

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

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Захист телекомунікаційних систем від активних завад при
наявності відмінностей у фазових фронтах ЕМХ сигналу та завади»**

Виконала:

студентка ІV курсу, групи ТЗ-01

Дубова Марина Михайлівна _____

Керівник:

Професор кафедри ТК НН ІТС, к.т.н.

Якорнов Євгеній Аркадійович _____

Рецензент:

Старший викладач кафедри ЕКІР, к.т.н.

Новіков Валерій Іванович _____

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

Студентка _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студентці

Дубовій Марині Михайлівні

1. Тема роботи «Захист телекомунікаційних систем від активних завад при наявності відмінностей у фазових фронтах ЕМХ сигналу та завади», керівник роботи професор Якорнов Євгеній Аркадієвич, к.т.н., затверджені наказом по університету від «22» травня 2024 р. № 2064-с.
2. Термін подання студентом роботи : 10 червня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: Цифрові дані для аналізу.
4. Зміст роботи : Дослідження впливу активних завад на якість передачі сигналів у телекомунікаційних системах, аналіз відмінностей у фазових фронтах електромагнітних сигналів та їх впливу на ефективність активних завад, розробка методу захисту телекомунікаційних систем від активних завад з урахуванням виявлених особливостей фазових фронтів.
5. Перелік ілюстративного матеріалу:
Слайд 1: Титульна сторінка
Слайд 2: Назва, мета та задачі дипломної роботи.

Слайд 3: Актуальність проблеми захисту телекомунікаційних систем від активних завад.

Слайд 4: Огляд існуючих методів захисту та їх обмеження.

Слайд 5: Аналіз відмінностей у фазових фронтах електромагнітних сигналів.

Слайд 6: Розроблений метод захисту від активних завад з урахуванням фазових фронтів.

Слайд 7: Структурна схема системи захисту телекомунікаційних систем від активних завад.

Слайд 8: Теоретичне обґрунтування ефективності розробленого методу.

Слайд 9: Висновки та перспективи подальших досліджень.

6. Дата видачі завдання 1 січня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання першого розділу	01.01.2024 - 15.02.2024	Виконано
2	Написання другого розділу	16.02.2024 - 31.03.2024	Виконано
3	Написання третього розділу	01.04.2024 - 15.05.2024	Виконано
4	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	16.05.2024 - 31.05.2024	Виконано
5	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	01.06.2024 - 15.06.2024	Виконано

Студент

Марина ДУБОВА

Керівник

Євгеній ЯКОРНОВ

РЕФЕРАТ

Текстова частина бакалаврської дипломної роботи містить: 76 сторінок, 15 рисунків та 27 джерела.

Метою роботи є розробка методу захисту телекомунікаційних систем від активних завад при наявності відмінностей у фазових фронтах ЕМХ сигналу. В роботі проведено аналіз існуючих методів захисту від активних завад та їх обмежень.

Досліджено вплив відмінностей у фазових фронтах ЕМХ сигналу на ефективність активних завад. Запропоновано новий метод захисту, що враховує ці особливості, та проведено його теоретичне обґрунтування. Оцінено потенційну ефективність запропонованого методу.

Ключові слова: активні завади, фазові фронти, ЕМХ сигнал, захист телекомунікаційних систем.

ABSTRACT

The text part of the thesis contains: 76 pages, 15 figures and 27 sources.

The purpose of the work is to develop a method for protecting telecommunication systems from active interference in the presence of differences in the phase fronts of the EM signal. The work analyzes existing methods of protection against active interference and their limitations. The influence of differences in the phase fronts of the EM signal on the effectiveness of active interference is investigated. A new protection method that takes into account these features is proposed and its theoretical justification is carried out. The potential effectiveness of the proposed method is evaluated.

Keywords: active interference, phase fronts, EM signal, telecommunication systems protection.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ВІД АКТИВНИХ ПЕРЕШКОД.....	10
1.1 Аналіз сучасних інфокомунікаційних систем.....	10
1.1.1 Технологічна основа сучасних ІКС.....	10
1.1.2 Приклади сучасних ІКС та їх застосування	13
1.1.3 Тенденції розвитку ринку ІКС.....	14
1.2 Аналіз особливостей функціонування інфокомунікаційних систем в сучасному середовищі	16
1.3 Сучасні системи захисту засобів зв'язку від активних перешкод.....	18
Висновки	20
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ВІД АКТИВНИХ ПЕРЕШКОД У ГОЛОВНОМУ ПЕЛЮСТКУ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПРЯМОВАНОСТІ АНТЕНИ.....	22
2.1 Аналіз необхідності високої завадостійкості інфокомунікаційних систем	22
2.2 Аналіз можливих радіоелектронних завад.....	25
2.2.1 Класифікація радіоелектронних завад.....	25
2.2.2 Особливості радіоелектронних завад у головному пелюстку характеристики спрямованості антени	29
2.3 Аналіз сучасних методів захисту від активних навмисних завад у головному пелюстку	33
Висновки	38
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СПОСОБУ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДМІННОСТЕЙ У ФАЗОВИХ ФРОНТАХ ЕМХ СИГНАЛУ ТА ЗАВАДИ....	40

3.1 Теоретичне обґрунтування методу дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами ЕМХ	40
3.1.1 Аналіз фазових фронтів ЕМХ сигналу та перешкоди	40
3.1.3 Аналіз впливу різних факторів на фазові fronti ЕМХ.....	42
3.2 Математичне обґрунтування методу дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами ЕМХ	44
3.3 Аналіз способів дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами електромагнітних хвиль у зоні Френеля	49
3.3.1 Огляд існуючих алгоритмів дискримінації	49
3.3.2 Розробка алгоритму дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами електромагнітних хвиль у зоні Френеля	52
3.3.3 Аналіз та порівняння ефективності різних алгоритмів	60
3.4 Розробка структурної схеми системи захисту	60
5.5 Аналіз результатів	Ошибка! Закладка не определена.
Висновки	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЧХ	амплітудно-частотна характеристика
ДУС	діаграмоутворююча схема
ЕМХ	електромагнітне поле
ІКС	інфокомунікаційні системи
КАМЧМ	квадратурна амплітудна модуляція з часовим ущільненням
КМ	коваріаційна матриця
МГц	мегагерц
МНК	метод найменших квадратів
ММП	метод максимальної правдоподібності
НВЧ	надвисокі частоти
РЕЗ	радіоелектронні завади
СКП	середньоквадратична помилка
ХСА	характеристика спрямованості антени

ВСТУП

Сучасні інфокомунікаційні системи (ІКС) є основою функціонування сучасного суспільства, забезпечуючи передачу великих обсягів інформації та надаючи широкий спектр послуг. Одним з ключових аспектів забезпечення надійності та ефективності ІКС є захист засобів зв'язку від активних перешкод, які можуть суттєво погіршити якість передачі інформації та призвести до збоїв у роботі системи.

Актуальність роботи. Захист телекомунікаційних систем від активних завад є актуальною науково-технічною проблемою. Існуючі методи захисту часто не враховують відмінності у фазових фронтах електромагнітних хвиль сигналу та завади, що обмежує їх ефективність. Використання цих відмінностей відкриває нові можливості для розробки більш досконалих методів захисту.

Об'єктом дослідження є телекомунікаційні системи, що піддаються впливу активних завад у головному пелюстку діаграми спрямованості антени.

Предметом дослідження є методи захисту телекомунікаційних систем від активних завад, засновані на використанні відмінностей у фазових фронтах електромагнітних хвиль сигналу та завади.

Метою роботи є розробка та дослідження ефективних методів захисту телекомунікаційних систем від активних завад у головному пелюстку діаграми спрямованості антени, що враховують відмінності у фазових фронтах електромагнітних хвиль.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз існуючих методів захисту телекомунікаційних систем від активних завад та виявити їх обмеження.
2. Дослідити вплив відмінностей у фазових фронтах ЕМХ сигналу та завади на ефективність захисту.
3. Розробити математичну модель поширення ЕМХ сигналу та завади з урахуванням їх фазових фронтів.

4. Запропонувати нові методи захисту, що враховують виявлені особливості.
5. Провести теоретичну оцінку ефективності запропонованих методів.

Методика дослідження включає аналіз літератури, розробку математичної моделі, теоретичний аналіз та оцінку ефективності запропонованих методів.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для розробки нових ефективних систем захисту телекомунікаційних систем від активних завад, що підвищить їх надійність та стійкість до зовнішніх впливів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ВІД АКТИВНИХ ПЕРЕШКОД

1.1 Аналіз сучасних інфокомунікаційних систем

Сучасні інфокомунікаційні системи (ІКС) – це складний комплекс технологічних рішень, що забезпечує передачу, обробку та зберігання інформації. Вони відіграють ключову роль у сучасному суспільстві, забезпечуючи функціонування різних сфер життя, від економіки та державного управління до оборони та соціальної сфери.

1.1.1 Технологічна основа сучасних ІКС

Сучасні ІКС базуються на передових технологіях, що забезпечують високу швидкість, надійність та безпеку передачі інформації. Розглянемо деякі з ключових технологій.

Бездротові технології:

- 5G (п'яте покоління мобільного зв'язку): Це новітнє покоління мобільного зв'язку, що обіцяє революціонізувати спосіб нашої взаємодії з технологіями[1]. 5G пропонує значно вищі швидкості передачі даних, ніж попередні покоління, що дозволяє завантажувати фільми високої якості за лічені секунди, проводити відеоконференції без затримок та забезпечувати стабільний зв'язок для великої кількості пристроїв одночасно. Крім того, 5G має потенціал для підтримки інноваційних технологій, таких як віртуальна та доповнена реальність, автономні транспортні засоби та розумні міста.
- Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax): Це новітній стандарт Wi-Fi, який пропонує значні покращення в порівнянні з попередніми версіями. Wi-Fi 6 забезпечує вищу швидкість передачі даних, більшу пропускну здатність, покращену

енергоефективність та підтримку більшої кількості одночасних підключень. Це особливо важливо в умовах, коли все більше пристроїв підключається до мережі Wi-Fi, таких як розумні будинки, офіси та громадські місця.

- Bluetooth 5: Ця версія Bluetooth пропонує значно більший радіус дії та вищу швидкість передачі даних порівняно з попередніми версіями[2]. Це робить Bluetooth 5 ідеальним для підключення різноманітних пристроїв Інтернету речей (IoT), таких як розумні датчики, трекери активності та медичні пристрої.
- LoRaWAN та NB-IoT: Ці технології низької потужності широкопasmового зв'язку (LPWAN) спеціально розроблені для Інтернету речей. Вони забезпечують можливість підключення великої кількості пристроїв з низьким енергоспоживанням та передачею даних на великі відстані. LoRaWAN та NB-IoT знаходять застосування у різних сферах, включаючи розумні міста, сільське господарство, логістику та промисловість.

Оптичні технології:

- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)[3]: Ця технологія дозволяє передавати кілька оптичних сигналів на різних довжинах хвиль по одному оптичному волокну, що значно збільшує пропускну здатність мережі. DWDM є ключовою технологією для магістральних мереж зв'язку, що забезпечують передачу величезних обсягів даних на великі відстані.
- OTN (Optical Transport Network): Це протокол передачі даних, який забезпечує надійну та масштабовану передачу даних в оптичних мережах. OTN використовується для створення магістральних та метрових мереж зв'язку, що забезпечують високу якість обслуговування для різних типів трафіку, включаючи голос, відео та дані.
- PON (Passive Optical Network)[4]: Ця технологія використовується для побудови розподільчих мереж доступу, що забезпечують

високошвидкісний доступ до Інтернету та інших послуг для домашніх та бізнес-користувачів. PON характеризується використанням пасивних оптичних розгалужувачів, що спрощує мережеву інфраструктуру та знижує її вартість.

Хмарні технології:

- IaaS (Infrastructure as a Service)[5]: Ця модель надає користувачам доступ до віртуальних серверів, сховищ даних та мережевих ресурсів, що дозволяє їм швидко розгорнути та масштабувати свої ІТ-інфраструктури без необхідності купувати та обслуговувати власне обладнання.
- PaaS (Platform as a Service): Ця модель надає користувачам платформу для розробки, тестування та розгортання додатків, що включає операційну систему, середовище виконання, бази даних та інші інструменти. PaaS[6] дозволяє розробникам зосередитися на створенні додатків, не турбуючись про управління інфраструктурою.
- SaaS (Software as a Service): Ця модель надає користувачам доступ до готових програмних додатків через Інтернет. SaaS-додатки розміщуються на серверах постачальника послуг та доступні користувачам через веб-браузер або мобільний додаток.

Штучний інтелект (ШІ):

- Машинне навчання (ML): Це підгалузь ШІ, що зосереджується на алгоритмах, які дозволяють комп'ютерам навчатися на даних та покращувати свою продуктивність з часом. ML знаходить застосування у різних сферах ІКС, включаючи оптимізацію мереж, виявлення аномалій, прогнозування трафіку та забезпечення безпеки.
- Обробка природної мови (NLP): Ця галузь ШІ займається розробкою алгоритмів та моделей, що дозволяють комп'ютерам розуміти та обробляти людську мову. NLP[7] використовується для створення чат-ботів, голосових помічників, систем машинного перекладу та інших застосунків.

- Комп'ютерний зір (CV): Ця галузь ІІІ займається розробкою алгоритмів та моделей, що дозволяють комп'ютерам аналізувати та розпізнавати зображення та відео. CV використовується для систем безпеки, медичної діагностики, автономних транспортних засобів, розпізнавання облич та інших застосунків.

Програмно-визначені мережі (SDN) та віртуалізація мережевих функцій (NFV):

- SDN: SDN відокремлює рівень управління мережею від рівня передачі даних, що дозволяє централізовано керувати мережею та її ресурсами за допомогою програмного забезпечення. Це спрощує управління мережею, підвищує її гнучкість та адаптивність, а також дозволяє швидко впроваджувати нові сервіси та додатки.
- NFV: NFV дозволяє реалізувати мережеві функції (маршрутизація, брандмауер, балансування навантаження тощо) у вигляді програмного забезпечення, що працює на стандартних серверах, а не на спеціалізованому обладнанні. Це знижує вартість та складність обладнання, а також підвищує гнучкість та масштабованість мережі.

1.1.2 Приклади сучасних ІКС та їх застосування

Сучасні ІКС знаходять застосування у різних сферах життя:

- Мобільні мережі 5G: забезпечують високошвидкісний мобільний Інтернет, підтримують технології Інтернету речей, розумних міст, телемедицини тощо.
- Інтернет речей (IoT): об'єднує різноманітні пристрої (датчики, виконавчі механізми, розумні прилади) для збору та обміну даними, що використовується у розумних будинках, промисловості, сільському господарстві, логістиці тощо.
- Хмарні сервіси: надають доступ до обчислювальних ресурсів, сховищ даних та програмного забезпечення через інтернет, що використовується

для зберігання та обробки даних, хостингу веб-сайтів та додатків, електронної пошти, соціальних мереж тощо.

- Корпоративні мережі: забезпечують зв'язок між співробітниками компанії, доступ до корпоративних ресурсів, спільну роботу над проектами тощо. Використовують різноманітні технології, такі як локальні мережі (LAN), віртуальні приватні мережі (VPN), хмарні сервіси тощо.
- Розумні міста (Smart City): це концепція інтеграції інформаційних та комунікаційних технологій у міську інфраструктуру для підвищення ефективності управління містом, покращення якості життя мешканців та забезпечення сталого розвитку[8]. ІКС відіграють ключову роль у реалізації цієї концепції, забезпечуючи збір та аналіз даних з різноманітних джерел (датчики, камери відеоспостереження, соціальні мережі тощо), а також управління міськими службами (транспорт, енергетика, освітлення тощо).
- Індустрія 4.0: це концепція цифрової трансформації промисловості, що передбачає використання інноваційних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (ШІ), хмарні обчислення та інші, для підвищення ефективності виробництва, оптимізації процесів та створення нових бізнес-моделей. ІКС є основою для реалізації цієї концепції, забезпечуючи зв'язок між промисловими пристроями, збір та аналіз даних, управління виробничими процесами тощо.

1.1.3 Тенденції розвитку ринку ІКС

Ринок ІКС є одним з найбільш динамічних та швидкозростаючих сегментів світової економіки. Зростання ринку зумовлене збільшенням попиту на послуги зв'язку та передачі даних, розвитком нових технологій та появою нових гравців на ринку.

