Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

факультет кібербезпеки
(повна назва)
Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*

Аналіз використання технології «beamforming»у системах мобільного зв'язку
(тема)

Виконав: Орда Владислав Сергійович
здобувач *4* року навчання,
групи *ТРТК - 20 - 1*

Владислав ОРДА
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність *172 Телекомунікації та радіотехніка*
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми *освітньо-професійна*

Освітня програма *«Телекомунікації»*
(повна назва освітньої програми)

Керівник *зав. каф. ІМІ Микола МОСКАЛЕЦЬ*
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ *Микола МОСКАЛЕЦЬ*
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Здобувач / *Владислав ОРДА* /

Керівник / *Микола МОСКАЛЕЦЬ* /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*

Спеціальність *172 Телекомунікації та радіотехніка*
(код і повна назва)

Тип програми *освітньо-професійна*
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма *«Телекомунікації»*
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«*26*» *червня* 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувача Орда Владислав Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _Аналіз використання технології beamforming у системах мобільного зв'язку
затверджена наказом університету від _01__05_____20_26_ р. № _361 Стз.____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _22_06_ 20_26_ р.

Стандарт мобільного зв'язку 5G New Radio. Smart-антена – лінійна рівномірна адаптивна антенна решітка. Методи адаптивного формування діаграми спрямованості антени (beamforming): метод найменшого середньоквадратичного відхилення (LMS – Least Mean Square), рекурсивний алгоритм найменших квадратів (RLS – Recursive Least Square), алгоритм постійного модуля (CMA – Constant Modulus Algorithm). Відстань між між антенними елементами антенної решітки (d): 0,125λ,0,25λ, 0,5λ та λ. Розмір кроку (μ): 0.1, 0.01 та 0.001. Кількість елементів антенної решітки: N=4,6,8,12,16. Шум системи: 0,1 та 0,01. Бажаний сигнал DOA: 20 градусів. Кути повороту для нульових завад: -82, -40, -19, -10, 0 і 40 (градус). Швидкість передачі даних, Мбіт/с:100. Кількість вибірок (час ітерації): 210. Ширина смуги пропускання системи (W): 1,25 МГц. Коефіцієнт бітових помилок (BER): 10^{-3}

___.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Аналіз передумов впровадження технологій формування променя в системи мобільного зв'язку

4.2 Методи реалізації інтелектуальних антен у системах мобільного зв'язку

4.3 Дослідження питань синтезу діаграми спрямованості лінійної рівномірної антенної решітки

4.4 Дослідження алгоритмів адаптивного формування променю інтелектуальної антени

4.5 Оцінка ефективності алгоритмів адаптивного формування променю інтелектуальної антени

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Отримання завдання	01.05.2026	*виконано*
2.	Збір матеріалів для дослідження	23.05.2026	*виконано*
3.	Розробка 1 розділу	31.05.2026	*виконано*
4.	Розробка 2 розділу	05.06.2026	*виконано*
5.	Розробка 3 розділу	12.06.2026	*виконано*
6.	Розробка 4 розділу	14.06.2026	*виконано*
7.	Розробка 5 розділу	16.06.2026	*виконано*
8.	Розробка 6 розділу	18.06.2026	*виконано*
9.	Оформлення кваліфікаційної роботи	21.06.2026	*виконано*

Дата видачі завдання *18 травня 2026 р.*

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ *(зав. каф. Микола МОСКАЛЕЦЬ)*
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 83 сторінок, 44 рисунка, 4 таблиці, 2 додатки, 25 джерел,

СИСТЕМА МОБІЛЬНОГО ЗВ’ЯЗКУ 5G, СМАРТ-АНТЕНА, АДАПТИВНА АНТЕННА РЕШІТКА, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ, ФОРМУВАННЯ ПРОМЕНЯ, НАПРЯМ ПРИХОДУ, МЕТОД НАЙМЕНШОГО СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНОГО ВІДХИЛЕННЯ, РЕКУРСИВНИЙ АЛГОРИТМ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ, АЛГОРИТМ ПОСТІЙНОГО МОДУЛЯ

Мета роботи – аналіз принципів функціонування та ефективності використання технології beamforming у сучасних системах мобільного зв’язку, а також дослідження її впливу на основні параметри радіоканалу в мережах LTE та 5G NR на основі математичного моделювання.

Об'єкт дослідження – Об’єктом дослідження є сучасні системи мобільного зв’язку, зокрема мережі LTE та 5G NR, що використовують технології просторової обробки сигналів та антенні системи типу MIMO та Massive MIMO

Предмет дослідження – Предметом дослідження є технологія beamforming як метод просторового формування та керування радіосигналом, а також її вплив на характеристики радіоканалу, зокрема RSRP, SINR, пропускну здатність та спектральну ефективність.

У роботі проведено порівняльний аналіз застосування beamforming у LTE та 5G NR, огляд методів математичного моделювання роботи антенних решіток (ULA) та процесу формування променя, методів просторової обробки сигналів та теорії антенних решіток. Здійснено комп’ютерне моделювання роботи радіоканалу з beamforming та без нього. Проведено порівняльну оцінку ефективності за показниками RSRP, SINR та пропускної здатності та статистичний аналіз отриманих результатів моделювання.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 88 pages, 44 figures, 4 tables, 2 appendices, 25 references,

5G MOBILE COMMUNICATION SYSTEM, SMART ANTENNA, ADAPTIVE ANTENNA ARRAY, DIRECTIVITY PATTERN, BEAMFORMING, ARRIVAL DIRECTION, LEAST MEAN SQUARE METHOD, RECURSIVE LEAST SQUARES ALGORITHM, CONSTANT MODULATION ALGORITHM

The objective of this work is to analyze the operating principles and effectiveness of beamforming technology in modern mobile communication systems, as well as to investigate its impact on key radio channel parameters in LTE and 5G NR networks based on mathematical modeling.

Research Object – The research object is modern mobile communication systems, specifically LTE and 5G NR networks, which utilize spatial signal processing technologies and MIMO and Massive MIMO antenna systems.

Subject of the study – The subject of the study is beamforming technology as a method of spatial shaping and control of radio signals, as well as its impact on radio channel characteristics, specifically RSRP, SINR, throughput, and spectral efficiency.

The paper presents a comparative analysis of the use of beamforming in LTE and 5G NR, a review of methods for mathematical modeling of the operation of antenna arrays (ULA) and the beamforming process, methods of spatial signal processing and the theory of antenna arrays. Computer modeling of the operation of a radio channel with and without beamforming was performed. A comparative assessment of the efficiency according to RSRP, SINR and throughput indicators and a statistical analysis of the obtained modeling results were performed.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, символів, одиниць і термінів…..... 8
Вступ…… 9
1 Теоретичні основи мобільних мереж та технології beamforming 11
1.1 Еволюція систем мобільного зв’язку від 1G до 5G 11
1.2 Особливості архітектури сучасних мереж мобільного зв’язку 15
1.3 Використання антенних систем у стільникових мережах 17
1.4 Принципи роботи технології Beamforming 19
1.5 Основні типи Beamforming 21
1.6 Взаємодія Beamforming та технології Massive MIMO 22
1.7 Висновки до розділу 1 24
2 Аналіз застосування та ефективності технології beamforming у мережах LTE та 5G NR 25
2.1 Особливості використання Beamforming у мережах LTE 25
2.2 Реалізація Beamforming у мережах 5G NR 26
2.3 Алгоритми формування та керування променем 28
2.4 Аналіз впливу Beamforming на параметри мережі 30
2.5 Переваги та недоліки використання Beamforming 31
2.6 Проблеми впровадження технології у мережах мобільного зв’язку 32
2.7 Перспективи розвитку Beamforming у мережах 6G 33
2.8 Висновки до розділу 2 34
3 Дослідження питань синтезу діаграми спрямованості лінійної рівномірної антенної решітки……. 36
3.1 Синтез діаграми спрямованості у лінійних антенних решітках.. 36
3.2 Лінійні антенні решітки з рівноамплітудним збудженням та лінійною зміною фази…….. 41
4 Дослідження алгоритмів адаптивного формування променю інтелектуальної антени……... 43
4.1 Побудова інтелектуальної антени……... 43
4.2 Розробка алгоритму адаптивного формування променя в інтелектуальній антени……... 43

4.3 Математичне моделювання системи та трафіку…….. 46
4.4 Алгоритм формування променю на основі найменшого середнього квадратичного відхилення…… 47
4.5 Алгоритм формування променю на основі рекурсивного алгоритму найменших квадратів (RLS)……. 54
4.6 Аналіз ефективності адаптивних алгоритмів формування діаграми спрямованості RLS і LMS лінійної антенної решітки…… 59
4.7 Алгоритм адаптивного формування цифрової діаграми спрямованості антенної решітки на основі постійного модуля CMA. 63
5 Оцінка ефективності алгоритмів адаптивного формування променю інтелектуальної антени……... 68
5.1 Результати моделювання адгоритмів LMS і CMA…… 68
5.2 Рекомендації щодо можливості застосування антенної решітки у системах мобільного зв’язку…… 69
Висновки……. 72
Перелік джерел посилання……..…… 74
Додаток А. Програма для побудови діаграми спрямованості антенної решітки…….. 77

ВСТУП

Сучасний розвиток систем мобільного зв’язку супроводжується стрімким зростанням обсягів передачі даних, збільшенням кількості абонентів та підвищенням вимог до якості обслуговування. Особливо актуальними стають питання забезпечення високої швидкості передачі інформації, зменшення рівня завад, підвищення спектральної ефективності та покращення енергетичних характеристик мереж. У зв’язку з цим оператори мобільного зв’язку активно впроваджують новітні технології, які дозволяють ефективно використовувати обмежений радіочастотний ресурс.

Однією з ключових технологій сучасних мереж LTE та 5G є технологія «beamforming» – просторове формування сигналу, що забезпечує спрямовану передачу електромагнітної енергії в напрямку конкретного користувача. На відміну від традиційних антенних систем, які випромінюють сигнал рівномірно в широкому секторі, технологія «beamforming» дозволяє формувати вузькі промені, концентруючи потужність передавання у необхідному напрямку. Це сприяє підвищенню рівня корисного сигналу, зменшенню впливу міжсоткових завад та покращенню якості зв’язку.

Використання технології «beamforming» є особливо важливим у мережах п’ятого покоління, де застосовуються високочастотні діапазони та масиви антен типу Massive MIMO. Завдяки цьому забезпечується підтримка великої кількості одночасних користувачів, збільшення пропускної здатності мережі та підвищення енергоефективності систем мобільного зв’язку. Разом із тим впровадження технології потребує детального аналізу принципів її роботи, методів формування променів та оцінювання ефективності в реальних умовах експлуатації.

У зв’язку з цим актуальним завданням в кваліфікаційної роботі є аналіз і дослідження алгоритмів та технологій формування діаграми спрямованості для систем мобільного зв’язку для підвищення ефективності функціонування сучасних мобільних мереж, зокрема LTE та 5G

Метою роботи є дослідження принципів функціонування та особливостей застосування технології «beamforming» у системах мобільного зв’язку, а також оцінювання її ефективності в сучасних мережах LTE та 5G.

У роботі виконано аналіз передумов впровадження інтелектуальних антен у мережах мобільного зв’язку 5G, а також розглянуто основні методи реалізації цих

технологій, завдяки яким стає можливим реалізувати адптивне формування діаграми спрямованості.

Ключовим етапом адаптивного формування діаграми спрямованості smart-антен є обчислення комплексних вагових коефіцієнтів, необхідних для формування променя. До найбільш поширених алгоритмів належать метод найменших середніх квадратів (LMS – Least Mean Square), рекурсивний метод найменших квадратів (RLS – Recursive Least Square) та алгоритм постійного модуля (CMA – Constant Modulus Algorithm).

У межах роботи синтезовано математичну модель процесу формування діаграми спрямованості лінійної антенної решітки з використанням алгоритмів LMS, RLS та CMA.

Також у середовищі математичного моделювання MatLab проведено дослідження працездатності алгоритмів LMS, RLS і CMA з урахуванням різної кількості антенних елементів, різних відстаней між елементами антенної решітки та інших параметрів моделі. За результатами моделювання отримано кількісні оцінки ефективності алгоритмів LMS, RLS і CMA в умовах заданих обмежень синтезу адаптивної антенної решітки.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ ТА ТЕХНОЛОГІЙ BEAMFORMING

1.1 Еволюція систем мобільного зв’язку від 1G до 5G

Еволюція систем мобільного зв’язку є послідовним і закономірним процесом розвитку радіотехнологій, спрямованим на підвищення швидкості передачі даних, покращення якості обслуговування користувачів, розширення функціональних можливостей мереж та підвищення ефективності використання радіочастотного спектра. Кожне наступне покоління мобільного зв’язку усувало обмеження попереднього та впроваджувало нові технологічні підходи, що визначали подальший напрям розвитку телекомунікаційної галузі.

1G — перше покоління мобільного зв’язку



Рисунок 1.1 – перше поколыння мобыльного зв’язку

Перше покоління мобільних систем зв’язку (1G) з’явилося у 1980-х роках і базувалося на аналоговій передачі радіосигналу. Основним призначенням таких мереж була виключно передача голосу без використання цифрової обробки даних.

До основних характеристик 1G належать:

- аналогова модуляція сигналу;
- низька якість зв’язку та висока чутливість до радіоперешкод;
- відсутність механізмів шифрування інформації, що зумовлювало низький рівень безпеки;
- обмежена пропускна здатність мережі.

Ключовим недоліком систем 1G була повна відсутність підтримки передачі цифрових даних, що суттєво обмежувало їх функціональність і подальший розвиток сервісів.

2G – перехід до цифрових технологій



Рисунок 1.2 – перехід до цифрових технологій

Другий етап розвитку мобільного зв’язку (2G) ознаменував перехід від аналогових до цифрових технологій. Найбільш поширеним стандартом став GSM, який забезпечив більш стабільну та захищену передачу інформації.

Основні особливості 2G:

- повністю цифрова обробка сигналу;
- підвищена якість голосового зв’язку;
- впровадження криптографічного захисту даних;
- поява сервісів SMS та MMS;
- більш ефективне використання радіочастотного спектра.

Системи 2G стали важливим етапом у розвитку мобільного зв’язку, оскільки створили базу для подальшого впровадження мобільних сервісів передачі даних, хоча швидкість доступу до них залишалася обмеженою.

3G — поява мобільного інтернету



Рисунок 1.3 – мобільний інтернет

Третє покоління (3G) суттєво розширило можливості мобільних мереж завдяки впровадженню високошвидкісної передачі даних та підтримці мультимедійних сервісів.

Основні характеристики 3G:

- підтримка мобільного інтернету;
- швидкість передачі даних до кількох Мбіт/с;
- можливість здійснення відеодзвінків;
- використання технологій UMTS та CDMA2000;
- покращена підтримка мультимедійного контенту.

Поява 3G стала ключовим етапом переходу від голосоорієнтованих сервісів до повноцінних цифрових послуг, що забезпечують доступ до Інтернету в мобільному середовищі.

4G LTE — повністю пакетна передача даних



Рисунок 1.4 – пакетна передача даних

Четверте покоління мобільного зв’язку (4G LTE) базується виключно на IP-архітектурі та відмовляється від класичної комутації каналів, включаючи голосові сервіси.

Основні особливості 4G:

- повністю пакетна IP-архітектура мережі;
- висока швидкість передачі даних (десятки та сотні Мбіт/с);
- низька затримка сигналу (latency);
- підтримка потокового відео високої якості (HD, 4K);
- використання технологій OFDM та MIMO.

Саме в мережах 4G активно почали застосовуватися багатоантенні системи (MIMO), які стали базою для подальшого розвитку просторової обробки сигналів та технології формування спрямованих променів.

5G — мережі нового покоління



Рисунок 1.5 – нове покоління мереж

П’яте покоління мобільного зв’язку (5G) є якісним технологічним стрибком у розвитку телекомунікаційних систем. Воно орієнтоване не лише на підвищення швидкості передачі даних, але й на забезпечення наднизької затримки, високої надійності та підтримки масового підключення пристроїв.

Основні характеристики 5G:

- надвисокі швидкості передачі даних (до кількох Гбіт/с);
- наднизька затримка сигналу;
- підтримка масового підключення пристроїв у рамках концепції IoT;
- використання міліметрових хвиль (mmWave);
- технологія Massive MIMO;
- застосування beamforming для спрямованої передачі сигналу.

Особливе значення в мережах 5G має технологія beamforming, яка дозволяє формувати спрямовані радіопромені на конкретні пристрої користувачів. Це підвищує якість зв’язку, зменшує рівень інтерференції та забезпечує більш ефективне використання радіочастотного спектра, що є критично важливим для сучасних високонавантажених мереж.

1.2 Особливості архітектури сучасних мереж мобільного зв’язку

Сучасні мережі мобільного зв’язку, зокрема LTE та 5G NR, побудовані на багаторівневій та гнучкій архітектурі, яка забезпечує ефективне управління трафіком, високу масштабованість, а також оптимальне використання радіочастотно-

го ресурсу. Загальна структура таких мереж умовно поділяється на два основні сегменти: радіодоступну мережу (RAN — Radio Access Network) та ядро мережі (Core Network), кожен з яких виконує власні функціональні завдання.

Радіодоступна мережа (RAN) є частиною телекомунікаційної системи, що забезпечує безпосередній радіозв'язок між кінцевими пристроями користувачів (UE — User Equipment) та базовими станціями оператора.

Основними елементами RAN є:

- UE (User Equipment) — мобільні телефони, IoT-пристрої, модеми;
- базові станції:
    - LTE: eNodeB;
    - 5G: gNodeB (gNB).

У сучасних мобільних мережах саме RAN відіграє ключову роль у забезпеченні якості радіозв'язку. На цьому рівні реалізуються такі технології, як:

- MIMO (Multiple Input Multiple Output);
- beamforming;
- адаптивне керування потужністю передачі;
- динамічний розподіл радіоресурсів.

Особливої важливості набуває еволюція RAN у мережах 5G, де ця підсистема стає більш інтелектуальною та децентралізованою. Частина функцій обробки сигналів переноситься ближче до користувача, що дозволяє зменшити затримки та підвищити ефективність обслуговування трафіку.

Ядро мережі (Core Network) відповідає за управління сеансами зв'язку, маршрутизацію трафіку, автентифікацію користувачів та взаємодію з зовнішніми мережами, включаючи Інтернет та мережі інших операторів.

У мережах 4G використовується архітектура:

- EPC (Evolved Packet Core).

У 5G відбувається перехід до нового покоління ядра:

- 5GC (5G Core).

Основними особливостями 5G Core є:

- сервісно-орієнтована архітектура (SBA — Service Based Architecture);
- підтримка мережевих зрізів (network slicing);
- висока гнучкість та масштабованість;
- повна орієнтація на пакетну IP-передачу даних.

Завдяки цим особливостям ядро мережі 5G здатне ефективно підтримувати різні класи сервісів — від звичайного мобільного інтернету до критично важливих систем зв’язку.

У сучасних мобільних мережах підсистеми RAN та Core тісно взаємодіють через стандартизовані інтерфейси. У мережах 5G ця взаємодія стає більш гнучкою та динамічною, що дозволяє адаптувати мережеву інфраструктуру під різні сценарії використання.

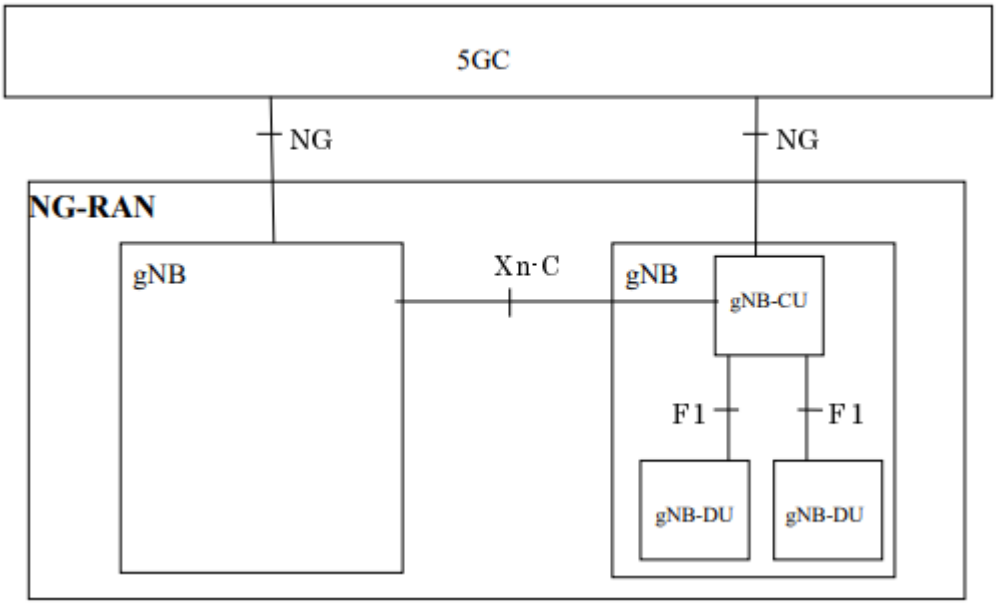


Рисунок 1.6 – Узагальнена архітектура 5G системи (RAN та Core Network)

Це забезпечує підтримку широкого спектра сервісів: від звичайного доступу до мобільного Інтернету до систем з наднизькою затримкою, таких як автономний транспорт, промислові IoT-рішення та критичні інфраструктури.

Важливою складовою сучасної архітектури мобільних мереж є антенно-фідерні системи базових станцій, які безпосередньо впливають на ефективність радіодоступу.

