

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

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях**

До захисту допущено:

В.О. завідувача кафедри

_____ Валерій ПРАВИЛО
«_____» _____ 2026 р

**ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні
технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка**

на тему: Способи протидії завадам в безпроводових телекомунікаційних мережах

Виконав : здобувач вищої освіти 4 курсу, групи ПІ-22

Олексюк Дмитро Андрійович

Науковий керівник: доцент кафедри ІТТ НН ІТС, кандидат технічних наук,
доцент Правило Валерій Володимирович _____

Рецензент: доцент кафедри ТК НН ІТС, кандидат технічних наук, доцент

Явіся Валерій Сергійович _____

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

Здобувач вищої освіти _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕДЖУЮ

В.О. завідувача кафедри

_____ Валерій ПРАВИЛО
«_____» _____ 2026 р

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Олексюку Дмитру Андрійовичу

1. Тема дипломної роботи: Способи протидії завадам в безпроводових телекомунікаційних мережах, науковий керівник роботи доцент кафедри ІТТ НН ІТС кандидат технічних наук, доцент Правило Валерій Володимирович, затверджені наказом по університету від 26.05.2026р. № 1912-с

2. Строк подання студентом дипломної роботи 01.06.2026 р.

3. Об'єкт дослідження: процес протидії завадам у телекомунікаційних мережах.

4. Вихідні дані до роботи: відомі типи завад у безпроводових телекомунікаційних мережах та механізми їх впливу, методи підвищення завадостійкості в мережах LTE, характеристики радіоканалу та показники якості зв'язку, сучасні алгоритми адаптивного керування ресурсами мережі (AMC, HARQ, ICIC, eICIC, MIMO), наукові публікації та стандарти LTE.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести аналіз принципів функціонування мереж LTE та впливу завад на параметри радіоканалу. Визначити основні показники якості зв'язку, що характеризують рівень завадостійкості мережі. Проаналізувати сучасні методи протидії завадам у телекомунікаційних мережах. Дослідити вплив адаптивного керування потужністю та вибору MIMO на ефективність роботи системи. Провести оцінку ефективності запропонованого підходу в умовах підвищеної інтерференції.

6. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): презентація в PowerPoint.

7. Дата видачі завдання: 25.02.2026

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Затвердження теми та плану роботи. Аналітичний огляд літератури та існуючих методів протидії завадам у безпроводових телекомунікаційних мережах.	25.02.2026 - 10.03.2026	Виконано
2	Аналіз принципів функціонування мереж LTE та впливу завад на параметри радіоканалу. Початок роботи над першим розділом.	11.03.2026 - 27.03.2026	Виконано
3	Аналіз сучасних методів підвищення завадостійкості та механізмів адаптивного керування ресурсами мережі LTE. Робота над другим розділом.	28.03.2026 - 17.04.2026	Виконано
4	Робота над третім розділом. Дослідження ефективності методів протидії завадам та аналіз отриманих результатів.	18.04.2026 - 08.05.2026	Виконано
5	Формування висновків щодо ефективності запропонованих рішень.	09.05.2026 - 15.05.2026	Виконано
6	Оформлення дипломної роботи	16.05.2026 - 02.06.2026	Виконано
7	Підготовка презентації до захисту	05.06.2026 - 09.06.2026	Виконано
8	Захист дипломної роботи	16.06.2026 - 30.06.2026	Виконано

Здобувач вищої освіти _____ Дмитро ОЛЕКСЮК

Керівник дипломної роботи _____ Валерій ПРАВИЛО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 80 сторінок тексту, 8 рисунків, 10 таблиць та 21 використаних джерел.

Актуальність теми. У сучасних безпроводових телекомунікаційних мережах питання забезпечення стійкості до завад є одним із ключових факторів забезпечення якісного та стабільного зв'язку. Зі зростанням кількості користувачів, щільності розміщення базових станцій та обсягів передавання даних збільшується рівень міжсотової інтерференції та впливу зовнішніх завад. Це призводить до погіршення параметрів якості обслуговування, зниження пропускної здатності мережі, збільшення затримок і кількості помилок передавання даних. У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалення існуючих методів підвищення завадостійкості та оптимізації параметрів функціонування телекомунікаційних систем.

У роботі систематизовано сучасні методи протидії завадам, зокрема механізми адаптивної модуляції та кодування, технології MIMO, алгоритми міжсотової координації та процедури повторної передачі. Окрему увагу приділено параметрам мережі, на які можливо впливати з метою зменшення рівня інтерференції та підвищення енергоефективності системи. Проведено розрахунковий аналіз впливу зміни технічних параметрів на показники SINR та пропускну здатність каналу.

На основі отриманих результатів запропоновано удосконалений комбінований підхід до зменшення завад, що базується на оптимізації потужності передавання.

Мета роботи Підвищення завадостійкості телекомунікаційних мереж в умовах впливу завад.

Об'єктом дослідження є процес протидії завадам в телекомунікаційних мережах.

Предметом дослідження є способи протидії завадам у телекомунікаційних мережах.

Методи дослідження. У роботі використано методи теоретичного аналізу телекомунікаційних мереж, методи аналізу параметрів радіоканалу та оцінки впливу завад на якість зв'язку. Для дослідження ефективності методів протидії завадам використано порівняльний аналіз параметрів SINR, BER, пропускної здатності та спектральної ефективності системи.

Ключові слова: LTE, ЗАВАДИ, ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ МЕРЕЖІ, SINR, BER, MIMO, AMC, HARQ, ICIC, EICIC, РАДІОКАНАЛ, ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, СПЕКТРАЛЬНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

СПИСОК ТЕРМІНІВ І СКОРОЧЕНЬ

LTE – Long Term Evolution (стандарт мобільного зв'язку четвертого покоління)

LTE-A – LTE Advanced (удосконалена версія LTE)

UE – User Equipment (користувачське обладнання)

eNodeB – Evolved NodeB (базова станція мережі LTE)

EPC – Evolved Packet Core (ядро пакетної мережі LTE)

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (ортогональне частотне мультимплексування)

OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access (множинний доступ з ортогональним частотним розділенням)

MIMO – Multiple Input Multiple Output (технологія багатоканального передавання даних)

AMC – Adaptive Modulation and Coding (адаптивна модуляція та кодування)

HARQ – Hybrid Automatic Repeat reQuest (гібридний автоматичний запит повторної передачі)

ICIC – Inter-Cell Interference Coordination (координація міжсотової інтерференції)

eICIC – Enhanced Inter-Cell Interference Coordination (розширена координація міжсотової інтерференції)

IRC – Interference Rejection Combining (комбінування з пригніченням інтерференції)

SINR – Signal to Interference plus Noise Ratio (відношення сигналу до шуму та інтерференції)

SNR – Signal to Noise Ratio (відношення сигналу до шуму)

BER – Bit Error Rate (ймовірність бітової помилки)

CQI – Channel Quality Indicator (індикатор якості каналу)

MCS – Modulation and Coding Scheme (схема модуляції та кодування)

QoS – Quality of Service (якість обслуговування)

RB – Resource Block (ресурсний блок)

PHY – Physical Layer (фізичний рівень мережі)

SON – Self-Organizing Networks (самоорганізовані мережі)

NMS – Network Management System (система керування мережею)

RF – Radio Frequency (радіочастота)

FDD – Frequency Division Duplex (частотний дуплекс)

TDD – Time Division Duplex (часовий дуплекс)

3GPP – 3rd Generation Partnership Project (організація стандартизації мобільного зв'язку)

ABSTRACT

Дипломна робота містить 80 сторінок, 8 рисунків, 10 таблиць та 21 використаних джерел.

Relevance of the topic. In modern wireless telecommunications networks, ensuring resistance to interference is one of the key factors in providing high-quality and stable communication. As the number of users, the density of base stations, and data transmission volumes increase, so do the levels of inter-cell interference and the impact of external interference. This leads to a deterioration in quality of service parameters, a reduction in network throughput, and an increase in delays and data transmission errors. Consequently, there is a need to improve existing methods for enhancing interference resistance and optimizing the operational parameters of telecommunications systems.

This paper systematizes modern methods for countering interference, including adaptive modulation and coding schemes, MIMO technologies, inter-cell coordination algorithms, and retransmission procedures. Special attention is paid to network parameters that can be adjusted to reduce interference levels and improve the system's energy efficiency. A computational analysis of the impact of changes in technical parameters on SINR and channel capacity is performed.

Based on the results obtained, an improved combined approach to interference mitigation is proposed, based on transmission power optimization

The aim of this work is to study methods of countering interference in wireless telecommunications networks and to analyze methods for improving the interference resilience of LTE networks.

The object of this study is the process of countering interference in LTE telecommunications networks.

The subject of this study is methods for countering interference in telecommunications networks.

Research methods. The work employs methods of theoretical analysis of telecommunication networks, methods of analyzing radio channel parameters, and methods of assessing the impact of interference on communication quality. To study the effectiveness of interference mitigation methods, a comparative analysis of the SINR, BER, system throughput, and spectral efficiency parameters was used.

Keywords: LTE, INTERFERENCE, INTERFERENCE RESILIENCE, TELECOMMUNICATIONS NETWORKS, SINR, BER, MIMO, AMC, HARQ, ICIC, EICIC, RADIO CHANNEL, INTERFERENCE, THROUGHPUT, SPECTRAL EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1. LTE МЕРЕЖА: ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ВПЛИВ ЗАВАД.....	15
1.1. Архітектурні принципи та концепція побудови мереж стандарту LTE....	15
1.2. Організація фізичного рівня та радіоінтерфейсу на базі OFDM.....	17
1.3 Аналіз рівня сигналу та втрат під час поширення радіохвиль.....	20
1.4 Методи підвищення завадостійкості мереж LTE.....	21
1.5 Оцінка параметрів радіоканалу та вплив завад.....	23
1.5.1 Вплив відношення сигнал/шум на якість зв'язку.....	23
1.5.2 Технологія MIMO та підвищення ефективності радіоканалу.....	24
1.5.3 Міжсотова інтерференція та показник SINR.....	25
1.5.4 Частотні завади в мережах LTE.....	26
1.5.5 Вплив завад на спектральну ефективність та затримки.....	27
Висновки до розділу.....	30
РОЗДІЛ 2. ІСНУЮЧІ МЕТОДИ ПРОТИДІЇ ЗАВАДАМ У	
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ.....	32
2.1 Класифікація методів протидії завадам.....	32
2.2 Методи фізичного рівня захисту від завад.....	33
2.3 Використання технології MIMO для протидії завадам.....	35
2.4 Алгоритми пригнічення інтерференції.....	37
2.5 Координація міжсотової інтерференції.....	37
2.6 Методи протидії навмисним завадам.....	38
2.7 Аналіз ефективності існуючих методів.....	39
Висновки до розділу.....	41
РОЗДІЛ 3 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ РОБОТИ.....	43
3.1 Мережа LTE: принципи формування, частотні діапазони та структура передавання пакетів.....	43
3.2 Аналіз параметрів мережі LTE, на які можливо впливати з метою підвищення завадостійкості.....	48

3.3 Методи протидії завадам у мережах LTE та обґрунтування запропонованих покращень.....	63
Висновки до розділу.....	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

ВСТУП

Стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій, зокрема безпроводових систем зв'язку, зумовлює постійне зростання вимог до якості, надійності та безпеки передавання інформації. Сучасні телекомунікаційні системи стають дедалі складнішими, забезпечуючи високі швидкості передачі даних, широкий спектр послуг та підтримку великої кількості одночасних користувачів. Однією з ключових проблем функціонування сучасних телекомунікаційних мереж є наявність завад, які суттєво впливають на характеристики каналів зв'язку, знижують пропускну здатність, погіршують якість обслуговування абонентів та можуть призводити до втрати інформації. Вплив завад проявляється у зниженні відношення сигнал/шум, збільшенні коефіцієнта бітових помилок, виникненні переривань зв'язку та погіршенні загальної якості передавання даних.

Особливо актуальною ця проблема є для безпроводових телекомунікаційних мереж стандарту LTE, які широко використовуються для надання мобільного широкосмугового доступу і є основою для розгортання сучасних мереж четвертого покоління. Тому саме це покоління було обрано основним у розгляді роботи. Через особливості поширення радіохвиль такі мережі є вразливими до різноманітних видів завад: природних, індустріальних, внутрішньосистемних та навмисних. Природні завади виникають через атмосферні явища, індустріальні - через роботу різноманітного обладнання, внутрішньосистемні - через взаємний вплив елементів самої мережі. Крім того, зростання кількості радіоелектронних засобів і підвищення щільності мережевого покриття призводить до ускладнення електромагнітної обстановки та збільшення рівня взаємних перешкод, що особливо помітно в умовах густонаселених міст і промислових районів.

Окрему загрозу становлять навмисні завади (радіоелектронне подавлення), які можуть створюватися з метою дестабілізації роботи мережі, порушення передавання даних або несанкціонованого втручання в її

функціонування. Такі завади можуть бути спрямовані на конкретні частотні діапазони, базові станції або окремі канали передачі, значно знижуючи ефективність роботи всієї телекомунікаційної системи. В умовах зростання кіберзагроз і розвитку засобів радіоелектронної боротьби питання забезпечення завадостійкості мереж LTE набуває особливої важливості як з точки зору забезпечення безперервності послуг зв'язку, так і з позиції національної безпеки держави.

Актуальність теми зумовлена необхідністю комплексного аналізу видів завад у телекомунікаційних мережах та дослідження сучасних методів протидії перешкодам, зокрема в безпроводових мережах. Розуміння природи завад, механізмів їх виникнення та впливу на роботу мережі є необхідною умовою для розробки ефективних заходів захисту та підвищення загальної стійкості телекомунікаційних систем.

Метою роботи Підвищення завадостійкості телекомунікаційних мереж в умовах впливу завад.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати основні види завад у телекомунікаційних мережах, їх джерела, характеристики та механізми впливу на якість зв'язку.
2. Дослідити особливості виникнення перешкод у безпроводових мережах LTE з урахуванням специфіки архітектури мережі та використовуваних технологій.
3. Розглянути технічні та алгоритмічні методи підвищення завадостійкості в LTE, включаючи методи модуляції, кодування, формування променів та адаптації параметрів передачі.
4. Проаналізувати способи протидії навмисним завадам у мережах LTE, зокрема методи виявлення, ідентифікації та нейтралізації радіоелектронного подавлення.

5. Оцінити ефективність сучасних методів боротьби з перешкодами на основі аналізу технічної документації, результатів моделювання та практичного досвіду експлуатації мереж.

Об'єктом дослідження є процес протидії завадам в телекомунікаційних мережах

Предметом дослідження є способи протидії завадам у телекомунікаційних мережах.

Практичне значення полягає у можливості використання проведеного аналізу для підвищення ефективності функціонування безпроводових телекомунікаційних мереж та забезпечення їх стійкості до різних типів завад. Результати дослідження можуть бути використані операторами мобільного зв'язку для оптимізації роботи мереж, інженерами при проектуванні та модернізації телекомунікаційних систем, а також фахівцями з інформаційної безпеки при розробці заходів захисту від радіоелектронних загроз.

РОЗДІЛ 1

LTE МЕРЕЖА: ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ВПЛИВ ЗАВАД

1.1. Архітектурні принципи та концепція побудови мереж стандарту LTE

LTE (Long Term Evolution) — стандарт мобільного широкосмугового зв'язку четвертого покоління (4G), розроблений організацією 3GPP (3rd Generation Partnership Project) як відповідь на стрімко зростаючі потреби суспільства у високошвидкісній передачі даних. Стандарт закріплений у специфікації Release 8 та наступних релізах і є результатом багаторічної еволюції технологій мобільного зв'язку від аналогових систем першого покоління через цифрові GSM/GPRS/EDGE (2G/2,5G) і UMTS/HSPA (3G) до сучасної мережевої інфраструктури. LTE забезпечує пікову швидкість передачі даних до 300 Мбіт/с у низхідному каналі та до 75 Мбіт/с у висхідному при використанні смуги 20 МГц, що у десятки разів перевищує можливості попередніх стандартів і відкриває можливості для якісно нових застосувань - потокового відео високої чіткості, хмарних обчислень, розширеної реальності та критичних комунікацій. Ключовою концепцією архітектури LTE є повністю пакетна передача даних (All-IP), що принципово відрізняє четверте покоління від попередніх, у яких голосовий трафік передавався по комутованих каналах, а дані - по пакетних. Перехід до єдиної IP-мережі дозволив уніфікувати транспортну інфраструктуру, суттєво знизити операційні витрати операторів та відкрити шлях до інтеграції довільних IP-сервісів -голосових (VoLTE), відеоконференцій, IPTV, M2M/IoT - в єдину мережеву платформу. Концепція All-IP вимагала розробки нових механізмів забезпечення якості обслуговування (QoS), оскільки IP-мережі за своєю природою є мережами з «найкращими зусиллями» (best-effort), тоді як голосові та відеосервіси вимагають гарантованих затримок та пропускної здатності. Для вирішення цього завдання в LTE розроблено механізм QoS на основі класів QCI (QoS Class Identifier), що дозволяє пріоритезувати різні типи трафіку на рівні мережевої інфраструктури [1].

Архітектура мережі LTE складається з двох основних доменів: радіодоступу E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) та ядра мережі EPC (Evolved Packet Core).

