# ВСТУП

Швидке зростання бездротових технологій зв’язку зумовлене передусім посиленням інтересу суспільства до доступу в Інтернет. У сучасному інформаційному просторі глобальна мережа відіграє надзвичайно важливу роль. Завдяки Інтернету люди можуть працювати, навчатися, спілкуватися, обмінюватися даними, переглядати різноманітні файли та користуватися онлайн-послугами як комерційних компаній, так і державних установ.

Сьогодні Україна володіє зовнішніми каналами зв’язку з достатньою пропускною здатністю, і майже в кожному населеному пункті працюють провайдери, що забезпечують доступ до глобальної мережі. Проте підключення між провайдерами та кінцевими користувачами й досі здебільшого здійснюється через комутовані або виділені лінії. У результаті виникають проблеми: низька швидкість передавання даних, нестабільність з’єднання та обмежені можливості підключення. Однією з ключових труднощів залишається прокладання кабельних ліній, яке в окремих випадках є неможливим, незручним або економічно недоцільним, особливо у великих містах.

Останніми роками в телекомунікаційній сфері дедалі більше уваги зосереджується на технологіях четвертого покоління (4G), які забезпечують вищу якість зв’язку, швидшу передачу даних та ширший спектр послуг порівняно з попередніми поколіннями. Однією з таких сучасних технологій є LTE.

Стандарт LTE (Long Term Evolution — «довгострокова еволюція») є сучасною технологією побудови й розвитку бездротових систем зв’язку, створеною в рамках спільного проєкту зі стандартизації мереж третього покоління — 3GPP (3G Partnership Project). Основними цілями впровадження LTE є зниження вартості передавання даних, підвищення швидкості їх передачі та забезпечення більшої ефективності роботи мережі.

Головною особливістю мереж LTE, що вирізняє їх серед інших мобільних технологій, є повне використання IP-технологій у побудові мережевої

інфраструктури. Передавання трафіку в мережах LTE здійснюється блоками з інтервалом у 1 мс, із використанням адаптивного керування форматом передачі в режимі реального часу.

У цій кваліфікаційній роботі як територіальний об’єкт для можливого розгортання мережі LTE для користувачів, що перебувають у межах міста, було обрано місто Шостка з населенням близько 74 000 осіб.

Однією з основних цілей даної роботи є створення стабільного покриття LTE по всій території міста та забезпечення абонентів високоякісним мобільним доступом до Інтернету. У процесі проектування мережі LTE застосовуються два ключові підходи: оптимізація зон покриття та гарантування необхідної пропускної здатності мережі.

*Об’єкт дослідження* – процес безпроводового доступу в стільникових мережах четвертого покоління.

*Предмет дослідження* – є методи оцінки та підвищення безпроводових каналів стільникових мереж.

*Мета роботи* – є розробка покращеного алгоритму оцінки якості стільникового покриття.

*Методи дослідження* – методи теорії інформації та передавання сигналів, методи теорії розповсюдження електромагнітних хвиль, методи комп’ютерного моделювання.

# 1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОКОЛІННЯ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ LTE

## 1.1 Ключова інформація про стандарти стільникового зв'язку та їх глобальне поширення

Мережі першого покоління базувалися на аналогових методах передавання сигналу, що суттєво впливало на якість зв'язку. Такі системи мали низку істотних обмежень, зокрема низький рівень захищеності розмов, що уможливлювало їх несанкціоноване прослуховування. Крім того, покриття мережі було обмеженим, а пропускна здатність — недостатньою для забезпечення стабільного зв'язку за зростаючої кількості абонентів. Аналогові мережі також характеризувалися частими перервами з'єднання та складністю організації міжнародних викликів.

Друге покоління (2G) та стандарти стільникового зв'язку. Наприкінці XX століття телекомунікаційна галузь перейшла до етапу впровадження перших цифрових стільникових мереж другого покоління (2G), які стали суттєвим кроком уперед порівняно з аналоговими системами. Основною відмінністю цих мереж було використання цифрових методів обробки та передавання сигналів, що дозволило значно підвищити якість голосового зв'язку, покращити захист інформації та ефективніше використовувати радіочастотний ресурс.

У Сполучених Штатах Америки широкого поширення набули мережі стандарту D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone System), а також перші реалізації технології CDMA (Code Division Multiple Access), розробленої компанією *Qualcomm*. Ці рішення забезпечували більшу ємність мережі та кращу завадостійкість у порівнянні з попередніми аналоговими системами.

Водночас у країнах Європи ключову роль відіграв стандарт GSM (Groupe Spécial Mobile), який швидко став домінуючим завдяки уніфікованому підходу до побудови мереж, підтримці міжнародного роумінгу та високому рівню сумісності обладнання різних виробників. Саме GSM заклав основу для подальшого

розвитку мобільного зв’язку та переходу до наступних поколінь стільникових технологій.

На той час стандарти 2G ще не мали власних широких сервісів для передачі даних. Проте вони забезпечували можливість надсилання SMS-повідомлень, а також підтримували CSD (Circuit Switched Data), що дозволяло передавати цифрові дані й значно пришвидшувало обмін інформацією.

З появою GPRS у 1997 році розпочався новий етап у розвитку стільникового зв’язку. Саме завдяки GPRS у мережах GSM стало можливим безперервне передавання даних. Швидкість передачі значно зросла, і відпала потреба у підключенні до мережі у традиційному сенсі. Оператори отримали змогу встановлювати тарифи за обсяг переданого трафіку, а не за час перебування на лінії.

Третє покоління (3G) та його стандарти зв’язку. Мережа 3G включає низку мобільних стандартів, кожен із яких виконує певні функції. Загалом технологія третього покоління дозволяє користувачам не лише здійснювати радіозв’язок, але й підключатися до Інтернету зі швидкістю до 2 Мб/с та передавати різноманітні відеофайли. Кожному абоненту призначається індивідуальна IP-адреса, а тарифи нараховуються залежно від обсягу використаного трафіку.

Технологія третього покоління (3G) та її стандарти.

Стандарт IMT-2000**,** що став основою технології третього покоління, був остаточно затверджений Міжнародним союзом електрозв’язку (ITU) у 2000 році. Перші комерційні мережі 3G були запущені 1 жовтня 2001 року в Японії**,** і через чотири роки близько 40% населення користувалися послугами мобільного зв’язку нового покоління. У Європі впровадження мереж 3G відбулося дещо пізніше. Офіційно мережа третього покоління визначається як система, побудована на основі одного з п’яти стандартів, що наведені в документі IMT-2000**:**

- UMTS/WCDMA — універсальна мобільна телекомунікаційна система з широкосмуговим кодовим розподілом;
- CDMA2000/IMT-MC — стільникова мережа, що базується на кодовому мультиплексуванні;

- TD-CDMA / TD-SCDMA — часово-роздільні стандарти, зокрема TD-SCDMA є національним стандартом Китаю;
- DECT — цифрова стандартизована технологія бездротового зв'язку;
- UWC-136 — універсальна бездротова система на основі TDMA.

Найширше поширення отримали UMTS/WCDMA **та** CDMA2000, які стали основою комерційних 3G-мереж у світі. Проміжний стандарт 3,5G.

У процесі розвитку технологія UMTS була вдосконалена до HSPA (High Speed Packet Access)**,** що забезпечує високошвидкісну пакетну передачу даних. HSPA реалізує передачу даних від базової станції до абонента за стандартом HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) та обмін даними від абонента до базової станції за стандартом HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access), що дозволяє значно підвищити ефективність використання мережі для передачі мультимедійних сервісів.

Четверте покоління (4G) та його стандарти зв'язку. Мережі четвертого покоління відносять до перспективних технологій, що забезпечують передачу даних абонентам зі швидкістю понад 100 Мбіт/с у русі та до 1 Гбіт/с для стаціонарних користувачів. До 4G належать такі розробки, як LTE-A (LTE Advanced) та WMAN Advanced, IEEE 802.16m (WiMAX 2), які мають загальноприйняті позначення у системі IMT-Advanced.

Особливості кожного покоління стільникового зв'язку визначаються зміною способу обслуговування абонентів, несумісністю технологій передачі сигналу, збільшенням максимальної швидкості передачі бітів, застосуванням сучасних смуг пропускання частот, підвищеною ємністю для одночасної передачі великих обсягів даних, а також розширенням частотного діапазону, що вимірюється в герцах.

До основних вимог, що висуваються до сучасних мобільних мереж нового покоління, належать такі характеристики. Передусім мережа має підтримувати пакетну комутацію на основі IP-протоколів**,** що забезпечує універсальність передавання різних типів трафіку. Швидкість обміну даними повинна перевищувати 100 Мбіт/с для абонентів у русі та досягати 1 Гбіт/с для

стаціонарних користувачів. Важливою умовою є застосування динамічного механізму розподілу мережевих ресурсів, який дозволяє ефективно обслуговувати велику кількість одночасних з'єднань.

Крім того, система повинна підтримувати масштабовану ширину частотного каналу до 40 МГц, гарантуючи при цьому безперервність сеансу зв'язку під час переміщення абонента між базовими станціями. Нормативні показники спектральної ефективності встановлюються на рівні до 15 біт/с/Гц для низхідного каналу та до 6,75 біт/с/Гц для висхідного каналу, а середні значення ефективності на сектор коливаються в межах 1,1–3 біт/с/Гц для downlink і 0,7–2,25 біт/с/Гц для uplink.

П'яте покоління мобільного зв'язку (5G) та його стандарти.

Порівняно з попередніми поколіннями мобільних систем зв'язку, мережі п'ятого покоління (5G) забезпечують суттєвий технологічний прорив. Їх ключовою перевагою є багаторазове — у сотні разів — зростання швидкості передавання даних, а також значне, майже тисячократне, збільшення загальної пропускної здатності мережі. Такі можливості є критично важливими в умовах стрімкого зростання кількості смартфонів, сенсорів, пристроїв Інтернету речей та інших користувацьких терміналів, що постійно генерують великий обсяг трафіку.

Розвиток стандартів 5G ґрунтується на кількох ключових напрямах. По-перше, це забезпечення надвисоких швидкостей передавання даних і підвищення ефективності використання радіочастотного спектра. По-друге, мережі 5G мають гарантувати стабільний та якісний зв'язок у зонах з високою щільністю абонентів, де одночасно працює значна кількість підключених пристроїв. При цьому всі сервісні функції повинні реалізовуватися з мінімальними затримками, що є особливо важливим для критичних застосувань, таких як автономний транспорт, промислова автоматизація та системи реального часу.

До ключових вимог, що висуваються до стандартів мобільного зв'язку п'ятого покоління, належать показники продуктивності, енергоефективності та масштабованості мережі. Зокрема, передбачається забезпечення швидкості передавання даних на рівні від 1 до 10 Гбіт/с, що дає можливість підтримувати

сервіси з високими вимогами до пропускної здатності. Очікуваний середній обсяг переданих даних на одного абонента може досягати 500 ГБ на місяць, що відображає зростання мультимедійного та сервісного трафіку.

Важливою характеристикою є суттєве збільшення кількості одночасно підключених пристроїв, яке у порівнянні з попередніми поколіннями має зрости в сотні разів, що особливо актуально для сценаріїв Інтернету речей. Одночасно з цим мережі 5G повинні демонструвати підвищену енергоефективність, знижуючи загальне енергоспоживання приблизно у десять разів.

Окрему увагу приділено показнику затримки передавання сигналу, яка в цільових сценаріях не повинна перевищувати 5 мс, що є критичним для застосувань реального часу. При цьому одним із важливих соціально-економічних вимог залишається збереження прийнятного рівня вартості користування послугами зв’язку, що забезпечує масову доступність технології.

Для досягнення високої продуктивності мережі 5G пропонується застосовувати велику кількість малопотужних базових станцій, розташованих у будівлях, на вуличних ліхтарях, транспортних засобах та інших об’єктах. Такий підхід дозволяє скоротити відстань між передавачем і користувачем, що забезпечує підвищену швидкість передачі даних. Крім того, низька потужність сигналу цих станцій сприяє зменшенню рівня шкідливого випромінювання.

Схематичне відображення розвитку поколінь мобільного зв’язку наведено на рис. 1.1.

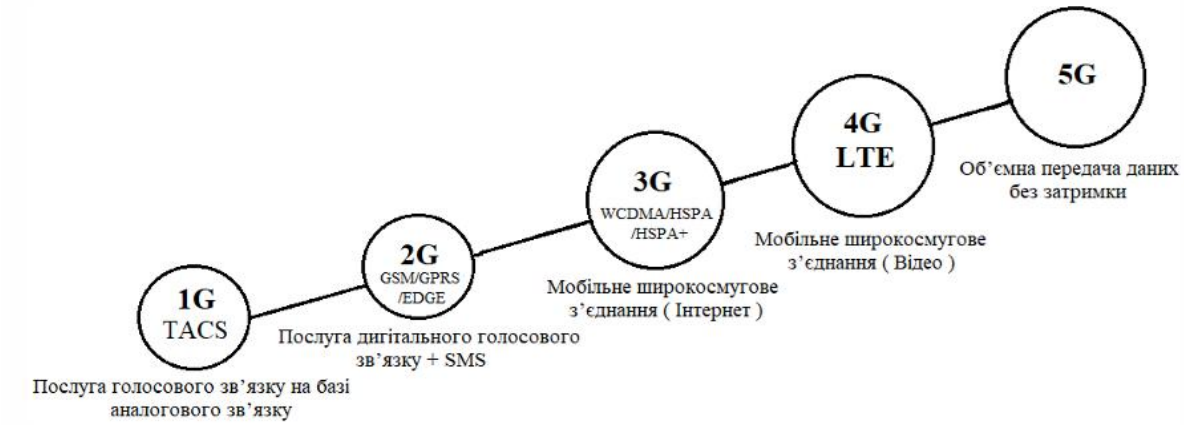


Рис. 1.1 Еволюція поколінь мобільного зв’язку

## 1.2 Технологія LTE та її впровадження в Україні

Розвиток стільникового зв’язку не обмежується мережами четвертого покоління, адже вже триває розробка мереж п’ятого покоління. Проте, попри поширення стандарту LTE, на деяких територіях досі переважають технології мереж третього покоління (3G).

Технологія LTE виступає наступним етапом розвитку та вдосконалення мереж GSM/UMTS у сфері широкосмугового стільникового зв’язку. У процесі формування LTE на базі радіоінтерфейсу 3GPP були визначені основні цілі та технічні вимоги до цієї технології, серед яких виділяють:

- зменшення затримок;
- значне підвищення швидкості передачі даних;
- спрощення та покращення архітектури мережі;
- підвищення гнучкості використання спектра;
- зниження енергоспоживання користувацького обладнання.

Ключовою вимогою до технології LTE є підтримка стабільної та безперервної роботи мережі в різних умовах експлуатації. Стандарт LTE повністю відповідає специфікаціям 3GPP і в окремих параметрах навіть перевершує їх, що дозволяє розглядати його як універсальне рішення для мобільного зв’язку. У системі використовується мережа радіодоступу RAN, яка забезпечує малу затримку передавання сигналу — на рівні до 10 мс, а максимальна швидкість передавання даних у нисхідному напрямку може перевищувати 100 Мбіт/с. Завдяки гнучкій структурі каналу LTE підтримує роботу з шириною смуги пропускання від 5 до 20 МГц для однієї несучої. Крім того, технологія забезпечує функціонування як у режимі частотного дуплексу (FDD), так і в режимі часового дуплексу (TDD).