На рівні RAN реалізуються такі технології:

- Massive MIMO;
- формування спрямованих променів (beamforming);
- просторове мультиплексування сигналів.

Технологія beamforming дозволяє концентрувати енергію радіосигналу в напрямку конкретного користувача, що забезпечує:

- підвищення якості сигналу;
- покращення співвідношення сигнал/шум;

- більш ефективне використання радіочастотного спектра.

Таким чином, beamforming є ключовим елементом сучасної архітектури мобільних мереж, особливо в умовах 5G, де вимоги до швидкості, затримок і щільності підключень є максимально високими.

1.3 Використання антенних систем у стільникових мережах

Антенні системи є одним із ключових елементів сучасних стільникових мереж, оскільки саме вони забезпечують випромінювання та приймання радіосигналів між базовими станціями та абонентськими пристроями. Від їх конструктивних особливостей, конфігурації та принципів роботи безпосередньо залежать такі важливі параметри мережі, як радіус покриття, якість зв’язку, пропускна здатність та енергоефективність системи.

У ранніх поколіннях мобільного зв’язку застосовувалися переважно всеспрямовані (omni-directional) антени, які забезпечували рівномірне випромінювання сигналу у всіх напрямках. Такий підхід дозволяв спростити організацію покриття, однак мав суттєві недоліки, зокрема значні енергетичні втрати та низьку ефективність використання радіочастотного спектра.

У мережах 2G–4G широкого поширення набули секторні антенні системи, які дозволяють розділяти зону покриття однієї базової станції на кілька секторів, зазвичай 3 × 120° або 6 × 60°.

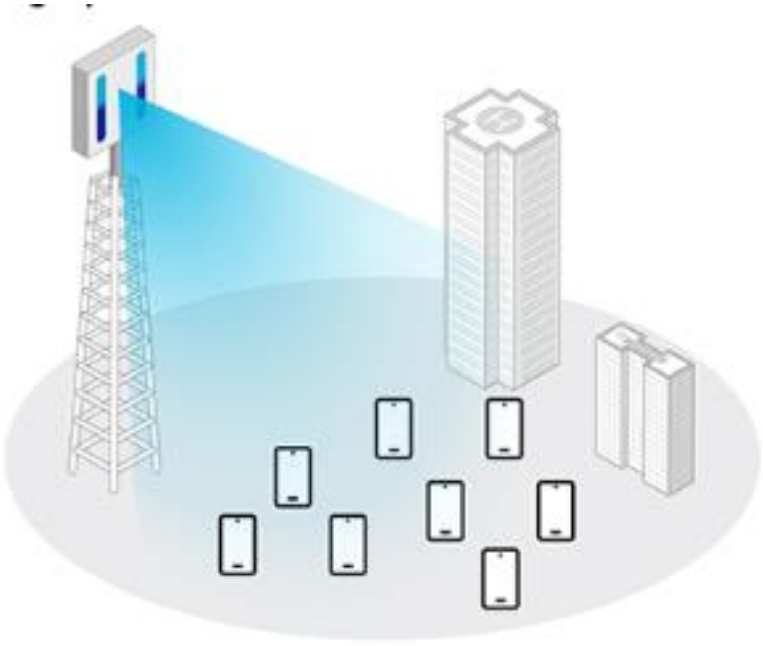


Рисунок 1.7 - Секторні антенні системи

Використання секторизації забезпечує такі переваги:

- підвищення ємності мережі;
- зменшення рівня міжканальних завад;
- більш ефективне використання радіоресурсів;
- покращення якості сигналу в межах окремого сектора.

Секторні антени стали базовим технічним рішенням для побудови стільникових мереж LTE, оскільки дозволили значно підвищити ефективність обслуговування великої кількості абонентів.

Із розвитком технологій 4G та особливо 5G широкого застосування набули антенні решітки, які складаються з великої кількості випромінюючих елементів, розміщених у певній геометричній конфігурації (лінійній, плоскій або просторовій).

Основними особливостями антенних решіток є:

- можливість незалежного керування фазою та амплітудою сигналів;
- формування складних просторових діаграм спрямованості;
- підтримка технології MIMO;
- реалізація алгоритмів beamforming.

Саме антенні решітки стали фізичною основою для реалізації керованого просторового випромінювання, що є критично важливим для сучасних високошвидкісних мобільних мереж.

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) є одним із ключових етапів розвитку антенних систем. Вона передбачає використання кількох антен на передачу та прийом сигналу, що дозволяє суттєво підвищити ефективність радіоканалу.

Основні переваги MIMO:

- збільшення швидкості передачі даних;
- підвищення надійності з’єднання;
- реалізація просторового мультиплексування сигналів.

У мережах 5G використовується розширена версія цієї технології — Massive MIMO, в якій кількість антенних елементів може досягати десятків або навіть сотень, що забезпечує значне підвищення пропускної здатності та гнучкість керування радіоресурсами.

Технологія beamforming є логічним продовженням розвитку антенних решіток і MIMO-систем. Вона полягає в керуванні фазовими характеристиками сигна-

лів на кожному антенному елементі таким чином, щоб забезпечити концентрацію енергії випромінювання у напрямку конкретного користувача.

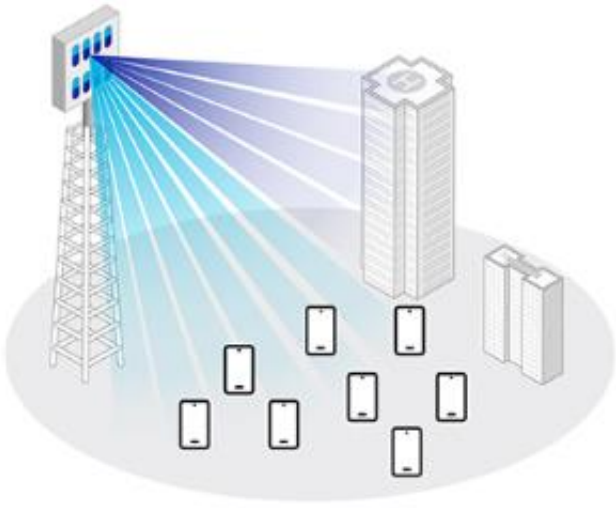


Рисунок 1.8 - MIMO-система

Таким чином, можна виділити наступну логічну взаємозалежність:

- антенна решітка — фізична структура системи;
- MIMO — метод організації роботи кількох антен;
- beamforming — алгоритм просторового формування та спрямування сигналу.

Завдяки такому поєднанню сучасні стільникові мережі отримують можливість значно підвищити ефективність використання спектра, покращити якість зв’язку та забезпечити стабільну роботу в умовах високої щільності користувачів.

1.4 Принципи роботи технології Beamforming

Beamforming (формування променя) — це технологія просторової обробки радіосигналів, яка дозволяє спрямовувати енергію випромінювання антенної системи в заданому напрямку шляхом керування фазою та амплітудою сигналів на окремих антенних елементах.

Основна ідея beamforming полягає в тому, що сигнали від кількох антен не випромінюються рівномірно у всі сторони, а складаються таким чином, що в потрібному напрямку відбувається їх конструктивна інтерференція, тоді як в інших напрямках — часткове або повне взаємне пригнічення (деструктивна інтерференція). У результаті формується вузькоспрямований радіопромінь, який може бути націлений на конкретного користувача.

Антенна решітка складається з N випромінюючих елементів, кожен з яких випромінює сигнал із певним фазовим зсувом. При правильному підборі фазових співвідношень сигнали в заданому напрямку підсилюють один одного за рахунок конструктивної інтерференції.

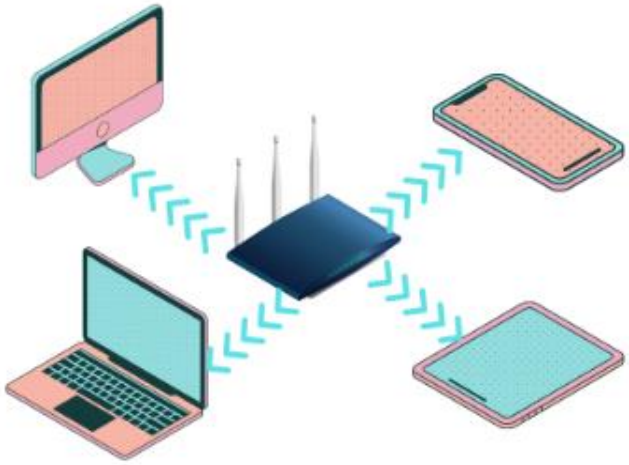


Рисунок 1.9 - Принцип формування спрямованого радіосигналу (Beamforming)

Таким чином, формування променя базується на двох основних керованих параметрах:

- фазове керування сигналом;
- амплітудне зважування сигналу.

Результатом є просторове перерозподілення енергії випромінювання без необхідності фізичного повороту антенної системи.

Сумарний сигнал антенної решітки може бути представлений як суперпозиція сигналів від кожного елемента з відповідними фазовими зсувами. У загальному вигляді:

- при синхронізації фаз сигналів відбувається їх підсилення в заданому напрямку;
- при протифазному розташуванні — взаємна компенсація сигналів.

Це дозволяє формувати керовану просторову діаграму спрямованості антени, змінюючи її форму та напрямок без зміни фізичної конфігурації системи.

Типи beamforming

У сучасних системах мобільного зв’язку технологія beamforming може реалізовуватися у кількох основних формах:

- аналоговий beamforming — керування фазою сигналу на радіочастотному рівні;
- цифровий beamforming — обробка сигналів у цифровій базовій смузі;
- гібридний beamforming — поєднання аналогового та цифрового підходів для підвищення ефективності системи.

У сучасних мережах 4G та особливо 5G технологія beamforming виконує критично важливу роль, оскільки дозволяє суттєво підвищити ефективність використання радіоресурсів.

Основні функції beamforming включають:

- підвищення рівня корисного сигналу на приймачі;
- зменшення міжкористувацької інтерференції;
- збільшення пропускної здатності мережі;
- підвищення енергоефективності базових станцій.

У мережах 5G beamforming є обов'язковим елементом функціонування базових станцій, особливо при використанні міліметрових хвиль, де втрати сигналу значно зростають і потребують точного просторового керування енергією.

Beamforming можна інтерпретувати як "розумне" спрямування сигналу, подібне до ліхтарика з регульованим променем, який не освітлює простір рівномірно, а концентрує енергію саме в напрямку потрібного користувача. Це забезпечує більш ефективну та стабільну роботу мобільного зв'язку.

1.5 Основні типи Beamforming

У сучасних системах мобільного зв'язку технологія beamforming може реалізовуватися різними способами залежно від рівня обробки сигналу, архітектури базової станції та вимог до продуктивності. Найпоширенішими є аналоговий, цифровий та гібридний типи beamforming, кожен з яких має власні особливості, переваги та обмеження.

Аналоговий beamforming передбачає формування спрямованого променя на радіочастотному (RF) рівні шляхом керування фазовими зсувами сигналів до їх підсилення та випромінювання.

Основні характеристики цього підходу:

- використання фазових шифтерів;
- формування одного променя на кожен RF тракт;
- відносно низька складність апаратної реалізації;

- обмежена гнучкість у керуванні просторовими характеристиками сигналу.

Перевагою аналогового beamforming є його висока енергоефективність та відносна простота реалізації. Водночас він має суттєве обмеження — неможливість одночасного формування кількох незалежних променів, що знижує ефективність у багатокористувацьких сценаріях.

Цифровий beamforming виконується на рівні цифрової обробки сигналів у базовій смузі (baseband). У цьому випадку кожен антенний елемент має власний незалежний тракт обробки сигналу.

Основні особливості цифрового підходу:

- повний контроль амплітуди та фази сигналу;
- можливість одночасного формування кількох незалежних променів;
- висока гнучкість у керуванні радіоресурсами;
- значні обчислювальні та апаратні витрати.

Цей тип beamforming забезпечує найвищу функціональну гнучкість і продуктивність, однак потребує складної та дорогої реалізації, особливо при великій кількості антенних елементів, що характерно для сучасних систем Massive MIMO.

Гібридний beamforming є компромісним рішенням, яке поєднує переваги аналогового та цифрового підходів. Він широко використовується в мережах 5G, особливо у міліметровому діапазоні частот, де вимоги до ефективності та енергоспоживання є критичними.

Архітектура гібридного beamforming включає:

- частину обробки сигналу на цифровому рівні;
- частину обробки на аналоговому рівні з використанням фазових шифтерів.

Основні переваги:

- зменшення кількості необхідних RF трактів;
- баланс між складністю реалізації та продуктивністю;
- можливість формування декількох променів;
- оптимальне співвідношення вартості та ефективності.

Порівняльна характеристика типів beamforming

Узагальнюючи, можна виділити наступні особливості кожного підходу:

- аналоговий beamforming є найпростішим, але найменш гнучким;
- цифровий beamforming забезпечує максимальну продуктивність, але є найбільш ресурсомістким;
- гібридний beamforming є оптимальним компромісом і фактично виступає стандартом для сучасних 5G систем.

1.6 Взаємодія Beamforming та технології Massive MIMO

Технології beamforming і Massive MIMO є взаємопов’язаними та взаємодоповнюючими складовими сучасних систем мобільного зв’язку, зокрема мереж 5G. Якщо Massive MIMO визначає збільшення кількості антенних елементів у базових станціях, то beamforming забезпечує ефективне просторове керування випромінюванням цих елементів, дозволяючи максимально реалізувати їх потенціал.

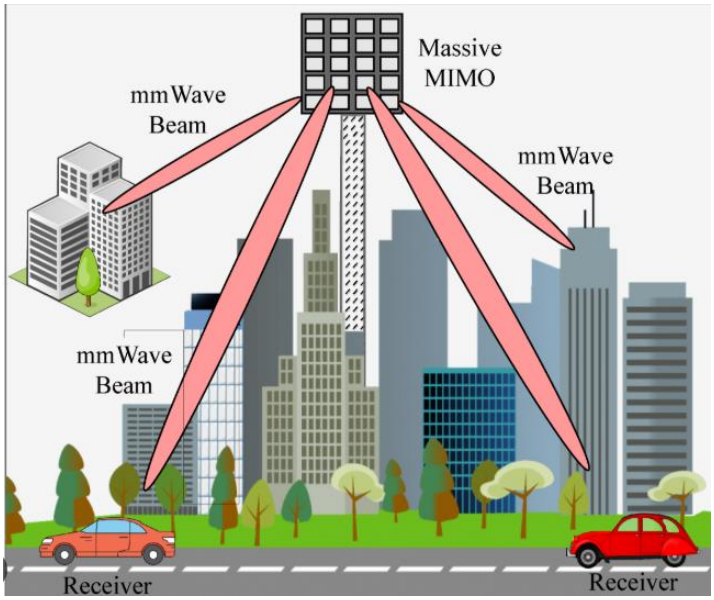


Рисунок 1.10 - Взаємодія Beamforming та технології Massive MIMO

Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) передбачає використання великої кількості антенних елементів — від десятків до сотень — на базовій станції. Це дозволяє одночасно обслуговувати кількох користувачів у межах одного частотного ресурсу, розділяючи їх за просторовими напрямками.

Основні переваги Massive MIMO:

- значне підвищення пропускної здатності мережі;
- збільшення спектральної ефективності;
- підвищення стійкості до радіоперешкод;
- можливість просторового розділення користувачів.

Beamforming є ключовим механізмом, що дозволяє реалізувати переваги Massive MIMO на практиці. Завдяки точному керуванню фазами та амплітудами сигналів на великій кількості антенних елементів система формує вузькоспрямовані промені, орієнтовані на конкретних користувачів.

У цьому контексті:

- Massive MIMO визначає кількість доступних просторових ступенів свободи;

- beamforming визначає спосіб використання цих просторових ресурсів.

Таким чином, beamforming виступає інструментом просторового керування, який дозволяє максимально ефективно реалізувати можливості багатоантенних систем.

У традиційних мобільних системах розділення користувачів здійснюється переважно за частотою або часом. У випадку Massive MIMO з beamforming додається третій вимір — просторовий.

Це забезпечує наступні можливості:

- одночасна робота кількох користувачів на одній частоті;
- формування окремих спрямованих променів для кожного користувача;
- суттєве зниження взаємних інтерференційних завад.

У результаті ефективність використання радіочастотного спектра значно зростає.

У мережах 5G NR технології beamforming і Massive MIMO функціонують як єдина інтегрована система. Massive MIMO забезпечує багатоканальність та просторову розмірність передачі, тоді як beamforming оптимізує напрямок випромінювання для кожного користувача.

Система працює адаптивно, змінюючи параметри променів у реальному часі відповідно до:

- руху користувачів;
- змін радіоумов;
- рівня інтерференції.

Це дозволяє підтримувати високу якість зв’язку навіть у складних умовах щільної міської забудови.

Поєднання Massive MIMO та beamforming є одним із ключових технологічних рішень сучасних мереж 5G, яке забезпечує:

- високу пропускну здатність;
- ефективне використання радіочастотного спектра;
- мінімізацію міжкористувацької інтерференції;
- масштабованість та адаптивність мережевої інфраструктури.

1.7 Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи побудови сучасних систем мобільного зв’язку, а також базові принципи технології beamforming, яка відіграє ключову роль у функціонуванні мереж 4G LTE та особливо 5G NR.

Було проаналізовано еволюцію мобільних мереж від 1G до 5G, що дозволило простежити поступовий перехід від аналогових систем передачі голосу до високошвидкісних цифрових мереж із підтримкою широкого спектра сервісів та масового підключення пристроїв. У процесі розвитку особливу увагу приділено зміні архітектури мобільних мереж, зокрема поділу на радіодоступну мережу (RAN) та ядро мережі (Core Network), що забезпечило значне підвищення гнучкості, масштабованості та ефективності сучасних телекомунікаційних рішень.

Також розглянуто еволюцію антенних систем у стільникових мережах — від простих всеспрямованих антен до секторних рішень, антенних решіток та технології Massive MIMO. Саме ці підходи стали фізичною основою для впровадження просторової обробки сигналів у сучасних мережах.

Окрему увагу приділено принципам роботи beamforming, який базується на керуванні фазовими та амплітудними характеристиками сигналів у багатоелементних антенних системах. Це дозволяє формувати вузькоспрямовані промені, підвищувати якість радіозв’язку та зменшувати рівень міжкористувацької інтерференції.

Крім того, проаналізовано основні типи beamforming — аналоговий, цифровий та гібридний, визначено їх переваги та обмеження. Також розглянуто роль Massive MIMO як технології, що забезпечує багатокористувацьку передачу даних за рахунок просторового розділення каналів і тісної інтеграції з beamforming.

Таким чином, у першому розділі сформовано необхідну теоретичну базу для подальшого аналізу практичних аспектів застосування технології beamforming у сучасних мобільних мережах, що буде розглянуто у наступних розділах роботи.

2 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ BEAMFORMING У МЕРЕЖАХ LTE ТА 5G NR

2.1 Особливості використання Beamforming у мережах LTE

У мережах LTE технологія beamforming застосовується як один із важливих методів підвищення якості радіозв'язку та ефективності використання частотного ресурсу. Хоча LTE не передбачає повноцінного використання масивних антенних систем, як це реалізовано в 5G, у даній технології вже закладено базові принципи просторової обробки сигналів, зокрема через використання MIMO та спрощених форм beamforming.

У LTE широко використовується технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output), яка передбачає застосування кількох антен як на стороні базової станції, так і на стороні абонентського пристрою. Саме MIMO створює основу для реалізації просторових методів обробки сигналу, включаючи елементи beamforming.

Залежно від конфігурації мережі LTE може підтримувати:

- 2×2 MIMO;
- 4×4 MIMO;
- у розширених реалізаціях — до 8×8 MIMO.

Завдяки цьому забезпечується підвищення пропускної здатності та покращення якості радіоканалу за рахунок просторового розділення потоків даних.

У мережах LTE beamforming реалізується переважно у двох основних формах:

- Transmit diversity (просторове рознесення) — метод, що підвищує надійність передачі сигналу шляхом його випромінювання через кілька антен із різними фазовими зсувами. Це дозволяє зменшити вплив завмирань та покращити стабільність з'єднання.
- Closed-loop beamforming — підхід, який передбачає використання зворотного зв'язку від користувацького обладнання для адаптації параметрів передачі сигналу та часткового спрямування енергії у бік користувача.

Ці механізми дозволяють реалізувати базові принципи спрямованої передачі сигналу, однак із меншою гнучкістю порівняно з більш сучасними реалізаціями в 5G.

Попри наявність елементів просторової обробки сигналів, LTE має низку обмежень у контексті використання beamforming:

- обмежена кількість антенних елементів;
- відсутність широкого застосування масивних антенних решіток;
- відсутність повноцінного динамічного керування променями (dynamic beam management);
- обмежена адаптивність до швидких змін радіоканалу.

Унаслідок цього ефективність beamforming у LTE є нижчою порівняно з мережами 5G.

Незважаючи на зазначені обмеження, застосування beamforming у LTE забезпечує низку важливих переваг:

- підвищення рівня сигналу на межі зони покриття;
- зменшення рівня інтерференції;
- покращення стабільності радіоз'єднання;
- збільшення пропускної здатності в умовах високого навантаження мережі.

Таким чином, у мережах LTE технологія beamforming реалізується у спрощеному вигляді та базується переважно на принципах MIMO та просторового рознесення сигналів. Вона стала важливим етапом еволюції мобільних систем, сформувавши технологічну основу для подальшого розвитку більш складних та ефективних рішень у мережах 5G NR.

2.2 Реалізація Beamforming у мережах 5G NR

У мережах 5G NR (New Radio) технологія beamforming є базовим та невід'ємним елементом радіодоступу, який забезпечує високу пропускну здатність, низькі затримки та ефективне використання радіочастотного спектра. На відміну від LTE, де beamforming застосовується обмежено, у 5G він інтегрований безпосередньо в архітектуру фізичного рівня радіозв'язку.

