

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

**Інститут телекомунікаційних систем  
Кафедра Телекомунікаційних систем**

«На правах рукопису»

УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Л.О. Уривський

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка**

**на тему: «Підвищення пропускної спроможності мереж мобільного зв'язку стундарту LTE при використанні неліцензійного радіочастотного спектру»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ТС-71мп

Заболотна Анна Юріївна \_\_\_\_\_

Керівник:

Доцент

Гаттуров В.К. \_\_\_\_\_

Рецензент:

Доцент, к.т.н.

Мазор С.Ю. \_\_\_\_\_

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

Студентка \_\_\_\_\_

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інститут телекомунікаційних систем**  
**Кафедра Телекомунікаційних систем**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
(172.3620.1 «Телекомунікаційні системи та мережі»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Л.О. Уривський

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Заболотній Анні Юріївні**

1. Тема дисертації «ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ LTE ПРИ ВИКОРИСТАННІ НЕЛІЦЕНЗІЙНОГО РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРУ», науковий керівник дисертації Гаттуров В.К. доцент, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження : неліцензійний радіочастотний доступ мережі LTE

4. Предмет дослідження: підвищення пропускної спроможності мережі LTE, розвантаження мережі.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- аналіз технологій для підвищення пропускної спроможності LTE
- вибір кращої технології
- розрахунки ефективності вибраної технології
- розрахунки використання частотного ресурсу для мереж LTE і Wi-Fi окремо

- порівняння технологій LTE та Wi-Fi
- побудова суміщеної мережі LTE+ Wi-Fi

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

- Плакат 1: Тема дипломної роботи, мета, постановка дослідження.
- Плакат 2: Пояснення фізичного змісту задачі
- Плакат 3 Опис платформи на основі якої проводиться дослідження
- Плакат 4: Математична постановка задачі яка вирішується

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вибір актуальної теми	02.09.2017-05.10.2017	
2	Пошук теоретичної інформації на вибрану тему	10.10.2017-12.12.2017	
3	Аналіз неліцензійного частотного спектру для мережі LTE	02.02.2018-02.03.2018	
4	Дослідження технологій для подальших розрахунків	05.03.2018-02.05.2018	
5	Аналіз підвищення агрегації оператора LTE + LAA	05.05.2018-21.06.2018	
6	Розрахунки ефективності розгортання технології LAA	01.07.2018-03.09.2018	
7	Розрахунки ефективності використання частотного ресурсу для мереж LTE і Wi-Fi окремо. Порівняння технологій LTE та Wi-Fi. Побудова суміщеної мережі LTE + Wi-Fi	15.09.2018-31.10.2018	
8	Робота над висновками	12.11.2018-28.11.2018	
9	Оформлення роботи	29.11.2018-04.12.2018	

Студент

Заболотна А.Ю.

Науковий керівник дисертації

Гаттуров В.К.

## РЕФЕРАТ

Робота містить 67 сторінки, 29 рисунків. Було використано 28 джерел.

Мета роботи: дослідити використання неліцензованих смуг спектру в гетерогенних мережах LTE як один з методів вирішення проблеми перевантаження мережі; зниження швидкості передачі даних та відсутність мережі LTE ресурси. Технічні вимоги та умови застосування радіочастот в неліцензованому спектрі 5 ГГц по всьому світу, а також порівняння механізмів співіснування різних технологій радіодоступу. Особлива увага приділяється опису співіснування схем Wi-Fi та LAA на один радіочастотний канал у неліцензованому спектрі 5 ГГц. Виконати оцінку ефективності впровадження сумісних технологій LAA, LTE, Wi-Fi

Ключові слова: LAA, LTE, Wi-Fi, неліцензійний спектр, пропускна здатність, агрегація, 4G

## ABSTRACT

The work contains pages, 67, 29 figures. 28sources have been used.

**Goal:** to investigate the use of unlicensed spectrum bands in heterogeneous LTE networks as one of the methods of solving the network overload problem; reducing data rates and lack of LTE network resources. Technical requirements and conditions for the use of radio frequencies in the unlicensed spectrum of 5 GHz worldwide, as well as comparison of mechanisms of coexistence of various radio access technologies. Particular attention is paid to describing the coexistence of Wi-Fi and LAA schemes on one radio frequency channel in the unlicensed spectrum of 5 GHz. Perform evaluation of the implementation of compatible technologies LAA, LTE, Wi-Fi

**Keywords:** LAA, LTE, Wi-Fi, unlicensed spectrum, bandwidth, aggregation, 4G

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. СТРУКТУРА ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ 4G .....	11
1.1 Структура та основні характеристики. ....	11
1.1 Актуальність технології 4G.....	18
1.3 Проблема перевантаження базових станцій, зниження швидкості передачі.....	20
1.4 Висновки з розділу 1.....	22
РОЗДІЛ 2. НЕЛІЦЕНЗІЙНИЙ СПЕКТР В ДІАПАЗОНІ 5 ГГц ТА УМОВИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ .....	23
2.1 Розподіл каналів у частотному діапазоні 5 ГГц .....	23
2.2 Використання неліцензійного спектру в діапазоні 5 ГГц.....	25
2.3 Стандартизація в області "неліцензійного LTE" .....	29
2.4 Висновки з розділу 2 .....	34
РОЗДІЛ 3. СТАНДАРТИЗОВАНІ РІШЕННЯ .....	35
3.1 LAA-LTE. ....	35
3.2 LTE-U.....	40
3.3 LWA.....	41
3.4 Висновки з розділу 3 .....	42
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЄМНОСТІ LTE, ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ .....	44
4.1 Залежність пропускної здатності мережі LTE від кількості антен та залежність пропускної здатності LTE+ LAA від відношення сигнал/шум та ширини каналу .....	44

4.2 Підвищення агрегація оператора LTE+LAA .....	45
4.2 Оцінка ефективності розгортання технології LAA .....	47
4.3 Розрахунки ефективності використання частотного ресурсу для мереж LTE і Wi-Fi окремо. Порівняння технологій LTE та Wi-Fi. Побудова суміщеної мережі LTE + Wi-Fi.....	49
4.4 Висновки з розділу 4 .....	62
ВИСНОВКИ .....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	65

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3GPP	3rd Generation Partnership Project - консорціум, який розробляє специфікації для мобільної телефонії
LTE	Long-Term Evolution - довготривалий розвиток
LAA	Licensed-Assisted-Access – ліцензійний допоміжний доступ
LTE-U	LTE-Unlicensed – Неліцензійний LTE
Wi-Fi	Wireless Fidelity - технологія бездротової локальної мережі
SRD	Short Range Device - пристрій короткого радіуса дії
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System - Універсальна Мобільна Телекомунікаційна Система
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing - технології ортогонального частотного рознесення
EPC	Evolved Packet Core – Пакетне ядро
eNB	Evolved NodeB - базова станція мережі стандарту LTE
MME	Mobility Management Entity - суб'єкт управління мобільністю
PCRF	Policy and Charging Resource Function - Функція ресурсів політики та заряду
GSM	Global System for Mobile Communications — глобальний стандарт цифрового мобільного зв'язку
GPRS	General Packet Radio Service - пакетний радіозв'язок загального користування
MIMO	Multiple Input Multiple Output - метод просторового кодування сигналу
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System - Універсальна Мобільна Телекомунікаційна Система
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access - надання універсального бездротового зв'язку на великих відстанях для широкого спектру пристроїв
RLAN	Radio Local Area Network - Радіо локальні мережі

WAS	Wireless Access Systems - системи бездротового доступу
DFS	Dynamic Frequency Selection - динамічний вибір частот
TPC	Transfer Power Control - керування передачею потужності
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power - Еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність
LWA	LTE & WLAN Aggregation - агрегація технологій LTE iWLAN

## ВСТУП

Мережі мобільного зв'язку пройшли складний шлях еволюційного розвитку, протягом якого надавали абонентам можливість обмінюватися інформацією на віддалі. З роками різновид трафіку, а разом із тим, вимоги до пропускної здатності змінювалися, вимагаючи при цьому удосконалення мереж для забезпечення необхідної якості обслуговування з кінця в кінець.

2018 ознаменувався для українців приходом нового стандарту мобільного зв'язку - LTE або 4G. Три основні гравці ринку мобільного зв'язку - "Київстар", Vodafone Україна і lifecell - отримали можливість будувати 4G-мережі в українських містах, вигравши тендери на відповідні частоти. За останні кілька років в світі заговорили про доцільність використання неліцензійного радіочастотного спектру для технологій LTE. Доступ до такого спектру вільний (неліцензійний), в ньому працюють різні пристрої малого радіусу дії SRD (Short Range Device), в тому числі і пристрої передачі даних, відомі під назвою Wi-Fi.

Намір використовувати неліцензійний спектр викликано, насамперед, необхідністю отримати для мереж LTE додатковий радіочастотний ресурс і до того ж з вільним доступом до нього. Для його реалізації сьогодні розглядаються декілька рішень. Два з них - LAA-LTE (Licensed-Assisted-Access-LTE) і LTE-U (LTE-Unlicensed) - припускають приєднання Wi-Fi-спектра в діапазоні 5 ГГц шляхом його агрегування з основним (ліцензійним) спектром LTE. Інше рішення - LWA (LTE & WLAN Aggregation) - полягає в інтеграції самих технологій LTE і Wi-Fi, що є непрямим використанням неліцензійних радіочастот.

## РОЗДІЛ 1. СТРУКТУРА ТА ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ 4G

### 1.1 Структура та основні характеристики.

LTE[1] - Long Term Evolution (англ., Довгострокова еволюція). Коли вчені доводили до розуму 3G (він же UMTS, він же WCDMA) в рамках проекту 3GPP, вони «розрахувалися на перший-другий». Половина стала «докручувати» 3G до HSPA: це були мінорні доопрацювання радіо-інтерфейсу при збереженні основи - принципу кодового поділу каналів (CDMA). Планували закінчити швидко, тому називали між собою короткостроковою еволюцією. Іншу половину стурбували питанням: а що, якщо абоненти забажають мобільного інтернету на швидкості на порядок вище, ніж в 3G Звідси і еволюція довгострокова - LTE. Маркетологи, до речі, часто називають LTE 4G.

LTE включає в себе мережу радіодоступу (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN) і вдосконалене пакетне ядро (Evolved Packet Core, EPC).

Мережа LTE побудована як сукупність нових базових станцій eNB (Evolved NodeB або eNodeB), де сусідні eNB з'єднані між собою інтерфейсом X2. eNB підключені до EPC за допомогою інтерфейсу S1. На рис.1.1 показано взаємодію нових елементів в архітектурі мережі: S-GW (Serving Gateway) - обслуговують шлюзів, що містять ПО управління по протоколу MM (MME - Mobility Management Entity).

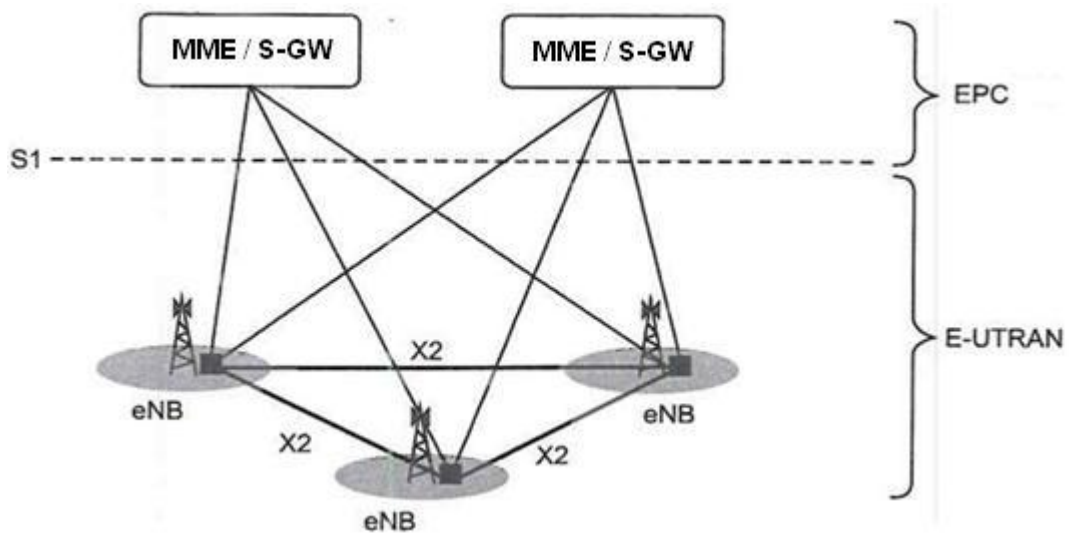


Рисунок 1.1 Спрощена архітектура мережі LTE

У мережі радіодоступу радіо-інтерфейс між UE і eNB здійснений на основі технології ортогонального частотного рознесення (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDMA). Робота EPC заснована на технології IP. Таку структуру відносять до All-IP Network (AIPN).

Структура мережі LTE приведена на рис. 1.2. Ядро мережі EPC (Evolved Packet Core) складається з обслуговуючого шлюзу S-GW (Serving Gateway), шлюзу для виходу на пакетні мережі P-GW (Packet Data Network Gateway), структури управління по протоколу Mobility Management MME (Mobility Management Entity), пов'язаної з S-GW і eNodeB сигнальними інтерфейсами.

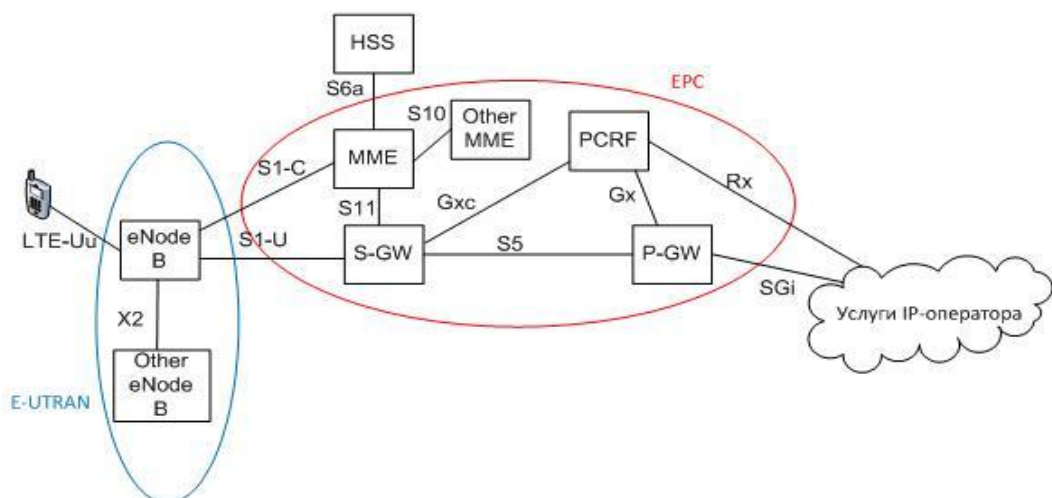


Рисунок 1.2 Структура мережі LTE

### Функції eNodeB (Evolved NodeB)

eNodeB об'єднує в собі функції базових станцій і контролерів мереж 3-го покоління:

- забезпечує передачу трафіку і сигналізації по радіоканалу,
- управляє розподілом радіоресурсів,
- забезпечує наскрізний канал трафіку до S-GW,
- підтримує синхронізацію передач і контролює рівень перешкод в соте,
- забезпечує шифрацію і цілісність передачі по радіоканалу,
- вибирає MME і організовує сигнальний обмін з ним,
- виробляє стиснення заголовків IP-пакетів,
- підтримує послуги мультимедійного мовлення,
- при використанні структури з підсилювачами потужності на антенною щоглі організовує управління антенами за спеціальним інтерфейсу Iuant.

Інтерфейс S1, як показано на рис.1.2, підтримує передачу даних з S-GW і сигналізації через MME. Відзначимо, що eNB може мати з'єднання з декількома S-GW.

Інтерфейси X2 використовують для організації хендовера між сусідніми базовими станціями, в тому числі і при балансуванні навантаження між ними. При цьому інтерфейси X2 можуть бути логічними, тобто для їх організації не обов'язково реальне фізичне з'єднання між eNB.