Важливою перевагою технології LTE є можливість естафетної передачі сигналу, а також підтримка роумінгу з мережами попередніх поколінь

стільникового зв’язку, що забезпечує абонентам стабільний мобільний зв’язок незалежно від їхнього місцезнаходження.

Мобільні оператори не зіштовхнуться з труднощами при впровадженні технології LTE у вже існуючі мережі та частотний спектр, оскільки вона передбачає використання широкосмугових і мультимедійних послуг.

Технологія LTE базується на трьох ключових складових, які визначають її архітектурні та технічні особливості. Першим елементом є System Architecture Evolution (SAE) — еволюціонована мережева архітектура, що задає логічну побудову системи, розподіл функцій між мережевими вузлами та механізми керування трафіком. Другою важливою складовою виступає Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), яка забезпечує передавання інформації шляхом використання великої кількості ортогональних піднесучих, що дозволяє ефективно використовувати спектр і підвищити стійкість до завад. Третім базовим компонентом є технологія Multiple Input Multiple Output (MIMO), що передбачає застосування декількох передавальних і приймальних антен з метою збільшення пропускної здатності каналу та покращення якості сигналу.

Ключовими елементами структури LTE є вузол шлюзу (Gateway Node, GW) та загальна опорна точка, що забезпечують доступ до мережевих ресурсів. Взаємодія між компонентами базується на IP-протоколах, що робить LTE архітектурно простою та ефективною стільниковою системою. Реалізація технології LTE здійснюється на основі SAE, яка визначає як логічну, так і фізичну структуру мережі. На рис. 1.2 наведена архітектура SAE.

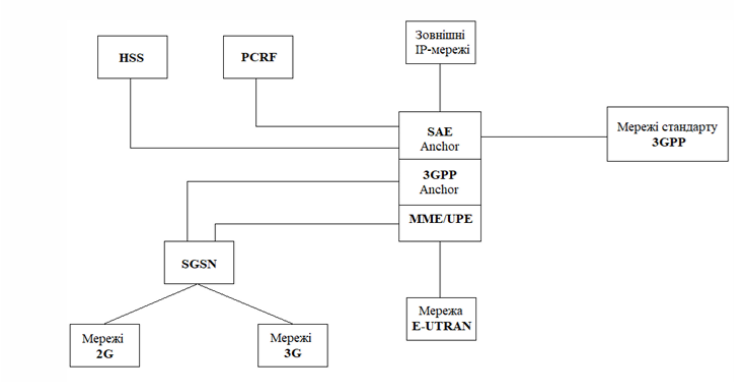


Рис. 1.2 Архітектура базової мережі SAE

SAE (System Architecture Evolution) є еволюцією базової мережі GPRS із рядом відмінностей, серед яких спрощена архітектура, повна реалізація мережі на IP-технології, підтримка радіомереж з високою пропускною здатністю та низькими затримками, а також забезпечення мобільності між різнорідними RAN, включно із застарілими системами, такими як GPRS, та мережами, що не належать до 3GPP, наприклад WiMAX.

Базова станція, що підтримує LTE, називається eNodeB. Вона безпосередньо підключена до шлюзу SAE, який виступає ключовим елементом мережі та зменшує кількість проміжних вузлів, що забезпечує підвищену продуктивність обслуговування та економічну ефективність експлуатації. Вузол обслуговування пакетних даних (PDSN) у мережах CDMA та вузол підтримки GPRS (SGSN) у мережах GSM і WCDMA, які обслуговують пакетну передачу даних, також підключені до шлюзу SAE. Сигналізація управління, наприклад для забезпечення мобільності, обробляється окремо вузлом MME (Mobility Management Entity), що сприяє оптимізації розгортання мережі.

Домашній сервер абонентів (HSS), що зберігає профілі користувачів, взаємодіє з вузлом MME через протокол Diameter, аналогічно до функції управління політиками та контролю нарахування плати (PCRF). Така схема забезпечує використання виключно IP-інтерфейсів у всій архітектурі мережі. На рис. 1.3 представлено структуру мережі LTE.

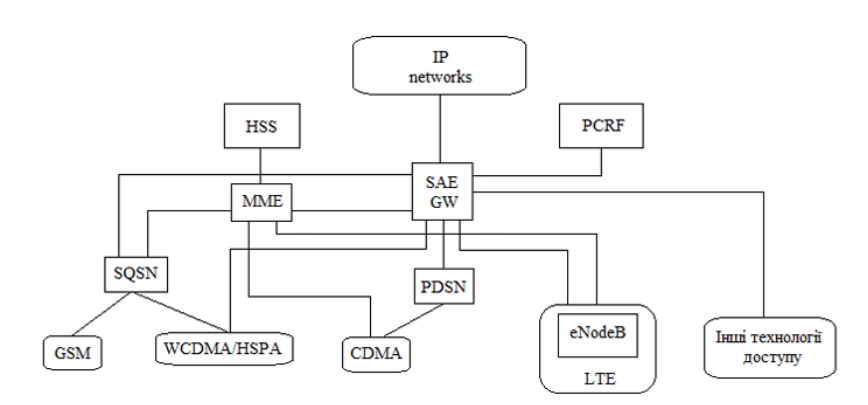


Рис. 1.3 Архітектура LTE

В Україні покриття LTE забезпечують основні оператори: Vodafone, Київстар та Lifecell, які надають користувачам високоякісний мобільний зв’язок. Карти покриття цих операторів доступні у відкритому доступі.

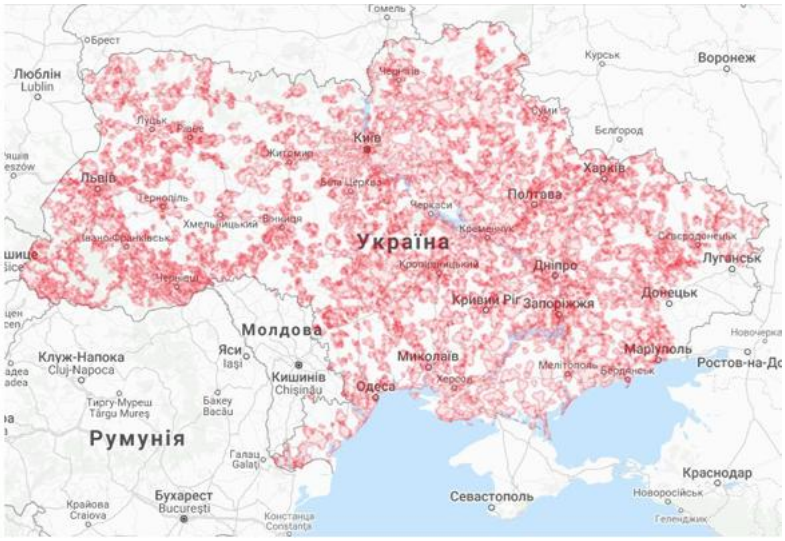



Рис. 1.4 Покриття мережі четвертого покоління (4G) оператора Vodafone

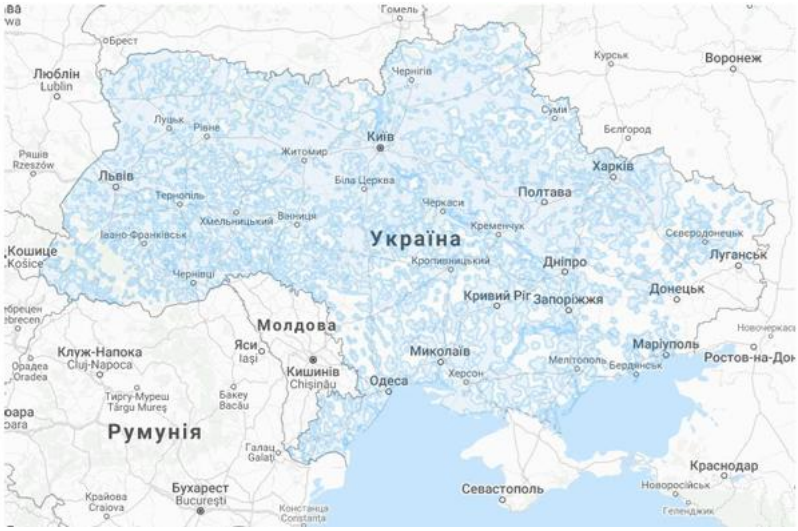



Рис. 1.5 Покриття мережі четвертого покоління (4G) оператора Київстар




Рис. 1.6 Рівень покриття мережі четвертого покоління (4G) оператора Lifecell

Більшість території України покрита мережею 4G від зазначених операторів. Загальний рівень покриття 4G по країні можна визначити, об’єднавши карти всіх операторів.

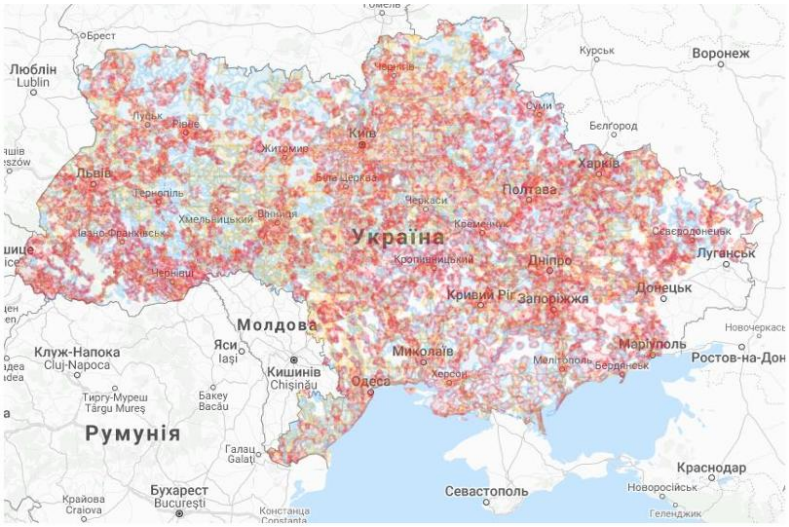



Рис. 1.7 Сумарне покриття мережі 4G на території України

Таким чином, мережа четвертого покоління в Україні охоплює більшу частину території, проте в окремих регіонах спостерігаються проблеми з якістю сигналу. Особливо це стосується віддалених населених пунктів, де рівень

покриття залишається недостатнім. Водночас розвиток мобільного зв’язку продовжується, і в перспективі очікується повне забезпечення країни стандартом LTE-Advanced, що відповідає сучасним міжнародним вимогам.

Наразі почали використовувати частоти 900 МГц, тоді як на початковому етапі впровадження мереж 4G застосовувалися діапазони 1800 МГц та 2600 МГц. Використання частот 900 МГц сприяє покращенню та розширенню зони покриття, а також дозволяє зменшити кількість необхідних базових станцій. Це, у свою чергу, забезпечує якісний мобільний зв’язок та доступ до Інтернету навіть у віддалених населених пунктах.

## 1.3 Методи забезпечення якості обслуговування територіальних об’єктів

З точки зору інженерного планування мереж 4G, окрім створення сучасної мобільної системи, необхідно забезпечити її інтеграцію в існуючу на даній території інфраструктуру стільникового зв’язку. Така стратегія передбачає формування об’єднаної мережі з урахуванням умов, необхідних для сумісної роботи мережі 4G із існуючими мережами 2G/3G.

Головна мета впровадження стандарту LTE четвертого покоління полягає у збільшенні продуктивності високошвидкісних мобільних мереж, зниженні витрат на передачу даних та забезпеченні доступу до широкого спектра сервісів. Основні відмінності LTE від мереж 2G/3G включають:

принципово нові методи формування групового сигналу;

- значно вдосконалений логічний рівень та покращене програмне забезпечення;
- підвищену абонентську ємність, значно більші швидкості передачі даних у висхідному та низхідному каналах, а також більш ефективне використання частотного ресурсу.

Основною відмінністю елементної частини радіосистеми LTE від мереж 2G/3G є відсутність контролера базових станцій у LTE. Частково цю функцію

виконують самі базові станції eNodeB. В LTE базові станції безпосередньо взаємодіють одна з одною через інтерфейс X2 за допомогою транспортної мережі Mobile Backhaul. У класичних мережах 2G/3G обмін даними між базовими станціями здійснюється тільки через контролер, що формує топологію «зірка».

Радіопланування в LTE значно не відрізняється від аналогічного процесу для мереж 3G і включає такі етапи:

- визначення приблизних бюджетів радіоканалів;
- детальне моделювання поширення радіохвиль;
- оптимізація та точне налаштування для кожної базової станції (БС).

У порівнянні з радіобюджетом мереж HSPA (3G), LTE демонструє перевагу приблизно в 2 дБ завдяки зниженню рівня інтерференції. Частотний діапазон 2600 МГц оптимально підходить для густозаселених міських територій, оскільки дозволяє розміщувати більшу кількість стільників на обмеженій площі, що забезпечує високу швидкість передачі даних навіть при великій кількості користувачів. Натомість, частоти 800 МГц більш доцільні для передмістя та сільської місцевості, оскільки вони забезпечують ширше покриття, хоча й з меншою щільністю обслуговування на одиницю площі. У таких регіонах високі швидкості передачі даних не є критично необхідними через меншу кількість абонентів.

Після отримання оператором частот і проходження всіх необхідних процедур погодження, одним із ключових аспектів стає транспортна інфраструктура. Найбільш вигідно, якщо у оператора вже існує транспортна IP/MPLS (Multiprotocol Label Switching) мережа достатньої пропускної здатності. У мережах 2G/3G для транспорту часто використовують SDH (TDM) мережі, як показано на рис. 1.8.

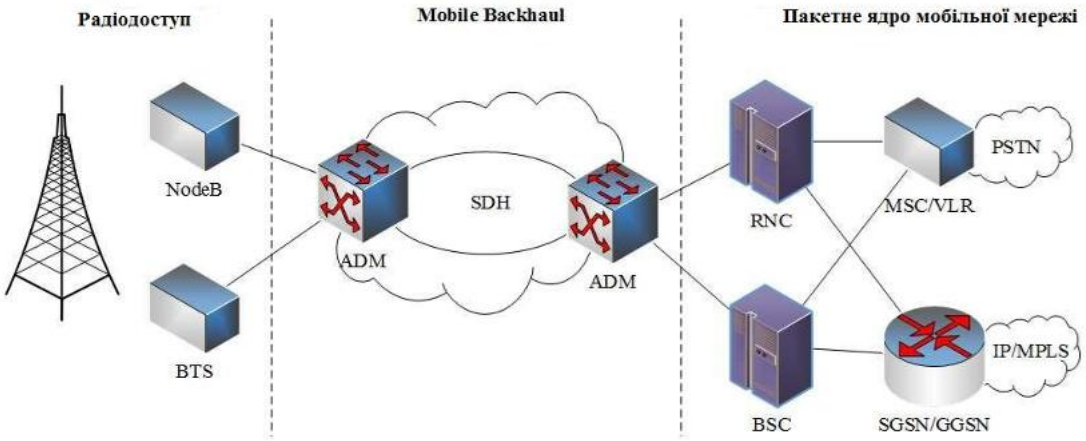



Рис. 1.8 Схема мобільної мережі з TDM Mobile Backhaul

Ємність таких мереж розрахована переважно на передачу невеликих обсягів даних та голосового трафіку. Модернізація подібних мереж часто потребує значних додаткових інвестицій і не завжди забезпечує очікувану гнучкість та масштабованість при збільшенні пропускної здатності.

