


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

кафедра РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

“На правах рукопису”
УДК 621.396.969.3

“До захисту допущено”
Завідувач кафедри РТС
 **Сергій ЖУК**

“06” 12 _____ 202__ р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
“Радіотехнічні комп’ютеризовані системи”
зі спеціальності 172 **“Електронні комунікації та радіотехніка”**
на тему: Алгоритм адаптації радіолокаційної системи виявлення БПЛА до роботи в умовах радіопротидії

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи РС-31 мп

БІЛЕНКО Володимир Григорійович

(прізвище, ім’я, по батькові)



(підпис)

Науковий керівник: *доцент каф. радіотехнічних систем*
к.т.н., доц., Чмельов В’ячеслав Орійович

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



(підпис)

Рецензент: *старший викладач, PhD каф. ПРЄ,*
Єзерський Нікіта Валерійович

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

(підпис)

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

Студент (-ка) _____

(підпис)

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

РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
спеціальність 172 “Електронні комунікації та радіотехніка”
Освітньо-професійна програма “Радіотехнічні комп’ютеризовані системи ”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТС

СМЧ Сергій ЖУК

«01» 10 2024 року

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту (тці)

БІЛЕНКО Володимиру Григорійовичу

(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема дисертації Алгоритм адаптації радіолокаційної системи
виявлення БПЛА до роботи в умовах радіопротидії

науковий керівник дисертації

Чмельов Вячеслав Орійович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом по університету від «08» листопада 2024 р. №5023-с


2. Термін подання студентом дисертації 06 грудня 2024 року
3. Об’єкт дослідження: Робота РЛС в умовах радіопротидії.
4. Вихідні дані: Сучасні радіолокаційні системи що використовують методи адаптації та просторової обробки.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 1. Розглянути сучасні радіолокаційні системи виявлення БПЛА;
 2. Дослідити розвиток систем радіопротидії роботі РЛС та іншим радіосистемам;
 3. Вивчити підходи до боротьби з активними завадами в радіолокаційних системах;
 4. Дослідити підходи до просторової селекції джерел активних завад;

5. Виконати моделювання роботи цифрової ФАР з адаптивною діаграмою спрямованості;
 6. Провести моделювання роботи автокомпенсатора активних завад;
 7. Виконати компаративний аналіз підходів до боротьби з активними завадами;
 8. Розробити алгоритм просторової адаптації антенної системи РЛС.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: розроблена блок-схема алгоритму адаптації радіолокаційної системи, слайди презентації результатів роботи.
7. Орієнтовний перелік публікацій: _____
8. Консультанти розділів дисертації: науково-педагогічні працівники радіотехнічного факультету.
9. Дата видачі завдання: 01 жовтня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання та пошук джерел інформації	01 жовтня 2024 р. по 18 жовтня 2024 р.	
2	Виконання завдань 1 розділу	18 жовтня 2024 р. по 25 жовтня 2024 р.	
3	Виконання завдань 2 розділу	25 жовтня 2024 р. по 5 листопада 2024 р.	
4	Виконання завдань 3 розділу	5 листопада по 12 листопада 2024 р.	
5	Виконання завдань 4 розділу	12 листопада по 20 листопада 2024 р.	
6	Оформлення магістерської дисертації згідно до вимог та методичних рекомендацій	20 листопада по 30 листопада 2024 р.	
7	Подання магістерської дисертації керівнику на підготовку відгука	01 грудня 2024 р.	
8	Підготовка результатів роботи до попереднього захисту	01 грудня 2024 р. по 06 грудня 2024 р.	
9	Попередній захист результатів роботи	06 грудня 2024 р.	
10	Подання магістерської дисертації на рецензію	09 грудня 2024 р.	
11	Подання магістерської дисертації на перевірку дотримання академічної доброчесності	10 грудня 2024 р.	

Студент


(підпис)

Володимир БІЛЕНКО

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник


(підпис)

Вячеслав ЧМЕЛЬОВ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми дослідження: В останні роки БПЛА стали невід'ємною частиною військових і цивільних операцій, проте їх використання супроводжується активним розвитком засобів радіоелектронної боротьби, які суттєво ускладнюють процес їх виявлення та нейтралізації. В умовах сьогодення виникає критична необхідність у вдосконаленні радіолокаційних систем виявлення БПЛА, оскільки сучасні засоби радіопротидії дозволяють забезпечити широке використання методів маскування радіосигналів, постановку активних і пасивних завад, застосування технології глушіння та відбивання сигналів. Ці методи створюють для безпілотних літальних апаратів умови для уникнення виявлення, або зменшують точність і надійність їх виявлення радіолокаційними системами.

У магістерській дисертації розглядаються сучасні підходи до адаптації радіолокаційних систем виявлення безпілотних літальних апаратів в умовах радіоелектронної протидії. Зокрема, досліджуються методи просторової селекції сигналів, боротьби з активними завадами та моделювання роботи методів адаптації

Мета дисертаційної роботи: розробити алгоритм адаптації радіолокаційної системи виявлення БПЛА до умов складної радіоелектронної обстановки.

Об'єкт дослідження: Робота РЛС в умовах радіопротидії.

Предмет дослідження: Адаптація РЛС до зміни завадо-цільової обстановки.

Завдання:

1. Розглянути сучасні радіолокаційні системи виявлення БПЛА
2. Дослідити розвиток систем радіопротидії роботі РЛС та іншим радіосистемам
3. Вивчити підходи до боротьби з активними завадами в радіолокаційних системах
4. Дослідити підходи до просторової селекції джерел активних завад
5. Моделювання роботи цифрової ФАР з адаптивною діаграмою спрямованості
6. Моделювання роботи автокомпенсатора активних завад
7. Провести компаративний аналіз підходів до боротьби з активними завадами

8. Розробка алгоритму просторової адаптації антенної системи РЛС

Магістерська дисертація складається з вступу, чотирьох розділів та висновків. Повний обсяг дисертації складає 72 сторінки, в тому числі 62 сторінки основного тексту, 2 таблиці, 26 рисунків, 2 сторінки використаних джерел.

Ключові слова: радіолокаційна система, адаптивні алгоритми, радіоелектронна боротьба, активні завади, автокомпенсатори.

ABSTRACT

The relevance of the research topic: In recent years, UAVs have become an integral part of military and civilian operations, but their use is accompanied by the active development of electronic warfare, which significantly complicates the process of detecting and neutralizing them. Today, there is a critical need to improve radar systems for detecting UAVs, as modern means of radio countermeasures allow for the widespread use of radio signal masking methods, active and passive jamming, and the use of jamming and signal reflection technologies. These methods create conditions for unmanned aerial vehicles to avoid detection or reduce the accuracy and reliability of their detection by radar systems.

The master's thesis examines modern approaches to the adaptation of radar systems for detecting unmanned aerial vehicles in the face of electronic countermeasures. In particular, the methods of spatial signal selection, combating active interference and modeling the operation of adaptation methods are studied.

The purpose of the dissertation: to develop an algorithm for adapting the radar system for detecting UAVs to the conditions of a complex electronic environment.

Object of research: Radar operation in conditions of radio jamming.

Subject of research: Adaptation of the radar to changing jamming and target conditions.

Tasks:

1. To consider modern radar systems for UAV detection
2. Investigate the development of radio countermeasures against radar and other radio systems
3. To study approaches to combating active interference in radar systems
4. To study approaches to spatial selection of active interference sources
5. Modeling the operation of a digital radar with an adaptive beamforming pattern
6. Modeling the operation of an auto-compensator for active interference
7. Conduct a comparative analysis of approaches to combating active interference
8. Development of an algorithm for spatial adaptation of the radar antenna system

The master's thesis consists of an introduction, four chapters and conclusions. The total volume of the thesis is 73 pages, including 63 pages of the main text, 2 tables, 26 figures, 2 pages of references.

Key words: radar system, adaptive algorithms, electronic warfare, active jammers, autocompensators.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	9
1 ЗАСАДИ РОБОТИ РЛС ПО ВИЯВЛЕННЮ БПЛА.....	12
1.1 Сучасні радіолокаційні системи виявлення БПЛА	12
1.2 Розвиток систем радіопротидії роботі РЛС та іншим радіосистемам...	20
1.3 Висновок	26
2 БОРОТЬБА З АКТИВНИМИ ЗАВАДАМИ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	27
2.1 Підходи до боротьби з активними завадами в радіолокаційних системах	27
2.2 Суть проблеми просторової селекції сигналів та завад	32
2.3 Висновок	36
3 ЦИФРОВІ СИСТЕМИ АДАПТАЦІЇ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ АНТЕННИХ СИСТЕМ РЛС	38
3.1 Компенсація сигналів активних завад	38
3.2 Багатоканальний кореляційний автокомпенсатор.....	40
3.3 Конфігурація автокомпенсатору у вигляді адаптивного фільтру.....	46
3.4 Висновки	52
4 КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ З ВІДОМИМИ.....	54
4.1 Перевірка ефективності запропонованого підходу	54
4.2 Формування та опис алгоритму.....	63
4.3 Висновки	67
ВИСНОВКИ.....	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	70
ДОДАТОК А.....	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РЛС – Радіолокаційна система

БПЛА – Безпілотний літальний апарат

РЕБ – Радіоелектронна боротьба

ЕПР – Ефективна площа розсіювання

ФАР – фазована антенна решітка

АР – антенна решітка

ДН – діаграма направленості

АКЗ – автокомпенсатор завад

МАРП – миттєве автоматичне регулювання підсилення

ШАРП – шумове автоматичне регулювання підсилення

АШЗ – активна шумова завада

ШП – шумова перешкода

МНК – метод найменших квадратів

РМНК – рекурентний метод найменших квадратів

ВСТУП

Сучасні радіолокаційні системи займають ключове місце в забезпеченні національної безпеки та обороноздатності країни, виконуючи завдання з виявлення, відстеження та ідентифікації цілей у повітряному просторі. Однак сучасні реалії ведення бойових дій та швидкий розвиток технологій радіоелектронної боротьби ставлять перед радіолокаційними системами (РЛС) нові виклики. Наразі противник активно застосовує засоби радіоелектронної боротьби, які можуть вносити значний вплив та ускладнити роботу радарів, створюючи перешкоди та заважаючи ефективному моніторингу.

За умов швидкого розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та їх широкого застосування в цивільних та військових цілях все частіше виникає необхідність у створенні високоефективних систем виявлення та протидії цим комплексам. Радіолокаційні системи відіграють важливу роль у забезпеченні моніторингу повітряного простору та своєчасному виявленню подібних об'єктів. З підвищенням рівня складності засобів радіоелектронної боротьби, що застосовуються для маскуванню та захисту БПЛА від виявлення, радіолокаційні системи стикаються з новими викликами, пов'язаними із зменшенням ефективності їх роботи.

Одна з основних загроз – це активні та пасивні методи радіопротидії, які можуть знизити точність та надійність виявлення безпілотних літальних апаратів. Для подолання цієї проблеми необхідно впроваджувати адаптивні алгоритми що здатні ефективно змінювати свої параметри в реальному часі з урахуванням умов радіоелектронної обстановки. Такі алгоритми мають забезпечити підвищену стійкість систем виявлення до зовнішніх завад та зберігати високу продуктивність в умовах складних радіоелектронних середовищ. В умовах застосування потужних перешкод і активних засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), традиційні методи обробки сигналів можуть виявитися недостатньо ефективними. Завдяки розвитку цифрових технологій, зокрема адаптивних алгоритмів, виникає можливість підвищення стійкості РЛС до різноманітних видів завад. Зокрема, адаптивні алгоритми здатні динамічно змінювати параметри роботи РЛС залежно від типу, сили та характеру перешкод, що дозволяє забезпечити надійне виявлення та відстеження цілей на у складних радіоелектронних умовах.

У зв'язку з цим тема дослідження набуває особливої актуальності, оскільки існує гостра потреба у вдосконаленні методів і засобів виявлення безпілотних літальних апаратів, здатних забезпечити працездатність в умовах активної радіоелектронної боротьби. Метою цієї роботи є розробка алгоритму адаптації радіолокаційної системи виявлення безпілотних літальних апаратів до роботи в складній радіоелектронній обстановці, що дозволить підвищити її ефективність та надійність.

Існуючі радіолокаційні системи базуються на певних алгоритмах обробки сигналів, які ефективні в умовах відсутності зовнішніх завад, але значно втрачають свою продуктивність в умовах активної радіоелектронної протидії. Критичний аналіз наявних методів виявлення БПЛА показує, що більшість із них зосереджена на поліпшенні характеристик окремих сенсорів або застосуванні різноманітних частотних діапазонів для мінімізації впливу радіоелектронних завад. Наприклад, використання багатодіапазонних сенсорів та оптичних камер дозволяє знизити вплив завад. Проте, такі рішення не можуть забезпечити достатньої стійкості до складної, динамічної радіопротидії, що застосовуються у сучасних конфліктах.

Головна сутність проблеми полягає в тому, що наявні системи виявлення БПЛА не здатні своєчасно і точно адаптуватися до умов радіоелектронної боротьби. Використання стандартних алгоритмів часто призводить до втрати або спотворення даних, що унеможливорює своєчасне реагування на загрози. Таким чином, науковий пошук спрямований на розробку ефективного адаптивного алгоритму, здатного миттєво реагувати на зміни радіоелектронної обстановки, що дозволить підвищити надійність і ефективність систем виявлення БПЛА.

Мета дисертаційної роботи: розробити алгоритм адаптації радіолокаційної системи виявлення БПЛА до умов складної радіоелектронної обстановки.

Об'єкт дослідження: Робота РЛС в умовах радіопротидії.

Предмет дослідження: Адаптація РЛС до зміни завадо-цільової обстановки.

Завдання:

1. Розглянути сучасні радіолокаційні системи виявлення БПЛА
2. Дослідити розвиток систем радіопротидії роботі РЛС та іншим радіосистемам

3. Вивчити підходи до боротьби з активними завадами в радіолокаційних системах
4. Дослідити підходи до просторової селекції джерел активних завад
5. Моделювання роботи цифрової ФАР з адаптивною діаграмою спрямованості
6. Моделювання роботи автокомпенсатора активних завад
7. Провести компаративний аналіз підходів до боротьби з активними завадами
8. Розробка алгоритму просторової адаптації антенної системи РЛС

Результатом проведення дослідження теми магістерської дисертації повинна бути розроблена схема структурна багатоканального автокомпенсатора активних шумових завад, алгоритм адаптації радіолокаційної системи виявлення БПЛА до роботи в умовах радіопротидії.

1 ЗАСАДИ РОБОТИ РЛС ПО ВИЯВЛЕННЮ БПЛА

1.1 Сучасні радіолокаційні системи виявлення БПЛА

Засади роботи радіолокаційних станцій для виявлення безпілотних літальних апаратів базуються на принципах радіолокації з урахуванням специфіки малорозмірних та цілей з низькою швидкістю, до яких можна віднести дрони мультироторного типу та значну кількість БПЛА літакового типу. Виявлення таких об'єктів є складним завданням, оскільки вони мають невеликі розміри, зазвичай пересуваються на низьких висотах та використовують складний рельєф місцевості для маскування. Також, в умовах сьогодення є актуальним питання протидії засобам радіоелектронної боротьби, оскільки розвиток систем постановки перешкод не стоїть на місці. Впроваджуються нові технічні рішення та розробляються тактики ведення радіоелектронної боротьби, що створює нові виклики для безперешкодного моніторингу повітряного простору.

Основний принцип побудови РЛС не є складним, але в багатьох спеціальних випадках реалізація є складним завданням. Радіолокаційна станція випромінює зондуючий сигнал та виявляє відбитий сигнал, а також визначає його характеристики. Для визначення характеристик цілі використовуються радіолокаційні зондуючі сигнали, що формуються та спрямовуються в заданий напрямок. [1]

Під час супроводження цілі найбільш часто використовується сумарний відбитий сигнал. Такий спосіб має назву «супроводження по відбитому сигналу», на відміну від супроводження по сигналу маяка, коли на об'єкті супроводження встановлений маяк або відповідач, що створює більш сильний сигнал. Відбитий сигнал від складної цілі буде відрізнятися від сигналу точкового джерела модуляцією, що викликає зміни амплітуди та відносної фази сигналів, відбитих від окремих ділянок об'єкту. Основним механізмом того, через що виникає модуляція відбитого сигналу є рух цілі, а саме тангаж, крен, ривки, що призводить до зміни дальності окремих елементів цілі відносно радіолокаційної станції. [1]

Сучасні системи виявлення БПЛА майже не відрізняються від традиційних радарів, але особливістю є здатність виявляти цілі зі значно меншою ефективною площею розсіювання (ЕПР), та необхідність роботи на низьких висотах. Відповідно,

радіолокаційні системи такого призначення адаптують під ці умови і використовують спеціальні технології для забезпечення надійного виявлення.

Радіолокаційні станції є ефективним засобом виявлення малопомітних апаратів, відповідно, зазвичай вони також здатні забезпечити виявлення об'єкту що знаходиться в режимі радіомовчання, коли засіб не керується оператором з наземного терміналу, а рухається по заданих координатах.

Комплекси з виявлення повітряних цілей, що покладаються лише на дані системи радіолокаційного виявлення БПЛА мають суттєвий недолік – це велика кількість хибних спрацювань. Подібні радарні станції можуть фіксувати не лише БПЛА, але й шкідливі для роботи систем виявлення сигнали, що зменшують ефективність виявлення. В зв'язку з цим, необхідно виконувати відповідні заходи для підвищення селекції корисного сигналу, з метою уникнення негативного впливу подібних сигналів на радіотехнічні системи виявлення. Для кращого розуміння розглянемо сучасні, існуючі радіолокаційні системи:

АСРР «Кольчуга» (Україна) - автоматизована станція радіотехнічної розвідки, за способом дії є пасивним радаром. Комплекс, що складається з трьох радіолокаційних станцій «Кольчуга», дозволяє виявляти наземні та надводні цілі та відстежувати їх переміщення в радіусі 600 км.

Сама станція здатна виявити лише напрямок на ціль, у зв'язку з цим, для повного визначення відстані, швидкості, висоти та напрямку руху потрібне одночасне використання не менше трьох таких систем.

Оскільки "Кольчуга" працює пасивно, тобто не випромінює радіохвиль, а лише приймає сигнали, вона не створює випромінювання, на яке можна було б спрямувати перешкоди. Це означає що ворогу неможливо навести свої засоби протидії по зондуєчому сигналу, оскільки він не випромінюється. Також складніше «засліпити» станцію перешкодами на конкретній частоті, як це відбувається з активними радарми, які випромінюють власні сигнали.

Однак, застосування широкосмугової шумової завади може мати вплив на режим роботи РЛС, тому необхідно забезпечити завадостійкість інтегруванням певних технічних рішень, або методів адаптації до складних радіоелектронних умов.

За технічними характеристиками дана система має радіус дії до 600 км. у глибину території, 150 км. по фронту, але для повітряних цілей на висоті до 10 км.



Рисунок 1.1 – РЛС «Кольчуга» на шасі КрАЗ-6322.

