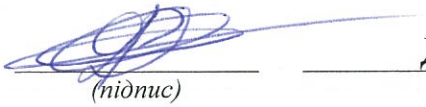
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



(підпис) Данило ФІЛЯКІН
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-61
Данило ФІЛЯКІН

Керівник: Анатолій МАКАРЕНКО

Рецензент: О. Вагроломеєва

Київ – 2024

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Філякіну Данилу Юрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі»,
керівник кваліфікаційної роботи Анатолій МАКАРЕНКО, д.т.н., професор,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 15.10.2024 р. №320.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Технологія LTE.
   2. Стандарти LTE-U та LAA.
   3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Мережі мобільного зв'язку на основі технології LTE;
   2. Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі;
   3. Дослідження показників ефективності методу збільшення ефективності використання технології LTE.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	26.10.24	Викон.
2.	Мережі мобільного зв'язку на основі технології LTE	29.10.24	Викон.
3.	Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі	01.12.24	Викон.
4.	Дослідження показників ефективності методу збільшення ефективності використання технології LTE	02.11.24	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	11.12.24	Викон.
6.	Розробка презентації	25.12.24	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Данило ФІЛЯКІН
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій МАКАРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Філякіна Данила Юрійовича

на тему: «Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі»

Актуальність:

Актуальність теми зумовлена потребою в підвищенні пропускної здатності та оптимізації роботи мобільних мереж у зв'язку з обмеженістю ліцензійного спектра. Використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі (LTE-U, LAA) дозволяє розширити спектральні ресурси та забезпечити стабільну якість обслуговування. Методи збільшення ефективності включають адаптивне управління частотами, механізми коексистенції з іншими технологіями (наприклад, Wi-Fi), а також динамічне налаштування параметрів передачі. Це сприяє оптимізації використання спектра, зменшенню інтерференції та підвищенню продуктивності мереж.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показала високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.

2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. Більш детально описати методику моделювання спільного використання спектра між LAA та Wi-Fi, зокрема використані параметри (частота, ширина каналу, щільність користувачів).

2. Рекомендується додати порівняння запропонованого методу з існуючими підходами (наприклад, LBT – Listen Before Talk), щоб підкреслити його переваги.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Філякін Данило Юрійович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Рецензент: _____ О. Варфоломеєва

(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Філякін Д.Ю. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

В.о. директора ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Філякін Данило Юрійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Філякіна Данила Юрійовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій МАКАРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Філякін Д.Ю.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедрою
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 77 стор., 25 рис., 4 табл., 46 дж.

Метою роботи є підвищення пропускної здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку в умовах адаптивного використання радіочастотного спектру кількома технологіями радіодоступу (LTE та Wi-Fi).

Об'єктом дослідження є процес передавання даних у мережах мобільного зв'язку.

Предметом дослідження є методи підвищення ефективності використання неліцензійного радіочастото спектру.

Короткий зміст роботи: У першому розділі детально проаналізовано основи технології LTE, її еволюцію та ключові принципи роботи. Розглянуто основні релізи стандарту, починаючи з Release 8, що забезпечили значне підвищення продуктивності, зокрема через впровадження технологій OFDMA, MIMO та Carrier Aggregation. Показано, як використання різних частотних діапазонів впливає на ефективність мережі: низькі частоти забезпечують ширше покриття, тоді як високі сприяють досягненню високої пропускної здатності. Описано архітектуру LTE, зокрема eNodeB та EPC, які відіграють ключову роль у забезпеченні високих швидкостей передачі даних.

У другому розділі запропоновано методи оптимізації використання радіочастотного спектра в неліцензійному діапазоні. Вперше представлено адаптивний підхід до спільного використання спектра LTE та Wi-Fi, що знижує інтерференцію та підвищує якість обслуговування. Метод включає динамічне чергування підкадрів і адаптивну агрегацію частотного спектра, що дозволяє оптимально використовувати ресурси мережі. Проведено моделювання, яке підтвердило ефективність запропонованих методів у підвищенні пропускної здатності та зниженні рівня інтерференції.

У третьому розділі досліджено модель спільного використання неліцензійного спектра між LAA та Wi-Fi. Моделювання показало, що багаторівнева архітектура значно покращує продуктивність мережі, забезпечуючи рівномірний розподіл SINR та знижуючи ймовірність колізій. Результати підтвердили, що запропонований метод дозволяє ефективно інтегрувати LTE у неліцензійний спектр, забезпечуючи стабільне обслуговування навіть у середовищах із високою щільністю користувачів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: LTE, LTE-U, LAA, WI-FI, МОДЕЛЬ СПІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ НЕЛІЦЕНЗІЙНОГО СПЕКТРА, QOS.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 77 pages, 25 pictures, 4 table, 46 sources.

The purpose of the work is to increase the throughput of heterogeneous mobile communication networks in the conditions of adaptive use of the radio frequency spectrum by several radio access technologies (LTE and Wi-Fi).

The object of the study is the process of data transmission in mobile communication networks.

The subject of the study is methods for increasing the efficiency of using unlicensed radio frequency spectrum.

Summary of the work: The first section analyzes in detail the basics of LTE technology, its evolution and key principles of operation. The main releases of the standard, starting with Release 8, are considered, which have provided a significant increase in performance, in particular through the implementation of OFDMA, MIMO and Carrier Aggregation technologies. It is shown how the use of different frequency ranges affects the efficiency of the network: low frequencies provide wider coverage, while high frequencies contribute to achieving high throughput. The LTE architecture is described, in particular eNodeB and EPC, which play a key role in ensuring high data transfer rates.

The second section proposes methods for optimizing the use of radio frequency spectrum in the unlicensed range. For the first time, an adaptive approach to LTE and Wi-Fi spectrum sharing is presented, which reduces interference and improves the quality of service. The method includes dynamic subframe interleaving and adaptive frequency spectrum aggregation, which allows for optimal use of network resources. Simulations were conducted, which confirmed the effectiveness of the proposed methods in increasing throughput and reducing the level of interference.

In the third section, a model of unlicensed spectrum sharing between LAA and Wi-Fi is investigated. The simulations showed that the multi-level architecture significantly improves network performance, ensuring a uniform distribution of SINR and reducing the probability of collisions. The results confirmed that the proposed method allows for effective integration of LTE into the unlicensed spectrum, ensuring stable service even in environments with high user density.

KEYWORDS: LTE, LTE-U, LAA, WI-FI, UNLICENSED SPECTRUM SHARING MODEL, QOS.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1. МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LTE . 11
1.1. Основні характеристики та принципи роботи LTE 11
1.2. Архітектура мереж LTE: елементи, функції та протоколи 20
1.3. Особливості використання LTE у ліцензованому спектрі 27
РОЗДІЛ 2. МЕТОД ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LTE В НЕЛІЦЕНЗІЙНОМУ РАДІОЧАСТОТНОМУ СПЕКТРІ 35
2.1. Особливості архітектури з кількома рівнями покриття 35
2.2. Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі 50
2.3. Методи агрегації радіочастотних ресурсів 54
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LTE 58
3.1. Модель спільного використання неліцензованого частотного діапазону між LAA та Wi-Fi 58
3.2. Моделювання пропускної здатності мережі в умовах завад в неліцензійному частотному діапазоні 67
ВИСНОВКИ 74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 78
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 83

ВСТУП

Технологія LTE (Long Term Evolution) є фундаментальною в сучасних мобільних комунікаціях, забезпечуючи високошвидкісний доступ до мережі Інтернет, низьку затримку та стабільність з'єднання. Її впровадження стало важливим етапом у розвитку інформаційного суспільства, яке базується на оперативному обміні даними. Завдяки LTE зросла доступність інноваційних послуг, таких як потокове відео, VoIP (голос через IP), мобільні ігри та розумні пристрої, що дозволяє користувачам залишатися на зв'язку будь-де та будь-коли.

Роль LTE у суспільстві особливо відчутна у сфері освіти, медицини, бізнесу та державного управління. Вона забезпечує платформу для розгортання рішень «розумного міста», розвитку Інтернету речей (IoT) і дистанційної роботи. У кризових ситуаціях, таких як природні катастрофи, LTE надає можливість оперативного зв'язку, що є критично важливим для координації дій служб порятунку.

Актуальність технології LTE також визначається її здатністю інтегруватися з мережами наступного покоління, такими як 5G, забезпечуючи плавний перехід до нових стандартів. Це робить LTE ключовим елементом у розвитку телекомунікаційної інфраструктури, яка є основою для подальшої цифрової трансформації суспільства. Таким чином, LTE відіграє важливу роль у задоволенні сучасних потреб користувачів, сприяючи підвищенню якості життя та ефективності в усіх сферах діяльності.

Технологія LTE стала однією з найбільш поширених у мобільних комунікаціях завдяки своїй здатності забезпечувати високошвидкісний доступ до Інтернету та підтримувати широкий спектр сучасних сервісів. Однак із зростанням обсягу мобільного трафіку постає питання ефективного використання обмеженого радіочастотного спектру. Особливий інтерес викликає неліцензійний спектр, який пропонує додаткові можливості для підвищення пропускної здатності мережі без значних фінансових витрат на ліцензування.

Використання LTE в неліцензійному спектрі, зокрема через стандарти LTE-U

та LAA (Licensed Assisted Access), дозволяє операторам покращити якість обслуговування та підвищити ефективність роботи мереж. Це особливо важливо в умовах сучасного інформаційного суспільства, де потреба в швидкому та стабільному зв'язку зростає щодня. Неліцензійний спектр також сприяє розвитку інноваційних послуг, таких як Інтернет речей (IoT), розумні міста та автономні системи.

Розробка методів, які забезпечують оптимальне використання неліцензійного спектру, є актуальним завданням, оскільки це дозволяє мінімізувати інтерференцію, забезпечити стабільність з'єднання та максимізувати пропускну здатність мережі. У цьому контексті дослідження підходів до адаптивного управління ресурсами та ефективної координації з іншими технологіями, такими як Wi-Fi, є важливим кроком для подальшого розвитку телекомунікаційних систем.

Метою магістерської роботи є підвищення пропускної здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку в умовах адаптивного використання радіочастотного спектру кількома технологіями радіодоступу (LTE та Wi-Fi).

Об'єктом дослідження є процес передавання даних у мережах мобільного зв'язку.

Предметом дослідження є методи підвищення ефективності використання неліцензійного радіочастото спектру.

РОЗДІЛ 1. МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LTE

1.1. Основні характеристики та принципи роботи LTE

Потреби створення LTE випливають з необхідності підвищення швидкості передачі даних у мобільних мережах [1]. З розвитком технологій та зростанням кількості користувачів мобільного Інтернету, традиційні стандарти зв'язку, такі як 3G, стали недостатніми для задоволення потреб споживачів. одночасно, швидкість передачі даних у 3G-мережах коливалася від 1 до 3 Мбіт/с, що було значно нижче вимог нових застосувань і послуг [2]. У 2008 році стандарт 3GPP Release 8 став основою для розвитку LTE, з максимальною швидкістю передачі даних до 100 Мбіт/с у напрямку вниз і 50 Мбіт/с у напрямку вгору [3]. Це стало значним кроком вперед, після чого вже в 2015 році кількість користувачів LTE-мережі досягла 1,37 мільярда [4].

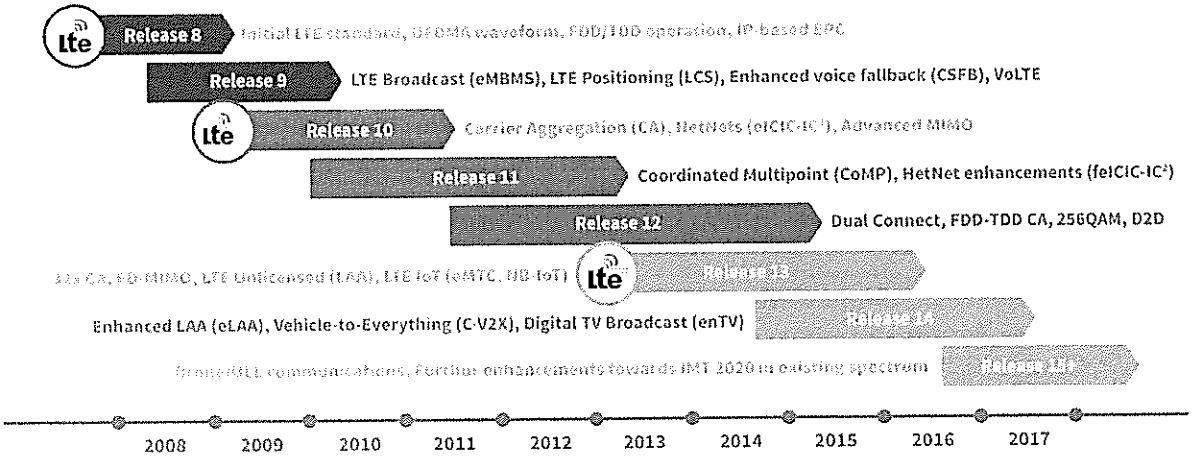


Рис. 1.1. Релізи технології LTE

Еволюція стандартів від 3GPP відбулася через кілька ключових етапів, які призвели до появи LTE Advanced і LTE Advanced Pro [5]. Стандарт Release 8, затверджений у грудні 2008 року, став основою для подальшого розвитку обладнання та пристроїв LTE[6]. Упродовж наступних років нові версії стандартів забезпечили значне підвищення швидкості передачі даних, зокрема, LTE Advanced

дозволив досягти швидкості до 300 Мбіт/с у напрямку вгору, а LTE Advanced Pro – до 1 Гбіт/с [1]. Це стало можливим завдяки використанню вдосконалених структурних сигналів та підтримки до восьми антен під час передачі даних у напрямку вниз [7]. Ці вдосконалення забезпечили велику пропускну здатність і кращу якість зв'язку (табл. 1.1).

Таблиця 1.1.

Релізи технології LTE: роки, швидкості та ключові технології

Реліз	Рік впровадження	Максимальна швидкість завантаження	Максимальна швидкість передачі	Ключові технології
Release 8	2008	300 Мбіт/с	75 Мбіт/с	OFDMA, MIMO, SC-FDMA
Release 9	2009	300 Мбіт/с	75 Мбіт/с	Improved MIMO, MBMS
Release 10	2011	1 Гбіт/с	500 Мбіт/с	Carrier Aggregation, LTE Advanced
Release 11	2012	1 Гбіт/с	500 Мбіт/с	Coordinated Multipoint (CoMP)
Release 12	2014	1.5 Гбіт/с	600 Мбіт/с	Device-to-Device (D2D), Small Cells
Release 13	2016	2 Гбіт/с	750 Мбіт/с	Enhanced IoT Support, LTE-M
Release 14	2017	3 Гбіт/с	1 Гбіт/с	Gigabit LTE, V2X (Vehicle-to-Everything)
Release 15	2018	4 Гбіт/с	1.5 Гбіт/с	NR (New Radio) Non-Standalone

Конкуренція LTE з іншими технологіями, такими як WiMAX та 3G, стала великим фактором у розвитку мобільних мереж [8]. Хоча технології 3G забезпечували певні можливості, LTE значно перевершив їх, пропонуючи вищу швидкість та кращу якість обслуговування [9]. WiMAX, хоч і пропонував високу швидкість передачі даних, не зміг зарахувати гідність конкуренції LTE в умовах швидкого розвитку мобільних технологій. Завдяки використанню нових принципів побудови мережі, LTE дозволив не лише підвищити швидкість передачі даних, але й забезпечити вибірковість та надійність з'єднання, що стало вирішальним для його популярності серед мобільних операторів і користувачів.

Радіочастотний спектр LTE

У системі LTE використовується як ліцензійний, так і неліцензійний спектр, що забезпечує частоту гнучкості при виборі параметрів для операторів зв'язку [10]. Ліцензійний спектр дозволяє операторам забезпечити стабільний і надійний зв'язок без шкоди з боку інших користувачів, тоді як неліцензійний спектр, зокрема, може бути використаний для розширення та підвищення ємності мережі [11]. Важливо відзначити, що LTE-U, що використовує неліцензійний спектр, може співіснувати з іншими технологіями, такими як Wi-Fi, що дозволяє максимально ефективно використовувати доступні ресурси [10].

Глобальні частоти для LTE варіюються від 700 МГц до 2600 МГц, що дає операторам можливість вибору оптимальних частот для своїх мереж [12]. Використання нижчих частот, таких як 700 МГц, забезпечує більший захист та кращу проникність сигналу, тоді як вищі частоти, як 2600 МГц, забезпечують високу пропускну здатність, але з обмеженим радіусом дії [13]. Це дозволяє операторам адаптувати свою інфраструктуру до специфічних умов ринку та потреб користувачів, забезпечуючи їх якісним зв'язком незалежно від місця розташування.

Однією з ключових технологій, що використовуються в LTE, є агрегування частот (Carrier Aggregation), яке дозволяє модему одночасно підключатися до кількох каналів зв'язку, об'єднуючи їх пропускну здатність [14]. Це значно досягає швидкості передачі даних, що є фактором у сучасному світі зростає попиту на

мобільний Інтернет [15]. Агрегування частот дозволяє не зменшити швидкість, але й покращити загальну продуктивність мережі, що робить LTE привабливим варіантом для операторів зв'язку, які прагнуть задовольнити потреби своїх користувачів [16].

Архітектура LTE мережі

Основними елементами архітектури мережі LTE є eNodeB і Evolved Packet Core (EPC) [1]. eNodeB виконує роль базової станції, забезпечуючи бездротовий доступ до мережі для мобільних пристроїв, а потім як EPC відповідає для управління пакетними даними. EPC спрощує структуру мережі в порівнянні з попередніми поколіннями, що дозволяє більш ефективно управляти сеансами абонентів і послугами [17]. Ця структура дозволяє LTE забезпечити високу швидкість передачі даних, до 1 Гбіт/с для стаціонарних абонентів і 100 Мбіт/с для мобільних користувачів [18]. Завдяки цій структурі, LTE здатний забезпечити підтримку ресурсів для великої кількості одночасних з'єднань.

Інтеграція LTE з іншими мережами, такими як 3G і 2G, є ще одним аспектом архітектури мережі LTE [19]. Це дозволяє LTE надавати безперервний сервіс користувачам, які переходять з однієї мережі в іншу. Завдяки цьому LTE може використовувати ресурси старої мережі для підтримки більшої кількості користувачів і зменшення завантаження нової інфраструктури. Також важливо відзначити, що LTE підтримує механізми, які не можуть реалізувати безперервний зв’язок під час зміни мережі, що має загальну якість послуг для абонентів.

Принципи роботи мережі LTE базуються на технології без комутації каналів, що дозволяє зменшити затримки та підвищити ефективність передачі даних [3]. Замість пакетів традиційної комутації каналів, LTE використовує передачу, що означає, що дані надсилаються у вигляді пакетів, які незалежно маршрутизуються через мережу. Це дозволяє LTE досягати високої швидкості передачі даних, оскільки ресурси мережі використовуються більш гнучко та ефективно. У результаті користувачі можуть отримувати послуги з високою швидкістю та з мінімальними підтримками, що є критично важливим для сучасних додатків, таких як потокове відео та онлайн-ігри.

Методи модуляції у LTE

У LTE для передачі в прямому каналі використовується метод модуляції OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), який є багатокористувальною версією OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [20]. Цей метод забезпечує ефективний розподіл смуги частот серед численних користувачів, що дозволяє одночасно передавати дані багатьма абонентами на різних піднесучих частотах. Використання OFDMA в LTE забезпечує спектральну ефективність і зменшує затримки при передачі даних, що є критичним для сучасних бездротових комунікацій. Завдяки цій технології LTE може досягти високої швидкості передачі даних, що робить її ідеальною для широкосмугових мобільних послуг.

Для зворотного каналу LTE використовується SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), який вирізняє вашу простоту в реалізації та ефективність у використанні енергії [21]. Основна перевага SC-FDMA в тому, що він знижує піковий фактор, що дозволяє зменшити споживчу потужність на мобільних пристроях. У порівнянні з OFDMA, SC-FDMA використовує один носій для передачі даних, що робить його більш привабливим для абонентських станцій, які часто мають обмежені ресурси енергії. Це забезпечує стабільніше та ефективніше з'єднання для абонентів, особливо в умовах обмеженої потужності.

Адаптивна модуляція є ще однією ключовою характеристикою LTE, що дозволяє мережі адаптувати типи модуляції в залежності від умов каналу [4]. У LTE різні схеми модуляції, такі як QPSK, 16-QAM та 64-QAM, що забезпечують гнучкість при передачі даних. Наприклад, в умовах високого рівня шуму або завад, мережа може знизити рівень модуляції до QPSK, що забезпечує стабільніше з'єднання. У той же час, за сприятливих умов, мережа може підвищити рівень модуляції до 64-QAM, що дозволяє досягти вищих швидкостей передачі. Це адаптивне управління цим модулем є місцем для забезпечення оптимальної продуктивності LTE-мережі, що забезпечує загальну якість обслуговування користувачів.

Ефективність використання радіоресурсів

Однією з фундаментальних технологій, що підвищують ефективність використання радіоресурсів у LTE, є технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) [22]. Завдяки використанню кількох антен як на стороні передавача, так і на приймачі, MIMO значно покращує пропускну здатність і надійність бездротового зв'язку [19]. Ця технологія використовує просторове рознесення та просторове мультиплексування для збільшення пропускної здатності каналу зв'язку, дозволяючи одночасно передавати більше даних, не вимагаючи додаткової пропускної здатності [23]. У результаті MIMO не тільки підвищує швидкість передачі даних, але й покращує загальну продуктивність мережі LTE, роблячи її ключовим компонентом для задоволення зростаючого попиту на високошвидкісні послуги передачі даних (табл. 1.2).

Іншим ключовим аспектом ефективного управління радіоресурсами в LTE є динамічне управління частотними ресурсами [4]. Цей метод передбачає коригування розподілу частотних ресурсів на основі умов мережі в реальному часі та попиту користувачів, гарантуючи оптимальне використання доступного спектру. Динамічне керування дозволяє гнучко розподіляти ресурси між різними користувачами, що важливо в мережі, де трафік може значно коливатися. Адаптуючись до мінливих умов, LTE може підтримувати високі рівні якості обслуговування та мінімізувати перевантаження під час пікового використання, сприяючи більш ефективній загальній продуктивності мережі [24].

Використання технології планування також життєво важливо для оптимізації трафіку в мережах LTE [25]. Алгоритми планування визначають, як ресурси розподіляються користувачам на основі різних факторів, таких як умови каналу, пріоритет користувача та необхідні швидкості передачі даних. Ця оптимізація гарантує, що користувачі отримають необхідну пропускну здатність, зберігаючи справедливість у мережі. Наприклад, удосконалені методи планування можуть визначити пріоритет користувачів із вищими вимогами до даних або тих, хто має погані умови каналу, тим самим підвищуючи взаємодію з користувачами та ефективність мережі [26]. Завдяки ефективному плануванню LTE може динамічно адаптуватися до змінного трафіку, гарантуючи, що всі користувачі отримають вигоду від покращеної якості обслуговування при максимальному використанні

радіоресурсів.

Таблиця 1.2.

Особливості технології LTE

Розділ	Основні аспекти	Технології
Радіочастотний спектр LTE	Ліцензійний і неліцензійний спектр; Глобальні частоти LTE; Агрегування частот.	Бенди з частотами: 700 МГц, 800 МГц, 1800 МГц, 2600 МГц
Архітектура LTE мережі	Основні елементи (eNodeB, EPC); Інтеграція з 3G і 2G; Принципи роботи мережі.	Evolved Packet Core (EPC), eNodeB
Методи модуляції у LTE	OFDMA для прямого каналу; SC-FDMA для зворотного каналу; Адаптивна модуляція.	OFDMA, SC-FDMA, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Ефективність використання радіоресурсів	Технологія MIMO; Динамічне управління частотними ресурсами; Планування ресурсів.	MIMO, динамічне управління частотами
Забезпечення якості обслуговування (QoS)	Пріоритизація трафіку; Мінімізація затримок у реальному часі; Оптимізація роботи при високому навантаженні.	Класи обслуговування QoS, GPRS Tunneling Protocol (GTP), Packet Data Convergence Protocol (PDCP)

Забезпечення якості обслуговування (QoS)

Забезпечення якості обслуговування (QoS) в мережах LTE є критичним аспектом, оскільки воно вимагає, як ефективно та надійно обробляються різні типи трафіку [27]. Пріоритизація трафіку на основі класів обслуговування є одним із основних методів, що дозволяє забезпечити необхідну якість обслуговування для користувачів. Мережа LTE підтримує чотири класи якості обслуговування, які включають: - Клас обслуговування для голосового трафіку - Клас обслуговування

для відео - Клас обслуговування інтерактивних даних - Клас обслуговування для фонових даних Ця класифікація дозволяє мережі ефективно керувати ресурсами, забезпечуючи пріоритетне опрацювання трафіку, що вимагає низької затримки та високої надійності [28]. Таким чином, реалізація пріоритизації трафіку забезпечує високу якість обслуговування для критичних програм, покращуючи загальні враження користувачів.

Методи мінімізації затримок в реальному часі також є класи для забезпечення ефективності QoS в мережах LTE [29]. Підтримка може суттєво вплинути на користувацький досвід, особливо при передачі відео або голосових викликів. Для зменшення ємності використовують різні технічні рішення, такі як: - Оптимізація маршрутизації даних - Використання технологій, що забезпечують швидкий доступ до ресурсів - Управління чергами в мережі Ці методи дозволяють зменшити час обробки даних та забезпечити швидкий і безперервний доступ до послуг, що є критично важливим для користувачів, які потребують реального часу [4]. Змінення затримки в реальному часі не позбавляє якості зв'язку, але й зміцнює довіру користувачів до мережі LTE.

Оптимізація роботи при високій завантажуваності мережі є ще одним ключовим аспектом забезпечення QoS в LTE [30]. Зростання кількості користувачів та обсягу даних вимагає від мережі ефективність справлятися з навантаженням. Для застосування цієї іншої стратегії, включаючи: - Динамічне управління ресурсами - Технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) - Використання технології Scheduling для оптимізації трафіку Ці стратегії мережі повинні адаптуватися до забезпечення змінених умов, забезпечуючи безперебійну роботу навіть під час пікових завантажень [27]. Оптимізація роботи мережі при високій завантаженості не тільки покращує якість обслуговування, але й дозволяє зменшити витрати на ресурси, що є місцем для операторів зв'язку.

