненту сигналу, що відповідає напрямку випромінювача (α, β) , можна обчислити наступним чином,

$$y_{(\alpha,\beta)}(f) = \frac{1}{T} \int_0^T \exp\{j\psi_{(\alpha,\beta)}(t)\} \exp\{-j2\pi ft\} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \exp\left\{j \frac{2\pi d \sin \beta}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \alpha\right)\right\} \exp\{-j2\pi ft\} dt. \quad (3.16)$$

Хоча (3.16) навряд чи можна використовувати для отримання виразу $y_{(\alpha,\beta)}(f)$ у замкнутій формі, воно допомагає встановити зв'язки між властивостями спектральних компонентів сигналу та двовимірними 2D напрямками випромінювачів.

Рівняння (16) можна спростити наступним чином, підставивши

$$\text{в нього } \alpha = 2\pi\Delta_\alpha/T \text{ та } \Delta_\alpha = \alpha/(2\pi) \cdot T,$$

$$y_{(\alpha,\beta)}(f) = \exp\{-j2\pi f\Delta_\alpha\} \times \frac{1}{T} \int_0^T \exp\left\{j \frac{2\pi d \sin \beta}{\lambda} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\right\} \exp\{-j2\pi ft\} dt - \exp\{-j2\pi f\Delta_\alpha\} y_{(0,\beta)}(f). \quad (3.17)$$

Рівняння (3.17) показує, що для будь-яких двох випромінювачів, що падають з однієї й тієї ж висоти, фази $y_{(\alpha,\beta)}(f)$ можуть бути використані для їх розрізнення та визначення їхніх азимутів. Фазові вимірювання випромінювача, розташованого в напрямку (α, β) , є тимчасово Δ_α —затриманою копією вимірювань випромінювача в напрямку $(0, \beta)$,. таким чином, спектри двох випромінювачів мають фазовий зсув, пропорційний Δ_α та частоті.

Більше того, миттєва частота часової хвильової форми $\exp\{j\psi_{(\alpha,\beta)}(t)\}$ в момент часу t становить

$$f_{(\alpha,\beta)}(t) = \left| \frac{\partial}{\partial t} \psi_{(\alpha,\beta)}(t) \right| = \frac{(2\pi)^2 d \sin \beta}{\lambda T} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \alpha\right). \quad (3.18)$$

Для випромінювача з певним азимутом миттєва частота $\exp\{j\psi_{(\alpha,\beta)}(t)\}$ пропорційна синусу його висоти. Отже, чим більше висота випромінювача, тим більшою буде смуга пропускання пов'язаного з ним спектрального

компонента сигналу. Таким чином, смугу пропускання спектру можна використовувати для оцінки висоти випромінювача. Однак, оскільки немає виразу спектру в замкнутій формі, відображення між висотою випромінювача та смугою пропускання спектру неможливо зобразити аналітично, і проблему оцінки висоти випромінювача за спектром можна вирішити лише чисельно.

Сімейство відображень між висотами випромінювача та смугами пропускання спектру слід зберігати заздалегідь відповідно до (3.16), при цьому спектр обчислюється приблизно офлайн на основі передбачуваних часово щільних та рівномірних фазових вимірювань.

З вищезазначених аналізів у цьому підрозділі можна зробити висновок, що смуга пропускання кожного спектрального компонента сигналу залежить від його висоти, а різні азимути вводять різні фази в спектр. Отже, спектральні компоненти сигналу можна використовувати для оцінки напрямків двовимірних випромінювачів відповідно до їхньої смуги пропускання та фаз. Спектральні властивості, що відповідають трьом випромінювачам, зображеним на рис. 3.2, показані на рис. 3.3, де перший малюнок показує амплітуду спектру $y_{(\alpha,\beta)}(f)$ для різних частот, а другий показує різницю фаз спектру між другим та третім випромінювачами. Оскільки кут піднесення першого випромінювача більший, ніж у двох інших випромінювачів, його спектральна компонента має більшу смугу пропускання. Спектральні компоненти двох інших випромінювачів, що мають однакову висоту, мають ідентичні послідовності амплітуд спектру, тоді як їхня різниця фаз змінюється лінійно з частотою. Ця група моделювань добре підтверджує висновки, отримані в (3.18) та (3.17) щодо спектральних властивостей щодо смуги пропускання та фази.

Як показано в (3.15), спектральні дані, отримані з часово чергуваних фазових вимірювань, складаються не лише зі спектральних компонентів сигналу K , але й забруднені спектральним шумом, внесеним шумами фазових вимірювань. Твердження 3: Припустимо, що шуми фазових вимірювань у різні моменти часу незалежні один від одного, і вони розподілені за Гаусом з нульовим середнім значенням та дисперсією σ^2 , також припустимо, що кількість імпульсів помірно

велика, а імпульсні ТОА (приблизно) рівномірно розподілені протягом періоду обертання, тоді e приблизно розподілено за Гаусом з середнім значенням $\mu \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ та дисперсією $\Sigma \in \mathbb{C}^{M \times M}$ де $\mu = -\frac{\sigma^2}{2} \sum_{k=1}^K \frac{N_k}{N} y_k$ та елементом Σ , де на m_1 рядку та m_2 колонка $\Sigma_{m_1, m_2} = \frac{\sigma^2}{N} \delta(m_1 - m_2)$.

Ненульове середнє значення слід спеціально обробити перед переходом до процесу оцінки 2-D DOA, щоб уникнути зміщення в кінцевих оцінках напрямку.

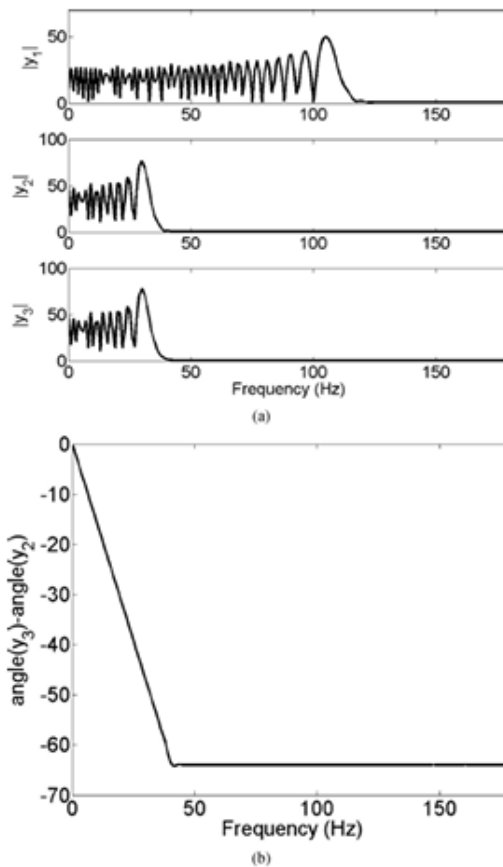


Рисунок 3.3 - Зв'язки між спектральними властивостями та двовимірними напрямками, (a) ширина смуги; (b) фазовий зсув.

Оцінка 2-D DOA

На основі (3.15) та результатів, наведених у реченні 3, спектральні дані можна переписати наступним чином:

$$y = \sum_{k=1}^K \left(1 - \frac{\sigma^2}{2}\right) \frac{N_k}{N} y_k + e', \quad (3.19)$$

де

e' — гауссівський розподіл з нульовим середнім значенням та дисперсією Σ .

Структури спектральних компонентів сигналу не змінюються у (3.19) порівняно з їхніми аналогами у (3.15),

тоді як їхні вагові коефіцієнти зменшуються з тим самим співвідношенням,

а середнє значення шумової компоненти зменшено до нуля.

Спектральні дані, наведені у (3.19), складаються з компонентів K сигналу та забруднені гауссовим шумом з нульовим середнім значенням, і всі можливі компоненти сигналу можна обчислити приблизно згідно з (3.14) на основі попередньо припущених фазових вимірювань.

Випромінювачі в більшості застосувань оцінки DOA є просторово розрідженими [7]–[12], і нещодавно цікаві методи розрідженої реконструкції [13]–[17] продемонстрували, що дуже добре вирішують проблеми оцінки DOA навіть з одним знімок [18]–[15]. Модель даних, наведена в (3.19), містить лише один знімок, тому ми звертаємося до методу індукції розрідженості, щоб знайти спосіб реконструкції спектральних компонентів сигналу з та оцінки напрямків випромінювача. Методи оптимізації L1-норми [15], [17] та розрідженого байєсівського навчання [18], [19] є обчислювально дуже вимогливими при використанні в поточних обставинах, оскільки вони повинні значно збільшити розмірність моделі, щоб адаптувати вимогу оцінки 2-D DOA.

Тому ми вводимо обчислювально ефективніший метод ортогонального зіставлення (OMP) [19], щоб запропонувати 2-D метод оцінки DOA, який називається оцінкою напрямку через спектральне ортогональне зіставлення або скорочено DeSoMP.

DeSoMP відновлює компоненти сигналу одну за одною та оцінює напрямки випромінювача під час процесу відновлення.

Властивість спектрального фазового зсуву, пов'язана з азимутом, наведена в (3.17), також буде використана для підвищення обчислювальної ефективності.

Позначимо залишкові дані у після $q-1$, де ОМРітерацій $z^{(q-1)}$ з $z^{(0)} = u$, через напрямок нового випромінювача може бути визначений відповідно до критерію максимальної кореляції наступним чином [19],

$$[\alpha^{(q)}, \beta^{(q)}] = \arg \max |y_{(\alpha, \beta)}^H z^{(q-1)}|, \quad (3.20)$$

$$\text{де } y_{(\alpha, \beta)} = \frac{[y_{(\alpha, \beta)}(f_1), \dots, y_{(\alpha, \beta)}(f_M)]^T}{\|[y_{(\alpha, \beta)}(f_1), \dots, y_{(\alpha, \beta)}(f_M)]\|_2},$$

верхній індекс $(\bullet)^H$ та представляє спряжений оператор транспонування і $(\bullet)^T$

представляє оператор транспонування, $\|\bullet\|_2$ означає 2-норму вектора.

Наступне перетворення виконується як,

$$y_{(\alpha, \beta)}(f) = \exp\{-j2\pi f \Delta_\alpha\} y_{(0, \beta)}(f) \quad (3.21)$$

$$w_{(\alpha, \beta)}^{(q-1)} = y_{(\alpha, \beta)}^H z^{(q-1)} [\exp\{j2\pi f_1 \Delta_\alpha\}, \dots, \exp\{j2\pi f_M \Delta_\alpha\}] \times \{y_{(0, \beta)}^* \odot z^{(q-1)}\},$$

$$\text{де } \Delta_\alpha = \frac{\alpha}{(2\pi)} \bullet T, y_{(0, \beta)} = [y_{(0, \beta)}(f_1), \dots, y_{(0, \beta)}(f_M)]^T$$

$\odot$ означає поелементний добуток, а верхній індекс $(\bullet)^*$

представляє спряжений оператор. Оскільки, $f_m = (m-1)/T$,

можна отримати, що $2\pi f_m \Delta_\alpha = (m-1)\alpha$ і (21) можна таким чином вважати

часо-частотним перетворенням $g_\beta^{(q-1)} = y_{(0, \beta)}^* \odot z^{(q-1)}$ на кутовій частоті α .