Основні тенденції розвитку ринку ІКС:

- Зростання інвестицій у розвиток ІКС: компанії та уряди вкладають значні кошти у розробку та впровадження нових технологій, таких як 5G, штучний інтелект, Інтернет речей тощо. Це зумовлено розумінням того, що ІКС є ключовим фактором розвитку економіки, підвищення конкурентоспроможності та забезпечення національної безпеки.
- Поява нових гравців на ринку: на ринок ІКС виходять нові компанії, що пропонують інноваційні рішення та послуги. Це сприяє розвитку конкуренції та стимулює впровадження нових технологій. Серед нових гравців можна виділити компанії, що спеціалізуються на розробці програмного забезпечення для управління мережами, хмарних сервісів, рішень для Інтернету речей та інших.
- Консолідація ринку: великі компанії поглинають менших конкурентів, що призводить до концентрації ринку. Це дозволяє великим гравцям збільшувати свою ринкову частку, розширювати спектр послуг та підвищувати ефективність роботи.
- Збільшення конкуренції: на ринку ІКС спостерігається зростання конкуренції, що призводить до зниження цін та підвищення якості послуг. Це вигідно для споживачів, які отримують доступ до більш доступних та якісних послуг зв'язку та передачі даних.
- Фокус на кібербезпеку: зростає увага до питань кібербезпеки, що стимулює розробку та впровадження нових засобів захисту інформації. Це пов'язано з тим, що ІКС стають все більш складними та взаємопов'язаними, що робить їх більш вразливими до кібератак. Компанії та уряди вкладають значні кошти у розробку та впровадження нових рішень для захисту від кіберзагроз.

Сучасні інфокомунікаційні системи (ІКС) характеризуються використанням різноманітних передових технологій, таких як 5G, Wi-Fi 6,

Bluetooth 5, LoRaWAN, NB-IoT, DWDM, OTN, PON, хмарні обчислення, штучний інтелект, SDN та NFV. Ці технології забезпечують високу швидкість, надійність та безпеку передачі даних, а також підтримують широкий спектр застосувань, включаючи мобільний зв'язок, Інтернет речей, розумні міста, телемедицину, промислову автоматизацію та інші.

Розвиток ІКС характеризується постійним зростанням обсягів передачі даних, розширенням спектра послуг, підвищенням вимог до якості обслуговування та збільшенням вразливості до кібератак. Ці тенденції вимагають постійного вдосконалення технологій та рішень, що використовуються в ІКС, а також розробки ефективних систем захисту від перешкод.

Ринок ІКС є одним з найбільш динамічних та швидкозростаючих сегментів світової економіки. Зростання ринку зумовлене збільшенням попиту на послуги зв'язку та передачі даних, розвитком нових технологій та появою нових гравців на ринку. Основні тенденції розвитку ринку ІКС включають зростання інвестицій у розвиток ІКС, появу нових гравців на ринку, консолідацію ринку, збільшення конкуренції та фокус на кібербезпеку.

1.2 Аналіз особливостей функціонування інфокомунікаційних систем в сучасному середовищі

Сучасне середовище функціонування ІКС характеризується такими особливостями:

- **Динамічність:** зміни в технологіях, потребах користувачів, конкурентному середовищі та регуляторних вимогах відбуваються з високою швидкістю, що вимагає від ІКС здатності до швидкої адаптації та гнучкості[9].

- Гетерогенність: ІКС включають різноманітні технології, протоколи, обладнання та програмне забезпечення від різних виробників, що ускладнює їх інтеграцію, управління та забезпечення сумісності.
- Розподіленість: елементи ІКС розташовані на великій території та можуть бути підключені до різних мереж, що ускладнює їх управління, моніторинг та захист.
- Відкритість: ІКС взаємодіють з іншими системами та мережами, що підвищує ризик несанкціонованого доступу та кібератак.
- Складність: ІКС мають складну архітектуру, що включає безліч компонентів та взаємозв'язків, що ускладнює їх управління, моніторинг та захист.

Ці особливості створюють ряд викликів для забезпечення надійного та безпечного функціонування ІКС:

- Забезпечення сумісності та інтероперабельності: різних компонентів ІКС між собою та з іншими системами, що вимагає використання відкритих стандартів та протоколів, а також проведення тестування та сертифікації.
- Управління складними та розподіленими мережами: з урахуванням динамічних змін у навантаженні та умовах середовища, що вимагає використання інтелектуальних систем управління, моніторингу та оптимізації.
- Захист від кібератак: включаючи виявлення, запобігання та реагування на різні види загроз, що вимагає використання комплексних систем захисту, що включають брандмауери, системи виявлення та запобігання вторгненням, антивірусне програмне забезпечення, шифрування даних та інші засоби.
- Забезпечення високої якості обслуговування: для різних типів трафіку та застосувань, що вимагає використання механізмів пріоритезації трафіку, резервування ресурсів, управління перевантаженнями та інших засобів.

- Оптимізація використання ресурсів: таких як спектр частот, енергія, пропускна здатність та обчислювальні потужності, що вимагає використання ефективних алгоритмів та протоколів, а також інтелектуальних систем управління ресурсами.

1.3 Сучасні системи захисту засобів зв'язку від активних перешкод

Активні перешкоди є одним з найсерйозніших видів загроз для засобів зв'язку, оскільки вони можуть бути навмисними (створеними противником) або ненавмисними (виникаючими від інших джерел радіовипромінювання). Активні перешкоди можуть призвести до погіршення якості зв'язку, втрати даних, відмови обладнання та навіть до повного припинення роботи системи зв'язку[10].

Для захисту засобів зв'язку від активних перешкод використовуються різні методи та системи, які можна класифікувати за такими ознаками:

За принципом дії:

- Фільтрація: виділення корисного сигналу з суміші сигналу та перешкоди на основі їх відмінностей у частоті, часі, амплітуді, фазі, поляризації або інших параметрах. Фільтрація може бути реалізована за допомогою аналогових або цифрових фільтрів, а також за допомогою адаптивних фільтрів, які автоматично налаштовують свої параметри в залежності від характеристик перешкоди.
- Адаптація: налаштування параметрів системи зв'язку з урахуванням характеристик перешкоди. Адаптація може включати зміну частоти, потужності, модуляції, кодування або інших параметрів сигналу, а також зміну параметрів приймача, таких як посилення, смуга пропускання, алгоритм демодуляції тощо. * Формування діаграми спрямованості антени: створення нулів у напрямках на джерела перешкод. Це може бути

досягнуто за допомогою антенних решіток, фазованих антенних решіток або адаптивних антенних решіток, які дозволяють динамічно змінювати діаграму спрямованості антени в залежності від розташування джерел перешкод. * Просторово-часове кодування: використання складних сигналів, що дозволяють розрізнити сигнал та перешкоду за їх просторово-часовими характеристиками. Просторово-часове кодування може включати використання множинного доступу з кодовим поділом каналів (CDMA), множинного доступу з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA), множинного входу та множинного виходу (MIMO) та інших технологій.

За типом перешкоди:

- Захист від вузькосмугових перешкод: використовуються фільтри з високою добротністю, режекторні фільтри, адаптивні фільтри[11]. Вузькосмугові перешкоди можуть бути створені, наприклад, іншими радіостанціями, що працюють на сусідніх частотах, або спеціальними генераторами перешкод.
- Захист від широкосмугових перешкод: використовуються просторово-часове кодування, адаптивні антенні решітки, формування діаграми спрямованості антени. Широкосмугові перешкоди можуть бути створені, наприклад, радіовипромінюванням від природних джерел, таких як блискавки, або спеціальними генераторами перешкод, що працюють у широкому діапазоні частот.
- Захист від імпульсних перешкод: використовуються обмежувачі, бланкери, адаптивні пороги. Імпульсні перешкоди можуть бути створені, наприклад, роботою електродвигунів, систем запалювання, радіолокаційних станцій або спеціальними генераторами перешкод.

За рівнем реалізації:

- Апаратні засоби: фільтри, підсилювачі, атенюатори, змішувачі, генератори, антенні решітки та інші. Апаратні засоби забезпечують високу швидкість обробки сигналів та низьку затримку, але можуть бути дорогими та складними у налаштуванні.
- Програмні засоби: алгоритми обробки сигналів, адаптивні алгоритми, алгоритми формування діаграми спрямованості антени та інші. Програмні засоби забезпечують гнучкість та можливість адаптації до різних умов, але можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів та мати більшу затримку.
- Комбіновані засоби: поєднання апаратних та програмних засобів. Комбіновані засоби дозволяють досягти оптимального балансу між швидкістю, гнучкістю та вартістю.
- Сучасні системи захисту засобів зв'язку від активних перешкод використовують різні комбінації вищезгаданих методів та систем, адаптовані до конкретних умов та вимог. Наприклад, для захисту військових систем зв'язку можуть використовуватися складні системи просторово-часового кодування та адаптивні антенні решітки, тоді як для захисту цивільних систем зв'язку можуть бути достатніми простіші методи фільтрації та адаптації.

Висновки

У цьому розділі було проведено аналіз сучасних інфокомунікаційних систем, особливостей їх функціонування в сучасному середовищі та систем захисту засобів зв'язку від активних перешкод. Було встановлено, що сучасні ІКС характеризуються високою складністю, динамічністю та вразливістю до різних видів загроз, включаючи активні перешкоди. Для забезпечення надійного та безпечного функціонування ІКС необхідно використовувати комплексний підхід до захисту, що включає різні методи та системи, адаптовані до конкретних умов та вимог. Наступний розділ буде присвячений детальному аналізу проблеми

захисту засобів зв'язку від активних перешкод у головному пелюстку характеристики спрямованості антени та обґрунтуванню вибору методу захисту на основі використання відмінностей у сферичності електромагнітних хвиль сигналу й перешкоди.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ВІД АКТИВНИХ ПЕРЕШКОД У ГОЛОВНОМУ ПЕЛЮСТКУ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПРЯМОВАНОСТІ АНТЕНИ

2.1 Аналіз необхідності високої завадостійкості інфокомунікаційних систем

Сучасні інфокомунікаційні системи (ІКС) є основою функціонування суспільства, економіки та оборони. Вони забезпечують передачу величезних обсягів даних, включаючи конфіденційну інформацію, управління критично важливими процесами, забезпечення зв'язку в надзвичайних ситуаціях тощо. Висока завадостійкість ІКС є необхідною умовою для забезпечення їх надійності, безпеки та безперервності функціонування[12].

Значення ІКС у різних сферах життя:

- Економіка: ІКС забезпечують зв'язок між підприємствами, банками, фінансовими установами, торговельними мережами та іншими організаціями, що дозволяє здійснювати електронну комерцію, онлайн-платежі, обмін фінансовою інформацією тощо. Відмова або порушення роботи ІКС може призвести до значних фінансових втрат та негативно вплинути на економічну стабільність.
- Державне управління: ІКС використовуються для зв'язку між державними органами, забезпечення роботи електронного уряду, проведення виборів, надання адміністративних послуг населенню тощо. Порушення роботи ІКС може призвести до дестабілізації політичної ситуації та загрози національній безпеці.
- Оборона: ІКС відіграють ключову роль у забезпеченні зв'язку між військовими підрозділами, управління бойовими діями, розвідки, навігації, цілевказівки тощо. Відмова або порушення роботи ІКС може призвести до

втрати контролю над військами, зниження ефективності бойових дій та загрози національній безпеці.

- Соціальна сфера: ІКС забезпечують доступ до інформації, освіти, охорони здоров'я, соціальних послуг тощо. Порушення роботи ІКС може призвести до ізоляції окремих груп населення, обмеження доступу до життєво важливих послуг та негативного впливу на соціальну стабільність.

Радіоелектронні завади (рис. 2.1)[13] можуть мати різний характер та інтенсивність,

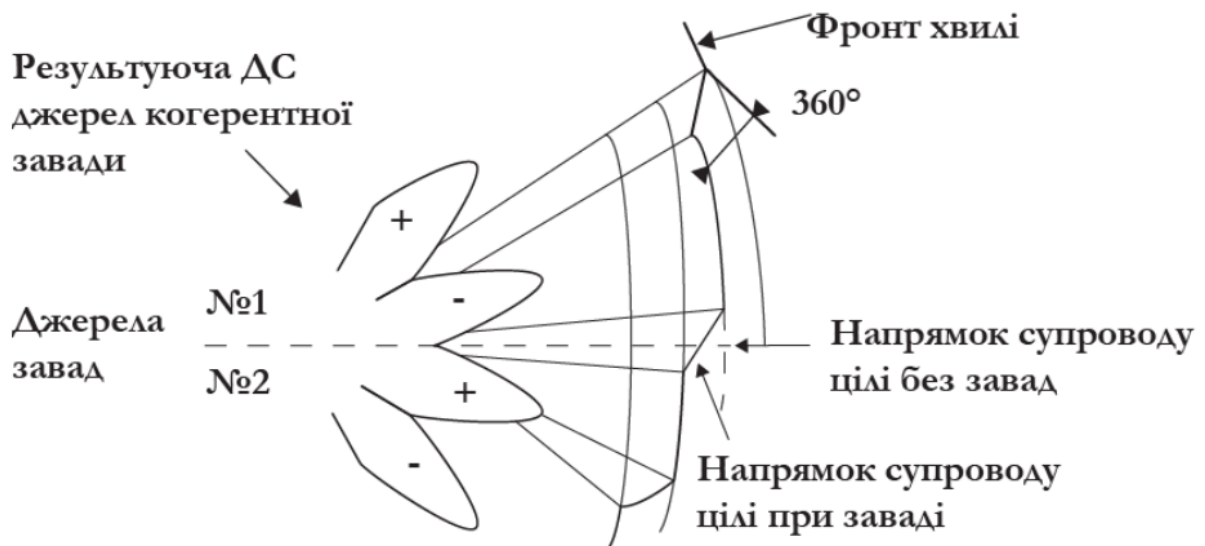


Рис. 2.1 Вплив радіоелектронної завади на сигнал

але в будь-якому випадку вони негативно впливають на роботу ІКС:

- Погіршення якості зв'язку: РЕЗ можуть призвести до зниження швидкості передачі даних, збільшення кількості помилок, спотворення сигналу(рис. 2.2)[14], втрати пакетів даних тощо. Це може зробити зв'язок нестабільним, ненадійним або взагалі неможливим.

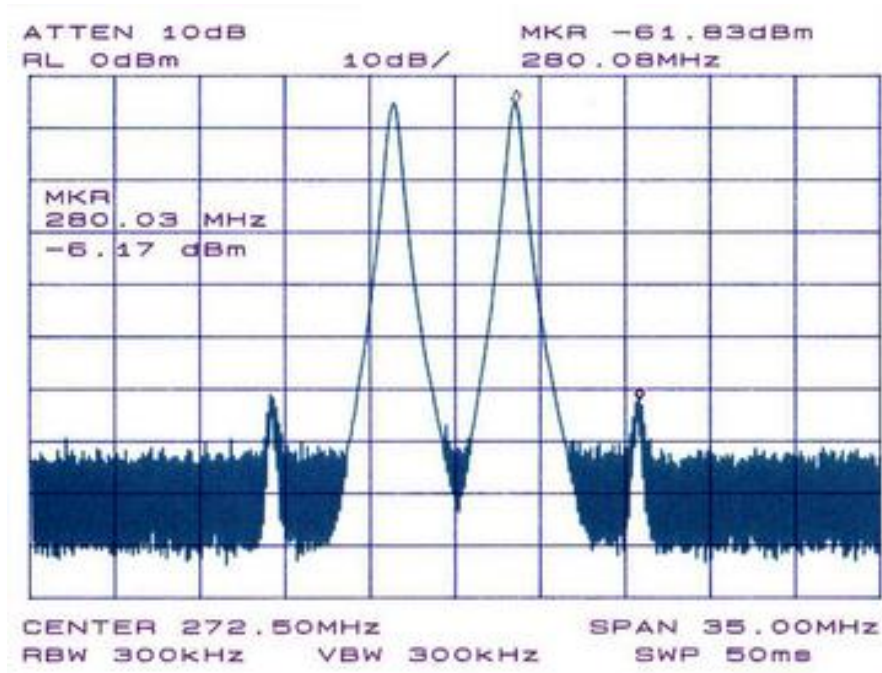


Рис. 2.2 спотворення сигналу

- **Порушення цілісності та конфіденційності інформації:** РЕЗ можуть призвести до спотворення, втрати або перехоплення переданих даних, що може мати серйозні наслідки для бізнесу, державних установ та окремих осіб. Наприклад, перехоплення банківських реквізитів може призвести до фінансових втрат, а витік конфіденційної інформації може завдати шкоди репутації компанії або держави.
- **Збій у роботі критично важливих систем:** РЕЗ можуть призвести до збоїв у роботі систем управління технологічними процесами, транспортних систем, енергетичних систем, систем охорони здоров'я та інших критично важливих систем. Це може становити загрозу для життя та здоров'я людей, а також для економічної та національної безпеки[15]. Наприклад, збій у роботі системи управління повітряним рухом може призвести до авіакатастрофи, а збій у роботі енергетичної системи може призвести до масових відключень електроенергії.

- Економічні збитки: РЕЗ можуть призвести до значних економічних збитків через втрату даних, простої виробництва, порушення роботи бізнес-процесів, втрату клієнтів та інші фактори. Наприклад, збій у роботі біржової торгової системи може призвести до мільйонних втрат, а порушення роботи банківської системи може призвести до паніки серед населення та відтоку капіталу.