Радіус дії в глибину території становить до 800 км., Сама ж станція оснащена антенами метрового, дециметрового та сантиметрового діапазонів, які забезпечують високу радіочутливість в діапазоні від 110 дБ/Вт до 155 дБ/Вт, залежно від частоти. Модифікована станція «Кольчуга-М» здатна відстежувати імпульсне та безперервне випромінювання на частотах 135 – 170, 230 – 470 та 750 – 18000 МГц [2].

Станція "Кольчуга" здатна виявляти безпілотні літальні апарати, але з певними обмеженнями, які залежать від типу літального апарату та його активності в радіочастотному діапазоні. Основний принцип роботи "Кольчуги" базується на перехопленні випромінюваних сигналів, а не на активному випромінюванні радіохвиль, що робить її менш ефективною проти БПЛА, які не випромінюють електромагнітних сигналів.

AN/MPQ-64 Sentinel (США) – це тривимірна система з фазованою антенною решіткою (ФАР), яка працює в X-діапазоні (8 – 12 ГГц). Призначена для автоматичного виявлення, відстеження, ідентифікації та повідомлення про загрози в повітрі.

Цей оглядовий радар здатен виявляти та загрози на відстані, яка в кілька разів перевищує радіус дії зброї малої дальності, що забезпечує раннє попередження та ураження загроз на максимальній відстані.

Командні пункти Sentinel активують команди керування зброєю та забезпечують сполучення ціль-зброя. Конфігурація Sentinel також дозволяє керувати зброєю, радаром та командними пунктами з різних позицій на полі бою.



Рисунок 1.2 – AN/MPQ-64 Sentinel

Sentinel забезпечує виявлення та спостереження цілей до різноманітної зброї, включаючи Hawk, Surface Launched AMRAAM, Stinger, зенітні гармати та іншу зброю класу SHORAD/VSHORAD. Sentinel встановлено на 2,5-тонному причепі з бортовим генератором електроенергії, який буксирується броньованою вантажівкою сімейства середніх тактичних машин (FMTV).

Завдяки точним і швидким реакціям Sentinel вловлює цілі на достатній відстані від дружніх сил, щоб забезпечити достатній час реакції для зброї протиповітряної оборони, щоб вразити цілі на оптимальній відстані. Система також включає інтегровану функцію ідентифікації свій-чужий. [3].

Фактично, ця станція є радаром, в якому визначення відстані до об'єкту виявлення виконується за рахунок вимірювання часу затримки відбитого від цілі зондуючого сигналу, а визначення швидкості цілі по зсуву частоти відбитого сигналу, що виникає внаслідок ефекту Доплера. Така система поєднує функції імпульсних

радарів та радарів безперервного випромінювання, які раніше розділялися через складність їх сумісної реалізації [1, 3] .

Відповідно, такі станції є вразливими до генерації потужних шумових перешкод та постановки фальшивих цілей, що може заплутати радар, змусивши його виявляти хибні цілі та ускладнити виділення корисного сигналу. З урахуванням цього, для збільшення ефективності роботи такої системи необхідно застосовувати методи та алгоритми для покращення селективності, що дозволить більш якісно виділяти корисний сигнал від завад в умовах складної радіоелектронної обстановки.

RADA Multi-Mission Hemispheric Radar (MHR) (Ізраїль) – передовий, багатоцільовий полусферичний радар для виявлення безпілотних літальних апаратів, гелікоптерів та ракет.



Рисунок 1.3 – RADA Multi-Mission Hemispheric Radar (MHR)

Із заявлених ключових особливостей є антена з електронним скануванням (активна електронна решітка), усунення перешкод завдяки вдосконаленій топології антени, можливості електронної протидії, здатність відстежувати повне динамічне зображення тактичної обстановки та можливість мобільного застосування на пересувних засобах. За технічними характеристиками MHR від RADA забезпечує 360-

градусне спостереження та виявляє дрони на відстані 3-5 кілометрів. Система сигнальної розвідки разом з електрооптичними датчиками забезпечує додаткові рівні класифікації та ідентифікації загроз. Радар здатен працювати з багатьма цілями одночасно та ефективно визначає об'єкти завдяки системі кругового огляду. Забезпечує швидке сканування та низький рівень помилкових спрацювань [4].

З огляду на те, що система здатна виконувати купольне сканування та відстеження багатьох цілей одночасно виникає ризик значного впливу засобів радіоелектронної боротьби, що в свою чергу може значно впливати на ефективність виявлення повітряних об'єктів, оскільки система є потенційно вразливою до застосування багатопромених шумових завад. Таким чином, радіолокаційний комплекс може сприймати хибні сигнали за справжні цілі, що значно зменшує його ефективність. Для боротьби з цим впливом доцільно інтегрувати методи адаптації до таких умов, щоб збільшити селективні здібності засобу.

РЛС TRML-3D (Німеччина) – це багатосистемна радіолокаційна система з фазованою антенною решіткою для спостереження та захоплення цілей. Вона призначена для виявлення цілей на малих і середніх відстанях та здатна відстежувати та класифікувати різні типи цілей [5].



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд TRML-3D

TRML-3D був розроблений для інтеграції в системи протиповітряної оборони малої та середньої дальності або для роботи в автономному режимі.

Він призначений для сил швидкого реагування завдяки своїм функціям швидкого розгортання та повністю сумісний з іншими оглядовими радарними системами та оперативними центрами. Відповідно, кожен стаціонарний пристрій може обмінюватись інформацією з двома сусідніми радарними. За заявленими характеристиками радіус дії радару перевищує 200 км., а повне сканування триває від 2 до 15 секунд [6].

ELM-2026B (Ізраїль) – це сучасний радар виробництва ізраїльської компанії ELTA Systems Ltd, що входить до Israel Aerospace Industries (IAI). Радіолокаційний комплекс ELM-2026B призначений для виявлення малорозмірних повітряних цілей на низьких висотах, зокрема безпілотних літальних апаратів, гелікоптерів та інших маловисотних загроз.



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд ELM-2026B

Завдяки високій чутливості, мобільності та можливості функціонування в умовах щільної міської забудови, ELM-2026B широко використовується в системах протиповітряної оборони, для охорони кордонів, захисту критично важливих об'єктів та моніторингу повітряного простору. Радар використовує багатопроменеве

охоплення місця за допомогою цифрового формування променя і охоплення азимута на 360 градусів шляхом обертання антени, забезпечуючи точні вимірювання швидкості, дальності, азимута цілі. ELM-2026B може бути розгорнутий на різних транспортних платформах, що забезпечує гнучкість у розгортанні й швидкий доступ до різних зон. Також, підтримується можливість інтеграції з іншими системами оборони, що дозволяє використовувати радар як частину комплексної системи моніторингу повітряного простору. Виробник зазначає що система є стійкою до впливу РЕБ, здатна ідентифікувати перешкоди та застосовує сучасні технологічні рішення для протидії перешкодам, що забезпечує її ефективну роботу у випадках наявності інтенсивних радіоелектронних перешкод [7].

Аналізуючи вищенаведену інформацію про сучасні радіолокаційні станції, що орієнтовані на виявлення малорозмірних і маловисотних цілей можна зробити кілька важливих висновків щодо тенденції та вимог що ставляться до сучасних РЛС. Існує велика різноманітність засобів виявлення, які мають власні особливості та конструктивні рішення, а даний тип радіотехнічних систем дедалі частіше стикається з умовами складної радіоелектронної обстановки, коли противник активно використовує засоби РЕБ. Цей фактор змушує виробників шукати технічні рішення, що забезпечать стійкий режим роботи та зменшать вплив ворожих засобів на ефективність роботи власних систем.

Ефективність роботи радіолокаційних станцій в складних умовах значною мірою залежить від здатності адаптуватися до різних видів перешкод і змінювати свої параметри роботи в режимі реального часу. Наприклад, системи, як ELM-2026B, мають вбудовані алгоритми цифрової обробки сигналів, що дозволяють фільтрувати перешкоди та підтримувати високу точність виявлення навіть за наявності активних завад. Тому одним із ключових напрямків розвитку РЛС є підвищення їхньої адаптивності та стійкості до перешкод.

Пасивні РЛС, такі як «Кольчуга», мають перевагу в умовах складної радіоелектронної обстановки, оскільки вони не випромінюють власних сигналів і за рахунок цього забезпечується захист від засобів створення перешкод противника. Пасивні системи ефективні для моніторингу великих зон і відстеження об'єктів, які

активно випромінюють сигнали, однак вони мають обмеження при виявленні цілей, які не випромінюють (наприклад, пасивні цілі, безпілотні літальні апарати, що мають інерціальні системи навігації, тобто не мають потреби у наявності зовнішніх орієнтирів або сигналів ззовні). Все ж таки, при наявності інтенсивного ширококутового шуму в роботі станції також можуть з'явитися певні труднощі, що змушує шукати можливості фільтрації та адаптації, щоб виділити потрібні сигнали серед загальних перешкод.

Зважаючи на сучасні загрози, більшість РЛС розробляються з урахуванням забезпечення мобільності, легкості розгортання з транспортного положення, та здатності виконувати кілька завдань одночасно. Наприклад, система ELM-2026В може виявляти як повітряні, так і наземні цілі, забезпечуючи круговий огляд та відстеження кількох цілей одночасно, але при цьому також виникає питання забезпечення високої селективності аби уникнути впливу ворожих систем протидії.

Також, важливо відмітити тенденцію до можливості інтеграції радіолокаційних станцій з іншими системами спостереження та протиповітряної оборони завдяки використанню стандартизованих інтерфейсів. Це дозволяє забезпечувати комплексну картину повітряної обстановки та підвищує швидкість реагування на загрози.

Аналіз сучасних РЛС для виявлення БПЛА та інших малорозмірних цілей показує, що їхня ефективність забезпечується поєднанням адаптивних алгоритмів, мобільності, багатofункціональності та здатності інтеграції з іншими системами оборони. Подальший розвиток РЛС зосереджується на підвищенні стійкості до перешкод, створенні комбінованих активних і пасивних систем, а також на впровадженні більш просунутих алгоритмів обробки сигналів для виявлення малорозмірних і малопомітних цілей в умовах складної радіоелектронної обстановки.

1.2 Розвиток систем радіопротидії роботі РЛС та іншим радіосистемам

Розвиток систем радіопротидії роботі РЛС та іншим радіосистемам стосується еволюції технологій, які спрямовані на блокування або ускладнення роботи радіолокаційних систем та інших радіосистем. Для придушення роботи радіолокаційних систем використовуються різноманітні види активних перешкод, які спрямовані на

погіршення або блокування функціонування радарів противника. Активні радіолокаційні перешкоди - це форма електронної протидії, призначена для зниження ефективності радіолокаційних систем противника. Зазвичай це робиться шляхом випромінювання радіосигналів на певних частотах, які погіршують здатність радіолокаційних систем точно виявляти та відображати об'єкти в робочому середовищі. Це може генерувати «шум» у радіочастотному діапазоні, який введе в оману противника та відповідно вплине на прийняття ним рішення [8].

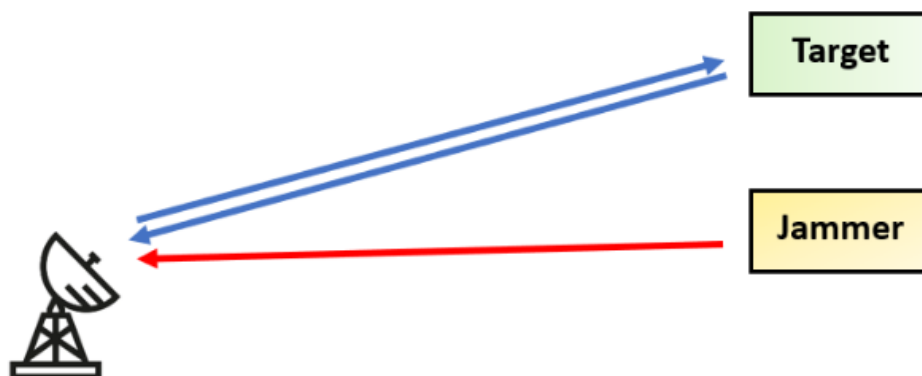


Рисунок 1.6 – Принцип роботи системи радіолокаційних перешкод

З рис. 1.6 можна наглядно побачити загальний принцип постановки радіолокаційних перешкод, який передбачає передачу хибних сигналів, що поступають на антенну систему приймача, що негативно впливає на режим роботи.

Активні завади класифікуються за різними критеріями, такими як:

- тип взаємодії із сигналом: це можуть бути адитивні (додаються до сигналу) або мультиплікативні (накладаються на сигнал) завади;
- походження: джерелом завади може бути власний генератор або зовнішнє джерело;
- спосіб створення: завади генеруються шляхом додавання або модуляції сигналу;
- ефект впливу: деякі завади маскують корисний сигнал, а інші – імітують помилкову інформацію;
- співвідношення спектрів сигналів: завади можуть охоплювати той самий спектр, що й корисний сигнал, або ж бути значно ширшими;
- характер випромінювання і місце виникнення: це включає як сам характер випромінювання, так і місце генерації завади.

За типами:

— маскувальні завади: ці завади приховують корисний сигнал, знижуючи його видимість і якість інформації. Чим вища потужність завади, тим сильніше вона перекриває сигнал, а при надмірній потужності може навіть повністю його подавити;

— імітаційні завади: створюють фальшиві сигнали, які схожі на корисний сигнал РЛС, і вводять помилкову інформацію. Це може викликати появу хибних цілей на радарі та знижує ефективність систем управління зброєю, зриваючи супровід цілей або перенаправляючи зброю на фальшиві цілі.

За спектром:

— загороджувальні завади: мають широкий спектр, який перекриває декілька частот одночасно, що дозволяє приглушити кілька радарів. Проте з розширенням спектра їхня щільність потужності знижується.

— прицільні завади: мають спектр, близький до спектра корисного сигналу, що забезпечує високу щільність потужності і, відповідно, ефективне приглушення конкретної РЛС [9].

Ця класифікація допомагає зрозуміти, як різні типи завад діють на радіолокаційні системи, зокрема у військових умовах, для порушення роботи РЛС і введення в оману. Надалі розглянемо генератори завад, які призначені для створення негативного впливу на радіотехнічні системи.

Генератори завад – іншими словами можна назвати постановниками завад. Це спеціальні пристрої, які створюють радіоперешкоди, щоб завадити стабільному функціонуванню радіолокаційних систем, або інших електронних систем супротивника. Залежно від їхнього призначення, джерела живлення та способу встановлення, генератори завад можуть мати різні конструкції та характеристики.

Активні завади можуть створюватися різними типами генераторів завад: стаціонарними, літаковими, мобільними та морськими. Вибір типу генератора залежить від тактичних потреб і умов, у яких застосовується система радіоелектронної боротьби [1]. Для кращого розуміння розглянемо основні типи генераторів, які створюють завади.

Стаціонарні генератори завад:

Ці пристрої розташовуються на фіксованих позиціях, таких як наземні бази, і зазвичай мають високі потужності, оскільки можуть підключатися до наземних джерел живлення. Схожий принцип відповідає й морським системам. Приклад стаціонарних генераторів завад наведено на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – автоматизована станція постановки перешкод Р-330Ж

Наведений комплекс у своєму складі має два основні вузли: колісна платформа з робочим місцем оператора та причепа, що оснащений антенами для постановки активних перешкод.

З відкритих джерел відомо, що система здатна виконувати виявлення, відстеження та придушення супутникового зв'язку, мобільних каналів зв'язку та навігаційних систем.

Комплекс має можливість створювати перешкоди вищенаведеним системам в межах свого робочого діапазону, який охоплює діапазон хвиль від 100 МГц до 2 ГГц.

Наведений тип генераторів завад використовуються для створення інтенсивних широкосмугових завад, здатних перекривати великі території. Завдяки високій потужності, стаціонарні генератори часто застосовують для загороджувальних завад, що охоплюють широкі частотні діапазони. Такі системи застосовуються для захисту стратегічних об'єктів, командних пунктів бригадного чи дивізійного рівня від ворожого спостереження та наведення високоточного озброєння [10].

Мобільні генератори завад:

Такий тип генераторів завад зазвичай встановлюється на транспортні засоби, такі як автомобілі або броньовані платформи.



Рисунок 1.8 – Наземна мобільна частина комплексу AN/MLQ-40(V) Prophet

Прикладом такого типу генераторів завад є система AN/MLQ-40(V) Prophet, яку зображено на рис. 1.8. Наведений комплекс є прикладом базової наземної системи тактичного рівня армії США.

Основним завданням такого типу систем є створення перешкод у районах бойових дій. мають обмежену потужність у порівнянні зі стаціонарними системами. Завдяки своїй мобільності, ці генератори можуть швидко змінювати позиції, що дозволяє їм уникати виявлення і знищення. Мобільні генератори завад часто використовуються для прицільних завад, які можуть налаштовуватись на певні частоти, де працюють радіолокаційні системи противника [11].

Авіаційні генератори завад:

Такий тип генераторів завад встановлюються на літаках, безпілотних системах або вертольотах і можуть створювати завади під час польоту. Завдяки висоті по-

льоту, авіаційні генератори завад можуть перекривати великі території та працювати на значній відстані від об'єктів, що захищаються. Їх часто використовують для створення імітаційних завад, які можуть імітувати цілі або створювати хибні сигнали, що заплутує ворожі РЛС. Крім того, авіаційні генератори завад ефективні для тимчасового "засліплення" зон ворожої радіолокації, дозволяючи союзним силам безперешкодно маневрувати в районі бойових дій. Приклад такої системи наведено на рис. 1.9.



Рисунок 1.9 – Авіаційний комплекс радіоелектронної боротьби AN/ALQ-99

Наведений комплекс радіоелектронної боротьби встановлюється на літаках EA-6B Prowler, EA-18G Growler та інших. Його основна мета — створення радіоперешкод для ворожих систем радіолокації, зв'язку та наведення ракет [12].

Отже, кожен різновид генераторів завад виконує конкретні завдання, залежно від умов і потреб операції. Стационарні генератори виконують завдання з захисту стратегічних точок, мобільні генератори завад підходять для тактичних маневрів на полі бою, а авіаційні – для оперативного обману та захисту під час польотів або пересування повітряними шляхами.

1.3 Висновки

У сучасних умовах протидія засобам радіоелектронної боротьби є надзвичайно важливим питанням, оскільки постійний розвиток систем постановки перешкод створює нові виклики для безперешкодного моніторингу повітряного простору. Аналіз сучасних радіолокаційних станцій, що призначені для виявлення малорозмірних і низьковисотних цілей, демонструє значні зміни в тенденціях і вимогах до цих систем. Це вимагає від виробників пошуку нових технічних рішень для забезпечення ефективної роботи в умовах активного використання засобів РЕБ. Сучасні РЛС представлені широким спектром засобів виявлення, які мають свої конструктивні особливості. Це різноманіття обумовлює необхідність адаптації до складних радіоелектронних умов, в яких противник активно використовує засоби РЕБ.

