ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «**МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ ДО НЕЛІЦЕНЗІЙНОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ LTE/WI-FI МЕРЕЖ**»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

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

_____ Дмитро ШУЛЬГА
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. ТСДМ-61
Дмитро ШУЛЬГА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:
л.т.н., доцент
Ганна ГРИНКЕВИЧ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Рецензент: _____
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Шульзі Дмитру Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Методи адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону для підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих LTE/Wi-Fi мереж
керівник кваліфікаційної роботи Ганна ГРИНКЕВИЧ, л.т.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від « » 2025 р. №

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1. Оптимізація доступу до спектру.
2. Вимоги користувачів.
3. Гібридне управління LTE/Wi-Fi.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Архітектура доступу.
2. Адаптивне управління навантаженням.
3. Гібридна архітектура та запобігання передчасній оптимізації.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: ___презентація на____слайдах_____

6. Дата видачі завдання «___» _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та аналіз науково-технічної літератури	01.10.2025	Викон.
2	Розробка першого розділу	05.10.2025	Викон.
3	Розробка другого розділу	10.10.2025	Викон.
4	Розробка третього розділу	05.11.2025	Викон.
6	Висновки, вступ, реферат	25.11.2025	Викон.
7	Розробка презентації	30.11.2025	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Дмитро ШУЛЬГА
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Ганна ГРИНКЕВИЧ
(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 Шульга Д.В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: «Методи адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону для підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих LTE/Wi-Fi мереж»

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Шульга Дмитро Володимирович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Шульги Дмитра Володимировича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Ганна ГРИНКЕВИЧ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Шульга Д.В. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача вищої освіти Шульги Дмитра Володимировича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Методи адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону для підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих LTE/Wi-Fi мереж»

Актуальність. В умовах зростання трафіку мобільних користувачів та широкого впровадження сервісів, чутливих до затримок, критично важливим є ефективне використання доступного радіочастотного ресурсу. Інтеграція технологій LTE, Wi-Fi та LTE-U в неліцензійному спектрі створює нові можливості підвищення пропускної здатності мережі, але одночасно ускладнює забезпечення справедливого доступу, стабільності QoS та енергоефективності. Саме тому дослідження механізмів адаптивного управління доступом і балансування навантаження, що дозволяють оптимізувати співіснування різних технологій зв'язку в єдиному радіосередовищі, є актуальним як з наукової точки зору, так і з позиції практичної телекомунікаційної інженерії. Запропоноване автором імітаційне моделювання та аналіз поведінки інтегрованих систем дозволяють поглибити розуміння механізмів спільного використання спектра та сприяють розробленню енергоефективних мереж наступних поколінь.

Позитивні сторони:

1. Автор ґрунтовно дослідив архітектуру та принципи функціонування гетерогенних LTE/Wi-Fi/LTE-U систем, що дозволило всебічно оцінити проблематику спільного використання неліцензійного спектра.
2. Запропонований підхід до адаптивного балансування навантаження і керування радіоресурсами є логічним, технічно коректним і відповідає сучасним тенденціям розвитку мобільних комунікацій.

Недоліки:

1. У роботі розглянуто лише окремі типові сценарії навантаження.
2. Деякі методи координації доступу до неліцензійного спектра, які останніми роками розглядаються в 3GPP та IEEE, могли б бути використані як база для глибшого порівняльного аналізу.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Шульга Дмитро Володимирович заслуговує присвоєння кваліфікації: магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.*

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

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 76 стор., 27 рис., 3 табл., 29 джерел.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi/LTE-U шляхом дослідження механізмів спільного використання спектра, аналізу характеристик гетерогенних систем та розроблення імітаційної моделі адаптивного розподілу радіоресурсів з оцінкою впливу на пропускну здатність та енергоефективність мережі.

Об'єкт дослідження - процес функціонування гетерогенних багаторівневих мереж радіодоступу LTE/Wi-Fi/LTE-U в умовах динамічного та просторово нерівномірного навантаження.

Предмет дослідження - механізми інтеграції та спільного використання радіоресурсів у гетерогенних мережах LTE/Wi-Fi/LTE-U, а також методи їх адаптивного управління та моделювання ефективності.

Короткий зміст роботи: У роботі проаналізовано інтегровані LTE/Wi-Fi мережі та методи адаптивного управління доступом до неліцензійного спектра. Розглянуто технології LWA, LAA та LTE-U та їхній вплив на пропускну здатність і якість обслуговування. Показано, що адаптивне балансування навантаження і керування малими комірками покращує співіснування LTE та Wi-Fi, підвищує ефективність використання радіоресурсів і знижує енергоспоживання. Встановлено, що ключовим принципом оптимізації є адаптивність, яка забезпечує стабільність роботи мережі в умовах змінного трафіку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ГЕТЕРОГЕННА КОМП'ЮТЕРНА МЕРЕЖА, HETNET, QOS, МЕРЕЖЕВА БЕЗПЕКА, CSMA/CD, АГРЕГАЦІЯ LTE-WLAN, LWIP, ДРАЙВ-ТЕСТ, CSAT, КОЛІЗІЯ, CSMA/CD, КОМБІНОВАНІ АДАПТИВНІ СИСТЕМИ, OPENSIGNAL.

ABSTRACT

Text part of the qualification work for obtaining a master's degree: 76 pages, 27 figures, 3 tables, 29 sources.

The purpose of the work - of this work is to improve the efficiency of integrated LTE/Wi-Fi/LTE-U networks by studying spectrum sharing mechanisms, analyzing the characteristics of heterogeneous systems, and developing a simulation model of adaptive radio resource allocation with an assessment of its impact on network throughput and energy efficiency.

Object of research - is the functioning of heterogeneous multi-level LTE/Wi-Fi/LTE-U radio access networks under conditions of dynamic and spatially uneven load.

Subject of research - is the mechanisms of integration and shared use of radio resources in heterogeneous LTE/Wi-Fi/LTE-U networks, as well as the methods of their adaptive management and performance modeling.

Summary of the work: The study analyzes integrated LTE/Wi-Fi networks and methods of adaptive access management in the unlicensed spectrum. The technologies LWA, LAA, and LTE-U and their impact on throughput and quality of service are examined. It is shown that adaptive load balancing and small-cell control improve LTE and Wi-Fi coexistence, increase the efficiency of radio resource usage, and reduce energy consumption. It is established that the key principle of network optimization is adaptability, which ensures stable network operation under varying traffic conditions.

KEYWORDS: MOBILE COMMUNICATION, HETEROGENEOUS COMPUTER NETWORK, HETNET, QOS, NETWORK SECURITY, CSMA/CD, LTE-WLAN AGGREGATION, LWIP, DRIVE TEST, CSAT, COLLISION, CSMA/CD, COMBINED ADAPTIVE SYSTEMS, OPENSIGNAL.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 10
ВСТУП 12
1. ГЕТЕРОГЕННІ МОБІЛЬНІ МЕРЕЖІ: АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ І ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ 14
1.1 Сучасний стан та тенденції розвитку мобільних мереж 14
1.2 Архітектура та принципи функціонування гетерогенних LTE/Wi-Fi мереж 19
1.3 Технічні проблеми та перспективи розвитку інтегрованих систем зв’язку 25
Висновок до першого розділу 31
2 МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ У НЕЛІЦЕНЗІЙНОМУ ДІАПАЗОНІ 33
2.1 Архітектура інтегрованих систем LTE/Wi-Fi нового покоління 33
2.2. Методи адаптивного розподілу та координації радіоресурсів 37
2.3. Порівняльний аналіз і шляхи вдосконалення систем управління доступом 41
Висновок до другого розділу 48
3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ Й ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ В ІНТЕГРОВАНИХ LTE/Wi-Fi МЕРЕЖАХ 50
3.1 Дослідження покриття LTE та Wi-Fi у міських умовах за допомогою мобільних інструментів для імітаційного моделювання 50
3.2 Моделювання сценаріїв адаптивного розподілу навантаження під час інтеграції технологій LTE/Wi-Fi/LTE-U 53
3.3 Моделювання та аналіз роботи об’єднаної інфраструктури LTE/Wi-Fi та LTE-U в умовах адаптивного управління доступом 57
Висновки до третього розділу 67
ВИСНОВКИ 69

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 71
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

GSM - Global System for Mobile Communications (глобальна система мобільного зв’язку)

IoT- Internet of Things (Інтернет речі)

VR -Virtual Reality (віртуальна реальність)

ШІ- штучний інтелект

HetNet- Heterogeneous network (гетерогенна мережа)

LAA- Licensed Assisted Access (допоміжний доступ з ліцензованого спектра)

LWA - LTE-WLAN Aggregation (агрегація LTE та Wi-Fi)

LTE-U - LTE in Unlicensed spectrum (LTE у неліцензійному діапазоні)

EAP-Extensible Authentication Protocol (це розширюваний протокол автентифікації)

QoS -Quality of service (якість обслуговування)

WLAN -Wireless Local Area Network

RRM -Radio Resource Management (керування радіоресурсами)

UE -User Equipment

NR -New Radio

LWIP -LTE WLAN Radio Level Integration with IPsec Tunnel

VoLTE - Voice over LTE

IMS- IP Multimedia Subsystem

EAP-Extensible Authentication Protocol (розширюваний протокол автентифікації)

RRM - Radio Resource Management (керування радіоресурсами)

UMTS - Universal Mobile Telecommunications System (універсальна мобільна телекомунікаційна система)

ETSI - European Telecommunications Standards Institute (Європейський інститут стандартів телекомунікацій)

HSPA+ - Evolved High Speed Packet Access (удосконалений високошвидкісний пакетний доступ)

3GPP - 3rd Generation Partnership Project (партнерський проєкт третього покоління)

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing (ортогональне частотне мультиплексування)

MIMO - Multiple Input Multiple Output (багатоантенна система прийому і передачі)

QAM - Quadrature Amplitude Modulation (квадратурна амплітудна модуляція)

SAE - System Architecture Evolution (еволюція системної архітектури

All-IP Network -Мережа повністю на основі IP

IP - Internet Protocol (Інтернет-протокол)

UTRAN - UMTS Terrestrial Radio Access Network (Наземна радіомережа доступу UMTS)

SRD - Short Range Device (пристрій короткого радіусу дії)

DFS - Dynamic Frequency Selection (динамічний вибір частоти)

TPC - Transmit Power Control (керування потужністю передавання)

DCS - Distributed Control System (розподілена система керування)

ADC - Analog-to-digital converter (аналого-цифровий перетворювач)

CSAT - Carrier-Sensing Adaptive Transmission (адаптивна передача з виявленням несучої)

CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (множинний доступ з контролем несучої та виявленням колізій)

ПЗ – програмне забезпечення

ВСТУП

Упродовж останніх десятиліть трафік у мережах як мобільного, так і фіксованого зв’язку стрімко зростає. Це пов’язано як і з кількісним зростанням користувачів мобільного зв’язку, так і з розвитком нових послуг, що вимагають від мереж значної пропускної здатності. У сучасних телекомунікаційних системах значну увагу приділяють інтеграції ліцензованих та неліцензованих частотних діапазонів, що дозволяє підвищити пропускну здатність мережі. Більшої уваги набувають такі питання в контексті побудови інтегрованих LTE/Wi-Fi систем, які поєднують переваги мобільних мереж четвертого покоління та технологій бездтротового доступу Wi-Fi.

Істотний приріст ємності можна отримати за рахунок побудови гетерогенної архітектури мережі, яка могла б об’єднати ліцензований і неліцензований радіочастотний ресурс, а саме останні дослідження вказують на те, що взаємодія систем LTE і Wi-Fi дасть змогу ефективно використовувати позитивні аспекти функціонування обох технологій, а їх інтеграція стане ще тіснішою в рамках побудови мереж зв'язку 5G аж до повсюдного застосування суміщених LTE/Wi-Fi модулів.

Через велику кількість різноманітних рішень, направлених на підвищення ефективності мереж мобільного зв’язку, все ще залишаються невирішеними питання, зв’язані з адаптивним формуванням структури рівня радіодоступу за умов великої кількості абонентських пристроїв та узгодженого використання неліцензійного Wi-Fi-діапазону для підвищення спектральної ефективності.

Тож, зростання обсягів мобільного трафіку зумовлює необхідність розв’язання науково-практичного завдання підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi. Так можна передбачити розроблення методів адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону, ефективного планування радіоресурсів і формування структури рівня радіодоступу, а також удосконалення алгоритмів обслуговування

черг канального рівня в мережах Wi-Fi з метою мінімізації короткочасних відмов каналу під час передавання відеопотоків у реальному часі.

Актуальність дослідження полягає у зростаючій потребі мобільних операторів забезпечувати високу пропускну здатність, стабільність обслуговування та енергоефективність у гетерогенних мережах нового покоління, де LTE, Wi-Fi та LTE-U спільно використовують ліцензований і неліцензований спектр. Нерівномірність абонентського навантаження, обмеження спектра та збільшення мультимедійного трафіку вимагають застосування адаптивних підходів до формування структури рівня радіодоступу, що дають змогу оптимізувати роботу багаторівневих систем і мінімізувати втрати продуктивності в умовах реального міського середовища.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi/LTE-U шляхом дослідження механізмів спільного використання спектра, аналізу характеристик гетерогенних систем та розроблення імітаційної моделі адаптивного розподілу радіоресурсів з оцінкою впливу на пропускну здатність та енергоефективність мережі.

Об’єкт дослідження – процес функціонування гетерогенних багаторівневих мереж радіодоступу LTE/Wi-Fi/LTE-U в умовах динамічного та просторово нерівномірного навантаження.

Предмет дослідження – механізми інтеграції та спільного використання радіоресурсів у гетерогенних мережах LTE/Wi-Fi/LTE-U, а також методи їх адаптивного управління та моделювання ефективності.

.

1. ГЕТЕРОГЕННІ МОБІЛЬНІ МЕРЕЖІ: АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ І ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

1.1Сучасний стан та тенденції розвитку мобільних мереж

Швидкий і доступний мобільний інтернет став одним із основних пріоритетів розвитку мобільних провайдерів в Україні. Запуск у 2018 році мережі 4G відкрив нові можливості для використання IT-технологій як для пересічних користувачів, так і для малого та середнього бізнесу.

Мобільні мережі за декілька десятиліть зробили величезний стрибок — від перших аналогових технологій, які забезпечували лише базову передачу голосу, до сучасних систем, здатних підтримувати мільйони підключень одночасно та передавати дані майже миттєво. Ця трансформація не лише покращила зв'язок, але й стала каталізатором змін у способах спілкування, ведення бізнесу та взаємодії із навколишнім середовищем [1].

Вивчаючи матеріали з відкритих джерел, можемо виділяти такі основні етапи еволюції мобільних мереж.

Починалося все з 1G-першого покоління мобільного зв'язку, запущене компанією Nippon Telegraph and Telephone у 1979 році, яке спочатку працювало для мешканців Токіо. Вже до 1984-го мережа охопила всю Японію, ставши першою країною з національним 1G-покриттям. У США дана мережа зявилася в березні 1983 року, завдяки компанії Ameritech. 1G стала справжнім проривом і заклала фундамент для розвитку мобільних мереж майбутніх поколінь [2].

Однак ця технологія мала суттєві недоліки:

- низьку якість звуку із шумом;
- низька швидкість передачі даних(2,4 кбіт/с);
- обмежене покриття;
- відсутність роумінгу;

- відсутність шифрування, через що дзвінки можна було легко прослухати.

На зміну 1G в 1991 році у Фінляндії прийшло покоління 2G, яке працювало на основі стандарту GSM (Global System for Mobile Communications, глобальна система мобільного зв'язку). 2G давало змогу передавати не лише голос, а й дані, що відкрило шлях до таких функцій, як-от тональні мелодії. Саме завдяки розвитку 2G з'явилася можливість надсилати SMS-повідомлення та мультимедійні MMS [2].

Але вже в 2001 році в Японії відбувся публічний запуск 3G. Головним досягненням 3G стало уніфікування протоколів, що дало змогу абонентам користуватися мобільним інтернетом і онлайн-сервісами з будь-якої точки світу [2]. Можемо визначати, що справжнім досягненням 3G стала можливість переглядати веб-сторінки на мобільних телефонах. Музику тепер теж можна слухати онлайн, адже раніше це було неможливо або дуже повільно.

У 2007 році світ побачив оригінальний iPhone, а вже у 2008 з'явився iPhone 3G. За перші дні продали понад мільйон пристроїв. Зі зростанням популярності смартфонів зросла й потреба у ще швидшому інтернеті. Тим часом в Україні 3G з'явився 2015 року.

Вже наприкінці 2009 року у Норвегії відбувся комерційний запуск 4G. Цей стандарт став основою сучасного мобільного інтернету, бо швидкість стартувала від 12,5 Мбіт/с і давала змогу переглядати відео у високій якості, грати в онлайн ігри, спілкуватися в чатах без затримок і швидко знаходити інформацію в інтернеті. Але в Україні технологія 4G з'явилася лише в березні 2018 року.

Наступним проривом стала технологія 5G. Першою країною, яка запровадила 5G, стала Південна Корея у березні 2019 року. Зазначимо, що технологія 5G працює у 20 разів швидше за 4G. Можемо говорити, що величезною перевагою є зменшення затримки сигналу.

Проте в Україні технологія 5G лише розпочинає свій шлях до впровадження. 1 листопада 2024 року міністр цифрової трансформації Михайло Федоров

повідомив про запуск пілотного проєкту у трьох містах: Львові, Києві та Одесі. Це тестування триватиме два роки й відбуватиметься у два етапи. Головне завдання — перевірити, чи не впливає 5G-обладнання на роботу військових систем, адже безпека є пріоритетом в умовах війни [2]. Однак, за словами експертів, повноцінне впровадження технології 5G в Україні можливе лише після припинення бойових дій.