### Функції обслуговуючого шлюзу S-GW:

- маршрутизація переданих пакетів даних,
- установка якісних показників (Quality of Service, QoS) послуг, що надаються,
- буферизація пакетів для UE, які перебувають в стані Idle Mode,
- надання облікових даних для тарифікації та оплати виконаних послуг.

S-GW є якірної структурою, що забезпечує мобільність абонентів. Кожну працюючу UE обслуговує певний S-GW. Теоретично UE може бути

пов'язана з декількома пакетними мережами; тоді її будуть обслуговувати кілька серверів S-GW.

#### Функції P-GW (Packet Data Network Gateway)

Шлюз для виходу на пакетні мережі P-GW організовує точку доступу до зовнішніх IP-мереж. Відповідно P-GW є якірним шлюзом для забезпечення трафіку. Якщо абонент має статичний IP-адресу, то P-GW його активізує. У разі, якщо абонент повинен отримати на час сеансу зв'язку динамічний IP-адресу, P-GW запитує його з сервера DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) або сам виконує необхідні функції DHCP, після чого забезпечує доставку IP-адреси абонента. До складу P-GW входить PCEF (Policy and Charging Enforcement Function), який входить забезпечує якісні характеристики послуг на зовнішньому з'єднанні через інтерфейс Sgi і фільтрацію пакетів даних. При обслуговуванні абонента в домашній мережі функції P-GW і S-GW можуть виконувати як два різних, так і один пристрій. Інтерфейс S5 являє собою тунельний з'єднання GPRS або Proху Mobile Ipv6. Якщо P-GW і S-GW знаходяться в різних мережах (наприклад, при обслуговуванні абонента в роумінгу), то інтерфейс S5 замінюють інтерфейсом S8.

#### Функції MME (Mobility Management Entity)

Керуючий блок MME насамперед підтримує виконання процедур протоколу Mobility Management: забезпечення безпеки роботи в мережі при підключенні UE і вибір S-GW, P-GW. MME пов'язаний з HSS своєї мережі за допомогою інтерфейсу S6a. Інтерфейс S10, що з'єднує різні MME, дозволяє обслуговувати UE при переміщеннях абонента, а також при його знаходженні в роумінгу.

#### Функції PCRF

Policy and Charging Resource Function (PCRF) по суті являє собою керуючий сервер, що забезпечує централізоване управління ресурсами мережі, облік і тарифікацію послуг, що надаються. Як тільки з'являється

запит на нове активне з'єднання, ця інформація надходить на PCRF. Він оцінює наявні в його розпорядженні ресурси мережі й направляє в PCEF шлюзу P-GW команди, які встановлюють вимоги до якості послуг і до їх тарифікації.

Базові станції LTE містять радіомодулі (вони ж приймачі, TRXи), блок цифрової обробки сигналу (BBU), інтерфейсні плати (FE / GE порти, електричні, оптичні). Радіомодулі бувають виносні - RRU. Монтуються поблизу антени (для зменшення втрат в ВЧ-фідері), до BBU підключаються по оптике (стандарт CPRI). Все як в БС 3G, але називаються красиво - evolved NodeB (дослівно - продукт еволюції «вузла Б», тобто власне БС 3G).



Рисунок 1.3 Базові станції мереж 4 G

А оскільки БС різних стандартів більше схожі, чим відрізняються, виробники швидко здогадалися робити все «в одному флаконі». Рішення називається SingleRAN. Одна БС на 3 стандарти: GSM, 3G і LTE.

Для LTE в якості антен цілком підійдуть звичайні панельні антени з крос-поляризацією. Вони, наприклад, використовуються в мережах GSM і в 3G. Але тут є різниця, - якщо в GSM і 3G дві поляризації зазвичай використовуються на прийом, а на передачу тільки одна (схема 2Rx / 1Tx), то в LTE обидві поляризації задіяні по повній, і на прийом, і на передачу (схема 2Rx / 2Tx). Це необхідно для реалізації технології MIMO2x2. На першому етапі впровадження LTE цього буде достатньо. Далі пропускну здатність сектора можна буде збільшити, додавши ще по одній крос-пол антені. Вийде схема 4Rx / 4Tx і MIMO4x4. Головне рознести антени в просторі на достатню відстань (близько 10 довжин хвиль).

### Частоти LTE

На відміну від інших стандартів мобільного зв'язку LTE не прив'язаний до якогось конкретного діапазону частот. В цьому його сила. Розробники (3GPP) визначили понад 30 діапазонів, для яких виробники можуть випускати стандартне радіоустаткування LTE. Сюди потрапили як частоти, використовувані зараз під інші стандарти (наприклад, 900, 1800 (GSM), 2100 (UMTS), 2500 (WiMAX), так і "нові", наприклад 700-800 МГц (так званий "цифровий дивіденд"). зрозуміло, що далеко не всі з можливих діапазонів знайдуть широке поширення в світі. Швидше за все, в результаті "виживе" не більш 4-5 діапазонів. Можливі серед них:

- 800 МГц (3GPP band 20) - виділено або планується під LTE практично у всіх європейських країнах, включаючи Росію; вигідний з точки зору витрат на забезпечення суцільного покриття; обладнання випускається всіма провідними виробниками;

- 2,5 ГГц (3GPP band 7) - виділений або планується під LTE практично у всіх країнах Європи і Азії, включаючи Росію; обладнання випускається всіма провідними виробниками.

- 1800 МГц (3GPP band 3) - буде звільнятися в міру зменшення кількості GSM-only телефонів і розширення покриття 3G (щоб було, куди

переводити голос); хороший з точки зору забезпечення в мережі балансу між ємністю і покриттям; GSM-операторам дасть можливість заощадити за рахунок перевикористання інфраструктури мережі доступу (приймачі, антени); обладнання випускається багатьма провідними виробниками.

Взагалі, вибір правильного діапазону для розвитку LTE - завдання не з простих. В нижніх діапазонах, де все відмінно з покриттям, проблема знайти смугу достатньої для повноцінного LTE ширини. У верхніх зазвичай добре з частотним ресурсом, але БС потрібно ставити через кожні 400-500 метрів, що завдасть великих витрат. Ймовірно, більшість мереж LTE, аналогічно GSMу, будуть двох-діапазонні.

### Швидкості LTE

Максимальні швидкості передачі даних - ключовий показник якості стандарту для кінцевих користувачів. Можна довго говорити про теоретичні можливості різних стандартів, перспективи їх розвитку і так далі, але те, що абонентам у вже працюючих мережах LTE доступні швидкості більше 100 Мбіт / с - це факт. І це тільки початок світлого майбутнього: досягнення в мережах LTE швидкостей до 1 Гбіт / с - питання декількох років. Швидше за все, потрібен буде черговий прорив, як в теорії радіозв'язку, так і в технології виробництва елементної бази.

### Покриття LTE

Зона покриття однієї БС в LTE може бути абсолютно різною. Перш за все це залежить від використовуваного діапазону частот. Якщо порівняти крайні варіанти, то площа покриття однієї eNodeB, що працює в самому нижньому LTE-діапазоні (700 МГц) виявляється, при інших рівних, в 5-6 разів більше, ніж для бази, яка працює в 2.5 ГГц. В умовах міської забудови радіус стільники, таким чином, може бути від кількох сотень метрів до декількох кілометрів. Що стосується рекорду по дальності дії БС LTE, він був встановлений в ході Трайл грецького оператора Cosmote на обладнанні

Huawei на початку цього року - на відстані 102 км від БС була отримана швидкість передачі 135 Мбіт / с. Звичайно, це була пряма видимість і один абонент в соте. Але з точки зору граничних можливостей стандарту - досить переконливо.

### 1.1 Актуальність технології 4G

Якщо потреба в 3G для українських користувачів була очевидною [2] - мобільний інтернет Edge занадто повільний для комфортного використання, а потреба в зв'язку на ходу, без прив'язки до мереж Wi-Fi, вже сформувалася, то з 4G не все так очевидно. Про технологію прийнято говорити в контексті швидкостей, рідше - в контексті ємності мережі. Але є і менш очевидні речі, для яких потрібні мережі наступного покоління.

Для користувачів: Швидкість

Швидкості мереж 3G досить для всіх існуючих сценаріїв використання мобільного інтернету. Оператор lifecell заявляє про максимальну швидкість в своїх мережах - 63 Мбіт / с, але для реальних життєвих сценаріїв вона недосяжна - потрібні як мінімум мобільні пристрої зі специфічною характеристикою, яких практично немає на руках у абонентів. Швидкість 42 Мбіт / с більш досяжна для українських операторів, і її досить навіть для перегляду відео в Full HD-дозволі (якщо немає обмежень з боку оператора).

Для операторів: Ємність мережі

4G дає більшу ширину каналу, тому в місцях, де навантаження на мережу вище, операторам треба використовувати менше обладнання для обслуговування більшого числа абонентів. Це особливо важливо в центрі великих міст, біля туристичних об'єктів і в інших місцях скупчення людей. Результат - краща якість зв'язку, кращий користувальницький досвід. 4G не можна назвати ідеальним стандартом для розвитку інтернету речей. Проте,

він більше підходить, ніж всі попередні (і, ймовірно, гірше, ніж 5G, яка ще перебуває в стані розробки). Інтернет речей - складова "розумних" міст. Датчики дозволяють управляти ресурсами більш точно (наприклад, прибирати сміття в міру завантаження контейнерів, стежити, де великі витрати електроенергії, контролювати роботу світлофорів і т.д.). Це економить ресурси місту, робить його зручніше і безпечніше.

### Спеціальні мережі

На базі 4G можливе будівництво спеціальних мереж пріоритетною зв'язку для потреб міста (по правді кажучи, це було можливо і до 4G, але можливості таких мереж були менше, а вартість обслуговування - вище). Наприклад, у Великій Британії в цьому році запускають мережу Emergency Services Network (ESN), яка працює на базі 4G і дозволяє екстреним службам швидше отримувати інформацію про події в місті, використовувати для отримання більш докладних відомостей інтернет. Так, лікарі в лікарнях отримуватимуть відомості про пацієнтів від бригад швидкої допомоги, пожежні - бачити стан пожежі з вертольота. Поліція зможе ділитися один з одним відео з натільних камер, перетворювати свої автомобілі в точки доступу тощо.

### Для ринку

Поява нової технології збільшить як продаж терміналів з підтримкою 4G, так і розвиток сервісів, де ця послуга потрібна. Безумовно, користувачі почнуть витрачати більше, але і отримувати, по суті, теж. 4G - це і перегляд відео на ходу, і гри і т.д. Оператори вже почали привчати своїх абонентів до тяжких сервісів - таким, як аудіо- і відеострімінг, наприклад, завдяки нетарифікованого трафіку на Megogo, Youtube, власних сервісах. Одні пропонують нетарифікований трафік, інші - до 10 ГБ в місяць без тарифікації. За словами Івана Шестакова, маркетинг-директора Megogo в Україні, для перегляду онлайн-відео в місяць 10 ГБ - це небагато. Але якщо

дивитися на обсяги споживання трафіку українськими абонентами, 10 ГБ - це багато. У мережах наступного покоління витрати трафіку зростуть, що буде стимулювати появу платять абонентів і розвиток сервісів.

Для країни

Дослідження Світового банку показують, що проникнення швидкісного інтернету і розвиток економіки тісно пов'язані один з одним. За даними джерела, при зростанні числа підключень до швидкісного інтернету на 10% зростання економіки становить 1,3%.

1.3 Проблема перевантаження базових станцій, зниження швидкості передачі.

Забезпечена технологією 4G теоретично максимальна швидкість мобільного Інтернету до 375 Мбіт / сек., А середня швидкість скачування в умовах нормального навантаження складає 20 Мбіт / сек., Що дозволяє завантажити інтернет-сайт миттєво. Середня вихідна швидкість складає 10 Мбіт / сек., А максимальна - до 50 Мбіт / сек.

Технологія LTE - це прогресивний і зручний стандарт, який дозволяє мешканцям приватних будинків легко отримувати бездротовий інтернет в своє житло. Однак бувають випадки, коли сигнал LTE працює не в повну силу - користувачеві не вистачає швидкості.

Умови, які можуть вплинути на швидкість передачі даних[3]:

- наявність покриття мережі, на яке може впливати знаходження пристрою одержувача в приміщенні з утрудненим прийомом сигналу, наприклад, в повальних приміщеннях. Крім того, поганим прийомом можна обмежувати товщина стін будівлі, матеріали, з яких побудований будинок і інші обставини. За межами приміщення на сприйняття сигналу можуть впливати особливості рельєфу навколишнього середовища, відстань до

базової станції, погодні умови та інші, що впливають на передачу радіосигналу, фактори.

- перевантаження мережі - в окремі періоди на швидкість передачі даних може впливати стрімке збільшення навантаження, наприклад, під час фестивалів, в місцях надзвичайних подій і т.п. Якщо під час користування послугою в секторі базової станції констатується перевантаження і у користувачів в даних умовах знижується швидкість передачі даних, оператор вправі провести як мануальну, так і автоматичну зміну параметрів підключення, щоб усунути порушення.

- функціональні особливості кінцевого пристрою.

Ідеологічно [4] стандарт 4G замислювався як стандарт де ключовими показниками є масове обслуговування великої кількості запитів і звичайно показник швидкості. За рахунок того, що це зовсім інше середовище доступу терміналів в спектрі, в цьому стандарті буде обслужено більше мобільних та інших терміналів в якійсь точці скупчення, стадіони, вокзали, і т.д.

Тому не очікується якихось глобальних змін в швидкісних показниках в даний час. Існують певні вимірювальні комплекси, які показують вузькі місця на фізичній мережі стільникового оператора. І там-таки є над чим працювати.

Швидше за все на першому етапі 4G буде як ешелон розвантаження місць найбільшого скупчення абонентів, для мереж 3G, мережі 5G будуть з'являтися тільки тоді, коли зростаючий трафік між терміналами і базовими станціями буде рости і продуктивності мереж 4G не буде вистачати, саме на фізичному рівні.

Тоді будуть потрібні більш дрібні осередки розташування базових станцій, і вони всі повинні бути вже пов'язані між собою оптичними мережами зв'язку.

#### 1.4 Висновки з розділу 1.

Технологія LTE - це прогресивний і зручний стандарт, який дозволяє мешканцям приватних будинків легко отримувати бездротовий інтернет в своє житло. Однак бувають випадки, коли сигнал LTE працює не в повну силу - користувачеві не вистачає швидкості. Для рішення цієї проблеми необхідно отримати для мереж LTE додатковий радіочастотний ресурс до того ж з вільним доступом до нього. Підвищення пропускної здатності мереж LTE можливе шляхом використання неліцензійного радіочастотного спектра в діапазоні 5 ГГц як один із способів вирішення проблеми перевантаження базових станцій, зниження швидкості передачі даних і брак ресурсів гетерогенних мереж стандарту LTE

## РОЗДІЛ 2. НЕЛІЦЕНЗІЙНИЙ СПЕКТР В ДІАПАЗОНІ 5 ГГц ТА УМОВИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

Очікуване зростання мобільного трафіку даних пов'язано із впровадженням трафіку нових широкосмугових послуг та запуском бездротового зв'язку. Передача через мобільні мережі величезна і буде продовжувати зростати швидко. Очікується, що в 2021 році рух даних мобільного зв'язку по всьому світу, як очікується, досягне 587 екзобайт на рік, тобто в сім разів більше, ніж був трафік мобільного трафіку по всьому світу в 2016 році. Трафік від бездротових та мобільних пристроїв складатиме дві третини загального обсягу трафіку IP до 2020 року, оскільки річні абоненти потребують більшої пропускнуєї здатності для передачі великих обсягів даних. З метою збільшення ємності мережі мобільного зв'язку було визначено низку технологічних рішень для використання неліцензованого спектра, що дозволило створити додатковий радіочастотний ресурс.

### 2.1 Розподіл каналів у частотному діапазоні 5 ГГц

Весь неліцензований діапазон 5 ГГц поділений на три піддіапазони, для кожного з яких відведена смуга у 100 МГц [4]. Такі частотні піддіапазони отримали назву неліцензійної національної інформаційної інфраструктури (Unlicensed National Information Infrastructure), що не потребують отримання ліцензій. Для сімейства стандартів 802.11x використовуються наступні смуги: нижній UNII - 1 від 5,150 ГГц до 5,250 ГГц; середній UNII - 2 від 5,250 ГГц до 5,350 ГГц; середній розширений UNII – 2 extended від 5,470 ГГц до 5,725 ГГц; верхній UNII - 3 від 5,725 ГГц до 5,825 ГГц. Відповідно до [4], частотний розподіл цих каналів можна представити як на рис. 2.1.