Якщо α_m встановлено рівним з $\alpha_m = (m-1)/M \times (2\pi)$, тоді значення

$y_{(\alpha, \beta)}^H z^{(q-1)}$ на азимутах $\alpha_1, \dots, \alpha_M$ одночасно шляхом перетворення

$g_\beta^{(q-1)}$ можна обчислити за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT) на

рівномірно розподілених кутових частотах в межах $2\pi - \alpha_1, \dots, 2\pi - \alpha_M$ в межах

$[0, 2\pi)$, що зменшує кількість комплексних добутків з M^2 до $O(M \log 2M)$ до

реалізує процес узгодження вздовж азимута для кожного кута висоти. Число

комплексного добутку для завершення процесу МР у двовимірній площині

таким чином зменшується з $M^2 P$ до $O(M \log 2M)$ загалом, де P позначає кількість

кандидатів на кут висоти, а процес узгодження є обчислювально

субдвовимірним.

Після визначення найкращого спектрального базису $\mathcal{Y}_{(\alpha^{(q)}, \beta^{(q)})}$ на q -й ітерації, вектор залишкових даних може бути $z^{(0)}$ оновлюється проектуванням на ортогональний підпростір $\mathcal{Y}_{(\alpha^{(1)}, \beta^{(1)})}, \dots, \mathcal{Y}_{(\alpha^{(q)}, \beta^{(q)})}$

$$z^{(q)} = P_{G^{(q)}}^\perp z^{(0)}, \quad (3.22)$$

$$\text{Де } P_{G^{(q)}}^\perp = I_M - G^{(q)}(G^{(q)})^\dagger, G^{(q)} = [\mathcal{Y}_{(\alpha^{(1)}, \beta^{(1)})}, \dots, \mathcal{Y}_{(\alpha^{(q)}, \beta^{(q)})}]$$

$$\text{I } (G^{(q)})^\dagger = [(G^{(q)})^H G^{(q)}]^{-1} (G^{(q)})^H$$

Якщо компоненти сигналу були вилучені з $z^{(q)}$, то оцінку дисперсії узгодженого шуму у можна отримати наступним чином згідно з [23, рівняння (5.6b)],

$$(\sigma_{e'}^2)^{(q)} = \frac{\|P_{G^{(q)}}^\perp \mathcal{Y}\|_2^2}{(M-q)}. \quad (3.23)$$

Якщо кількість емітерів заздалегідь невідома, оцінки грубого DOA та дисперсії шуму можуть бути використані для реалізації переліку емітерів відповідно до інформаційних критеріїв, наведених у [24]. Після аналізу в [11] цільова функція для переліку емітерів може бути отримана наступним чином,

$$g(k) = M \ln(\sigma_{e'}^2)^{(k)} + r(k), \quad (3.24)$$

а номер емітера визначається відповідно до $K = \arg \min_k g(k)$, де $r(k)$ є штрафною функцією, що має варіації відповідно до різних інформаційних критеріїв [24].

Оскільки процес ОМР реалізується на основі дискретних

кандидатів на різні висоти, грубі оцінки DOA забруднені помилками квантування та повинні бути уточнені після процесу ОМР. Далі,

косинусоїдна впорядкованість однозначних та безпомилкових фазових вимірювань. А. Випадок з одним емітером

Коли присутній один емітер, встановлюється типовий сценарій, в якому довжина базової лінії становить 2 м, кількість імпульсів становить 300, стандартне відхилення шуму вимірювання фази становить та напрямок емітера становить . Імпульсні TOA генеруються випадковим чином (нерівномірно) протягом кількох секунд, розмірність спектральних даних встановлюється на 512 згідно з (28), де замінюється на максимальне значення 3 м у симуляціях, кількість ітерацій уточнення DOA становить 10, а поріг для вилучення фази в процедурі уточнення DOA становить , при цьому вважається, що він відомий заздалегідь. Змінюючи один з параметрів один раз, формуються чотири сценарії, описані наступним чином:

а) Фіксувати кількість імпульсів, відхилення вимірювання фази та напрямок емітера, змінювати довжину базової лінії від 1 м до 3 м;

б) Фіксувати довжину базової лінії, відхилення вимірювання фази та напрямок емітера, змінювати кількість імпульсів від 100 до 1000;

с) Зафіксувати довжину базової лінії, кількість імпульсів та напрямок випромінювача,

змінювати відхилення вимірювання фази від 5 до 80 градусів;

д) Зафіксувати довжину базової лінії, кількість імпульсів, відхилення вимірювання фази та азимут випромінювача, змінювати кут місця випромінювача від 5 до 65 градусів.

Середньоквадратична похибка (RMSE) оцінок азимута та кута місця, отриманих за допомогою DeSoMP, разом з CRLB та асимптотичним CRLB, розрахованим за допомогою (8) та (9), показані на рис. 3.4.

Ця група результатів моделювання частково підтверджує доцільність системи RLBI в 2-D оцінці DOA та показує, що CRLB, наведений у (3.8), отриманий для випадкових розподілів TOA імпульсів, та асимптотичний CRLB, наведений у (9), отриманий для щільних та рівномірних TOA імпульсів, добре узгоджуються. Пропорційність між (асимптотичним) CRLB та базовою лінією тривалістю, кількістю імпульсів, відхиленням

вимірювання фази та синусом/косинусом кута підйому випромінювача також підтверджується результатами. Метод DeSoMP отримує оцінки DOA з дисперсіями, дуже близькими до CRLB у більшості розглянутих сценаріїв, його продуктивність швидко погіршується, коли відхилення вимірювання фази перевищує 60 градусів.

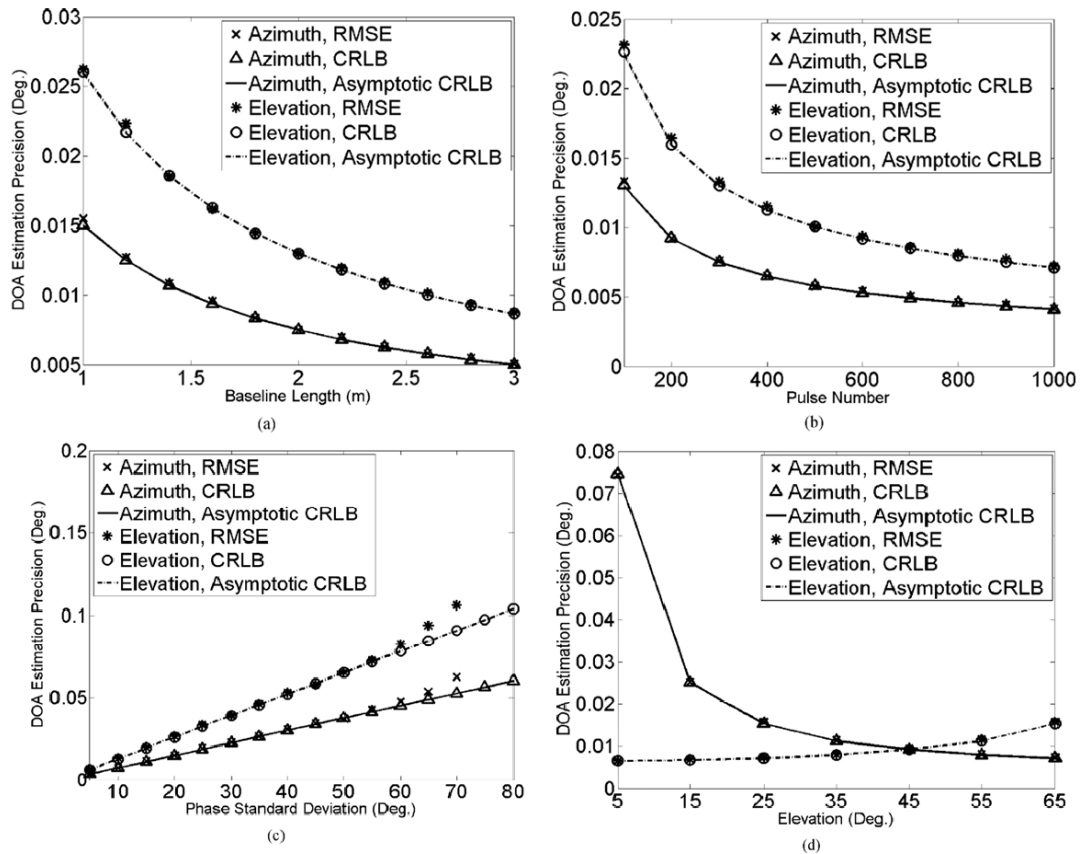


Рисунок 3.4 - Оцінка азимута/кутового підйому CRLB та середньоквадратичне значення помилки DeSoMP в сценаріях з одним випромінювачем, (a) довжина базової лінії змінюється; (b) кількість імпульсів змінюється; (c) відхилення вимірювання фази змінюється; (d) змінюється кутове підйому випромінювача.

4 ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АЗИМУТУ ПРИХОДУ СИГНАЛУ

У цьому розділі представлено застосування генетичного алгоритму, розробленого для визначення напрямку приходу кількох сигналів, що падають на лінійну решітку.

Результати статистично проаналізовано, щоб зробити висновок про точність та надійність алгоритму.

4.1 Загальні положення

Оцінка параметрів кількох сигналів, що приймаються системою зв'язку, є критичним аспектом як процесу характеристики мобільного каналу, так і проблеми локалізації джерела[10].

Для визначення місцезнаходження джерел сигналу необхідно виділити два фундаментальні параметри: амплітуду та напрямок прибуття (DoA) падаючої хвилі.

У минулому для оцінки DoA було запропоновано кілька алгоритмів, більшість з яких базуються на концепції підпросторів сигнально-шумових сигналів [10], [12].

Для оцінки амплітуди та DoA кількох вузькосмугових сигналів, що потрапляють на антенну решітку, використовується генетичний алгоритм (GA). Генетичні алгоритми стали дуже популярними для цілей проектування завдяки своїй стійкості та ефективності в задачах, де оптимальне рішення слід шукати у великому просторі пошуку [13]. Сучасне застосування генетичних алгоритмів для оцінки параметрів сигналу базується на цих атрибутах.

4.2 Задача оцінки параметрів сигналу

У випадку оцінки параметрів сигналу ми розглядаємо масив з M антенних елементів, що приймає N синусоїдальних хвильових фронтів сигналу.