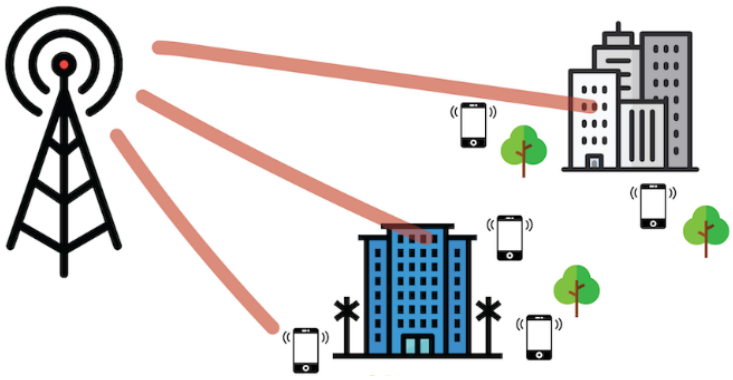


Рисунок 1.11 - Реалізація Beamforming у мережах 5G NR

Ключовими відмінностями реалізації beamforming у 5G є використання:

- антенних решіток Massive MIMO;
- міліметрового діапазону частот (mmWave);
- адаптивного керування променем у режимі реального часу.

Завдяки цьому базові станції 5G здатні формувати десятки або навіть сотні вузькоспрямованих променів, що дозволяє одночасно обслуговувати велику кількість користувачів із високою якістю сервісу.

У 5G NR beamforming реалізується безпосередньо на фізичному рівні за допомогою:

- precoding-матриць;
- керування фазою та амплітудою сигналів;
- просторового мультиплексування.

Система використовує інформацію про стан каналу (CSI — Channel State Information), що надходить від користувацького обладнання, для оптимального налаштування напрямку випромінювання та підвищення ефективності передачі даних.

У мережах 5G застосовуються всі основні підходи до реалізації beamforming:

- Analog beamforming — використовується переважно в mmWave-діапазоні для компенсації значних втрат сигналу;
- Digital beamforming — забезпечує формування кількох незалежних променів одночасно з високою гнучкістю керування;
- Hybrid beamforming — найбільш поширене рішення, яке поєднує переваги аналогового та цифрового підходів, забезпечуючи оптимальний баланс між продуктивністю та складністю реалізації.

Однією з ключових особливостей 5G є система керування променем (beam management), яка включає:

- пошук оптимального променя (beam sweeping);
- вимірювання якості радіосигналу;
- вибір найкращого напрямку передачі;
- динамічне оновлення параметрів у режимі реального часу.

Даний механізм є критично важливим в умовах руху користувачів та високої щільності абонентського навантаження.

Використання міліметрових хвиль (24–100 ГГц) у мережах 5G супроводжується значним загасанням сигналу, що робить застосування beamforming необхід-

ним. Формування вузькоспрямованих променів дозволяє компенсувати втрати енергії та забезпечити стабільний високошвидкісний зв’язок.

Впровадження beamforming у 5G забезпечує низку суттєвих переваг:

- значне підвищення швидкості передачі даних;
- зменшення рівня інтерференції між користувачами;
- підвищення енергоефективності мережі;
- стабільність з’єднання при високій мобільності;
- ефективну роботу в умовах щільної міської забудови.

Таким чином, у 5G NR технологія beamforming є не допоміжним інструментом, а фундаментальною складовою радіодоступу. Її реалізація на основі Massive MIMO, використання mmWave-діапазону та адаптивного керування променем забезпечує досягнення характеристик мобільного зв’язку, які були недоступні в попередніх поколіннях мереж.

2.3 Алгоритми формування та керування променем

Алгоритми формування та керування променем (beamforming and beam management algorithms) є ключовим елементом сучасних систем мобільного зв’язку, оскільки саме вони визначають принципи вибору напрямку передачі сигналу та адаптації параметрів радіовипромінювання до змін умов радіоканалу. У мережах 5G NR ці алгоритми працюють у режимі реального часу та базуються на інформації про стан каналу (CSI — Channel State Information), яка надходить від користувацького обладнання.

Процес beam management у 5G зазвичай складається з трьох основних етапів:

- Beam sweeping (сканування променів) — базова станція послідовно формує набір променів у різних просторових напрямках для виявлення користувацьких пристроїв;
- Beam measurement (вимірювання) — користувацьке обладнання оцінює якість сигналу для кожного променя за показниками RSRP та SINR;
- Beam reporting (зворотний зв’язок) — UE передає інформацію про найкращий промінь до базової станції.

Після завершення цих етапів система обирає оптимальний напрямок передачі та налаштовує параметри зв’язку.

У сучасних системах мобільного зв’язку використовується кілька основних підходів до формування променя.

1. Класичний алгоритм фазового керування

Цей метод базується на зміні фаз сигналів на антенних елементах з метою створення конструктивної інтерференції в заданому напрямку. Він є базовим принципом більшості реалізацій beamforming.

2. Codebook-based beamforming

У цьому підході використовується попередньо сформований набір можливих напрямків променя (codebook). Базова станція вибирає оптимальний варіант на основі вимірювань каналу.

Переваги:

- висока швидкість вибору променя;
- зменшення обчислювальної складності.

3. Адаптивний (adaptive) beamforming

Даний підхід передбачає динамічну зміну параметрів променя залежно від умов радіоканалу та руху користувача.

Основні переваги:

- оптимізація SINR;
- зменшення рівня інтерференції;
- підвищення стабільності з’єднання.

4. AI/ML-based beamforming (сучасний підхід)

У перспективних системах 5G Advanced та майбутніх мережах 6G застосовуються алгоритми машинного навчання, які дозволяють прогнозувати оптимальний напрямок променя на основі історичних даних та поведінки користувачів.

Алгоритми керування променем зазвичай орієнтуються на оптимізацію таких параметрів:

- рівень сигналу (RSRP);
- співвідношення сигнал/шум (SINR);
- пропускна здатність мережі;
- рівень інтерференції;
- енергоспоживання системи.

У практичних умовах реалізація алгоритмів beamforming повинна враховувати низку факторів, зокрема:

- високу мобільність користувачів;
- швидкі зміни характеристик радіоканалу;

- затримки зворотного зв’язку від UE;
- обмежені обчислювальні ресурси базових станцій.

Ці фактори суттєво впливають на ефективність роботи алгоритмів та вимагають їх постійної адаптації.

Таким чином, алгоритми формування та керування променем є критично важливими для ефективного функціонування мереж 5G NR. Вони забезпечують адаптацію системи до змін умов радіоканалу та дозволяють максимально реалізувати потенціал технологій Massive MIMO та beamforming.

2.4 Аналіз впливу Beamforming на параметри мережі

Використання технології beamforming у сучасних системах мобільного зв’язку суттєво впливає на ключові показники якості та ефективності роботи мережі. Завдяки просторовому керуванню випромінюванням сигналу покращуються радіоумови на приймальній стороні, що безпосередньо відображається на таких параметрах, як рівень сигналу, співвідношення сигнал/шум, пропускна здатність та спектральна ефективність.

Одним із основних ефектів застосування beamforming є підвищення рівня прийнятого сигналу (Reference Signal Received Power, RSRP). Завдяки концентрації енергії у напрямку конкретного користувача збільшується корисна складова сигналу без необхідності підвищення загальної потужності передавача.

Це особливо важливо для високочастотних діапазонів, зокрема mmWave, де втрати сигналу є значними, а стабільність зв’язку значною мірою залежить від точного просторового спрямування випромінювання.

Beamforming дозволяє не лише підсилювати корисний сигнал, але й зменшувати рівень інтерференції від інших користувачів і джерел випромінювання. У результаті покращується показник SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio).

Покращення SINR забезпечує:

- підвищення стабільності з’єднання;
- зменшення втрат пакетів даних;
- покращення якості сервісів реального часу (VoIP, відеострімінг).

Зростання SINR безпосередньо впливає на вибір модуляційно-кодової схеми (MCS). За кращих умов радіоканалу система переходить до більш складних схем модуляції, що дозволяє передавати більший обсяг даних у межах того самого частотного ресурсу.

Таким чином, застосування beamforming сприяє:

- збільшенню швидкості передачі даних;
- більш ефективному використанню радіоресурсів;
- підвищенню загальної пропускної здатності мережі.

Спектральна ефективність характеризує обсяг інформації, який може бути переданий у межах одного герца частотного спектра. Використання beamforming у поєднанні з технологією Massive MIMO суттєво підвищує цей показник.

Основними причинами є:

- можливість одночасного обслуговування кількох користувачів на одній частоті;
- зменшення міжкористувацької інтерференції;
- використання просторового мультиплексування.

У сукупності технологія beamforming забезпечує комплексне покращення характеристик мобільної мережі, зокрема:

- підвищення якості радіосигналу;
- зменшення рівня інтерференції;
- збільшення ємності мережі;
- підвищення енергоефективності базових станцій.

Таким чином, beamforming є одним із ключових факторів підвищення продуктивності сучасних систем мобільного зв’язку, особливо в умовах 5G NR.

2.5 Переваги та недоліки використання Beamforming

Технологія beamforming є одним із ключових рішень сучасних мобільних мереж, однак, як і будь-яка складна інженерна технологія, вона має як суттєві переваги, так і певні обмеження. Її ефективність значною мірою залежить від умов застосування, частотного діапазону та рівня розвитку мережевої інфраструктури.

Переваги beamforming:

1. Підвищення якості сигналу

Beamforming дозволяє концентрувати енергію радіосигналу в напрямку конкретного користувача, що забезпечує підвищення рівня прийнятого сигналу та покращення стабільності з’єднання.

2. Зменшення інтерференції

Завдяки просторовому розділенню сигналів зменшується взаємний вплив між ко-

ристувачами та джерелами випромінювання, що особливо важливо в умовах щільного міського розгортання мереж.

3. Підвищення пропускної здатності

Покращення показників SINR дозволяє використовувати більш ефективні модуляційно-кодові схеми, що збільшує швидкість передачі даних без необхідності розширення частотного спектра.

4. Енергоефективність

Спрямоване випромінювання зменшує втрати енергії, оскільки потужність концентрується лише в напрямку користувача, а не розсіюється в навколишній простір.

5. Підтримка багатокористувацького режиму

У поєднанні з технологією Massive MIMO beamforming дозволяє одночасно обслуговувати кількох користувачів у межах одного частотного ресурсу.

Недоліки beamforming:

1. Висока складність реалізації

Реалізація beamforming потребує складних апаратних рішень, включаючи антенні решітки та потужні системи цифрової обробки сигналів.

2. Висока вартість обладнання

Збільшення кількості антенних елементів та радіочастотних (RF) компонентів суттєво підвищує вартість базових станцій.

3. Чутливість до руху користувача

У високочастотних діапазонах, особливо в mmWave, напрямок променя необхідно постійно коригувати через рух користувачів та зміну умов радіоканалу.

4. Обчислювальна складність

Адаптивне керування променем потребує значних обчислювальних ресурсів, особливо при великій кількості одночасно обслуговуваних користувачів.

5. Обмеження у складних умовах поширення сигналу

Фізичні перешкоди, такі як будівлі або складний рельєф місцевості, можуть блокувати вузькоспрямовані промені, що потребує швидкого переналаштування системи зв’язку.

2.6 Проблеми впровадження технології у мережах мобільного зв’язку

Попри суттєві переваги технології beamforming та її ключову роль у мережах 5G, практичне впровадження цієї технології супроводжується рядом технічних, економічних та організаційних проблем. Ці фактори впливають як на етап

проєктування мобільних мереж, так і на їх подальшу експлуатацію та масштабування.

1. Складність апаратної реалізації:

Однією з основних проблем є необхідність використання великої кількості антенних елементів та радіочастотних трактів. У системах Massive MIMO це може становити десятки або навіть сотні антен, що значно ускладнює конструкцію базових станцій.

Це призводить до таких наслідків:

- збільшення габаритів обладнання;
- ускладнення систем охолодження;
- підвищення вимог до точності синхронізації сигналів між елементами.

2. Висока вартість впровадження:

Реалізація beamforming потребує використання високотехнологічних і дорогих компонентів, зокрема:

- фазових шифтерів;
- високопродуктивних процесорів цифрової обробки сигналів;
- складних антенних решіток.

У сукупності це значно підвищує вартість розгортання мереж 5G порівняно з попередніми поколіннями мобільного зв’язку.

3. Складність алгоритмів керування:

Адаптивне формування променя вимагає постійного аналізу стану радіоканалу (CSI), швидкої обробки великих обсягів даних та виконання обчислень у режимі реального часу.

Це створює значне навантаження на:

- обчислювальні ресурси базових станцій;
- програмне забезпечення керування мережею;
- системи оптимізації радіоресурсів.

4. Проблеми мобільності користувачів:

У високочастотних діапазонах, особливо в mmWave, навіть незначні переміщення користувача можуть призводити до втрати оптимального напрямку променя.

Це вимагає:

- частого оновлення параметрів beamforming;
- використання механізмів beam tracking;
- швидкого перемикання між різними променями.

5. Вплив перешкод і особливостей середовища

Beamforming є чутливим до умов поширення радіосигналу. Фізичні перешкоди, такі як будівлі, транспорт або складний рельєф місцевості, можуть:

- блокувати вузькоспрямовані промені;
- спричиняти багатопроменеве поширення сигналу;
- знижувати стабільність радіоз'єднання.

6. Складність стандартизації та сумісності

Різні виробники телекомунікаційного обладнання можуть застосовувати власні реалізації алгоритмів beamforming, що створює додаткові проблеми:

- труднощі забезпечення сумісності обладнання;
- складність інтеграції в мультивендорних мережах;
- необхідність суворого дотримання стандартів 3GPP для забезпечення взаємодії систем.

2.7 Перспективи розвитку Beamforming у мережах 6G

Розвиток мобільних мереж поступово переходить до концепції 6G, у якій технологія beamforming відіграватиме ще більш критичну роль, ніж у 5G. Це зумовлено подальшим зростанням вимог до швидкості передачі даних, щільності підключених пристроїв, а також необхідністю мінімізації затримок у мережі.

У мережах 6G очікується використання ще вищих частот, включно з терагерцовим діапазоном (THz). За таких умов поширення радіохвиль стає суттєво обмеженим, тому beamforming перетворюється з додаткової технології на базовий механізм забезпечення зв'язку.

Основні напрями розвитку включають:

- надвисоку спрямованість радіопроменів;
- формування ультратонких променів із високою точністю наведення;
- динамічне створення просторових каналів у режимі реального часу.

Одним із ключових трендів розвитку 6G є широке застосування штучного інтелекту та методів машинного навчання для керування beamforming. Використання таких підходів дозволяє:

- прогнозувати рух користувачів;
- передбачати зміни характеристик радіоканалу;
- автоматично оптимізувати напрямок променя;
- зменшувати затримки при перемиканні між променями.

Таким чином, beamforming поступово трансформується з реактивної технології в проактивну систему управління радіоресурсами.

Перспективним напрямом розвитку 6G є використання реконфігурованих інтелектуальних поверхонь (RIS), які здатні змінювати характеристики відбиття радіохвиль.

У поєднанні з beamforming це забезпечує:

- керування не лише передачею сигналу, але й середовищем його поширення;
- формування «розумних радіоканалів»;
- можливість обходу перешкод без збільшення потужності передавача.

Ще одним перспективним напрямом є розвиток голографічних антенних решіток, які дозволяють формувати надзвичайно точні просторові діаграми випромінювання. Це забезпечує:

- значне підвищення щільності обслуговування користувачів;
- мінімізацію втрат енергії;
- надточне просторове керування радіосигналом.

У порівнянні з 5G, застосування beamforming у 6G забезпечить:

- значно вищу точність спрямування променя;
- зниження затримок до мікросекундного рівня;
- майже повну адаптацію до умов навколишнього середовища;
- інтеграцію з IoT та сенсорними мережами нового покоління.

2.8 Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено комплексний аналіз застосування технології beamforming у сучасних мережах мобільного зв’язку, зокрема в LTE та 5G NR, а також розглянуто принципи її реалізації, алгоритми керування та вплив на основні параметри мережі.

Встановлено, що в мережах LTE технологія beamforming реалізується у спрощеному вигляді та базується переважно на використанні MIMO-технологій і просторового рознесення сигналів. Це забезпечує певне покращення якості радіозв’язку, однак характеризується обмеженою гнучкістю, масштабованістю та рівнем адаптивності.

У мережах 5G NR beamforming є фундаментальною складовою радіодоступу, яка інтегрована у фізичний рівень системи та тісно пов’язана з технологіями Massive MIMO, використанням міліметрового діапазону частот (mmWave) та ада-

птивним керуванням променем. Це дозволяє суттєво підвищити пропускну здатність мережі, зменшити рівень інтерференції та забезпечити просторове розділення користувачів.

Окрему увагу приділено алгоритмам формування та керування променем, які базуються на аналізі стану каналу (CSI) та включають етапи beam sweeping, beam measurement і beam reporting. Такі алгоритми забезпечують динамічну адаптацію системи до змін умов радіоканалу в режимі реального часу.

Аналіз впливу beamforming на параметри мережі показав суттєве покращення рівня прийнятого сигналу, співвідношення сигнал/шум (SINR), пропускної здатності та спектральної ефективності. Водночас визначено основні переваги та недоліки технології, а також ключові проблеми її впровадження, пов’язані зі складністю реалізації, високою вартістю обладнання та значними вимогами до обчислювальних ресурсів.

Також розглянуто перспективи розвитку beamforming у мережах 6G, де передбачається його глибока інтеграція з технологіями штучного інтелекту, реконфігурованими інтелектуальними поверхнями (RIS) та терагерцовими каналами зв’язку.

Таким чином, у другому розділі доведено, що beamforming є однією з ключових технологій сучасних і перспективних мобільних мереж, яка безпосередньо визначає їх продуктивність, ефективність та подальший напрям розвитку.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАНЬ СИНТЕЗУ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ ЛІНІЙНОЇ РІВНОМІРНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

3.1 Синтез діаграми спрямованості у лінійних антенних решітках

Для формування спрямованого випромінювання у панельних антенах використовуються системи слабкоспрямованих випромінювачів, певним чином розташованих у просторі.

Висока спрямованість панельної антени досягається завдяки відповідній орієнтації однакових випромінювальних елементів та їх збудженню струмами з необхідним розподілом амплітуд і фаз. Такі системи випромінювачів називаються антенними решітками (АР).

Залежно від просторового розташування елементів розрізняють лінійні, поверхневі та об’ємні антенні решітки. У стільникових мережах базових станцій найбільшого поширення набули лінійні та плоскі антенні решітки.

Найпростішим типом є лінійна антенна решітка, у якій випромінювальні елементи розташовані вздовж прямої лінії, що називається віссю решітки, на однаковій відстані один від одного. Відстань між фазовими центрами сусідніх випромінювачів називається кроком решітки. Лінійна антенна решітка може використовуватися як самостійна антена або як складовий елемент плоскої антенної решітки.

Однією з основних характеристик антени є її спрямованість. За визначенням точковий ізотропний випромінювач є абсолютно ненаправленим джерелом випромінювання. Проте такий випромінювач є лише теоретичною моделлю, оскільки будь-яка реальна антена певною мірою має спрямовані властивості [14].
Функція, що описує просторовий розподіл випромінювання антени, називається функцією спрямованості, а її графічне представлення – діаграмою спрямованості антени.

Під час дослідження спрямованих властивостей антени вважається, що антена розташована в центрі сфери, а точка спостереження МММ знаходиться на поверхні цієї сфери, як показано на рис. 3.1.

Сферичні координати точки спостереження (прийому сигналу): дальність r, азимут φ, зенітний кут θ або кут місця $\beta = 90° - \theta$ [3].

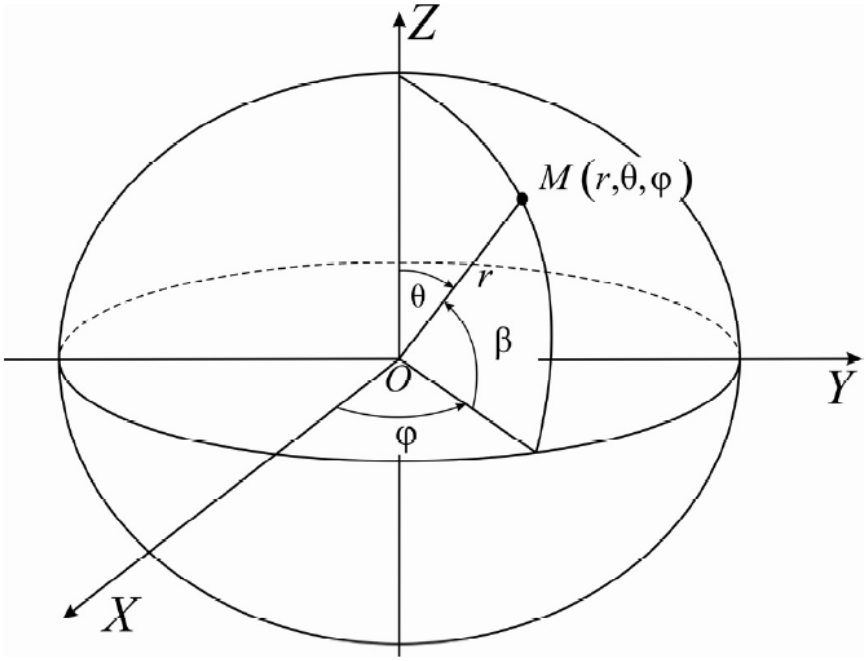


Рисунок 3.1 – Сферичні координати точки спостереження [3]

Для визначення просторової ДС антени встановлюють залежність комплексної амплітуди напруженості поля $\dot{E}_m$ від кутових координат точки спостереження θ, φ за умови, що r = const. Комплексна амплітуда $\dot{E}_m$ має модуль та аргумент. Крім того, хвиля характеризується поляризацією. Отже, діаграми спрямованості можуть бути амплітудними, фазовими та поляризаційними.