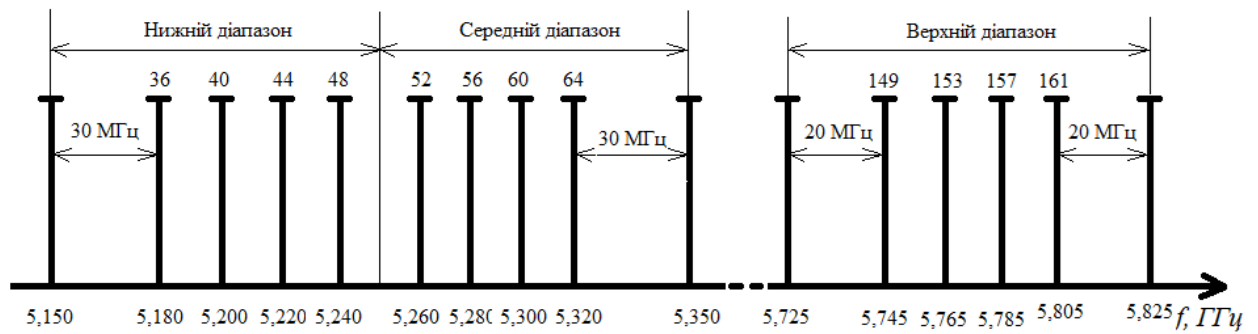


Рисунок 2.1 Розподіл каналів у частотному діапазоні 5 ГГц

Відстань між носійними частотних каналів становить 20 МГц, це означає, що при використанні каналів із смугою  $\Delta f = 20$  МГц можна отримати до 23-х каналів, які не будуть перетинатись головними та бічними пелюстками спектру та впливати один на одного, а при застосуванні  $\Delta f = 40$  МГц, можна отримати до 12 каналів. Крім того, в даному діапазоні можна формувати канали зі смугою  $\Delta f = 80$  МГц та  $\Delta f = 160$  МГц, які використовує стандарт 802.11ac. Єдиним недоліком цього є законодавство країн, що не завжди дозволяє вільно використовувати неліцензований діапазон повністю без дозволу. Наприклад, середній частотний діапазон від 5,260 ГГц до 5,725 ГГц використовується для радіолокаційних систем, тому використання таких каналів потребує наявності функції динамічного вибору частоти, яка надає пріоритети для точки доступу та клієнтів. В такому випадку точка доступу постійно сканує середовище передачі та при наявності випромінювання радарів повинна автоматично змінити частотний канал на вільний. Також, у майбутньому для частотного діапазону 5 ГГц можуть з'являться системи передачі інших стандартів, такі як LTE-U – мережі четвертого покоління у неліцензованому частотному діапазоні, які в свою чергу для безпроводних каналів 802.11 будуть являться як додаткові шуми або системи із боротьбою за частотний ресурс.

## 2.2 Використання неліцензійного спектру в діапазоні 5 ГГц

Основною метою використання неліцензійного спектру в діапазоні 5 ГГц є отримання додаткових радіочастотних ресурсів для мережі LTE. Крім того, доступ до неліцензійного спектра необмежений, коли працюють різні пристрої SRD (пристрій короткого радіуса дії), включаючи Wi-Fi та радіолокаційні пристрої. На Всесвітній конференції радіозв'язку (WCC03) на першому етапі були визначені наступні частотні діапазони 5150 - 5350 МГц і 5470-5755 МГц для WAS (системи бездротового доступу), включаючи RLAN (Радіо локальні мережі) (рис.2.2) [ 6].

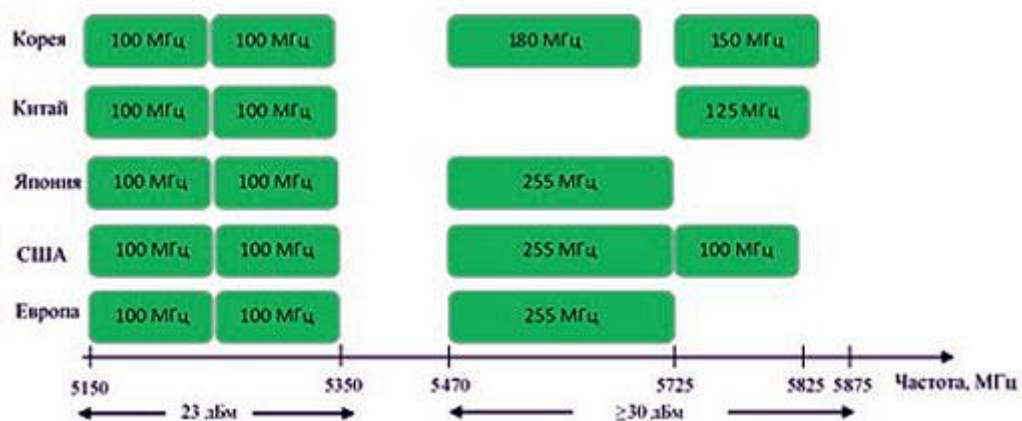


Рисунок 2.2 Неліцензійний спектр в діапазоні 5 ГГц в різних країнах

Умови використання цих смуг, в тому числі і регуляторні аспекти, були викладені в Резолюції 229 (ВКР-03), переглянутої далі на ВКР-12. Ці умови такі [7]:

- WAS / RLAN в смузі частот 5150 - 5250 МГц повинні використовуватися тільки усередині приміщень (Indoor) з ЕІВП, що не перевищує значення 200 мВт (щільність ЕІВП 10 мВт / 1МГц або еквівалентно 0,25 мВт / 25 кГц);

- WAS / RLAN в смузі частот 5250- 5350 МГц не обмежені застосуванням Indoor і повинні мати такі ж значення ЕІВП, крім того, дозволяється ЕІВП з максимальним значенням 1 Вт (щільність ЕІВП 50 мВт / 1МГц) при дотриманні додаткових вимог по кутовій масці піднесення над горизонтом;
- WAS / RLAN в смузі частот 5470- 5725 МГц мають обмеження максимальної потужності передавача рівнем 230 мВт при максимальній ЕІВП 1 Вт (щільність ЕІВП 50 мВт / 1МГц);
- WAS / RLAN в смузі частот 5250- 5350 МГц і 5470-5725 МГц повинні використовувати автоматичне керування потужністю передавача і забезпечити "пом'якшення" потужності в середньому на 3 дБ щодо її максимуму. При відсутності такого контролю - зменшити значення максимальної ЕІВП також на 3 дБ. Дана вимога продиктована і Рекомендацією МСЕ-Р М.1652 [8]. Смуга радіочастот 5725-5875 МГц виділена для пристроїв ISM (Industry, Scientific and Medical) в ряді країн, як показано на рис. 3, крім того, смуга до 5850 МГц на первинній основі розподілена для радіолокаційних пристроїв, що вимагає застосування динамічного вибору частот DFS (Dynamic Frequency Selection).

Співіснування різноманітних технологій радіодоступу - таких як LTE та Wi-Fi, а також використання механізмів доступу до каналів - є необхідним для співіснування та сумісності, мінімізації взаємних перешкод та підвищення ефективності. У випадку систем Wi-Fi в різних регіонах, наприклад Європа, Японія, Сполучені Штати Америки та інші частини світу, DFS (динамічний вибір частот) разом із TRP (керування передачею потужності) та уніфікованими схемами завантаження каналів були використані в неліцензованому спектрі 5 ГГц для пом'якшення перешкод на існуючі раніше розподіл спектра в тій самій смузі для роботи радіолокації, я показано в Таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Вимоги по всьому регіону в 5 ГГц неліцензійному спектру

	Частота, МГц	5150-5250	5250-5350	5470-5725	5725-5875
	Максимум EIRP. мВт	200	1000	1000	25
	Максимальна спектральна щільність, мВт / МГц	10	50	50	-
		Максимальна потужність TX, маска викидів			
Росія	Механізм співіснування	LBT	LBT & DFS/TPC	-	LBT
	Місцезнаходження	Всередині		-	Всередині/ззовні
	Додаткові вимоги	Робочий цикл довівнює 0.1 %, Висота антени < 5 метрів.			
Європа	Механізм співіснування	LBT	LBT & DFS/TPC	-	
	Місцезнаходження	Всередині	Всередині/ззовні		
США	Механізм співіснування	-	DFS/TPC	-	
	Місцезнаходження	Всередині	Всередині/ззовні		
	Додаткові вимоги	FCC Part 15.247, 15.401-407			
Китай	Механізм співіснування	-	DFS/TPC	-	-
	Місцезнаходження	Всередині		-	Всередині/ззовні
Японія	Механізм співіснування	LBT	LBT & DFS/TPC	-	
	Місцезнаходження	Всередині		Всередині/ззовні	-
	Додаткові вимоги	Максимальна довжина вибуху (4 ms), Максимальний приріст антени			
Корея	Механізм співіснування	-	DFS/TPC	DFS/TPC (5470-5670)	-
	Місцезнаходження	Всередині	Всередині/ззовні		
	Додаткові вимоги	Максимальний приріст антени			

Європейський розподіл радіочастот в діапазоні 5 ГГц показано на рис.2.3. Європейські документи СЕРТ доповнюють умови використання перерахованих смуг частот низкою національних вимог. До таких документів належать звіти і рішення СЕРТ (ЕСС) ERC Report 67 (1993 г.), ERC Report 72 (1999), ECC Report 192 (2014 г.) [8], СЕРТ Report 57 (2015 г.) [9], ECC / DEC (04) 08 (2004) [10], а також стандарт ETSI EN 301 893 [11].



Рисунок 2.3 Розширення діапазону 5 ГГц в Європі

В якості умов для них були взяті за основу раніше описані вимоги для смуг 5150-5350 МГц і 5470-5725 МГц, доповнені лише механізмами FDS і TRP. Разом з тим, відзначено, що потрібні нові механізми пом'якшення конфліктів, які гарантували б безконфліктне розподіл спектра в додаткові смуги частот між всіма користувачами.

Таблиця 2.2 Неліцензійні полоси частот в діапазоні 5 ГГц в Росії

Полоси, МГц	Технології	Технічні вимоги	Додаткові вимоги	Додаткові умови
5725-5875	Неспеціалізовані прилади-SRD загального застосування	Макс. ЕІМ 25 мВт Гармонізований стандарт ETSI EN 300 440	Робочий цикл 0,1 або LBT	Висота підвісу антен не більше 5м
5150-5250	Пристрої локальних мереж	Макс. ЕІМ 100 мВт Гармонізований стандарт ETSI EN 301 893	-	Тільки в межах побудови
5250-5350			-	Тільки на борту повітряних судів
5650-5825			-	Тільки на борту повітряних судів
5150-5350	Пристрої з прямим розширенням спектра та іншими видами модуляції	Макс.ЕІМ200 Вт Макс.спектральна щільність ЕІМ 10мВт/МГц	TRP	В зачинених приміщеннях
5470-5650			TRP	-
5650-5850			TRP	В зачинених приміщеннях

Росія

З урахуванням міжнародного та європейського розподілу в статусі неліцензійного спектра в Росії виділені смуги частот в діапазоні 5 ГГц, які наведені в табл. 2.2 з умовами їх використання.

Загальними вимогами для цих частот є наступні умови:

- застосовувані пристрої повинні відповідати встановленим технічним характеристикам;
- не повинні створювати неприпустимих перешкод і не повинні вимагати захисту від перешкод з боку інших РЕЗ;
- пристрою підлягають реєстрації.

Відповідно до законодавства перераховані смуги виділені рішеннями Державної комісії з радіочастот (ГКРЧ) [13, 14], а статус неліцензійного спектра визначено тим, що умови використання смуг не вимагають отримання відповідних дозвільних документів (рішень ГКРЧ і дозволів на використання радіочастот або радіочастотних каналів)

### 2.3 Стандартизація в області "неліцензійного LTE"

Базові стандарти в цій області формуються в рамках 3GPP. Як уже зазначалося, аспекти по LTE-U були досліджені в рамках LTE-U Форуму, але у взаємодії також з 3GPP. Загальні етапи стандартизації показані в табл. 2.3

Таблиця 2.3 Етапи стандартизації «неліцензійного LTE»

Етапи	Що зроблено
Грудень 2013р.	Qualcomm та Ericsson презентували в 3GPP пропозицію LTE-U(Південна Корея)

## Продовження таблиці 2.3

Січень 2014р.	Неформальна зустріч 3GPP з операторами в Парижі по перспективам LTE в неліцензійному спектрі.
Березень 2014р.	Дискусія на пленарному засіданні 3GPP (Японія)
Червень 2014р.	Семінар в Софія-Антиполіс. Результати: Спланований пункт дослідження у вересні 2014; запропонована назва LAA-LTE; узгоджений діапазон 5 ГГц, обов'язковість глобального рішення; необхідність справедливого існування LTE і Wi-Fi
Вересень 2014р.	Схвалена стандартизація в 3GPP(TSG-RAN) в рамках 13 релізу. Головна мета досліджень – доповнити механізми суміщення LAA-LTE і Wi-Fi
Березень 2016р.	Завершення досліджень в 3GPP, буде визначений механізм LBT. Rel'13 також буде включати рішення LWA та нову функціональність eNB з управління мобільністю при LWA

## Технічний звіт 3GPP TR 36.889

В протоколі викладені технічні вимоги, включаючи європейські вимоги до процедури LBT і автоматичне регулювання потужності ТПК (див. Табл. 2.4).

Таблиця 2.4 Вимоги 3GPP до механізму TRS

Технології	Полоса частот, МГц	Макс. EIBП, дБм	Щільність макс. EIBП, дБм/МГц	Примітка
WAS/RLAN	5150-5350	23	10	Канали 20МГц і 40МГц
	5470-5725	30	17	
FBA	5725-5875	33	23	Канали 10МГц
	5725-5875	36	23	Канали 20МГц

TRS повинен знижувати максимальну EIBП на 3 дБ (5 дБ для WFA).

TRS не потребується для каналів в частоті 5150-5250МГц.

Без TRS найвищі допустимі значення максимальної EIBП знизяться на 3 дБ.

Відзначається, що за рахунок витрати ресурсу на виконання LBT слід очікувати зниження пропускну здатності LTE в неліцензійній частині спектру до 30% (за оцінками Intel та Nokia) та одночасного підвищення в суміжних Wi-Fi до 50% (за оцінками Nokia). Таке співвідношення залежить від способу реалізації LBT

Вимоги до механізму LBT для базової тимчасової структури фрейму.

- Час пошуку вільного каналу- мінімум 20 мкс
- Час заняття каналу – мінімум 1мс, максимум – 10мс

- Період очікування – мінімум 5% від часу заняття каналу
- Фіксований часовий фрейм – час заняття каналу + період очікування
  - Час передачі коротких сигналів управління – максимальний робочий цикл 5% в границях періоду спостереження 50мс

Стандарт ETSI EN 301 893

Цей гармонізований європейський стандарт відноситься до WAS / RLAN (5 ГГц) і до фіксованого бездротового доступу BFWA (5,8 ГГц) [12]. В ньому визначені технічні вимоги до механізму DFS. Согласно R & TTE-директиве [6] відповідність гармонізованому стандарту дозволяє виробникам постачання обладнання на широкий ринок.

Документи LTE-U Forum

Перелік цих документів наступний:

- eNB Мінімальні вимоги до LTE-U SDL v1.0 (2015-02) (поправка до 3GPP TS 36.104);
- LTE-U SDL Специфікації співжиття V1.0 (2015-02)
- LTE-U Процедура CSAT TS V1.0 (2015-10);
- LTE-U Технічний звіт про співіснування для LTE-U SDL V1.0 (2015-02);
- UE Мінімальні вимоги для LTE-U SDL V1.0 (2015-02) (Зміни до 3GPP TS 36.101).