2.2 Аналіз можливих радіоелектронних завад

Радіоелектронні завади (РЕЗ) – це будь-які електромагнітні випромінювання або явища, які погіршують якість прийому радіосигналів, спотворюють інформацію, що передається, або повністю переривають радіозв'язок. Вони можуть бути природного або штучного походження, навмисними або ненавмисними.

2.2.1 Класифікація радіоелектронних завад

РЕЗ можна класифікувати за різними ознаками:

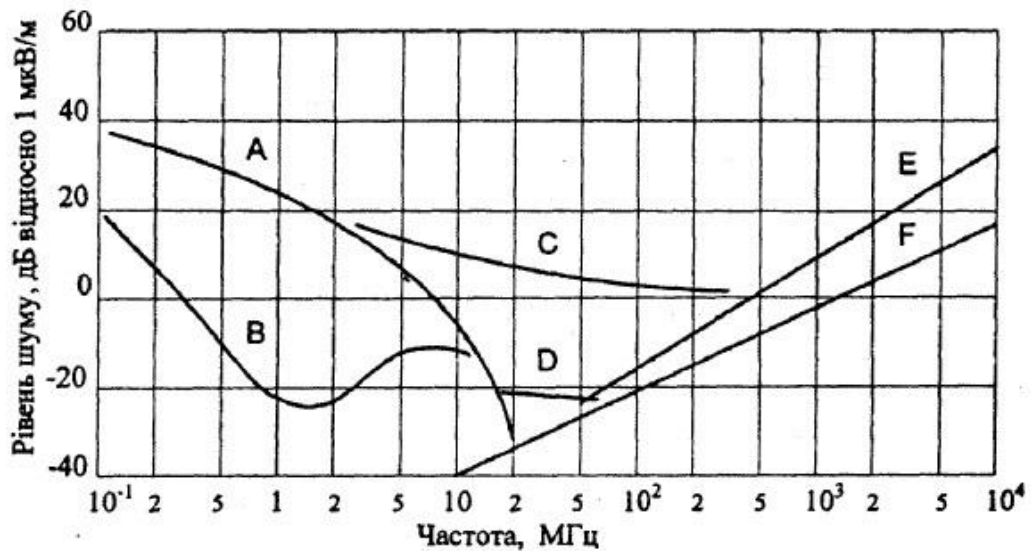
1. За походженням:

Природні завади:

- Атмосферні завади(рис. 2.3)[16]: виникають внаслідок електричних розрядів в атмосфері (блискавки), а також через тепловий шум атмосфери рис 10. Блискавки є потужними імпульсними джерелами завад, які можуть впливати на широкий діапазон частот. Тепловий шум атмосфери має неперервний спектр і може бути особливо помітним на високих частотах.
- Космічні завади:виникають внаслідок випромінювання Сонця, зірок та інших космічних об'єктів. Сонячні спалахи можуть викликати сильні перешкоди для радіозв'язку, особливо на коротких хвилях.

Космічне фонове випромінювання має неперервний спектр і може бути помітним на низьких частотах.

- Інші природні завади: до цієї категорії належать завади, викликані землетрусами, вулканічною активністю, метеорологічними явищами (дощ, сніг, град) тощо.



Типовий усереднений рівень шуму в смузі частот 6 кГц:
 А - стаціонарний атмосферний шум вночі; В - полуденний стаціонарний атмосферний шум; С - шуми від систем запалювання двигунів внутрішнього згорання у великому місті; D - космічний шум; Е - шум типового радіоприймача; F- тепловий шум

Рис. 2.3 атмосферні завади

Штучні завади:

- Промислові завади: виникають внаслідок роботи промислового обладнання, такого як електродвигуни, зварювальні апарати, високовольтні лінії електропередач тощо. Ці завади можуть бути як вузькосмуговими, так і широкосмуговими, і часто мають імпульсний характер.
- Завади від радіоелектронної апаратури: створюються іншими радіостанціями, телевізійними передавачами, мобільними телефонами, радарми, системами супутникового зв'язку тощо. Ці завади можуть бути як навмисними, так і ненавмисними.

- Навмисні завади (перешкоди): створюються спеціально для порушення роботи засобів зв'язку. Вони можуть бути як активними (випромінювання потужних сигналів на частотах, що використовуються засобами зв'язку), так і пасивними (створення перешкод для поширення радіохвиль).

2. За характером дії:

Активні завади:

- Загороджувальні завади: створюються шляхом випромінювання потужних сигналів на частоті корисного сигналу, перешкоджаючи його прийняттю. Ці завади можуть бути спрямованими або неспрямованими, мати різну потужність, модуляцію та форму сигналу[17].
- Імітаційні завади: створюють хибні сигнали, що імітують корисний сигнал, з метою введення в оману приймача. Ці завади можуть бути особливо небезпечними для систем, що використовують складні методи модуляції та кодування.
- Придушувальні завади: випромінюють короткочасні імпульси великої потужності, що призводять до тимчасового блокування роботи приймача. Ці завади можуть бути ефективними проти систем з низькою завадостійкістю.

Пасивні завади:

- Відбиття: відбиття радіохвиль від різних об'єктів (будівель, літаків, земної поверхні тощо), що призводить до появи багатопроменевого поширення та інтерференції сигналів[18]. Інтерференція може призвести до спотворення або зникнення корисного сигналу.
- Розсіювання: розсіювання радіохвиль на неоднорідностях середовища (хмарах, дощі, снігу тощо), що призводить до зменшення потужності сигналу та збільшення рівня шуму. Це може погіршити якість зв'язку або зробити його неможливим.

- Поглинання: поглинання радіохвиль різними матеріалами (водою, ґрунтом, рослинністю тощо), що призводить до зменшення потужності сигналу. Поглинання залежить від частоти сигналу та властивостей матеріалу.

3. За шириною спектра:

- Вузькосмугові завади: зосереджені в обмеженому діапазоні частот. Вони можуть бути створені, наприклад, іншими радіостанціями, що працюють на сусідніх частотах, або спеціальними генераторами перешкод[19].
- Широкосмугові завади: займають широкий діапазон частот. Вони можуть бути створені, наприклад, радіовипромінюванням від природних джерел (атмосферні розряди, сонячна активність) або спеціальними генераторами перешкод.

4. За часовими характеристиками:

- Постійні завади: діють протягом тривалого часу. Вони можуть бути створені, наприклад, радіостанціями, що працюють у безперервному режимі.
- Імпульсні завади: діють протягом коротких інтервалів часу. Вони можуть бути створені, наприклад, радіолокаційними станціями[20] або спеціальними генераторами перешкод.
- Хаотичні завади: мають випадковий характер. Вони можуть бути створені, наприклад, атмосферними розрядами або промисловими установками.

5. За потужністю:

- Слабкі завади: не призводять до значного погіршення якості зв'язку. Вони можуть бути придушені за допомогою простих методів захисту, таких як фільтрація.
- Середні завади: призводять до помітного погіршення якості зв'язку. Вони можуть вимагати застосування більш складних методів захисту, таких як адаптація або просторово-часове кодування.

- Сильні завади: призводять до значного погіршення якості зв'язку або повного припинення роботи засобів зв'язку. Вони можуть вимагати застосування комбінованих методів захисту, таких як формування діаграми спрямованості антени та просторово-часове кодування.

2.2.2 Особливості радіоелектронних завад у головному пелюстку характеристики спрямованості антени

У головному пелюстку характеристики спрямованості антени (ХСА) зазвичай концентрується основна енергія корисного сигналу(рис. 2.4)[21]. Тому РЕЗ, що потрапляють у головний пелюсток, можуть мати найбільший негативний вплив на якість зв'язку.

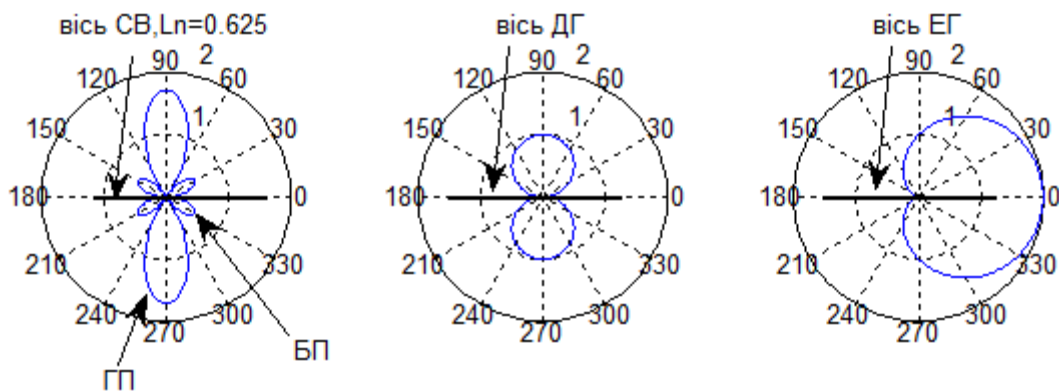


Рис. 2.4 Діаграма спрямованості антени

Особливо небезпечними є активні навмисні завади (АНЗ), які спрямовуються противником безпосередньо в головний пелюсток ХСА[22]. АНЗ можуть бути вузькосмуговими або широкосмуговими, постійними або імпульсними, мати різну потужність та модуляцію.

Придушення АНЗ у головному пелюстку ХСА є складним завданням, оскільки:

- АНЗ можуть мати високу потужність, що перевищує потужність корисного сигналу.
- АНЗ можуть мати складну структуру, що ускладнює їх фільтрацію.

- АНЗ можуть бути адаптивними, тобто змінювати свої параметри в залежності від характеристик корисного сигналу.

Для ефективного придушення АНЗ у головному пелюстку ХСА необхідно використовувати спеціальні методи та алгоритми, які враховують особливості АНЗ та умови їх застосування.

Аналіз методів захисту на основі кутових відмінностей

- Адаптивні антенні решітки (ААР):

ААР складаються з декількох антенних елементів, кожен з яких приймає сигнал з певною амплітудою та фазою. За допомогою спеціального алгоритму обробки сигналу ці параметри налаштовуються таким чином, щоб сформувати діаграму спрямованості антени з максимумом у напрямку на корисний сигнал та мінімумом (або навіть нулем) у напрямку на перешкоду. Це дозволяє ефективно придушити перешкоду, зберігаючи при цьому високу якість прийому корисного сигналу.

ААР можуть бути одно або багатоканальними. Одноканальні ААР використовуються для прийому одного сигналу, тоді як багатоканальні ААР можуть одночасно приймати кілька сигналів з різних напрямків. Це дозволяє реалізувати просторовий мультиплексинг, тобто одночасну передачу кількох потоків даних в одному частотному каналі, що значно підвищує пропускну здатність системи зв'язку.

- Методи просторової фільтрації:

Методи просторової фільтрації засновані на обробці сигналів, прийнятих кількома антенними елементами, з метою виділення корисного сигналу та придушення перешкод. Для цього використовуються різні алгоритми, такі як:

- Алгоритми формування променів (beamforming): ці алгоритми дозволяють формувати вузький промінь в діаграмі спрямованості антени, спрямований на корисний сигнал. При цьому перешкоди, що приходять з інших напрямків, придушуються.

- Алгоритми MUSIC (Multiple Signal Classification): ці алгоритми дозволяють розділити корисний сигнал та перешкоду на основі їх просторових характеристик. Для цього використовуються методи власних значень та власних векторів кореляційної матриці прийнятих сигналів.
- Алгоритми ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques): ці алгоритми дозволяють оцінити параметри сигналів (напрямок приходу, частоту, амплітуду тощо) на основі їх просторової та часової кореляції.
- Методи поляризаційної фільтрації:

Методи поляризаційної фільтрації засновані на використанні різниці поляризацій корисного сигналу та перешкоди. Поляризація - це напрямок коливань електричного поля електромагнітної хвилі. Якщо поляризації корисного сигналу та перешкоди ортогональні (перпендикулярні одна до одної), то їх можна розділити за допомогою поляризаційного фільтра.

Поляризаційні фільтри можуть бути реалізовані у вигляді спеціальних антен, які приймають сигнал тільки з певною поляризацією, або у вигляді спеціальних пристроїв, що підключаються до приймача.

Методи захисту на основі кутових відмінностей широко використовуються в сучасних системах зв'язку, таких як:

- Супутниковий зв'язок: для захисту від перешкод, створюваних земними джерелами.
- Мобільний зв'язок: для підвищення якості зв'язку в умовах багатопроменевого поширення та інтерференції сигналів.
- Радіолокація: для виділення корисних цілей на тлі перешкод.
- Радіоастрономія: для дослідження слабких космічних сигналів на тлі шуму.

Вибір конкретного методу захисту від АНЗ залежить від багатьох факторів, таких як:

- Тип і характеристики перешкоди: потужність, ширина спектра, часові характеристики, напрямок приходу тощо.
- Вимоги до якості зв'язку: допустимий рівень спотворення сигналу, ймовірність помилки, швидкість передачі даних тощо.
- Технічні можливості системи зв'язку: кількість антенних елементів, обчислювальні ресурси, вартість обладнання тощо.

У деяких випадках може бути достатньо використовувати прості методи фільтрації або адаптації, тоді як в інших випадках може знадобитися застосування складніших методів, таких як ААР або просторова фільтрація.

Аналіз можливих радіоелектронних завад та методів їх придушення є важливим етапом у розробці завадостійких систем зв'язку.

У цьому розділі було розглянуто різні види РЕЗ, їх класифікацію, особливості та методи придушення. Особливу увагу було приділено аналізу активних навмисних завад, які є найбільш небезпечними для систем зв'язку. Було розглянуто сучасні методи захисту від АНЗ на основі кутових відмінностей між сигналом та перешкодою, такі як адаптивні антенні решітки, методи просторової та поляризаційної фільтрації.

Було показано, що ці методи дозволяють ефективно придушувати АНЗ у головному пелюстку характеристики спрямованості антени, але вимагають застосування складних алгоритмів та обладнання. Перспективними напрямками розвитку є розробка нових алгоритмів адаптації та просторової фільтрації, використання методів машинного навчання та інтеграція з іншими методами захисту.

2.3 Аналіз сучасних методів захисту від активних навмисних завад у головному пелюстку

На даний момент єдиним способом захисту від радіоперешкод в головній пелюстці діаграми спрямованості антени (ДС), згідно з літературними джерелами, є використання адаптивних антенних систем (ААС).

Адаптивні антенні системи класифікуються на кілька типів(рис. 2.5):

- Повністю адаптивні антенні решітки (АР): Ці системи здатні змінювати свою діаграму спрямованості для найкращого прийому корисного сигналу та придушення перешкод. Вони використовують різні алгоритми обробки сигналів, такі як алгоритми з ортогоналізацією коваріаційної матриці сигналів, з ортогоналізацією матриці спектральної густини сигналів та з обмеженнями на ДС.
- Компенсаційні адаптивні АР: Ці системи формують у допоміжному каналі ДС з нульовими значеннями у напрямку приходу корисного сигналу. Це дозволяє після зважування сигналів з виходу допоміжного каналу і підсумовування їх з сигналами від основного каналу отримати постійне значення результуючої ДС у напрямку приходу корисного сигналу і мінімальне значення ДС у напрямку приходу перешкоди.
- Адаптивні АР зі зміною відстані між елементами: Ці системи змінюють відстань між елементами антенної решітки для створення інтерференційних мінімумів у напрямку джерел перешкод.
- Багатопроменеві адаптивні гібридні антени: Ці системи використовують кілька променів для формування діаграми спрямованості, що дозволяє покращити роздільну здатність та ефективність придушення перешкод.

