

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
В.о. завідувача кафедри

_____ Явіся В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ____ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

За освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування інфокомунікацій.

на тему: Розробка покриття радіомережі четвертого покоління в умовах міської забудови.

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ТЗ-81мп
(шифр групи)

_____ Шнурков Владислав Олегович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник професор, д.т.н. Кравчук С.О. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант 1, 2, 3 к.т.н., доцент Міночкін Д.А. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент професор каф. ІТМ, д.т.н., с.н.с., Скулиш М.А. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування інфокомунікацій.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Шнуркову Владиславу Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Розробка покриття радіомережі четвертого покоління в умовах міської забудови.

науковий керівник дисертації Кравчук Сергій Олександрович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «_07_» «_11_» 2019р. № _3840-с_

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження мережа стільникового зв'язку четвертого покоління LTE

4. Предмет дослідження покриття радіомережі

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- _____ аналіз загальних відомостей про мережу четвертого покоління LTE;
- _____ визначення алгоритму планування радіомережі LTE;
- _____ розрахунок енергетичного бюджету радіолінії LTE;

— _____ моделювання покриття за отриманими результатами з використання сучасного інструменту для планування та оптимізації Atoll.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

- | | |
|----------|--|
| 1) _____ | Тема, мета та завдання магістерської дисертації |
| 2) _____ | Загальні відомості про мережу LTE; |
| 3) _____ | Архітектура мережі LTE; |
| 4) _____ | Процес номінального планування |
| 5) _____ | Моделювання з використанням інструменту для планування Atoll |
| 6) _____ | Результати моделювання |
| 7) _____ | Висновки |

7. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Доцент Міночкін Д.А.	26.12.2019	27.03.2019
2	Доцент Міночкін Д.А.	27.03.2019	20.09.2019
3	Доцент Міночкін Д.А.	20.09.2019	20.11.2019

9. Дата видачі завдання 20.09.2018

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка, оформлення, узгодження та затвердження технічного завдання на дипломну роботу	20.09.2018	Виконано
2	Опрацювання літературних джерел з теми досліджень	26.12.2018	Виконано
3	Аналіз вимог завдання, вибір методів і засобів розв'язання поставленої задачі	18.01.2019	Виконано
4	Дослідження відомостей про мережу LTE, архітектура, особливості роботи	27.03.2019	Виконано
5	Розробка алгоритму планування радіомережі	18.06.2019	Виконано
6	Розробка алгоритму розрахунку на	20.09.2019	Виконано

	стадії номінального планування		
7	Розрахунок необхідної кількості базових станцій за алгоритмом	11.11.2019	Виконано
8	Моделювання покриття за допомогою інструменту для планування Atoll	20.11.2019	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	07.12.2019	Виконано

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Робота містить 101 сторінку, 38 рисунків, 27 таблиць. Було використано 11 джерел інформації.

Актуальність. В наш час в Україні стрімко розвиваються мережі стільникового зв'язку четвертого покоління. Трафік на одного абонента зростає з кожним місяцем, все частіше користувачі надають перевагу стільниковому зв'язку замість Wi-Fi. Оператори змушені забезпечувати покриття та необхідну ємність шляхом встановлення нових базових станцій. Якісне планування мережі здатне забезпечити кращу продуктивність мережі та скоротити затрати на розгортання та оптимізацію. Також важливо використовувати інструмент для планування та оптимізації, за допомогою якого можна моделювати покриття мережі та проводити аналіз продуктивності.

Метою даної роботи є дослідження процесу планування мережі четвертого покоління LTE в умовах міської забудови, проведення розрахунків та моделювання покриття.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- дослідження особливостей мережі LTE;
- розробка алгоритму планування радіомережі;
- проведення номінального та детального планування;
- моделювання покриття за допомогою інструменту для планування та оптимізації мережі;

– попередня оптимізація та повторне моделювання.

Об’єкт дослідження – безпроводна мережа четвертого покоління LTE.

Предмет дослідження – покриття радіомережі

Ключові слова: стільниковий зв’язок, LTE, покриття радіомережі, енергетичний бюджет, планування покриття, Atoll

ABSTRACT

The work contains 101 pages, 38 illustrations, 27 tables, 11 sources of information were used.

Topicality. Nowadays, fourth generation cellular networks are rapidly developing in Ukraine. Traffic per subscriber is increasing every month, and more and more users are switching to mobile over Wi-Fi. Operators are forced to provide coverage and the necessary capacity by installing new base stations. Good network planning can deliver better network performance and reduce deployment and optimization costs. It is also important to use a planning and optimization tool to model network coverage and perform performance analysis.

The purpose of this work is to investigate the process of planning of fourth-generation LTE network in urban development, calculations and coverage modeling.

To achieve this goal, the following tasks are solved in the work:

- study of LTE network features;
- development of radio network planning algorithm;
- carrying out nominal and detailed planning;
- coverage modeling using the network planning and optimization tool;
- Pre-optimization and re-modeling.

The object of study is a fourth-generation LTE wireless network.

The subject of the study is radio network coverage

Keywords: cellular network, LTE, radio coverage, link budget, coverage planning, Atoll

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. Загальні відомості про технологію LTE	11
1.1. Вступ	11
1.2. Порівняння з мережею WCDMA/UMTS	14
1.3. Архітектура мережі LTE	18
1.3.1. eNodeB	19
1.3.2. Serving gateway	22
1.3.3. Public data network gateway	23
1.3.4. Mobility management entity	24
1.3.5. Home subscriber server та PCRF	25
1.3.6. User equipment	26
1.4. Частотний спектр	27
1.4.1. Виділені смуги спектру	27
1.4.2. Частотний і часовий дуплекс	29
1.4.3. Частотні смуги	30
1.5. Метод просторового кодування сигналу MIMO	33
2. Реалізація мережі бездротового доступу	39
2.1. Загальний огляд	39

2.2.	Процес планування радіомережі	40
2.2.1.	Стадія підготовки.....	40
2.2.2.	Номінальне планування.	41
2.2.3.	Детальне планування.	42
2.2.4.	Запуск мережі.....	43
2.2.5.	Оптимізація мережі	43
2.3.	Планування покриття LTE	43
2.3.1.	Модель розповсюдження	45
2.3.1.1.	Модель Окамура-хата.....	46
2.3.1.2.	Модель COST231-Hata.....	47
2.3.1.3.	Модель Ericsson 9999.....	48
2.3.2.	Параметри і формули для розрахунку енергетичного бюджету 49	
2.3.3.	Площа соти та кількість базових станцій.....	54
2.4.	Планування ємності LTE	55
2.4.1.	Процес визначення ємності.....	55
2.4.2.	Розрахунок середньої швидкості на соту/базову станцію.....	56
2.4.3.	Кількість базових станцій на основі розрахунку ємності.....	60
2.5.	Оптимізація перед запуском	60
2.5.1.	Перестановка місць розташування базових станцій.....	62
2.5.2.	Початкові налаштування параметрів антени.....	62
3.	Розрахунок зон покриття.....	65
3.1.	Вступ.....	65
3.2.	Вимоги до цільової мережі.....	65

