

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

на тему: **“ Розробка радіомережі четвертого покоління та прогнозування її покриття в умовах міської забудови ”**

Виконав: студент 7 курсу, групи
АРЗМ-71
спеціальності

172 Телекомунікації і радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Завалій А.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____

Київ – 2021

ВСТУП

У зв'язку з високим попитом людей до інтернет, йде швидкий розвиток технологій мобільного зв'язку. Фіксований зв'язок теж розвивається, але не такими стрімкими кроками на відміну від мобільного. В сучасному світі, роль розвитку інтернет, є дуже важливим фактором і не може бути заперечливим. Мережа інтернет, дозволяє людям отримувати різні можливості під час навчання чи роботи, надає змогу спілкування, виконувати обмін даними, сплачувати за надані послуги, товари та покупки, користуватися в онлайн режимі послугами комерційних компаній та державних установ. За багатьма результатами різних досліджень з використання інтернет запитів в Україні та як джерела в цілому з'ясували, що спостерігається постійний та суттєвий приріст розміру об'єму даних, особливо який передається за допомогою бездротових засобів. Суттєвий вплив на зріст бездротової передачі даних оказує мобільний інтернет.

Планування розгортання мережі у сільській місцевості завдяки відсутності будівель є більш простим та залежить перш за все від правильного місця розташування базових станцій виходячи з рельєфу місцевості, та від висоти конструкції яка залежить від наявності будівель. У великих містах де присутні будівлі, для запобігання перешкод під час проходження сигналу на великі відстані, необхідно розміщати різку кількість базових станцій на різній відстані та в залежності від типу місцевості. Важливо враховувати особливості забудови, оскільки різні сигнали з різних станцій є перешкодою одне для одного.

В роботі проведений аналіз етапів проектування покриття, наведено методику планування, наявність формул та типових значень для певних показників, що приймають участь для розрахунків. Для розрахунків з великою щільністю забудови обрано частину Солом'янського району міста Києва. Виконано моделювання за допомогою інструменту планування та оптимізації Atoll, використовуючи отримані дані, а результати надані в останньому розділі.

1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ТЕХНОЛОГІЮ LTE

1.1 Еволюція 4G та LTE

LTE розглядається як еволюція технології UMTS, є стандартом високошвидкісного бездротового зв'язку передачі даних розроблений групою 3GPP визначеного специфікаціями у виданні 8 від 2008 року та доповненого у виданні 9 від 2009 року. Спочатку програму LTE розробляли в контексті заходів для забезпечення переваг у наступному десятилітті і як спосіб всебічної оптимізації. До того ж, архітектура мереж буде спрощена до двох рівнів — E-UTRAN (оновлений UTRAN) і AGW, протоколи також будуть значно спрощені.

LTE, усім відомий як 4G LTE, - це стандарт, який створено для бездротового високошвидкісного зв'язку з обміном даних для смартфонів та різних типів терміналів передачі даних. Стартовим етапом для цього стандарту став відкритий семінар, який проведений у листопаді 2004 року з стосовно розвитку 3GPP RAN. Дослідження розпочаті були через місяць по тому, у грудні 2004 року, з метою покращення та розвитку системи радіо-доступу. Головними задачами було зменшення витрат, які використовуються на передачу 1біт даних, збільшення кількості об'ємів надаваних послуг, більш гнучке використання нових та поточних у використанні частот, ефективне енергоспоживання пристроїв та спрощення архітектури з відкритими програмними інтерфейсами.

Виникнення технології LTE пояснюється наступними причинами:

- Велака необхідність технологій зв'язку, які могли б задовольнити експоненту збільшення трафіку і об'єму даних;
- Виникнення нових зручних сервісів, які користуються інтернет з'єднанням, для таких типів даних, як відеоконференції або онлайн-відео, що потребує збільшення швидкості передачі даних надаваних послуг;

- З погляду на оптимізацію, присутня необхідність виникнення нового зручного стандарту, який дозволить різко зменшити витрати на розгортання та обслуговування мережі зв'язку.

За даними щорічного звіту відомого Ericsson Mobility Report за 2019 рік чікувалось, що кількість активних користувачів LTE зростатиме до 2022 року і становитиме 8.1 млрд користувачів, хоча на даний момент вже запускаються і працюють мережі 5-ого покоління. Проте велике зростання користувачів 5G очікується в 2022 на відміну від 2021, оскільки ще не всі країни готові до змін, а не всі мають достатньо для цього обланання. Тим часом, оператори мобільного зв'язку продовжують розвивати свої мережі на базі технологій 4G та LTE, збільшуючи покриття та ємність.

На рис. 1.1 показано графік зростання кількості активних підключень за на базі існуючих поточних технологій (LTE, WCDMA, GSM, TD-SCDMA, CDMA). На графіках не вказано пристрої Інтернету Речей.

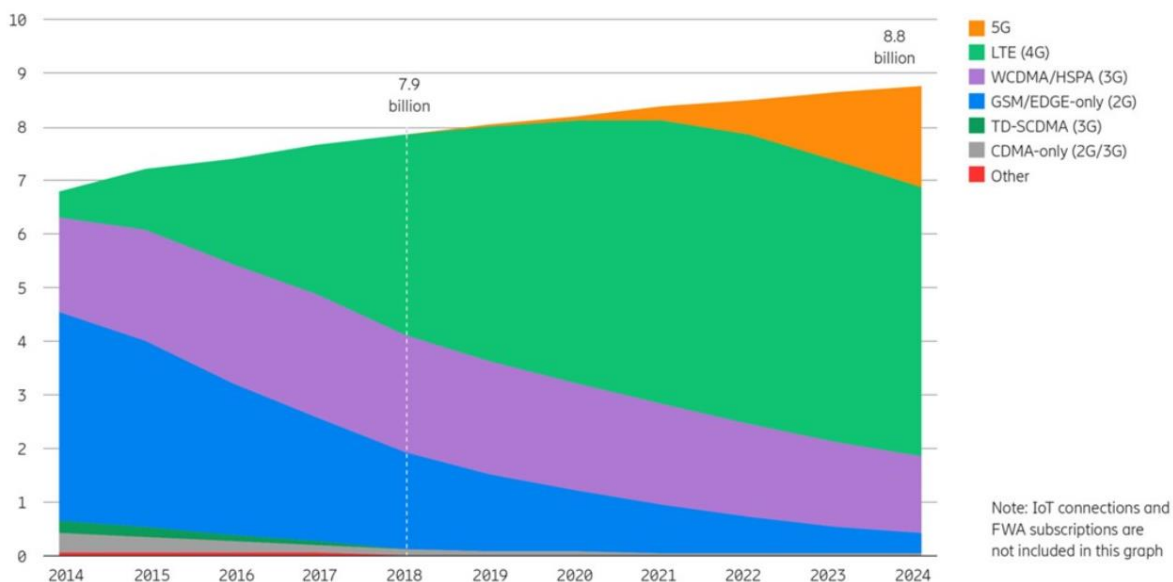


Рисунок 1.1. Прогноз зростання кількості пристроївмобільного зв'язку

Щомісячно в світі зростає мобільний трафік. За прогнозом та на підставі звітів компанії Ericsson Mobility Report, мобільний трафік в 2018 році вже досяг 28 Екзабайт і 65% цього об'єму складав переважно відео-контент. До 2024 року прогнозується велике збільшення трафіку до 155 Екзабайт в місяць і понад 75% буде складати переважно відео-трафік. Це в повній мірі пояснюється появою

відео-сервісів із великим попитом, популярністю та інтересу населення до існуючих (YouTube, Tic-Toc, Instagram, Twitch, Vimeo та ін.). Кругову діаграму розподілу активного трафіку по типу даних, вказано на рисунку 1.2

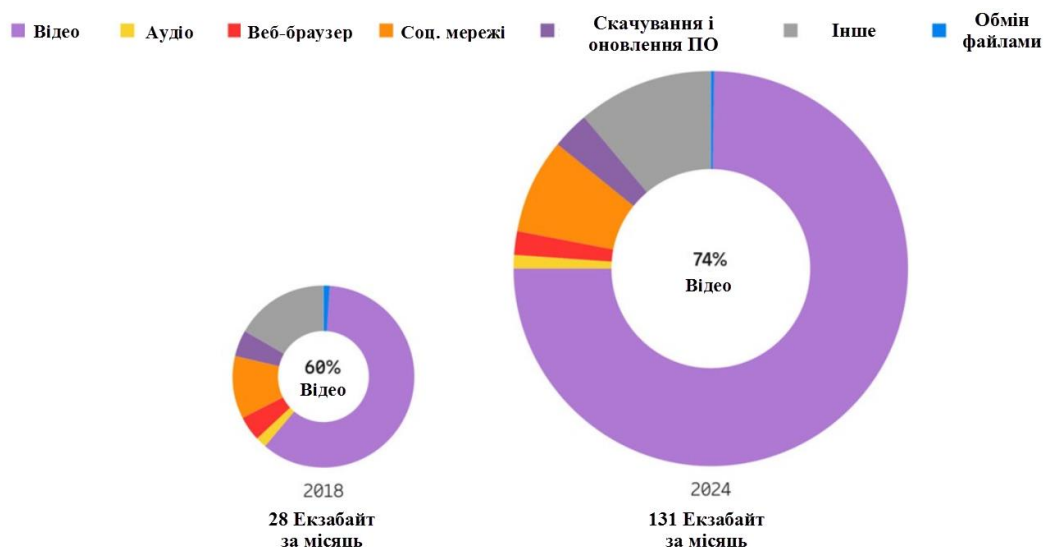


Рисунок 1.2. Об'єми мобільного трафіку за місяць в 2018 і прогноз на 2024

3GPP збільшували прогрес для встановлення нових стандартів та появи використання LTE після першого стандарту, який було заблоковано у 2008 році для версії релізу 8. Стандартизація та еволюція йшла до релізу LTE-Advanced та інших. Ці дослідження на підставі на версії релізу 8, та узагальнені характеристик різних варіантів протоколів LTE 3GPP, представлені та прийняті у наведених нижче розділах з поясненням.

LTE розробила та впровадила нові технології, наприклад MIMO, OFDMA, турбокодування тощо. Усі нові технологічні нововведення, пов'язані з фізичним рівнем LTE. Фізичний рівень справляється з усіма обробками даних на більш високому рівні. На фізичному рівні були реалізовані різні методики та логіки обробки сигналів для якісної передачі та прийому мережі LTE.

Технологія LTE повинна була відповідати вимогам, які були висунуті:

- Збільшена характеристика ємності системи та покращено покриття;
- Збільшення пікової швидкості передачі даних;
- Мала затримка обміну та передачі;

- Зменшення витрат на експлуатацію;
- Можливість передачі даних за допомогою декількох антен;
- Підтримка роботи в різних діапазонах з різною шириною каналу;
- Повна інтеграція з існуючими системами зв'язку.

1.2 Порівняння LTE з мережею WCDMA/UMTS

Технологія UMTS, яка має відношення до технологій третього покоління дуже змінила відношення і уяву користувачів до використання мобільного інтернету. Відпала пряма необхідність для перегляду спеціально адаптованих версій сайту, які мали менший об'єм та інше відображення, з'явилося багато різних сервісів, які почали використовувати високу швидкість передачі даних. Кількість користувачів постійно збільшувалась, мобільний трафік зростав постійно і з кожним роком. Завдяки цьому з'явилася нова технологія LTE, яка змогла забезпечити потреби користувачів та надати можливість впровадження нових підходів обміну даних та обслуговування. В таблиці 1.1 вказано відмінність та схожість технологій LTE та WCDMA.

Таблиця 1

Порівняння переваг технологій WCDMA та LTE

Властивість	WCDMA	LTE
Вид доступу	WCDMA	OFDMA та SC-FDMA
Повторне використання частот	100%	Гнучке
Ширина смуги	5 МГц	1.4 - 20 МГц
Режим роботи	Частотний або часовий дуплекс	Частотний або часовий дуплекс
Використання MIMO	З випуску 3GPP	2x2, 4x4, 8x8
Тривалість фрейму	10 мс	10 мс
Максимальна швидкість завантаження	42 Мбіт/с	1 Гбіт/с
Типова швидкість завантаження	4 Мбіт/с	15 Мбіт/с
Затримка	250 мс	50мс

В Україні оператори стільникового зв'язку отримали ліцензії в 2018 році, для використання частот LTE в діапазонах 1800 та 2600 МГц. Покриття на даний час, доступне не тільки в великих містах де населення понад 10000, також на трасах та в селах, через які проходять ці дороги. На рис. 1.3 показано покриття України на момент листопаду 2019 року технологіями UMTS та LTE. На рис. 1.4 показаний приклад прогнозу покриття 4G LTE в порівнянні з ЄС.

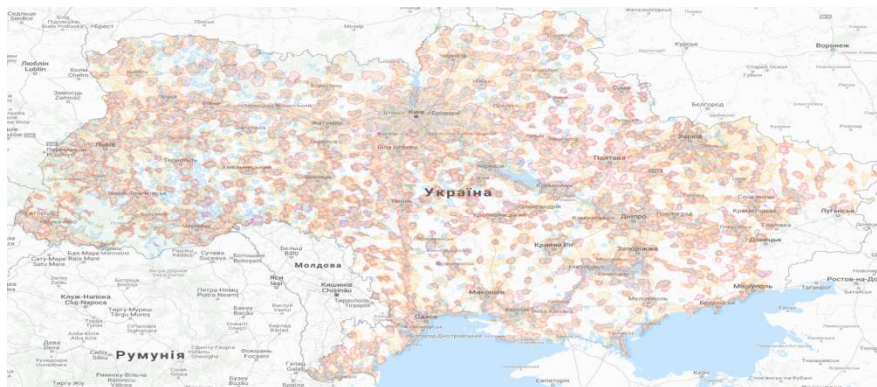


Рисунок 1.3. Покриття операторів України, технологія UMTS. Червоний колір – Vodafone, синій – Київстар, жовтий – Lifecell

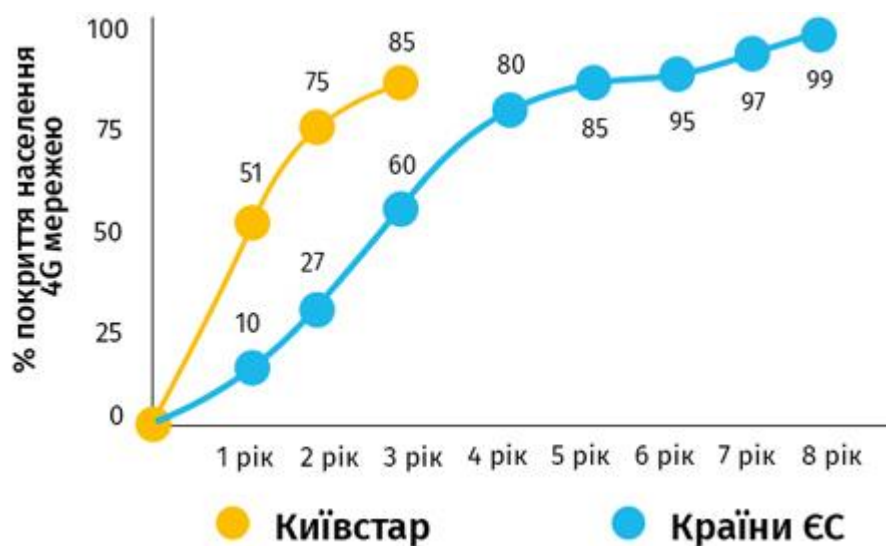


Рисунок 1.4. Приклад прогнозу покриття LTE від операторів України

В 2020 році відбувся аукціон певних частот в діапазоні 900 МГц, що надав можливість операторам забезпечити покриття в деяких віддалених регіонах, та на автомобільних дорогах, забезпечивши доступ до швидкісного мобільного

інтернету, що в свою чергу стало впевненим кроком реалізації ідеї розвитку. Проте, на той момент існувала складність з перерозподілом частот, які використовувалися для GSM. Оскільки оператори і користувачі були не готові відмовитися від технології GSM, оскільки існує багато пристроїв які підтримують стару технологію, тому в існуючих мережах LTE оператори використовують не весь доступний діапазон частот, а вимушені залишати частину під використання в GSM.

На рис. 1.5 показані результати тестування мереж UMTS та LTE на швидкість завантаження за допомогою протоколу HTTP. Також відтверено тестування затримки ping. Тестування та надання результатів було виконано в обраній локації біля індустріального мосту за допомогою програмно-апаратного комплексу TEMS. Вимірювання проводились протягом 30 хвилин починаючи з 18:30, це є година та період найбільшого навантаження та щільності трафіку, на квадратний метр. Враховується аналіз затримок під час завантаження для аналізу стабільності надання послуг в піковий момент. В таблиці 1.2 показані ключові результати вимірювання.

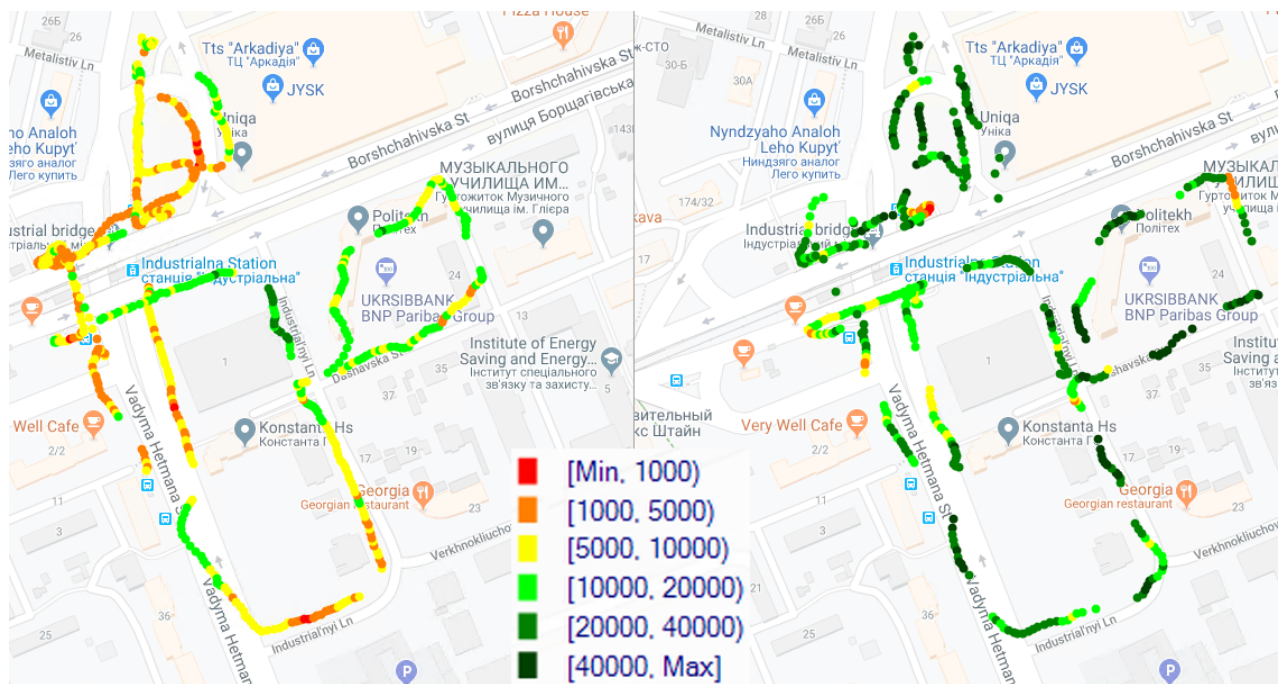


Рисунок 1.5. Результати вимірювання завантаження. Зліва – UMTS, справа – LTE

Таблиця 1.2

Результати вимірювання швидкості завантаження і затримки

Показник	UMTS	LTE
Середня швидкість завантаження, Мбіт/с	08.янв	24.сент
Максимальна швидкість завантаження, Мбіт/с	32.7	66.3
Середня затримка (ping), мс	172	38
Кількість скачувань файлу розміром 1024 Мб	16	29

1.3 Архітектура мережі LTE

На рис. 1.6 відображена архітектура LTE-Advanced E-UTRAN. У випусках 3GPP E-UTRAN, яка базується на одному елементі - вдосконаленому вузлі В (eNB), який включає в себе інтерфейс радіо, який містить протоколи площини управління та користувача у напрямку до UE.

Кожен елемент eNB діє як логічний компонент, який обслуговує декілька сот E-UTRAN. Елементи eNB з'єднані між собою через інтерфейс X2. Елементи Home eNB (HeNB), також відомі як фемто-соти, можуть бути розгорнуті з випуску нової версії 9 3GPP. Елементи HeNB – як недорогі елементи, які призначені для покращення покриття в невеликій області, які можна приєднати до EPC двома варіантами, або безпосередньо, або через шлюз. Для підтримки великої кількості HeNB потрібне окреме підключення.

LTE-Advanced надає можливість встановлення ретрансляторів з метою підвищення ефективності мережі. Ціль використання ретрансляторів та елементів HeNB у збільшенні зони покриття, швидкості передачі даних та покращенні якості надаваного сервісу.

Протоколи та стеки протоколів LTE та LTE-Advanced знаходяться у площині протоколів Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Protocol (RLC), Medium Access Control (MAC) та Physical Layer (PHY) protocol. Площина управління складається з Radio Resource Control (RRC) protocols.

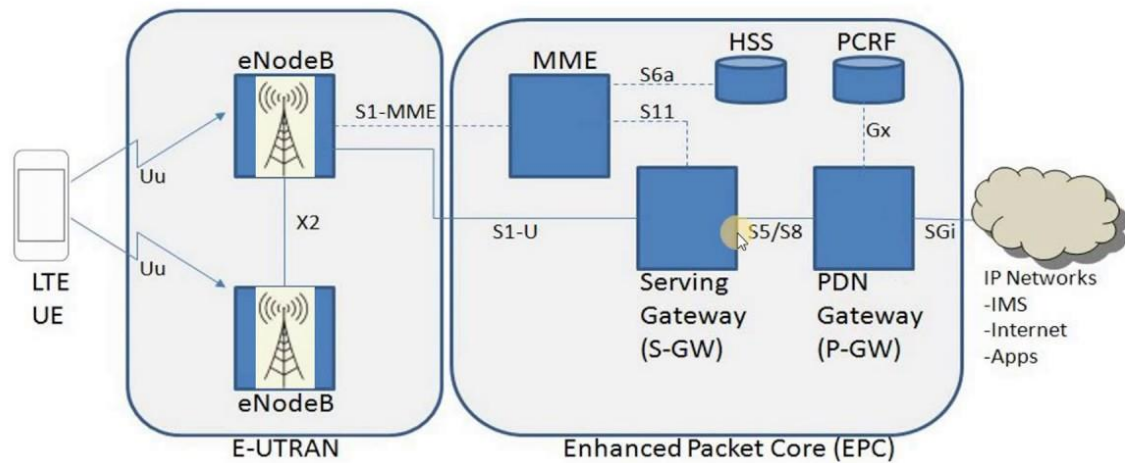


Рисунок 1.6. Архітектура мережі LTE

1.3.1 eNodeB

Вузол елементів eNodeB або eNB LTE відповідає за передачу та прийом з UE. Елемент eNB забезпечує достатньо необхідну функціональність для використання управління радіо ресурсами (RRM), до якого входить контроль прийому, радіоканалу, планування даних та обмін повідомленнями управління за допомогою хмарного інтерфейсу. Також, eNB відповідає за кодування та зменшення заголовків через хмарний інтерфейс.

Чітку різницю між UTRAN та E-UTRAN можна спостерігати при розгляді ролі базової станції (БС). Також eNB LTE включає в себе всі функції, які присутні в RNC системи UTRAN. Важливо пам'ятати, що традиційні завдання NB включаються в елемент eNB. В LTE БС мають інтерфейс для з'єднання по принципу кожний з кожним. Раніше, в UMTS БС мали сам інтерфейс і доступ до нього, тільки до контролеру, і обмінювалися між собою інформацією тільки через сам контролер. В LTE БС мають обмін напряду, оминаючи інші додаткові системи переходів, що позитивно впливає на зменшення затримки під час з'єднання та обміну. Відмінності в архітектурі мереж доступу систем UMTS та LTE показано на рисунку 1.7. Таким чином, eNB включає в себе елементи прийняття рішень, які перш за все пов'язані з з'єднаннями. Рішення позначено певним терміном "плоска архітектура" LTE, тобто менше інтерфейсів і лише один

елемент в усій ієрархії архітектури. Так як сам елемент управління переміщено ближче до радіо інтерфейсу, відповідно час проходження сигнальних повідомлень скорочений. Це є ключовим рішенням зниження затримки з'єднання в LTE порівняно з попередніми рішеннями, такими як 3G.