Безпека в LTE

У сучасній технології LTE безпека є одним із досліджених аспектів, і протоколи автентифікації та шифрування, такі як EPS-AKA та IPsec, виконують ключову роль у забезпеченні цієї безпеки [31]. EPS-AKA (Evolved Packet System

Authentication and Key Agreement) забезпечує механізм автентифікації користувачів, який допоможе запобігти несанкціонованому доступу до мережі. Цей протокол дозволяє генерувати унікальні ключі шифрування для кожної сесії, що забезпечує рівень захисту даних. Водночас IPsec, що є набором протоколів для захисту даних, що передаються через IP, гарантує цільність і конфіденційність інформації [32]. Таким чином, ці протоколи спільно створюють надійний захист для користувачів мережі LTE.

Захист даних від несанкціонованого доступу є критичним місцем для підтримки безпеки в LTE [33]. За допомогою різних методів шифрування та автентифікації, таких як згадувані EPS-AKA та IPsec, мережа LTE забезпечує конфіденційність передачі даних. Це включає в себе захист особистих даних, таких як інформація про сайт та особисті повідомлення, що передаються через мережу. Крім того, інші фактори безпеки є захистом від потоку інформації та управління доступом, що дозволяє контролювати, хто має доступ до чутливих даних [34]. Таким чином, належна реалізація цих механізмів забезпечує високий рівень захисту даних у LTE.

Механізм виявлення та запобігання також є невід'ємною частиною безпеки LTE [35]. Для цього використовуйте різні системи запобігання атак (IDS) та системи запобігання атак (IPS), які аналізують мережу трафіку та виявляють шкідливі або шкідливі дії. Наприклад, системи можуть виявляти аномалії в патернах трафіку, які можуть свідчити про зловмисні спроби отримати несанкціонований доступ до мережі [36]. Своєчасне виявлення таких загроз дозволяє вжити заходів для їх нейтралізації, що є критичним для підтримки цілісності та безпеки мережі LTE.

1.2. Архітектура мереж LTE: елементи, функції та протоколи

Розширений вузол B (eNodeB) відіграє вирішальну роль як базова станція в архітектурі мережі LTE [1]. Він служить основним інтерфейсом між користувальницьким обладнанням (UE) і Evolved Packet Core (EPC), полегшуючи зв'язок і забезпечуючи мобільність абонентів [2]. eNodeB відповідає за різні функції, включаючи керування радіоресурсами, передачу даних користувача та сигналізацію. Його конструкція поєднує в собі функції як базової станції, так і контролера радіомережі, оптимізуючи роботу та підвищуючи продуктивність. Завдяки підтримці кількох частотних діапазонів eNodeB забезпечують ефективний зв'язок у різноманітних середовищах, що робить їх основним компонентом інфраструктури LTE [3] (рис. 1.2).

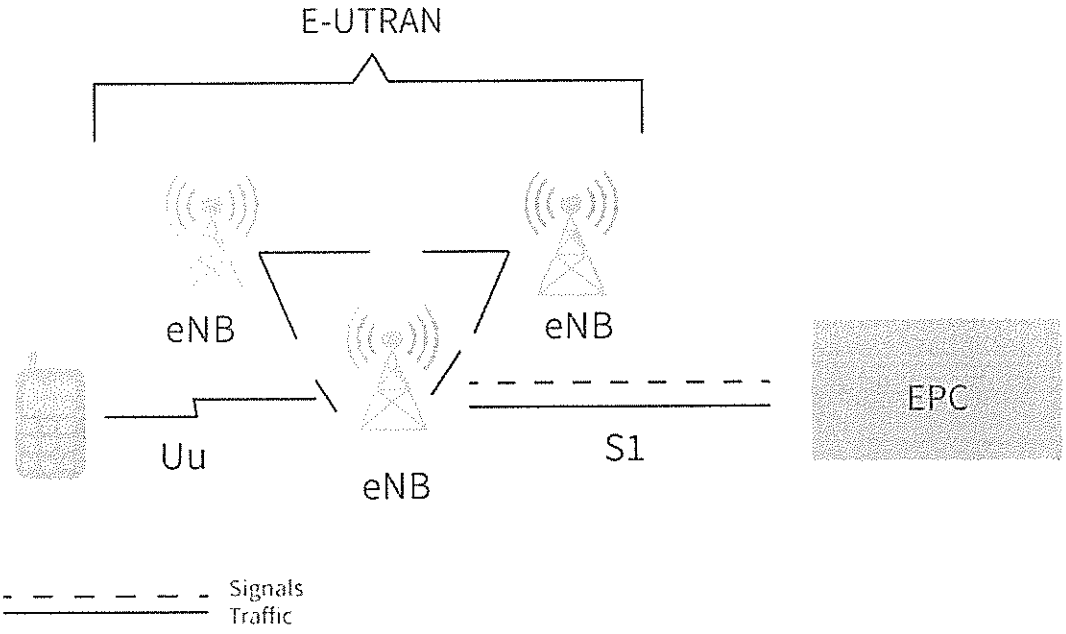


Рис. 1.2. Архітектура мережі доступу на основі технології LTE

Обладнання користувача (UE) охоплює широкий спектр клієнтських пристроїв, які підключаються до мережі LTE, включаючи смартфони, планшети та пристрої IoT [5]. Ці пристрої оснащені різними функціями, такими як голосові дзвінки, потокове відео та перегляд Інтернету, і всі вони покладаються на надійну інфраструктуру, яку забезпечує архітектура LTE. Характеристики UE відіграють

важливу роль у визначенні загальної продуктивності мережі, оскільки такі фактори, як можливості пристрою, дизайн антени та оптимізація програмного забезпечення, можуть впливати на підключення та швидкість передачі даних. Крім того, стандарт LTE дозволяє працювати різноманітним типам UE в одній мережі, забезпечуючи широкий спектр додатків і послуг, таким чином підвищуючи задоволеність користувачів і залученість [6].

Розширене пакетне ядро (EPC) діє як центральний елемент управління та маршрутизації в мережі LTE [4] (рис. 1.3). Він охоплює важливі функції, такі як керування сеансами, автентифікація користувачів і маршрутизація даних, забезпечуючи безперебійне підключення між різними мережевими компонентами. EPC призначений для керування потоком даних між eNodeB і зовнішніми мережами, таким чином оптимізуючи роботу користувача шляхом підтримки низької затримки та високої пропускної здатності даних. Будучи життєво важливим елементом керування, EPC не бере участі в прямій передачі даних; натомість він працює разом із eNodeB, щоб полегшити передачу пакетів даних. Такий поділ рівня керування та даних є однією з визначальних особливостей архітектури LTE, що сприяє її ефективності та масштабованості [5].

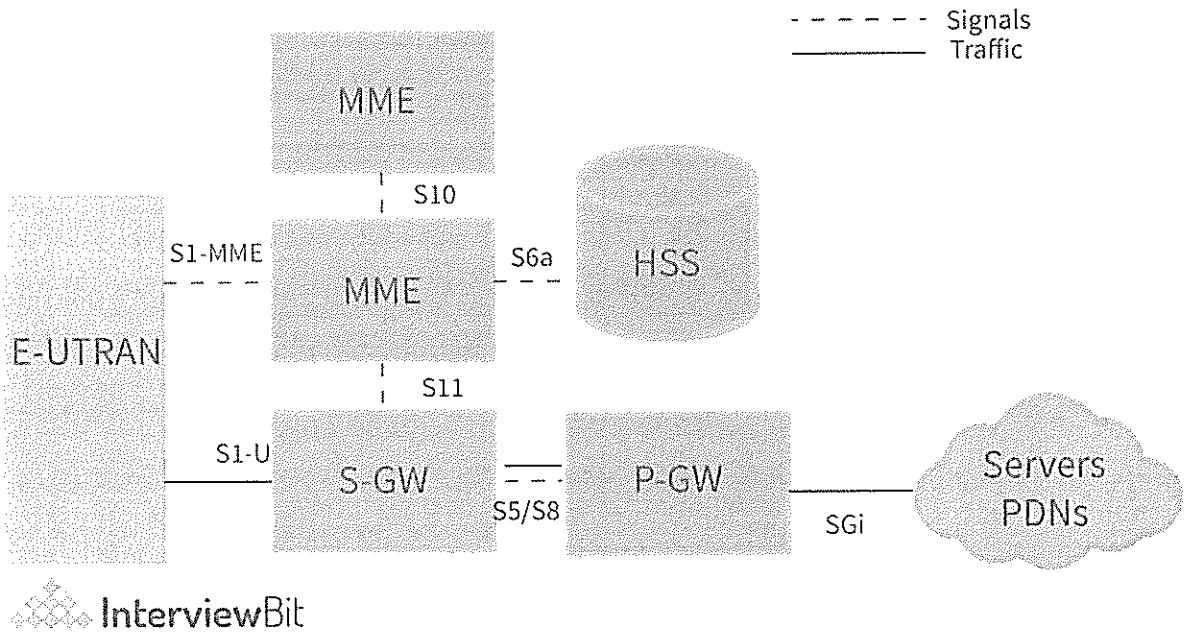


Рис. 1.3. Розширене пакетне ядро (EPC)

Функції елементів мережі LTE

eNodeB, або Evolved Node B, виконує ключову роль в архітектурі мережі LTE, надаючи доступ до радіоканалу [3]. Як базова станція, eNodeB відповідає за управління радіоресурсами та забезпечення безперебійного з'єднання між обладнанням користувача (UE) і базовою мережею. Він виконує важливі функції, такі як обробка радіочастотних (РЧ) умов, координація передачі та передача даних користувача. eNodeB також підтримує різні схеми модуляції та методи кодування для оптимізації швидкості передачі даних і підтримки якості обслуговування. Його ефективна робота має вирішальне значення для надання послуг мобільного широкосмугового доступу з високою пропускною здатністю, що робить його наріжним каменем мереж LTE. Значення eNodeB можна підсумувати таким чином: - Управління радіоресурсами - Координація прийому-передачі - Підтримка різних методів передачі даних

Суб'єкт управління мобільністю (MME) відіграє вирішальну роль в управлінні мобільністю користувачів у мережах LTE [7]. Будучи основним елементом керування, MME відповідає за керування сеансами користувача, відстеження розташування обладнання користувача та полегшення передачі між різними eNodeB. Крім того, MME обробляє автентифікацію користувачів і розподіл ресурсів, необхідних для встановлення з'єднань. Зберігаючи службову інформацію про абонентів та їхню мобільність, MME гарантує, що користувачі можуть безперешкодно переміщатися між різними зонами покриття без втрати зв'язку. Ця функція необхідна для підтримки високоякісного досвіду користувача в мобільному середовищі, де користувачі постійно перебувають у русі. - Управління сесіями користувачів - Відстеження місцезнаходження обладнання користувача - Аутентифікація та розподіл ресурсів

Обслуговуючий шлюз (S-GW) і мережевий шлюз пакетної передачі даних (P-GW) є невід'ємними компонентами архітектури LTE, які полегшують маршрутизацію трафіку в мережі [8]. S-GW діє як основний маршрутизатор даних, керуючи трафіком даних користувача та забезпечуючи його направлення до відповідного пункту призначення в мережі. З іншого боку, P-GW служить

інтерфейсом між мережею LTE та зовнішніми мережами пакетної передачі даних, такими як Інтернет. Він відповідає за розподіл IP-адрес для обладнання користувача та за забезпечення якості обслуговування шляхом керування потоками даних. Разом ці шлюзи забезпечують ефективну та надійну маршрутизацію трафіку, що є життєво важливим для підтримки продуктивності та масштабованості мереж LTE. Їх спільні функції можна виділити наступним чином: - Маршрутизація трафіку даних користувача (S-GW) - Інтерфейс із зовнішніми мережами (P-GW) - розподіл IP-адрес і управління якістю обслуговування (P-GW)

Радіомережеві протоколи LTE

Протокол RRC (Radio Resource Control) виконує критичні функції управління ресурсами радіоканалу в мережах LTE [3]. Цей протокол відповідає для створення, налаштування та управління радіозв'язком між мобільними пристроями та базовими станціями eNodeB. Однією з основних задач RRC є забезпечення ефективного використання радіочастотного спектру, що включає розподіл ресурсів для передачі даних і сигналізації. Цей процес є іншим, після чого він впливає на якість зв'язку та швидкість передачі даних, що, у свій час, завершується загальною продуктивністю мережі. - Управління радіоресурсами - Підтримка сигналізації - Оптимізація спектра

PDCP (Packet Data Convergence Protocol) грає важливу роль у зменшенні захоплення та стиснення даних у мережах LTE [9]. Цей протокол відповідає для передачі службових і контрольних даних, а також виконує функції стиснення заголовків, що забезпечує ефективність передачі інформації по радіоканалах. Крім того, PDCP забезпечує безпеку даних, реалізуючи криптографічні операції, що є особливим місцем у контексті захисту приватності користувачів та запобігання несанкціонованому доступу. Завдяки цій функції PDCP забезпечує збереження високої якості обслуговування навіть при високих навантаженнях на мережу. - Передача користувацьких даних - Стиснення заголовків - Забезпечення безпеки даних

Для контролю доступу до каналу в мережах LTE відповідає MAC (Medium Access Control) [10]. Цей протокол визначає, як пристрої можуть надавати

радіочастоти та передавати дані, що є критичним місцем для забезпечення безперебійної роботи мережі. MAC виконує функції, пов'язані з модулюванням і кодуванням, а також управлінням помилками, що знижують ймовірність втрати даних під час передачі. Ефективне управління доступом до каналу дозволяє зменшити затримки та підвищити загальну продуктивність мережі, що є для користувачів, які потребують стабільного та швидкого з'єднання. - Контроль доступу до каналу - Модуляція та кодування - Управління помилками

Протоколи ядра мережі EPC

S1-AP (S1 Application Protocol) відіграє вирішальну роль в архітектурі мережі LTE, полегшуючи зв'язок між eNodeB і MME (Mobility Management Entity) [5]. Цей протокол має важливе значення для керування сигнальними та керуючими повідомленнями, які дозволяють установлювати та підтримувати сеанси користувачів [T4】. Він працює через інтерфейс S1, який з'єднує мережу радіодоступу з основною мережею, забезпечуючи ефективну передачу важливої інформації【T2】. Завдяки оптимізації процесу підключення та оптимізації потоку даних між мережевими елементами S1-AP значно підвищує загальну продуктивність мереж LTE, особливо під час сценаріїв високого попиту, коли необхідні швидкі налаштування для підтримки якості обслуговування.

GTP (протокол тунелювання GPRS) є ключовим протоколом у базовій мережі LTE, забезпечуючи необхідне тунелювання трафіку [10]. Цей протокол дозволяє інкапсулювати пакети даних користувача в мережі, забезпечуючи безпечну та ефективну передачу інформації між різними мережевими вузлами [6]. GTP використовується як у формах GTP-C (Контроль), так і в GTP-U (Дані користувача), причому перша керує сигналізацією та керуванням сеансом, тоді як остання обробляє передачу даних користувача [11]. Ця подвійна функція необхідна для підтримки безперебійного зв'язку в мережі, що є життєво важливим для додатків, які потребують низької затримки та високої надійності, таких як голос через LTE (VoLTE) і потокове відео [3].

Diameter — ще один фундаментальний протокол у базовій мережі LTE, який в основному використовується для автентифікації, авторизації та виставлення

рахунків (AAA) [12]. Цей протокол розширює можливості свого попередника RADIUS, підтримуючи ширший спектр програм і пропонуючи більш надійні функції безпеки [1]. Diameter керує зв'язком між мережевими операторами та абонентами, забезпечуючи перевірку облікових даних користувача та відповідну оплату послуг [4]. Забезпечуючи безпечні та ефективні засоби керування сеансами користувачів і доступом до послуг, Diameter відіграє важливу роль у підтримці цілісності та надійності мереж LTE, особливо в умовах, коли попит на мобільні дані продовжує зростати [2].

Управління та сигналізація у LTE

Площина керування (CP) у мережах LTE має вирішальне значення для обробки функцій сигналізації, які полегшують зв'язок між елементами мережі [8]. Одним із основних протоколів, що використовуються в цій площині, є S1 Application Protocol (S1-AP), який встановлює зв'язок між еволюційним вузлом B (eNodeB) та об'єктом керування мобільністю (MME) [5]. Цей протокол відповідає за управління сигнальними повідомленнями, які керують мобільністю користувачів, управлінням сеансами та загальним контролем обладнання користувача в мережі. Завдяки ефективним процесам сигналізації Control Plane забезпечує ефективний розподіл ресурсів і безперебійність взаємодії з користувачем, навіть коли користувачі переміщуються між різними осередками в мережі.

На відміну від Control Plane, User Plane (UP) призначений для передачі даних користувача [4]. Протокол GPRS Tunneling Protocol (GTP) відіграє важливу роль у цьому процесі, оскільки він забезпечує тунелювання трафіку даних користувача між різними вузлами мережі. GTP гарантує, що пакети даних інкапсулюються та безпечно передаються через мережу, зберігаючи цілісність і конфіденційність спілкування користувачів [11]. Ефективне функціонування User Plane має важливе значення для надання високоякісних послуг, таких як потокове відео, голосові дзвінки та перегляд Інтернету. Оптимізуючи передачу даних, GTP безпосередньо впливає на взаємодію з користувачем, роблячи його ключовим компонентом архітектури LTE.

Процеси встановлення та звільнення з'єднання в мережах LTE є фундаментальними для підтримки ефективних потоків зв'язку [5]. Ці процеси включають низку обмінів сигналами, які ініціюють, змінюють і завершують сеанси користувача. Під час налаштування з'єднання контрольна площина координує дії з користувальницькою площиною, щоб виділити необхідні ресурси та встановити шляхи даних для трафіку користувачів. І навпаки, коли сеанс більше не потрібен, процес випуску гарантує, що ресурси звільняються та можуть бути перерозподілені іншим користувачам, таким чином оптимізуючи ефективність мережі [12]. Таке динамічне керування з'єднаннями не тільки підвищує задоволеність користувачів, надаючи швидке та надійне обслуговування, але також сприяє загальній стабільності та продуктивності мережі LTE.

Безпека архітектури LTE

Однією з ключових складових систем безпеки LTE є автентифікація користувачів через EPS-AKA (Evolved Packet System Authentication and Key Agreement) [1]. Ця процедура забезпечує перевірку особистих мобільних пристроїв, які підключаються до мережі, гарантуючи, що тільки авторизовані користувачі можуть отримати доступ до послуг. Вона використовує комбінацію унікальних ідентифікаторів, ключів шифрування та випадкових чисел для створення безпечного каналу зв'язку. Завдяки такому підходу EPS-AKA не підтверджує особу користувача, але й запобігає можливим атакам, таким як підробка ідентифікаторів, що знижує ризик несанкціонованого доступу до мережі.

Шифрування даних у радіомережі також є критичним аспектом безпеки LTE, де використовують алгоритми SNOW 3G і AES [5]. Ці методи шифрування забезпечують конфіденційність переданих даних, захищаючи їх від перехоплення та несанкціонованого доступу. SNOW 3G є спеціально розробленим алгоритмом для мобільних мереж, який гарантує високий рівень безпеки, в той час як AES (Advanced Encryption Standard) забезпечує надійний захист на рівнях передачі даних. Завдяки цим технікам, користувачі можуть бути впевнені в безпеці своїх даних під час передачі радіопосигналів, що є особливою в умовах зростання кіберзагроз.

Захист сигналізації в LTE реалізується через використання протоколу IPsec, що забезпечує безпечну передачу даних через протокол Інтернету [13]. IPsec є набором протоколів, які забезпечують шифрування та аутентифікацію даних, що передаються між мережевими пристроями. Цей протокол забезпечує цільність та конфіденційність сигналізації, що особливо важливо для захисту від атак на мережеву інфраструктуру. Завдяки впровадженню IPsec, LTE забезпечує надійний захист сигналізації, що підтримує стійкість мережі до зовнішніх загроз і забезпечує безпечний обмін інформацією між користувачами та мережею.

1.3. Особливості використання LTE у ліцензованому спектрі

Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку (НКРЗІ), є ключовим регуляторним органом, який відповідає за управління і розподіл частотного спектра в Україні. Її діяльність спрямована на забезпечення ефективного використання спектра, підтримку конкуренції, розвиток новітніх технологій та забезпечення доступності послуг для громадян.

Основні функції НКРЗІ у розподілі спектра

1. Планування та регулювання використання частот

- Розробка і затвердження національного плану розподілу радіочастотного ресурсу, який визначає порядок використання частотного спектра.
- Забезпечення гармонізації частотного спектра з міжнародними стандартами (наприклад, рекомендаціями ITU, CEPT).
- Визначення частотних діапазонів для ліцензованого та неліцензованого використання.

1. Розподіл частот серед операторів

- Проведення аукціонів або тендерів для розподілу частотного ресурсу серед операторів зв'язку.

- Встановлення правил користування спектром, включаючи обмеження на потужність передавачів і захист від інтерференції.
- Видача ліцензій операторам на право використання певних частотних діапазонів.

3. Контроль за дотриманням ліцензійних умов

- Моніторинг ефективного використання частот операторами.
- Виявлення та запобігання несанкціонованому використанню радіочастотного спектра.
- Вжиття заходів у разі порушення операторами ліцензійних умов або правил використання спектра.

4. Сприяння розвитку новітніх технологій

- Забезпечення умов для впровадження технологій LTE, 5G та IoT шляхом виділення необхідних частот.
- Перерозподіл частотного спектра з урахуванням розвитку технологій (наприклад, вивільнення частот від старих технологій 2G для 4G та 5G).

5. Забезпечення конкуренції

- Надання рівного доступу до частотного спектра для всіх учасників ринку.
- Попередження монополізації частотного ресурсу великими операторами.
- Стимулювання розвитку нових гравців на ринку мобільного зв'язку.

6. Міжнародна координація

- Участь у міжнародних переговорах і угодах щодо використання спектра на прикордонних територіях.
- Гармонізація частотного планування з сусідніми країнами для уникнення перешкод.

Особливості використання LTE у ліцензованому спектрі. Контроль доступу

Виключний доступ до частоти є критичним аспектом використання LTE у ліцензованому спектрі, після чого він забезпечує мінімальну інтерференцію між ефективними користувачами[1]. Це дозволяє операторам зберегти якість зв'язку, уникати перешкод і забезпечити стабільне з'єднання для своїх абонентів. В умовах, де конкуренція за обмежений спектр зростає, виключний доступ стає необхідним

для забезпечення надійного та ефективного використання частоти. Крім того, за рахунок користувацького доступу оператори можуть оптимізувати ваші мережі, що призводить до підвищення якості обслуговування та підвищення задоволеності користувачів.

Захист спектра від несанкціонованого використання є ще важливою спектральною складовою контролю доступу до ліцензованого [2]. Несанкціоноване використання може призвести до серйозних проблем, включаючи зниження якості зв'язку, підвищення інтерференції та якісь безпекові загрози. Регуляторні органи зобов'язані здійснювати моніторинг і контроль використання спектра, забезпечуючи, щоб усі користувачі були дотримані встановлених норм і правил. Це включає в себе заходи щодо впровадження та усунення несанкціонованого доступу, які у своєму часі підтримують цілісність та ефективність телекомунікаційних мереж.

Розподіл прав на спектр через регуляторні органи гарантує справедливе і раціональне використання радіочастоти [3]. Цей процес включає в себе не тільки надання ліцензій, але й регулярний моніторинг виконання умов використання спектра з ліцензіатів. Регулятори контролю за дотриманням технічних вимог, що стосуються експлуатаційних умов, а також категорій користувачів радіочастотного спектру. Це дозволяє забезпечити ефективне управління ресурсами та підтримувати баланс між користувачами, що у своєму випадку сприяє розвитку телекомунікаційної інфраструктури та покращенню зв'язку для споживачів.

Розподіл спектра

Основні розділи для LTE включають низькі частоти (700–800 МГц), середні (1800–2100 МГц) та високі (2600 МГц) [4] (табл. 1.3). Кожен із цих частин має свої переваги, що впливають на покриття та якість зв'язку. Наприклад, низькі частоти забезпечують більш широкий радіус покриття та краще проходження сигналу через перешкоди, що робить їх ідеальними для сільських районів. Середні частоти, такі як 2100 МГц, забезпечують баланс між покриттям і швидкістю передачі даних, з покриттям приблизно 10-12 км [5]. Високі частоти, і хоча забезпечують вищу швидкість передачі даних, мають обмежене покриття і потребують більшої

кількості базових станцій для досягнення належного рівня обслуговування.

Таблиця 1.3.

Ліцензовані частотні діапазони LTE в Україні

Частотний діапазон (МГц)	LTE Band	Опис використання
900 / FDD	Band 8	Використовується для покриття великих територій, зокрема сільської місцевості, завдяки великому радіусу дії базових станцій (до 26 км).
1800 / FDD	Band 3	Забезпечує баланс між радіусом дії та ємністю мережі, використовується як у містах, так і в сільській місцевості.
2100 / FDD	Band 1	Частково використовується для LTE, очікується повний рефармінг для збільшення пропускної здатності.
2600 / TDD	Band 7	Застосовується в густонаселених районах для забезпечення високої пропускної здатності, має менший радіус дії (до 2,5-3 км).

Використання FDD (Frequency Division Duplex) і TDD (Time Division Duplex) є великим аспектом розподілу частоти для двонаправленого зв'язку [6]. У системах FDD передача та прийом відбуваються на двох окремих симетричних частотних каналах, що дозволяє зменшити затримки та забезпечити стабільний зв'язок. Наприклад, при ширині каналу в 20 МГц в LTE FDD, 15 МГц виділяється для завантаження, а 5 МГц — для вивантаження [7]. У свою чергу, TDD не вимагає парного спектру після передачі та відвідування одного з каналів, які можуть бути вигідними в умовах обмеженого спектра [8]. Такий розподіл частот дозволяє операторам оптимізувати використання ресурсів та підвищити ефективність мережі.