Тож на основі отриманих матеріалів можемо створити таблицю, яка покаже характеристики поколінь.

Таблиця 1.1.

Характеристика поколінь

Покоління	**Швидкість мережі**	**Особливості**	**Вплив**
1G	2,4 Кбіт/с	Можливість здійснювати аналогові голосові виклики	З’явились перші мобільні телефони як символу статусу та прогресу.
2G	14,4–217,6 Кбіт/с	Цифровізація передачі даних, відправка SMS	Швидке поширення мобільних пристроїв і популяризація текстового зв’язку.
3G	384 Кбіт/с – 336 Мбіт/с	Високошвидкісний інтернет, смартфони.	Початок епохи соціальних мереж, відеодзвінків та глобального інтернету.
4G	100 Мбіт/с – 1 Гбіт/с	HD-відео, стримінг, онлайн-сервіси.	Зростання електронної комерції та цифрових розваг.
5G	2–20 Гбіт/с	IoT, VR, автономні системи.	Інноваційність в медицині, створення розумних міст та автопілот транспорту.

Мобільний зв'язок – зв’язок із застосуванням радіотехнологій, під час якого кінцеве обладнання хоча б одного із споживачів може вільно переміщуватися в межах телекомунікаційної мережі, зберігаючи єдиний унікальний ідентифікаційний номер мобільної станції.

Мобільний зв’язок (мобільні телекомунікації) -технології, які дозволяють абонементам залишатись на зв'язку під час руху, вдома, на роботі, в транспорті, в роумінгу і на морі [3].



Рис.1.1. Вежа антени мобільного телефону

Мобільні мережі стали не лише технологічним досягненням, а й важливим фактором, яке відображає сучасне суспільство. Кожне нове покоління мереж відкривало нові можливості, значно впливаючи на економіку, соціальність, розвиток технології та глобальні екологічні проблеми [1].

Мобільні мережі істотно трансформували бізнес, економіку та суспільство, забезпечивши розвиток мобільної комерції, дистанційної роботи та освіти. Завдяки високошвидкісному інтернету з’явилися платформи електронних платежів, змога працювати та навчатися з будь-якого місця світу, що зробило сучасний світ більш гнучким.



Рис.1.2. Вежа (базова станція) мобільного зв’язку

Мобільні технології сприяли глобальній інтеграції, створивши нові форми соціальної взаємодії та комунікації. Завдяки соціальним мережами меседжерам люди можуть спілкуватися без обмежень у просторі та часі, проводити віртуальні зустрічі та отримувати миттєвий доступ до світових новин, що формує поінформоване та взаємопов’язане суспільство.

Мобільні мережі нового покоління стали основою розвитку інноваційних технологій, що змінюють усі сфери життя. Завдяки 5G стало можливим ефективне використання ШІ , впровадження VR-рішень у різних галузях та інтеграція Інтернету речей, яке забезпечує функціонування розумних міст, автоматизованих систем і підключених пристроїв.

Разом із технологічним прогресом зростають і екологічні виклики, пов’язані з функціонуванням мобільних мереж. Збільшення енергоспоживання інфраструктури 5G/6G та накопичення електронних відходів потребують

впровадження енергоефективних рішень та систем переробки, спрямованих на зменшення негативного впливу на довкілля.

Гетерогенна комп'ютерна мережа - комп’ютерна мережа, що з'єднує персональні комп’ютери та інші пристрої з різними операційними системами або протоколами передавання даних. Наприклад, локальна мережа, яка з'єднує комп'ютери під управлінням операційних систем Microsoft Windows, MacOS, є гетерогенною. Термін *«гетерогенні мережі»* також вживають у бездротових мережах, які використовують різні технології для підключення. Наприклад, бездротова мережа, яка забезпечує доступ через бездротову локальну мережу і здатна забезпечувати доступ, перемикаючись на стільниковий зв'язок, також називається гетерогенною мережею [4].

HetNet - це гетерогенна мережа, що поєднує макро-, піко-, фемтосоти та Wi-Fi для створення безперервного покриття в різних умовах середовища. Вона забезпечує ефективну взаємодію між елементами мережі та підвищує якість зв’язку, стимулюючи розвиток мобільної інфраструктури. За прогнозами аналітичної компанії ARCchart, розвиток HetNet-технологій суттєво стимулює ринок мобільної інфраструктури, обсяг якого оцінювався у понад 57 мільярдів доларів ще у 2017 році.

1.2 Архітектура та принципи функціонування гетерогенних LTE/Wi-Fi мереж

HetNet-це концепція мережевої інфраструктури, яка об’єднує різні типи мережевих елементів і технологій для забезпечення безперервного зв’язку та підвищення пропускної здатності. Їхнє застосування особливо актуальне в сучасних мобільних мережах LTE, 5G, міських Wi-Fi системах і мережах Інтернет (IoT).

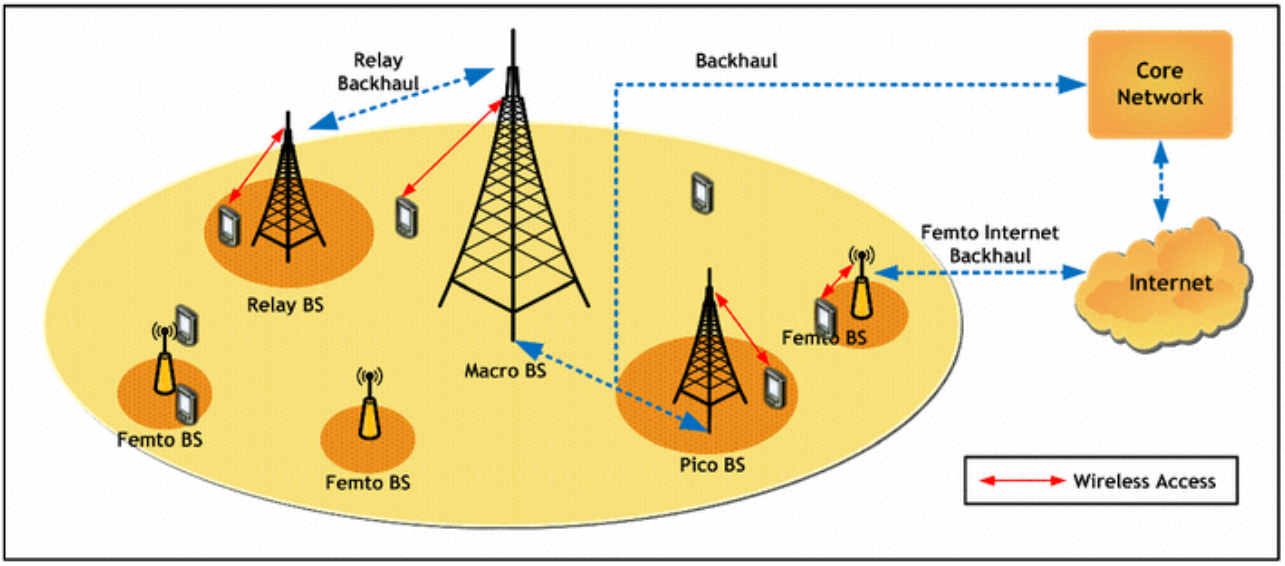


Рис.1.3. Ілюстрація чотирирівневої архітектури HetNet

Гетерогенність дозволяє покращити покриття мережі в складних умовах, наприклад, в густонаселених міських районах або всередині будівель, куди макро станції не можуть ефективно проникнути. Також це забезпечує більш високу пропускну здатність, розподіляючи трафік між різними вузлами мережі. А також це дає змогу визначити, яке підключення буде більш оптимальним не лише за показником якості сигналу, а і пропускної здатності [5].

З першого погляду може здаватись, що стільникові дані конкурують з Wi-Fi мережами. Адже, обидві використовуються для мобільної передачі даних. Проте місць, де працюють обидві ці системи, більш ніж достатньо: торгові та офісні центри, метрополітен і багато житлових будівель. Тому розробники стандарту LTE вирішили об'єднати можливості обох систем за допомогою двох технологій: LWA і LAA. Це стало можливим з появою Wi-Fi 5 ГГц, де окремі частотні канали стали ширшими і не перетинаються між собою [6].

Технологія LWA (LTE-WLAN Aggregation) дозволяє об’єднувати потоки даних із Wi-Fi та LTE на одному пристрої. У діапазоні 5 ГГц створюється додатковий канал для передачі даних, який значно підвищує швидкість. Керування об’єднанням і розподілом трафіку здійснює мережа LTE, тоді як Wi-Fi виконує допоміжну роль.



Рис.1.4. Об’єднання потоків даних LTE і Wi-Fi мереж на одному пристрої

Технологія LAA (License Assisted Access) передбачає використання додаткової LTE-несучої в діапазоні 5 ГГц, яка доповнює основну LTE-несучу в нижчому частотному діапазоні. Фактично, це схоже на технологію Carrier Aggregation (об’єднання каналів), проте з тією відмінністю, що додаткова несуча активується не постійно. Цю технологію також називають LTE-Unlicensed або LTE-U, тобто LTE у неліцензійному спектрі, яким є 5-гігагерцевий діапазон.

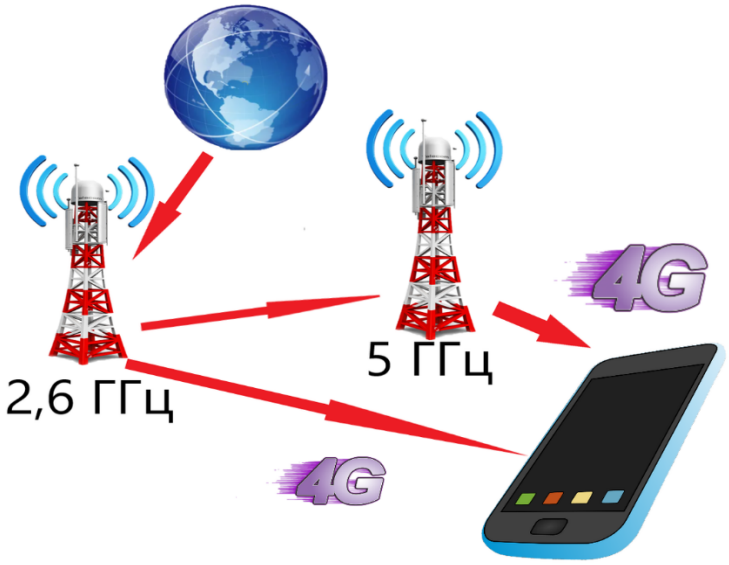


Рис.1.5. LTE-U Carrier Aggregation

Однак, маємо зазначити і недоліки, наприклад, щоб охопити обидва діапазони, оператору необхідно розгорнути власну інфраструктуру по всій будівлі, де планується впровадження однієї з цих технологій. Для відкритих територій ця технологія має значні обмеження, оскільки передавачі в діапазоні 5 ГГц мають дуже обмежену потужність. Вона значно поступається стандартним стільниковим базовим станціям, що зменшує зону покриття цих технологій до декількох десятків метрів.

Так як складно розширити мережеву інфраструктуру для підтримки сплеску використання даних мобільного зв’язку, через пов'язані з цим високі витрати, оператори мобільного зв'язку і постачальники послуг звертаються до простих в реалізації і економічних технологій, таких як Wi-Fi Offloading.

Технологія Wi-Fi Offloading покликана розвантажити мережі мобільних операторів від трафіку передачі даних за рахунок застосування технології Wi -Fi. В даному випадку трафік передачі даних абонентів виводяться з радіомережі оператора в окрему радіомережу, яке працює з використанням власних магістральних каналів [7].

Вивчаючи матеріали з відкритих джерел можемо визначати три проблеми з розвантаженням за допомогою Wi-Fi.

Перша проблема пов’язана з *пошуком хорошого обслуговування*. Сучасні користувачі хочуть, щоб смартфони безперешкодно виявляли точки доступу, перевіряли їх на безпеку та автоматично підключалися з такою ж якістю обслуговування, як і в сотовій мережі Таку якість обслуговування важко досягти без рішень Hotspot 2.0 / NGH [7].

Але, сьогодення показує - найкраще, що можуть отримати користувачі-список точок доступу, який надається їхнім надавачем послуг, без будь-яких інформацій щодо доступних рівнів обслуговування.

Другою проблемою можемо визначати безпеку доступу. Автоматичне розвантаження трафіку через загальнодоступні точки доступу Wi-Fi можуть представити серйозні ризики для безпеки призначених для користувача даних.

Третю проблему можемо пов’язувати з безшовним розвантаженням. Хоч і обладнання користувача можуть ідентифікувати безпечну точку доступу для розвантаження, все ж непросто досягти плавної передачі існуючих сеансів даних. Подібні передачі так само можуть виконуватись різними методами, але вони потребують колосальних вкладень в інфраструктуру зі сторони мережі.

Незважаючи на складнощі впровадження Wi-Fi Offloading, використання Wi-Fi для розвантаження мережевого трафіку може мати низку переваг:

- Зменшення навантаження на мережу;
- Зниження витрат на експлуатацію;
- Покращення клієнтського досвіду та зменшення відтоку клієнтів;
- Безпека на рівні стільникових мереж;
- Використання існуючих облікових даних SIM-карти для автентифікації через стільникову SIM-карту EAP.

Переваги Wi-Fi Offloading відчувають як оператори мобільного зв’язку, так і їхні абоненти. Оператори можуть більш ефективно використовувати доступні мережеві ресурси та збільшувати загальну пропускну здатність, перенаправляючи мобільний трафік у Wi-Fi мережі. Таким чином клієнти отримують вищу якість обслуговування від операторів.

Основною перевагою технології Wi-Fi Offloading є використання неліцензованого частотного діапазону, що виключає можливість втручання в роботу мережевого трафіку. Більше того, більшість користувацьких пристроїв уже оснащеними вбудованими Wi-Fi-трансиверами, які значно спрощують процес реалізації цієї технології. Оператори мобільного зв’язку розміщують точки доступу Wi-Fi у місцях масового скупчення людей – торгових центрах, ринках, аеропортах тощо.

Комплексний підхід до розвантаження даних надає оператору повний контроль над абонентами, а також можливість доставляти будь-який абонентський контент, поки користувачі знаходяться в мережі Wi-Fi. Це виконується за рахунок інтеграції стільникових мереж і мереж Wi-Fi, таким чином, що між двома мережами може бути створений міст, через який може бути встановлений потік даних [7].

Сучасні інтернет-технології вимагають якісного та ефективного розподілу ресурсів. Однією з ключових систем, що регулює цей процес, є механізм контролю трафіку. Він дозволяє пріоритетизувати критично важливі дані, як-от голосові дзвінки або трансляції [8].

QoS (Quality of service, якість обслуговування) у широкому значенні -якість послуг, які надає комунікаційна мережа. У вузькому технічному значенні в IT, цей термін означає - набір методів для управління ресурсами пакетних мереж [9].

В більшості випадків якість зв'язку можемо зазначити чотирма параметрами:

- Пропускна смуга – означає доступну пропускну здатність каналу звязку. Вимірюється у бітовій швидкості - bit/s (bps), kbit/s (kbps), Mbit /s (Mbps).
- Затримка при передачі, виміряється у мілісекундах.
- Джиттер-нерівномірність затримок пакетів при передачі пакетів.
- Втрата пакетів- визначає кількість пакетів, загублених у мережі під час час передачі.

Інтеграція LTE та Wi-Fi створює виклики у підтримці стабільного QoS через різницю у механізмах доступу до середовища.

Вивчаючи інформацію можемо зазначати, що для забезпечення QoS застосовують:

- Адаптивне керування трафіком між інтерфейсами LTE та Wi-Fi;
- Динамічний вибір маршруту передачі даних;
- Пріоритетизація трафіку з урахуванням типу послуг;

- Механізми узгодження черг між базовими станціями та точками доступу.

Wi-Fi Offloading передбачає перенаправлення частини трафіку з LTE у Wi-Fi, що дозволяє:

- Знизити навантаження на стільникову мережу;
- Зменшити витрати операторів;
- Підвищити якість обслуговування в місцях масового скупчення.

Основними методами розвантаження є Seamless Offloading (автоматичне перемикання між мережами LTE і Wi-Fi без втрати з'єднання), Selective offloading (розвантаження лише певних типів трафіку), Policy-Based Offloading (перемикання згідно з політиками оператора).

Інтеграція LTE та Wi-Fi мереж можуть відкрити нові можливості для підвищення ефективності мобільних мереж. Але в цей же час, забезпечення сумісності, стабільності QoS і управління ресурсами вимагає розроблення адаптивних алгоритмів доступу та інтелектуальних систем керування трафіком.

1.3 Технічні проблеми та перспективи розвитку інтегрованих систем зв'язку

Історично тенденція до об'єднання стільникових мереж і локальних бездротових мереж (WLAN - Wireless Local Area Network) виникла через потребу мобільних операторів збільшити пропускну здатність мереж доступу та уникнути їх перевантаження. Надалі очікується, що використання технології Wi-Fi для розвантаження стільникових мереж і в перспективі лишатиметься важливою складовою довгострокової стратегії розвитку операторів мобільного зв'язку.