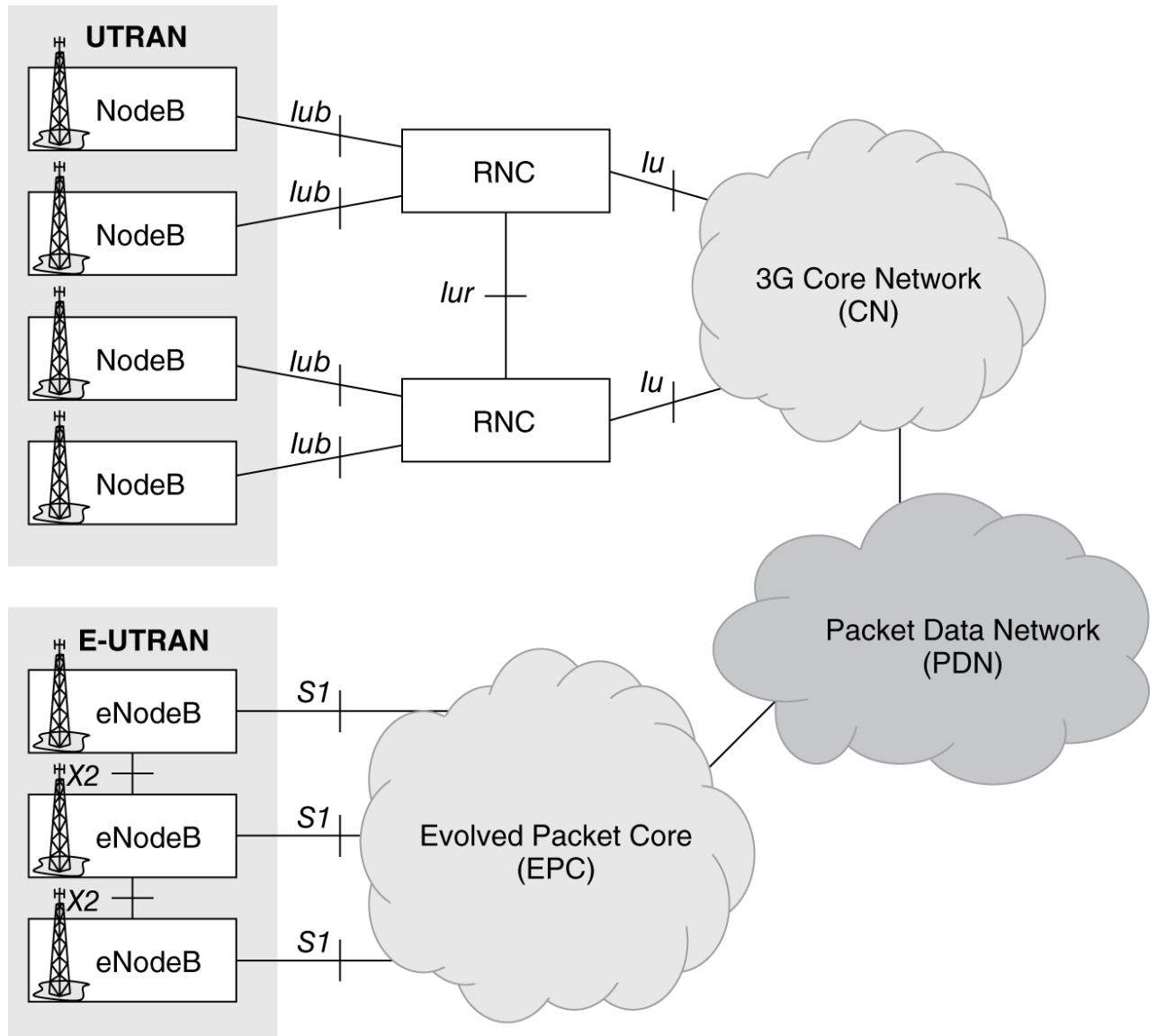


Рисунок 1.7. Відмінності архітектури мережі доступу UMTS(UTRAN) та LTE(EUTRAN)

Елемент eNB відповідає за наступні функції:

- Управління радіоресурсами (RRM);
- Управління радіоканалом;
- Контроль радіоприймання;

- Контроль мобільності підключення (КМП);
- Планування користувацьких даних (DL та UL);
- Захищеність у площині доступу (AS);
- Вимірювання, як основа для планування та управління мобільністю;
- Зменшення заголовків IP;
- Шифрування та кодування даних користувача;
- Маршрутизація даних між eNB та S-GW;
- Проведення пейджингу, який бере початок від MME;
- Розсилка ширококомовних повідомлень.

Можливе використання додаткових елементів, - HeNB та HeNB Gateway.

Аспекти для HeNB, такі:

- HeNB - обладнання, яке можна використовувати в приміщеннях та яке використовує частоти згідно ліцензії оператора;
- HeNB призначений для посилення та збільшення покриття мережі або ємності;
- HeNB включає всі функції eNB, а також функції, які пов'язані з конфігурацією та безпекою.

HeNB Gateway вирішує більшість проблем підтримки великої кількості інтерфейсів S1. Тим самим, цей відносно додатковий елемент можна використовувати для співвідношення та врівноваження інтерфейсів.

На рис. 1.8 показаний принцип та архітектура HeNB.

Концепція HeNB може бути використана в наступних елементах доступу:

- У форматі закритого доступу, тобто коли лише група користувачів закритої групи абонентів може отримати доступ до відповідної фемтосоти;
- У гібридному форматі доступу, тобто коли користувач, і не користувач закритої групи абонентів може отримувати доступ до фемтосоти, але користувач закритої групи має вищий пріоритет;
- У форматі відкритого доступу, тобто коли фемтосота сприймається всіма користувачами як звичайний eNB.

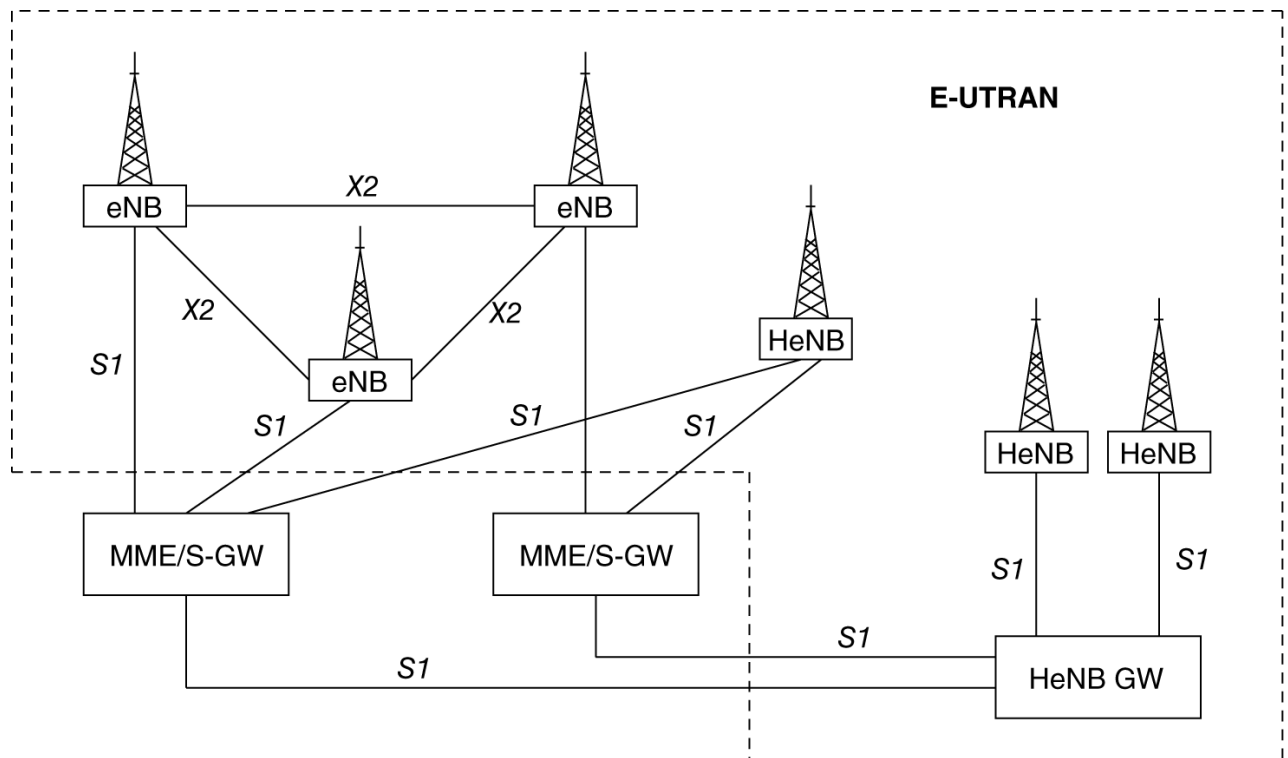


Рисунок 1.8. Архітектура мережі доступу E-UTRAN з використанням HeNB

1.3.2 Serving gateway

Елемент Serving Gateway (S-GW) відповідає за маршрутизацію та передачу пакетів даних з пристроїв користувачів. S-GW управляє мобільністю в зоні розташування та відносно до площини користувача, в разі хендоверу між eNB або вертикального хендоверу між LTE та іншими активними технологіями 3GPP через інтерфейс S4 шляхом ретрансляції трафіку між P-GW та 2G/3G систем. Якщо пристрій користувача починає приймати дані в режимі очікування, елемент S-GW запускає протокол пейджингу. S-GW керує контекстами UE, включаючи параметри послуги IP-пристрою та інформацію маршрутизації в мережі LTE.

Елемент S-GW забезпечує з'єднання на користувацькому рівні UE з одного боку та мережевим шлюзом пакетної передачі даних (P-GW) з іншого боку фізичного елемента S-GW. В залежності від відношення провайдера мережі, ці елементи будуть окремими або фізично об'єднані як єдиний користувацький елемент. Варто зазначити про те, що жодного обміну керуючими повідомленнями між UE та S-GW не відбувається у зв'язку з тим, що елемент MME відповідає за площину управління.

Взагалі, елемент маршрутизації S-GW відповідає за наступні функції:

- S-GW – як основна опорна точка для процедури хендоверу між eNB;
- S-GW є основним опорним пунктом для вертикального хендоверу з використанням інших технологій 3GPP;
- Маршрутизація та переадресація пакетів;
- S-GW виконує буферизацію пакету в стані очікування E-UTRAN;
- S-GW відтворює і обробляє процедуру запитів на обслуговування;
- Виконує маркування пакету на транспортному рівні для різних типів ліній зв'язку;
- Виконує збір записів даних (CDR), який може ідентифікувати UE, PDN та QCI.

1.3.3 Public data network gateway

Діючи в інтерфейсі між опорними та зовнішніми мережами, мережевий пакетний шлюз передачі даних (P-GW) забезпечує зв'язок між обладнанням користувача та зовнішніми мережами. Основна роль P-GW полягає в тому, щоб для технології мобільності та між технологіями 3GPP стати якорем, як на прикладі між мережами 3GPP2 та WiMAX. Обладнання користувача має з'єднання з декількома PDN GW причому одночасно для того, щоб отримувати доступ до різних PDN паралельно.

P-GW так само, як і S-GW, забезпечує підключення на площині користувача в ланцюзі UE, S-GW і P-GW. Елемент P-GW взаємодіє з S-GW, а з іншого боку - із зовнішньою мережею пакетних даних (PDN). Також, P-GW має присутній в собі функціонал GGSN (GPRS).

Взагалі, P-GW включає в себе наступні функції:

- Функціональний розподіл IP-адреси для обладнання користувача;
- Фільтрація пакетів даних, яка здійснюється на рівні активного користувача. Інший термін цієї функціональності – глибокий рівень перевірки пакетів;
- Законне перехоплення інформації;
- Маркування пакетів даних рівні низхідної транспортної лінії зв'язку;

- Стягнення оплати за різні активні сервіси для користувача, за встановлення тарифів та стовок;
- Налаштування та встановлення прав на доступ до ресурсів в DL на основі APN;
- Активний контроль за стягнення сплати за використання в реальному часі.

1.3.4 Mobility management entity

На рівні управління мережею присутній елемент управління мобільністю (MME), який діє для доступу LTE. Цей елемент виконує роль керування процедурами відстеження та активного пейджингу обладнання у користувача в режимі очікування. Роль елемента MME полягає в наданні допомоги до процедур для активації та дезактивації каналу, обираючи необхідні S-GW, в той час, коли користувачке обладнання виконує початкові процедури приєднання. MME бере пряму участь у передачі повідомлень на сигнальному рівні у випадку хендовера, що в свою чергу вимагає активного переміщення вузла опорної мережі. Крім того, MME керує аутентифікацією користувача за допомогою взаємозв'язку з елементами HSS. MME постійно піклується про «роботу без доступу» (NAS).

MME часто використовують для сигналізації площин управління між UE та іншими елементами мережі, на прикладі HSS. Повідомлення з площин користувача не проходять так само, як і повідомлення через MME, оскільки сигналізація не проходить через S-GW або P-GW.

MME забезпечує наступні функції;

- Сигналізація в прошарку без доступу (NAS);
- Організація безпеки сигналізації NAS;
- Здійснення контролю безпеки шару доступу;
- Обирання елементів P-GW та S-GW;
- Обирання інших MME у разі хендовера;
- Обирання SGSN у випадку хендовера між LTE та 3G
- Сигналізація опорних мереж між вузлами для 3G;
- Керування переліком зон відстеження (TA);

- Міжнародний та національний роумінг;
- Аутентифікація користувача;
- Створення та надання управління виділеними активними каналами;
- Управління неодноразовою передачею пейджингу до UE та функціями, які пов'язані з пошуком UE під час очікування;
- Створення, надання та розподіл ідентифікаторів для UE, які є тимчасові;
- Дозвіл на так званий «кемпінг», для UE в громадській мережі (PLMN);
- Дотримання обмежень для роумінгу UE;
- Визначення та забезпечення певних функцій контролю для LTE та 3G через інтерфейс S3 до SGSN.

1.3.5 Home subscriber server та PCRF

HSS - це активне сховище для всіх типів даних, яке пов'язане з користувачами та активними послугами. HSS включає в себе наступні функціональні елементи: функціонал IMS, місцевий реєстр розташування, центр аутентифікації (HLR/AUC), необхідні дані реєстру для домену PS та CS. Функція HLR яка використовується для забезпечення підтримки елементів домену PS, таких як MME. Це надає змогу користувачам передплатеного сервісу отримати доступ до активних послуг домену PS. Також HLR забезпечує підтримку елементів домену CS, таких як MSC-сервери. Що в свою чергу надає змогу користувачам передплатеного сервісу отримати доступ до елементів та служб домену CS та надає підтримку роумінгу до доменів мереж GSM та UMTS. AUC зберігає секретний ключ для кожного споживача мобільного зв'язку, який використовується для створення динамічних даних для забезпечення безпеки кожного користувача мобільного зв'язку.

Мережа LTE включає в себе декілька HSS. Кількість HSS залежить від географічної структури, належності та кількості активних абонентів.

PCRF – елемент мережі LTE, який відповідає за управління нарахуваннями оплати за надані послуги стільникового зв'язку, та також за надану якість з'єднання у відповідності до заданих користувачу характеристик.

Функції PCRF розділено на 2 ключові частини:

- Управління різними типами політик, які також можуть бути розділені на 2 частини: контроль шлюзу та якості. Під контролем шлюзу визначається своєчасне та безпомилкове співвизначення подій, таких як початок надання, зміна активних параметрів, кінець надання послуг і т.д. В свою чергу управління якістю забезпечує безперервний моніторинг і підтримку заданих параметрами абонента характеристик надання послуг.
- Керування нарахуваннями для оплати. Передбачає зобов'язання проводити онлайн тарифікацію, тобто коли абонент і оператор відслідковують в реальному часі стан рахунку. PCRF підтримує декілька активних моделей нарахувань для сплати: по об'єму послуг, по витраченому часі на надання послуг, по факту активного надання послуг, а також комбіновані моделі.

PCRF повинен підтримувати всі названі вище функції навіть тоді, коли абонент знаходиться за межами дії мережі оператора.

1.3.6 User equipment

User equipment – абонентське обладнання. Відноситься до мереж стандартів UMTS та LTE. На відміну від GSM, абонентські пристрої в мережі UMTS та LTE не обмежують себе лише смартфонами. Елементи та модулі для використання доступу в мережу стільникового зв'язку, можна знайти в багатьох приладах як побутового, так і промислового значення. При чому це не тільки мобільні, а й стаціонарні пристрої, наприклад роутери, адже LTE забезпечує велику швидкість передачі даних, і користувачі часто використовують роутери для забезпечення домашнього ПК чи телевізора доступом до інтернет.

В специфікаціях 3GPP доволі часто можна зустріти термін «категорія UE». Це сукупність певних параметрів, які визначають максимальну швидкість (тобто

пропускну здатність) для UE. З постійним розвитком LTE та випуском нових елементів, список категорій UE стає все довшим, а відтворення категорій постійно ускладнюється. Присутні окремі категорії, які визначають певні властивості для пристроїв, які використовуються в мережах інтернету-речей, оскільки в 3GPP присутні стандарти, які передбачають розгортання таких типів мереж на базі LTE. В таб. 1.3 вказано максимальну швидкість завантаження в обох напрямках.

Таблиця 1.3

Категорії UE та максимальна можлива швидкість завантаження

Категорія UE	Максимальна швидкість завантаження, downlink, Мбіт/с	Максимальна швидкість завантаження, uplink, Мбіт/с
0	1	1
1	10	5
2	50	25
3	100	50
4	150	50
5	300	75
6	300	50
7	300	100
8	300	150
9	450	50
10	450	100
11	600	50
12	600	100
13	390	150
14	3900	1500

1.4 Частотний спектр

1.4.1 Виділені смуги спектру

3GPP встановили набір з 6 смуг частот, від 1.4 МГц до 20 МГц. Ці смуги відображені в таб. 1.4. Блок ресурсів надає визначення основній одиниці для інтерфейсу LTE. Планувальник eNB надає ресурсні блоки для UE при дозволі

передачі даних. Піднесучі належать до технології ортогонального розподілу частот з множинним доступом (OFDMA) у низхідній лінії зв'язку та до технології множинного доступу з розподілом частот з використання однією несучої (SC-FDMA).

Таблиця 1.4

Смуги частот для мережі LTE

Ширина каналу	1.4 МГц	3 МГц	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
Кількість ресурсних блоків	6	15	2	50	75	100
Кількість піднесучих	72	180	300	600	900	1200
Ефективна ширина каналу у висхідній лінії	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18
Ефективна ширина каналу у низхідній лінії	1,095	2,715	4,515	9,015	13,515	18,015

Блок ресурсів надає уяву основній одиниці для повітряного інтерфейсу LTE. Планувальник eNB надає ресурсні блоки для UE при отриманні дозволу для передачі даних. Піднесучі належать до технології OFDMA у низхідній лінії зв'язку та до технології множинного SC-FDMA. Є 12 піднесучих на один ресурсний активний блок, тому кількість піднесучих дорівнює, 12 «помножено на» кількості ресурсних блоків, рис. 1.9. Кожна піднесуча має смугу в 15 кГц, тому загальна ширина піднесучих дорівнює, 15 кГц «помножено на» кількості ресурсних блоків. Ширина піднесучих, для низхідної лінії зв'язку, включає в себе додаткові 15 кГц для розміщення нульової піднесучої в центрі всіх інших піднесучих. Нульова піднесуча забезпечує 15 кГц порожнього спектру, в межах якого нічого і нікому не передається. Загальна ширина піднесучих менше, ніж ширина каналу, для того щоб забезпечити безперебійне згортання викидів і підтримувати забезпечення захисних смуг. Збільшена ширина каналу, забезпечує постійну підтримку збільшеної пропускної здатності. Менша ширина каналів

викликає підтримку нижчої пропускної здатності, тому їх легше розмістити в межах існуючих розподілів спектру. 3GPP визначає інтервал між піднесучими в 7,5 кГц (на додаток до 15 кГц). Інтервал між піднесучими становить 7,5 кГц та використовується лише у сотах, які призначені для трансляцій мультимедіа. Присутні 24 замість 12 піднесучих на ресурсний блок, якщо використаний інтервал 7,5 кГц, тому ширина ресурсного блоку залишається сталою. LTE Advanced забезпечує підтримку створення каналів, що в свою чергу дозволяє паралельне використання декількох одночасних каналів. Це більш ефективно збільшує швидку пропускну здатність каналу, відповідно до суми окремих компонентів.

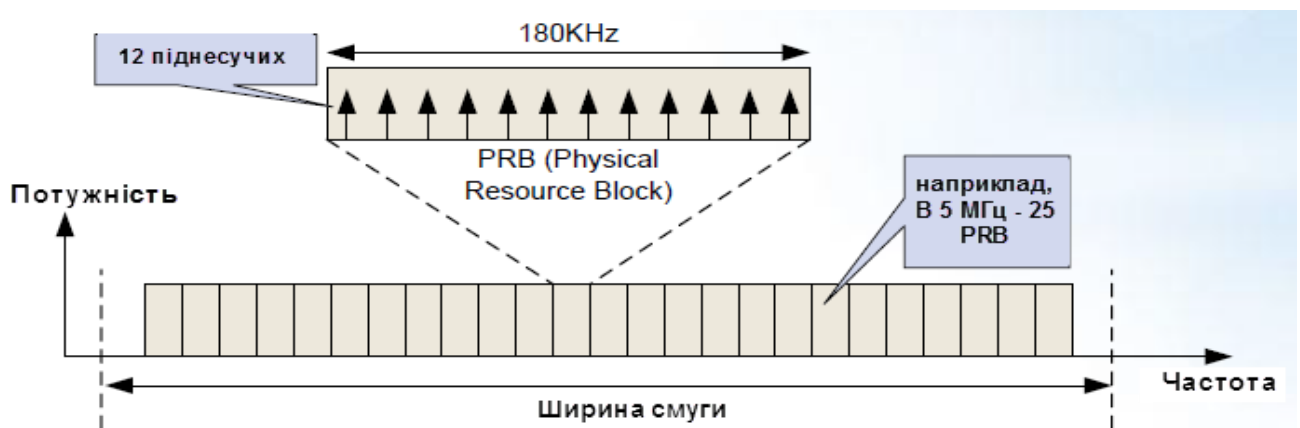


Рисунок 1.9. Приклад поділу спектру на піднесучі і ресурсні блоки

1.4.2 Частотний і часовий дуплекс

В LTE визначено підтримку частотного і часового дуплексу. Часовий дуплекс полягає у використанні однієї смуги спектру для передачі в низхідному і висхідному напрямках. Частотний дуплекс полягає у використанні двох окремих смуг спектру для передачі в низхідному і висхідному напрямках, тобто коли користувачський термінал та eNB передають і приймають дані використовуючи різні частотні смуги. Пристрій користувача та eNB не можуть передавати дані одночасно, так як використовують один канал, вони це роблять у встановлені проміжки часу.



Рисунок 1.10. Принцип дуплексу з частотним та часовим поділом

Частотний дуплекс – це більш кращий варіант для систем, де вимоги до швидкості в висхідній і низхідній лінії зв'язку є відносно симетричною величиною. Частотний дуплекс забезпечує більш вищу швидкість і пропускну здатність каналу зв'язку, оскільки передача даних йде переважно безперервно в обох напрямках. Ємність пари каналів є вищою ніж ємність одного каналу при активному часовому дуплексі, проте вимагає більшу величину спектру. Частотний дуплекс в цьому плані простіший і більш адаптивний для розгортання з точки зору вимог до синхронізації. Загалом, сусідні станції не обов'язково повинні бути синхронізовані по часу. Сусідні станції при часовому дуплексі повинні бути синхронізовані, щоб уникати взаємної інтерференції. Принцип організації каналів передачі вказано на рис.1.10

Часовий дуплекс – це більш кращий варіант для систем, де вимоги до передачі даних дуже асиметричні, оскільки співвідношення між низхідною і висхідною лінією зв'язку може змінюватися, а водночас смуга частот залишається використаною. У частотному дуплексі спостерігаються ситуації, коли низхідна лінія більш завантажена ніж висхідна, бо та залишається слабо використаною. Однак канали операторам коштують однакових витрат за використання. При часовому дуплексі обладнання постійно синхронізовано по часу і несе певну складність роботи пристроїв. На відміну від часового у частотному дуплексі йде збільшення шуму під час прийому сигналу та йде збільшення втрат при передачі.

1.4.3 Частотні смуги

Частотні смуги, що утверджені 3GPP для використання в системі LTE при частотному дуплексі. Вказано в таб. 1.5.