Основними напрямками розвитку сучасних РЛС є підвищення їхньої адаптивності та стійкості до перешкод, що дозволяє забезпечити їхню ефективність у складних радіоелектронних умовах. Ефективність роботи радіолокаційних станцій значною мірою залежить від їхньої здатності адаптуватися до різних видів перешкод і змінювати параметри роботи в режимі реального часу. Вбудовані алгоритми цифрової обробки сигналів, такі як у системах ELM-2026B, є прикладом технологічних досягнень, які забезпечують фільтрацію перешкод і підтримують високу точність виявлення в умовах активних завад.

2 БОРТЬБА З АКТИВНИМИ ЗАВАДАМИ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

В сучасних радіолокаційних системах для боротьби з активними завадами застосовують різні підходи, які спрямовані на підвищення ефективності та точності роботи РЛС у складних умовах радіоелектронної боротьби. Далі розглянемо основні підходи та що вони в себе включають.

2.1 Підходи до боротьби з активними завадами в радіолокаційних системах

У реальних умовах експлуатації приймач завжди отримуватиме корисну інформацію разом із небажаними сигналами, що ускладнює коректну обробку та визначення параметрів сигналу. Проте навіть у найскладніших ситуаціях радіолокаційна станція повинна виконувати свої завдання з необхідним рівнем якості. Для цього в радіолокаційних системах застосовуються різноманітні захисні засоби, головною метою яких є виділення відбитого сигналу від цілі на тлі завад. Всі ці засоби базуються на відмінності фізичних характеристик між завадовими та корисними сигналами.

Крім технічних засобів захисту, широко використовуються організаційні методи. До них належать обмеження на вихід в ефір, організація планової зміни частотних характеристик РЛС (зміна номінальних несучих частот), а також взаємодія між декількома радіолокаційними системами. Додатково захист від завад базується на особливостях створення та властивостях завадових сигналів. Наприклад, ефективність активної спрямованої завади підвищується, якщо її характеристики максимально відповідають зондуєчому сигналу РЛС. Для цього станція постановки перешкод повинна прийняти зондуєчий сигнал, щоб визначити його параметри [12, 13].

Враховуючи направлення дослідження, більшу увагу буде приділено технічним методам захисту від завад.

Найбільш поширеними методами захисту від завад є:

— Використання рознесення робочих частот радіолокаційних станцій у широкому діапазоні для вирішення проблем електромагнітної сумісності;

- створення РЛС з можливістю гнучкого налаштування робочої частоти;
- збільшення енергетичних параметрів зондуючого сигналу та коефіцієнта підсилення антени;
- придушення активних шумових перешкод, що впливають на бокові пелюстки діаграми спрямованості антени, шляхом використання адаптивних систем з кореляційним зворотним зв'язком;
- розширення динамічного діапазону приймальних трактів за рахунок застосування схем миттєвого автоматичного регулювання підсилення (МАРП), шумового автоматичного регулювання підсилення (ШАРП) тощо;
- усунення несинхронних імпульсних завад за допомогою пристроїв, які базуються на відмінностях у параметрах одиночних корисних сигналів і перешкод (схема ШОВ (широкосмуговий фільтр – обмежувач – вузькосмуговий фільтр), схеми амплітудної селекції і ін.);
- придушення імпульсних завад через застосування схем, що враховують різницю в параметрах послідовностей корисних сигналів і завад (наприклад, частотна селекція повторення);
- використання оптимальних методів обробки, включаючи кореляційно-фільтрові системи когерентної обробки та інші фільтрові підходи [14].

Можна звернути увагу на метод розширення динамічного діапазону приймальних трактів за рахунок використання схем МАРП та ШАРП.

РЛС приймає відбиті від цілі сигнали, які можуть бути дуже різноманітні за рівнем, через що динамічного діапазону приймача з фіксованим підсиленням може бути недостатньо. Відмінності в рівнях сигналів виникають внаслідок різної ЕПР цілей, дальності до цілі, та погодних умов. Однак, найбільший вплив на рівень відбитих сигналів РЛС має саме параметр дальності до цілі. Вплив цієї характеристики значно ускладнює визначенню розміру цілі, а цей параметр необхідний для розрізнення сигналу відлуння корисних цілей від сигналів відлуння інших об'єктів. Також, важливо враховувати що характеристики багатьох радіолокаційних приймачів піддаються небажаним змінам у випадках коли динамічний діапазон сигналів що приймаються перевищує динамічний діапазон приймача [15].

Миттєве автоматичне регулювання підсилення є специфічним підходом, що дозволяє зберігати диференційне підсилення каскадів при впливі завад. Один із можливих варіантів реалізації передбачає використання схеми зі зворотним зв'язком, яка коригує від'ємне зміщення каскаду до тих пір, поки позитивні піки сигналу завади не досягнуть рівня нормальної робочої точки каскаду. Діапазон роботи МАРП буде визначається кількістю підсилювальних каскадів у проміжній частоті, що знаходяться під управлінням системи регулювання. Проте, цей метод не враховує вплив шумів та інших перешкод на параметри виявлення сигналу. Для забезпечення стабільного рівня перешкод використовується шумове автоматичне регулювання підсилення (ШАРП), де коефіцієнт підсилення налаштовується на основі виміряного рівня шуму [13].

Імпульсні завади часто виникають у радіокомунікаційних системах, наприклад, через контактну мережу на електрифікованих ділянках. Такі завади проявляються у вигляді клацань в аналогових мовних трактах або призводять до помилок у цифрових системах.

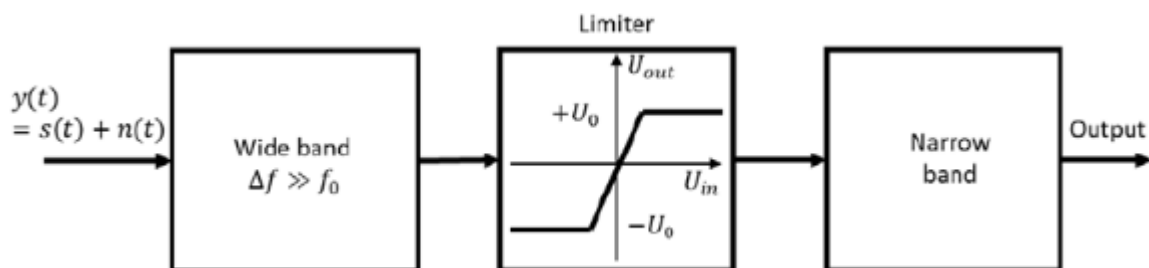


Рисунок 2.1 – Блок-схема системи придушення імпульсних завад

Схема ШОВ, яка наведена на рис. 2.1 складається з широкосмугового фільтру, обмежувача, та вузькосмугового фільтру.

Широкосмуговий фільтр пропускає широкий діапазон частот, в якому міститься корисний сигнал та імпульсні завади. Ця частина схеми необхідна для підготовки сигналу до подальшого обмеження.

Відповідно, обмежувач є основним елементом схеми. Він налаштований на певне порогове значення амплітуди сигналу, та у випадку перевищення сигналом цієї амплітуди, вона зрізається. Це дозволяє зменшити вплив імпульсних завад, які зазвичай мають вищу амплітуду, ніж корисний сигнал.

Вузькосмуговий фільтр необхідний для того, щоб пропустити лише ті частоти, які будуть характерні для корисного сигналу. Таким чином знижуються залишкові

втрати після обмежувача, та зберігається корисний сигнал із мінімальними втратами [16].

Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки, і їх ефективність може змінюватись залежно від конкретної радіолокаційної ситуації та типу завад. Проте, якщо враховувати сучасні вимоги до радіолокаційних систем, варто звернути увагу на системи адаптивної обробки сигналів, оскільки вони забезпечують універсальність та гнучкість. Замість підвищення енергії зондуючого сигналу, що потребує великих витрат енергії, адаптивні методи використовують більш економні підходи, підвищуючи якість корисного сигналу без значного збільшення енерговитрат. В свою чергу, інші методи мають певні обмеження.

Наприклад, рознесення робочих частот та перебудова частоти є ефективними методами для зменшення впливу окремих завад, але не завжди ефективні при активних широкосмугових завадах.

Підвищення енергії зондуючого сигналу, в свою чергу, не завжди є доцільним методом за рахунок технічних та матеріальних обмежень.

Серед систем адаптивної обробки можна звернути увагу на автокомпенсатори. Вони працюють за принципом адаптивної компенсації завад, тобто автоматично налаштовуються для мінімізації впливу перешкод на корисний сигнал.

Автокомпенсатор завад (АКЗ) з кореляційним зворотнім зв'язком працює за принципом просторової кореляції, яка описує зв'язок між сигналами, що прийняті різними антенами з підключеними до них приймачами.

Для функціонування автокомпенсатора потрібна наявність слабонаправленої компенсаційної антени, що буде охоплювати головним пелюстком ДН бокові пелюстки антени, як це показано на рис. 2.2.

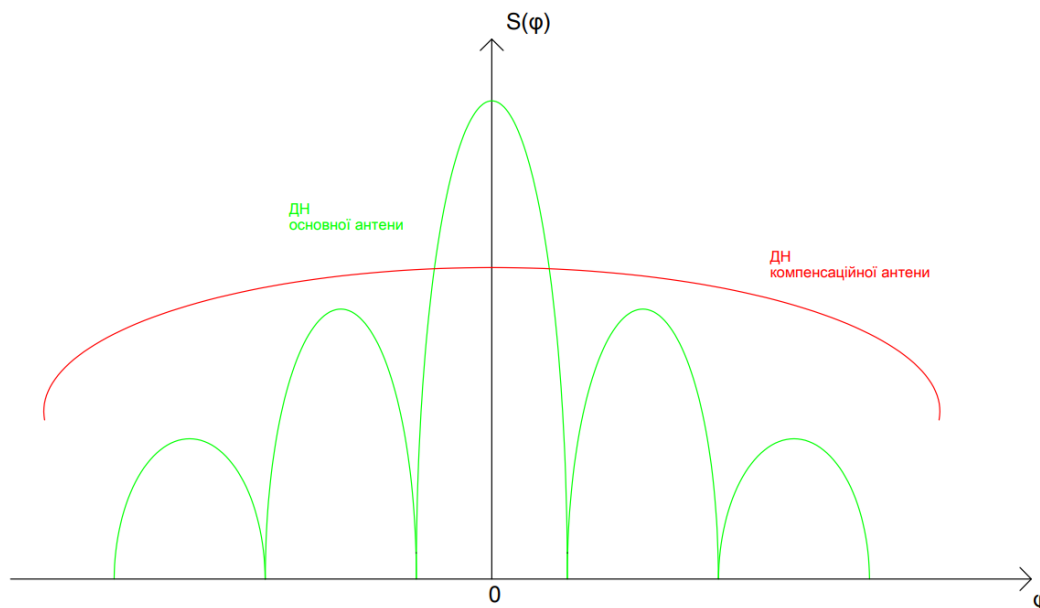


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення діаграм направленості антен

Якщо схожість прийнятих сигналів є значною, буде доцільним додати допоміжний канал з власною антеною, який буде компенсаційним каналом. Відповідно, цей канал можливо використати для компенсації завади з основному каналі. На рис. 2.3 наведено схему АКЗ зі зворотнім кореляційним зв'язком.

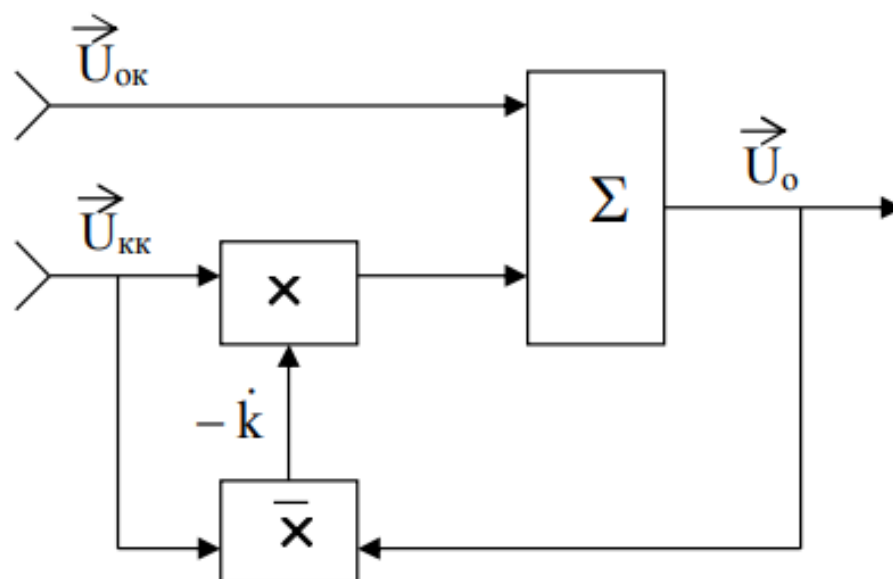


Рисунок 2.3 – Схема одноканального автокомпенсатора зі зворотнім кореляційним зв'язком.

Робота автокомпенсатора фактично є формуванням діаграми спрямованості, максимум якої буде спрямовано на ціль, а мінімум буде зорієнтовано в напрямку

джерела завади, тому прийнято казати що АКЗ формує провал в боковому пелюстку діаграми направленості в напрямку дії активної завади.

Сигнали що прийняті основним каналом РЛС $\vec{U}_{ок}(t)$, та компенсаційним каналом $\vec{U}_{кк}(t)$ надходять на пристрій суматор. На його виході формується вихідний сигнал автокомпенсатора, як наведено у рівнянні (2.1) [13]

$$\vec{U}_o(t) = \vec{U}_{ок}(t) - \dot{k} \cdot \vec{U}_{кк}(t). \quad (2.1)$$

Для формування керуючого множника \dot{k} застосовується кореляційний зворотній зв'язок. Він дозволяє визначити кореляцію $\overline{\vec{U}_o(t)\vec{U}_{кк}(t)}$, що характеризує зв'язок вихідного сигналу $\vec{U}_o(t)$ та сигналу завади $\vec{U}_{кк}(t)$ що прийнятий з компенсаційного каналу. Відповідно, кореляційний момент обертається в нуль за умови повної компенсації завади.

Обчислений кореляційний момент з точністю до постійного множника χ використовується в якості керуючого множника \dot{k}

$$\dot{k} = \chi \cdot \overline{\vec{U}_o(t)\vec{U}_{кк}(t)}. \quad (2.2)$$

Підставивши вираз (2.2) в (2.1) можна знайти вираз для вихідного сигналу АКЗ

$$\vec{U}_o(t) = \vec{U}_{ок}(t) - \frac{\chi \cdot \overline{\vec{U}_{ок}(t)\vec{U}_{кк}(t)}}{1 + \chi \left| \overline{\vec{U}_{кк}(t)} \right|^2} \cdot \vec{U}_{кк}(t). \quad (2.3)$$

З виразу (2.3) виходить, що при $\chi \rightarrow \infty$ та достатній кореляції між сигналом основного каналу $\vec{U}_{ок}(t)$ та компенсаційного каналу $\vec{U}_{кк}(t)$ відбувається повна компенсація завади, тобто $\vec{U}_o(t)$ дорівнює нулю [13, 15].

2.2 Суть проблеми просторової селекції сигналів та завад

Проблема просторової селекції сигналів у радіолокаційних системах є однією з ключових в умовах складної електромагнітної обстановки. Обробка радіолокаційних сигналів на основі антенних решіток широко застосовується в різних сферах, включаючи виявлення цілей і оцінку параметрів безпілотних літальних апаратів.

Тим не менш, в радіолокаційних системах ефективно послаблення множинних одночасних завад, особливо завад основного пелюстка, під час оцінювання параметрів цілі залишається значною технічною проблемою [17, 18].

Просторова селекція сигналів у системах радіолокації являє собою задачу відокремлення корисних сигналів від завад на основі інформації про їх напрямки. У сучасних системах радіолокації такий підхід базується на застосуванні антенних решіток, зокрема фазованих антен, які задовольняють потребу у формуванні вузьких діаграм спрямованості, та фокусуючись на сигнали що надходять з конкретного напрямку.

Приклад таких ФАР наведено на рис.2.4 та рис. 2.5 відповідно.

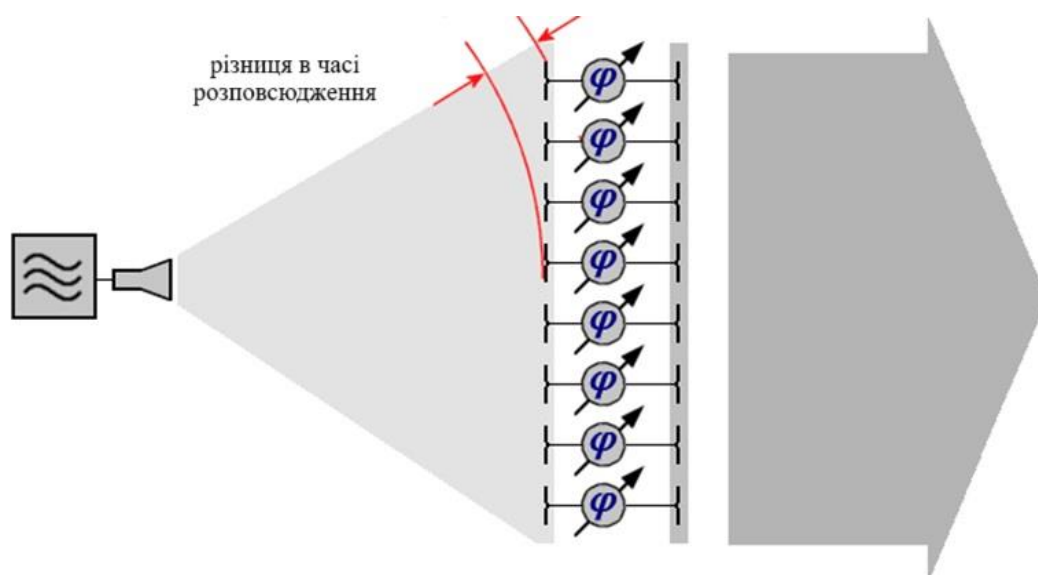


Рисунок 2.4 – Фазована антенна решітка з просторовим збудженням випромінювального типу

Просторове збудження можна вважати проміжною формою між послідовним і паралельним збудженням елементів антенної решітки.

Воно забезпечує чіткий розподіл фазових зрушень між елементами решітки, що дозволяє формувати вузькі діаграми спрямованості з високою здатністю придушення сигналів із небажаних напрямків.

Це має на меті зменшити рівень впливу завад з інших напрямків, що значно підвищить завадостійкість та точність системи. У випадку збудження випромінювального типу елементи антенної решітки розміщуються так, щоб мінімізувати

вплив небажаних сигналів. Це дозволяє ефективніше управляти направленістю випромінювання та створювати провали (нулі) діаграми спрямованості у напрямках на завади [12].

Фазовані антенні решітки з просторовим збудженням відбивального типу також відіграють важливу роль у вирішенні проблеми просторової селекції сигналів і завад у радіолокаційних системах.

Відбивальне просторове збудження дозволяє оптимізувати використання енергії випромінювання і структури діаграми спрямованості антенних решіток.