На сьогодні суміщені малі комірки LTE/Wi-Fi є однією з передових інновацій в телекомунікаційній індустрії, що дає змогу знизити витрати на розгортання системи зв'язку за рахунок використання гібридної мережевої інфраструктури. Однак з огляду на те, що такий варіант розміщення комірок ще мало поширений на

практиці, поточні роботи по стандартизації спрямовані також на поліпшення мережевої архітектури, у якій абонентські термінали приймають локальні рішення в умовах обмеженого сприяння з боку мережевої інфраструктури або ж за його відсутності [10].

Подальший виклад зконцентрований на аналізі різних підходів до інтеграції мереж LTE та Wi-Fi, які наведено на рисунку 1.6. Описані варіанти відрізняються перш за все, механізмами взаємодії технологій радіодоступу, які охоплюють виявлення активної радіотехнології, її вибір або призначення, керування радіоресурсами (RRM - Radio Resource Management), забезпечення мобільності користувачів і перенаправлення потоків даних між різними технологіями радіодоступу тощо. Так як така опція не передбачає координації на мережевому рівні її реалізація є порівняно простою та вже достатньо дослідженою у контексті підвищення ефективності роботи прикладних сервісів верхнього рівня. Даний тип архітектури є оптимальним для швидкого покращення якості обслуговування сприйняття послуг користувачем, але значною мірою залежить від методу реалізації конкретного додатку. Водночас він може не враховувати повною мірою поточний стан мережі, особливо у випадках, коли умови її функціонування динамічно змінюються.

Мережева безпека - це широкий термін, охоплюючий багато технологій, пристроїв і процесів. Простіше кажучи, це набір правил і конфігурацій, призначених для захисту цілісності, конфіденційності та комп’ютерних мереж та даних з використанням як програмних, так і апаратних технологій. Кожна організація, незалежно від її розміру, роду занять або інфраструктури, потребує наявності визначених рішень мережевої безпеки для захисту від постійно зростаючих кіберзагроз [11]. Простіше кажучи, мережева безпека - це сукупність методів і засобів, спрямованих на захист даних від несанкціонованого доступу, втрати або модифікації як під час зберігання, так і передачі між користувацькими пристроями (UE - User Equipment) у межах різних мереж LTE. В умовах, коли інформація є одним із найцінніших активів 21 століття, питання забезпечення її

захисту набуває ключового значення для стабільного та безпечного функціонування телекомунікаційних систем.

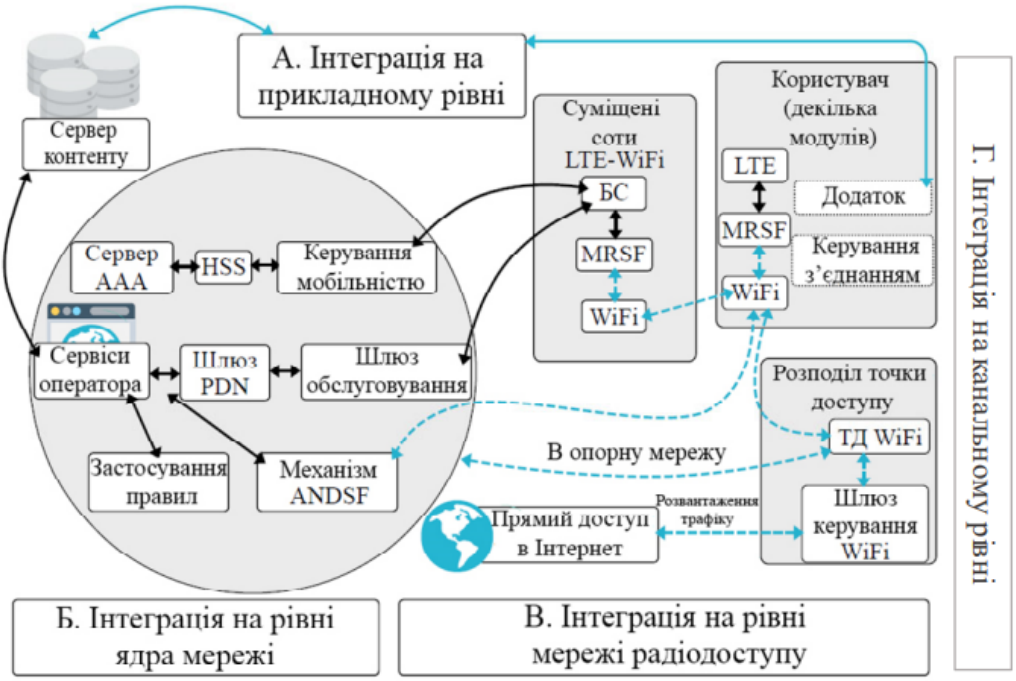


Рис.1.6. Архітектура гетерогенної мережі зв'язку [10]

Для операторів мобільного зв'язку спільне використання спектра в мережах 5G надає можливість гнучкого застосування ширшого діапазону частот, а це в свою чергу дозволяє динамічно адаптувати пропускну здатність і забезпечувати якість зв'язку, близьку до оптичних мереж.

Окрім цього, механізми спільного використання спектра у 5G розширюють доступ до переваг технології 5G NR (New Radio) для користувачів, які не мають власного ліцензованого спектра, зокрема кабельних операторів, корпоративних мереж і рішень IoT.

Розширення цих понять продовжується в 5G NR, додаючи інновації навколо нового спектра обміну даними. Основним недоліком неліцензійного і загального спектра є відсутність гарантії QoS [12]. Таке поняття, як якість обслуговування, сьогодні мають вирішальне значення та є невід'ємною характеристикою

ліцензованого спектра. Втім забезпечення належного рівня QoS стає значно складнішим у випадку спільного використання спектра. Через це сучасні дослідження та інновації у цій сфері спрямовані на те, щоб досягти рівня передбачуваної продуктивності, притаманного ліцензованому спектру, водночас зберігаючи властиву спільному доступу гнучкість і ефективність використання ресурсів.

З погляду на змінну інтенсивність навантаження в гетерогенних мережах мобільного зв'язку, постійне використання неліцензованого спектра операторами LTE є неефективним і необгрунтованим. Це особливо важливо у випадках, коли декілька операторів одночасно прагнуть використовувати ресурси неліцензованого частотного діапазону для обслуговування свої абонентів.

Тож, вивчивши інформацію відкритих джерел, можу зазначати, що інтеграція мереж LTE та Wi-Fi супроводжується рядом технічних труднощів, які є наслідком суттєвими відмінностями у принципах функціонування, структурі управління доступом і характеристиках використання спектра. Однією головних проблем є конфлікти під час спільного використання частотного діапазону, а саме 2,4 та 5 ГГЦ, де працюють обидві технології. LTE використовує централізовану систему розподілу ресурсів, в той час коли Wi-Fi базується на механізмі випадкового доступу CSMA/CA. Це призводить до виникнення інтерференції сигналів, колізій і, як наслідок, погіршення якості зв'язку та нестабільності пропускної здатності.

CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) - це протокол, який використовується в мережевих технологіях, таких як Інтернет, для управління доступом до мережі та виявлення колізій даних [13].

Основним принципом роботи CSMA/CD відображається в тому, що кожен пристрій перед передачею даних перевіряє, чи є канал вільним. Якщо канал не зайнятий, пристрій розпочинає передачу інформації. Крім того, коли декілька пристроїв одночасно починають передавати дані, відбувається колізія. В даній ситуації всі учасники, які виявили колізію, зупиняють передачу, очікують випадковий проміжок часу та повторюють спробу надсилання даних.

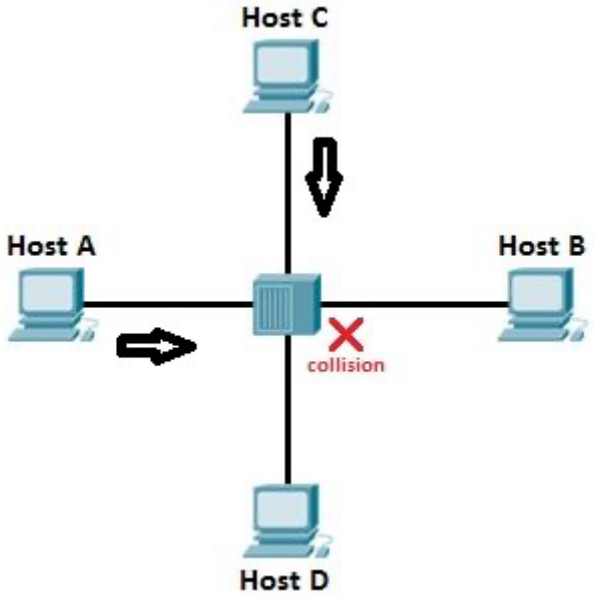


Рис.1.7. Пояснення роботи CSMA/CD

Даний підхід ефективно працює в мережах із кількома пристроями, які конкурують за доступ до спільного середовища передачі, допомагаючи зменшити ймовірність повторних колізій навіть при значному навантаженні. Проте з розвитком бездротових технологій CSMA/CD поступово замінили більш сучасні методи доступу, зокрема CSMA/CA (множинний доступ з попередженням колізій), які краще відповідають умовам роботи бездротових мереж.

Додаткові труднощі пов’язані з проблемами сумісності обладнання й стандартів, адже різні виробники використовують власні технічні рішення та протоколи. Це ускладнює інтеграцію систем і потребує уніфікації стандартів на рівні інтерфейсів, таких як LWA, LWIP, LAA чи MulteFire. Через це гарантування стабільного рівня якості обслуговування (QoS) стає складним завданням, особливо в умовах перемінного навантаження або при обслуговуванні мультимедійних сервісів у режимі реального часу.

Ще однією важливою проблемою є підвищене енергоспоживання UE, що зумовлене одночасною роботою модулів LTE і Wi-Fi або частими перемиканнями між ними. Ці процеси створюють додаткове навантаження на акумулятор і

потребують втручання енергоефективних алгоритмів керування передачею даних. Помимо того, у процесі хендоверу між двома технологіями можуть виникати затримки, втрата пакетів або короткочасне розривання з'єднання, що негативно впливає на якість сервісів, чутливих до часу, зокрема VoLTE чи потокове відео.

Зазначимо, що VoLTE це технологія передачі голосу по мережі LTE, заснована на IP Multimedia Subsystem (IMS). Дозволяє надавати голосові послуги і доставляти їх як потік даних по LTE [14].

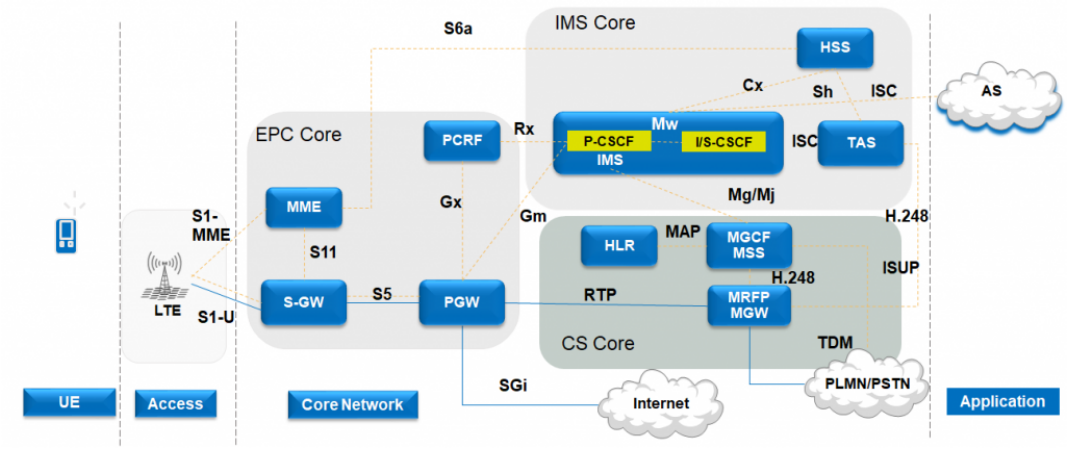


Рис.1.8. Архітектура VoLTE

Важливе значення мають також питання безпеки та автентифікації, оскільки LTE і Wi-Fi використовують різні системи шифрування та перевірки користувачів. Для збереження цілісності й конфіденційності даних необхідне застосування єдиних механізмів, таких як EAP-SIM або EAP-AKA. Складність додає і керування радіоресурсами (RRM), яке повинно координувати розподіл потужності, частот і часових слотів між двома системами. Без належної синхронізації можуть виникати конфлікти доступу або неефективне використання спектра.

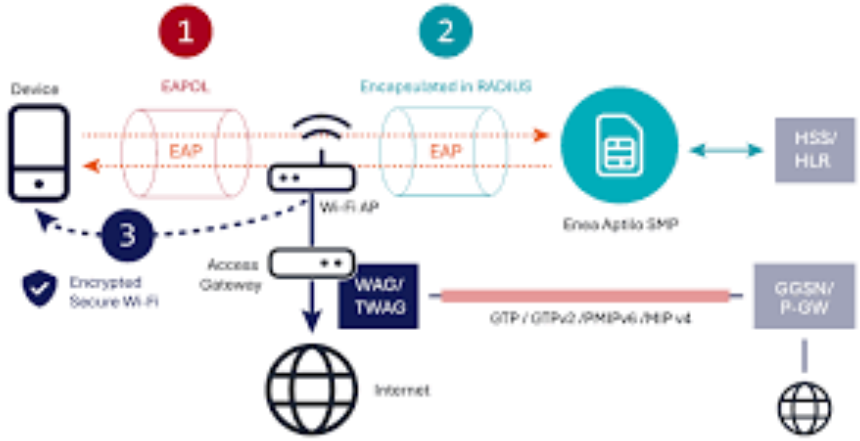


Рис.1.9. Сервер аутентифікації SIM, що підтримує EAP-SIM/AKA

Все це свідчить про те, що ефективна інтеграція LTE і Wi-Fi потребує комплексного підходу, який поєднує технічні, енергетичні, безпекові та управлінські рішення для досягнення стабільної, безпечної та якісної взаємодії між двома радіотехнологіями.

Висновок до першого розділу

Вивчаючи матеріали по темі гетерогенних мобільних мереж демонструє, що інтеграція LTE та Wi-Fi є перспективним напрямом розвитку сучасних телекомунікаційних систем, які здатні підвищити пропускну здатність, покращити покриття та якість обслуговування користувачів. Розвиток мобільного зв’язку від 1G до 5G показав значні технологічні стрибки, які вплинули не лише на комунікації, а й на економіку, соціальні взаємодії та інтеграцію цифрових сервісів у повсякденне життя. Впровадження гетерогенних мереж, зокрема HetNet та технологій об’єднання LTE і Wi-Fi (LWA, LAA, Wi-Fi Offloading), дозволяє ефективно розподіляти трафік, знижувати навантаження на стільникову інфраструктуру та підвищувати рівень QoS для кінцевих користувачів.

Одночасно інтеграція цих технологій супроводжується суттєвими технічними викликами. До них належать конфлікти у спільному використанні

спектра, різниця у механізмах доступу до мережі проблеми сумісності обладнання та стандартів, підвищене енергоспоживання користувальницьких пристроїв, а також забезпечення безпеки та автентифікації. Для ефективного розрішення цих проблем треба впроваджувати інтелектуальні системи управління трафіком, адаптивне керування доступом, синхронізацію радіоресурсів та сучасні протоколи бездротового доступу.

Як висновок, інтеграція LTE і Wi-Fi є стратегічно важливим кроком у розвитку мобільних мереж нового покоління, забезпечуючи підвищену гнучкість, ефективність і якість обслуговування. В цей же час її успішне впровадження вимагає комплексного підходу, що поєднує технічні, енергетичні, безпекові та управлінські рішення, що стане основою для подальшого розвитку 5G та майбутніх 6G мереж.

2 МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ У НЕЛІЦЕНЗІЙНОМУ ДІАПАЗОНІ

2.1 Архітектура інтегрованих систем LTE/Wi-Fi нового покоління

Попередній стандарт стільникового зв'язку UMTS, що був розроблений Європейським Інститутом Стандартів Телекомунікацій ETSI для впровадження 3G у Європі, міг забезпечити різні мультимедійні послуги (зі швидкістю до 42 Мбіт/с – по лінії вниз і до 11,5 Мбіт/с – по лінії вгору), використовуючи технологію HSPA +. Розробкою нового стандарту, що є вдосконаленням стандарту UMTS, займалася організація 3GPP [15].

Головна особливість стандарту LTE у порівнянні з попередніми поколіннями полягає у використання технології ортогонального частотного розділення (OFDM) та систем багатоантенного приймання і передавання(MIMO). До ключових змін також належить збільшення максимальної ширини смуги частот до 20 МГц з можливістю її гнучкого використання в діапазоні від 1,4 до 20 МГц.

Розширення смуги пропускання забезпечило мережам LTE вищу пропускну здатність, кращу ємність та значно більшу швидкість передачі даних у порівнянні з технологією UMTS.

На фізичному рівні мереж LTE застосовується технологія мультиплексування OFDM, при якій ортогональні піднесучі розташовуються щільно одна до одної і працюють на низькій швидкості символів. Потік вихідних даних розділяється на кілька паралельних, ортогональних потоків, що дозволяє уникнути взаємних перешкод і максимально ефективно використовувати частотний спектр. Моделяція піднесучих здійснюється за стандартними схемами, наприклад QAM.

Серед основних переваг OFDM – стійкість до складних радіоумов, викликаних перешкодами та загасання сигналу на високих частотах. До недоліків належать обмежена спектральна ефективність при широкій смузі частот та висока

чутливість до Допплерівського зсуву частоти, що виникає під час руху об'єкта зв'язку. Це знижує ефективність передачі і прийому, що особливо актуально для швидко рухомих транспортних засобів та автомагістралей.