Таблиця 1.5

Список встановлених частотних смуг для LTE з використанням частотного дуплексу з частотним поділом

Номер смуги LTE	Частотний діапазон Upload (МГц)	Частотний діапазон Download (МГц)	Ширина діапазону (МГц)
band 1	1920 - 1980	2110 - 2170	2x60
band 2	1850 - 1910	1930 - 1990	2x60
band 3	1710 - 1785	1805 - 1880	2x75
band 4	1710 - 1755	2110 - 2155	2x45
band 5	824 - 849	869 - 894	2x25
band 6	830 - 840	875 - 885	2x10
band 7	2500 - 2570	2620 - 2690	2x70
band 8	880 - 915	925 - 960	2x35
band 9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	2x35
band 10	1710 - 1770	2110 - 2170	2x60
band 11	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	2x20
band 12	698 - 716	728 - 746	2x18
band 13	777 - 787	746 - 756	2x10
band 14	788 - 798	758 - 768	2x10
band 15	1900 - 1920	2600 - 2620	2x20
band 16	2010 - 2025	2585 - 2600	2x15
band 17	704 - 716	734 - 746	2x12
band 18	815 - 830	860 - 875	2x15
band 19	830 - 845	875 - 890	2x15
band 20	832 - 862	791 - 821	2x30
band 21	1447.9 - 1462.9	1495.5 - 1510.9	2x15
band 22	3410 - 3500	3510 - 3600	2x90
band 23	2000 - 2020	2180 - 2200	2x20
band 24	1625.5 - 1660.5	1525 - 1559	2x34
band 25	1850 - 1915	1930 - 1995	2x65
band 26	814 - 849	859 - 894	2x35
band 27	807 - 824	852 - 869	2x17
band 28	703 - 748	758 - 803	2x45
band 29	н/д	717 - 728	11
band 30	2305 - 2315	2350 - 2360	2x10
band 31	452.5 - 457.5	462.5 - 467.5	2x5

Більшість смуг вказаних частот, встановлені для надання можливості використання в системі стільниковго зв'язку UMTS. Що в свою чергу забезпечило можливість перерозподілу даних у спектрі для використання в LTE, чи одночасного використання одразу двома технологіями. Нумерація смуг, які повинні бути використані в UMTS та LTE, співпадає. Деякі смуги встановлені для надання можливості використання в системі стільниковго стандарту зв'язку GSM. Що в свою чергу забезпечує надання можливості перерозподілу спектру використання для LTE, та сумісного використання двома технологіями. Такий підхід надає операторам зв'язку гнучкості під час вибору стратегії для використання доступного частотного діапазону.

Більшість наданих частот, були встановлені для надання можливості використання в системі стільниковго зв'язку операторів UMTS. Такий підхід забезпечує надання можливості перерозподілу виділеного спектру для використання в LTE, та сумісного використання двома технологіями. Нумерація смуг, які повинні бути використані в LTE, співпадає. Це в свою чергу забезпечує надання можливості перерозподілу спектру використання для LTE, та сумісного використання двома технологіями. Такий підхід надає операторам гнучкості під час вибору стратегії для використання доступного частотного діапазону.

Як ми бачимо, більшість вказаних смуг передбачають розміщення частин смуг, для надання та організації висхідної лінії зв'язку перед частинами, які передбачені для низхідної лінії зв'язку. Таке рішення прийнято та використано для того, щоб підвищити енергоефективність обладнання споживачів, так як передача даних на більш низьких частотах має більшу енергоефективність та ефективність розповсюдження, тобто сама вихідна потужність пристрою буде нижчою, ніж під час використання більш високих частот.

Вказані переваги та особливості пояснюються властивостями розповсюдження радіохвиль (таб. 1.6 вказаний перелік затверджених смуг частот для використання у системі оператора стільникового зв'язку під час надання послуг з використанням LTE при активному часовому дуплексі).

Таблиця 1.6

Список встановлених частотних смуг для LTE з використанням часового дуплексу

Номер смуги LTE	Частотний діапазон (МГц)	Ширина діапазону (МГц)
band 33	1900 - 1920	20
band 34	2010 - 2025	15
band 35	1850 - 1910	60
band 36	1930 - 1990	60
band 37	1910 - 1930	20
band 38	2570 - 2620	50
band 39	1880 - 1920	40
band 40	2300 - 2400	100
band 41	2496 - 2690	194
band 42	3400 - 3600	200
band 43	3600 - 3800	200
band 44	703 - 803	100

Більшість вказаних смуг частот були встановлені для надання можливості використання в системі зв'язку UMTS. Це фактично надає можливість перерозподілу спектру під час використання для LTE, або сумісного використання двома технологіями. Проте спільне використання є доволі складним, та викликає і створює велика ймовірність виникнення взаємної інтерференції. Зазначимо, що нумерація смуг, які повинні бути використані для операторів зв'язку мереж UMTS та LTE не співпадають. В LTE нумерація починається з номеру 33, в той самий час, як в UMTS позначається літерами, такими як: a, b, c, d, e та f.

1.5 Метод просторового кодування сигналу MIMO

Однією з випереджаючих технологій передового плану, впроваджених в систему LTE, є використання технології, в якій присутнє використання декількох антен які мають назву Multiple Input Multiple Output (MIMO). Системи MIMO здебільшого використовують декілька передавальних антен для передачі сигналу

передачі даних та для більш ніж однієї приймальної антени іншої сторони пристроїв, використовуючи ту ж саму частоту передачі даних. MIMO не нова технологія, бо вже багато років використовується в бездротових локальних мережах WLAN. Але для LTE це є нова технологія і вона використовується перш за все, для збільшення пропускної здатності на площині та спектральної ефективності і на додачу до покращення якості передаваних даних, які було отримано завдяки використанню у цій сфері нового методу доступу OFDMA.

Використання технології MIMO застосовується для вирішення двох задач:

- Підвищення фактичної якості зв'язку за рахунок просторового, часового, частотного кодування та формування так званого «променя» (beamforming);
- Підвищення фактичної максимальної швидкості передачі даних під час використання просторового мультиплексування.

MIMO включає в себе обов'язкове просторове мультиплексування, попереднє кодування та рознесення під час передачі даних. Принцип дії просторового мультиплексування полягає в тому, що сигнали які передаються з двох або більше різних антен та мають різні потоки даних, а водночас на стороні приймача потоки даних повинні бути розділені за допомогою існуючих та прописаних методів обробки сигналів. Фактично, це збільшує максимальну швидкість надаваної передачі даних на коефіцієнт 2, під час використання конфігурації MIMO 2x2, і на коефіцієнт 4 під час використання конфігурації MIMO 4x4.

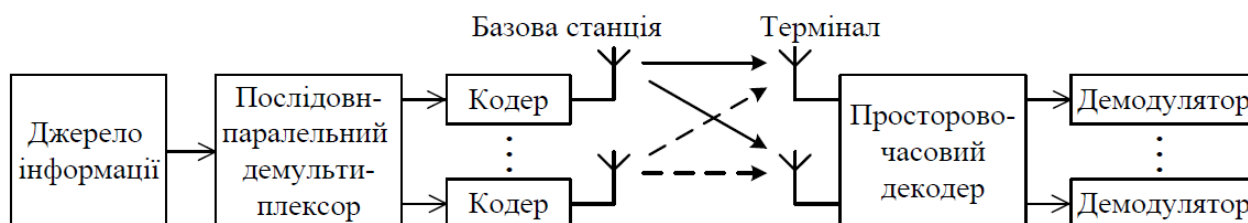


Рисунок 1.11. Принцип роботи системи MIMO

В системі LTE просторове мультиплексування впроваджують на основі багатошарових структур. Інформаційний потік даних, який передається, розділяють на окремі шари (layers). Далі потоки цих окремих шарів за допомогою

спеціальних матриць кодування, перетворюють їх у потоки, які передаються через спеціальні окремі антени, число яких досягає 8. Кількість окремих шарів визначає фактичний ранг самої структури. Пояснення послідовності виконуваних операцій в передавальному обладнанні під час просторового мультиплексування пояснює зображення на рис. 1.12.

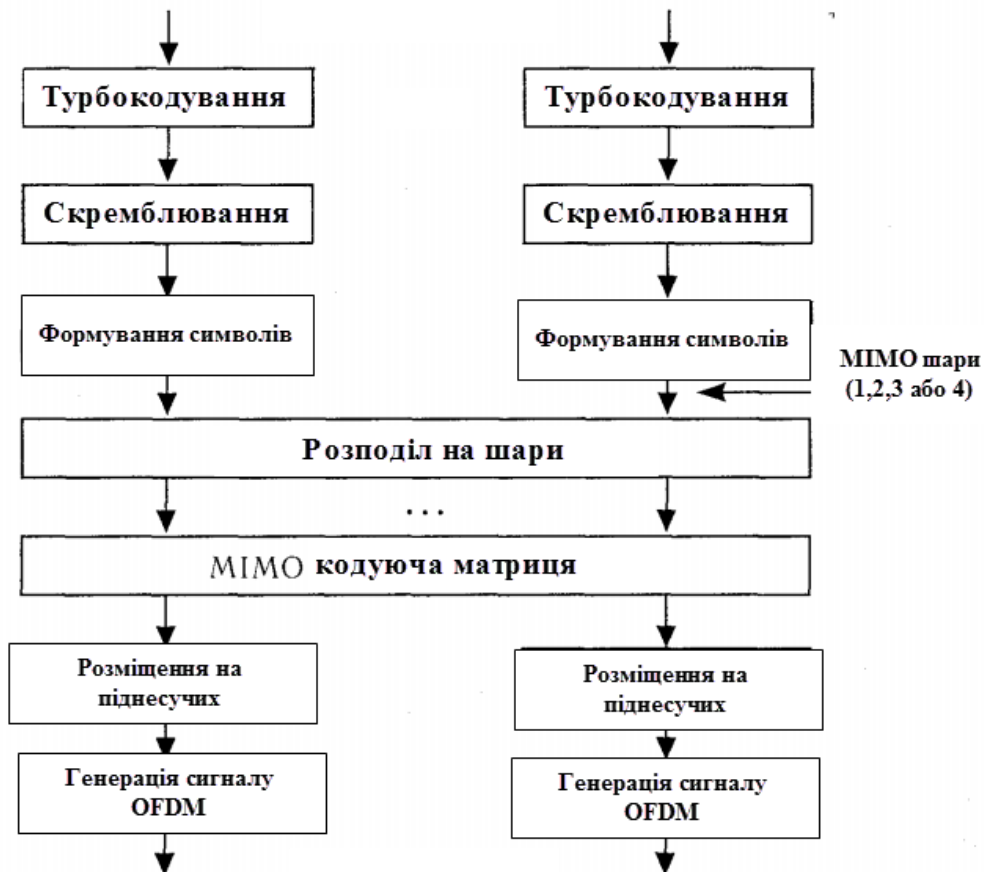


Рисунок 1.12. Операції передавача при просторовому мультиплексуванні

В LTE використовують 2 варіанти просторового мультиплексування: однокодовий (SCW) та багатокодовий (MCW). В однокодовому варіанті до інформаційного блоку додають перевірочний код CRC, після цього виконують збиткове кодування, скремблювання і формування модулюючих символів. Потік символів ділять на декілька шарів та після MIMO кодування передають на різні антени.

При багатокодовому мультиплексуванні інформаційний блок розділяють на декілька спеціальних субблоків. До кожного субблоку додають свій так званий перевірочний код, потім відбувається так зване збиткове кодування та

формування модулюючих символів. При цьому в субблоках можуть бути використані різні модуляційно-кодуєчі схеми.

В LTE число використовуваних кодів під час передачі даних обмежено двома, а число шарів (ранг) – чотирма. Припустимі варіанти просторового мультиплексування, в залежності від прийнятого рангу. Цей варіант пояснює рис. 1.13(1 і 2). На них чітко показано розподіл модулюючих символів окремим шарами, під час використання однокодового (CW0) та багатокодового (CW1, CW2) варіантів. Число передавальних антен не може бути менше за ранг.

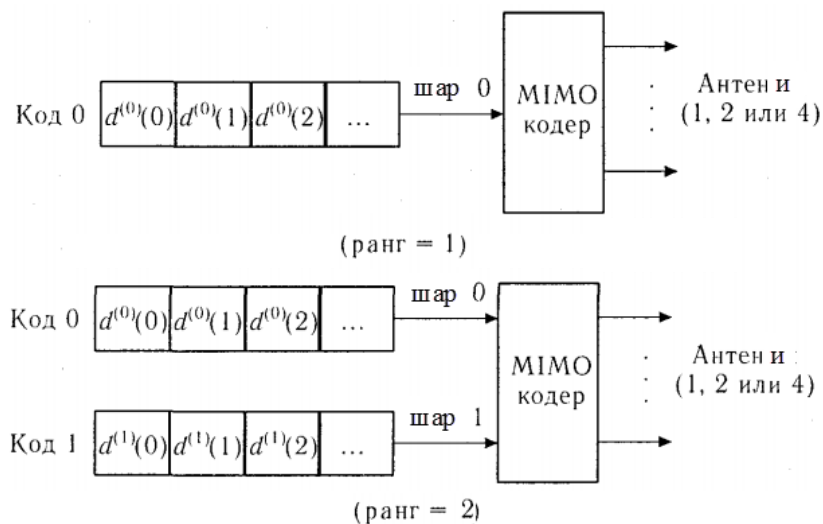


Рисунок 1.13.1. Потіки символів при передачі з двома різними рангами

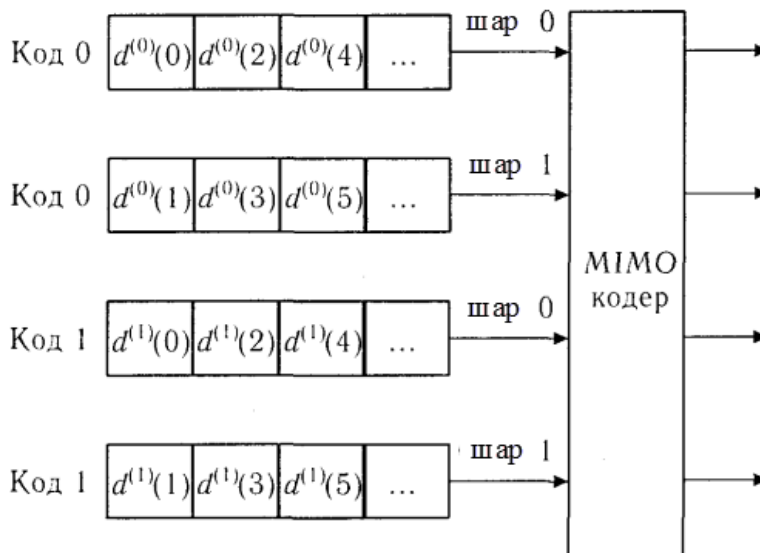


Рисунок 1.13.2. Потіки символів при передачі з чотирма різними рангами

Стандартом LTE передбачено 9 класів передачі:

- Клас 1. Одна звичайна передавальна антена без MIMO;
- Клас 2. Передача з просторовим частотно-часовим кодуванням;
- Клас 3. Просторове мультиплексування з розімкненою петлею зворотнього зв'язку. Можливе використання двох кодів при передачі. З боку UE припустиме та можливе управління числом активних шарів;
- Клас 4. Просторове мультиплексування з зімкненою петлею зворотнього зв'язку. Присутня можливість використання двох кодів під час передачі даних. З боку UE надаються команди управління рангом, передачі і індексом матриці передкодування;
- Клас 5. Багатокористувацький MIMO з зімкненою петлею зворотнього зв'язку;
- Клас 6. Просторове мультиплексування з зімкненою петлею зворотнього зв'язку. Ранг = 1;
- Клас 7. Робота з опорними сигналами. Ранг = 1;
- Клас 8. Робота з опорними сигналами. Ранг = 2;
- Клас 9. Робота з опорними сигналами. Ранг ≤ 8 .

Висновки до розділу 1

Розглянуто історію виникнення четвертого покоління бездротового зв'язку стандарту LTE, надано важливі особливості технології, проведені різного типу порівняння з технологією не тільки третього покоління UMTS, а в тому числі зі реальним тестуванням.

Розглянуто архітектуру мережі, коротко та змістовно показано основні функції кожного ключового елемента, зазначені особливості частотного спектру, які використовуються для роботи мережі та приклад організації фізичного каналу.

2 РЕАЛІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ БЕЗДРОТОВОГО ДОСТУПУ

2.1 Загальний огляд

Радіомережа LTE є лише частиною всієї мережі LTE, яка включає в себе eNB, UE та користувацький інтерфейс між ними. Оскільки оглядувана частина мережі безпосередньо з'єднується з споживачами, то вона забезпечує обмін інформацією з UE в певній зоні покриття з досить задовільним рівнем якості різних надаваних сервісів.

У контексті систем стільникового зв'язку планування радіомережі – це комплекс процесів визначення місць для розташування БС, визначення частотних каналів та радіо-частотних параметрів бездротової системи мобільного зв'язку для забезпечення досить достатнього покриття та ємності підключень для забезпечення необхідного рівня якості надаваних послуг, які надаються користувачеві. Планування покриття стосується перш за все географічної зони, де мережа повинна забезпечувати присутність сигналу з достатньою потужністю, для забезпечення доступу до голосових чи пакетно-інформаційних послуг, а планування ємності визначає можливість системи забезпечити достатній доступ до сервісів та заданої кількості абонентів.

Присутні послідовні етапи активного планування стільникової радіомережі, починаючи від звичайного аналізу і до математичного моделювання, за допомогою звичайного комп'ютеру і відповідно-спеціалізованого ПО; тобто від номінального планування до детального та продовження налаштування певної оптимізації. Для розгортання нової стільникової мережі або розширення існуючої, процес планування не є єдиним процесом який присутній при плануванні та проектуванні мережі; це відбувається в щільній координації з процесами планування опорної мережі та мережі трансмісії. Але в поточній роботі акцент поставлено на процесах номінального та більш детального планування покриття мережі стільникового зв'язку LTE, розглянуто загальну методику розрахунку,

використано сучасні програмні засоби для математичного моделювання та оцінки покриття, в останньому розділі відображені результати моделювання в обраному районі міста Києва по заданим вхідним даним.

2.2 Процес планування радіомережі

Найважливіша ціль планування покриття – забезпечити достатньо економічно-ефективне рішення планування радіомережі з точки зору, як покриття, так і ємності та якості. Залежно від обраного первинного параметру, покриття чи ємності, результат планування може бути різноманітним та задовольняти різні потреби перш за все бізнесу. Критерій чи первинний параметр обирається в залежності від регіону, де проводитиметься планування, а також бізнес-стратегія. З другого боку, мережа повинна відповідати поточним та майбутнім потребам та вимогам.

У випадку розробки та впровадження на комерційній основі нової мережі LTE, процес планування поділяється на певні етапи підготовки, базового планування, детального планування, запуску мережі та оптимізації, як показано на рис. 2.1 Далі кожен з етапів буде коротко описано.

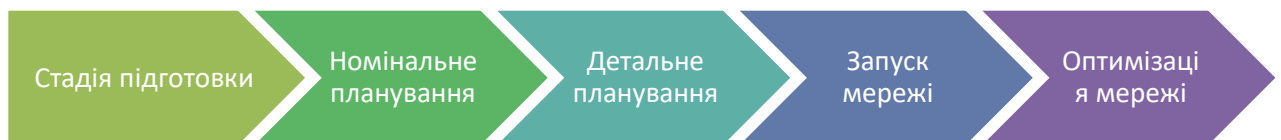


Рисунок 2.1. Етапи планування радіомережі

2.2.1 Стадія підготовки

Оскільки стадія підготовки є початком процесу, то вона починається з підготовки вимог до покриття і ємності. Вимоги до покриття потребують визначення областей покриття, можливість надання відповідних сервісів та пов'язаний з цим рівень сигналу, на прикладі потужності опорного сигналу (RSRP). З другого боку, вимоги ємності потребують прогноз та карта трафіку в обраній місцевості. На поточному етапі виконується обирання доступних смуг частот, для визначення областей за типом (міська зі щільною забудовою, міська, приміська або сільська), та також визначення моделі розповсюдження.

2.2.2 Номінальне планування

У поточному етапі проведено розрахунки енергетичного бюджету для визначення оптимальних значень для обраної області та на їх властивостях. З енергетичного бюджету вираховано максимальне припустиме затухання під час розповсюдження та радіус соти, який буде використано під час деталізованого планування та для проведення математичного моделювання покриття за допомогою спеціальних програмних засобів. На цьому етапі присутня оцінка-розрахунок пропускної здатності мережі для отримання кількості необхідних БС, які відповідатимуть вимогам ємності.

Як результат підрахунків у поточному етапі буде радіус соти для різних місцевостей, підтримувана кількість абонентів однією БС, а також кількість БС, які задовольнятимуть потреби покриття та ємності, які були визначені у попередньому етапі. На рис. 2.2 показано блок-схему, яка узагальнює кроки під час номінального планування.

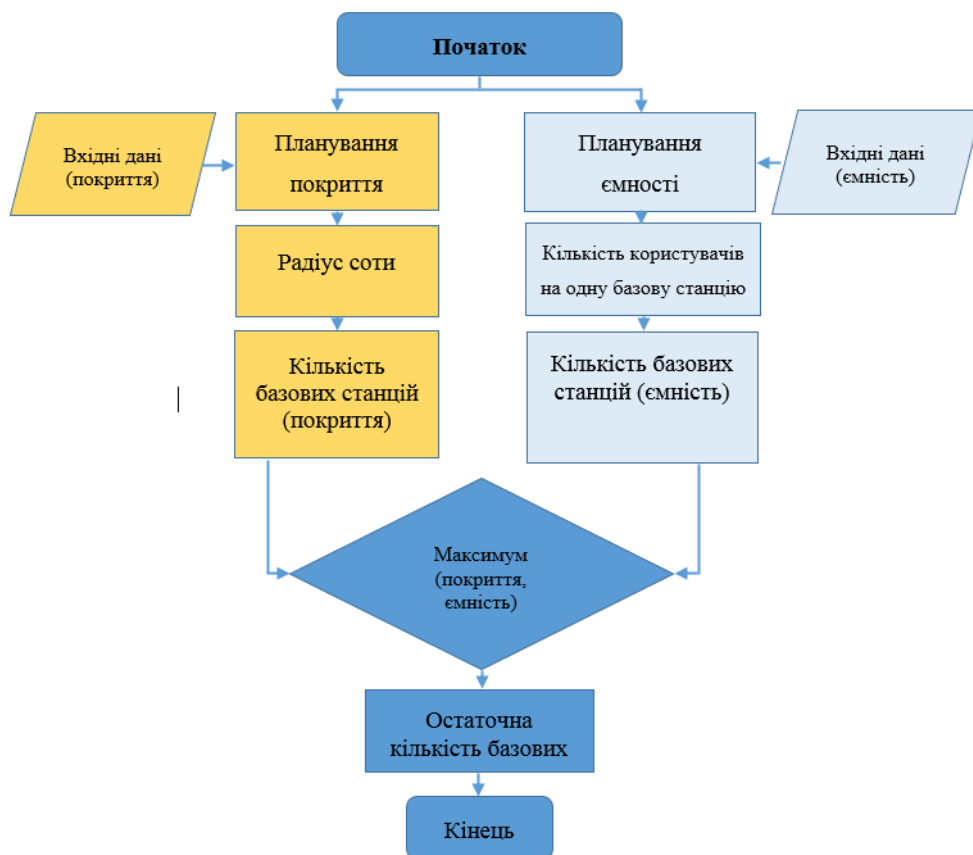


Рисунок 2.2. Схема процесу номінального планування

2.2.3 Детальне планування

Використовуючи результати, отримані після етапу номінального планування, та на етапі детального планування починають визначатися початкові точки розташування БС, обирається тип антени, обирається азимуту, механічного, електричного та вертикального нахилу. Після того як, використавши параметри, які були використані при початковому плануванні та обравши певну модель розповсюдження, та за допомогою спеціалізованого ПО для планування радіомережі буде враховано спрогнозоване покриття.

Так як при початковому плануванні територія необхідних обчислень береться як рівна, та під час прогнозування покриття можна зіткнутися з пустими просторами в покритті через особливості рельєфу та забудов. Тому, для досягнення необхідного результату, потрібно впроваджувати оптимізацію до самого запуску мережі.

Також на етапі планування кожна з запланованих станцій-кандидатів перевіряється на відповідність потребам з покриття та ємності. На час обстеження певних ділянок, на яких заплановане розміщення, будуть надані вимоги до придбання чи оренди певної ділянки, рішення стосовно забудов базової станції, відповідного доступу до певного об'єкта тощо.

2.2.4 Запуск мережі

На цьому етапі впровадження мережі та побудова відповідних сайтів проводиться на підставі результатів, отриманих на етапі деталізованого планування. Обравши модель для розгортання, проведено розгортання всієї мережі та прийняття.

2.2.5 Оптимізація мережі

Оптимізація мережі – це постійний процес, що триває протягом всього часу експлуатації мережі. Стосовно попередньої оптимізації, перевірка параметрів сот, покриття та пропускної здатності, проведена для попередньої оптимізації

запланованої мережі. На фазі оптимізації будуть перевірені номінальні та деталізовані результати виконаного планування з фактичними показниками продуктивності запланованої мережі та налаштування мережевих параметрів проводитиметься доти, доки мережа не буде відповідати погодженим ключовим показникам ефективності (KPI) перед самим етапом комерційного запуску. Після того, як мережа почне працювати в комерційному форматі, оператор продовжить відтворювати оптимізацію мережі знову і знову, для задоволення попиту своїх абонентів та уникнути ряд нарікань на роботу (такі як: проблеми покриття, рівень якості дзвінків та зменшення продуктивності тощо).