Аукціони та тендери є методами виділення частоти для операторів, що дозволяють забезпечити справедливий доступ до спектра [9]. В Україні оператори

отримали право на використання мережі на частоті 15 років, що відкриває можливості для інвестицій у розвиток своїх [9]. Процес аукціонів забезпечує не тільки конкурентність серед операторів, але й спектр захисту від несанкціонованого використання, що є одним з аспектів регуляторної політики [10]. В результаті такий підхід підвищує якість послуг та забезпечує стабільний розвиток ринку мобільного зв'язку.

Переваги використання

Однією з головних переваг використання LTE у ліцензованому діапазоні є його надзвичайна продуктивність, яка підтримує швидкість передачі даних до 4 Гбіт/с[11]. Така висока пропускна здатність дозволяє користувачам швидко завантажувати великі файли, транслювати відео високої чіткості без буферизації та легко грати в онлайн-ігри в реальному часі. Ефективність технології LTE полягає в її здатності збалансувати пропускну здатність і затримку, гарантуючи, що навіть у перевантажених мережах користувачі отримають незмінно високу якість послуг. Наприклад, хоча середня швидкість може змінюватися, LTE зазвичай забезпечує швидкість завантаження в діапазоні від 20 до 150 Мбіт/с [12]. Цю мінливість можна пояснити умовами мережі та кількістю підключених пристроїв, але базова інфраструктура розроблена таким чином, щоб максимізувати продуктивність, дозволяючи користувачам використовувати весь потенціал свого інтернет-з'єднання.

Іншою значною перевагою LTE є його здатність забезпечувати стабільне з'єднання в густонаселених районах[13]. У міру того, як міське середовище стає все більш людним, попит на надійне бездротове підключення зростає. Технологія LTE вирішує цю проблему, розгортаючи мікростільники, які є меншими базовими станціями, які покращують покриття та пропускну здатність у обмежених географічних зонах. Ці мікростільники особливо ефективні в міських умовах, оскільки вони можуть надавати високоякісні послуги, навіть коли багато пристроїв одночасно підключено до мережі. Забезпечуючи стабільне з'єднання, LTE дозволяє користувачам підтримувати продуктивність і отримувати доступ до основних послуг без перерв, навіть у часи пікового використання. Ця надійність має

вирішальне значення як для особистої, так і для професійної діяльності, особливо в ситуаціях, коли зв'язок необхідний для безпеки та спілкування.

Крім того, LTE полегшує пріоритезацію трафіку для критично важливих додатків, покращуючи загальний досвід користувача під час сценаріїв високого попиту[11]. Ця можливість особливо важлива в контекстах, де життєво важлива своєчасна комунікація, наприклад у службах екстреної допомоги та програмах охорони здоров'я. Розрізняючи різні типи мережевого трафіку, LTE може гарантувати, що високопріоритетні дані, такі як голосові виклики чи екстрені сповіщення, оброблятимуться першими. Така пріоритезація не тільки підвищує ефективність мережі, але й зменшує затримку для основних служб, гарантуючи, що користувачі можуть покладатися на свої з'єднання, коли це найбільш важливо[14]. Таким чином, здатність LTE ефективно керувати мережевим трафіком і визначати пріоритети для нього сприяє міцності та надійності зв'язку як у повсякденних, так і в критичних ситуаціях.

Використання агрегації спектра (Carrier Aggregation)

Об'єднання низьких і високих частот є сегментом агрегації спектра, що забезпечує оптимальне покриття для користувачів[15]. Використання низькочастотного спектру дозволяє досягти більшого радіусового покриття, тоді як високочастотний спектр забезпечує вищу швидкість передачі даних. Це підключення дозволяє операторам мобільного зв'язку створювати більш ефективні мережі, здатні обслуговувати значну кількість користувачів одночасно. Наприклад, у густонаселених районах, де висока швидкість та стабільне з'єднання є критичними, агрегація низьких і високих може суттєво підвищити якість обслуговування. Такий підхід також забезпечує: - Підвищення швидкості передачі даних - Зміна мертвих зон покриття - Підвищення надійності з'єднання

Спектр агрегації також забезпечує пропускну здатність мережі, дозволяючи досягти швидкості до декількох Гбіт/с[16]. Цей аспект є особливим вмістом у контексті зростаючого запиту на дані, більшість користувачів прагнуть отримати швидкий доступ до ресурсів Інтернету, потокового відео та інших важливих послуг. Завдяки агрегації оператори можуть використовувати різні комбінації, що

забезпечують більш ефективне використання частот радіоресурсів. Якщо мережа використовує кілька частот одночасно, це дозволяє: - Збільшити загальну пропускну здатність системи - Оптимізувати використання наявних частот - Змінити затори в мережі

Зменшення затримок і підвищення ефективності для користувачів є ще важливою перевагою використання агрегаційних спектрів[17]. Висока пропускна здатність, отримана завдяки об'єднаній частоті, дозволяє зменшити затримки в передачі даних, що є критичним для таких програм, як відеоконференції та онлайн-ігри. Це досягається за рахунок підвищення трафіку управління, що займає пріоритетність критично важливих добавок. Як результат, користувачі підтримують: - Швидше завантаження контенту - Поліпшену якість зв'язку - Зменшення часу реакції в інтерактивних додатках Загалом, агрегація спектра є ключовим елементом для забезпечення високої продуктивності LTE-мереж у ліцензованому спектрі.

Обмеження та виклики

Однією з основних фінансових перешкод для операторів мобільного зв'язку в Україні є висока вартість ліцензій на користування радіочастотою[18]. Наприклад, компанія Lifecell витратила 463 мільйони гривень на отримання частоти в функціях 1935-1940/2125-2130 МГц[19]. Ця величезна фінансова інвестиція може стати значним бар'єром для нових гравців на ринку, які прагнуть розширити свої послуги в LTE-середовищі. У ваших результатах багато нових операторів можуть бути неспроможними конкурувати з уже усталеними гравцями, такими як Київстар, які також отримали ліцензії на розвиток зв'язку 4G[20]. Таким чином, висока вартість ліцензії обмежує можливості для інновацій і розвитку в індустрії зв'язку.

Обмежений доступ до спектра для нових операторів також представляє серйозну проблему для розвитку LTE у ліцензованому спектрі[21]. В умовах, коли вже існуючі оператори займають значні частини доступного спектру, новим учасникам важко отримати ресурси для надання послуг. Це, у свою чергу, призводить до монополізації ринку і знижує конкуренцію, що негативно впливає

на якість послуг, які можуть бути запропонованим споживачам[22]. Обмежений доступ до частоти також забезпечує впровадження нових технологій і послуг, які могли б підвищити ефективність і якість зв'язку.

Дефіцит частоти в густонаселених регіонах є ще одним місцем виклику для операторів мобільного зв'язку в Україні[23]. У містах з високою щільністю населення, де попит на мобільний Інтернет значно зростає, наявних частот недостатньо для забезпечення стабільного та швидкого з'єднання[24]. Це може призвести до великого завантаження в мережу та підвищення затримок, що негативно впливають на користувацький досвід. Оператори повинні шукати нові рішення для оптимізації використання доступного спектру, включаючи впровадження технологій, які можуть більш ефективно розподіляти частоти та зменшувати затримки в обслуговуванні користувачів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОД ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LTE В НЕЛІЦЕНЗІЙНОМУ РАДІОЧАСТОТНОМУ СПЕКТРІ

2.1. Особливості архітектури з кількома рівнями покриття

Централізація мережі радіодоступу є ключовою для майбутніх мобільних мереж, щоб задовольнити величезний попит на мобільний трафік, а також зменшити обсяги капітальних та операційних витрат, з якими стикаються оператори. Як показано на рис. 2.1, нова централізована архітектура стільникових мереж на основі хмарних обчислень, яка підтримує поточні та майбутні стандарти бездротового зв'язку. Це відбувається шляхом відокремлення модуля формування сигналів (BaseBand Unit, BBU) від пристроїв радіодоступу та міграції BBUs у хмару, утворюючи пул BBU для централізованої обробки. Це забезпечує більшу гнучкість та масштабованість з точки зору розміщення додаткових віддалених радіоприймачів (Remote Radio Head, RRH) у порівнянні з традиційними мережами радіодоступу.

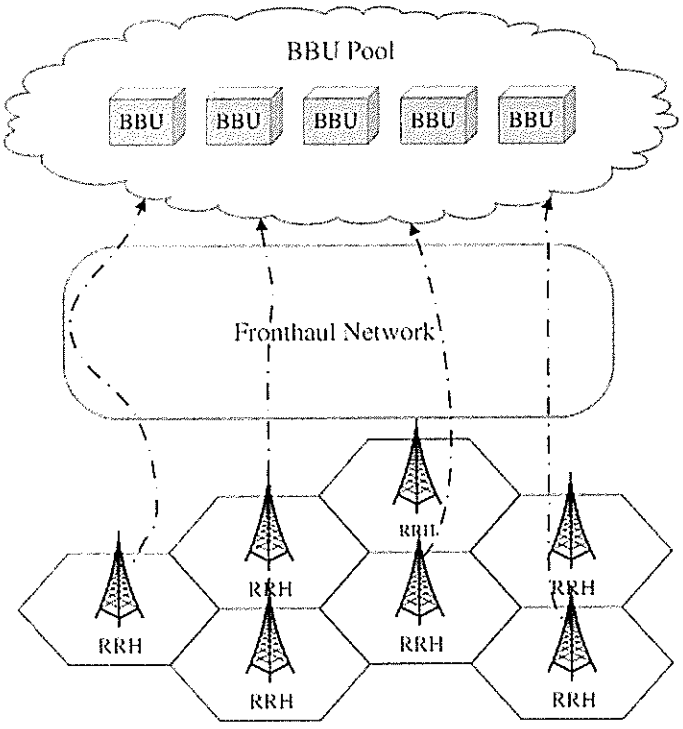


Рис. 2.1. Архітектура хмарної мережі радіодоступу

Як важливий сценарій системи 5G, розгортання надщільної мережі (Ultra-Dense Networks, UDN) на основі C-RAN відіграватиме дуже важливу роль. Зокрема, розробка UDN передбачає спільне обговорення різних питань, серед яких управління/координація інтерференцією, управління мобільністю, відключення контрольних та користувацьких планів, зворотній зв'язок, а також інтеграція/взаємодія технологій багатоканального доступу (multi-Radio Access Technology, RAT). У цьому випадку C-RAN буде відігравати важливу роль у внутрішніх високошвидкісних схемах координації низької латентності та центральній обробці, необхідній для їх реалізації.

Початковий трафік для UDN повинен мати значну роль у зведенні та відправленні трафіку даних між ланкою радіопередачі та сегментом магістральної мережі. В даний час технології мережі зворотного зв'язку переважно включають мікрохвилі, мідні та волоконні канали передачі тощо. Оператори зазвичай вибирають технологію зворотного зв'язку відповідно до їх потреб у сенсі системної пропускної здатності, надійності, вартості та періоду розгортання.

Провідний зворотний зв'язок - це технологія, заснована на x-цифрових абонентських лініях (x-Digital Subscriber Line, xDSL) або оптичному волокні. Згідно зі статистикою, приблизно 20% всіх поточних розгортань - це xDSL на основі міді та 30% - це волоконно-оптичні. Деякі види оптоволоконного зв'язку можуть пропонувати практично необмежену пропускну здатність на великих відстанях, як показано в таблиці 2.1, що можна назвати «ідеальним» зворотним зв'язком. Рівень пропускної здатності до 100 Мбіт/с може бути гарантований лише до 500 мс зі зворотним зв'язком на основі міді, який, швидше за все, буде витіснений з цієї причини, а також через нездатність масштабувати з економічно ефективним способом з великою кількістю базових станцій.

Бездротовий зворотний зв'язок – це технологія, що базується на мікрохвильовій, Wi-Fi та потенційно іншій технологіях повітряного інтерфейсу. Сьогодні мікрохвилі становлять близько 50% усіх поточних зворотних зв'язків. Такий зворотній зв'язок широко використовується в Європі і, очікується, що така

ж частка збережеться і в наступні роки. Бездротовий зворотний зв'язок буде корисним для мобільних мереж, особливо для UDN, через його помірні витрати на встановлення та відносно короткий час розгортання.

Таблиця 2.1

Пропускна здатність мереж мобільного зв'язку

	Технологія зворотного зв'язку	Затримка (у один кінець)	Пропускна здатність
Ідеальний зворотній зв'язок	Оптичне волокно	<2.5 мс	> 10 Гбіт/с
Неідеальний зворотній зв'язок	Оптичне волокно	10-30 мс	10 Мбіт/с – 10 Гбіт/с
	Оптичне волокно	5-10 мс	100 – 1 000 Мбіт/с
	Оптичне волокно	2-5 мс	50 Мбіт/с – 10 Гбіт/с
	xDSL	15-60 мс	10 – 100 Мбіт/с
	Кабель	25-35 мс	10 – 100 Мбіт/с
	Бездротовий зворотній зв'язок	5-35 мс	10 – 100 Мбіт/с, до Гбіт/с

Крім того, хоча схема зворотного тракту на основі волоконно-оптичного кабелю є кращою за пропускною спроможністю та затримкою, коли розглядаються проблеми зворотного зв'язку для UDN, бездротовий зворотний зв'язок має значні переваги перед дротовим з точки зору розгортання. Також добре підключати та запускати базові станції. Тому гібридна архітектура зворотного трафіку, яка включає дротові та безпроводові параметри, повинна бути інтелектуальною для UDN.

Бездротова сіткова мережа, яка є гібридною архітектурою зворотного трафіка, спрямована на побудову високошвидкісної, високоефективної та самодостатньої бездротової мережі передачі між базовими станціями для того, щоб відповідати

вимогам щодо високих швидкостей передачі даних та трафіку. Бездротова мережа також є ключовою мережевою технологією для сценаріїв UDN у мережі 5G. На рис. 2.2 показана безпровідна коміркова мережа 5G. З точки зору зворотного зв'язку, основна мережа складається з дротового та бездротового зворотних зв'язків. Базові станції, які працюють як шлюзи, пов'язані з основною мережею дротовим зворотним зв'язком; водночас безпровідні базові станції зворотного зв'язку пов'язані між собою бездротовим зворотним зв'язком, який утворює мережу бездротової сітки. Базова станція бездротового зворотного зв'язку може передавати дані інших базових станцій під час передачі своїх даних. Базові станції бездротового зворотного зв'язку можуть швидко обмінюватися інформацією обслуговуваних користувачів, ресурсами передачі тощо через бездротові мережі та приймати координаційні рішення для забезпечення високої продуктивності та послідовної служби для користувачів.

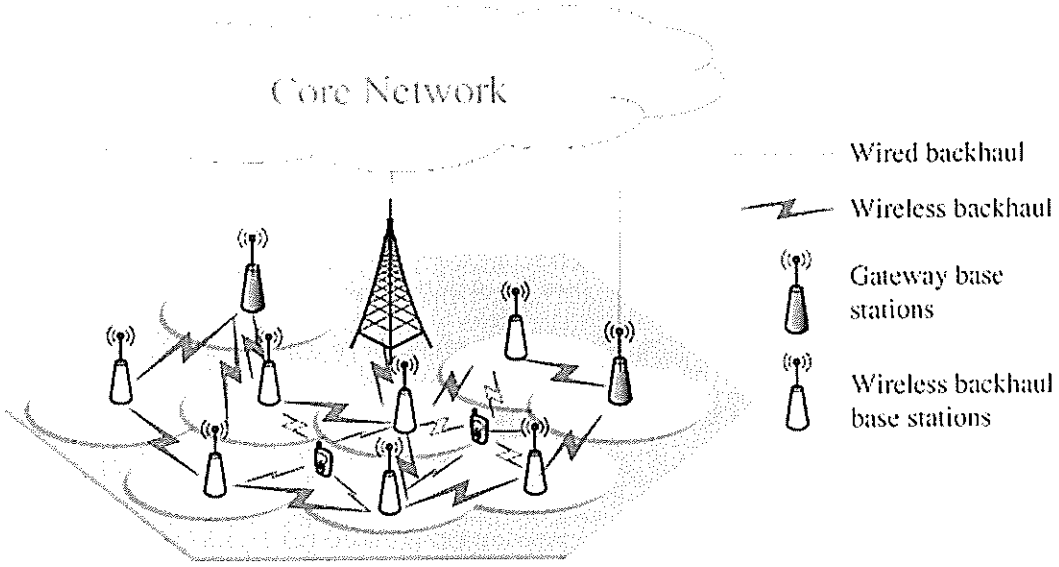


Рис. 2.2. Стільник безпровідної мережі

Для кращого розгортання мережа бездротової сітки може бути побудована з ієрархічною зворотною трасою, як показано на рис. 2.3, де різні базові станції позначаються шарами. Перший шар зворотного зв'язку включає макроелементи та інші дрібні клітини, які мають проводовий зворотний тракт. Малі клітини, що належать до другого каналу зворотного зв'язку, з'єднані з базовими станціями в

першому каналі зворотного зв'язку з бездротовою передачею з одним хопом. Аналогічно, маленькі клітини, що належать до третього і наступних шарів, з'єднані з верхнім шаром за допомогою одномоментної бездротової передачі. Ця архітектура поєднує в собі дротовий та бездротовий зворотний зв'язок разом з фіксованою або адаптивною структурою, яка може забезпечити легкий і мережевий режим з підключенням і відтворенням.

З точки зору структури трансмісії зворотного потоку, бездротовий зворотний зв'язок включає підходи типу точка-точка (Point-To-Point, PTP) та точка-багатоточка (Point-To-MultiPoint, PTMP). Архітектура включає в себе безпровідну схему PTP з адаптивною архітектурою зворотної траєкторії, яка може адаптуватися до балансу навантаження серед усіх маленьких комірок. В цій архітектурі розглядаються три топології:

1) топологія дерева з єдиним вузлом шлюзу, який з'єднує мережу зворотного зв'язку з магістральною волоконною мережею;

2) декілька паралельних вузлових шлюзів;

3) узгоджена топології сітки з надлишковими посиланнями.

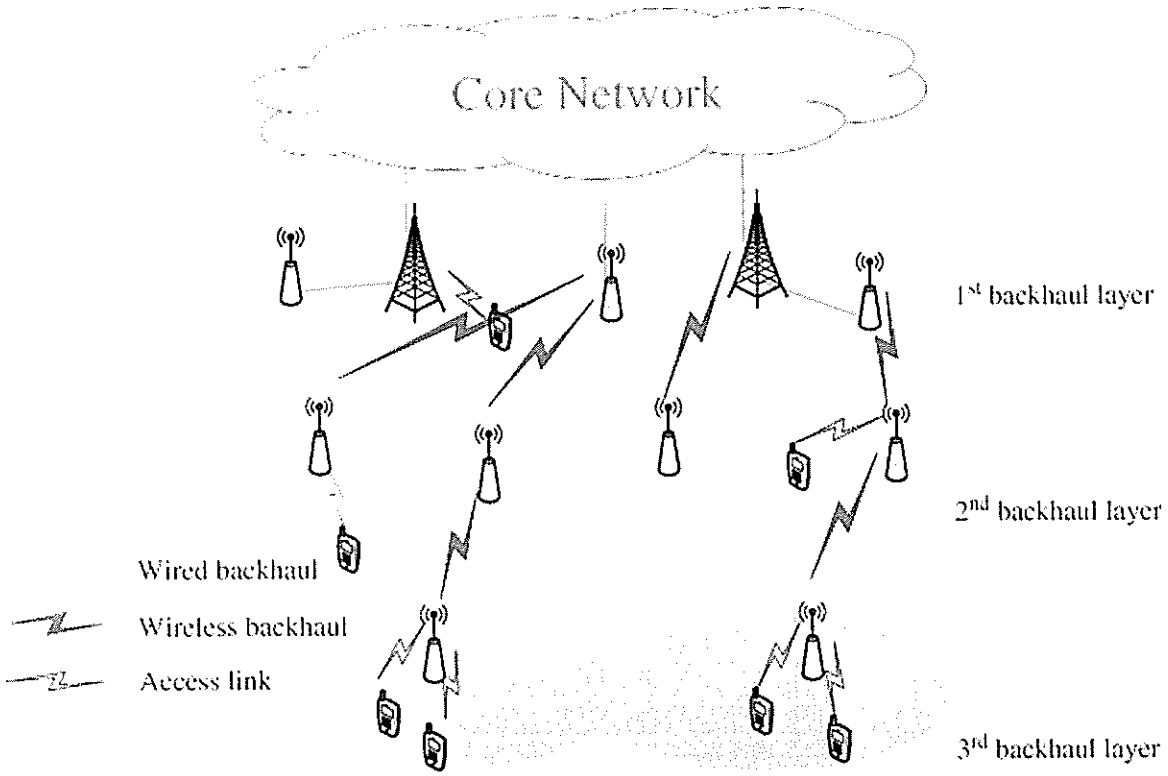
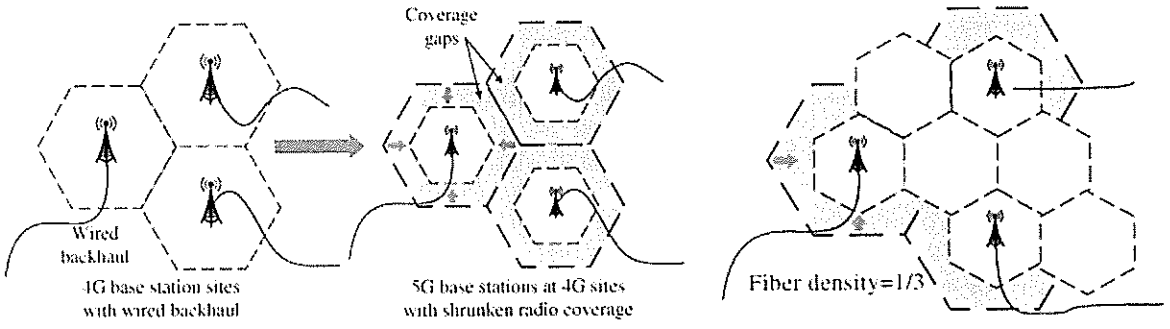


Рис. 2.3. Ієрархія архітектури зворотного зв'язку

У цьому типі архітектури різні частоти можуть бути призначені для різних частин зворотної мережі, щоб задовольнити мінливі умови руху та придушувати перешкоди. Ця адаптована РТР архітектура дуплексного розподілу частот (Frequency Division Duplex, FDD) для малих мобільних комірок зворотного тракту дозволяє не лише змінювати загальну топологію зворотного зв'язку, але й надає змогу кожній окремій лінії зворотного тракту змінювати свою частоту для задоволення вимог до трафіку та пом'якшення перешкод.

Що стосується витрат на розгортання, то було б корисно, якщо існуючі місця могли б бути використані повторно для розгортання 5G базових станцій. На основі цього принципу проектування бездротовий зворотний зв'язок використовується для підключення 5G базових станцій на нових та старих об'єктах, як це показано на рис. 2.4,а. Припускаючи, що зворотний трафік для волокон на оригінальні 4G-місця доступний, і на нових місцях не буде розгорнуто додаткового зворотного тракту, залежно від того, як клітини будуть укладені, то результуюча щільність волокон може становити 1/3, тобто один з кожних трьох 5G базових станцій розфасовується - як показано на рис. 2.4,б. Архітектура включає в себе технологію вхідного діапазону мікрохвильової зворотної траєкторії, в якій дві нові 5G базові станції з'єднуються з розгалуженою базовою станцією через бездротовий зворотний тракт.



а) б)

Рис. 2.4. Структура зворотного тракту централізованої мережі радіодоступу 4G – а) та мережі радіодоступу 5G – б)

Хоча ліцензований спектр є основою для операторів мобільного зв'язку в

рішенні проблеми 1000х даних, пристосування використання неліцензійного спектра стає все більш важливим, щоб реагувати на зростання трафіку економічним чином.

Кращий спосіб для операторів мобільного зв'язку використовувати неліцензійний спектр є його агрегування його з LTE каналом в ліцензійному спектрі.

Є два основні підходи використання неліцензійного спеткру в гетерогенних мережах мобільного зв'язку:

1. Об'єднання каналів LTE та Wi-Fi використовуючи частотні смуги 2.4 ГГц та 5 ГГц.

2. Розгортання LTE у неліцензійному частотному діапазоні 5 ГГц (LTE-U).

Обидва ці варіанти забезпечують більш високу пропускну здатність і підвищується зручність роботи через єдину уніфіковану мережу (в порівнянні з окремою LTE і Wi-Fi мережами).

Вибір між цими двома варіантами агрегування диктується існуючими активами операторів а також їх планами розгортання, очікується що багато операторів використовуватимуть обидва підходи.

LTE - Wi-Fi об'єднання каналів потребує підтримки обох пристроїв і мережевих сторін. На стороні пристрою агрегація відбувається глибоко на модемному рівні. На мережевій стороні це може бути або між окремими або між спільно розташованими (але скоординованими) Wi-Fi і LTE Wi-Fi точками доступу access points (APs). LTE - Wi-Fi об'єднання каналів є частиною більшої конвергенції, що вже почала відбуватися і є визначеною для 3GPP Rel 13.

LTE - Wi-Fi об'єднання каналів було продемонстроване на MWC 2015 року і надалі знаходиться у розробках спільно з різними командами та партнерами.

LTE Неліцензійний у вигляді LTE-U чи LAA пропонує як можливість стислу агрегацію. Це може забезпечити двох разову або навіть і більшу місткість і краще покриття ніж Wi-Fi. LTE Неліцензований розроблений для цілковитого співіснування з Wi-Fi з функціями які виходять за рамки мінімальних вимог, включаючи нормативні регулюючі стандарти і тестування на погодженість. LTE

Неліцензований надає кілька варіантів розгортання для операторів. У таких країнах, як США, Корея та Індія, LTE-U може бути розгорнуто з використанням існуючого Rel 10/11/12. В Європі і Японії, обидва з яких мають «Listen Before Talk» (LBT) нормативні вимоги, потрібна зміна стандарту котрий в даний час стандартизований як Rel. 13 і називається Licensed Assisted Access (LAA).