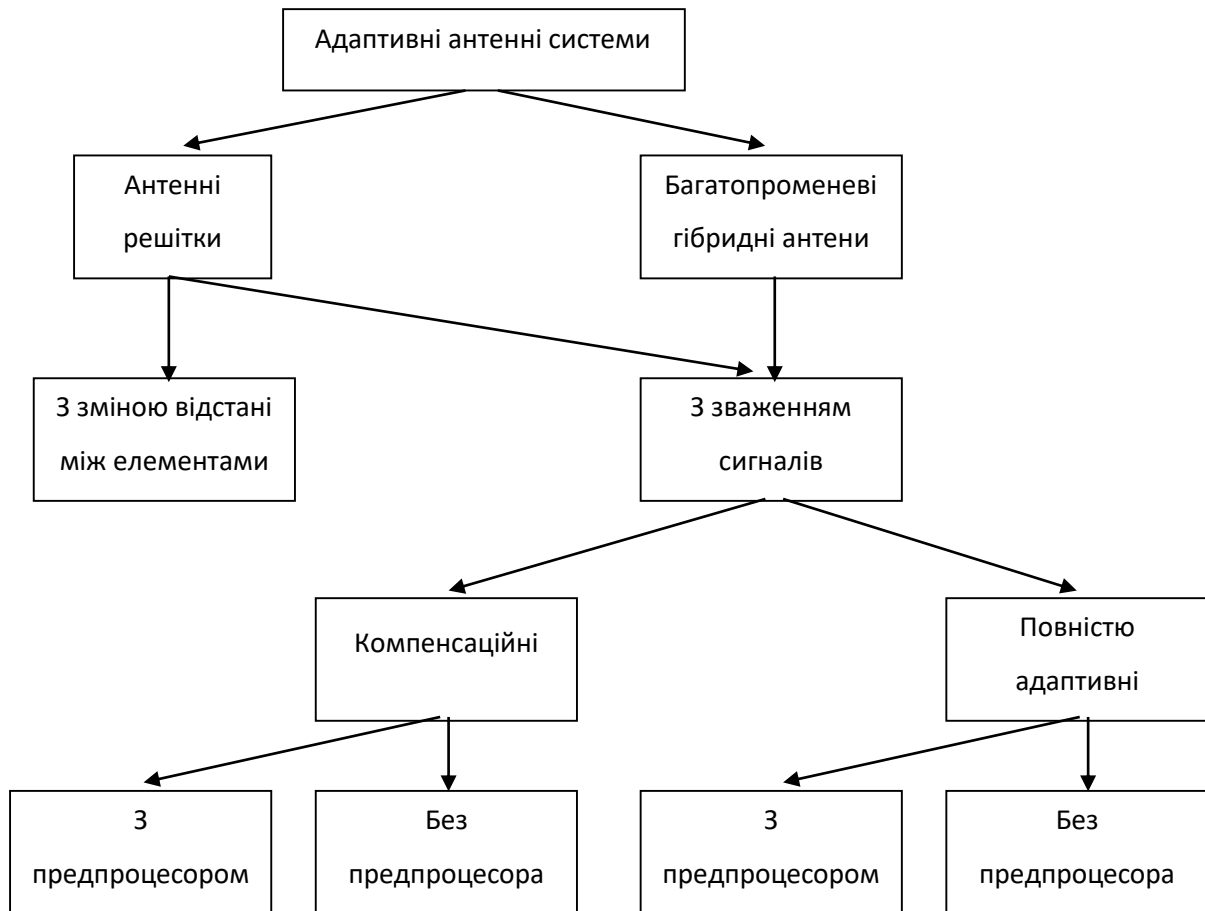


Рис. 2.5 Класифікація ААС

Повністю адаптивні антенні решітки відрізняються способами збереження форми діаграми спрямованості (ДС) у напрямку приходу корисних сигналів під час адаптації. Основні алгоритми обробки сигналів, що використовуються в процесорі АР, включають:

- Алгоритми з ортогоналізацією коваріаційної матриці (КМ) сигналів: Ці алгоритми підвищують роздільну здатність ААР, але вимагають складного математичного апарату, що ускладнює їх реалізацію в реальному часі для багатоелементних АР.
- Алгоритми з ортогоналізацією матриці спектральної густини сигналів: Ці алгоритми подібні до попередніх, але використовують перетворення Фур'є

коваріаційної матриці сигналів. Вони також вимагають значних обчислювальних ресурсів.

- Алгоритми з обмеженнями на ДС: Ці алгоритми зберігають значення ДС у напрямку приходу корисного сигналу, але можуть спотворювати головну пелюсток ДС.

Компенсаційні адаптивні АР формують у допоміжному каналі ДС з нульовими значеннями у напрямку приходу корисного сигналу. Це дозволяє зберегти постійне значення результуючої ДС у напрямку приходу корисного сигналу та мінімізувати значення ДС у напрямку приходу перешкоди. Для формування ДС у допоміжному каналі використовуються алгоритми адаптації з обмеженнями на вагові коефіцієнти (ВК).

Одним з таких алгоритмів є алгоритм з обмеженнями Фроста, який мінімізує потужність вихідного різницевого сигналу при умові, що сума ВК стовпця дорівнює нулю. Це забезпечує мінімум ДС у напрямку корисного сигналу.

В адаптивній АР зі зміною відстані між елементами подавлення перешкод здійснюється створенням інтерференційних мінімумів у напрямку джерел перешкод шляхом зміни відстані між елементами решітки. Зміна відстані може здійснюватися електричним або механічним шляхом. Електричний спосіб має перевагу у швидкості адаптації, але вимагає більшої кількості елементів.

Багатопробеневі адаптивні гібридні антени використовують кілька променів для формування діаграми спрямованості, що дозволяє покращити роздільну здатність та ефективність придушення перешкод. Існують різні варіанти таких антен, включаючи дзеркальні антени та лінзові антени.

Одним з прикладів є 4-пробенева ААС з лінзою Ротмена, яка дозволяє подавляти одиночні сигнали перешкод до 30 дБ. При попаданні до області головної пелюстки перешкод з двох напрямів, що розрізняються за кутом приходу на 1,26 ширини ДС за потужністю, відношення сигнал/шум поліпшується на 15 дБ.

Ефективність ААС залежить від багатьох факторів, включаючи розташування опорних і допоміжних елементів антенної системи, точність встановлення напрямку мінімумів ДС, конструктивні характеристики антени, алгоритми адаптації та інші.

Наприклад, розташування опорного елемента АР на краю розкриття апертури призводить до формування в сумарній ДС зони подавлення еліптичної форми. При надходженні перешкоди з напрямку, перпендикулярного площині АР, зона подавлення якнайменша. Глибина подавлення перешкод при цьому складає 30 дБ і більше.

Також важливим фактором є точність налаштування вагових коефіцієнтів (ВК). Для підвищення точності налаштування ВК пропонується використовувати двохетапну оптимізацію адаптації з використанням додаткової антени-локатора та системи кореляторів.

Вибір та реалізація конкретної ААС залежить від багатьох факторів, включаючи обстановку, алгоритми адаптації, конструктивні можливості та необхідну якість адаптації. Розглянемо докладніше особливості характеристик ААС.

Основна і допоміжні діаграми спрямованості (ДС) часто формуються різними елементами антенної решітки (АР), які називаються відповідно основними і допоміжними. Сумарна ДС являє собою суперпозицію цих двох ДС. Форма сумарної ДС і кількість перешкод, що придушуються, обмежуються шириною допоміжного променя та різницею ходу сигналів між фазовими центрами основної і допоміжної ДС. Для досягнення високої роздільної здатності та ефективного придушення перешкод у головному пелюстку ДС, ААС повинна формувати максимально вузьку допоміжну ДС і максимізувати адаптовану ДС поза напрямом приходу перешкоди.

Ступінь придушення перешкод залежить від точності встановлення напрямку мінімумів ДС, яка визначається як помилками виготовлення антени,

розкидом параметрів пристроїв обробки сигналів, так і дисперсійними характеристиками значень вагових коефіцієнтів (ВК).

На якість адаптації алгоритмів максимуму відношення сигнал/(шум+перешкода) (ВСШП) істотно впливає розкид параметрів антенно-фідерного тракту та затримка сигналів у різних плечах контурів зворотного зв'язку. Розкид параметрів антенно-фідерного тракту призводить до спотворення формованої ДС у напрямку приходу корисного сигналу, як наслідок до зменшення потужності корисного сигналу. Різні затримки сигналів в різних плечах контурів зворотного зв'язку також погіршують подавлення перешкод, особливо широкосмугових. Збільшення ширини смуги частот перешкоди призводить до збільшення часу адаптації та зменшення ВСШП. Так, якщо різниця зсувів фаз сигналів на межах частотного спектру через час T_0 не перевищує 90° , тобто $\Delta\omega T_0 \leq 90^\circ$, де T_0 – різниця затримок сигналів в різних плечах контура зворотного зв'язку, то час адаптації збільшується не більше ніж в 2 рази. При цьому для спектру перешкоди з відносною шириною спектру 10% зменшення ВСШП складає 6 дБ.

Якість же адаптації алгоритмів, що реалізують критерій мінімуму СКП, не залежить від розкиду параметрів антенно-фідерного тракту (електричних довжин шляхів), але залежить від прецизійності елементів контурів зворотного зв'язку, наприклад від якості роботи перемножувачів. Поява на виході перемножувача постійної складової або частотної гармоніки призводить до зменшення ВСШП.

З метою зменшення числа конструктивних елементів схеми адаптації та збільшення точності встановлення мінімумів ДС в межах головної пелюстки вирішується задача оптимізації адаптації в два етапи. На першому етапі за допомогою додаткової антени-локатора та системи кореляторів визначається коваріаційна матриця (КМ) сигналів, що надходять, а на другому - за допомогою спеціалізованого процесора визначаються вагові коефіцієнти (ВК), що

оптимізують ДС в межах головної пелюстки. В даній схемі адаптації конструктивні помилки в антені, що призводять до зменшення глибини формованого мінімуму ДС в напрямку приходу перешкод, можуть бути зкомпенсовані в додатковій решітці-локаторі. Оскільки ця решітка може мати відносно малі геометричні розміри і менше, ніж основна антена число елементів, то КМ сигналів, що приходять на антену може бути визначена малим числом додаткових елементів, наприклад, тільки системою кореляторів. При цьому конструктивні помилки елементів будуть менше впливати на якість адаптації, ніж в класичних системах адаптації з контуром зворотного зв'язку, особливо при великому числі каналів адаптації. Через істотні помилки при виготовленні антени для більш точного налаштування ВК пропонується ввести додаткове підстроювання за вихідним сигналом антени. В цьому випадку при дисперсії значень ВК 0,1 дБ формуються мінімуми ДС в напрямках приходу перешкоди глибиною -40 дБ і більше у відношенні до початкового значення ДС в цих же напрямках.

З приведеного аналізу особливостей ААС з подавленням перешкод по головній пелюстці витікає, що задача вибору і реалізації ААС визначається багатьма чинниками і істотно залежить від обстановки і алгоритмів адаптації, конструктивних можливостей і апаратурної реалізації, а також необхідної якості адаптації, що використовуються.

Висновки

У цьому розділі було проведено комплексний аналіз необхідності високої завадостійкості інфокомунікаційних систем, розглянуто різноманітні види радіоелектронних завад, а також проаналізовано сучасні методи захисту від активних навмисних завад у головному пелюстку характеристики спрямованості антени.

Було встановлено, що використання кутових відмінностей між сигналом та перешкодою є ефективним методом захисту, проте його застосовність обмежена

випадками, коли напрямки приходу сигналу та перешкоди збігаються. У таких ситуаціях, особливо актуальними стають методи селекції за кривизною фазового фронту, що безпосередньо пов'язана з дальністю до джерела сигналу. Це відкриває перспективи для використання зон Френеля та властивостей ближнього поля для розробки нових підходів до захисту від завад. Перспективними напрямками розвитку є розробка нових алгоритмів адаптації та просторової фільтрації з урахуванням інформації про кривизну фазового фронту.

Дослідження проблеми захисту засобів зв'язку від активних перешкод, особливо з урахуванням можливостей селекції за кривизною фазового фронту, є надзвичайно актуальним та перспективним напрямом наукових досліджень. Розробка нових методів та алгоритмів захисту, що враховують як кутові, так і дальнісні характеристики сигналів та завад, дозволить значно підвищити надійність та ефективність роботи інфокомунікаційних систем у складних умовах дії перешкод.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СПОСОБУ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДМІННОСТЕЙ У ФАЗОВИХ ФРОНТАХ ЕМХ СИГНАЛУ ТА ЗАВАДИ

3.1 Теоретичне обґрунтування методу дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами ЕМХ

Метод дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами ЕМХ базується на фундаментальних властивостях поширення електромагнітних хвиль. Для розуміння цього методу необхідно проаналізувати, як форма фазового фронту ЕМХ залежить від відстані до джерела випромінювання, частоти сигналу та характеристик середовища поширення. Це дозволить виявити відмінності у фазових фронтах корисного сигналу та перешкоди, які можуть бути використані для їх розділення.

3.1.1 Аналіз фазових фронтів ЕМХ сигналу та перешкоди

Фазовий фронт електромагнітної хвилі (ЕМХ) є геометричним місцем точок, що мають однакову фазу коливань електричного та магнітного полів. Форма фазового фронту визначається типом джерела випромінювання, його розташуванням відносно приймача, а також умовами поширення хвилі в середовищі.

У вільному просторі точкове джерело випромінює ЕМХ, фазовий фронт якої має форму сфери. Це означає, що всі точки на поверхні сфери, що знаходяться на однаковій відстані від джерела, мають однакову фазу коливань. Проте, зі збільшенням відстані від джерела, кривизна фазового фронту зменшується, і на достатньо великих відстанях його можна апроксимувати площиною. Цей перехід від сферичної до плоскої хвилі відбувається в так званій

зоні Френеля (рис. 3.1), яка знаходиться між ближньою зоною (де фронт хвилі є сферичним) та дальньою зоною (де фронт хвилі є плоским).

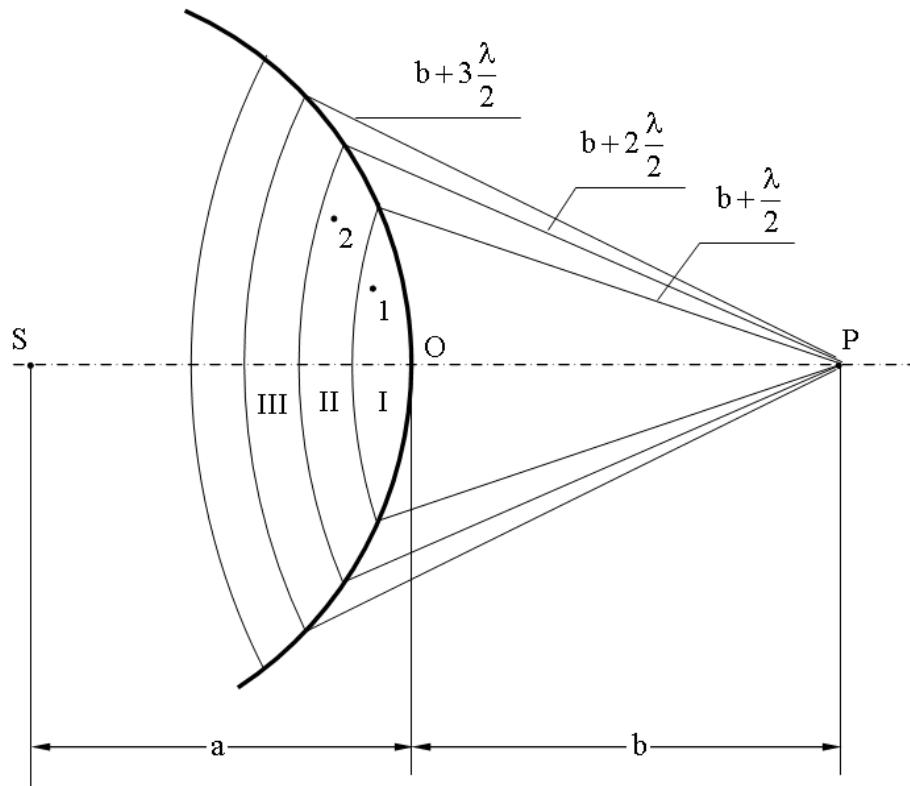


Рис. 3.1 Зони Френеля

У телекомунікаційних системах джерело корисного сигналу, як правило, знаходиться на значній відстані від приймача. Тому фазовий фронт сигналу, що досягає приймальної антени, можна вважати практично плоским. З іншого боку, активні перешкоди, створювані ближніми джерелами, такими як генератори перешкод або інші радіоелектронні пристрої, матимуть більш виражену сферичність фазового фронту.

Ця принципова відмінність у формі фазових фронтів сигналу та перешкоди є основою для розробки методів їх дискримінації. Адже, якщо на приймальній антенні розмістити кілька елементів, рознесених у просторі, то різниця фаз між сигналами, прийнятими цими елементами, буде залежати від форми фазового фронту. Для плоскої хвилі (сигнал) ця різниця фаз буде меншою, ніж для сферичної хвилі (перешкода)

3.1.3 Аналіз впливу різних факторів на фазові фронти ЕМХ

На форму фазових фронтів ЕМХ впливають такі фактори:

Відстань до джерела:

- Близня зона (зона Френеля): У цій зоні, що знаходиться безпосередньо біля джерела випромінювання, фазовий фронт має виражену сферичну форму. Це означає, що хвилі поширюються від джерела радіально у всіх напрямках, подібно до того, як розходяться кола на воді від кинутого каменю. Кожна точка на фазовому фронті в ближній зоні знаходиться на однаковій відстані від джерела випромінювання. Це призводить до того, що форма фронту нагадує поверхню сфери.
- Дальня зона (зона Фраунгофера): Зі збільшенням відстані від джерела, фазовий фронт поступово втрачає свою сферичну форму і починає наближатися до площини. У дальній зоні, радіуси кривизни фазового фронту стають значно більшими за довжину хвилі випромінювання. Це означає, що відмінності у відстані від різних точок фронту до джерела стають незначними порівняно з довжиною хвилі. У результаті, фазовий фронт у дальній зоні можна з гарною точністю апроксимувати площиною.