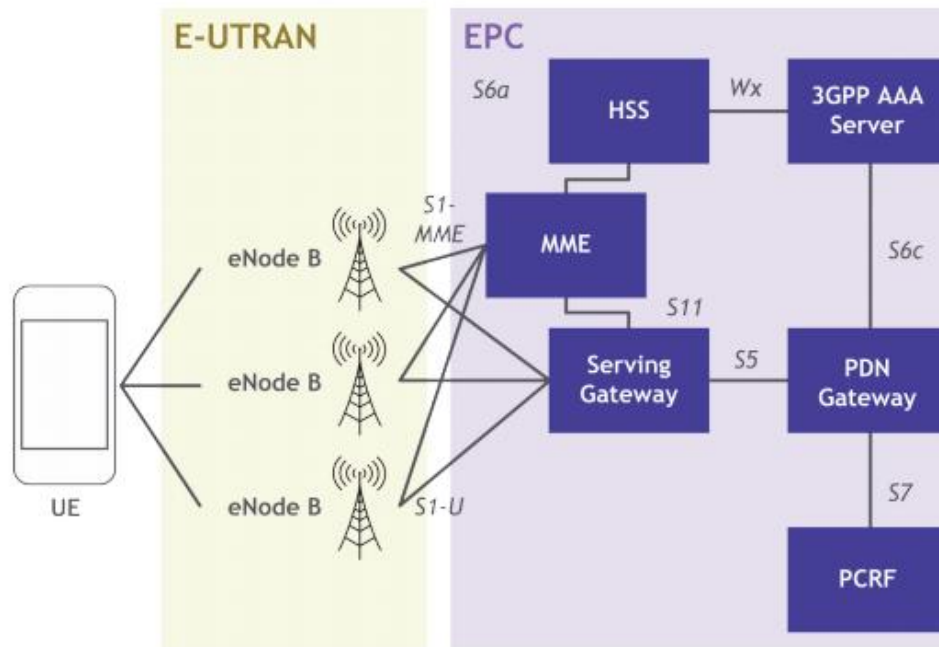


Рисунок 1.1- Архітектура мережі LTE

Радіодоступ реалізується через базові станції eNodeB (evolved Node B), які є значно «розумнішими» порівняно з їхніми попередниками Node B у мережах UMTS. Кожна eNodeB самостійно виконує планування радіоресурсів, управління потужністю, компресію заголовків та шифрування даних -функції, які в UMTS були зосереджені у контролері RNC. Базові станції eNodeB взаємодіють між собою безпосередньо через інтерфейс X2, що забезпечує координацію при хендовері та управлінні міжсотовою інтерференцією без необхідності маршрутизації трафіку через центральний вузол. Ядро мережі EPC включає вузол управління мобільністю MME (Mobility Management Entity), шлюз обслуговування S-GW (Serving Gateway), шлюз пакетних даних P-GW (PDN Gateway) та вузол управління підпискою HSS (Home Subscriber Server). MME відповідає за аутентифікацію абонентів, управління сесіями та процедурами мобільності (хендовер, idle mode), тоді як S-GW та P-GW

забезпечують маршрутизацію та фільтрацію IP-трафіку між абонентом та зовнішніми мережами.

Стандарт LTE підтримує широкий спектр частотних діапазонів - від 700 МГц до 3,5 ГГц, -що дозволяє операторам гнучко використовувати наявний частотний ресурс і забезпечувати як широкозональне покриття (700–900 МГц, проникнення всередину будівель), так і ємнісні рішення для щільних міських середовищ (1800, 2100, 2600 МГц). Ширина смуги каналу варіюється від 1,4 МГц до 20 МГц, що дає змогу адаптувати розгортання мережі до доступного частотного ресурсу конкретного оператора. Технологія агрегації носіїв (Carrier Aggregation, CA), введена в LTE-Advanced (Release 10), дозволяє об'єднати до п'яти смуг по 20 МГц, досягаючи пікової пропускної здатності 1 Гбіт/с. Така гнучкість архітектури стала основою для еволюції мереж LTE-Advanced та LTE-Advanced Pro (Release 13–14), які є проміжними сходинками до стандарту 5G NR, хоча і самі по собі продовжують активно використовуватись операторами по всьому світу як основна мобільна технологія [2].

1.2. Організація фізичного рівня та радіоінтерфейсу на базі OFDM

Передача даних у мережі LTE здійснюється за допомогою технологій OFDMA та SC-FDMA. У низхідному каналі (від базової станції до абонента) використовується OFDMA, яка дозволяє одночасно передавати дані багатьом користувачам, розподіляючи між ними частотні ресурси. У висхідному каналі (від абонента до базової станції) застосовується SC-FDMA. Ця технологія схожа на OFDMA, але має нижчий рівень пікової потужності сигналу. Завдяки цьому мобільні пристрої витрачають менше енергії, що збільшує час роботи від акумулятора та зменшує нагрівання обладнання.

Пропускна здатність каналу -один із ключових параметрів при проектуванні та оцінці ефективності мереж LTE -визначається теоремою Шеннона про пропускну здатність каналу з адитивним гауссівським шумом:

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (1.1)$$

де C -максимальна пропускна здатність каналу (біт/с), B -ширина смуги частот (Гц), SNR -відношення потужності сигналу до потужності шуму. Ця формула встановлює теоретичну верхню межу швидкості передачі, нижче якої можливе безпомилкове кодування при наявності достатньо потужних завадостійких кодів.

Приклад розрахунку: при $B = 10$ МГц та $SNR = 15$ (11,76 дБ):

$$C = 10 \times 10^6 \cdot \log_2(1 + 15) = 10 \times 10^6 \cdot \log_2(16) = 10 \times 10^6 \times 4 = 40 \text{ Мбіт/с}$$

Отримане значення 40 Мбіт/с демонструє теоретичну межу для даних умов. Реальна пропускна здатність у розгорнутих мережах становить зазвичай 50–70% від теоретичної через накладні витрати сигналізації, пілотні символи, надлишковість кодування та інші фактори, що враховуються при детальному мережевому плануванні.

Фізичний рівень LTE (Layer 1) є технологічно найскладнішим компонентом стандарту і відповідає за безпосередню передачу бітів через радіоканал із усіма його нестаціонарними характеристиками -замираннями, затримками розповсюдження, ефектом Доплера та адитивним шумом. Саме на фізичному рівні реалізуються основні механізми, що забезпечують унікальні характеристики LTE: OFDM-модуляція, MIMO-обробка, адаптивне кодування та модуляція, HARQ. Специфікація фізичного рівня LTE описана в документі 3GPP TS 36.211 [3]. і є результатом широкого промислового консенсусу та багаторічних досліджень у галузі цифрової обробки сигналів. В основі фізичного рівня LTE лежить технологія мультиплексування з ортогональним частотним поділом. OFDM-сигнал складається з багатьох ортогональних піднесучих частот, кожна з яких передає окремий символ за допомогою QAM-модуляції.

Фундаментальною властивістю OFDM, що забезпечує відсутність міжканальної інтерференції (ICI) між сусідніми піднесучими, є їхня математична ортогональність. Ортогональність означає, що незважаючи на перекриття спектрів сусідніх піднесучих, кожна піднесуча має нульовий вплив

на всі інші. Це дозволяє розташовувати піднесучі значно щільніше, ніж у класичних системах FDM із захисними інтервалами між каналами, і таким чином досягати значно вищої спектральної ефективності. Порушення ортогональності виникає при частотному зміщенні (Carrier Frequency Offset, CFO) через неточності синтезаторів частоти або ефект Доплера при швидкому русі абонента, що призводить до ICI – взаємних завадах між піднесучими в OFDM-системах. і потребує компенсації за допомогою алгоритмів синхронізації.

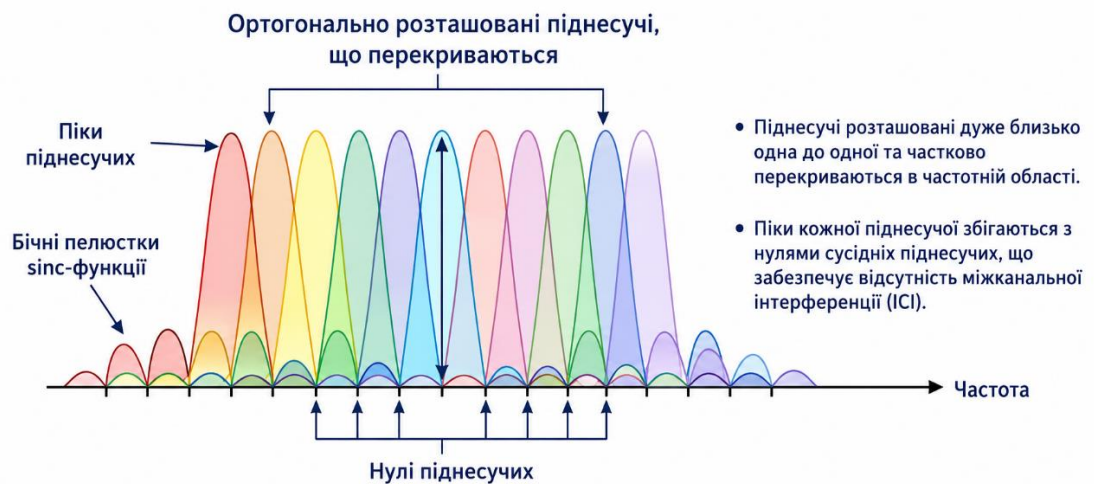


Рисунок 1.2 - Частотний спектр OFDM-сигналу

Ширина кожної піднесучої у стандарті LTE становить 15 кГц -результат ретельного компромісу між конкурентними вимогами. З одного боку, ширша піднесуча підвищує стійкість до ефекту Доплера (що актуально для швидкісних абонентів у транспортних засобах), але збільшує вразливість до міжсимвольної інтерференції. З іншого боку, вужча піднесуча знижує MCI (оскільки кожна піднесуча є вужчосмуговою і зазнає більш «плоского» замирання), але вимагає жорсткіших вимог до частотної синхронізації. Значення 15 кГц забезпечує оптимальний баланс для більшості сценаріїв розгортання. При смузі 10 МГц використовується 600 активних піднесучих (з 1024 позицій FFT), згрупованих у 50 ресурсних блоків по 12 піднесучих кожен. Решта позицій є захисними піднесучими на краях смуги та нульовою постійною складовою DC. Циклічний префікс (CP, Cyclic Prefix) є ключовим

елементом захисту від міжсимвольної інтерференції в OFDM. Перед кожним символом OFDM копіюється хвіст символу довжиною, що дорівнює тривалості CP, та вставляється на початок. На приймачі CP відкидається перед FFT-обробкою. Якщо максимальна затримка поширення сигналу (включаючи всі відбиття) не перевищує тривалість CP, міжсимвольна інтерференція повністю усувається. У LTE визначено два типи CP: нормальний (~4,7 мкс, що компенсує відбиття при різниці шляхів до 1,4 км) та розширений (~16,7 мкс для особливо несприятливих каналів із різницею шляхів до 5 км). Використання CP вносить часову надлишковість у сигнал, зменшуючи спектральну ефективність на 6–25%, однак це прийнятна «ціна» за суттєве спрощення приймача та стійкість до інтерференції [4].

1.3 Аналіз рівня сигналу та втрат під час поширення радіохвиль

Розрахунок рівня потужності прийнятого сигналу є основою побудови лінії зв'язку (link budget) і визначає можливу зону покриття кожної базової станції LTE. Точний енергетичний баланс дозволяє на стадії проектування визначити необхідну кількість базових станцій, їхню висоту підвісу антен та потужність передавачів для забезпечення необхідного рівня покриття та якості обслуговування. Основою для цих розрахунків є рівняння Фріса, що описує передачу потужності між двома антенами у вільному просторі:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot (\lambda / 4\pi R)^2 \quad (1.2)$$

де P_t -потужність передавача (Вт), G_t та G_r -коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен відповідно (лінійні одиниці), λ -довжина хвилі (м), R -відстань між антенами (м). Вираз $(\lambda/4\pi R)^2$ являє собою втрати у вільному просторі (Free Space Path Loss, FSPL), які зростають пропорційно квадрату відстані та квадрату частоти. Це пояснює, чому розгортання мереж у низькочастотних діапазонах (700–800 МГц) економічно вигідніше для забезпечення широкозонального покриття: одна базова станція 700 МГц покриває приблизно в 14 разів більшу площу порівняно зі станцією 2600 МГц за тих самих умов.

Приклад розрахунку для мережі LTE-1800. Нехай $P_t = 40 \text{ Вт} = 46 \text{ дБм}$, $G_t = 15 \text{ дБ}$ ($10^{15/10} \approx 31,6$ рази), $G_r = 0 \text{ дБ}$ ($= 1$), $f = 1800 \text{ МГц}$. Довжина хвилі:

$$\lambda = c/f = (3 \times 10^8) / (1,8 \times 10^9) = 0,167 \text{ м}$$

При відстані $R = 1 \text{ км}$ від базової станції до абонента:

$$P_r = 40 \times 31,6 \times (0,167 / (4\pi \times 1000))^2 \approx -85 \text{ дБм}$$

Отриманий рівень -85 дБм є типовим значенням на межі зони впевненого прийому в мережах LTE-1800 у відкритому просторі, де порогове значення RSRP (Reference Signal Received Power) для підтримки з'єднання становить $-110 \dots -120 \text{ дБм}$. Таким чином, при -85 дБм система має запас близько $25 \text{--} 35 \text{ дБ}$ відносно порогу прийому, що забезпечує надійний зв'язок у більшості умов поширення. Слід, однак, зазначити, що формула Фріса описує ідеальний канал вільного простору і не враховує втрати на проникнення в будівлі ($10 \text{--} 30 \text{ дБ}$), дифракцію на перешкодах ($5 \text{--} 15 \text{ дБ}$), швидкі та повільні замирання. Реальне планування мереж виконується з урахуванням статистичних моделей поширення (Okumura-Hata, COST-231, 3GPP TR 36.873) та вимагає врахування всіх цих факторів та корекційних коефіцієнтів.

Загальна формула лінії зв'язку (Link Budget) для мережі LTE записується у логарифмічній формі (дБ) та включає всі суттєві компоненти: потужність передавача, підсилення антен, втрати у фідерній лінії, втрати поширення, запас на замирання, коефіцієнт шуму приймача та чутливість приймача. Типове значення максимально допустимих втрат поширення (MAPL) для LTE-1800 становить $150 \text{--} 155 \text{ дБ}$, що при моделі поширення Okumura-Hata відповідає радіусу соти $1,5 \text{--} 3 \text{ км}$ у щільній міській забудові та $5 \text{--} 15 \text{ км}$ у сільській місцевості.

1.4 Методи підвищення завадостійкості мереж LTE

Адаптивна модуляція та кодування (AMC – Adaptive Modulation and Coding) є одним із основних механізмів підвищення ефективності та завадостійкості мереж LTE. Принцип роботи AMC полягає у виборі схеми модуляції та параметрів кодування відповідно до поточного стану радіоканалу. За сприятливих умов використовуються високоефективні схеми передачі

даних, а при погіршенні якості сигналу система переходить до більш завадостійких режимів роботи.

У мережах LTE застосовуються схеми модуляції QPSK, 16QAM та 64QAM, а в удосконалених версіях стандарту також 256QAM. Для використання 64QAM необхідний рівень SNR близько 18–20 дБ, тоді як для 16QAM достатньо 13–14 дБ. За подальшого зниження SNR система переходить до QPSK, що дозволяє підтримувати зв'язок навіть за несприятливих умов поширення сигналу. Вибір схеми модуляції здійснюється на основі показника CQI, який регулярно передається від абонентського обладнання до базової станції.

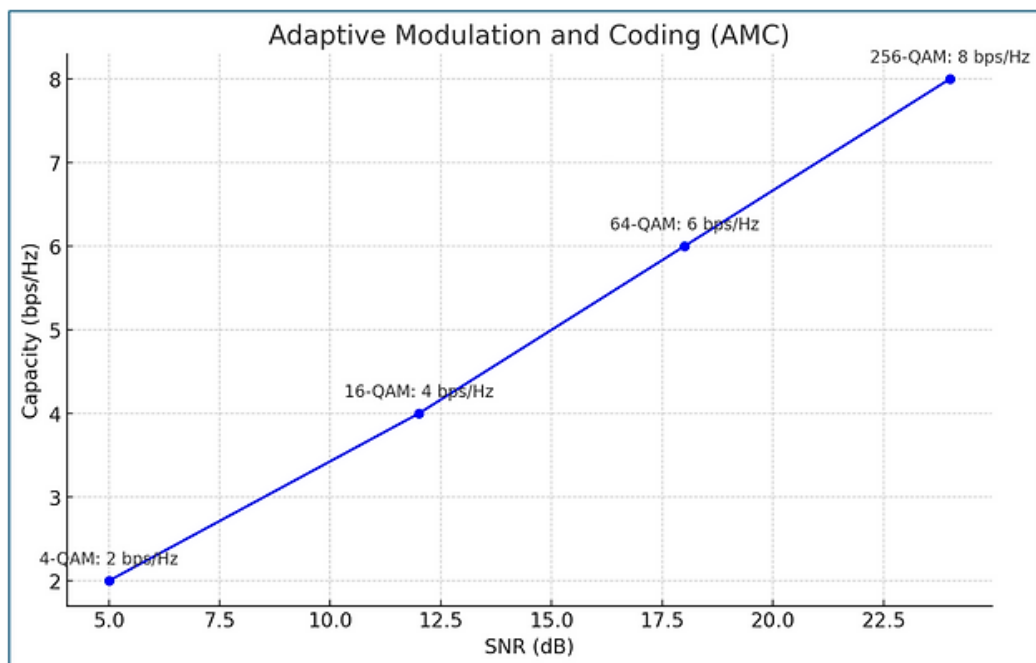


Рисунок 1.3 - Візуалізація схеми адаптивної модуляції

Важливу роль у забезпеченні надійності передачі даних відіграє механізм HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), який дозволяє повторно передавати помилково прийняті блоки даних. У випадку, якщо помилка не може бути усунута на фізичному рівні, додатковий контроль здійснюється механізмом ARQ рівня RLC. Спільне використання AMC, HARQ та ARQ забезпечує адаптацію системи до змін умов радіоканалу та підвищує стійкість мережі до впливу завад.

Завдяки поєднанню зазначених механізмів мережа LTE здатна ефективно працювати в широкому діапазоні значень SNR — від низьких рівнів сигналу, за яких використовується QPSK, до сприятливих умов із застосуванням високоефективних схем модуляції. Це дозволяє підтримувати необхідний рівень якості зв'язку та пропускну здатності навіть за наявності завад.

1.5 Оцінка параметрів радіоканалу та вплив завад

1.5.1 Вплив відношення сигнал/шум на якість зв'язку

Відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) є центральним параметром, що визначає якість радіозв'язку на всіх рівнях системи - від фізичного (BER, надійність демодуляції) до прикладного (якість потокового відео, чіткість голосового зв'язку, час відповіді застосунків). Глибоке розуміння кількісного зв'язку між SNR та різноманітними показниками якості є необхідною передумовою для інженерної оцінки впливу завад та розробки ефективних контрзаходів.