Кожен сигнал характеризується своєю амплітудою E_n фаза ψ_n , та напрямком приходу (DoA) ϕ_n . Поле, створене n -м хвильовим фронтом у місці, представленому вектором x відносно опорної точки на осі антени, визначається за формулою:

$$E_n(x) = E_n \cdot e^{j \cdot (k \cdot x_n + \omega \cdot t + \psi_n)} \cdot \hat{e} = E_n \cdot e^{j \cdot (k \cdot d_x \cdot \cos \phi_n + \omega \cdot t + \psi_n)} \cdot \hat{e} \quad (4.1)$$

Розмістивши точку відліку на першому елементі, поле, збуджене на елементі m n -м сигналом, буде:

$$E_n(m) = E_n \cdot e^{j \left(\frac{2\pi}{\lambda} (m-1)d \cos \phi_n + \omega \cdot t + \psi_n \right)} \cdot \hat{e}$$

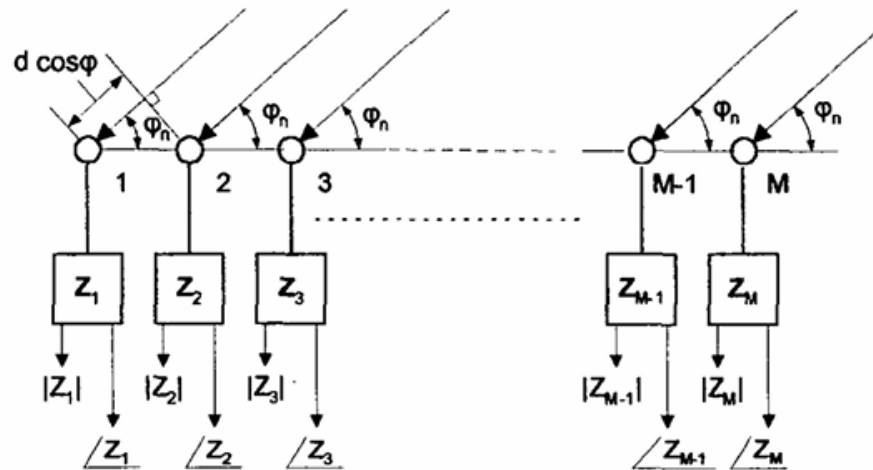


Рисунок 4.1 – Вимірювальний масив

Комплексна характеристика кожної антени Z_m пропорційна сумі полів, збуджених на ній кожною хвильовою іонною хвилею (принцип суперпозиції).

$$Z_m \propto \sum_n E_n \cdot e^{j\left(\frac{2\pi}{\lambda}(m-1)d \cos \phi_n + \omega \cdot t + \psi_n\right)}$$

Оскільки в цьому розділі розглядається лише випадок, коли падаючі сигнали вважаються такими, що мають однакову частоту, Z_m Кожен сигнал характеризується своєю амплітудою Z , від цієї точки позначає фазор комплексної реакції m -го елемента.

Основна мета полягає в оцінці DoA ϕ_n кожного сигналу та амплітуди E_n (далі E_n позначає нормалізовану амплітуду E/E_0) для цілей локалізації, а вторинна мета - зробити висновок про статистичну поведінку фази ψ_n прийнятих сигналів.

4.3 Генетичний алгоритм, застосований у задачі оцінки параметрів сигналу

У цьому розділі описано генетичний алгоритм (ГА), який використовується для оцінки параметрів сигналу. У наступному абзаці ми визначимо терміни, що використовуються в цій статті.

Популяція – це масив особин. Кожна особина є повним рішенням задачі, що складається з певної кількості хромосом, що представляють набір параметрів сигналу.

Кожна хромосома – це масив генів, які є індексами в масиві алелів (набір алелів, можливі значення, які може приймати кожен параметр). Для розглядуваної задачі особина складається з трьох хромосом, по одній для кожного оцінюваного параметра.

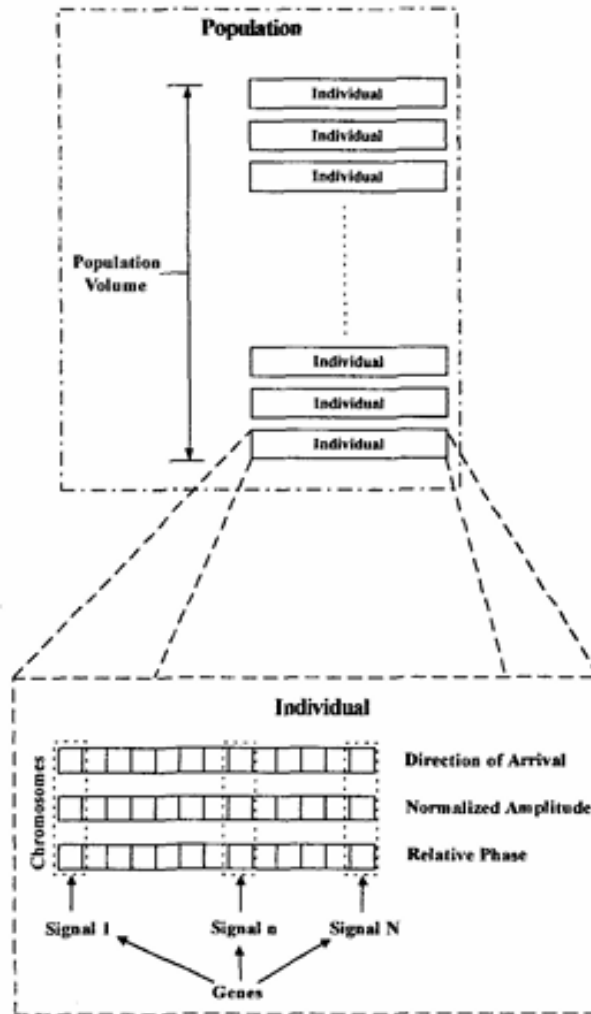


Рисунок 4.2 – Вигляд генетичного алгоритму

Мірою придатності кожної людини як рішення проблеми є відхилення вектора комплексної реакції. $\bar{z}^I = [z_1^I z_2^I \dots z_{M-1}^I z_M^I]$ це викликало б у вимірювальній системі зміну, порівняно з фактичною реакцією

$$\bar{z}^R = [z_1^R z_2^R \dots z_{M-1}^R z_M^R]$$

отримані шляхом вимірювань. Метою є мінімізація норми векторної різниці між передбачуваним та фактичним комплексом відгуки на кожен елемент $|z_m^I - z_m^R|, m = 1 \dots M$ скалярна величина, що характеризує Таким чином, розв'язок є $C = \frac{1}{M} \cdot \sum_{m=1}^M |z_m^I - z_m^R|$ Однак, це відносний показник, M $m=1$ МІ корисний лише для порівняння між рішеннями, наданими для дуже специфічної задачі. Очевидно, що кількість сигналів N впливає на діапазон значень функції вартості, описаної вище.

Існує потреба ввести кількісний показник придатності рішення, що застосовується для порівняння між різними сценаріями вимірювання. Позначивши як 100% відповідність особу з $C_{\min}=0$ та 0% відповідність особину з $C_{\max} \rightarrow \infty$, можна охарактеризувати кожну особину за допомогою функції придатності, що визначається як $F_I = 10^{-CIN}$.

Спрощена блок-схема ГА, що застосовується для оцінки параметрів сигналу, показана на рисунку 4.3. Дані отримують шляхом вимірювання комплексних відгуків елементів антенної решітки.

Визначення кількості падаючих сигналів може бути виконано за допомогою коваріаційної матриці або за допомогою зовнішнього джерела інформації [4], яке тут не розглядається.

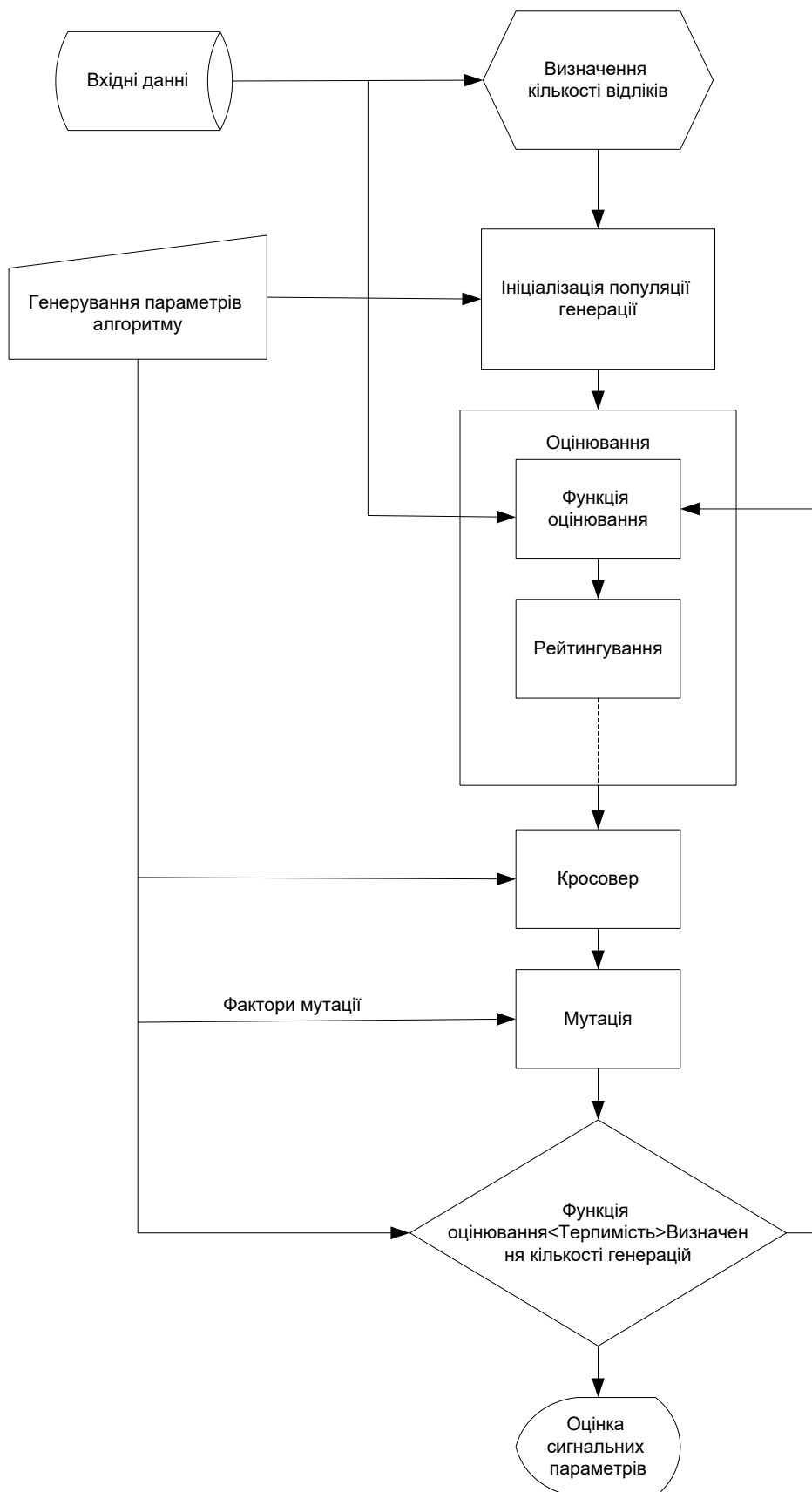


Рисунок 4.3 – Генетичний алгоритм потокових обчислень

Першим кроком генетичного алгоритму (ГА) є генерація початкової популяції рішень (особин), що містить набори параметрів сигналу (DoA,

нормалізована амплітуда та відносна фаза). За відсутності будь-яких підказок параметри вибираються випадковим чином, згідно з рівномірним розподілом. Велика початкова популяція містить більш репрезентативну вибірку простору пошуку, що збільшує ймовірність того, що деякі з особин початкового покоління знаходяться поблизу глобального рішення.