У мережах LTE використовується оновлена системна архітектура SAE (System Architecture Evolution), розроблена консорціумом 3GPP спеціально для цієї технології. Її робота базується на концепції All-IP Network, тобто мережа повністю функціонує на основі IP-протоколу без застосування комутації каналів під час передавання голосового трафіку.

Спрощена архітектура LTE забезпечує зменшення витрат на інфраструктуру та дає змогу більш ефективно масштабувати мережу у разі необхідності збільшення її пропускної здатності.

У мережах LTE використовується оновлена системна архітектура SAE (System Architecture Evolution), розроблена консорціумом 3GPP спеціально для цієї технології. Її робота базується на концепції All-IP Network, тобто мережа повністю функціонує на основі IP-протоколу без застосування комутації каналів під час передавання голосового трафіку.

Спрощена архітектура LTE забезпечує зменшення витрат на інфраструктуру та дає змогу більш ефективно масштабувати мережу у разі необхідності збільшення її пропускної здатності.

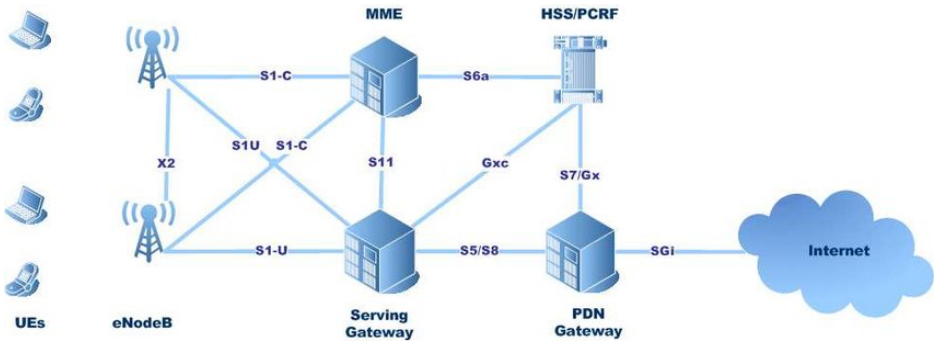


Рис.2.1. Архітектура SAE

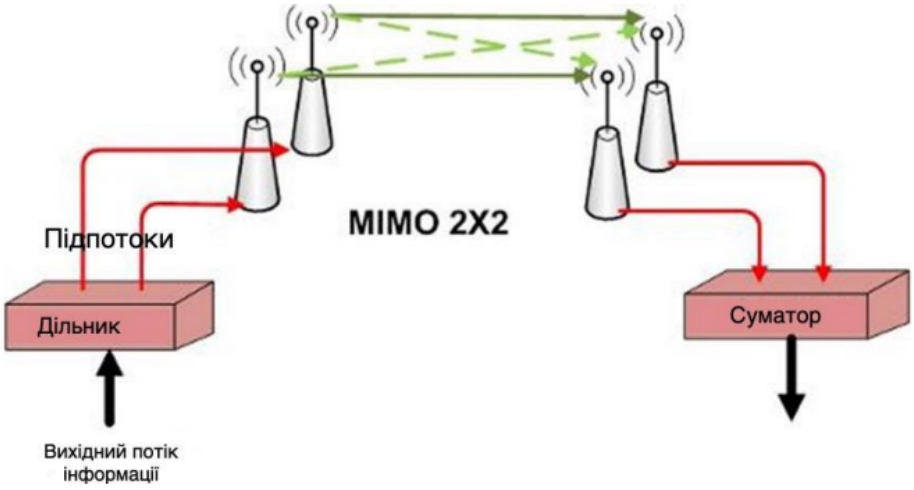


Рис.2.2. Принцип MIMO

Сучасні мережі LTE активно використовують різні технології об’єднання трафіку для підвищення пропускної здатності та поліпшення якості обслуговування користувачів. Основними технологіями є LWA, LWIP та LTE-U/LAA.

Агрегація LTE-WLAN (LWA) - це технологія, визначена стандартом 3GPP. У LWA мобільний телефон, що підтримує як LTE, так і Wi-Fi, може бути налаштований мережею для одночасного використання обох каналів зв'язку [16].

Технологія LWA дозволяє мобільному пристрою одночасно використовувати ресурси мережі LTE і Wi-Fi для передачі даних. Контроль трафіку здійснюється на стороні LTE, що забезпечує балансування навантаження між обома мережами та підвищує ефективність використання частотного спектра.

LwIP - це стек протоколів TCP/IP з відкритим вихідним кодом. Спочатку LwIP був розроблений Адамом Дункельсом у Шведському інституті комп'ютерних наук, зараз розробка ведеться силами спільноти. LwIP набув дуже широкого поширення в вбудованих системах на базі мікроконтролерів завдяки низькому споживанню оперативної пам'яті [17].

У технології LWIP весь трафік користувача передається через Wi-Fi, але LTE продовжує виконувати функції контролю та маршрутизації з’єднання. Це

забезпечує безшовний перехід між LTE та Wi-Fi та дозволяє оптимізувати використання спектра. LWIP корисний у середовищах із високою щільністю користувачів або у випадках, коли LTE-канал обмежений.

До основних методів оцінки якості роботи мобільної мережі відносять:

- метод оцінки та обробки мережевої статистики;
- драйв-тести;
- програмні засоби на абонентському обладнанні.

Метод оцінки та обробки мережевої статистики передбачає збір даних про роботу мережі з результатів роботи UTRAN. Зібрані дані обробляються та консолідуються у вигляді ключових показників продуктивності (KPI), що дозволяє оцінити ефективність роботи мережі загалом та провести аналіз у конкретних місцях. До основних обмежень цього методу відносять значну розбіжність між статистичними даними та реальною поведінкою мережі. Застосовується він переважно для попередньої або грубої оцінки мережі, часто у комбінації з іншими методами.

Драйв-тест - це метод безпосереднього тестування мережі в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації. За допомогою спеціального мобільного обладнання та програмних засобів кваліфікована команда фіксує параметри мережі, такі як рівень сигналу від базових станцій, якість голосових викликів, швидкість передачі даних, якість відео та інші показники трафіку.

Програмні засоби на абонентському обладнанні поєднують підходи попередніх двох методів. Тестування проводиться безпосередньо на пристроях користувачів у реальних умовах використання послуг зв’язку. Такі виміри максимально відображають досвід кінцевого користувача, проте залежать від його активності та мотивації під час проведення тесту. Крім того, обладнання абонента може не підтримувати весь функціонал оператора, що обмежує повноту зібраних даних. Хоча цей метод не застосовується глобально, він є дуже ефективним для локальної оцінки стану мережі, наприклад, під час обробки скарг користувачів.

Отже, якщо QoS відображає ймовірність успішної доставки пакетів між двома вузлами мережі, то QoE характеризує суб’єктивне сприйняття абонентом загальної якості наданої послуги. Для оцінки QoE використовують показники QoS, доповнені оцінкою людського фактора та суб’єктивного сприйняття якості сервісу.

Для оцінки продуктивності мобільної мережі застосовують KPI, які дозволяють здійснювати якісний моніторинг мережі в режимі реального часу. Реальні показники роботи мережі визначаються за допомогою методів перевірки, серед яких ключовим є драйв-тест.

2.2. Методи адаптивного розподілу та координації радіоресурсів

Мережі 5G повинні мати велику ємність, низьку затримку, велику швидкість передавання даних для кожного абонента. Здійснювати локальні вдосконалення мережі є не достатніми, потрібен комплексно новий підхід до проектування мережі, але при цьому нова концепція має відбуватися на основі старої [18].

Очікуване зростання мобільного трафіку даних пов'язано із впровадження трафіку нових широкосмугових послуг та запуском бездротового зв'язку. Передача через мобільні мережі величезна і буде продовжувати зростати швидко [19].

Основна мета використання неліцензійного діапазону 5 ГГц полягає в забезпеченні мережі LTE додатковими радіочастотними ресурсами. Окрім цього, доступ до цього спектра не обмежується, навіть коли в ньому одночасно працюють різні пристрої короткого радіуса дії (SRD), зокрема Wi-Fi та радіолокаційне обладнання.

Співіснування різних технологій радіодоступу, таких як LTE та Wi-Fi, а також застосування механізмів управління доступом до каналу, є необхідними для забезпечення сумісності, зменшення взаємних завад і підвищення ефективності роботи мереж. У Wi-Fi системах, залежно від регіону (наприклад, Європа, Японія, США та інші), у неліцензованому діапазоні 5 ГГц для зниження впливу на раніше

виділений спектр для радіолокаційних систем використовуються механізми DFS, TPC та уніфіковані методи оцінки завантаження каналу.

Три загальнонаціональні оператори мобільного зв'язку запровадили на своїх мережах послуги VoLTE та VoWiFi [20].

Технологія 4G (LTE) забезпечує не лише значно вищу швидкість передачі даних, порівняно з мережами 3G та 2G, але й дозволяє покращити якість голосового зв'язку та забезпечити стабільне з'єднання навіть у зонах зі слабким сигналом.

Технологія VoLTE дає змогу здійснювати голосові виклики через мережу 4G, замість використання традиційних голосових каналів 2G/3G. Це забезпечує вищу якість звучання, швидше встановлення з'єднання та стійкіший зв'язок.

VoWiFi дозволяє виконувати голосові виклики через мережу Wi-Fi у місцях, де сигнал стільникової мережі є недостатнім, наприклад, у підвальних або напівпідвальних приміщеннях чи інших закритих локаціях, куди не проникає сигнал мобільного оператора.

Ця технологія являється альтернативою встановленню репітера (підсилювача сигналу), монтаж якого дозволено лише мобільним операторам, щоб уникнути створення радіозавад для інших користувачів.

Починаючи з грудня 2024 року, абоненти українських мобільних мереж, які користуються 4G та мають сучасні моделі смартфонів, можуть застосовувати обидві зазначені послуги у всіх трьох національних операторів.

Варто зазначити, що для використання VoLTE достатньо підтримки цієї функції смартфоном (у деяких випадках – попереднє ввімкнення в налаштуваннях). Натомість для активації послуги VoWiFi треба звернутися до мобільного оператора.

Вивчаючи матеріали відкритих джерел можемо виділити кілька методів управління каналами доступу.

Перший з них - розподілена система керування (Distributed Control System, DCS) – автоматизована система керування технологічним процесом, що характеризується побудовою розподіленої системи введення-виведення та децентралізацією обробки даних [21]. Цей метод передбачає вибір найменш завантаженого каналу Wi-Fi або LTE.

Другий - аналого-цифровий перетворювач (Analog-to-digital converter, ADC) - пристрій, що перетворює вхідний аналоговий сигнал у дискретний код. Зворотне перетворення здійснюється за допомогою цифро-аналогового перетворювача [22]. LTE перемикається між активним передаванням та паузами.

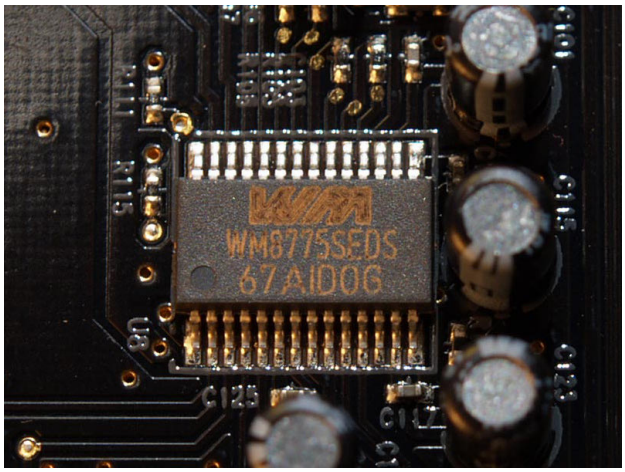


Рис. 2.3. Чотириканальний аналого-цифровий перетворювач

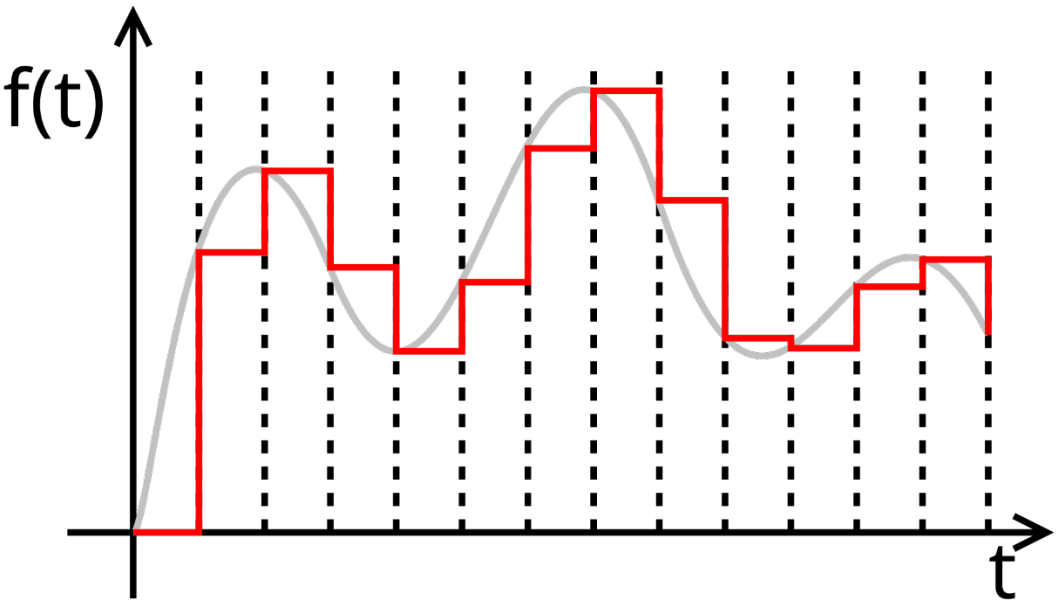


Рис. 2.4. Сигнал з ЦАП без інтерполяції відліків

Третім методом виступає CSAT - адаптивна передача з виявленням несучої є основним підходом галузі до вирішення проблеми співіснування LTE та Wi-Fi в неліцензованих діапазонах. У рамках CSAT ключовою проблемою є розробка алгоритму планування для розподілу радіоресурсів між декількома каналами та великою кількістю підканалів . LTE періодично слухає ефір та змінює параметри передачі.

Колізія - це зіткнення й спотворення кадрів при одночасному передаванні двома й більше вузлами у спільне середовище [23].

Одним із найпоширеніших методів виявлення та усунення колізій у мережах є CSMA/CD - множинний доступ з контролем несучої та виявленням колізій. Окрім нього існують також методи ALOHA.

У методі CSMA/CD кожна станція перед початком передавання «прослуховує» кабель, щоб визначити, чи є він вільним. Під час передачі всі станції паралельно контролюють сигнали в середовищі. Якщо сигнал, котрий станція передає, відрізняється від сигналу, що вона спостерігає в мережі, це означає, що сталася колізія.

Щоб усі станції якнайшвидше виявили колізію, станція, яка її помітила, негайно припиняє передачу кадру (у будь-якому місці, навіть посередині байта) і надсилає спеціальну jam-послідовність — короткий сигнал, що повідомляє про колізію. Після цього станція зупиняє передачу та робить паузу, тривалість якої визначається випадковим чином. Завершивши паузу, вона може знову спробувати отримати доступ до середовища і відновити передачу.

2.3. Порівняльний аналіз і шляхи вдосконалення систем управління доступом

Адаптивними системами автоматичного керування називаються системи у яких автоматично змінюється алгоритм керування з метою збереження показників якості при довільному зміщенні характеристик керованого об'єкта та зовнішніх умов [24].

Підсумовуючи вивчений матеріал отримуємо, що в залежності від характеру змін у керуючому пристрої, адаптивні системи поділяють на дві основні категорії: *самоналаштовувальні* системи (змінюються лише числові значення параметрів регулятора, тоді як його структура залишається незмінною), *самоорганізовані* системи (передбачають зміну не тільки параметрів, але й самої структури регулятора, тобто алгоритм або схема управління може адаптуватися до умов).

А за способом отримання інформації про об’єкт керування адаптивними системами класифікують на:

- пошукові - використовують пробні дії або експерименти для визначення оптимальних параметрів курування;
- безпошукові - налаштовуються на основі поточних вимірювань і математичних моделей, без застосування пробних впливів на систему.

Способи керування адаптивних систем з ідентифікатором ділять на: прямий та непрямий [25].

У разі прямого адаптивного керування, параметри регулятора оцінюються та корегуються безпосередньо з огляді на їхній взаємозв’язок із параметрами об’єктам, що дозволяє уникнути етапу ідентифікації об’єкта.

Натомість при непрямому адаптивному керуванні спочатку визначаються параметри об’єкта, після чого на основі цих оцінок обчислюються потрібні параметри регулятора та виконується їх налаштування.

Зазначимо, залежно від способу реалізації самоналуштування системи з моделлю поділяють на:

- системи із сигнальною (пасивною) адаптацією;
- системи з параметричною (активною) адаптацією.

У системах із сигнальною адаптацією потрібний адаптивний ефект досягається без зміни параметрів регулятора – завдяки введенню додаткових компенсуючих сигналів. Системи, у яких поєднано обидва підходи, називають **комбінованими адаптивними системами**.



Рис. 2.5. Функціональна схема адаптивної системи

Якість програмного забезпечення (ПЗ) є основною його характеристикою в різних сферах використання інформаційних технологій, яка вказує на ступінь його відповідності встановленим вимогам [26].