Зазвичай цікавляться амплітудними ДС, які, у свою чергу, поділяється на ДС за напруженістю поля f(θ,φ) та за потужністю $f^2(\theta,\varphi)$.

Таким чином, ДС є деякою поверхнею f(θ,φ) у сферичних координатах. Для зручності досліджень розглядають перерізи об'ємної ДС двома перпендикулярними площинами, що проходять через напрямок максимального випромінювання. Одна з них збігається з вектором Е, а інша з вектором Н. При вертикальній поляризації говорять про ДС у вертикальній та горизонтальній площинах [11].

Слід зазначити, що це сказане справедливо для так званої дальньої зони чи зони Фраунгофера. Вважається, що у дальній зоні відсутня поздовжня складова електричного та магнітного полів. Вектори Е і Н перпендикулярні один одному та напряму поширення хвилі. Усе це призводить до значного спрощення обчислень.

З іншого боку, у ближній (зоні Френеля) та проміжній зоні розрахунок поля істотно складніший через неможливість прийняти наведені вище припущення. У цих зонах на монотонне зменшення поля за законом 1/r накладається осцилююче

амплітудне згасання, а кутова залежність величин поля виявляється залежною і від r, тобто ДС тут спотворюється. Тим не менш, у ряді випадків виникає необхідність обчислення поля в ближній та проміжній зонах. Наприклад, при кількісній оцінці ефектів взаємного зв'язку між антенами, що близько розташовані на щоглі, а також при врахуванні впливу поля антени на обслуговуючий персонал.

Множник антенної решітки. Розглянемо лінійну еквідистантну АР, елементи якої розташовані вздовж осі OZ (рис.3.2). Струми у всіх елементах рівні по амплітуді, а для зсуву по фазі між струмами сусідніх елементів $\Delta\psi$ виконується умова $\Delta\psi = 0$. В якості елементів використовуються точкові ненаправлені випромінювачі [3].

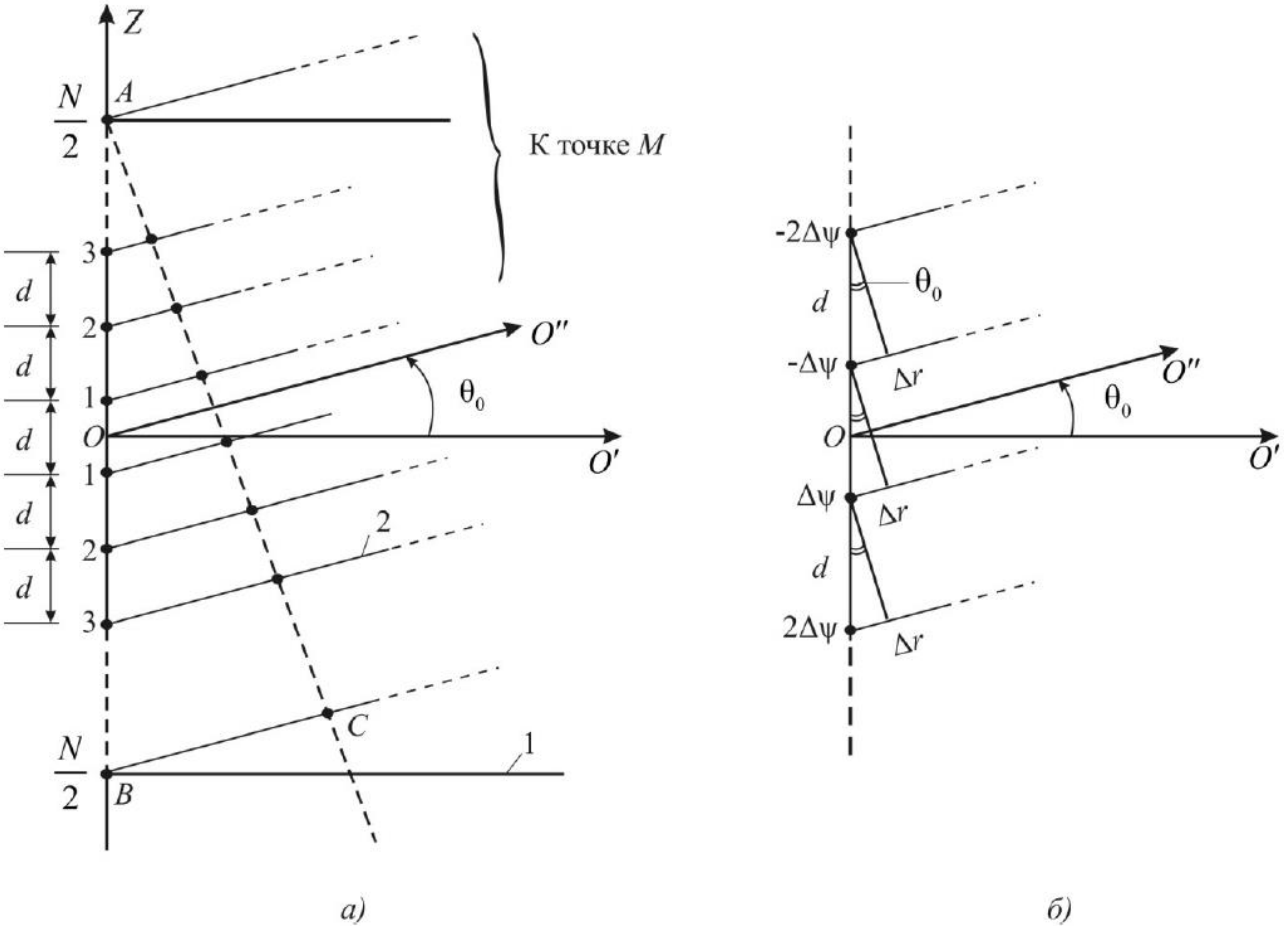


Рисунок 3.2 – Лінійні решітки випромінювачів [3]

Нехай віддалена точка прийому М така, що промені, спрямовані до неї від N випромінювачів, можна вважати паралельними. Якщо струми у всіх випромінювачів мають однакові фази (синфазний режим), то в напрямку ОО′ всі випроміню-

вачі створюють поля однакової фази і сумарне поле має максимальне значення (рис. 3.2, а) [6].

У довільному напрямку, що утворює кут θ з нормаллю до осьової лінії решітки, напруженість поля дорівнює сумі векторів:

$$E = E_1 + E_2 + \ldots + E_N. \tag{3.1}$$

Напруженість поля, створювана n-м випромінювачем, визначається рекурентним співвідношенням:

$$E_n = E_{n-1} e^{jkd\sin\theta}, \tag{3.2}$$

де $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число вільного простору;

d – відстань між елементами решітки.

Підставляючи (3.2) у (3.1), після перетворень знаходимо:

$$E = Af_1(\theta)f_p(\theta), \tag{3.3}$$

де A – коефіцієнт, що не залежить від θ;

$f_1(\theta)$ – функція, що характеризує спрямовані властивості одного випромінювача.

Лінійка випромінювачів створює у дальній зоні електромагнітне поле зі сферичним фронтом хвилі, центр якої (фазовий центр) збігається із середньою точкою лінійки. Функція $f_p(\theta)$ характеризує спрямовані властивості системи N випромінювачів. Цю функцію називають множником решітки:

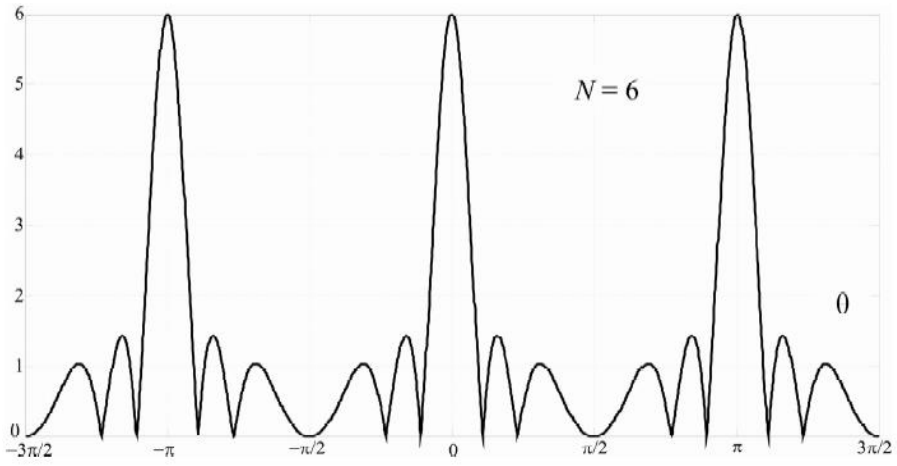
$$f_p(\theta) = \frac{\sin(\frac{Nkd}{2}\sin\theta)}{\sin(\frac{kd}{2}\sin\theta)}. \tag{3.4}$$

Якщо кожен елемент решітки являє собою точковий ненаправлений випромінювач, то функція (3.4) є ДС антенної системи.

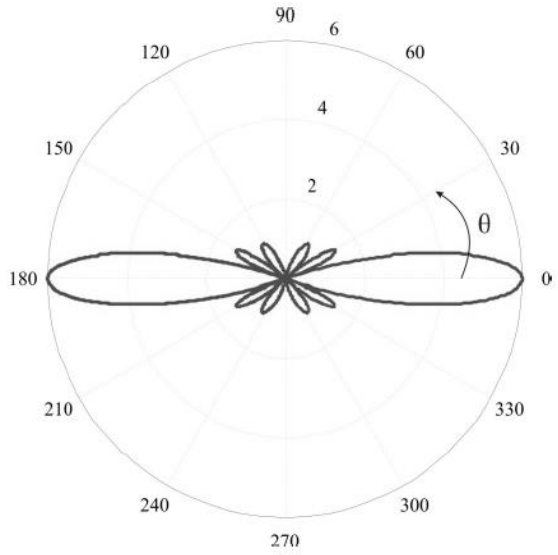
Режим нормального випромінювання. Цей режим відрізняється тим, що максимум випромінювання орієнтований нормалі до осі решітки.

Для дослідження основних властивостей множника решітки створимо в середі MATLAB файл-програму armultiplier.m, представлену в додатку А.

На рис. 3.3,*а* представлена залежність множника решітки від кута θ для випадку $d = \lambda 2$ и $N = 6$ в прямокутній системі координат.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Множник лінійної решітки у прямокутній (а) та полярній (б) системах координат

Функція (3.4) є періодичною та симетричною щодо θ = 0. Головні максимуми її розташовані при θ=0; ± π і т.д. Максимальне значення дорівнює N , тому нормований множник решітки може бути записаний у вигляді:

$$f_{реш}(\theta) = \frac{\sin(\frac{Nkd}{2}\sin\theta)}{N\sin(\frac{kd}{2}\sin\theta)}. \quad (3.5)$$

Ширина основної пелюстки ДС за першими нулями визначається за формулою:

$$\Delta\theta_0 \approx 2\lambda / Nd, рад. \quad (3.6)$$

Ширину ДС за половинною потужністю можна знайти за наближеною формулою:

$$\Delta\theta_{0.5} \approx 0.89\lambda / Nd, рад. \quad (3.7)$$

Між сусідніми головними пелюстками розміщуються (N − 2) бічних пелюсток і, отже, (N −1) нулів.

На рис. 3.3,б представлений графік множника решітки в полярній системі координат. Добре видно симетрію ДС щодо осі решітки та площини, перпендикулярної до осі. Відповідна просторова ДС представляє собою поверхню обертання кривої зображеної на рис. 3.3,б навколо осі решітки.

3.2 Лінійні антенні решітки з рівноамплітудним збудженням та лінійною зміною фази

В цьому випадку максимум випромінювання відхиляється від нормалі на кут θ_0, при якому різниця ходу променів від випромінювачів Δr компенсується зсувом фаз між струмами в сусідніх елементах $\Delta\psi$ (рис. 2.2,б). При цьому справедливе таке співвідношення:

$$\Delta\psi = kd\sin\theta_0. \quad (3.8)$$

Такий метод збудження елементів решітки називають режимом похилого випромінювання.

Множник решітки для режиму похилого випромінювання має вигляд:

$$f_P(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{Nkd}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right]}{\sin\left[\frac{kd}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right]}. \qquad (3.9)$$

Рис. 3.4,а ілюструє ДС лінійної решітки в прямокутній системі координат при куті нахилу максимального випромінювання $\theta_0 = \pi/6$. Діаграма спрямованості лінійної решітки в режимі похилого випромінювання представляє собою поверхню обертання у вигляді конуса, вісь якого збігається з віссю OZ. Подібну діаграму називають лійкоподібною. На рис. 2.4,б представлено переріз лійкокоподібної ДС вертикальною площиною, що проходить через вісь OZ .

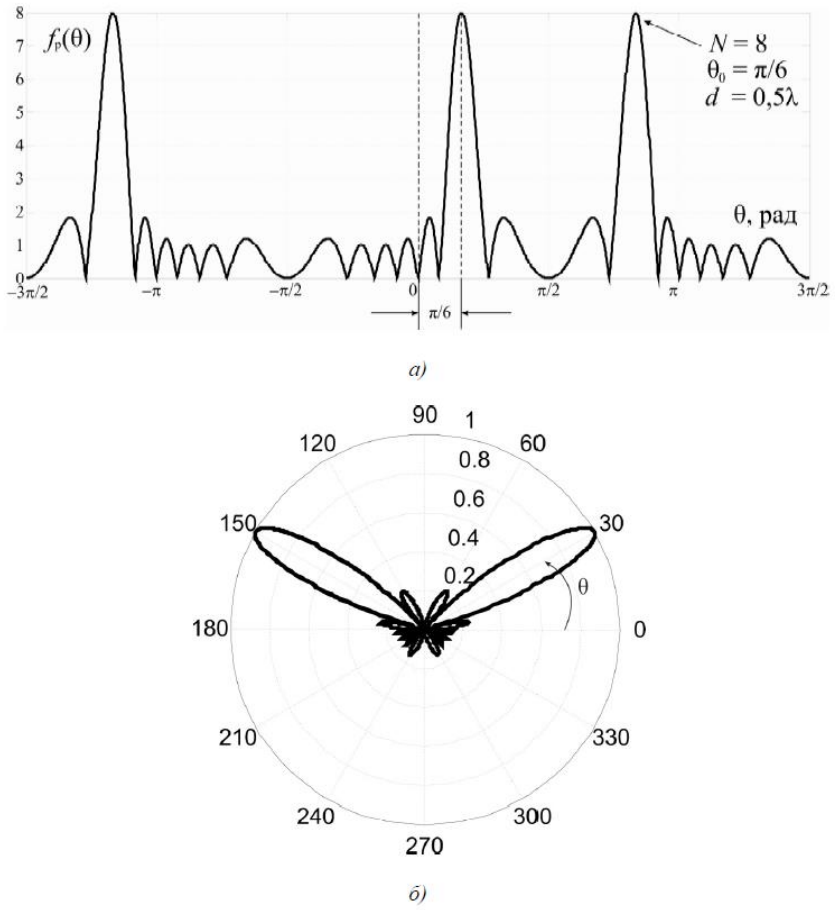


Рисунок 3.4 – Множник решіток у прямокутній (а) та полярній (б) системах координат

Файл-програма armultiplier.m, представляє собою інструмент для дослідження залежності форми ДС лінійної решітки від параметрів N , d и θ_0 . При великій ширині променю ДС, промені зливаються разом.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ АДАПТИВНОГО ФОРМУВАННЯ ПРОМЕНЮ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ АНТЕНИ

4.1 Побудова інтелектуальної антени

На рисунку 4.1 наведено типову структурну схему інтелектуальної антени, побудованої на основі адаптивної антенної решітки з N- елементів та процесора обробки сигналів із коригувальним алгоритмом керування. Вибірки сигналів, прийняті smart-антеною, надходять до блоку обробки сигналів, де за допомогою заданого алгоритму керування здійснюється обчислення вагових коефіцієнтів вектора антенної решітки.

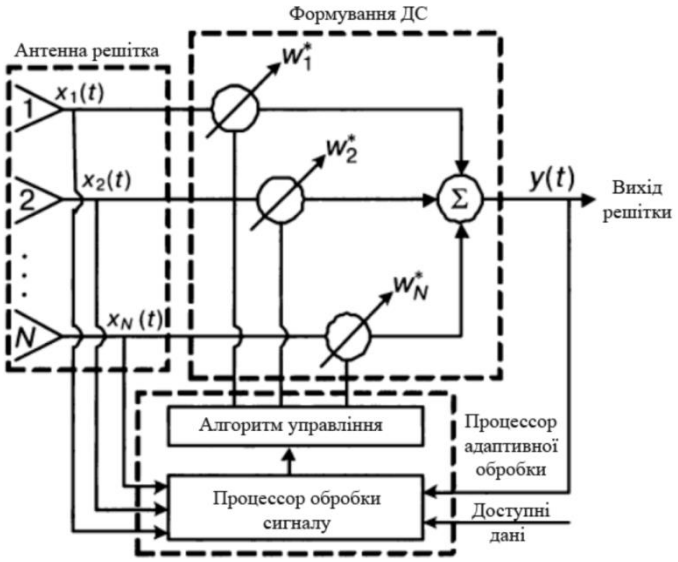


Рисунок 4.1 – Схема інтелектуальної антени [1]

Для інтелектуальної антени можна виділити два класи вимог, що відповідають усталеному та перехідному режимам роботи. Відмінність між ними полягає в тому, чи досягли вагові коефіцієнти стаціонарних значень у незмінному середовищі поширення сигналу, чи вони продовжують адаптивно змінюватися у відповідь на зміни характеристик каналу.

За умови, що опорний сигнал для адаптивного алгоритму формується на основі апріорно відомої навчальної послідовності, яка доступна приймачу під час передавання даних, адаптивне коригування вагових коефіцієнтів може здійснюватися як за допомогою спрямованого зворотного зв’язку, так і на основі вагових коефіцієнтів, отриманих після завершення етапу налаштування [7]. Адаптивні ал-

горитми дозволяють виконувати оперативне підлаштування вагового вектора до нестаціонарних умов поширення сигналу для кожної вибірки даних.

4.2 Розробка алгоритму адаптивного формування променя в інтелектуальній антені

Формування променя в інтелектуальній антені базується на використанні набору антенних елементів та відповідних процесорів обробки сигналів для створення необхідної діаграми спрямованості. Основною перевагою smart-антен є зменшення загальної потужності системи та підвищення ефективності використання радіоресурсів.

Методи формування променя поділяються на дві основні групи: фіксоване та адаптивне формування променя. У системах із фіксованим формуванням променя завади лише послаблюються, але не пригнічуються повністю, проте такі системи мають відносно невисоку складність реалізації та меншу вартість.

На відміну від цього, адаптивне формування променя потребує використання складних алгоритмів обробки сигналів, які забезпечують спрямування головного променя в напрямку корисного сигналу та пригнічення небажаних джерел випромінювання. Такий підхід дозволяє досягти кращих характеристик системи, однак потребує більшої обчислювальної складності та значних витрат на реалізацію.

У системах мобільного зв’язку для підвищення ємності мережі та розширення зони покриття широко застосовуються методи повторного використання частот і секторизації стільників. Однак через випромінювання сигналу в різних напрямках у межах усієї площі стільника можливості подальшого збільшення ємності мережі та покриття є обмеженими [3]. Одним із найбільш ефективних способів подолання цих обмежень є використання технології формування променя.

Існує два основні підходи до формування променя: комутоване та адаптивне формування променя, які відрізняються між собою рівнем складності реалізації та ефективністю функціонування.

Найпростішим методом є комутоване формування променя, при якому спочатку визначається напрямок приходу сигналу (DOA – Direction of Arrival), після чого у відповідному напрямку формується промінь шляхом застосування комплексних вагових коефіцієнтів антенної решітки. Для визначення напрямку приходу

сигналу можуть використовуватися алгоритми MUSIC та ESPRIT, однак такі методи не забезпечують ефективного пригнічення потужних завад [2].

Адаптивне формування діаграми спрямованості є більш складним, але водночас значно ефективнішим підходом. На рисунку 4.2 наведено структурну схему алгоритму адаптивного формування променя.