2.3 Планування покриття LTE

Завдання планування покриття полягає у визначенні зони покриття, в якій є необхідність забезпечити достатню потужній радіосигнал для споживачів. Це відтворюється шляхом оцінки бюджету радіохвиль лінії DL та UL, та для отримання максимального зменшення втрати під час розповсюдження (MAPL) на базі бажаного рівня співвідношення «сигнал-інтерференція+шум» (SINR) з приймальної сторони.

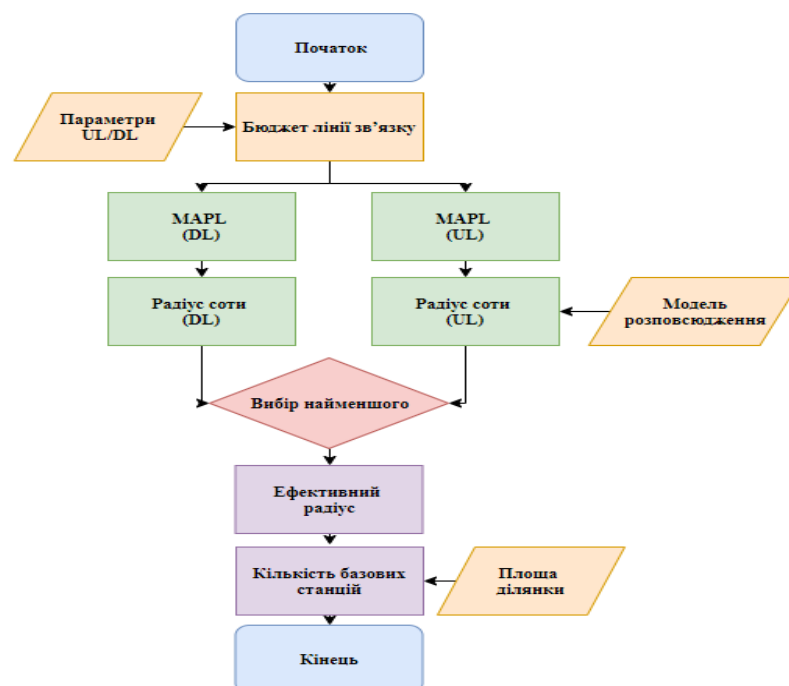


Рисунок 2.3. Загальний процес планування покриття LTE

MAPL розраховується для DL та UL для різних типів рельєфу використовуючи модель розповсюдження, щоб в результаті отримати значення радіусу соти. Так як властивості DL та UL різні, то для визначення площі соти, слід враховувати ефективний радіус соти. На рис. 2.3 показано загальний процес планування покриття LTE. Для отримання результативного планування яке вимагає вірного вибору моделі розповсюдження, деталізовану інформацію надано в інших послідуючих підрозділах.

2.3.1 Модель розповсюдження

У бездротовій стільниковій системі зв'язку інформація (або голосова, або дані) відтворюється за допомогою електромагнітних хвиль між передавальними та приймальними пристроями (антенами). Потужність сигналу електромагнітних хвиль слабшає під час поширення через оточуюче навколишнє середовище. Різниця потужності сигналу на виході антени передавача до сили сигналу на вході антени приймача називається втратою розповсюдження (PL – pathloss).

Для визначення втрат розповсюдження використовуються моделі розповсюдження (моделі втрат). Моделі класифікуються на дві категорії: емпіричні та детерміновані. Емпіричні моделі базуються на фактично вимірах даних та включають в себе всі елементи середовища, тоді як детерміновані моделі базуються на теоретичному аналізі, і їх можна використовувати у різних ситуаціях без фактичного впливу на точність.

Поточна робота побудована на емпіричній моделі де коротко розглянуті ключові емпіричні моделі розповсюдження, які на поточний момент використовуються для визначення певних втрат розповсюдження.

2.3.1.1 Модель Окамура-хата

Модель Окамура-хата використовується для планування покриття, де висота антени зазвичай вища, ніж навколишні перешкоди. Основна втрата розповсюдження для поточної моделі – дифракція та розсіювання сигналу по дахах біля БС. Дана модель повинна використовуватися для діапазону частот 150-

1000 МГц і 1500-2000 МГц та для будь яких типів місцевості, де для висоти антени приймача 1-10 м і для висоти антени 30-200м. Втрати за розповсюдження для моделі Окамура-Хата визначаються за формулою:

$$PL = A + B * \log(f) - 13.82 * \log(h_{6c}) - a(h_a) + [44.9 - 6.55 * \log(h_{6c})] * \log(d) + L_0 \quad (2.1)$$

де f – частота у МГц;

h_{6c} – висота на яку підвішена антена БС в метрах;

$a(h_a)$ – функція, яка залежить від висоти мобільної станції абонента h_a ;

d – відстань між БС та споживачем в км;

L_0 – затухання у вільному просторі.

Функція, $a(h_a)$ приймає різні значення залежно від типу території та визначається як:

Для малих/середніх міст:

$$a(h_a) = (1.1 * \log(f) - 0.7) * h_a - (1.56 * \log(f) - 0.8) \quad (2.1a)$$

Для великих міст:

$$a(h_a) = 8.25[\log(1.54 * h_a)]^2 - 1.1, \quad \text{для } f \leq 200 \text{ МГц} \quad (2.1б)$$

$$a(h_a) = 3.2[\log(11.75 * h_a)]^2 - 4.97, \quad \text{для } f \leq 200 \text{ МГц} \quad (2.1в)$$

Постійні A і B , залежать від частоти:

- Для частоти 150-1000 МГц, $A = 69.55$, $B=26.16$
- Для частоти 1000-2000 МГц, $A = 46.3$, $B=33.9$

2.3.1.2 Модель COST231-Hata

Форум з наукових досліджень ЄС розробив поточну модель, для розширення частотного діапазону моделі Окамура-Хата. Втрата за рахунок розповсюдження розраховується за формулою:

$$PL = 46.3 * 33.9 \log(f) - 13.82 * \log(h_{\text{бс}}) + [44.9 - 6.55 * \log(h_{\text{бс}})] * \log(d) - a(h_a) - C_m \quad (2.2)$$

де d – відстань між БС та споживачем в км;

f – частота у МГц;

h_a – висота антени абонента в метрах;

C_m - стала, 0 дБ для передмістя, 3дБ для міст;

$a(h_a)$ – корекційний показник для значення висоти антени абонента, яка визначається в залежності від типу місцевості:

$$a(h_a) = 3.2 * [\log(11.75 * h_a)]^2 - 4.79 \quad \text{– для міста} \quad (2.2a)$$

$$a(h_a) = 3.2 * [\log(11.75 * h_a)]^2 - 4.79 \quad \text{– передмістя чи сільської місцевості} \quad (2.2б)$$

2.3.1.3 Модель Ericsson 9999

Поточна модель розроблена, з ціллю покращити модель Окамура-Хата та COST231-Hata, враховуючи середовище для розповсюдження. Модель включає більше типів середовища. Дана модель була розроблена Ericsson та використовується з частотами від 150МГц до 2 ГГц, з висотою антени БС від 20 до 200 і висотою антени абонента від 1 до 5 м. Втрати розповсюдження для цієї моделі розраховуються за формулою:

$$PL = A_0 * A_1 \log(d) + \log(h_{\text{бс}}) + A_2 \log(h_{\text{бс}}) \log(d) - 3.2[\log(11.75 * h_a)]^2 + g(f) \quad (2.3)$$

$$g(f) = 44.40 * \log(f) - 4.78[\log(f)]^2 \quad (2.3a)$$

де d – відстань між БС та абонентом в км;

h_a – висота антени абонента в метрах;

$h_{\text{бс}}$ – висота підвісу антени БС в метрах;

f – частота у МГц;

$A_0 - A_3$ – константи зі значеннями 36.3, 30.2, -12 та 0.1 відповідно.

Присутні моделі розповсюдження, які можна використовувати для прогнозування розгортання LTE, які показано в таб. 2.1. Дані моделі використовуються для різних діапазонів частот та типів місцевості. Потрібно правильно обирати модель розповсюдження, для якісного розрахунку покриття.

Таблиця 2.1

Моделі розповсюдження для LTE

Модель	Частотні діапазони	Необхідні дані	Рекомендації використання
ITU 529-3	300 – 1500 МГц	Профіль місцевості, статистичні завади	$1 < d < 100$ км
Стандартна модель розповсюдження	150 – 3500 МГц	Профіль місцевості, статистичні завади	$1 < d < 20$ км
Сакагамі розширена	3000 – 8000 МГц	Профіль місцевості, статистичні завади	$1 < d < 20$ км
CrossWave	150 – 5000 МГц	Профіль місцевості, статистичні завади	Для будь-якого
WinProp-ProMan	150 – 3500 МГц	База будівель, профіль місцевості	$0.02 < d < 35$ км

2.3.2 Параметри і формули для розрахунку енергетичного бюджету

Основна ціль визначення енергетичного бюджету – розрахувати MAPL між передавальною антеною і користувачем в напрямках DL та UL. Порівнюючи MAPL з втратами розповсюдження обраної моделі важливо визначити радіус соти для різних типів місцевості. Енергетичний бюджет включає в себе багато залежних факторів, які впливають на остаточне покриття. Ці фактори включають

в себе втрати для проникнення у будівлі, втрати фідера, підсилення антени, інтерференційний запас радіолінії, для розрахунку підсилення та втрат.

Параметри енергетичного бюджету можна розгрупувати на параметри, які стосуються поширення, параметри які пов'язані з обладнанням, та специфічні елементи налаштування LTE. Параметри які пов'язані з розповсюдженням, включають втрати проникнення, втрату тіла, втрати фідера та фоновий шум. Параметри, які пов'язані з обладнанням - це особливості специфікації, від виробника, такі як потужність передавача, чутливість приймача та підсилення антени. Специфічні елементи LTE враховують інтерференційний запас, запас швидкого затухання, покриття на межі соти і використовуваний тип MIMO:

- Максимальна потужність передавача eNB. Значення потужності передавача на шлях передачі. Типова величина або 43 дБм (20Вт) або 46 дБм (40Вт).
- Коефіцієнт підсилення (КП) антени eNB, вибір якого залежить від вимог до покриття. Антена з низьким КП (15-17 дБі) використовується при щільній забудові, а антена з високим КП (18-20 дБі) буде використана в сільській місцевості, та на магістралях щоб збільшити покриття.
- Максимальна потужність передавача UE. Значення потужності передавача користувача, який залежить від типу обладнання. Поточний клас з потужністю – 23 дБм.
- КП антени UE. Згідно специфікаціям 3GPP, антена UE має КП – 0 дБ.
- Втрата тіла. Це втрата, яка виникає внаслідок поглинання сигналу, коли антена користувача знаходиться близько до тіла. Для таких пристроїв як модем, такі втрати ігноруються, а для смартфонів потрібно обов'язково враховувати. Типове значення – 3дБ.
- Втрати у фідері враховують затухання, радіоперемикачах, конекторах, на шляху між антеною на eNB. Втрати досягають 3 дБ відповідно до характеристик обладнання.
- Ефективна ізотропно випромінювана потужність (EIRP). Вказує потужність, яку теоретично випромінює ізотропна антена для досягнення максимально щільної потужності у напрямку максимального підсилення антени.

EIRP на одну піднесучу розраховується за формулами:

$$EIRP_{DL}^{SC} = P_{eNB(SC)} + AG_{eNB} - F_L + M_G \quad (2.4.)$$

$$EIRP_{UL}^{SC} = P_{UE(SC)} + AG_{UE} - B_L \quad (2.5.)$$

де $P_{eNB(SC)}$ та $P_{UE(SC)}$ – потужність на одну піднесучу в низхідній та висхідній лінії відповідно;

F_L – втрати у фідері;

M_G – підсилення MIMO;

AG_{eNB} – підсилення антени eNB;

AG_{UE} – підсилення антени UE;

B_L – втрати тіла.

- Пропускна спроможність границі соти. Мінімальна цільова пропускна здатність UE, яка повинна бути на межі соти. Визначає послугу, яку необхідно надавати на краю соти; яка визначає мінімальну схему модуляції та кодування (MCS), яку слід використовувати. Цей параметр надається оператором сотової мережі на підставі послуг на межі соти. Типова величина для UL може бути від 512 кбіт / с до 1 Мбіт, в DL, вона може бути від 1 Мбіт до 4 Мбіт / с.
- Відношення сигналу до шуму та інтерференції, SINR. Поріг приймача, забезпечує демодулювання сигналу для UL, який пов'язаний з MCS для DL. Значення SINR отримують під час моделювання на рівні системи, яке залежить від конструкції приймача. Таким чином, SINR є дуже специфічним для постачальника параметром.
- Шумовий рисунок: Це ключовий фактор для вимірювання продуктивності приймача. Він визначається як відношення вхідного SINR на вхідному кінці до виходу SINR на вихідному кінці приймача. Показник шуму залежить від ширини смуги та можливості eNB. Базове значення для показника шуму становить від 6 до 8 дБ.

- Чутливість приймача визначає рівень сигналу, при якому може бути виявлений сигнал з певною зазначеною якістю. Відноситься до антенного роз'єму який повинен враховувати демодуляцію та необхідну якість вихідного сигналу. Чутливість приймача можна обчислити так:

$$R_{x_{S(SC)}} = SINR + NF + NP + 10 \log(SC) \quad (2.6)$$

де SINR – порогове значення для приймача, при якому він може демодулювати сигнал;

NP – щільність теплової енергії білого шуму, яка становить -174 дБм/Гц;

SC – піднесуча, і вона становить 15 кГц в LTE;

NF – показник шуму в дБ.

- Втрати від проникнення – втрата при проникненні, яка вказує на згасання радіосигналу через перешкоду будівлі від внутрішнього терміналу до eNodeB і навпаки. Залежить від типу будівель та типу щільності цільової зони покриття. Таб. 2.2 вказує типовий діапазон втрат при проникненні для різних скупчень:

Таблиця 2.2

Втрати від проникнення для різних типів місцевості

Тип місцевості	Типове значення (дБ)	Типове значення (дБ)
Місто зі щільною забудовою	19-25	19
Місто	15-18	15
Передмістя	окт.14	11
Сільська	05.авг	8

- Запас на загасання, яке обумовлене щільністю сигналу. Вказує показник загасання завдяки перешкодам, на прикладі будівель. Для мінімізації, цього ефекту та забезпечення потрібного покриття на межах соти, необхідно враховувати запас. Запас на згасання приймає значення від 5 до 12 дБ та залежить від типу місцевості, як показано на прикладі в таб. 2.3

Таблиця 2.3

Стандартні значення запасу на загасання

Тип місцевості	Стандартне значення (дБ)
Місто зі щільною забудовою	10
Місто	8
Передмістя	6
Сільська	6

У таб. 2.4. підсумок всіх вищевказаних показників, які враховуються при розрахунку енергетичного бюджету, зазначені формули, по яким вестиметься розрахунок у наступній главі.

Таблиця 2.4

Параметри енергетичного бюджету LTE

Енергетичний бюджет LTE	
Параметри	DL/UL змінна
Головні параметри	
Тип місцевості	Місто зі щільною забудовою, міська, приміська, сільська
Тип каналу	PDSCH/PUSCH
Тип дуплексу	FDD, TDD
Місце розміщення абоненту	Зовнішнє/ всередині приміщення
Смуга частот (МГц)	Смуги LTE
Пропускна здатність на межі соти (кбіт/с)	1024/512
Параметри передавача eNB	
Максимальна потужність передавача (дБм)	A
Загальна кількість ресурсних блоків	B
Ресурсні блоки для передачі	C
Піднесучи для передачі	$D = 12 * C$
Потужність на піднесучу (дБм)	$E = A - 10 * \text{Log}(D)$
Підсилення антени передавача (дБі)	G
Втрати у фідері (дБ)	H
Втрати тіла (дБ)	I

Продовження таблиці 2.4	
EIRP на піднесучу	$J = E+G-H-I$
Параметри приймача UE	
SINR (дБ)	K
Шумова фігура (дБ)	L
Чутливість приймача (дБм)	$M = K+L-174+10*\log(15\text{кГц})$
Підсилення антени приймача (дБі)	N
Втрати у фідері приймача (дБ)	O
Втрати тіла приймача (дБ)	P
Інтерференційний запас (дБ)	Q
Мінімальний рівень сигналу (дБм)	$R = M-N+O+P+Q$
Параметри, що стосуються місцевості	
Втрати на проникнення (дБ)	S
Запас на загасання, обумовлене затіненням сигналу (дБ)	T
Максимальні допустимі втрати (MAPL)	
MAPL (дБ)	$U=J-R-S-T$

2.3.3 Площа соти та кількість базових станцій

Після обчислення значення MAPL як для UL, так і для DL на підставі таблиці 2.4, наступним важливим кроком для планування покриття є визначення радіусу стільника (комірки) за допомогою певної моделі поширення. З урахуванням, де площа покриття соти є гексагональною за формою, площа соти може бути обов'язково обчислена використовуючи радіус соти, який знайдений у MAPL.

Як видно на малюнку 2.5, площа соти напряму залежить від конфігурації сайту. Це можуть бути всенаправлені, двосекторні або трисекторні сайти, і таким чином радіус соти обчислюється для кожної конфігурації окремо. Загальна кількість ділянок обчислюється шляхом поділу цільової площі покриття на одну площу ділянки, як показано у формулі (2.12). Для кожної з конфігурацій, формула розрахунку площі покриття БС своя.

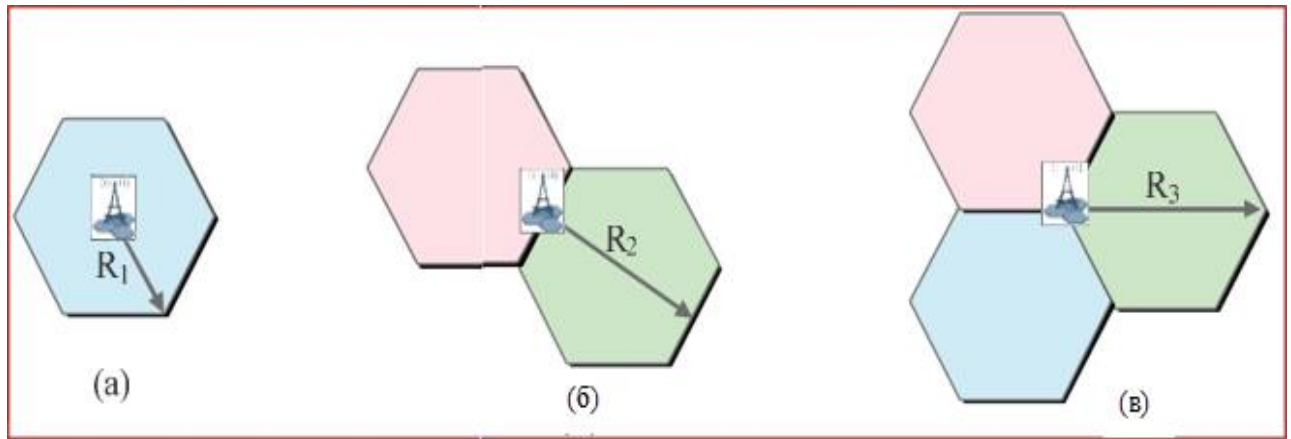


Рисунок 2.4. Типи конфігурації сайтів, всенаправлена(а), двох секторна(б), трьох секторна(в)

Для кожної з конфігурацій площа покриття БС розраховується за формулами:

Для всенаправленої:

$$S_1 = \frac{3}{2}\sqrt{3} * (R_1)^2 \quad (2.9)$$

Для двох секторної:

$$S_2 = \sqrt{3} * (R_2)^2 \quad (2.10)$$

Для трьох секторної:

$$S_3 = \frac{9}{8}\sqrt{3} * (R_3)^2 \quad (2.11)$$

В результаті, кількість БС буде визначено за формулою:

$$N_{\text{бс}} = \frac{S_{\text{т}}}{S_3} \quad (2.12)$$

2.4 Планування ємності LTE

Після визначення необхідного розміру покриття БС та розрахунку кількості, проводиться оцінка ємності, для перевірки, чи спроможний зазначений підрахунок сайтів забезпечити ємність користувачів. Відповідно до визначення, ємність - це максимально досяжний набір швидкостей в каналах з малою ймовірністю помилки. Оскільки показник являє собою максимум продуктивності, розглядається певна агрегована швидкість необхідна для переданих даних. При збільшенні попиту до даних у всьому світі ємність системи можна було б

визначити як максимальну агреговану швидкість передачі даних відповідно до заданої цілі якості сервісів.

2.4.1 Процес визначення ємності

Метою розгляду ємності LTE є отримання показника пропускної здатності, який підтримується мережею, виходячи з можливої пропускної здатності та стану кожного каналу споживача. Загальний процес планування ємності, на рис.2.6.

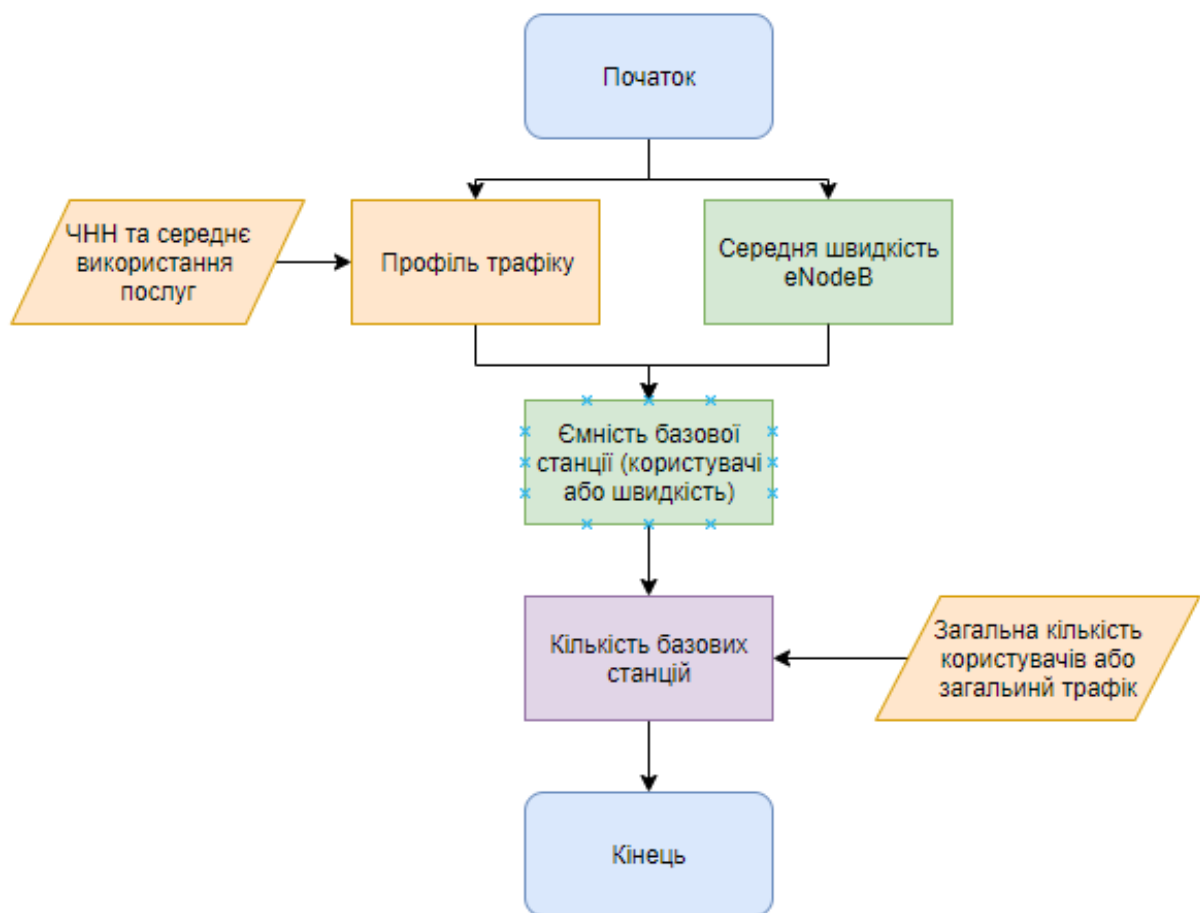


Рисунок 2.6. Загальний процес планування ємності

Як показано, оцінювання ємності потребує двох завдань, а саме:

- 1) Оцінка пропускної здатності, що відповідає аналізу конфігурації;
- 2) Оцінка підтримки кількості абонентів на одну соту залежно від трафіку.

Кількість сайтів на основі ємності буде визначена для задоволення загального попиту на трафік в мережі.

2.4.2 Розрахунок середньої швидкості на соту/базову станцію

Середнє значення пропускної здатності сектору чи базової станції є важливим елементом планування ємності LTE. Оцінку можна отримати за допомогою моделювання або на підставі вимірювання у полі.

Надаємо три підходи, за допомогою яких можна отримати середню пропускну здатність сектору в LTE:

1) Підхід постачальника.