Основні питання, що виникають при проектуванні мереж Mobile Backhaul для LTE, включають:

- визначення передбачуваних точок підключення базових станцій (БС) та ємності каналів (визначається на етапі радіопланування);
- вибір інтерфейсів для підключення БС до маршрутизатора Cell-Site Router;
- визначення типу LTE-стандарту, передбаченого для впровадження в мережі;
- спосіб забезпечення синхронізації базових станцій.

У цьому випадку ключовим фактором є розташування майбутніх або вже наявних точок Mobile Backhaul, оскільки від цього залежить визначення необхідної пропускної здатності каналів та їх маршрутизація. Проте прокладання кабельних ліній не завжди можливо, тому альтернативним рішенням часто виступають пакетні радіорелейні лінії (РРЛ) типу «точка-точка», сучасні варіанти яких забезпечують швидкість передачі даних по радіоканалу до 1 Гбіт/с і більше.

На сьогодні актуальними є LTE FDD та LTE TDD. Основна різниця між ними полягає у способі поділу каналів на прийом і передачу. LTE FDD використовує дві несучі частоти для прийому та передачі, тоді як LTE TDD працює на одній несучій частоті з часовим поділом. Це має ключове значення для синхронізації базових станцій: LTE FDD потребує лише частотної синхронізації, тоді як LTE TDD вимагає фазової синхронізації. Технологія LTE Advanced передбачає використання фазової синхронізації, тому доцільно одразу планувати її впровадження з урахуванням майбутнього розвитку мережі.

Загальні відомості про об’єкт проектування.

Місто Шостка розташоване в північній частині Сумської області України та є важливим адміністративним і промисловим центром регіону. Населений пункт має вигідне транспортно-географічне положення, оскільки через нього проходять залізничні сполучення за напрямами Новгород-Сіверський – Шостка – Вороніж – Київ, а також розгалужена мережа автомобільних шляхів. Зокрема, місто з’єднане з навколишніми населеними пунктами автомобільними дорогами категорій Т1908, Т1912, Т2502 та Р65. У межах міста функціонує залізнична станція «Шостка», що забезпечує як вантажні, так і пасажирські перевезення.

Площа території Шостки становить близько 43,7 км². Кількість мешканців міста оцінюється приблизно в 74 тисячі осіб, що відповідає середній густоті населення на рівні понад 1700 осіб на квадратний кілометр. Абсолютна висота місцевості складає близько 154 м над рівнем моря, що створює сприятливі умови для розміщення телекомунікаційної інфраструктури та радіотехнічних об’єктів.

Міська інфраструктура є достатньо розвиненою та охоплює основні соціальні й виробничі сфери. Освітній сектор представлений мережею загальноосвітніх і спеціалізованих навчальних закладів, а також установами професійно-технічної та вищої освіти. Загалом у місті функціонують понад двадцять закладів освіти різних рівнів підготовки.

Система охорони здоров’я включає кілька лікарень і профільних медичних установ, які надають первинну та спеціалізовану допомогу населенню різних вікових категорій. Культурна інфраструктура охоплює бібліотечні заклади,

будинки культури та музичні школи, що сприяє активному суспільному життю міста.

Інформаційний простір Шостки формується за рахунок місцевих друкованих видань, телерадіокомпаній, інтернет-провайдерів і представництв основних операторів мобільного зв'язку. Крім того, на території міста розташована значна кількість промислових підприємств та організацій різних форм власності, зокрема підприємства хімічної, харчової, енергетичної та машинобудівної галузей, а також комунальні служби міського господарства.

Забудова Шостки переважно характеризується мало- та середньо поверховими житловими і виробничими будівлями, що позитивно впливає на умови поширення радіосигналів. Схеми та цифрові карти міста є відкритими та доступні для використання в процесі проектування телекомунікаційних систем.
Узагальнюючи наведене, можна зазначити, що соціально-економічний розвиток та інфраструктурні особливості міста Шостка зумовлюють потребу у впровадженні сучасних і надійних засобів масової комунікації та передачі інформації.

Супутникове зображення території міста Шостка (Сумська область), показано на рис.1.9.

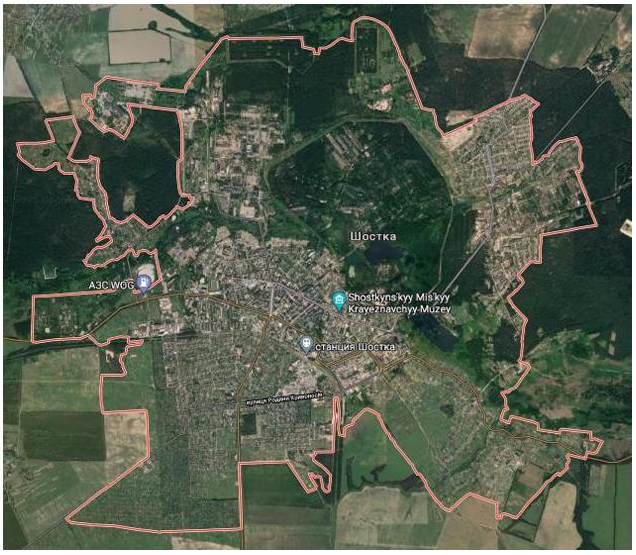



Рис. 1.9 Супутникове зображення території міста Шостка (Сумська область)



Рис. 1.10 Схемотехнічна карта міста Шостка

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка системи бездротового доступу на основі технології LTE для міста Шостка та розробка покращеного алгоритму оцінки якості стільникового покриття. Населення міста становить близько 74 000 осіб, площа – 43,69 км², густота населення – 1717 осіб/км², а середня висота над рівнем моря – 154 м. Проєкт передбачає оптимізацію покриття та пропускної здатності мережі з урахуванням особливостей міської забудови та щільності населення.

# 2 Оптимізація показників якості обслуговування абонентів мобільних мереж

## 2.1. Керування процесами в мобільних телекомунікаційних мережах

Керування процесами в мобільних телекомунікаційних мережах є одним із ключових елементів їх стабільної, ефективної та безпечної роботи. Сучасні стільникові мережі характеризуються складною архітектурою, великою кількістю абонентів і динамічними умовами розповсюдження радіосигналу, що вимагає постійного контролю та оптимізації функціонування мережевих елементів.

Основним завданням керування є забезпечення необхідної якості обслуговування абонентів (QoS), раціональне використання радіоресурсів, підтримка безперервності з'єднань та мінімізація затримок і втрат даних. Для цього в мобільних мережах реалізовано комплекс механізмів, які охоплюють процеси встановлення з'єднання, передачі даних, мобільності користувачів, а також управління трафіком і навантаженням.

Важливою складовою керування є контроль мобільності абонентів, зокрема процедури реєстрації в мережі, перемикання між базовими станціями (handover) та підтримка сеансів зв'язку під час переміщення користувача. Ці процеси виконуються автоматично та непомітно для абонента, що дозволяє зберігати якість зв'язку незалежно від його місця розташування.

Керування ресурсами мережі передбачає динамічний розподіл частотних, часових і потужностних ресурсів між користувачами залежно від типу сервісу, рівня пріоритету та поточного навантаження. Особлива увага приділяється сервісам реального часу, таким як голосові виклики та відеозв'язок, для яких критичними є затримка та стабільність передачі даних.

У сучасних мобільних мережах значну роль відіграють централізовані системи керування та моніторингу, які забезпечують збір статистики, аналіз стану мережі та автоматичне виявлення несправностей. Це дозволяє оперативно реагувати на аварійні ситуації, оптимізувати конфігурації та підвищувати загальну продуктивність мережі.

Таким чином, ефективне керування процесами в мобільних телекомунікаційних мережах є необхідною умовою їх функціонування, оскільки воно забезпечує якісне надання послуг, надійність зв'язку та можливість масштабування мережі відповідно до зростаючих потреб користувачів.

Якість сприйняття послуги абонентом (Quality of Experience, QoE) формується під впливом усіх елементів телекомунікаційного ланцюга «від кінцевого до кінцевого пристрою», зокрема абонентського обладнання, мережевої інфраструктури та сервісних платформ. Водночас рівень QoE значною мірою залежить від суб'єктивних чинників, пов'язаних з особистими очікуваннями користувача, його

досвідом та характером споживаного інформаційного наповнення. Основні чинники, що визначають QoE, наведені на рисунку 2.1.

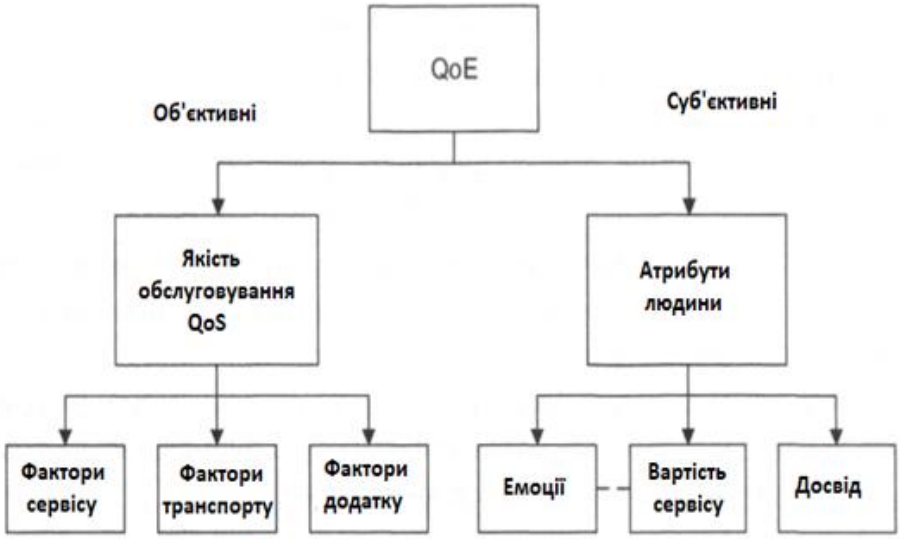



Рис. 2.1. Сукупність факторів, що формують QoE користувача

**Застосування принципів управління якістю обслуговування в мережах LTE надає операторам можливість:**

- **знизити рівень перевантаженості мережевих ресурсів;**
- **покращити суб'єктивне сприйняття якості сервісів користувачами;**
- **підвищити фінансову ефективність за рахунок надання мережевих послуг.**

**До традиційних критичних загроз для рівня якості обслуговування належать такі чинники:**

- **недостатня зацікавленість абонентів у процесах оновлення та розвитку мережі**, що проявляється у небажанні або обмеженій можливості використовувати сучасні абонентські пристрої та нові сервіси;

- **значні фінансові витрати** на придбання чи модернізацію обладнання, необхідного для впровадження інноваційних послуг;
- **скорочення часових інтервалів між виникненням попиту на сервіс та його реалізацією**, зумовлене зростанням динаміки ринкових процесів;
- **ймовірність фрагментованої доставки послуги**, коли її окремі компоненти надходять до користувача несинхронно, що може призводити до тимчасової або аварійної недоступності сервісів;
- **затримки у наданні послуг**, які негативно впливають на сприйняття їхньої якості.

**У межах стандартів 3GPP визначено перелік функціональних можливостей, призначених для забезпечення обслуговування та ефективного управління процесами тарифікації.**

**У мережах LTE реалізація управління якістю обслуговування здійснюється оператором на основі контролю параметрів QoS для послуг передачі даних, які визначаються параметрами абонентської підписки. Відповідна інформація зберігається у базі профілів підписки (Subscription Profile Repository, SPR). Зазначений підхід загалом відповідає принципам керування якістю обслуговування, що застосовувалися в мережах другого та третього поколінь.**

**Водночас архітектура LTE передбачає, що після надходження першого пакета даних від абонентського термінала трафік спрямовується до пакетної мережі передачі даних (Packet Data Network, PDN). На цьому етапі вузол PCRF, який відповідає за політики управління мережею та процеси тарифікації, здійснює перевірку класу якості сервісу для запитаної послуги в межах наскрізного з'єднання між кінцевими користувачами.**

Залежно від класу якості сервісу, який запитується, вузол PCRF має можливість застосовувати різні набори параметрів для процесу передавання даних. Особливістю механізмів управління в мережах LTE є здатність одного

абонентського пристрою (UE) одночасно підтримувати значну кількість активних сервісів у наскрізному з'єднанні «кінцевий користувач – кінцевий користувач». При цьому кожна з таких послуг характеризується власним, індивідуально визначеним профілем обробки та передавання трафіку в мережі. **У мережі LTE один абонентський пристрій (UE) здатний одночасно встановлювати до 256 каналів радіодоступу E-UTRAN (E-UTRAN Radio Access Bearer, E-RAB) для передавання даних між терміналом і шлюзом SGW із використанням протоколів радіодоступної мережі. Для порівняння, у мережах третього покоління кількість підтримуваних каналів обмежується п'ятнадцятьма.**

**До основних параметрів, що формують рівень якості обслуговування в мережах LTE, належать:**

У мережах **LTE** виділяють дев'ять класів обслуговування, кожен із яких має свій **ідентифікатор якості сервісу (QoS)**. Для передачі даних використовуються наскрізні канали, що поділяються на дві категорії залежно від наданих ресурсів:

- **Канали з гарантованою пропускною здатністю (GBR)** – забезпечують певну мінімальну швидкість передачі для конкретного трафіку;
- **Канали з негарантованою пропускною здатністю (Non-GBR)** – швидкість передачі даних може змінюватися в залежності від навантаження мережі.