Мобільна індустрія показала сильну підтримку LTE-U і LAA з різного роду випробуваннями і анонсами нової продукції. Qualcomm Technologies, Inc. (QTI) є одним із засновників форуму LTE-U, що створений для співпраці між гравцями галузі, сформованих для узгодження специфікацій. QTI оголосила LTE-U пристрій і мало коміркові рішення. На MWC 2015 було продемонстровано ефективність LTE-U і LAA і як вони будуть співіснувати з Wi-Fi.

LTE-Wi-Fi агрегування каналів і LTE-U є рушійними інструментами для операторів мобільного зв'язку в рішенні 1000х завдання (зростання трафіку). Крім операторів мобільного зв'язку, Wi-Fi буде залишатися основним варіантом для приватного і корпоративного доступу до мережі на довгі роки.

Для операторів, спрямованих на вирішення проблеми 1000х, ліцензований спектр є основою. У той самий час, використання доступного неліцензійного спектру з користю, має також надзвичайно важливе значення. Багато операторів вже розгорнули свої власні мережі Wi-Fi або працюють з провайдерами третіх сторін чи роблять і те і інше. Але завдання полягає у створенні безперебійної мережі, а так як Wi-Fi мережі в багатьох випадках не є інтегровані з мережами 3G/4G це наразі проблематично. Тому це робить важким для пристроя пошук і з'єднання до мережі без втручання користувача. Крім того, мобільні оператори не мають ніякого контролю над якістю обслуговування. Обидва 3GPP і Wi-Fi співтовариства (WFA і ін) працюють в напрямку тіснішої між мережевої взаємодії LTE - Wi-Fi. Результат конвергенції показаний на рис. 2.5.

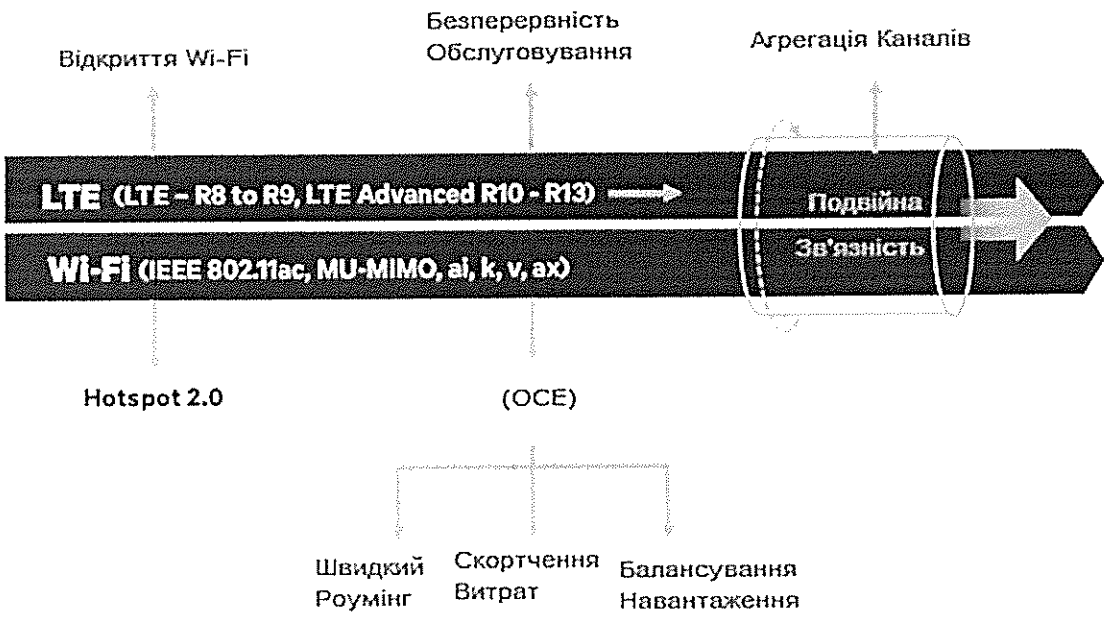


Рис. 2.5. 3GPP і Wi-Fi працюють в напрямку посилення міжмережевої взаємодії LTE і Wi-Fi

Елементи цієї "тісної" між мережевої взаємодії діапазонів, є дозвіл мати безперебійний відкритий Wi-Fi та безперервне обслуговування і об'єднання каналів . Наприклад, Hotspot 2.0, дозволяє операторам розширити аутентифікацію SIM для Wi-Fi, а також розгорнутися в комерційних мережах.

Wi-Fi швидко розвивався протягом останнього десятиліття, і продовжує розвиватися, успішно пропонуючи високу швидкість передачі даних, потужність і призначений для досвідчених користувачів.

Остання версія стандарту 802.11ac по справжньому ламає бар'єр в 1 Гбіт/с. Наступна версія, 802.11ax буде сприяти подальшому підвищенню продуктивності.

Майбутня ініціатива під назвою Оптимізований Досвід З'єднань (на основі 802.11ai, 11k і 11v) спеціально спрямована на рішення проблем щільних розгортань котрі надають значну вигоду Wi-Fi мережам розгорнутих операторами мобільного зв'язку.

Деякі з представлених особливостей є:

1) Більш швидкий роумінг між різними точками доступу чи мережами - дозволяє надавати безперебійні послуги в реальному часі;

2) Виражене зниження витрат на управління;
3) Інтелектуальне балансування навантаження - де користувач є повернеником в напрямку до точки доступу, що може забезпечити краще з'єднання на основі навантаження, а не тільки зосередивши увагу на силі сигналу.

Дивлячись на LTE - Wi-Fi між мережеву взаємодію, що має продуктивність що виходить за межі стандартних методів визначеного мережевого обміну і переходу до LTE - Wi-Fi конвергенції. Як показано на рис.2.6. конвергенція передбачає надання оптимального вибору лінії зв'язку, надання безперебійних послуг, зменшення перешкод і об'єднання каналів між LTE (і 3G) і Wi-Fi зв'язком і за їх межами.

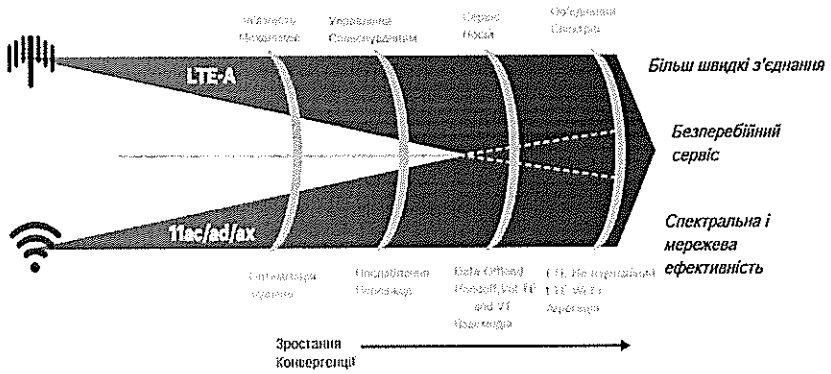


Рис. 2.6. Тенденції конвергенції LTE і Wi-Fi

Конвергенція вимагає багато покращень та доповнень до стандартних визначених функцій, наприклад підключення Connectivity Engine (CnE) для QTI в доповненні до підтримки Hotspot 2.0 і механізмів виявлення, визначеному в 3GPP, що включає в себе власні алгоритми, щоб зробити вибір каналу набагато розумніші. CNE також має всі основні елементи і інтелектуальні алгоритми, необхідні для ефективного забезпечення безперервного і безперебійного обслуговування, і так далі.

Агрегація каналів LTE та Wi-Fi підвищення пропускної здатності мережі

При агрегації каналів LTE та Wi-Fi оператор має змогу сумувати пропускну здатність LTE у ліцензійному частотному діапазоні та пропускну здатність Wi-Fi у неліцензійному частотному діапазоні. Таке рішення не потребує об'єднання

каналів на рівні ядра мережі. В такому випадку, абонент може отримувати додаткову пропускну здатність навіть при підключенні до приватної точки доступу Wi-Fi, яка не належить оператору (рис. 2.7).

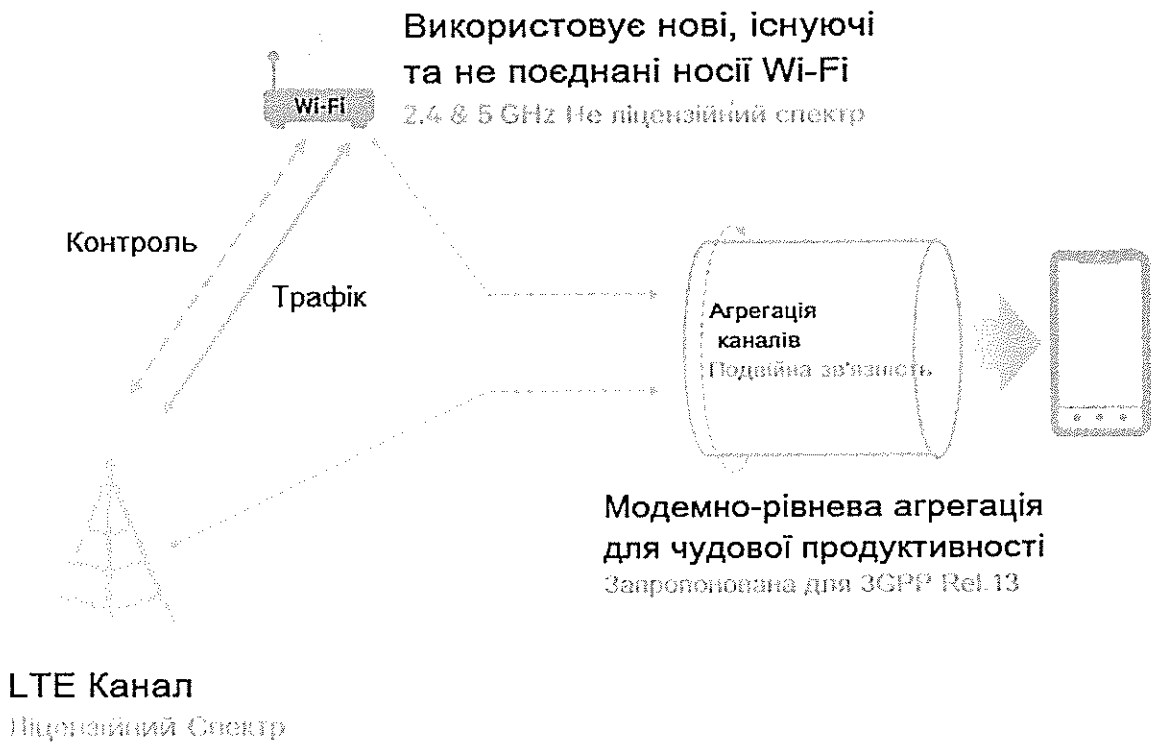


Рис. 2.7. Агрегація каналів LTE та Wi-Fi без об'єднання на рівні ядра

Користувачі будуть підключені одночасно до обох ланок, отримуючи більш високу швидкість передачі даних, а також безперебійну мобільність, в порівнянні з окремими (автономними) LTE і Wi-Fi мережами. Як згадувалося раніше, багато операторів вже розгорнули свої власні мережі Wi-Fi і LTE-Wi-Fi агрегація каналів забезпечує відмінне рішення, щоб краще інтегрувати їх з мережею LTE, і поліпшити загальну продуктивність. З точки зору мережі, Wi-Fi точки доступу будуть підключені до мережі LTE, так само як і будь-які невеликі комірки і в повній мірі використовувати ядро мережі, шифрування, контроль, перевірку справжності LTE, і інших систем. Результатом є те, що базова станція LTE проводить управління та розподіл ресурсів Wi-Fi точки доступу.

Ще більш важливим є те, що LTE і Wi-Fi точки доступу не повинні бути поєднані, і дозволяється використання навіть макрокомірок LTE. Це означає, що

коли один з пристроїв, що підтримує дану функцію буде підключатись до мережі, переваги LTE-Wi-Fi агрегації будуть доступні для нього в короткий термін з мінімальними змінами LTE та Wi-Fi.

Це має важливе значення тому, що агрегація на рівні модема забезпечує краще балансування навантаження (в порівнянні з іншими варіантами). LTE мережа завжди повідомлена про стан завантаження і потужності сигналу на обох ланках і може балансувати трафік по посиланнях відповідно. Крім того LTE може швидко адаптуватись до швидких змін в умовах лінії зв'язку, в порівнянні з іншими варіантами такими як об'єднання в HTTP-шарі, в операційній системі високого рівня (HLOS), які повільно адаптуються.

З точки зору користувачів, коли вони у стані підключення до двох мереж їхні дані розумно розподіляються між двома каналами щоб забезпечити найкращу продуктивність. Агрегація Wi-Fi зв'язку є безперебійною без ніяких ручних втручань і є доступною будь де за потребою користувача.

Агрегація каналів LTE у ліцензійному та неліцензійному частотному діапазоні

У бездротовому зв'язку сигналізаційна інформація і інформація управління має дуже важливе значення щоб не тільки зберегти надійність каналу зв'язку але і переконатись що ресурси розподілено правильно. Це стає ще більш важливим в щільному розгортанні, де є багато перешкод і де вузли в мережі конкурують один з одним за ресурси. У таких випадках, управління ресурсами і впевненість, що вони виділяються в упорядкованому образі є основною потребою. Крім того розподіл ресурсів і інша інформація така як інформація сигналізації та управління повинна надійно передаватись між точками доступу і пристроями. Дану задачу найкраще можна виконувати за допомогою надійного зв'язку на ліцензованому спектрі. Це одна з причин, серед багатьох чому отримання найкращої продуктивності неліцензійного спектра вимагає його агрегації з LTE каналами в ліцензованому спектрі.

LTE-Wi-Fi об'єднання каналів створене для залучення носіїв мереж Wi-Fi і використовує обидві 2,4 ГГц і 5 ГГц неліцензованих смуги. У такому варіанті LTE

базова станція (ENodeB) контролюватиме обсяг трафіку, запланований через Wi-Fi, і тим самим зможе забезпечити належним чином балансування навантаження між ланками LTE і Wi-Fi. LTE-U/LAA для розгортання нових дрібних комірок і використовує неліцензійний діапазон 5 ГГц.

Для обох LTE-U і LAA, всі сигнали сигналізації і управління передаються через надійні ліцензовані канали (мережі LTE) і неліцензований зв'язок використовуються тільки для передачі даних. Це одна з причин, чому LTE Неліцензований може працювати краще, ніж Wi-Fi поодинці. Обидва варіанти використовують єдину уніфіковану базову мережу, яка забезпечує економічну ефективність і простоту управління для операторів, пропонуючи при цьому безперервні безперебійні послуги і більш широкосмуговий доступ для користувачів. Вибір між цими двома варіантами агрегування залежить від поточних активів і майбутніх мережевих планів операторів.

Останнє доповнення MuLTEfire працює виключно в неліцензійному спектрі і розширює LTE інфраструктуру для нових можливостей розгортання. MuLTEfire не є сфокусований на цьому але також буде корисним для мобільних операторів для розвантаження трафіку. LTE-U і LAA використовує вже комерційну функцію агрегації несучої для об'єднання LTE на обох ліцензованих і неліцензованих спектрів. LTE Неліцензований ідеально підходить для використання у нових не великих Стільникх орієнтованих на 5 ГГц у неліцензійному спектрі, який має до 500 МГц пропускної здатності наявної у багатьох регіонах світу. LTE-U і LAA презентує найвищий можливий рівень агрегації між двома типами спектра, як схожі технології схожі базові мережі і навіть схожі малі комірки є використані показано на рис. 2.7.

LTE-U і LAA можуть бути розгорнуті в будь-якій Supplemental Down Link (SDL) конфігурації де неліцензійний спектр використовується тільки для низхідних ліній зв’язку або у конфігурації TDD, в якому неліцензійний спектр використовується як для низхідних так і для висхідних ліній зв’язку. Через свою простоту, початкове розгортання буде використовувати SDL.

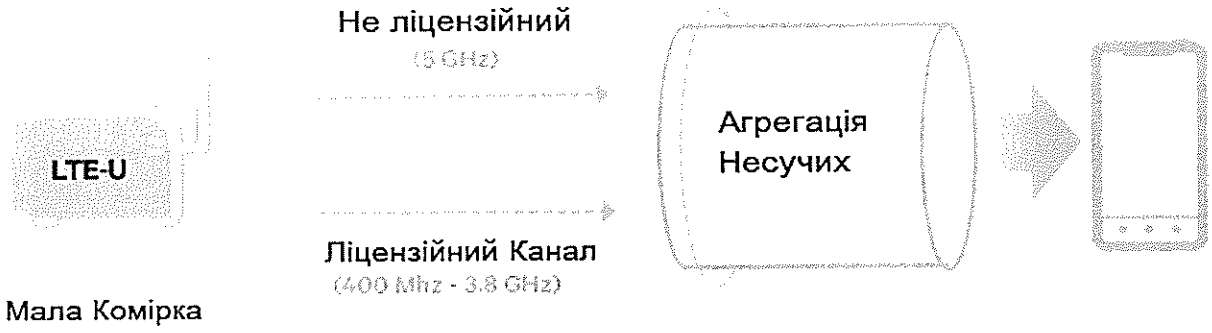


Рис. 2.7. Агрегація LTE в ліцензійному та неліцензійному спектрі для малих комірок

LTE-U визначається як SDL і у початкових випусках LAA в версії Release 13 підтримує SDL, з виділенням в версію Release 14, яка, як очікується, має визначити додаткові комбінації агрегацій. Всі рішення для LTE-U використовують технологію, що була розроблена для мобільності ще у перші дні розробок. LTE підтримує скоординоване та синхронізоване планування ресурсів (замість підходу на основі конкуренції, який використовується в Wi-Fi), і має ефективну лінію радіозв'язку з такими функціями, як масштабування, щоб знизити трафік даних, обробку великих поширень затримки та гібридний ARQ (HARQ), серед багатьох інших.

При використанні неліцензійного спектра, він динамічно вибирає канал, який не зайнятий Wi-Fi (або іншим користувачем неліцензійного LTE). З підніманням від 500МГц наявного спектра в діапазон 5ГГц, з'явилась хороша ймовірність що канал буде виділено. Якщо вільного каналу не знайдено, пристрій повинен буде ділити канал з Wi-Fi (так названий суміщений канал) і в даному випадку вступає в дію механізм справедливого співіснування. В залежності від регіону механізм справедливого співіснування працює в двох напрямах: У таких країнах, як США, Кореї та Індії, де LTE-U може бути розгорнутий з використанням Rel 10/11/12, співіснування буде досягнуто за допомогою підходу, який ми називаємо CSAT (Carrier Sense Adaptive Transmission). У таких регіонах, як Європа і Японія, співіснування буде грунтуватися на Rel-13 LAA, який за своєю суттю підтримує

нормативні вимоги LBT заповнювання каналу. Основна ідея спільного каналу співіснування, поділ часу на основі зондування каналу. Часова шкала розподілу може бути трохи більше в CSAT і дуже коротка у LAA. Рис. 2.8. ілюструє роботу з CSAT з прикладом.

Коли LTE-U вимкнений, він сприймає використання каналу шляхом оцінки кількості Wi-Fi точок доступу, і вимикається, щоб дати відповідний час для Wi-Fi. У показаному прикладі LTE-U виявляє канал, і розуміє, що є чотири активних Wi-Fi точок доступу в безпосередній близькості. І звичайно знає, що є два LTE-U точки доступу. Таким чином, він зберігає LTE-U на 2/6 часу, і LTE-U OFF для 4/6 часу, дозволяючи каналу використовувати Wi-Fi точок доступу.

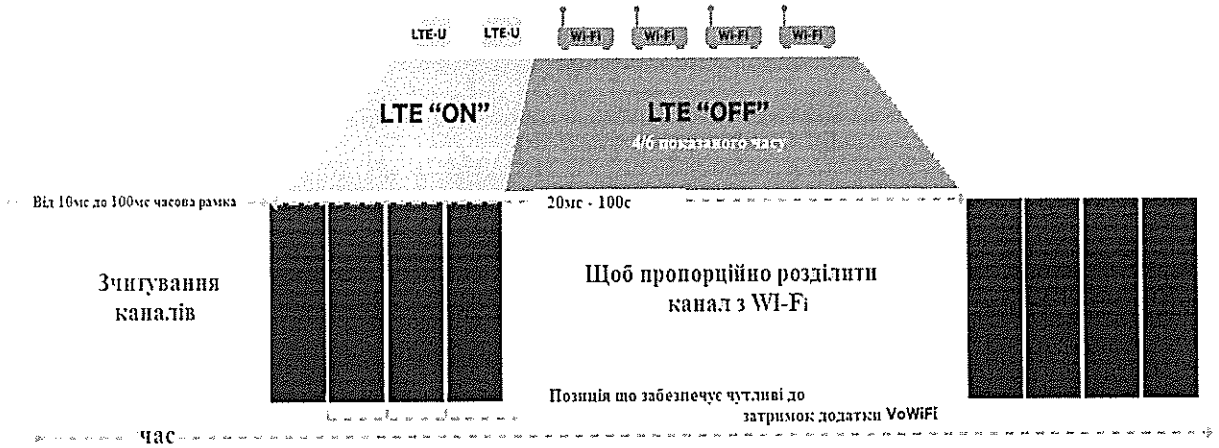


Рис. 2.8. Ілюстрація LTE-U/Wi-Fi справедливої взаємодії на базі CSAT

Часова шкала для CSAT налаштовується і може тривати як 20 мілісекунд так і 100 мілісекунд. Крім того, LTE-U також вимикається кілька разів протягом дуже короткого часу, в продовж часу який призначений для його включення, щоб дати дозвіл чутливим до затримок додаткам, таких як VoIP, через Wi-Fi отримувати і відправляти свої пакети. LAA сприймає канал кожні 20 мкс, і якщо вільний, займає його протягом наступних 1-10 мілісекунд, час може бути встановлений для динамічного використання аналогічно CSAT, як показано на рис. 2.8.

2.2. Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі

Класичний метод випадкового доступу з прослуховуванням середовища у мережах Wi-Fi функціонує за наступним механізмом. Спочатку передавальна станція прослуховує середовище з метою визначення стану зайнятості каналу. Якщо канал зайнятий, передавальний вузол очікує доки канал буде звільнений, і після випадково обраного інтервалу очікування здійснює свою спробу передавання даних. Якщо дана спроба є успішною, вузол повинен отримати підтвердження від вузла отримувача (ACK). Якщо підтвердження не отримується, то передавальний вузол вважає, що дані були втрачені, і здійснює повторну спробу передавання даних. Таким чином, мережі Wi-Fi можуть ефективно функціонувати в умовах наявності великої кількості конкуруючих вузлів у спільному частотному діапазоні. Принцип прослуховування середовище мережами Wi-Fi представлено на рис. 2.9.

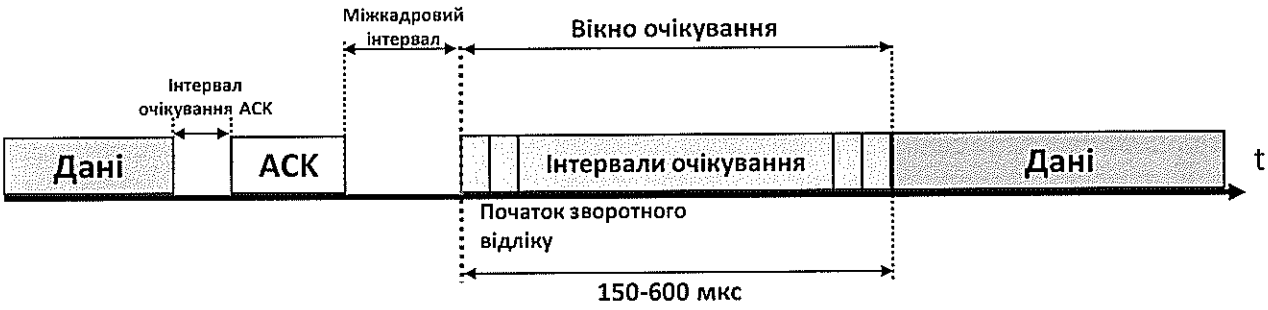


Рис. 2.9. Часова діаграма процесу прослуховування та адаптивного передавання даних у мережах Wi-Fi

Проте, застосування такого механізму для розгортання мереж LTE є неприйнятним, оскільки пристрої LTE не використовують підтвердження успішного передавання на канальному рівні, що ускладнює процес виявлення колізій. Тому, у роботі запропоновано удосконалений метод випадкового доступу з прослуховуванням середовища для підвищення ефективності функціонування мереж LTE у неліцензійному частотному діапазоні. Особливістю запропонованого методу є те, що він поєднує механізм випадкового доступу до радіоканалу із детермінованим розподілом каналів у мережі LTE. Це реалізується шляхом поділу

підкадрів LTE на два типи: підкадр прослуховування та підкадр передавання. Дані підкадри чергуються між собою для забезпечення адаптивного використання радіочастотних ресурсів абонентами LTE, із забезпеченням рівноцінних умов доступу до каналу для абонентів Wi-Fi. Важливою умовою для функціонування запропонованого методу є строга синхронізація основного кадру LTE тривалістю 10 мс та підкадрів LTE тривалістю 1 мс. Кожен пристрій LTE прослуховує середовище протягом першого підкадру, і здійснює передавання протягом усіх наступних підкадрів за умови, що канал є вільним. Якщо канал є зайнятим протягом першого підкадру, вузол автоматично продовжує прослуховувати канал протягом наступних підкадрів, до тих пір поки канал не звільниться. Якщо, базова станція LTE отримує право доступу до каналу у неліцензійному спектрі, вона займає канал аж до завершення основного кадру, після чого звільняє його для того, щоб надати можливість точкам доступу Wi-Fi рівноцінне право адаптивного використання радіочастотних ресурсів. Запропонований принцип прослуховування середовища мережами LTE представлено на рис. 2.10.