У такому підході постачальники допускають, середню пропускну здатність eNB на підставі власного досвіду, як з моделювання, так і з вимірювань. Як тільки пропускну здатність eNB стане відома, максимальна кількість підтримуваних користувачів на eNB буде вираховувана, враховуючи обсяг даних кожного користувача протягом місяця та їх пропускну здатність протягом годин зайнятості. Розширений розрахунок підходу наведено в таб. 2.5

Таблиця 2.5

Розрахунок кількості базових станцій на основі даних оператора

Параметр	Змінна	Уточнення
Обсяг даних на користувача за місяць	a	Надається оператором
Кількість днів на місяць	b	30 днів
Відношення трафіку в ГНН до трафіку за день	c	Надається оператором
Пропускна здатність на користувача в ГНН (кбіт/с)	d	$d = (((a * 8 * 10^6) / b) * c) / 3600$
Середня пропускна здатність на eNodeB (Мбіт/с)	e	Надається оператором
Максимальна кількість користувачів на eNodeB	f	$f = (e * 1000) / d$
Загальна кількість користувачів	g	Надається оператором
Необхідна кількість eNodeB	h	$h = g / f$

2) Підхід на основі моделювання.

Підхід отримує пропускну здатність соти за допомогою використання моделювання. Для цього потрібні два типи моделювання; моделювання на

системному рівні, який забезпечує вірогідність SINR з таблицею розподілу середнього рівня SINR та імітацією пропускної здатності, яка забезпечується при певному та відповідному значенні SINR.

Моделювання каналу симулює зв'язок між передавачем і приймачем. Дозволяє дослідити підсилення MIMO, вплив адаптивної модуляції і кодування, моделювання каналного коду та повторної передачі. З іншого боку, моделювання на системному рівні надає оцінку продуктивності по всій мережі аналізуючи кількість eNB, яка забезпечує покриття на певній локації, в якій присутні термінали, та які рухаються.

Завдяки такому підходу до розрахунку, враховується ймовірність виникнення заданого SINR на межі соти. Тоді значення SINR для підтримки кожної схеми кодування і модуляції генеруються на підставі моделювання каналу. Таким чином пропускна здатність соти може бути розрахована за формулою:

$$Cell_{Throughput} = \sum_{SINR} (SINR_{OccPro} * SINR_{AveThroughput}) \quad (2.13)$$

Де $SINR_{OccPro}$ – ймовірність досягнення певного SINR на межі соти використовуючи симуляцію.

$SINR_{AveThroughput}$ – середня швидкість, що відповідає значенню SINR.

0 dB	+	-
Шум та сигнал рівні	сигнал більше	шум більше

Коли значення середньої врахованої швидкості базової станції обраховано та визначено по заданій формулі, доведено, що кількість базових станцій може бути розраховано, використовуючи таб. 2.6. В таб. 2.6 вказані основні параметри швидкості, ємності, фактору використання, коефіцієнту витрат, кількості користувачів та підхід до моделювання.

Таблиця 2.6

Розрахунок кількості базових, використовуючи підхід моделювання

Параметр	Змінна	Уточнення
Середня швидкість соти	a	З формули 3.13
Відношення пікової до середньої швидкості	b	%
Фактор використання	c	%
Коефіцієнт перевитрати	d	$d=b*c$
Кількість користувачів	e	Надається операторів
Пікова швидкість передачі даних	f	
Загальна швидкість передачі даних	g	$g=d*e*f$
Ємність базової станції	h	$h=a*кількість секторів$
Необхідна кількість базових станцій	i	$i=g/h$

3) На основі наявних ресурсних блоків каналу трафіку.

Для досягнення пропускної здатності DL і UL впливають смуга пропускання (від 1.4 до 20 МГц), загальні витрати та спектральна ефективність. У системі LTE ємність UL ділиться між каналами управління та каналом трафіку, тобто фізичним загальним каналом висхідної лінії зв'язку (PUSCH). Аналогічно, ємність DL розділена між каналами управління і каналом трафіку, фізичним загальним каналом низхідній лінії зв'язку (PDSCH).

Цей підхід визначає середню пропускну здатність сектора шляхом визначення доступних ресурсних блоків каналів трафіку. Тут обчислення PDSCH показано наступним чином, і аналогічна методика може бути використана для отримання середньої пропускної здатності сектора на підставі наявних RB для PUSCH:

Визначення доступних ресурсних блоків для PDSCH

$$RB_d = RB_z - O_f - O_c - O_p \quad (2.14)$$

Визначення доступних символів PDSCH

$$S_d = RB_d * NSC_{RB} - NSY_{SC} \quad (2.15)$$

Визначення ємності на один сектор

$$T = S_d * SE \quad (2.16)$$

Де RB_d – наявні ресурсні блоки за винятком накладних витрат;

S_d – наявні символи;

NSC_{RB} – кількість піднесучих на один ресурсний блок (12);

NSY_{SC} – кількість символі на одну піднесучу (6 або 7).

Середня швидкість в Мбіт/с на один сектор буде розраховано за формулою:

$$T_c = (RB_d * DL_3 * T) / 100 \quad (2.17)$$

Коли швидкість на один сектор розраховано, кількість БС може бути розраховано, використовуючи таблицю 2.7.

Таблиця 2.7

Розрахунок кількості БС, використовуючи підхід підрахунку наявних ресурсів

Параметр	Змінна	Пояснення
Середня швидкість на один сектор	a	З формуои 3.17, Мбіт/с
Відношення пікової до середньої швидкості	b	%
Середня швидкість на користувача в ГНН	c	З моделі трафіку (Кбіт/с)
Кількість секторів на базову станцію	d	(6,3,2, or 1)
Підтримувана кількість користувачів базовою станцією	e	$e=(a*d)/((1+b)*c)$
Загальна кількість користувачів	f	Надається оператором
Необхідна кількість eNodeB	g	$g=f/e$

2.4.3 Кількість базових станцій на основі розрахунку ємності

Кількість сайтів на базі ємності може бути розрахована за допомогою двох методів. Перший метод полягає в тому, як отримати кількість споживачів, які

присутні на одному сайті, як зазначено в 1-му та 3-му підходах, в такому випадку кількість сайтів визначається іншою формулою.

З другого боку, інший метод використовує підхід, який заснований на моделюванні, шляхом встановлення пропускної здатності сайту та який вираховує кількість сайтів іншим чином.

2.5 Оптимізація перед запуском

Як і інші мобільні мережі зв'язку, такі як GSM або UMTS, мережа LTE теж потребує оптимізації після розгортання та впровадження, для забезпечення кращого покриття та відповідної швидкості. Процес оптимізації включає кілька етапів. Розпочинається з проведення тест-драйвів, де всі елементи продуктивності перевіряються після підключення мережі. Виходячи з отриманих даних, планувальники аналізують ефективність мережі та можуть пропонувати оптимізацію параметрів, таких як висота антени, азимут, нахил та список сусідів.

Зазвичай процес оптимізації є ітеграційним, без певних кроків; швидше як набір послідовних процедур, які характеризують продуктивність мережі та покриття в певній області. Цільова продуктивність мережі може бути оцінено за показниками RSRP, SINR та успішності передачі.

Узагальнений процес оптимізації LTE показаний на рис. 2.7.

Процес починається із встановлення цілей оптимізації для встановлення RSRP, SINR та успішності передачі. Надалі проводяться заміри, щоб перевірити, чи досягнуто заплановані показники, чи ні. Якщо цілі не будуть досягнуті, необхідно провести аналіз з точки зору покриття та хендоверів, для того щоб виявити недоліки. Коригування параметрів буде здійснено на підставі варіантів рішень для завершення завдання оптимізації.

Оптимізація та аналіз розглядає планування мережі за сценарієм розгортання нової мережі, тому процес оптимізації після запуску не розглядається. Замість того, розглядається оптимізація перед запуском мережі. Вона враховує в себе розгляд розташування БС та параметрів для забезпечення цілей, поставлених при номінальному плануванні та енергетичному бюджеті. Це

може бути досягнуто шляхом зміни розташування сайтів та коригування базових параметрів антен.

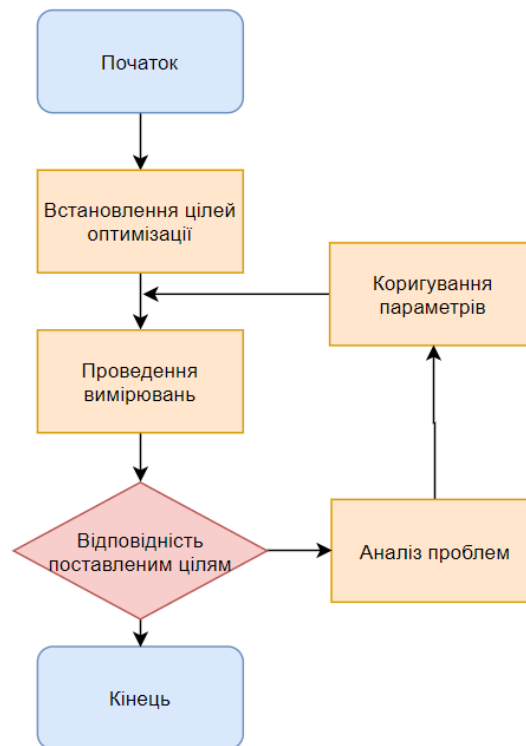


Рисунок 2.7. Загальний процес оптимізації LTE

2.5.1 Перестановка місць розташування базових станцій

У випадку проектування нової мережі, початкові місця розташування БС виконують за допомогою інструментів необхідних для планування. Ці початкові елементи можуть бути розташовані у таких місцях, як дороги, річки та інші місця, які не підходять для іншого розташування. У рамках, ранньої оптимізації, не відповідні місця для розташування БС, мають бути перенесені на можливі місця, які будуть додатково перевірені під час підготовки до запуску.

2.5.2 Початкові налаштування параметрів антени

При початковому плануванні, параметри антени, такі як азимут і нахили, використовуються однаково для всіх БС у цільовій області для спрощення під час ранніх планувальних робіт. Ці параметри необхідно коригувати, виходячи із стану місцевості та результатів аналізу покриття за допомогою інструментів для

планування. Коригування можна досягти вручну, обробляючи кожен сайт окремо, або для всієї мережі, використовуючи інструмент для планування.

Загалом, ці всі питання, розглянуті у третьому розділі, та показували, як підрахувати необхідну кількість сайтів за параметром покриття та ємності. Як описано на рис. 3.2, максимум з двох буде взято для подальшого аналізу та прогнозування. Це виконується шляхом моделювання параметрів за допомогою інструменту для планування для отримання відповідного оптимального за результатом значення. У зв'язку з тим, що необхідна кількість базових станцій визначається, розглядаючи територію як географічно рівну, під час прогнозування ми можемо зіткнутися з особливими безсигнальними зонами покриття «дірами» через особливості місцевості. Оптимізація яка необхідна перед розгортанням, тобто зміна висоти антени, азимуту, нахилу, місця розташування під час розміщення або збільшення розміру сайтів буде розглядатися до отримання оптимального результату з прогнозування.

У наступному розділі, главі 3, необхідні параметри визначаються як для покриття, так і для ємності. Виходячи з максимальної кількості сайтів, прогноз покриття та оцінка ємності відтворюється за допомогою інструменту для планування, Forsk Atoll. Крім того, обумовлюється аналіз та змінюється і відтворюється представлення результатів симуляції для фактичної оцінки результатів на підставі заданих вимог.

Висновки до розділу 2

В даному розділі було розглянуто алгоритм планування мережі LTE. Який складається з різних етапів, таких як: підготовка, номінальне планування, детальне планування, запуск мережі та оптимізація. Всього їх 5. Так як останні два етапи можливо розглядати тільки в реальній практиці, в розділі було розглянуто детально номінальне планування.

В кожному з пунктів присутні параметри, які враховані при плануванні, вказані їх типові значення та формули необхідні для розрахунків. Надано методику для розрахунку, тощо.

Ціллю номінального планування є визначення кількості БС, які необхідно розмістити на певній території, яка була обрана для побудови мережі, щоб задовольнити певні потреби до покриття та ємності. При оцінці необхідно враховувати 2 аспекти, такі як покриття та ємність.

Також розглянуті основні підходи деталізованого планування та ранньої оптимізації. При правильному підході до цих етапів, витрати для побудови мережі та для оптимізації після запуску можуть бути суттєво зменшені.

3 РОЗРАХУНОК ЗОН ПОКРИТТЯ ДЛЯ МЕРЕЖІ LTE

3.1 Номінальна фаза планування

Процес номінального та детального планування (включаючи вхідні та вихідні параметри) з точки зору покриття та ємності обговорювались у Розділі 3 вище. Використовуючи третій розділ в якості керівництва, в цій главі буде виконуватися завдання, як номінального, так і детального планування.

Розділ розпочинається з визначення цільових вимог до мережі та показує всі необхідні вхідні та вихідні параметри як для планування покриття, так і для планування ємності. Кількість сайтів, що базуються на покритті, буде обчислюватися за допомогою енергетичного бюджету та з урахуванням вимоги до ємності цільової мережі, підраховується кількість сайтів на основі ємності. Нарешті, максимум з двох буде взято, як кінцева кількість БС для цільової території

Як тільки буде завершено підрахунок БС, номінальна фаза планування буде завершена, а параметри, знайдені у фазі номінального планування, стануть вхідним етапом детального планування. На етапах детального планування параметри будуть моделюватися за допомогою інструменту для планування Atoll. Нарешті, запланований результат мережі буде оцінено, відповідає він цільовим вимогам, чи ні.

3.2 Вимоги до цільової мережі

У цій роботі для визначення покриття та характеристик пропускної спроможності мережі LTE вибрано частину Солом'янського району міста Київ. Місцевість цього району вважається густим містом із потребою в зоні постійного покриття 14,91 км². У цьому районі є різні місця, включаючи міжнародні готелі, державні установи, різні банки та підприємства. Таким чином, вибір мережі LTE

для цього району є правильним рішенням, оскільки для користувачів у цьому регіоні потрібна буде значна швидкість підключення до Інтернету.

При плануванні мережі LTE радіомережа повинна варіювати між охопленням та ємністю. Цілі покриття повинні відповідати бізнес-вимогам оператора шляхом мінімізації витрат. З іншого боку, цільову мережу слід також оцінювати, щоб знати, наскільки мережа здатна відповідати поточним та майбутнім вимогам щодо ємності. Таким чином, вимоги до мережі поділяються на вимоги покриття та вимогу пропускнуєї спроможності, і обидві подаються окремо так, як показано в наступних пунктах.

3.2.1 Вимоги до покриття

Для планування покриття визначено такі цілі:

- Частотна смуга. Для цієї роботи вибрано діапазон 3 (1800МГц). Ця смуга є найбільш популярним діапазоном для LTE, оскільки її можна використовувати для покриття міської території зі щільною забудовою та передмістя. Ця смуга є пріоритетною для розгортання мережі LTE по наступним причинам:
 - 1) Площа покриття приблизно в 2 рази більша ніж при використанні смуги 7 (2600 МГц);
 - 2) швидкість доступу на межі соти на 35% більша у порівнянні з 7 смугою;
 - 3) підтримка цього діапазону більшістю абонентських терміналів.
- Середнє значення потужності прийнятих пілотних сигналів (RSRP – reference signal received power). У мережі LTE кожен UE повинен вимірювати рівень сигналу обслуговуючої та сусідніх сот постійно, щоб підтримувати якість послуг, виконуючи хендовер. Одним з показників, які вимірюють користувачі для вибору соти або повторного вибору є RSRP. Це лінійне середнє значення опорних сигналів по всій ширині каналу. Він надає інформацію про рівень сигналу. Відповідно до специфікацій 3GPP діапазон звітності для RSRP є від -140 дБм до -44 дБм. У цій роботі цільове значення RSRP приймається рівним або більшим -110 дБм, щоб мати кращий рівень сигналу в обраній області.

- Ймовірність покриття межі соти. Все радіопокриття засноване на теорії ймовірностей. Оскільки радіохоплення не може бути гарантоване 100%, покриття в певному місці, деякій відстані від передавача, може бути визначено як 50%, 90% або більше. Як обговорювалося в розділі 3, ймовірність покриття краю соти залежить від запасу на замирання. Таким чином, у цій роботі передбачається, що вірогідність покриття на краю соти становить 83%, а отже, під час обчислення енергетичного бюджету використовується запас на замирання 9,34 дБ.
- Ймовірність покриття території. Ймовірність покриття території говорить про частину території, яка буде покриватися запланованою мережею. У цьому дослідженні передбачається покриття 95% цільової площі. Тобто цільова мережа охоплюватиме 95% вибраної області для вищезазначеного значення RSRP.

3.2.2 Вимоги до ємності

Для планування ємності визначено такі цілі:

- Швидкість низхідної на висхідної лінії зв'язку на межах соти. Цільова швидкість на межах соти для DL та UL приймається за 1024 та 512 кбіт/с відповідно. Така швидкість забезпечує користування основними сервісами, а отже досягнення цієї цілі буде твердити про доступність сервісів на всій території запланованого покриття.
- Загальна кількість користувачів. Кількість користувачів є дуже важливим для планування ємності при визначенні кількості сайтів. Для того, щоб мати мережу, здатну підтримати майбутній ріст користувачів, передбачення їх кількості є дуже важливим завданням, яке потрібно виконати перед початком планування мережі. Таким чином, надзвичайно важливим є розуміння того, які соціально-економічні фактори впливають на кількість абонентів на даному ринку та прогнозування того, як розвиватиметься кількість абонентів протягом наступних років.

Щоб показати внесок таких факторів у успішне планування ємності мережі, у цьому дослідженні зроблені наступні припущення.

Припущення:

- В загальному обсязі абонентів LTE в обраному регіоні передбачається досягнення 45000 абонентів до 2022 року;
- Вікова група потенційних абонентів LTE вважається 20-65 років;
- Об'єм трафіку за місяць.

Обсяг даних за місяць – це рішення обліку, при якому користувач може придбати певний об'єм послуг передачі даних. При оцінці ємності розглядається середній обсяг трафіку на одного користувача. В цій роботі запропоновано три пакети обсяг трафіку: золотий, срібний та бронзовий з 20Гб, 15Гб та 10 Гб відповідно, як показано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Категорії користувачів

Пояснення параметру	Категорія користувача		
	Золота	Срібна	Бронзова
Обсяг даних на місяць на користувача (Гб)	20	15	10

3.3 Планування покриття

Як було сказано в другому розділі, планування покриття починається з розрахунку енергетичного бюджету для отримання MAPL для обчислення радіусу соти. Як частина номінального планування, планування покриття починається з встановлення значення параметрів енергетичного бюджету. Використовуючи параметри та відповідну модель розповсюдження, підраховується радіус соти.

3.3.1 Енергетичний бюджет

Параметри RLB для DL та UL тут розглядаються окремо. Відповідно до визначення та формул у главі 2, припущені та обчислені значення показані в таблиці 3.2 та таблиці 3.3 для DL та UL відповідно. Однак особлива увага приділяється SINR та запас на загасання, обумовлене перешкодами, так як вони

значною мірою впливають на досягнення вимог до пропускної здатності на межах соти.

Як було обговорено в 3 главі, значення SINR отримують з моделювання на системному рівні і рівні каналу. Оскільки вони залежать від конструкції приймача, то значення SINR повністю залежить від постачальника. Однак у цьому дослідженні використовується модифікована формула ємності Шеннона для того, щоб отримати значення як для DL так і UL, з наступними припущеннями:

- Користувачам на межі соти віділяється 10% радіо ресурсів (тобто 10 ресурсних блоків зі 100 в смузі каналу 20 МГц);
- Пропускна здатність на межі соти – 1024 та 512 кбіт/с для низхідної та висхідної лінії відповідно.
- В низхідній та висхідній лінії використовується схема MIMO 2x2 та SIMO 1x2 відповідно

Формула для обчислення:

$$TP = BW * M * A * \log_2\left(1 + \frac{SINR}{B}\right) \quad (3.1)$$

$$TP = N_{PRB} * BW_{PRB} * SE \quad (3.2)$$

Де TP – пропускна здатність на межі соти;

BW – ширина смуги в ресурсних блоках;

M – кількість потоків даних;

SE – спектральна ефективність;

A та B – фактори що залежать від кількості антен, як показано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Значення факторів A, B та M для обчислення SINR

MIMO	M	A	B
SIMO 1x2	1	0.62	1.8
MIMO 2x2	2	0.42	0.85
MIMO 4x4	4	0.4	1.1
MIMO 8x8	8	0.33	1.4

Базуючись на формулі 3.3 та припущеннях, SINR для DL та UL було підраховано: -1.83 дБ та -3.06 відповідно як показано в таблиці 3.3

Таблиця 3.3

Обчислення SINR, необхідного для досягнення швидкості на межі соти

Параметр	Змінна	DL	UL
Швидкість на межі соти, Мбіт/с	CER	1	0.5
Виділені ресурсні блоки (10% від загальної кількості)	B	10	10
Фактор А	FA=2*0.42/ FA=1*0.62	0.84	0.62
Фактор В	FB	0.85	1,8
Ширина смуги одного ресурсного блоку, МГц	PRB	0.18	0.18
Пропускна здатність на один ресурсний блок, Мбіт/с	RpP=CER/B	0.1	0.05
Необхідна спектральна ефективність, біт/с/Гц	SE=RpP/PRB	0.56	0.28
SINR (лінійний)	SL=FB*(2^(SE/FA)-1)	0.49	0.66
SINR (дБ)	K	-3.06	-1,83

Результати розрахунків максимально допустимих втрат розповсюдження було проведено так, як було показано в попередньому розділі. Результати для низхідної лінії показано в таблиці 3.4, а для висхідної – в таблиці 3.5.

Таблиця 3.4

Енергетичний бюджет LTE для низхідної лінії

Енергетичний бюджет LTE низхідної лінії		
Параметри	Змінна	Значення
Головні параметри		
Тип місцевості	Місто зі щільною забудовою, міська, приміська, сільська	
Тип каналу	PDSCH	
Тип дуплексу	FDD	
Місце розміщення абоненту	всередині приміщення	
Смуга частот (МГц)	20	
Пропускна здатність на межі соти (кбіт/с)	1024/512	
Параметри передавача eNB		
Максимальна потужність передавача (дБм)	A	46
Загальна кількість ресурсних блоків	B	10
Ресурсні блоки для передачі	C	100
Піднесучи для передачі	D = 12*C	1200
Потужність на піднесучу (дБм)	E=A-10*Log(D)	15.21
Підсилення антени передавача (дБі)	G	17
Втрати у фідері (дБ)	H	0.5

Продовження таблиці 3.4

Втрати тіла (дБ)	I	0
EIRP на піднесучу	$J = E+G-H-I$	31.71
Параметри приймача UE		
Фактор А	$FA=2*0.42$	0.84
Фактор В	FB	0.85
Ширина смуги одного ресурсного блоку	PRB	0.18
Пропускна здатність на один ресурсний блок	$RpP=CER/B$	0.1
Необхідна спектральна ефективність	$SE=RpP/PRB$	0.56
SINR (лінійний)	$SL=FB*(2^{(SE/FA)}-1)$	0.49
SINR (дБ)	K	-3.06
Шумова фігура (дБ)	L	8
Чутливість приймача (дБм)	$M = K+L-174+10*\log(15кГц)$	-127,3
Підсилення антени приймача (дБі)	N	0
Втрати у фідері приймача (дБ)	O	0
Втрати тіла приймача (дБ)	P	3
Інтерференційний запас (дБ)	Q	3
Мінімальний рівень сигналу (дБм)	$R = M-N+O+P+Q$	-121.3
Параметри, що стосуються місцевості		
Втрати на проникнення (дБ)	S	20
Запас на загасання, обумовлене затіненням сигналу (дБ)	T	9.34
Максимальні допустимі втрати (MAPL)		
MAPL (дБ)	$U=J-R-S-T$	123.67

Таблиця 3.5

Енергетичний бюджет LTE для UL

Енергетичний бюджет LTE		
Параметри	Змінна	Значення
Головні параметри		
Тип місцевості	Місто зі щільною забудовою, міська, приміська, сільська	
Тип каналу	PUSCH	
Тип дуплексу	FDD	
Місце розміщення абоненту	всередині приміщення	
Смуга частот (МГц)	20	
Пропускна здатність на межі соти (кбіт/с)	512	

Продовження таблиці 3.5

Параметри передавача UE		
Максимальна потужність передавача (дБм)	A	23
Загальна кількість ресурсних блоків	B	10
Ресурсні блоки для передачі	C	3
Піднесучи для передачі	$D = 12 * C$	36
Потужність на піднесучу (дБм)	$E = A - 10 * \text{Log}(D)$	7.44
Підсилення антени передавача (дБі)	G	0
Втрати у фідері (дБ)	H	0
Втрати тіла (дБ)	I	3
EIRP на піднесучу	$J = E + G - H - I$	4.44
Параметри приймача eNB		
Фактор A	$FA = 1 * 0.42$	0.42
Фактор B	FB	1.8
Ширина смуги одного ресурсного блоку	PRB	0.18
Пропускна здатність на один ресурсний блок	$RpP = CER / B$	0.05
Необхідна спектральна ефективність	$SE = RpP / PRB$	0.28
SINR (лінійний)	$SL = FB * (2^{(SE/FA)} - 1)$	0.66
SINR (дБ)	K	-1.83
Шумова фігура (дБ)	L	2.3
Чутливість приймача (дБм)	$M = K + L - 174 + 10 * \text{log}(15 \text{кГц})$	-131.77
Підсилення антени приймача (дБі)	N	17
Втрати у фідері приймача (дБ)	O	0
Втрати тіла приймача (дБ)	P	0
Інтерференційний запас (дБ)	Q	3
Мінімальний рівень сигналу (дБм)	$R = M - N + O + P + Q$	-145.27
Параметри, що стосуються місцевості		
Втрати на проникнення (дБ)	S	19
Запас на загасання, обумовлене затіненням сигналу (дБ)	T	9.34
Максимальні допустимі втрати (MAPL)		
MAPL (дБ)	$U = J - R - S - T$	121.37

За результатами розрахунку, MAPL для DL становить 123,67 дБ і 121,37 дБ для UL. Видно, що для низхідної лінії допустимі втрати більші, ніж для висхідної, тобто площа покриття eNodeB буде більшою за площу покриття UE. Наступна дія

– розрахунок радіусу соти, як було показано в розділі 3. Для цього потрібно обрати та використати одну з емпіричних моделей розповсюдження.