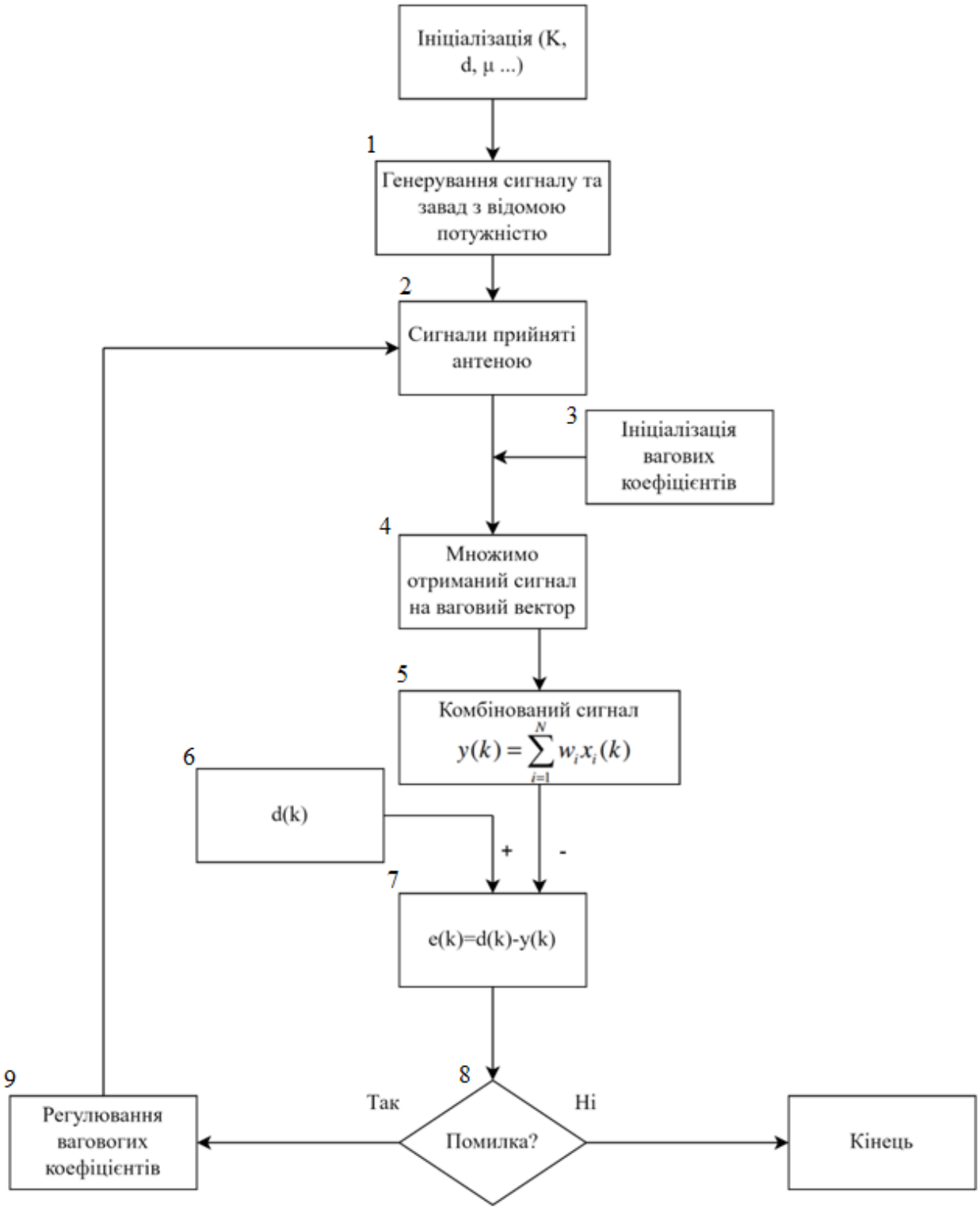


Рисунок 4.2 – Структурна схема алгоритму адаптивного формування променя

У цьому випадку діаграма спрямованості формується динамічно: у напрямках дії завад створюються нулі діаграми спрямованості, тоді як головний промінь автоматично орієнтується в напрямку користувача. Керування променем здійснюється в реальному часі за допомогою адаптивної антенної решітки під час переміщення абонента.

Комплексні вагові коефіцієнти визначаються за допомогою адаптивних алгоритмів, серед яких LMS, RLS, SMI, CMA та DDA. Формування необхідної діаграми спрямованості здійснюється шляхом множення обчислених вагових коефіцієнтів на сигнали антенної решітки.

Відповідно завданюю кваліфікаційної роботи основну увагу приділено алгоритмам LMS, RLS і CMA, які використовуються для оцінювання ефективності адаптивного формування променя на основі результатів імітаційного моделювання. Порівняно з іншими алгоритмами, LMS і CMA характеризуються меншою обчислювальною складністю та відносною простотою практичної реалізації.

4.3 Математичне моделювання системи та трафіку

Хоча жорсткого обмеження на кількість мобільних користувачів, які можуть обслуговуватися системою, не існує, на практиці кількість одночасно активних користувачів у межах однієї комірки обмежується необхідністю контролю міжкористувацьких завад, що виникають при використанні однакових пілотних сигналів.

У даному моделюванні передбачається, що антенна решітка застосовується лише на базовій станції, тоді як мобільна станція оснащена однією антеною. Це відповідає конфігурації каналу типу MISO (Multiple Input Single Output) – системі з декількома входами та одним виходом.

Вважається, що зона обслуговування мобільної мережі складається з множини однакових правильних шестикутних комірок. Мобільні станції рівномірно розподілені в межах кожної комірки та переміщуються з випадковою швидкістю V, що описується функцією щільності ймовірності $f_v(v)$. Напрямок руху абонентів також вважається випадковим і рівноймовірним у межах кута прибуття $[0;2\pi)$.

Для мобільної стільникової системи, у якій реалізовано алгоритм формування променя, припускається, що ширина променя становить θ. У подальшому

цей параметр розглядається як мінімальний кутовий інтервал між двома сусідніми мобільними станціями, які використовують один і той самий фізичний канал [1].

Відстань між елементами антенної решітки d визначається довжиною хвилі сигналу λ. У моделюванні використовувалися антени з невеликою кількістю елементів – 4 та 6, що дозволило продемонструвати ефективність окремих алгоритмів формування променя навіть при відносно простій конфігурації антенної системи.

У таблиці 4.1 наведено параметри моделювання та їх значення, які використовувалися під час дослідження процесу формування променя.

Таблиця 4.1 – Параметри моделювання формування променя

Параметр	Значення	
	Алгоритм LMS	Алгоритм RLS
Кількість елементів решітки (N)	8,12,16	8,12,16
Відстань між елементами (d)	0.5 λ,0.25λ,0.125λ	0.5 λ,0.25 λ,0.125λ
Напрямок приходу бажаного сигналу	30˚	30˚
Напрямок приходу сигналу завади	-60˚	-60˚
Розмір кроку (μ)	0.02	-
Кількість ітерацій (it)	100	50
Коефіцієнт прискорення (α)	-	0.9

4.4 Алгоритм формування променю на основі найменшого середнього квадратичного відхилення

Одним із найбільш поширених адаптивних алгоритмів фільтрації, що широко застосовується в сучасних системах зв'язку, є алгоритм LMS (Least Mean Square). Його популярність зумовлена відносно низькою обчислювальною складністю та високою стійкістю роботи [3]. Алгоритм LMS використовує нові вимірювання сигналу та забезпечує ітераційне мінімізування середньоквадратичної помилки [11].

Принцип роботи алгоритму LMS полягає у зміні вагового вектора www у напрямку оціненого градієнта відповідно до методу найшвидшого спуску [6].

Збіжність алгоритму гарантується квадратичним характером функції середньоквадратичної помилки $\varepsilon\left\{\left|e(k)\right|^2\right\}$, яка має єдиний глобальний мінімум.

Для заданої функції середньоквадратичної помилки $\varepsilon\left\{\left|e(k)\right|^2\right\}=\varepsilon\left\{\left|d(k)-w^H x(k)\right|^2\right\}$ та при певному індексі адаптації алгоритм LMS виконує коригування вагового вектора відповідно до виразу:

$$w(k+1)=w(k)-\frac{\mu}{2}\frac{\partial J_{w,w^*}}{\partial w^*}=w(k)+\mu e^*(k)x(k), \tag{4.1}$$

де $J_{w,w^*}=\left|e(k)\right|^2$ – швидкість зміни цільової функції (градієнт функції помилки);

μ– скалярна константа, що визначає швидкість збіжності та стабільність роботи алгоритму.

Для забезпечення стабільності алгоритму за критерієм середньоквадратичної помилки значення довжини кроку μ повинна знаходитися в межах інтервалу, наведеного у формулі [6]:

$$0<\mu<\frac{2}{\lambda_{\max}}, \tag{4.2}$$

де $\lambda_{\max}$ – власне максимальне значення R_{xx}.

Також при переведенні на сумарну потужність векторапотужність вектору x [6]:

$$\lambda_{\max}\le trace\left\{R_{xx}\right\}, \tag{4.3}$$

де слід матриці $\left\{R_{xx}\right\}=\sum_{i=1}^{N}\varepsilon\left\{x_i^2\right\}$ характеризує загальну потужність вхідного сигналу.

Таким чином, умовою забезпечення збіжності в середньому для вагового вектора за критерієм мінімального середньоквадратичного відхилення [6] є:

$$0 < \mu < \frac{2}{\sum_{i=1}^{N} \varepsilon\left\{x_i^2\right\}}, \tag{4.4}$$

де N – кількість елементів решітки.

Алгоритм найменшого середньоквадратичного відхилення [6]:

$$e(k) = d(k) - w^H(k)x(k), \tag{4.5}$$

$$w(k+1) = w(k) + \mu e^*(k)x(k). \tag{4.6}$$

Алгоритм LMS належить до сімейства алгоритмів стохастичного градієнта, оскільки миттєва оцінка градієнтного вектора є випадковою величиною, що залежить від вектора вхідних даних $x(k)$ [13]. Для кожної ітерації алгоритм потребує приблизно 2N операцій множення комплексних чисел, де N – кількість вагових коефіцієнтів або елементів адаптивної антенної решітки.

Швидкість збіжності LMS-алгоритму безпосередньо залежить від структури кореляційної матриці Rxx [13]. У разі значного розкиду її власних значень процес збіжності може суттєво сповільнюватися. За великої різниці між значеннями власних чисел коваріаційної матриці час збіжності алгоритму значно зростає та стає залежним від статистичних характеристик вхідних даних [6].

У таких умовах LMS-алгоритм може не мати достатнього часу для збіжності вагового вектора до статистично оптимального розв’язку, що ускладнює адаптацію системи в реальному масштабі часу до нестаціонарного середовища поширення сигналу [2].

Крім того, використання LMS-алгоритму передбачає наявність достатньої кількості апріорної інформації про корисний сигнал, необхідної для формування опорної послідовності. Однак отримання таких даних у безпроводових системах зв’язку може бути складним і ресурсомістким завданням, особливо в умовах швидких завмирань сигналу [25].

У випадках, коли швидкість збіжності LMS-алгоритму є недостатньою для практичного застосування, доцільним рішенням може бути використання альтернативних адаптивних алгоритмів із кращими характеристиками збіжності [26].

Алгоритм LMS є одним із найбільш поширених алгоритмів адаптивної фільтрації, що застосовується в різноманітних системах зв’язку. Його широке вико-

ристання зумовлене невеликою обчислювальною складністю та високою надійністю роботи. Алгоритм враховує нові вхідні спостереження та забезпечує ітераційне мінімізування середньоквадратичної помилки. Коригування вагового вектора www здійснюється у напрямку оціненого градієнта відповідно до методу найшвидшого спуску.

Для дослідження роботи алгоритму адаптивні антенні решітки були змодельовані у середовищі MATLAB. Розглядалися решітки з кількістю елементів N = 8, 12, 16. Для моделювання використовувалися різні відстані між елементами антенної решітки: у першому випадку d = 0,5λ, у другому – d = 0,25λ, а в третьому – d = 0,125λ.

Корисний сигнал надходив під кутом $\theta_0 = 30^\circ$, а сигнал завади – під кутом $\theta_1 = -60^\circ$.

Передбачалося, що коефіцієнт корисного сигналу визначається виразом $s(k) = \cos(2\pi t(k)/T);$, де період сигналу *T = 1* мс, а часовий інтервал задається як $t = (1:100)T/100);$. Коефіцієнт сигналу завади визначався виразом $\bar{x}_i(k) = \bar{a}_{1i}(k)$, де $i(k) = randn(1,100)$. Обидва сигнали в межах інтервалу T вважалися практично ортогональними.

У процесі моделювання приймалося, що бажаний сигнал визначається як $d(k) = s(k)$. Для обчислення оптимальних вагових коефіцієнтів антенної решітки застосовувався алгоритм найменших середніх квадратів (LMS). Початкові значення вагових коефіцієнтів приймалися рівними нулю, а кількість ітерацій алгоритму становила 100.

Для моделювання LMS-алгоритму використовувався MATLAB-код, наведений у додатку А, а на рисунку 4.3 представлено структурну схему алгоритму LMS.

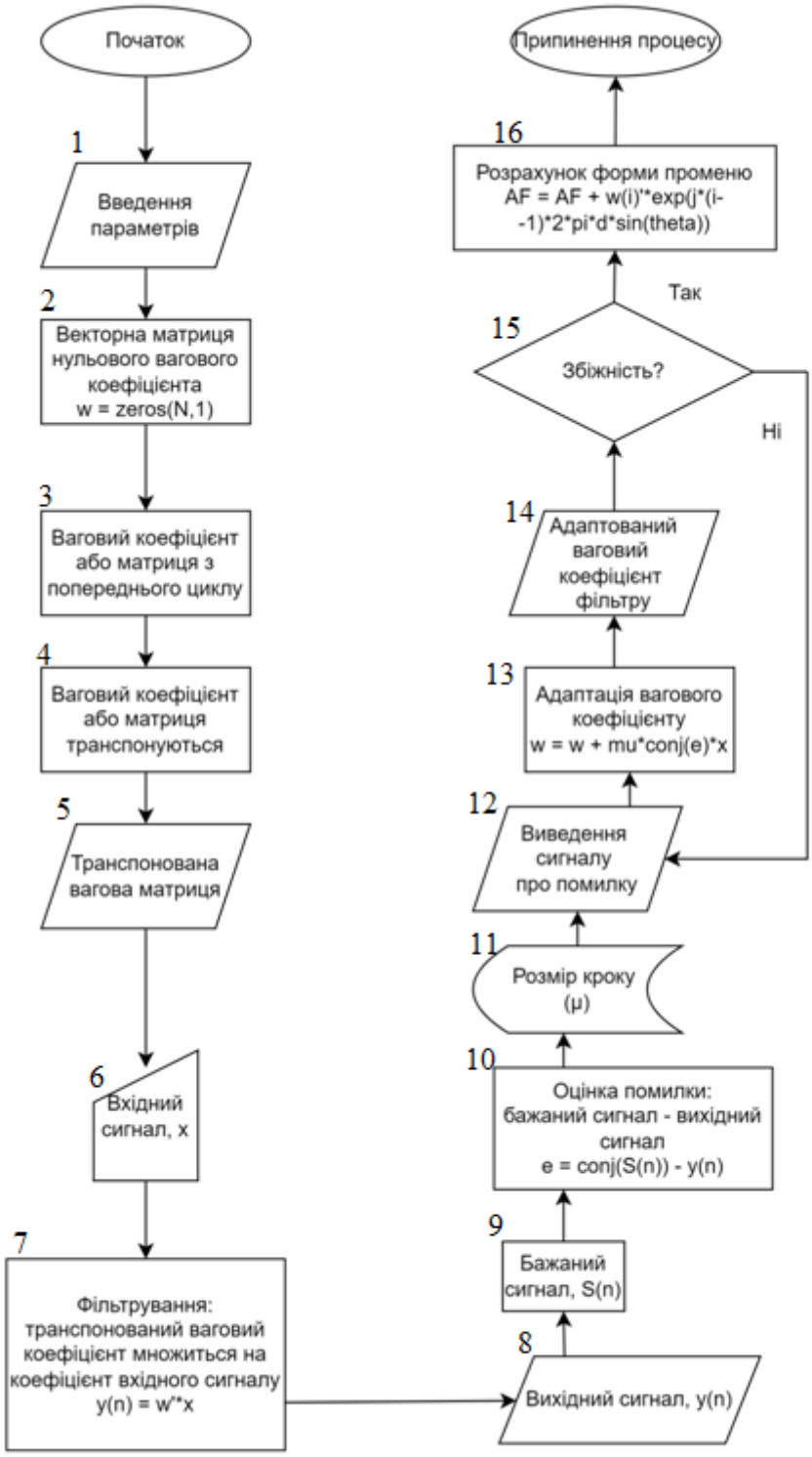
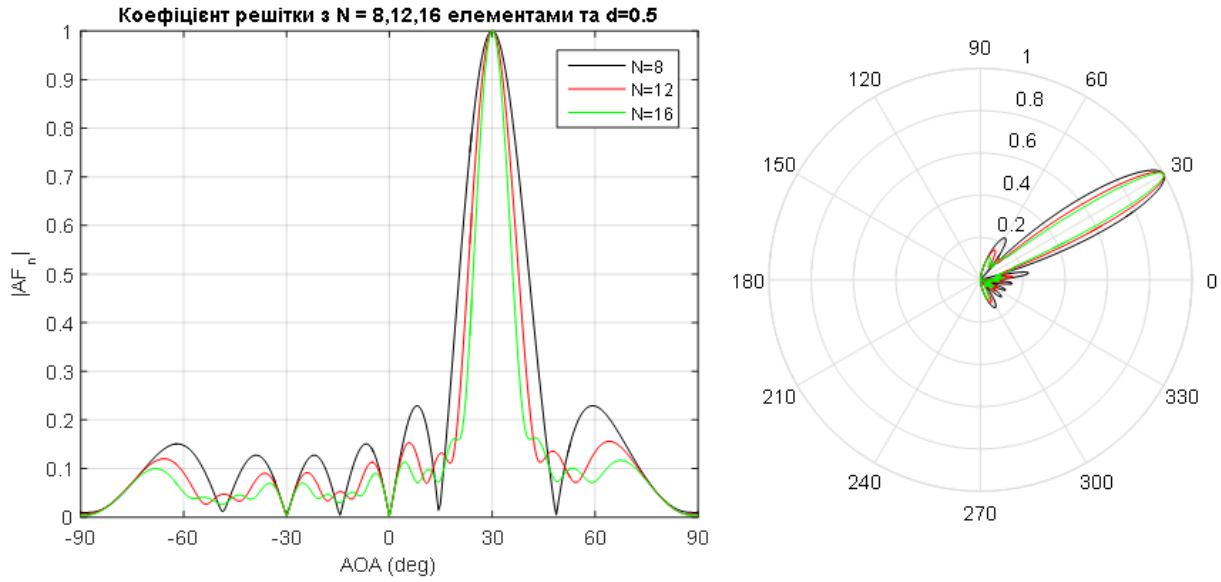


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритму найменшого середнього квадратичного відхилення (LMS)

На рисунку 4.4 наведено амплітудний відгук алгоритму найменших середніх квадратів (LMS) для різної кількості елементів антенної решітки при міжелементній відстані d=0.5λ. Отримані результати свідчать, що алгоритм LMS формує відгук з амплітудою, близькою до одиниці, у напрямку корисного сигналу та ефективно пригнічує сигнал завади. Використання 12 елементів антенної решітки дозволило покращити характеристики алгоритму завдяки звуженню смуги відгуку.

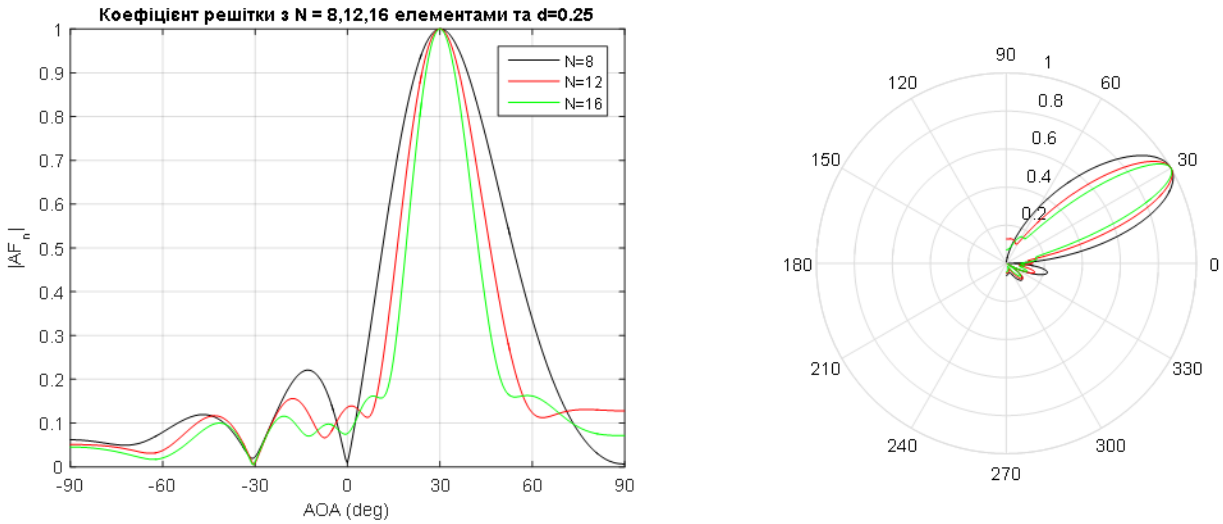


а) б)

Рисунок 4.4 – Амплітудний відгук антенної решітки для алгоритму найменшого середнього квадратичного відхилення LMS (d=0.5λ)
а) діаграма спрямованості антенної решітки в деартових системі координат
б) діаграма спрямованості антенної решітки в полярній системі координат

На рисунку 4.5 наведено результати моделювання для випадку, коли відстань між елементами решітки становить d=0.25λ. Аналіз результатів показує, що зі збільшенням кількості елементів антенної решітки покращуються характеристики відгуку алгоритму, що також підтверджується результатами, наведеними на рисунку 4.5.

Водночас зі зменшенням відстані між елементами антенної решітки спостерігається зниження точності формування відгуку. Як видно з рисунка 4.5, ширина смуги пропускання є більшою порівняно з випадком 0.5λ, наведеним на рисунку 4.4. Для випадку 0.125λ, представленого на рисунку 4.6, смуга пропускання стає ще ширшою.