Кожен **QCI-ідентифікатор** для GBR та Non-GBR визначає певний **пріоритет обробки пакетів** у мережі, де **пріоритет 1** відповідає найвищому рівню обслуговування. Наприклад, передача даних через GBR вимагає від **eNodeB** динамічного управління ресурсами. Послуги з QCI 1, 2, 3 та 7 забезпечують обслуговування в **режимі реального часу** за протоколом UDP/IP, причому ключовим обмеженням для них є **допустима затримка доставки пакетів**. У **мережах LTE**, аналогічно мережам **UMTS**, використовується концепція **наскрізного каналу (End-to-End Bearer)**, який забезпечує передачу даних між двома кінцевими точками, наприклад, між двома **UE** або між **UE** і будь-яким

Інтернет-сервером. Цей наскрізний канал складається з кількох складових на різних рівнях та в різних вузлах мережі: **радіоканал (Radio Bearer)**, **зовнішній канал (External Bearer)** та інших. Зокрема, існує канал, який передає **параметри якості обслуговування** між **UE** та **PGW**. У специфікаціях LTE такий канал називається **EPS Bearer**. Для конкретної послуги, що передбачає передачу даних, створюється **наскрізний канал (bearer)** із відповідним **QCI**. Для дотримання вимог специфікацій LTE **QoS для наскрізних каналів** визначають за наступними параметрами:

*PDB (Packet Delay Budget) – затримка передачі пакетів даних* визначає максимально допустимий односторонній час затримки пакета під час передачі між *UE* та модулем *PCEF (Policy and Charging Enforcement Function)*. PCEF відповідає за застосування керуючих політик, отриманих від вузла *PCRF (Policy and Charging Rules Function)*. Іншими словами, PDB встановлює верхню межу часу, протягом якого пакет повинен дістатися до точки контролю, забезпечуючи QoS для сервісів із вимогами щодо затримки. Параметр **PDB (Packet Delay Budget)** використовується для організації планування черг та управління функціями мережі на рівні протоколу з'єднань. Він визначає максимальну затримку передачі пакетів з імовірністю 98 %.

Існують два основні класи якості обслуговування в LTE:

- **Non-GBR (без гарантованої швидкості)** – абонент не має фіксованої швидкості передачі; ресурси мережі виділяються за принципом *Best Effort* («максимально можливе зусилля»), тобто залежно від наявності вільної пропускної здатності.
- **GBR (з гарантованою швидкістю)** – забезпечує користувачу гарантовану мінімальну швидкість передачі даних відповідно до встановленого QCI.

Таким чином, PDB та класи GBR/Non-GBR дозволяють ефективно керувати ресурсами мережі та забезпечувати потрібний рівень якості обслуговування для різних типів трафіку.

Цей клас якості обслуговування (**GBR QCI**) призначений для послуг, які потребують гарантованої швидкості передачі даних. Для забезпечення таких послуг мережа резервує необхідні ресурси, що дозволяє підтримувати стабільну пропускну здатність.

Параметр **PERLR (Packet Error Loss Rate)** визначає надійність передачі даних у мережі. Він характеризує максимально допустиму кількість пакетів, які можуть бути втрачені під час передачі по LTE-мережі через помилки прийому. Контроль PERLR дозволяє підтримувати необхідний рівень якості обслуговування та забезпечує ефективне планування мережевих ресурсів для гарантованих каналів передачі.

Досягнення заданих значень **PERLR** можливе лише при передачі пакетів за протоколом **TCP/IP**. За замовчуванням трафік TCP/IP, який включає завантаження файлів з Інтернету, електронну пошту, відео та інші непривілейовані послуги, обробляється через **QCI 8 та 9**.

Варто зазначити, що **сигнальний трафік має найвищий пріоритет**, що забезпечує своєчасне керування мережею. Конфігурація протоколів рівня з'єднань, таких як **RLC та HARQ** у мережі радіодоступу LTE, виконується відповідно до встановлених значень **PERLR**, щоб гарантувати необхідну надійність передачі даних і відповідність QoS.

Значення **PERLR** встановлюється однаково для обох напрямків передачі даних — **вгору та вниз**. Специфікація **QCI** гарантує уніфіковану обробку потоків даних одного класу незалежно від виробника обладнання, що забезпечує сумісність різних компонентів мережі.

Контроль дотримання необхідних якісних характеристик на **радіоінтерфейсі** здійснює елемент мережі, відповідальний за управління радіоресурсами. Він починає виконувати цю функцію з моменту підключення абонентського терміналу, забезпечуючи належний рівень QoS протягом усього сеансу зв'язку.

У мережах LTE для передачі пакетів даних встановлюються **черги з пріоритетами**, які визначають порядок обробки пакетів. Абонентський термінал (UE) отримує від **eNodeB** призначені пріоритети для передачі даних у **висхідному напрямку** на основі класу обслуговування відповідної послуги.

Маршрутизація та управління IP-сесіями в LTE здійснюються вузлом **PCRF (Policy and Charging Rules Function)**. Він визначає параметри для послуг передачі даних у мережі **EPC/SAE** (EPC Bearer Service / SAE Bearer Service), забезпечуючи з'єднання між абонентами з урахуванням необхідної швидкості передачі, класу IP-трафіку, затримок та пріоритетів пакетів.

Сервісний шлюз **SGW** відповідає за **наскрізну передачу пакетів даних у площині користувача** (трафік абонента) у висхідному та низхідному напрямках. При цьому використовуються значення **Differentiated Services Code Point (DSCP)**, які формуються на основі **QCI**, призначеного для конкретної послуги в системі **EPC/SAE**.

Взаємодія SGW з вузлом **PCRF** відбувається через інтерфейс **Gx**, по якому передаються команди із зазначеними параметрами, такими як пріоритет пакетів, швидкість передачі даних та інші параметри **QoS**. Ці значення визначаються **профілем підписки абонента** для конкретних послуг. Таким чином, реалізуються функції управління якістю обслуговування (QoS) і забезпечується необхідний рівень передачі даних для абонентів.

До основних завдань послуг передачі даних у мережах **E-UTRAN** та **EPC/SAE** належать:

- **Управління передачею пакетів даних**, орієнтоване на конкретний ланцюг «кінцевий абонент – кінцевий абонент»;
- **Стиснення службової інформації протоколу IP** для підвищення ефективності передачі даних;

- **Шифрування переданих даних**, що забезпечує конфіденційність інформації;
- **Надання абонентському терміналу (UE) інформації про параметри QoS**, а також організація мультиплексування даних, що передаються UE.

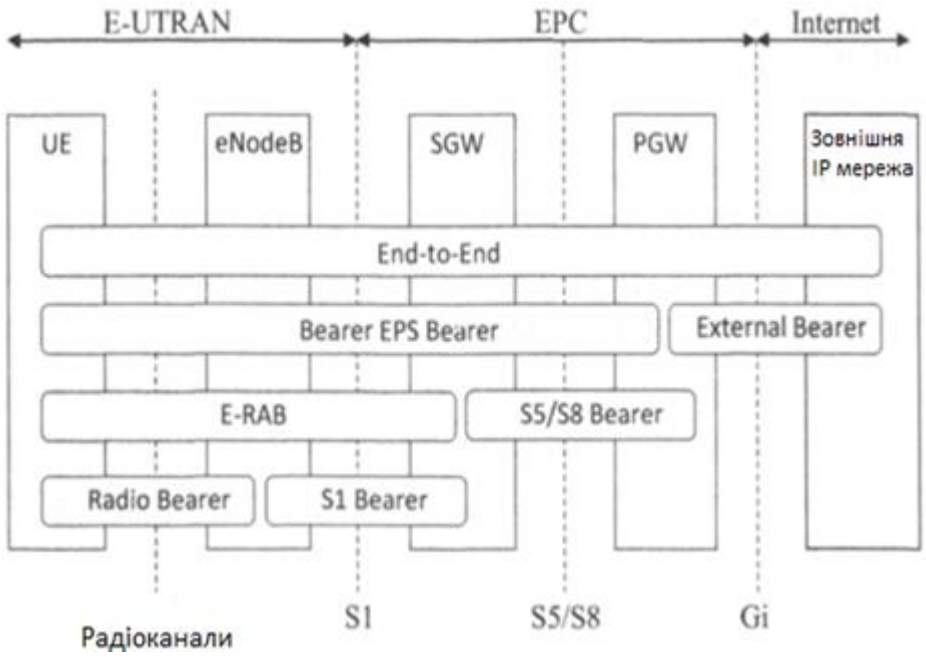



Рис. 2.2 Архітектура організації наскрізних каналів у **мережах LTE/EPC (Evolved Packet System)**

Архітектура організації наскрізних каналів у **мережах LTE/EPC (Evolved Packet System)** побудована таким чином, щоб забезпечити передачу даних між абонентом (UE) та мережею або між двома абонентами із заданими параметрами **QoS** (Quality of Service). Основні компоненти та принципи архітектури:

1. Наскрізний канал (End-to-End Bearer)

Це логічний канал, що забезпечує передачу пакетів даних між UE і мережею (наприклад, між UE і сервером Інтернету).

- Складається з кількох складових на різних рівнях:
    - **Радіоканал (Radio Bearer, RB)** – забезпечує передачу між UE та базовою станцією eNodeB.
    - **Зовнішній канал (External Bearer)** – відповідає за передачу даних між мережею радіодоступу та ядром EPC.
    - **EPS Bearer** – наскрізний канал від UE до PGW, який визначається QCI (QoS Class Identifier) і забезпечує певні параметри QoS.

2. Параметри QoS наскрізних каналів

Для організації наскрізних каналів визначені такі основні параметри:

3. Розподіл каналів у мережі

4. Принцип організації

1. Для кожного сервісу або потоку даних створюється окремий **EPS Bearer** з відповідним QCI.
2. Канал може бути **GBR** (з гарантованою швидкістю) або **non-GBR** (Best Effort).
3. UE отримує інформацію про QoS, мережа контролює пріоритети та доступ до ресурсів.
4. Під час передачі дані проходять через радіоканал, ядро EPC та зовнішні мережі, зберігаючи QoS-параметри наскрізного каналу.

Приклад організації послуг передачі даних в мережі LTE (дві послуги передачі типу "точка-точка") зображений на рис.2.3.

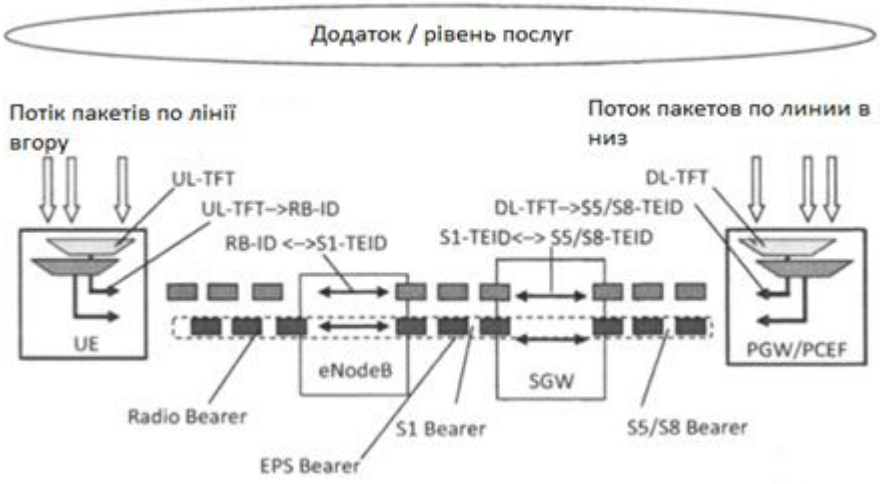



Рис. 2.3 Архітектура сервісу EPC bearer

EPS Bearer – це логічний канал, який забезпечує транспорт абонентського трафіку між **UE** і **PGW** у мережі LTE/EPC. Для кожного EPS Bearer встановлюється набір параметрів **QoS**, що визначають його характеристики та пріоритет у мережі:

- **Бітова швидкість (Bit Rate)** – встановлює гарантовану або максимальну швидкість передачі даних;
- **Затримка (Latency / Packet Delay Budget, PDB)** – максимально допустимий час, протягом якого пакет може проходити від UE до мережі;
- **Допустимий коефіцієнт помилок (Packet Error Loss Rate, PELR)** – визначає максимально допустиму кількість втрачених пакетів;
- **Пріоритет (Allocation and Retention Priority, ARP / QCI)** – визначає черговість обробки та виділення мережевих ресурсів для конкретного каналу.

Таким чином, EPS Bearer гарантує передачу даних з необхідною **якістю обслуговування**, забезпечуючи підтримку різних типів трафіку (голос, відео, дані) із заданими параметрами QoS.

На рисунку 2.3 показано процес передачі трафіку через різні складові **EPS Bearer**. У **UE** трафік розподіляється між різними **Radio Bearers** відповідно до **Uplink Traffic Flow Template (UL-TFT)**. Ці шаблони використовують інформацію з **IP-заголовка** пакетів, таку як:

- IP-адреса джерела та адресата;
- номери TCP/UDP портів;
- інші параметри, що дозволяють віднести пакет до конкретного потоку.

Після цього пакети надходять у відповідний **Radio Bearer** з присвоєним **Radio Bearer ID (RB-ID)**.

Далі трафік передається на **eNodeB** через інтерфейс **S1**, де він інкапсулюється в тунель із **Tunnel Endpoint Identifier (TEID)**, що відповідає **RB-ID**. Таким чином, для кожного Radio Bearer на S1 інтерфейсі формується окремий тунель, забезпечуючи правильну маршрутизацію та ізоляцію потоків трафіку всередині мережі LTE.

Далі абонентські пакети інкапсулюються у зовнішні **IP-пакети**, у яких додається поле **Differentiated Services Code Point (DSCP)** для визначення рівня пріоритету обслуговування мережевого трафіку. Аналогічний процес відбувається в **SGW**: пакети надходять з певного **S1-тунелю**, після чого передаються у тунель на **S5** або **S8 інтерфейсі** в напрямку до **PGW**. Це забезпечує наскрізну маршрутизацію трафіку абонента та збереження параметрів **QoS** на всіх ділянках EPS Bearer.

Слід зазначити, що під час передачі даних між **SGW** та **PGW** значення **DSCP** може відрізнятися від того, що використовувалося на **S1 інтерфейсі**. Це можливо через застосування іншого маркування трафіку, проте при цьому зберігається відповідність **класу якості обслуговування (QoS)**. При передачі трафіку **у напрямку до абонента (downlink)** ці процедури виконуються аналогічно, за винятком того, що **розподіл потоку між різними класами QoS здійснює PGW**.

У цьому випадку використовується **шаблон потоку трафіку для лінії вниз (Downlink Traffic Flow Template, DL-TFT)**. В залежності від розташування джерела та адресата трафік передається через інтерфейс **S5** або **S8** із застосуванням відповідного **Tunnel Endpoint Identifier (TEID)**. Зіставивши **TEID** та мітку **DSCP**, трафік надходить на **SGW**, який перенаправляє його у відповідний тунель на **S1 інтерфейсі** для подальшої доставки абоненту. З тунелю трафік надходить до **eNodeB**, який, виходячи з **класу якості обслуговування (QCI)**, направляє його у відповідний **Radio Bearer**. Пакет отримує пріоритет у черзі, маркується **ідентифікатором Radio Bearer (RB-ID)** і після цього передається кінцевому користувацькому обладнанню (**UE**).