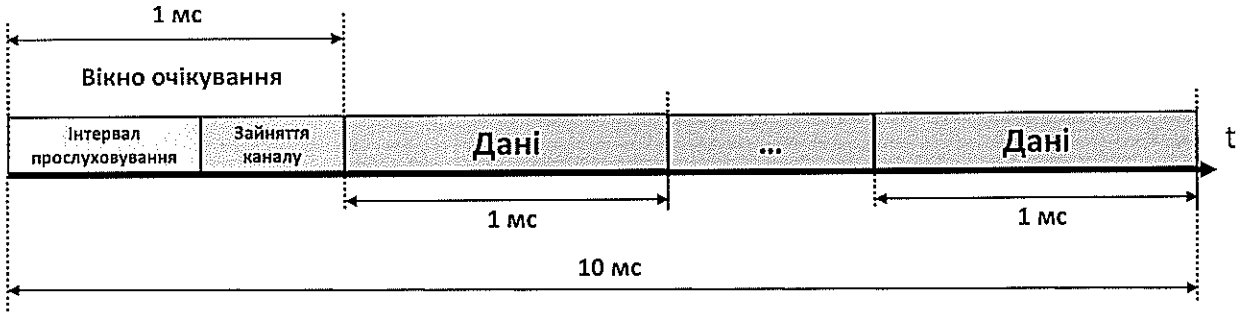


Рис. 2.10. Часова діаграма процесу прослуховування та адаптивного передавання даних у мереж Wi-Fi

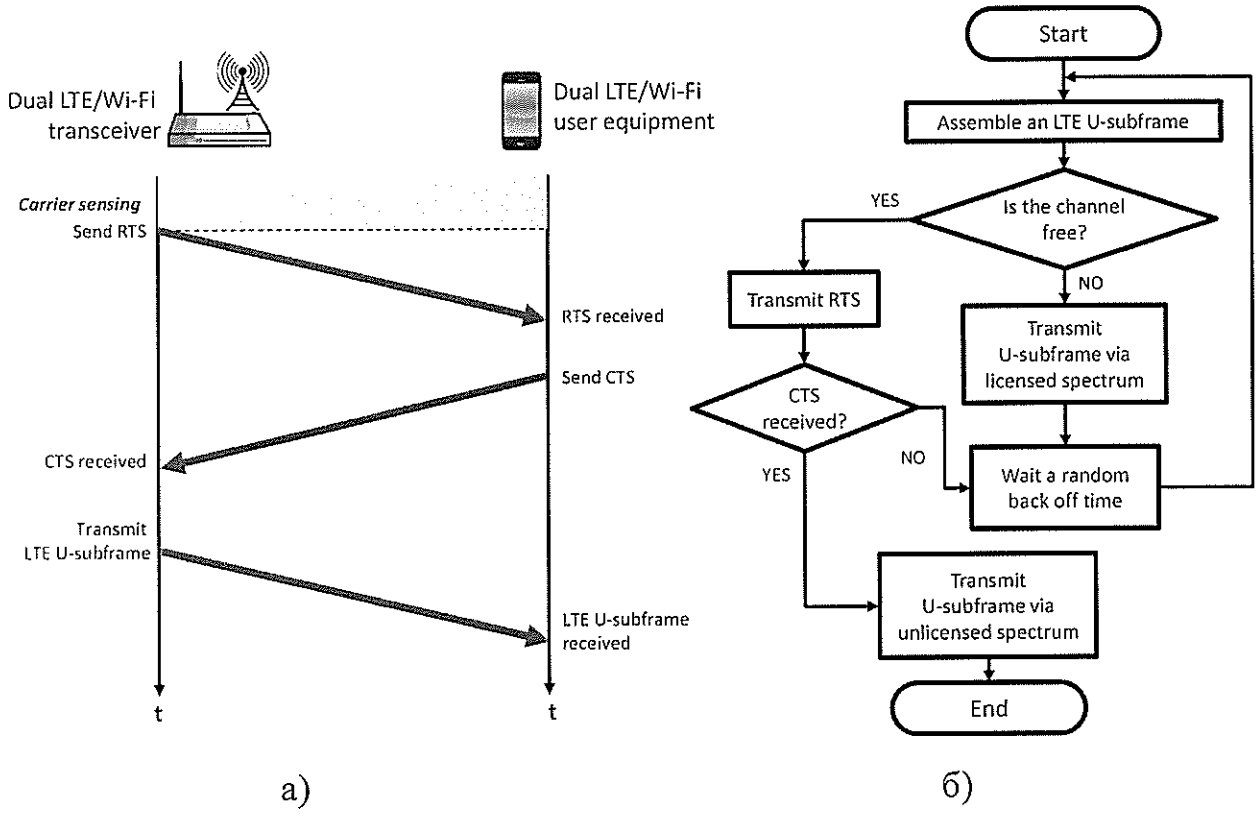
Складність співіснування Wi-Fi і LTE виходить з істотних відмінностей в інтерфейсах і схемах MAC. Wi-Fi працює в 20 МГц каналів і використовує CSMA/CA. Зокрема, кожен передавач сприймає поточну активність по бездротовому каналу до передачі пакета. Якщо канал зайнятий, передавач чекає випадковий час до наступного зондування каналу, щоб дозволити активного користувача закінчити поточну активну передачу по каналу. У CSMA/CA, якщо канал доступний, передавач посилає пакети даних. CSMA/CA дозволяє декільком

користувачам доступ до носія з використанням обмеженої кількості каналів спектра. Недолік такого підходу полягає в тому, що збільшення кількості пристроїв знижує продуктивність мережі. Це відбувається тому, що зондування час збільшується, а час передачі даних зменшується.

У порівнянні з Wi-Fi, LTE може передавати дані з використанням різних смуг спектра від 1.4 МГц до 20 МГц. MAC-рівень LTE використовує множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDMA). У OFDMA, доступна смуга пропускання ділиться на безліч піднесучих, які задовільняють умову ортогональності. Кожна піднесуча має ширину смуги 15 кГц. Піднесучі розташовані в блоках ресурсів. Кожен блок ресурсів складається з 12 піднесучих, в результаті чого у вигляді смуг на 180 кГц, який може бути виділений для передачі даних користувачів. У часовій області, блок ресурсів складається з шести або семи символів, тривалістю 66,7, розділених захисними інтервалами. Таким чином, блок ресурсів передається в інтервалі часу 0,5 мс. Два послідовних часових інтервалів становлять 1 мс підрамник. Кадр LTE складається з 10 підкадрів. Кадру LTE можуть бути розділені на 10 користувачів в тій же смузі частот. Звичайно, збільшення числа користувачів, знижує пропускну здатність для кожного користувача. Проте, в порівнянні з CSMA/CA, OFDMA, допомагає розподіляти ресурси між усіма користувачами відповідно до їх вимогу.

Використання неліцензованої смуги для передачі LTE призводить до значного зниження якості користувацького досвіду через проблеми інтерференції. Ми очікуємо, що використання неліцензійної смуги з підходом агрегації несучої, використовуваної в LTE забезпечить більш високу продуктивність, в порівнянні з традиційним використанням неліцензійного спектра. Тому ми розробили підхід, який агрегує пропускну здатність в ліцензовані і неліцензовані смуги одночасно. Дані, що вимагають низької частоти появи помилок, такі як дані сигналізації передачі даних і голосу, як і раніше передаються по ліцензованій смузі спектра, в той час як неліцензована смуга використовується для підвищення пропускної здатності для передачі даних, що дозволяє деяку втрату пакетів. Запропоновано підхід розподілу подвійного підкадру. У пропонованому підході, один підкадр

передається по ліцензованої смузі (L-підкадр), а інший кадр передається через неліцензований діапазон (U-підкадр). Ми припускаємо, що мережі Wi-Fi не створюють перешкод LTE-U через зондування каналу перед передачею відповідно до протоколу CSMA. Наш підхід полягає у використанні переваг протоколу MAC Wi-Fi для LTE каналів в неліцензійної смузі. Протокольна діаграма запропонованого методу випадкового доступу представлена на рис. 2.11, а. Блок-схема методу адаптивного доступу до неліцензійного частотного діапазону представлена на рис. 2.11, б.



а) б)

Рис. 2.11. Часова діаграма процесу прослуховування та адаптивного передавання даних у мереж Wi-Fi

2.3. Методи агрегації радіочастотних ресурсів

На основі запропонованої моделі розроблено алгоритм адаптивної агрегації радіочастот ліцензійного та неліцензійного діапазонів. Даний алгоритм використовує логічне розділення радіочастотного спектру на три пріоритети доступу оператора. Найвищий пріоритет доступу оператор має у власному ліцензійному діапазоні. Наступним за пріоритетом є радіочастотний ресурс, який зарезервований для оператора у неліцензійному діапазоні. Для передавання у даному частотному діапазоні оператор LTE повинен враховувати наявність сусідніх мереж Wi-Fi, щоб забезпечити справедливість використання радіочастотних ресурсів. Найнижчим за пріоритетом доступу для оператора LTE є радіочастотний ресурс неліцензійного діапазону, який зарезервований для інших LTE операторів. Для того, щоб здійснювати передавання даних у такому діапазоні, LTE оператор повинен враховувати наявність не лише сусідніх мереж Wi-Fi, але і комірок LTE оператора з вищим пріоритетом доступу. Модель розподілу радіочастотних ресурсів за пріоритетами доступу представлена на рис. 2.12.

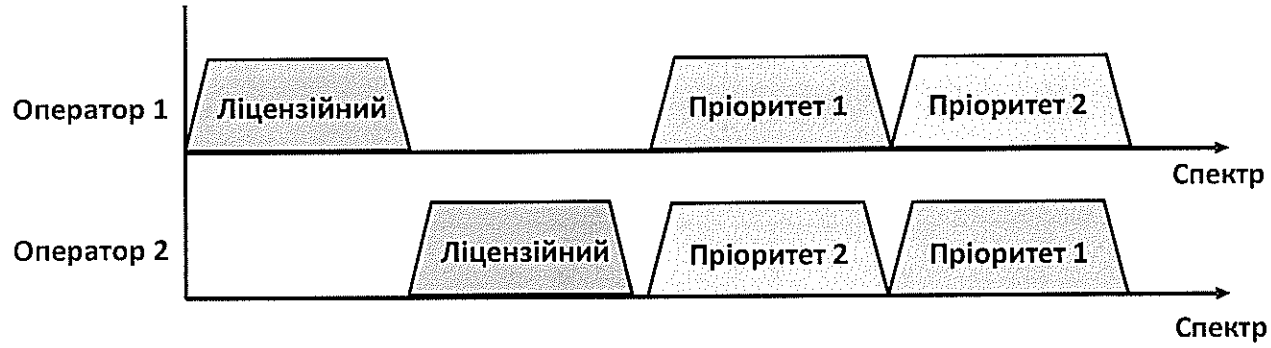


Рис. 2.12. Модель розподілу радіочастотних ресурсів за пріоритетами доступу

На рис. 2.13. представлено варіант спільного використання неліцензійного спектра за допомогою декількох операторів мобільного зв'язку, заснований на прямому поділі спектра на окремі смуги і привласненні кожному оператору ексклюзивної псевдо-ліцензії на частину неліцензійного спектра. Кожен оператор

є основним користувачем групи неліцензійного спектра, але шляхом найкращого підбору може отримати доступ до смуг інших операторів в якості вторинного користувача. Принцип агрегації пропускної здатності для запропонованого алгоритму представлений на рис. 2.13. Оператор мобільного зв'язку може збільшити пропускну здатність шляхом об'єднання кількох смуг.

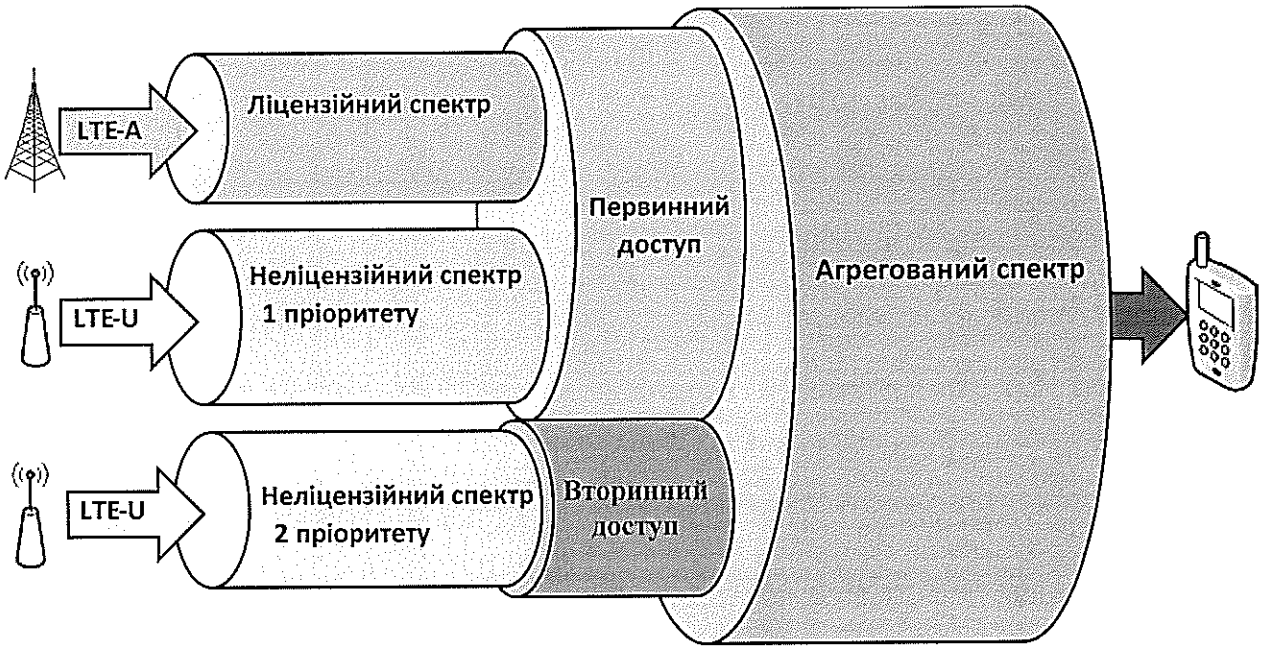


Рис. 2.13. Принцип агрегації пропускної здатності з трьох частотних діапазонів

Розділимо агрегацію спектра на два етапи: первинний доступ до спектру і вторинний. У разі первинного доступу, оператор мережі може агрегувати весь доступний ліцензійний спектр з частиною неліцензійного спектра, який призначений цьому оператору. Принцип функціонування запропонованого алгоритму описаний нижче.

Крок 1. Виявлення вторинного неліцензійного спектра. Оператор мережі повинен перевірити як LTE, так і Wi-Fi передачі, тому що вони мають більш високий пріоритет для використання цієї смуги. Якщо є доступний спектр (тобто ні конкурентоспроможні LTE мережі, ні мережі Wi-Fi не використовують цю частину неліцензійної смуги), оператор мережі агрегує його для майбутньої передачі даних, а потім переходить до кроку 2. Якщо немає ніяких доступних смуг

у вторинного неліцензійного спектра, перейдіть одразу до кроку 2.

Крок 2. Перевірка наявності первинного неліцензійного спектра. При перевірці первинного неліцензійного спектра, оператор мережі має більш високий пріоритет доступу серед всіх операторів LTE. Проте, все ще існує необхідність перевірки активних передач Wi-Fi, для того, щоб уникнути перешкод, тому що Wi-Fi має більш високий пріоритет для використання цієї смугу. Тому, якщо є доступним спектр в первинній неліцензійній смузі, він об'єднується для майбутніх передач. В іншому випадку ця група ігнорується і алгоритм переходить до кроку 3.

Крок 3. Якщо немає ніяких агрегованих смуг в неліцензійному спектрі, оператор мережі повинен виділити необхідну смугу пропускання в ліцензійному спектрі для того, щоб надати користувачам негарантовану доставку. Якщо в неліцензійному спектрі є агреговані смуги, то оператор мережі повинен доповнити його необхідною кількістю ліцензованого спектру, але не менш надійним "якорем" групи, щоб забезпечити надійне з'єднання для отримання важливих даних (наприклад, дані сигналізації або чутливих до затримки даних). Потім алгоритм переходить до кроку 4.

Крок 4. Оператор мережі об'єднує всі групи, отримані від попередніх кроків, і виконує передачу даних через три-діапазонний агрегований канал. За наявності кількох користувачів в цільовій зоні покриття, агрегована пропускна здатність справедливо розподіляється між ними, відповідно до їх вимог. Слід зазначити, що навіть після успішної агрегації несучої з неліцензійного спектра, оператор повинен звільнити неліцензійні смуги для наступного оператора, після того, як протокол CASLUA виявить більш високий запит пріоритету для цього спектра.

Після успішного сеансу передавання даних, алгоритм повертається до кроку 1. Таким чином, для збільшення пропускної здатності, LTE оператор має змогу здійснювати агрегацію каналів у трьох вищезгаданих діапазонах, за умови наявності одночасного покриття макрокомірок та фемтокомірок. блок-схема алгоритму агрегації радіочастотних ресурсів, представлено на рис. 2.14.

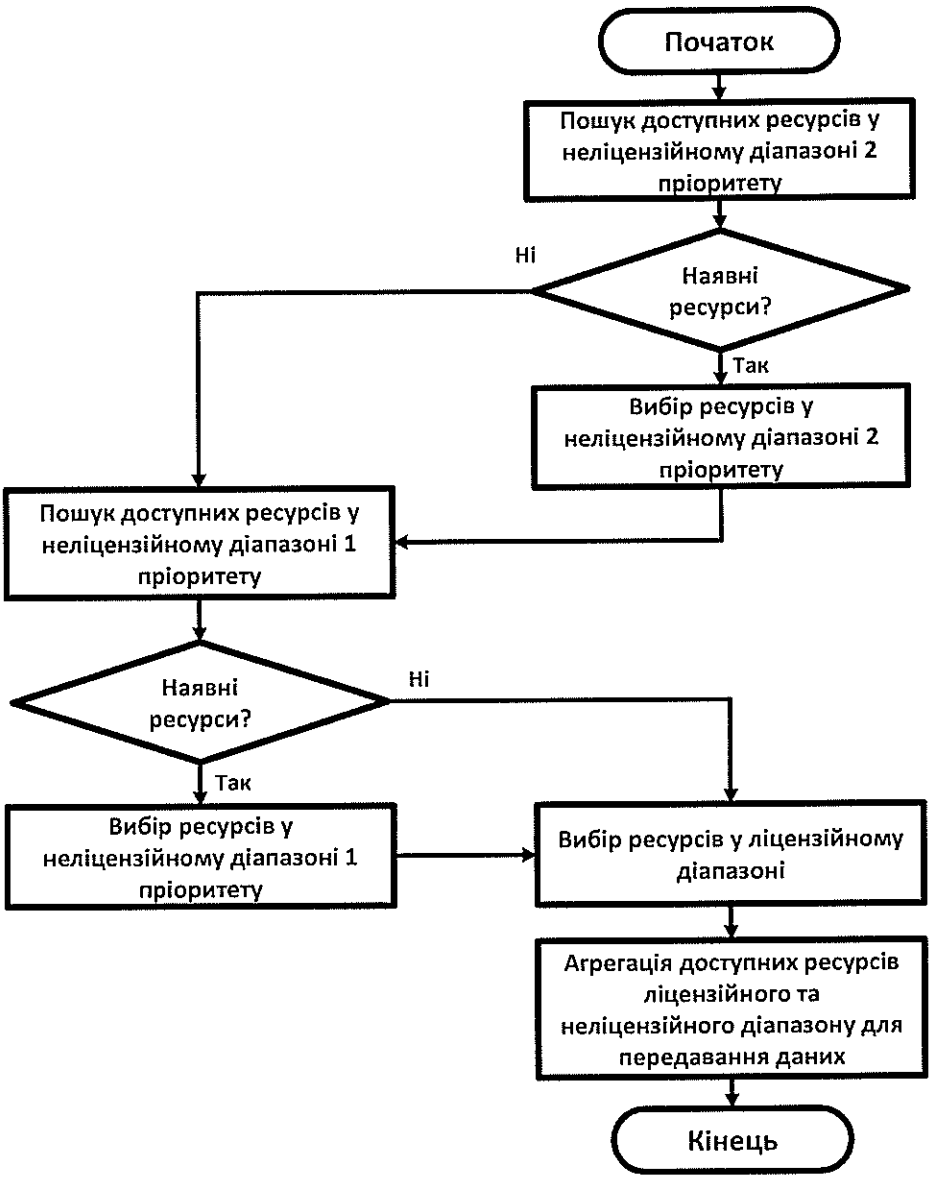


Рис. 2.16. Алгоритм агрегації радіочастот в ліцензійному та неліцензійному діапазонах

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LTE

3.1. Модель спільного використання неліцензованого частотного діапазону між LAA та Wi-Fi

LAA (Licensed Assisted Access) — це технологія, яка дозволяє операторам мобільного зв'язку використовувати неліцензований радіочастотний спектр (наприклад, діапазон 5 ГГц) для підвищення пропускної здатності мереж LTE (рис. 3.1). Вона є частиною стандарту LTE Advanced Pro (Release 13), визначеного організацією 3GPP.

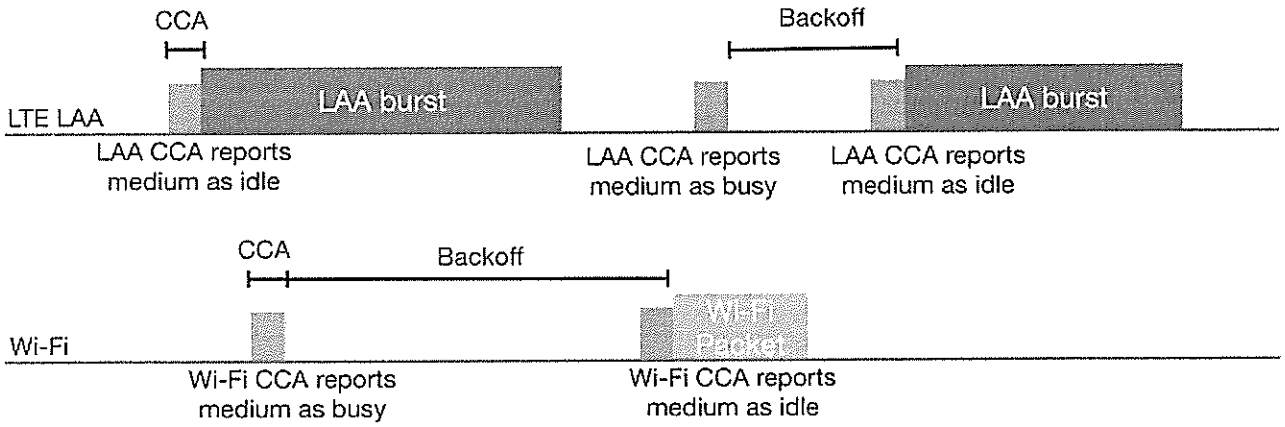


Рис. 3.1. Модель співіснування між LAA та Wi-Fi

Модель пропорційної справедливості для спільного використання неліцензованих смуг частот між LAA (Licensed Assisted Access) і Wi-Fi передбачає розподіл ефірного часу на основі рівних часових інтервалів для кожної системи [1]. Цей підхід гарантує, що LAA і Wi-Fi можуть працювати одночасно без істотних перешкод, таким чином максимізуючи ефективне використання доступних ресурсів. Призначаючи рівні часові інтервали, модель може підтримувати збалансований і справедливий розподіл частотного спектру, запобігаючи домінуванню однієї технології в смузі пропускання. Це особливо важливо в

середовищах, де інтенсивно використовуються обидві системи, оскільки це забезпечує більш справедливий доступ до радіоресурсів, що в кінцевому підсумку покращує роботу користувачів на обох платформах.

Ефективність моделі пропорційної справедливості може суттєво відрізнятися в різних сценаріях, таких як різна щільність користувачів, типи запущених програм і загальне навантаження на мережу [2]. Наприклад, у середовищах з високою щільністю, де багато користувачів намагаються отримати доступ до мережі одночасно, моделі може знадобитися динамічна адаптація для підтримки справедливості та ефективності. Аналіз цієї моделі в різних сценаріях показує, що, незважаючи на те, що вона спрямована на забезпечення справедливого доступу, можуть знадобитися певні коригування, щоб гарантувати оптимальну продуктивність користувачів LAA і Wi-Fi. Ця адаптивність життєво важлива для підтримки якості обслуговування та виконання вимог щодо якості обслуговування (QoS) для різних додатків, таких як потокове відео та онлайн-ігри, які можуть мати різні вимоги до пропускної здатності.

Показники, які визначають баланс між ефірним часом, виділеним для LAA та Wi-Fi, є важливими для успішного впровадження моделі пропорційної справедливості [3]. Ці показники можуть включати пропускну спроможність, затримку та рівень задоволеності користувачів, які в сукупності забезпечують уявлення про продуктивність обох систем. Постійно відстежуючи ці показники, мережеві оператори можуть приймати обґрунтовані рішення щодо розподілу ефірного часу, щоб переконатися, що користувачі LAA та Wi-Fi відчувають мінімальні збої. Крім того, синтетичні показники, які об'єднують кілька показників в одне значення, можуть сприяти більш повному аналізу того, наскільки добре функціонує модель спільного доступу, допомагаючи визначити області для вдосконалення та забезпечуючи ефективне задоволення динамічних потреб користувачів.

Модель максимум-мінімальної справедливості

Виділення пропускної здатності для каналів на основі їхньої навантаженості є ключовим елементом моделі максимально-мінімальної справедливості [4]. У цій

моделі пропускна здатність розподіляється таким чином, щоб забезпечити рівний доступ до ресурсів для обох систем – LAA та Wi-Fi. Це означає, що канали з більшою завантаженістю забезпечують більше ресурсів, що дозволяє оптимізувати використання доступних частот. Наприклад, якщо Wi-Fi використовує більшу частину своїх ресурсів, система може автоматично збільшити пропускну здатність, обмежену для Wi-Fi, що не дозволить уникнути перезавантаження та забезпечити якість обслуговування для користувачів.