Частота сигналу:

- Висока частота: Електромагнітні хвилі з високою частотою мають коротшу довжину хвилі. Для таких хвиль, перехід від сферичного фазового фронту в ближній зоні до плоского фронту в дальній зоні відбувається швидше, тобто на менших відстанях від джерела. Це пов'язано з тим, що для коротких хвиль відмінності у відстані від різних точок фронту до джерела стають менш значущими порівняно з довжиною хвилі навіть на відносно невеликих відстанях.
- Низька частота: Електромагнітні хвилі з низькою частотою мають більшу довжину хвилі. Для таких хвиль, перехід до плоского фазового фронту відбувається на більших відстанях від джерела. Навіть на значних

відстанях від джерела, відмінності у відстані від різних точок фронту до джерела залишаються значними порівняно з довжиною хвилі, що зберігає сферичну форму фронту.

Середовище поширення:

- Однорідне середовище (вакуум): У вільному просторі, де немає перешкод і неоднорідностей, фазовий фронт поширюється без спотворень. Форма фронту залишається сферичною в ближній зоні і плоскою в дальній зоні, як описано вище.
- Неоднорідне середовище (атмосфера, іоносфера): В атмосфері та іоносфері показник заломлення може змінюватися в залежності від висоти, температури, тиску та інших факторів. Ці зміни призводять до викривлення фазового фронту, явища відомого як рефракція. В результаті рефракції, форма фронту може стати складною і відрізнитися від ідеальної сферичної або плоскої форми.

Поляризація:

- Лінійна поляризація: У лінійно поляризованої хвилі, вектор напруженості електричного поля коливається в одній площині. Фазовий фронт такої хвилі залишається плоским або сферичним, залежно від відстані до джерела.
- Циркулярна або еліптична поляризація: У циркулярно або еліптично поляризованої хвилі, вектор напруженості електричного поля обертається навколо напрямку поширення хвилі. Це призводить до того, що фазовий фронт набуває форми спіралі.

Вплив цих факторів необхідно враховувати при розробці алгоритмів дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами. Наприклад, для сигналів високої частоти або для джерел, розташованих на великих відстанях, відмінності у фазових фронтах можуть бути незначними, що ускладнює їх

розрізнення. У таких випадках може знадобитися використання більш складних алгоритмів або збільшення кількості елементів антенної решітки.

3.2 Математичне обґрунтування методу дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами ЕМХ

Адаптивні антенні системи (ААС) дозволяють ефективно виділяти корисний сигнал на фоні перешкод, проте тільки в тих випадках, коли азимут перешкоди і корисного сигналу не співпадають. При цьому як ознака, за якою розрізняються корисні сигнали і перешкоди, можуть виступати найрізноманітніші параметри, такі як: номінал частоти, рівень, тривалість випромінювання, напрям, поляризація, частотно-часова структура.

Новий метод виділення корисного сигналу на фоні перешкоди лише за допомогою інформації про кривизну фронту ЕМХ дозволяє подавляти перешкоду навіть тоді, коли перешкода і корисний сигнал мають однаковий напрям приходу.

Провівши аналіз даного методу на основі статті [23] можна зробити висновок про те, що при прийомі сигналу на 3-х елементну еквідистантну прямолінійну антенну решітку (ЕПЛАР) з напрямом перпендикулярного до лінії розташування антенних елементів (АЕ) дійсно можливо визначати місцезнаходження джерела сигналу або подавлювати сигнал перешкоди, який знаходиться на одному напрямку разом з корисним сигналом, при цьому відносне подавлення перешкоди буде тим більшим, чим далі джерело корисного сигналу віддалене від джерела перешкоди. Відстань до джерела сигналу визначається кривизною фронту ЕМХ, що виражається в різниці фаз прийнятого сигналу на крайніх та центральному АЕ, при цьому ідеальним варіантом є випадок, коли $\Delta\varphi_{\text{сигналу}} = 0^\circ$ $\Delta\varphi_{\text{перешкоди}} = 180^\circ$ або навпаки.

Аналіз даної статті [23] показав, що даний метод дослідження на основі побудови коваріаційних матриць є надто громіздким для такої простої антенної системи, при цьому не врахувалось те, що сигнал може приходити не тільки по нормалі до лінії розташування АЕ, і взагалі спроектувати працюючу схему, використавши дане дослідження, виявилось достатньо складною задачею.

Врахувавши недоліки опишемо основні геометричні співвідношення та створимо математичний апарат, який зможе легко описати основні можливості даного методу, на основі якого можливо промодельовати різноманітні ситуації та створити реальну систему дискримінації на основі використання кривизни фронту ЕМХ.

В даному пункті введемо математичний апарат для описання функціонування системи, що визначає відстань до джерела сигналу та азимут передавача на основі фазових розбіжностей сигналу, який надходить до різних антен.

Розглянемо 3х елементну ЕПЛАР відносно джерела випромінювання з координатами (R, θ) . Визначимо залежності $\Delta_{12}(R, \theta, d)$, $\Delta_{23}(R, \theta, d)$, $R(\Delta_{12}, \Delta_{23}, d)$, $\theta(\Delta_{12}, \Delta_{23}, d)$, $d(\Delta_{12}, \Delta_{23}, R, \theta)$, використовуючи рис. 3.2

$$\rightarrow \begin{cases} (R - \Delta_{12})^2 = d^2 + R^2 - 2dR \sin \theta \\ (R + \Delta_{23})^2 = d^2 + R^2 + 2dR \sin \theta \end{cases} \quad (3.1)$$

З виразу (3.1) та за умови, що $\Delta_{12}, \Delta_{23} \ll R, \sqrt{d^2 + R^2 \pm 2dR \sin \theta}$ отримаємо:

$$\begin{cases} \Delta_{12} = -\sqrt{d^2 + R^2 - 2dR \sin \theta} + R \\ \Delta_{23} = \sqrt{d^2 + R^2 + 2dR \sin \theta} - R \end{cases} \quad (3.2)$$

З виразу (3.2) чевидно, що при $\sin \theta = d/2R, \Delta_{12} = 0$, а при $\sin \theta < d/2R, \Delta_{12} \rightarrow \Delta_{21} = \sqrt{d^2 + R^2 - 2dR \sin \theta} - R$

Спрощуючи вираз (3.2) отримуємо:

$$\begin{cases} \Delta_{12}^2 - 2R\Delta_{12} = d^2 - 2dR \sin \theta \\ \Delta_{23}^2 + 2R\Delta_{23} = d^2 + 2dR \sin \theta \end{cases} \quad (3.3)$$

З системи (3.3) отримаємо вирази для знаходження залежностей R ($\Delta_{12}, \Delta_{23}, d$), θ ($\Delta_{12}, \Delta_{23}, d$).

$$\begin{cases} \sin \theta = \frac{d^2 + 2R\Delta_{12} - \Delta_{12}^2}{2dR} \\ \sin \theta = \frac{-d^2 + 2R\Delta_{23} + \Delta_{23}^2}{2dR} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} R = \frac{\Delta_{12}^2 - d^2}{2\Delta_{12} - 2d \sin \theta} \\ R = \frac{\Delta_{23}^2 - d^2}{2d \sin \theta - 2\Delta_{23}} \end{cases} \quad (3.5)$$

Розв'яжемо систему (3.4) та знайдемо R ($\Delta_{12}, \Delta_{23}, d$).

$$d^2 + 2R\Delta_{12} - \Delta_{12}^2 = -d^2 + 2R\Delta_{23} + \Delta_{23}^2 \Rightarrow 2d^2 - \Delta_{12}^2 - \Delta_{23}^2 = 2R(\Delta_{23} - \Delta_{12})$$

$$R = \frac{2d^2 - \Delta_{12}^2 - \Delta_{23}^2}{2(\Delta_{23} - \Delta_{12})}, \quad (3.6)$$

Розв'яжемо систему (3.5) та знайдемо θ (Δ_{12} , Δ_{23} , d).

$$\begin{aligned} (\Delta_{12}^2 - d^2)(2d \sin \theta - 2\Delta_{23}) &= (\Delta_{23}^2 - d^2)(2\Delta_{12} - 2d \sin \theta) \\ \sin \theta (\Delta_{12}^2 d - 2d^3 + \Delta_{23}^2 d) + d^2(\Delta_{12} + \Delta_{23}) - \Delta_{12}\Delta_{23}(\Delta_{12} + \Delta_{23}) &= 0 \\ \theta &= \arcsin \left(\frac{(\Delta_{12}\Delta_{23} - d^2)(\Delta_{12} + \Delta_{23})}{(\Delta_{12}^2 d - 2d^3 + \Delta_{23}^2 d)} \right), \end{aligned} \quad (3.7)$$

Знайдемо d (Δ_{12} , Δ_{23} , R , θ) з виразу (3.7), віднявши від другого рівняння системи перше:

$$\begin{aligned} \Delta_{23}^2 - \Delta_{12}^2 + 2R(\Delta_{23} + \Delta_{12}) &= 4dR \sin \theta \\ d &= \frac{\Delta_{23}^2 - \Delta_{12}^2 + 2R(\Delta_{23} + \Delta_{12})}{4R \sin \theta} = \frac{(\Delta_{23} - \Delta_{12} + 2R)(\Delta_{23} + \Delta_{12})}{4R \sin \theta}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

Зведемо отримані залежності в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1.

Геометричні співвідношення для 3х елементної ЕПЛАР відносно джерела випромінювання з координатами (R , θ)

$\Delta_{12}(R, \theta, d)$	$\Delta_{12} = -\sqrt{d^2 + R^2 - 2dR \sin \theta} + R$, при $\sin \theta = d/2R$, $\Delta_{12} = 0$, при $\sin \theta < d/2R$, $\Delta_{12} \rightarrow \Delta_{21} = \sqrt{d^2 + R^2 - 2dR \sin \theta} - R$
$\Delta_{23}(R, \theta, d)$	$\Delta_{23} = \sqrt{d^2 + R^2 + 2dR \sin \theta} - R$
R (Δ_{12} , Δ_{23} , d)	$R = \frac{2d^2 - \Delta_{12}^2 - \Delta_{23}^2}{2(\Delta_{23} - \Delta_{12})}$
θ (Δ_{12} , Δ_{23} , d)	$\theta = \arcsin \left(\frac{(\Delta_{12}\Delta_{23} - d^2)(\Delta_{12} + \Delta_{23})}{(\Delta_{12}^2 d - 2d^3 + \Delta_{23}^2 d)} \right)$
d (Δ_{12} , Δ_{23} , R , θ)	$d = \frac{(\Delta_{23} - \Delta_{12} + 2R)(\Delta_{23} + \Delta_{12})}{4R \sin \theta}$

Дані залежності виведені для випадку елементарної ЕПЛАР, яка вже може аналізувати сигнал за кривизною фронту його електромагнітної хвилі, проте ці залежності можуть бути використані для ЕПЛАР, які мають більше ніж 3 елементи, варто лише обрати деяку точку відліку на лінії, яка проходить через всі антенні елементи (бажано, щоб в цій точці був один з антенних елементів – це спрощує задачу математичного моделювання) та відрахувати від неї потрібну відстань d , до кожного антенного елементу.

Δ_{12} , Δ_{23} показують відстань між фазовими фронтами ЕМХ, що проходять через кожен АЕ і незалежні від частоти. Для визначення різниці фаз сигналу, що надходить до різних АЕ, треба перемножити дані показники на коефіцієнт поширення ЕМХ у просторі.

3.3 Аналіз способів дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами електромагнітних хвиль у зоні Френеля

У цьому розділі буде розглянуто різні алгоритми дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами ЕМХ. Спочатку буде проведено огляд існуючих алгоритмів, таких як MUSIC та ESPRIT, які широко використовуються в сучасних телекомунікаційних системах. Потім буде запропоновано новий алгоритм дискримінації, заснований на використанні різниці фаз між сигналами, прийнятими різними парами елементів антенної решітки. Цей алгоритм буде детально описаний та проаналізований. Також буде проведено порівняння ефективності різних алгоритмів для різних типів сигналів, перешкод та умов поширення.

3.3.1 Огляд існуючих алгоритмів дискримінації

Існуючі алгоритми дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами ЕМХ можна розділити на дві основні категорії:

Алгоритми, засновані на оцінці напрямку приходу (DOA): Ці алгоритми визначають напрямки приходу сигналу та перешкоди, а потім формують діаграму спрямованості антени таким чином, щоб підсилити сигнал у напрямку на джерело корисного сигналу та послабити його у напрямку на джерело перешкоди. До цієї категорії належать такі відомі алгоритми:

- **MUSIC (Multiple Signal Classification):** Цей алгоритм (рис. 3.3) базується на розкладанні кореляційної матриці прийнятих сигналів на підпростори сигналу та шуму. Напрямки приходу сигналів визначаються як точки максимуму функції просторового спектра, яка формується на основі власних векторів кореляційної матриці.

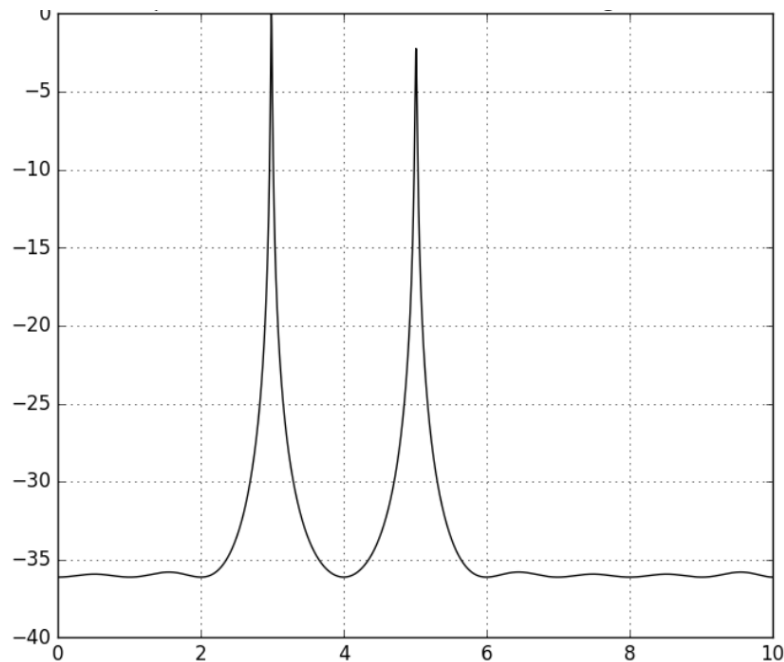


Рис 3.3 Результат роботи алгоритму MUSIC

- **ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques):** Цей алгоритм використовує властивість обертальної інваріантності кореляційної матриці для оцінки напрямків приходу сигналів. ESPRIT дозволяє оцінити напрямки приходу сигналів без необхідності формування просторового спектра, що зменшує обчислювальну складність алгоритму.

- **Алгоритм Сапон:** Цей алгоритм формує адаптивний фільтр, який мінімізує потужність вихідного сигналу при збереженні підсилення в напрямку на корисний сигнал. Це дозволяє ефективно придушувати перешкоди, що приходять з інших напрямків.

Алгоритми, засновані на оцінці різниці дальностей: Ці алгоритми оцінюють різницю дальностей між джерелом сигналу та джерелом перешкоди на основі аналізу фазових фронтів ЕМХ, що надходять на антенну решітку. Ця інформація може бути використана для формування діаграми спрямованості антени або для фільтрації перешкоди. До цієї категорії належать такі алгоритми:

- **Алгоритми на основі методу найменших квадратів (МНК):** Ці алгоритми мінімізують суму квадратів відхилень між вимірними та розрахунковими значеннями різниці фаз для різних пар антенних елементів(рис 3.4) . Розв'язком цієї задачі є оцінка різниці дальностей, яку можна використовувати для дискримінації сигналу та перешкоди.