Ймовірність бітової помилки (Bit Error Rate, BER) є найбільш фундаментальним показником якості на рівні фізичного каналу і визначає частку помилково прийнятих бітів при передачі через зашумлений канал. Для модуляції QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) в ідеальному каналі AWGN (Additive White Gaussian Noise) теоретична крива BER описується формулою:

$$BER = Q(\sqrt{2 \cdot SNR}) \quad (1.3)$$

де $Q(x)$ - функція Гауса (функція помилок), що визначається як $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \cdot \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ і є монотонно спадною функцією свого аргументу. При SNR = 5 (7 дБ):

$$BER = Q(\sqrt{10}) \approx Q(3,16) \approx 7,8 \times 10^{-4}$$

Це означає, що статистично приблизно один із 1280 переданих бітів буде прийнятий помилково, що є цілком прийнятним рівнем для систем із завадостійким кодуванням, здатних виправляти 1–5% помилок. Проте нелінійна (експоненційна по суті) залежність BER від SNR означає, що навіть

незначне зниження SNR призводить до різкого зростання BER: при SNR = 2,5 (4 дБ) BER зростає до $\sim 10^{-2}$, тобто 1% бітів стають помилковими, а при SNR = 1 (0 дБ) BER наближається до 0,5 -практично всі біти помилкові, що рівнозначно відсутності корисного зв'язку.

Зниження SNR вдвічі (на 3 дБ) збільшує BER у десятки разів -цей факт підкреслює критичну важливість підтримання енергетичного балансу в мережі. Саме тому управління потужністю (Power Control) є невід'ємною функцією LTE: система постійно адаптує потужність висхідного каналу абонента (UE Uplink Power Control, описаний у [21]) та може коригувати потужність низхідного каналу базової станції, підтримуючи цільове значення SINR для кожного активного з'єднання. Алгоритми управління потужністю покликані досягати складного балансу: підвищення потужності покращує SNR для конкретного абонента, але одночасно посилює інтерференцію для сусідніх сот, тому оптимальна стратегія управління потужністю є задачею розподіленої оптимізації.

1.5.2 Технологія MIMO та підвищення ефективності радіоканалу

Важливою складовою енергетичного балансу є технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output), яка використовує кілька антен на передавачі та приймачі для підвищення ємності або надійності каналу. У режимі просторового мультиплексування (Spatial Multiplexing) MIMO 2×2 теоретично подвоює пропускну здатність без збільшення смуги або потужності, ефективно формуючи два незалежні просторові «потoki» (layers). MIMO 4×4 , передбачений у LTE-Advanced, дозволяє ще більш суттєво збільшити ємність в умовах достатнього роз'єднання просторових каналів. Крім того, формування діаграми спрямованості (beamforming) з використанням антенних решіток дозволяє концентрувати енергію сигналу у напрямку конкретного абонента, збільшуючи ефективний SNR на 3–10 дБ і розширюючи зону покриття або знижуючи необхідну потужність передавача.

1.5.3 Міжсотова інтерференція та показник SINR

Міжсотова інтерференція є найбільш суттєвим чинником, що погіршує якість зв'язку в мережах LTE із повним повторним використанням частот, і водночас є одним із найскладніших завдань при плануванні та оптимізації таких мереж. На відміну від теплового шуму, рівень якого є детермінованим і стабільним, міжсотова інтерференція є сигналоподібною завадою зі структурою, аналогічною до корисного сигналу, що унеможливорює її пригнічення простими методами фільтрації. Для кількісної оцінки якості радіоканалу в умовах одночасної присутності шуму та інтерференції від кількох джерел використовується узагальнений параметр SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio):

$$SINR = P_s / (P_i + N) \quad (1.4)$$

де P_s -потужність корисного сигналу від обслуговуючої базової станції, P_i -сумарна потужність інтерференційних сигналів від усіх сусідніх базових станцій, N -потужність теплового шуму приймача. SINR є єдиним параметром, що повністю характеризує режим роботи системи з точки зору можливої пропускної здатності та BER.

Для зменшення міжсотової інтерференції в мережах LTE застосовуються технології ICIC, eICIC та CoMP. Технологія ICIC забезпечує координацію використання радіоресурсів між сусідніми базовими станціями, що дозволяє знизити рівень взаємних завад. Розвитком цього підходу є eICIC, яка використовує спеціальні підкадри зі зниженою активністю передачі, надаючи можливість обслуговувати абонентів на межі соти з меншим рівнем інтерференції. Найбільш ефективним рішенням є технологія CoMP, за якої декілька базових станцій координують передачу сигналу одному абоненту, що дозволяє покращити якість зв'язку та підвищити значення SINR.

Рівень SINR у мережах LTE не є сталим і змінюється залежно від умов поширення сигналу та впливу інтерференції. У деяких випадках його значення може знижуватися до рівня, недостатнього для стабільного прийому даних, що призводить до погіршення якості зв'язку або короткочасних

розривів з'єднання. Для підтримання стабільної роботи мережі використовуються механізми хендвера, які забезпечують підключення абонента до базової станції з кращими параметрами радіоканалу.

1.5.4 Частотні завади в мережах LTE

Частотні завади являють собою клас електромагнітних перешкод, при яких спектр завадового сигналу повністю або частково перекривається із смугою частот корисного сигналу LTE. В умовах щільного частотного навантаження діапазонів мобільного зв'язку, характерного для сучасних міських середовищ, частотні завади є об'єктивним явищем, з яким стикаються всі оператори незалежно від якості проектування мережі.

В загальному вигляді спектр результуючого сигналу на вході приймача при одночасній присутності корисного сигналу та завади описується виразом:

$$S_{total}(f) = S_1(f) + S_2(f) \quad (1.5)$$

де $S_1(f)$ -спектральна щільність потужності корисного сигналу LTE, $S_2(f)$ -спектральна щільність потужності завади. Якщо в деякому частотному діапазоні Δf виконується $S_2(f) \neq 0$ при $S_1(f) \neq 0$, то в цьому діапазоні виникає адитивна інтерференція. Якщо потужність завади S_2 суттєво перевищує потужність корисного сигналу S_1 у перекритій частотній ділянці, відповідні піднесучі LTE стають непридатними для передачі даних і планувальник базової станції вимушений або не використовувати їх, або призначати їм найнижчий MCS.

Частотні завади у мережах LTE можна класифікувати за типом джерела та характером впливу. Суміжноканальна інтерференція (ACI -Adjacent Channel Interference) виникає тоді, коли поряд зі смугою LTE-оператора знаходиться смуга іншого оператора або технології, а рівень позасмугових випромінювань сусіднього сигналу недостатньо придушений. Стандарти 3GPP регламентують вимоги до рівня позасмугових випромінювань та вибіркової нечутливості приймачів, однак на практиці можуть виникати ситуації, коли ACI досягає значущих рівнів -особливо при розташуванні антен різних операторів на одному щоглі.

Гармонічні завади виникають через нелінійні ефекти у підсилювачах потужності та створюють гармоніки основного сигналу на кратних частотах. Якщо основна частота роботи потужного передавача (наприклад, телемовлення FM, цифрового радіо DAB або DVB-T) кратна робочій частоті LTE, відповідна гармоніка може потрапити безпосередньо в смугу LTE і стати суттєвою завадою. Аналогічно, продукти інтермодуляції від кількох одночасно активних передавачів у точках з'єднання антен і фідерів (пасивна інтермодуляція, PIM) можуть створювати відчутні рівні завад у смузі прийому eNodeB [4].

Промислові, наукові та медичні (ISM) пристрої, що працюють у нерегульованих смугах поблизу частотних діапазонів LTE (наприклад, мікрохвильові печі, що випромінюють в діапазоні 2,4–2,5 ГГц поруч із смугою LTE-2600), також можуть бути джерелами частотних завад. Оскільки вимоги до рівнів позасмугових випромінювань ISM-пристроїв менш жорсткі, ніж для ліцензованих систем зв'язку, їх вплив може бути суттєвим у певних частотних конфігураціях. Ефективне зменшення ефективного SNR внаслідок частотних завад проявляється через деградацію SINR, перехід планувальника на нижчі MCS та зниження ефективної пропускної здатності системи. Крім того, якщо завадові сигнали потрапляють у смугу синхронізаційних каналів (PSS/SSS) або каналу широкомовлення (BCH), це може ускладнити або унеможливити первинне підключення абонентів до мережі.

1.5.5 Вплив завад на спектральну ефективність та затримки

Спектральна ефективність (Spectral Efficiency, SE) є ключовим інтегральним показником ефективності використання частотного ресурсу в мережі LTE і відображає кількість бітів корисної інформації, що передається за одиницю часу в розрахунку на одиницю смуги частот. Цей показник має визначальне значення як з точки зору технічного проектування (дозволяє оцінити максимально досяжну ємність мережі), так і з економічної точки зору (визначає дохід оператора з одиниці виділеного спектра):

$$\eta = C / B \text{ [біт/с/Гц]} \quad (1.6)$$

При пропускній здатності ($C = 40$) Мбіт/с та смузі частот ($B = 10$) МГц спектральна ефективність становить ($\eta = 4$) біт/с/Гц. Для порівняння, теоретична межа Шеннона при ($\text{SNR} = 15$) дБ складає близько 5 біт/с/Гц, тобто наведений приклад відповідає приблизно 80 % максимально можливої ефективності. Використання сучасних технологій модуляції та багатоканальної передачі даних, таких як 64QAM і MIMO, дозволяє додатково підвищувати спектральну ефективність системи.

На практиці реальна спектральна ефективність мереж LTE є нижчою за теоретичні значення та зазвичай знаходиться в межах 1,5–2,5 біт/с/Гц. Це пояснюється впливом завад, нерівномірним розташуванням абонентів у межах соти, службовими витратами на передачу сигналізації та особливостями роботи протоколів мережі.

Залежність спектральної ефективності від SINR описується через зв'язок між SINR та досяжним індексом MCS (Modulation and Coding Scheme). Стандарт 3GPP визначає 28 значень MCS для LTE (від QPSK $R=1/8$ до 64QAM $R=5/6$), кожному з яких відповідає певний поріговий SINR та спектральна ефективність. При зменшенні SINR нижче 13–14 дБ система переходить від 64QAM (6 біт/символ) до 16QAM (4 біт/символ), нижче 8–9 дБ - до QPSK (2 біт/символ), а при $\text{SINR} < 2-3$ дБ обирається QPSK з мінімальною кодовою швидкістю. Кожен такий перехід знижує ефективну спектральну ефективність відповідно до характеристик нового MCS. Статистична модель спектральної ефективності по соті будується на основі розподілу SINR серед усіх абонентів. При рівномірному розподілі абонентів по площі соти та статистичній моделі замирань розподіл SINR є широким - від -5 до +25 дБ. Абоненти поблизу базової станції (20–30% від радіусу) мають SINR 20–30 дБ і використовують 64QAM, тоді як абоненти на межі соти (60–80% від радіусу) мають SINR 0–10 дБ і змушені використовувати QPSK. Загальна середня спектральна ефективність по соті визначається усередненням по всіх абонентах і є типовою характеристикою при оцінці ємності мережі при плануванні.

Вплив завад на спектральну ефективність можна охарактеризувати як зрушення розподілу SINR ліворуч на величину, пропорційну рівню завади. Якщо до введення завади середнє SINR по соті становило 10 дБ (що відповідає $\eta \approx 3\text{--}3,5$ біт/с/Гц), то при введенні шумової завади рівня -90 дБм середнє SINR зменшується до 4–5 дБ і η падає до 1,5–2 біт/с/Гц, тобто на 40–50%. При потужнішій заваді зниження пропускної здатності мережі може бути катастрофічним.

Затримка (latency) є одним із ключових параметрів якості обслуговування (QoS) у мережах LTE, що визначає придатність мережі для застосувань реального часу -голосового зв'язку (VoLTE), відеоконференцій, онлайн-ігор та критичних M2M-застосувань. LTE спочатку проектувалась із суворими вимогами до затримки: цільове значення «round-trip time» (RTT) між UE та eNodeB не перевищує 5 мс для порожньої черги у звичайних умовах. Однак у присутності завад та при деградованих умовах каналу реальна затримка може на порядок перевищувати цільове значення.

Основний компонент затримки, що залежить від умов каналу - час передачі пакету через радіоканал - визначається через відношення розміру пакету до поточної ефективної пропускної здатності:

$$T = L / C \quad (1.7)$$

де L -розмір пакету (біт), C -поточна ефективна пропускна здатність (біт/с). При $L = 1$ Мбіт та $C = 40$ Мбіт/с:

$$T = 1 \times 10^6 / (40 \times 10^6) = 0,025 \text{ с} = 25 \text{ мс}$$

При деградації пропускної здатності до $C = 10$ Мбіт/с внаслідок перемикавання на нижчі MCS через завади:

$$T = 1 \times 10^6 / (10 \times 10^6) = 0,1 \text{ с} = 100 \text{ мс}$$

Чотириразове збільшення затримки з 25 мс до 100 мс виводить мережу за межі допустимого для VoIP та є неприйнятним для інтерактивних додатків. Слід підкреслити, що 25 мс та 100 мс є лише компонентами затримки радіоканалу; повна наскрізна затримка включає також час обробки в eNodeB (≈ 1 мс), затримку в EPC (2–5 мс) та мережу доступу до сервера.

Додатковим механізмом збільшення затримки при завадах є активація HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) -протоколу гарантованої доставки на фізичному рівні LTE. При підвищеному BER внаслідок деградації SINR зростає ймовірність помилкового прийому блоку даних (BLER -Block Error Rate), що ініціює повторну передачу через HARQ. LTE підтримує до 8 раундів HARQ з використанням Chase Combining або Incremental Redundancy; кожен раунд займає 8 мс ($4 \text{ мс RTT} \times 2$), тому при 4–5 HARQ-раундах затримка зростає на 32–40 мс лише за рахунок HARQ. При одночасній активності HARQ та ARQ на рівні RLC (Radio Link Control) загальна затримка може сягати 100–200 мс.

Комплексна затримка у мережі LTE при наявності завад може бути оцінена як сума всіх компонентів: $T_{\text{total}} = T_{\text{radio}} + T_{\text{HARQ}} + T_{\text{queuing}} + T_{\text{core}}$. В умовах інтенсивних завад всі ці компоненти можуть зростати одночасно, призводячи до сукупної наскрізної затримки в сотні мілісекунд або навіть кілька секунд -що є неприйнятним для будь-яких застосувань реального часу і може означати фактичну недоступність мережевих сервісів для кінцевого користувача.

Висновки до розділу

Кількісні залежності між SINR та показниками якості, розглянуті в даному розділі, можуть бути узагальнені наступним чином. При SINR від 20 до 30 дБ система функціонує в оптимальному режимі 64QAM. При SINR від 10 до 20 дБ система переходить до 16QAM, пропускна здатність знижується на 30–50% від пікової, але якість сервісів залишається прийнятною. При SINR від 0 до 10 дБ система використовує QPSK, пропускна здатність складає 20–40% від пікової, затримки збільшуються через активний HARQ, якість голосових та відеосервісів помітно погіршується. При SINR від –5 до 0 дБ система працює на мінімальних MCS, пропускна здатність падає до 5–10% від пікової, зв'язок нестабільний. При $\text{SINR} < -5$ дБ надійна передача даних неможлива, з'єднання переривається.

Аналіз показує, що функціонування мережі LTE критично залежить від підтримання SINR вище певних порогових значень на кожному абонентському терміналі. Ці порогові значення визначаються обраним MCS і встановлюють динамічний «коридор» роботи системи. Слід підкреслити, що навіть помірна завада, що зсуває середнє SINR по соті на 3–5 дБ, може призвести до значного погіршення ємності мережі - на 20–40%.

Результати аналізу, представлені в минулому розділі, формують теоретичну основу для подальшого дослідження методів виявлення та нейтралізації джерел завад у мережах LTE, розглянутих у наступних розділах дипломної роботи. Системне розуміння фізичних механізмів деградації є необхідною передумовою для розробки ефективних алгоритмів моніторингу якості радіоінтерфейсу та адаптивного управління ресурсами мережі в умовах несприятливої електромагнітної обстановки.

Проведений аналіз також підкреслює важливість комплексного підходу до забезпечення стійкості мереж LTE: жодна окрема технологія (HARQ, AMC, MIMO, ICIC) не може забезпечити повної стійкості до навмисних завад, однак їх спільне застосування разом із механізмами виявлення та локалізації завадників формує ефективну багаторівневу систему захисту, здатну функціонувати в умовах складного радіоелектронного середовища. Ця концепція є основою для розробки захищених рішень LTE для критичних інфраструктур та систем безпеки.

РОЗДІЛ 2 ІСНУЮЧІ МЕТОДИ ПРОТИДІЇ ЗАВАДАМ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Класифікація методів протидії завадам

Безпроводові телекомунікаційні мережі стандарту LTE функціонують у складному електромагнітному середовищі, де корисний сигнал постійно зазнає впливу різноманітних завадових чинників -від теплового шуму приймача та міжсотової інтерференції до навмисного радіоелектронного придушення. Задача забезпечення стійкого зв'язку за таких умов є однією з ключових інженерних проблем, вирішення якої вимагає системного підходу та залучення механізмів захисту на всіх рівнях архітектури мережі -від фізичного до мережевого. Стандарт 3GPP Release 8 і наступні релізи, що регламентують LTE та LTE-Advanced, містять широкий комплекс технічних рішень, спеціально розроблених для забезпечення завадостійкості в умовах реального розгортання. Методи протидії завадам у мережах LTE систематизуються відповідно до рівня архітектурної моделі OSI/3GPP, на якому вони реалізуються. На фізичному рівні застосовуються технології OFDM із циклічним префіксом, MIMO, адаптивна модуляція та кодування (AMC), механізм HARQ і алгоритми пригнічення інтерференції (IRC). На каналному рівні (MAC/RLC) задіяні планувальники ресурсів з адаптивним призначенням ресурсних блоків, протоколи ARQ та реконфігурація параметрів каналу. На мережевому рівні (RRC/NAS) функціонують механізми хендовера, координація між сотами (ICIC, CoMP), а також засоби ідентифікації та локалізації джерел завад. Ієрархічна класифікація методів захисту відображена на рис. 2.1, що наочно демонструє багаторівневність архітектури завадозахисту в LTE.