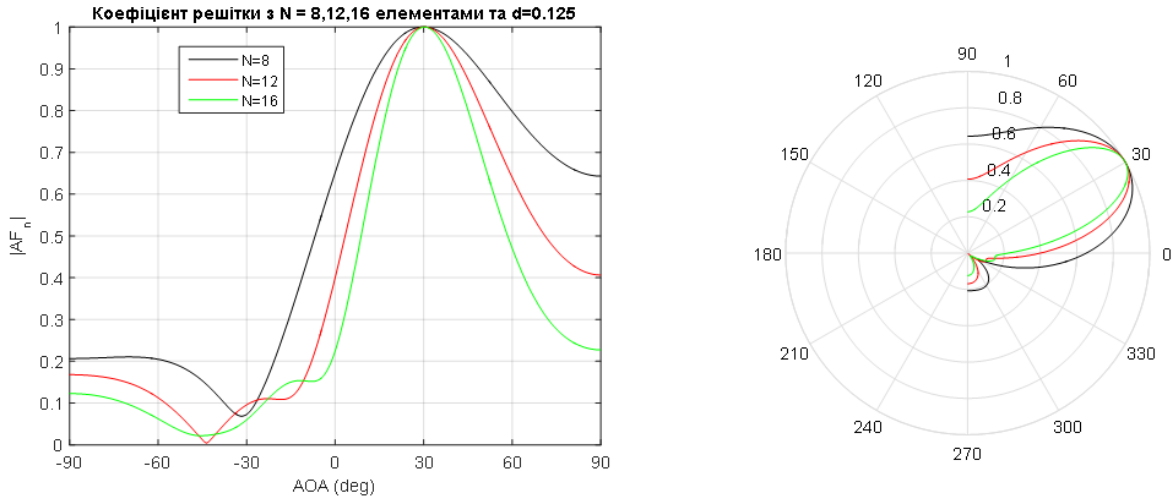


а) б)

Рисунок 4.5 – Амплітудний відгук антенної решітки для алгоритму найменшого середнього квадратичного відхилення LMS (d=0.25λ)

а) діаграма спрямованості антенної решітки в деартових системі координат

б) діаграма спрямованості антенної решітки в полярній системі координат



а) б)

Рисунок 4.6 – Амплітудний відгук антенної решітки для алгоритму найменшого середнього квадратичного відхилення LMS (d=0.125λ)

а) діаграма спрямованості антенної решітки в деартових системі координат

б) діаграма спрямованості антенної решітки в полярній системі координат

4.5 Алгоритм формування променю на основі рекурсивного алгоритму найменших квадратів (RLS)

У методі найменших квадратів ваговий вектор w(k) визначається таким чином, щоб забезпечити мінімізацію цільової функції, яка являє собою суму квадратів помилки на певному часовому інтервалі. Таким чином, реалізується рекурсивна мінімізація розв'язку за методом найменших квадратів LS (Least Square) [3].

На відміну від цього, у методі найшвидшого спуску ваговий вектор обирається з метою мінімізації математичного сподівання квадрата помилки.

$$J_{w,w^*} = \sum_{i=1}^{k} \lambda^{k-1} \left| e(i) \right|^2, \tag{4.7}$$

де *e(i)* – сигнал помилки, а $0 < \lambda \leq 1$ – експоненційний коефіцієнт масштабування, який визначає швидкість згасання впливу попередніх даних [15]. Параметр λ також називають коефіцієнтом забування або коефіцієнтом відсутності післядії [5].

Зазвичай значення λ вибирається близько до одиничного. Однак у стаціонарному середовищі значення λ має бути рівним 1, тому що всі дані – поточні і попередні, повинні мати однаковий ваговий коефіцієнт [6]. Знаходження мінімуму [5] диференціюванням цільової функції J_{w,w^*} по w^* дає [5].

$$\left[\sum_{i=1}^{k} \lambda^{k-1} x(i) x^H(i) \right] w(k) = \sum_{i=1}^{k} \lambda^{k-1} x(i) d^*(i). \tag{4.8}$$

Далі, визначаючи наступні величини

$$R(k) = \sum_{i=1}^{k} \lambda^{k-1} x(i) x^H(i), \tag{4.9}$$

$$p(k) = \sum_{i=1}^{k} \lambda^{k-1} x(i) d^*(i), \tag{4.10}$$

отримуємо рішення у вигляді виразу [5]:

$$w(k) = R^{-1}(k)\,p(k). \tag{4.11}$$

Рекурсивна реалізація являється результатом виразів [5]::

$$R(k) = \lambda R(k-1) + x(k)x^{H}(k). \tag{4.12}$$

$$p(k) = \lambda p(k-1) + x(k)d^{*}(k). \tag{4.13}$$

Рекурсивний алгоритм найменших квадратів [5]:

$$k(k) = R^{-1}(k-1)x(k), \tag{4.14}$$

$$k(k) = \frac{k(k)}{\lambda + x^{H}(k)k(k)}, \tag{4.15}$$

$$R^{-1}(k) = \frac{1}{\lambda}\left[R^{-1}(k-1) - \frac{k(k)k^{H}(k)}{\lambda + x^{H}(k)k(k)} \right], \tag{4.16}$$

$$e(k) = d(k) - w^{H}(k)x(k), \tag{4.17}$$

$$w(k+1) = w(k) + e^{*}(k)k(k), \tag{4.15}$$

Обернена матриця $R^{-1}(k)$ може бути отримана рекурентно на основі попереднього значення $R^{-1}(k-1)$ за допомогою допоміжної теореми обернення матриць [1]. Такий підхід дозволяє уникнути прямого обчислення оберненої матриці $R(k)$ для кожного моменту часу k, що значно підвищує ефективність алгоритму.

Однією з важливих особливостей алгоритму RLS є використання всієї інформації, накопиченої у вхідних даних до поточного моменту часу. Завдяки цьому швидкість збіжності RLS-алгоритму є приблизно на порядок вищою порівняно з класичним LMS-алгоритмом.

Проте підвищення продуктивності супроводжується значним зростанням обчислювальної складності. Для одного циклу роботи RLS-алгоритму необхідна

кількість операцій множення комплексних чисел становить $4N^2 + 4N + 2$, де N – кількість вагових коефіцієнтів адаптивної антенної решітки.

На відміну від LMS-алгоритму, який використовує метод найшвидшого спуску для оновлення вагових коефіцієнтів, адаптивний алгоритм RLS безпосередньо апроксимує оптимальне рішення Вінера, застосовуючи метод найменших квадратів для коригування вагового вектора без необхідності додаткової апроксимації процедури оптимізації.

У методі найменших квадратів ваговий вектор $w(k)$ визначається таким чином, щоб мінімізувати цільову функцію, яка являє собою суму квадратів помилок у межах певного часового вікна. Таким чином, реалізується рекурсивна мінімізація розв'язку за методом найменших квадратів (LS – Least Squares) [29].

На рисунку 4.7 наведено структурну схему алгоритму RLS.

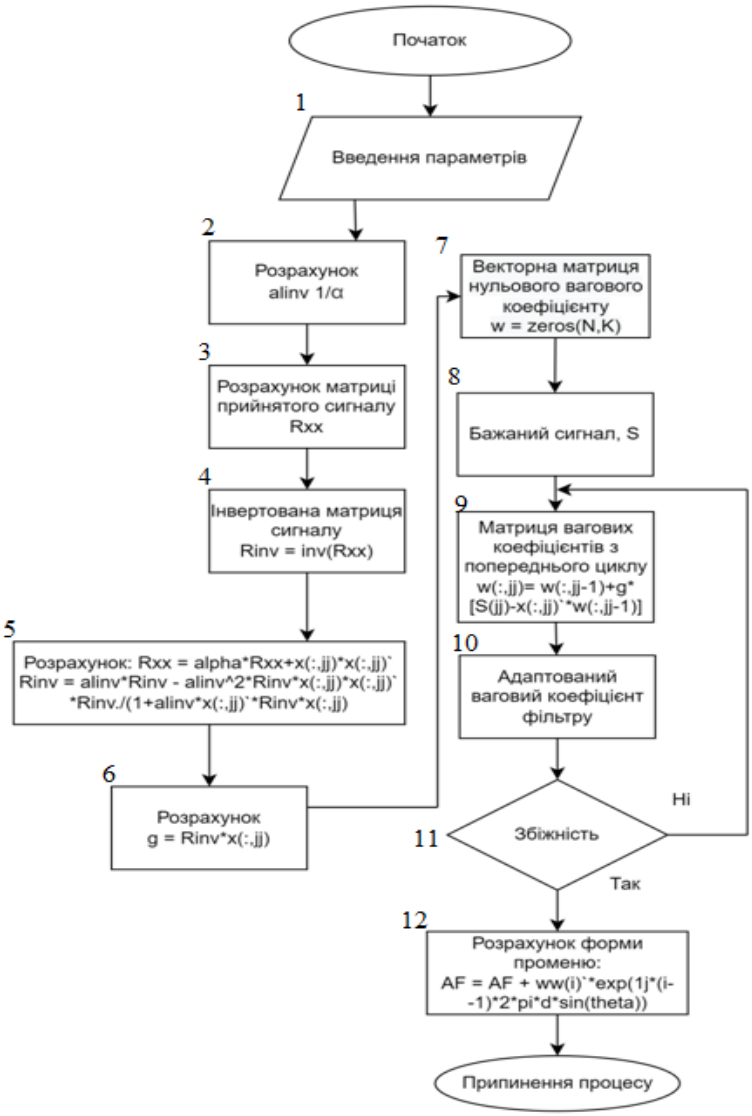


Рисунок 4.7 – Струкутрна схема алгоритму RLS

Для моделювання роботи алгоритмів формування променю інтелектуальної антени застосуємо програмний математичний пакет моделювання MATLAB. Нехай кількість елементів N = 8, 12, 16 антенної решітки з кроком (у першому випадку d = 0.5λ, у другому випадку d = 0.25λ і в третьому випадку d = 0.125λ) з прийнятим сигналом, що приходить під кутом $\theta_0 = 30^\circ$, сигнал завади при $\theta_1 = -60^\circ$.

Будемо використовувати програмний пакет математичного моделювання MATLAB для написання процедури алгоритму RLS, щоб розрахувати вагові коефіцієнти антенної решітки. Бажаний коефіцієнт сигналу визначається $x_S(k) = \bar{a}_{0S}(k)$, $s(k) = \cos(2*\pi*t(k)/T)$; з $T = 1мс$. Нехай є K = 50 часових вибірок, таких, що $t = (0:K-1)*T/(K-1)$.

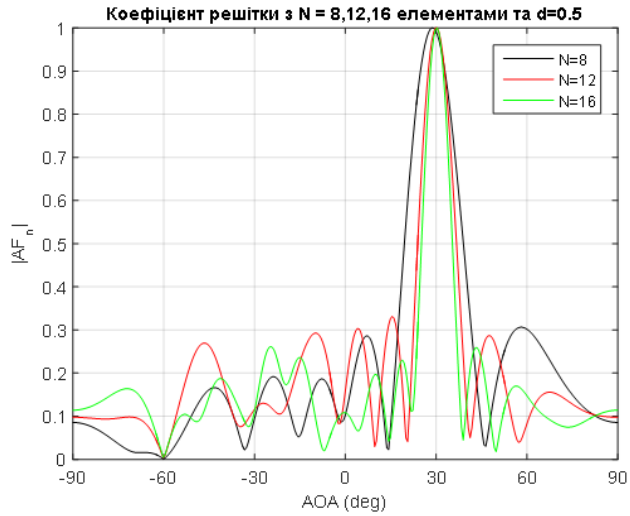
Ми припускаємо, що коефіцієнт сигналу, що заважає визначається $\bar{x}_i(k) = \bar{a}_{1i}(k)$, де $i(k) = \sin(\pi*t(k)/T)$. Нехай бажаний сигнал d(k) = s(k). Щоб зворотна кореляційна матриця стала сингулярною, ми додаємо в систему шум з дисперсією =0.01. Почнемо з припущення, що ваговий коефіцієнт решітки дорівнює нулю, отже $\sigma_n^2 \bar{\bar{w}}(1)$ = [0 0 0 0 0 0 0].T. Встановимо коефіцієнт прискорення α = 0.9.

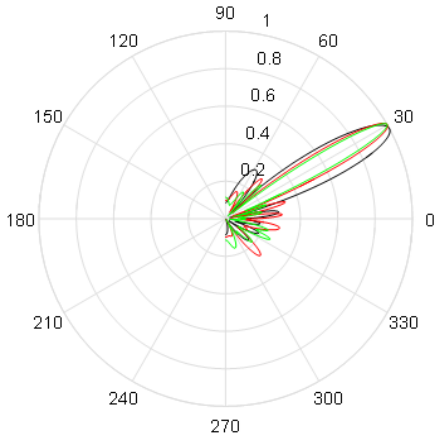
У даному підрозділі виконано моделювання роботи алгоритмів адаптивного формування променя для різних параметрів антенної решітки, зокрема кількості антенних елементів та відстані між сусідніми елементами решітки. Результати моделювання для різних конфігурацій представлені у вигляді графіків на рисунках 4.8–4.10.

Під час дослідження використовувалися антенні решітки з 8, 12 і 16 елементами при міжелементних відстанях d=0.125λ, 0.25λ та 0.5λ. Максимальна відстань між сусідніми елементами була обмежена значенням 0.5λз метою запобігання виникненню просторових спотворень.

Результати моделювання, наведені на рисунках 4.8–4.10, показують, що зі збільшенням кількості елементів антенної решітки характеристики відгуку покращуються. Водночас для деяких небажаних напрямків приходу сигналу амплітуда відгуку досягала приблизно 0,4, що можна розглядати як недолік роботи алгоритму.

Найкращі результати для конфігурації з N=16 були отримані при міжелементній відстані d=0.5λ. Однак при зменшенні відстані до d=0.25λ та d=0.125λ така перевага вже не спостерігалася. Для випадку N=12 було досягнуто кращих характеристик за шириною смуги пропускання при менших значеннях міжелементної відстані.



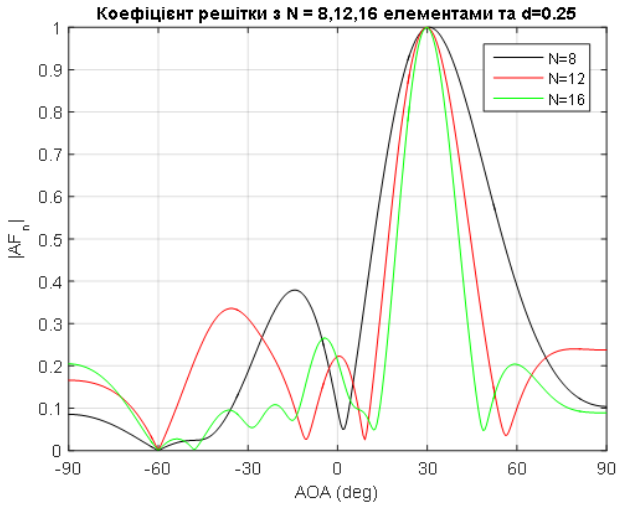


а) б)

Рисунок 4.8 – Амплітудний відгук антенної решітки рекурсивного алгоритму найменших квадратів RLS (d=0.125λ)

а) діаграма спрямованості антенної решітки в деартових системі координат

б) діаграма спрямованості антенної решітки в полярній системі координат



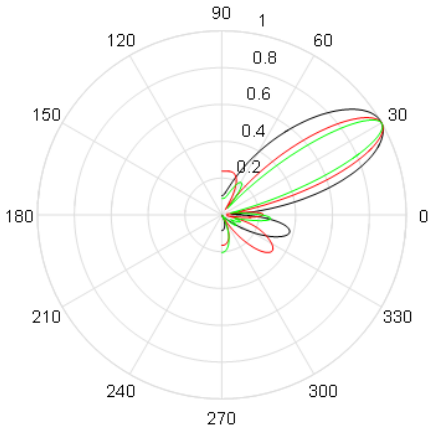


Рисунок 4.9 – Амплітудний відгук антенної решітки рекурсивного алгоритму найменших квадратів RLS (d=0.25λ)

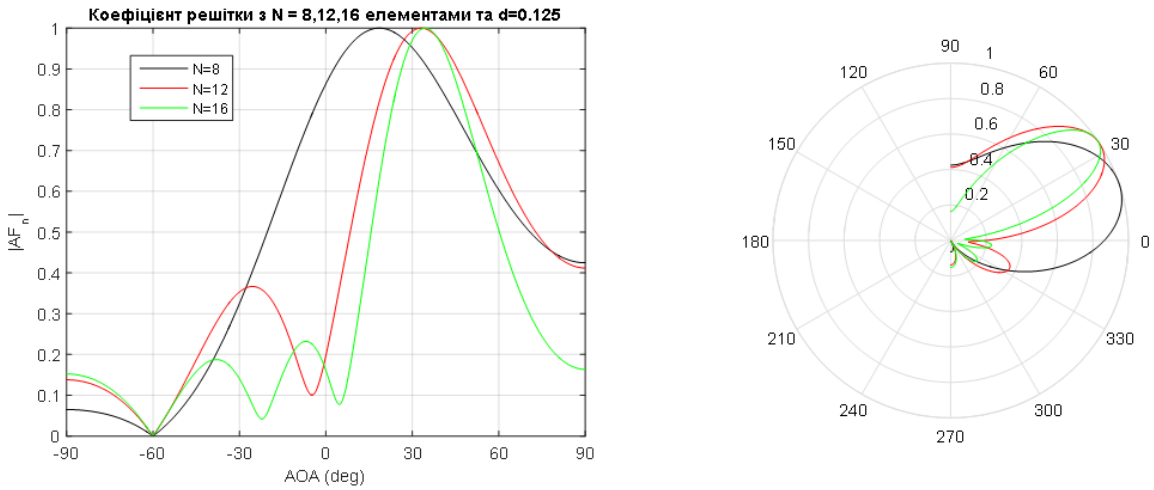


Рисунок 4.10 – Амплітудний відгук антенної решітки рекурсивного алгоритму найменших квадратів RLS (d=0.125λ)

4.6 Аналіз ефективності адаптивних алгоритмів формування діаграми спрямованості RLS і LMS лінійної антенної решітки

У даному підрозділі проведено аналіз алгоритмів LMS та RLS для лінійної антенної решітки, що складається з восьми елементів із міжелементною відстанню, рівною половині довжини хвилі. Моделювання виконувалося у середовищі MATLAB. Корисний сигнал надходив під кутом приходу $\theta = 30^0$, а сигнал завади – під кутом $\theta = 60^0$.

Для адаптивної схеми LMS характерною особливістю є необхідність виконання значної кількості ітерацій для досягнення задовільної збіжності алгоритму. Залежність величини вагових коефіцієнтів від кількості ітерацій наведено на рисунку 4.11. На рисунку 4.12 показано процес формування вихідного сигналу антенної решітки та його наближення до корисного сигналу після приблизно 60 ітерацій роботи алгоритму LMS.

Адаптивна схема RLS демонструє значно швидшу збіжність. Як показано на рисунку 4.13, вагові коефіцієнти алгоритму RLS досягають оптимальних значень приблизно за 15 ітерацій, що суттєво перевищує швидкість збіжності LMS-алгоритму. На рисунку 4.14 наведено процес формування вихідного сигналу антенної решітки, який у випадку алгоритму RLS практично одразу відстежує корисний сигнал.