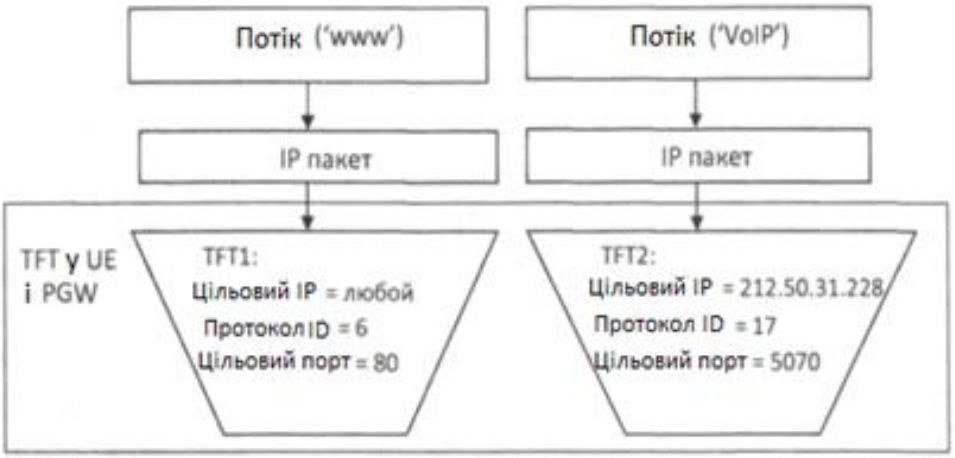



Рис. 2.4 Приклад використання TFT

Функціональні обов’язки елементів мережі PGW, eNodeB та UE можна переказати таким чином:

**PGW (Packet Gateway) виконує:**

**eNodeB виконує:**

- Отримує дані про **GBR та ARP абонента** і виділяє радіоресурси згідно з пріоритетом; при нестачі ресурсів застосовує алгоритм ARP.
- Реалізує **Rate Policing** на радіоінтерфейсі: спочатку абоненти, що не досягли GBR, потім ті, що досягли GBR, але не перевищили MBR.

- **Управляє чергами (Queue Management)** – розподіляє трафік між різними чергами.
- **Забезпечує порядок проходження пакетів** по UL та DL (UL/DL Scheduling).
- Визначає розмір пакетів та передає їх на рівні L1/L2.
- Виконує **mapping QCI в DSCP** для сумісності з транспортною мережею.

**UE (User Equipment) виконує:**

- Фільтрацію пакетів для **uplink** та їх розподіл між Radio Bearers.
- Побудову черг для передачі даних (**Queue Management**).

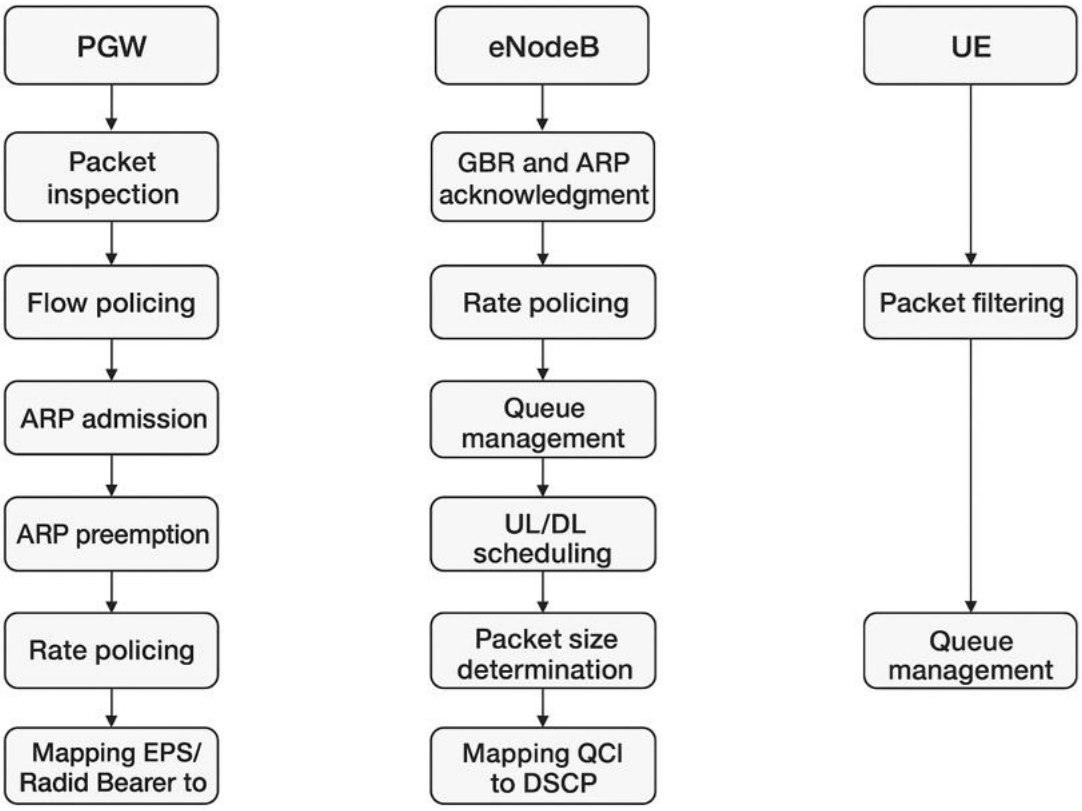



Рис. 2.5 Схема работи элементів мережі LTE

Вузол PCRF здійснює контроль доступу користувача (UE) до контенту та налаштувань якості передачі даних, а також ініціює процеси тарифікації трафіку абонента. При цьому можуть використовуватися різні підходи до нарахування:

- тарифікація на основі обсягу переданих даних;
- нарахування за тривалістю сеансу з’єднання;
- комбінований підхід, що враховує одночасно обсяг трафіку та час з’єднання;
- система тарифікації за шкалою споживаного трафіку;
- моделі передплачених послуг або з встановленими пороговими обмеженнями.

Розглянемо ключові етапи алгоритму організації виділених наскрізних каналів (Dedicated Bearer Activation), представлені на рис. 2.6.

Параметри наскрізного каналу, такі як наявність необхідних ресурсів, характеристики QoS і тарифні умови обслуговування, визначає PCRF:

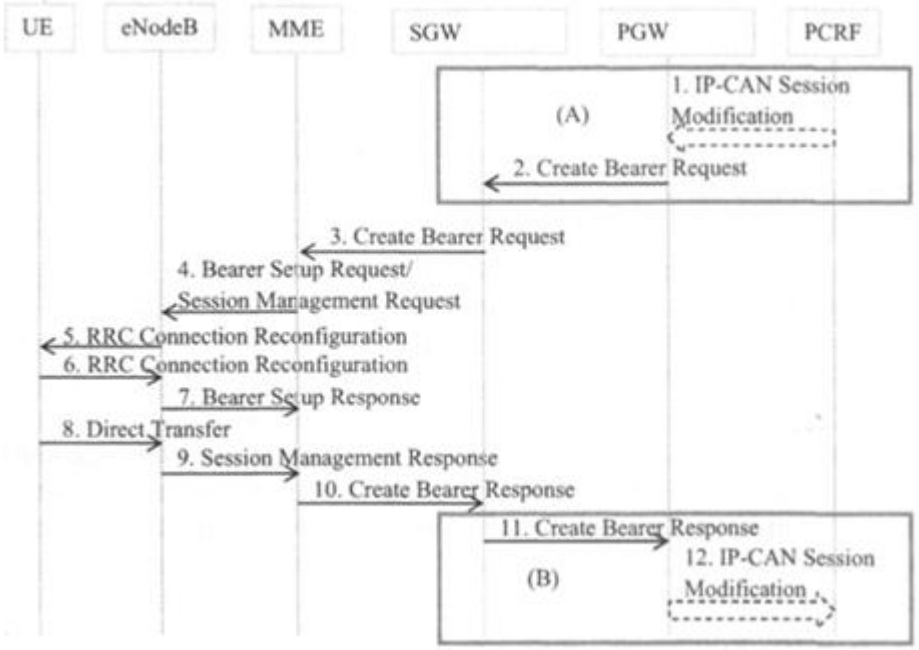



Рис. 2.6 Процедура активації наскрізного каналу

Під час виконання процедури **Bearer Modification з оновленням QoS каналу** можливе коригування таких характеристик наскрізного каналу:

Слід зауважити, що в процесі **Bearer Modification з оновленням QoS каналу** допускається зміна таких параметрів, як **QCI** та **ARP** для наскрізного каналу за замовчуванням, проте ця процедура не дозволяє перетворювати канал із типу **GBR** на **non-GBR** і навпаки [20]. Варто відзначити, що алгоритми цієї процедури та **Dedicated Bearer Activation** мають подібну структуру та послідовність дій. Основні відмінності цієї процедури полягають у призначенні та складі обмінюваних повідомлень:

На кроках 6–12 цієї процедури надсилаються підтвердження про виконання отриманих команд, аналогічно тому, як це відбувається в алгоритмі **Dedicated Bearer Activation**.

UE має можливість:

- ініціювати створення нового наскрізного каналу з певним класом QoS для нової послуги;
- змінювати пакетні фільтри наявного каналу;
- запускати процедуру деактивації каналу.

Для цього в мережі повинно бути встановлено IP-з’єднання між UE та PGW. У разі зміни пакетних фільтрів UE передає параметр **TAD (Traffic Aggregate Description)**, який містить ідентифікатори фільтрів та відповідну інформацію про них.

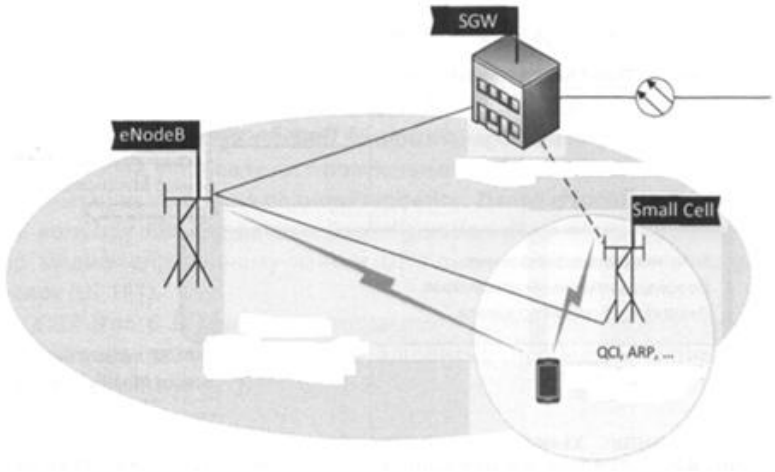


Рис. 2.7 UE працює с макро eNodeB і Small Cell

Метод, за якого UE одночасно взаємодіє як з макро eNodeB, так і з **Small Cell**, відомий як технологія **Coordinated Multi-Point (CoMP)**. Використання цього підходу дозволяє підвищити ефективність застосування частотного спектра та покращує загальну продуктивність мережі. **Основні завдання оператора для підвищення якості обслуговування абонентів**

На завершення наведено узагальнений перелік ключових завдань, які оператор вирішує для забезпечення високої якості обслуговування користувачів.

**Якість встановлення обладнання:**

- правильність та надійність монтажу при підключенні;
- поліпшення характеристик абонентських пристроїв;
- можливість підключення за один візит до клієнта.

**Якість мережевих послуг:**

- постійний моніторинг стану наданих сервісів;
- своєчасне виявлення та вирішення потенційних проблем користувачів;
- мінімізація кількості мережевих інцидентів.

**Якість і швидкість обслуговування:**

- забезпечення доступності сервісів для абонентів;
- ефективність обробки звернень і запитів;
- покращення процесу продажів та утримання клієнтів;
- розвиток каналів дистанційного самообслуговування.

**Якість усунення технічних проблем:**

- скорочення часу вирішення інцидентів;
- вдосконалення процесів технічної підтримки;
- забезпечення стабільного електропостачання обладнання.

**Якість роботи зі скаргами:**

- контроль повторних звернень;
- аналіз причин відтоку клієнтів та вжиття заходів для їх зменшення.

## 2.1 Послуги, що надаються в мережах LTE

Мережі **LTE (Long Term Evolution)** забезпечують широкий спектр послуг для користувачів завдяки високій пропускній здатності та низькій затримці передачі даних. Основні категорії сервісів включають:

1. **Передача даних у пакетному режимі** – забезпечує доступ до Інтернету, обмін файлами, роботу хмарних сервісів та інших додатків, що потребують високошвидкісного з'єднання.
2. **Голосові послуги через IP (VoIP/VoLTE)** – дозволяють здійснювати голосові дзвінки безпосередньо через мережу LTE, забезпечуючи гарантовану якість обслуговування (QoS).
3. **Мультимедійні сервіси** – включають відеодзвінки, потокове аудіо та відео, обмін мультимедійними повідомленнями (MMS), забезпечуючи інтерактивну роботу користувачів у режимі реального часу.
4. **Інтеграція з корпоративними та сторонніми мережами** – підтримка VPN, доступу до корпоративних ресурсів, взаємодія з іншими мобільними мережами та сервісами VoIP.
5. **Послуги із забезпечення якості обслуговування (QoS)** – LTE дозволяє диференціювати трафік за класами обслуговування (QCI), що гарантує пріоритет передачі для критично важливих сервісів.

Використання LTE забезпечує одночасну підтримку декількох сервісів з різними вимогами до QoS, що підвищує ефективність роботи мережі та покращує якість обслуговування абонентів.

Сучасні та перспективні мережі мобільного зв'язку повинні забезпечувати надання повного спектра послуг, включаючи передачу та прийом голосу, мультимедійні сервіси, доступ до Інтернету та підтримку функціоналу різноманітних додатків. При цьому сервіси повинні надаватися з необхідним рівнем якості та забезпечувати сумісність із іншими системами. Однією з ключових особливостей мереж LTE є здатність одночасно підтримувати роботу кількох додатків із різними вимогами до якості обслуговування (QoS).

Можна виділити наступну класифікацію послуг мобільного зв’язку:

- **Основні послуги** – сервіси, що надаються виключно з використанням ресурсів радіомережі та ядра мережі оператора;
- **Додаткові послуги** – сервіси, які надаються поряд із основними та забезпечують розширений функціонал завдяки спеціалізованим сервісним платформам.

Наступним кроком у розвитку голосових послуг у мережах LTE стала технологія **VoLTE (Voice over LTE)**, яка функціонує на основі підсистеми мультимедійних повідомлень (**IP Multimedia Subsystem, IMS**). Завдяки VoLTE абоненти можуть здійснювати голосові дзвінки безпосередньо через мережу LTE, не використовуючи інфраструктуру 2G або 3G. По суті, VoLTE є варіантом **IP-телефонії (VoIP)**, але з підтримкою гарантованого рівня якості обслуговування (**QoS**). Це забезпечується дотриманням єдиного стандарту якості протягом усього шляху передачі IP-трафіку, що гарантує **End-to-End QoS (E2E QoS)**. Для організації **VoLTE** необхідно підтримувати два класи QoS (**QCI**): 1 і 5, які відповідають за передачу голосових даних та сигнальних IMS-повідомлень відповідно.