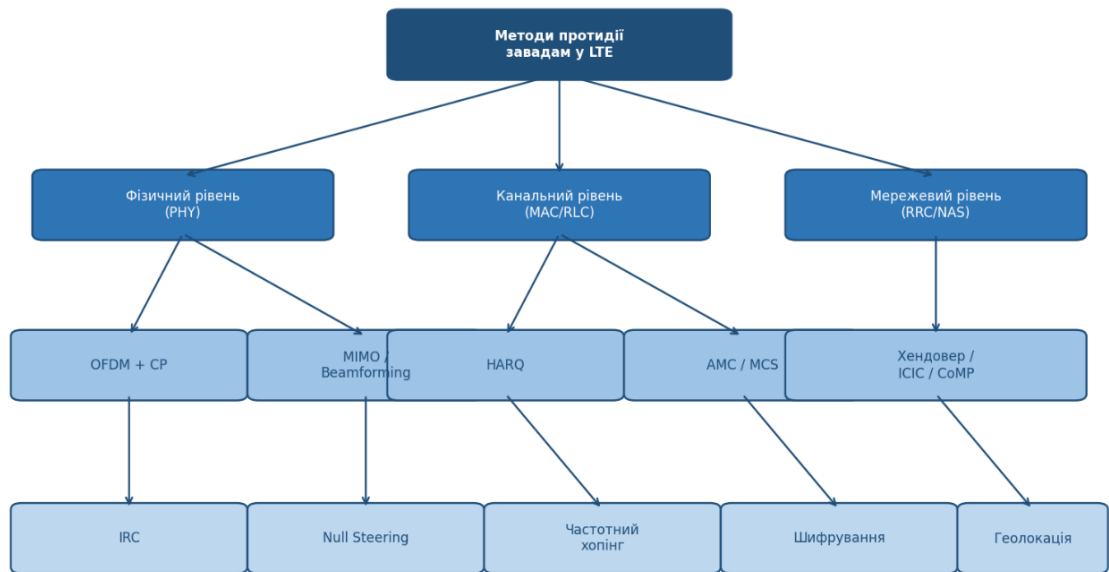


Рисунок 2.1 - Класифікація методів протидії завадам у мережах LTE

Ефективність будь-якого методу захисту визначається його здатністю підтримувати відношення SINR вище порогового значення для поточної схеми модуляції та кодування. Як показано в розділі 1, мінімальний SINR для QPSK $R=1/8$ становить близько -5...-6 дБ, для 16QAM -8-9 дБ, для 64QAM -18-20 дБ. Таким чином, кожен метод захисту характеризується ефективним виграшем у SINR, на який він здатен підвищити якість прийому порівняно з незахищеною системою. Комплексне застосування кількох методів дозволяє підсумовувати ці виграші, досягаючи сукупного захисту від 10 до 30+ дБ залежно від конкретної конфігурації [7].

2.2 Методи фізичного рівня захисту від завад

Технологія OFDM, застосована на фізичному рівні LTE, є першим і найбільш фундаментальним рівнем захисту від завад, пов'язаних із мультипроменевим поширенням. Принципова перевага OFDM над одночастотними системами полягає в тому, що смуга пропускання каналу розбивається на N вузьких піднесучих, кожна з яких є плоскочастотною і зазнає простого рівномірного замирання. Це принципово спрощує реалізацію

каналу: замість часового N-відводного фільтра потрібен лише один комплексний коефіцієнт на кожну піднесучу, що обчислюється з одного пілотного символу RS. Завдяки цьому OFDM-приймач значно простіший у реалізації, ніж RAKE-приймач систем UMTS, і природно стійкий до частотно-вибіркових замирань -найпоширенішого виду деградації в міському середовищі.

Циклічний префікс (CP) захищає систему OFDM від міжсимвольної інтерференції (ISI), що виникає через різницю часів поширення між прямим і відбитими сигналами. Нормальний CP тривалістю 4,69 мкс нейтралізує ефект відбиттів із різницею шляхів до 1,4 км -що відповідає типовому міському середовищу за стандартною моделлю EVA (Extended Vehicular A). Розширений CP (16,67 мкс) застосовується у спеціальних сценаріях і захищає від відбиттів з різницею шляхів до 5 км (модель ETU -Extended Typical Urban). Ціна захисту -зниження спектральної ефективності на 6,25% (нормальний CP) або до 20% (розширений CP), що є прийнятним компромісом з огляду на практичну відсутність ISI у переважній більшості сценаріїв розгортання LTE. Адаптивна модуляція та кодування (AMC -Adaptive Modulation and Coding) реалізує принцип оперативного пристосування схеми передачі до поточного стану каналу. Стандарт LTE підтримує 28 індексів MCS (Modulation and Coding Scheme): від QPSK з кодовою швидкістю $R = 1/8$ (MCS 0, поріг SINR близько -6 дБ) до 64QAM з $R = 5/6$ (MCS 27, поріг SINR близько 20 дБ). Абонентський термінал безперервно вимірює якість каналу через опорні символи DMRS/CSI-RS і передає показник CQI (Channel Quality Indicator) на базову станцію із затримкою 4-8 мс -достатньою для відстеження змін каналу при швидкості руху до 120 км/год. Планувальник eNodeB обирає оптимальний MCS, балансуючи між максимальною пропускну здатністю та цільовим рівнем BLER не вище 10% .

Залежність імовірності бітової помилки (BER) від відношення E_b/N_0 для різних схем модуляції наведена на рис. 2.2. Ця залежність є теоретичною нижньою межею для ідеального каналу AWGN без замирань і служить

еталоном при оцінці реальної ефективності приймача. Аналіз рисунку свідчить, що QPSK забезпечує $BER = 10^{-3}$ при E_b/N_0 близько 7 дБ, тоді як 64QAM потребує E_b/N_0 близько 18 дБ для того ж рівня BER. Суттєво, що при деградації SINR нижче порогового значення BER різко зростає внаслідок нелінійного характеру залежності. Саме цей ефект обумовлює необхідність AMC: виявивши зниження CQI, планувальник обирає нижчий MCS і тим самим превентивно підвищує стійкість до завад без збільшення потужності передавача.

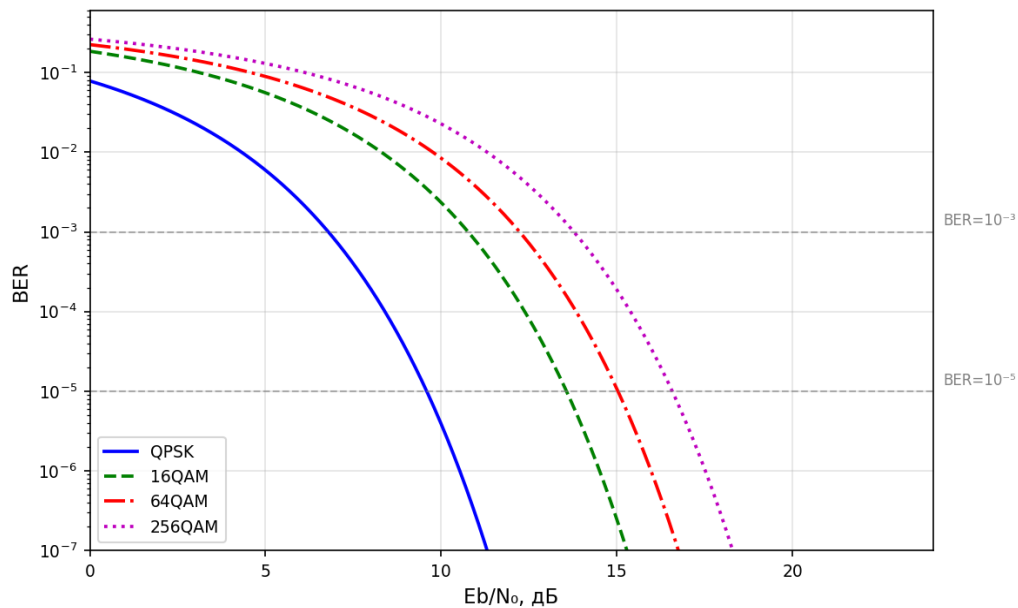


Рисунок 2.2 - Залежність BER від E_b/N_0 для схем модуляції LTE

2.3 Використання технології MIMO для протидії завадам

Технологія множинного входу -множинного виходу (MIMO -Multiple Input Multiple Output) є найбільш потужним методом фізичного рівня для боротьби з просторово-корельованими завадами, включаючи навмисне радіоелектронне придушення. MIMO реалізує кілька принципово різних режимів роботи залежно від умов каналу та мети застосування. У режимі просторового різноманіття (Transmit Diversity, Alamouti SFBC) підвищується надійність прийому за рахунок некорельованих замирань на різних антенах. У режимі просторового мультиплексування (Spatial Multiplexing) збільшується пропускна здатність завдяки передачі кількох незалежних потоків даних. У

режимі формування діаграми спрямованості (Beamforming) здійснюється просторова фільтрація -концентрація потужності у напрямку корисного сигналу та пригнічення у напрямку завади [8].

Формування нулів у діаграмі спрямованості (Null Steering) є найбільш ефективним засобом протидії навмисним спрямованим завадам. При відомому напрямку завади алгоритм Null Steering налаштовує вагові коефіцієнти антенної решітки таким чином, що діаграма спрямованості має нульове значення у напрямку завадника. Залежність просторового виграшу від кількості антенних елементів наведена на рис. 2.3. Для решітки з $N = 64$ антенними елементами (Massive MIMO) досягається виграш beamforming близько 18 дБ і глибина нуля понад 30 дБ -що є достатнім для ефективного пригнічення переважної більшості навмисних завад із JSR до 25-28 дБ. При $N = 128$ елементів (відповідає сучасним базовим станціям 5G NR з підтримкою LTE) досягнення просторового виграшу 21 дБ і глибини нуля 37 дБ дозволяє протистояти навмисним завадам промислового рівня.

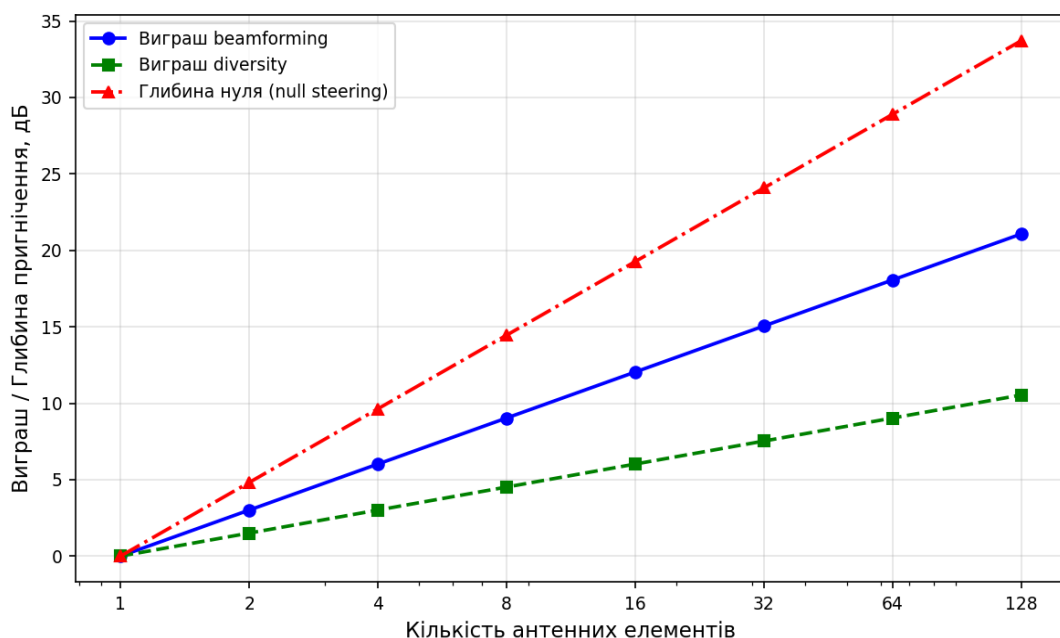


Рисунок 2.3 - Просторовий виграш від кількості антенних елементів (лінійна решітка ULA, теоретичні оцінки)

2.4 Алгоритми пригнічення інтерференції

Алгоритм пригнічення інтерференції IRC (Interference Rejection Combining) використовується на приймальній стороні базової станції LTE для зменшення впливу шумів і завад. Він є удосконаленням методу MRC (Maximum Ratio Combining), оскільки враховує не лише рівень корисного сигналу, а й характеристики інтерференції. Завдяки цьому IRC забезпечує кращу якість прийому та дозволяє підвищити значення SINR у середньому на 3–8 дБ порівняно з MRC.

Для багатоканальних систем MIMO також використовується алгоритм MMSE (Minimum Mean Square Error), який забезпечує більш точне відновлення переданих даних у присутності шумів та завад. Поєднання методів IRC та MMSE дозволяє ефективніше пригнічувати інтерференцію та підвищувати надійність передачі інформації. Саме тому алгоритми MMSE-IRC широко застосовуються в сучасних мережах LTE.

Ефективність роботи цих алгоритмів залежить від точності оцінки параметрів радіоканалу та рівня інтерференції. У випадках, коли характеристики завад швидко змінюються, ефективність IRC може знижуватися. Незважаючи на це, алгоритми IRC та MMSE залишаються важливими засобами підвищення завадостійкості мереж LTE та забезпечення стабільної якості зв'язку.

2.5 Координація міжсотової інтерференції

Технологія координації міжсотової інтерференції ICIC (Inter-Cell Interference Coordination) є одним із основних механізмів LTE, призначених для зменшення взаємного впливу сусідніх базових станцій. Оскільки всі соти мережі часто використовують однаковий частотний ресурс, на межах покриття виникають завади, які погіршують якість зв'язку та знижують швидкість передачі даних. Для вирішення цієї проблеми базові станції обмінюються інформацією через інтерфейс X2 та узгоджують використання ресурсних блоків. Завдяки цьому абоненти, які знаходяться на краю соти, отримують

кращі умови прийому сигналу та менше страждають від інтерференції сусідніх базових станцій.

Подальшим розвитком цієї технології стала eICIC (Enhanced ICIC), яка була впроваджена в новіших версіях стандарту LTE. Її особливістю є використання майже порожніх підкадрів ABS (Almost Blank Subframes). У такі моменти одна базова станція значно зменшує свою активність, що дозволяє сусіднім станціям передавати дані з меншим рівнем завад. Це особливо важливо в мережах із високою щільністю розміщення базових станцій, де проблема міжсотової інтерференції проявляється найсильніше.

Найбільш досконалим методом координації є технологія CoMP (Coordinated Multi-Point). Її принцип полягає в тому, що декілька базових станцій одночасно беруть участь у передачі або прийомі сигналу для одного абонента. Завдяки цьому сигнал від різних станцій може підсилюватися, а негативний вплив інтерференції суттєво зменшується. Особливо ефективною ця технологія є для абонентів, які знаходяться на межі між кількома сотами.

Зазначені механізми насамперед призначені для боротьби з природними та міжсотовими завадами, що виникають під час роботи мережі. Для протидії навмисним радіоелектронним завадам вони мають обмежене застосування. Проте за наявності інформації про розташування джерела завад технологія CoMP може використовуватися для покращення якості прийому корисного сигналу та часткової компенсації впливу зовнішньої інтерференції. Тому ICIC, eICIC та CoMP є важливими інструментами підвищення завадостійкості мереж LTE та забезпечення стабільного зв'язку в складних умовах роботи радіомережі.

2.6 Методи протидії навмисним завадам

Навмисні завади є однією з найбільш небезпечних загроз для безпроводових телекомунікаційних мереж, оскільки їхні параметри можуть спеціально підбиратися для максимального погіршення роботи системи

зв'язку. Для зменшення впливу таких завад у мережах LTE застосовується комплекс технічних та програмних засобів.

Одним із найбільш ефективних методів є просторова обробка сигналів із використанням технології MIMO. Завдяки формуванню діаграми спрямованості антенної системи можна посилювати корисний сигнал та зменшувати вплив сигналів, що надходять із напрямку джерела завад. Це дозволяє покращити якість прийому без збільшення потужності передавання.

Для боротьби з вузькосмуговими завадами застосовується динамічний розподіл ресурсних блоків. У разі виявлення ділянок спектра з підвищеним рівнем інтерференції система може перенаправляти передачу даних на менш зашумлені частотні ресурси. Такий підхід дозволяє підтримувати стабільну роботу мережі навіть за наявності локальних джерел завад.

Важливим етапом протидії є також виявлення джерел інтерференції. Для цього аналізуються основні показники роботи мережі, зокрема рівень помилок передачі, кількість повторних передач та зміни параметрів модуляції. У разі виявлення аномальних відхилень можуть виконуватися додаткові вимірювання радіосигналів для визначення місця розташування джерела завад та вжиття відповідних заходів.

Додатковий рівень захисту забезпечують механізми автентифікації та шифрування, які використовуються в мережах LTE. Вони ускладнюють реалізацію атак, пов'язаних із підrobкою мережевих елементів або несанкціонованим втручанням у процес обміну даними.

Таким чином, ефективна протидія навмисним завадам досягається шляхом комплексного використання технологій просторової обробки сигналів, адаптивного розподілу радіоресурсів, моніторингу параметрів мережі та механізмів інформаційної безпеки.

2.7 Аналіз ефективності існуючих методів

Оцінка ефективності методів протидії завадам є важливим етапом під час проєктування та оптимізації мереж LTE. На рис. 2.4 наведено порівняння

впливу різних методів захисту на якість зв'язку в умовах зростання рівня завад. Аналіз показує, що без використання спеціальних механізмів захисту якість зв'язку швидко погіршується зі збільшенням інтенсивності інтерференції. Застосування адаптивної модуляції та кодування (AMC) дозволяє частково компенсувати вплив завад за рахунок переходу до більш завадостійких режимів роботи. Додаткове використання механізму HARQ підвищує надійність передачі даних завдяки повторній передачі пошкоджених блоків інформації.

Одним із найбільш ефективних способів підвищення завадостійкості є використання технології MIMO. Застосування декількох антен дозволяє покращити якість прийому сигналу та зменшити вплив інтерференції. Подальше підвищення ефективності досягається завдяки технологіям beamforming та просторової обробки сигналів, які забезпечують концентрацію енергії сигналу в напрямку абонента та зменшують вплив завад.

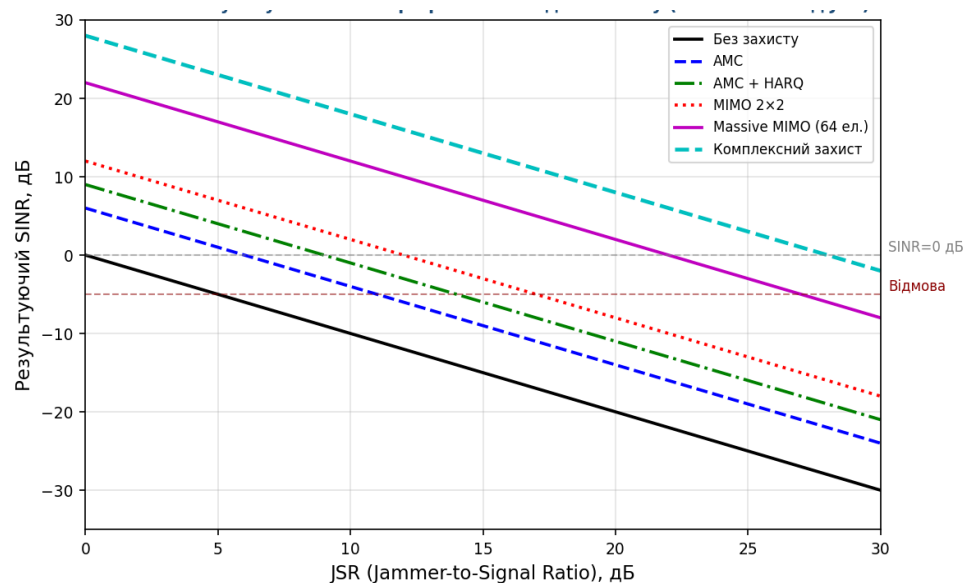


Рисунок 2.4 - Просторовий вигравш від кількості антенних елементів

Рис. 2.4 демонструє, що найбільший ефект забезпечує комплексне використання декількох механізмів одночасно. Поєднання технологій MIMO, HARQ та методів координації міжсотової інтерференції дозволяє підтримувати прийнятний рівень якості зв'язку навіть в умовах значного рівня завад.