3.2.1.	Вимоги до покриття.....	66
3.2.2.	Вимоги до ємності	67
3.3.	Планування покриття	68
3.3.1.	Енергетичний бюджет	68
3.3.1.2.	Вибір моделі розповсюдження.....	73
3.4.	Планування ємності.....	75
3.4.1.	Обсяг даних на користувача за місяць	76
3.4.2.	Середня пропускна здатність базової станції.....	76
3.4.3.	Визначення кількості базових станцій за ємністю.....	77
3.5.	Моделювання з використанням інструменту Atoll	78
3.5.1.	Розміщення базових станцій	81
3.6.	Моделювання карт покриття та аналіз	81
3.6.1.	Результати початкового моделювання.....	82
3.6.2.	Результати попередньої оптимізації.....	87
3.7.	Оцінка та аналіз ємності мережі	92
ВИСНОВКИ		97
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....		98
ДОДАТОК А.....		99
ДОДАТОК Б.....		101

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

LTE	Long Term Evolution	Довготерміновий розвиток, навза мережі четвертого покоління
3GPP	3rd Generation Partnership Project	Проект партнерства третього покоління
GSM	Global System for Mobile	Глобальна система для мобільних пристроїв
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Універсальна мобільна телекомунікаційна система
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network	Розвинута наземна мережа доступу UMTS
eNB	Evolved Node B	Розвинутий вузол B
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Метод просторового кодування сигналу
ГНН		Години найбільшого навантаження

DL	Downlink	Низхідна лінія зв'язку
UL	Uplink	висхідна лінія зв'язку
BC		Базова станція

ВСТУП

Швидкий розвиток технологій зв'язку, як фіксованою, так і мобільного, викликаний підвищеним інтересом людей до мережі інтернет. Величезна роль глобальної мережі в сучасному світі обміну інформацією незаперечна і не потребує підтвердження. Користуючись мережею інтернет, люди отримують можливість навчатися, працювати, спілкуватися, обмінюватися даними, оплачувати послуги та покупки, а також користуватися в режимі онлайн усіма можливими послугами комерційних компаній і державних установ. Як показують результати багатьох досліджень, останнім часом в Україні суттєво росте об'єм даних, що передається бездротовими мережами.

В той час, як для сільської місцевості планування мережі є більш простим та звужується до правильного підбору місця розміщення виходячи з рельєфу та висоти конструкції, в містах з щільною забудовою виникають інші проблеми. Будівлі є перешкодами для проходження сигналу на велику відстань, тому для однакової площі в різних типах місцевості для якісного покриття необхідно розмістити різну кількість базових станцій. До того ж необхідно враховувати особливості забудови, так як сигнали з різних базових станцій є перешкодою одне для одного. З іншого боку, велика щільність населення потребує великої ємності мережі, щоб забезпечити потреби по швидкості та кількості одночасно підключених користувачів.

В цій роботі проведено аналіз етапів проектування радіо покриття в загальному випадку, наведено методикку номінального планування зі вказуванням формул та типових значень для певних показників, що беруть

участь у розрахунку. Для розрахунку обрано частину Солом'янського району міста Київ зі щільною забудовою. Використовуючи отримані дані, виконано моделювання за допомогою сучасного інструменту для планування на оптимізації мережі Atoll, а результати представлені в останньому розділі.

1. Загальні відомості про технологію LTE

1.1. Вступ

Стандарти бездротового зв'язку з'являлися після впровадження стандарту 1G в 1980 році. Стандарт 1G був заснований на аналоговій технології, а цифрові технології впроваджені в бездротових системах другого покоління. Після аналізу другого покоління світ зазнав широкосмугової передачі даних бездротово в системах 3G. LTE / LTE Advanced, випущений 3GPP, успішно запусив 4G системи в усьому світі, покращивши попередні стандарти бездротового зв'язку. Зараз нові тенденції вже наближаються до впровадження 5G-систем із новими розробками з кожного аспекту існуючих систем LTE. [1]

LTE, широко відомий як 4G LTE, - це стандарт, що створено для бездротового зв'язку з високошвидкісним обміном даними для мобільних телефонів та терміналів передачі даних. Відправним пунктом для цього стандарту став семінар, проведений у листопаді 2004 року з питань розвитку 3GPP RAN в Торонто, Канада. Дослідження було розпочато через місяць, у грудні 2004 року, з метою еволюції системи радіо-доступу. Головними цілями було зменшення витрат на передачу одного біту інформації, збільшення об'ємів надання послуг, гнучкішого використання нових та існуючих діапазонів частот, розумне енергоспоживання терміналу та спрощена архітектура з відкритими інтерфейсами [2].

Поява технології LTE пояснюється наступними причинами:

- Необхідність мережі, яка могла б задовольнити лавиноподібне збільшення трафіку даних;

- Поява нових сервісів, що використовують інтернет з'єднання, таких, як відеоконференція або потокове відео, що потребують покращення щодо швидкості передачі даних
- З точки зору оптимізації, необхідність нового стандарту, який різко знижує витрати на розвертання і обслуговування мережі.

За даними щорічного звіту Ericsson Mobility Report за 2019 рік очікується, що кількість користувачів LTE буде зростати до 2021 року і становитиме 8.1 млрд користувачів, хоча на даний момент вже запускаються мережі 5-ого покоління.[3] Проте бурхливе зростання користувачів 5G очікується в 2021. Тим часом, оператори продовжують розвивати свої мережі LTE, збільшуючи покриття та ємність. На рисунку 1 показано графік росту кількості підключень за допомогою існуючих технологій (LTE, WCDMA, GSM, TD-SCDMA, CDMA). На графіках не вказано пристрої Інтернету Речей.