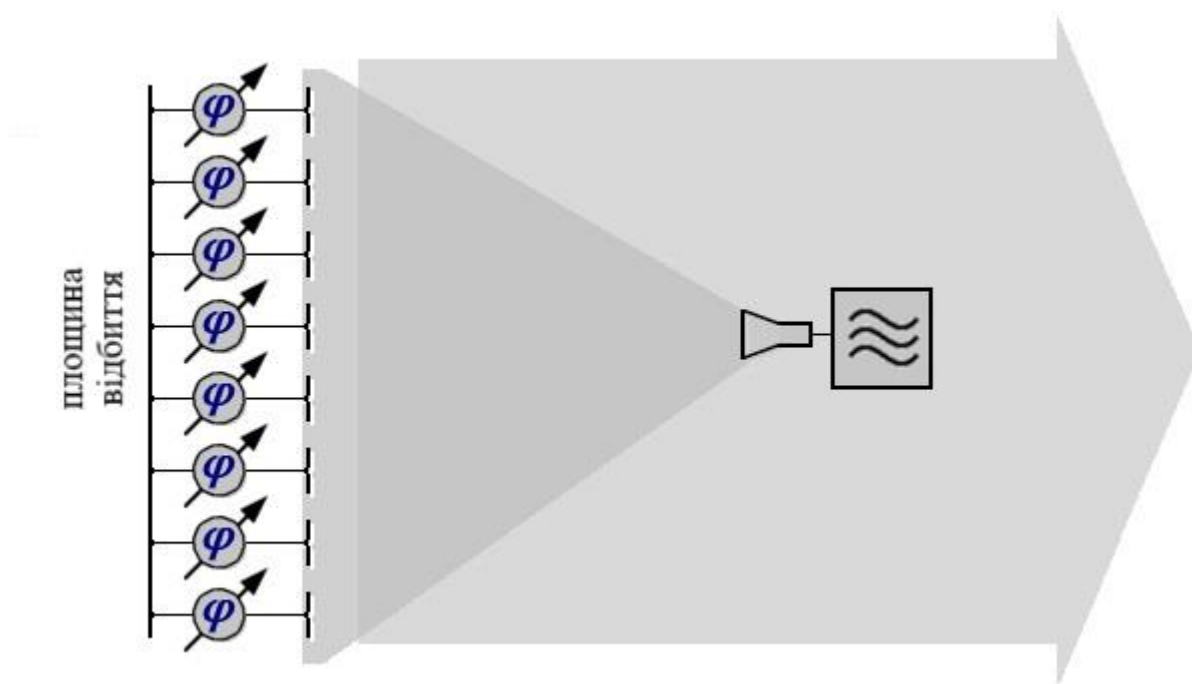


Рисунок 2.5 – Фазована антенна решітка з просторовим збудженням відбивального типу

Простір позаду антени використовується для розміщення апаратури, таких як фазообертачі, джерела живлення чи інші системні компоненти. Це дозволяє максимально ефективно використовувати доступний обсяг конструкції. У системах з відбивальним типом збудження випромінювачі розміщуються перед антенною решіткою. Це впливає на формування діаграми спрямованості, однак, в свою чергу, може викликати небажані ефекти через перевідбиття енергії в системі антени. Відповідно, так як випромінювач розташований перед решіткою, можливо виникнення стоячих хвиль, які знижують ефективність роботи антени. Це, в свою чергу, стає

значною проблемою для забезпечення чіткої селекції сигналів і зменшення впливу завад [12, 15].

Параметри фазованих антенних решіток також мають значний вплив на ефективність просторової селекції. Наприклад, ширина головної пелюстки буде визначати точність направлення прийому корисного сигналу, а коефіцієнт підсилення антен безпосередньо впливає на відношення сигнал/шум, що є критичним для роботи в умовах потужних завад.

Однак, просторова селекція сигналів не обмежується лише ізоляцією сигналів за напрямком; вона також включає інтеграцію алгоритмів цифрової обробки для підвищення ефективності радіолокаційних систем. Застосування сучасних обчислювальних методів, таких як адаптивні алгоритми, дозволяє динамічно змінювати параметри діаграми спрямованості для компенсації змін у завадово-сигнальній обстановці.

У сучасних системах радіолокації активно застосовується концепція просторово-частотної селекції. Вона дозволяє одночасно враховувати просторові (напрямок) і частотні (спектр) характеристики сигналів. Частотні методи, наприклад, ефективно використовуються для селекції сигналів у разі, якщо спектри корисного сигналу та завад перекриваються частково. Просторові ж методи дозволяють концентрувати енергію антенної системи на визначених напрямках, забезпечуючи пригнічення небажаних сигналів.

Такі комбіновані методи будуть особливо корисні в умовах багатоканальних систем, коли необхідно обробляти кілька джерел сигналів та завад одночасно.

Отже, питання просторової селекції фактично спрямоване на вирішення кількох ключових завдань:

- розмежування сигналів і завад за напрямками;
- придушення завад основного пелюстка;
- адаптивне управління діаграмою направленості.

Для випадків коли джерело корисного сигналу та генератор завад знаходяться в різних напрямках, за рахунок використання адаптивних алгоритмів з'являється можливість сконцентрувати чутливість приймача саме на корисному сигналі. Якщо

ж основні завади надходять з напрямку, близького до корисного сигналу, то за рахунок створення певних «провалів» у діаграмі спрямованості антени можливо придушити ці завади основного пелюстка ДН. Використання фазованих антенних решіток взагалі спрямоване на забезпечення в реальному часі змінювати напрямок основного променя, що дозволяє підвищити ефективність радіолокаційної системи та забезпечити якісне виконання поставлених задач в динамічних умовах постановки завад.

Застосування фазованих антенних решіток дозволяє створювати вузькі просторові діаграми спрямованості, які фокусуються на сигналах з обраного напрямку, одночасно придушуючи сигнали з інших напрямків. Це забезпечує зниження впливу завад на роботу радіолокаційної станції.

Антенні решітки (АР) що використовувались у ранніх зразках радіолокаційних систем фактично були певним набором окремих випромінюючих елементів (вібраторів). Під час опанування в радіолокації більш коротких хвиль АР були витіснені менш складними антенами. В сучасній радіолокації, завдяки появі електронно-керованих фазообертачів та перемикачів конструктори радіолокаційних систем повернулися до використання антенних решіток. Так, керуючи параметрами окремих елементів можна змінювати збудження по апертурі, та в результаті забезпечується електронне сканування діаграми направленості (ДН) [1, 18].

2.3 Висновки

У цьому розділі було розглянуто сучасні методи боротьби з активними завадами в радіолокаційних системах, спрямовані на підвищення ефективності та точності роботи у складних умовах радіоелектронної боротьби. Основний акцент зроблено на технічних підходах, які дозволяють виділяти корисний сигнал на фоні завад. Зокрема, розширення динамічного діапазону приймальних трактів, використання адаптивних систем з кореляційним зворотним зв'язком та автоматичне регулювання підсилення сприяють поліпшенню якості корисних сигналів навіть при наявності потужних завад.

Особливу увагу приділено використанню систем адаптивної обробки сигналів, які забезпечують більшу гнучкість та економію енерговитрат. Наприклад, автокомпенсатори, працюючи за принципом адаптивної компенсації, можуть ефективно мінімізувати вплив завад.

Методи просторової селекції сигналів, такі як застосування фазованих антенних решіток, також дозволяють підвищити завадостійкість шляхом адаптивного управління діаграмою спрямованості. Це дає можливість сконцентрувати чутливість приймача на корисному сигналі та придушити завади, що надходять з інших напрямків.

Таким чином, для успішного функціонування радіолокаційних систем у складних завадових умовах важливо використовувати комплексний підхід, що включає адаптивну обробку, розширення динамічного діапазону та селекцію сигналів за напрямком. Ці методи сприяють підвищенню ефективності, надійності та гнучкості сучасних РЛС, забезпечуючи можливість виконувати завдання навіть у складних умовах радіоелектронної обстановки.

3 ЦИФРОВІ СИСТЕМИ АДАПТАЦІЇ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНOSTІ АН- ТЕННИХ СИСТЕМ РЛС

Загалом, існує значна кількість методів захисту радіолокаційних систем від завад, що ускладнюють їх роботу. Умовно їх можна поділити на адаптивні та неадаптивні методи. Через постійний розвиток систем радіоелектронної протидії, радіоелектронна обстановка повітряного простору набуває динамічного характеру. Відповідно, це сприяє все більш ширшому інтегруванню адаптивних методів в сучасні наземні РЛС оглядового типу. Однак, ці методи передбачають внесення певних технічних змін, які внаслідок застосування додаткових компенсаційних каналів прийому та адаптивних пристроїв придушення перешкод призводять до ускладнення конструкції самого комплексу.

3.1 Компенсація сигналів активних завад

Традиційно вийшло так, що у РЛС компенсація активних шумових завад (АШЗ) виконується з застосуванням АКЗ. Метод компенсації таких завад розглядався частково розглядався у попередньому розділі. Фактично, є основний приймальний канал, та компенсаційний. Антена основного каналу обробляє суміш сигналу перешкоди та сигналу що містить корисну інформацію. Антена ж компенсаційного каналу переважно буде приймати перешкоди. Мета обробки сигналів полягає у тому, щоб отримати протилежні за фазою, при цьому однакові за інтенсивністю сигнали завад в основному та компенсаційному каналі. Далі вже, безпосередньо, компенсація буде відбуватися за рахунок віднімання сигналів перешкод компенсаційного приймального каналу від перешкод основного приймального каналу [19].

Компенсація сигналів активних завад — це один із ключових процесів у сучасних радіолокаційних системах та системах зв'язку. Його мета полягає у виділенні корисного сигналу на фоні завад, які можуть виникати через цілеспрямовані дії (наприклад, постановка активних перешкод) або через природні джерела (шум, відбиття, багатопроменевість).

Відповідно, загальною компенсація базується на використанні наступних основних принципів:

Для розрізнення корисного сигналу та завад важливо використовувати різницю фізичних характеристик сигналів, а саме амплітуду, фазу, частоту, часові параметри. Таким чином, розрізнення буде можливо виконати за визначенням різниці спектральної щільності, або нерегулярності у часі.

Також важливим залишається питання застосування адаптивної обробки сигналів. В такому випадку система виконує аналіз властивостей вхідного сигналу та налаштовується на придушення різних типів завад у реальному часі.

Використання математичних методів оптимізації, кореляційних методів фільтрації, інверсії матриць для оцінки вагових коефіцієнтів, що мінімізують вплив завад. Серед методів компенсації активних завад варто звернути увагу на використання багатоканальних антенних систем, які дозволяють формувати вузькі діаграми спрямованості, концентруючись на сигналі з певного напрямку забезпечуючи просторову компенсацію. Прикладом таких систем можуть бути фазовані антенні решітки з адаптивними алгоритмами управління.

Отже, потрібно звернути увагу до методу Вінера. Застосування оптимального фільтрування, яке засноване на мінімізації середньоквадратичної помилки між вихідним та корисним сигналом.

Метою вирішення рівняння Вінера-Хопфа є мінімізація середньоквадратичної помилки на основі використання матриці автокореляції R та вектору кореляції p для оцінки оптимальних вагових коефіцієнтів, що наведено у рівнянні (3.1) [13].

$$w_{opt} = R^{-1} \cdot p \quad (3.1)$$

Не менш ефективним буде адаптивний метод найменших квадратів, або ж RLS-алгоритм. Його використання дозволяє ефективно, в реальному часі оцінювати та оновлювати вагові коефіцієнти [13]. Це забезпечується ітеративним оновленням вагових коефіцієнтів k :

$$w_{n+1} = w_n + K \cdot (U_o - U_d^T \cdot k_n) \quad (3.2)$$

Де K - коефіцієнт підсилення;

U_d - сигнал завад у компенсаційних каналах.

До цього розглядався варіант одноканального автокомпенсатора, однак він має основний, критичний недолік. Таке технічне рішення забезпечує обмежену ефективність у складних умовах роботи. Зокрема, він не здатен забезпечити достатній рівень захисту радіотехнічної системи, якщо корисний сигнал та перешкода мають схожі характеристики. Наприклад, це може бути майже однаковий напрямок прибуття корисного сигналу та завади, або подібне значення спектру. Перешкоди можуть бути багатоконентними, та забезпечувати швидку зміну параметрів, що значно перешкоджає роботі одноканального автокомпенсатора, значно перевищує здатність швидко налаштуватися. Це потребує більш гнучких підходів, таких як, наприклад, багатоканальні автокомпенсатори, які мають більші можливості по забезпеченню завадостійкості системи та краще адаптовані до складних умов виконання завдань.

3.2 Багатоканальний кореляційний автокомпенсатор

Проаналізуємо схему адаптивного багатоканального автокомпенсатора, який використовується для придушення перешкод у приймальній системі. Розберемо її елементи та принцип роботи детальніше.

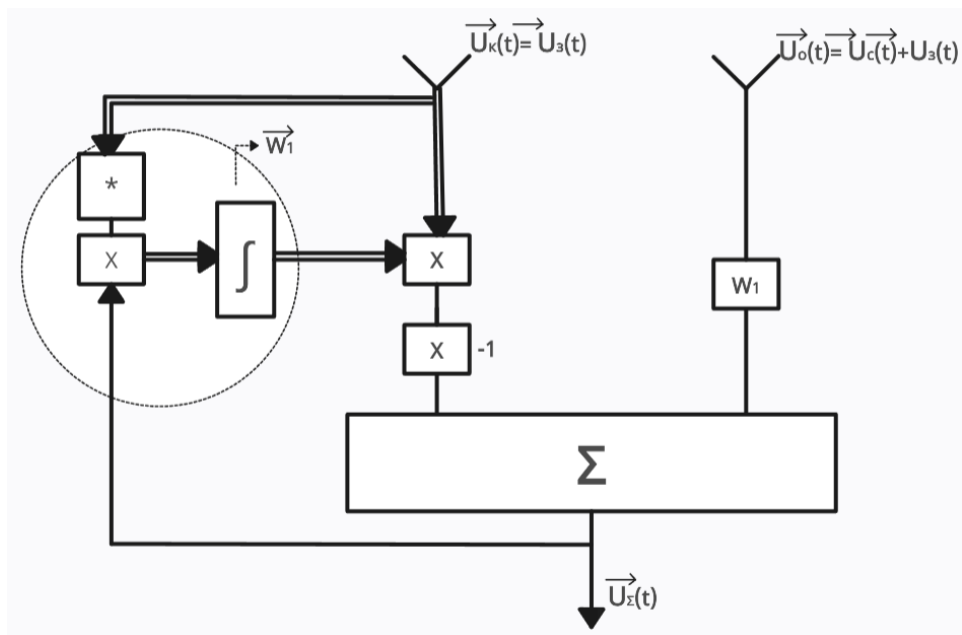


Рисунок 3.1 – Схема кореляційного багатоканального автокомпенсатора

На рис. 3.1 зображено спрощену схему багатоканального кореляційного автокомпенсатора, що містить систему паралельних компенсаційних каналів.

Вона працює за принципом зворотного зв'язку. Виконується оцінка помилок, що вносяться впливом перешкоди, та автоматичне налаштування під змінні характеристики перешкод. Таке виконання дозволяє ефективно придушувати навіть динамічні перешкоди, що характерні для реальних умов роботи РЛС.

Оскільки система є багатоканальною, тоді діаграми спрямованості антен будуть мати вигляд, як зображено на рис. 3.2.

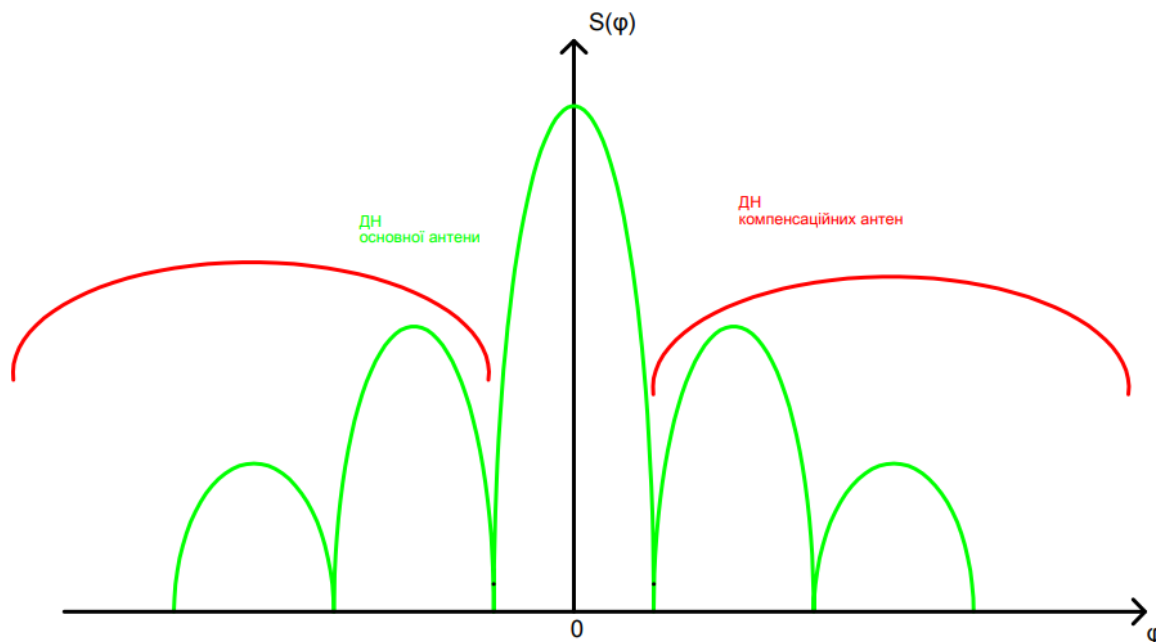


Рисунок 3.2 – Умовне зображення діаграм спрямованості антен багатоканального АК

На рис. 3.2 зображено діаграми направленості для системи, яка має два компенсаційні канали.

Відповідно, \vec{U}_o - вектор комплексних амплітуд вхідної напруги основного каналу, що складається з корисного сигналу та сигналу завади

$$\vec{U}_o(t) = \vec{U}_c(t) + \vec{U}_z(t). \quad (3.3)$$

Напруга на компенсаційному каналі \vec{U}_κ є вектором комплексних амплітуд, що складається з сигналу завади $\vec{U}_\kappa(t) = \vec{U}_z(t)$. З цього маємо, що сигнал на виході АК має вигляд:

$$\vec{U}_\Sigma(t) = \vec{U}_o(t) - w_1 \cdot \vec{U}_\kappa(t). \quad (3.4)$$

Принцип роботи схеми наступний:

Система приймає сигнал основним каналом $\vec{U}_o(t)$, що містить корисний сигнал і перешкоду, та генерує адаптивний сигнал для компенсації сигналу перешкоди $\vec{U}_z(t)$, використовуючи сигнал з компенсаційного каналу $\vec{U}_k(t)$, де присутній лише сигнал перешкоди. В результаті, на виході пристрою $\vec{U}_\Sigma(t)$ повинна залишитися тільки складова корисного сигналу $\vec{U}_c(t)$, а перешкода $\vec{U}_z(t)$ має бути максимально придушена.