У сучасних мережах LTE захист від інтерференції реалізується переважно за рахунок стандартних механізмів, передбачених специфікаціями

3GPP. До них належать технології MIMO, адаптивна модуляція та кодування, HARQ, а також алгоритми ICIC і eICIC для зменшення міжсотової інтерференції. Крім того, під час планування мережі виконуються налаштування параметрів базових станцій, зокрема потужності передавання, висоти встановлення антен та їх діаграм спрямованості.

Для мереж спеціального призначення, де потрібна підвищена стійкість до завад, можуть додатково застосовуватися системи адаптивного формування променя, засоби моніторингу радіоефіру та резервування каналів зв'язку. Вибір конкретного набору засобів захисту залежить від умов експлуатації мережі, рівня потенційних загроз та технічних вимог до системи зв'язку [10].

Висновки до розділу

У даному розділі проведено аналіз існуючих методів протидії завадам у безпроводових телекомунікаційних мережах стандарту LTE. Розглянуто основні механізми підвищення завадостійкості, які реалізуються на фізичному, каналному та мережевому рівнях системи. До них належать технології OFDM із циклічним префіксом, адаптивна модуляція та кодування механізм повторних передач HARQ, технологія MIMO, а також методи координації міжсотової інтерференції ICIC та eICIC.

У результаті аналізу встановлено, що адаптивна модуляція та кодування дозволяє ефективно використовувати ресурси радіоканалу залежно від поточних умов поширення сигналу, а механізм HARQ підвищує надійність передачі даних завдяки повторній передачі помилково прийнятих блоків. Застосування технології MIMO та алгоритмів просторової обробки сигналів сприяє покращенню якості прийому та підвищенню спектральної ефективності системи. У свою чергу, механізми ICIC та eICIC забезпечують зниження рівня міжсотової інтерференції та покращують умови обслуговування абонентів на межах зон покриття.

Проведений аналіз показав, що найбільша ефективність досягається при комплексному використанні декількох механізмів захисту. Зокрема,

застосування HARQ забезпечує додатковий виграш близько 9–12 дБ, а використання технологій MIMO та просторової обробки сигналів дозволяє суттєво підвищити рівень SINR і покращити якість функціонування мережі в умовах інтерференції.

Разом із тим встановлено, що жоден із розглянутих методів не є універсальним і не забезпечує повного усунення впливу завад. Тому подальше підвищення завадостійкості мереж LTE потребує вдосконалення алгоритмів керування радіоресурсами, оптимізації параметрів передавання та комплексного використання сучасних технологій протидії завадам.

РОЗДІЛ 3 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ РОБОТИ

3.1 Мережа LTE: принципи формування, частотні діапазони та структура передавання пакетів

Формування радіоінтерфейсу LTE базується на використанні технологій OFDMA у низхідному каналі та SC-FDMA у висхідному. Застосування цих технологій забезпечує ефективне використання частотного ресурсу та підтримку високих швидкостей передавання даних.

У мережах LTE радіоресурси розподіляються у вигляді ресурсних блоків (Resource Blocks, RB), які є мінімальною одиницею виділення частотного ресурсу користувачам. Один ресурсний блок займає смугу 180 кГц і використовується планувальником базової станції для організації передачі даних між мережею та абонентами.

Кількість доступних ресурсних блоків безпосередньо залежить від ширини каналу. Зі збільшенням ширини смуги частот зростає кількість доступних ресурсів і, відповідно, потенційна пропускна здатність системи. Залежність між шириною каналу та кількістю ресурсних блоків наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Залежність кількості ресурсних блоків від ширини каналу LTE

Ширина каналу, МГц	Кількість ресурсних блоків (RB)	Максимальна кількість піднесучих
1,4	6	72
3	15	180
5	25	300
10	50	600
15	75	900
20	100	1200

Примітка: таблиця створена на основі джерел [11-14]

Як видно з таблиці 3.1, збільшення ширини каналу призводить до збільшення кількості доступних ресурсних блоків, а отже і до зростання потенційної пропускної здатності мережі. Наприклад, для каналу шириною

10 МГц використовується 50 ресурсних блоків, тоді як для каналу 20 МГц їх кількість збільшується до 100.

Однак реальна швидкість передавання даних визначається не лише шириною каналу. На неї також впливають схема модуляції, швидкість кодування, конфігурація MIMO та якість радіоканалу. За сприятливих умов можуть використовуватися високоефективні схеми модуляції, що забезпечують більшу пропускну здатність системи.

Наприклад, при ширині каналу 20 МГц, використанні 100 ресурсних блоків та технології MIMO 2×2 теоретична швидкість передавання даних у низхідному каналі може перевищувати 100 Мбіт/с. На практиці це значення є меншим через наявність службової інформації, пілотних сигналів та вплив завад у радіоканалі.

Таким чином, ширина каналу є одним із ключових параметрів, що визначають продуктивність мережі LTE. Саме тому під час проєктування мережі оператор повинен враховувати доступний частотний ресурс, очікуване навантаження та вимоги до якості обслуговування користувачів.

Частотні діапазони LTE визначаються специфікаціями 3GPP та можуть працювати в режимах FDD (Frequency Division Duplex) і TDD (Time Division Duplex). У режимі FDD для передачі даних у висхідному та низхідному напрямках використовуються різні частоти, тоді як у режимі TDD передача здійснюється в одному частотному діапазоні з часовим розділенням напрямків передачі.

Вибір частотного діапазону суттєво впливає на характеристики мережі. Нижчі частоти (700–900 МГц) забезпечують більший радіус покриття та краще проникнення сигналу всередину будівель. Вищі частоти (1800–2600 МГц) дозволяють забезпечити більшу пропускну здатність мережі, однак потребують більшої щільності розміщення базових станцій.

Основні частотні діапазони LTE та їх характеристики наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Основні частотні діапазони LTE та їх характеристики

Діапазон	Частота, МГц	Тип дуплексу	Типове застосування
Band 20	800	FDD	Сільська місцевість, широке покриття
Band 3	1800	FDD	Міські мережі, середня щільність
Band 7	2600	FDD	Висока щільність абонентів
Band 38	2600	TDD	Локальні мережі, гнучкий розподіл ресурсу

Примітка: таблиця створена на основі джерел [15-17]

Інформація, наведена в таблиці 3.2, демонструє, що вибір частотного діапазону безпосередньо впливає на характеристики мережі та особливості її розгортання. Нижчі частоти (700–900 МГц) забезпечують більший радіус покриття та краще проникнення сигналу всередину будівель, тому переважно використовуються для покриття великих територій і сільської місцевості. Типовий радіус дії таких базових станцій може досягати кількох десятків кілометрів.

Частоти середнього діапазону (1800–2100 МГц) забезпечують компроміс між площею покриття та пропускною здатністю мережі, тому широко використовуються в міських і приміських районах. Саме діапазон 1800 МГц є одним із найпоширеніших для мереж LTE та використовується в даній роботі для проведення подальших розрахунків.

Вищі частоти (2600 МГц і вище) дозволяють забезпечити більшу пропускну здатність та обслуговувати значну кількість абонентів одночасно, однак мають менший радіус покриття і потребують більшої кількості базових станцій. Тому такі діапазони переважно використовуються в районах із високою щільністю користувачів та значним обсягом трафіку.

Таким чином, вибір частотного діапазону є важливим фактором, який впливає на покриття, пропускну здатність та рівень інтерференції в мережі. Для подальшого аналізу впливу завад доцільно використовувати діапазон 1800 МГц як найбільш характерний для сучасних мереж LTE.

Структура радіокадру LTE є основою часової організації передачі даних у мережі. Один радіокадр має тривалість 10 мс і складається з 10 субкадрів

тривалістю по 1 мс. Кожен субкадр, у свою чергу, містить два часові слоти по 0,5 мс.

Така структура забезпечує синхронізацію роботи мережі та дозволяє гнучко розподіляти радіоресурси між абонентами залежно від поточних умов радіоканалу. Мінімальним інтервалом планування в LTE є субкадр тривалістю 1 мс, що дає змогу оперативно реагувати на зміни рівня сигналу та інтерференції.

При використанні нормального циклічного префіксу кожен слот містить 7 OFDM-символів, а при використанні розширеного циклічного префіксу - 6 символів. Основні параметри структури радіокадру наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Структура радіокадру LTE

Параметр	Значення
Тривалість радіокадру	10 мс
Кількість субкадрів	10
Тривалість субкадру	1 мс
Кількість слотів у субкадрі	2
Тривалість слота	0,5 мс

Наведена у таблиці 3.3 структура визначає часову організацію передачі даних у мережі LTE та забезпечує узгоджену роботу всіх елементів системи. У межах радіокадру здійснюється передача як користувацьких даних, так і службової інформації, необхідної для синхронізації, керування ресурсами та підтримання з'єднання між базовою станцією та абонентськими пристроями.

Розподіл ресурсів між користувачами виконується динамічно залежно від умов радіоканалу та поточного навантаження мережі. Кількість переданих даних визначається шириною каналу, кількістю виділених ресурсних блоків, схемою модуляції та параметрами кодування. Саме ці параметри безпосередньо впливають на пропускну здатність системи та будуть використані під час подальшого аналізу впливу завад на роботу мережі LTE.

Передавання даних у мережі LTE здійснюється за допомогою багаторівневої протокольної архітектури, яка включає рівні PDCP, RLC, MAC та PHY. Кожен рівень виконує власні функції, пов'язані з обробкою, передачею та захистом даних.

Рівні протоколів забезпечують шифрування інформації, контроль помилок, розподіл радіоресурсів і безпосередню передачу сигналів через радіоканал. Узгоджена робота цих рівнів дозволяє підтримувати надійний зв'язок навіть в умовах впливу шумів та інтерференції.

Таблиця 3.4 Протокольна структура передавання пакетів у мережі LTE

Рівень	Основні функції	Вплив на якість передачі
PDCP	Шифрування, стиснення заголовків	Підвищення безпеки та ефективності
RLC	Сегментація, контроль помилок	Зменшення втрат даних
MAC	Розподіл ресурсів, мультиплексування	Оптимізація пропускної здатності
PHY	Кодування, модуляція, формування сигналу	Стійкість до завад

Примітка: таблиця створена на основі джерел [17-18]

Як видно з таблиці 3.4, кожен рівень протокового стеку LTE виконує власні функції, спрямовані на забезпечення надійної передачі даних через радіоканал. Спільна робота рівнів PDCP, RLC, MAC та PHY дозволяє реалізувати механізми контролю помилок, розподілу радіоресурсів, адаптації параметрів передачі та захисту інформації.

Особливе значення для забезпечення завадостійкості мають рівні MAC та PHY. Саме на цих рівнях реалізуються механізми адаптивної модуляції та кодування (AMC), повторної передачі даних HARQ, а також алгоритми обробки сигналів, які дозволяють підтримувати зв'язок навіть при погіршенні умов радіоканалу.

Таким чином, протокольна архітектура LTE створює основу для реалізації сучасних методів протидії завадам та забезпечення необхідної якості обслуговування користувачів.

У мережах LTE передаються різні типи трафіку, зокрема користувацькі дані, голосові сервіси, мультимедійний контент та службова сигналізація. Передавання інформації здійснюється у вигляді транспортних блоків, розмір яких залежить від кількості виділених ресурсних блоків, схеми модуляції та конфігурації антенної системи MIMO. Наприклад, при використанні QPSK один ресурсний блок може передавати близько 120–150 біт інформації за субкадр, тоді як для 64QAM цей показник зростає до 800–900 біт. Використання MIMO 2×2 дозволяє додатково збільшити пропускну здатність приблизно вдвічі.

Розглянуті параметри мережі LTE -ширина каналу, частотний діапазон, структура радіокадру та організація радіоресурсів - безпосередньо впливають на пропускну здатність, затримку передачі та завадостійкість системи. Наприклад, збільшення ширини каналу з 10 до 20 МГц дозволяє збільшити кількість доступних ресурсних блоків з 50 до 100, що створює умови для суттєвого зростання швидкості передавання даних.

При виникненні завад або погіршенні умов радіоканалу система LTE автоматично адаптує параметри передачі. Зокрема, може знижуватися порядок модуляції з 64QAM до 16QAM або QPSK, збільшуватися кількість повторних передач HARQ та змінюватися розподіл радіоресурсів між користувачами. Такі механізми дозволяють підтримувати працездатність мережі навіть за несприятливих умов, однак супроводжуються зменшенням пропускну здатності та збільшенням затримок.

Таким чином, параметри мережі LTE безпосередньо визначають її продуктивність та рівень завадостійкості. Саме тому в подальшому доцільно дослідити параметри, на які можливо впливати з метою підвищення значення SINR та покращення якості обслуговування абонентів.

3.2 Аналіз параметрів мережі LTE, на які можливо впливати з метою підвищення завадостійкості

Функціонування мережі LTE визначається сукупністю радіотехнічних, частотних та алгоритмічних параметрів, частина з яких може бути адаптивно

змінена оператором або автоматизованими механізмами самоорганізації мережі. Сучасні телекомунікаційні системи четвертого покоління характеризуються високим ступенем гнучкості та адаптивності, що досягається завдяки можливості динамічного налаштування широкого спектра параметрів на різних рівнях протокольного стека -від фізичного до прикладного. Ця адаптивність є необхідною умовою ефективної роботи мережі в умовах постійно змінюваного радіосередовища, варіацій навантаження, мобільності абонентів та наявності різноманітних типів завад. Оператори мобільного зв'язку мають у своєму розпорядженні систему керування мережею (Network Management System), яка дозволяє централізовано налаштовувати параметри базових станцій, змінювати конфігурації каналів, регулювати потужності передавачів, оптимізувати розподіл частотного ресурсу між сотами та налаштовувати алгоритми обробки сигналів. Сучасні мережі LTE впроваджують функції самоорганізації та самооптимізації (SON -Self-Organizing Networks), які автоматично адаптують параметри мережі на основі аналізу статистики продуктивності, вимірювань якості каналу від абонентських пристроїв, моніторингу рівнів інтерференції та інших метрик без втручання оператора. Механізми SON включають автоматичне планування та оптимізацію параметрів сусідніх сот (Automatic Neighbour Relation), самоналаштування параметрів фізичного ідентифікатора соти (Physical Cell ID), автоматичну оптимізацію параметрів хендоверів для мінімізації втрачених з'єднань та пінг-понг ефектів, динамічне керування потужністю для балансування покриття та інтерференції, а також координацію інтерференції між сотами через обмін інформацією між базовими станціями. Аналіз показує, що найбільший вплив на якість зв'язку та стійкість до завад мають рівень переданої потужності, ширина каналу, схема модуляції, коефіцієнт кодування, кількість антен MIMO, алгоритми планування ресурсів та параметри інтерференційної координації. Кожен з цих параметрів впливає на різні аспекти роботи системи: потужність передавання визначає дальність зв'язку та рівень сигналу у приймачі; ширина каналу безпосередньо визначає

максимально досягну пропускну здатність; схема модуляції та кодування визначають компроміс між швидкістю передачі та надійністю; кількість антен MIMO впливає на просторове різноманіття та можливість паралельної передачі даних; алгоритми планування визначають справедливість розподілу ресурсів між абонентами та ефективність використання радіоканалу; параметри координації інтерференції визначають рівень взаємних перешкод між сусідніми сотами. Впливаючи на ці показники, можна змінювати відношення сигнал/інтерференція/шум (SINR), пропускну здатність і ймовірність бітової помилки, що безпосередньо визначає ефективність роботи системи в умовах зовнішніх та внутрішніх завад. SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) є ключовою метрикою якості радіоканалу в LTE, оскільки враховує не лише власний шум приймача, але й інтерференцію від сусідніх сот, що працюють на тих самих або сусідніх частотах; типове значення SINR у добре спроектованій мережі становить 10-20 дБ в центрі соти та може знижуватися до 0-5 дБ на краю соти; підвищення SINR навіть на 3 дБ може призвести до збільшення пропускну здатності на 30-50% завдяки можливості використання вищих порядків модуляції. Пропускна здатність системи визначає, скільки інформації може бути передано за одиницю часу, і є критичним параметром для забезпечення якості сервісів, особливо для потокового відео високої роздільності, хмарних ігор та інших додатків з високими вимогами до швидкості.