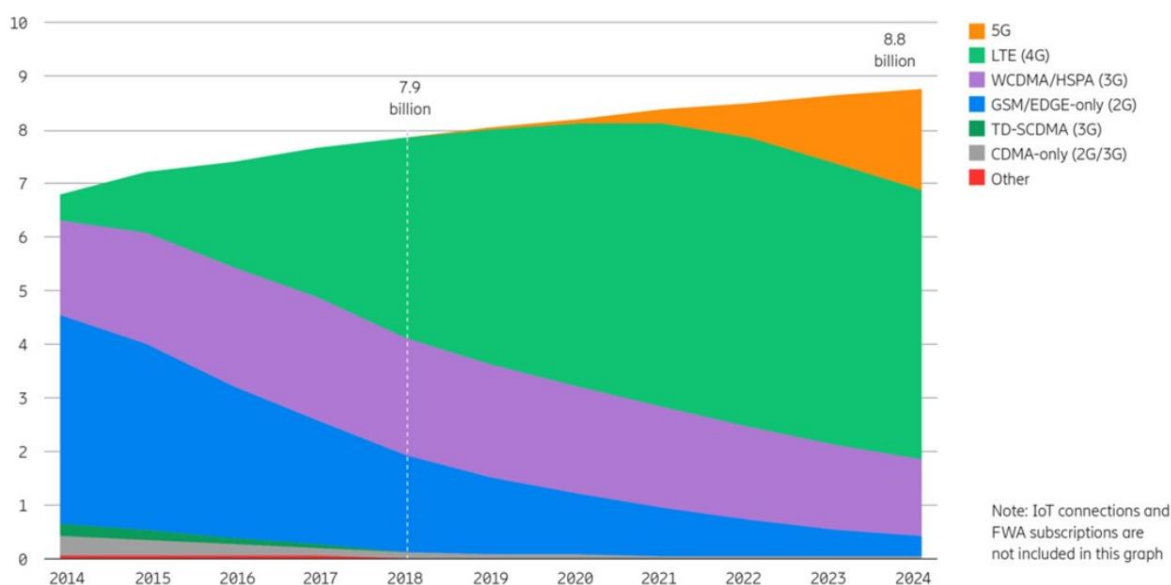


Рисунок 1.1. Прогноз росту кількості пристроїв, що використовують мобільний зв'язок [3]

Мобільний трафік зростає в світі і в Україні особливо з кожним місяцем. За звітом і прогнозом Ericsson Mobility Report, мобільний трафік в 2018 році досяг 28 Екзобайт і 60% цього об'єму складав відео-контент. До 2024 року прогнозується збільшення трафіку до 131 Екзобайт в місяць і понад 70% буде складати відео-трафік. Це пояснюється появою нових відео-сервісів і

зростанням популярності та залученості населення до існуючих (YouTube, TikTok, Instagram, Twitch, Vimeo та ін.). Кругова діаграма розподілу трафіку по виду даних вказано на рисунку 2

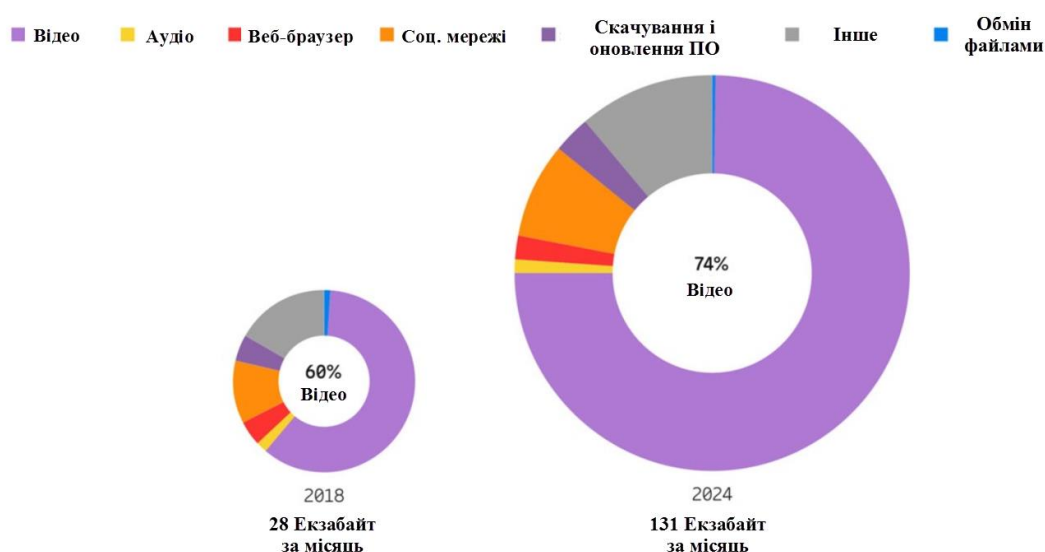


Рисунок 1.2. Об'єми мобільного трафіку за місяць в 2018 і прогноз на 2024 [3]

3GPP прогресували для встановлення стандартизації та еволюції LTE після першого стандарту, замороженого в 2008 році для Release 8. Стандартизація та еволюція тривали з випусками LTE-Advanced та далі. Це дослідження базується на Release 8, а узагальнені характеристики різних варіантів випусків LTE 3GPP представлені в [16 2] та прийняті, як у наведених нижче розділах.

LTE впровадила нові технології, наприклад MIMO, OFDMA, турбокодування тощо. Ці технологічні нововведення пов'язані з фізичним рівнем LTE. Фізичний рівень справляється з усіма обробками даних з більш високих рівнів. На фізичному рівні реалізовані різні методи обробки сигналів для успішної передачі та прийому системи LTE.

Технологія LTE відповідала вимогам, що були висунуті:

- Покращена ємність системи та покриття відносно UMTS;
- Висока пікова швидкість передачі даних;
- Низька затримка;

- Зменшення експлуатаційних витрат;
- Підтримка передачі за допомогою декількох антен;
- Гнучкість щодо частотного ресурсу (підтримка роботи в різних діапазонах з різною шириною каналу);
- інтеграція з існуючими системами (UMTS, Wi-Fi тощо). [1]

1.2. Порівняння з мережею WCDMA/UMTS

Технологія UMTS, що відноситься до третього покоління суттєво змінила ставлення і уявлення користувачів до мобільного інтернету. Зникла необхідність перегляду спеціально адаптованих версій сайту, що мали менший об'єм, з'явилося багато сервісів, що використовували високу швидкість передачі даних. Користувачів ставало все більше, мобільний трафік виростав лавиноподібно з кожним роком. Тому, закономірно з'явилася технологія LTE, яка забезпечила потреби користувачів зі впровадженням нових підходів. В таблиці 1.1 вказано схожість і різницю технологій WCDMA та LTE.