Як правило, такі вимоги розуміють по-різному, що призводить до виникнення декількох незалежних визначень цього поняття. Частіше всього, під якістю програмного забезпечення розуміють сукупність характеристик програмного продукту, які визначають його здатність задовольняти встановлені або очікувані потреби замовника, сформульовані у вигляді користувальницьких вимог на початкових етапах його створення.

Зовнішні характеристики програмного забезпечення відображають вимоги до його функціонування, тоді як внутрішні характеристики використовуються для планування способів досягнення необхідного рівня зовнішньої якості. Обидва типи

характеристик описують властивості ПЗ, а також відображають погляди як замовника, так і розробника. Але, для кінцевого користувача першочергове значення має експлуатаційна якість ПЗ, тобто загальний результат досягнення необхідних властивостей програмного продукту, який оцінюється швидкістю, точністю та надійністю отриманих результатів, а не лише окремими функціональними властивостями. Це поняття являється значно ширшим за будь-яку окрему характеристику, зокрема зручність використання або надійність.

Оцінювання якості ПЗ зазвичай розглядають як процес визначення ступеня відповідності програмного забезпечення його призначенню. Для цього застосовують модель якості. З розвитком технологій оцінювання якості, зокрема методів метричного аналізу, це питання набуває особливої актуальності. Як наслідок, виникає потреба в створенні спеціалізованих засобів для визначення якості програмного забезпечення за допомогою таких методів.

Тож, надалі можемо говорити, що існують набори метрик, що охоплюють технічну ефективність, якість сервісу та експлуатаційні характеристики:

1. пропускна здатність;
2. затримка;
3. варіація затримки;
4. втрати пакетів;
5. коефіцієнт співіснування;
6. енергоефективність;
7. складність реалізації;
8. масштабованість.

Раніше ми розглядали основні алгоритми, які використовуються для спільного використання неліцензійного спектра та адаптивного управління доступом. Тож, розглянемо порівняльну таблицю:

Таблиця 2.1.

Порівняння основних алгоритмів для спільного використання неліцензійного спектра

	Пропускна здатність	Затримка	Співіснування з Wi-Fi	Складність	Енерго-ефективність
LTE-U	висока для LTE-стеку (перевага в контролі)	низька для LTE-пакетів; для Wi-Fi-може зростати	Низка справедливість-ризики високої завади Wi-Fi.	низька	добра для LTE, сумнівна для загальної системи через повторні передачі Wi-Fi
LAA	добра	помірна	Висока справедливість щодо Wi-Fi	середня	Краща загалом, оскільки зменшуються повторні передачі.
LWA / LWIP	Значно підвищується за рахунок агрегації інтерфейсів	для Wi-Fi сегмента може бути вищою	гарне	низька/середня	хороша
CSAT	змінна	варіа-тивна	помірна	низька	можлива економія

Розглядаючи дану таблицю можемо прийти до висновку, що LAA і LWA виглядають найбільш збалансованими для забезпечення QoS та співіснування з Wi-Fi. LTE-U дає високі показники LTE, але може шкодити Wi-Fi. Агресивне використання LTE-U/CSAT може погіршувати QoE великих груп користувачів Wi-Fi і підвищувати енергоспоживання через повторні передачі.

Іноді трапляються перевантаження мережі. Пікові навантаження операційної системи - це періоди максимальної інтенсивності використання ресурсів комп'ютера, коли кількість активних процесів або обсяг виконуваних операцій значно перевищує середній рівень.

Причинами виникнення перевантаження мережі можуть бути такі фактори: одночасне запускання великої кількості програм, важкі обчислення, масові запити до серверів, фонові оновлення тощо.

Щоб забезпечити стабільність при пікових навантаженнях доцільно використовувати різні методи стабілізації.

Першим методом можемо зазначати – динамчне балансування навантаження. Балансування навантаження - це процес розподілення множини задач на множині ресурсів, з метою зробити загальний час їхнього опрацювання більш дієвим. Балансування навантаження може оптимізувати час відповіді і запобігти нерівномірному навантаженню на окремі обчислювальні вузли тоді як інші обчислювальні вузли бездіють [27].

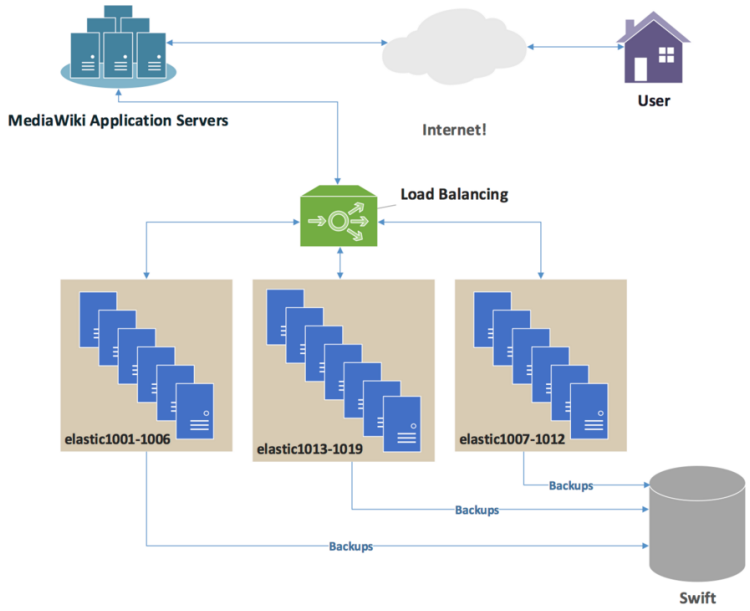


Рис. 2.6. Діаграма розподілу запитів до балансувальника навантаження

Алгоритми балансування навантаження створюються для того, щоб оптимально розподіляти завдання між обчислювальними ресурсами. При цьому необхідно враховувати специфіку задач, апаратну архітектуру, складність алгоритму та вимоги та надійності системи. Через це часто доводиться шукати компромісні рішення, щоб досягти найкращі результати для конкретного застосування.

Ефективність алгоритму значною мірою залежить від типу задач, що виконуються. Чим більше інформації про ці задачі доступно під час прийняття рішень, тим краще можна здійснити оптимальний розподіл навантаження.

Алгоритми можна розділити на два типи: *статичні* (розподіл задач здійснюється до початку виконання, без врахування поточного завантаження системи), *динамічні* (беруть до уваги поточний стан системи).

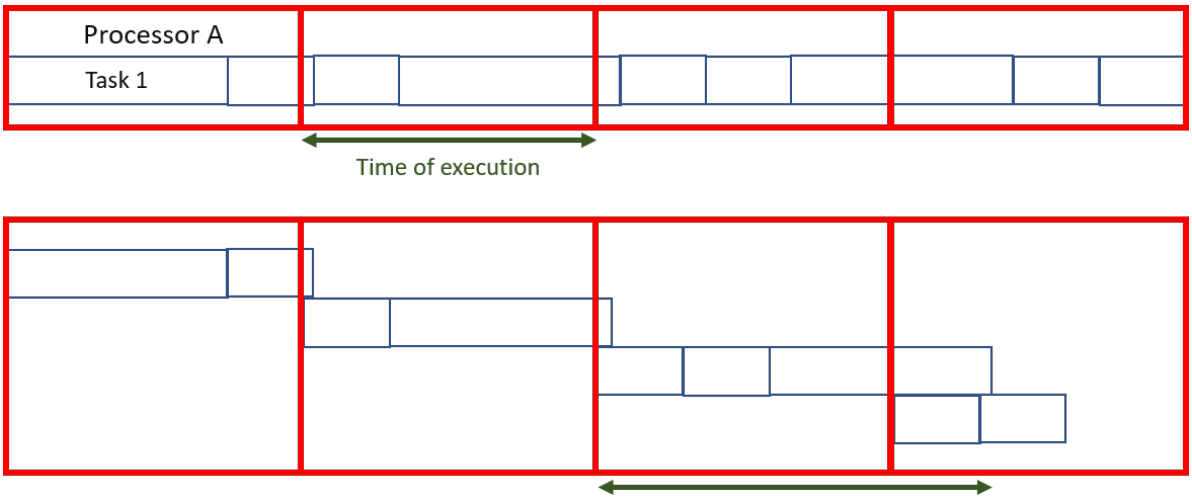


Рис. 2.7. Залежність алгоритму балансування навантаження від подільності задач

Другий - еластичні політики QoS - це технологія керування мережевим трафіком, яка адаптивно змінює пріоритети, щоб забезпечити якість обслуговування (QoS) для критично важливих додатків, динамічно реагуючи на зміни навантаження мережі.

Існує кілька різних способів впровадження QoS, але один із найпоширеніших - це політики якості обслуговування (Політики QoS). Політики QoS дозволяють налаштувати, як ваша мережа обробляє різні типи трафіку. Наприклад, ви можете надати пріоритет певним типам трафіку або обмежити пропускну здатність, яку можуть використовувати певні типи трафіку [28].

Після визначення політик QoS їх потрібно застосовувати в мережі. Спосіб впровадження залежить від конфігурації - наприклад, на маршрутизаторі слід налаштовувати обробку трафіку згідно з обраними правилами QoS.

Налаштування QoS може бути непростим, але воно виправдане, якщо хочете підвищити ефективність мережі. Правильно налаштовані мережі допоможуть забезпечити пріоритет для важливого трафіку.

Третім методом є Edge-обчислення та кешування. Edge-обчислення це підхід, коли дані обробляються не в центральному дата-центрі чи "хмарі", а максимально близько до джерела їх виникнення. Даний метод допомагає забезпечити більшу швидкість, менше навантаження на мережу, стійкість та безпеку. Його використовують в 5G мережах та телекомі, IoT, відеонагляд, онлайн-іграх.

В свою чергу кешування – це збереження копій часто використовуваних даних ближче до користувача або до обчислювальних вузлів, щоб пришвидшити доступ. Правила цього процесу встановлює адміністратор програми або сайту. У налаштуваннях сервера можна вибрати, що саме пристрої відвідувачів повинні зберігати та як довго [29].

Кешування допомагає пришвидшити роботу сайтів і додатків, адже під час повторного виконання тих самих дій, комп’ютер бере вже збережені дані з кешу, а не завантажує їх щоразу з сервера або не виконує обчислення з нуля.

Наприклад, коли ви вперше заходите на сайт, браузер завантажує всі елементи сторінки із сервера. Це займає трохи більше часу. Але частина цих даних зберігається у кеші браузера. Тож при наступному відкритті сторінки вона

завантажується значно швидше, тому що потрібно отримати менше інформації із сервера.

Подібний принцип можна пояснити на прикладі холодильника. Ми зберігаємо у ньому продукти, щоб мати до них швидкий доступ, замість того, щоб кожного разу ходити до магазину. Так само і кеш зберігає дані, щоб не «ходити в мережу» щоразу, коли вони потрібні.

Висновок до другого розділу

Розвиток інтегрованих систем LTE/Wi-Fi нового покоління зумовлений необхідністю підвищення пропускної здатності мереж, забезпечення стабільної якості обслуговування та ефективного використання доступного спектра. Стандарти LTE, що є еволюцією UMTS, впроваджують такі ключові технології, як OFDM, MIMO та архітектура SAE з концепцією All-IP, що дозволяє досягти високих швидкостей передачі, гнучкості масштабування та зниження витрат на інфраструктуру.

В умовах стрімкого зростання мобільного трафіку та впровадження послуг VoLTE і VoWiFi актуальним стає інтегрування LTE з Wi-Fi. Технології LWA, LWIP та LAA забезпечують спільне використання ліцензованого та неліцензованого спектра, балансування навантаження та підвищення ефективності радіоресурсів. Серед них найбільш оптимальними для забезпечення QoS і справедливого співіснування з Wi-Fi є LAA та LWA, тоді як LTE-U часто створює завади Wi-Fi і може погіршувати QoE користувачів.

Для забезпечення стабільної роботи систем використовуються методи оцінювання якості (KPI, QoS, QoE) та інструменти контролю мережевого стану, такі як драйв-тести, мережеві статистики та абонентські програмні засоби. У 5G-мережах додатково акцентуються аспекти низької затримки, високої ємності та

адаптивного управління спектром, що зближує архітектуру з концепціями самоналаштовувальних і самоорганізованих систем.

Таким чином, поєднання LTE та Wi-Fi на основі адаптивного управління доступом і використання неліцензованого спектра є ключовим кроком до побудови високопродуктивних, гнучких та енергоефективних мереж нового покоління, здатних забезпечити високу якість сервісу для зростаючої кількості користувачів і пристроїв.

3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ Й ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ В ІНТЕГРОВАНИХ LTE/Wi-Fi МЕРЕЖАХ

3.1 Дослідження покриття LTE та Wi-Fi у міських умовах за допомогою мобільних інструментів для імітаційного моделювання

У цьому розділі буде викостано методи адаптивного управління доступом до неліцензійного спектра для розвантаження стільникової інфраструктури. Їх застосування розглянуто на прикладі умовної моделі, що відтворює фрагмент міської території Львова. Такий підхід дає змогу оцінити потенційну ефективність використання інтегрованої гетерогенної мережі LTE/Wi-Fi в реальних умовах щільної урбанізації.

Для дослідження було обрано центральну частину міста (рис. 3.1). На цій ділянці зосереджені різні за інтенсивністю зони присутності користувачів мобільних пристроїв - смартфонів, планшетів, ноутбуків тощо. У подальшому аналізі буде визначено критичні точки перевантаження мережі та окреслено доцільні механізми їх розвантаження на основі адаптивного використання неліцензійного діапазону.

Першим етапом дослідження є порівняння карт покриття Wi-Fi та LTE. Для оцінювання було застосовано доступні безкоштовні мобільні додатки, що працюють із відкритими базами даних: Wi-Fi Map, RFBenchmark та OpenSignal. Нижче наведено коротку характеристику використаних інструментів.

Функціонал застосунку *Wi-Fi Map* дозволяє виявляти точки доступу публічних Wi-Fi мереж — як відкритих, так і тих, що захищені паролем. Наповнення бази даних здійснюється користувачами вручну шляхом створення запису з назвою мережі та ключем доступу. Через це частина інформації може бути застарілою або неактуальною. Програма також дозволяє отримати дані про затримку, швидкість передавання та приймання. Серед аналогічних інструментів цей додаток вирізняється найбільшою кількістю точок у своїй базі.

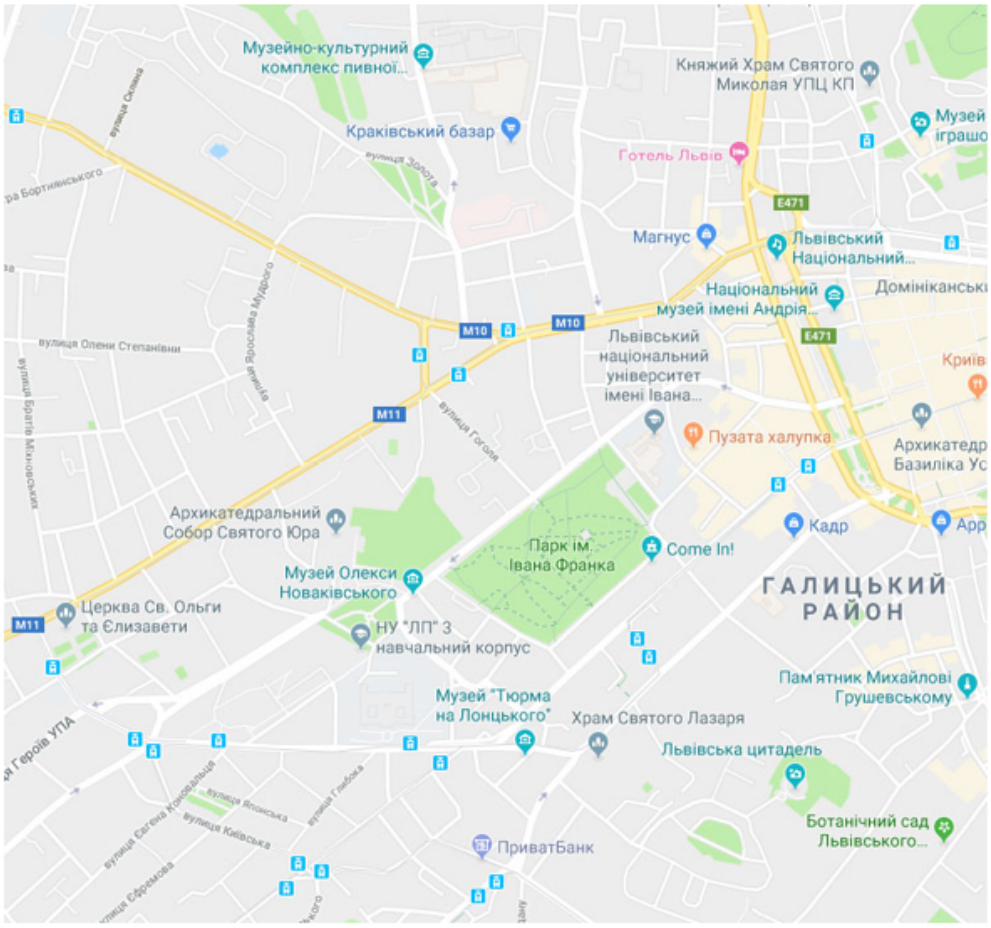


Рис. 3.1 Обрана територія Львова

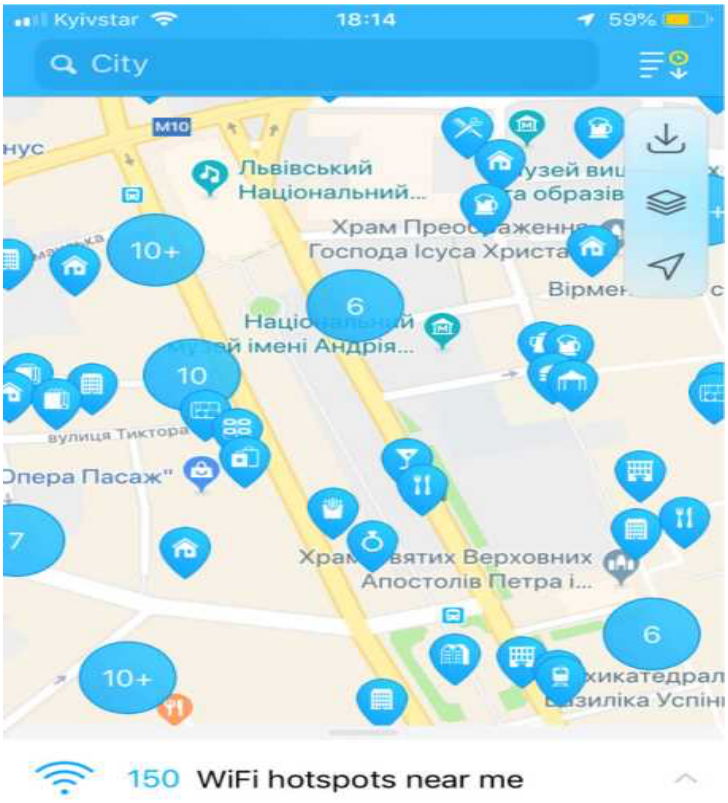


Рис. 3.2 Wi-Fi Map - Вигляд додатку

Наступні два мобільні додатки використовуються для аналізу покриття мереж LTE. Важливо зазначити, що різнокольорові кола на карті не означають окремі соти з базовими станціями в центрі. Це лише графічне відображення щільності сигналу: де він слабший, а де сильніший. У додатку можна окремо або разом переглядати покриття операторів Kyivstar, Lifecell, VodaFone, а також технологій стільникового зв'язку GSM, UMTS та LTE.