Основними вузлами та елементами схеми будуть:

1. Канал корекції

— Контур адаптує ваговий коефіцієнт $\overline{W}_1(t)$ який використовується для корекції сигналів

— Спряження сигналів основного та компенсаційного каналів $\vec{U}_o(t)$ та $\vec{U}_k(t)$ дозволяє оцінити фазовий зсув між вхідними сигналами та створити корекційний сигнал.

2. Інтегратор

— Накопичує помилки компенсації, щоб ваговий коефіцієнт $\overline{W}_1(t)$ змінювався поступово в напрямку мінімізації перешкод.

3. Суматор

— На цьому етапі сигнал завади $\vec{U}_z(t)$, що прийнятий через компенсаційний канал, віднімається від сумарного сигналу $\vec{U}_\Sigma(t)$.

Відповідно, загальні етапи обробки сигналу будуть наступними:

1. Визначення взаємозв'язку між сигналами:

— Добуток сигналів $\vec{U}_k(t)$ та $\vec{U}_\Sigma(t)$ дозволяє оцінити, наскільки сигнал завади $\vec{U}_z(t)$ у каналі впливає на сумарний сигнал $\vec{U}_\Sigma(t)$.

2. Адаптація вагового коефіцієнта:

— Сигнал корекції передається до інтегратора, який поступово змінює ваговий коефіцієнт $\overrightarrow{W_1}(t)$ щоб мінімізувати вплив перешкод.

3. Формування компенсаційного сигналу:

— На основі адаптованого вагового коефіцієнту $\overrightarrow{W_1}(t)$ генерується сигнал компенсації, який має протилежну фазу.

4. Придушення перешкод:

— Компенсаційний сигнал $\overrightarrow{U_k}^*(t)$ додається до сигналу на виході системи $\overrightarrow{U_\Sigma}(t)$, внаслідок чого сигнал завади $\overrightarrow{U_z}(t)$ буде накладати в протифазі, та його вплив не буде враховуватись.

В результаті, на виході системи отримується сигнал, що відповідає корисному, без завад.

Вектор комплексних вагових коефіцієнтів можна відобразити наступним чином

$$w(t) = \int_0^T \overrightarrow{U_k}^*(t) \cdot \overrightarrow{U_\Sigma}(t) dt. \quad (3.5)$$

Якщо розібрати фізичний зміст цього рівняння, то добуток сигналів буде визначати взаємну кореляцію між компенсаційним та сумарним сигналом. Інтеграл визначає акумулювання кореляції за час T , визначаючи загальний вплив компенсації на перешкоду. Результатом обрахунку є оновлений ваговий коефіцієнт, який оптимально налаштовує компенсаційний сигнал для зменшення перешкод. Він буде адаптивно змінюватись залежно від характеру вхідного сигналу та перешкод.

Таким чином, це рівняння можна інтерпретувати як механізм налаштування компенсаційного сигналу, за допомогою якого можливо зменшити шум і підвищити якість виявлення корисного сигналу у радарних системах, антенних решітках та адаптивних фільтрах.

Рівняння, що буде описувати роботу багатоканального автокомпенсатору буде мати наступний вигляд [15].

$$T \frac{dW_1(t)}{dt} + W_1(0) = \overline{\dot{U}_\kappa(t) \cdot \dot{U}_\Sigma(t)}, \quad (3.6)$$

де $\dot{U}_\kappa(t)$ – комплексний сигнал компенсаційного каналу;

$\dot{U}_\Sigma(t)$ - комплексний сигнал на виході автокомпенсатору;

T – постійна часу;

$W_1(t)$ – вагові коефіцієнти.

З рівнянь (3.5) та (3.6) можна помітити, що по закінченню T , у встановленому режимі отримуємо результатом усередненого значення добутку комплексно спряженого компенсаційного сигналу дорівнює нуль, як зображено у рівнянні (3.7).

$$\overline{\dot{U}_\kappa(t) \cdot \dot{U}_\Sigma(t)} = 0. \quad (3.7)$$

Встановлений режим означає, що система досягла стабільності, тоді $\frac{dW_1(t)}{dt} = 0$, це означає, що ваговий коефіцієнт відповідає рівнянню (3.8)

$$W_1(t) = W_1. \quad (3.8)$$

Тобто значення вагового коефіцієнту більше не змінюється, оскільки система вже стабілізована, та його значення стає сталою величиною.

Відповідно, рівняння (3.7) вказує на відсутність кореляції між компенсаційним сигналом $\dot{U}_\kappa(t)$ та залишковим сумарним сигналом $\dot{U}_\Sigma(t)$. Іншими словами можна сказати, що система досягла оптимального налаштування, і сигнал компенсації повністю компенсує перешкоди.

Доведемо це твердження, розкривши рівняння (3.7) докладніше:

$$\int_0^T \dot{U}_\kappa^*(t) \cdot (U_o(t) - W_1 \cdot U_\kappa(t)) dt = 0 \quad (3.9)$$

Далі ми можемо розкласти рівняння (3.9) на два інтеграли, та отримуємо рівняння (3.10)

$$\int_0^T \dot{U}_\kappa^*(t) \cdot U_o(t) dt - \int_0^T \dot{U}_\kappa^*(t) \cdot W_1 \cdot U_\kappa(t) dt = 0 \quad (3.10)$$

Оскільки сигнал компенсаційного каналу $\vec{U}_k(t)$ дорівнює сигналу завади $\dot{U}_3(t)$ а сигнал з основного каналу $\vec{U}_o(t)$ складається з завади та корисного сигналу, підставимо ці змінні в рівняння (3.10), та отримаємо рівняння (3.11)

$$\int_0^T U_3^*(t) \cdot (U_c(t) + U_3(t)) dt - \int_0^T U_3^*(t) \cdot W_1 \cdot U_3(t) dt = 0. \quad (3.11)$$

Розкладемо рівняння (3.11) далі, та отримаємо рівняння (3.12)

$$\int_0^T U_3^*(t) \cdot U_c(t) dt + \int_0^T U_3^*(t) \cdot U_3(t) dt - \int_0^T U_3^*(t) \cdot W_1 \cdot U_3(t) dt = 0 \quad (3.12)$$

Перший доданок рівняння (3.12) характеризує кореляцію між шумом та корисним сигналом, позначимо його як матрицю автокореляції R

$$R = U_3^*(t) \cdot U_c(t). \quad (3.13)$$

Оскільки розглядається робота АК у встановленому режимі, кінцевим результатом його роботи є отримання нульової кореляції між корисним сигналом та завадою.

Тоді маємо наступний вираз:

$$R = U_3^*(t) \cdot U_c(t) = 0. \quad (3.14)$$

Виходячи з виразу (3.14) ми можемо розписати рівняння (3.12) далі

$$\int_0^T U_3^*(t) \cdot U_3(t) dt = W_1 \cdot \int_0^T U_3^*(t) \cdot U_3(t) dt. \quad (3.15)$$

Виконаємо рішення рівняння відносно вагового коефіцієнту W_1

$$W_1 = \frac{\int_0^T U_3^*(t) \cdot U_3(t) dt}{\int_0^T U_3^*(t) \cdot U_3(t) dt}. \quad (3.16)$$

Відповідно, тепер можемо побачити, що ваговий коефіцієнт дорівнює значенню $W_1 = 1$. Якщо коефіцієнт прагне до максимального значення, це вказує що система максимально налаштована на компенсацію перешкоди.

3.3 Конфігурація автокомпенсатору у вигляді адаптивного фільтру

Виконаємо переконфігурацію стандартного багатоканального автокомпенсатора та відобразимо його у вигляді адаптивного фільтру, як зображено на рис. 3.3

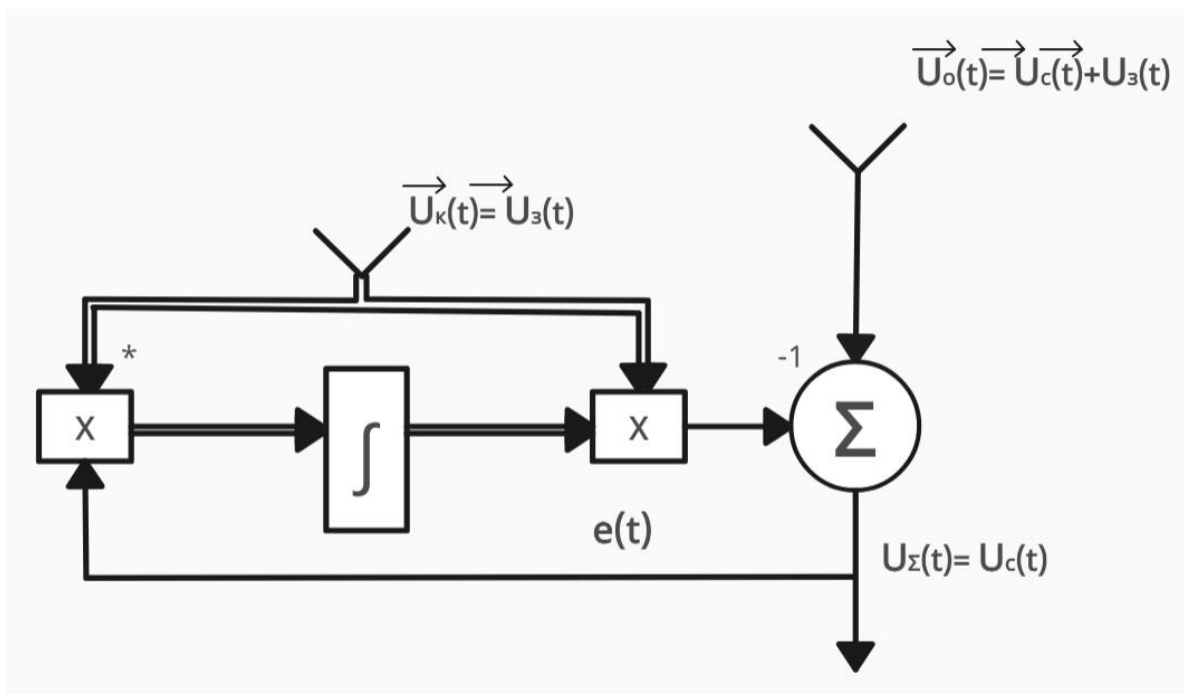


Рисунок 3.3 – Схема адаптивного фільтру компенсації завад

Для багатоканальної системи, як показано на схемі, застосуємо метод найменших квадратів (МНК) для оптимального налаштування вагових коефіцієнтів кожного з компенсаційних каналів. Розглянемо цей процес у деталях.

Схема, що наведена на рис. 3.3 використовується для виділення корисного сигналу $\vec{U}_c(t)$ з сигналу основного каналу $\vec{U}_o(t)$, що містить корисний сигнал $\vec{U}_k(t)$ та завади $\vec{U}_3(t)$.

Вхідний сумарний сигнал $\vec{U}_o(t)$ відповідає тому ж сигналу, що наведено у виразі (3.3). Як і в попередньому прикладі, напруга на компенсаційному каналі $\vec{U}_k(t)$ буде відповідати вектору комплексних амплітуд, що складається з сигналу завади $\vec{U}_3(t)$.

На схемі з рис. 3.2 інтегратор визначає ваговий коефіцієнт $W_1(t)$, який буде оптимально адаптуватися для формування сигналу компенсації. Ваговий коефіцієнт же, в свою чергу, є керуючим параметром, що регулює амплітуду та фазу компенсаційного сигналу для оптимального усунення перешкод.

Сигнал на виході системи, фактично, являє собою сигнал помилки $e(t)$, який буде описуватись рівнянням (3.17)

$$e(t) = \vec{U}_0(t) - W_i(t) \cdot \vec{U}_k(t). \quad (3.17)$$

Помилка визначає різницю між сигналом після суматора та скоригованим сигналом з каналів компенсації. Вона використовується для адаптації вагового коефіцієнту $W(t)$ через зворотній зв'язок:

$$W(t) = \int_0^T e(t) \cdot \vec{U}_k(t) dt \quad (3.18)$$

Інтегратор виконує функцію накопичення значення взаємодії між сигналом помилки $e(t)$ та компенсаційним сигналом $\vec{U}_k(t)$, щоб поступово виконувати налаштування $W_i(t)$ до оптимального значення.

Надалі система виконує формування скоригованого компенсаційного сигналу $W_i(t) \cdot \vec{U}_k(t)$, який віднімається від сигналу основного каналу $\vec{U}_0(t)$, з метою максимального усунення перешкоди.

Отже, маємо вихідний сигнал, що описано рівнянням (3.17). Оновлення вагового коефіцієнта, згідно зі схемою, буде визначатися виразом (3.18), де T - час адаптації.

Цільовою умовою є те, що у встановленому режимі помилка $e(t)$ мінімізується. Це буде означати що корисний сигнал повністю виділено від завад.

Розрахунок вагових коефіцієнтів буде виконуватись за методом найменших квадратів (МНК). Він передбачає знаходження оптимальних значень вагових коефіцієнтів, які мінімізують середньоквадратичну помилку між сигналом основного каналу $\vec{U}_0(t)$ та каналу компенсації $\vec{U}_k(t)$.

З виразу (3.17) визначається середньоквадратична помилка

$$e^2(t) = (\vec{U}_0(t) - W_i^T(t) \cdot \vec{U}_k(t))^2. \quad (3.19)$$

Наступним кроком розкривається квадрат помилки:

$$e^2(t) = \overline{U}_0^2(t) - 2 \cdot \overline{U}_0^2 \cdot W_i^T(t) \cdot \overline{U}_k(t) + W_i^T \cdot W_i \cdot \overline{U}_k(t) \cdot \overline{U}_k^T(t) \quad (3.20)$$

Для мінімізації помилки необхідно визначити часткову похідну від середньоквадратичної помилки.

$$\frac{\partial e^2}{\partial W_i} = -2\overline{U}_0(t) \cdot \overline{U}_k(t) + 2 \cdot W(t)_i \cdot \overline{U}_k(t) \cdot \overline{U}_k^T(t). \quad (3.21)$$

Для мінімізації помилки необхідно прирівняти вираз (3.21) до нуля, оскільки часткова похідна функції середньоквадратичної помилки визначає нахил поверхні у відповідному напрямку.

У точці мінімуму нахил буде дорівнювати нулю, оскільки поверхня є плоскою в цій точці, тобто немає напрямку, в якому значення середньоквадратичної помилки зменшується.

Графічне пояснення мінімізації похибки зображено на рис. 3.4.

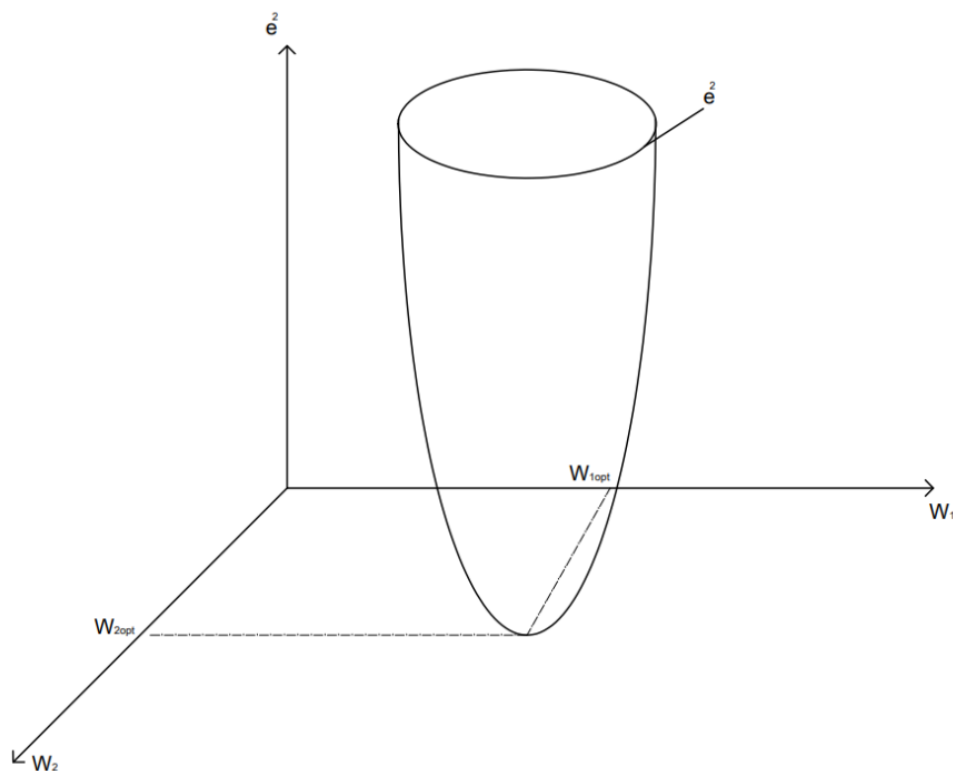


Рисунок 3.4 – Графічне представлення функції помилок у ваговому просторі
Згідно з цим, отримуємо вираз (3.22)

$$-2\overline{U}_0(t) \cdot \overline{U}_k(t) + 2 \cdot W(t)_i \cdot \overline{U}_k(t) \cdot \overline{U}_k^T(t) = 0. \quad (3.22)$$

Спростимо вираз (3.22) до наступного вигляду:

$$W_i(t) \cdot (\overline{U}_k(t) \cdot \overline{U}_k^T) = \overline{U}_0(t) \cdot \overline{U}_k(t) \quad (3.23)$$

У рівнянні (3.23) можливо відобразити добуток $\overline{U}_k(t) \cdot \overline{U}_k^T$ як R_{kk} – матрицю автокореляції компенсаційного каналу.

Також, доцільно буде розписати сигнал з основного каналу $\overline{U}_0(t)$, як сума корисного сигналу та завади. В кінцевому результаті, отримуємо вираз (3.24)

$$W_i = R_{kk}^{-1} \cdot (\overline{U}_c(t) + \overline{U}_k(t)) \cdot \overline{U}_k(t). \quad (3.24)$$

Далі виконується операція добутку, щоб розкрити вираз. Буде отримано рівняння (3.25)

$$W_i = R_{kk}^{-1} \cdot (\overline{U}_c(t) \cdot \overline{U}_k(t) + \overline{U}_k(t) \cdot \overline{U}_k^T(t)). \quad (3.25)$$

Відповідно, у рівнянні (3.25) добуток $\overline{U}_c(t) \cdot \overline{U}_k(t)$ позначається як R_{sk} – матриця взаємної кореляції між сигналами основного та компенсаційного каналу. Тоді вираз набуде наступного вигляду.

$$W_i = R_{kk}^{-1} \cdot R_{sk} + R_{kk}^{-1} \cdot R_{kk}. \quad (3.26)$$

Виконавши спрощення виразу (3.26) отримуємо наступний результат:

$$W_i = \frac{R_{sk}}{R_{kk}^{-1}} + I, \quad (3.27)$$

де I - одинична матриця.

Оскільки адаптивний багатоканальний фільтр розглядається в установленому режимі, то кореляції між сигналами основного та компенсаційного каналу немає.