3.3.2 Вибір моделі розповсюдження.

Існує багато різних моделей розповсюдження, які доступні для діапазону 1800 МГц, які можна використовувати в різних місцевостях. Правильною практикою є порівняння між різними моделями розповсюдження, щоб з'ясувати яка модель підходить для обраного типу місцевості місцевості. Таким чином, у цьому дослідженні для порівняння вибираються три моделі розповсюдження: Okumura-Hata, COST231-Hata та Ericsson 9999.

Порівняння моделі розповсюдження здійснюється за допомогою Matlab на основі втрат розповсюдження, висоти антени та частоти передачі. Графік на рис.3.1 показує залежність втрати розповсюдження від відстані між eNodeB та UE для вищезазначених емпіричних моделей поширення. Відповідно, модель COST231-Hata показує максимальну втрату розповсюдження порівняно з іншими двома моделями. Оскільки найгірший сценарій повинен бути обраний для кращого планування, то модель COST231-Hata вибирається для розрахунку радіусу соти.

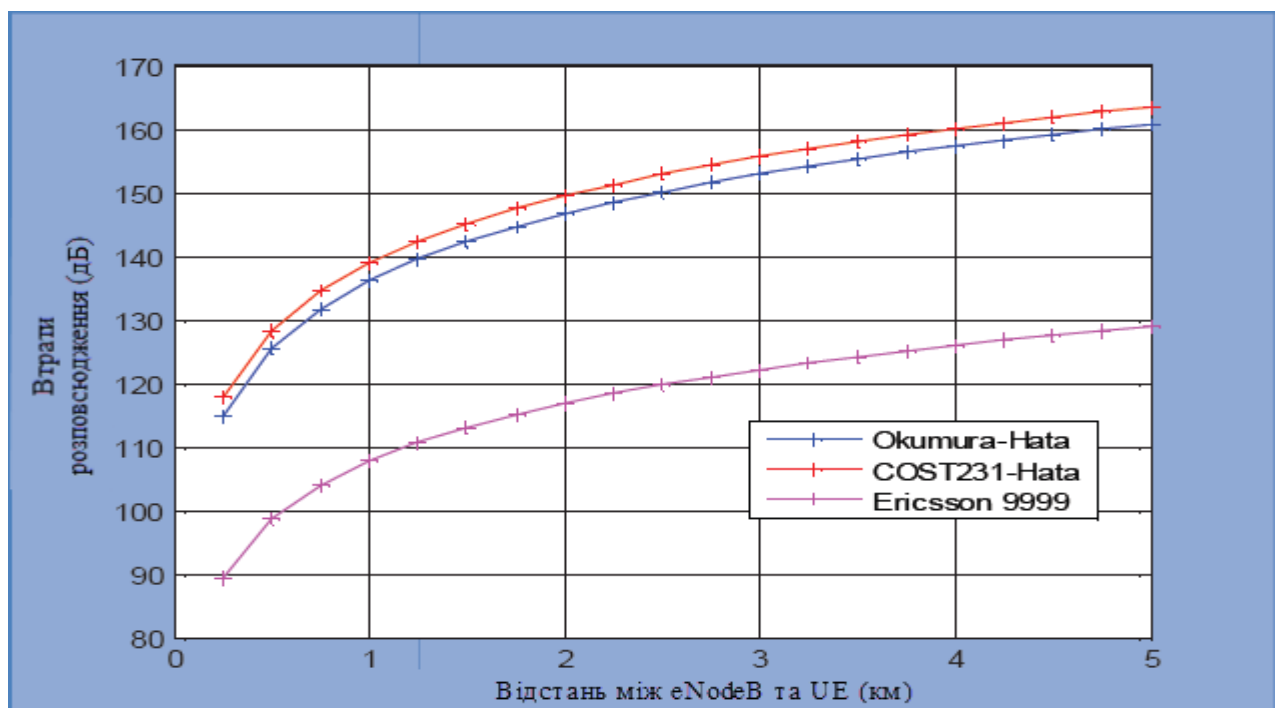


Рисунок 3.1. Порівняння моделей розповсюдження

Використовуючи обрану модель розповсюдження та MAPL можливо обчислити радіус соти для обох напрямків передачі. Як було сказано раніше, за ефективний радіус буде прийнято менше значення.

Припустимо, що висота антени – 30 м, висота антени абонента – 1.5м. Радіус соти для низхідної та висхідної лінії може бути обчисленим за формулами:

$$d_{UL} = 10^{[PL_{UL}-46.3-3-33.9*\log(f)+13.02-\log(h_{6c})+3.2-((\log(11.75*\log(h_a)))^2+4.97)/(44.9-6.55*\log(h_{6c}))]}$$

$$d_{UL} = 0.41 \text{ км}$$

$$d_{DL} = 10^{[PL_{DL}-46.3-3-33.9*\log(f)+13.02-\log(h_{6c})+3.2-((\log(11.75*\log(h_a)))^2+4.97)/(44.9-6.55*\log(h_{6c}))]}$$

$$d_{DL} = 0.47 \text{ км}$$

Як було сказано, ефективний радіус обирається з меншого отриманого значення і буде становити 0.41 км. Таблиця 4.7 показує загальне обчислення ефективного радіусу, який буде використано для підрахунку кількості базових станцій.

Таблиця 3.6

Результати обчислення радіусу соти

Параметр	DL	UL
Висота антени eNodeB (м)	30	
Висота антени UE (м)	1,5	
Частота (МГц)	1800	
MAPL (дБ)	121,37	123,67
Радіус соти (км)	0,41	0,47
Ефективний радіус соти, R_{ef} (км)	0,41	

Тепер, припускаючи, що всі базові станції будуть трьох секторними, можливо підрахувати площу покриття однієї базової станції та необхідну кількість базових для забезпечення покриття на обраній ділянці

$$S_{bc} = \frac{9}{8} \sqrt{3} * [R_{ef}]^2 = \frac{9}{8} \sqrt{3} * [0,41]^2 = 0,33 \text{ км}^2$$

Отже, результат розрахунку кількості базових станцій для забезпечення покриття в обраній ділянці становить 52.

3.4 Планування ємності

Планування пропускної спроможності можна сформулювати, оцінивши трафік учас найбільшого навантаження відносно трафіку за день. Оскільки користувачі LTE в цьому дослідженні вважаються користувачами, які використовують смартфони, модеми та інші типи терміналів (фіксованих або портативних), ГНН буде у трьох різних часових інтервалах. Перший інтервал - з 9:00 до 10:00 ранку, другий - з 13:00 до 14:00, а третій з 18:00. до 19:00 ввечері. Таким чином, в цілому три години вважаються годинами найбільшого навантаження протягом дня, що робить трафік ГНН - 12,5% від денного трафіку.

Наступним кроком у плануванні ємності є визначення середньої пропускної здатності соти, вибираючи один із підходів, обговорених у главі 3. Для цього дослідження підхід «постачальника» вибирається через його простоту, а також враховуючи той факт, що його використовували багато запущених мереж у різних країнах. Оскільки це дослідження не має наміру відобразити значення будь-якого постачальника, було внесено модифікації для отримання середньої пропускної здатності соти, щоб визначити кількість сайтів на основі ємності таким чином.

3.4.1 Обсяг даних на користувача за місяць

З заданих вимог, три категорії користувачів, згадані у розділі 3.2, використовуються в визначені обсягу даних на користувача за місяць. Розподіл користувачів послуг вважається 10%, 40%, 50% для користувачів золотої, срібної та бронзової категорії відповідно, як показано в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Категорії користувачів та використання сервісів

Пояснення параметру	Категорія користувача		
	Золота	Срібна	Бронзова
Обсяг даних на місяць на користувача (Гб)	20	15	10
Частка користувачів (%)	10	40	50

3.4.2 Середня пропускна здатність базової станції

Враховуючи ширину каналу 20 МГц і вважаючи кількість наявних ресурсних блоків за 85% від загальною кількості з завантаженням низхідної лінії 80% з середньою спектральною ефективністю 2.8, середню пропускну здатність базової станції можна обчислити за формулою:

Де $RB_{\%}$ - частка доступних ресурсних блоків;

DL_{load} – завантаження низхідної лінії;

SE – спектральна ефективність;

N_p – кількість піднесучих в ресурсному блоці;

N_c – кількість символів в ресурсному блоці;

N_{PB} – загальна кількість ресурсних блоків.

Так як всі базові станції плануються трьох секторними, середня пропускна здатність базової станції може бути знайдено, помноживши середню пропускну здатність соти на 3. Таким чином, середня пропускна здатність базової станції буде становити $3*37,63=112,89 \approx 113$ Мбіт/с.

3.4.3 Визначення кількості базових станцій за ємністю

Враховуючи значення для категорій користувачів з таблиці 3.7, середню швидкість базової станції 113 Мбіт/с, максимальна кількість користувачів на одну базову станцію буде розраховано за формулою, що наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

Максимальна кількість користувачів на одну базову станцію

Параметр	Категорія користувачів			Пояснення
	Золот а	Срібн а	Бронз ова	
Обсяг даних на місяць на користувача (Гб)	20	15	10	a
Кількість днів у місяці	30			b
Частка трафіку в ГНН до загального за день, %	12,5			c
Пропускна здатність на користувача в ГНН (кбіт/с)	185,19	138,89	92,59	$d=\frac{((a*8*10^6)/b)*c}{3600}$

Продовження таблиці 3.8				
Використання сервісів (%)	10	40	50	P
Загальна середня пропускна здатність на користувача (кбіт/с)	120,37			$T = \sum P * d$
Середня пропускна здатність базової станції, Мбіт/с	113			e
Максимальна кількість користувачів на одну базову станцію	939			$f = (e * 1000) / T$

Отже, тепер можливо розрахувати необхідну кількість базових станцій, щоб підтримувати заплановану кількість користувачів (45000) за формулою 3.18

На стадії номінального планування отримано такий результат: для задоволення вимог до покриття необхідно 52 базові станції, а для задоволення ємності мережі потрібно 48 базових станцій. Так як мережа, що проектується, повинна задовольняти вимоги покриття і ємності одночасно, загальна кількість базових станцій, які будуть використані для аналізу мережі на етапі детального планування, становить 52.

У наступних підрозділах буде показано етап детального планування для подальшого аналізу мережі шляхом використання параметрів, знайдених у фазі номінального планування, за допомогою інструменту для планування і оптимізації Atoll.

3.5 Моделювання з використанням інструменту Atoll

Інструмент для планування і оптимізації Atoll дозволяє планувальнику мережі проектувати бездротові мережі доступу. Він використовується для прогнозування радіопокриття, управління мобільними та фіксованими даними абонента, а також для оцінки ємності мережі. На рис. 3.2 зображено процес симуляції, який використовується в цьому дослідженні для проектування та оцінки мережі LTE за допомогою інструмента Atoll.

Як показано алгоритмі, процес вимагає двох наборів вхідних даних. Перший - це цифрова карта, яка використовується для налаштування робочого середовища в Atoll. У цьому дослідженні використовується цифрова карта з роздільною здатністю 5м. На рисунках 3.3 та 3.4 показано цифрову карту рельєфу

та карту висот будівель відповідно; обраний регіон обведено червоним кольором. Цифрова карта - це електронна база даних, яка містить географічну інформацію, таку як тип місцевості (інформація про вид перешкод), дані про висоти та векторні дані (вулиці, головні дороги, вторинні дороги, автошляхи та залізниці).

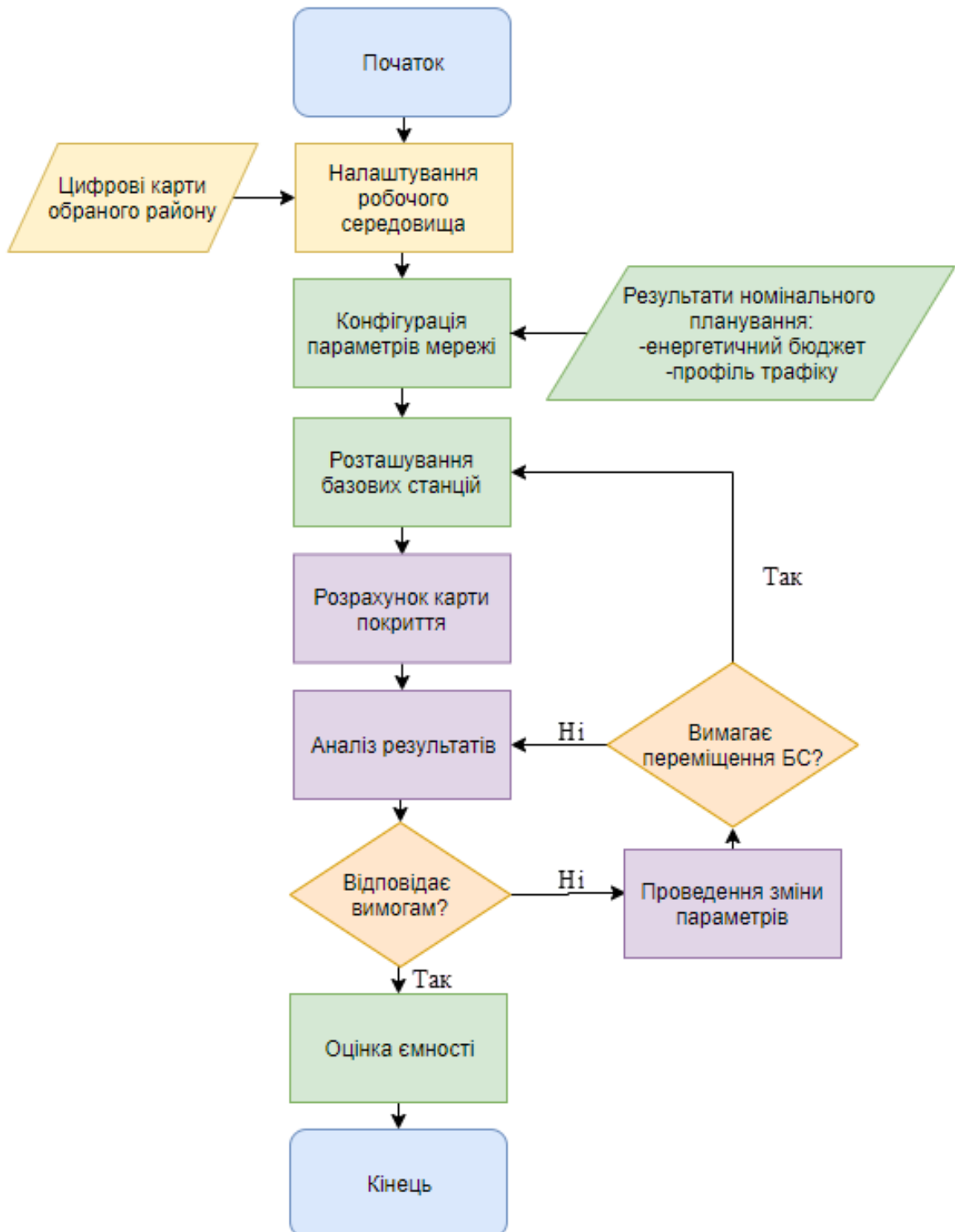


Рисунок 3.2. Процес проведення симуляції

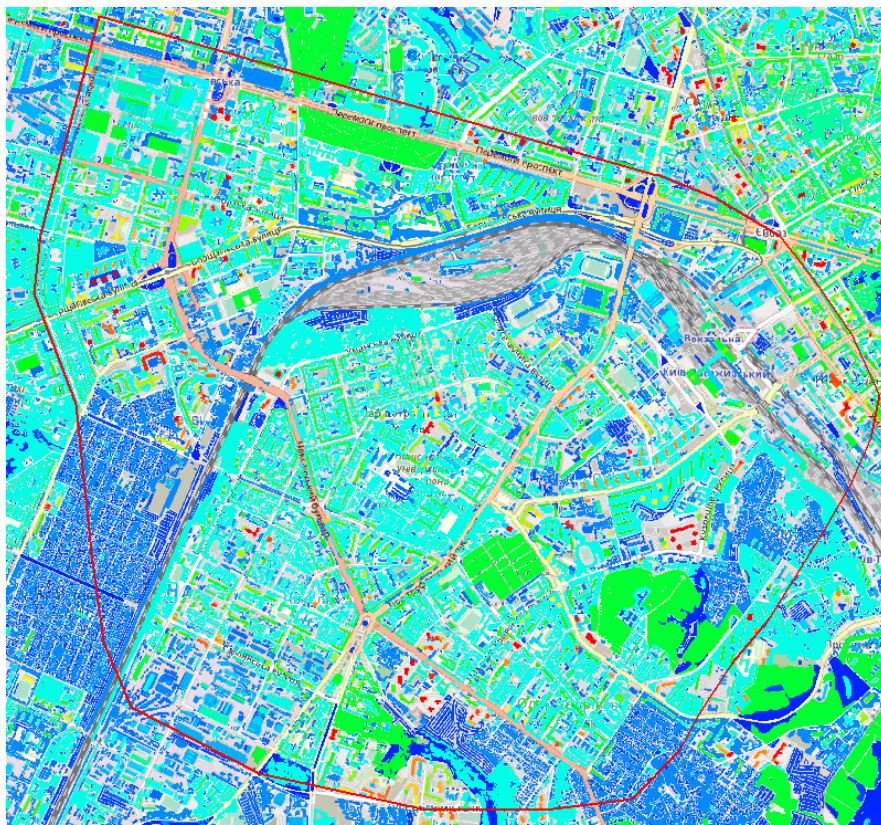


Рисунок 3.3. Цифрова карта висот

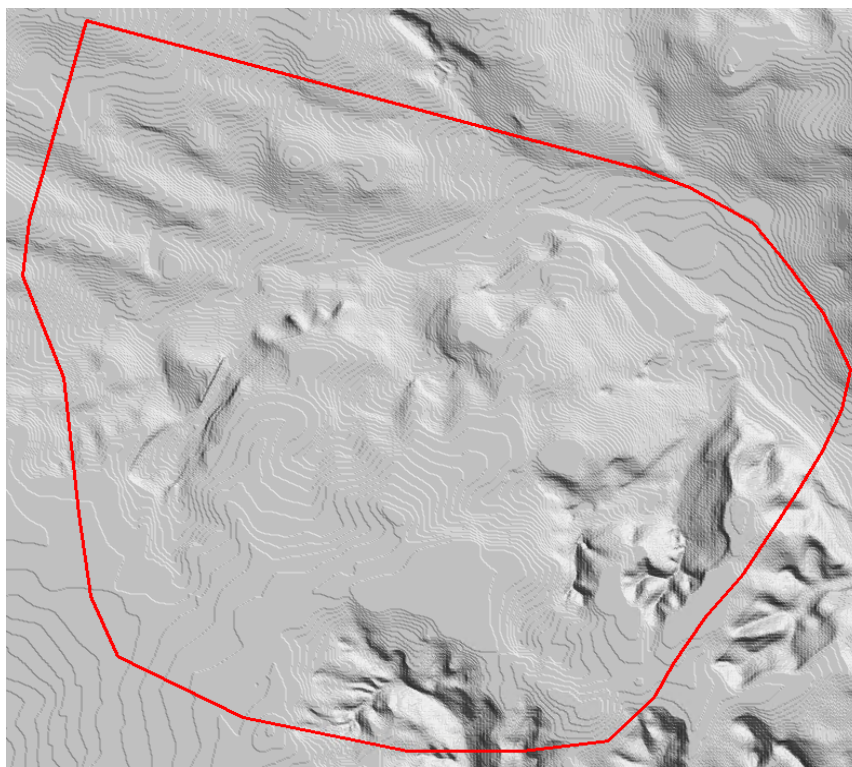


Рисунок 3.4. Цифрова карта рельєфу

Другий набір вхідних даних – це параметри, визначені на етапі номінального планування. Вони використовуються для встановлення мереж

налаштувань. У таблиці 3.9 вказано деякі з параметрів, які використовуються при встановленні у інструменті Atoll.

Таблиця 3.9

Приклад налаштувань мережі

Параметр	DL	UL
Частота	1800 МГц	
Ширина смуги	20 МГц	
Дуплекс	Частотний	
Модель розповсюдження	Cost-Nata	
Перевикористання частот	1	
Планування	Пропорційне	
МІМО	2x2	1x2
Вихідна потужність	46 дБм	23 дБм

3.5.1 Розміщення базових станцій

На основі номінального планування в інструменті Atoll створюється 52 базових станцій. Спочатку ці базові налаштовані так, як показано в таблиці 3.10. Залежно від попередніх результатів моделювання, можливо змінювати ці параметри для покращення результатів. Список БС вказано в додатку 1.

Таблиця 3.10

Початкові параметри секторів базових станцій

Сектор	Конфігурація антени	Висота антени	Азимут	Механічний нахил антени	Електричний нахил антени
1	65 ⁰ , 17 дБі, 1800 МГц	35 м	0 ⁰	0 ⁰	0 ⁰
2	65 ⁰ , 17 дБі, 1800 МГц	35 м	120 ⁰	0 ⁰	0 ⁰
3	65 ⁰ , 17 дБі, 1800 МГц	35 м	240 ⁰	0 ⁰	0 ⁰

3.6 Моделювання карт покриття та аналіз

Моделювання карти покриття - результати визначених умов. Вони розраховується на основі умов покриття та роздільної здатності покриття за допомогою матриць втрат розповсюдження. Як показано на рис. 3.7, Atoll використовував у цьому дослідженні географічний профіль між eNodeB та UE з урахуванням будівель для виконання розрахунків прогнозування покриття, а потім він відображає результати у вигляді графічного представлення пікселів, для

яких визначені умови покриття задоволені. У цьому дослідженні кожен піксель розглядається як користувач певним сервісом, з мобільністю та певним терміналом.

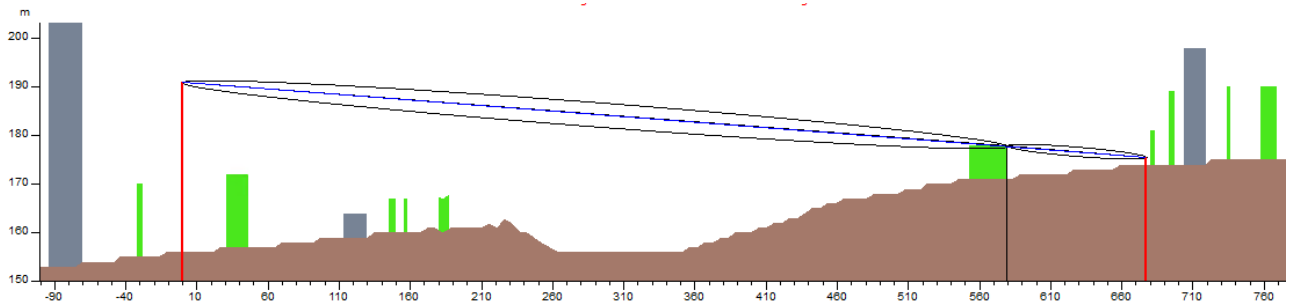


Рисунок 3.5. Приклад географічного профілю між eNodeB та UE

Відповідно до цілей, встановлених у розділі 3.1, номінальна фаза планування буде оцінюватися за наступними результатами прогнозування покриття:

- Покриття за рівнем сигналу;
- Ефективний аналіз сигналу;
- Покриття по SINR.

3.6.1 Результати початкового моделювання

Прогнозування рівня сигналу мережі виконується шляхом обчислення «найкращого рівня сигналу» у всій цільовій області, використовуючи умови, показані у таблиці 3.11. На рис. 3.6 показаний моделювання покриття на основі "кращого рівня сигналу" в цільовій області.

Таблиця 3.11

Умови моделювання покриття «найкращого рівня сигналу»

Умова	Значення
Рівень сигналу	> -130 дБм
Обсудовуюча сота	краща
Брати до уваги замирання	так
Покриття всередині приміщень	так
Ймовірність покриття на межі соти	83%

На цьому малюнку червоний колір представляє рівень сигналу ≥ -70 дБм, який відповідає найвищому рівню сигналу, тоді як синій кольору представляє рівень сигналу ≥ -130 дБм, який показує поганий сигнал покриття на цільовій ділянці.