Однак, чим більша кількість особин, тим більшим стає обчислювальне навантаження і тим повільніше збіжність алгоритму.

Наступним кроком є оцінка придатності кожної особини та ранжування популяції у порядку спадання придатності. Ця процедура дозволяє ГА розв'язати загальну придатність покоління (або функцію вартості) та передати інформацію про придатність кожного рішення до центральної частини алгоритму.

Ядро генетичного алгоритму складається з двох генетичних операторів: кросовера та мутації. Кросовер – це метод обміну генетичною інформацією між двома особинами (батьками) з метою формування іншої пари особин (нащадків), метою якого є рекомбінація якостей батьків та створення пари вищої якості для наступного покоління. Цей оператор випадковим чином вибирає локус (позицію на кожній хромосомі) та обмінюється підпоследовностями до та після нього.

Кожна хромосома розділяється на іншому локусі, щоб максимізувати ймовірність рекомбінації. Однак, розділення відбувається в одному локусі (одноточковий кросовер). У кількох реалізаціях ГА кросовер може бути застосований до двох або більше локусів [5]. Це корисно в задачах, де порядок генів є критичним (наприклад, задача комівояжера), оскільки є потреба зберегти стійкі набори генів у хромосомі. У задачі оцінки параметрів сигналу порядок генів не є важливим (сигнали не впорядковані), тому з міркувань спрощення вибирається одноточкове схрещування.

Оскільки схрещування є основним механізмом покращення загальної пристосованості популяції, критично важливо застосувати ефективний спосіб вибору особин, які народять нове покоління. Це проблема визначення фертильності особини, ймовірності народження потомства. У більшості

випадків фертильність визначається за допомогою пристосованості кожної особини як частки від сукупної пристосованості покоління. Ця стратегія, яка називається відбором колеса Рулетта [15], надає перевагу особинам з найвищою придатністю, що спонукає ГА зосередитися та швидше знайти рішення. Оскільки це перешкоджає дослідженню всього простору пошуку, її не рекомендується застосовувати до перших поколінь, де слід використовувати менш дискримінаційний підхід. У поточній реалізації ГА всі особини мають однакову ймовірність народження потомства, доки вся популяція не стане високо корельованою, а стратегія відбору не зміниться на відбір за принципом рулетки, щоб забезпечити швидшу конвергенцію.

Іншим аспектом оновлення поколінь є відсоток оновлення популяції, а саме кількість потомства, яке буде утворюватися як дія всієї популяції. У статичних випадках, коли розмір популяції не змінюється, менш пристосовані особини замінюються новою породою, тоді як певна кількість найпристосованіших особин старого покоління зберігається (перекриття поколінь). Це гарантує, що стан старого покоління може лише покращуватися.

Поки лише оператор кросовера змінює покоління, популяція прагне стати однорідною, сходячись до максимуму пристосованості, який не обов'язково є глобальним максимумом. Щоб диверсифікувати популяцію і змусити алгоритм шукати в раніше недосліджених областях простору пошуку, необхідно ввести мутацію, оператор, який випадковим чином змінює стан популяції.

Кожна особина підтримує мутацію в одному або кількох локусах з певною ймовірністю, яка називається ймовірністю мутації. Оскільки алелі є постійними значеннями, мутація виконує зміну шляхом множення старого алеля на випадково згенерований коефіцієнт мутації. Коефіцієнт мутації дотримується рівномірного розподілу, обмеженого двома значеннями, симетричними одиниці. Широкий діапазон значень дозволяє алгоритму вийти з локального максимуму пристосованості, але може також

дезорієнтувати особин, які знаходяться поблизу глобального максимуму, зупиняючи або навіть запобігаючи конвергенції.

Збереження найбільш пристосованих особин може захистити максимальну пристосованість кожного покоління. Групу особин, що збереглися, елітну групу, можна визначити як частину всієї популяції, відсоток еліти. Якщо елітна група мала, вона, ймовірно, залишить незахищеними особин середньої пристосованості, які ближче до глобального максимуму, ніж найбільш пристосовані, але коли елітна група велика, коефіцієнт мутації застосовується до невеликої кількості менш пристосованих особин і впливає на ефективність операції мутації.

Тому, слід знайти компроміс між вищезазначеними міркуваннями, щоб вибрати специфічний для проблеми відсоток еліти.

Виконання алгоритму завершується, коли кількість поколінь перевищує заздалегідь визначений максимум, або функція вартості падає нижче очікуваного порогу.

Ці величини слід ретельно вибирати, щоб уникнути передчасного завершення або непродуктивного продовження після досягнення задовільного рішення.

Результати

У цьому абзаці розглядається продуктивність генетичного алгоритму (ГА) при оцінці напрямку прибуття. Існує кілька випадків, змодельованих за допомогою програмного забезпечення, розробленого для роботи в середовищі Matlab® 9.3. Для кожного випадку ГА виконується 100 разів, щоб зробити висновок про точність та надійність результатів. Приймальні антени повинні бути однорідними лінійними решітками. У різних випадках досліджується вплив розміру решітки на точність оцінки. Визначення впливу параметрів генетичного алгоритму здійснюється шляхом варіації початкової популяції.

У першому прикладі розглядається простий випадок двох сигналів ($N=2$) зі значним розділенням напрямку прибуття ($\phi_1 = 27^\circ, \phi_2 = 110^\circ$),

прийнятих рівномірною лінійною решіткою з $M=4$ елементарних антен з міжелементною відстанню $\lambda/4$.

Популяція складається з $N_{ind}=40$ особин, відсоток оновлення становить $R_t=60\%$, а відсоток еліти становить $R_e=10\%$.

ГА використовує відбір за принципом рулетки після того, як популяція досягає порогу придатності (50%), а ймовірність мутації становить $p_m=5\%$. Коефіцієнти мутації становлять 5° для параметра DoA, 5% для параметра нормалізованої амплітуди та 5° для параметра відносної фази.

На рисунку 4 показано полярне представлення, де кут $\Phi=0^\circ$ збігається з орієнтацією осі антенної решітки, а радіальна відстань пропорційна нормалізованій амплітуді. Жирний та слабкий символи відповідають фактичним та розрахунковим параметрам сигналу відповідно.

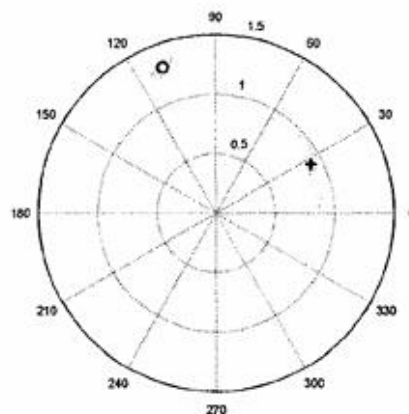


Рисунок 4.4 - Оцінка DoA та нормалізованої амплітуди (перший приклад)

Алгоритм набагато більш схильний до кутової похибки в оцінці точки досяжності сигналу, що надходить з малого кута. Це є наслідком неоднозначності, спричиненої лінійною структурою решітки, яка демонструє вужчу ширину променя в бік, ніж поблизу її осі.

Середні значення похибки оцінки для кожного параметра розраховуються для 100 ітерацій. Середня кутова похибка оцінки становить $\overline{\Delta\Phi_1} = 2.28^\circ$ та $\overline{\Delta\Phi_2} = 0.80^\circ$, середня нормована похибка оцінки амплітуди становить $\overline{\Delta E_1} = 1.26\%$ та $\overline{\Delta E_2} = 1.06\%$, а середня відносна похибка оцінки

фази становить $\overline{\Delta\psi_1} = 3.58^\circ$ та $\overline{\Delta\psi_2} = 2.58^\circ$ відповідно. У таблиці I наведено результати похибки для всіх оцінених параметрів. Кутова похибка становить менше 5° у 87% виконань для першого сигналу та 100% виконань для другого сигналу. Нормалізована похибка амплітуди становить менше 5% у 94% виконань для першого сигналу та 98% виконань для другого сигналу. Фаза помилка, яка, однак, не є критичною для локалізації, демонструє гірші результати.

Таблиця 4.1 – Відсоток похибки

Angular Error (deg)	$\Delta\phi < 1$	$1 < \Delta\phi < 5$	$5 < \Delta\phi < 10$	$10 < \Delta\phi$
Signal 1	49%	38%	5%	8%
Signal 2	71%	29%	0%	0%
Amplitude Error (%)	$\Delta E_n < 1$	$1 < \Delta E_n < 5$	$5 < \Delta E_n < 10$	$10 < \Delta E_n$
Signal 1	55%	39%	6%	0%
Signal 2	73%	25%	1%	1%
Phase Error (deg)	$\Delta\psi < 1$	$1 < \Delta\psi < 5$	$5 < \Delta\psi < 10$	$10 < \Delta\psi$
Signal 1	37%	40%	11%	12%
Signal 2	36%	49%	10%	5%

Один зі способів забезпечити точність результатів полягає в ігноруванні розв'язків, коли придатність не перевищує заздалегідь визначеного порогу. Наприклад, якщо оцінки алгоритму ігноруються, коли придатність розв'язку падає нижче 95%, тоді можна зменшити середню похибку оцінки параметра до - - $\overline{\Delta\phi_1} = 1.00^\circ$, $\overline{\Delta\phi_2} = 0.49^\circ$, $\overline{\Delta E_1} = 0.74\%$, $\overline{\Delta E_2} = 0.45\%$, $\overline{\Delta\psi_1} = 1.66^\circ$, $\overline{\Delta\psi_2} = 1.47^\circ$. Це зауваження є цінним, коли простір пошуку демонструє кілька локальних максимумів, де ГА може бути захоплений і досягти максимальної кількості поколінь, не збігаючись до відповідного розв'язку.