Відповідно, $\frac{R_{sk}}{R_{kk}^{-1}} \rightarrow 0$ з чого маємо кінцевий результат:

$$W_i = I. \quad (3.28)$$

Так як фільтр є багатоканальним, то оптимальне значення вагового коефіцієнту відповідає одиничній матриці, яка має наступний вигляд

$$W_{opt} = I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.29)$$

З отриманого результату виходить, що застосування відповідних оптимальних вагових коефіцієнтів до сигналів компенсаційних каналів призведе до очищення вихідного сигналу від перешкод.

Відповідно, якщо розкладемо сигнал основного каналу як $\vec{U}_0(t) = \vec{U}_c(t) + \vec{U}_3(t)$, а сигнал компенсаційного каналу $\vec{U}_k(t) = \vec{U}_3(t)$ та виконаємо підстановку у вираз (3.17), то отримаємо вираз для отримання кінцевого результату, що буде наведено у виразі (3.30)

$$e(t) = \vec{U}_c(t) + \vec{U}_3(t) - W_{opt}(t) \cdot \vec{U}_3(t). \quad (3.30)$$

Підставимо у вираз (3.30) вже відоме значення W_{opt} , та отримаємо кінцевий результат у вигляді сигналу на виході системи.

Оскільки сигнал помилки фактично буде являти собою сигнал на виході системи після встановленого режиму, тоді кінцевий результат, що наведено у виразі (3.30) дає зрозуміти, що сигнал на виході системи буде містити тільки корисний сигнал.

$$\vec{U}_\Sigma(t) = \vec{U}_c(t) + \vec{U}_3(t) - \vec{U}_3(t) = \vec{U}_c(t) \quad (3.31)$$

Це означає, що після застосування оптимальних вагових коефіцієнтів до сигналу компенсаційного каналу, завада повністю компенсується, що демонструє здатність правильно налаштованої системи автокомпенсації ефективно придушувати шумові компоненти, залишаючи лише корисний сигнал.

З цього виходить, що ДН антенної системи РЛС після повного налаштування та встановленого режиму буде мати вигляд, як зображено на рис. 3.5

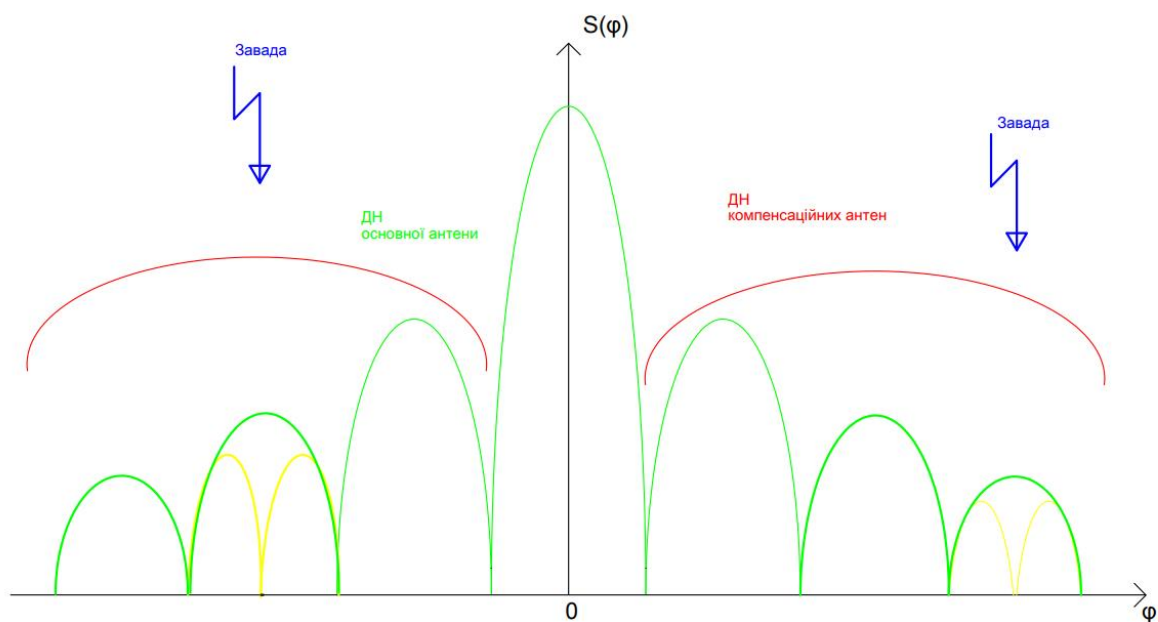


Рисунок 3.5 – Діаграма направленості антенної системи після компенсації

На рисунку 3.5 представлена діаграма спрямованості антенної системи після компенсації активних шумових завад. Докладний опис аспектів роботи антенної системи в умовах радіоелектронної протидії та вплив конструкції антени на ефективність компенсації завад полягає у наступних принципах роботи системи компенсації:

— Завада надходить на вхід антени з певного пеленга φ , після чого система автоматично створює «провал» в діаграмі направленості антени на цьому напрямку. Саме це забезпечує ефективне придушення сигналу завади, мінімізуючи його вплив на основний, корисний сигнал;

— Діаграма направленості основної антени, що відображена зеленою кривою має головну пелюстку на напрямку надходження корисного сигналу, що забезпечить приймання сигналу з високою ефективністю;

— Діаграма спрямованості компенсаційних антен, в свою чергу, відображається червоною кривою. Основна задача цих каналів – формувати відповідні «провали» у напрямках пеленгів завад, щоб нейтралізувати їх вплив на стабільний режим роботи радіолокаційної станції.

Саме налаштування вагових коефіцієнтів компенсаційних каналів автокомпенсатора забезпечує мінімізацію впливу завадових сигналів через їх накладання в протифазі.

Жовта крива на рис. 3.5 зображує подавлення завад, що надходить з відповідних азимутів. Отже, це відповідає стану налаштованої, адаптованої системи, яка здатна ефективно створювати провали у випадках наявності завад.

Ефективність придушення завад залежить від значення коефіцієнту придушення завади, що буде основним критерієм стійкості системи. Відповідно, чим глибший провал у діаграмі направленості, тим більше коефіцієнт придушення завади. Цей коефіцієнт визначає ступінь компенсації, та фактично є співвідношенням залишкової потужності завади до її вхідної потужності.

Важливо зауважити, що згідно до наведеної схеми автокомпенсатору, в якій закладено коефіцієнт підсилення антени $W = 1$, «провал» ДН сягає нульового значення. Щоб ефективно подавити вплив завад доцільно застосовувати антени з більшим коефіцієнтом підсилення.

3.4 Висновки

У розділі 3 було досліджено сучасні підходи до адаптації діаграми спрямованості антенних систем радіолокаційних систем для забезпечення ефективної боротьби з активними завадами. Основну увагу приділено адаптивним методам, які забезпечують високу точність і надійність функціонування РЛС у складних радіоелектронних умовах.

Розглянуто застосування багатоканальних кореляційних автокомпенсаторів для придушення активних шумових завад. Особливістю цих систем є можливість динамічного налаштування вагових коефіцієнтів на основі оцінки взаємозв'язку сигналів основного та компенсаційного каналів, що дозволяє ефективно придушувати перешкоди навіть за умов динамічно змінних характеристик завад. Було показано, що багатоканальні АКЗ мають значні переваги у порівнянні з одноканальними системами завдяки здатності обробляти багатоконпонентні завади та адаптуватися до складної електромагнітної обстановки.

Також наведено математичні моделі, які описують принцип роботи багатоканальних систем компенсації. Використання рівняння Вінера-Хопфа та алгоритму МНК для оцінки оптимальних вагових коефіцієнтів забезпечує мінімізацію залишкової енергії завади та підвищення завадостійкості РЛС.

Таким чином, у розділі було обґрунтовано доцільність використання адаптивних цифрових систем для покращення роботи РЛС у сучасних умовах, що включають активну радіоелектронну боротьбу. Використання багатоканальних АКЗ із застосуванням сучасних алгоритмів дозволяє суттєво підвищити ефективність і надійність роботи РЛС у складній радіоелектронній обстановці.

4 КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ З ВІДОМИМИ

Для оцінки ефективності запропонованого методу виконано серію моделювань трьохканального автокомпенсатору за різних умов завадової обстановки. Моделювання виконувалося у програмному середовищі MATLAB із застосуванням реалізації на основі запрограмованих методів, які було розглянуто вище. Виконується перевірка алгоритму адаптації за допомогою використання рекурентного методу найменших квадратів (РМНК) та розрахунок за допомогою рівнянь Вінера-Хопфа. Адаптивна реалізація методу найменших квадратів, а саме РМНК застосовується для оцінки параметрів у реальному часі, коли дані надходять поступово, а обчислення потрібно виконувати швидко та ефективно, без перерахунку всього масиву даних з початку. Таким чином, це дозволить оцінити ефективність запропонованого рішення в умовах, коли дані постійно оновлюються, що наближено до реальних умов функціонування РЛС.

4.1 Перевірка ефективності запропонованого підходу

Підхід Вінера-Хопфа базується на статистичних характеристиках сигналу та перешкод. Відповідно, метод вимагає ідеальних даних, тобто, він передбачає, що всі статистичні властивості сигналів будуть точно відомі заздалегідь.

Оскільки в класичному формулюванні метод Вінера-Хопфа працює на основі статистичних властивостей сигналів і завад, це означає що дані будуть накопичуватись протягом спостережень, та вже на основі зібраних даних обчислюються середні кореляційні властивості. Це не завжди буде можливо на практиці.

Відповідно, зазначимо відмінності між теоретичним підходом та адаптивним алгоритмом, які наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Відмінності між підходом Вінера-Хопфа та алгоритмом RLS.

Характеристика	Метод Вінера-Хопфа	Адаптивний алгоритм (РМНК)
Тип підходу	Теоретичний	Практичний
Розрахунок вагових коефіцієнтів	Одноразовий, стаціонарний	Динамічний, змінюється в часі
Вхідні дані	Повна інформація про статистику	Поточні значення сигналів
Стабільність результатів	Завжди стабільний	Наявні коливання через шуми
Графік	Пряма лінія	Динамічна крива (збіжність до прямої)

Також, важливо зазначити, що розрахунок є стаціонарним.

Метод виконує розрахунок фіксованих оптимальних вагових коефіцієнтів, які залишаються незмінними. В той же час, реальна сигнально-перешкодова обстановка буде змінюватись.

Отже, підхід Вінера-Хопфа можна вважати теоретичним розв'язком, до якого адаптивний алгоритм RLS намагається наблизитися.

Відповідно до вищенаведеної інформації нижче наведемо підсумкові параметри моделювання:

- Кількість компенсаційних каналів – 3 канали;
- Кількість ітерацій адаптації – 300 ітерацій;
- Вхідний сигнал складається з корисного сигналу, зовнішніх завад та власних шумів.

Проведено п'ять експериментів із різною кількістю джерел завад та різними напрямками випромінювання сигналів завад, що будуть негативно впливати на режим роботи системи.

Для зручності сприйняття отриманих графічних результатів усі джерела завад будуть мати однакову потужність. Вхідні параметри для кожного випадку наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Параметри завад що подаються на вхід РЛС.

Кількість завад	Потужність завади [дБ]	Пеленг завад [градус]	Коефіцієнт подавлення [дБ]
1	10	5	-18,4
2	10 10	-7, 5	-17,93
3	10 10 10	-7, 5, 12	-18,92
4	10 10 10 10	-7, 5, 12, 18	-17,85
5	10 10 10 10 10	-21, -7, 5, 12, 18	-15,20

Результати моделювання для кожного випадку завадової обстановки будуть показувати досягнутий коефіцієнт придушення завад, який й буде критерієм завадозахищеності. Аналіз графічних результатів дозволить помітити демонстрацію динаміки адаптації коефіцієнта придушення, а також його стабілізацію в залежності від певної кількості ітерацій. Програма для моделювання наведена окремо у додатку А.

Розглянемо випадок, коли діє одна активна шумова завада роботі РЛС на індикаторі оператора РЛС. Оцінювати якість роботи системи придушення завад будемо за рахунок аналізу коефіцієнту придушення завади.

Відповідно, отриманий результат коефіцієнту придушення завади після процесу моделювання зображено на рис. 4.1.

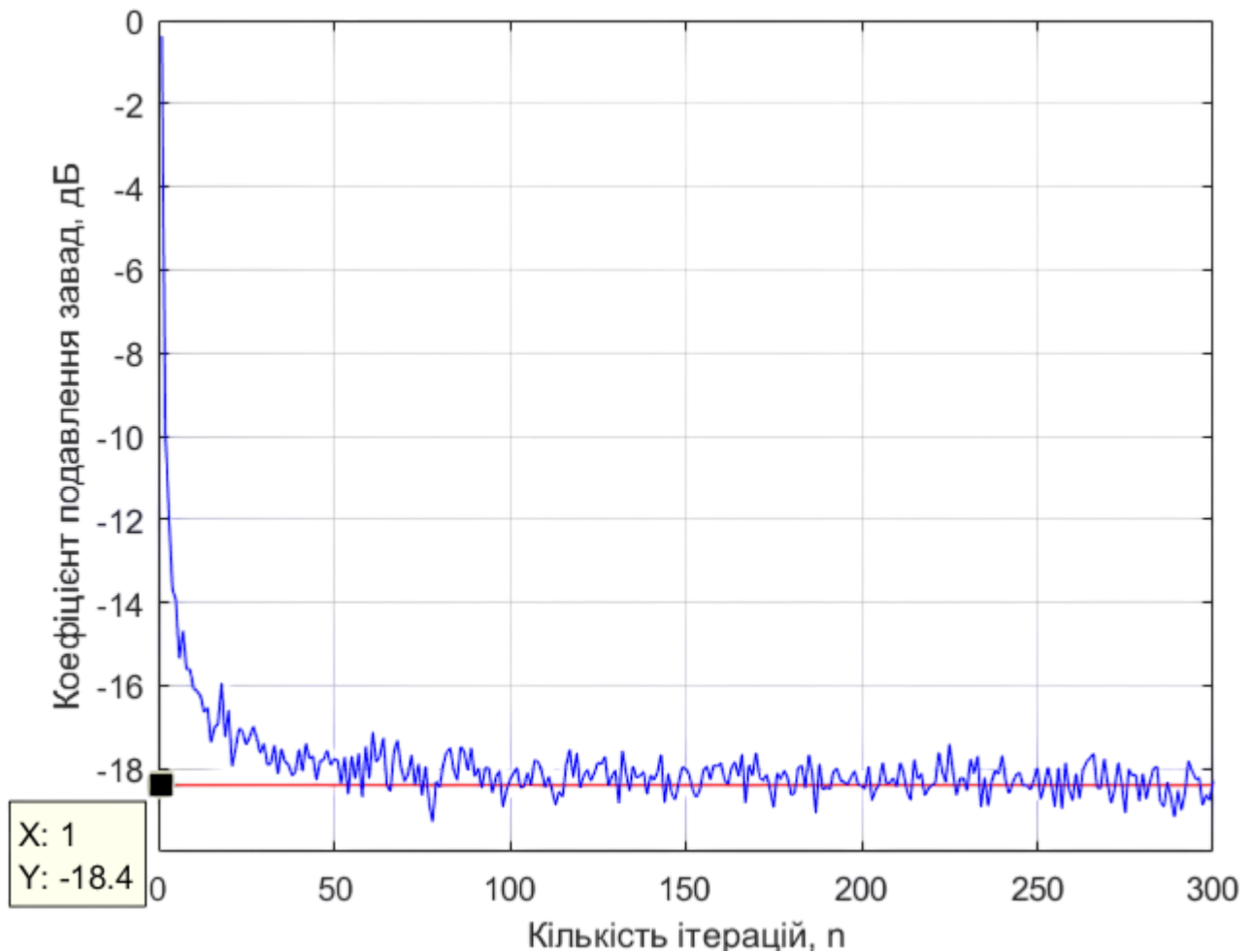


Рисунок 4.1 – Коефіцієнт придушення однієї активної шумової завади

Аналіз графіка, отриманого в результаті роботи коду, дозволяє оцінити ефективність роботи автокомпенсатора за методами Вінера та РМНК.

Серед основних аспектів аналізу можна виділити наступні важливі моменти:

Порівняння кривих: в нашому випадку необхідно, щоб синя крива, яка характеризує результати що отримані методом МНК, наближалася до червоної лінії, що є результатом виконання методу Вінера-Хопфа. Це буде вказувати на те, що адаптивний алгоритм ефективно налаштовує вагові коефіцієнти та досягає близьких значень до оптимального рівня. Саме це й спостерігається на отриманому графічному відображенні. У випадку, якщо б синя крива не досягала рівня червоної прямої, це було б свідченням неправильної роботи системи, обмеження адаптивного алгоритму, або проблеми з параметрами моделювання.

Швидкість адаптації: аналізуючи рис. 4.1 одразу можна окремо виділити швидкість запропонованого методу. На початкових ітераціях синя крива стрімко зменшується, що вказує на ефективне виконання адаптації вагових коефіцієнтів. Після проходження кількох десятків ітерацій крива входить у фазу стабілізації, досягаючи рівноважного стану.

Стабільність: Синя крива, що характеризує виконання МНК алгоритму, після проведення близько 70 ітерацій набуває стабільних значень. Це означає що адаптивний алгоритм виконав налаштування постійних оптимальних вагових коефіцієнтів, тим самим провів підлаштування системи до заданої завадо-цільової обстановки. Коливання синьої кривої, що спостерігаються під час усього експерименту вказують на вплив власних шумів та залишкових шумів зовнішніх джерел, що будуть присутні для кожної системи.

Рівень залишкових перешкод: Потрібно зазначити, що після кінцевого визначення вагових коефіцієнтів, тобто стабілізації системи, крива адаптивного алгоритму МНК набуває схожих значень з червоною прямою. Це символізує точність розглянутого методу, який набуває подібних значень до теоретичного результату.

У реальних радіолокаційних або зв'язкових системах середовище може включати декілька активних перешкод. Додавання ще однієї завади в моделювання дозволяє перевірити систему компенсації на стійкість, адаптивність і точність роботи в складних умовах. Це важливо для перевірки ефективності працездатності системи в реальних умовах, де середовище завжди непередбачуване.

Виконано ускладнення завадо-цільової обстановки шляхом додавання до моделювання ще однієї завади з пеленгу -7° для перевірки стійкості алгоритму. Графік коефіцієнту придушення активних шумових перешкод для двох завад наведено на рис. 4.2.