Таблиця 1. Порівняння технологій WCDMA та LTE [1]

Властивість	WCDMA	LTE
Вид доступу	WCDMA	OFDMA та SC-FDMA
Повторне використання частот	100%	Гнучке
Ширина смуги	5 МГц	1.4, 3, 5, 10, 15 або 20 МГц
Режим роботи	Частотний або часовий дуплекс	Частотний або часовий дуплекс
Використання MIMO	З останнього 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 лише в 2018 році отримали ліцензії на використання частот для LTE в діапазонах 1800 та 2600 МГц. Покриття на даний момент

доступне в великих містах з населенням понад 20000, на основних дорогах та в селах, через які ці дороги проходять. На рисунках 1.3 та 1.4 показано покриття мобільних операторів України технологіями UMTS та LTE на момент листопаду 2019 року. На даний момент покриття недостатньо для комфортного користування технологією.

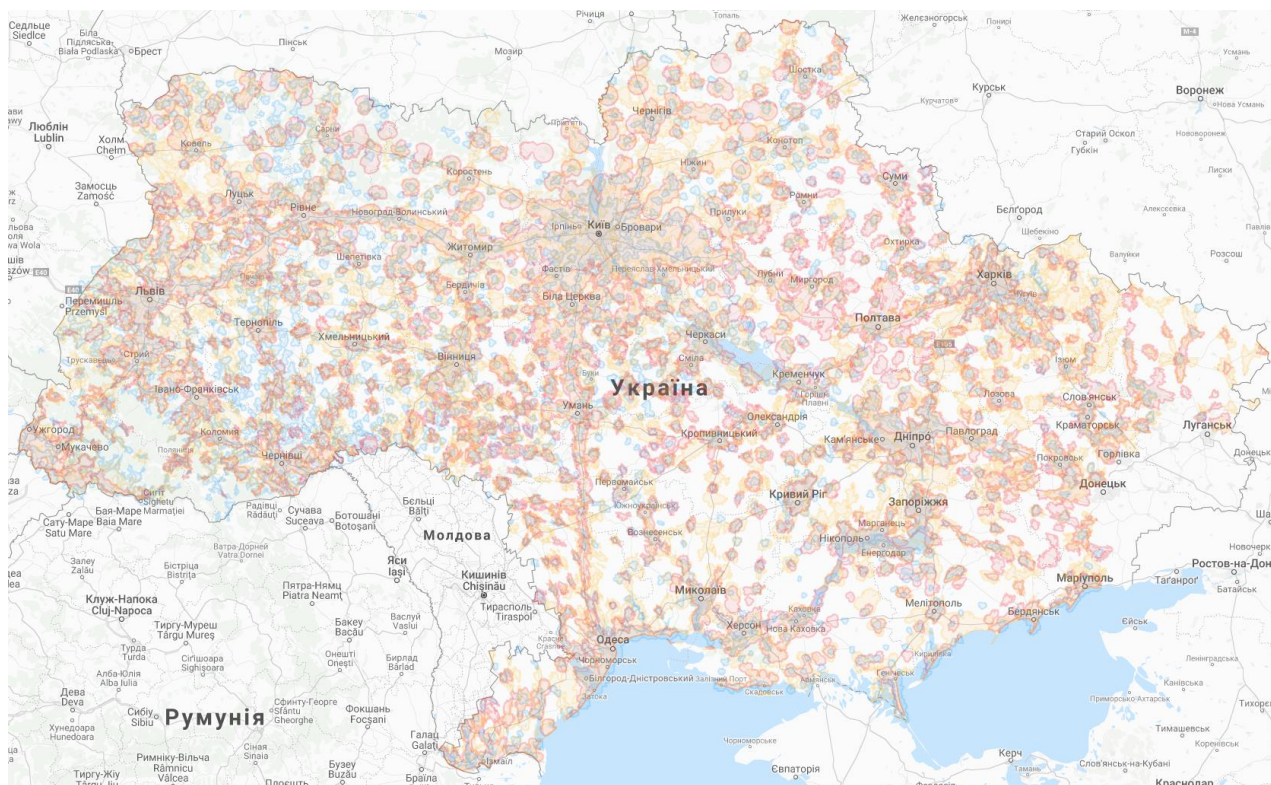


Рисунок 1.3. Покриття операторів України, технологія UMTS. Червоний колір – Vodafone, синій – Київстар, жовтий – Lifecell.