Як згадувалося вище, спосіб уникнути захоплення в локальних максимумах полягає в збільшенні початкової популяції більшою кількістю особин. Це можна виявити за допомогою наступного прикладу, який є повторенням першого сценарію, змодельованого після збільшення ($N_{ind}=80$) обсягу початкової популяції. У цьому випадку середня похибка оцінки параметра дорівнює

$$\overline{\Delta\phi_1} = 2.24^\circ, \quad \overline{\Delta\phi_2} = 0.55^\circ, \overline{\Delta E_1} = 0.93\%, \overline{\Delta E_2} = 0.68\%,$$

$$\overline{\Delta\psi_1} = 2.69^\circ, \quad \overline{\Delta\psi_2} = 1.80^\circ$$

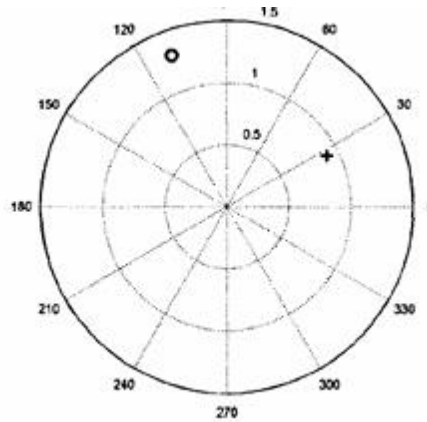


Рисунок 4.5 - Оцінка DoA та нормалізованої амплітуди (другий приклад)

Таблиця 4.2 – Відсоток помилки(другий приклад)

Angular Error (deg)	$\Delta\phi < 1$	$1 < \Delta\phi < 5$	$5 < \Delta\phi < 10$	$10 < \Delta\phi$
Signal 1	55%	40%	1%	4%
Signal 2	79%	21%	0%	0%
Amplitude Error (%)	$\Delta E_n < 1$	$1 < \Delta E_n < 5$	$5 < \Delta E_n < 10$	$10 < \Delta E_n$
Signal 1	66%	31%	3%	0%
Signal 2	72%	27%	1%	0%
Phase Error (deg)	$\Delta\psi < 1$	$1 < \Delta\psi < 5$	$5 < \Delta\psi < 10$	$10 < \Delta\psi$
Signal 1	44%	40%	12%	4%
Signal 2	43%	49%	7%	1%

Незначне покращення оцінки DoA першого сигналу показує, що точність обмежена неоднозначністю, що накладається шириною променя решітки, тому надмірне обчислювальне навантаження, спричинене додатковими індивідами, не є необхідним. Головною перевагою є те, що існує менша кількість неприйнятних рішень, оскільки загальний індекс придатності значно вищий.

Останній приклад, наведений у цій статті, є випадком антенної структури ($M=6$, $d=\lambda/4$), яка отримує чотири сигнали ($N=4$), кути виходу $\phi_1 = 27^\circ$, $\phi_2 = 110^\circ$, $\phi_3 = 162^\circ$, $\phi_4 = 88^\circ$.

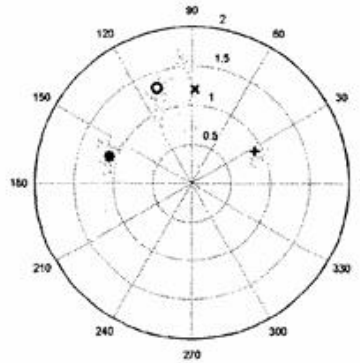


Рисунок 4.6 - Оцінка DoA та нормалізованої амплітуди (третій приклад)

На рисунку 4.6 видно, що для сигналу, що надходить з відстані 162° дюйми, є деякі оцінки, що лежать симетрично до кута осі решітки (198° дюймів). Це є наслідком лінійної структури решітки, яка не дозволяє алгоритму розрізнити півпростір походження падаючого сигналу.

Очевидно, що кількість елементів решітки, яка є малою для конкретного розміру задачі, впливає на точність генетичного алгоритму (ГА). Оцінка відносного фазового параметра демонструє найгірші результати. Середня похибка оцінки параметра становить

$$\begin{aligned} \overline{\Delta\phi_1} &= 9.41^\circ, \overline{\Delta\phi_2} = 4.07^\circ, \overline{\Delta\phi_3} = 7.78^\circ, \overline{\Delta\phi_4} = 3.42^\circ, \\ \overline{\Delta E_1} &= 5.40\%, \quad \overline{\Delta E_2} = 14.07\%, \quad \overline{\Delta E_3} = 5.17\%, \quad \overline{\Delta E_4} = 16.98\%, \\ \overline{\Delta\psi_1} &= 27.54^\circ, \quad \overline{\Delta\psi_2} = 37.97^\circ, \quad \overline{\Delta\psi_3} = 18.78^\circ, \quad \overline{\Delta\psi_4} = 38.36^\circ. \end{aligned}$$

Таблиця 4.3 – Відсоток помилки (третій приклад)

Angular Error (deg)	$\Delta\varphi < 1$	$1 < \Delta\varphi < 5$	$5 < \Delta\varphi < 10$	$10 < \Delta\varphi$
Signal 1	18%	44%	20%	18%
Signal 2	20%	49%	27%	4%
Signal 3	10%	44%	28%	18%
Signal 4	24%	46%	30%	0%
Amplitude Error (%)	$\Delta E_n < 1$	$1 < \Delta E_n < 5$	$5 < \Delta E_n < 10$	$10 < \Delta E_n$
Signal 1	37%	35%	12%	16%
Signal 2	10%	20%	16%	54%
Signal 3	24%	49%	16%	11%
Signal 4	6%	13%	17%	64%
Phase Error (deg)	$\Delta\psi < 1$	$1 < \Delta\psi < 5$	$5 < \Delta\psi < 10$	$10 < \Delta\psi$
Signal 1	5%	11%	14%	70%
Signal 2	2%	11%	7%	80%
Signal 3	5%	15%	15%	65%
Signal 4	2%	7%	12%	79%

Алгоритм успішно дає надійні результати.

Подібну конфігурацію з деякими незначними змінами можна було б застосувати, використовуючи відгуки від двовимірної антенної решітки, що забезпечує можливість визначення як азимуту, так і кутів місця. Були докладені деякі зусилля для модифікації алгоритму, і обчислювальне навантаження, яке призводить до повільної конвергенції, значно зменшується. Подальше дослідження включає додавання шуму та введення статистичної поведінки модульованих прийнятих сигналів, щоб порівняти продуктивність цього алгоритму з існуючими алгоритмами оцінки досягнення атаки.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Трудова діяльність є важливим аспектом самореалізації людини, сприяє зростанню її самоповаги та гідності через залучення до спільної мети та економічного розвитку. Водночас, нещасні випадки на виробництві та професійні захворювання мають тяжкі наслідки як для постраждалих працівників, так і для їхніх родин, спричиняючи значний соціальний та фінансовий тягар. До негативних наслідків належать втрата заробітку, значні витрати на лікування та відновлення здоров'я, а також психологічні та емоційні травми. В Україні існує розгалужена законодавча база з охорони праці, проте залишаються невирішені питання, що потребують уваги. Угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом передбачає гармонізацію українського законодавства з міжнародними та європейськими стандартами у сфері умов праці, що сприятиме забезпеченню гідного та безпечного трудового життя для всіх громадян країни.

На працівника під час розробки програми виявлення значення азимуту для системи двох випромінювачів з довільним фазовим зсувом можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори (згідно Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»):

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до визначених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

5.1.1. Обладнання приміщення та робочого місця

Оскільки розробка програми виявлення значення азимуту для системи двох випромінювачів з довільним фазовим зсувом проводилася із використанням ПК та відповідного програмного забезпечення, тому обладнання приміщення та робочого місця працівника повинно враховувати специфіку цієї роботи. Робоче місце має бути організоване таким чином, щоб забезпечити комфорт і продуктивність праці, а також для збереження здоров'я розробника під час тривалої роботи з комп'ютером. На робочому місці необхідно забезпечити впровадження заходів захисту від потенційного впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Інтенсивність цих факторів не повинна перевищувати встановлених граничних рівнів, визначених відповідними правовими, технічними та санітарно-гігієнічними нормами.

Враховуючи специфіку робочого процесу, пов'язаного з використанням відповідного програмного забезпечення, проведено аналіз параметрів приміщення на відповідність вимогам НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями». Загальна площа приміщення становить 18,7 м², а його об'єм – 62 м³. У приміщенні працює 3 особи, кожна з яких забезпечена комп'ютеризованим робочим місцем. Таким чином, на одного працівника припадає 6,2 м² робочої площі та 20,7 м³ повітряного простору. Отримані показники повністю відповідають встановленим нормативним значенням.

Головним робочим місцем розробника є письмовий стіл з персональним комп'ютером. Достатній простір для оператора ЕОМ з ВДТ забезпечується наступними заходами:

- вільну досяжність органів ручного керування в зоні моторного поля (відстань по висоті - 900-1330 мм, по глибині - 400-500 мм);

- екран монітора ПК повинен знаходитися від очей оператора (користувача) ПК на відстані 600 - 700 мм;
- клавіатура повинна розміщуватися так, щоб на ній було зручно виконувати роботу двома руками. Кут нахилу до панелі клавіатури повинен бути в межах від 5 до 25°;
- принтер повинен бути розташований у зручному для оператора – відстань до клавіш керування принтером не перевищувала довжину витягнутої руки;
- висота робочої поверхні стола – 725 мм;
- робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 450 мм, на рівні витягнутих ніг – не менше 650 мм.

Органи керування робочим місцем, такі як клавіатура, монітор та маніпулятор «миша», як предмети постійного використання, повинні бути розташовані в оптимальній зоні досяжності рук працівника без необхідності нахилів корпусу. Предмети, що використовуються періодично, наприклад, носії інформації або довідкові матеріали, слід розміщувати у більш віддаленій зоні або на спеціальних стелажах, відповідно до вимог ДСТУ 8604:2015. Таке ергономічне розміщення сприяє зниженню статичного навантаження та підвищенню комфорту під час роботи. Дотримання цих рекомендацій допомагає запобігти розвитку професійних захворювань опорно-рухового апарату та органів зору.

5.1.2. Електробезпека приміщення

Усе наявне в приміщенні обладнання, ПК, спеціальні периферійні пристрої ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК з якими працює розробник відповідають вимогам чинних в Україні стандартів та нормативних актів з охорони праці (НПАОП 0.00-7.15-18, ДСанПіН 3.3.2.007-98).

За критерієм небезпеки ураження електричним струмом приміщення, де проводилися дослідження, належить до категорії приміщень без підвищеної небезпеки. Це зумовлено сухістю приміщення, відсутністю підвищених температур та вологості, а також наявністю струмонепровідного покриття підлоги. Електроживлення силового обладнання та системи освітлення забезпечується чотири провідною трифазною мережею з напругою 380/220 В (де 220 В є фазною напругою від фази до нейтралі, а 380 В – лінійною напругою між фазами).