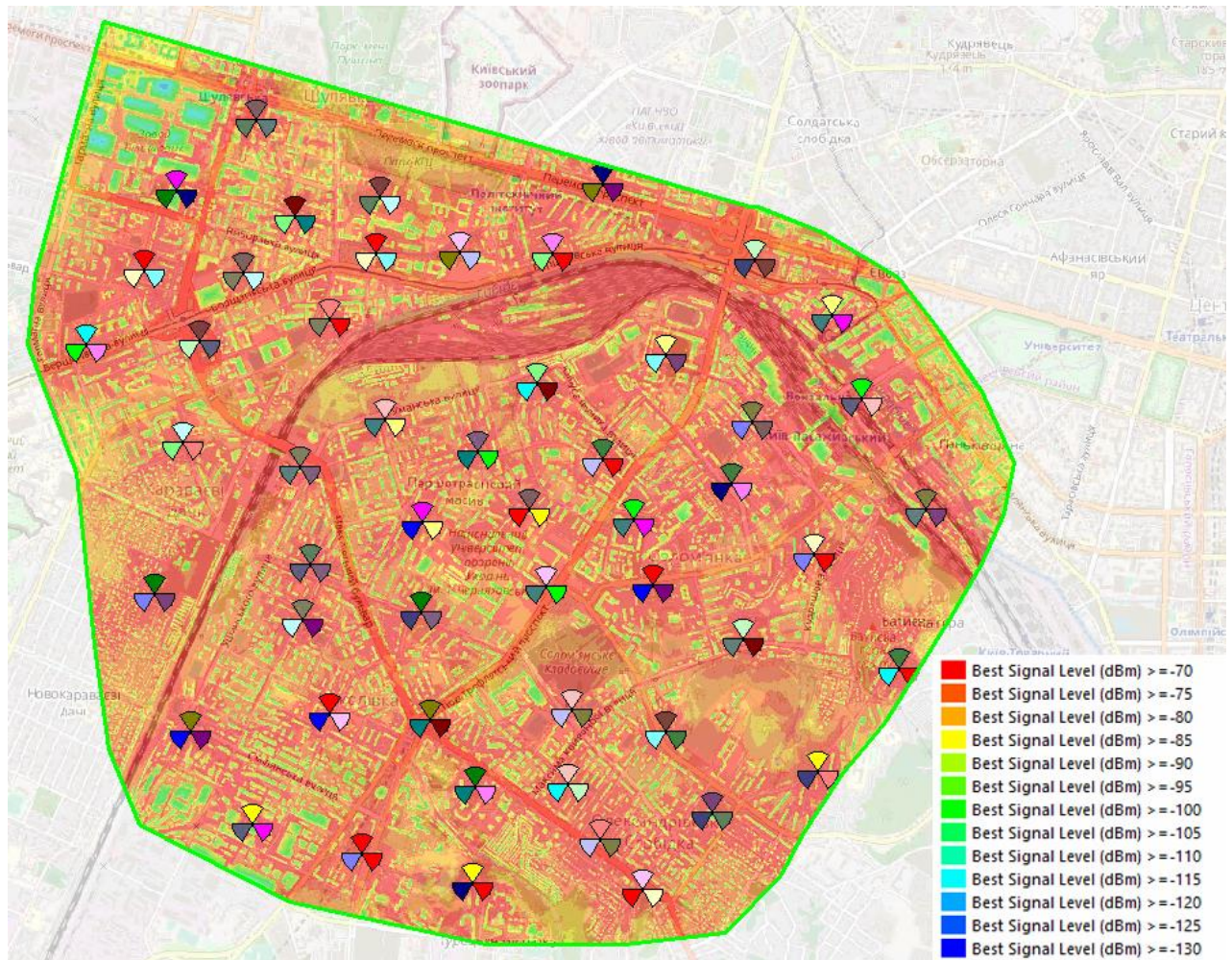


Рисунок 3.6. Результат моделювання покриття за рівнем сигналу

Відповідно до результатів, показаних на гістограмі на рис. 3.7, результат моделювання ілюструє, що 98,54% площі покрито сигналом ≥ -95 дБм. Це показує, що UE може отримувати кращий сигнал порівняно з обчисленим мінімальним рівнем $-121,30$ дБм, що було обчислено з енергетичного бюджету; із середнім значенням $-61,93$ дБм та стандартним відхиленням $8,79$ дБм.

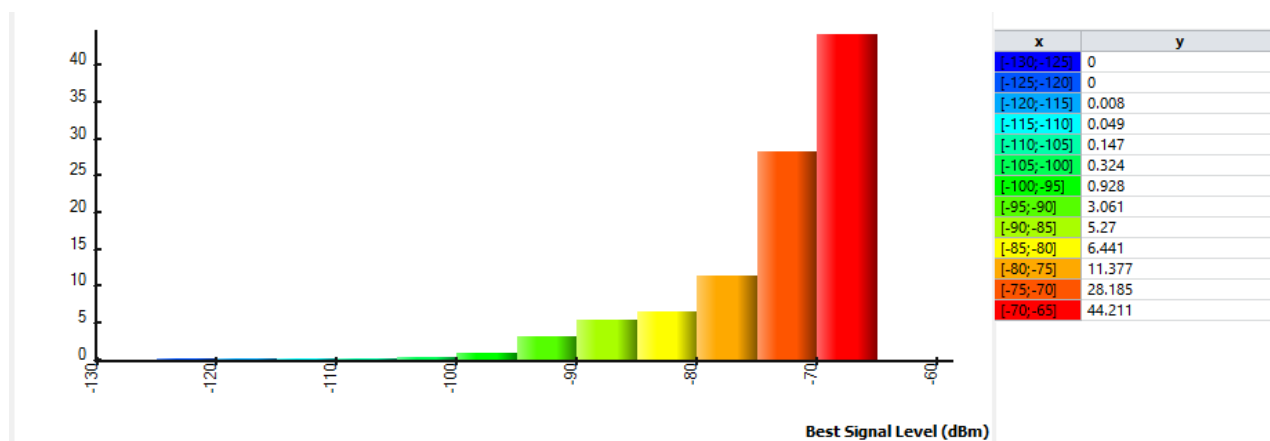


Рисунок 3.7. Результат моделювання покриття за рівнем сигналу у виді гістограми

Коли аналіз проводиться з точки зору покритої площі, встановлено, що 17,072 км² покрито рівнем сигналу ≥ -85 дБм, як показано на малюнку 3.8. Цей результат показує, що запланована мережа забезпечує хорошу силу сигналу в межах цільової області.

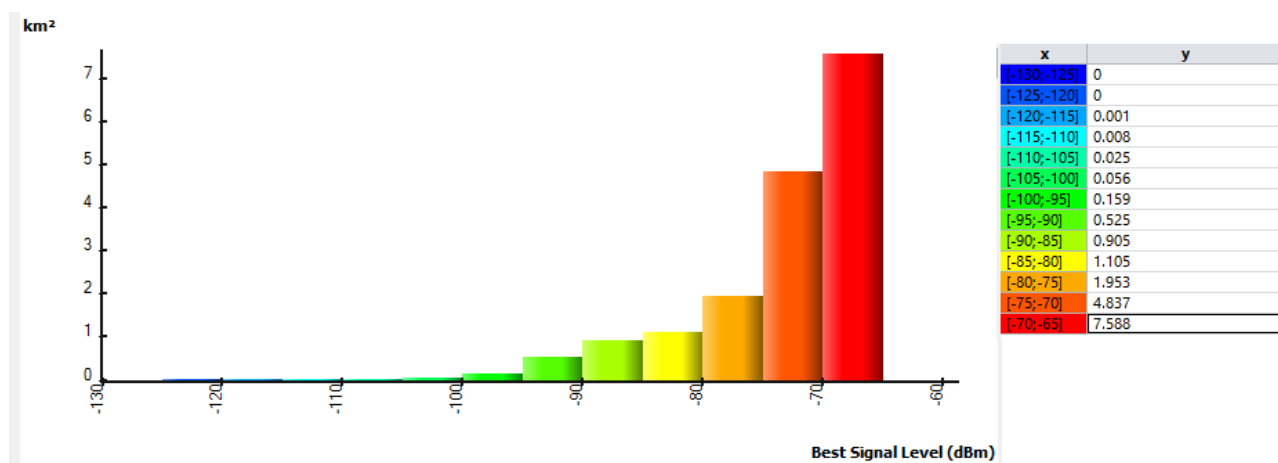


Рисунок 3.8. Результат моделювання покриття за рівнем сигналу у виді гістограми

У таблиці 3.12 показаний результат передбачення покриття за рівнем сигналу. 98,54 % площі займає найкращий рівень сигналу ≥ -85 дБм. Це показує, що вимогу покриття області (95%) вже досягнуто.

Таблиця 3.12

Результат моделювання покриття у виді таблиці

Легенда	Охоплювана територія (км ²)	% покритої площі
Рівень сигналу ≥ -70	7.588068	44.210995
Рівень сигналу ≥ -75	12.425569	72.396129
Рівень сигналу ≥ -80	14.378201	83.772911
Рівень сигналу ≥ -85	15.483613	90.213469

Продовження таблиці 3.12		
Рівень сигналу ≥ -90	16.388195	95.48391
Рівень сигналу ≥ -95	16.913565	98.544915
Рівень сигналу ≥ -100	17.072802	99.472691
Рівень сигналу ≥ -105	17.128393	99.796589
Рівень сигналу ≥ -110	17.153568	99.943268
Рівень сигналу ≥ -115	17.161974	99.992243
Рівень сигналу ≥ -120	17.163298	99.999956
Рівень сигналу ≥ -125	17.163305	100
Рівень сигналу ≥ -130	17.163305	100

Прогнозування покриття "Ефективний аналіз сигналу" дозволяє передбачити ефективні рівні сигналу в напрямку UL & DL для різних типів сигналів (опорні сигнали (RS), сигнали синхронізації (SS), канал сигналізації PDCCCH та ін.

У цьому дослідженні робиться лише аналіз сигналів опорних сигналів (RSRP), що показано на малюнку 3.9 нижче. Виходячи з результату, 96,08 % площі досягає RSRP більше -110 дБм. Таким чином, досягається цільова вимога RSRP. Середнє значення складає -95.15 дБм зі стандартним відхиленням 9.06

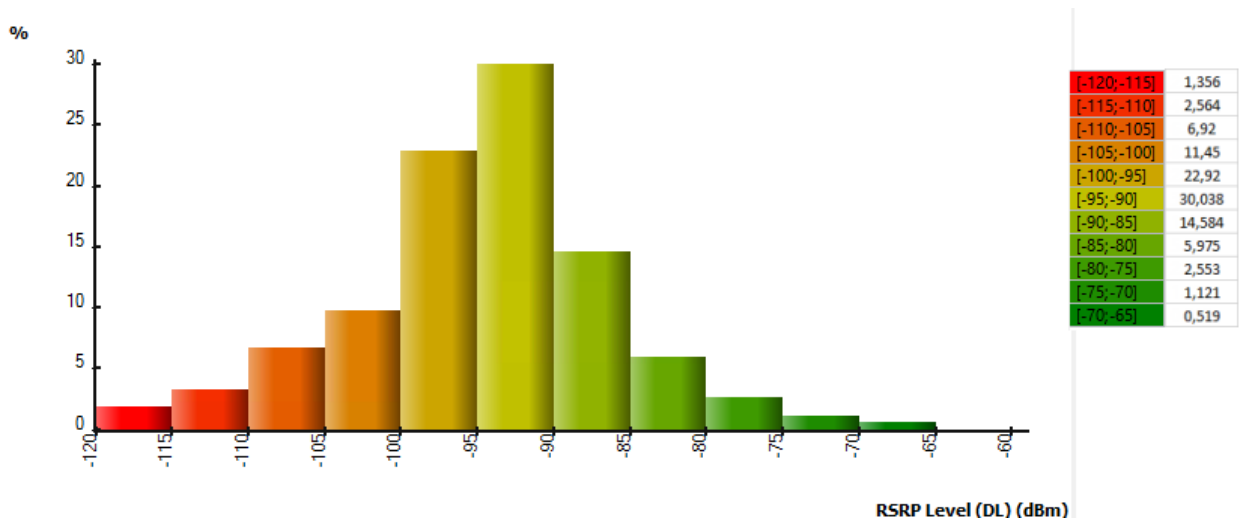


Рисунок 3.9. Результат моделювання за показником RSRP

Прогнозування покриття низхідної лінії зв'язку та висхідної лінії зв'язку на основі показника SINR оцінює відношення рівня прийнятого сигналу до інтерференції та шуму. В процесі моделювання обчислюються перешкоди по каналу, а також перешкоди сусіднього каналу.

SINR у низхідній лінії зв'язку обчислюється для різних каналів, використовуючи потужність їх опорних символів передачі та обчислюючи потужність, отриману ресурсними елементами, від сот, що є джерелом інтерференції. У висхідній лінії зв'язку SINR підраховується за допомогою потужності терміналу і значень шуму висхідної лінії зв'язку.

На рис. 3.10 показано прогнозування покриття за значенням SINR, сигналу низхідній лінії зв'язку.

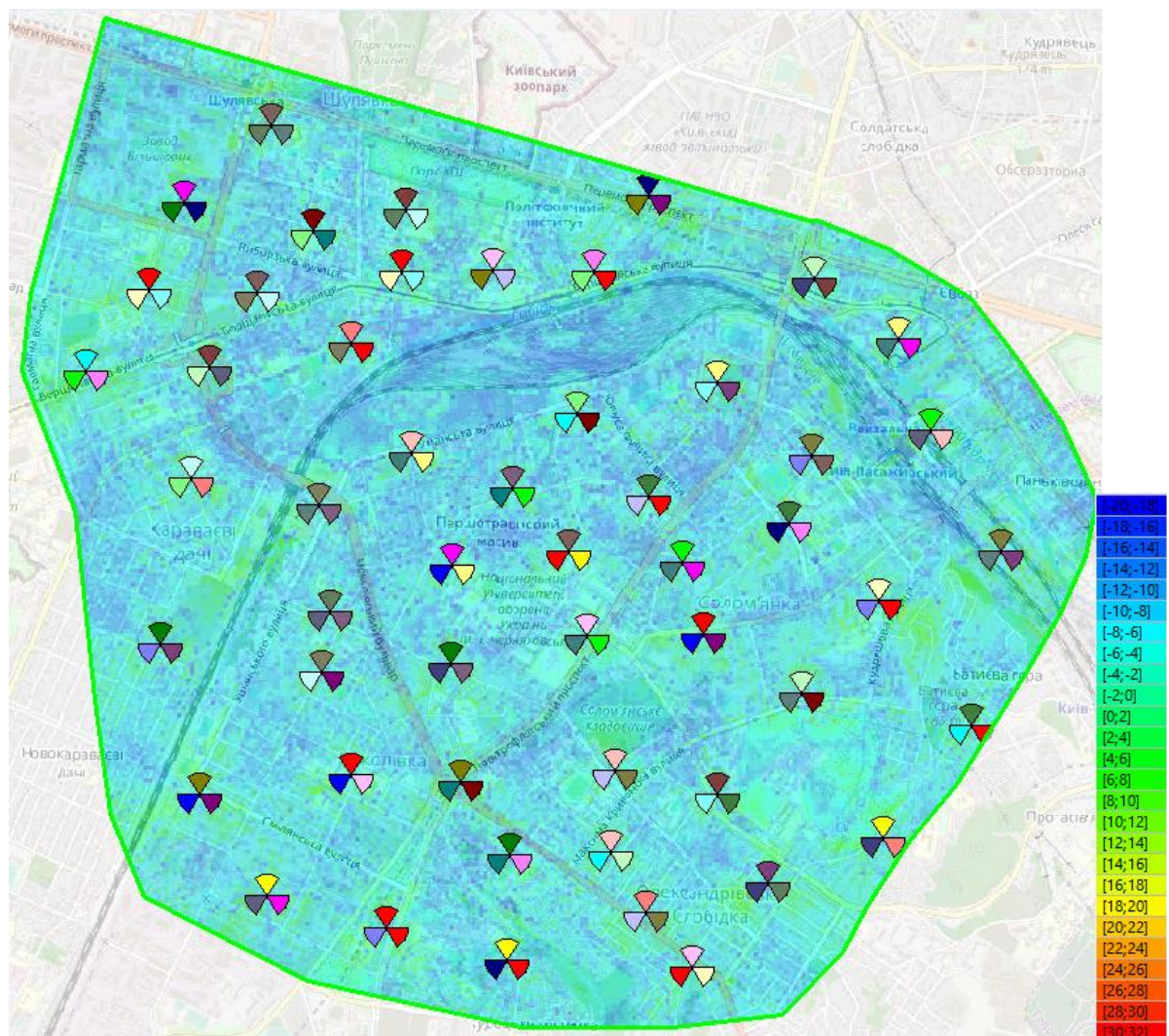


Рисунок 3.10. Результат моделювання за показником SINR

Невідповідність цілям планування можна пояснити тим, що початкова конфігурація базових станцій була однаковою для всіх і кут нахилу антени в вертикальній площині становив 0° . Це в свою чергу означало, що сигнал основного променя розповсюджувався на великі відстані, набагато більші, ніж

розрахований в попередньому розділі радіус соти, і створював перешкоди (інтерференцію) для інших сот. В наступному пункті буде проводитися попередня оптимізація з метою більш чіткого визначення зон обслуговування та покращення показників, по яким проводиться прогнозування покриття.

Діаграма, показана на рис. 3.11 показує, що значення SINR вище -3 дБ досягається лише на 17% площі ділянки, що є дуже малим результатом.

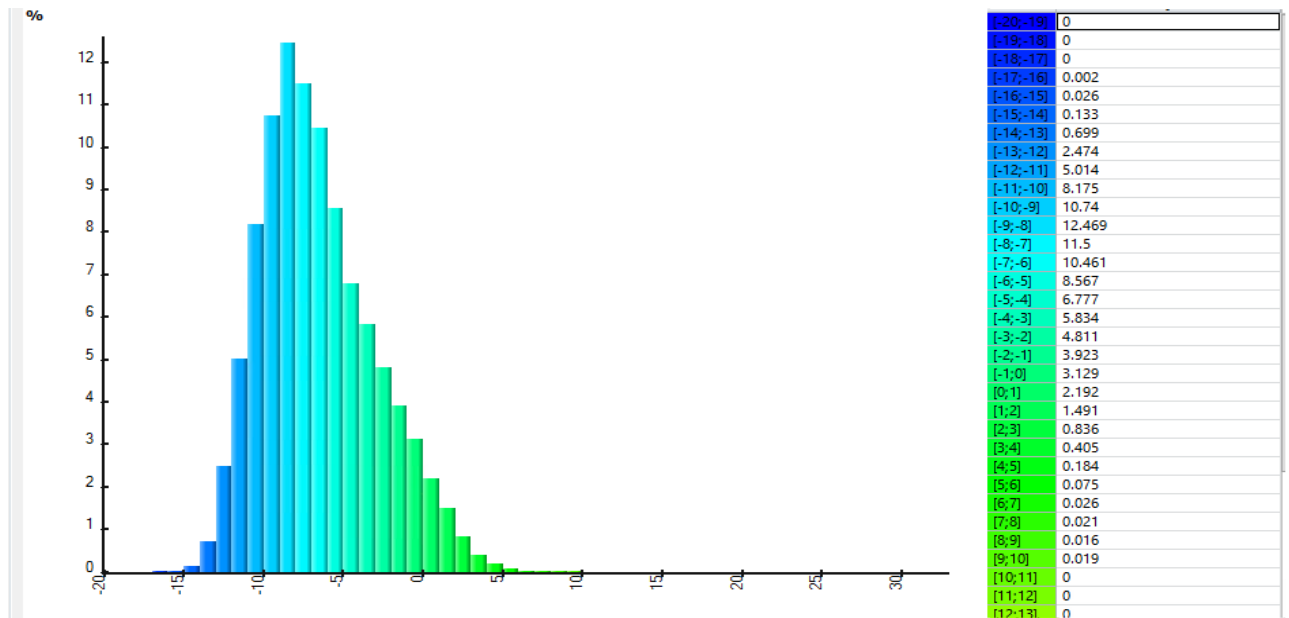


Рисунок 3.11. Результат моделювання за показником SINR у вигляді гістограми

3.6.2 Результати попередньої оптимізації

Інструмент Atoll дозволяє інженерам оптимізувати початкові параметри мережі з точки зору покриття мережі та якості. Для існуючої мережі оператори можуть змінювати основні параметри - електричні нахили антен та потужність сигналу, які керуються дистанційно. У сценарії нового розгортання початкові параметри, такі як типи антен, азимути, висоти, механічні нахили та електричні нахили, можуть бути налаштовані для отримання оптимальних параметрів мережевих параметрів на етапі детального планування. У цьому дослідженні, навіть якщо цільові вимоги до мережі, наприклад, покриття області та значення RSRP досягаються, для оптимізації перед розгортанням потрібна потужна мережа з точки зору рівня сигналу, SINR та RSRP, щоб уникнути додаткових витрат на

оптимізацію мережі після розгортання. Таким чином, за допомогою інструменту Atoll, параметри передавачів, такі як азимути антени, механічний нахил антени та електричний нахил, змінюються відповідно до додатка Б.

Після завершення оптимізації продуктивність роботи мережі оцінювалась з точки зору основних показників роботи мережі, таких як рівень сигналу, ефективний аналіз сигналу за RSRP та SINR. Відповідно, досягається значне покращення продуктивності мережі в порівнянні з початковими результатами передбачення перед оптимізацією. Це суттєве вдосконалення ілюструється так, як показано далі.

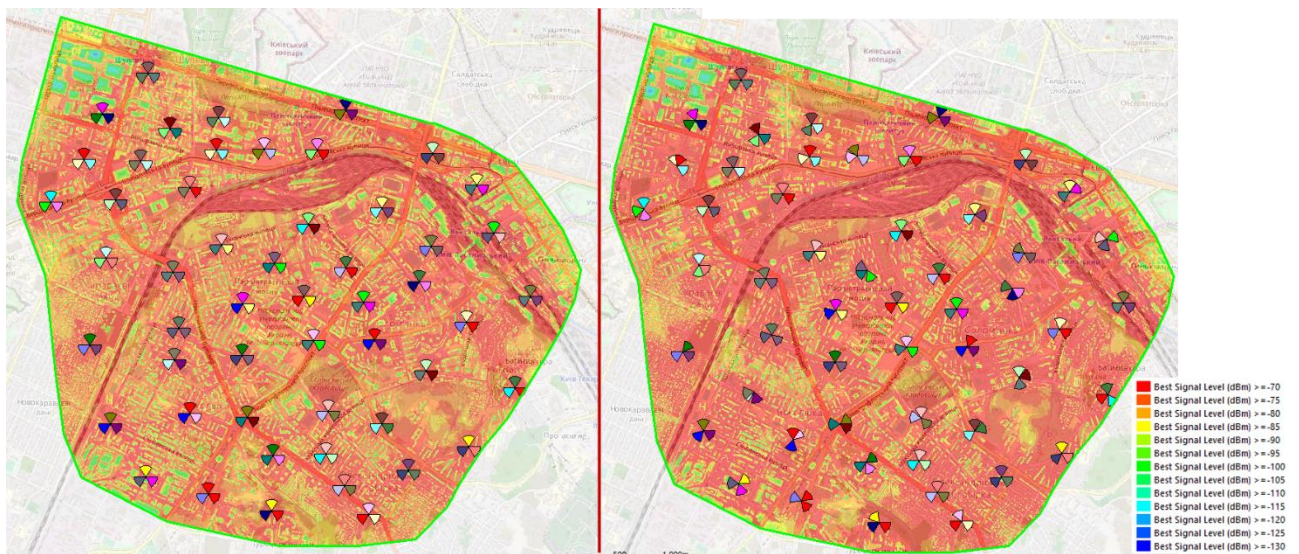


Рисунок 3.12. Карта покриття за рівнем сигналу до (зліва) та після (праворуч) оптимізації

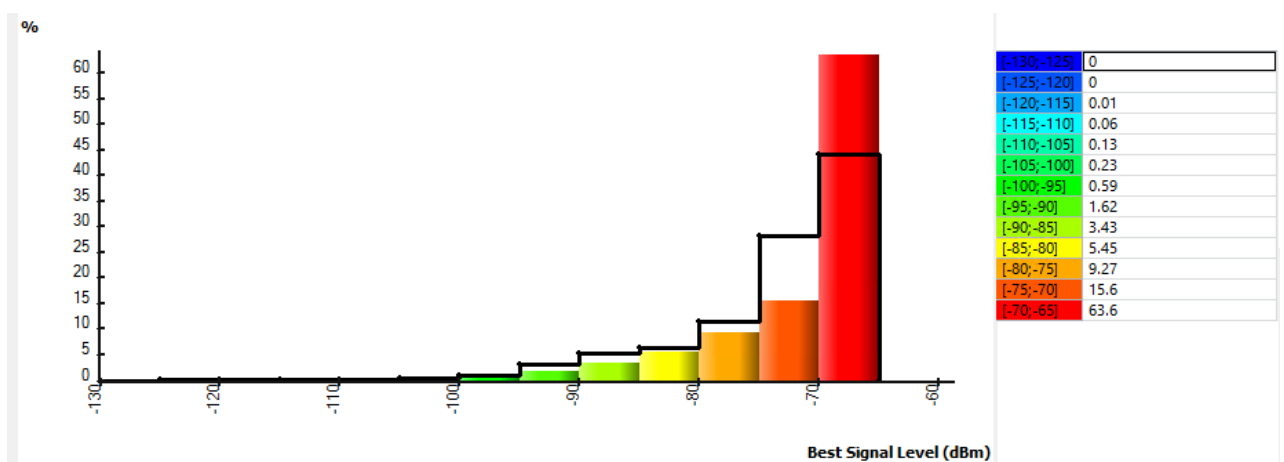


Рисунок 3.13. Порівняння результатів моделювання зі рівнем сигналу у виді гістограм. Чорним кольором показано попередній результат

Рисунок 3.12 показує карту покриття за рівнем сигналу до оптимізації (зліва) та після (праворуч). Для рівня сигналу більше -70 дБм відбулося покращення на 43,85%, а для -75 – на 9,4%. Результати для інших значень, та порівняння у виді гістограм показано на рис. 3.13 та в таблиці 4.11.