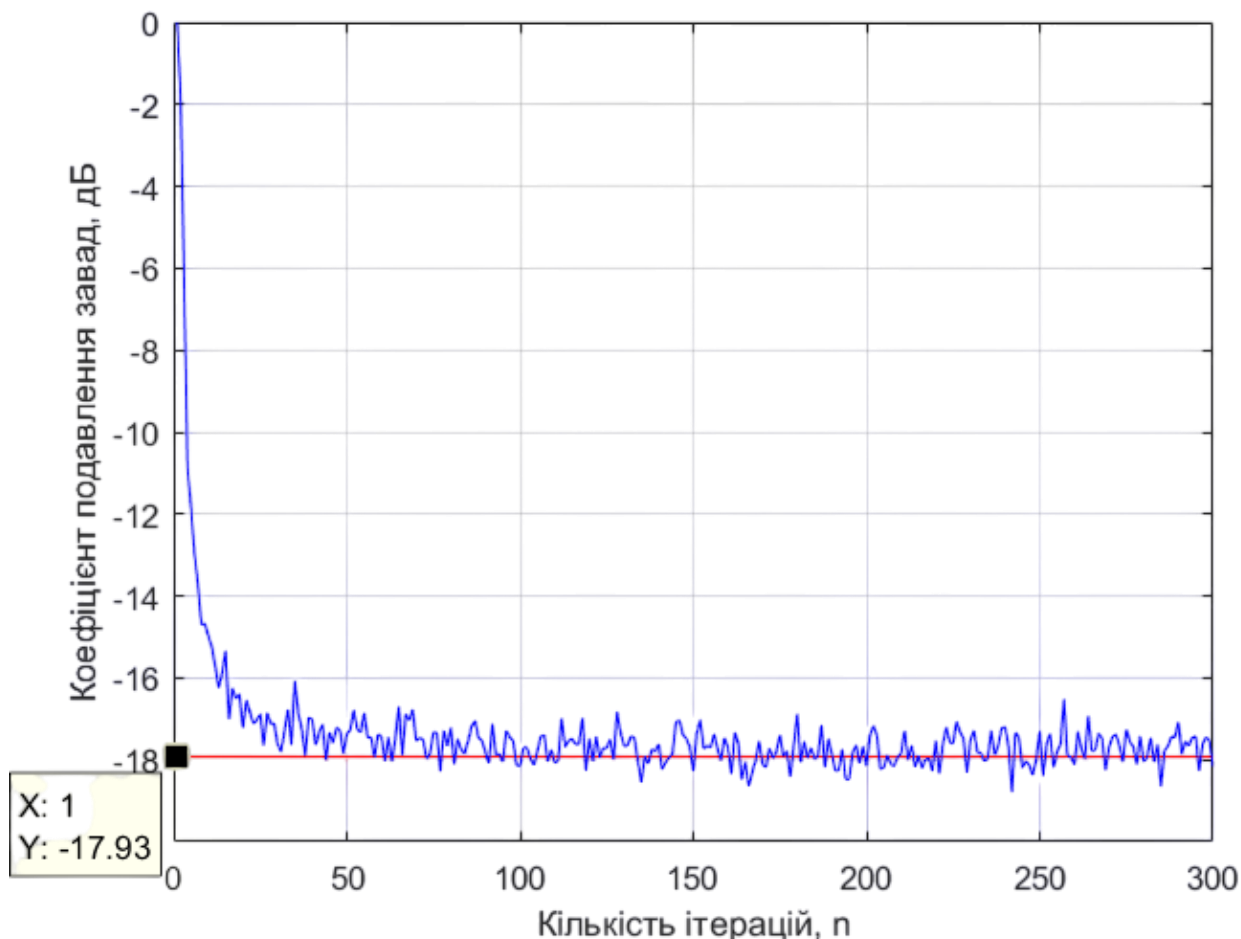


Рисунок 4.2 – Коефіцієнт придушення двох активних шумових перешкод

Відповідно, з рис. 4.2 помітно, що на початкових етапах синя крива різко зменшується, що свідчить про швидку адаптацію вагових коефіцієнтів системи. Ця ділянка демонструє швидке налаштування вагових коефіцієнтів, що призводить до ефективного зниження рівня впливу перешкод.

Після 50 ітерацій крива досягає стабільного рівня. Це свідчить про те, що протягом цього періоду йде налаштування вагових коефіцієнтів, а після цього крива характеризує стан адаптованої до завад системи, яка є повністю налаштованою. Як і в попередньому випадку спостерігаються коливання в стабільній фазі, які є наслідком впливу власних шумів.

Через динамічні умови синя крива, що відображує роботу RLS-алгоритму не досягає повного збігу з теоретично мінімальним рівнем потужності завад, що досягнуто за методом Вінера.

З аналізу рис. 4.1 та рис. 4.2 можна зрозуміти, що перший випадок демонструє кращі результати з точки зору придушення завад. На рис. 4.1 спостерігається нижчий рівень залишкових завад, та переважно менші коливання в стані стабілізації системи. Такий результат очікуваний, оскільки результати що отримані на рис. 4.2 відповідають більш складній завадовій обстановці.

Проведемо моделювання з ще більш складними умовами роботи. Для цього виконаємо моделювання з додаванням ще однієї завади з пеленгу 12° та отримаємо графік коефіцієнту придушення активних шумових перешкод для трьох завад:

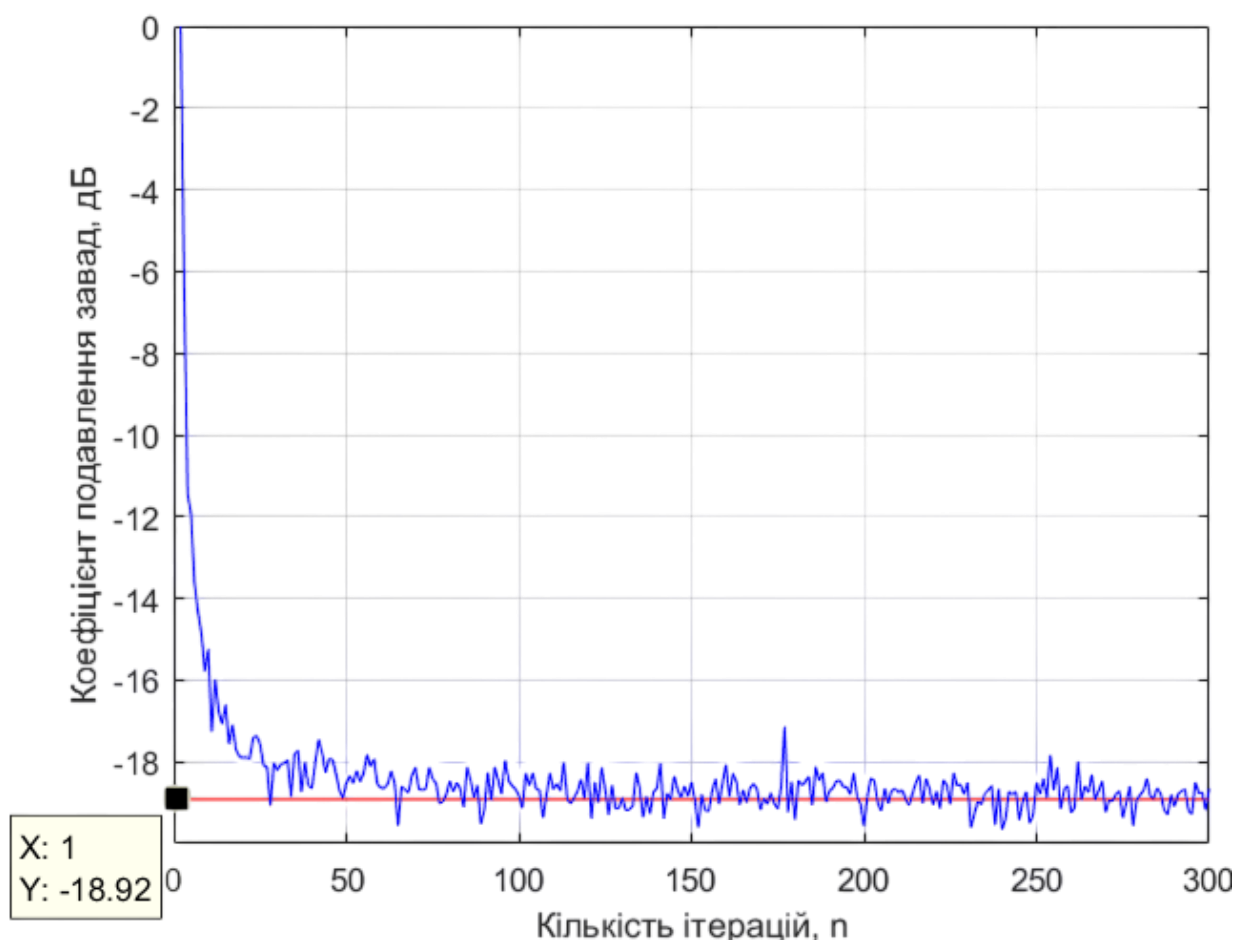


Рисунок 4.3 – Коефіцієнт придушення трьох активних шумових перешкод

Отриманий результат на рис. 4.3 демонструє ту ж саму тенденцію, що і попередні два моделювання.

Інтерпретація отриманого результату може бути наступною: спочатку виконується налаштування системи шляхом обрахунку вагових коефіцієнтів. Далі спостерігається стабільний режим роботи по завершенню сотні ітерацій. Це найбільш повільна швидкість збігу, в порівнянні з попередніми результатами. Також, рис. 4.3 має найбільш значні коливання серед проведених трьох експериментів. Таким чином, стає зрозуміло що три завади збільшують складність задачі компенсації, що негативно впливає на швидкість адаптації. Попри це, система все ще демонструє здатність досягати стабільності.

Забезпечимо ще більш складні просторові умови, додавши ще одну заваду з пеленгу 18° . Результат моделювання – графік залежності коефіцієнту придушення активних шумових перешкод від кількості ітерацій для чотирьох завад наведено на рис. 4.4.

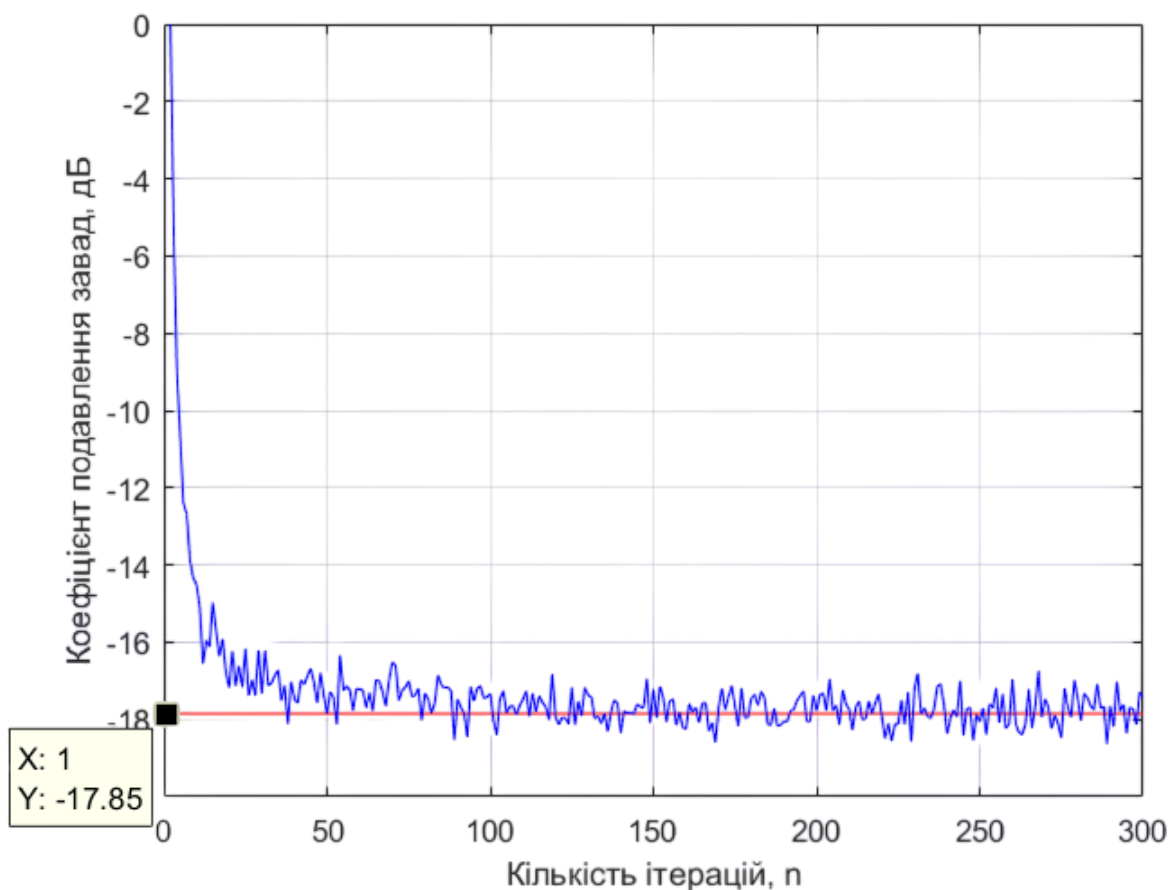


Рисунок 4.4 – Коефіцієнт придушення чотирьох активних шумових перешкод

Результат відображає моделювання для завад з пеленгами -7° , 5° , 12° , 18° відповідно.

Як і на попередніх графічних результатах спостерігається різке початкове зниження коефіцієнту придушення завад. Стабільний рівень роботи досягається після 100 ітерацій, що аналогічно до випадку з трьома завадами. Зменшення рівня придушення пояснюється збільшенням складності компенсації через додавання четвертої завади у моделювання. Якщо звертати увагу на стійкість системи, то у випадку наявності чотирьох завад спостерігається найвищий рівень коливань у стабільному режимі, в порівнянні з попередніми результатами моделювання. Відповідно, збільшення кількості завад до чотирьох помітно впливає на рівень стабілізації та стійкість алгоритму. Однак, навіть при наявності такої кількості завад система зберігає ефективність компенсації та забезпечує такий рівень придушення, що приблизно відповідає теоретичним розрахункам, які отримані на основі методу Вінера та зображені червоною прямою. Проведемо моделювання ще раз, попередньо додавши в умови моделювання п'яту заваду з пеленгу -21° . Графічний результат моделювання для п'яти завад зображено на рис. 4.5.

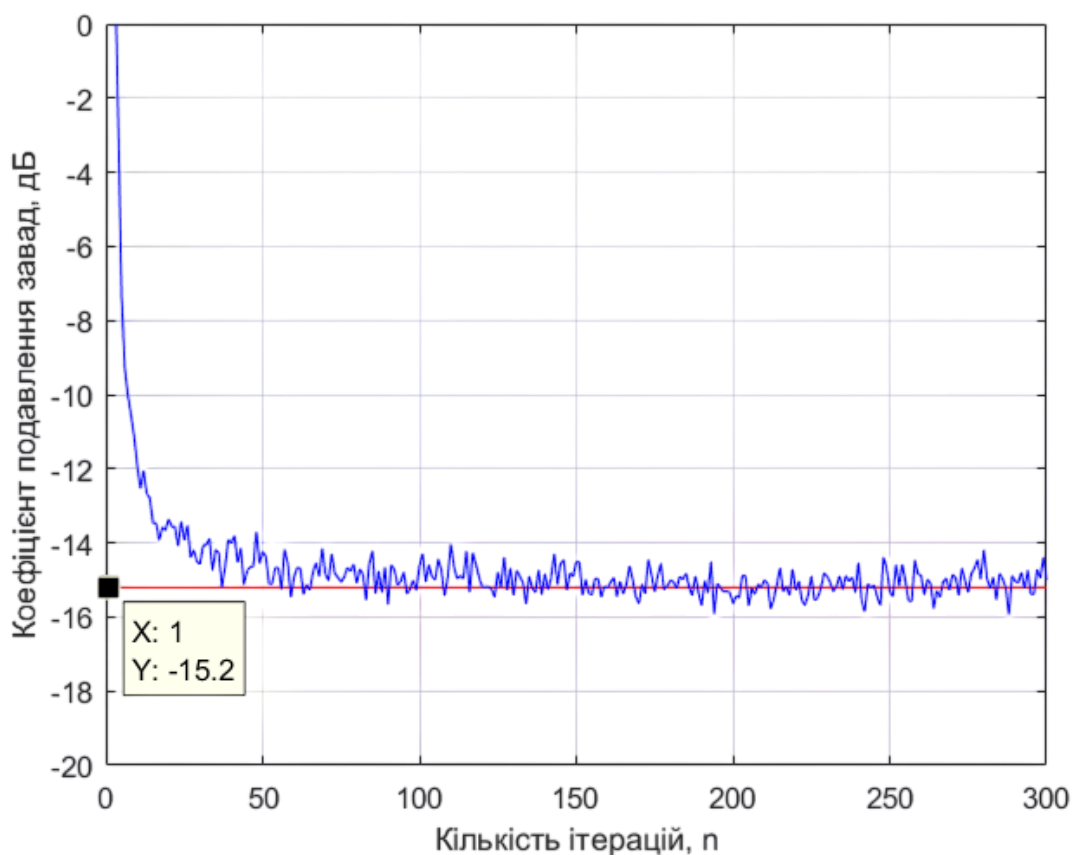


Рисунок 4.5 – Коефіцієнт придушення п'ятих активних шумових перешкод

Моделювання показує стабільний режим роботи на рівні -15.2 дБ, що є найгіршим результатом серед всіх сценаріїв.

Відповідно, це пояснюється збільшенням кількості джерел завад, що ускладнює процес компенсації та впливає на здатність системи досягати більш ефективного рівня придушення.

Час, що необхідний для досягнення стабільного режиму роботи системи становить приблизно 150 ітерацій. Порівнюючи результати попередніх експериментів можна помітити, що це є найбільшим значенням. Також, можна побачити що присутні значні коливання, які характеризують вплив залишкових шумів. Тож, стає зрозумілим, що хоч система забезпечує значний рівень придушення завад, але для таких просторових умов роботи складно назвати систему стійкою до такої кількості завад через найвиразніші коливання.

4.2 Формування та опис алгоритму

Важливим аспектом сучасних радіолокаційних систем є забезпечення стійкої роботи в умовах інтенсивного впливу активних завад. Підвищення ефективності радіолокаційних станцій забезпечується за допомогою розробки алгоритмів адаптації, які дозволяють динамічно налаштовувати параметри роботи системи для придушення завад та забезпечення якісного виявлення цілей.

Формування алгоритму адаптації є етапом, що включає аналіз поточних умов роботи РЛС, визначення параметрів завадової обстановки, а також реалізацію механізмів адаптації антенних систем і приймальних трактів. Опис такого алгоритму дозволяє зрозуміти ключові етапи його роботи, методи придушення завад і забезпечення точності виявлення сигналів.

Цей підпункт присвячений детальному опису розробленого алгоритму адаптації радіолокаційної станції, який передбачає комплексний підхід до аналізу завадової обстановки, формування вагових коефіцієнтів, а також налаштування роботи системи у відповідь на зміни в електромагнітному середовищі. Розглянуто основні етапи алгоритму, їх взаємозв'язок та технічні аспекти реалізації, що забезпечують високу ефективність роботи РЛС навіть у складних умовах.

Формування алгоритму адаптації радіолокаційної роботи виконується на основі результатів моделювання розглянутих раніше методів, з урахуванням можливості налаштування у реальному часі, та є необхідним для забезпечення її стійкої роботи, високої точності виявлення цілей, придушення активних завад і адаптації до змінних умов електромагнітного середовища.