OpenSignal - Функціонал цього застосунку подібний до попереднього: він також дозволяє переглядати щільність покриття кожного оператора окремо або всіх разом, а також вибирати потрібну технологію мобільного зв'язку. На відміну від інших інструментів, OpenSignal додатково відображає приблизне місце розташування базових станцій, хоча їх зона дії не показується. У додатку можна отримати унікальний ідентифікатор комірки ID та локальний код LAC.

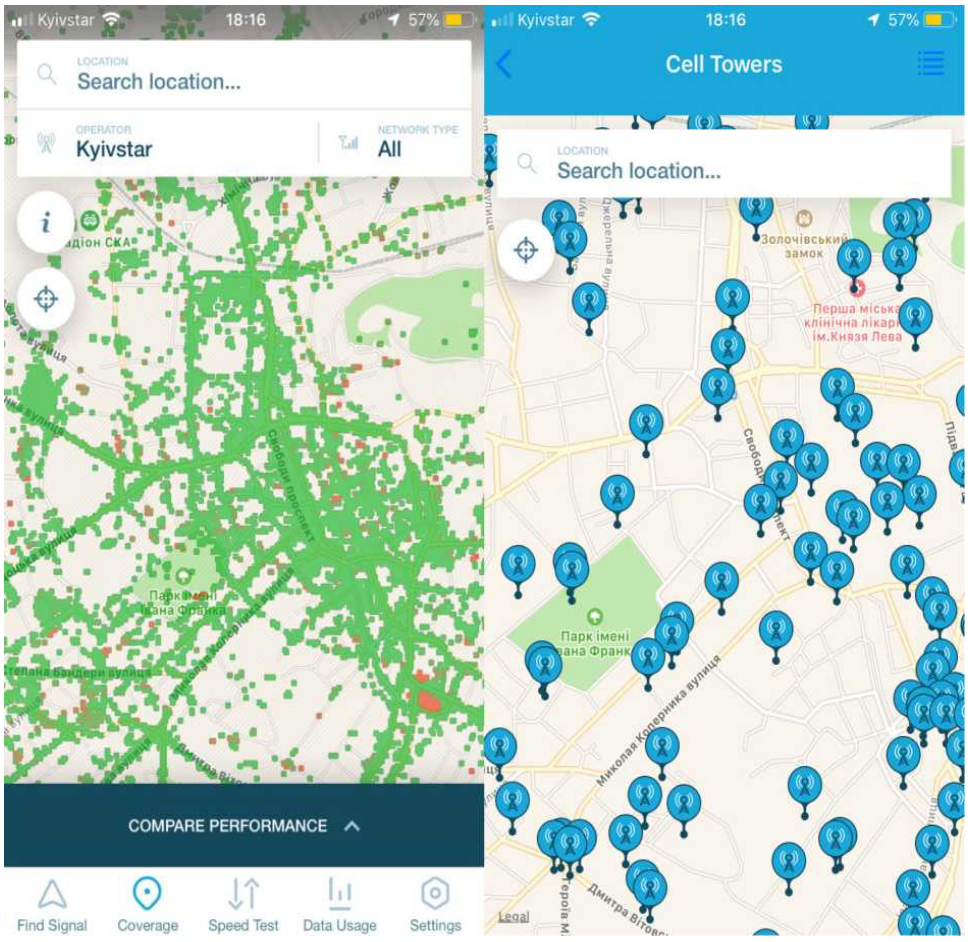


Рис. 3.3. OpenSignal

3.2 Моделювання сценаріїв адаптивного розподілу навантаження під час інтеграції технологій LTE/Wi-Fi/LTE-U

На основі карт покриття, отриманих за допомогою наведених раніше мобільних додатків, можна сформувати узагальнену схему покриття території міста Львів (рис. 3.4). Варто врахувати, що така карта може частково відрізнятись від актуальних даних операторів, оскільки інформація в подібних додатках оновлюється нерегулярн.

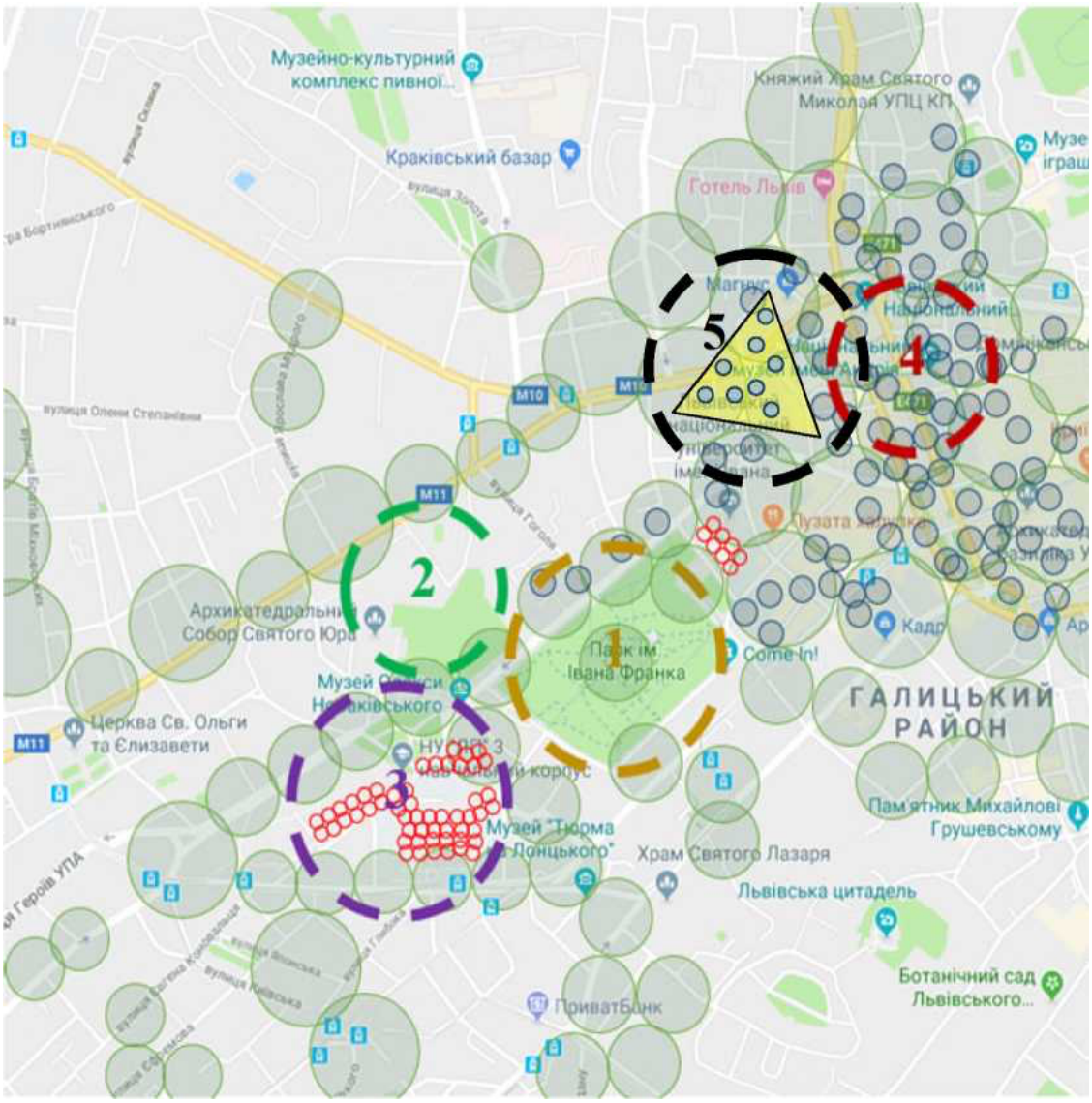


Рис. 3.4. Вигляд покриття на території Львову

- Зелене коло - покриття базовою станцією.
- Синє коло - покриття точкою доступу Wi-Fi.
- Червоне коло - власна корпоративна мережа.

Дана карта рис. 3.4. показує, у яких ділянках доцільніше здійснювати розвантаження трафіку. Для подальшого аналізу виділено чотири основні випадки, позначені штрихованими зонами. П’ятий випадок відповідає моделюванню покриття відповідно до методики адаптивного формування радіоструктури.

Адаптивний розподіл навантаження в LTE мережі в умовах інтеграції з технологією Wi-Fi (hotspot 2.0/Wi-Fi Certified Passpoint)

Вищі навчальні заклади характеризуються високою концентрацією студентів, для яких постійний доступ до інтернету є критично важливим. У зоні 3 видно, що територія університету оточена достатнім LTE покриттям, однак всередині навчальних корпусів рівень сигналу значно знижується. Навчальний заклад має технічну можливість усунути цю проблему, уклавши договір з оператором для використання його радіоресурсів, при цьому управління трафіком здійснюватиметься контролерами Wi-Fi.

Згідно з концепцією Wi-Fi Alliance, оператори повинні забезпечувати своїм абонентам доступ до громадських точок Wi-Fi без введення логіна і пароля, оскільки автентифікація виконується автоматично за SIM-картою. Такий підхід може застосовуватись не лише в університетах, але й у різних корпоративних мережах.

Розглянемо детальніше сценарій, у якому відбувається розвантаження LTE трафіку через точку доступу Wi-Fi. Припустимо, що протягом інтервалу 1 год надходять випадково згенеровані виклики, і кожному абоненту потрібна лише одна послуга. Кожна послуга має власні вимоги до пропускної здатності (таблиця 3.1). Тривалість виклику Ттрив генерується за законом Пуассона із середнім значенням 1500 с. Моменти початку викликів Тпоч формуються випадковим чином за рівномірним розподілом, а моменти завершення визначаються як Ткін = Тпоч + Ттрив. Пропускна здатність LTE мережі та всіх сервісів становить:

Таблиця 3.1

Швидкості телекомунікаційних послуг

LTE	IPTV	VoIP	VoD	WEB	Відеоконференція	Сигналізація
100 Мбіт/с	10 Мбіт/с	128 кбіт/с	4 Мбіт/с	512 кбіт/с	2 Мбіт/с	64 кбіт/с

Незавантажена мережа LTE буде мати наступний вигляд:

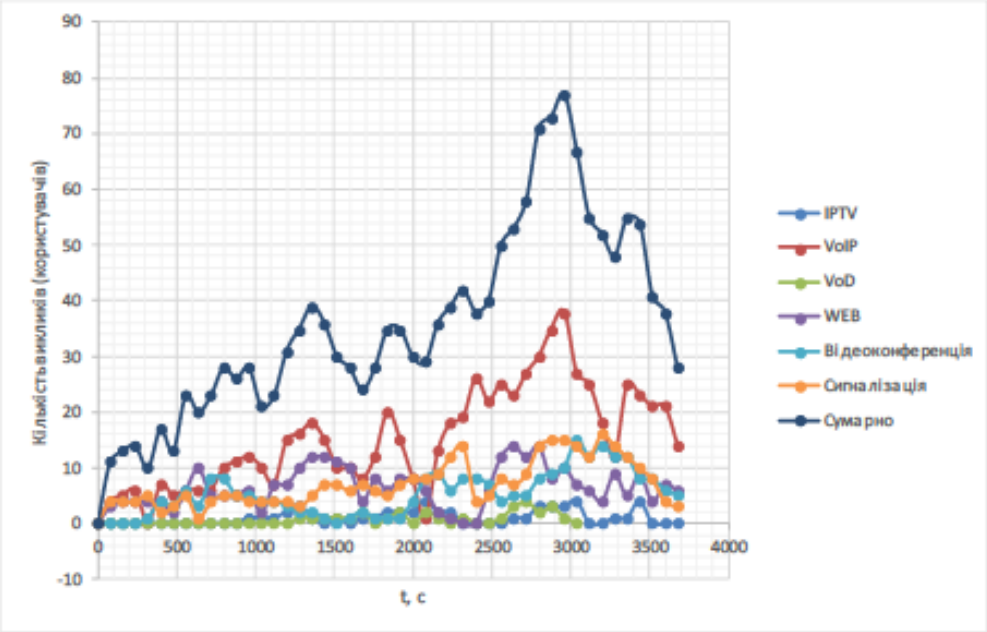


Рис. 3.5 Кількість викликів різних видів послуг в мережі LTE у часі

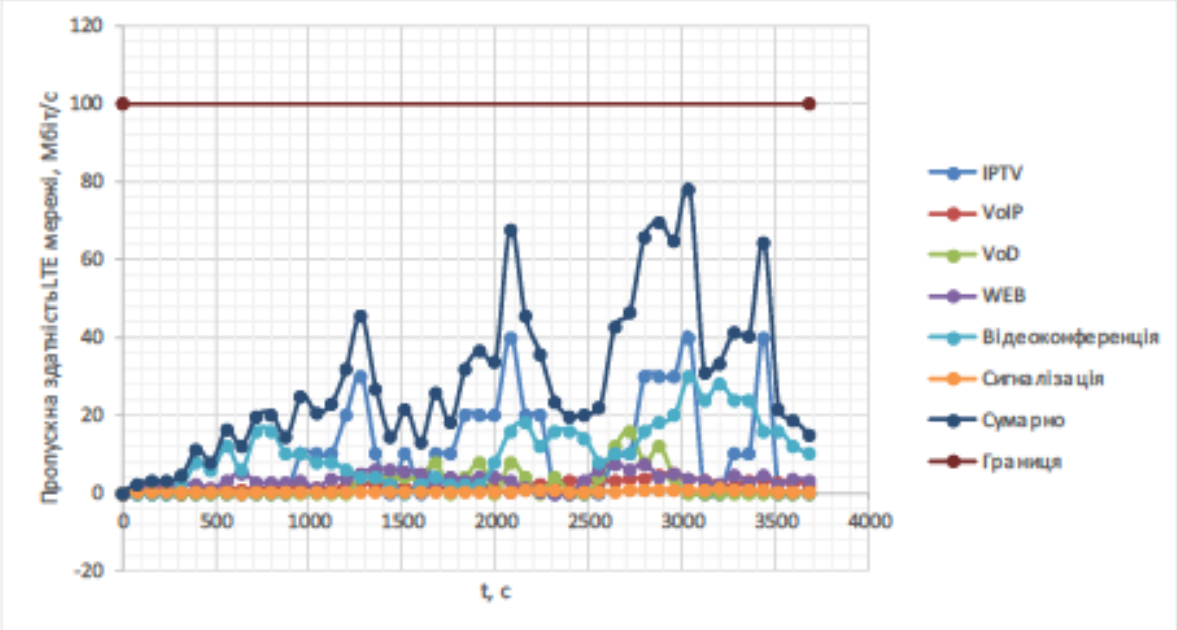


Рис. 3.6. Пропускна здатність видів послуг, які поступили в LTE мережу

Однак, у період пікового навантаження мережа стає переповненою, що призводить до втрати частини з'єднань. У такій ситуації частину абонентів із перевантаженої LTE мережі було перенаправлено до Wi-Fi. Передусім було задіяно тих користувачів, що створювали найбільше навантаження на радіоканал.

Адаптивний розподіл навантаження в LTE мережі в умовах інтеграції з технологією LTE-U

У зоні 1 присутнє лише стільникове покриття LTE і повністю відсутні публічні точки доступу Wi-Fi. Оскільки LTE працює в ліцензованому спектрі, оптимальним рішенням для оператора є впровадження технології LTE-U. Це дозволяє задіяти додатковий неліцензований спектр, який є значно дешевшим, і таким чином збільшити доступну пропускну здатність на даній території. Відповідні результати наведено на рисунках 3.7 та 3.8.