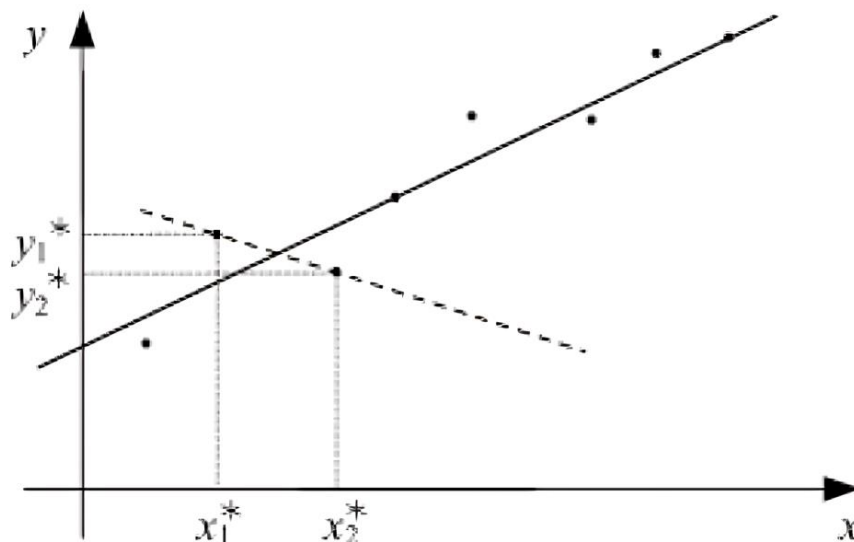


Рис 3.4 Дискримінація за допомогою методу найменших квадратів

- **Алгоритми на основі методу максимальної правдоподібності (ММП):** Ці алгоритми шукають такі значення параметрів моделі (напрямки приходу, дальності), які максимізують функцію правдоподібності, що визначається виходячи зі статистичних властивостей прийнятих сигналів.

- **Алгоритми на основі методу максимальної ентропії (МЕ):** Ці алгоритми формують діаграму спрямованості антени, яка максимізує ентропію вихідного сигналу. Це дозволяє ефективно придушувати перешкоди, що приходять з різних напрямків, та зберігати при цьому інформацію про корисний сигнал.

3.3.2 Розробка алгоритму дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами електромагнітних хвиль у зоні Френеля

Аналізуючи отримані вирази (таблиця 3.1), розробимо найпростішу математичну модель, яка описує можливість придушення сигналу перешкоди, використовуючи інформацію про кривизну фронту його електромагнітної хвилі (EMX). Розглянемо випадок прийому сигналу перпендикулярно до лінії розміщення антенних елементів, не враховуючи азимутальну залежність. У цьому випадку фаза EMX у крайніх елементах буде однаковою, а між центральним та крайніми – різною, залежно від кривизни фронту EMX.

Розглянемо випадок обробки сигналу з двома каналами, що можна вважати перевагою при проектуванні. Вхідний сигнал складається з корисного сигналу та сигналу перешкоди, джерела яких просторово рознесені. Припустимо, що амплітуди сигналу та перешкоди в обох каналах однакові, що необхідно для коректної роботи схеми (рис 3.5) як при визначенні координат джерела, так і при придушенні сигналу перешкоди.

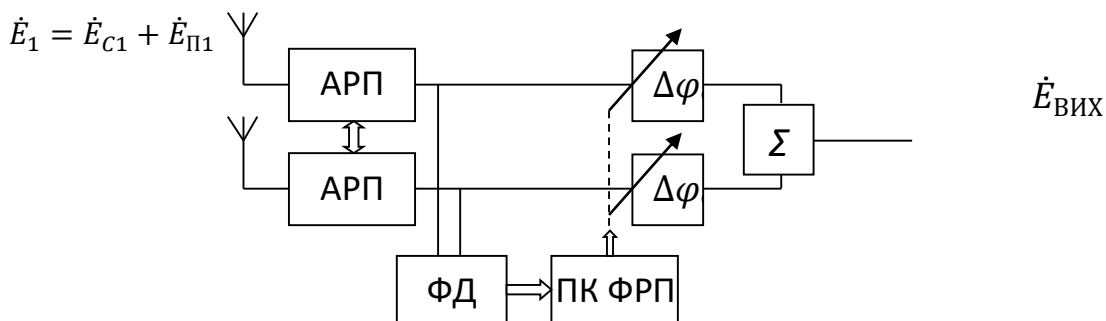


Рис. 3.5 Принципова схема елементарного дискримінатора сигналу за кривизною фронту EMX:

можна реалізувати шляхом зсуву фаз в одному каналі на $\Delta\varphi = \pi$, а в іншому на $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\Pi}$, в результаті отримуємо відносний зсув на $\Delta\varphi_{\Phi} = \pi - \Delta\varphi_{\Pi}$

Підставимо отримане значення $\Delta\varphi_{\Phi} = \pi - \Delta\varphi_{\Pi}$ в перше рівняння системи.

$$E_C(\sin \omega t + \sin(\omega t + \pi + \Delta\varphi_C - \Delta\varphi_{\Pi})) = E_{\text{ВИХ}} \sin(\omega t + \Delta\varphi_{\text{ВИХ}})$$

$$\frac{E_{\text{ВИХ}}}{E_C} = 2 \sin\left(\frac{\Delta\varphi_C - \Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right),$$

$$\alpha = 20 \lg\left(\frac{E_{\text{ВИХ}}}{E_C}\right) = 20 \lg\left(2 \sin\left(\frac{\Delta\varphi_C - \Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)\right), \text{ дБ}, \quad (3.12)$$

(2.2.7)

Якщо електромагнітна перешкода (ЕМП) знаходиться на значно більшій відстані від приймача, ніж передавач корисного сигналу, то її фазовий фронт плоский і $\Delta\varphi_{\Pi} = 0^\circ$, а $\alpha = 20 \lg\left(2 \sin\frac{\Delta\varphi_C}{2}\right)$, дБ

З отриманих відношень в попередньому рівнянні (3.12) визначимо залежність $\Delta\varphi_C(R)$:

$$\Delta\varphi_C = \beta \cdot \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{d^2 + R^2} - R\right), \quad (3.13)$$

де R – відстань до джерела сигналу, м; d – відстань між антенами, м; λ - довжина хвилі сигналу, що оброблюється, м; β - коефіцієнт поширення ЕМХ, рад/м;

Визначимо $\alpha(R)$ з рівняння(3.13), зважаючи тільки на кривизну фронту і не враховуючи ослаблення сигналу з розповсюдженням.

$$\alpha = 20 \lg\left(2 \sin\frac{\Delta\varphi_C}{2}\right) = 20 \lg\left(2 \sin\frac{\pi(\sqrt{d^2 + R^2} - R)}{\lambda}\right), \quad (3.14)$$

(3.6)

Оскільки ослаблення, яке потрібно скомпенсувати в рівнянні(3.14) в наслідок обробки залежить від такого конструктивного параметру як відстань між антенними елементами, що є надто важливим параметром при конструюванні, то знайдемо залежність $d(\alpha)$, при заданих довжині хвилі λ та максимальній дальності до джерела корисного сигналу з виразу (3.14).

$$d = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\pi} \arcsin\left(10^{\frac{\alpha}{20}}/2\right) + R\right)^2 - R^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{\lambda}{\pi} \arcsin\left(10^{\frac{\alpha}{20}}/2\right)\right)^2 + 2R \frac{\lambda}{\pi} \arcsin\left(10^{\frac{\alpha}{20}}/2\right)} \quad (3.15)$$

Знайдемо оптимальне d , коли $R \leq 35000$ м, $\alpha \geq -60$ дБ на прикладі системи мобільного зв'язку стандарту GSM900 з $\lambda = 0,33$ м.

Результатом рішення буде значення $d \approx 5\lambda = 1,65$ м, тоді вираз (3.15) спрощується.

$$\alpha = 20 \lg \left(2 \sin 9,52 \left(\sqrt{2,7225 + R^2} - R \right) \right), \quad (3.16)$$

Результати моделювання отриманого виразу(3.16) зобразимо на графіку (Рис. 3.6)

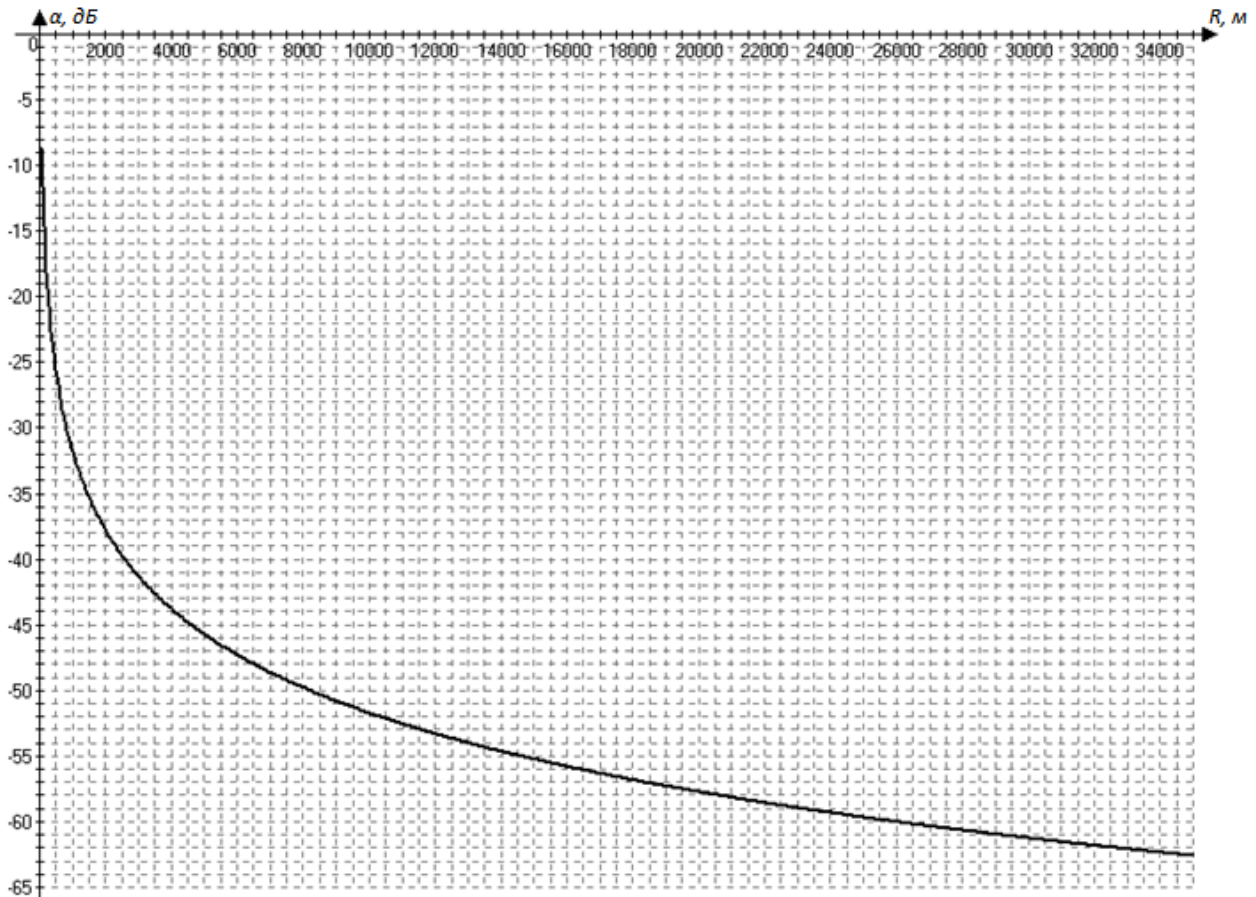


Рис. 3.6 Залежність ослаблення корисного сигналу від відстані до його джерела при обробці.

Розглянемо випадок, коли перешкода знаходиться достатньо близько до приймача так, щоб $\Delta\varphi_{\Pi} > 0^\circ$, тоді

$$\alpha = 20 \lg \left(2 \sin \left(\frac{\Delta\varphi_c - \Delta\varphi_{\Pi}}{2} \right) \right) =$$

$$= 20 \lg \left(2 \sin \left| \frac{\pi \left(\sqrt{d^2 + R_c^2} - R_c - \sqrt{d^2 + R_{\Pi}^2} + R_{\Pi} \right)}{\lambda} \right| \right), \quad (3.17)$$

Для вже розглянутої системи GSM900 формула набуде вигляду:

$$\alpha = 20 \lg \left(2 \sin \left| 9,52 \left(\sqrt{d^2 + R_c^2} - R_c - \sqrt{d^2 + R_{\Pi}^2} + R_{\Pi} \right) \right| \right), \quad (3.18)$$

(3.8)

Розглянемо випадок коли перешкода знаходиться на відстані 500, 1000, 1500 м від приймача, при $d = 1,65$ м і $R \leq 2000$ м.

$$\alpha = 20 \lg \left(2 \sin \left| 9,52 \left(\sqrt{2,7225 + R_C^2} - R_C - \Delta_{\Pi} \right) \right| \right),, \quad (3.19)$$

де $\Delta_{\Pi} = 0,00272; 0,001361; 0,000907$ відповідно при $R_{\Pi} = 500, 1000, 1500$ метрах.

Результати моделювання $\alpha(R)$ згідно з рівнянням(3.19) для вище згаданих випадків зобразимо на графіках (рис. 3.7)

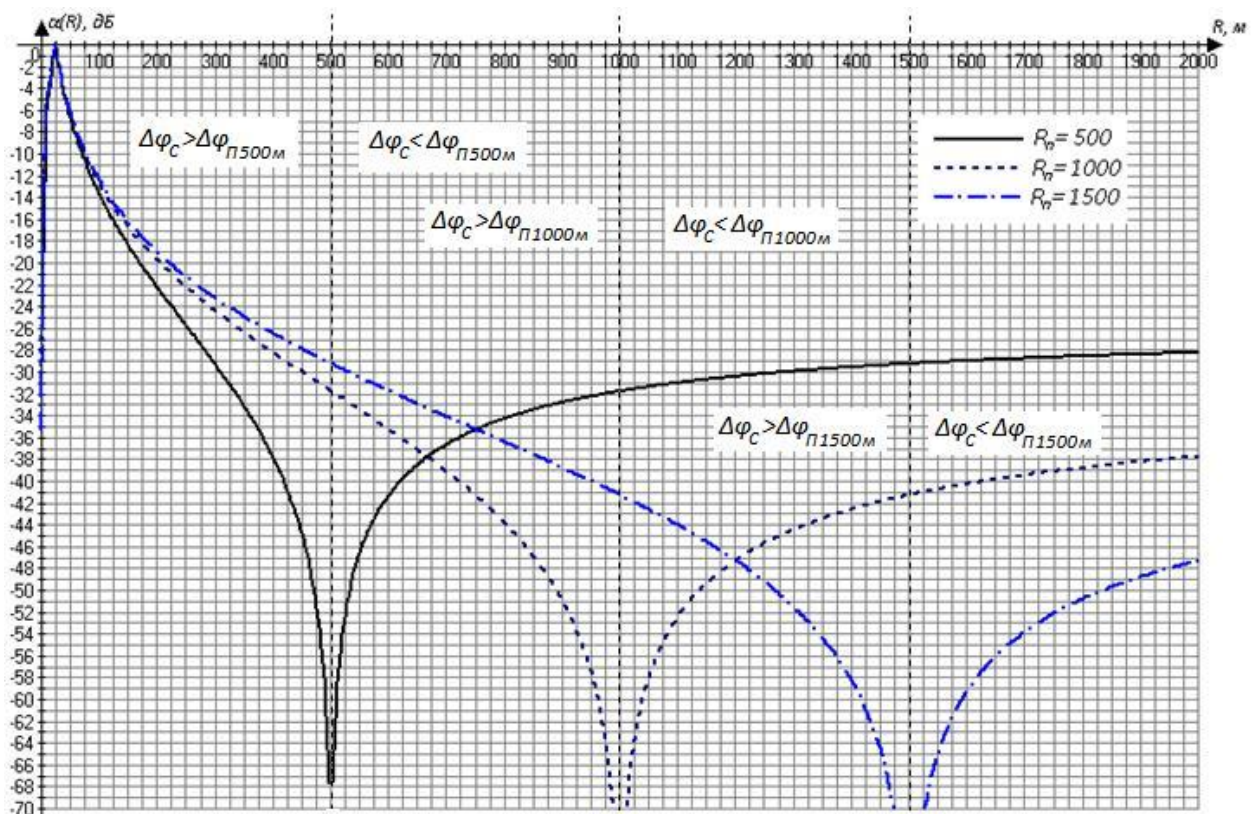


Рис. 3.7 Залежність ослаблення від відстані до джерела сигналу, який оброблюється, при подавленні перешкоди, яка знаходиться на відстані 500, 1000, 1500м до приймача

Аналізуючи результати моделювання виразу (3.18), представлені на рис 3.6, можна зробити висновок, що даний варіант обробки забезпечує додаткове ослаблення сигналу, подібне до закону його поширення.

Рис. 3.7 показує, що сигнал, який надходить з певної відстані, що відповідає різниці фаз в каналах обробки, повністю придушується. Сигнали, що надходять з ближчої та дальшої відстані, мають різницю фаз в каналах і в результаті обробки на виході мають деяку амплітуду, але з різними знаками: ближче - плюс, далі - мінус, або практично протифазні.