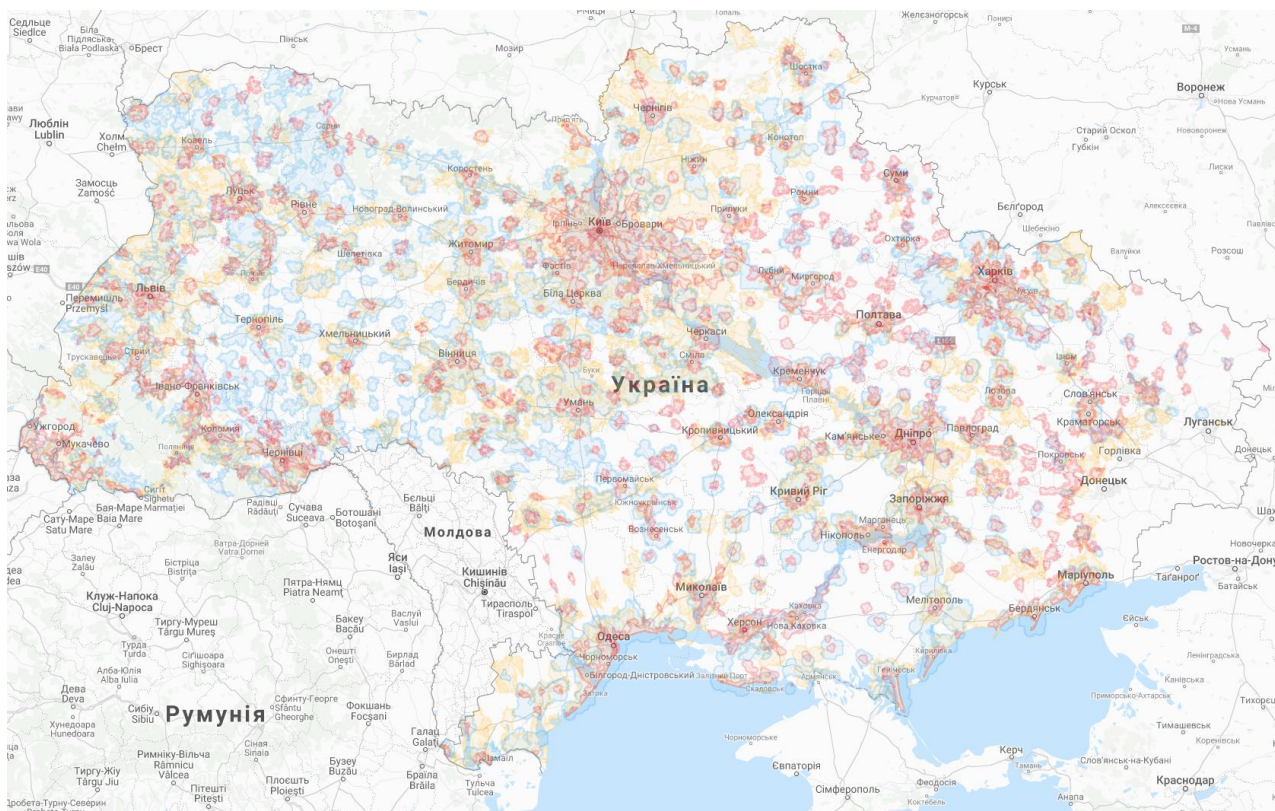


Рисунок 1.4. Покриття операторів України, технологія UMTS. Червоний колір – Vodafone, синій – Київстар, жовтий – Lifecell.

В 2020 році очікується аукціон частот в діапазоні 900 МГц, що надасть можливість операторам забезпечити покриття в віддалених регіонах, на всіх автомобільних дорогах та забезпечити доступ до швидкісного мобільного інтернету більшості населення, що в свою чергу стане кроком до реалізації ідеї «країни у смартфоні». Проте на даний момент існує проблема з перерозподілом частот, що використовувалися раніше для GSM. Так як оператори і користувачі не готові відмовитися від цієї технології, адже багато терміналів не підтримують хоча б третє покоління, існує багато датчиків (GPS в наземному транспорті, користувацькі сигналізації, GSM-реле). Тому в нині запущених мережах LTE-1800 оператори використовують не весь доступний діапазон частот, вимушено залишаючи частину під використання в GSM. Схожа ситуація буде відбуватися і з діапазоном 900 МГц. Тим більше, цей діапазон забезпечує набагато більше покриття завдяки властивостям розповсюдження радіохвиль. Тому, неможливо буде швидко відмовитися від GSM, так як такий крок позбавить багато ділянок покриття.

На рисунку 1.5 показано результати одночасно проведеного тестування мереж UMTS та LTE на швидкість завантаження великого файлу за допомогою протоколу HTTP та тестування затримки (ping). Тестування і обробка результатів була виконана в локації біля індустріального мосту, навколо учбового корпусу інституту телекомунікаційних систем за допомогою програмно-апаратного комплексу TEMS. Вимірювання проводилося протягом 25 хвилин починаючи з 18:00, що є годинами найбільшого навантаження. В таблиці 1.2 показано основні результати вимірювання.

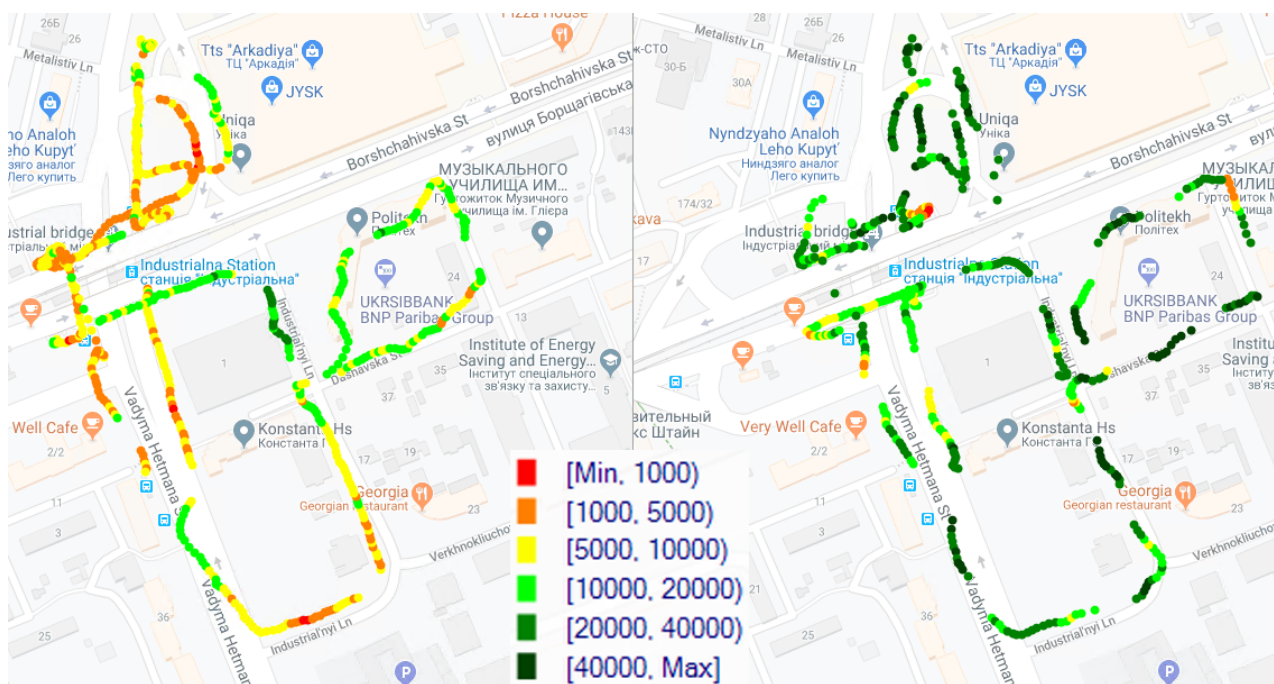


Рисунок 1.5. Результати вимірювання швидкості завантаження. Зліва – UMTS, справа – LTE.

Таблиця 1.2. Результати вимірювання швидкості завантаження і затримки

Показник	UMTS	LTE
Середня швидкість завантаження, Мбіт/с	8.1	24.9
Максимальна швидкість завантаження, Мбіт/с	32.7	66.3
Середня затримка (ping), мс	172	38
Кількість скачувань файлу розміром 100 Мб	16	29

1.3. Архітектура мережі LTE

На рисунку 1.6 показана архітектура LTE-Advanced E-UTRAN. У всіх випусках 3GPP E-UTRAN базується на одному елементі - вдосконаленому вузлі В (від англ. enhanced Node B, eNodeB або eNB). Він включає в себе радіо інтерфейс, який містить протоколи площини управління та користувача у напрямку до UE.