В перерахованих документах робиться висновок і даються рекомендації. Відзначається, що LTE в неліцензійному спектрі надає істотний вплив на діючий Wi-Fi, якщо не застосовувати механізми сумісності цих технологій. При наявності таких механізмів LTE-U веде себе по відношенню до "звичайного" Wi-Fi не гірше (навіть краще), ніж таке ж Wi-Fi, і в цілому заміна вузла Wi-Fi з'єднанням LTE покращує пропускну здатність суміжних користувачів Wi-Fi . На рис. 2.4 показана ступінь підвищення пропускну здатності залишившихся вузлів Wi-Fi при впровадженні LTE-U.

Так, при заміні двох з восьми вузлів Wi-Fi з'єднань LTE-U пропускна здатність сусідніх (залишившихся) шести вузлів Wi-Fi підвищується на 16%, при заміні чотирьох вузлів Wi-Fi таке підвищення становить 38% .

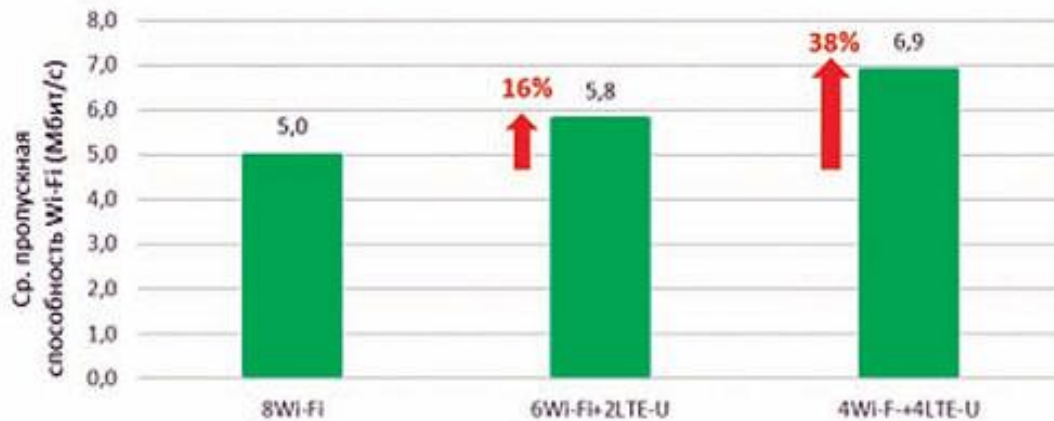


Рисунок 2.4 Підвищення пропускної здатності WI-Fi при LTE-U.

В якості рекомендацій по сумісництву LTE-U і Wi-Fi без механізму LBT (в країнах, де не потрібне застосування LBT) описано наступне:

- в неліцензійному спектрі розміщується вторинний соток SCell;
- вибирається канал з найменшим рівнем перешкод, виключіть канал LTE-U іншого оператора;
- обов'язковий періодичний контроль використовуваного каналу;
- робочий цикл SCell повинен бути таким:
- SCell увімкнена: передача відповідно до Rel'10 та далі; - SCell виключено: припинено передачу, включаючи передачу службових сигналів;
- цикли Вкл. / Викл. мають тривалість від 10 до 100 мс з можливістю адаптації
- час безперервної передачі обмежено;
- SCell вимикається, коли немає абонентських пристроїв в зоні обслуговування або немає даних для передачі.

- В рекомендації викладені вимоги до механізму DFS, названого в її російській версії з динамічною частотною селекцією (ДЧС), як методом ослаблення завад при спільному використанні радіочастот в діапазоні 5 ГГц пристроїв WAS / RLAN та радіо-засобами радіовизначення (радарамі). Указані вимоги щодо виявлення сигналів від радарів з рівнем, що перевищує мінімальний рівень (-62 дБм для пристроїв з максимальною ЕІМ менше 200 мВт і - 64 дБм для пристроїв з максимальною ЕІМ від 200 мВт до 1 Вт). Крім того, пристрої WAS / RLAN повинні здійснювати перевірку доступності каналів за рахунок їх прослуховування протягом 60 с для визначення того, працює чи в цьому каналі радар чи ні.

- 

#### 2.4 Висновки з розділу 2

Намір використовувати неліцензійний спектр викликано, насамперед, необхідністю отримати для мереж LTE додатковий радіочастотний ресурс і до того ж з вільним доступом до нього. Для його реалізації сьогодні розглядаються декілька рішень. Два з них - LAA-LTE (Licensed-Assisted-Access-LTE) і LTE-U (LTE-Unlicensed) - припускають приєднання Wi-Fi-спектра в діапазоні 5 ГГц шляхом його агрегування з основним (ліцензійним) спектром LTE. Інше рішення - LWA (LTE & WLAN Aggregation) - полягає в інтеграції самих технологій LTE і Wi-Fi, що є непрямим використанням неліцензійних радіочастот (детальніше в наступному розділі). В даному розділі були розглянуті умови використання неліцензійного спектру. У перерахованих документах робляться висновки і даються рекомендації. Відзначається, що LTE в неліцензійному спектрі має суттєвий вплив на діючий Wi-Fi, якщо не застосовувати механізми сумісності цих технологій. При наявності таких механізмів LTE-U поводить себе по відношенню до "звичайного" Wi-Fi не гірше (навіть краще), ніж такий же Wi-Fi, і в цілому заміна вузла Wi-Fi вузлом LTE покращує пропускну здатність суміжних користувачів Wi-Fi.

## РОЗДІЛ 3. СТАНДАРТИЗОВАНІ РІШЕННЯ

### 3.1 LAA-LTE.

У випуску 13 3GPP введені дві технології LWA (LTE & WLAN Aggregation) та LAA (ліцензований допоміжний доступ) як рішення для використання неліцензованого спектру для мережі LTE. Технологія LWA вимагає сукупних LTE та WLAN на рівні протоколу конвергенції пакетних даних, що дозволяє передавати трафік висхідної лінії на LTE та низхідну лінію як на LTE, так і на WLAN.

Це рішення є базовим в стандартах 3GPP (Rel'13) і претендує бути глобальним гармонізованим рішенням. Як уже підкреслювалося, воно будується на функціональності LTE по агрегування спектра (CA) і передбачає застосування механізму LBT. Важливим є той факт, що агрегується компонента з неліцензійних частот є виключно додатковою (вторинною), як показано на рис. 3.1. На первинній несучій (ліцензійний спектр) поряд з одними даними передається і службова інформація (команди управління).



Рисунок 3.1 Агрегація частот при LAA-LTE

Ця обов'язкова умова викликана тим, що неліцензійний спектр має непередбачувану і швидко мінливу електромагнітну обстановку через

вільний оступу багатьох користувачів до нього, що не може гарантувати високу якість передач. Крім того, із зазначеної причини необхідні спеціальні заходи, спрямовані на зменшення конфліктних ситуацій з іншими працюючими РЕМ. Такими заходами розглядаються прослуховування каналу перед випромінюванням ЛВТ, а також обмеження робочого циклу (переривчаста передача) [2, 7-9, 12]. За допомогою цих процедур здійснюється динамічний вибір вільних каналів (ССА), а при їх відсутності - справедливе поділ найменш завантаженого каналу з іншим пристроєм, як показано на рис. 3.2. [15].



Рисунок 3.2 Доступ до каналу при LAA-LTE

На відміну від цього, PCell (первинна комірка) на ліцензованому спектрі агрегується з SCell (вторинна комірка) на неліцензійному спектрі (рис.3.2). PCell служить для передачі даних користувача та службової інформації. Проте СС (компонентні носії) у неліцензованих смугах використовується як додаткова (вторинна) клітинка виключно для передачі даних користувача[13].

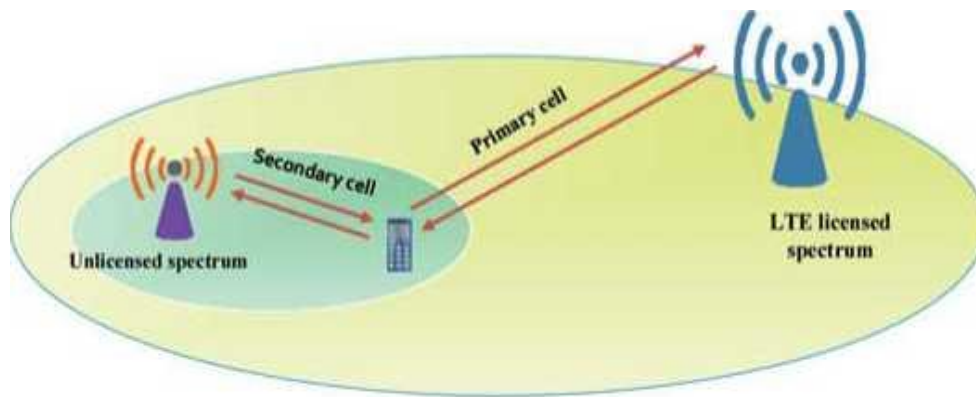


Рисунок 3.3 Ліцензійний допоміжний доступ

Слід зазначити, що технологія eLAA (розширеної LAA), описана у випуску 14, дозволяє агрегувати ліцензійні та неліцензійні діапазони спектрів для первинного та вторинного каналів. LAA може використовувати FDD (Frequency

Division Duplex) або TDD (Time Division Duplex) у первинному та вторинному каналах. Планування трафіку по додатковому каналу - це функція типу трафіку, така як чутливість затримки, швидкість руху та оптимізація завантаження трафіку. Для імплементації технології LAA (рис.3.4.) існує 4 сценарії, що розглядаються у випуску 13 [14]. На додаток до впровадження LTE + LAA потрібні нові мобільні пристрої LTE, здатні працювати в неліцензованому спектрі, і мають механізми для справедливого розподілу спектру між користувачами.

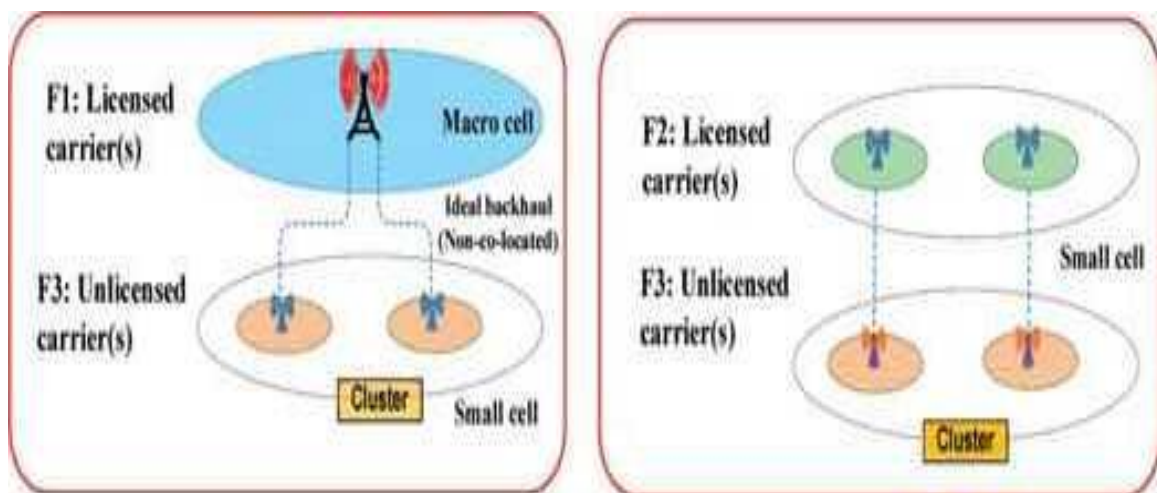


Рисунок 3.4(а) Сценарії розгортання LAA

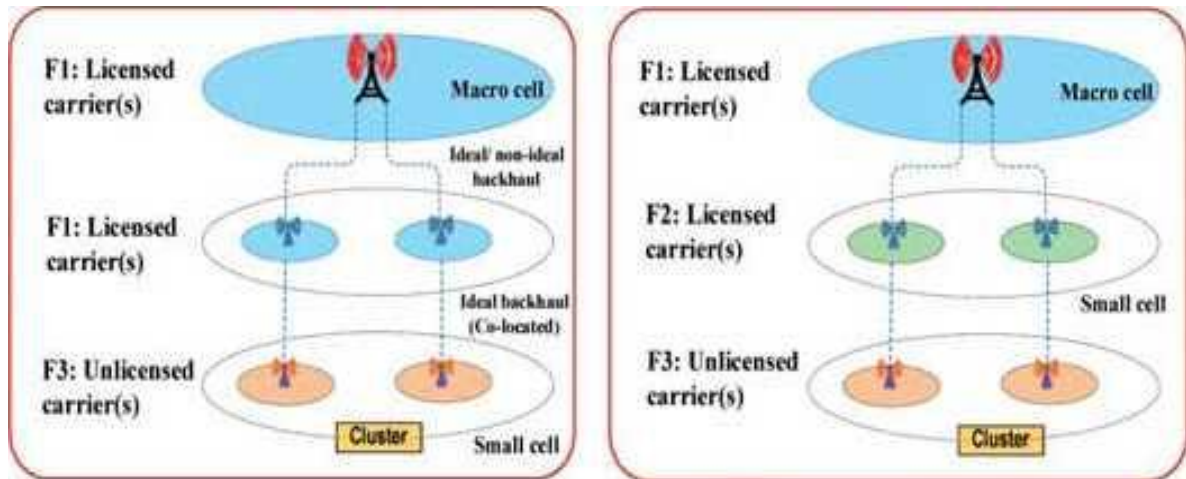


Рисунок 3.4(б) Сценарії розгортання LAA

Необхідно підкреслити, що використання неліцензованого спектра як додаткового діапазону частот - через те, що воно було випадковим і швидко змінюваним електромагнітним середовищем - не може гарантувати високу QoS (якість сервісу): потужність системи та затримку. Крім того, необхідні спеціальні заходи для зменшення конфлікту з іншими радіоелектронними пристроями, що працюють у тій самій смузі.

В 13 релізі вказуються наступні механізми як засіб вирішення конфліктів [15]:

- LBT (Listen Before Talk);
- DTX (Discontinuous Transmission Mode)
- DFS (Dynamic Frequency Selection);
- TPC (Transmit Power Control)

Вимоги до механізму співіснування LBT

Тип усунення перешкод та механізм справедливого співіснування залежать від ринкових та регіональних регуляторних режимів. Ця концепція є основою схеми LBT (основна вимога в Європі та Японії) для оптимальної взаємодії пристроїв LAA та Wi-Fi у неліцензованому спектрі. У схемі LBT виявлено доступність орієнтованих каналів CCA (чистий доступ до каналу) який виконує адаптивну передачу на основі змінної шкали часу, яка охоплює 1-10 мілісекунд [16]

Виявлення енергії (ED) застосовується у поєднанні з процедурою CCA для забезпечення ефективною схемою співіснування між LTE та Wi-Fi, одночасно мінімізуючи вплив ефективності в результаті розподілу ресурсів над неліцензованим спектром. Виявлення енергії дає змогу вказати, чи доступний або зайнятий канал. Якщо виявлені рівні енергії є нижчими за порогову величину, канал вважається чистим, і вузол ЛАА може передаватися. Іншими словами, ЛАА продовжує моніторинг енергетичних рівнів, поки канал не вважатиметься ясним, і встановлює випадкове відхилення. Це дає можливість розпочати передачу після того, як канал буде прозорим на мінімальний термін. Приклад цього процесу ілюструється на рис. 3.5.