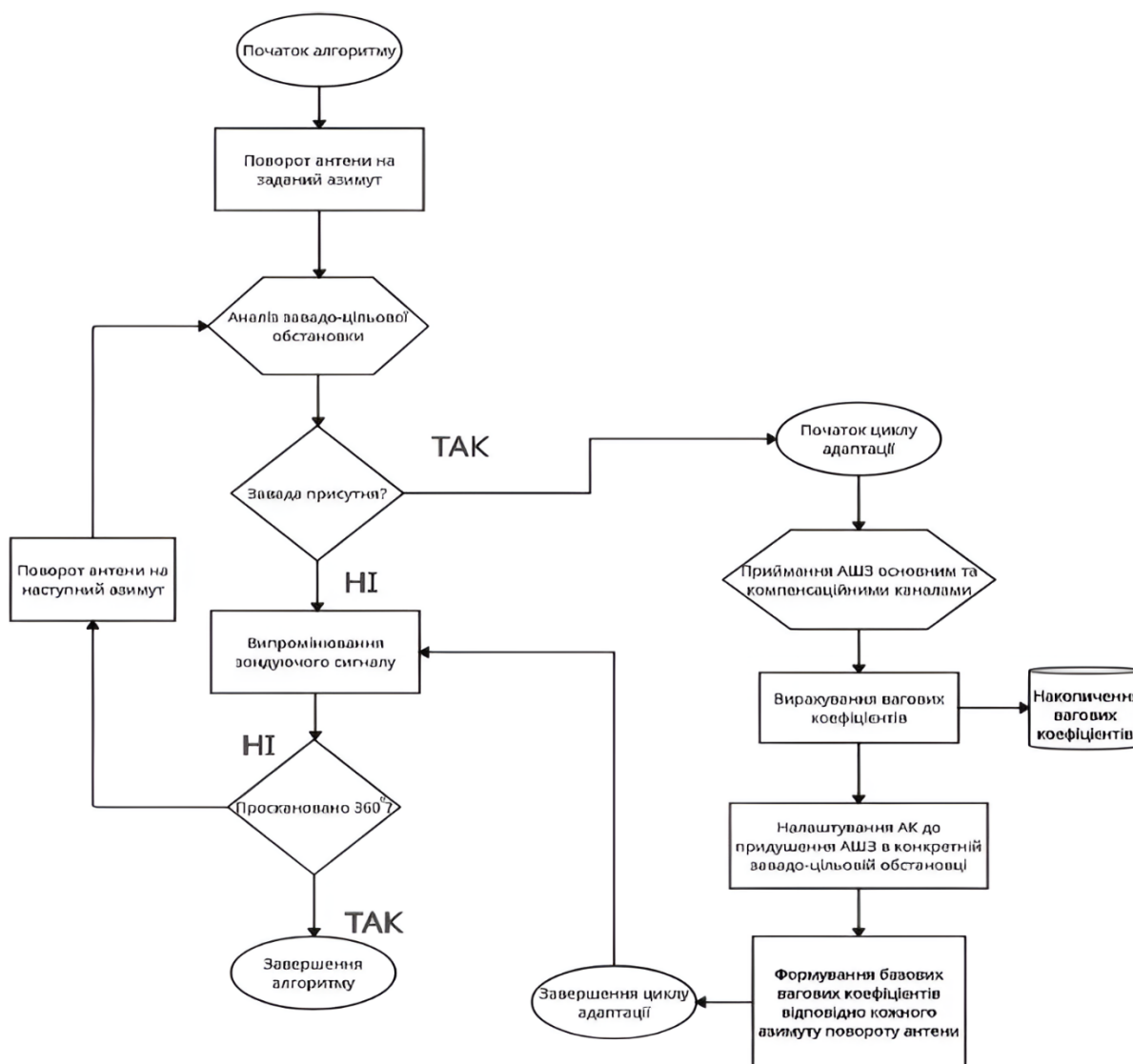


Рисунок 4.6 – Блок-схема алгоритму адаптації РЛС

Головним завданням цього алгоритму є виявлення та придушення активних шумових завад у реальному часі для підвищення точності та ефективності функціонування РЛС.

На рис. 4.6 наведено блок-схему алгоритму, яка відображає послідовність операцій, виконуваних під час адаптації системи до змінюваної завадово-цільової обстановки.

Для більшого пояснення функціонування алгоритму необхідно по чергово пояснити етапи його роботи, щоб мати розуміння принципу виконання адаптації системи до активних шумових завад.

1. Початок роботи алгоритму: процес адаптації починається з визначення початкового стану РЛС. Антена встановлюється на заданий азимут для аналізу поточної завадово-цільової обстановки.

2. Аналіз завадово-цільової обстановки: на цьому етапі система аналізує сигнали, що надходять, і визначає наявність активної радіоелектронної протидії. Це включає:

- Оцінку шумових завад, відображених на індикаторі оператора.
- Визначення напрямку та характеристик джерел завад.

3. Перевірка наявності завад

— Якщо завади відсутні: Система переходить до випромінювання зондуючого сигналу.

— Якщо завади присутні: Виконується адаптація адаптивного компенсатора (АК).

4. Адаптація адаптивного компенсатора (АК): у разі виявлення завад виконується комплекс операцій:

- Прийом активних шумових завад основним та компенсаційними каналами.
- Обчислення вагових коефіцієнтів для компенсаційних каналів.
- Налаштування адаптивного компенсатора для придушення завад у поточній завадово-цільовій обстановці.

— Формування базових вагових коефіцієнтів для кожного азимуту повороту антени.

5. Випромінювання зондуючого сигналу: після виконання адаптації (або у разі відсутності завад) РЛС випромінює зондуючий сигнал для виявлення та обробки відбитих сигналів.

6. Охоплення кругового сектору: наступним кроком виконується перевірка охоплення повної азимутальної площини, щоб визначити завершення алгоритму. Якщо весь простір охоплено, алгоритм завершується. Інакше – антена повертається на наступний азимут.

7. Поворот антени на наступний азимут: антена автоматично повертається на наступний азимут для виконання аналізу на новій ділянці простору. Цикл повторюється для кожного азимутального положення антени.

8. Зміна заводово-цільової обстановки: у разі зміни заводових умов система повертається на початок алгоритму для повторного аналізу та адаптації.

9. Завершення алгоритму: у випадку, коли завершено повне сканування азимутальної площини, алгоритм завершує свою роботу, до моменту поки не зміниться заводо-цільова обстановка.

Таким чином, система автоматично підлаштовується до змін у заводо-цільовій обстановці завдяки використанню вагових коефіцієнтів.

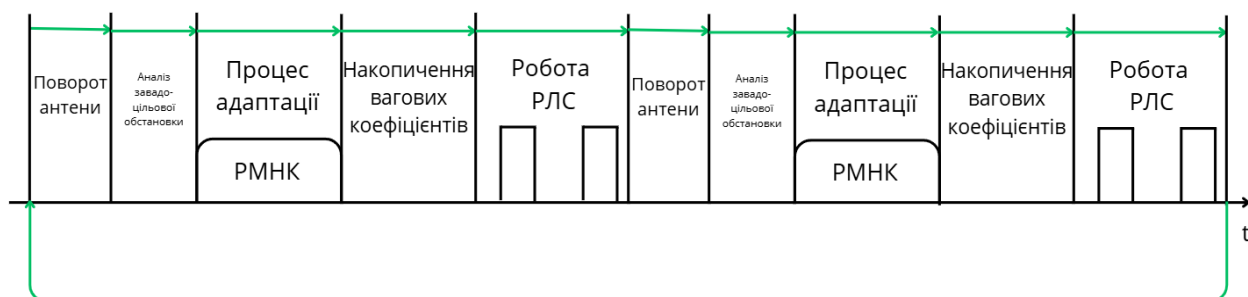


Рисунок 4.7 – Етапи роботи АК в режимі адаптації

Циклічність забезпечує повторення алгоритму для кожного повороту антени, що забезпечує повне охоплення простору. Значною перевагою є реалізація в реальному часі, так як алгоритм дозволяє швидко реагувати на зміни обстановки, що робить систему стійкою до зміни просторової обстановки та забезпечує стабільну роботу.

На рис. 4.7 зображено етапи роботи автокомпенсатора в режимі адаптації, відповідно до розробленого алгоритму. Його аналіз показує, що адаптація РЛС до зміни заводової обстановки виконується в циклічному режимі, що позитивно впливає на її гнучкість та динамічність, а чітке розмежування етапів адаптації та основної роботи радіолокаційної станції дозволяє системі ефективно вирішувати поставлені завдання.

Відповідно, вищенаведений алгоритм здатен забезпечити комплексний підхід до вирішення задачі адаптації РЛС виявлення БПЛА в умовах радіоелектронної боротьби, чим дозволяє забезпечити високу якість радіолокаційної інформації навіть у складних умовах.

4.3 Висновки

У четвертому розділі виконано аналіз процесу формування та реалізації алгоритму адаптації радіолокаційних систем в умовах радіоелектронної боротьби. Було розроблено схему, яка забезпечує можливість автоматичного коригування параметрів роботи антенної системи для підвищення ефективності придушення активних шумових завад та збільшення селективності корисного сигналу.

Основними результатами цього розділу є формування логічної структури алгоритму, на основі чого визначено основні етапи процесу адаптації, такі як аналіз завадової ситуації, адаптація автокомпенсаторів, обчислення вагових коефіцієнтів, а також повторення циклу в умовах динамічної зміни завадової обстановки.

Також, було проведено моделювання ключових процесів адаптації. Було реалізовано алгоритм із застосуванням основних принципів обчислення, включаючи аналіз кореляційних характеристик сигналів і визначення оптимальних вагових коефіцієнтів для компенсації завад.

Завдяки ітеративному підходу адаптації алгоритм дозволяє динамічно реагувати на зміни радіоелектронного середовища, забезпечуючи мінімізацію впливу завад та збереження високої точності виявлення корисного сигналу.

В свою чергу, блок-схема алгоритму, що наведена в цьому розділі, демонструє чітку послідовність дій, що дозволяє інтегрувати алгоритм у реальні системи управління радіолокаційними станціями виявлення БПЛА.

Таким чином, розроблений алгоритм є універсальним рішенням для підвищення ефективності радіолокаційних систем, що працюють в умовах складної радіоелектронної обстановки, і може бути основою для подальшого вдосконалення радіотехнічних систем виявлення БПЛА, та інших повітряних цілей.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання завдань, поставлених під час виконання роботи, проведено огляд сучасних радіолокаційних систем виявлення БПЛА. Визначено ключові особливості таких систем. Зокрема, найбільше увага приділялася здатності працювати у складній завадо-цільовій обстановці. Це включає застосування фазованих антенних решіток та адаптивних алгоритмів обробки сигналів. Аналіз розглянутих комплексів продемонстрував необхідність удосконалення систем виявлення для забезпечення підвищення ефективності моніторингу повітряного простору в умовах активних радіоперешкод.

Розглянуто тенденції розвитку систем радіоелектронної боротьби, орієнтованих на придушення радіолокаційних станцій та зв'язкових систем. Під час виконання завдання було виявлено тенденцію до використання широкосмугових завад та вузькосмугових, спрямованих перешкод, що забезпечують негативний вплив на режим роботи систем виявлення.

Виконано аналіз підходів до боротьби з активними завадами в радіолокаційних системах. Зокрема, увагу приділено методам адаптивної фільтрації, просторової селекції та комбіновані підходи. Було встановлено, що застосування багатоканальних адаптивних систем обробки сигналів є найбільш ефективним при роботі системи в умовах активної роботи засобів радіопротидії.

Визначено, що просторові методи, які базуються на використанні адаптивних фазованих антенних решіток, дозволяють знизити рівень впливу завад шляхом формування вузьких діаграм спрямованості та «провалів» у напрямках завад. Ці підходи суттєво підвищують ефективність роботи РЛС в умовах складної радіоелектронної обстановки.

Проведено моделювання роботи багатоканального автокомпенсатора для придушення активних завад. Результати моделювання показали, що такий метод дозволяє забезпечити високий рівень придушення завад за умов складної просторової обстановки. Наприклад, при моделюванні використовувалась багатоканальна система що має 3 компенсаційні канали. З аналізу результатів можливо помітити, що

при наявності у просторі більше 4-х завад система втрачає свою здатність забезпечувати ефективне придушення завад, що вказує на можливості до подальшої модифікації методу адаптації.

Виконано компаративний аналіз методів боротьби з активними завадами, таких як РМНК та Вінера-Хопфа. Завдяки цьому було визначено, що запропонований метод наближається до теоретично розрахованих результатів, та здатен забезпечити придушення завад при складній завадо-цільовій обстановці.

Розроблено алгоритм просторової адаптації, який дозволяє автоматично налаштувати антенну систему відповідно до наявних просторових умов роботи радіолокаційної станції. В свою ж чергу, алгоритм включає виявлення завад, розрахунок вагових коефіцієнтів та формування адаптивної діаграми спрямованості.

Таким чином, результати дослідження підтверджують важливість застосування адаптивних підходів у сучасних РЛС, які забезпечують підвищення їх завадозахищеності. Розроблений алгоритм та змодельовані підходи демонструють високу ефективність у вирішенні завдань боротьби з активними завадами, що робить їх перспективними для впровадження у практику.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Merrill Skolnik. Radar Handbook. Second Edition by The McGraw-Hill Companies, New York, 1990.
2. Peters Ada / Kolchuga Passive Early Warning Radar [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://peters-ada.de/Kolchuga2.pdf>
3. AN/MPQ-64 “Sentinel” [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/04.battle/karte011.en.html>.
4. Leonardo DRS. Multi-Mission Hemispheric Radar (MHR) Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.drsrcada.com/products/mhr>.
5. TRML-3D/32. Mobile Air Surveillance and Defence Radar [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.hensoldt.net/products/radar-iff-and-datalink/trml-3d/32/>.
6. TRML-3D. Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.deagel.com/Tactical%20Vehicles/TRML-3D/a000467>.
7. ELTA North America. 2026B VSHORAD [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://eltanorthamerica.com/products/vshorad/>.
8. How Radar Jamming & Deception Changed Warfare FOREVER (Plus Future Trends) [Електронний ресурс] // Bliley Technologies. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://blog.bliley.com/radar-jamming-deception-electronic-warfare>.
9. ОСНОВИ ПОБУДОВИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ РОЗВІДКИ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ [Електронний ресурс] // МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ ХАРКІВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПОВІТРЯНИХ СИЛ імені ІВАНА КОЖЕДУБА. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: http://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/10414/1/%D0%9A%D0%B E%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9_%D0%9E%D0%9F_%D0%A0%D0%9B%D0%97_%D0%A0%D0%9F%D0%9F.pdf.

10. Description of the radio jamming station R-330Zh ZHITEL [Електронний ресурс] // Smartencyclopedia. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://smartencyclopedia.org/content/r-330zh-zhitel/>.
11. Rockwell D. L. Military Electronics Briefing. Radar & Sonar Systems / David L. Rockwell. // Teal Group. – 2019.
12. Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook, (Fourth Edition). NAVAL AIR WARFARE CENTER WEAPONS DIVISION POINT MUGU, CA 93042, 2013
13. Shyrman, Ja.D. and Manzhos, V.M. (2008), Teorija i tehnyka obrobky radiolokacijnoi' informacii' na foni pereshkod, VIRTA PPO, Harkiv
14. Чмельов В. О. РАДІОЛОКАЦІЙНІ СИСТЕМИ. Розрахунково-графічна робота. Навчальний посібник [Електронний ресурс] / Вячеслав Орійович Чмельов. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/bc3868c7-fe91-4d14-b65a-d035658b1fa3/content>.
15. Merrill Skolnik. Radar Handbook. Third Edition by The McGraw-Hill Companies, New York, 2008.
16. A. Stafeev / American Journal of Electrical and Electronic Engineering. 2020.
17. Zhang Y. Spatial Multi-Interference Suppression in Monopulse Radar With Reconfigurable Distributed Array Nodes [Електронний ресурс] / Y. Zhang, T. Haihong. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10587158>.
18. Monzingo Robert A. Introduction to adaptive arrays / Robert A. Monzingo, Randy L. Haupt, Thomas W. Miller. -2nd ed. Scitech publishing, inc. 2011.
19. Пропозиції щодо модернізації пристрою захисту від активних шумових перешкод РЛС П-18 Малахіт / А. А. Гризо та ін. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 2(43). – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.14>

ДОДАТОК А

```

%% АВТОКОМПЕНСАТОР АКТИВНИХ ЗАВАД

clear;
NK = 3; % Кількість компенсаційних каналів
p = [10 10 10 10 10]; % Потужність завод
fi = [-21 -7 5 12 18]; % Пеленг завод
SIG = max(size(p));
nmax = 300;
mmax = 500;

alfa = pi * sin(fi * pi / 180); % Кутові значення
Po = sum(p) + 1; % Загальна потужність
sigma = sqrt(Po); % Стандартне відхилення

% Обчислення матриці W
for l = 1:NK
    for k = 1:SIG
        W(l, k) = sqrt(p(k)) * exp(l * li * alfa(k));
    end
end

% Оптимальне рішення за рівнянням Вінера-Хопфа
Ws = [sqrt(p(1:SIG)); W];
R = Ws * Ws' + eye(NK + 1);
B = R(2:NK + 1, 2:NK + 1);
Ro = R(2:NK + 1, 1);
A1 = inv(B) * Ro; % Оптимальні коефіцієнти
PminLS = abs(Po - Ro' * A1);
Pmin1 = 20 * log10(PminLS / Po);
P_opt = zeros(nmax, 1);
P_opt = P_opt(1:nmax, 1) + Pmin1;
plot(P_opt, 'r'); % Червона крива для методу Вінера
hold on;

% Адаптація РМНК
Pvih = zeros(nmax, 1);
Pvih3 = zeros(nmax, 1);

sigm = 1;
sigm1 = 0;
Dnach = 0.5;
Rv = sigm^2;

for m = 1:mmax
    k = zeros(NK, 1);
    Q = sigm1^2 * eye(NK);
    P = Dnach * eye(NK);

    for n = 1:nmax

```

```

Pz = P + Q;
Vs = (randn(SIG, 1) + 1i * randn(SIG, 1)) / sqrt(2);
Vno = (randn(1) + 1i * randn(1)) / sqrt(2);
Vnd = (randn(NK, 1) + 1i * randn(NK, 1)) / sqrt(2);

Uo(n) = sqrt(p(1:SIG)) * Vs + Vno;
Ud = W * Vs + Vnd;

D = Ud.' * Pz * conj(Ud) + Rv; % D
K = Pz * conj(Ud) * inv(D); % Коефіцієнт підсилення

P = Pz - K * Ud.' * Pz;

Uvih = Uo(n) - Ud.' * k;
k = k + K * (Uo(n) - Ud.' * k); % Оцінка вагових
коефіцієнтів W

Pvih(n) = Pvih(n) + abs(Uvih^2);
end
Pvih3 = Pvih3 + Pvih;
end

Pvih = 20 * log10((Pvih / mmax) / Po);
plot(Pvih, 'b'); % Синя крива для РМНК алгоритму

ylim([-20 0]); % Обмеження графіка по амплітуді
xlabel('Кількість ітерацій, n');
ylabel('Коефіцієнт подавлення завад, дБ');
grid on;
hold off;

```