Кожен елемент eNodeB діє як логічний компонент, що обслуговує одну або різні соти E-UTRAN. Елементи eNodeB можуть бути з'єднані між собою через інтерфейс X2. Крім того, елементи Home eNodeB (HeNB), також відомі як фемто-соти, можуть бути розгорнуті з випуску 9 3GPP. Елементи HeNodeB - це недорогі елементи, призначені в основному для покращення покриття в невеликій області, і їх можна підключити до EPC безпосередньо або через шлюз. Перевага окремого шлюзу полягає в тому, що він підтримує велику кількість HeNB.

LTE-Advanced також надає можливість розгорнути ретранслятори з метою підвищення продуктивності мережі. Основна ціль ретрансляторів та елементів HeNodeB полягає у збільшенні покриття, швидкості передачі даних та покращенні якості сервісу.

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

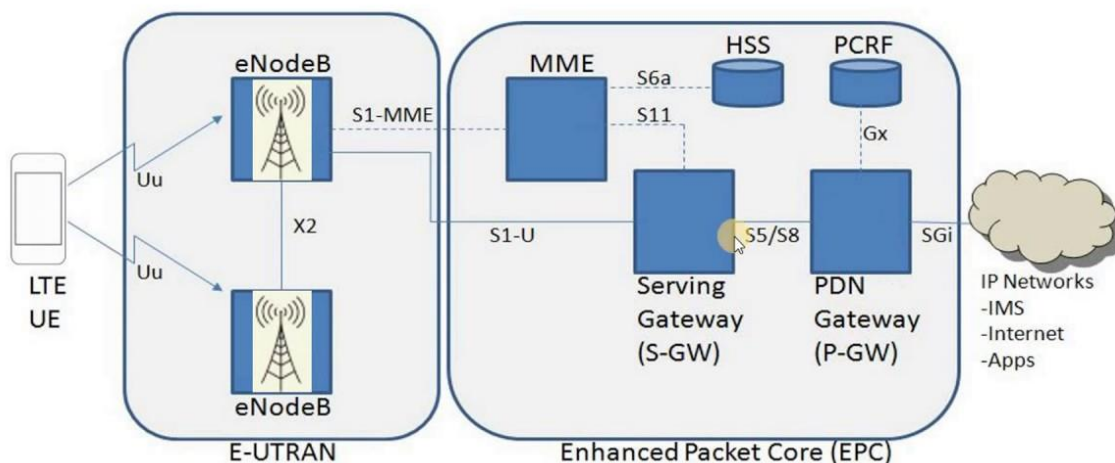


Рисунок 1.6. Архітектура мережі LTE. [1]

1.3.1. eNodeB

Елемент eNodeB або eNB LTE відповідає за радіопередачу та прийом з UE. eNB забезпечує необхідну функціональність для управління радіо ресурсами (RRM), включаючи контроль прийому, контроль радіоканалу, планування даних користувачів та обмін керуючими повідомленнями через повітряний інтерфейс. Крім того, eNB відповідає за шифрування та стиснення заголовків через повітряний інтерфейс.

Найбільш чітку різницю між UTRAN та E-UTRAN можна побачити при розгляданні ролі базової станції. Тепер eNodeB LTE включає в себе всі функції, які раніше були сконцентровані в RNC системи UTRAN. Крім того, традиційні завдання NodeB все ще включаються в новий елемент eNodeB. Також слід зауважити, що в LTE базові станції мають інтерфейс для з'єднання про принципу кожний з кожним. Раніше, в UMTS базові станції мали інтерфейс тільки до контролера, і обмінювалися між собою інформацією тільки через контролер. В LTE базові станції спілкуються напряму, оминаючи додаткові переходи, що позитивно впливає на зменшення затримки. Різницю в архітектурі мереж доступу систем UMTS та LTE показано на рисунку 1.7. Таким чином, eNB включає в себе процедури прийняття рішень, пов'язані з з'єднаннями. Це рішення позначено терміном "плоска архітектура" LTE, тобто менше

інтерфейсів і лише один елемент в ієрархії архітектури. Так як управління було переміщено ближче до радіо інтерфейсу, відповідно час проходження сигнальних повідомлень також скорочувався. Це одне з ключових рішень для зниження затримки LTE порівняно з попередніми рішеннями 3G.