З метою забезпечення електробезпеки в приміщенні реалізовано заземлення всіх металевих неструмопровідних частин електрообладнання, які за умов несправності можуть опинитися під небезпечною напругою. Усі струмопровідні елементи обладнання мають надійну ізоляцію. Побутові та комп'ютерні електромережі функціонують незалежно одна від одної. Перед проведенням будь-яких ремонтних робіт електрообладнання персонал обов'язково проходить попередній інструктаж з електробезпеки. Додатково, для підвищення рівня безпеки, передбачено використання пристроїв захисного відключення (ПЗВ) на окремих лініях електроживлення, що забезпечують швидке знеструмлення у випадку витoku струму. Регулярні перевірки стану ізоляції та контуру заземлення є невід'ємною частиною системи електробезпеки приміщення.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

В даному пункті розглянуто організацію праці розробника програми виявлення значення азимуту для системи двох випромінювачів з довільним фазовим зсувом та умови виробничого приміщення, де виконувалося поставлене завдання.

5.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат виробничого середовища є важливим фактором, що впливає на фізичне самопочуття та продуктивність праці співробітників. Він охоплює такі

характеристики, як температура повітря, відносна вологість, швидкість руху повітря та інтенсивність теплового випромінювання від обладнання. Ключовим завданням роботодавця є створення на робочих місцях допустимих мікрокліматичних умов, які забезпечують комфорт працівників. Підтримання комфортних умов праці сприяє збереженню здоров'я персоналу та підтримує їхню працездатність протягом усього робочого дня. Такі умови полегшують перенесення фізичних та психологічних навантажень, а також знижують ймовірність виникнення стресу або втоми.

Робота розробника за енерговитратами відноситься до категорії 1а. Нормується мікроклімат на робочому місці розробника згідно ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для підтримки оптимального рівня мікроклімату в приміщенні передбачено систему кондиціонування повітря з індивідуальним регулюванням температури, систему центрального опалення та систематичне вологе прибирання приміщення.

5.2.2. Склад повітря робочої зони

Наявність забрудненого повітря в робочій зоні становить значну загрозу для здоров'я працівників, зумовлюючи розвиток різноманітних захворювань та патологічних станів. Забруднення повітря часто є причиною захворювань респіраторної системи, таких як кашель, нежить, ларингіт, бронхіт і навіть пневмонія. Вдихання шкідливих частинок може викликати подразнення слизових оболонок дихальних шляхів та запальні процеси в легенях. Крім того,

забруднене повітря може негативно впливати на серцево-судинну систему, сприяючи розвитку атеросклерозу та серцевих захворювань, підвищуючи артеріальний тиск та збільшуючи ризик інфарктів. Тривалий контакт з забрудненим повітрям також може призвести до послаблення імунної системи, підвищуючи вразливість організму до інфекційних та інших захворювань.

В приміщенні, де здійснюється розробка програми виявлення значення азимуту для системи двох випромінювачів з довільним фазовим зсувом, можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил, озон та вуглекислий газ. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	10	4	4
Озон	0,16	0,03	4
Вуглекислий газ	3	1	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.5.3).

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Забезпечення належного складу повітря у робочій зоні досягається завдяки комплексному застосуванню системи кондиціонування для фільтрації та регулювання температури й вологості, регулярного провітрювання для

оновлення повітря та видалення забруднень, а також систематичного вологого прибирання для зменшення концентрації пилу та алергенів.

5.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення визначається як використання природного сонячного світла та штучних джерел для забезпечення візуального сприйняття навколишнього простору. Ефективна система освітлення є важливим елементом психофізіологічного комфорту, позитивно впливає на продуктивність праці та гарантує безпеку під час виконання робочих завдань. Раціональне освітлення в промислових приміщеннях також є показником естетики та високого рівня культури виробництва. Слід враховувати, що освітлення відіграє значну роль у стимулюванні фізіологічних процесів в організмі людини, а його недостатній рівень може призводити до перевтоми зорового апарату в процесі роботи та, як наслідок, збільшувати ризик травматизму.

У виробничих умовах застосовують різні типи освітлення, включаючи природне, штучне та комбіноване. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні для умов виконання роботи зазначені у таблиці 5.4:

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високої точності	0,3 -0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Штучне освітлення в приміщенні організовано за принципом загального рівномірного освітлення. Для виконання робіт, пов'язаних переважно з документами, допускається використання комбінованої системи, що поєднує загальне освітлення з додатковими світильниками місцевого освітлення. При цьому рівень освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів повинен становити 300-500 люксів. Якщо досягти таких показників лише загальним освітленням неможливо, допускається застосування місцевого освітлення, світильники якого слід розміщувати таким чином, щоб уникнути відблисків на екрані монітора, а освітленість самого екрана не повинна перевищувати 300 люксів. В якості джерел штучного світла рекомендується використовувати лампи, що забезпечують якісне та розсіяне світло.

Для забезпечення достатнього освітлення слід максимально використовувати бічне природного освітлення, систематично очищувати скло від бруду та систематично замінювати перегорілі лампи.

5.2.4 Виробничий шум

Шум є одним з найбільш значущих негативних чинників виробничого середовища, здатний викликати дискомфорт при короткотривалому впливі та серйозні функціональні порушення внутрішніх органів при тривалій дії. Систематичний вплив шуму на організм працівника може призвести до розладів нервової системи, сприяти розвитку серцево-судинних захворювань та послаблювати імунну систему. Крім того, гуморальна система та шлунково-кишковий тракт також є чутливими до шумового навантаження. Джерелами шуму в процесі виконання робочих завдань можуть бути різноманітні фактори, включаючи зовнішній шум від транспорту, функціонування офісної техніки (комп'ютерів, принтерів, сканерів), а також звуки, що створюються присутнім персоналом.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99. Допустимі рівні звукового тиску для умов виконання роботи наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно забезпечити звукоізоляцію та дотримання раціональних режимів роботи та відпочинку.

5.2.5. Виробничі випромінювання

Організм людини складається з клітин, внутрішнє середовище яких представлене рідинами-електролітами (протоплазма, кров, лімфа та інші). Під впливом зовнішнього постійного електричного поля біологічні тканини зазнають поляризації. Полярні молекули (наприклад, вода) та іони, що містяться в рідкому середовищі, переміщуються та орієнтуються відповідно до напрямку силових ліній зовнішнього поля. У випадку змінного електромагнітного поля електричні характеристики живих клітин залежать від частоти випромінювання, і зі збільшенням частоти вони проявляють властивості провідників. Окрім струмів провідності, змінне ЕМП індукує змінну поляризацію діелектричних компонентів організму (сухожилля, хрящі тощо). Також можливе явище резонансного поглинання енергії. При цьому особливо небезпечними для людини є частоти до 1000 Гц, оскільки вони близькі до власних частот енергетичних центрів організму.

Відповідно до стандартів, електромагнітне випромінювання на робочому місці розробника повинне бути виміряне в діапазоні частот від 5 Гц до 400 кГц. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника становлять наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 - Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатистичного поля

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля 60 кГц до 3 мГц	50	5	
Напруженість електромагнітного поля 3 кГц до 30 мГц	20		
Напруженість електромагнітного поля 30 кГц до 50 мГц	10	0,3	
Напруженість електромагнітного поля 30 кГц до 300 мГц 5	5		
Напруженість електромагнітного поля 300 кГц до 300 гГц			10Вт/кв. м
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 нм)			0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 нм)			0,01
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 нм)			10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 нм			10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм			35,0 — 70,0
Напруженість електричного поля відеодисплейного терміналу			20кВ/м

Для обмеження впливу ЕМП на працівника слід використовувати лише якісну техніку із сертифікатом якості. Для забезпечення безпеки розробника необхідно дотримуватися вимог НПАОП 0.00-7.15-18 та встановленого режиму часу під час роботи з ПК.

5.3 Пожежна безпека

Запобігання пожежам є першочерговим завданням, що вимагає усунення умов для формування горючих або вибухонебезпечних середовищ та джерел займання. На підприємстві вкрай важливо вжити дієвих заходів з пожежної безпеки, спрямованих на мінімізацію ризиків для життя та здоров'я людей, а також на обмеження матеріальних збитків у випадку пожежі. Забезпечення пожежної безпеки об'єкта ґрунтується на комплексній системі, що охоплює запобігання пожежам, протипожежний захист та організаційно-технічні заходи. Оскільки досліджуване приміщення належить до категорії «Д» за пожежною небезпекою, що характеризується як приміщення з негорючими речовинами та матеріалами в холодному або негорючому стані, основні зусилля в системі запобігання пожежам мають бути спрямовані на контроль за можливими джерелами займання та недопущення занесення до приміщення горючих матеріалів. Важливим є також підтримання в належному стані первинних засобів пожежогасіння та проведення інструктажів з персоналом щодо дій у разі виникнення пожежі, навіть за низького рівня пожежної небезпеки.

5.3.1. Технічні рішення системи запобігання пожежі

У приміщенні ідентифіковано низку факторів, що становлять потенційну пожежну небезпеку, серед яких:

1. Перевищення допустимого навантаження на електричну мережу та, як наслідок, перегрів провідників і контактних з'єднань.
2. Недотримання правил експлуатації технічного обладнання, зокрема комп'ютерів, периферійних пристроїв (принтерів, сканерів), лабораторного обладнання, систем вентиляції та кондиціонування, а також освітлювальних приладів, що може включати порушення режимів роботи, неправильне підключення або несвоєчасне технічне обслуговування.

3. Недостатній рівень електробезпеки, що проявляється у перевантаженні електромережі та неналежному заземленні, що може призвести до надмірного нагрівання та коротких замикань.

4. Порушення правил користування електроприладами, наприклад, їх неправильне підключення до мережі або залишення без нагляду у ввімкненому стані.

5. Несправність електрообладнання, включаючи пошкодження ізоляції провідників, зношені електричні кабелі та дефекти в самих електроприладах.

Система запобігання пожежі включає комплекс наступних заходів: регулярний контроль стану ізоляції електромереж, облаштування спеціальних зон для куріння, періодичне проведення навчань та інструктажів з питань пожежної безпеки, запобігання накопиченню займистих матеріалів у приміщенні та встановлення системи захисту від блискавки. Впровадження цих заходів спрямоване на мінімізацію ймовірності виникнення пожежі, забезпечення безпеки персоналу та збереження матеріальних цінностей, а також на дотримання вимог нормативних документів з пожежної безпеки.