Результати моделювання виразу (3.19), представлені на рис 3.5, показують, що дана реалізація здатна сильно придушувати лише сигнал перешкоди на певній відстані від приймача та в деякій зоні біля неї. За цією відстанню будь-який сигнал придушується не набагато більше, ніж перед нею. Це може бути корисним фактором при виділенні дальнього сигналу на фоні ближньої перешкоди, але негативним фактором при придушенні перешкоди, що надходить з-за меж певної зони.

Дана реалізація не зможе повністю придушити перешкоду з-за меж стільника, але може бути використана для придушення одного потужного джерела сигналу перешкоди, наприклад, іншої базової станції, промислової перешкоди або іншої радіоелектронної апаратури. Також її можна налаштувати на придушення сигналу з межі стільника, враховуючи корисне явище ослаблення сигналу з відстанню при конструюванні підсилювачів ТРЧ, але ефективність буде недостатньою.

Отже, необхідно ускладнити схематичне рішення, щоб досягти потрібного результату: слабкого ослаблення сигналу, що надходить з меж стільника, і сильного або практично повного ослаблення з-за його меж, або достатнього ослаблення на більшій території поза визначеною зоною.

Порівнюючи графіки на рис. 3.4 та 3.5, можна побачити різницю в характері ослаблення та знаку амплітуди сигналу на виході залежно від того, чи сигнал

приходить ближче чи далі відстані, на яку налаштована система. Це можна використати для побудови нового математичного апарату.

При побудові нового апарату використаємо той факт, що сигнали, які надходять з відстаней перед та за точкою налаштування системи, мають різні знаки амплітуди на виході рівняння (3.17), а згідно рівняння (3.18) - однаковий знак з будь-якої відстані. При простому додаванні цих сигналів отримаємо суму сигналів, що надійшли до точки налаштування, та їх різницю, що надійшли після точки налаштування.

Створимо аналітичний вираз, що описує суму параметрів виразів (3.17) та (3.18).

$$\alpha = 20\lg\left(2 \sin\left(\frac{\Delta\varphi_C}{2}\right) + 2 \sin\left(\frac{\Delta\varphi_C - \Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)\right) = 20\lg\left(\left[4 \cos\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{4}\right)\right] \sin\left(\frac{\Delta\varphi_C}{2} - \frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{4}\right)\right) \quad (3.20)$$

Також на основі виразу(3.20) можливо створити вираз, який враховуватиме корекцію амплітуди та фази, що виражатиметься в деякій корекції $\Delta\varphi_{\Pi}$, від різних каналів обробки для досягнення оптимального результату, використовуючи математичні вирази з статті [23].

$$\begin{aligned} \alpha &= 20\lg\left(A \sin\left(\frac{\Delta\varphi_C}{2}\right) + B \sin\left(\frac{\Delta\varphi_C - \Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)\right) =, \quad (3.21) \\ &= 20\lg\left(\left[A + B \cos\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)\right] \sin\left(\frac{\Delta\varphi_C}{2}\right) + \left[B \sin\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)\right] \cos\left(\frac{\Delta\varphi_C}{2}\right)\right) = \\ &20\lg\left(E \sin\left(\frac{\Delta\varphi_C}{2} + \theta\right)\right), \end{aligned}$$

$$\text{де } E = \sqrt{\left[A + B \cos\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)\right]^2 + \left[B \sin\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)\right]^2} = \sqrt{A^2 + 2AB \cos\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right) + B^2},$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{B \sin\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)}{\sqrt{\left[A+B \cos\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)\right]^2 + \left[B \sin\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)\right]^2}} \right) = \arcsin \left(\left[\left[\frac{A}{B \sin\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right)} + \operatorname{ctg}\left(\frac{\Delta\varphi_{\Pi}}{2}\right) \right]^2 + 1 \right]^{-0.5} \right).$$

3.3.3 Аналіз та порівняння ефективності різних алгоритмів

Для оцінки ефективності запропонованого алгоритму дискримінації по дальності необхідно провести його порівняння з існуючими алгоритмами, такими як MUSIC та ESPRIT. Це порівняння може бути здійснено за допомогою моделювання та/або експериментальних досліджень.

При моделюванні необхідно враховувати різні сценарії поширення радіохвиль (пряма видимість, багатопроменеве поширення тощо), різні рівні потужності сигналу та перешкоди, різні типи модуляції та кодування тощо.

Експериментальні дослідження можуть проводитися на реальному обладнанні або з використанням програмно-визначуваних радіосистем (SDR). При проведенні експериментів необхідно враховувати вплив зовнішніх факторів, таких як атмосферні умови, перешкоди від інших джерел тощо.

Основними критеріями оцінки ефективності алгоритмів дискримінації є ймовірність правильного виявлення сигналу, ймовірність хибної тривоги та коефіцієнт придушення перешкоди. Порівняльний аналіз дозволить визначити переваги та недоліки кожного з алгоритмів та вибрати найбільш підходящий для конкретних умов застосування.

3.4 Розробка структурної схеми системи захисту

Структурна схема системи захисту є важливим етапом у розробці будь-якої системи зв'язку. Вона дозволяє визначити основні компоненти системи, їх

функції та взаємозв'язки між ними. У цьому розділі буде розроблена загальна структурна схема системи захисту телекомунікаційних систем від активних завад на основі використання відмінностей у фазових фронтах ЕМХ сигналу. Будуть детально описані всі основні блоки системи, включаючи антенну решітку, приймачі, аналого-цифрові перетворювачі, блок обробки сигналів та блок прийняття рішень. Також буде обґрунтовано вибір конкретних компонентів та надано рекомендації щодо їх параметрів.

Отже, суть отриманих виразів в розділі 3.3 може бути втілена в такій схемі (рис. 3.8):

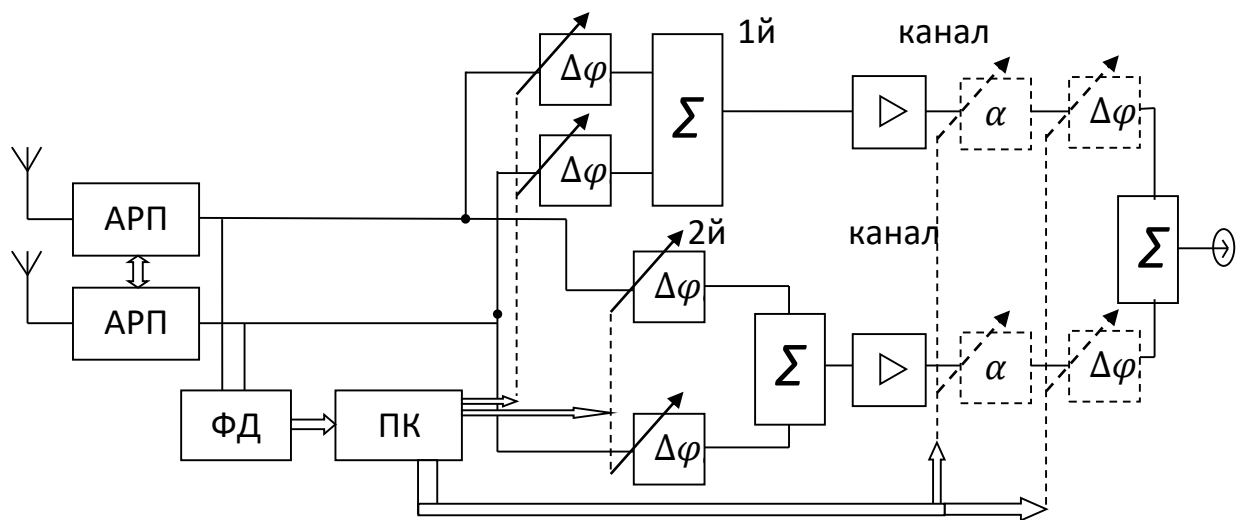


Рис. 3.8 Принципова схема ускладненого дискримінатора сигналу за кривизною фронту ЕМХ:

АРП – амплітудо - регулюючий пристрій, ФД фазовий детектор, ПК – пристрій керування. Штрихованою лінією вказані пристрої, які можуть бути встановлені в залежності від результатів, які треба отримати або взагалі можуть не встановлюватись.

Принцип роботи цієї схеми полягає в наступному: сигнал з кожного каналу приймально-передавального пристрою (ТРЧ) розподіляється порівну між двома каналами обробки. У першому каналі система фазообертачів налаштована так,

ніби сигнал перешкоди надходить з дуже великої відстані ($\Delta\varphi\Pi = 0$), тоді як у другому каналі система фазообертачів налаштована на сигнал перешкоди з деякої досить близької відстані до приймача ($\Delta\varphi\Pi \neq 0$).

Після проходження суматорів сигнали додатково підсилюються, щоб компенсувати ослаблення внаслідок первинної обробки. Потім вони проходять через фазообертачі та атенюатори, які приводять сигнали в обох каналах до такого вигляду, що в результаті їх сумування на вихідному суматорі отримується необхідна вихідна характеристика.

Промодельюємо вирази (3.16), (3.17), (3.18) і (3.19), де $A=2$, $B=1$, та співставимо їх результати на рис. 3.9.

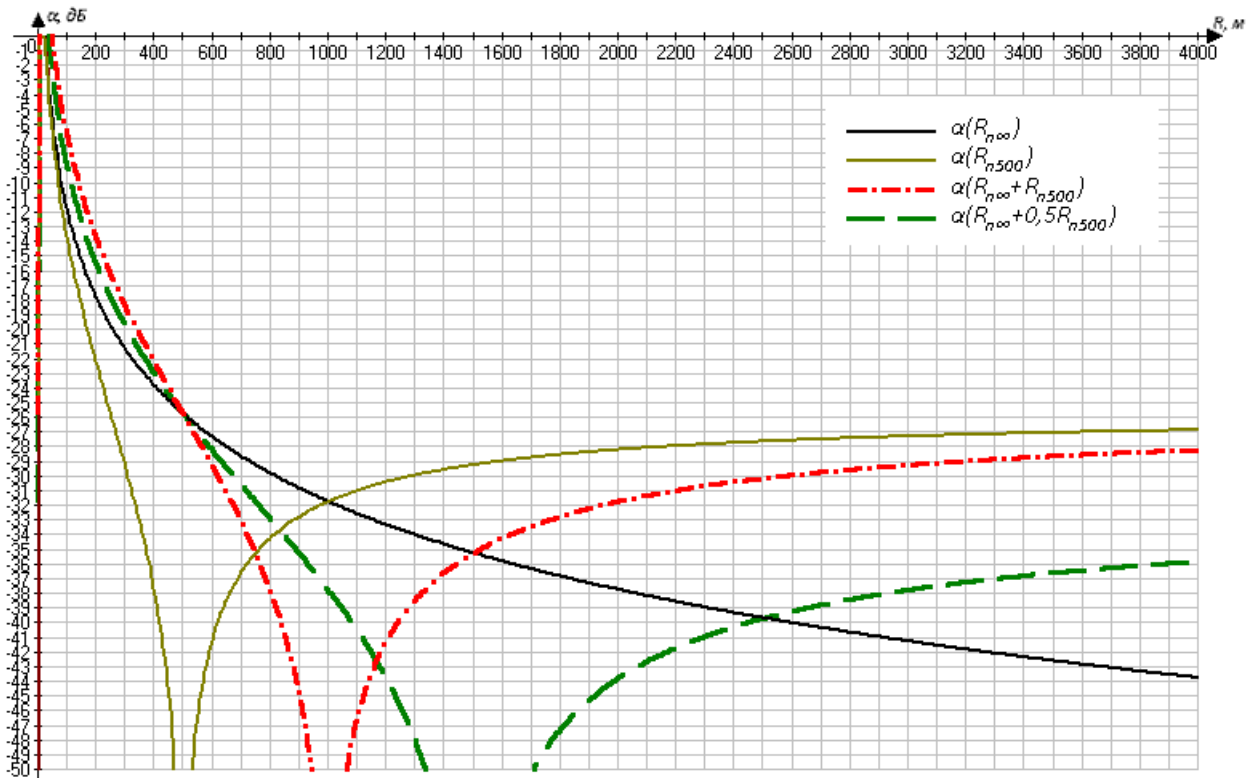


Рис. 3.9 Порівняльне моделювання виразів (3.16), (3.17), (3.18) і (3.19), де $A=2$, $B=1$.

Проаналізувавши рис. 3.9, можна стверджувати, що змодельовані вирази (3.9) та (3.10), які описують роботу двоканального дискримінатора за кривизною фронту ЕМХ, підтверджують очікуваний позитивний результат: менше

ослаблення до точки налаштування з $\Delta\phi\Pi=0$ та більш сильне ослаблення після неї, що є компромісним рішенням між результатами (3.16) та (3.17). Цю точку налаштування з $\Delta\phi\Pi=0$ назовемо точкою корисного виграшу.

Важливо зазначити, що в роботі даного схематичного рішення точка налаштування з $\Delta\phi\Pi=0$ не є точкою розміщення перешкоди, а слугує показником повного придушення сигналу. Вона може вказувати на межу стільника, крайню точку прийому сигналу або визначатися іншими конструкційними параметрами на розсуд проектувальника.

Маніпулюючи амплітудами сигналу в різних каналах обробки згідно (3.10), сумарний графік поступово наближається до графіку, що описується (3.16) або (3.17), якщо відповідно зменшувати долю сигналу в каналі, амплітуда на виході якого описується протилежними виразами (3.17) або (3.16). При цьому змінюється крутизна графіку та точка абсолютного придушення сигналу.

Додаткова корекція фази призводить до зміщення точки абсолютного придушення сигналу та точки корисного виграшу, яка в нашому випадку може відповідати межі стільника.

Позитивним результатом є також збільшення зони певного рівня ослаблення згідно (3.19) та (3.10) відносно результату (3.17). Наприклад, на рівні -36 дБ згідно (3.19) зона ослаблення зросла вдвічі, а згідно (3.10) при $A=2$, $B=1$ - в 10 разів у порівнянні з результатом моделювання (3.17).

Аналіз результатів моделювання показує, що будь-яка реалізація системи дискримінації на основі використання кривизни фронту ЕМХ призводить до підвищення відношення сигнал/перешкода. Наприклад, при моделюванні (3.19), якщо джерело корисного сигналу знаходиться на відстані 200 м, а перешкоди - 800 м до приймача, то додатковий виграш у відношенні С/П складе 25 дБ за амплітудою і 12 дБ за потужністю.

Розглянувши попередні пункти можна визначити, що дана система дискримінації за кривизною фронту електромагнітної хвилі (ЕМХ), що

надходить по суті є системою просторово-часової обробки сигналу з використанням антенних решіток або антенних систем, елементами яких можуть виступати як всеспрямовані, так і спрямовані антени або навіть фазовані антенні решітки.

Сумуючи дані про класифікацію ААС та математичну модель даної системи впливає, що вона належить до класу компенсаційних ААС з сумарно різницевим предпроцесором. Тому загальна структурна схема буде схожою як на рис. 3.9 з тою відмінністю, що кількість антен і сигнальних каналів дві, предпроцесор охоплює кожен сигнальний канал, замість ДУС встановлено простий суматор, також необхідні блоки в предпроцесорі, які компенсують фазові затримки та розбіжності амплітуд в каналах зв'язаних з азимутом сигналів, що надходить, оскільки система також відноситься до систем з рознесеним прийомом. Оскільки дана система працює тільки на прийом, то вона повинна бути відділена від передавача дуплексором. Сигнал на вході системи обробки дуже слабкий, тому його необхідно підсилити і виділити необхідну смугу частот, що виконає тракт радіочастоти (ТРЧ) на декількох підсилювачах та смугових фільтрах, кількість яких визначатиметься чутливістю системи. Також система працюватиме в режимі визначення місцезростащування джерела сигналу або перешкоди, тому її необхідно спорядити блоками аналізу сигналу за фазовими розбіжностями та амплітудою, та зв'язати з системою каналної сигналізації.

Особливістю даного методу обробки полягає в тому, що замість формування різницевих і сумарних ДС в каналах формуються складові, які при сумуванні формують особливу характеристику, яка відображає залежність амплітуди на виході від відстані до приймача.

В простому варіанті схеми в одному каналі формується складова протифазна вхідному сигналу, а в іншому зкоректована по фазі на невеликий кут, що відповідає кривизні гіпотетичної перешкоди. Складний варіант схеми

полягає в сумі двох простих схем, які формують різні характеристики на виході, сума яких дає оптимальну амплітудну характеристику.

З сказаного зробимо висновок, що дана реалізація не зможе подавлювати перешкоду, що має відмінний азимут від азимуту корисного сигналу, тому як антени потрібно використовувати виключно АР, які зможуть налагоджуватись на перешкоду і корисний сигнал зрізними напрямками приходу. В загальному може використовуватись як комплекс, який подавлює перешкоди як по азимуту, так і за відстанню.

Створимо загальну структурну схему виходячи з структури на рис. 3.8 та виведених відмінностей. Результат відобразимо на рис. 3.10.