Алгоритми адаптації тривалості циклів ON/OFF для обох систем також виконують важливу роль із забезпеченням справедливого доступу до невикористовуваних частот [5]. Ці алгоритми дозволяють LAA та Wi-Fi динамічно регулювати ваші цикли активності залежно від поточного завантаження в частотній частині. Наприклад, якщо одна система виявляє меншу активність, алгоритм може скоротити її цикл увімкнення, надаючи більше часу іншій системі. Це не тільки завдяки більш ефективному використанню частоти, але й допомагає зменшити інтерференцію між мережами, що забезпечує загальну продуктивність обох систем.

Переваги та обмеження максимально-мінімальної моделі варто розглядати з огляду на специфіку використання невикористовуваних частот [1]. Однією з основних переваг цієї моделі є її здатність адаптуватися до змінних умов навантаження, що забезпечує оптимальний баланс між LAA та Wi-Fi. Однак і є певні обмеження, такі як можливість виникнення затримок при переключенні між циклами ON/OFF, що може бути включено до якості обслуговування користувачів. Дослідження в цій області допомагають краще зрозуміти, як забезпечити ефективне і справедливе використання частоти в конкурентних умовах.

Застосування об'єднаних моделей співіснування

Застосування уніфікованих моделей співіснування в бездротовому зв'язку може значно підвищити ефективність динамічного спільного використання спектру між мережами LAA та Wi-Fi [1]. Одним із основних аспектів цих моделей є використання динамічних підходів для адаптації робочих циклів, які можуть оптимізувати операційну ефективність обох систем. Регулюючи цикли на основі умов мережі в режимі реального часу та вимог трафіку, оператори можуть

переконатися, що кожна технологія ефективно використовує доступний неліцензований діапазон частот. Ця можливість адаптації не тільки покращує якість обслуговування, але й зменшує ймовірність перешкод між LAA та пристроями Wi-Fi, таким чином сприяючи більш гармонійному співіснуванню в переповненій неліцензованій смузі [6].

Іншим критичним фактором ефективності цих моделей співіснування є вплив різних рівнів мережевого спостереження на їх продуктивність. Можливість відстежувати мережеву активність і шаблони використання дозволяє приймати більш обґрунтовані рішення щодо розподілу спектру та управління ресурсами [7]. Наприклад, високий рівень спостереження може забезпечити більш точні розрахунки використання частотного ресурсу, що призведе до покращеної координації між мережами LTE та Wi-Fi. Ця координація має важливе значення для мінімізації збоїв і максимального збільшення пропускної здатності, що в кінцевому підсумку приносить користь користувачам, які покладаються на обидві технології для безперебійного підключення [8]. Без належного моніторингу моделі можуть не точно передбачити поведінку мережі, що призведе до потенційної неефективності та погіршення якості обслуговування.

Результати моделювання взаємодії LAA та Wi-Fi у сценаріях із частковим доступом до даних дають цінну інформацію про практичні наслідки цих моделей співіснування. Ці симуляції показують, як різні конфігурації та робочі параметри можуть впливати на загальну продуктивність обох мереж у спільному середовищі [9]. Наприклад, аналізуючи сценарії з різними рівнями трафіку та перешкод, стає очевидним, що адаптивні стратегії можуть значно покращити спільне використання неліцензованих частот. Основні висновки вказують на те, що сценарії, які включають інтелектуальний розподіл ресурсів і коригування динамічного циклу, призводять до зниження частоти зіткнень і покращення швидкості передачі даних, тим самим забезпечуючи ефективне співіснування як LAA, так і Wi-Fi, задовольняючи вимоги щодо якості обслуговування користувачів [5].

Алгоритми співіснування LAA та Wi-Fi: Базовий алгоритм робочих циклів

ON/OFF (рис. 3.2.)

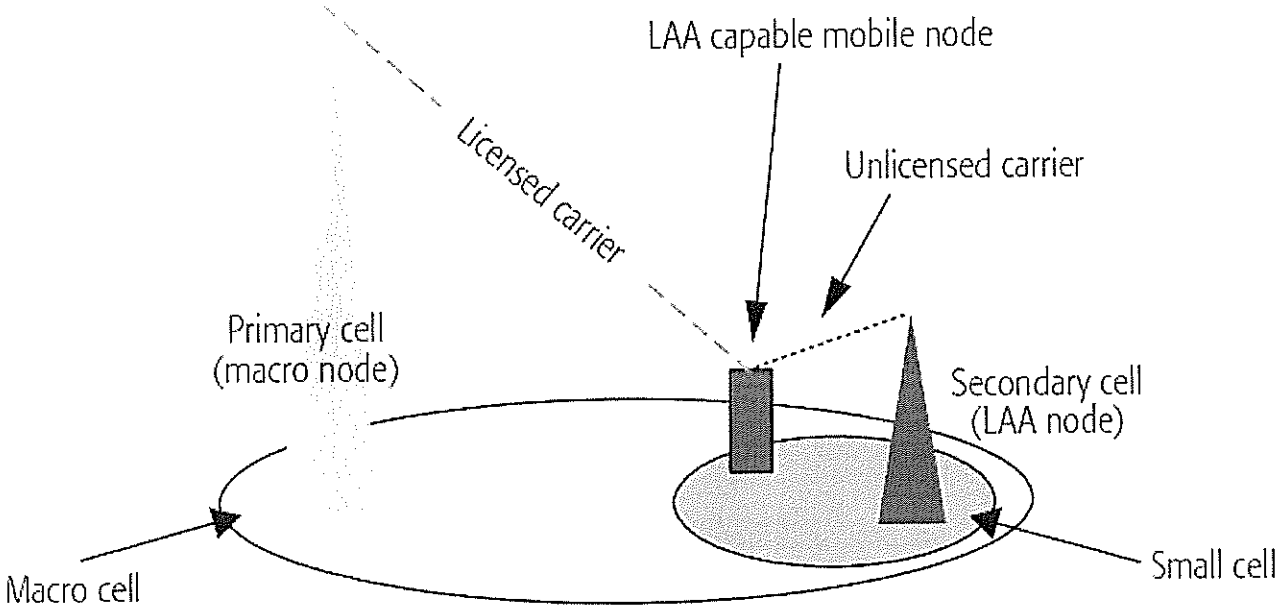


Рис. 3.2. Робота стільників у алгоритмі співіснування LAA та Wi-Fi

Використання періодів LAA ON для централізованого доступу до каналу є численним компонентом для забезпечення ефективної взаємодії між LAA та Wi-Fi [1]. Під час цих періодів LAA має перевагу у використанні каналу, що дозволяє зменшити затримки в передачі даних і підвищити загальну якість обслуговування для користувачів. Цей підхід дозволяє адаптувати робочі цикли, забезпечуючи централізований доступ до частотного ресурсу. Важливо досягти того, що ефективність таких алгоритмів залежить від правильного управління періодами доступу, що можна включати динамічну адаптацію залежно від рівня завантаження мережі. Це, у свою чергу, сприяє зменшенню взаємних перешкод між LAA та Wi-Fi, підвищуючи їхню загальну продуктивність [6].

Оптимізація використання Wi-Fi під час LAA OFF періодів є ще одним ключовим аспектом алгоритмів співробітництва [4]. Якщо LAA не використовує канал, Wi-Fi може отримати доступ до частотного спектру, що дозволяє забезпечити максимальну пропускну здатність і припинити затримки при передачі даних. Цей процес вимагає розробки нових методів управління доступом, які

можуть адаптуватися до системи в реальному часі. таким чином, важливо врахувати потреби користувачів і їхні вимоги до якості обслуговування (QoS) під час таких періодів. Це дозволяє мережам Wi-Fi ефективно використовувати наявні ресурси, досягати кращого балансу між прогресивними технологіями та забезпечувати стабільне з'єднання для кінцевих користувачів [1].

Методи збільшення тривалості циклів для досягнення балансу між LAA і Wi-Fi є критичними для оптимізації їх взаємодії [8]. Правильне визначення тривалості цих циклів може суттєво вплинути на загальну продуктивність мережі. Для цього необхідно використовувати моделі, які враховують різні параметри, такі як завантаженість мережі, кількість підключених пристроїв і типи трафіку. Впровадження адаптивних алгоритмів, здатних динамічно досягати тривалості циклів у відношенні умов роботи, може значно підвищити ефективність використання частотного спектру. Це дозволяє досягти оптимального розподілу ресурсів між LAA і Wi-Fi, що у вашому випадку, якщо досягти кращого досвіду користувачів у мережах з частковим доступом до даних [10].

Пропорційно-лінійна адаптація

Адаптація тривалості робочих циклів на основі використання спектра є критично важливою для ефективної роботи системи LAA та Wi-Fi в неконтрольованому спектрі [4]. Це дозволяє оптимізувати доступ до ресурсів частоти, забезпечуючи, щоб злоякісні технології могли працювати безперебійно та з максимальним використанням доступного спектру. Важливим аспектом є розрахунок тривалості базису циклів, який надається на аналіз поточного використання частотних ресурсів. Завдяки цьому система може адаптуватися до змінених умов у реальному часі, що дозволяє зменшити ймовірність перешкод між LAA та Wi-Fi пристроями. Адаптивний підхід до управління робочими циклами надає можливість зберегти якість обслуговування для користувачів, навіть за умови високої завантаженості мережі.

Динамічне налаштування параметрів алгоритму розміщено для підтримки оптимальної роботи в умовах різних мережевих ситуацій [1]. У разі зміни завантажень або конфліктів між пристроями, алгоритм може автоматично

коригувати ваші параметри, щоб забезпечити стабільний доступ до частоти. Це включає в себе адаптацію до змін у кількості активних користувачів, їхні вимоги до якості сервісу та наявність перешкод. Наприклад, у випадку, якщо мережа Wi-Fi стикається з підвищеним трафіком, система може зменшити періоди доступу до LAA, щоб звільнити частоти для Wi-Fi, забезпечуючи таким чином кращу продуктивність для всіх користувачів.

Результати моделювання пропорційної адаптації у високонавантажених мережах підтверджують ефективність даного підходу [6]. Згідно з отриманими даними, системи, які реалізують пропорційно-лінійну адаптацію, демонструють значну вищу продуктивність у порівнянні з традиційними методами управління спектром. Моделі показують, що оптимізація використання частот у періоди, коли один із технологічних стандартів переважає, може зменшити затримки та підвищити загальну пропускну здатність мережі. Це особливо важливо у ситуації, коли користувачі очікують високої якості обслуговування, найліпша адаптація дозволяє уникнути перезавантаження та забезпечує більш стабільне з'єднання в умовах конкуренції за ресурси.

Оцінка використання каналу

Алгоритми оцінки ефірного часу для Wi-Fi і LAA грають важливу роль у забезпеченні ефективного використання каналу в умовах спільного використання частотним спектром [11]. Вони не могли аналізувати, як давно різні технології можуть використовувати доступні ресурси без шкоди для інших користувачів. Одним із підходів є методи використання, які оцінюють доступний ефірний час, базуючись на специфікаціях, таких як стандарт 802.11ah, що дозволяє Wi-Fi працювати в неліцензованих частотних зонах нижче 1 ГГц [7]. Ці алгоритми повинні бути адаптивними, щоб отримати різноманітні умови мережі, що дозволяють зменшити затримки та підвищити загальну продуктивність системи.

Застосування часових інтервалів для вимірювання ефективності каналу є ще одним аспектом оцінки використання спектра [12]. Часові інтервали повинні точно вимірювати, як довго різні пристрої, такі як LAA та Wi-Fi, можуть використовувати частоту, забезпечуючи при цьому справедливе співвіднесення між ними.

Використання адаптивних алгоритмів дозволяє динамічно регулювати параметри в залежності від навантаження мережі, що робить систему більш стійкою до змін у навколишньому середовищі. Важливо, що інші завантаження можуть впливати на різні фактори, включаючи кількість активних користувачів та об'єм переданих даних.

Інтеграція оцінок використання в централізоване управління представляє собою наступний крок у підвищенні ефективності спільного використання [6]. Центральне управління може забезпечити координацію між більшими технологіями, такими як Wi-Fi та LAA, і оптимізувати використання ресурсів на основі їх реальних потреб. Це дозволяє не тільки зменшити затори в мережі, але й покращити загальну якість обслуговування користувачів. Впровадження таких систем управління, які спираються на дані оцінки ефірного часу, може значно підвищити продуктивність мережі, забезпечуючи при цьому більш справедливий доступ до частотного спектру.

Продуктивність систем LAA та Wi-Fi: Метрики продуктивності

Пропускна здатність мережі є одним із ключових показників продуктивності системи LAA та Wi-Fi [1]. Вона вимірює, скільки даних можна передати через мережу за одиницю часу, що є критично важливим для забезпечення якісного обслуговування ефективних користувачів. Системи LAA, які використовують ліцензовані та неліцензовані частоти, мають можливість досягти значної пропускної здатності, особливо з впровадженням нових технологій, таких як OFDMA у Wi-Fi 6 [7]. Наприклад, максимальна номінальна пропускна здатність Wi-Fi 7 становить до 46 Гбіт/с, що підкреслює величезний потенціал для швидкісних з'єднань [7]. З іншого боку, для ефективного виконання вимог користувачів LAA також забезпечує оптимальну пропускну здатність, щоб залишитися конкурентоспроможною на ринку.

Плив затримок і втрат пакетів на якість сервісу є ще одним аспектом, що впливає на продуктивність системи LAA та Wi-Fi [1]. Затримки можуть виникати через конкуренцію за частотний ресурс, що особливо актуально в умовах спільного використання неліцензованих частот. Високі затримки можуть негативно впливати

на досвід користувачів, особливо при використанні додатків, чутливих до затримок, таких як VoIP та онлайн-ігри. Втрати пакетів є ще одним критичним показником, після чого вони впливають на надійність з'єднання. Системи, які здатні мінімізувати втрати і втрати, здатні забезпечити кращу якість обслуговування, що робить їх більш привабливими для користувачів.

Рівень використання ефірного часу системами LAA і Wi-Fi є важливою метрикою для оцінки їх продуктивності [6]. В умовах спільного використання часто важливо, щоб обидві системи максимально ефективно використовували доступні ресурси. Взаємодія між пристроями LAA та Wi-Fi у неліцензованому спектрі, зокрема за допомогою механізму Listen-Before-Talk (LBT), дозволяє уникнути колізій і забезпечує більш ефективне використання ефірного часу [13]. Оцінка та моніторинг використання ефірного часу можуть допомогти в оптимізації управлінських рішень, що у своєму часі може підвищити загальну продуктивність системи. Успішна інтеграція обох технологій може призвести до покращення якості обслуговування та задоволеності користувачів.

Аналіз продуктивності в симуляційному середовищі NS-3

Моделювання конфліктів між системами LAA та Wi-Fi є критичним місцем для розуміння їх впливу на пропускну здатність. Конфлікти, які виникають через одночасне використання незареєстрованого частотного діапазону, можуть значно знизити ефективність обох технологій [8]. Наприклад, при моделюванні ситуацій, в яких помилкові системи намагаються отримати доступ до одного й того ж каналу, через зниження пропускної здатності внаслідок затримок і витрат пакетів [13]. Це можна призвести до підвищення якості послуг для користувачів, особливо в умовах високого завантаження. Важливо врахувати, що для оптимізації пропускної здатності потрібно використовувати ефективні алгоритми управління доступом до частоти, які можуть зменшити ймовірність конфліктів.

3.2. Моделювання пропускної здатності мережі в умовах завад в неліцензійному частотному діапазоні

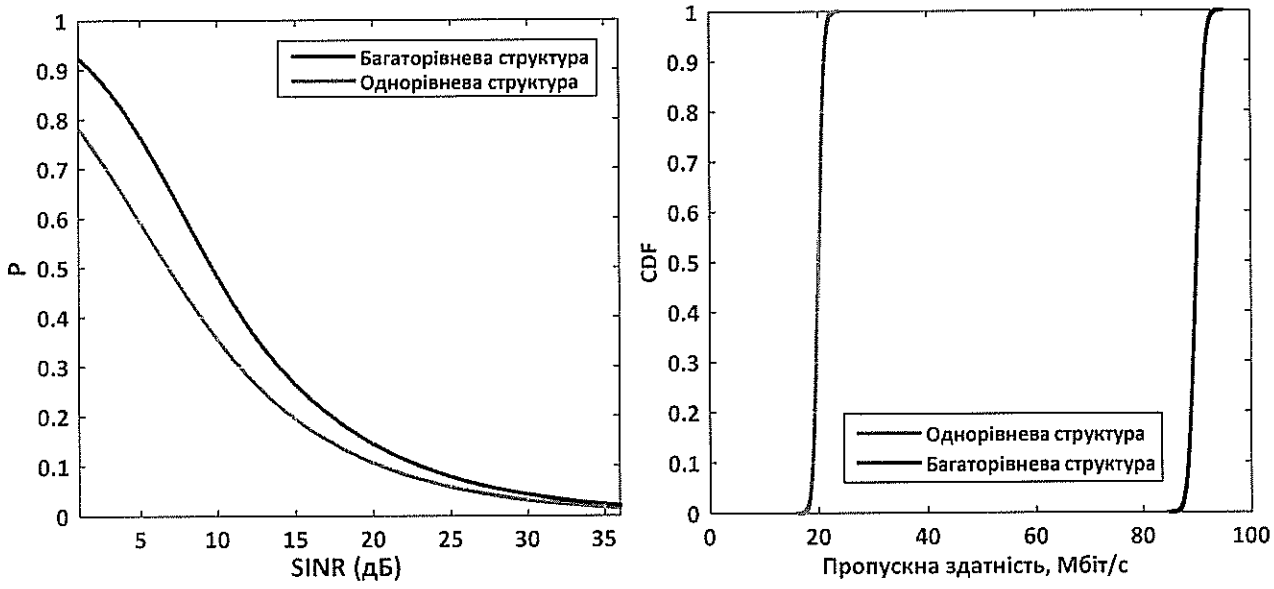
Моделювання продуктивності гетерогенної мережі проводилось на основі оцінки ймовірності того, що випадковий користувач отримає мінімально необхідний рівень співвідношення сигналу до шуму та інтерференції (SINR) з кумулятивною функцією розподілу, яка усереднена по всіх видимих базових станціях. При моделюванні було задано наступні параметри:

- потужність передавання базової станції макрокомірки – 45 дБм;
- потужність передавання базової станції пікокомірки – 30 дБм;
- потужність передавання базової станції фемтокомірки – 20 дБм;
- порогів рівень чутливості приймача – -90 дБм;
- смуга пропускання – 20 МГц;
- спектральна ефективність – 5 біт/с/Гц;
- конфігурація антенної системи – кругова
- модель поширення сигналу – COST-232.

Отримано залежності ймовірності обслуговування від рівня SINR для двох випадків: однорівневої та багаторівневої мережі (рис. 3.3, а). Хоча підвищення густини комірок підвищує рівень інтерференції, результати моделювання показують, що однорівнева топологія мережі забезпечує нижчу ймовірність обслуговування ніж багаторівнева. Це пояснюється тим, що в однорівневій мережі загасання потужності сигналу є вищим. Тому, вплив адитивного шуму є більш суттєвим у порівнянні із впливом інтерференції. Розподіл значення SINR для багаторівневої гетерогенної мережі є більш рівномірним у зв'язку з додатковими передавачами малих комірок, які розташовані ближче до користувачів. На рис. 3.3, б показано кумулятивні функції розподілу пропускної здатності для однорівневої та багаторівневої мережі для ширини спектру 20 МГц та кругової діаграми спрямованості антен базових станцій.

Як показують результати, багаторівнева гетерогенна мережа забезпечує

суттєвий виграш у пропускній здатності у порівнянні із однорівневою мережею у зв'язку з вищим коефіцієнтом повторного використання спектру. Варто зазначити, що багаторівневі гетерогенні мережі також забезпечують виграш з точки зору ймовірності обслуговування, проте подальші дослідження необхідні для розрахунку оптимальної кількості рівнів мережі, а також моделювання складних конфігурацій мережі з динамічною варіацією розміру комірок на основі моделей детермінованої та стохастичної геометрії.



(а) (б)

Рис. 3.3. Залежності ймовірності обслуговування від співвідношення SINR – (а) та кумулятивні функції розподілу пропускної здатності – (б) для однорівневої та багаторівневої гетерогенної мережі.

Комп'ютерне моделювання виконується для отримання інформації про продуктивність співіснування Wi-Fi і LAA в неліцензійній смузі при різних імітаційних конфігураціях. Ми розглядаємо двошарове розміщення комірок, по одному для WiFi і LAA, як показано на рис 3.4., покриття мереж LTE та Wi-Fi співпадає. Параметри, які використовуються для моделювання канального рівня LTE. TDD-LTE розглядається при моделюванні, і передбачається, що BS BS і LAA UE синхронізуються разом весь час. UE LAs повідомляють про значення DL SINR під час передачі DL до BS LAA. Який потім використовується BS LAA для

визначення кількості RB, які будуть розподілені для наступної передачі DL. Планування з круглим циклом розглядається в DL, коли тільки один користувач буде призначений центром протягом кожного інтервалу часу передачі (TTI). Грунтуючись на кількості запитів LAA UE для передачі UL протягом тривалості одного підкадру, смуга пропускання (BW) розподіляється порівну між всіма підкадрами.

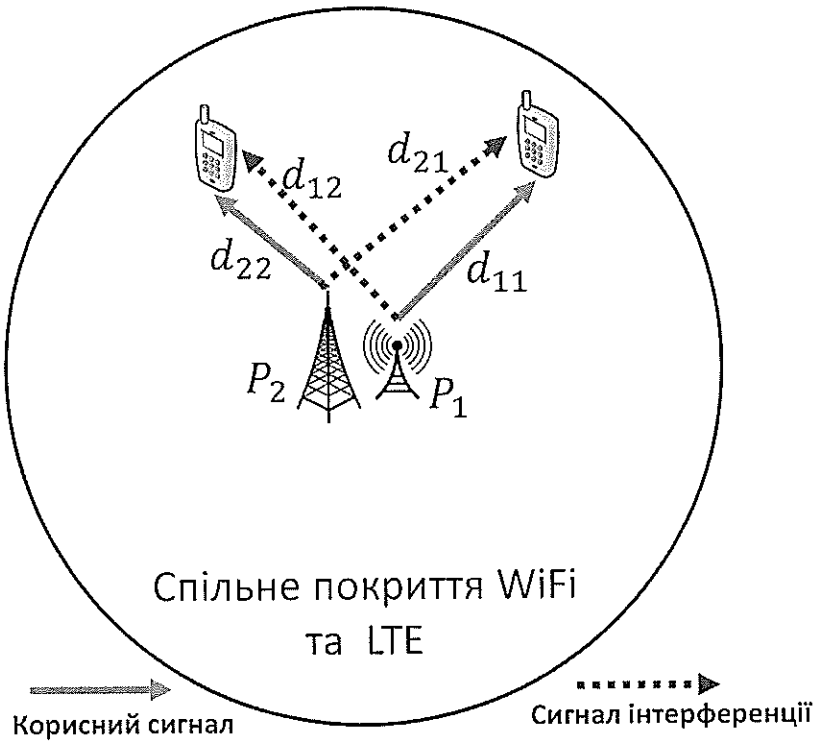


Рис. 3.4. Сценарій моделювання гетерогенної мережі при співіснуванні покриття LTE та Wi-Fi в неліцензійному частотному діапазоні.

У цьому розділі ми опрацюємо результати моделювання, отримані для різних сценаріїв співіснування WiFi і LAA. У всіх цих сценаріях ми зосереджуємося на продуктивності центральної комірки як в моделі Wi-Fi, так і в LAA.

Режим TDD в LTE може бути налаштований на різну кількість підкадрів DL і UL для підтримки різних умов трафіку. Як показано на Рис. 3.6, в конфігурації 1 TDD кількість підкадрів UL у два рази перевищує кількість підкадрів в конфігурації 2.

Можна бачити, що зі зміною TDD 1 ємність Wi-Fi збільшилася. Основна

причина цього полягає в конфігурації 1 TDD, кількість підкадрів UL більша в порівнянні з конфігурацією TDD 2. Отже, можна припустити, що інтерференція LAA менша з конфігурацією 1 TDD в порівнянні з конфігурацією 2, і, як результат, пропускна здатність WiFi збільшується з конфігурацією TDD 1.

З іншого боку, пропусна здатність LAA DL в конфігурації TDD 1 трохи зменшується, порівнянні з конфігурацією 2. Це пов'язано з тим, що, WiFi отримує більше можливостей для передачі, перешкоди від WiFi в LAA DL більші при конфігурації TDD 1. Як видно, WiFi SINR з конфігурацією TDD 1 менша порівняно з конфігурацією 2 TDD. Це пояснюється тим, що, як було пояснено раніше, інтерференція LAA в WiFi із конфігурацією TDD 1 є нижчою порівняно з конфігурацією 2. Таким чином, коли є більша кількість підкадрів UL, інтерференція в Wi-Fi знижена, і внаслідок цього можна спостерігати кращу продуктивність Wi-Fi.

Для визначення ефективності удосконаленого методу випадкового доступу, проведено моделювання процесу обслуговування абонентів в умовах одночасного функціонування мережі LTE та мережі Wi-Fi в цільовій зоні обслуговування. Отримано результати співвідношення потужності сигналу до сумарного значення шуму та інтерференційних завад (SINR) в приймальних абонентських пристроях.

Отримані результати показали перевагу запропонованого методу точки зору інтерференційних завад між мережами Wi-Fi та LTE. Як можна побачити, при використанні запропонованого методу значення SINR для абонентів LTE та Wi-Fi є вищими у 5-10 разів, за рахунок зниження кількості колізій у гетерогенній мережі. Це досягається за рахунок адаптації інтервалів прослуховування середовища до структури кадру LTE. Спочатку передавальна станція LTE прослуховує середовище протягом інтервалу, кратному 1 мс, що відповідає стандартному підкадру LTE. Якщо протягом одного з підкадрів канал звільняється, передавальна станція починає обслуговування абонентів з наступного підкадру до кінця кадру тривалістю 10 мс. Таким чином, протягом одного циклу адаптивного доступу, передавальна станція LTE обслуговує до 9 абонентів у одному частотному каналі, зменшуючи таким чином кількість циклів випадкового доступу, і, як наслідок,

інтерференційних завад між мережами Wi-Fi та LTE.