1. З’єднання з **QCI 5** використовується для передачі керуючих повідомлень до підсистеми IMS з метою встановлення або розриву сесії при передаванні голосу. Для цього застосовується **Session Initiation Protocol (SIP)**. Керуючі повідомлення передаються через канал типу **non-GBR** з підвищеним пріоритетом. При цьому встановлюються високі вимоги до надійності передачі, що забезпечуються використанням режиму підтверджень на рівні управління радіоз’єднанням (**Radio Link Control, RLC**) [17]. Важливо зазначити, що для такого з’єднання не застосовується механізм **Robust Header Compression (ROHC)**.
2. Голосові дані передаються через з’єднання з **QCI 1** без підтверджень, із застосуванням стиснення заголовків **ROHC** та стеку протоколів

**RTP/UDP/IP** (також можливий варіант **RTCP/UDP/IP**). Тут **RTP (Real-Time Transport Protocol)** забезпечує передачу даних у реальному часі, а **RTCP (Real-Time Control Protocol)** контролює передачу, працюючи спільно з RTP.

**IMS (IP Multimedia Subsystem)** є базовою підсистемою мультимедійних сервісів у мережах LTE, яка відповідає за управління та координацію передачі пакетів даних абонента, включаючи голос, відео, аудіо та текстові повідомлення. Вона також забезпечує резервування мережевих ресурсів, маршрутизацію IP-пакетів у реальному часі, а також підтримує взаємодію з серверами додатків, системами управління мережею та білінговими системами оператора.

Підсистема **IMS** надає абонентам мереж LTE широкий спектр сервісів, включаючи телефонні послуги, обмін короткими, мультимедійними та миттєвими повідомленнями. Вона також забезпечує інтеграцію мереж LTE з іншими мережами, зокрема мережами рухомого радіотелефонного зв'язку (**PLMN**) та мережами **VoIP**. Для забезпечення безшовної передачі голосових послуг у рамках IMS використовується технологія **SRVCC** (Single Radio Voice Call Continuity).

Серед ключових особливостей архітектури **IMS** варто виділити такі:

- багаторівнева та диференційована структура мережі;
- незалежність від типу доступу, що дозволяє операторам і сервіс-провайдерам реалізовувати конвергенцію між фіксованими та мобільними мережами;
- підтримка мультимедійного обміну інформацією в реальному часі (голос, відеодзвінки) та обміну даними між користувачами й автоматизованими системами;

- інтеграція додатків як реального, так і відкладеного часу (наприклад, потокові сервіси та чати);
- можливість взаємодії різних сервісів, таких як сервіси присутності (**Presence**) або миттєвого обміну повідомленнями (**Instant Messaging**);
- забезпечення одночасного надання кількох сервісів у межах одного сеансу або організації декількох синхронізованих сеансів одночасно.

# 3 ОЦІНКА ЯКОСТІ ТА КЛЮЧОВИХ ПАРАМЕТРІВ СТІЛЬНИКОВОГО ПОКРИТТЯ

## 3.1 Розробка алгоритму оцінки якості стільникового покриття

Аналізуючи джерела [6, 15–18], можна зробити висновок, що проєктування мережі радіодоступу LTE вимагає специфічного підходу, який відрізняється від методик, що застосовуються для мереж GSM та CDMA. При розробці необхідно враховувати новий принцип організації багатостанційного доступу на основі технології OFDM. Крім того, стандарт LTE передбачає використання двох типів дуплексування – частотного та часового, а впровадження технології MIMO додає особливості при плануванні частотно-територіальної структури мережі радіодоступу.

Проведений аналіз літератури [6, 15–18] дозволяє виділити основні етапи проєктування мережі радіодоступу 4G на прикладі стандарту LTE. При цьому слід керуватися ключовими принципами сучасного мережевого проєктування: розширення частотного спектра бездротових систем; врахування специфіки частотно-територіального планування в різних типах забудови – щільній, середньої щільності, рідкій та відкритих територіях; інтеграція новітніх технологій для підтримки високошвидкісного радіозв'язку (OFDM, MIMO); а також контроль параметрів пропускної здатності мережі та одночасної кількості обслуговуваних абонентів.

Приклад алгоритму оцінки якості, що відображає основні етапи проєктування мережі радіодоступу 4G LTE, наведено нижче:

Етап 1: Аналіз наявної мережі.
На початковому етапі проектування слід провести всебічний аналіз існуючої мережі радіозв'язку. Це дозволяє оцінити рівень електромагнітної сумісності між вже діючою інфраструктурою та проектованою мережею.

Етап 2: Вибір типу дуплексного режиму.
На цьому кроці визначається спосіб реалізації дуплексного каналу в проектованій мережі. Вибір типу дуплекса безпосередньо впливає на підбір частотного діапазону для мережі.

Етап 3: Підбір обладнання з необхідними технічними характеристиками. Виходячи з результатів аналізу мережі та економічних факторів, обирається обладнання, яке відповідає технічним вимогам проектованої LTE-мережі.

Етап 4: Розрахунок енергетичного бюджету радіозв'язку.
На основі технічних характеристик обраного обладнання визначаються максимально допустимі втрати сигналу, що дозволяє спроектувати ефективну радіолінію.

Етап 5: Визначення параметрів стільників та кількості базових станцій. Використовуючи дані про енергетичний бюджет, розраховуються радіус покриття та площа стільника. Після цього визначається необхідна кількість базових станцій для забезпечення повного покриття території.

Етап 6: Оцінка пропускної здатності мережі. На завершальному етапі проводиться розрахунок пропускної здатності кожного стільника та визначається кількість абонентів, які можуть одночасно обслуговуватися в одному стільнику та у всій мережі в цілому.

Отже, у цьому розділі представлено алгоритм проектування мережі радіодоступу для мобільних систем четвертого покоління стандарту LTE. На основі запропонованого алгоритму були визначені основні параметри мережі, а також обрано тип і розраховано необхідну кількість обладнання для створення ефективної LTE-інфраструктури.

### 3.2 Розрахунок пропускної здатності мережі

Враховуючи невелику територію міста Шостка та помірну щільність абонентів, базові станції можуть розташовуватися на відносно великій відстані одна від одної, що дозволяє кожному eNB покривати більшу площу. Для задоволення вимог мережі слід обрати відповідний радіочастотний спектр. Згідно з сучасними положеннями, можна використовувати частотний діапазон 880–960 МГц (band 8) з FDD-дуплексом.

Цей варіант частотного діапазону є оптимальним для проектування мережі, оскільки забудова міста переважно низька та середньої поверховості, а нижчі частоти забезпечують кращий радіус покриття сигналу. Це дозволить значно скоротити витрати на будівництво мережі. Площа міста становить 43,69 км², а населення — близько 74 000 осіб. На основі цих даних можна оцінити потенційний обсяг трафіку. Для підвищення точності розрахунків варто визначити частку абонентів, які реально користуватимуться послугами зв’язку, від загальної кількості потенційних клієнтів. Приймаємо значення 40% як максимальну ємність ринку, що дозволяє обчислити приблизну кількість абонентів, зацікавлених у використанні проектованої мережі.

Пропускна здатність або ємність мережі визначається, серед іншого, середніми показниками спектральної ефективності. Саме ці показники

визначають швидкість передачі даних у виділених смугах частот. Спектральна ефективність розраховується як відношення швидкості передачі даних до ширини смуги частот і виражається у біт/с/Гц. Для різних конфігурацій MIMO у випадку частотного дуплексу (FDD) приймається ширина смуги 20 МГц.

# 4 ПРОЕКТУВАННЯ МЕРЕЖІ LTE В ПРОГРАМІ ATOLL

## 4.1 Програмне забезпечення ATOLL

На сучасному етапі існує широкий спектр програмних рішень для проектування бездротових мереж, які дозволяють проводити точні розрахунки покриття, втрат сигналу, швидкості передачі даних та інших критичних параметрів мережі. Провідні світові IT-компанії активно розробляють такі продукти, як RVA, RF3D WiFi Planner, ICS Telecom, Ekahau Site Survey та Atoll. Для реалізації моделювання мережі у цій роботі обрано програмне забезпечення Atoll.

Atoll є мультитехнологічною платформою, що поєднує відкритість, простоту у використанні, масштабованість і високу гнучкість. Вона дозволяє виконувати проектування та оптимізацію мереж на всіх етапах реалізації, забезпечуючи підтримку різних бездротових технологій. Користувачі можуть налаштовувати робочий простір індивідуально під свої потреби та інтегрувати проект з іншими системами.

Програмне забезпечення Atoll підтримує такі технології:

- GSM/GPRS/EDGE;
- UMTS/HSPA;
- CDMA2000 1xRTT/EV-DO;
- LTE;
- TD-SCDMA;
- WiMAX/BWA;
- Мікрохвильові канали передачі даних (Microwave links).

Завдяки цим можливостям, Atoll дозволяє моделювати різноманітні сценарії проектування, включаючи багатопотокові розрахунки, а також автономне або корпоративне керування конфігураціями мережі. Це робить програму ефективним

інструментом для оцінки параметрів роботи мережі та прийняття оптимальних рішень щодо її побудови.

Програмне забезпечення Atoll має низку переваг, які відрізняють його від конкурентів, зокрема:

- розширені можливості проектування мереж завдяки підтримці великої кількості стандартів зв'язку;
- ефективні інструменти для оптимізації мережевих параметрів;
- відкрита архітектура, що забезпечує гнучкість налаштувань;
- сучасні засоби роботи з різними форматами геоданих;
- підтримка багатошарових цифрових моделей;
- інструменти для автоматичного планування стільників та частот;
- широкий вибір бездротових телекомунікаційних систем;
- можливість тонкого налаштування параметрів антени, висоти установки та потужності передавача.

### 4.2 Моделювання мережі в місті Шостка

Одним із ключових етапів проектування мережі мобільного радіозв'язку для абонентського доступу є частотно-територіальне планування. Цей процес передбачає визначення топології мережі, вибір оптимальних місць розташування базових станцій та розробку схеми розподілу радіоканалів для кожної БС. Для досягнення максимальної точності розрахунків необхідно враховувати рельєф міської території, тому при моделюванні мережі використовуються карти висот Шостки. Використання рельєфних карт дозволяє враховувати перепади висот та інші особливості місцевості, що істотно впливає на покриття сигналом та якість роботи мережі [5].

Для отримання детальної інформації про висоти місцевості доцільно скористатися онлайн-сервісом USGS Earth Explorer (https://earthexplorer.usgs.gov/), який надає можливість завантаження цифрових моделей рельєфу для обраної

території. Процес вибору конкретної ділянки для завантаження даних продемонстровано на рис. 4.1.

Використання точних цифрових карт рельєфу є основою для подальшого моделювання покриття, розрахунку втрат сигналу та оптимізації розташування базових станцій, що дозволяє забезпечити високий рівень якості обслуговування абонентів у місті Шостка.

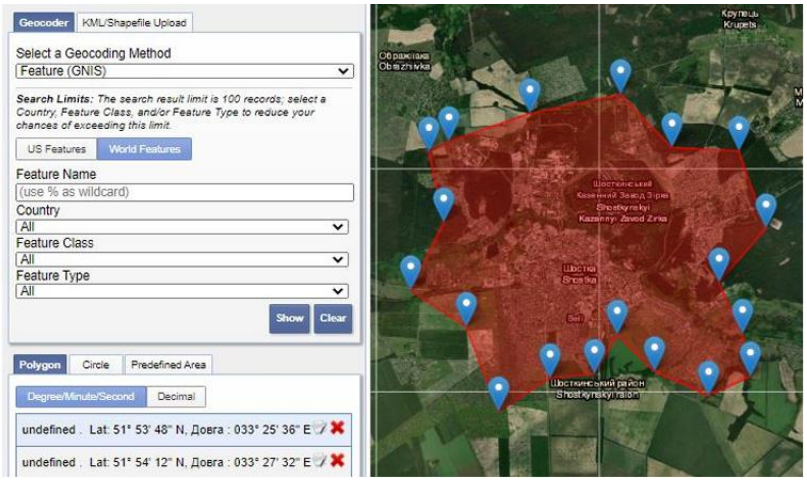



Рис. 4.1 Вибір необхідної місцевості

Після визначення необхідної ділянки слід завантажити карту рельєфу з даними про висоти, що забезпечує більш точне моделювання мережі LTE в умовах, наближених до реальних. Оскільки Atoll не підтримує безпосередньо цей формат файлу, його необхідно попередньо конвертувати за допомогою програмного забезпечення GlobalMapper. Ця програма широко застосовується в картографії та обробці геоданих і підтримує великий спектр форматів. Після конвертації карта рельєфу набуває форми, представленої на рис. 4.2.

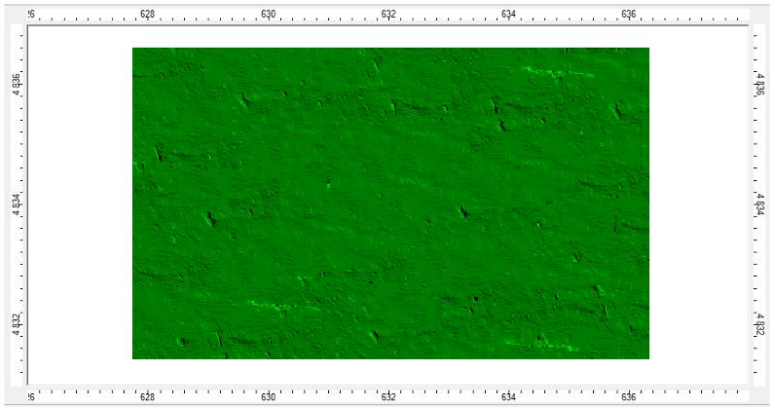


Рис. 4.2. Додавання схемотехнічної карти міста

Після отримання цифрової моделі рельєфу міста Шостка наступним етапом є інтеграція схемотехнічної карти міста у середовище проектування мережі. Використовуючи функціонал програмного забезпечення Atoll, карта автоматично накладається на рельєфну модель з точним географічним позиціонуванням завдяки координатній прив’язці.

Такий підхід дозволяє точно враховувати топографію та наявні об’єкти інфраструктури при розташуванні базових станцій, визначенні напрямків антен та зон покриття. Використання геоприв’язаної картографії забезпечує високий рівень точності прогнозування параметрів сигналу, зменшуючи ризик втрат зв’язку у критичних точках міста.

Остаточний результат інтеграції рельєфу та схемотехнічної карти наведено на рис. 4.3, що дозволяє розпочати безпосереднє планування та оптимізацію розміщення базових станцій LTE для міста Шостка.

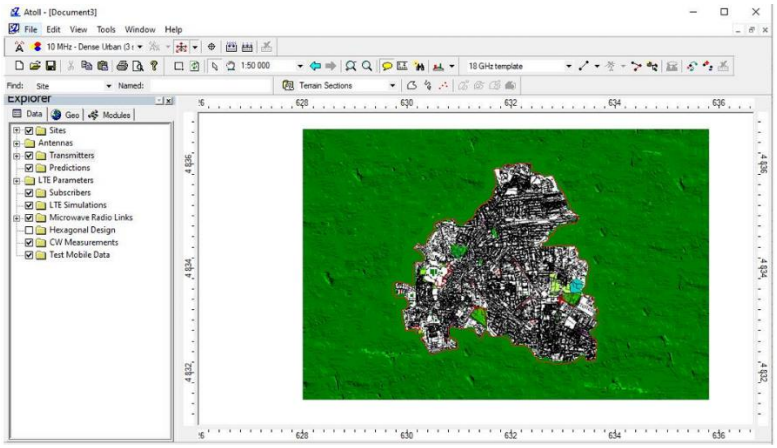


Рис. 4.3 Підготовка проекту до моделювання мережі LTE

Після інтеграції рельєфної та схемотехнічної карти у середовище Atoll можна переходити до безпосереднього моделювання мережі. На цьому етапі програмне забезпечення надає широкий набір параметрів для налаштування, що дозволяє максимально точно відтворити реальні умови міста Шостка.