5.3.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту спрямована на локалізацію поширення вогню, забезпечення безпеки людей та збереження матеріальних цінностей від руйнівного впливу факторів пожежі, а також на створення умов, що унеможливають її виникнення. Для досягнення цих цілей передбачаються наступні технічні рішення: встановлення автоматичної пожежної сигналізації (для оперативного виявлення загоряння на ранній стадії та своєчасного оповіщення про пожежу), монтаж системи автоматичного пожежогасіння (для локалізації та ліквідації пожежі без безпосередньої участі людини, особливо в зонах підвищеної пожежної небезпеки або з цінним обладнанням), облаштування системи димовидалення (для забезпечення безпечної евакуації людей шляхом видалення диму та токсичних продуктів горіння з шляхів евакуації та приміщень), встановлення протипожежних дверей, воріт та перегородок (для

створення протипожежних бар'єрів, що перешкоджають розповсюдженню вогню та диму між приміщеннями), обладнання шляхів евакуації евакуаційним освітленням та знаками безпеки (для забезпечення видимості та орієнтування під час евакуації в умовах задимлення або відключення основного освітлення), забезпечення первинними засобами пожежогасіння (вогнегасниками) (для оперативного гасіння невеликих загорянь на початковій стадії).

У приміщенні передбачено розміщення одного порошкового вогнегасника типу ПВ-3 на висоті не більше 1,5 метра від підлоги до його нижньої частини, на відстані, що не перешкоджає повному відчиненню дверей. Для чіткого позначення місця розташування вогнегасника буде встановлено вказівний знак на видних місцях на висоті 2,0 - 2,5 метра від рівня підлоги. У коридорі приміщення розташована схема евакуації людей при пожежі. Шляхи евакуації з відділу відповідають правилам пожежної безпеки. У будинку є два виходи, ширина коридору – 2-3 метри, ширина дверей – 0,8 м., двері відкриваються по ходу руху людей у випадку евакуації.

ВИСНОВКИ

Розроблено алгоритм визначення азимуту, що забезпечує високу точність обробки фазових параметрів сигналів двох випромінювачів. Враховано можливість варіювання фазового зсуву, що підвищує гнучкість застосування методу в реальних умовах.

Запропоновано використання генетичного алгоритму для оптимізації процесу визначення азимуту. Алгоритм демонструє покращення точності в умовах впливу завад та нестабільності сигналів, що підтверджено результатами моделювання.

Проведено порівняльний аналіз методів визначення азимуту на основі обертового інтерферометра з довгою базою. Виявлено, що метод RLBI забезпечує перевагу в точності двовимірної оцінки напрямку в порівнянні зі статичними інтерферометричними системами.

Розглянуто питання охорони праці, пов'язані з роботою над програмою. Визначено потенційно шкідливі фактори виробничого середовища та розроблено заходи для мінімізації їх впливу на працівника.

Обґрунтовано перспективи практичного застосування розробленого методу у навігаційних та радіолокаційних системах, зокрема в автономних платформах, військових технологіях та аерокосмічних дослідженнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Навігація. Основи визначення місцеположення та скеровування / Б. Гофманн-Велленгоф, К. Легат, М. Візер; пер. з англ. за ред.: Я.С.Яцківа; літ. ред.: О. Є. Смолінська. – Л.: ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – 449 с.
2. Сумик М.М. Основи теорії радіотехнічних систем: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Радіотехніка» / М. М. Сумік. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2005. – 240 с.
3. Конін В.В. Системи супутникової радіонавігації / В.В. Конін, В.П. Харченко. – Київ: Холтех, 2010. – 520 с.
4. Бабак В.П. Супутникова радіонавігація / В.П. Бабак, В.В. Конін, В.П. Харченко. – К.: Техніка, 2004. – 328 с.
5. Зуєв О.В. Радіолокаційне та радіонавігаційне обладнання аеропортів: навч. посіб. / О.В. Зуєв, В.Г. Мелкумян, А.А. Соломенцев // Нац. авіац. ун-т. – Київ: НАУ, 2006. – 217 с.
6. E. Jacobs and E. W. Ralston, "Ambiguity resolution in interferometry," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 17, no. 6, pp. 766–780, Jul. 1981.
7. W. Wu, C. C. Cooper, and N. A. Goodman, "Switched-element direction finding," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 45, no. 3, pp. 1209–1217, Jul. 2009.
8. J. Sheinvald and M. Wax, "Direction finding with fewer receivers via time-varying preprocessing," IEEE Trans. Signal Process., vol. 47, no. 1, pp. 2–9, Jan. 1999.
9. S. Kawase, "Radio Interferometer for geosynchronous satellite direction finding," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 43, no. 2, pp. 443–449, Apr. 2007.
10. B. Friedlander and A. Zeira, "Eigenstructure-based algorithms for direction finding with time-varying arrays," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 32, no. 2, pp. 671–689, Apr. 1996.
11. J. Sheinvald, M. Wax, and A. J. Weiss, "Localization of multiple sources with moving arrays," IEEE Trans. Signal Process., vol. 42, no. 10, pp. 2736–2743, Oct.

1998.

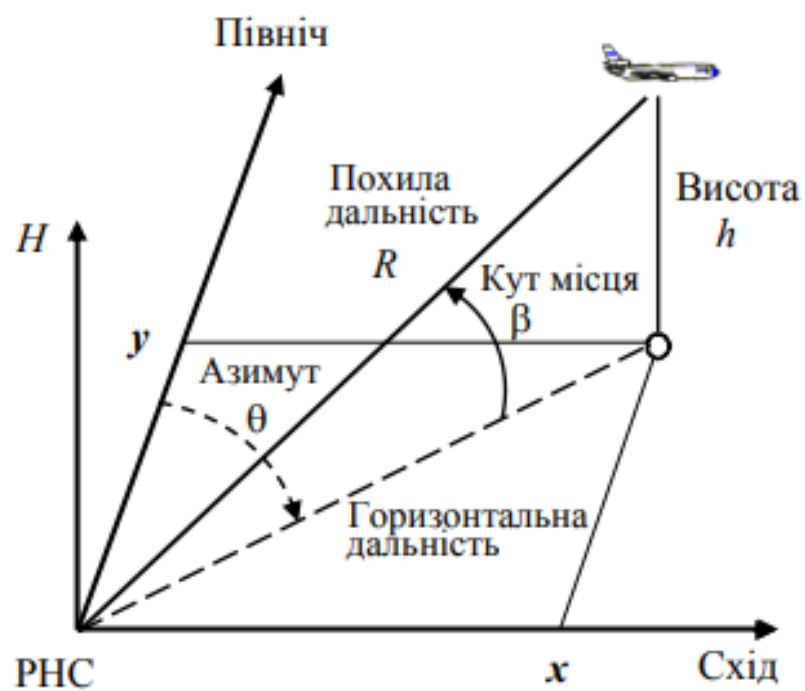
12. Schmidt, R.O, “Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation”, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol. AP-34, No. 3, March 1985, pp. 276-280
13. Godara, L.C, “Application of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam-Forming and Direction-of-Arrival Considerations”, Proceedings of the IEEE, V01.85, No.85, No8, August 1997, pp. 1 195-1 245
14. Goldberg D.E, “Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning”, Addison-Wesley, 1989 [4] Liberti, J.C., Rappaport, T.S, “Smart Antennas for Wireless Communications”, Prentice Hall, 1999
15. Mitchell, M. “An Introduction to Genetic Algorithms”, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1996
16. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html
17. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php
18. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028
19. ДСанПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>
20. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

21. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Електронний ресурс] – Режим доступу до сторінки: http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819
22. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
23. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>
24. СанПіН 2.2.4.1191-03 «Електромагнітні поля у виробничих умовах» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.vrednost.ru/2241191-03.php>
25. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення- [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
26. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>
27. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759
28. ДБН В.1.1.7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002..pdf

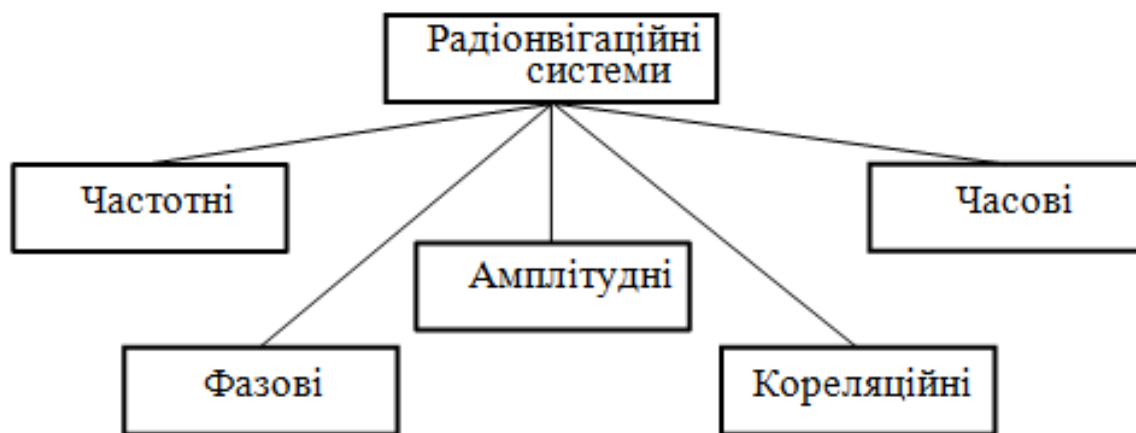
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ПРОГРАМА ВИЯВЛЕННЯ ЗНАЧЕННЯ АЗИМУТУ ДЛЯ СИСТЕМИ ДВОХ
ВИПРОМІНЮВАЧІВ З ДОВІЛЬНИМ ФАЗОВИМ ЗСУВОМ

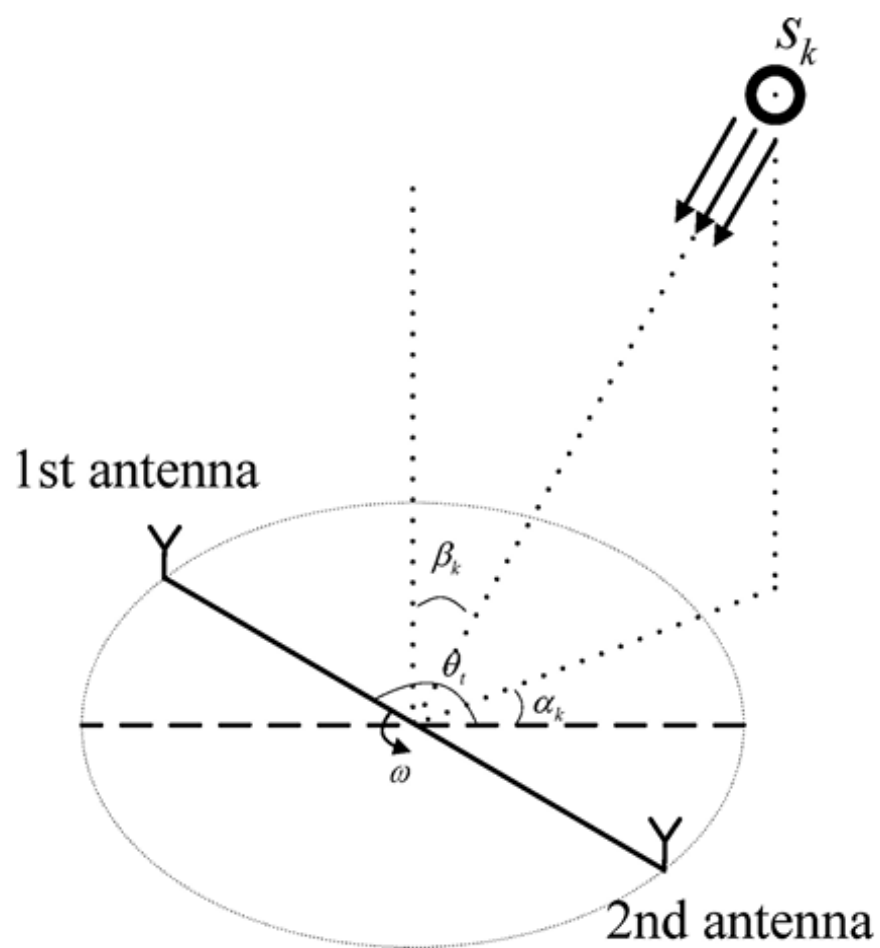
назва бакалаврської кваліфікаційної роботи