Крім того, у розділі проведено моделювання гетерогенної мережі в умовах спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону трьома операторами LTE. Моделювання проводилось на основі запропонованої ігрової моделі розподілу радіочастотних ресурсів (рис. 5).

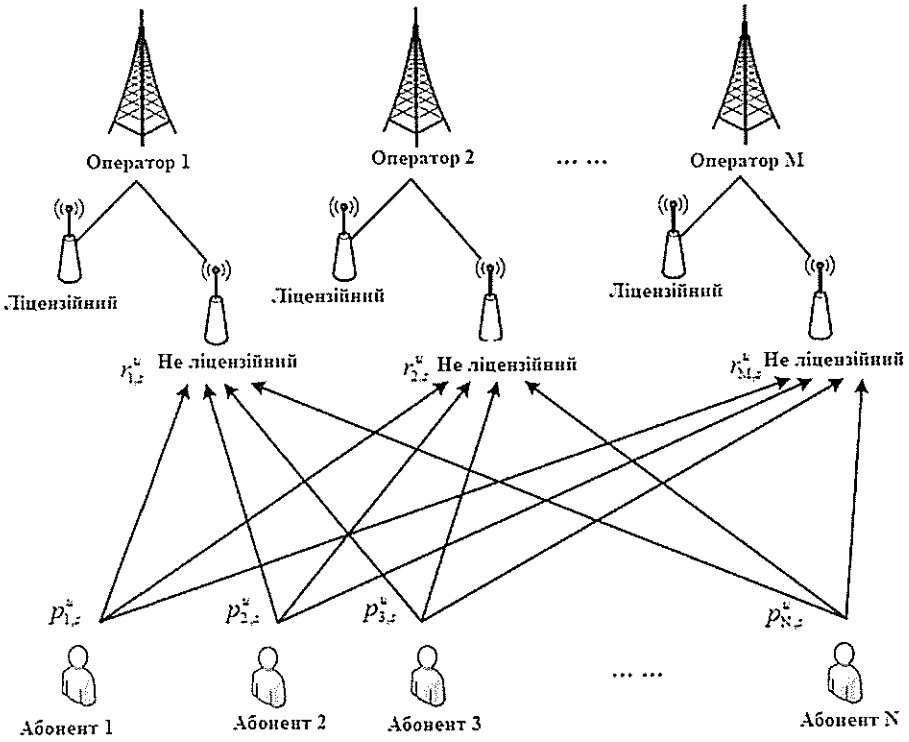


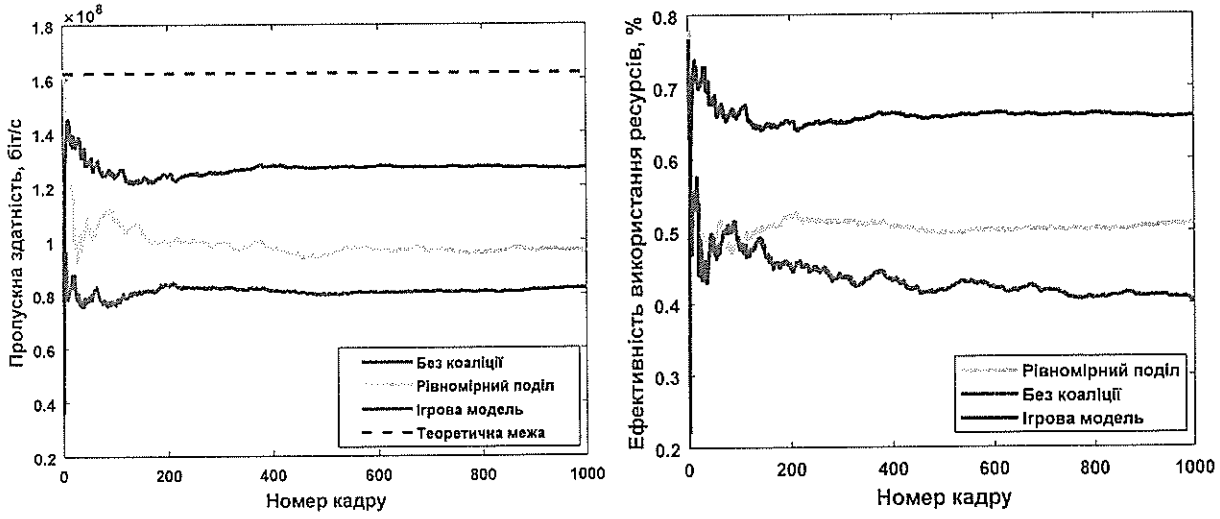
Рис. 3.5. Системна архітектура багато операторної мультиабонентської мережі LTE

Сфокусуємось на потенційному механізмі ціноутворення який може застосовуватися операторами стільникового зв'язку для управління і контролю перешкод викликаних кожним MU відносно іншого MU, а також послуги Wi-Fi в неліцензійному спектрі. Кожен MU може також оптимізувати його продуктивність в рамках механізму ціноутворення операторів. Також сформулюємо ієрархічну гру для вивчення взаємодії між операторами стільникового зв'язку і MU в LTE-U. У цій грі всі оператори спочатку встановлюють їх ціну штрафу за перешкоди на переговори один з одним. Виходячи з ціни, встановленої операторами, кожен MU буде оптимізувати його потужність передачі для подальшого поліпшення і

оптимізації його потожності, без нанесення нестерпних перешкод всім іншим Mus і Wi-Fi користувачів сервісу. Наскільки нам відомо, це перша робота, яка застосовує ієрархічну модель гри для вивчення LTE-U. Результати моделювання показують що стільникові оператори і мобільні користувачі досягають високої продуктивності базуючись на різних умовах руху трафіку в неліцензійному спектрі.

Розглянемо сценарій висхідних ліній зв'язку в системі стільникового зв'язку де M суміщених операторів служать N мобільним користувачам N (MUs) одночасно. Як оператори можуть обслуговувати MUs в обох спектрах ліцензованому і неліцензованому.

У ліцензованому спектрі ми припускаємо що кожен оператор може обслуговувати користувачів або з макроСтільникми чи малими Стільникми які можуть бути узгоджені між собою для уникнення перешкод (рис. 3.6.).



а) б)

Рис. 3.6. Результати пропускної здатності – а) та ефективності використання радіочастотних ресурсів – б) при ігровій моделі спільного використання ресурсів

Діаграма ілюструє залежність ймовірності колізій від співвідношення сигнал/шум (SNR) для двох підходів: традиційного та удосконаленого методу випадкового доступу. Згідно з представленими даними, удосконалений метод

демонструє помітне зниження ймовірності колізій у порівнянні з традиційним методом у всьому діапазоні SNR.

Аналіз результатів:

1. При низьких значеннях SNR (0–10 дБ). Традиційний метод має високу ймовірність колізій (до 45%), що пов'язано з обмеженими можливостями ефективного управління радіоресурсами в умовах низької якості сигналу. Натомість удосконалений метод дозволяє зменшити цей показник до 30%, що свідчить про його здатність краще адаптуватися до умов низького співвідношення сигнал/шум.

2. У середньому діапазоні SNR (15–25 дБ). У цьому діапазоні спостерігається значне зниження ймовірності колізій для обох методів, однак удосконалений метод залишається більш ефективним. Його показник ймовірності колізій зменшується до 10%, тоді як для традиційного методу цей показник складає близько 24–29%.

3. При високих значеннях SNR (30–35 дБ). Удосконалений метод забезпечує стабільну ефективність, знижуючи ймовірність колізій до рівня 3–5%. Це підтверджує його здатність оптимально використовувати радіочастотний ресурс навіть за сприятливих умов передачі. Традиційний метод у цьому випадку демонструє вищу ймовірність колізій (12–18%), що свідчить про його менш ефективну адаптацію до умов високого SNR.

Удосконалений метод випадкового доступу забезпечує значно кращі показники, ніж традиційний метод, завдяки своїй адаптивній природі та здатності знижувати інтерференцію між пристроями. Цей підхід є особливо ефективним у неліцензійному спектрі, де інтерференція від сторонніх пристроїв є значним викликом. Таким чином, впровадження удосконаленого методу сприяє підвищенню ефективності використання спектра, знижуючи навантаження на мережу та покращуючи якість обслуговування (QoS).

ВИСНОВКИ

У першому розділі досліджено основні характеристики та принципи роботи технології LTE. Представлено еволюцію стандартів LTE, починаючи з Release 8, що забезпечило значне зростання швидкості передачі даних до 1 Гбіт/с і більше, завдяки використанню ключових технологій, таких як OFDMA, MIMO та Carrier Aggregation. Показано поступове підвищення ефективності LTE, зокрема, за рахунок впровадження LTE Advanced і LTE Advanced Pro.

У дослідженні наведено особливості використання радіочастотного спектра LTE, включаючи ліцензійний і неліцензійний спектри, що дозволяють забезпечити як стабільність з'єднання, так і високу пропускну здатність. Результати показують, що завдяки використанню низьких і високих частот у різних сценаріях вдалося досягти оптимального покриття і продуктивності мережі.

Розглянуто також архітектуру LTE, зокрема роль основних елементів, таких як eNodeB та EPC, які забезпечують високу швидкість передачі даних та ефективність роботи мережі. Досліджено методи забезпечення ефективного використання радіоресурсів, серед яких технологія MIMO, динамічне управління частотами та планування ресурсів, які демонструють суттєве підвищення продуктивності мережі.

Проаналізовано особливості використання LTE у ліцензованому спектрі. Встановлено, що ліцензований спектр забезпечує стабільне з'єднання, мінімізацію інтерференції та високу якість обслуговування завдяки виключному доступу операторів до частотних ресурсів. Показано, що низькі частоти (700–800 МГц) забезпечують ширше покриття та кращу проникність сигналу, тоді як високі частоти (2600 МГц) сприяють досягненню високої пропускної здатності. Визначено, що технології FDD і TDD сприяють ефективному розподілу частот для двонаправленого зв'язку. Разом із впровадженням механізмів агрегації спектра, LTE у ліцензованому діапазоні дозволяє оптимізувати використання радіоресурсів і задовольнити зростаючий попит на мобільний Інтернет у густонаселених районах.

У другому розділі вирішено задачу спільного використання радіочастотних ресурсів при розгортанні мереж LTE кількома операторами мобільного зв'язку в неліцензійному частотному діапазоні. Для цього запропоновано метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі.

Досліджено особливості архітектури з кількома рівнями покриття. Показано централізовану хмарну архітектуру стільникових мереж, що дозволяє відокремити модуль формування сигналів (BBU) від радіоприймачів (RRH) для створення пулу BBU. Це забезпечує гнучкість у розгортанні надщільних мереж та ефективне управління інтерференцією.

Вперше запропоновано метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі. Метод поєднує випадковий доступ із детермінованим розподілом каналів, що забезпечує адаптивне використання радіоресурсів. Як показано на рисунках 2.9 та 2.10, запропонована модель чергування підкадрів забезпечує співіснування пристроїв LTE і Wi-Fi. Це дозволяє ефективно використовувати спільний спектр, знижуючи інтерференцію і підвищуючи якість обслуговування. Метод є перспективним для розгортання гетерогенних мереж з агрегацією ресурсів, про що свідчить представлена на рисунках 2.11 та 2.12 діаграма процесу адаптивного доступу до спектру.

Досліджено методи агрегації радіочастотних ресурсів у ліцензійному та неліцензійному спектрах. Вперше запропоновано алгоритм адаптивної агрегації, який базується на логічному розподілі спектра за трьома рівнями пріоритету доступу. Це дозволяє ефективно використовувати ліцензійний спектр для критичних даних, одночасно забезпечуючи справедливий доступ до неліцензійного спектра в умовах співіснування з Wi-Fi і іншими LTE-мережами.

Аналіз моделі розподілу радіоресурсів (рисунок 2.12) показав, що запропонований підхід забезпечує оптимальне балансування між доступністю та ефективністю використання спектра. На рисунку 2.13 продемонстровано можливість агрегації трьох частотних діапазонів, що сприяє збільшенню

пропускної здатності мережі та підвищенню її надійності. Представлена на рисунку 2.14 блок-схема алгоритму підтверджує, що послідовний доступ до первинного та вторинного спектрів забезпечує максимальне використання доступних ресурсів.

Таким чином, методи агрегації радіочастотних ресурсів сприяють підвищенню ефективності функціонування LTE-мереж, забезпечуючи стабільне з'єднання та високу якість обслуговування в умовах інтенсивного навантаження.

У третьому розділі досліджено модель спільного використання неліцензованого частотного діапазону між LAA та Wi-Fi. В. Цей підхід дозволяє збалансувати використання частотного спектра між LAA і Wi-Fi, мінімізуючи інтерференцію та підвищуючи ефективність обох систем. Показники, такі як пропускна здатність та затримка, свідчать про значне покращення якості обслуговування (QoS) у порівнянні з традиційними методами.

На основі методу збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі досліджено пропускну здатність гетерогенних мереж у неліцензованому спектрі. Результати моделювання (рисунки 3.3 та 3.4) демонструють, що багаторівневі гетерогенні мережі забезпечують вищу пропускну здатність і знижують рівень інтерференції у порівнянні з однорівневими топологіями. Зокрема, розподіл SINR є більш рівномірним, що сприяє підвищенню ймовірності обслуговування користувачів. Отримані дані підтверджують ефективність запропонованого підходу для розгортання сучасних телекомунікаційних систем, зокрема в умовах підвищеного навантаження.

Рисунок 3.3 демонструє, що запропонований метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі значно покращує показники ймовірності обслуговування та пропускної здатності мережі. Порівняння однорівневої та багаторівневої гетерогенної мережі показує, що використання додаткових передавачів малих комірок зменшує вплив загасання сигналу та дозволяє досягти рівномірного розподілу співвідношення сигнал/шум (SINR). Це підвищує ефективність використання спектра та забезпечує стабільне обслуговування навіть у середовищі з високим рівнем інтерференції, що критично важливо для неліцензійного спектра.

Рисунок 3.6 підтверджує, що отримані результати свідчать, що запропонований метод дозволяє мінімізувати інтерференцію між операторами LTE та Wi-Fi завдяки адаптивному розподілу ефірного часу та частотного ресурсу. Підхід із координацією між операторами забезпечує зростання пропускної здатності, знижує ймовірність колізій і покращує ефективність використання обмеженого спектра.

Результати свідчать, що запропонований метод значно знижує інтерференцію між Wi-Fi та LTE та підвищує значення SINR у 5-10 разів порівняно з традиційними методами.

Таким чином, обидва рисунки демонструють, що запропонований метод значно підвищує продуктивність мереж LTE у неліцензійному спектрі, оптимізуючи розподіл ресурсів, зменшуючи інтерференцію та забезпечуючи високу якість обслуговування навіть у складних умовах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Boccardi, F., Heath, R. W., Lozano, A., Marzetta, T. L., & Popovski, P. (2022). Five Disruptive Technology Directions for 5G. IEEE Communications Magazine, 52(2), 74–80.

2. Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., ... & Gutierrez, F. (2013). Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! IEEE Access, 1, 335–349.

3. Li, Q. C., Niu, H., Papathanassiou, A. T., & Wu, G. (2022). 5G Network Capacity: Key Elements and Technologies. IEEE Vehicular Technology Magazine, 9(1), 71–78.

4. Ge, X., Cheng, H., Guizani, M., & Han, T. (2024). 5G Wireless Backhaul Networks: Challenges and Research Advances. IEEE Network, 28(6), 6–11.

5. Zhang, N., Li, S., Ren, J., & Shen, X. S. (2018). Synergy of Big Data and 5G Wireless Networks: Opportunities, Approaches, and Challenges. IEEE Wireless Communications, 25(1), 12–18.

6. C-RAN: The Road Towards Green RAN – White Paper, ver. 3.0 — China: China Mobile Research Institute, Oct. 2021. — 91 p.

7. Choi S.-H. Channel Estimations Using Extended Orthogonal Codes for AF Multiple-Relay Networks Over Frequency-Selective Fading Channels / S.-H. Choi, J.-S. Baek, J.-S. Han, and J.-S. Seo // IEEE Transactions on Vehicular Technology, January 2014 – vol. 63 – no. 1 – P.417-42

8. System and method for distributed input distributed output wireless communications / A. Forenza, R. W. Heath Jr, S. G. Perlman, R. Van der Laan and J. Speck – U.S. Patent No. 8,428,162. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2013.

9. Lee J.-H. Probabilistic Limited Feedback Precoding in MIMO Interference Channels / J.-H. Lee // IEEE Communications Letters December, 2022 — vol. 16 – no. 12

10. Insoo N. A Holistic View on Hyper-Dense Heterogeneous and Small Cell

Networks / H. Insoo, S. Bongyong, S.S. Soliman // IEEE Communications MagazineUSA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023 – vol. 51 – no. 6 – P.20-27

11. Nakamura T. Trends in small cell enhancements in LTE advanced / T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour et al. // IEEE Communications MagazineUSA – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023 – vol. 51 — no. 2 – P.98-105

12. 3GPP TS 36.104 version 12.1.0, " EUTRA; Base Station Radio Transmission and Reception."

13. Okino K. Pico cell range expansion with interference mitigation toward LTE-Advanced heterogeneous networks / K. Okino, T. Nakayama, , C. Yamazaki, H. Sato, Y. Kusano // In Communications Workshops (ICC), 2011 IEEE International Conference – June, 2011 – P. 1-5

14. Hu R.Q. Resource Management for Heterogeneous Networks in LTE Systems: tutorial. / R.Q. Hu, Y. Qian // SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering – USA: Springer, 2022. – 93 p.

15. Grant A. Convergence of linear interference cancellation multiuser receivers. / A. Grant, C. Schlegel // Communications, IEEE Transactions – 200 – 149(10) – P. 1824-1834.

16. Ahmed E. Self-interference cancellation with nonlinear distortion suppression for full-duplex systems / E. Ahmed, A. M. Eltawil, A. Sabharwal // In Signals, Systems and Computers, 2013 IEEE Asilomar Conference – November, 2013 – P. 1199-1203

17. Hong S. K. Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond. / S. K. Hong, J. Brand, J. Choi, M. Jain, J. Mehlman, S. Katti, P. Levis //. Communications Magazine IEEE, 2022 – 52(2) – P. 114-121.

18. Akoum S. Data sharing coordination and blind interference alignment for cellular networks. / S. Akoum, C. S. Chen, M. Debbah, R. W Heath // In Global Communications Conference (GLOBECOM) – 2022, December – P. 4273-4277

19. Liu C. A novel multi-service small-cell cloud radio access network for mobile backhaul and computing based on radio-over-fiber technologies. / C. Liu, L. Zhang, M. Zhu, J. Wang, L. Cheng, G. K. Chang // Lightwave Technology Journal, 2023– 31(17) –

P. 2869-2875.

20. Parkvall S. Evolution of LTE toward IMT-advanced / S. Parkvall, A. Furuskär, E. Dahlman // Communications Magazine, IEEE, 2021 – 49(2) – P. 84-91.

21. Bhosale R. D. Performance Evaluation of Unlicensed Mobile Access Using WiFi. / R. D. Bhosale, A. R. Nigavekar // Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), 2015 International Conference IEEE – 2015, February – P. 148-152.

22. Ratasuk R. LTE in unlicensed spectrum using licensed-assisted access / N. Mangalvedhe, A. Ghosh // In Globecom Workshops IEEE – December, 2022 – P. 746-751

23. Doppler K. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks / K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting et al. // IEEE Communications Magazine – vol. 47, no. 12 – USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. – P.42-49.

24. Silva C. F. M. Radio Resource Management for Device-to-Device Communications in Long Term Evolution Networks / C. F. M. Silva, J. M. B. Silva, T. F. Maciel, F. R. P. Cavalcanti, Ed. Springer // New York, 2023 – http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-8057-03.

25. Mitola J. Cognitive radio: making software radios more personal / J. Mitola, G. Q. Maguire // Jr IEEE Personal Communications, 1999 – vol. 6 – no.4 – pp.13-18

26. Chen R. A 0.5-to-3 GHz software-defined radio receiver using discrete-time RF signal processing. / R. Chen, H. Hashemi // Solid-State Circuits, IEEE Journal, 2014 – 49(5) – P. 1097-1111.

27. Bloessl B. (). Timings matter: standard compliant ieee 802.11 channel access for a fully software-based SDR architecture / B. Bloessl, A. Puschmann, C. Sommer, F. Dressler // In Proceedings of the 9th ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation and characterization – 2014, September – P. 57-64

28. Cai X. Energy-efficient Relay MAC with Dynamic Power Control in Wireless Body Area Networks / X. Cai, J. Yuan, X. Yuan, W. Zhu, J. Li, C. Li and S. Ullah // KSII Transactions on Internet and Information Systems – 2013 – Vol.7 – No.7 – P. 1547-1568.

29. Saleh A. RRSEB: A Reliable Routing Scheme For Energy-Balancing Using A

Self-Adaptive Method In Wireless Sensor Networks / A. Saleh, B. Ali, H. Mohamad, M. Rasid and A. Ismail // KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2023 – Vol. 7 – No.7 – P.1585-1609.

30. Demestichas P. 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network / P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu and J. Yao // IEEE Vehicular Technology Magazine – vol. 8 – no.3 – P. 47-53

31. Kaufman B. Spectrum sharing scheme between cellular users and ad-hoc device-to-device users. / B. Kaufman, J. Lilleberg, B. Aazhang // Wireless Communications, IEEE Transactions, 2023 – 12(3) – P. 1038-1049.

32. Jailton J. A quality of experience handover architecture for heterogeneous mobile wireless multimedia networks / J. Jailton, T. Carvalho, W. Valente, C. Natalino, R. Frances, K. Dias // IEEE Communications Magazine, Jun., 2013 – vol. 51 – no. 6 – P. 152-159

33. Mueck M. Novel Spectrum Usage Paradigms for 5G / M. Mueck, W. Jiang, J. Sung // White Paper — USA: IEEE TCCN SIG CR in 5G, 2021. — 77 p.

34. FCC, "Amendment of the Commission's Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550–3650 MHz Band," GN Docket No. 12-354, Notice of Proposed Rule Making, 27 FCC Rcd 15594, 2012.

35. Zhang H. Coexistence of Wi-Fi and heterogeneous small cell networks sharing unlicensed spectrum. H. Zhang, X. Chu, W. Guo, S Wan // Communications Magazine, IEEE, 2015 – 53(3) – P.158-164

36. Khan F. Millimeter-wave mobile broadband with large scale spatial processing for 5G mobile communication / F. Khan, Z. Pi, S. Rajagopal // In IEEE 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Oct. 2012 – P. 1517-1523

37. Rappaport T. S. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! / Rappaport T. S., Sun S., Mayzus R., Zhao H., Azar Y., Wang K., Gutierrez F. // IEEE Access, 2013 – 1 –P. 335-349.

38. Yin B. High-throughput beamforming receiver for millimeter wave mobile communication / Yin B., Abu-Surra S., Xu G., Henige T., Pisek E., Pi Z., Cavallaro J. R.

// Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec. 2023 – P. 3697-3702.

39. Pi Z. A millimeter-wave massive MIMO system for next generation mobile broadband / Pi Z., Khan F. // Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Nov. 2022 – P. 693-698.

40. Choi J. Noncoherent trellis coded quantization: A practical limited feedback technique for massive MIMO systems / Choi J., Chance Z., Love D. J., Madhow U. // IEEE Transactions on Communications, 2023 – 61(12), P. 5016-5029.

41. Yin H. A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems / Yin H., Gesbert D., Filippou M., Liu Y. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023 – 31(2) – P. 264-273.

42. Hur S. Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks/ Hur S., Kim T., Love D. J., Krogmeier J. V., Thomas T., Ghosh A. // IEEE Transactions on Communications, 2023 – 61(10), P. 4391-4403.

43. Haykin S. Cognitive radio: Brain empowered wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications – 2(23) – P. 201–220.

44. Mitola J. Cognitive radio –An integrated agent architecture for software defined radio // Ph.D. thesis – Royal Institute of Technology (KTH): Sweden – 2000.

45. Stuber G. L. Interference analysis of TV-band whitespace/ Stuber G. L., Almalfouh S. M., Sale D. //Proceedings of the IEEE, 2019 – 97(4) – P. 741-754.

46. Kryszkiewicz P. Out-of-band power reduction in NC-OFDM with optimized cancellation carriers selection/ Kryszkiewicz P., Bogucka H.// IEEE Communications Letters, 2021 – 17(10) – P. 1901–1904.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Презентація по магістерській роботі
на тему:

Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі

Виконав: Данило ФІЛЯКІН

Керівник: Анатолій МАКАРЕНКО,
д.т.н., професор

Мета роботи

Метою роботи є підвищення пропускної здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку в умовах адаптивного використання радіочастотного спектру кількома технологіями радіодоступу (LTE та Wi-Fi).

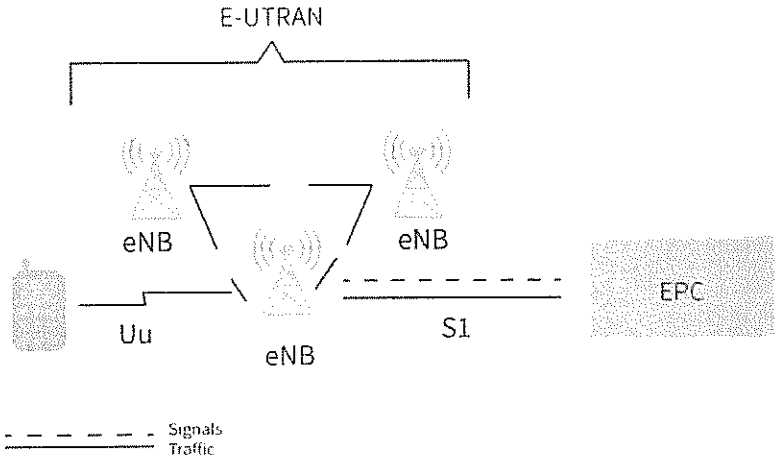
Об'єктом дослідження є процес передавання даних у мережах мобільного зв'язку.