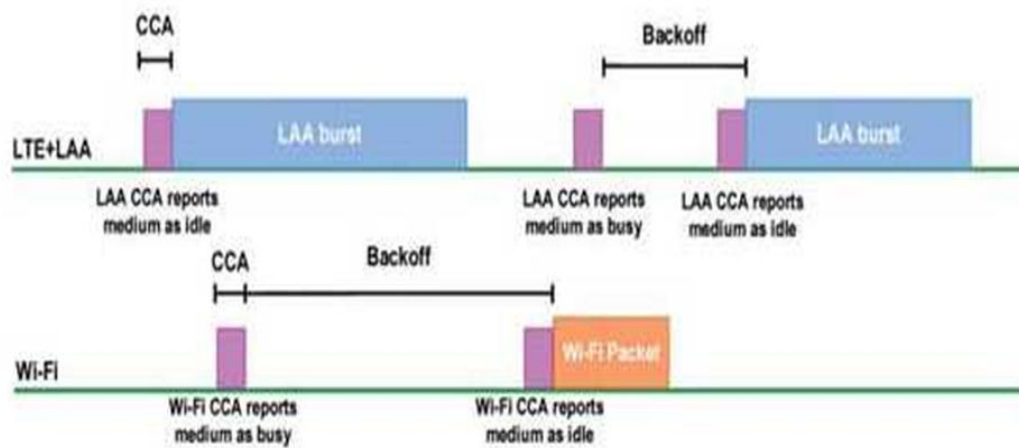


Рисунок 3.5 LAA і Wi-Fi співіснування

В основному механізм LBT - з точки зору чіткої оцінки каналу (CCA) - поділяється на два типи часового домену: Frame-based Equipment (FBE) та Load-Based Equipment (LBE). Як показано на рис.3.6, припущення про FBE, eNB або UE виконує CCA для кожного періоду фіксованого кадру, і передача даних може бути запущена лише тоді, коли вирішено очистити канал. Тим часом вибух передачі обмежений максимальним значенням (час заселення каналу), щоб підтримувати баланс доступу до каналу з іншими сусідніми вузлами. З іншого боку, LBT з LBE робить eNB або UE оцінювати канал тільки тоді, коли дані надходять у буфер (рис.3.6).

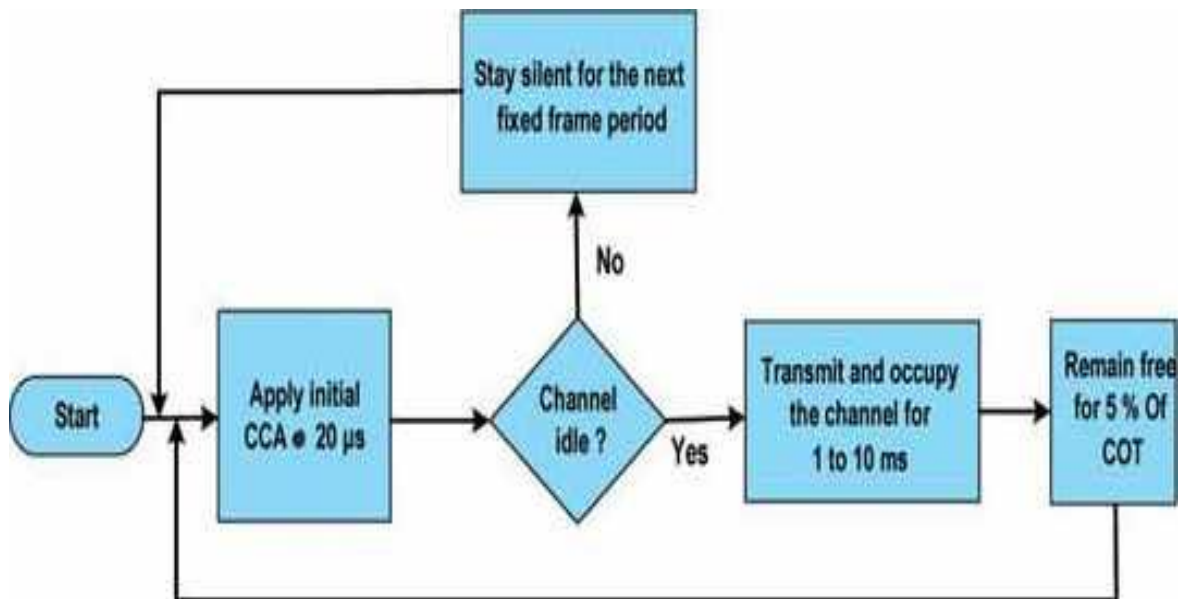


Рисунок 3.6 Режим роботи LBT на базі FBE

### 3.2 LTE-U

Це рішення ідентично описаному вище LAA-LTE з тією лише різницею, що не вимагає застосування механізму LBT. Механізмом, який використовується в LTE-U для зниження конфліктних ситуацій, є процедура, що встановлює робочий цикл (Duty Cycle) для переривчастої передачі. Duty Cycle дорівнює відсотку часу роботи пристрою на передачу, виміряного протягом фіксованого тимчасового фрейма, як показано на рис. 3.7.

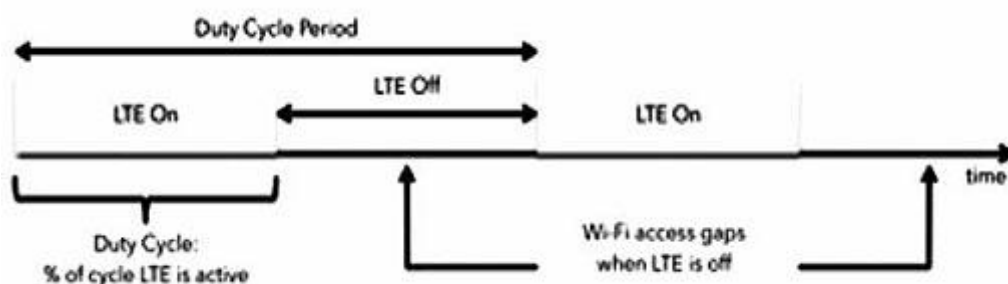


Рисунок 3.7 Робочий цикл LTE-U

Слід зазначити особливості R'13, які впливають на рішення LAA-LTE і LTE-U. По-перше, неліцензійний спектр агрегується тільки в Downlink в

формі SDL, і тільки в наступному R'14 планується агрегування його і в Uplink. По-друге, R'13 визначає кількість агрегованих компонент, рівне 32 (замість 5), що відповідає ширині агрегованого каналу 640 МГц [4]. Це розширює можливості щодо приєднання неліцензійного спектра істотної ширини, оскільки планована смуга в діапазоні 5 ГГц містить 775 МГц.

### 3.3 LWA

На рис. 3.8 пояснюється основний принцип LWA [15]. У LWA, так само, як і при двох попередніх рішеннях, Wi-Fi (неліцензійний спектр) використовується тільки для передачі в Downlink.

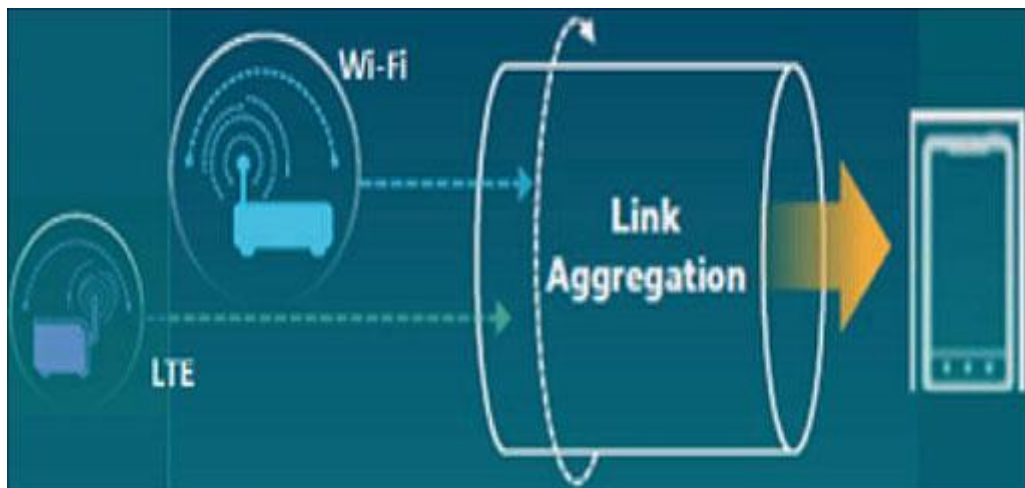


Рисунок 3.8 Принцип LWA

Головна перевага LWA полягає в тому, що для нього потрібні невеликі зміни в існуючому обладнанні (досить оновлення ПЗ, в тому числі і в абонентських пристроях) і установка нових точок доступу Wi-Fi при необхідності. На рис. 3.9. показані приклади реалізації LWA при суміщеному і несуміщеному розміщенні.

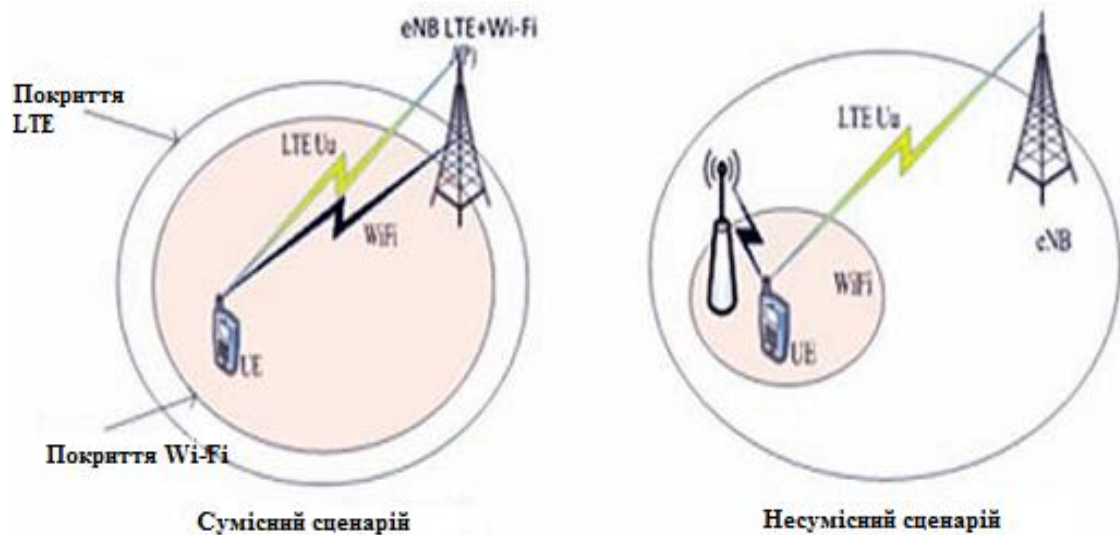


Рисунок 3.9 Сценарії LWA

### 3.4 Висновки з розділу 3

У даному розділі проведений аналіз рішень для реалізації додаткового радіочастотного ресурсу для LTE і розглянуто три рішення. Два з них - LAA-LTE (Licensed-Assisted-Access-LTE) і LTE-U (LTE-Unlicensed) - припускають приєднання Wi-Fi-спектра в діапазоні 5 ГГц шляхом його агрегування з основним (ліцензійним) спектром LTE.

Третє рішення LWA - агрегування з'єднань LTE і Wi-Fi як спосіб об'єднання ліцензійного та неліцензійного спектрів - розробляється в рамках 3GPP (Rel'13) і є новою (вдосконаленою) альтернативою по взаємодії LTE з WLAN. Удосконалення полягає в агрегуванні даних, що передаються на рівні мереж радіодоступу LTE і Wi-Fi, де базова станція LTE розподіляє пакети даних для передачі через кожну мережу. Цим забезпечується краще управління ресурсами в обох зв'язках і поліпшується ефективність використання спектра в діапазоні 5 ГГц в порівнянні з раніше запропонованою технологією Wi-Fi Offload. Описане рішення орієнтоване на випадок, коли у оператора LTE є структура Wi-Fi.

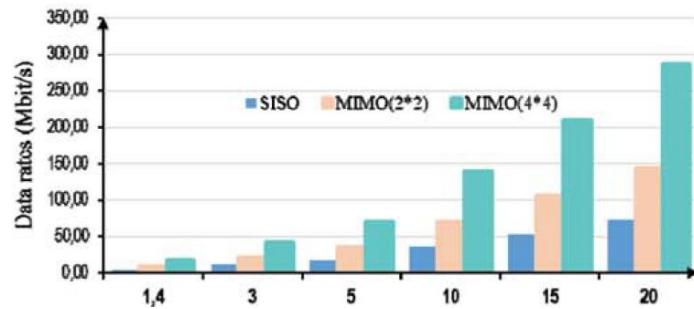
В наступному розділі проведено порівняння технологій LTE та Wi-Fi. Приведена побудова суміщеної мережі LTE + Wi-Fi для розвантаження мереж та проведений аналіз можливих шляхів вирішення проблеми перевантаження мережі, для вибору кращої технології для побудови мережі LTE + Wi-Fi.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЄМНОСТІ LTE, ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

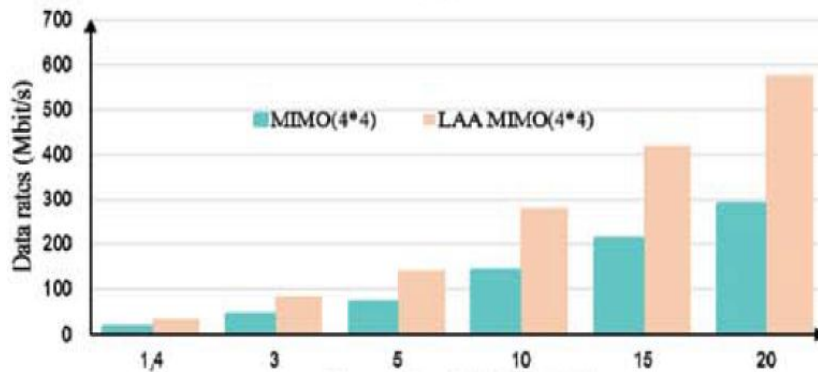
4.1 Залежність пропускної здатності мережі LTE від кількості антен та залежність пропускної здатності LTE+ LAA від відношення сигнал/шум та ширини каналу

Для LTE в якості антен цілком підійдуть звичайні панельні антени з крос-поляризацією. Вони, наприклад, використовуються в мережах GSM і в 3G. Але тут є різниця,- якщо в GSM і 3G дві поляризації зазвичай використовуються на прийом, а на передачу тільки одна (схема 2Rx / 1Tx), то в LTE обидві поляризації задіяні по повній, і на прийом, і на передачу (схема 2Rx / 2Tx). Це необхідно для реалізації технології MIMO2x2. На першому етапі впровадження LTE цього буде достатньо. Далі пропускну здатність сектора можна буде збільшити, додавши ще по одній крос-поляризованій антені. Вийде схема 4Rx / 4Tx і MIMO4x4. Головне рознести антени в просторі на достатню відстань (близько 10 довжин хвиль).

Швидкість передачі даних LTE + LAA суттєво збільшується з збільшенням кількості передавальної та приймальної антен, пропускну здатністю каналу: коли ширина смуги пропускання каналу ширша, ємність LTE + LAA більша. Швидкість передачі даних LTE + LAA дорівнює 575,1 Мбіт / с (для MIMO 4 \* 4, W (/ + f, = 40 МГц), на одночасно швидкість передачі даних LTE без використання технології LAA (для MIMO 4 \* 4, = 20 МГц) дорівнює лише 287,5 Мбіт / с. Рис.4.1 представляє зв'язок між швидкістю передачі даних LTE + LAA системи MIMO і пропускну здатністю каналу.



(а) Швидкість передачі даних LTE



(б) Швидкість передачі даних LTE+LAA

Рисунок 4.1 Зв'язок між швидкістю передачі даних LTE + LAA системи MIMO і пропускною здатністю каналу.

#### 4.2 Підвищення агрегація оператора LTE+LAA

Агрегація оператора (CA) дозволяє операторам мобільних мереж (MNO) об'єднати багатокомпонентні носії (CC) у доступному спектрі, щоб створити ширший канал пропускної здатності для збільшення пропускної спроможності та загальної потужності мережевих даних. CA дозволяє MNO підвищити швидкість передачі даних і може бути використаний для об'єднання ліцензованого та неліцензованого спектру оператора, а також у низхідній, висхідній або обох [2]. LTE-Advanced Pro з версії 3GPP 13 (Rel-13) дозволяє агрегацію максимум 32 компонентних носіїв із смугою пропускання до 20 МГц кожна. Крім того, покращена агрегація агрегації підтримує дублювання частотного поділу (FDD), а також дублювання часу (TDD). Тому загальна пропускна здатність каналу може досягати 100 МГц. На рис.4.2

наведено приклад агрегації п'ятикомпонентних носіїв у межах однієї частотної смуги суміжним способом.