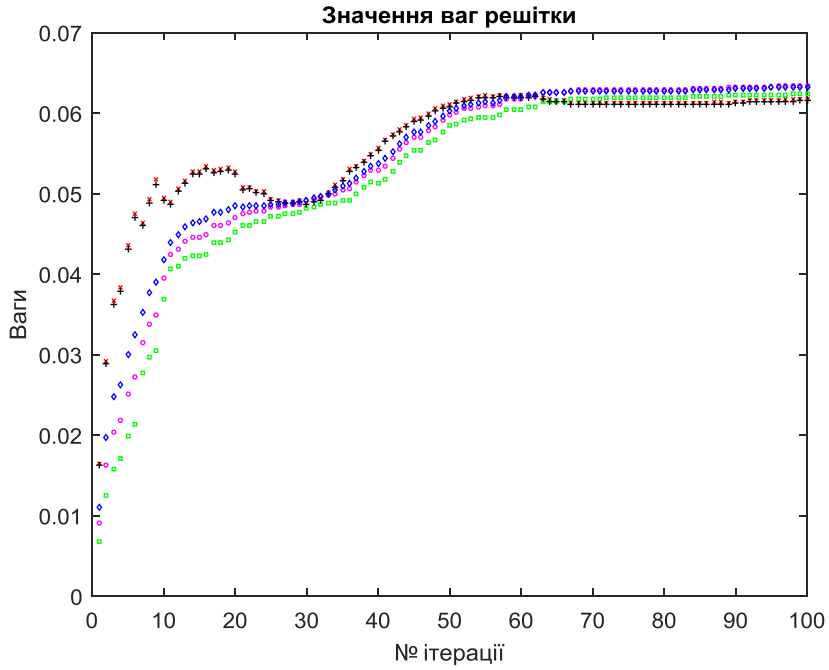


Рисунок 4.11 – Збіжність вагових коефіцієнтів антенної решітки для алгоритму найменшого середнього квадратичного відхилення LMS

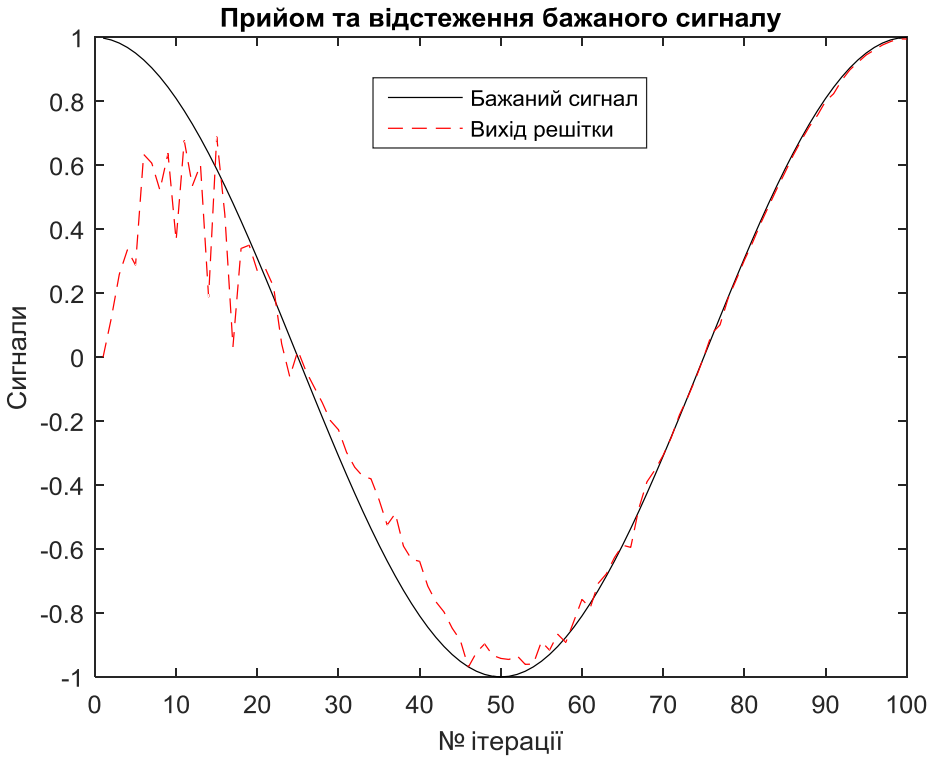


Рисунок 4.12 – Отримання та відстеження бажаного сигналу алгоритму найменшого середнього квадратичного відхилення LMS

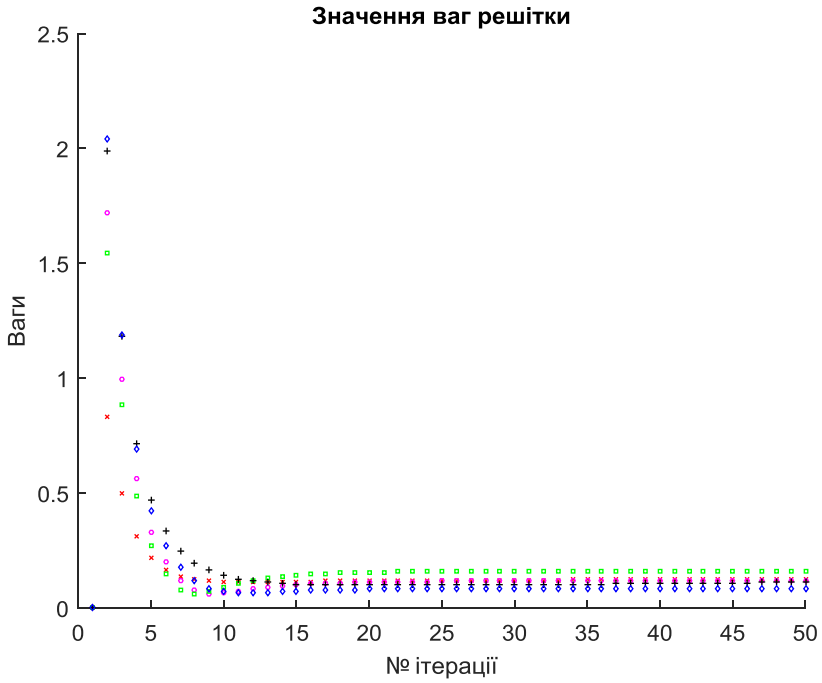


Рисунок 4.13 – Збіжність вагових коефіцієнтів антенної решітки рекурсивного алгоритму найменших квадратів RLS

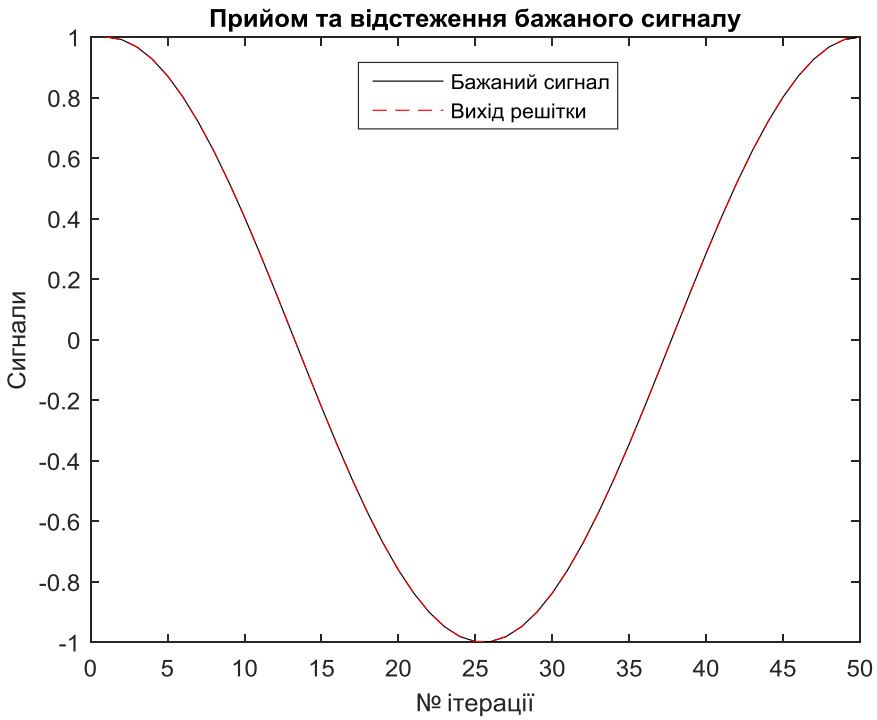


Рисунок 4.14 – Виявлення бажаного сигналу для алгоритму рекурсивного алгоритму найменших квадратів RLS

4.7 Алгоритм адаптивного формування цифрової діаграми спрямованості антенної решітки на основі постійного модуля CMA

Точне вимірювання ДС неможливе, оскільки це вимагало б попереднього знання $E[|s(n)|^p]$. Стратегія полягає в масштабуванні |s(n)| до одиниці і використанні миттєвої оцінки. Алгоритм було змодельовано за допомогою MATLAB, і результати моделювання наведено на рисунках 4.15 та 4.14 нижче. Алгоритм збігається повільніше, ніж алгоритм LMS, як видно з рисунків 4.4 і 4.13 та рисунків 4.11 і 4.16. Моделювання проводилося з відносно низьким рівнем шуму системи. Завади такі самі, як і в експерименті з LMS, з тим самим кутом приходу сигналів.

Сигнали завад надходять під кутами -10, -40 і 58 градусів. Сигнал, який потрібно прийняти, приходить під кутом 20 градусів. На рисунку 4.17 показано амплітудну характеристику адаптивної антенної решітки, де відкинуто три завади. З порівняння цих двох алгоритмів ми бачимо різницю в ініціалізації вагових коефіцієнтів. Під час спроб моделювання алгоритму CMA стало зрозуміло, що алгоритм є менш стабільним, ніж алгоритм LMS. Моделювання алгоритму з використанням похибки, не дало стабільних результатів. Перевагою алгоритму CMA є той факт, що йому потрібна лише миттєва амплітуда вихідного сигналу|y(k)| і тому не потрібна синхронізація, тоді як LMS вимагає синхронізації. Завдяки цій властивості алгоритм CMA є відносно простим у реалізації.

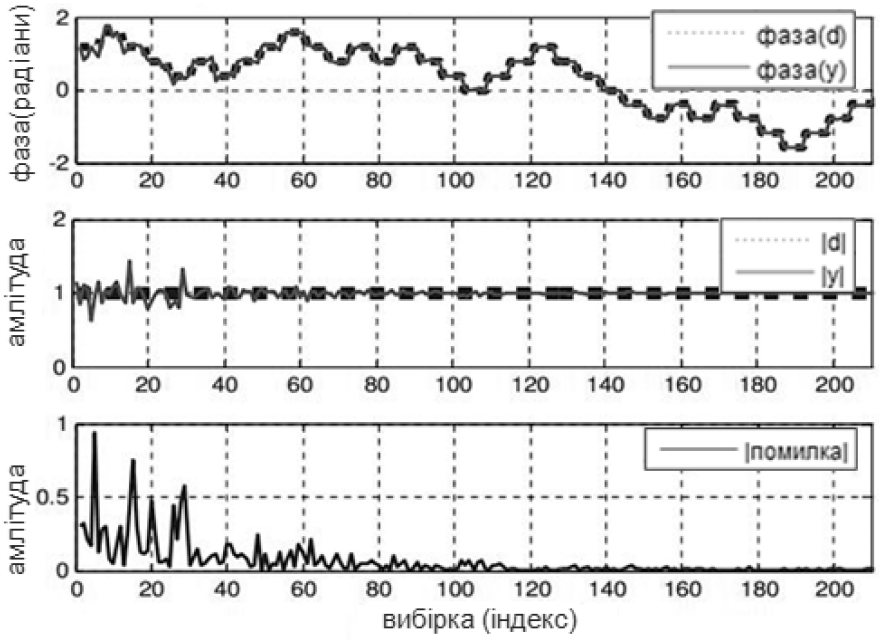


Рисунок 4.15 – Алгоритми CMA для адаптивної решітки з 6-елементною антеною та 5 завадами для коефіцієнта шуму антени 0.01, μ=0.01, d=0.5λ

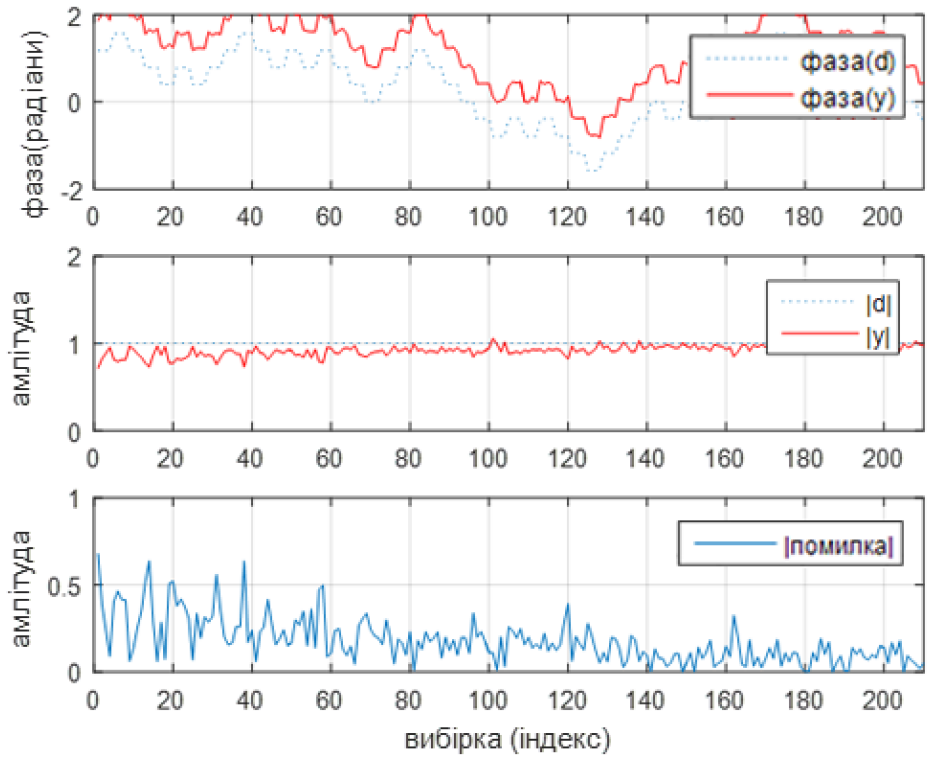


Рисунок 4.16 – Алгоритм CMA для адаптивної решітки з 6-елементною антеною та 5 завадами для коефіцієнта шуму антени 0.1, μ=0.01, d=0.5λ

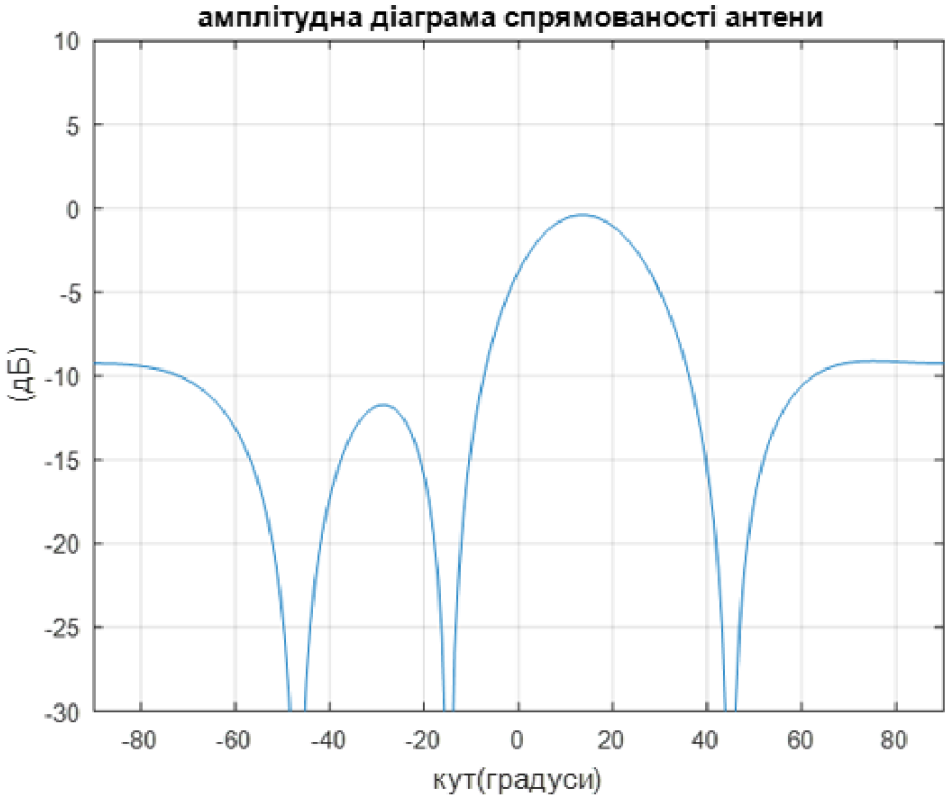
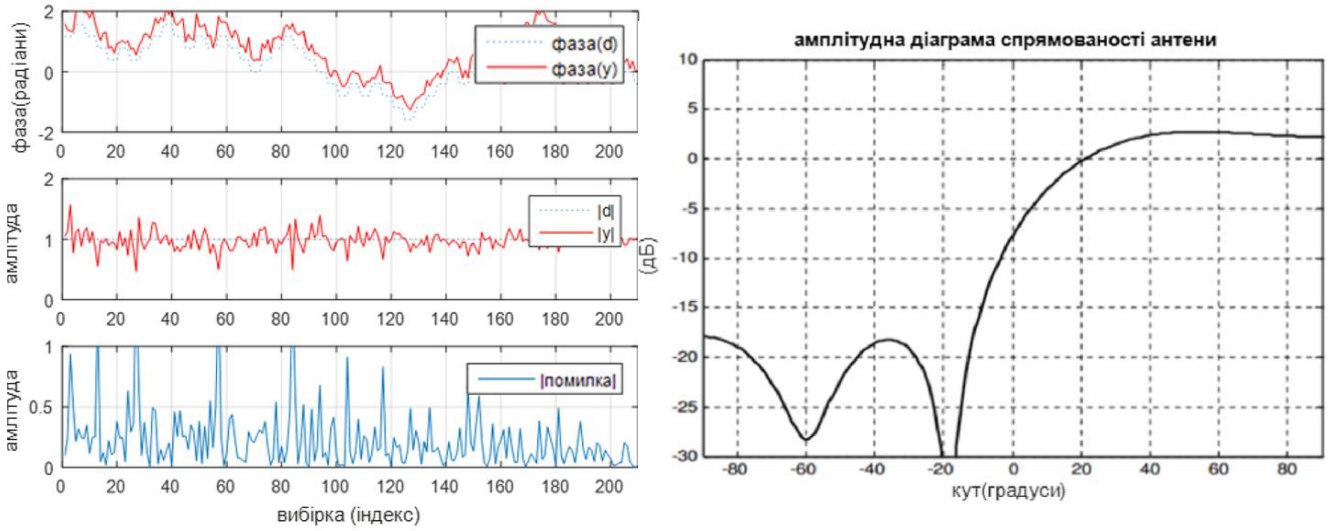


Рисунок 4.17 – Алгоритм CMA для адаптивної антенної решітки з 4-елементними антенами і 3 завадами для коефіцієнта шуму антени, що дорівнює 0.01, μ=0.01, d=0.5λ

На рисунку 4.18 (а) показано результат моделювання, отриманий для алгоритму CMA з тими самими параметрами, що й для моделювання на рисунку 4.15, з різницею лише у відстані між антенами. Як видно з рисунка 4.18 (а), фаза бажаного сигналу і зваженого сигналу не мають жодної спільної точки, що вносить більшу похибку. Порівнюючи це з фазою бажаного сигналу і зваженого сигналу, наведеними на рисунку 4.18, і величиною помилки для двох випадків, можна зрозуміти, що зміна міжелементної відстані впливає на продуктивність алгоритму CMA для цифрового формування діаграми спрямованості для підвищення пропускної здатності системи. Як пояснювалося вище, міжелементна відстань d = 0,25λ не є придатною відстанню для реалізації цього алгоритму, і він не може належним чином відкидати завади.



а) б)

Рисунок 4.18 – Алгоритми CMA для адаптивної решітки з 4-елементною антеною решіткою та 2 завадами для коефіцієнта шуму антени, що дорівнює 0,01, d = 0,25λ та μ = 0,01

а) амплітудна характеристика та оцінка фази в залежності від часу створення

б) коефіцієнт масиву (дБ) у порівнянні з тета (градуси)

З наведених нижче рисунків 4.19 (а) і (б) видно, що на АЧХ для цифрового формування діаграми спрямованості впливає величина міжантенної відстані між елементами порівняно з наведеним вище рисунком 4.15. Використання d= λ для підвищення продуктивності системи шляхом реалізації концепції цифрового формування діаграми спрямованості, як видно з рисунків 4.5, 4.11 для алгоритму LMS і 4.19 для алгоритму CMA. Величина помилки CMA сильно коливається ви-

падковим чином і в середньому становить близько 0,75 або 75%, а зважений сигнал сильно коливається і стає нестабільним. Крім того, фаза зваженого сигналу не відповідає фазовому зсуву шуканого сигналу. Тому результат, отриманий за допомогою цього параметра, не є практичним, оскільки він зміщує кут приходу бажаного сигналу і змішує нулі з сигналами, що заважають, як ми бачимо на рисунку 4.19 (б) нижче.

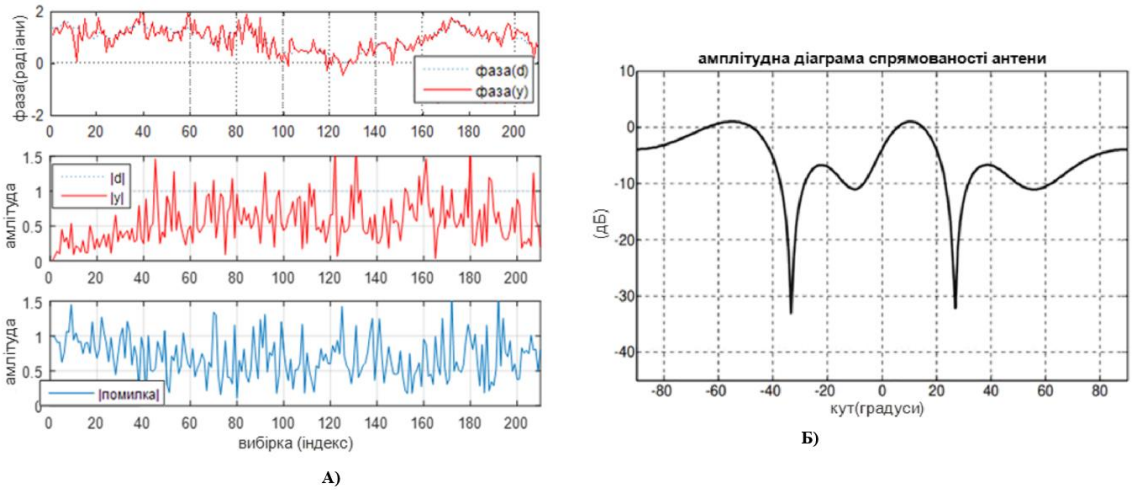
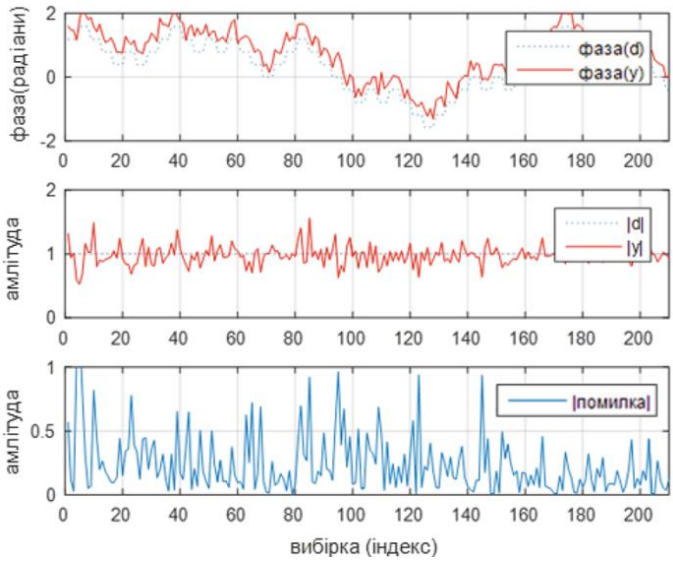


Рисунок 4.19 – Алгор а) CMA для адаптивної решітки з б) ментною антеною та 2 завадами для коефіцієнта шуму антени, що дорівнює 0.01, λ =d та μ = 0.01

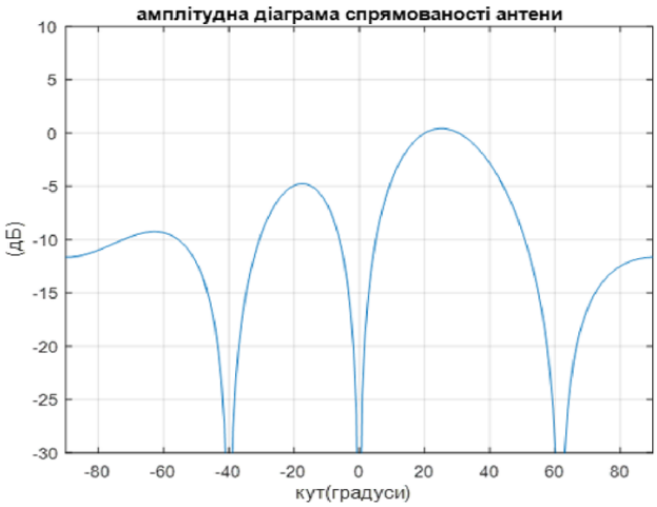
а) оцінка амплітуди та фази в залежності від часу ітерації

б) коефіцієнт масиву (дБ) у порівнянні з тетою (градуси)

Як показано на рисунку 4.20, використання дуже малого кроку адаптації впливає на продуктивність алгоритмів формування променя. Але порівняно з результатом, отриманим на рис. 4.13, результат, отриманий на рис. 4.20, є дуже нестабільним і не показує жодного покращення амплітуди помилки та оцінки бажаного сигналу. Це свідчить про те, що алгоритм LMS збігається зі збільшенням кількості відліків, тоді як CMA не може цього зробити.