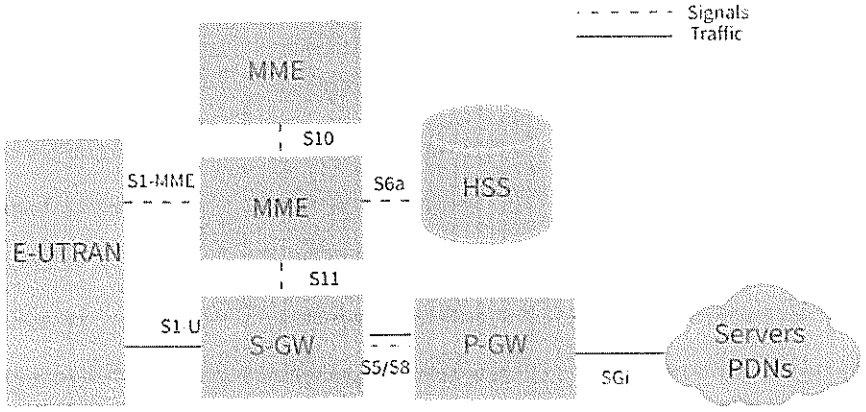
Предметом дослідження є методи підвищення ефективності використання неліцензійного радіочастото спектру.

Особливості технології LTE

Розділ	Основні аспекти	Технології
Радіочастотний спектр LTE	Ліцензійний і неліцензійний спектр; Глобальні частоти LTE; Агрегування частот.	Бенди з частотами: 700 МГц, 800 МГц, 1800 МГц, 2600 МГц
Архітектура LTE мережі	Основні елементи (eNodeB, EPC); Інтеграція з 3G і 2G; Принципи роботи мережі.	Evolved Packet Core (EPC), eNodeB
Методи модуляції у LTE	OFDMA для прямого каналу; SC-FDMA для зворотного каналу; Адаптивна модуляція.	OFDMA, SC-FDMA, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Ефективність використання радіоресурсів	Технологія MIMO; Динамічне управління частотними ресурсами; Планування ресурсів.	MIMO, динамічне управління частотами
Забезпечення якості обслуговування (QoS)	Пріоритизація трафіку; Мінімізація затримок у реальному часі; Оптимізація роботи при високому навантаженні.	Класи обслуговування QoS, GPRS Tunneling Protocol (GTP), Packet Data Convergence Protocol (PDCP)

Архітектура мережі доступу на основі технології LTE





Розширене пакетне ядро (EPC)

Ліцензовані частотні діапазони LTE в Україні

Частотний діапазон (МГц)	LTE Band	Опис використання
900 / FDD	Band 8	Використовується для покриття великих територій, зокрема сільської місцевості, завдяки великому радіусу дії базових станцій (до 26 км).
1800 / FDD	Band 3	Забезпечує баланс між радіусом дії та ємністю мережі, використовується як у містах, так і в сільській місцевості.
2100 / FDD	Band 1	Частково використовується для LTE, очікується повний рефармінг для збільшення пропускної здатності.
2600 / TDD	Band 7	Застосовується в густонаселених районах для забезпечення високої пропускної здатності, має менший радіус дії (до 2,5-3 км).

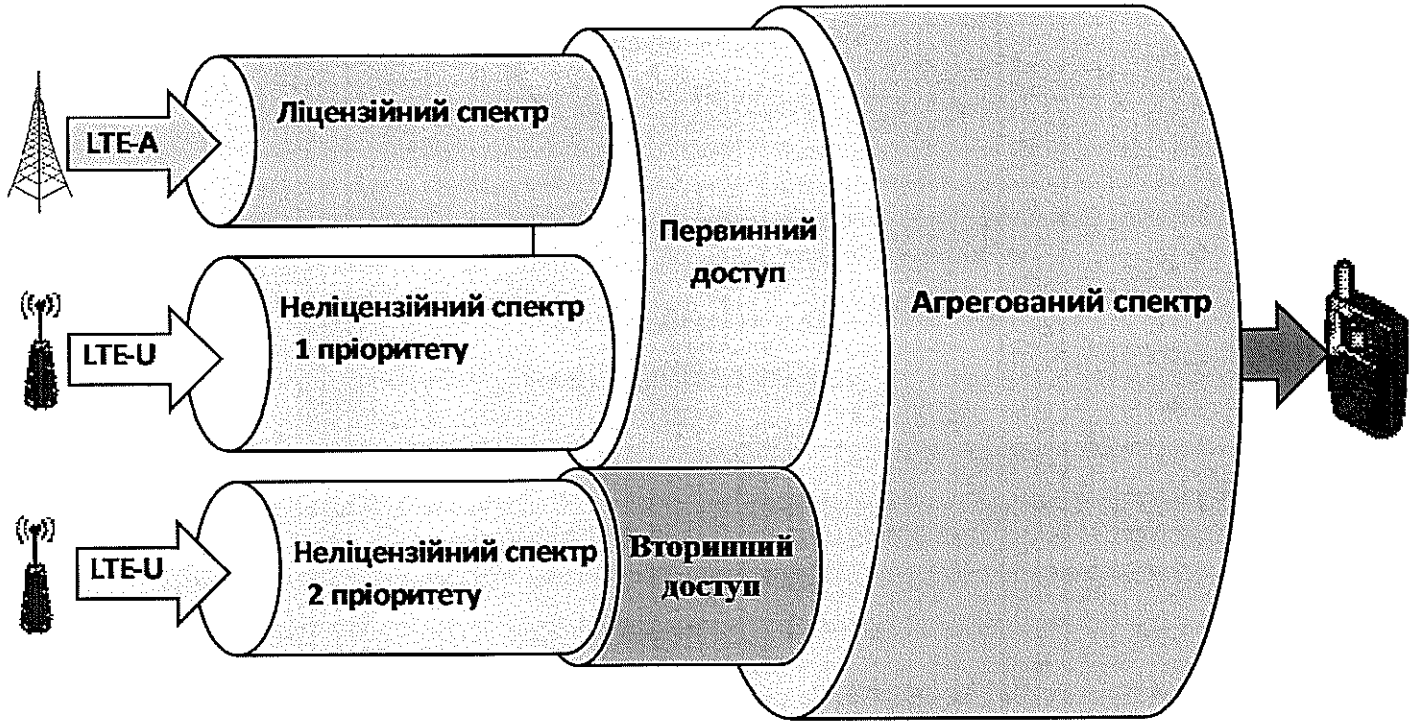
Licensed Assisted Access (LAA) — це технологія, яка дозволяє операторам мобільного зв'язку використовувати ліцензовані та неліцензовані діапазони частот для збільшення пропускної здатності. Основні частоти LAA використовують неліцензовані спектри, зокрема:

5 ГГц — найпоширеніший діапазон для LAA, оскільки він забезпечує високу пропускну здатність і мінімальні перешкоди в сучасних мережах.

2.4 ГГц — може використовуватися у випадках, коли потрібне ширше покриття, хоча він зазвичай має більше перешкод через велику кількість пристроїв, що працюють у цьому діапазоні.

3.5 ГГц — іноді використовується в умовах, де доступ до 5 ГГц обмежений.

Використання не ліцензованих частот: Принцип агрегації пропускної здатності з трьох частотних діапазонів



Licensed Assisted Access (LAA) — це технологія, яка дозволяє операторам мобільного зв'язку використовувати ліцензовані та неліцензовані діапазони частот для збільшення пропускної здатності. Основні частоти LAA використовують неліцензовані спектри, зокрема:

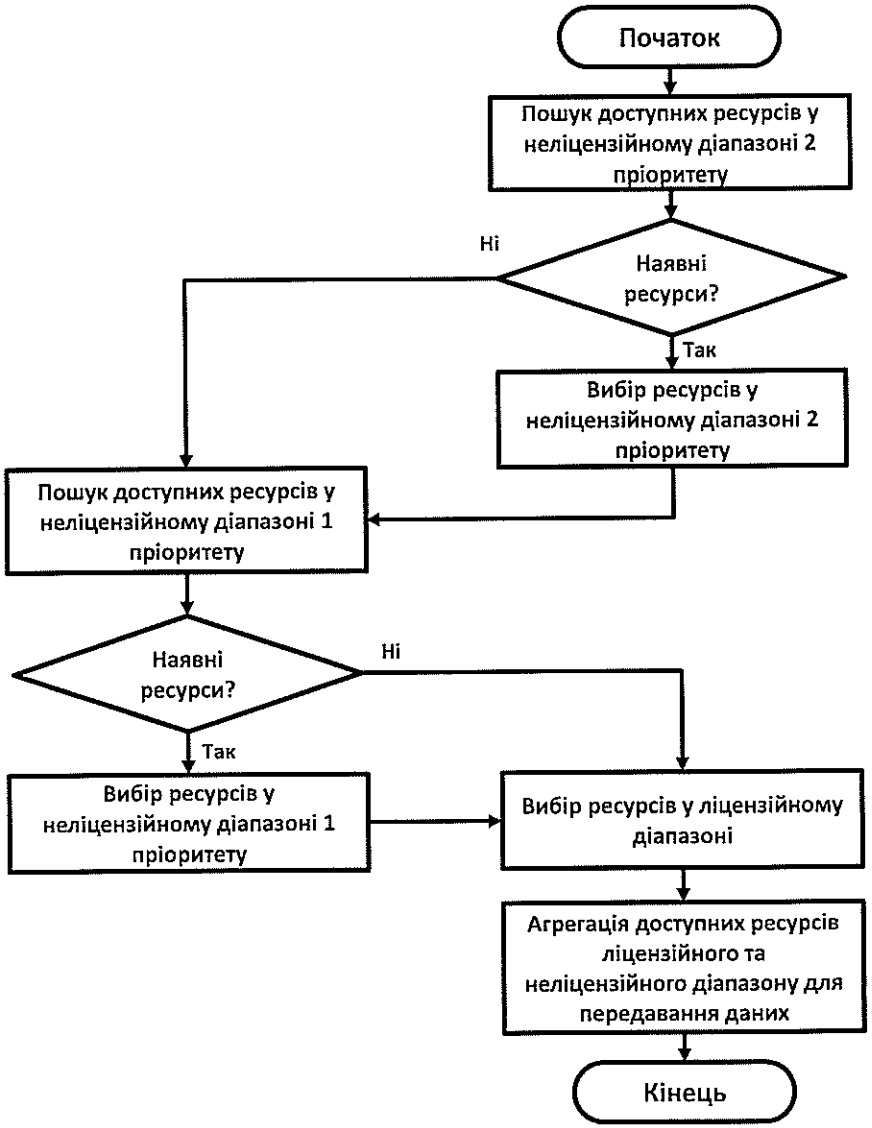
5 ГГц — найпоширеніший діапазон для LAA, оскільки він забезпечує високу пропускну здатність і мінімальні перешкоди в сучасних мережах.

2.4 ГГц — може використовуватися у випадках, коли потрібне ширше покриття, хоча він зазвичай має більше перешкод через велику кількість пристроїв, що працюють у цьому діапазоні.

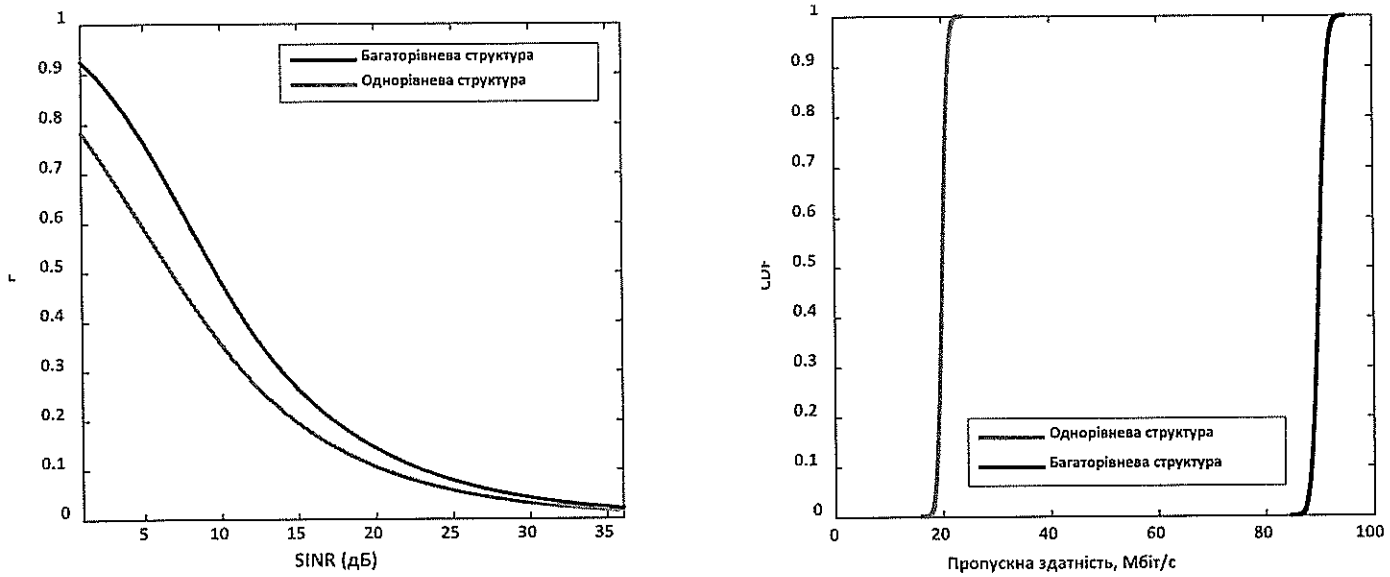
3.5 ГГц — іноді використовується в умовах, де доступ до 5 ГГц обмежений.

Технологія LAA працює на основі стандарту LTE Advanced і використовує методику агрегації несучих для об'єднання частот у ліцензованому та неліцензованому спектрах, що дозволяє підвищити ефективність використання радіочастотного ресурсу.

Блок-схема алгоритму агрегації радіочастот в ліцензійному та неліцензійному діапазонах

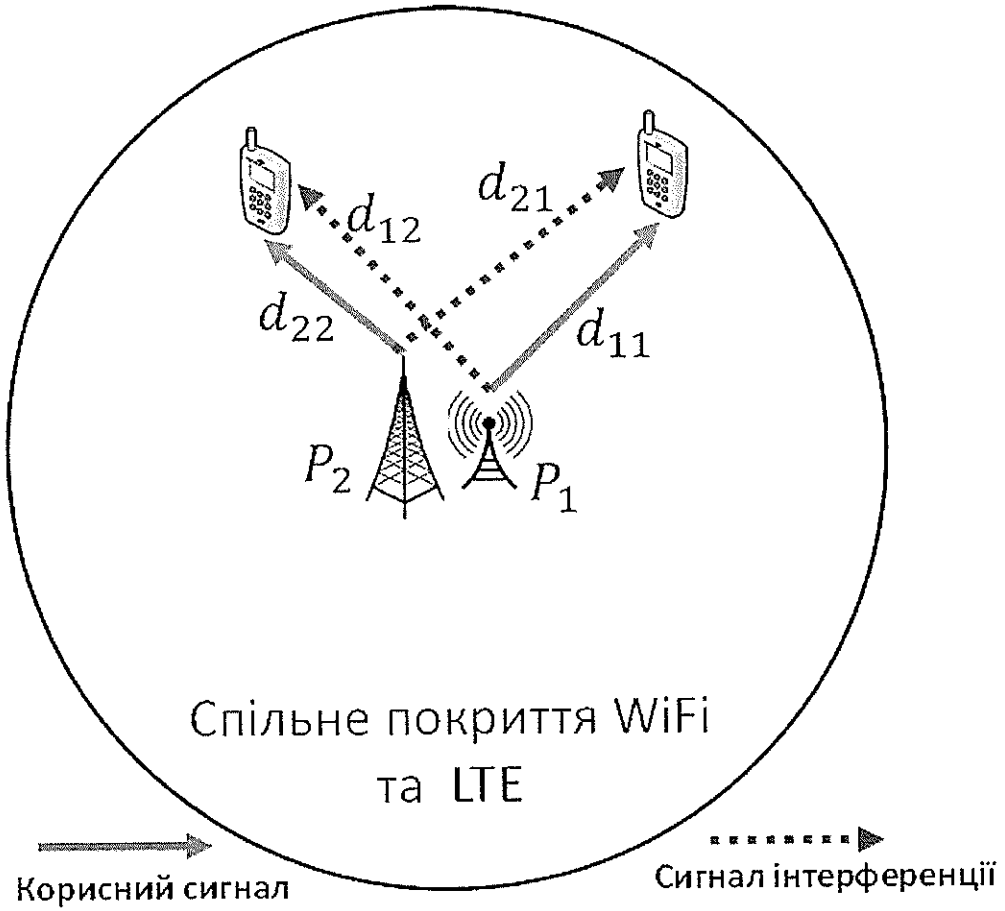


Залежності ймовірності обслуговування від співвідношення SINR

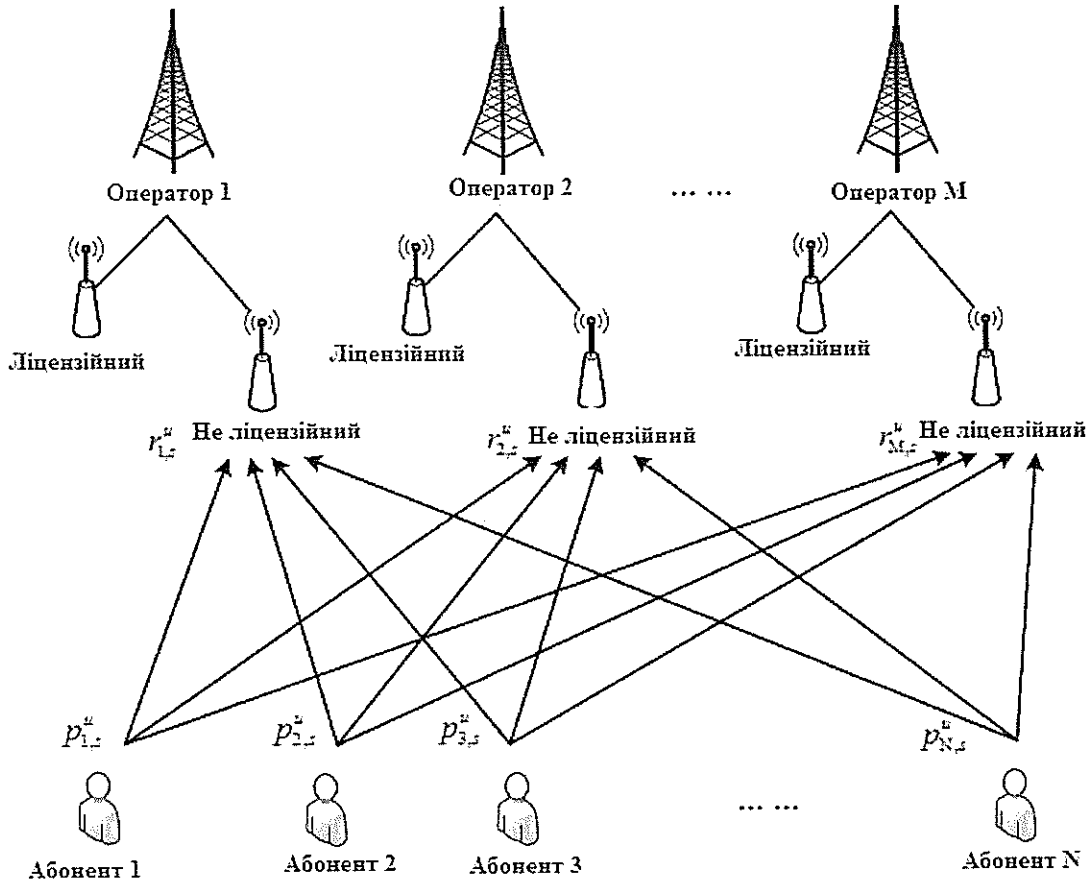


Залежності ймовірності обслуговування від співвідношення SINR – (а) та кумулятивні функції розподілу пропускної здатності – (б) для одноріванева та багаторівневої гетерогенної мережі

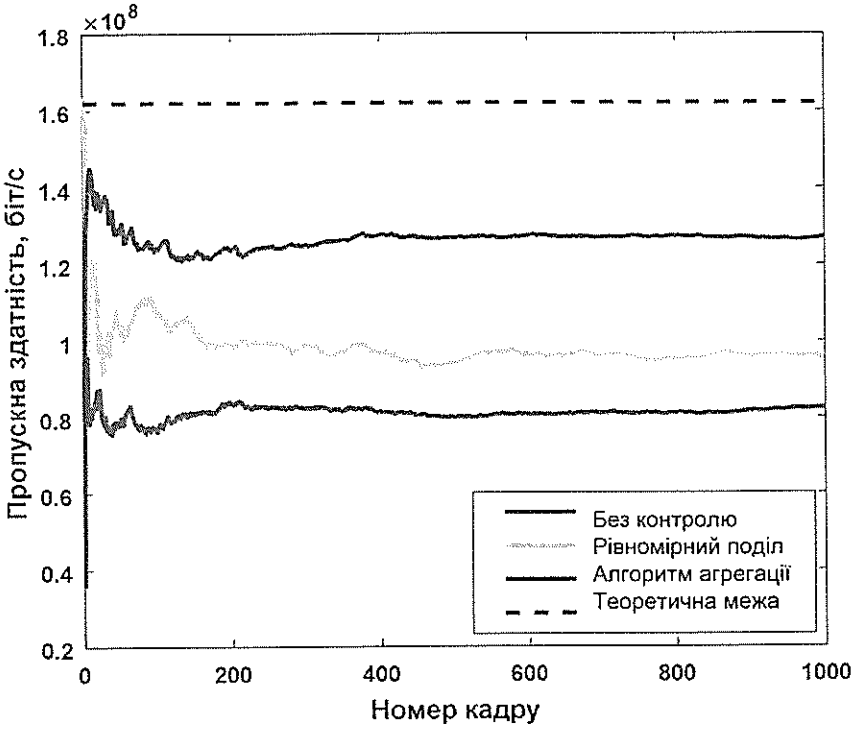
Сценарій моделювання гетерогенної мережі при співіснуванні покриття LTE та Wi-Fi в неліцензійному частотному діапазоні

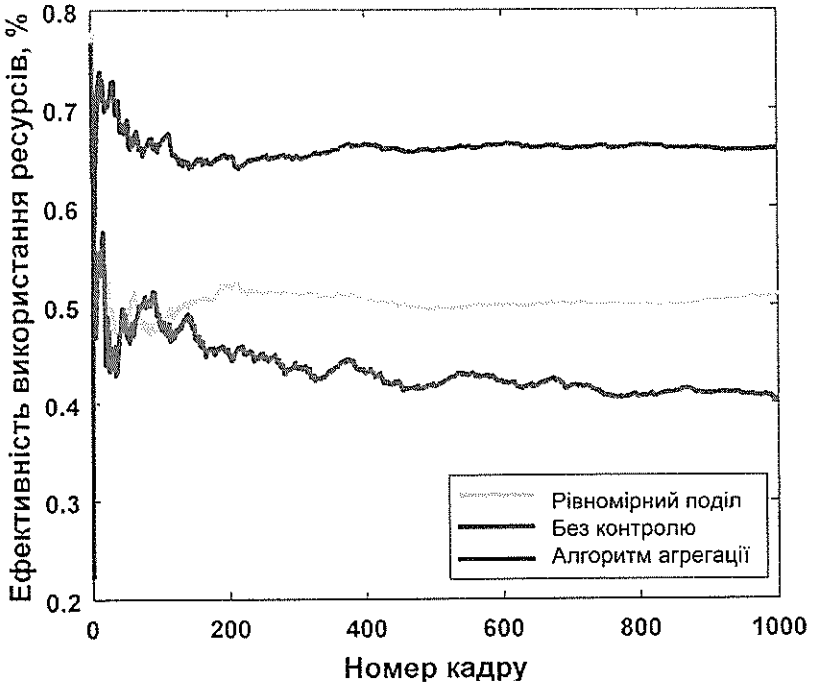


Моделювання процесу спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону кількома операторами LTE



Результати моделювання





Результати пропускної здатності – а)
та ефективності використання
радіочастотних ресурсів – б).

Висновки

В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

У першому розділі детально проаналізовано основи технології LTE, її еволюцію та ключові принципи роботи. Розглянуто основні релізи стандарту, починаючи з Release 8, що забезпечили значне підвищення продуктивності, зокрема через впровадження технологій OFDMA, MIMO та Carrier Aggregation. Показано, як використання різних частотних діапазонів впливає на ефективність мережі: низькі частоти забезпечують ширше покриття, тоді як високі сприяють досягненню високої пропускної здатності. Описано архітектуру LTE, зокрема eNodeB та EPC, які відіграють ключову роль у забезпеченні високих швидкостей передачі даних.

У другому розділі запропоновано методи оптимізації використання радіочастотного спектра в неліцензійному діапазоні. Вперше представлено адаптивний підхід до спільного використання спектра LTE та Wi-Fi, що знижує інтерференцію та підвищує якість обслуговування. Метод включає динамічне чергування підкадрів і адаптивну агрегацію частотного спектра, що дозволяє оптимально використовувати ресурси мережі. Проведено моделювання, яке підтвердило ефективність запропонованих методів у підвищенні пропускної здатності та зниженні рівня інтерференції.

У третьому розділі досліджено модель спільного використання неліцензійного спектра між LAA та Wi-Fi. Моделювання показало, що багаторівнева архітектура значно покращує продуктивність мережі, забезпечуючи рівномірний розподіл SINR та знижуючи ймовірність колізій. Результати підтвердили, що запропонований метод дозволяє ефективно інтегрувати LTE у неліцензійний спектр, забезпечуючи стабільне обслуговування навіть у середовищах із високою щільністю користувачів.

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Данило ФІЛЯКІН

Назва: Метод збільшення ефективності використання технології LTE в неліцензійному радіочастотному спектрі

Координатор: Анатолій МАКАРЕНКО

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:1.2

Коефіцієнт подібності 2:0

Тривога: 0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☑ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*