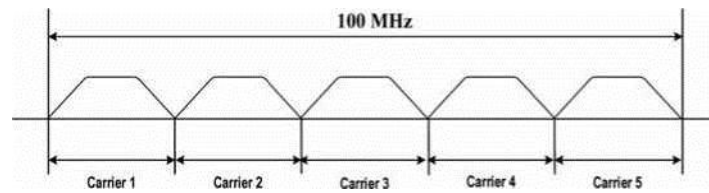


Рисунок 4.2 Агрегація внутрішньочастотного носія компонентних носіїв  
5 \* 20 МГц

Оскільки жоден з цих постачальників послуг не має безперервного спектру 100 МГц, в LTE-Advanced існують три різні режими агрегації носіїв: агрегація міжсмугової суміжної, внутрішньочастотної несуміжної та міжбарвної апаратури. На рис.4.3 зображено приклад агрегації трикомпонентних носіїв, що знаходяться в різних діапазонах частот

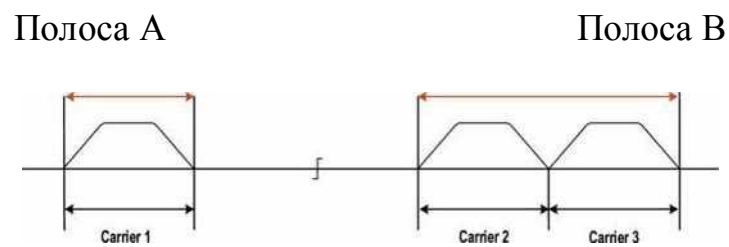


Рисунок 4.3 Агрегація міждіапазонного носія компонентних носіїв  
3 \* 20 МГц

З фізичної точки зору збільшення швидкості передачі даних ( $\vartheta_{down}$ ) в LTE може бути визначено за такою формулою:

$$\vartheta_{down} = C_r \times I_{TBS} \times 1000 \times N_{MIMO}$$

де,  $C_r$  - швидкість кодування;  $I_{TBS}$  - розмір транспортного блоку вимірюється в бітах (біт);  $N_{MIMO}$  - номер передачі та прийому антени. На рисунку 4.1а показано співвідношення між швидкістю передачі даних системи MIMO і пропускну здатністю каналу. Результати розрахунків наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Максимальна швидкість передачі даних LTE+LAA

Пропускна здатність каналу(МГц)		1,4	3	5	10	15	20
Кількість піднесучих		72	150	300	600	900	1200
Максимальна кількість ресурсних блоків		6	15	25	50	75	100
Модуляція та код схеми		28	28	28	28	28	28
Тип модуляції		64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM
Індекс транспортного блоку, $I_{TBS}$		26	26	26	26	26	26
Розмір блоку(біт)		4392	11064	18336	36696	55056	75376
Швидкість передачі даних LTE	SISO	4.2	10.6	17.5	35.1	52.5	71.9
	MIMO(2*2)	8.4	21.1	35.1	70.1	105.1	143.8
	MIMO(4*4)	16.8	42.2	70.1	140.1	210.1	287.5
Швидкість передачі даних LTE+LAA	MIMO(4*4)	33.5	84.4	139.9	280.1	420.1	575.1

#### 4.2 Оцінка ефективності розгортання технології LAA

Оцінка ефективності впровадження технології LAA може бути досягнута завдяки використанню радіочастот у неліцензованому спектрі 5 ГГц. З точки зору фізичної точки зору можливе збільшення потужності LTE може бути виправдане наступною формулою Шеннона:

$$C = f_g \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Видно, що там, де знаходиться  $C$ , потужність каналу вимірюється в мегабітах за секунду (Мбіт / с); а канал пропускна здатність вимірюється в

мегагерцах (МГц); і сигнал  $\frac{S}{N}$  до співвідношення інтерференції виражається в децибелах (дБ). Ефективна ємність множинного вхідного множинного виходу (MIMO) визначається за такою формулою:

$$C = M \times f_g \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Де заявлено  $M$ , це число передавальної та приймаючої антени [10]. Зв'язок між потужністю системи MIMO і пропускною здатністю каналу показана на рис. 4.4.

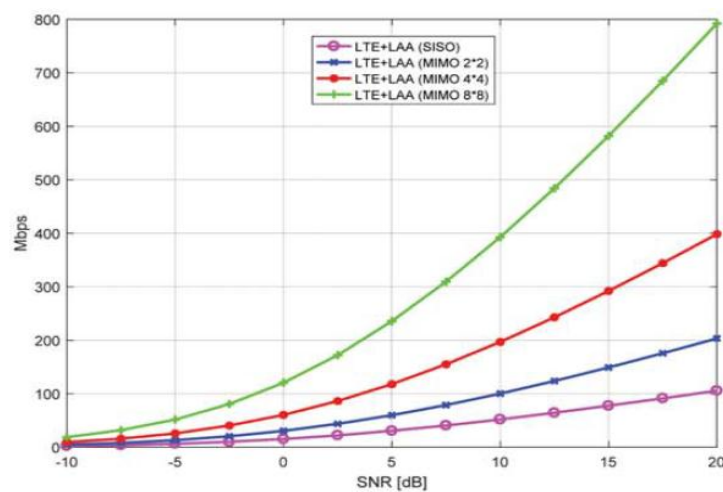


Рисунок 4.4 Зв'язок між потужністю системи MIMO і пропускною здатністю каналу

Подальшу систему збільшення потужності можна створити шляхом агрегації ліцензованого носія LTE з одним або кількома неліцензованими операторами в діапазоні 5 ГГц. Для оцінки потужності LTE, використовуючи технологію LAA, ми обчислимо ємність системи LTE + LAA щодо SINR (Співвідношення сигнал-перешкода) (рис.4.3.2) за такою формулою:

$$C = M \times (W_U + f_g) \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

Де  $W_U$  - пропускна здатність каналу у неліцензованому спектрі 5 ГГц (МГц).

Потужність LTE + LAA більша відповідно до рис. 4.4 і 4.5, оскільки вона використовує агрегацію ліцензованого носія LTE з одним або кількома неліцензованими носіями в діапазоні 5 ГГц. Проте потужність LTE + LAA значно збільшується з збільшенням кількості передавальних і приймальних антен NMIMO, збільшення пропускної здатності каналу та збільшення SINR. Потужність LTE + LAA дорівнює 796,1 Мбіт / с (для MIMO 4 \* 4,  $W_U + f_g = 40$  МГц і SINR=20дБ), в той час як емність LTE без використання технології LAA (для MIMO4\*4,  $f_g = 20$  МГц, SINR=20 дБ) дорівнює лише 388,6Мбіт / с

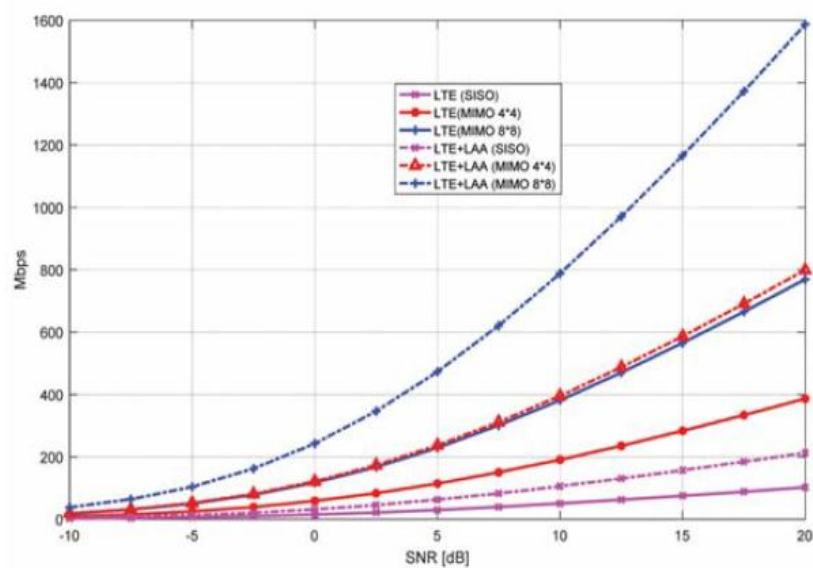


Рисунок 4.5 LTE+LAA Співвідношення між різними MIMO моделями

4.3 Розрахунки ефективності використання частотного ресурсу для мереж LTE і Wi-Fi окремо. Порівняння технологій LTE та Wi-Fi. Побудова суміщеної мережі LTE + Wi-Fi

Дисперсійні відмінності між LTE та Wi-Fi набором технологій радіодоступу з точки зору протоколів, процедур та стандартів PHY / MAC (фізичний та середній контроль доступу), а також відсутність будь-яких специфікацій для пом'якшення взаємних перешкод можливості,

підкреслюють необхідність створення таких можливостей у неоднорідному розподілі радіодоступу неліцензованих ресурсів спектру.

У випадку систем Wi-Fi немає механізму управління потужністю, а при доступі до каналу передача відбувається з максимальною доступною потужністю. З іншого боку, у випадку систем LTE, передача відбувається кожен підкадр (інтервал 1 мілісекунд), що потенційно блокує системи Wi-Fi у фізичній близькості, які намагаються отримати доступ до спільних неліцензованих ресурсів спектру.

Для підвищення ефективності сценаріїв експлуатації систем LTE та Wi-Fi використовуються EICIC (покращена міжклітинна інтерференційна координація). EICIC пропонує поліпшити методи зниження міжсистемних перешкод через використання ABS (майже порожніх субкадрів), що дозволяє вузлам з низьким рівнем енергії використовувати ці субкадри на краю комірки.

Однак вузол LTE + LAA відключає послуги користувачів у всіх субкадрах ABS, що дозволяє уникнути або зменшити вплив перешкод на загальні ресурси неліцензованого спектра. На додаток до ABS, щоб сприяти інтелектуальному співіснуванню, треба збирати адаптивний канал зондування в системах Wi-Fi, а також використання системи управління потужністю, орієнтованим на SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) в системах LTE. Приклади порівняння LTE / Wi-Fi наведені в таблиці 4.2

Табл.4.2 Порівняння технологій LTE та Wi-Fi

	LTE	Wi-Fi
Діапазон піднесучих, кГц	1 5	312.5
Кількість піднесучих	1200	56
Ефективність системи ( FDD)	$\text{kHz} * 1200) / 20 \text{ МГц} = 0.9$	$(312.5 \text{ кГц} * 56) / 20 \text{ МГц} = 0.875$
Тривалість символу, ps	66.7	3.2

## Продовження таблиці 4.2

Циклічний префікс	4.7 ps	800 ns (400 ns)
Ефективність системи (TDD)	$66.7 / (66.7+4.7) = 0.934$	$3.2/(3.2+ 0.8) = 0.8$ $3.2/(3.2+ 0.4) = 0.889$
Загальна ефективність	$0.9 * 0.934 = 0.841$	$0.875 * 0.8 = 0.708$ $0.875 * 0.889 = 0.778$

Результати моделювання цих стратегій співіснування LTE / Wi-Fi та розрахунків ефективності, що використовують радіочастотний спектр, як показано на рис.4.6, показали, що продуктивність системи LTE перевищує продуктивність системи Wi-Fi, де система LTE дозволяє отримувати пікові дані ставки на 8-15% більше, ніж системи Wi-Fi. Крім того, при обчисленні максимально допустимих втрат ліній відповідно до рис 4.7 енергетичний бюджет каналу LTE стає кращим, ніж канал Wi-Fi, на ~ 14 дБ.

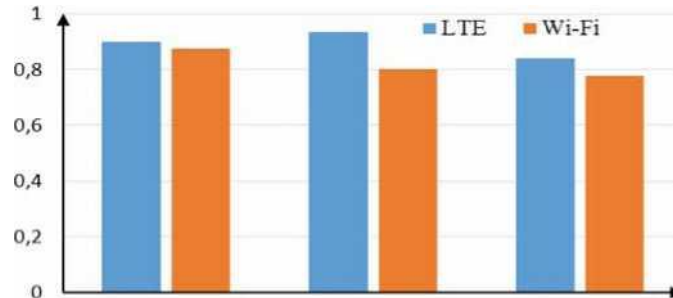


Рисунок 4.6 Порівняння продуктивності LTE і Wi-Fi (Ємність )

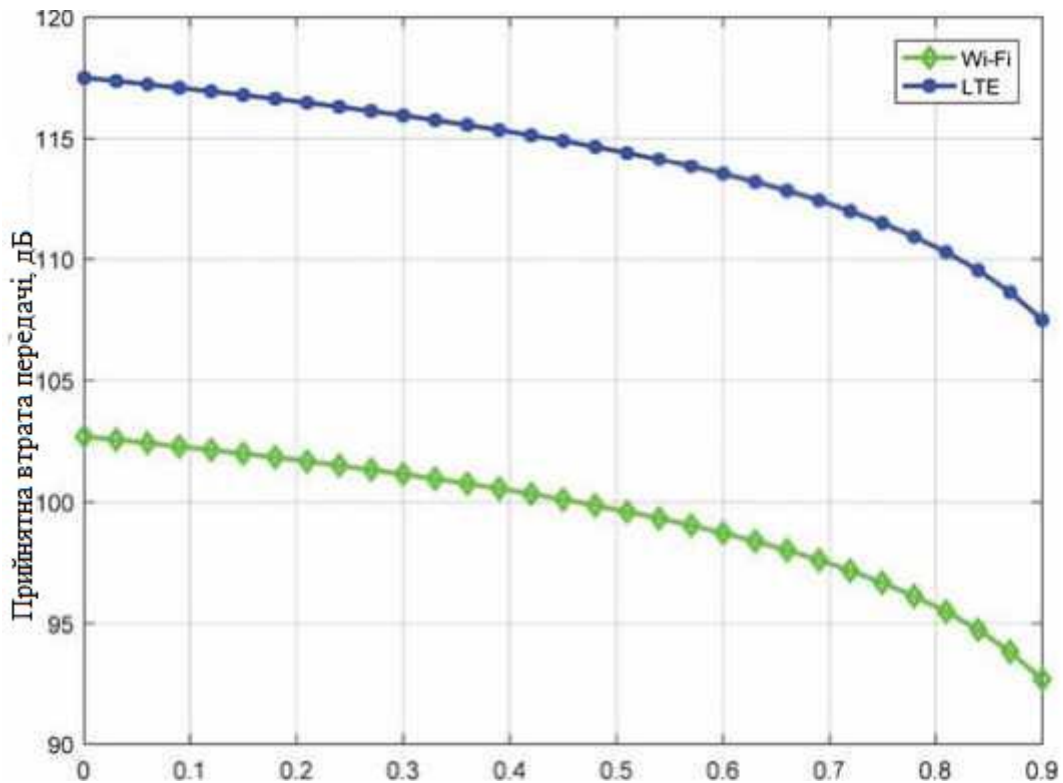


Рис. 4.7 Залежність прийнятної втрати передачі від площі навантаження

LTE включає в себе мережу радіодоступу E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) і вдосконалене пакетне ядро EPC (Evolved Packet Core) [17]. Що стосується мереж Wi-Fi, то доступ через ТД Wi-Fi може бути довіреною (мережі Wi-Fi оператор-ського класу з безпечним методом аутентифікації) і недовірених (громадські відкриті ТД Hotspots, домашні бездротові локальні мережі користувачів).

Для забезпечення роботи технології розвантаження через Wi-Fi необхідно ввести такі елементи.

1. Домашній агент НА (Home Agent) - маршрутизатор в домашній мережі, в який направляються пакети з мереж Wi-Fi. Також НА відправляє пакети, що прийшли в EPC, абонентському терміналу (User Equipment, UE) через мережу Wi-Fi [18].

2. Шлюз мобільного доступу MAG (Mobile Access Gateway), який відстежує рух абонентського терміналу UE і повідомляє про це в EPC.

3. Якір управління мобільністю LMA (Local Mobility Anchor) - це окремий випадок HA для взаємодії дії з MAG. LMA прив'язує свій IP адреса до IP адресою UE, щоб пакети, що прийшли в EPC, відправлялися далі через MAG користувачеві [19]. Для недовіреного доступу використовуються також додаткові компоненти.

4. Удосконалений шлюз для пакетних даних ePDG (evolved Packet Data Gateway), який виконує функцію MAG в довірених мережах [20].

5. Шлюз бездротового доступу WAG (WirelessAccess Gateway), який є маршрутизатором, напрямних пакети в ePDG. WAG гарантує, що пакети відправляються в EPC і що на UE приходять пакети тільки з ePDG [21].