Спершу необхідно створити новий проект у середовищі Atoll та обрати технологію LTE, яка буде використовуватись для моделювання. Після цього у проект завантажуються підготовлені шари карт у єдиний файл. Це забезпечує комплексний огляд місцевості та дозволяє врахувати особливості рельєфу, забудови та наявної інфраструктури при подальшому розташуванні базових станцій і розрахунку зон покриття.

Така організація даних дозволяє оперативно коригувати параметри мережі, проводити симуляції для різних сценаріїв та оцінювати вплив зміни розташування базових станцій на якість сигналу та пропускну здатність мережі.

Наступним етапом є розміщення базових станцій на найвищих точках рельєфу або на верхівках будівель. У вікні налаштувань базової станції необхідно задати такі параметри:

- Вибрати тип БС для міської забудови – urban;
- Встановити кількість секторів – три;
- Задати радіус покриття стільника – 1 км;
- Висота встановлення антени – 36 м;
- Задати робочу частоту передачі – 900 МГц;
- Обрати модель поширення радіохвиль з доступного списку – Окумура-Хата.

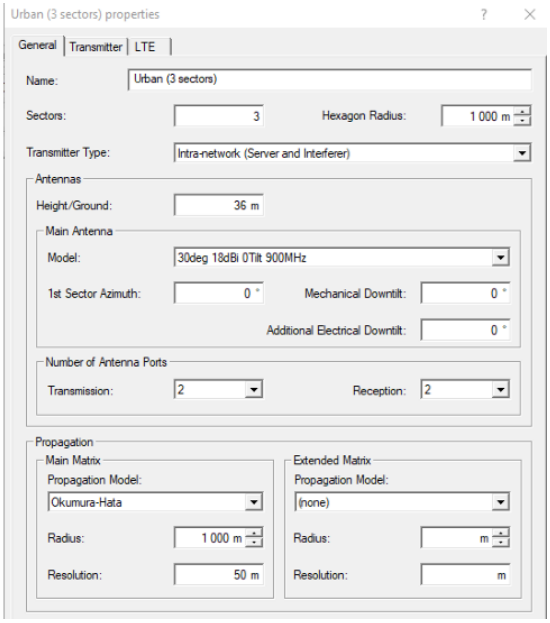



Рис. 4.4 Вікно конфігурації БС

Деякі параметри вже були визначені в попередніх розділах. Після налаштування конфігурації розпочинається процес розташування базових станцій таким чином, щоб забезпечити покриття всієї території міста. У реальних умовах зазвичай застосовується менша кількість БС через фінансові обмеження. Проте в межах цієї роботи здійснюється практично ідеальне моделювання мережі для досягнення максимальної пропускної здатності та оптимального покриття [5].

На рис.4.5 продемонстровано розташування базових станцій, яке забезпечує повне охоплення міста з використанням усіх БС, кількість яких була розрахована у попередніх розділах.

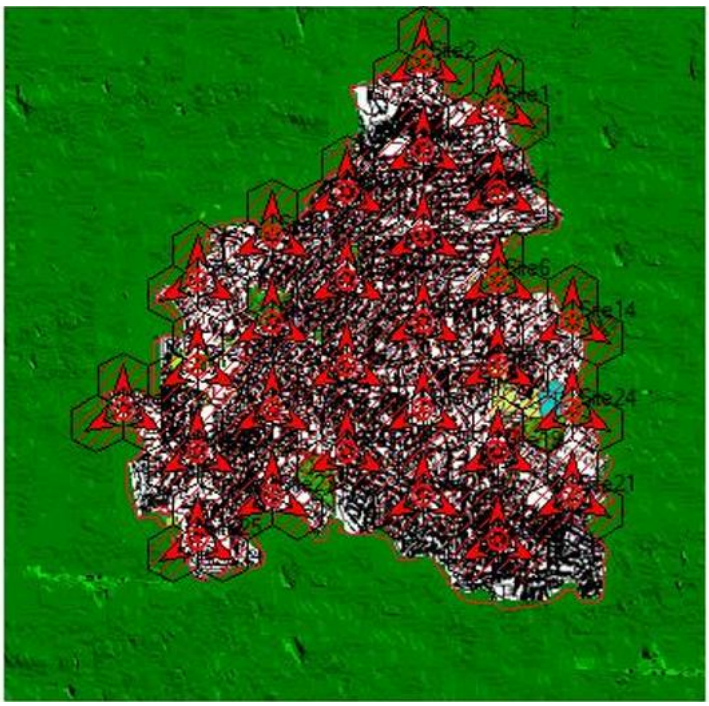


Рис. 4.5 Розташування БС у м. Шостка

Перед початком подальших експериментів необхідно перевірити працездатність передавачів та їх здатність покривати відведену територію. Для цього обираємо відповідну функцію та очікуємо результат, який наведено на рис. 4.6.

Після цього можливо перейти до моделювання покриття мережі та визначення рівня сигналу на території міста. Програма Atoll автоматично виконує розрахунки з урахуванням усіх попередньо встановлених параметрів. Для наочності рівень сигналу на карті відображається різними кольорами, що дозволяє оцінити ефективність покриття. Підсумковий результат представлений на рис.4.6.

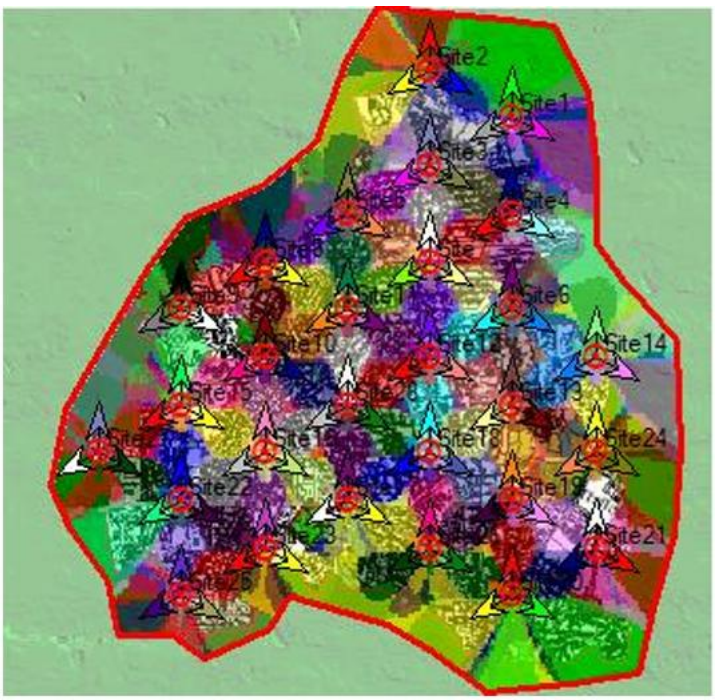



Рис.4.6 Територія покриття передавачем

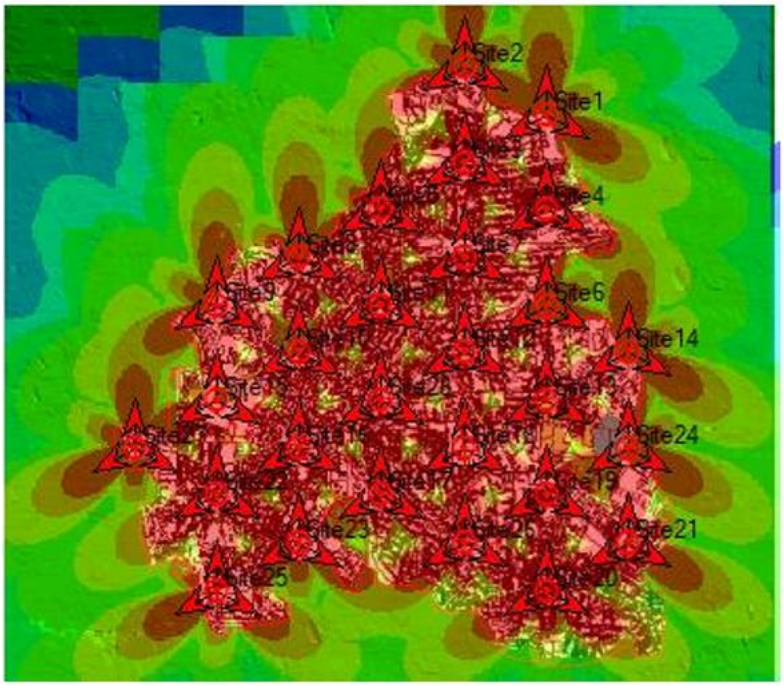



Рис.4.7 Аналіз рівня покриття мережі LTE

На рис.4.7 представлено результати моделювання покриття території міста Шостка. Як видно, більша частина міста охоплена високим рівнем сигналу, що забезпечує надійне з’єднання для абонентів. Використане обладнання та обрані

параметри мережі дозволяють підтримувати стабільний рівень сигналу навіть у випадку розширення покриття або збільшення кількості користувачів.

Проектована мережа розрахована на ефективне надання послуг протягом тривалого часу, враховуючи можливі зміни в структурі населення та щільності користувачів. Контроль рівня сигналу здійснюється за допомогою інструментів програмного забезпечення Atoll, що дозволяє отримати наочні карти покриття та детальні дані для подальшого аналізу та оптимізації мережі.

Такий підхід дозволяє не лише оцінити поточну якість покриття, а й здійснювати прогнозні моделювання при введенні нових базових станцій або зміні конфігурацій мережі.

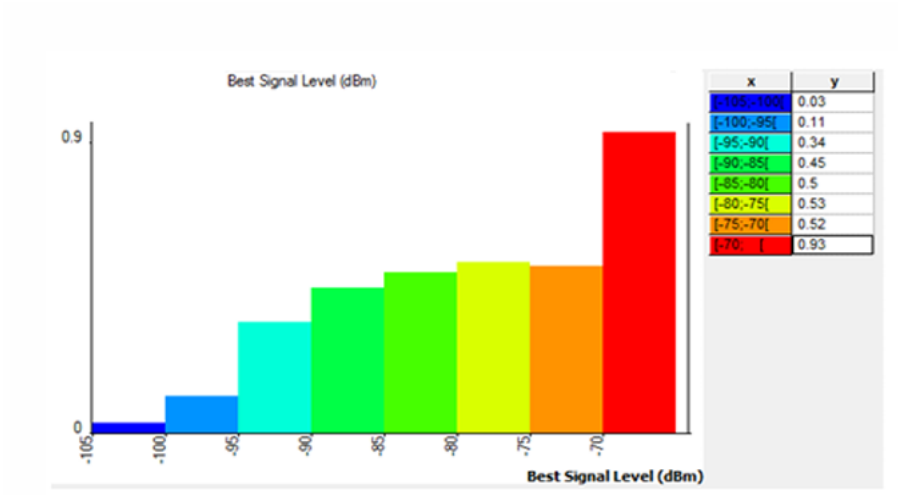



Рис.4.8 Гістограма рівня сигналу на території м. Шостка

Гістограма демонструє, що рівень сигналу в межах міста варіюється від − 65 до −70 дБ, що вважається оптимальним для проектованої мережі. Такий рівень сигналу дозволяє повністю задовольнити потреби користувачів у зв’язку, а перевантаження мережі практично виключене. Для отримання більш детальної інформації про мережу можна використовувати додаткові можливості програмного забезпечення. Зокрема, можливо оцінити покриття мережі за пропускною здатністю для 28 базових станцій. На наступних рисунках наведено

відсоткову статистику покриття 4G LTE за пропускною здатністю для напрямків «вниз» і «вгору».

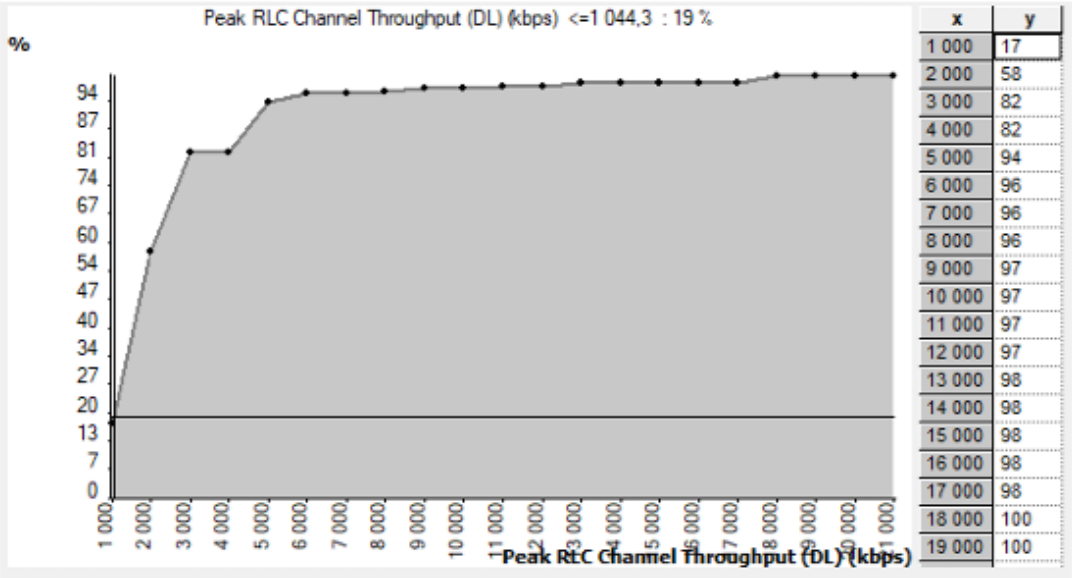



Рис.4.8 Покриття мережі за пропускною здатністю у низхідномканалі (DL)

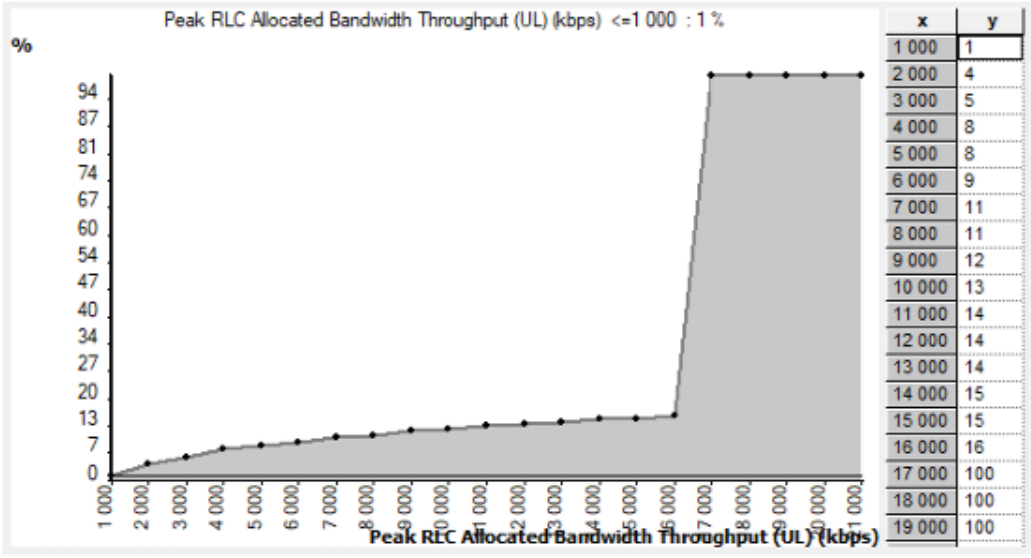



Рис.4.9 Аналіз покриття мережі за пропускною здатністю у висхідному каналі (UL)

На рис. 4.9 наведено карту покриття мережі LTE з урахуванням пропускної здатності висхідного каналу (UL). Отримані результати моделювання

демонструють, що проектована мережа забезпечує стабільний рівень сигналу по всій території міста Шостка.