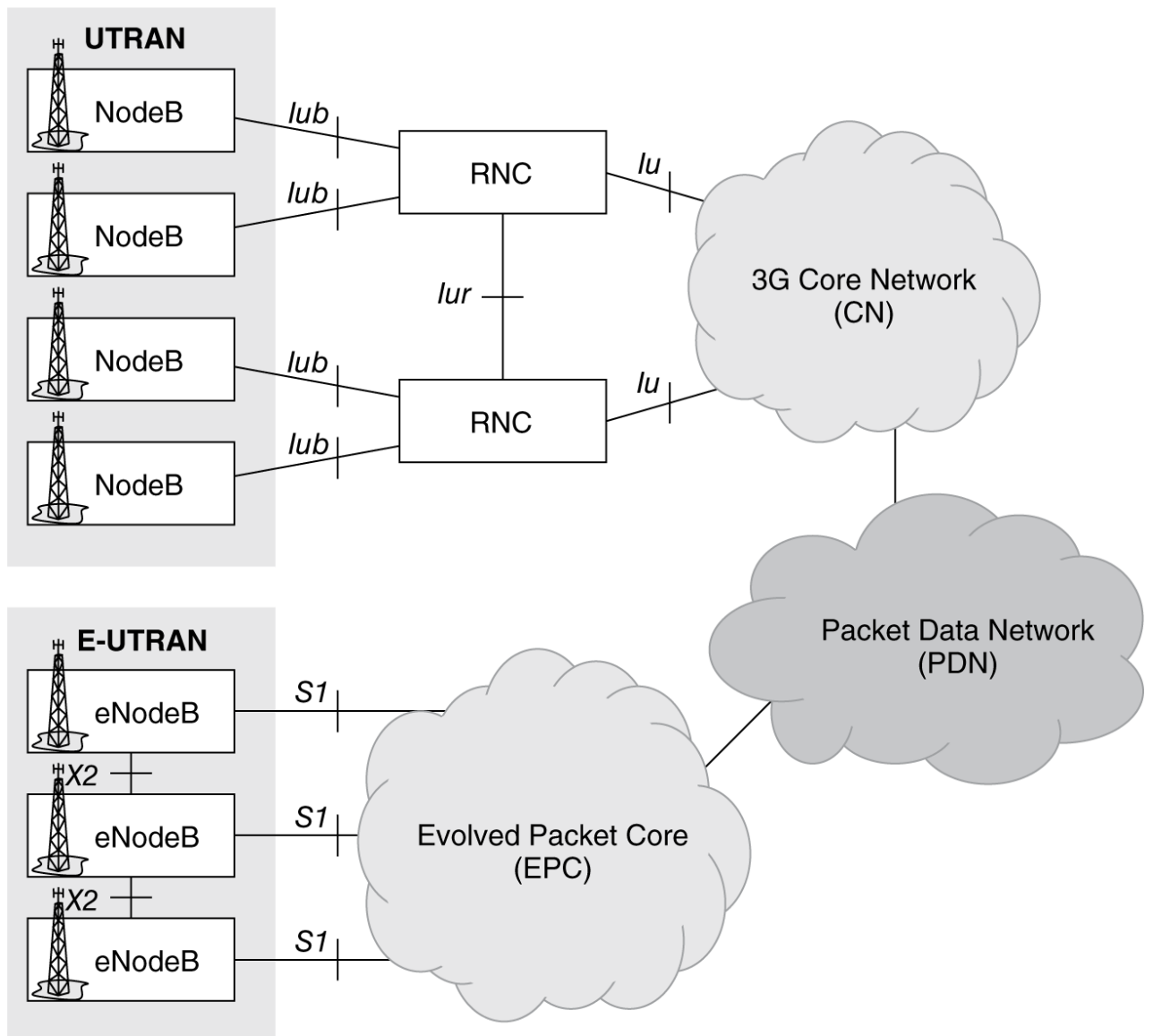


Рисунок 1.7. Відмінності архітектури мережі доступу UMTS(UTRAN) та LTE(EUTRAN) [9]

Елемент eNB відповідає за наступні функції:

- Управління радіоресурсами (RRM);
- Управління радіоканалом;
- Контроль радіоприймання;
- Контроль мобільності підключення;
- Планування користувацьких даних (DL та UL);

- Захищеність у площині доступу (від англ. Access stratum, AS);
- Вимірювання як основа для планування та управління мобільністю;
- Стиснення заголовка IP;
- Шифрування даних користувача;
- Маршрутизація даних користувача між eNB та S-GW;
- Проведення процедури пейджингу, що бере початок від MME;
- Розсилання ширококомовленневих повідомлень.

Також можливо використовувати додаткові елементи, - Home eNB та Home eNB Gateway. Конкретні аспекти для HeNB, такі:

- HeNB - обладнання, яке можна використовувати в приміщеннях замовника і яке використовує спектр ліцензованого оператора;
- HeNB призначений для посилення покриття мережі та / або ємності;
- HeNB включає всі функції eNB, а також до функції, що пов'язані з конфігурацією та безпекою.

Шлюз HeNB (HeNB GW) вирішує проблему підтримки можливої великої кількості інтерфейсів S1. Таким чином, цей додатковий елемент можна використовувати для врівноваження інтерфейсів. На рисунку 1.8 показаний принцип концепції HeNB.

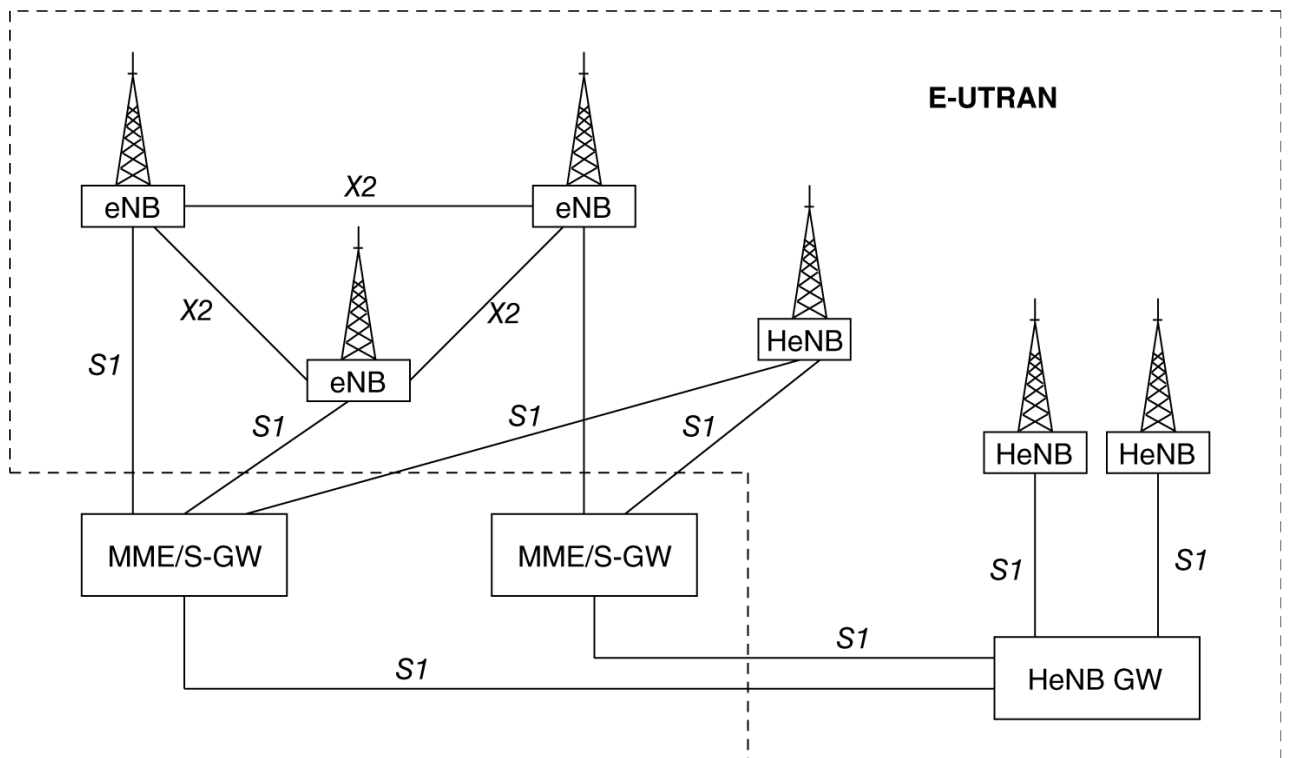


Рисунок 1.8. Архітектура мережі доступу E-UTRAN з використанням HeNB. [1]

Крім того, концепція HeNB може використовуватися в наступних сценаріях доступу:

- У режимі закритого доступу, тобто лише члени закритої групи абонентів можуть отримати доступ до відповідної фемтосоти;
- У гібридному режимі доступу, тобто і члени, і не члени закритої групи абонентів можуть отримувати доступ до фемтосоти, але члени групи мають вищий пріоритет;
- У режимі відкритого доступу, тобто фемтосота сприймається всіма користувачами як звичайний eNB.