Таблиця 3.13

Покращення рівня сигналу після оптимізації

Легенда	Охоплювана територія %, до	Охоплювана територія %, після	Зміна, %
Рівень сигналу ≥ -70	44,21	63,60	43,85
Рівень сигналу ≥ -75	72,40	79,20	9,40
Рівень сигналу ≥ -80	83,77	88,47	5,61
Рівень сигналу ≥ -85	90,21	93,91	4,10
Рівень сигналу ≥ -90	95,48	97,34	1,95
Рівень сигналу ≥ -95	98,54	98,97	0,43
Рівень сигналу ≥ -100	99,47	99,56	0,09
Рівень сигналу ≥ -105	99,80	99,79	-0,01
Рівень сигналу ≥ -110	99,94	99,92	-0,02
Рівень сигналу ≥ -115	99,99	99,98	-0,01
Рівень сигналу ≥ -120	100,00	100,00	0,00
Рівень сигналу ≥ -125	100,00	100,00	0,00
Рівень сигналу ≥ -130	100,00	100,00	0,00

Рисунок 3.14 показує порівняння результатів моделювання за показником RSRP до та після оптимізації, а таблиця 3.14 – надає числові значення та вказує зміну у відсотках. Як видно, відбулося значне покращення, для деяких значень у кілька разів.

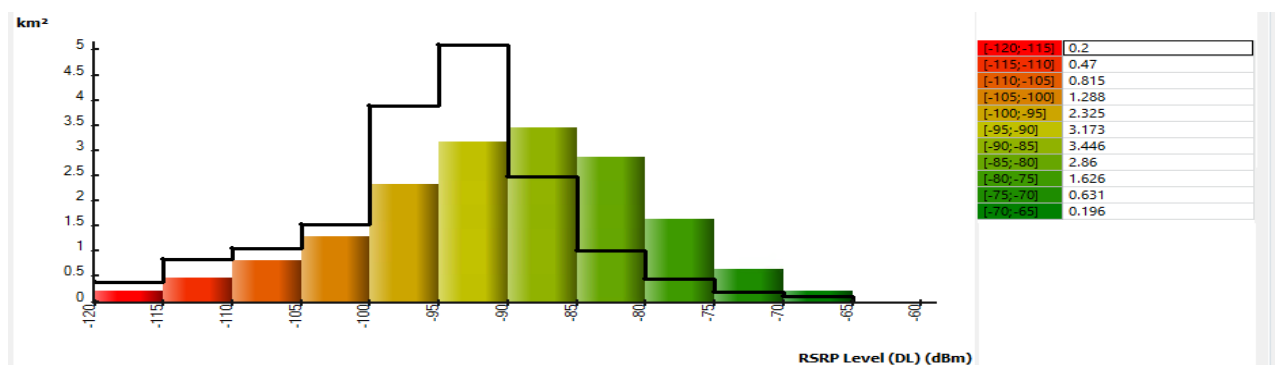


Рисунок 3.14. Порівняння результатів моделювання зі RSRP у виді гістограм.

Чорним кольором показано попередній результат

Таблиця 3.14

Покращення RSRP після оптимізації

Легенда	Охоплювана територія %, до	Охоплювана територія %, після	Зміна, %
RSRP \geq -70	0,518542	1,152843	122,323939
RSRP \geq -75	1,63909	4,857185	196,3342464
RSRP \geq -80	4,191953	14,405119	243,6374167
RSRP \geq -85	10,167269	31,196953	206,8370966
RSRP \geq -90	24,751401	51,429296	107,7833736
RSRP \geq -95	54,78936	70,059815	27,87120529
RSRP \geq -100	77,709544	83,712741	7,725173371
RSRP \geq -105	86,645273	91,275299	5,343656774
RSRP \geq -110	92,850983	96,063035	3,459362407
RSRP \geq -115	97,752614	98,823183	1,095181966
RSRP \geq -120	100	100	0

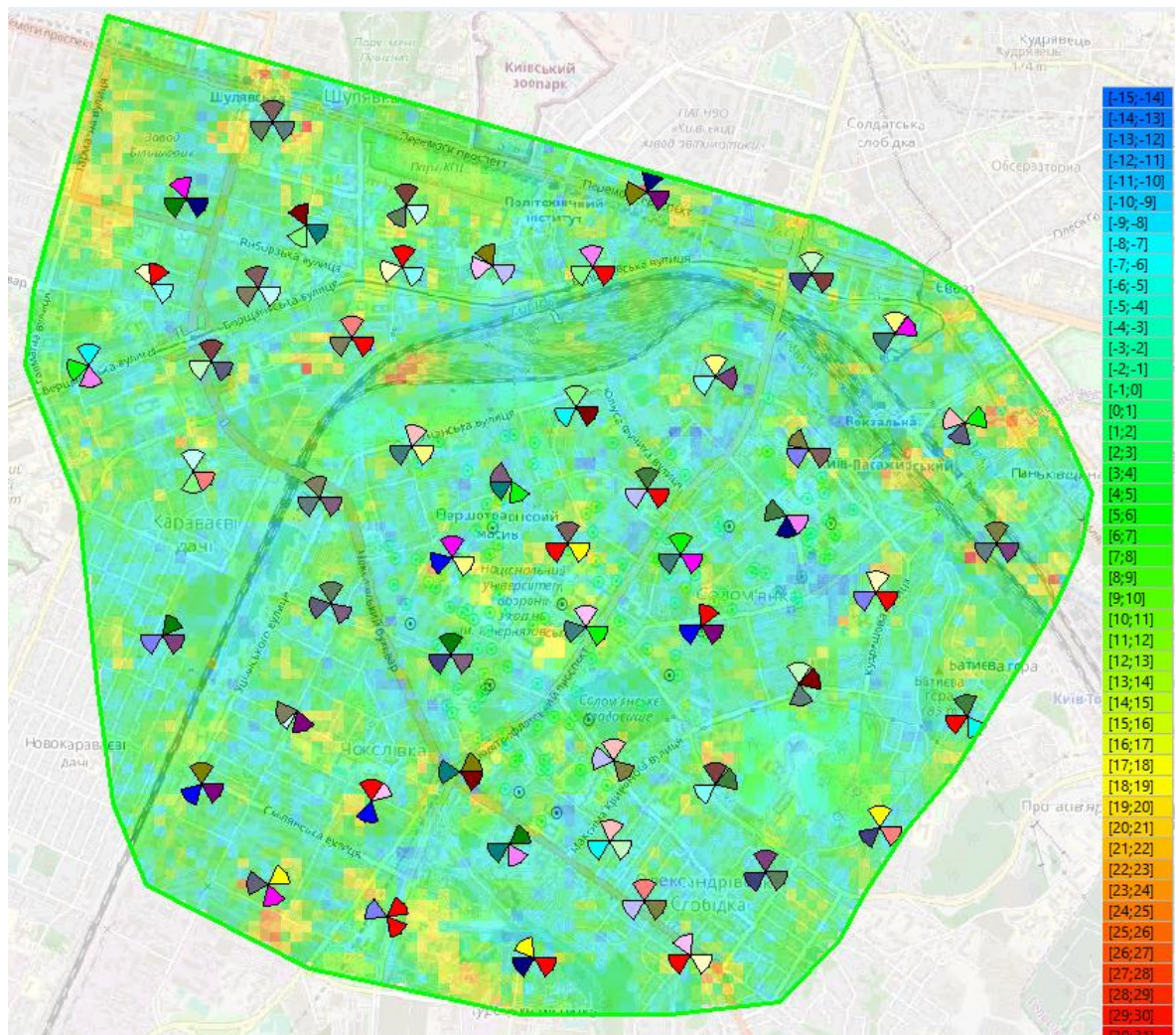


Рисунок 3.15 Результат моделювання за SINR

Останнє передбачення було зроблено за показником SINR. Як було вказано раніше, - за початкових налаштувань мережі досягти необхідних результатів не вдалося. Однак, після проведення попередньої оптимізації видно, що вдалося досягти наявність $SINR > -3$ дБ на 96% площі території. Результат моделювання вказано на рис. 3.15 в виді карти покриття, а на рис. 3.16 – в виді гістограми з порівнянням з попереднім результатом.

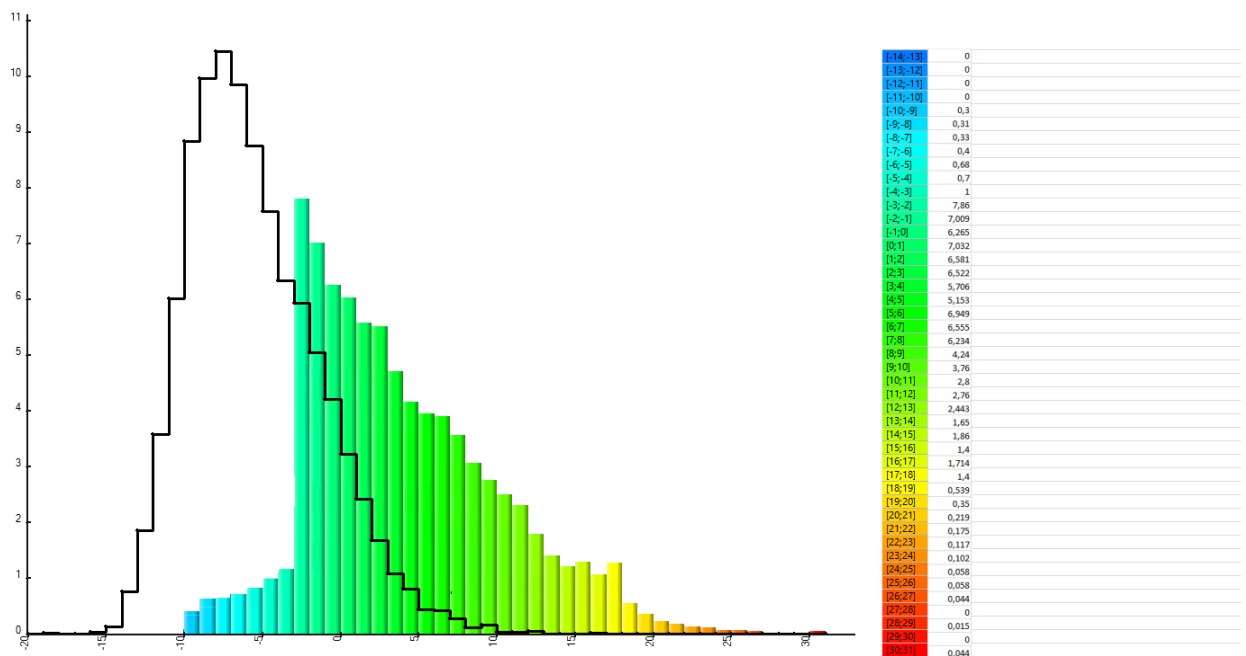


Рисунок 3.16. Порівняння результатів моделювання за SINR в виді гістограм.

Чорним кольором показано попередній результат

3.7 Оцінка та аналіз ємності мережі

Важливим кроком у процесі планування мережі LTE є перевірка ємності мережі. Це робиться за допомогою моделювання карти покриття за пропускнуою здатністю для низхідної/висхідної лінії та моделювання, заснованому на реалістичному розподілі користувачів у даний момент часу.

За допомогою інструменту проведено моделювання пропускнуої здатності щоб відобразити швидкість завантаження, базуючись на значення SINR та розрахунку носія для кожного пікселю. Нагадаємо, що ціллю проектування було

досягнення швидкості на межі соти 512 кбіт/с та 1024 кбіт/с для висхідної та низхідної лінії відповідно.

Рисунки 3.17 та 3.18 показують результати моделювання ефективної пропускної здатності каналу в виді гістограми для висхідної та низхідної лінії. Як видно з результатів, ціль досягнуто та демонструється набагато краща продуктивність.

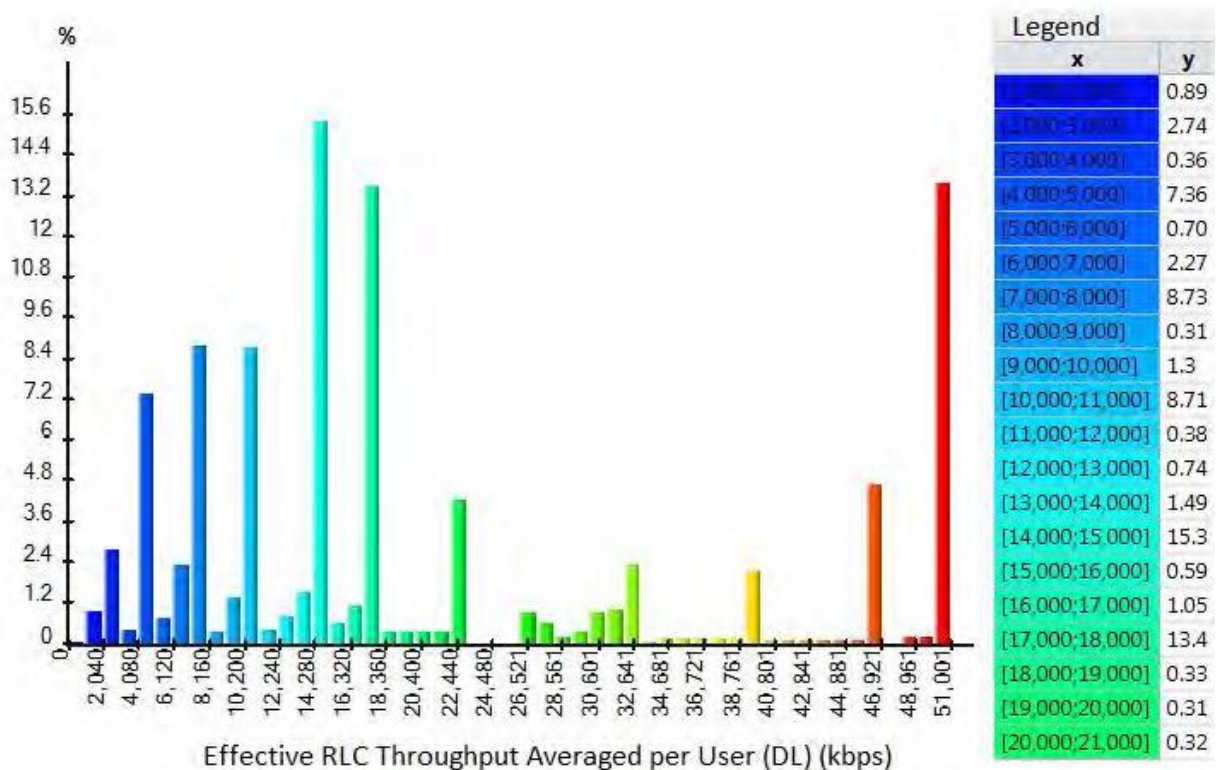


Рисунок 3.17. Результат моделювання пропускної здатності для висхідної лінії

Метод оцінки на основі реалістичного розподілі абонентів у певний момент часу полягає в тому, щоб оцінити ємність мережі на основі реальних користувачів, розміщених на карті випадковим чином. Інструмент Atoll в цьому випадку генерує випадкові розміщення абонентів, використовуючи карти трафіку. Використовується алгоритм Монте-Карло. Моделювання виконується послідовно і на кожному кроці обчислюються такі параметри, як завантаженість лінії зв'язку, пропускна здатність.

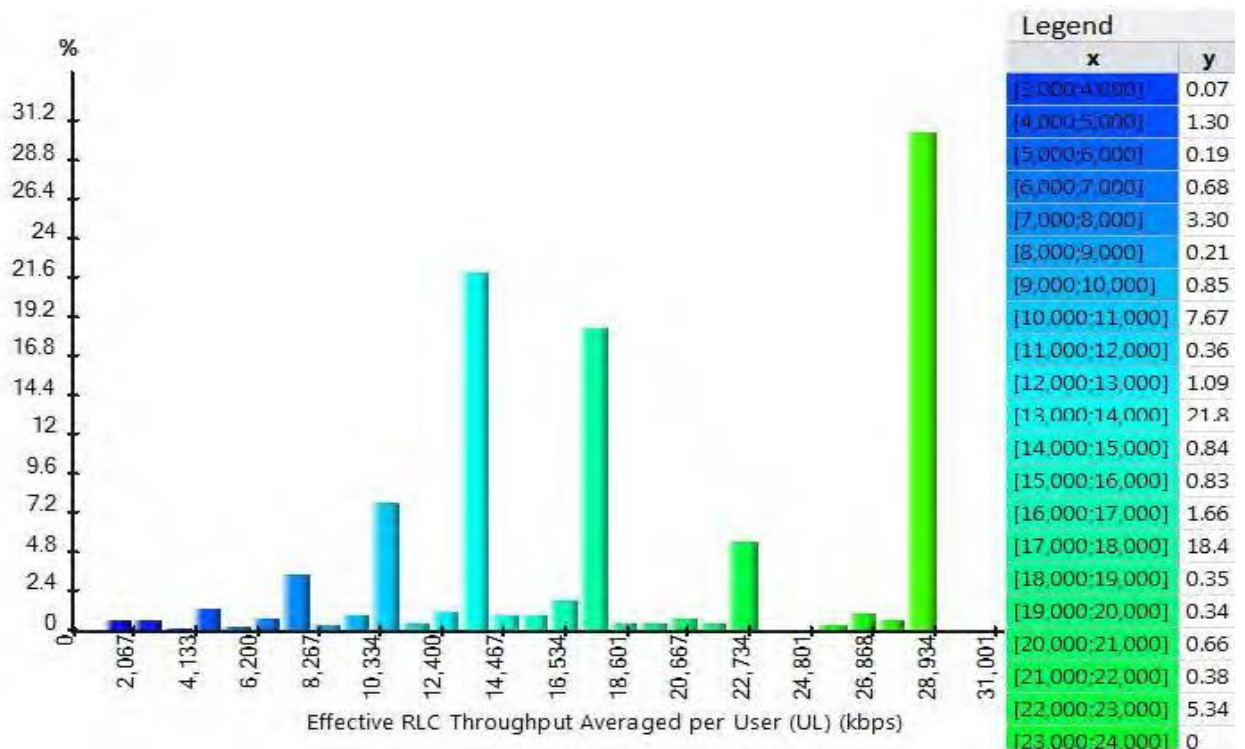


Рисунок 3.18. Результат моделювання пропускної здатності для висхідної лінії

В цій симуляції використовується карта трафіку секторів, яка створюється на основі загальної кількості одночасно підключених користувачів і використовує карту покриття секторів. Використовуючи таблицю, що описували категорії користувачів, яка використовувалася при номінальному плануванні, в інструменті Atoll було створено 3 профілі користувачів (Таблиця 4.16), щоб потім використати їх для симуляції кількості одночасно підключених абонентів, коли їх кількість складає 10%, 20% та 30% від загальної запланованої кількості абонентів.

Таблиця 4.16

Профілі користувачів, створені для моделювання

Категорія	Пріоритет (0- найнижчий)	Тип сервісу	Низхідна лінія		Висхідна лінія	
			Максимальна швидкість (кбіт/с)	Мінімальна швидкість (кбіт/с)	Максимальна швидкість (кбіт/с)	Мінімальна швидкість (кбіт/с)
Золота	0	передача даних	128	64	64	32
Срібна	1	передача даних	512	128	128	64
Бронзова	2	передача даних	1024	512	512	128

Таблиця 4.17 показує результат моделювання, коли 10% загальної кількість користувачів, 4500, намагається підключитися до мережі. З результатів видно, що 4490 (99.8%) підключені. 10 користувачів не підключилися по причині відсутності покриття. Всі базові станції показують показник успішності підключення 100%. Це означає, що мережа здатна забезпечити одночасне підключення 10% користувачів.

Таблиця 4.17

Результат моделювання при 10% активних користувачів

Категорія	Намагаються підключитися	Підключені	Відмова (відсутність покриття)
Золота	2250	2245	5
Срібна	1764	1759	5
Бронзова	486	486	0

Таблиця 4.18 показує результат моделювання, коли 10% загальної кількість користувачів, 9000, намагається підключитися до мережі. З результатів видно, що 8975 (99.7%) підключені. 25 користувачів не підключилися по причині відсутності покриття. Всі базові станції показують показник успішності підключення 100%. Це означає, що мережа здатна забезпечити одночасне підключення 20% користувачів.

Таблиця 4.18

Результат моделювання при 10% активних користувачів

Категорія	Намагаються підключитися	Підключені	Відмова (відсутність покриття)
Золота	4551	4537	14
Срібна	3532	3527	7
Бронзова	917	913	4

Таблиця 4.19 показує результат моделювання, коли 10% загальної кількість користувачів, 13500, намагається підключитися до мережі. З результатів видно, що 13452 (99.6%) підключені. 48 користувачів не підключилися по причині відсутності покриття. Всі базові станції показують показник успішності

підключення 100%. Це означає, що мережа здатна забезпечити одночасне підключення 10% користувачів.

Таблиця 4.19

Результат моделювання при 10% активних користувачів

Категорія	Намагаються підключитися	Підключені	Відмова (відсутність покриття)
Золота	6846	6825	21
Срібна	5287	5267	20
Бронзова	1367	1360	7

Висновки до розділу 3

В даному розділі було проведено роботу з проектування за методикою, яка була детально розглянута в попередньому розділі. За область для проведення розрахунків було обрано частину Солом'янського району міста Києва. За результатами номінального планування було визначено, що для покриття обраної ділянки необхідно 3 БС. Також для цільової мережі було обрано частотну смугу 1800 МГц, а ширину каналу – 20 МГц.

Для моделювання покриття та аналізу ефективності і продуктивності мережі було використано інструмент для планування та оптимізації Atoll. Виконуючи моделювання за рівнем сигналу, за показником RSRP та SINR було визначено, що результатів лише номінального планування недостатньо для успішної роботи мережі.

Для покращення результатів та продуктивності мережі було виконано попередню оптимізацію. Було змінено параметри БС та проведено повторне моделювання. Завдяки виконаним діям було досягнуто цілей, які ставилися до початку розгляду оцінки покриття.

Після досягнення поставлених цілей покриття, було проведено ще одне моделювання, для перевірки, чи відповідає мережа вимогам ємності. Як показали результати, спроектована мережа відповідає як критеріям покриття, так і критеріям ємності.

ВИСНОВКИ

В цій роботі було проведено проектування мережі бездротового зв'язку стандарту четвертого покоління LTE. В процесі розгляду основних особливостей мережі було розглянуто архітектуру мережі, її основні компоненти та їх функції.

В роботі розглянуто методику розрахунку кількості базових станцій, які необхідні для забезпечення покриття та ємності на певній території. В роботі для проектування було обрано частину Солом'янського району зі щільною забудовою. Для цільової мережі було обрано частотну смугу 1800 МГц, а ширину каналу – 20 МГц.

В результаті було визначено кількість БС та проведено симуляцію покриття та ємності за допомогою інструменту для планування та оптимізації Atoll. За результатами моделювання було проведено попередню оптимізацію та досягнуто поставлених цілей. Покриття за рівнем -110 дБм було досягнуто на всій території обраної ділянки. А результати моделювання швидкості завантаження та кількості одночасних підключень показують, що запланована мінімальна швидкість на межі соти досягається на всій запланованій для дослідження території, а мережа здатна одночасно обслужити 13500 користувачів, які намагаються зареєструватися.

Результати моделювання вказують на те, що при плануванні радіо покриття необхідно використовувати інструмент для моделювання. Завдяки виконанню передбачень карт покриття та їх аналізу, на етапі, які передують запуску мережі, можливо виконати певні зміни в параметрах мережі та у розташуванні БС, які в результаті надають можливість максимально ефективно використовувати кошти, що виділені для розгортання мережі та уникнення додаткових витрат та для проведення оптимізації.