Абоненти успішно підтримують зв’язок у обох напрямках передачі даних: від базових станцій до користувачів (низхідний канал, DL) та від користувачів до базових станцій (висхідний канал, UL). Така симетрична робота мережі свідчить про її високу ефективність, надійність і здатність обслуговувати одночасно велику кількість користувачів без суттєвого погіршення якості зв’язку.

Завдяки точному розташуванню базових станцій та налаштуванню параметрів радіоканалу, мережа LTE готова забезпечувати необхідну пропускну здатність навіть у пікові години навантаження. Використання програмного забезпечення Atoll дозволяє не лише оцінювати поточне покриття, а й прогнозувати вплив змін параметрів мережі на якість обслуговування абонентів.

### 4.3. Вибір обладнання для транспортної мережі та базових станцій

Для організації транспортної мережі LTE буде використано комутаційне обладнання компанії Huawei, яке на сьогодні вважається одним із найкращих варіантів на ринку. У межах цієї роботи обрана платформа базової мережі eCNS600 LTE, що включає всі необхідні компоненти для забезпечення функціонування LTE-мережі.

Система eCNS600 являє собою корпоративне рішення базової мережі, розроблене компанією Huawei для модернізації пакетної інфраструктури (EPC) і призначене виключно для архітектури LTE. Обладнання інтегрує ключові функції: управління абонентами через HSS, модуль управління мобільністю (MME), шлюз обслуговування пакетних даних (SGW) та реалізацію правил і політик тарифікації.

Управління та обслуговування мережі eCNS600 здійснюється централізовано. Система підтримує до 200 тис. абонентів та 400 тис. операторів, при цьому одночасно активними з боку UE можуть бути до 11 операторів. Платформа здатна обслуговувати до 1,5 тис. базових станцій із загальною пропускною здатністю до 40 Гбіт/с. Діапазон вхідного електроживлення становить від -40 В до -57 В, а

середній час безвідмовної роботи перевищує 300 тис. годин. Для резервування використовується схема 1+1.

Для ефективного керування та моніторингу мобільної мережі рекомендується застосовувати платформу Huawei iManager M2000, зовнішній вигляд якої представлений на рис. 4.10.



Рис. 4.10 iManagerM2000

Платформа M2000 надає широкий спектр функцій, що підвищують ефективність роботи інженерів з обслуговування та експлуатації мережі, одночасно зменшуючи загальні витрати. До таких функцій належать контроль загальної працездатності мережі, віддалене оновлення та покращення програмного забезпечення, пакетне оновлення конфігурацій, автоматизоване планування базових станцій, оптимізація стільників, дистанційне керування базовими станціями та налаштування аварійної сигналізації під час технічного обслуговування.

При виборі обладнання для базових станцій LTE необхідно переконатися, що воно підтримує сумісність із іншими стандартами мобільного зв’язку та відповідає технічним вимогам мережі. Для проектованої мережі доцільно використовувати обладнання компанії Huawei, зокрема базову станцію DBS3900 FDD.

БС DBS3900 складається з BBU3900 та RRU. BBU3900 відзначається компактними розмірами, легкістю встановлення та низьким енергоспоживанням. RRU має невеликі габарити та вагу, його можна розміщувати безпосередньо біля антени, що дозволяє скоротити довжину фідерного кабелю та підвищити покриття системи. Використання цієї БС забезпечує економне споживання електроенергії, підтримку необхідної ємності при зростанні мобільного трафіку та високу спектральну ефективність.

Модульна конструкція DBS3900 з двома основними функціональними компонентами знижує витрати на запасні частини та обслуговування. Основні модулі легко адаптуються до умов майданчика, що дозволяє ефективно розгортати мережу. Віддалений радіомодуль забезпечує низку додаткових переваг [10]:

- Радіочастотний модуль DBS390**0** можна встановлювати безпосередньо на вежі, що дозволяє значно зменшити довжину ліній живлення та, відповідно, витрати на прокладку підвідних кабелів.
- Зменшення втрат у лініях живлення сприяє підвищенню коефіцієнта посилення потужності на 3–5 дБ, що забезпечує збільшення радіусу покриття більш ніж на 20 %.

У цілому DBS, разом із BBU та усіма RRU, фактично функціонує як один стільник. Така конфігурація дозволяє зменшити кількість хендоверів між стільниками. Кожен RRU здатний самостійно генерувати та керувати радіосигналами, при цьому пасивні перешкоди не накопичуються, а DBS контролює весь інтерфейс обслуговування централізовано.

Характеристики базової станції DBS3900 [16,18] включають:

- Максимальна ширина смуги частот для одного стільника – 20 МГц.
- Пропускна здатність каналу «вниз» на рівні MAC становить 150 Мбіт/с (при конфігурації 2×2 MIMO).
- Максимальна кількість одночасних радіонесучих для передачі даних користувача (DRB) на UE – 8.

- Пропускна здатність каналів «вгору» і «вниз» на рівні MAC досягає 1500 Мбіт/с.

BBU3900 [18] має такі характеристики:

- Один електричний порт FE/GE та один оптичний порт FE/GE.
- Діапазон вхідної напруги: від -38 В до -57 В.
- Розміри (В×Ш×Г): 86×442×310 мм.
- Маса повної конфігурації – 12 кг.
- Робоча температура: від -20 °С до +20 °С при довгостроковій експлуатації.
- Ступінь захисту від зовнішніх впливів – IP-20.

Характеристики віддаленого радіоблоку RRU. Віддалений радіоблок RRU має такі параметри [18]:

- Номінальна вхідна потужність – -48 В, діапазон робочої напруги: від -57 В до -36 В.
- Температурний режим експлуатації: від -40 °С до +50 °С.
- Відносна вологість повітря: від 5% до 100%.
- Ступінь захисту від зовнішніх впливів – IP65.

На рис. 4.11 показано приклад встановлення базової станції DBS3900.

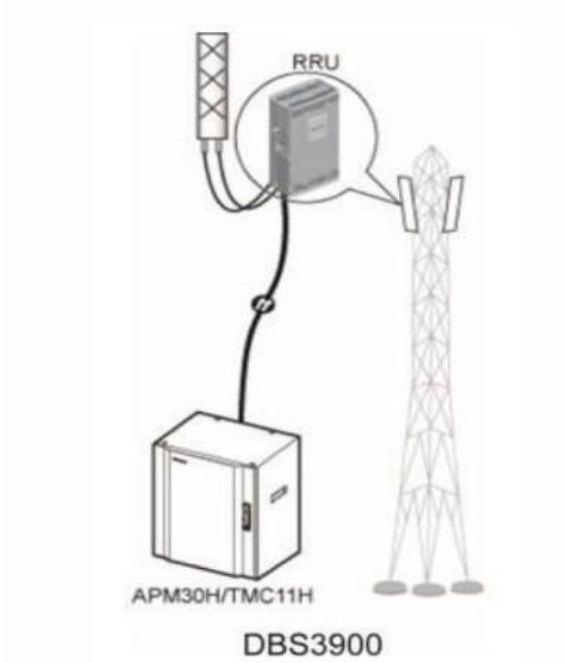



Рис. 4.11 Варіант встановлення DBS3900

До складу обладнання базової станції мережі стандарту LTE входять [16,18]:

- три антени;
- базовий блок BBU3900 LTE (виробник «Huawei Technologies», Китай);
- панель розподілу живлення;
- три віддалені радіомодулі RRU 3268 (виробник «Huawei Technologies», Китай).

Під час вибору цього обладнання були враховані всі особливості проектування LTE-мереж. Використання зазначених компонентів забезпечує можливість подальшого розширення та модернізації мережі без технічних складнощів.

# ВИСНОВОК

Технологія LTE відкриває нові можливості для бездротового бізнесу завдяки широкому спектру мобільних широкосмугових послуг. Вона забезпечує масштабовану пропускну здатність у межах від 1,4 до 20 МГц і підтримує як спарений (FDD), так і непарний (TDD) спектр частот. LTE використовується не лише на сучасних смартфонах, а й у ноутбуках, ультрапортативних камерах, відеокамерах, мобільних маршрутизаторах (MBR) та інших пристроях, що потребують швидкого та надійного доступу до мобільного широкосмугового зв'язку.

Для забезпечення високої якості обслуговування, особливо для додатків із вимогами до мінімальної затримки, критично важливо ефективно реалізувати мобільність і передачу даних між базовими станціями. LTE являє собою комплексне рішення мобільного широкосмугового доступу, яке поєднує гнучкість у розгортанні мереж і широкий спектр потенційних сервісів.

Серед ключових технологічних особливостей варто виділити застосування OFDM на фізичному рівні, що забезпечує високу спектральну ефективність і стійкість до багатопроменевих перешкод. У низхідному каналі OFDM дозволяє ефективно використовувати методи планування ресурсів у частотній області та інтегрувати технології MIMO для одночасної передачі даних по кількох антенних потоках, що значно підвищує пропускну здатність і надійність мережі.

У даній кваліфікаційній роботі було проведено дослідження щодо організації бездротового доступу LTE на території міста Шостка, Сумська область. Використання сучасних мобільних технологій дозволяє забезпечити високоякісне покриття мережі четвертого покоління LTE, що підтверджується створеною мережею, змодельованою за допомогою програмного забезпечення Atoll. У процесі проектування визначено основні параметри мережі, зокрема пропускну здатність, рівень сигналу та площу покриття, які показали високу ефективність роботи. Такі показники гарантують стабільну роботу мережі навіть за умови розширення території обслуговування або зростання кількості абонентів.

У роботі проведено аналіз сучасних технологій і стандартів мобільного зв’язку, проте основну увагу приділено LTE як ключовій технології для проектування мережі. Детально розглянуті технології MIMO та OFDMA, які забезпечують високу швидкість передачі даних та ефективне використання радіочастотного ресурсу.

Для моделювання мережі міста Шостка було використано програмне забезпечення Atoll, що дозволило максимально наблизити розрахунки до реальних умов та отримати точні характеристики мережі.

В результаті проектування визначено оптимальні параметри та сценарії побудови мережі LTE, яка здатна ефективно задовольняти потреби користувачів на території міста Шостка, забезпечуючи надійний та якісний мобільний доступ до послуг зв’язку.

# ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ


1. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції. [Електронний ресурс]: мультимед. підручник, Том 1// За редакцією В. В. Поповського, Харків, ТОВ “Компанія СМІТ”, 2020 р. Режим доступу до ресурсу: http://www.znanius.com/3533.html - 1012с.

2. Багатоканальний електрозв’язок та телекомунікаційні технології [Електронний ресурс]: підручник у 2-х томах. /О. В. Лемешко, В. А. Лошаков, В. В. Поповський, С. О. Сабурова та ін.// за редакцією В. В. Поповського-.Х.: ТОВ “Компанія СМІТ”, 2019. Режим доступу до ресурсу: http://www.smit book.com/books.html- 1012 с.

3. UMTS Networks: Architecture, Mobility and Service/ Heikki Kaaranen, Ari Ahtia- inen, Lauri Laitenen, Siamak Naghian, Valtteri Nienu(Second Edition), John Wiley & Sons, Ltd., 2021.

4. ETSI TR 122960 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), Mobile multimedia services including mobile Intranet and Internet services.

5. Overview of 3GPP Release 4. Summary of all Release 4 Features, 2018.

6. Козубенко В.С., Методи конвергенції послуг мобільного зв’язку на платформі IMS, 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті»-2021. 123-127с.

7. Козубенко В.С., Дослідження методів контролю послуг NB-IoT, 24-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» 2020. 1-4с.

8. Козубенко В.С., Сабурова С.О., Перспективи розвитку технології мобільного зв’язку 4G» представлена на П`ятій міжнародній науково-технічній конференція «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних 79 безпроводових мереж зв’язку, ЕМС-2019».34-39с.

9. Козубенко В.С., Сабурова С.О, Аналіз трафіку Інтернет–речей 4G, а Шоста міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв’язку, ЕМС2020».26-40с.

10. Basim K. J. Al-Shammari, Nadia Al-Aboody, and Hamed S. Al-Raweshidy. 2018. IoT Traffic Management and Integration in the QoS Supported Network. IEEE Internet of Things Journal 5, 1 (feb 2018), 352–370. https://doi.org/10.1109/jiot. 2017.2785219.

11. Eleonora Borgia. 2019. The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. Computer Communications 54 (2019), 1–31. https://doi.org/10. 1016/j.comcom.

12. Kulik, V.A., Vybornova, A.I. Methods of Complex Testing the Devices of the Internet of Things//Distributed Computer and Communication Networks 2019.

13. Villy, B. Iversen Teletraffic Engineering Handbook. COM Center Technical University of Denmark Building 343, DK-2800 Lyngby Tlf.: 4525 3648 www.tele.dtu.dk/teletra.

14. S. Parkvall, E. Dahlman, J. Sköld, and P. Beming, “3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband,” Elsevier Publishers, Second Edition, 2020.

15. L. Bajzik, P. Horváth, L. Krössy, and C. Vulkán, “Impact of Intra-LTE Handover with Forwarding on the User Connections,” July 2019.

16. F. Khan, “LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance,” Cambridge University Press, New York, 2022.

17. “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) NB-IOT Technical Report for BS and UE radio transmission and reception,” TR 36.802 v.13.0.0, 3GPP RAN4, 2023.

18. C. Yu, L. Yu, Y. Wu, Y. He, and Q. Lu, “Uplink scheduling and link adaptation for narrowband internet of things systems,” IEEE Access, vol. 5, 80 pp. 1724–1734, 2021.

19. L. Zhang, A. Ijaz, P. Xiao, and R. Tafazolli, “Channel Equalization and Interference Analysis for Uplink Narrowband Internet of Things (NB- IoT),” IEEE Communications Letters, vol. 21, no. 10, pp. 2206–2209, 2020.

20. Рекомендація МСЭ-Т P.863. POLQA. Perceptual objective listening quality assessment. 2021.

# ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