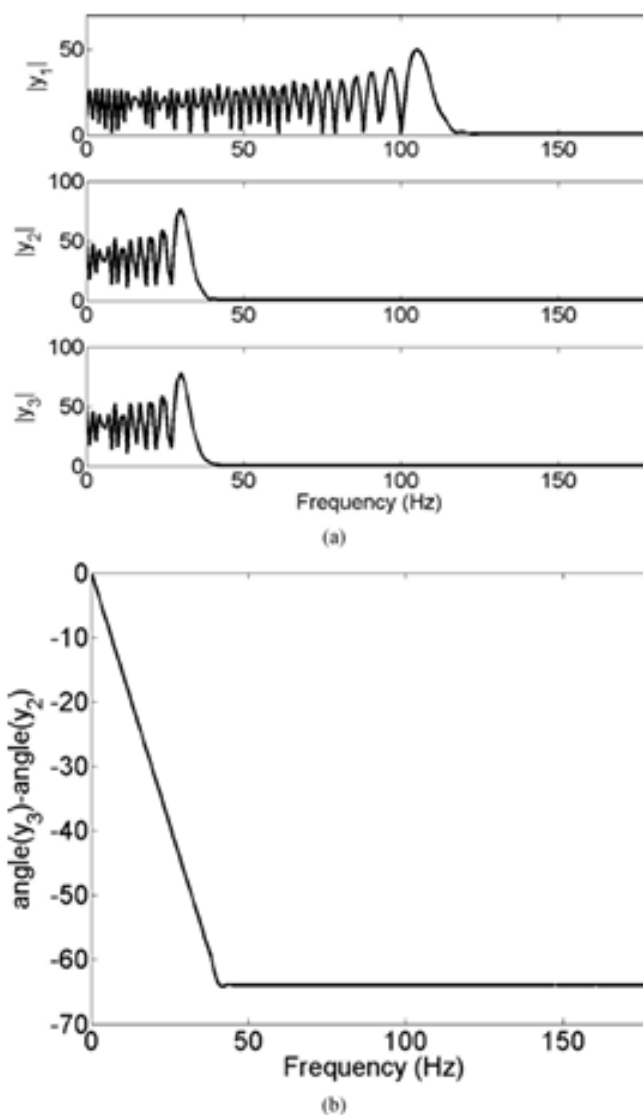
Локальна система координат



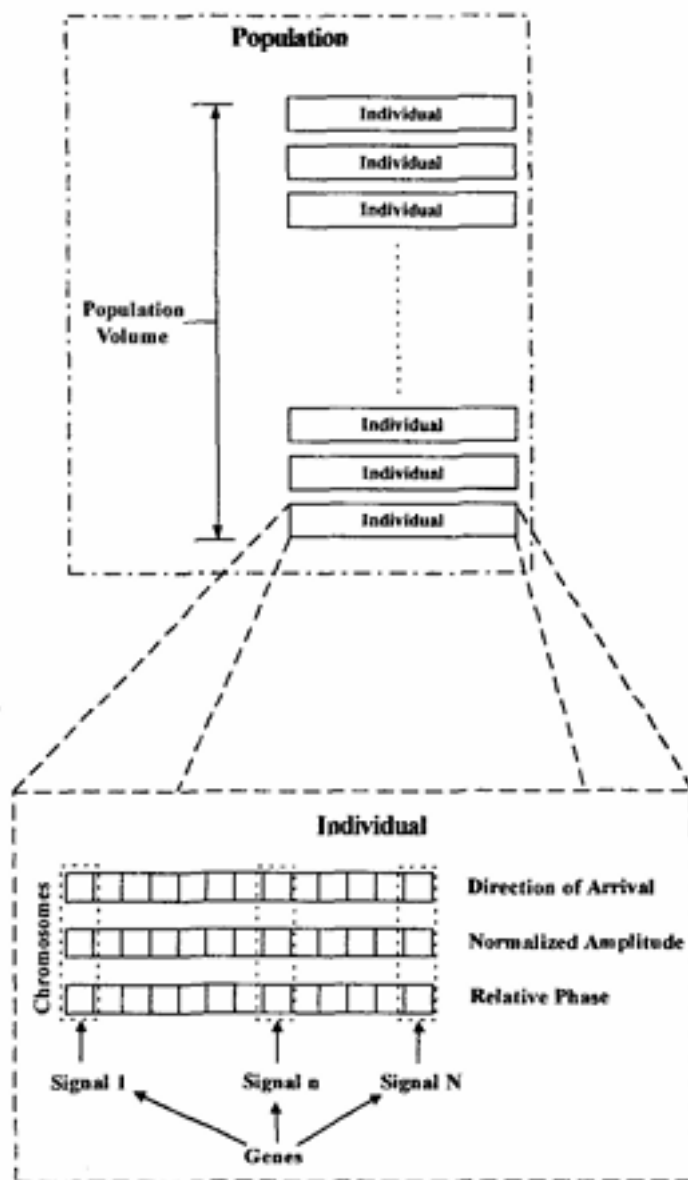
Класифікація радіонавігаційних систем за типом вимірювання



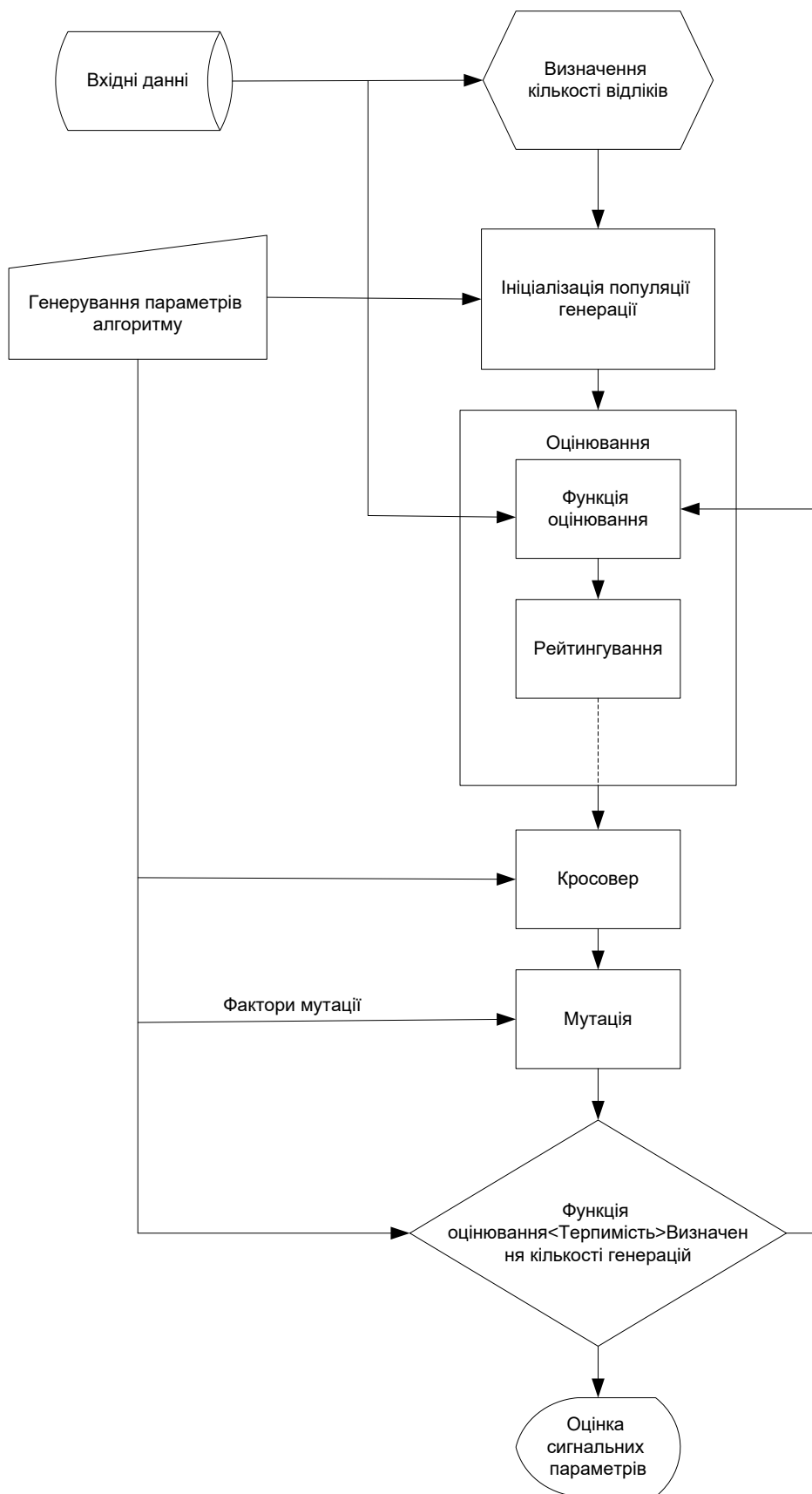
Структура RLBI систем для 2D визначення напрямку



Зв'язки між спектральними властивостями та двовимірними напрямками, (a) ширина смуги; (b) фазовий зсув.



Вигляд генетичного алгоритму



Генетичний алгоритм потокових обчислень

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Програма виявлення значення азимуту для системи двох випромінювачів з довільним фазовим зсувом

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ каф. ІКСТ ФІЕС гр. ПЗТ-23мс

(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 5.55 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Кичак В.М., д.т.н., проф., зав. каф. ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В. к.т.н., доц. каф. ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Крижановський В.Г. д.т.н., проф. Каф. ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Давискиба В.І.

(прізвище, ініціали)