а)



б)

Рисунок 4.20 – Алгоритм CMA для адаптивної антенної решітки з 4 антенами та 3 завадами для коефіцієнта шуму антени, що дорівнює 0,01 та 0,5 λ =d та μ = 0,001

а) оцінка амплітуди та фази в залежності від часу ітерації,

б) коефіцієнт масиву (дБ) у порівнянні з тетою (градуси)

5 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ АДАПТИВНОГО ФОРМУВАННЯ ПРОМЕНЮ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ АНТЕНИ

5.1 Результати моделювання адгоритмів LMS і CMA

В таблиці 5.1 наведено підсумки моделювання.

Таблиця 5.1 – Підсумкові результати моделювання

Алгоритм	Параметр						Ефективність (%)
	Кількість антен (M)	Відстань між антенами (d)	Розмір кроку(μ)	Шум системи	Швидкість збіжності (ітерація)	BER	
1	2	3	4	5	6	7	8
LMS	4	0,5λ	0,01	0,01	120	10^{-3}	12,5
	6	0,5λ	0,01	0,01	60		30
CMA	4	0,5λ	0,01	0,01	-		5,35
	6	0,5λ	0,01	0,01	140		23,2

На рисунку 5.1 показано моделювання залежності SINR від BER для CMA та LMS з кількістю антенних елементів решітки 4, 6 і для тієї ж самої антенної решітки без використання концепції формування діаграми спрямованості.

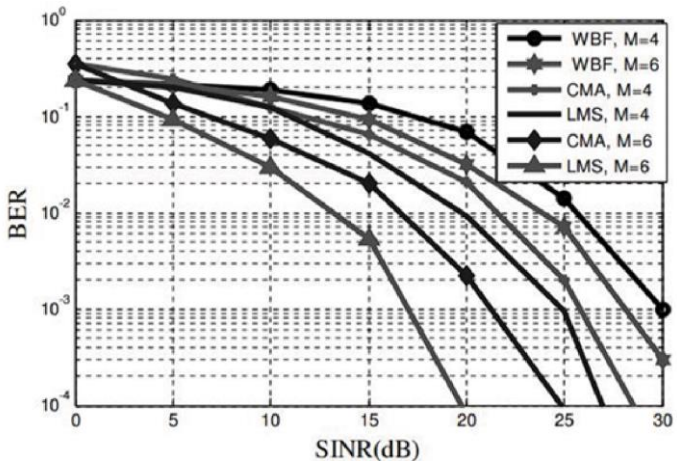


Рисунок 5.1 – Графік залежностей ймовірності помилки P_{BER} від відношення сигнал/(завада\шум) SINR

Таким чином, використання адаптивних антен покращує продуктивність систем мобільного зв'язку за показниками SINR та BER, як видно результатів моделювання, наведених на рис. 5.1. Прийом сигналу при $P_{BER} = 10^{-3}$ з 6-елементною антенною решіткою (LMS) більш ефективний, ніж з іншими. Таким чином, при використанні більшої кількості елементів антенної решітки якість прийому сигналу покращується за допомогою алгоритму формування діаграми спрямованості.

На рис. 5.2 наведено структурну схему алгоритму оцінки ефективності.

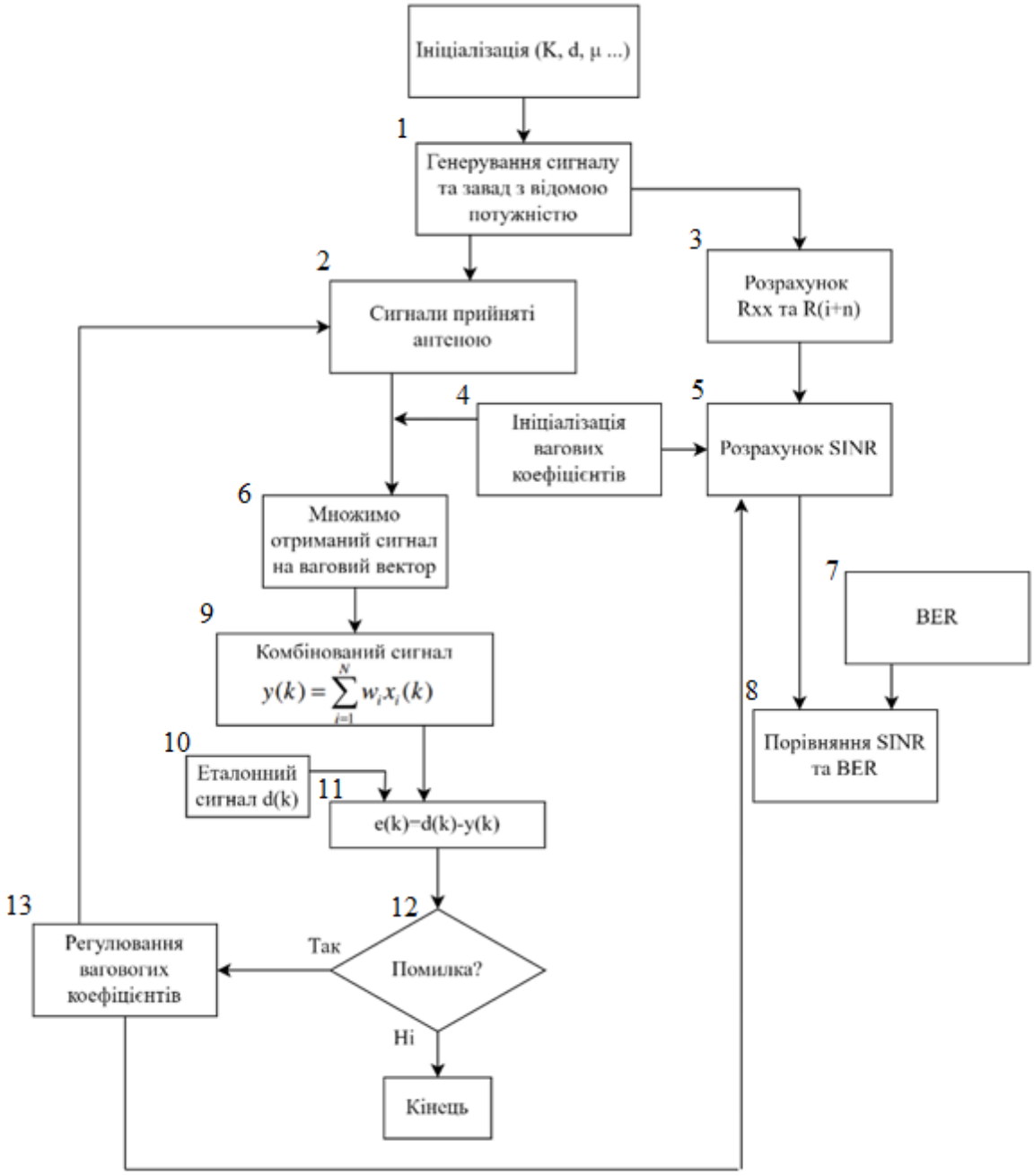


Рисунок 5.12 – Структурна схема алгоритму оцінки ефективності

Коефіцієнт шуму з наведеної на рисунку 5.12 струкутурної схеми алгоритму оцінки ефективності ми отримуємо ваговий вектор, який використовується для максимізації SINR адаптивного формування діаграми спрямованості.

Міжелементна відстань між елементами антени є важливим фактором при проектуванні антенної решітки: відстань між елементами більше 0,5λ (де λ – довжина хвилі вхідного або вихідного сигналу) призводить до утворення пелюсток решітки. Якщо міжелементна відстань між елементами антени менша за 0,5λ, то взаємним зв'язком між елементами вже не можна нехтувати. Тому оптимальна відстань між елементами для застосування діаграми спрямованості $d = 0,5\lambda$. Ми розглянули концепцію формування променя і обговорили методи, які використовуються для вирішення проблем, пов'язаних з бездротовим персональним зв'язком.

Було продемонстровано, як адаптивна антена здатна збільшити пропускну здатність системи мобільного зв'язку 5G. У LMS нам потрібен опорний сигнал d (k), до якого ми хочемо, щоб вихідний сигнал збігався. В CMA, однак, опорний сигнал не потрібен, ми використовуємо апріорну інформацію про те, що $|y|=1$ за відсутності сигналів, що заважають.

Результати моделювання для двох адаптивних алгоритмів, які були реалізовані для перевірки покращення продуктивності концепції цифрового формування променя, показують, що кількість завад, які відкидаються, рівень максимуму і нуля, величина помилки, оцінка (адаптація) зваженого сигналу до бажаного сигналу і фазовий зсув змінюються при зміні кількості антен, розміру кроку, системного шуму і відстані між антенними елементами. Резульати аналізу в цій роботі, є цінними для планування та визначення розмірів мобільних стільникових мереж.

Таким чином, було показано, що ці алгоритми дають значне поліпшення продуктивності при розумних обчислювальних витратах порівняно з алгоритмами, які розглядають тільки множину решіток (порівняно з алгоритмами комутованого формування променю). Імітаційне дослідження для SINR vs BER показує показники продуктивності лінії зв'язку, які дають нам уявлення про покращення продуктивності в результаті застосування методів формування променя.

Проведене імітаційне моделювання показало, що алгоритм LMS працює краще, ніж алгоритм CMA, у всіх припущених умовах при деякій обчислювальній складності.

5.2 Рекомендації щодо можливості застосування антенної решітки у системах мобільного зв’язку

У попередньому підрозділірозділі проведено моделювання, аналіз та порівняння двох алгоритмів адаптивного формування променя за критеріями ширини діаграми спрямованості, швидкості збіжності, а також здатності до приймання та відстеження корисного сигналу. За результатами дослідження встановлено, що оптимальною міжелементною відстанню антенної решітки є $d=0.5\lambda$.

Проаналізовано вплив кількості антенних елементів N на характеристики формування променя. Встановлено, що зі збільшенням кількості елементів антенної решітки ширина променя зменшується, завдяки чому підвищується спрямованість системи та покращується ефективність формування діаграми спрямованості.

Результати дослідження показують, що алгоритм LMS забезпечує кращі характеристики роботи за винятком відносно низької швидкості збіжності. Алгоритм RLS, у свою чергу, дозволяє суттєво підвищити швидкість збіжності, однак потребує значно більших обчислювальних ресурсів.

Отримані результати дають можливість здійснювати обґрунтований вибір адаптивного алгоритму формування променя для подальшої реалізації систем множинного просторово-часового доступу.

Використання розглянутих алгоритмів не потребує суттєвих змін у протоколах доступу систем мобільного зв’язку, а передбачає переважно модернізацію апаратної частини антенної системи, що є важливою перевагою запропонованої моделі лінійної антенної решітки.

Наявність значної кількості антенних елементів і достатніх обчислювальних ресурсів робить доцільним застосування алгоритму RLS у системах мобільного зв’язку. У випадках, коли кількість антенних елементів є достатньою, але обчислювальні ресурси обмежені, більш ефективним рішенням є використання алгоритму LMS. Під час перспективного проєктування програмно-апаратних комплексів для реалізації оптимальних алгоритмів формування променя необхідно забезпечити виконання низки умов, зокрема достатню обумовленість кореляційної матриці власних значень сигналів, завад і шумів у складній сигнально-завадовій обстановці, характерній для систем мобільного зв’язку. Саме тому практичне впровадження інтелектуальних антен супроводжується рядом технічних труднощів, які, ймовірно, будуть вирішені впродовж найближчих років розвитку телекомунікаційних технологій.

ВИСНОВКИ

У сучасних умовах глобалізації телекомунікаційні мережі стикаються зі стрімким зростанням обсягів трафіку. Для задоволення зростаючих потреб користувачів системи мобільного зв’язку розгортаються на відстанях у декілька сотень метрів одна від одної, а безпроводові локальні мережі (WLAN) встановлюються практично повсюдно. Подальше розширення послуг мобільного широкосмугового доступу, а також впровадження новітніх технологій, зокрема Smart-антен, Massive MIMO та 3D MIMO, характерних для систем мобільного зв’язку 5G, сприяють подальшому збільшенню обсягів безпроводового трафіку.

Для ефективної реалізації технологій цифрового формування діаграми спрямованості із застосуванням smart-антен необхідно обґрунтовано підходити до вибору алгоритмів обчислення комплексних вагових коефіцієнтів та процедур формування променя антенної решітки.

Проведено синтез математичних моделей на основі адаптивних методів формування діаграми спрямованості smart-антени, а саме алгоритму найменших середніх квадратів LMS, рекурсивного алгоритму найменших квадратів RLS та алгоритму постійного модуля CMA. Зазначені алгоритми використовуються для обчислення комплексних вагових коефіцієнтів лінійної антенної решітки та формування променя діаграми спрямованості.

У роботі виконано аналітичну та кількісну оцінку продуктивності алгоритмів LMS, RLS і CMA за такими показниками, як швидкість збіжності, ширина променя діаграми спрямованості антенної решітки та точність виділення корисного сигналу.

За результатами дослідження встановлено, що застосування розглянутих алгоритмів дозволяє суттєво підвищити продуктивність системи при прийнятному рівні обчислювальних витрат порівняно з методами, що базуються лише на використанні антенної решітки без адаптивної обробки сигналів.

Проведене імітаційне моделювання показало, що алгоритм LMS у більшості розглянутих умов забезпечує кращі результати порівняно з алгоритмами RLS і CMA, хоча й потребує певних обчислювальних ресурсів.

Отримані результати можуть бути використані під час планування та впровадження технологій просторово-часового доступу в мобільних мережах зв’язку стандарту 5G.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ohira T., Cheng J. Analog Smart Antennas. Adaptive Antenna Arrays. Berlin, Heidelberg, 2004. P. 184–204. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-05592-2_11 (дата звернення: 27.05.2026).

2. Kazumasa S., Tomohei S. Hamiltonian systems with many degrees of freedom: Asymmetric motion and intensity of motion in phase space. *Physical Review E*. 1996. Vol. 54, no. 5. P. 4685–4700. URL: https://doi.org/10.1103/physreve.54.4685 (дата звернення: 27.05.2026).

3. Naguib A. F., Paulraj A., Kailath T. Capacity improvement with base-station antenna arrays in cellular CDMA. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1994. Vol. 43, no. 3. P. 691–698. URL: https://doi.org/10.1109/25.312780 (дата звернення: 27.05.2026).

4. 3GPP2 C.S0002-D, Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems: Revision D, Feb. 2004.

5. A Survey on Hybrid Beamforming Techniques in 5G: Architecture and System Model Perspectives / I. Ahmed et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 20, no. 4. P. 3060–3097. URL: https://doi.org/10.1109/comst.2018.2843719 (дата звернення: 27.05.2026).

6. Saha R. K., Saengudomlert P., Aswakul C. Evolution Toward 5G Mobile Networks – A Survey on Enabling Technologies. *Engineering Journal*. 2016. Vol. 20, no. 1. P. 87–119. URL: https://doi.org/10.4186/ej.2016.20.1.87 (дата звернення: 27.05.2026).

7. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, no. 3. P. 1617–1655. URL: https://doi.org/10.1109/comst.2016.2532458 (дата звернення: 27.05.2026).

8. Pirinen P. A Brief Overview of 5G Research Activities. *1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity*, Levi, Finland, 26–27 November 2014. 2014. URL: https://doi.org/10.4108/icst.5gu.2014.258061 (дата звернення: 27.05.2026).

9. MmWave massive-MIMO-based wireless backhaul for the 5G ultra-dense network / Z. Gao et al. *IEEE Wireless Communications*. 2015. Vol. 22, no. 5. P. 13–21. URL: https://doi.org/10.1109/mwc.2015.7306533 (дата звернення: 27.05.2026).

10. Razavizadeh S. M., Ahn M., Lee I. Three-Dimensional Beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2014. Vol. 31, no. 6. P. 94–101. URL: https://doi.org/10.1109/msp.2014.2335236 (дата звернення: 27.05.2026).

11. Горбачов В.О., Колосов Б.Є., Любімов М.О., Москалець М.В. Дослідження продуктивності низхідного каналу зв'язку технології LTE. *«Радіоелектроніка і молодь У XXI столітті», конференція «Перспективи розвитку інфокомунікацій та інформаційно-вимірювальних технологій».* Матеріали 30-го міжнародного молодіжного форуму 22 – 24 квітня 2026 р., Том 4.С.104-106.

12. Бабіч М.Р., Горбачов В.О., Колосов Б.Є., Москалець М.В. Аналіз схем повторного використання частот для мереж мобільного зв'язку 4-5G. *«Радіоелетроніка і молодь У XXI столітті», конференція «Перспективи розвитку інфокомунікацій та інформаційно-вимірювальних технологій».* Матеріали 29-го міжнародного молодіжного форуму 16 – 18 квітня 2025 р., Том 4.С.28-31.

13. Muliar, B., Koliadenko, Y. U., & Moskalets, M., Loshakov, V., Martynchuk, O., Ageyev, D. (2022). Interaction Model and Phase States at Frequency Resource Allocation in a Grouping of Radio-Electronic Equipment of 5G Mobile Communication Network. 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), pp. 1-7. https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.089

14. Demir O. T., Bjornson E. Channel Estimation in Massive MIMO Under Hardware Non-Linearities: Bayesian Methods Versus Deep Learning. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2020. Vol. 1. P. 109–124. URL: https://doi.org/10.1109/ojcoms.2019.2959913 (дата звернення: 27.05.2026).

15. XueMing Ling, RongLin Li. A Novel Dual-Band MIMO Antenna Array With Low Mutual Coupling for Portable Wireless Devices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2011. Vol. 10. P. 1039–1042. URL: https://doi.org/10.1109/lawp.2011.2169035 (дата звернення: 27.05.2026).

16. Yıldız A., Džakmić Š., Ahmed Saleh M. A short survey on next generation 5G wireless networks. *Sustainable Engineering and Innovation*. 2019. Vol. 1, no. 1. P. 57–66. URL: https://doi.org/10.37868/sei.v1i1.93 (дата звернення: 27.05.2026).

17. 8-antenna and 16-antenna arrays using the quad-antenna linear array as a building block for the 3.5-GHz LTE MIMO operation in the smartphone / K.-L. Wong et al. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2015. Vol. 58, no. 1. P. 174–181. URL: https://doi.org/10.1002/mop.29527 (дата звернення: 27.05.2026).

18. Lopes P. A. C., Tavares G., Gerald J. B. A New Type of Normalized LMS Algorithm Based on the Kalman Filter. *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Honolulu, HI, 15–20 April 2007. 2007. URL: https://doi.org/10.1109/icassp.2007.367094 (дата звернення: 27.05.2026).

19. Widrow B., McCool J. A comparison of adaptive algorithms based on the methods of steepest descent and random search. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1976. Vol. 24, no. 5. P. 615–637. URL: https://doi.org/10.1109/tap.1976.1141414 (дата звернення: 27.05.2026).

20. Abohamra Y. A., Soleymani M. R., Shayan Y. R. Using Beamforming for Dense Frequency Reuse in 5G. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 9181–9190. URL: https://doi.org/10.1109/access.2019.2892381 (дата звернення: 27.05.2026).

21. Chandran S. Smart Antennas for Wireless Communications (with MATLAB) (Gross, F.; 2005) [Reviews and Abstracts. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2009. Vol. 51, no. 3. P. 134. URL: https://doi.org/10.1109/map.2009.5251212 (дата звернення: 27.05.2026).