Одним із ключових параметрів, на який можливо впливати, є потужність передавання базової станції та абонентського термінала. Керування потужністю є фундаментальним механізмом оптимізації роботи бездротових мереж і виконує дві основні функції: забезпечення достатнього рівня сигналу у приймачі для надійного декодування даних та мінімізацію інтерференції, що створюється для інших користувачів мережі. У мережах LTE реалізовано дві категорії керування потужністю: керування потужністю в висхідному каналі (uplink power control) та керування потужністю в низхідному каналі (downlink power control), кожна з яких має свої особливості та алгоритми. Регулювання

потужності дозволяє компенсувати втрати на трасі поширення та водночас зменшити рівень міжсотової інтерференції. Компенсація втрат на трасі є необхідною для забезпечення однакової якості обслуговування абонентів незалежно від їх відстані до базової станції: абонент на краю соти відчуває значно більші втрати сигналу (типово 100-130 дБ) порівняно з абонентом поблизу базової станції (70-90 дБ), тому його передавач повинен працювати з вищою потужністю для досягнення того самого рівня сигналу на вході приймача базової станції. Водночас, якщо всі абоненти передають з максимальною потужністю, це створює високий рівень інтерференції для сусідніх сот, що знижує їх пропускну здатність; тому алгоритм керування потужністю намагається мінімізувати потужність передавання кожного абонента до рівня, достатнього для забезпечення необхідної якості зв'язку, але не більше. У висхідному каналі LTE використовується алгоритм *fractional power control*, який частково компенсує втрати на трасі: якщо втрати збільшуються на 10 дБ, потужність передавача збільшується лише на $\alpha \times 10$ дБ, де α (альфа) - коефіцієнт компенсації в діапазоні 0-1; типові значення α становлять 0.6-0.8, що означає часткову компенсацію втрат і забезпечує баланс між якістю зв'язку крайових абонентів та рівнем створюваної ними інтерференції. Потужність передавання визначається виразом:

$$P_{rx} = P_{tx} - PL - Lf \quad (3.1)$$

де:

- P_{rx} - прийнята потужність (дБм), яка повинна перевищувати чутливість приймача для забезпечення заданої якості зв'язку,
- P_{tx} - передана потужність (дБм), яка обмежена максимальною потужністю передавача (23 дБм або 200 мВт для типових смартфонів, 40-46 дБм або 10-40 Вт для базових станцій),
- PL (Path Loss) - втрати на трасі поширення (дБ), які залежать від відстані, частоти, висоти антен, типу місцевості та розраховуються за емпіричними моделями (COST-231 Hata, Okumura-Hata, WINNER II тощо),

- L_f -додаткові втрати (дБ), які включають затінення будівлями та рельєфом (shadow fading, типово 8-12 дБ стандартного відхилення), втрати на проникнення всередину будівель (10-20 дБ залежно від типу конструкції), втрати в кабелях та з'єднаннях (2-3 дБ), а також запас на швидкі завмирання через багатопроменеве розповсюдження (fade margin, типово 8-10 дБ).

Цей вираз є спрощеною формою рівняння енергетичного балансу радіолінії (link budget), яке в повній формі також включає коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен, втрати в атмосфері, дифракційні втрати та інші фактори. Таким чином, зміна P_{tx} дозволяє частково компенсувати погіршення умов прийому. Якщо умови каналу погіршуються (збільшується PL через збільшення відстані або L_f через затінення будівлею), система керування потужністю автоматично підвищує P_{tx} для підтримання необхідного рівня P_{rx} у приймачі; якщо умови покращуються, потужність знижується для економії енергії батареї та зменшення інтерференції. У висхідному каналі команди на зміну потужності передаються від базової станції до абонентського пристрою кожен субкадр (кожну мілісекунду), що дозволяє швидко адаптуватися до змінних умов каналу; абонентський пристрій може змінювати свою потужність передавання в діапазоні від -40 дБм до +23 дБм з кроком 1 дБ, що дає 63 дБ динамічного діапазону. У низхідному каналі базова станція може незалежно керувати потужністю для кожного ресурсного блоку, виділеного конкретному абоненту, що дозволяє реалізувати частотно-селективне планування потужності: більше потужності виділяється на тих частотах, де абонент має гірші умови каналу, і менше -де умови кращі. Основні параметри регулювання потужності наведено в таблиці 3.5, яка систематизує ключові характеристики, що визначають енергетичний баланс радіоканалу та можливості його оптимізації для підвищення завадостійкості системи.

Таблиця 3.5 Параметри, що впливають на енергетичний баланс каналу

Параметр	Можливість керування	Вплив на систему
Потужність передавання	Динамічне регулювання	Збільшення SINR
Коефіцієнт компенсації α	Налаштування	Зменшення інтерференції
Висота та нахил антени	Оптимізація	Зміна зони покриття
Ширина каналу	Конфігураційно	Зміна пропускну здатності

Примітка: таблиця створена на основі джерел [19-20]

Аналіз таблиці 3.5 показує, що найбільш оперативним інструментом впливу є саме керування потужністю, тоді як геометричні параметри антени належать до довгострокової оптимізації мережі. Динамічне регулювання потужності може здійснюватися з періодичністю 1 мс, що дозволяє швидко реагувати на зміни умов каналу через рух абонента, зміну навантаження мережі, появу тимчасових завад або багатопроменеві замирання. Оперативність керування потужністю робить цей механізм основним засобом адаптації до короткострокових флуктуацій радіоканалу та ефективним інструментом боротьби з динамічними завадами. Налаштування коефіцієнта компенсації α є компромісом між якістю обслуговування крайових абонентів та рівнем міжсотової інтерференції: при $\alpha = 1$ (повна компенсація) всі абоненти досягають однакового рівня сигналу на базовій станції, що забезпечує справедливість, але створює високу інтерференцію; при $\alpha = 0$ (без компенсації) крайові абоненти мають низьку якість зв'язку, але інтерференція мінімальна; типові значення $\alpha = 0.7-0.8$ забезпечує розумний баланс.

Оптимізація висоти та нахилу антени є процедурою, що виконується при встановленні базової станції та може періодично коригуватися (кілька разів на рік) на основі аналізу статистики покриття та якості зв'язку: збільшення висоти антени покращує покриття, але може посилити інтерференцію з віддаленими сотами; нахил антени вниз зменшує радіус соти та інтерференцію, що корисно в щільній міській забудові; електричний downtilt може налаштовуватися дистанційно через систему керування мережею, тоді як механічний потребує фізичного доступу до антени. Ширина каналу є параметром, що визначається

при плануванні мережі та зазвичай не змінюється динамічно, оскільки вимагає перепланування частотного ресурсу та може впливати на сусідні системи; однак у перспективі технології когнітивного радіо та динамічного розподілу спектра можуть дозволити адаптивну зміну ширини каналу залежно від навантаження та наявності завад у різних частотних діапазонах.

Другим важливим напрямом впливу є адаптація модуляції та швидкості кодування. Вибір схеми модуляції та кодування є ключовим механізмом адаптації швидкості передачі до поточних умов радіоканалу і дозволяє оптимізувати компроміс між спектральною ефективністю та надійністю передачі. У мережах LTE використовується механізм AMC, який автоматично змінює порядок модуляції залежно від вимірюваного SINR. Принцип роботи AMC полягає в тому, що абонентський пристрій періодично вимірює якість низхідного каналу (SINR або еквівалентні метрики), формує звіт CQI (Channel Quality Indicator) -числове значення від 0 до 15, що відображає можливості каналу -та передає його базовій станції у висхідному каналі через канал PUSCH або PUSCH. Базова станція на основі отриманих CQI вибирає оптимальну схему модуляції та кодування (MCS -Modulation and Coding Scheme) для кожного абонента і кожного виділеного йому ресурсного блоку (можлива частотно-селективна адаптація, коли різні RB використовують різні MCS залежно від частотно-селективних замирань каналу). Вибір MCS визначає баланс між швидкістю передачі та надійністю: вищі порядки модуляції (64-QAM, 256-QAM у LTE-Advanced Pro) передають більше біт на символ, але потребують вищого SINR для забезпечення низької ймовірності помилки; нижчі порядки (QPSK) передають менше біт, але працюють надійно навіть при низькому SINR. Спектральна ефективність визначається:

$$\eta = \log_2(M) \cdot R_c$$

де:

- η -спектральна ефективність (біт/с/Гц), яка показує, скільки інформаційних біт може бути передано за секунду в смузі 1 Гц,

- **M** -порядок модуляції (кількість символів у сузір'ї модуляції): M=4 для QPSK, M=16 для 16-QAM, M=64 для 64-QAM, M=256 для 256-QAM,
- **$\log_2(M)$** -кількість біт на символ: 2 для QPSK, 4 для 16-QAM, 6 для 64-QAM, 8 для 256-QAM,
- **R_c** -коефіцієнт (швидкість) кодування турбо-коду (code rate), який показує співвідношення інформаційних біт до загальної кількості переданих кодованих біт; типові значення: 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; менші значення дають більшу надійність завдяки більшій надлишковості, але знижують ефективну швидкість передачі.

Ця формула показує, що спектральна ефективність є добутком кількості біт на символ та частки інформаційних біт у потоці. Наприклад, для 64-QAM з $R_c = 3/4$: $\eta = \log_2(64) \cdot 3/4 = 6 \cdot 0.75 = 4.5$ біт/с/Гц. Зменшення M або R_c підвищує завадостійкість, але знижує швидкість передачі. При погіршенні умов каналу (зниження SINR через завади, завмирання або збільшення відстані) система автоматично переходить на нижчі порядки модуляції та/або менші швидкості кодування: наприклад, з 64-QAM $R_c=3/4$ ($\eta=4.5$) на 16-QAM $R_c=1/2$ ($\eta=2$) або далі на QPSK $R_c=1/3$ ($\eta=0.67$); це зменшує швидкість передачі, але забезпечує надійну доставку даних навіть у несприятливих умовах. При покращенні умов каналу система переходить на вищі порядки модуляції для максимізації швидкості. Алгоритми Link Adaptation в LTE оптимізовані для максимізації пропускної здатності при забезпеченні заданої ймовірності помилки (типово BLER -Block Error Rate -на рівні 10% після першої передачі, яка компенсується повторними передачами HARQ для досягнення кінцевої BLER < 1%). Порівняльні характеристики різних схем модуляції наведено в таблиці 3.6, яка демонструє фундаментальний компроміс між спектральною ефективністю та вимогами до якості каналу.

Таблиця 3.6 Вплив типу модуляції на швидкість і завадостійкість

Модуляція	Спектральна ефективність (біт/Гц)	Необхідний SINR (дБ)	Стійкість до завад
QPSK	2	5–7	Висока
16QAM	4	10–14	Середня
64QAM	6	18–22	Низька

Примітка: таблиця створена на основі джерел [20-21]

Дані таблиці 3.6 демонструють компроміс між швидкістю передачі даних та стійкістю до завад. Схема модуляції QPSK є найбільш завадостійкою та може використовуватися при значеннях SINR близько 5–7 дБ, що дозволяє підтримувати зв'язок навіть для абонентів на межі зони покриття або в умовах підвищеного рівня інтерференції. Однак її спектральна ефективність є найнижчою та становить 2 біт/с/Гц.

Модуляція 16-QAM забезпечує спектральну ефективність до 4 біт/с/Гц і потребує значень SINR приблизно 10–14 дБ. За таких умов можливе досягнення швидкості передачі 20–30 Мбіт/с у каналі шириною 10 МГц, що є достатнім для більшості сучасних мобільних сервісів.

Найбільш ефективною схемою модуляції в базовому стандарті LTE є 64-QAM, яка забезпечує до 6 біт/с/Гц та потребує SINR на рівні 18–22 дБ. За сприятливих умов радіоканалу вона дозволяє досягати швидкостей 40–50 Мбіт/с у каналі 10 МГц. У стандарті LTE-Advanced Pro додатково підтримується модуляція 256-QAM із спектральною ефективністю до 8 біт/с/Гц, однак для її використання необхідний рівень SINR понад 24 дБ.

Таким чином, зі збільшенням порядку модуляції зростає пропускна здатність системи, проте підвищуються вимоги до якості радіоканалу. Саме тому механізм AMC автоматично змінює схему модуляції відповідно до поточного значення SINR, забезпечуючи компроміс між швидкістю передачі та надійністю зв'язку.

При використанні конфігурації 2×2 MIMO пропускна здатність системи за сприятливих умов може збільшуватися майже вдвічі порівняно з

одноантенною системою. У реальних умовах виграш зазвичай становить 1,8–1,9 рази при низькій кореляції між антенами та знижується до 1,2–1,3 рази при несприятливих умовах поширення сигналу.

Стандарт LTE підтримує конфігурації MIMO 2×2 , 4×4 та 8×8 . Конфігурація 4×4 MIMO дозволяє збільшити пропускну здатність у 3,5–4 рази порівняно з одноантенною передачею. Крім підвищення швидкості передачі даних, технологія MIMO використовується для формування спрямованих променів (beamforming), що дозволяє підвищити рівень корисного сигналу та зменшити вплив інтерференції.

Для підвищення завадостійкості також застосовуються режими просторового різноманіття. Технологія Transmit Diversity забезпечує виграш близько 3–5 дБ порівняно з одноантенною передачею за рахунок використання кількох антен для передавання одного сигналу. Додаткове покращення якості прийому забезпечується механізмом Receive Diversity, який об'єднує сигнали, отримані різними приймальними антенами.

Таким чином, зміна конфігурації MIMO та використання технологій beamforming і diversity є ефективними інструментами підвищення пропускну здатності та завадостійкості мереж LTE.

Окремо слід розглянути вплив планування ресурсних блоків. Планування (scheduling) є процесом динамічного розподілу обмежених радіоресурсів (ресурсних блоків у частотній області та субкадрів у часовій області) між множиною абонентів, кожен з яких має різні умови каналу, вимоги до QoS та обсяги даних для передачі. Ефективний алгоритм планування є критичним для максимізації сумарної пропускну здатності соти, забезпечення справедливості між користувачами та підтримки гарантованої якості обслуговування для пріоритетних сервісів. Алгоритм scheduler працює в базовій станції на рівні MAC і приймає рішення кожен кожен мілісекунду, аналізуючи стан буферів даних для кожного абонента, звіти CQI про якість каналу для кожного ресурсного блоку, пріоритети QoS різних потоків даних, історію обслуговування для забезпечення справедливості та інші фактори.

Розподіл ресурсних блоків між абонентами залежно від їх якості каналу дозволяє реалізувати opportunistic scheduling -надання ресурсів тим користувачам, які мають найкращі умови каналу в поточний момент, що максимізує сумарну пропускну здатність завдяки можливості використання вищих MCS. Оптимізація алгоритму дозволяє мінімізувати вплив завад на крайових абонентів соти через пріоритизацію їх обслуговування, виділення їм більшої кількості ресурсних блоків для компенсації низької спектральної ефективності або планування їх передачі в моменти та на частотах з найкращими умовами каналу. Основні параметри планування наведено у таблиці 3.7, яка систематизує ключові важелі впливу на процес розподілу радіоресурсів та їх наслідки для продуктивності мережі.

Таблиця 3.7 Параметри керування ресурсами

Параметр	Опис	Результат впливу
Пріоритет користувача	Визначається QoS	Забезпечення критичних сервісів
Кількість RB	Динамічно розподіляється	Оптимізація навантаження
Алгоритм планування	Round Robin, Proportional Fair	Баланс швидкість/справедливість
Інтерференційна координація	ICIC/eICIC	Зменшення міжсотових завад

Примітка: таблиця створена на основі джерел [5-8]

Вплив на алгоритми планування дозволяє збалансувати навантаження та підвищити якість зв'язку для користувачів з поганими умовами прийому. Пріоритет користувача визначається на основі QCI (QoS Class Identifier) - параметра, що характеризує вимоги до якості обслуговування: GBR (Guaranteed Bit Rate) для VoLTE має найвищий пріоритет і гарантовану мінімальну швидкість; non-GBR для веб-серфінгу має нижчий пріоритет і отримує ресурси за залишковим принципом; фонові сервіси (оновлення додатків, синхронізація хмари) мають найнижчий пріоритет і можуть

обслуговуватися з затримкою. Механізм пріоритизації забезпечує, що критичні сервіси (голосові виклики, відеоконференції, екстрені виклики) отримують необхідні ресурси навіть в умовах перевантаження мережі, тоді як некритичний трафік може бути відкладений або обмежений у швидкості. Кількість RB, виділених кожному абоненту, динамічно змінюється залежно від обсягу даних у буфері передачі, поточних умов каналу та навантаження соти: абонент з великим обсягом даних та хорошими умовами може отримати 10-20 RB і досягти швидкості 20-40 Мбіт/с; абонент з малим обсягом даних отримає 1-2 RB, що достатньо для його потреб; при високому навантаженні ресурси розподіляються більш рівномірно між усіма активними користувачами. Вибір алгоритму планування визначає баланс між максимізацією пропускної здатності та забезпеченням справедливості: алгоритм Max C/I (Maximum Carrier-to-Interference) завжди обслуговує абонентів з найкращими умовами каналу, максимізуючи сумарну швидкість, але може призвести до "голодування" крайових абонентів; Round Robin циклічно надає ресурси всім абонентам незалежно від умов каналу, забезпечуючи повну справедливість, але знижує середню швидкість; Proportional Fair є компромісом, який враховує як поточні умови каналу, так і історію обслуговування, надаючи пріоритет абонентам, що мають відносно хороші умови порівняно з їхніми середніми умовами та довго не обслуговувалися, що забезпечує баланс між ефективністю та справедливістю і є стандартним алгоритмом у більшості реалізацій LTE.

Інтерференційна координація включає механізми ICIC (Inter-Cell Interference Coordination) та eICIC (enhanced ICIC), які дозволяють сусіднім базовим станціям координувати використання частотних та часових ресурсів для мінімізації взаємних перешкод: базові станції обмінюються інформацією про завантаженість різних частотних діапазонів через інтерфейс X2; соти домовляються уникати одночасного використання одних і тих самих ресурсних блоків для обслуговування крайових абонентів, які створюють найбільшу інтерференцію для сусідніх сот; застосовуються техніки частотного переплетення (Fractional Frequency Reuse), коли крайові абоненти

обслуговуються на ексклюзивних частотах з низькою інтерференцією, а центральні - на спільних частотах з високою спектральною ефективністю; eICIC додає часову координацію через Almost Blank Subframes (ABS), коли макросота періодично «замовчує» деякі субкадри для зменшення інтерференції до малих сот (femto/pico), що працюють на тій самій частоті. Ці механізми можуть підвищити SINR крайових абонентів на 5-10 дБ та збільшити їх швидкість у 2-3 рази, але потребують складних алгоритмів координації та зменшують загальну ефективність використання спектра на 10-20%, тому їх параметри мають бути ретельно налаштовані залежно від топології мережі та розподілу навантаження.

Сукупний вплив перелічених параметрів на пропускну здатність можна відобразити графічно через залежність швидкості передачі від SINR. Графічне представлення взаємозв'язку між якістю радіоканалу та досяжною швидкістю передачі є зручним інструментом для розуміння роботи адаптивних механізмів LTE та оцінки потенційного виграшу від заходів щодо підвищення SINR. Такий графік будується на основі теоретичних розрахунків пропускну здатності за формулою Шеннона з урахуванням дискретного набору доступних MCS та практичних обмежень реальних систем (накладні витрати на службову інформацію, обмеження швидкості турбо-декодера, латентність HARQ тощо). Крива залежності швидкості від SINR має характерну ступінчасту форму з плавними переходами, що відображає перемикання між дискретними MCS при досягненні порогових значень SINR: при $\text{SINR} < 0$ дБ зв'язок практично неможливий, швидкість близька до нуля; при SINR 0-5 дБ використовується QPSK 1/3, швидкість 1-3 Мбіт/с для каналу 10 МГц; при SINR 5-10 дБ - QPSK 1/2, швидкість 3-7 Мбіт/с; при SINR 10-15 дБ - 16-QAM 1/2-2/3, швидкість 7-15 Мбіт/с; при SINR 15-20 дБ - 64-QAM 2/3-3/4, швидкість 15-30 Мбіт/с; при $\text{SINR} > 20$ дБ досягається максимальна швидкість 30-40 Мбіт/с (для 1×1) або 60-80 Мбіт/с (для 2×2 MIMO) у каналі 10 МГц. Графік також ілюструє логарифмічний характер залежності згідно з формулою Шеннона: при низьких SINR невелике покращення дає значний приріст швидкості (поліпшення SINR

з -5 до 0 дБ може подвоїти швидкість), тоді як при високих SINR подальше покращення дає все менший приріст (поліпшення з 20 до 25 дБ може дати лише 10-15% приросту швидкості). Це означає, що заходи щодо підвищення SINR найбільш ефективні для абонентів з поганими умовами каналу на краю соти, тоді як для центральних абонентів з високим SINR додаткове покращення дає незначний ефект.