У моделюванні припустимо аналогічний сценарій, як і в попередньому підрозділі: у випадкові моменти часу надходять запити від абонентів на отримання певних послуг. Усі параметри формування викликів залишаються такими самими, як і в попередньому випадку.

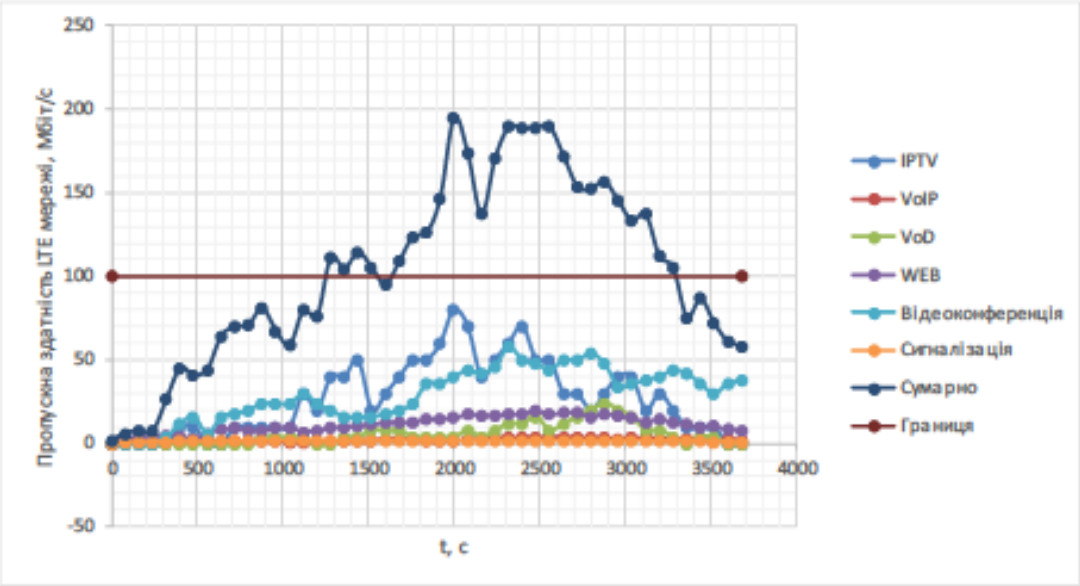


Рис. 3.7. Пропускна здатність LTE мережі змінюється залежно від типу послуги, яку запитує абонент

Як видно з рисунку 3.7, сумарна кількість викликів, що надходять до LTE мережі, формує загальне навантаження, яке перевищує доступну пропускну здатність радіоканалу. Через це мережа не здатна повністю забезпечити необхідний рівень обслуговування. Використання технології LTE-U дозволяє усунути цей недолік, оскільки задіяння неліцензованого спектра збільшує доступну пропускну здатність і покращує якість обслуговування абонентів, що підтверджується даними на рисунку 3.8.

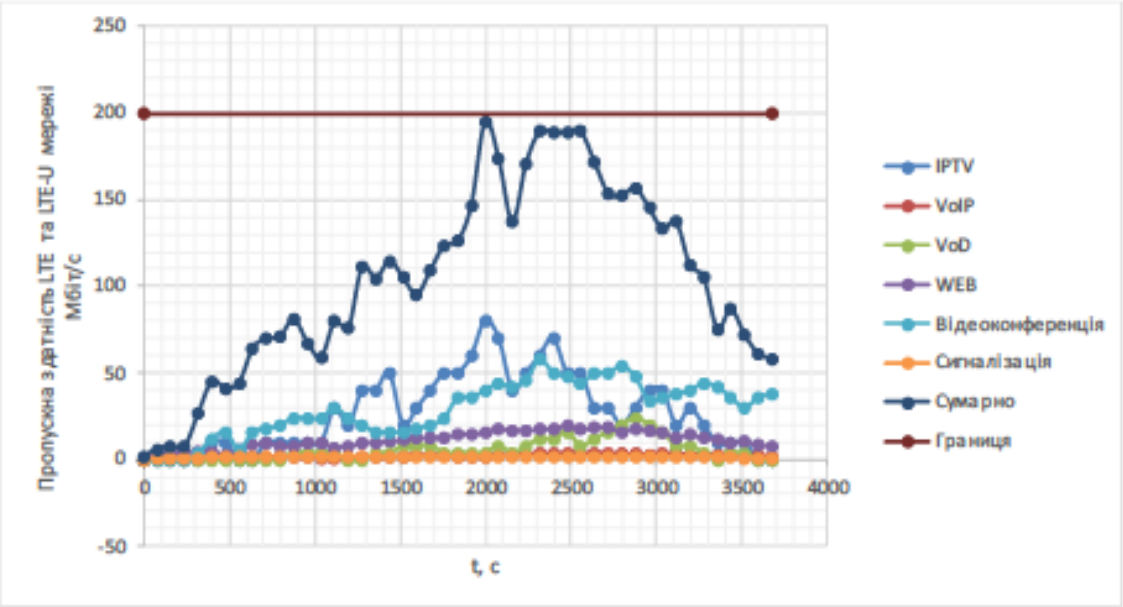


Рис. 3.8. Розвантажена мережа LTE з використанням технології LTE-U

У результаті застосування LTE-U загальна пропускна спроможність мережі збільшилась удвічі. Водночас слід врахувати, що LTE та LTE-U залишаються двома окремими технологіями, які працюють поруч, але не мають безпосереднього фізичного зв’язку між собою. Перемикання абонентів виконується через передачу сигналізаційних повідомлень у систему управління оператора.

3.3 Моделювання та аналіз роботи об’єднаної інфраструктури LTE/Wi-Fi та LTE-U в умовах адаптивного управління доступом

Зоною 2 можна вважати ділянку з мінімальним рівнем сервісу, оскільки там присутнє лише покриття 2G/3G. Парк ім. Івана Франка розташований поблизу центру міста та ЛНУ ім. І. Франка, тому на цій території часто спостерігається

висока концентрація людей (рис. 3.4). Для голосових викликів у непікові години цього покриття достатньо, однак для мультимедійних сервісів його явно бракує. Найімовірніше оператор намагається мінімізувати витрати і вважає, що встановлення 2–3 базових станцій LTE буде достатнім. Проте з часом стане очевидно, що цього замало, і доведеться додатково впроваджувати LTE-U. Щоб уникнути зайвих витрат і повторної модернізації, доцільніше одразу встановити гібридну базову станцію LTE/Wi-Fi. На відміну від попереднього методу, у цьому випадку технології об'єднані в єдину систему. Рекомендовано налаштувати правило, за яким нові з'єднання спочатку встановлюються у Wi-Fi, а лише за умови завантаженості цієї мережі абонент переноситься до LTE. Такий підхід дозволяє збільшити пропускну здатність за аналогією з попереднім методом.

Останній випадок, зони 4 та 5, є найбільш складним (рис. 3.4). Це поширена ситуація, у якій одночасно присутні LTE і Wi-Fi. Єдиним дієвим способом розвантаження макрокомірок у таких умовах є впровадження малих сот із підтримкою адаптивного формування рівня радіодоступу відповідно до локального абонентського навантаження, а також застосування технології LTE-U. Однак через таке багаторівневе формування можуть виникати колізії та інтерференції як у ліцензійному, так і в неліцензійному спектрі. За відсутності ефективних методів їх уникнення це призведе до погіршення якості обслуговування більшості користувачів. Способи усунення цих проблем наведено у другому розділі, а оцінювання ефективності запропонованих підходів проводиться у наступних підрозділах.

Розробка імітаційної моделі інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi/LTE-U

Для перевірки ефективності розглянутих методів було створено імітаційну модель. Модель реалізовано за допомогою мови програмування C++ та LTE-A Downlink System Level Simulator. Вона складається з робочого поля, на якому розміщено станції трьох рівнів: макростанції, пікостанції та Wi-Fi точки доступу [4]. Центри макростанцій утворюють трикутну структуру, що відповідає регулярній архітектурі мобільних мереж. На полі моделі не відображено повної зони дії макрокомірок, оскільки досліджується навантаження на сектор базової станції

(600). Усередині трикутника розташовано SC та Wi-Fi. Координати пікосот задаються відповідно до розробленої методики: при наявності навантаження вони вмикаються, а за його відсутності вимикаються та зникають з робочого поля. Таким чином змінюється структура рівня радіодоступу.

На початку моделювання генерується статистичний розподіл абонентів, а координати пікокомірок формуються за допомогою параметричного точкового процесу з параметром мінімальної відстані між базовими станціями. Після цього за допомогою теселяції Вороного визначається зона покриття кожної малої комірки.

Багаторівнева структура радіодоступу забезпечує високу спектральну ефективність, гнучкість у побудові мережі та здатність адаптуватися до потреб користувачів. Базові станції кожного рівня мають свої параметри та орієнтовані на різні категорії абонентів.

Залежно від швидкості руху та типу трафіку абонента його може обслуговувати базова станція одного рівня або декілька станцій різних рівнів у режимі агрегації спектра. Фемто- та пікосоти орієнтовані на малорухомих користувачів, які генерують великий обсяг трафіку. Вони ефективно розвантажують макросоти, а за низького навантаження вимикаються, адаптуючи архітектуру мережі до реальних потреб. Макрокомірки обслуговують високомобільних абонентів, користувачів, яких не можуть обслуговувати SC, або тих, хто працює одночасно з макросотою та SC (агрегація спектра).

Для формування трафіку та швидкості руху абонентів застосовуються генератори, побудовані на рівномірному та логнормальному розподілах, що дозволяє відтворити реалістичні сценарії мобільної поведінки. Кожен абонент має такі атрибути: координату, швидкість, напрям руху, тип послуги, необхідну пропускну здатність, а також імовірність активності. На початковому етапі моделювання формується статистична картина абонентського навантаження, відповідно до якої у просторі розміщуються користувачі.

Абоненти генеруються таким чином: одна їх частина розташована майже рівномірно по всьому робочому полю моделі і присутня протягом усього часу моделювання. Інша частина складається з локалізованих у трикутнику абонентів, їх

координати визначаються за Пуасонівським розподілом. Такі абоненти існують лише певний проміжок часу, після чого зникають. Саме вони забезпечують моделювання добових коливань абонентського навантаження.

Абоненти не є статичними, а постійно переміщуються, переходячи між різними базовими станціями. Реальну мобільність описати точно дуже складно, проте її можна досить добре апроксимувати найпростішими законами розподілу, такими як логнормальний, рівномірний та нормальний.

У густонаселених районах (центр міста, бізнес-центри, вокзали) більшість абонентів малорухомі або взагалі нерухомі, а зі збільшенням швидкості кількість таких абонентів зменшується. Відповідно швидкість руху користувача доцільно моделювати нормальним розподілом з математичним сподіванням 0 і дисперсією 35. Розподіл швидкостей абонентів у м/с подано на рис. 3.2.

У моделі рух абонента є квазіпостійним: певний час він рухається з однією швидкістю, після чого йому призначається нове значення швидкості. Напрям руху визначається залежно від одного з кількох сценаріїв, передбачених моделлю:

1. Мінімальне навантаження на мережу. Рух абонентів є випадковим, користувачі рівномірно розподілені по полі моделі.
2. Зростання потенційного навантаження. Кількість абонентів збільшується, їх переміщення має тенденцію зміщуватися до центру моделі.
3. Робота мережі в умовах ГНН.
4. Поступове зменшення навантаження. Кількість абонентів зменшується, вони рухаються від центру, далі їх траєкторія стає випадковою.

Ці сценарії відповідають реальній поведінці абонентів. Уночі навантаження мінімальне, зранку спостерігається невеликий пік, далі можливе тимчасове спадання або помірне збільшення навантаження. У середині дня виникає додатковий максимум, пов’язаний з обідньою активністю користувачів. Увечері мережа працює в режимі ГНН, після чого навантаження знову поступово зменшується.

Окрім генерації абонентів необхідно визначити навантаження, яке створює кожен користувач у кожний момент часу. Воно залежить від численних факторів:

часу доби, погодних умов, індивідуальних звичок та інтересів абонента. Водночас більшість користувачів найчастіше звертаються до типових сервісів, таких як:

• голосовий дзвінок Skype - 100 кбіт/с

• відеодзвінок Skype - від 300 кбіт/с

• соціальні мережі - кілька сотень кбіт/с

• потокове відео - від 200 кбіт/с до кількох Мбіт/с залежно від якості

• передавання файлів – навантаження визначається пропускною здатністю мережі або можливостями абонентського термінала

Через відносно високу вартість послуг доступу до Інтернету значна частина абонентів генерує низькошвидкісний трафік (соціальні мережі, голосові дзвінки, потокове відео низької якості). Із зростанням вимог до швидкості кількість абонентів, які потребують високошвидкісного доступу, поступово зменшується.

Параметри реальних абонентів не є сталими, вони постійно змінюються. Абонент не використовує послугу безперервно, а лише протягом коротких інтервалів часу. Тому доцільно поділяти абонентів у кожен момент на дві групи: активних, які в поточний момент займають ресурси мережі, та пасивних, навантаження яких є мінімальним і може бути проігнороване.

Кожен абонент має свою індивідуальну ймовірність активності. Приймемо припущення, що з ймовірністю P абонент генерує трафік (активний), а з ймовірністю (1 - P) він не створює навантаження (пасивний). Значення параметра P присвоюється абоненту під час його створення.

У межах кожної ітерації циклу моделювання для кожного абонента визначаються три параметри:

• кількість ітерацій циклу Nir, протягом яких його згенеровані характеристики залишаються сталими

• стан активності відповідно до ймовірності P: активний чи пасивний

• величина створюваного навантаження, Мбіт/с

Абонент має квазісталі характеристики, тобто протягом Nir його швидкість, навантаження та стан активності не змінюються. Після завершення Nir ітерацій параметри оновлюються, генерується нове значення Nir, і процес повторюється.

Перед стартом моделювання необхідно створити всі об’єкти моделі та задати їх параметри. Послідовність дій є такою:

1. Позиції макрокомірок визначаються за правилами детермінованої геометрії. Координати першої базової станції задаються довільно, після чого будується рівносторонній трикутник: його вершина відповідає базовій станції, а довжина сторони - діаметру макрокомірки.
2. Усередині трикутника генерується статистичний розподіл абонентського навантаження.
3. Позиції пікосот визначаються на основі цього розподілу за допомогою параметричного точкового процесу. При цьому перевіряється, щоб відстань між новою базовою станцією та сусідньою не була меншою за діаметр пікосоти.

Після цього в межах робочого поля випадково генеруються координати абонентів і їм призначаються відповідні атрибути.

Оцінка ефективності застосування запропонованих рішень на основі імітаційного моделювання

Після ініціалізації всіх об’єктів моделі необхідно з певною періодичністю оновлювати їх параметри та стан робочого поля. Моделювання здійснюється за допомогою таймера, який кожні 50 мс генерує запит на оновлення. У цей момент виконуються такі дії:

1. Для кожного абонента обчислюються нові параметри. Залежно від мобільності змінюються його координати.
2. Обчислюється потенційне навантаження на кожну комірку і визначається, чи потрібно змінити її стан.
3. На робоче поле виводяться геометричні елементи: базові станції, лінії розмітки, радіуси дії макрокомірок і фемтокомірок.
4. Для пікосот (інтегрованих LTE/Wi-Fi/LTE-U) у межах трикутника проводиться теселяція Вороного, після чого виводяться лінії, що визначають зони дії базових станцій.
5. На робоче поле наносяться абоненти.

6. Визначаються потенційні базові станції, які можуть обслуговувати кожного абонента відповідно до принципів диференціації трафіку.
7. Від доступної пропускної здатності комірки віднімається пропускна здатність активних абонентів.
8. Оновлюються показники навантаження, спектральної ефективності, частки активних малих комірок і відповідні графіки.

Для отримання коректних результатів потрібно правильно вибрати параметри функціонування моделі. Оскільки мережа є гетерогенною та містить три рівні базових станцій, необхідно визначити такі параметри для кожного рівня:

1. потужність випромінювання та середній радіус дії
2. доступна смуга частот
3. режим передавання
4. тип модуляції
5. кількість базових станцій кожного рівня

Згідно з поширеною класифікацією, потужність макростанції становить 46 дБм, а радіус дії - 1.2 км. Оскільки досліджується один трикутник, утворений трьома базовими станціями, кількість макростанцій приймається рівною трьом. Смуга частот для макрокомірки становить 20 МГц. Для підвищення спектральної ефективності та збільшення пропускної здатності використовується режим MIMO 4x4 і модуляція 64QAM, при якій один символ переносить 6 біт інформації.

Малі комірки працюють у режимі MIMO 2x2, використовують смуги частот 15 та 5 МГц і застосовують модуляцію 64QAM. На початку моделювання кількість малих сот задається статично: 25 пікокомірок і 15 фемтокомірок, однак у процесі роботи моделі їх кількість динамічно змінюється залежно від локалізації абонентського навантаження. Потужність передавання пікостанцій становить 23–30 дБм при радіусі дії 200–300 м, а фемтокомірки мають потужність до 23 дБм і радіус покриття близько 50 м. Топологію модельованої інтегрованої мережі LTE/LTE-U/Wi-Fi наведено на рис. 3.9.

Завдяки використанню методу адаптивного формування структури рівня радіодоступу в системі спостерігаються характерні коливання спектральної

ефективності. За невеликого навантаження структура рівня радіодоступу подібна до структури традиційних однорівневих мереж і практично не відрізняється за значенням спектральної ефективності. Проте зі збільшенням навантаження мережа набуває яскраво вираженої багаторівневої структури та демонструє високу спектральну ефективність системи.