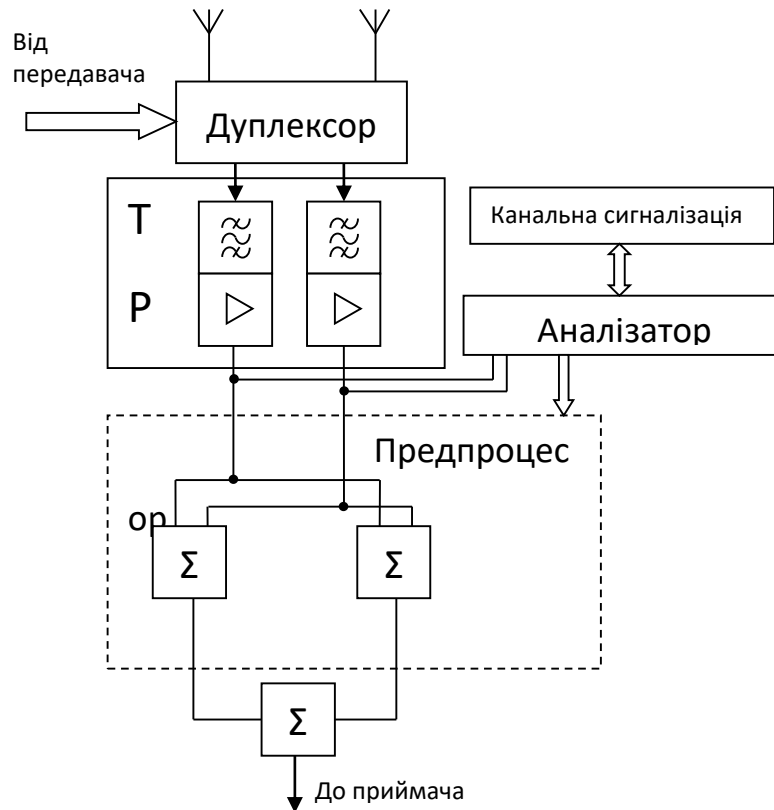


Рис 3.10 Загальна структурна схема системи дискримінації за кривизною фронту ЕМХ

3.5 Аналіз результатів

У цьому розділі було проведено глибоке теоретичне дослідження можливості використання відмінностей у фазових фронтах ЕМХ для дискримінації сигналу та перешкоди в телекомунікаційних системах. Розроблена математична модель, заснована на представленні електромагнітних хвиль як суперпозиції сферичних гармонік, дозволила детально проаналізувати характеристики фазових фронтів для різних типів джерел випромінювання та різних відстаней до них.

Було показано, що в ближній зоні джерела (зона Френеля) фазовий фронт ЕМХ має виражену сферичність, тоді як в дальній зоні (зона Фраунгофера) він наближається до площини. Ця відмінність у кривизні фазового фронту є ключовим фактором, що дозволяє розрізнити корисний сигнал від перешкоди, навіть якщо вони приходять з одного напрямку.

Для кількісної оцінки відмінностей у фазових фронтах було отримано аналітичні вирази для різниці фаз між сигналами, прийнятими різними елементами антенної решітки. Ці вирази враховують як кутові координати джерел сигналу та перешкоди, так і відстані до них.

Було встановлено, що різниця фаз між сигналами на сусідніх елементах антенної решітки залежить не тільки від кутової відстані між джерелами, але й від їх дальності. Це означає, що навіть за відсутності кутових відмінностей, можна розрізнити сигнал та перешкоду за їх дальністю, аналізуючи різницю фаз на антенній решітці.

На основі отриманих математичних співвідношень було розроблено алгоритм дискримінації по дальності, який дозволяє оцінити дальність до джерела перешкоди та розрізнити його від корисного сигналу. Цей алгоритм базується на порівнянні різниці фаз між сигналами на різних парах антенних елементів.

Для оцінки точності запропонованого алгоритму було проведено аналіз похибок, який показав, що точність оцінки дальності залежить від відношення сигнал/шум, кількості елементів антенної решітки та відстані між ними. Збільшення кількості елементів решітки та зменшення відстані між ними дозволяє підвищити точність оцінки дальності, але ускладнює систему та збільшує її вартість.

Для оцінки переваг розробленого методу дискримінації за фазовими фронтами EMX було проведено його порівняння з існуючими методами, такими як MUSIC (Multiple Signal Classification) та ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques).

MUSIC та ESPRIT є потужними алгоритмами, які дозволяють оцінити напрямки приходу сигналів та їх спектральні характеристики. Проте, ці алгоритми мають обмеження в умовах, коли сигнал та перешкода приходять з одного напрямку. У таких випадках вони не можуть ефективно розрізнити сигнал та перешкоду.

Запропонований метод дискримінації за фазовими фронтами EMX дозволяє вирішити цю проблему, оскільки він використовує інформацію про дальність до джерела, а не лише про напрямок приходу. Це робить його більш універсальним та ефективним в умовах, коли джерела сигналу та перешкоди знаходяться практично в одному напрямку.

Крім того, запропонований метод має ряд інших переваг порівняно з MUSIC та ESPRIT:

- **Простота реалізації:** Алгоритм дискримінації по дальності є відносно простим та не вимагає складних обчислень, що дозволяє реалізувати його на апаратних платформах з обмеженими ресурсами.
- **Менша чутливість до калібрування:** Метод менш чутливий до похибок калібрування антенної решітки, оскільки він використовує різницю фаз між сигналами на різних парах елементів, а не абсолютні значення фаз.

- **Можливість роботи в ближній зоні:** Метод ефективно працює не тільки в дальній зоні (зона Фраунгофера), але й у ближній зоні (зона Френеля), де фазовий фронт перешкоди має більш виражену сферичність.

Проте, запропонований метод має і деякі недоліки:

- **Обмежена точність оцінки дальності:** Точність оцінки дальності залежить від відношення сигнал/шум та кількості елементів антенної решітки.
- **Чутливість до багатопроменевого поширення:** У умовах багатопроменевого поширення оцінка дальності може бути ускладнена, оскільки на антенну решітку приходять кілька копій сигналу з різними затримками, що спотворює фазовий фронт.

Висновки

Проведене теоретичне дослідження та розрахунки підтвердили принципову можливість та ефективність використання відмінностей у фазових фронтах ЕМХ для дискримінації сигналу та перешкоди, особливо в зоні Френеля, де обидва сигнали мають виражену сферичність. Розроблений алгоритм дискримінації по дальності дозволяє розрізнити сигнал та перешкоду навіть за відсутності кутових відмінностей між ними, що є важливою перевагою порівняно з існуючими методами.

Результати дослідження свідчать про те, що запропонований метод є перспективним для підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем в умовах дії спрямованих активних перешкод, особливо в ближній зоні. Важливо відзначити, що ефективність методу обмежена зоною Френеля, де спостерігається відмінність у кривизні фазових фронтів сигналу та перешкоди. У дальній зоні, де обидва сигнали мають плоский фронт хвилі, цей метод не працює.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на детальний аналіз та розрахунок впливу сферичності фазового фронту на дискримінацію сигналу та

перешкоди. Це включає розробку математичних моделей та формул для кількісної оцінки впливу кривизни фазового фронту на характеристики прийнятих сигналів, розробку схем придушення перешкод, що враховують сферичність фазових фронтів у зоні Френеля. Це може включати використання адаптивних антенних решіток з алгоритмами формування діаграми спрямованості, що враховують кривизну фазового фронту сигналу, а також розробку методів просторової фільтрації, що враховують дальність до джерела перешкоди, вдосконалення алгоритму дискримінації з урахуванням амплітудних характеристик сигналів та методів адаптивної фільтрації та статистичної обробки сигналів.

Дослідження можливості використання кругових або конформних антенних решіток для підвищення ефективності дискримінації в зоні Френеля. Розробку комплексних систем захисту, що поєднують дискримінацію за фазовими фронтами з іншими методами, такими як фільтрація, кодування тощо. Проведення експериментальної перевірки ефективності методу на реальному обладнанні в різних умовах поширення радіохвиль, з акцентом на зону Френеля.

Запропонований метод дискримінації сигналу та перешкоди за фазовими фронтами ЕМХ має значний потенціал для підвищення завадостійкості телекомунікаційних систем в ближній зоні та забезпечення надійного зв'язку в умовах дії активних перешкод. Однак, необхідно враховувати обмеження методу в дальній зоні та спрямувати подальші дослідження на розробку комплексних підходів, що враховують як кутові, так і характеристики дальності сигналів та перешкод.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У даній дипломній роботі було проведено комплексне дослідження проблеми захисту телекомунікаційних систем від активних завад, з особливим акцентом на використанні відмінностей у фазових фронтах електромагнітного випромінювання сигналу та перешкоди, особливо в зоні Френеля. В результаті проведеної роботи було досягнуто поставленої мети – розроблено та досліджено ефективний метод захисту, що враховує ці відмінності.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

- **Актуальність проблеми:** Підтверджено актуальність проблеми захисту телекомунікаційних систем від активних завад, особливо з огляду на зростаючу кількість та різноманітність джерел таких завад. Існуючі методи захисту часто не враховують відмінності у фазових фронтах сигналу та перешкоди, що обмежує їх ефективність, особливо в ближній зоні.
- **Аналіз існуючих методів:** Проведено детальний аналіз існуючих методів захисту, включаючи адаптивні антенні решітки, просторову фільтрацію та поляризаційну фільтрацію. Виявлено їх переваги та недоліки, а також обмеження у застосуванні за наявності відмінностей у фазових фронтах, особливо в зоні Френеля, де ці відмінності найбільш виражені.
- **Вплив фазових фронтів:** Досліджено вплив відмінностей у фазових фронтах сигналу та перешкоди на ефективність захисту, зокрема в зоні Френеля. Показано, що ці відмінності, пов'язані з різною дальністю до джерел сигналу та перешкоди, можуть бути використані для розробки нових, більш ефективних методів дискримінації.
- **Математична модель:** Розроблено математичну модель поширення електромагнітних хвиль з урахуванням їх фазових фронтів у зоні Френеля. Ця модель дозволила провести теоретичний аналіз та оцінку ефективності запропонованого методу захисту.

- **Новий метод захисту:** Запропоновано новий метод захисту телекомунікаційних систем від активних завад в зоні Френеля, заснований на використанні відмінностей у фазових фронтах сигналу та перешкоди. Метод полягає у вимірюванні різниці фаз між сигналами, прийнятими різними парами елементів антенної решітки, та використанні цієї інформації для оцінки дальності до джерела перешкоди.
- **Теоретична оцінка:** Проведено теоретичну оцінку ефективності запропонованого методу в зоні Френеля. Показано, що метод дозволяє ефективно розрізняти сигнал та перешкоду, навіть якщо вони приходять з одного напрямку. Точність методу залежить від відношення сигнал/шум та кількості елементів антенної решітки.
- **Порівняльний аналіз:** Проведено порівняльний аналіз запропонованого методу з існуючими методами. Показано, що новий метод має ряд переваг в зоні Френеля, таких як простота реалізації, незалежність від напрямку приходу перешкоди та ефективність в умовах, коли інші методи можуть бути неефективними.
- **Структурна схема:** Розроблено структурну схему системи захисту, яка реалізує запропонований метод. Описано основні компоненти системи та їх функції.
- **Практична цінність:** Отримані результати мають практичну цінність для розробки нових систем захисту телекомунікаційних систем від активних завад в зоні Френеля. Запропонований метод може бути використаний для підвищення надійності та стійкості телекомунікаційних систем до зовнішніх впливів в умовах, коли інші методи можуть бути неефективними.

Результати дослідження підтверджують гіпотезу про те, що відмінності у фазових фронтах електромагнітного випромінювання сигналу та перешкоди в зоні Френеля можуть бути використані для їх ефективної дискримінації.

Розроблений метод захисту, заснований на цьому принципі, має ряд переваг порівняно з існуючими методами та може бути успішно застосований у реальних телекомунікаційних системах.

Отримані в роботі результати відкривають ряд перспективних напрямків для подальших досліджень:

- Вдосконалення методу: Подальше вдосконалення запропонованого методу дискримінації в зоні Френеля, включаючи розробку більш складних та точних алгоритмів обробки сигналів, врахування багатопроменевого поширення, адаптацію до різних типів сигналів та перешкод.
- Оптимізація системи: Оптимізація параметрів системи захисту в зоні Френеля, таких як кількість та розташування елементів антенної решітки, параметри приймачів та аналого-цифрових перетворювачів, з метою досягнення максимальної ефективності при мінімальних витратах.
- Експериментальна перевірка: Проведення експериментальної перевірки запропонованого методу на реальному обладнанні в різних умовах поширення радіохвиль, з акцентом на зону Френеля.
- Інтеграція з іншими методами: Дослідження можливості інтеграції запропонованого методу з іншими методами захисту, такими як адаптивні антенні решітки, просторова фільтрація та поляризаційна фільтрація, для створення комплексних систем захисту, що забезпечують високу ефективність у широкому діапазоні умов.
- Застосування в інших областях: Вивчення можливості застосування розробленого методу в інших областях, таких як радіолокація, радіоастрономія, радіонавігація тощо.

Подальші дослідження в цих напрямках дозволять розширити можливості захисту телекомунікаційних систем від активних завад та забезпечити їх надійне функціонування в умовах зростаючої кількості та різноманітності джерел таких завад, особливо в ближній зоні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ільченко М. Є., Наритник Т. Н., Ілюшко В. М. Використання методу комбінованої модуляції у мікрохвильових телекомунікаційних системах передачі даних // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – 2009. – № 1.
2. Наритник Т. Н., Семенко А. І. Використання дворівневої модуляції КАМЧМ у системі МІТРІС // Наукові записки УНДІЗ. – 2010. – № 2.
3. Спотворений сигнал [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – Електронні дані. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Спотворений_сигнал.
4. ЕМС завади природного походження [Електронний ресурс]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://gos2014.at.ua/index/emc_zavadi_prirodnogo_pokhodzhennja/0-97.
5. Рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – Електронні дані. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Рівень_бічних_пелюсток_діаграми_спрямованості.
6. Фазована антенна решітка [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – Електронні дані. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Фазована_антенна_решітка.
7. Адаптивна антенна решітка [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія. – Електронні дані. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Адаптивна_антенна_решітка.
8. Вишневський В.М., Ляхов А.І., Портной С.Л., Шахнович І.Л. Широкопasmовий бездротовий зв'язок. - К.: Техносфера, 2005. - 592 с.
9. Давидов А.А. Основи теорії передачі сигналів. - К.: Пітер, 2004. - 432 с.
10. Зюко А.Г., Кловський Д.Д., Назаров Ю.И., Финк Л.М. Теорія передачі сигналів. - К.: Радіо і зв'язок, 1986. - 304 с.

11. Карташевський В.Г. Системи мобільного зв'язку. - К.: Еко-Трендз, 2006. - 224 с.
12. Коломієць В.І., Сімоненко В.П. Теорія електричного зв'язку. - К.: Вища школа, 2003. - 478 с.
13. Кулешов В.Н. Системи та мережі передачі інформації. - К.: Академія, 2003. - 336 с.
14. Левін Л.С. Теорія електричного зв'язку. - К.: Радіо і зв'язок, 1985. - 320 с.
15. Прокіс Дж. Цифровий зв'язок. - К.: Радіо і зв'язок, 2000. - 800 с.
16. Скляр Б. Цифровий зв'язок. Теоретичні основи та практичне застосування. - К.: Вільямс, 2003. - 1104 с.
17. Веселовський К. Системи рухомого радіозв'язку / Пер. з пол. І.Д. Рудинського; під ред. А.І. Ледовського. - М.: Гаряча лінія-Телеком, 2006. - 536 с.
18. Джунь В.І., Щесняк С.С. Адаптивні антенні системи з придушенням перешкод по головному променю діаграми спрямованості. Зарубіжна радіоелектроніка, 1988, №4.
19. Нікітченко В.В., Галкін С.Н., Віхлянцев П.С. Аналіз можливостей дискримінації джерел радіовипромінювання за кривизною фронту хвилі. Вісті ВНЗ - Радіоелектроніка, 1988, №7.
20. Двайт Г.Б. Таблиці інтегралів та інші математичні формули. - М.: Наука, 1977. - 228 с.
21. Мікрохвильові пристрої телекомунікаційних систем. М.З. Згуровський, М.Є. Ільченко, С.А. Кравчук та ін.: У 2 т. - К.: "Політехніка", 2003 - Т.1: Розповсюдження радіохвиль. Антенні та частотно-вибірні пристрої. - 456 с.
22. Мікрохвильові пристрої телекомунікаційних систем. М.З. Згуровський, М.Є. Ільченко, С.А. Кравчук та ін.: У 2 т. - К.: "Політехніка", 2003 - Т.2:

Пристрої приймального та передавального трактів. Проектування пристроїв та реалізація систем. - 616 с.

23. Попов В.І. Основи стільникового зв'язку стандарту GSM.-М.: Еко-Трендз, 2005.-296с.