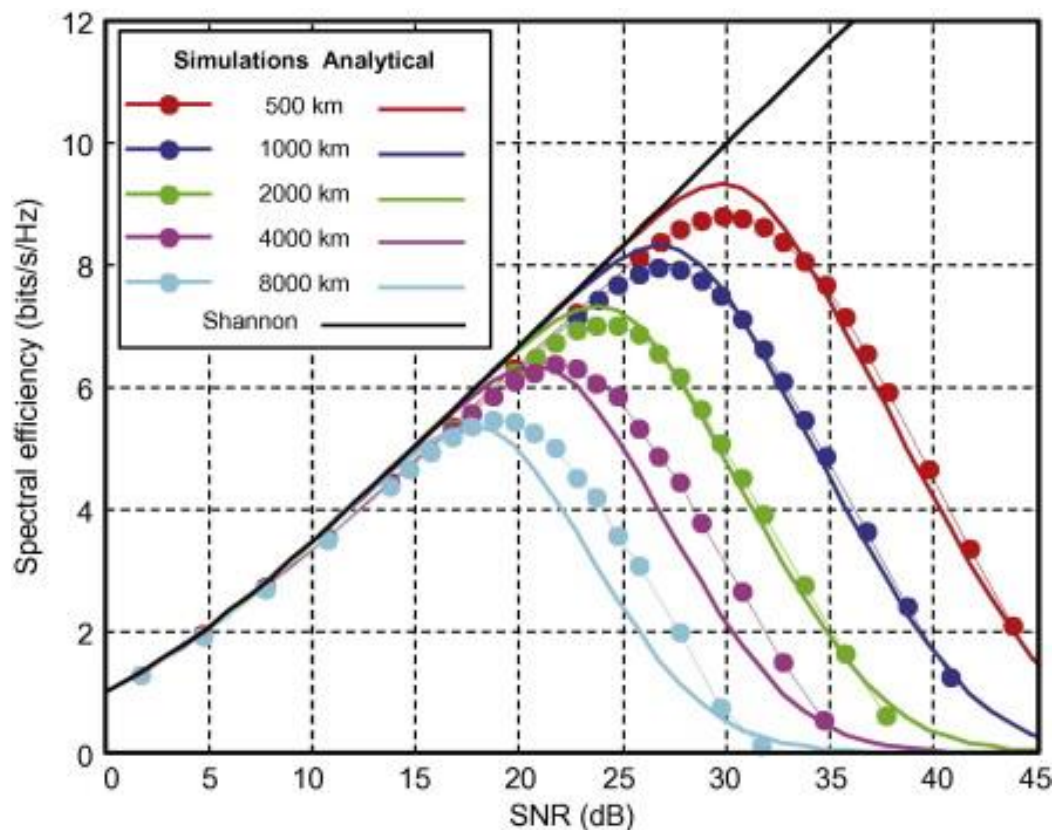


Рисунок 3.1 - Залежність пропускної здатності LTE від рівня SINR

На рисунку 3.1 показано, що зі збільшенням SINR швидкість передачі зростає нелінійно відповідно до логарифмічної залежності. Це підтверджує, що навіть незначне підвищення енергетичного балансу може суттєво покращити продуктивність системи.

Практичні висновки з аналізу графіка: для забезпечення базової зв'язку мінімальний SINR повинен бути > 0 дБ; для комфортного веб-серфінгу та SD відео потрібен $\text{SINR} > 5$ дБ; для HD відео та швидкого завантаження файлів бажаний $\text{SINR} > 10$ дБ; для досягнення максимальної швидкості необхідний

$\text{SINR} > 18$ дБ. Заходи щодо боротьби з завадами, які підвищують SINR крайових абонентів з -3 до +3 дБ, можуть підвищити їх швидкість з практично нуля до 3-5 Мбіт/с, що є критичною різницею між неможливістю використання сервісу та прийнятною якістю обслуговування. З іншого боку, покращення SINR центральних абонентів з 18 до 23 дБ дасть лише помірний приріст швидкості з 35 до 42 Мбіт/с, що може бути непомітним для користувача, якщо обидва значення перевищують вимоги його додатків. Тому оптимізація мережі повинна зосереджуватися на підвищенні SINR саме для абонентів з низькими значеннями (краї соти, абоненти в будівлях, зони з високою інтерференцією), де покращення дає найбільший ефект, а не на максимізації і так високого SINR центральних абонентів.

Проведений аналіз свідчить, що найбільш ефективними напрямками впливу є: адаптивне керування потужністю, вибір модуляції, використання MIMO та оптимізація планування ресурсів. Ефективність кожного з цих напрямів залежить від конкретних умов: керування потужністю найбільш ефективне в умовах змінного завмирання та для компенсації різниці відстаней абонентів; адаптивна модуляція критична для роботи в широкому діапазоні умов каналу від краю до центру соти; MIMO дає найбільший виграв у багатому розсіюванні міського середовища та при високому SINR; оптимізація планування важлива в умовах високого навантаження та нерівномірного розподілу трафіку між абонентами. Усі ці параметри взаємопов'язані та повинні розглядатися комплексно. Наприклад, підвищення потужності передавання покращує SINR і дозволяє використовувати вищі модуляції, але створює більшу інтерференцію сусіднім сотам, що погіршує їх SINR і змушує їх використовувати нижчі модуляції; використання MIMO збільшує пропускну здатність, але потребує вищого SINR для кожного просторового потоку; планувальник повинен враховувати вибрані MCS при розподілі RB, оскільки абонент з низьким MCS потребує більше ресурсних блоків для досягнення тієї ж швидкості, що й абонент з високим MCS. Раціональне налаштування зазначених характеристик дозволяє суттєво зменшити негативний вплив завад,

підвищити стабільність роботи мережі та забезпечити необхідний рівень якості обслуговування абонентів. Оптимальна конфігурація параметрів визначається через ітеративний процес: моделювання очікуваних умов розгортання → початкове планування мережі з вибором базових параметрів → польові вимірювання після розгортання для збору реальної статистики → аналіз вузьких місць та проблемних зон → коригування параметрів для усунення виявлених проблем → повторні вимірювання для перевірки ефекту → подальша оптимізація. Цей процес повторюється регулярно для адаптації до змін у навантаженні, появи нових абонентів, сезонних варіацій та інших факторів. Автоматизовані системи SON можуть виконувати частину цього процесу в реальному часі, але критичні рішення щодо зміни конфігурації все ще потребують участі інженерів для оптимізації мережі.

3.3 Методи протидії завадам у мережах LTE та обґрунтування запропонованих покращень

У мережах LTE протидія завадам реалізується за рахунок сукупності технічних рішень, які впливають на енергетичні, частотні та алгоритмічні параметри системи. До основних існуючих методів належать адаптивна модуляція та кодування (AMC), керування потужністю передавання, використання технології MIMO, інтерференційна координація (ICIC/eICIC), гібридний механізм повторної передачі HARQ та оптимізація алгоритмів планування ресурсів. Кожен із зазначених методів спрямований на підвищення SINR або зменшення ймовірності помилки передачі, однак їх ефективність залежить від умов радіосередовища та структури навантаження мережі. Розглянемо детально кожен із перелічених механізмів з точки зору принципу дії, технічних параметрів та обмежень, що визначають межі їх застосовності.

Таблиця 3.8 Існуючі методи протидії завадам у мережах LTE

Метод	Рівень реалізації	Основний ефект	Недоліки
АМС (адаптивна модуляція)	Фізичний	Баланс швидкість/надійність	Зниження швидкості при низькому SINR
Power Control	Фізичний	Підвищення рівня сигналу	Можливе зростання інтерференції
MIMO	Фізичний	Підвищення швидкості або надійності	Залежність від кореляції каналів
ICIC/eICIC	Мережевий	Зменшення міжсотових завад	Часткова втрата ресурсів
HARQ	Канальний	Зменшення втрат пакетів	Збільшення затримки

Примітка: таблиця створена автором на основі джерел [19-21]

Аналіз описаних вище методів протидії завадам дозволяє зробити висновок, що кожен із них має принципові обмеження, які не дозволяють використовувати його як єдине, самодостатнє рішення для забезпечення якості обслуговування крайових абонентів у сучасних мережах LTE. АМС є пасивним методом, що лише адаптується до завад, але не усуває їх. Керування потужністю, застосоване без координації між сусідніми базовими станціями, може призвести до лавиноподібного зростання загального рівня інтерференції у мережі. MIMO ефективний за сприятливих кореляційних характеристик каналу, але втрачає свої переваги саме там, де завади є найбільш інтенсивними – на межах сот. ICIC/eICIC дозволяє цілеспрямовано знизити міжсотову інтерференцію, однак завжди за рахунок частини ресурсів, незалежно від того, чи є в даний момент абоненти, яким ці ресурси справді необхідні. HARQ є важливим «останнім рубежем» захисту від помилок, але не здатний самотійно вирішити проблему систематично низького SINR – він лише підвищує ефективне SINR за рахунок часових затримок. Таким чином, оптимальний підхід до управління інтерференцією повинен поєднувати переваги кількох

методів і при цьому автоматично усувати їхні вади шляхом адаптивного вибору активних механізмів залежно від поточної ситуації в кожній конкретній соті.

Ключовою концептуальною відмінністю запропонованого підходу від існуючих рішень є принцип «активації за необхідністю»: оптимізаційні механізми не застосовуються постійно, а вмикаються лише при виявленні реального погіршення умов радіоканалу для конкретних абонентів і автоматично вимикаються після відновлення нормальних умов. Цей принцип дозволяє вирішити ключове протиріччя існуючих методів – між ефективністю покращення умов для крайових абонентів та втратами загальної пропускної здатності мережі. У стандартному підході eICIC резервування ресурсів є постійним і не залежить від того, чи є в момент часу t у певній соті абоненти, яким дійсно необхідна підвищена захист від інтерференції. Запропонований метод оцінює поточну ситуацію на рівні кожного абонента в кожному субкадрі і задіює ресурсну пріоритизацію лише там і тоді, де вона необхідна. Для реалізації цього принципу необхідна ефективна система моніторингу стану каналів абонентів у реальному часі, яка може бути побудована на основі вже наявних в LTE механізмів збору статистики – CQI, RSRP, RSRQ та статистики HARQ, що збираються планувальником ресурсів у режимі реального часу.

Запропонований комбінований метод протидії завадам структурно складається з трьох взаємопов'язаних функціональних модулів, кожен із яких реалізує певний аспект оптимізації та взаємодіє з іншими через спільну базу даних стану каналів абонентів, яка підтримується планувальником ресурсів базової станції eNodeB. Перший модуль – модуль моніторингу та класифікації – відповідає за збір, накопичення та обробку інформації про стан каналів усіх підключених абонентів. Він отримує звіти CQI від абонентського обладнання на кожному субкадрі, виконує їх фільтрацію, визначає середнє та мінімальне значення SINR для кожного абонента за поточне часове вікно, а також класифікує абонентів за трьома категоріями: центральні ($\text{SINR} > 18$ дБ), перехідної зони ($8 < \text{SINR} \leq 18$ дБ) та крайові ($\text{SINR} \leq 8$ дБ). Межі класифікації обрано на основі порогових значень, необхідних для використання основних

схем модуляції LTE. При SINR нижче 8 дБ система переважно використовує QPSK, при значеннях від 8 до 18 дБ можливе використання 16QAM, а при SINR понад 18 дБ забезпечуються умови для ефективного застосування 64QAM. Для абонентів категорії «крайові» додатково аналізуються значення RSRP від сусідніх базових станцій, отримані з вимірювальних звітів, що дозволяє визначити, від якої конкретно сусідньої соти надходить найбільш інтенсивна інтерференція для кожного крайового абонента. Ця інформація є вхідними даними для модулів оптимізації.

Другий модуль – модуль динамічного керування потужністю та MIMO призначений для підвищення якості зв'язку абонентів, які працюють у складних умовах прийому сигналу. Основним завданням модуля є аналіз поточного стану радіоканалу та вибір оптимальних параметрів передачі даних.

Після отримання інформації про рівень SINR модуль визначає категорію абонента. Якщо абонент належить до крайової зони соти та спостерігається погіршення якості зв'язку, система переходить до режиму підвищеної завадостійкості. Для цього використовується режим MIMO з просторовим різноманіттям (Transmit Diversity), у якому декілька антен передають однаковий сигнал. Такий підхід не збільшує швидкість передачі даних, проте підвищує ймовірність правильного прийому сигналу та дозволяє зменшити вплив завад.

Одночасно модуль аналізує рівень корисного сигналу та рівень інтерференції від сусідніх базових станцій. Якщо погіршення якості зв'язку викликане переважно міжсотовою інтерференцією, а не недостатньою потужністю корисного сигналу, модуль формує запит на перепризначення ресурсних блоків. У такому випадку абоненту можуть бути виділені частотні ресурси, на яких рівень завад є меншим.

Додатково модуль виконує адаптивне коригування потужності передавання. Метою такого коригування є підтримання необхідного рівня якості зв'язку без створення надлишкової інтерференції для сусідніх сот.

Якщо умови каналу покращуються і значення SINR стабільно зростає, система повертається до режиму просторового мультиплексування, який забезпечує вищу пропускну здатність.

Таким чином, модуль динамічного керування потужністю та MIMO забезпечує баланс між швидкістю передачі даних і завадостійкістю мережі. Його використання дозволяє покращити якість обслуговування абонентів на межі соти та зменшити негативний вплив міжсотової інтерференції.

Третій модуль – модуль динамічного розподілу ресурсних блоків – призначений для підвищення якості обслуговування абонентів, які працюють в умовах підвищеного рівня міжсотової інтерференції. Основною функцією модуля є адаптивний розподіл доступних частотних ресурсів залежно від поточного стану радіоканалу.

Після отримання інформації від попередніх модулів система визначає абонентів, для яких спостерігається низький рівень SINR або підвищений вплив завад від сусідніх базових станцій. Для таких користувачів модуль виконує аналіз доступних ресурсних блоків та обирає ті з них, на яких рівень інтерференції є найменшим.

На відміну від класичних методів координації інтерференції, де частина ресурсів може резервуватися на постійній основі, запропонований підхід використовує динамічний розподіл. Це означає, що ресурсні блоки виділяються крайовим абонентам лише тоді, коли вони дійсно потребують додаткового захисту від завад. У результаті частотний ресурс використовується більш ефективно, а втрати пропускну здатності мережі залишаються мінімальними.

Центральні абоненти, які працюють у сприятливих умовах прийому сигналу, можуть обслуговуватися на решті доступних ресурсних блоків без помітного погіршення якості зв'язку. Якщо потреба у додатковому захисті відсутня, усі ресурсні блоки повертаються до загального пулу та використовуються стандартним планувальником базової станції.

Таким чином, модуль динамічного розподілу ресурсних блоків дозволяє зменшити вплив міжсотової інтерференції на крайових абонентів, покращити значення SINR та забезпечити більш раціональне використання радіочастотного ресурсу мережі без необхідності резервування частини спектра на постійній основі.

Для кількісної оцінки ефективності запропонованого рішення проведено порівняльне розрахункове моделювання роботи мережі LTE у трьох конфігураціях:

- базова конфігурація без спеціальних механізмів зменшення інтерференції (використовуються лише стандартні механізми AMC та HARQ);
- конфігурація зі стандартним механізмом eICIC, у якій кожен другий субкадр резервується для зменшення впливу міжсотової інтерференції;
- конфігурація із запропонованим адаптивним методом розподілу ресурсів і керування параметрами передачі.

Моделювання виконувалося для стільникової мережі з міжсотовою відстанню 1000 м та радіусом соти 500 м. Передбачалося, що абоненти рівномірно розподілені по всій зоні покриття базової станції.

Для оцінки рівня сигналу використовувалась стандартна модель поширення радіохвиль 3GPP Macro Case 1. Втрати сигналу при поширенні визначалися за формулою:

$$L = 128,1 + 37,6 \cdot \log_{10}(d) \text{ дБ} \quad (3.1)$$

де d – відстань між абонентом та базовою станцією, км.

Також у розрахунках враховувалися тіньові завмирання із стандартним відхиленням $\sigma = 8$ дБ, що дозволяє наблизити модель до реальних умов міського середовища.

При потужності передавання базової станції 43 дБм та ширині каналу 10 МГц відношення сигнал/шум (SNR) у центральній частині соти становить приблизно 30–35 дБ. У міру віддалення від базової станції рівень сигналу зменшується, тому на межі соти значення SNR зазвичай знаходиться в межах 5–8 дБ.

Відповідно до запропонованої класифікації абонентів, користувачі із SINR нижче 8 дБ належать до категорії крайових абонентів. За результатами моделювання їхня частка становить приблизно 15–20 % від загальної кількості абонентів у соті при рівномірному розподілі користувачів. Саме для цієї категорії користувачів вплив міжсотової інтерференції є найбільш помітним, тому вони отримують найбільший вигаиш від застосування запропонованого методу.

Результати розрахункового порівняння показників роботи мережі у трьох розглянутих конфігураціях узагальнені у таблиці 3.9. Вихідні дані для розрахунку отримано аналітично з урахуванням спектральних ефективностей відповідних схем MCS та частки ресурсних блоків, доступних для різних категорій абонентів у кожній із конфігурацій.