Структура мережі LTE + Wi-Fi приведена на рис. 4.8

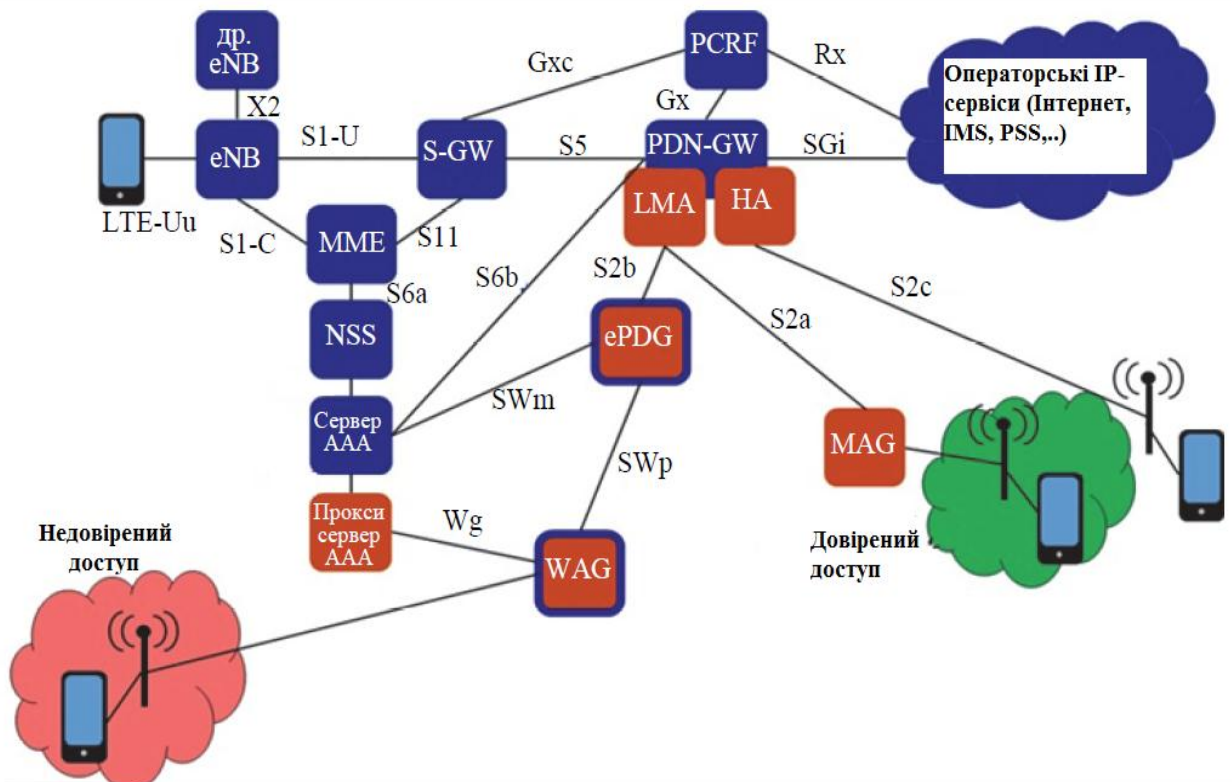


Рисунок 4.8 Структура об'єднаної мережі LTE + Wi-Fi

При взаємодії використовуються мобільний проксі-протокол IP версії 6 PMIPv6 (Proxy Mobile IPv6) на інтерфейсах S2a і S2b і IP протокол, який використовує версію 6 поверх версії 4 DSMIPv6 (Dual Stack Mobile IPv6) на інтерфейсі S2c. Протокол PMIPv6 [21] забезпечує взаємодію між MAG і LMA

для довіреної доступу, а також враховує використання WAG і ePDG для недовіреної доступу (додатково між UE і вузлом ePDG організовується тунельний з'єднання з використанням протоколу безпеки IPsec [22]).

Протокол DSMIPv6 підтримує можливість формування тунелів з використанням як IPv4, так і IPv6. Для роботи даного протоколу не має значення, який тип доступу використовується (довірений або недовірений) [23]. Функціонування протоколу DSMIPv6 значно простіше, протокол універсальний для обох видів доступу Wi-Fi і не вимагає великої кількості додаткових елементів. Однак реалізація цього протоколу вимагає, щоб його підтримував UE.

#### Оцінка ефективності впровадження Wi-Fi offloading

На рис.4.9 представлено розподіл видів трафіку за станом на лютий 2015 року згідно мобільному звіту компанії Ericsson [24]. Як «важкого» трафіку будемо розглядати відео, аудіо, завантаження і оновлення програм. Саме цей трафік пропонується розвантажувати в мережі Wi-Fi.

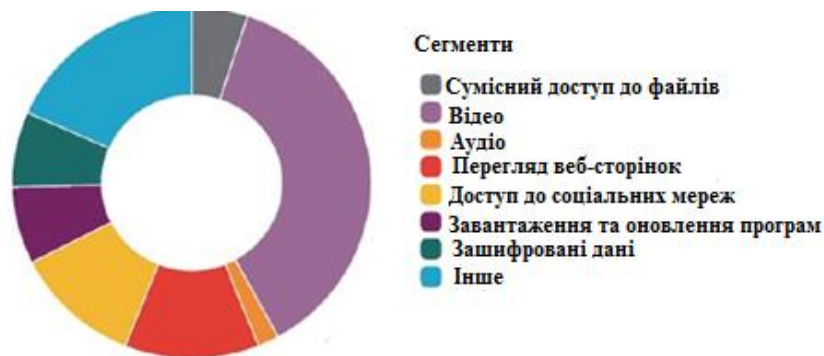


Рисунок 4.9 Розподіл трафіка

Зробимо оцінку ефективності впровадження розвантаження мережі стандарту LTE за допомогою технології Wi-Fi 802.11n для центру Львова. Для оцінки пропускну здатності і ємності мережі без застосування розвантаження через Wi-Fi використовуємо дані про середні значення

спектральної ефективності однієї стільниці мережі LTE [25] і розрахуємо середню пропускну здатність стільниці базової станції LTE (eNB) [26]:

$$R_{FDD} = S_{FDDaverage} * W, \text{ Мбум/сек}$$

Де  $S_{FDDaverage}$ , середня спектральна ефективність, біт/с/Гц;  $W$  – ширина каналу, МГц.

Далі розрахуємо сумарну пропускну здатність мережі LTE у напрямку до абонента:

$$R_{NW} = R_{eNB} * N_{eNB}, \text{ Гбіт/с}$$

Де  $R_{eNB}$ -середня пропускну здатність eNB, Мбіт/с,  $N_{eNB}$ -число eNB

Розрахуємо усереднений трафік абонента в годину найбільшого навантаження (ГНН):

$$R_{BH} = \frac{T_m * N_{bit}}{N_d * N_{BH} * t_h}, \text{ кбіт/с}$$

Де  $T_m$  величина трафіка використана користувачем за місяць (Б),  $N_{bit}$  число біт в байті (біт),  $N_d$  - число днів в місяці;  $N_{BH}$ - кількість годин найбільшого навантаження;  $t_h$  - число секунд в годині, с.

Усереднений трафік абонента на лінії «вниз» в ГНН:

$$R_{DL} = R_{BH} * S_{DL}, \text{ кбіт/с}$$

Де  $S_{DL}$  частка трафіку, що припадає на лінію «вниз».

Ємність мережі складе

$$N_{sub} = \frac{R_{NW}}{R_{DL}}$$

Із застосуванням даних про стандарт 802.11n були проведені аналогічні розрахунки для мережі стандарту LTE, що використовує розвантаження через Wi-Fi. Результати розрахунків наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 Оцінка ефективності застосування технології Wi-Fi offloading

Параметр	Без застосування Wi-Fi offloading	Із застосуванням Wi-Fi offloading		
		100ТД/км <sup>2</sup>	200ТД/км <sup>2</sup>	350ТД/км <sup>2</sup>
Середня пропускна здатність NB / ТД, Мбіт / с	51	97		
Середня швидкість передачі «Важкого» трафіку, Мбіт / с	1,7	9,7		
Площа покриття мережі LTE, км <sup>2</sup>	69			
Площа покриття мережі Wi-Fi для розвантаження мережі LTE, км <sup>2</sup> (з урахуванням поверховості забудови)	-	46	92	160
Максимальна ємність мережі, тис. чол.	38	7028	13987	24426

Згідно табл. 4.3, середня швидкість передачі даних в мережі з використанням розвантаження через Wi-Fi виявляється більше за рахунок того, що застосовуються ТД стандарту 802.11n. У сучасних системах радіодоступу можна максимально врахувати умови поширення радіохвиль в каналі зв'язку і адаптуватися до них шляхом вибору найбільш підходящої схеми модуляції і кодування MCS (Modulation and Coding Scheme). Квадратурна амплітудна модуляція QPSK / 16QAM / 64QAM може комбінувати з перешкодостійким кодуванням з різними швидкостями на різному віддаленні від ТД. Для підтримання якості послуг, що надаються доцільно розглядати швидкісні показники на видалення 30 м від ТД. При розрахунках до уваги приймалося співвідношення відкритої і забудованої

місцевості, рівне 1: 3, середня поверховість - 5 поверхів. У майбутньому застосування нового стандарту 802.11ac [27] дозволить збільшити швидкість передачі даних в мережі Wi-Fi до 2340 Мбіт / с на радіо-інтерфейсу.

Середня швидкість передачі «важкого» трафіку визначалася з розрахунку 10 активних користувачів на 1 сектор eNB або ТД Wi-Fi. «Важкий» трафік буде передаватися з більшою швидкістю, що поліпшить якість послуг, що надаються.

Площа покриття мережі LTE становить

$$S_{LTE} = S_{eNB} * N_{eNB} \text{ (км}^2\text{)}$$

де  $S_{eNB}$  - площа покриття трисекторна сайту, км<sup>2</sup>;  $N_{eNB}$  - число eNB.

Тоді необхідне число eNB для покриття всього міста складе

$$N_{eNB} = \frac{S_{LTE}}{S_{eNB}} = \frac{S_{СПб}}{S_{eNB}}$$

Площа центру Львова складає  $S_{СПб} = 69$  км<sup>2</sup>, а з урахуванням поверховості забудови площа покриття дорівнює 153 км<sup>2</sup>. Площа покриття трисекторного сайту в умовах середньої міської забудови становить  $S_{eNB} = 0,54$  км<sup>2</sup>.

Таким чином, необхідне число eNB для покриття центру міста складе  $N_{eNB} = 130$ , проте це кількість eNB не забезпечує необхідну ємність в 740 тис. чоловік населення центру міста (Табл. 2). За результатами виконаних розрахунків при щільності 350 ТД / км<sup>2</sup>сек Wi-Fi зможе покрити територію центру Львова, повністю забезпечуючи широкопasmовим доступом в Інтернет не тільки жителів, але і людей, що знаходяться в центрі на роботі, на прогулянці, а також приїжджих і туристів, що в цілому становить близько 2,5 млн. Більш того, ємність такої поєднаної мережі LTE + Wi-Fi на даний момент перевищує в 10 раз потреби центру міста (табл. 2). У зв'язку з цим на першому етапі впровадження технології доцільно розгортати мережу Wi-Fi в місцях масового скупчення людей, де гостро стоїть питання нестачі ресурсів. Оскільки спостерігається лавиноподібне зростання трафіка, то розглянутий граничний випадок буде актуальний через 7 років. Наприклад, до 2019 р

загальносвітової трафік даних виросте в 10 разів [21], таким чином, середньомісячний трафік (величина  $T_m$ ), генерується тією же кількістю абонентів, також зросте в 10 разів. У цій ситуації необхідну пропускну здатність забезпечать 200 ТД / км<sup>2</sup> (рис. 3). Потреби користувачів будуть продовжувати рости експоненціально [24], тому вже до 2022 р постане необхідність в повному покритті центру Львова мережею Wi-Fi операторського класу, тобто в розгортанні 350 ТД / км<sup>2</sup> (рис. 4.10).

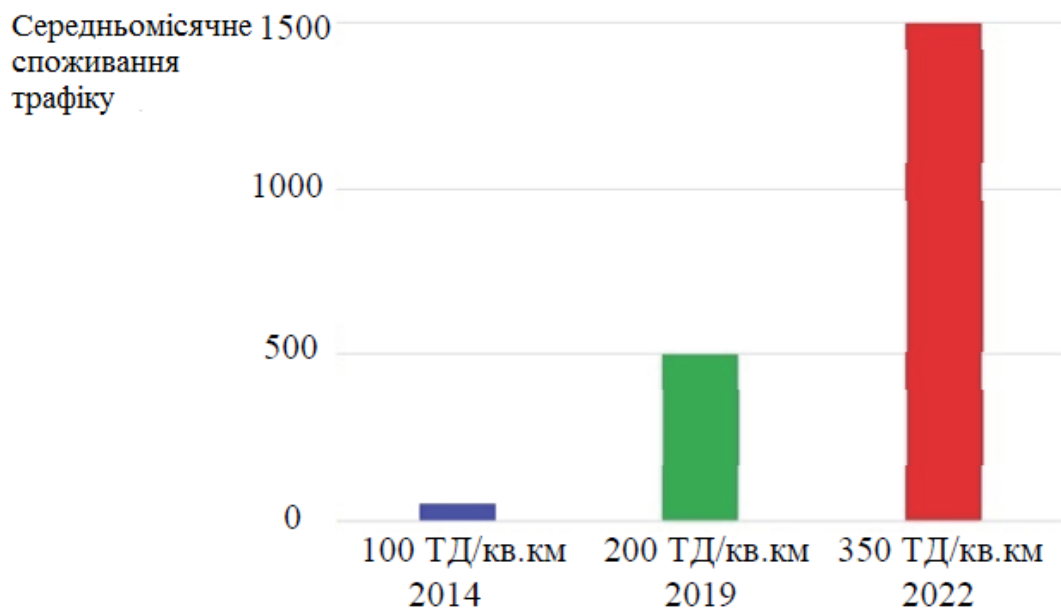


Рисунок 4.10 Оцінка ефективності впровадження технології розвантаження через Wi-Fi

### Моделювання процедури переходу UE з мережі LTE в мережу Wi-Fi

Розглянемо ділянку місцевості 1 км<sup>2</sup>. У центрі ділянки розташована базова станція eNB. Радіус однієї соти eNB в умовах середньої міської забудови - 0,53 м [22]. Досліджуємо поведінку UE-абонентів, що знаходяться всередині стільники. Абоненти розподілені на ділянці місцевості випадково по рівномірному закону розподілу. Кількість абонентів на ділянці 1 км<sup>2</sup> приймемо рівним 1000. Кількість ТД Wi-Fi на ділянці місцевості будемо

приймати різним, для того щоб дослідити кількість абонентів, які перейшли з мережі LTE в мережу Wi-Fi, при різній щільності ТД на 1 км<sup>2</sup>. Для визначення зміни пікової швидкості передачі даних в мережі LTE при перекладі частини абонентів в мережу Wi-Fi припустимо, що в зоні дії eNB знаходиться 20 активних абонентів. Згідно табл. 4.3, середня пропускна здатність eNB становить 51 Мбіт / с, середня пропускна здатність ТД Wi-Fi 802.11n - 97 Мбіт / с. Приклад досліджуваної ділянки місцевості, розподілу на ньому абонентів, при зоні обслуговування 1 eNB і щільності 100 ТД / км<sup>2</sup> наведено на рис. 4.11.