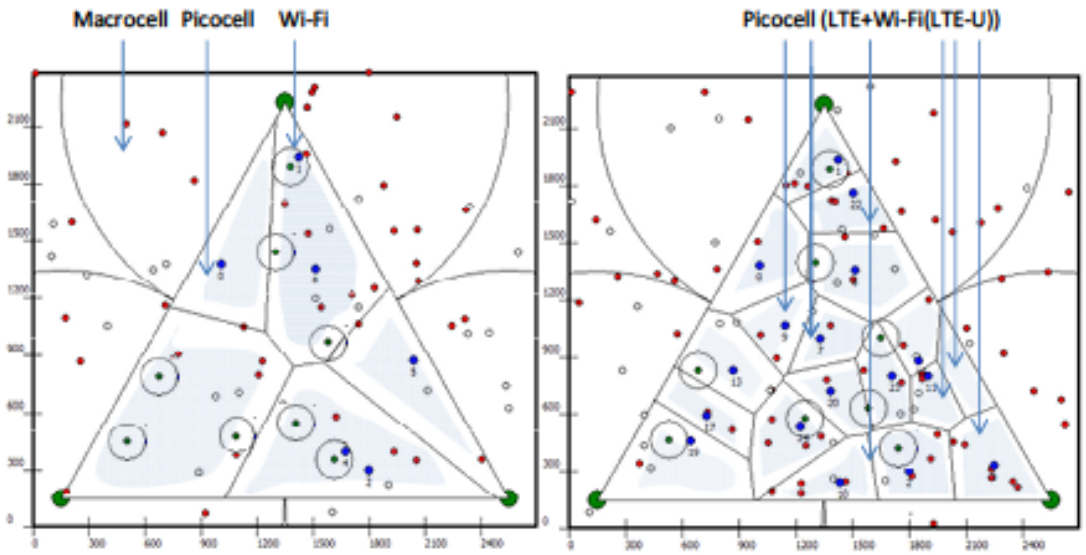


Рис. 3.9. Вигляд топології модельованої інтегрованої мережі LTE / LTE-U / Wi-Fi

Оцінюючи ефективність упровадження певного методу, необхідно користуватися відповідним критерієм ефективності. У цьому випадку таким критерієм виступає ймовірність того, що абонент отримає необхідну пропускну здатність каналу. Для цього застосовується кумулятивна функція розподілу (cumulative distribution function, CDF) - функція, що визначає імовірність того, що випадкова величина набуде значення менше за певний поріг.

На основі статистичних даних, отриманих із серії з 20 моделювань, для кожного абонента формується графік CDF зі швидкістю передавання С Мбіт/с (рис. 3.10).

На рисунку 3.10 наведено криві, що відповідають чотирьом режимам роботи мережі:

• працює лише макрокомірка (МС), а малі комірки (ВС) вимкнені

• працюють макрокомірка (МС) та пікомірка (ВС)

• інтегрована мала комірка з підтримкою LTE-U (BC + LTE-U), яка активується або деактивується залежно від абонентського навантаження відповідно до запропонованого методу

• Постійно включені всі SC.

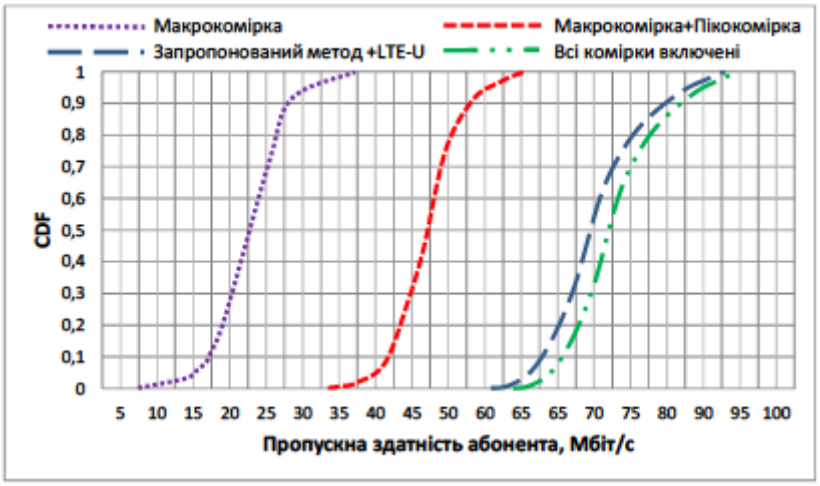


Рис. 3.10. Кумулятивна функція розподілу ймовірності середньої швидкості передавання для одного абонента в низхідному каналі при різних варіантах формування радіо структури

З З рис. 3.10 видно, що у випадку, коли мережа складається лише з макрокомірок, середня пропускна здатність для одного абонента становить приблизно 20–25 Мбіт/с. Якщо абонента обслуговують макрокомірка та пікокомірка, цей показник збільшується до 45–50 Мбіт/с. У гетерогенній мережі з трирівневою структурою базових станцій, включаючи LTE-U та використання неліцензійного Wi-Fi спектра, середня пропускна здатність досягає 67–71 Мбіт/с. Якщо ж активовані всі малі комірки, середнє значення становить близько 70–75 Мбіт/с.

Порівнюючи криві, отримані для конфігурації з постійно ввімкненими малими комірками та для режиму, де застосовується метод адаптивного формування рівня радіодоступу, варто відзначити, що у другому випадку при зниженні пропускної здатності всього на 1–4 % мережа забезпечує значну економію енергоресурсів на рівні 30–42 %. Це дозволяє оператору стабільно надавати такі сервіси, як потокове відео високої якості, відеодзвінки, доступ до IoT-послуг, а

також покращує можливості телемедицини для абонентів.

У результаті 20 серій моделювання отримано графік середньої частки активних малих комірок (рис. 3.11): Ввімкнені всі комірки

Метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу

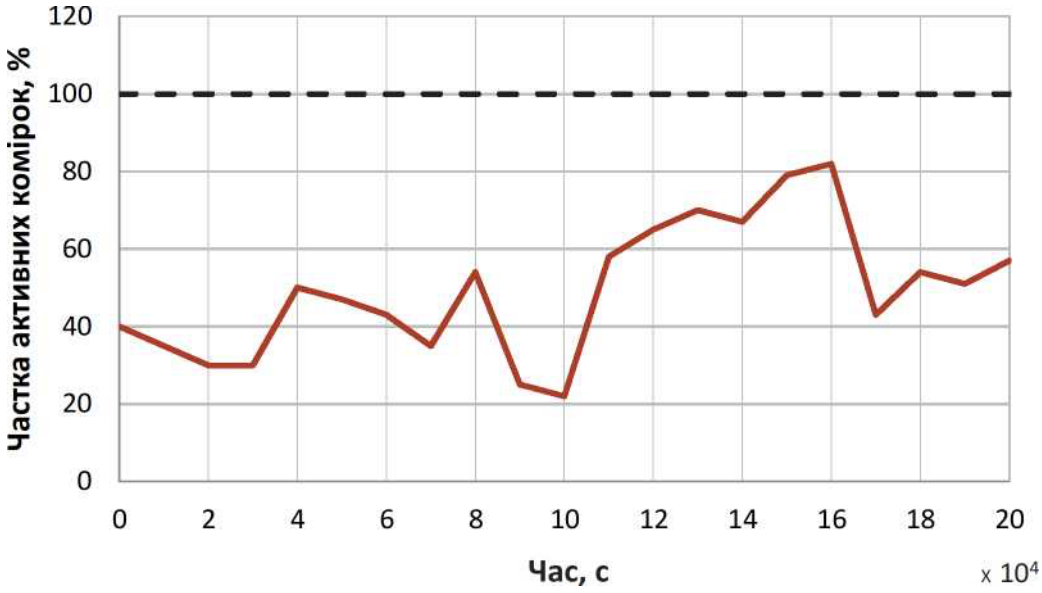


Рис.3.11. Графік середньої частки активних малих комірок

Середня частка активних малих комірок становить близько 58 %, тому немає необхідності підтримувати роботу всіх SC у активному режимі протягом усього часу. Завдяки використанню алгоритму адаптивного формування структури рівня радіодоступу мережа демонструє значно вищу енергоефективність, що безпосередньо пов'язано зі зменшенням кількості одночасно активних малих комірок.

Навіть у години пікового навантаження немає потреби вмикати всі пікосоти та фемтосоти, оскільки абонентське навантаження розподілене нерівномірно і частина базових станцій у певні моменти не обслуговує жодного користувача. Запропонований метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу є ефективним як при низькому, так і при високому навантаженні, хоча при великому навантаженні виграш в енергоефективності дещо зменшується.

Фемтокомірки мають малий радіус покриття і зазвичай встановлюються всередині приміщень, тому вони частіше перебувають у режимі простою, ніж пікосоти. Пікокомірки, що забезпечують покриття радіусом 200–300 м, залишаються активними значно довше, оскільки через більшу зону дії зростає ймовірність появи користувача в їх секторі.

Невелике зниження пропускної здатності при застосуванні алгоритму адаптивного формування структури рівня радіодоступу пояснюється дією порогу чутливості малих комірок, який визначає момент переходу між режимами. Якщо комірка перебуває в енергозберігаючому стані й отримує запити, що потребують мінімальної пропускної здатності, вона не переходить в активний режим, і користувача обслуговує макрокомірка. У режимі ГНН це може спричинити зменшення ємності мережі. Однак шляхом налаштування порога чутливості можна регулювати роботу мережі: зближуючи криві CDF для збільшення ємності та енергоспоживання, або віддаляючи їх для зменшення ємності, але підвищення енергоефективності.

На основі розробленої імітаційної моделі та реалізації алгоритму оцінювання стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі доведено, що запропоновані рішення дозволяють підвищити енергоефективність на 30–42 % при зменшенні середньої пропускної здатності всього на 1–4 %.

Висновки до третього розділу

У цьому розділі було проведено комплексне імітаційне моделювання інтегрованої гетерогенної мережі LTE/Wi-Fi/LTE-U з урахуванням реальних сценаріїв абонентського навантаження, мобільності та поведінки користувачів. На основі карт покриття та аналізу територіальних особливостей міста розглянуто ключові зони з різним характером навантаження та обґрунтовано необхідність застосування адаптивних методів управління доступом у неліцензійному спектрі.

Було змодельовано роботу макрокомірок, пікосот і фемтосот у різних режимах, а також оцінено вплив інтеграції LTE-U і Wi-Fi на якість обслуговування.

Проведені експерименти засвідчили, що застосування адаптивного підходу до формування структури рівня радіодоступу дозволяє істотно підвищити пропускну здатність мережі та збільшити її стійкість під час пікових навантажень. У порівнянні з традиційною однорівневою архітектурою використання трирівневої гетерогенної структури з підтримкою LTE-U забезпечує збільшення середньої пропускної здатності абонентів у 2–3 рази. Оцінка ефективності за допомогою кумулятивної функції розподілу (CDF) підтвердила, що мережа з адаптивною активацією малих комірок демонструє більш рівномірний розподіл пропускної здатності та покращену якість сервісу.

У результаті аналізу встановлено, що застосування адаптивного алгоритму увімкнення/вимкнення піко- та фемтосот забезпечує суттєву економію енергоресурсів. В середньому активними були лише близько 58 % малих комірок, що дозволило зменшити енергоспоживання мережі на 30–42 % при мінімальній втраті пропускної здатності (1–4 %). Це підтверджує актуальність і практичну цінність запропонованої методики, оскільки вона дозволяє одночасно підвищити енергоефективність та якість обслуговування в інтегрованих LTE/Wi-Fi/LTE-U мережах.

ВИСНОВКИ

У роботі виконано комплексне дослідження принципів побудови, функціонування та підвищення ефективності інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi/LTE-U з метою оптимізації пропускної здатності, енергоефективності та якості обслуговування користувачів у гетерогенних системах радіодоступу. Проведений аналіз технологій, характеристик радіосередовища та результатів імітаційного моделювання дозволив сформувати узагальнену оцінку переваг адаптивних методів управління доступом у неліцензійному спектрі.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Визначено ключові проблеми та обмеження інтеграції LTE, Wi-Fi і LTE-U, включаючи конфлікти доступу до середовища, відмінності у механізмах MAC-рівня та нерівномірне використання радіоресурсів у гетерогенних мережах.

2. Обґрунтовано доцільність застосування технологій LWA, LAA та LTE-U для підвищення пропускної здатності та оптимізації спільного використання ліцензованого й неліцензійного спектра, а також визначено їхній вплив на QoS та енергоефективність мережі.

3. У роботі в третьому розділі було проведено комплексне імітаційне моделювання інтегрованої гетерогенної мережі LTE/Wi-Fi/LTE-U, що дозволило всебічно оцінити ефективність запропонованих методів адаптивного управління доступом у неліцензійному спектрі та їхній вплив на якість обслуговування та енергоефективність мережі. На основі карт покриття та аналізу територіальних зон міського середовища змодельовано різноманітні сценарії абонентського навантаження, особливості мобільності користувачів і поведінку різних категорій абонентів, включаючи низькошвидкісні та високошвидкісні сервіси. Створена багаторівнева модель із макрокомірками, пікокомірками та фемтокомірками дала можливість проаналізувати роботу мережі як у звичайних умовах, так і під час пікових навантажень, а також дослідити особливості інтеграції технологій Wi-Fi, hotspot 2.0, Passpoint і LTE-U. Порівняння кількох режимів роботи мережі за

допомогою кумулятивних функцій розподілу (CDF) показало, що використання трирівневої гетерогенної архітектури та технології LTE-U суттєво підвищує середню пропускну здатність абонентів, яка зростає з 20–25 Мбіт/с у традиційних макрокомірках до 67–75 Мбіт/с у інтегрованій мережі з підтримкою малих комірок і неліцензійного спектра. Результати моделювання підтвердили, що застосування адаптивного алгоритму активації та деактивації малих комірок, який орієнтується на локалізацію абонентського навантаження та інтенсивність трафіку, забезпечує значний приріст енергоефективності: активними в середньому є лише 58 % малих сот, що дозволяє зменшити загальне енергоспоживання на 30–42 % при мінімальних втратах пропускної здатності лише на рівні 1–4 %. Отримані результати доводять практичну цінність запропонованих методів адаптивного керування доступом, оскільки вони забезпечують оптимальний баланс між енергоефективністю та якістю сервісу та дозволяють операторам підвищити стабільність роботи мережі, розширити підтримку мультимедійних і IoT-сервісів, а також ефективно обслуговувати абонентів навіть за умов пікового навантаження, що є актуальним для сучасних інтегрованих LTE/Wi-Fi/LTE-U мереж.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Еволюція мобільних мереж: Від 1G до 5G і перспективи 6G. Блог A1 Telecom. Режим доступу: https://a1call.me/blog/uk/3264/
2. Від 1G до 6G: коротко про еволюцію мобільного інтернету у світі. Kyivstar Business Hub. Режим доступу: https://surl.li/xwxlga
3. Мобільний зв'язок. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/9erXpJZNp
4. Геторогенні комп’ютерні мережі. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/J4PRgOAVz
5. Шевчук Д. В. Методи підвищення передачі даних в системах WiSun за різних конфігурацій мережі. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/dNYKmR8eM
6. Стаття з мережевих технологій. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/k4x9qRQey
7. Дорогань К. С. Вдосконалений метод перерозподілу абонентського трафіку по точках доступу Wi-Fi із застосуванням технології Wi-Fi offloading. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/AVMmM2yVo
8. QoS в мережах: що таке Quality of Service і як вона працює. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/BNEM8qPNG
9. QoS. Вікіпедія, вільна енциклопедія. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/QoS
10. Климаш М. М. Підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/MVwoQa8Vz
11. Інтернет-джерело з питань мобільного зв’язку. Режим доступу: https://lnk.ua/RVdK35ke3
12. Брич М. В. Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв’язку. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/pVJq6d9eP
13. Про протокол CSMA/CD. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/1V9k9ox4g

14. VoLTE. Вікіпедія, вільна енциклопедія. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/VoLTE
15. Ловейкін Д. Ю. Управління ресурсами та якістю в мережах LTE. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/aVp9YojND
16. LTE-WLAN Aggregation (LWA). Wikipedia, the free encyclopedia. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/LTE-WLAN_Aggregation
17. Стаття з питань телекомунікаційних мереж. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/Men0doQNg
18. Телекомунікаційні та інформаційні технології. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/x4LXxr94n
19. Заболотна А. Ю. Підвищення пропускної спроможності мереж мобільного зв'язку стандарту LTE при використанні неліцензійного радіочастотного спектру. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/xVm82v9ev
20. Послуги VoLTE. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/QV0kxg7eg
21. Розподілена система керування. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/Y4Q925649
22. Аналого-цифровий перетворювач. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/geqK9k0N5
23. Методи виявлення і вирішення колізії. Studfile. Режим доступу: https://studfile.net/preview/5207047/page:2/
24. Адаптивна система. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/wVlzg3D4P
25. Види адаптивного управління та систем. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/BNEM8ZXNG
26. Засіб для визначення якості програмного забезпечення методами метричного аналізу. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/1V9k9OM4g
27. Балансування навантаження. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/KVvd0ZO4E
28. Що таке якість обслуговування QoS? Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://lnk.ua/J4ZP0zwVE

29. Кеш (cache): що це таке і навіщо потрібно. HOSTiQ.ua. Режим доступу: https://hostiq.ua/wiki/ukr/cache/

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