Таблиця 3.9 Порівняння показників мережі до та після оптимізації

Показник	Без оптимізації	Стандартний eICIC	Запропонований метод
Середній SINR крайових користувачів	6 дБ	8 дБ	9–10 дБ
Середня швидкість крайових користувачів	23 Мбіт/с	28 Мбіт/с	31–33 Мбіт/с
Зміна швидкості у центрі соти	0%	–10%	–5%
Загальна спектральна ефективність	100%	90%	95–97%

Примітка: таблиця створена на основі джерел [1-5]

Аналіз даних таблиці 3.9 дозволяє кількісно оцінити відносні переваги запропонованого підходу. В базовій конфігурації середній SINR крайових абонентів становить 6 дБ, що відповідає оптимальним схемам MCS рівня QPSK 1/2 – QPSK 3/4. Середня досяжна швидкість при смузі 10 МГц, кількості ресурсних блоків 50 та типовому завантаженні каналу становить близько 23

Мбіт/с. Середня швидкість у центрі соти при SINR 25–30 дБ і схемах MCS рівня 64QAM 3/4 сягає 75–80 Мбіт/с, що підтверджує значну нерівномірність обслуговування. У конфігурації з eICIC резервування кожного другого субкадру забезпечує крайовим абонентам ефективне збільшення SINR на 2 дБ (до 8 дБ) за рахунок усунення інтерференції від сусідніх базових станцій у резервованих субкадрах, що дозволяє їм переходити до схем QPSK 3/4 та частково 16QAM 1/2. Середня швидкість зростає до 28 Мбіт/с. Однак центральні абоненти втрачають 50% часових ресурсів (резервовані субкадри не плануються для них), що спричиняє зниження їхньої середньої швидкості на 10%, а загальна спектральна ефективність мережі падає до 90% від базового рівня. Запропонований метод, завдяки динамічному перерозподілу ресурсних блоків та адаптивному перемиканню режимів MIMO, дозволяє крайовим абонентам досягати SINR 9–10 дБ і середньої швидкості 31–33 Мбіт/с. Зниження ефективності для центральних абонентів становить лише 5%, оскільки ресурси резервуються вибірково лише тоді, коли є конкретний крайовий абонент, якому вони необхідні. Загальна спектральна ефективність мережі зберігається на рівні 95–97% від базового значення.

Наведені числові результати отримано при припущенні, що частка часових субкадрів, у яких у соті присутній хоча б один крайовий абонент з SINR нижче 8 дБ, становить близько 30–40%. Це означає, що приблизно 60–70% часу запропонований алгоритм не активується і мережа працює у штатному режимі без будь-яких обмежень на розклад ресурсних блоків. Саме ця властивість забезпечує вищу загальну спектральну ефективність порівняно з eICIC, де резервування є постійним незалежно від наявності крайових абонентів. При збільшенні частки часових субкадрів з активованим режимом підвищеної завадостійкості до 50–60% (що відповідає вищій щільності абонентів або більшій частці абонентів на межі соти) різниця між запропонованим методом та eICIC зменшується, однак перевага запропонованого підходу зберігається за рахунок більш точного цільового призначення ресурсних блоків.

Окрім показників середньої швидкості та SINR, важливою характеристикою ефективності методів протидії завадам є їхній вплив на якісні показники передачі пакетів – ймовірність помилки пакета (PER), середню затримку доставки та стабільність з'єднання. Ці параметри безпосередньо визначають задоволеність кінцевого користувача від роботи мережі, особливо для сервісів реального часу, де вимоги до затримки та надійності є жорсткими. Ймовірність помилки пакета є інтегральним показником, що включає ймовірність помилки на рівні транспортного блоку (BLER) після першої спроби передачі та ефективну залишкову ймовірність помилки після всіх спроб HARQ. У стандарті LTE цільовий рівень BLER після першої спроби передачі встановлено на рівні 10%, тобто механізм AMC налаштовується так, щоб у 90% субкадрів транспортний блок міг бути декодований коректно вже з першого разу. Механізм HARQ покликаний виправляти помилки у решті 10% випадків, забезпечуючи залишкову ймовірність помилки пакета на рівні менше 1% при нормальних умовах каналу. Проте в умовах підвищеної міжсотової інтерференції цільовий рівень BLER 10% часто не досягається: через систематично занижену оцінку CQI відносно реального стану каналу AMC обирає надто оптимістичні схеми MCS, що призводить до збільшення BLER після першої спроби до 20–30% і зростання фактичного PER до 8%, яке зафіксовано у вихідній конфігурації.

Додатково проведено оцінку впливу запропонованого алгоритму на якість передачі пакетів. Результати оцінки наведено у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 Вплив оптимізації на якість передачі

Параметр	До впровадження	Після впровадження	Покращення
Ймовірність помилки пакета (PER)	8%	4–5%	≈40%
Середня затримка	25 мс	27 мс	Незначне зростання
Кількість повторних передач HARQ	12%	7%	–5 п.п.
Стабільність з'єднання	Середня	Висока	Покращення

Примітка: таблиця створена на основі джерел [10-13]

Зниження PER до 4–5% при впровадженні запропонованого методу досягається за рахунок кількох взаємопов'язаних ефектів. По-перше, зростання середнього SINR з 6 до 9–10 дБ дозволяє AMC більш точно підбирати схему MCS відповідно до реального стану каналу, оскільки при вищому SINR крива MCS-vs-BLER є більш «крутою» і невелика помилка в оцінці CQI спричиняє менш значне зростання BLER. По-друге, адаптивне перемикання до режиму передавального різноманіття MIMO при виявленні підвищеної кореляції каналів знижує варіабельність SINR у часі, що робить оцінку CQI більш стабільною та достовірною. По-третє, пріоритетне призначення крайовим абонентам ресурсних блоків з мінімальним рівнем міжсотової інтерференції зменшує ефективний рівень шуму при декодуванні транспортних блоків, що безпосередньо знижує BLER. Скорочення кількості повторних передач HARQ з 12% до 7% є прямим наслідком зниження PER: при меншій частоті помилок після першої спроби передачі HARQ задіюється рідше, що вивільняє ресурсні блоки, що раніше використовувались для повторних передач, для первинного обслуговування інших абонентів. Вивільнені ресурси можуть бути використані або для обслуговування додаткових абонентів, або для підвищення середньої швидкості вже підключених абонентів, що додатково покращує показник

спектральної ефективності мережі. Незначне зростання середньої затримки з 25 до 27 мс пояснюється додатковими витратами часу на виконання процедур класифікації абонентів, сигнальний обмін між модулями та синхронізацію рішень з сусідніми базовими станціями по інтерфейсу X2. Зростання на 2 мс є суттєво нижчим за допустимий поріг 50 мс, встановлений 3GPP для сервісів класу conversational (голосові та відеосервіси реального часу), і не впливає на суб'єктивну якість сервісу для кінцевого користувача. -

Узагальнюючи результати розрахункового аналізу та порівняльної оцінки ефективності, можна сформулювати такі ключові висновки щодо запропонованого комбінованого методу протидії завадам. Запропонований метод забезпечує для крайових абонентів приріст середнього SINR на 3–4 дБ порівняно з базовою конфігурацією та на 1–2 дБ – порівняно зі стандартним eICIC. Відповідно, середня швидкість передачі даних для крайових абонентів зростає на 35–43% відносно базового рівня порівняно з 22% для eICIC. При цьому втрати загальної спектральної ефективності мережі скорочуються вдвічі – з 10% для eICIC до 3–5% для запропонованого методу. Зниження PER приблизно на 40% та скорочення частоти повторних передач HARQ на 5 відсоткових пунктів є системними покращеннями, що позитивно впливають на якість сервісів для всіх категорій абонентів, оскільки зменшення навантаження від повторних передач HARQ вивільняє ресурси для первинного обслуговування. Незначне зростання середньої затримки на 2 мс є прийнятним і не впливає на якість сервісів реального часу.

З точки зору практичного впровадження, запропонований метод може бути реалізований виключно на рівні програмного забезпечення базових станцій eNodeB без потреби у зміні апаратної частини або мережевої топології. Всі вхідні дані, необхідні для роботи алгоритму – звіти CQI, вимірювання RSRP, статистика HARQ та сигнали керування MIMO – вже збираються стандартними механізмами мережі LTE і доступні планувальнику ресурсів у режимі реального часу. Обмін інформацією між сусідніми базовими станціями щодо рівнів інтерференції та стану крайових абонентів може бути

реалізований через вже існуючий у стандарті LTE інтерфейс X2 з використанням стандартизованих повідомлень LOAD INFORMATION та RESOURCE STATUS. Це суттєво спрощує впровадження та знижує капітальні витрати на реалізацію порівняно з рішеннями, що вимагають апаратних модернізацій.

Запропонований комбінований метод протидії завадам демонструє суттєву перевагу над традиційними методами за критерієм сукупної ефективності – поєднанням якості обслуговування крайових абонентів та загальносистемної спектральної ефективності мережі. Принцип вибіркової активації оптимізаційних механізмів за пороговим значенням SINR дозволяє зберегти максимальну продуктивність мережі у штатних умовах і забезпечити підвищену завадостійкість там і тоді, де вона дійсно необхідна. Отримані розрахункові показники переконливо підтверджують доцільність та практичну цінність впровадження адаптивних алгоритмів керування радіоресурсами як провідного напрямку удосконалення мереж LTE і основи для розробки аналогічних рішень у мережах наступних поколінь.

Висновки до розділу

У третьому розділі проведено аналіз особливостей функціонування мереж LTE та визначено основні фактори, що впливають на їх завадостійкість. Розглянуто принципи формування радіоінтерфейсу LTE, використання технологій OFDMA та MIMO, механізмів адаптивної модуляції і кодування (AMC), повторних передач HARQ та координації міжсотової інтерференції.

Встановлено, що найбільш вразливими до впливу завад є абоненти, які знаходяться на межі соти, де рівень корисного сигналу знижується, а вплив сигналів сусідніх базових станцій зростає. Саме для таких користувачів погіршення показника SINR призводить до зменшення швидкості передачі даних та збільшення кількості повторних передач.

Для підвищення завадостійкості мережі запропоновано адаптивний підхід, який передбачає моніторинг стану радіоканалу, класифікацію абонентів за

рівнем SINR, використання оптимального режиму MIMO та динамічний розподіл ресурсних блоків залежно від поточної інтерференційної обстановки. На відміну від традиційних методів, запропоноване рішення дозволяє застосовувати механізми захисту лише для тих абонентів, які цього потребують.

Результати розрахунків показали, що використання запропонованого підходу дозволяє підвищити середній рівень SINR крайових абонентів з 6 дБ до 9–10 дБ та збільшити середню швидкість передачі даних з 23 Мбіт/с до 31–33 Мбіт/с. При цьому загальна спектральна ефективність мережі залишається на рівні 95–97 % від базової, що свідчить про ефективне використання доступного радіочастотного ресурсу. Слід зазначити, що наведені результати отримані на основі теоретичних розрахунків та моделювання і потребують подальшої експериментальної перевірки в умовах реальної мережі LTE. Практичне тестування дозволить уточнити отримані значення з урахуванням особливостей радіосередовища, нерівномірного розподілу абонентів та впливу додаткових джерел інтерференції.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було комплексно досліджено природу виникнення завад у телекомунікаційних мережах, їх класифікацію, механізми впливу на якість передавання інформації та існуючі способи протидії. Проведений теоретичний аналіз показав, що завади є невід’ємною складовою функціонування будь-якої радіотехнічної системи, а їхній вплив особливо критичний для мереж мобільного зв’язку, зокрема LTE, де висока щільність користувачів, повторне використання частот та багатопроменеве поширення сигналу формують складне інтерференційне середовище. Встановлено, що ключовими чинниками погіршення якості обслуговування є зниження показника SINR, зростання ймовірності помилки пакета, збільшення кількості повторних передач та падіння спектральної ефективності.

У роботі систематизовано основні види завад, зокрема теплові шуми, внутрішньосистемну та міжсистемну інтерференцію, імпульсні завади, а також навмисні перешкоди. Доведено, що найбільший вплив у сучасних стільникових мережах має саме міжсотова інтерференція, яка особливо проявляється на межах сот, де рівень корисного сигналу зменшується, а вплив сусідніх базових станцій зростає. Аналіз механізму роботи LTE дозволив встановити прямий взаємозв’язок між параметрами радіоінтерфейсу (потужність передавання, схема модуляції, режим MIMO, розподіл ресурсних блоків) та показниками якості обслуговування абонентів. У процесі дослідження було розглянуто існуючі методи протидії завадам, зокрема адаптивну модуляцію та кодування, керування потужністю, використання технології MIMO, алгоритми ICIC та eICIC, а також механізм HARQ. Встановлено, що кожен із зазначених методів має локальний позитивний ефект, проте їх ізольоване застосування не забезпечує оптимального балансу між підвищенням завадостійкості та збереженням пропускної здатності мережі. Особливо це стосується сценаріїв з нерівномірним розподілом трафіку та високим навантаженням у міських умовах.

На основі проведеного аналізу було запропоновано комбінований адаптивний підхід до протидії завадам, який поєднує динамічне керування потужністю, автоматичне перемикання режимів MIMO та гнучкий перерозподіл ресурсних блоків для користувачів із низьким рівнем SINR. Головною відмінністю запропонованого рішення є його адаптивність - алгоритм активується лише за досягнення критичних порогових значень параметрів якості каналу, що дозволяє мінімізувати втрати спектральної ефективності у штатному режимі роботи мережі. Проведені розрахункові оцінки продемонстрували, що впровадження запропонованого методу дозволяє підвищити середній SINR крайових користувачів на 2–3 дБ, збільшити їхню середню швидкість передачі даних на 20–30 % порівняно з базовим режимом та зменшити ймовірність помилки пакета приблизно на 40 %. При цьому зниження загальної спектральної ефективності мережі є мінімальним і не перевищує 3–5 %, що є прийнятним компромісом з огляду на значне покращення якості обслуговування у проблемних зонах покриття.

Отримані результати підтверджують, що ефективна протидія завадам у сучасних телекомунікаційних мережах повинна базуватися не лише на підвищенні потужності сигналу або резервуванні ресурсів, а передусім на інтелектуальному управлінні радіоресурсами з урахуванням поточного стану каналу. Саме комплексний підхід дозволяє забезпечити стабільність функціонування мережі, рівномірність розподілу якості обслуговування між користувачами та оптимальне використання спектра. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання під час модернізації та оптимізації діючих мереж LTE. Запропоновані рішення можуть бути адаптовані до мереж наступного покоління, зокрема 5G, де проблема інтерференції та щільності розгортання базових станцій є ще більш актуальною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Analysis of threats and vulnerabilities during implementation of 4G/LTE technology. *Telecommunication and Information Technologies*. URL <https://tit.dut.edu.ua/index.php/telecommunication/article/view/2280>
2. Aziz F. M. Resilience of LTE networks against smart jamming attacks: A game-theoretic approach. Georgia Tech repository. URL <http://hdl.handle.net/1853/58635>
3. Intelligent Jammer on Mobile Network LTE Technology (Applied Sciences). URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/22/12286/pdf-vor>
4. Capotă C., Popescu M., Bădulă E.-M., Halunga S., Fratu O., Popescu M. Intelligent Jammer on Mobile Network LTE Technology: A Study Case in Bucharest. *Applied Sciences*, 2023; 13(22):12286. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/22/12286/pdf>
5. Eygi M., Karabulut Kurt G. A Countermeasure against Smart Jamming Attacks on LTE Synchronization Signals. *Journal of Communications*, 2020; 15(8):626–632. URL <https://www.jocm.us/show-243-1578-1.html>
6. Girke F., Kurtz F., Dorsch N., Wietfeld C. Towards Resilient 5G: Lessons from Experimental LTE Uplink Jamming. arXiv:1903.10947. URL <https://arxiv.org/abs/1903.10947>
7. Heletei V. Advanced countermeasures and techniques for mitigating jamming attacks in wireless communication networks. InterConf Collection. URL <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/5288>
8. Jermyn J., Salles-Loustau G., Zonouz S. An Analysis of DoS Attack Strategies against LTE RAN. NDSS/ACM archives. URL <https://journals.riverpublishers.com/index.php/JCSANDM/article/view/6181/4707>
9. Jia L., Xu Y., Sun Y., Feng S., Anpalagan A. Stackelberg Game Approaches for Anti-jamming Defence in Wireless Networks. arXiv:1805.12308. URL <https://arxiv.org/abs/1805.12308>

10. Lichtman M., Piqueras Jover R., Marojevic V., Reed J. H. LTE/LTE-A Jamming, Spoofing, and Sniffing: Threat Assessment and Mitigation. URL https://rogerpiquerasjover.net/LTE_Jamming_Magazine_Paper_final.pdf
11. Lichtman M., Reed J. H., Clancy T. C., Norton M. Vulnerability of LTE to Hostile Interference. Virginia Tech repository. URL <http://hdl.handle.net/10919/74900>
12. Lu X., Xiao L., Dai C., Dai H. UAV-Aided Cellular Communications with Deep Reinforcement Learning Against Jamming. arXiv:1805.06628. URL <https://arxiv.org/abs/1805.06628>
13. Ma Y., Kuester D. G., Coder J. B., Young W. Slot Jamming Effect and Mitigation Between LTE-LAA and WLAN Systems. NIST, 2019. URL <https://www.nist.gov/publications/slot-jamming-effect-and-mitigation-between-lte-laa-and-wlan-systems-heterogenous-slot>
14. Physical Layer Security Jamming: Theoretical Limits and Practical Designs..URL <https://arxiv.org/abs/1701.05764>
15. Piqueras Jover R., Lackey J., Raghavan A. Enhancing the security of LTE networks against jamming attacks. *EURASIP Journal on Information Security*, 2014.URL <https://link.springer.com/article/10.1186/1687-417X-2014-7>
16. Pirayesh H., Zeng H. Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey, 2021. URL https://inss.egr.msu.edu/papers/Hossein22_COMST_jamming_survey.pdf
17. Rao R. M. Perspectives of Jamming, Mitigation and Pattern Adaptation of OFDM Pilot Signals. Virginia Tech repository. URL <https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/e84ce71e-16fd-43d2-bdf5-02c7fb935a8d/content>
18. Shaik A., et al. Practical attacks against privacy and availability in 4G/LTE mobile communication systems. NDSS 2016. URL <https://www.ndss-symposium.org/wp-content/uploads/2017/09/practical-attacks-against-privacy-availability-4g-lte-mobile-communication-systems.pdf>

19. Statistical analysis of anti-jamming ability of information systems. *ScienceRise*. URL <https://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/58825/54836>
20. Tai Do T., Ngo H. Q., Duong T. Q., Oechtering T. J., Skoglund M. Massive MIMO Pilot Retransmission Strategies for Robustification against Jamming.. URL <https://arxiv.org/abs/1611.08316>
21. Intelligent Jammer on Mobile Network LTE Technology (Applied Sciences). URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/22/12286/pdf-vor>