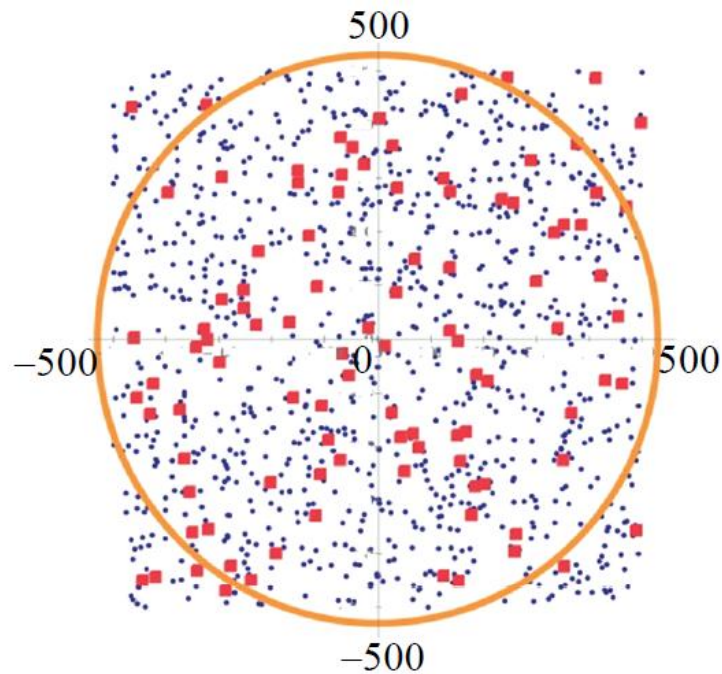


Рисунок 4.11 Розподіл абонентів і точок доступу на місцевості, де точками позначені абоненти, квадратами - точки доступу, коло - межа зони обслуговування eNB

UE приєднується до ТД, якщо вона розташована в області стільники з поточним Cell-ID. цією областю буде коло, описане навколо шестикутника зони обслуговування однієї антени eNB. Радіус цієї області  $r = 0,53$  м. Грунтуючись на положенні кожного абонента, можна оцінити кількісно у UE,

які підключилися до ТД, з урахуванням того, що UE потрапляє в зону дії ТД Wi-Fi, яка складає 30 м. Результат моделювання представлений на рис. 4.12.

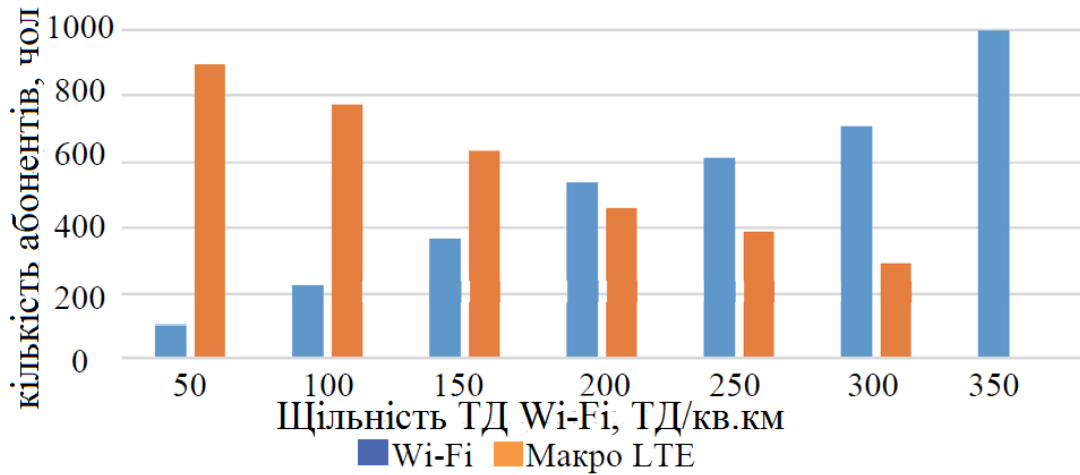


Рисунок 4.12 Кількість UE, переведених в мережу Wi-Fi

Вже при 200 ТД /км<sup>2</sup> величина абонентів, переведених в мережу Wi-Fi, перевищує число залишившихся в мережі LTE. При 350 ТД / км<sup>2</sup> мережу Wi-Fi виявляється повністю накладеної на мережу LTE, в результаті чого всі абоненти оператора виявляються в зоні дії Wi-Fi операторського класу. На рис. 4.13, а, показаний графік залежності середньої швидкості передачі даних в мережі LTE від щільності ТД.

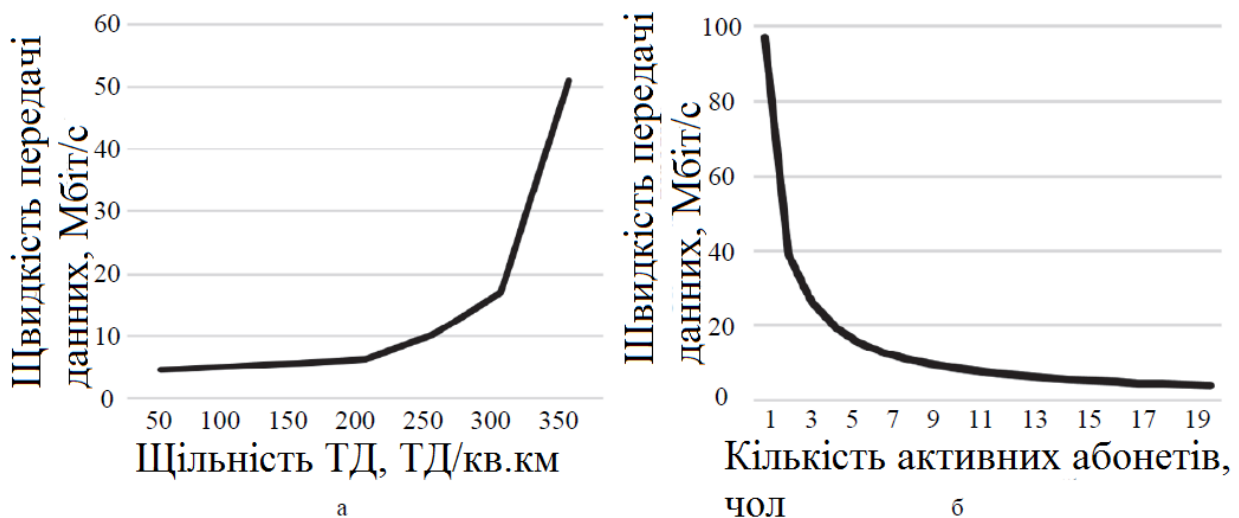


Рисунок 4.13 Залежність середньої швидкості передачі даних: в мережі LTE від щільності точок доступу (а); в мережі Wi-Fi від кількості абонентів (б).

Швидкість передачі даних в мережі LTE значно зростає при збільшенні щільності ТД: чим вище щільність, тим більша ймовірність того, що активний абонент потрапить в зону дії ТД Wi-Fi. При щільності 350 ТД / км<sup>2</sup> швидкість передачі даних в мережі LTE виявляється рівною 51 Мбіт / с, в той час як без використання технології розвантаження через Wi-Fi вона складе лише 2,6 Мбіт / с.

На рис. 4.13, б, наведена залежність швидкості передачі даних в мережі Wi-Fi для абонентів однієї ТД від числа абонентів, підключених до цієї ТД.

Щільність 350 ТД / км<sup>2</sup> забезпечує переклад в мережу Wi-Fi всіх 20 активних абонентів, якщо це необхідно. Навіть якщо припустити, що всі 20 абонентів були переведені в мережу Wi-Fi через одну ТД, швидкість передачі даних для кожного з них складе 3,9 Мбіт / с (рис. 4.13, б). Якби ці абоненти знаходилися в макромережі LTE, швидкість становила б 2,6 Мбіт / с. Таким чином, при самому невдалому варіанті попадання всіх абонентів в зону дії однієї ТД Wi-Fi швидкість передачі даних зростає в 1,5 рази. При всіх інших випадках швидкість буде вище, згідно рис. 4.13,б. Наявність повного покриття не завжди передбачає переведення всіх абонентів в мережу Wi-Fi, так як необхідно враховувати конкретні значення навантаження на eNB і ТД, а також її вид. В майбутньому при збільшенні навантаження можуть виникати випадки, коли ТД Wi-Fi буде перевантажена, і абонент буде лишатись підключеним до мережі через eNB, незважаючи на те, що буде перебувати в зоні дії ТД. Виходячи з цього, одним із завдань подальших досліджень в даній області є балансування навантаження в 3-вміщених мережах LTE + Wi-Fi з використанням таких алгоритмів [28], як алгоритм перепоповнення(Spillover), циклічний зважений алгоритм (Weighted Round Robin) і алгоритм, який використовує правило менш завантаженою черги (Least Load First).

#### 4.4 Висновки з розділу 4

Найбільш перспективною технологією для розвантаження мереж LTE є технологія Wi-Fi. В даній роботі проведений аналіз можливих шляхів вирішення проблеми перевантаження мережі, що доводить перевага технології Wi-Fi та побудови мережі LTE + Wi-Fi, де в структуру мережі LTE додані такі компоненти, як MAG, LMA, ePDG і WAG. Отримані результати розрахунків і моделювання показують ефективність впровадження даної технології за рахунок зростання швидкості передачі даних, збільшення клієнтської бази, усунення проблем в радіо-покриття. Ці фактори роблять технологію розвантаження мережі LTE через мережі Wi-Fi привабливою для операторів мобільного зв'язку.

## ВИСНОВКИ

Досліджено питання підвищення пропускної здатності мереж LTE шляхом використання неліцензійного радіочастотного спектра в діапазоні 5 ГГц як один із способів вирішення проблеми перевантаження базових станцій, зниження швидкості передачі даних і брак ресурсів гетерогенних мереж стандарту LTE. Представлені технічні вимоги та умови використання неліцензійного спектра в діапазоні 5 ГГц в різних регіонах світу. Наведено порівняння механізмів організації доступу до каналу при спільній роботі різних технологій радіодоступу в діапазоні 5 ГГц: FBE (Frame Based Equipment) і LBE (Load Based Equipment).

Особливу увагу приділено опису спільної роботи LTE + LAA і Wi-Fi на одному каналі в діапазоні 5 ГГц, де в структуру мережі LTE + LAA включені такі нові технологічні рішення для організації доступу, як FBE, LBE, LBT і CCA. Виконано оцінку ефективності впровадження технології LAA. Відповідно до проведених розрахунків потужність LTE + LAA більша (рис. 4.4 і 4.5), оскільки вона використовує агрегацію ліцензованого носія LTE з одним або кількома неліцензованими носіями в діапазоні 5 ГГц.

В рамках моделювання процесу спільного існування LTE / Wi-Fi представлені результати розрахунків ефективності використання частотного ресурсу для мереж LTE і Wi-Fi в окремо, залежність максимально допустимих втрат на лінії щодо завантаження стільниці, результати розрахунків швидкості передачі даних без застосування технології LAA, залежність пропускної здатності мережі LTE від кількості антен і залежність пропускної здатності LTE + LAA від відносини сигнал / шум і ширини каналу.

На підставі проведеного дослідження можна зробити висновок про те, що поступове впровадження даної технології дозволяє успішно справлятися з проблемою перевантаження базових станцій і брак ресурсів мереж мобільного оператора в великих містах через постійне зростання трафіку.

Показано, що використання неліцензійного радіочастотного спектру в діапазоні 5 ГГц в мережі LTE + LAA суттєво збільшує швидкість передачі даних.

Також описано побудову мережі LTE + Wi-Fi, де в структуру мережі LTE додані такі компоненти, як MAG, LMA, ePDG і WAG. Отримані результати розрахунків і моделювання показують ефективність впровадження даної технології за рахунок зростання швидкості передачі даних, збільшення клієнтської бази, усунення проблем в радіопокриття (середня швидкість передачі даних в мережі з використанням розвантаження через Wi-Fi виявляється більше за рахунок того, що застосовуються ТД стандарту 802.11n).

В даній роботі проведений аналіз можливих шляхів вирішення проблеми перевантаження мережі, що доводить перевагу технології Wi-Fi та побудови мережі LTE + Wi-Fi.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. (<https://habr.com/company/beeline/blog/129694/>)
2. (<https://112.ua/statji/zachem-nam-nuzhna-4g-416630.html>)
3. (<https://www.tele2.lv/ru/chastnym-klientam/internet/polezno1/ckorost-peredachi-dannyh/>)
4. <http://internetua.com/zacsem-izmeryat-skorost-4g>
5. <http://www.etsi.org/images/files/ETSITechnologyLeaflets/ShortRangeDevices.pdf>
6. Mobile Broadband Evolution Towards 5G: 3GPP Rel-12 & Rel-13 and Beyond. 4G Americas. June 2015.
7. 3GPP TR 36.889 v13.0.0 (2015-06). Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Licensed- Assisted Access to Unlicensed Spectrum. – Technical Report (Release 13). 2015.
8. ECC Report 192. The Current Status of DFS (Dynamic Frequency Selection) In the 5 GHz frequency range. – February 6, 2014.
9. CEPT Report 57. To study and identify harmonized compatibility and sharing conditions Wireless Access Systems including Radio Local Area Networks in the band 5350-5470 MHz and 5725-5925 MHz (‘WAS/RLAN extension bands’) for the provision of wireless broadband services. Report A from CEPT to the European Commission in response to the Mandate. – March 6, 2015.
10. ECC/DEC/(04)08. ECC Decision Of 09 July 2004 on the harmonized use of the 5 GHz frequency bands for the implementation of Wireless Access Systems including Radio Local Area Networks (WAS/RLANs). – Amended 30 October 2009.
11. ETSI EN 301 893 v1.8.1 (2015-03). Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive.– Harmonized European Standard. 2015.

12. Аль-Амері Х.А., Степутін А.Н. Особливості використання неліцензійного радіочастотного спектру в гетерогенних мережах стандарту LTE // Актуальні проблеми інфотелекомунікацій в науці і освіті. Зб. науч. с.: 39-44
13. Thalanany S., Irizarry M., Saxena N. License-Assisted Access Considerations. IEEE Communications Standards Magazine, June, 2017, pp. 106-112
14. 3GPP TR 36.889 v13.0.0 (2015-06). Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Licensed Assisted Access to Unlicensed Spectrum. - Technical Report (Release 13).
15. Maglogiannis V., Naudts D., Shahid A., Giannoulis S., Laermans E., Moerman I. Cooperation Techniques between LTE in Unlicensed Spectrum and Wi-Fi towards Fair Spectral Efficiency. Department of Information Technology, Ghent University, Belgium, 2017. 26 p
16. Alexandre K., Frank Y. LTE in Unlicensed Band: Medium Access and performance evaluation. IKT 590 Master Thesis in spring 2015, University of Agder, 2015. 80 p
17. Нікітіна А.В., Рижков А.Є. Мережі радіодоступу четвертого покоління. Стандарт LTE: технології та процедури. СПб .: СПбГУТ, 2012. 84 с.
18. IETF RFC 5944. IP Mobility Support for IPv4, Revised [Електронний ресурс]. 2010. Режим доступу: <http://www.ietf.org/proceedings/86/rfc/rfc5944.txt>
19. IETF RFC 5213. Proxy Mobile IPv6 [Електронний ресурс]. 2008. Режим доступу: <https://tools.ietf.org/html/rfc5213>
20. Тихвинський В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Мережі мобільного зв'язку LTE: технології та архітектура. М .: Еко-Трендз, 2010. 284с.
21. 3GPP Specification: 23.234. 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking; SystemDescription [Електронний ресурс]. 2012. Режим доступу: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23234.htm>

22. 3GPP Specification: 23.402. Architecture Enhancements for non-3GPP Accesses [Електронний ресурс].2013. Режим доступу: <http://www.3gpp.org/DynaReport/23402.htm>
23. 3GPP Specification: 24.303. Mobility Management based on Dual-Stack Mobile IPv6; Stage 3 [Електронний ресурс]. 2013. Режим доступу: <http://www.3gpp.org/dynareport/24303.htm>
24. Ericsson Mobility Report [Електронний ресурс]. 2015. Режим доступу: [www.ericsson.com/res/docs/2015/ericsson-mobility-report-feb-2015-interim.pdf](http://www.ericsson.com/res/docs/2015/ericsson-mobility-report-feb-2015-interim.pdf)
25. 3GPP Specification 25.912. Feasibility Study for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) [Електронний ресурс]. 2012. Режим доступу: <http://www.3gpp.org/DynaReport/25912.htm>
26. Варукіна Л. Вправа з планування радіомереж LTE, а також про технічні передумови об'єднання операторів [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.mforum.ru/arc/20110520\\_LTE\\_RNP\\_Varukina\\_180511.pdf](http://www.mforum.ru/arc/20110520_LTE_RNP_Varukina_180511.pdf)
27. Gast M.S. 802.11ac: A Survival Guide. O'Reilly Media, 2013. 152 p.
28. Функція балансування навантаження (Load Balancing) між двома WAN-портами на ZyWALL [електро-тронний ресурс]. Режим доступу: <http://zyxel.ru/kb/1443>