1.3.2. Serving gateway

Елемент Serving Gateway (S-GW) відповідає за маршрутизацію та передавання користувацьких пакетів даних. Він також управляє мобільністю в площині користувача в разі хендоверу між eNB або вертикального хендоверу між LTE та іншими технологіями 3GPP через інтерфейс S4 шляхом ретрансляції трафіку між P-GW та 2G/3G систем. Якщо користувацький термінал збирається приймати дані в режимі очікування, елемент S-GW

запускає пейджинг. S-GW управляє контекстами UE, включаючи параметри послуги IP-носія і інформацію про маршрутизацію в мережі LTE.

S-GW забезпечує з'єднання на рівні користувача з UE з одного боку та мережевим шлюзом пакетної передачі даних (P-GW) з іншого боку фізичного елемента S-GW. Залежно від підходу провайдера мережі, ці елементи можуть бути окремими або фізично об'єднані як єдиний елемент. Слід зазначити, що жодного обміну керуючими повідомленнями між UE та S-GW не відбувається, оскільки за площину управління відповідає елемент MME.

Загалом, елемент S-GW відповідає за наступні функції:

- S-GW - опорна точка для процедури хендоверу між eNB;
- S-GW є також опорним пунктом для вертикального хендоверу з іншими технологіями 3GPP;
- Маршрутизація та переадресація пакетів;
- S-GW здійснює буферизацію пакету в режимі очікування E-UTRAN;
- S-GW обробляє процедуру запиту на обслуговування;
- Маркування пакету на транспортному рівні як для низхідної так і висхідної лінії зв'язку;
- збір записів даних (CDR), який може ідентифікувати UE, PDN та QCI.

1.3.3. Public data network gateway

Мережевий шлюз пакетної передачі даних (PDN-GW або P-GW) забезпечує зв'язок між користувацьким обладнанням та зовнішніми мережами пакетної передачі даних, діючи в інтерфейсі між опорною та зовнішніми мережами. Роль P-GW полягає в тому, щоб стати якорем для мобільності між технологіями 3GPP та не 3GPP, наприклад, мережами 3GPP2 та WiMAX [15]. Обладнання одного користувача може мати з'єднання з декількома PDN GW одночасно для того, щоб паралельно отримувати доступ до різних PDN.

P-GW забезпечує так само, як і S-GW, 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). Крім того, P-GW включає функціонал GGSN (GPRS)

Загалом, P-GW включає наступні функції:

- Розподіл IP-адреси для користувацького обладнання;
- Фільтрація пакетів, яка може здійснюватися на рівні користувача. Інший термін для цієї функціональності - це глибока перевірка пакетів;
- Законне перехоплення;
- Маркування пакету на транспортному рівні в низхідній лінії зв'язку;
- стягування оплати за користування сервісами, а також встановлення ставок та встановлення тарифів;
- Встановлення прав на доступ до певних ресурсів в DL на основі APN;
- Контроль стягування оплати за користування в реальному часі.

1.3.4. Mobility management entity

Елемент управління мобільністю (MME) діє на рівні управління мережею доступу LTE. Він керує процедурами відстеження та пейджингу обладнання користувача в режимі очікування. Роль MME полягає у наданні допомоги в процедурах активації та дезактивації каналу, вибираючи потрібні S-GW, коли обладнання користувача виконує початкову процедуру приєднання. MME також бере участь у передачі сигнальних повідомлень у випадку хендоверу, що вимагає переміщення вузла опорної мережі. Крім того, MME управляє автентифікацією користувача через взаємозв'язок з елементом HSS. В цілому MME піклується про «роботу без доступу» (NAS).

MME використовується для сигналізації площини управління між UE та іншими мережевими елементами, наприклад HSS. Так само, як повідомлення з площини користувача не проходять через MME, сигналізація площини управління не проходить через S-GW або P-GW.

MME забезпечує наступні функції;

- Сигналізація в прошарку без доступу (NAS);
- Безпека сигналізації NAS;
- контроль безпеки шару доступу;
- Вибір елементів P-GW та S-GW;
- Вибір інших MME у разі хендоверу;
- Вибір SGSN у випадку хендоверу між LTE та 2G / 3G
- Сигналізація між вузлами опорних мереж 2G / 3G;
- Управління списками зон відстеження (TA);
- Міжнародний та національний роумінг;
- Аутентифікація користувача;
- Створення та управління виділеними каналами;
- Управління повторною передачею пейджингу до UE та іншими функціями, пов'язаними з пошуку UE в режимі очікування;
- Створення та розподілення тимчасових ідентифікаторів для UE;
- Дозвіл UE на кемпінг в мережі громадської мобільної мережі (PLMN);
- Дотримання обмежень роумінгу UE;
- Забезпечення функцій площини контролю між LTE та 2G/3G через інтерфейс S3 до SGSN.

1.3.5. Home subscriber server та PCRF

HSS - це основне сховище для всіх даних, пов'язаних з абонентами та послугами. Він включає наступні функціональні можливості: функціональність IMS, реєстр місцевого розташування та центр аутентифікації (HLR/AUC), необхідні для домену PS та домену CS. Функція HLR необхідна для забезпечення підтримки об'єктів домену PS, таких як MME. Це дає можливість передплатникам отримати доступ до послуг домену PS. Аналогічно HLR забезпечує підтримку об'єктів домену CS, таких як MSC-сервери. Це дає можливість передплатнику отримати доступ до служб домену CS та підтримує роумінг до доменних мереж GSM/UMTS. AUC зберігає секретний ключ для кожного абонента мобільного зв'язку, який використовується для генерування динамічних даних про безпеку для кожного абонента мобільного зв'язку. [3]

Мережа LTE може включати один або декілька HSS. Кількість HSS залежить від географічної структури і кількості абонентів.

PCRF – елемент мережі LTE, що відповідає за управління нарахуванням плати за надані послуги зв'язку, а також за якість з'єднання у відповідності до заданих конкретному абоненту характеристикам

Функції PCRF можна розділити на 2 основні частини:

- Управління політиками, що також може бути розділеним на 2 частини: контроль шлюзу та контроль якості. Під контролем шлюзу розуміється своєчасність і безпомилковість визначення таких подій як початок надання, зміна параметрів, закінчення надання послуг і т.д. Управління якістю включає в себе безперервний моніторинг і підтримка заданих абонентськими параметрами характеристик надання послуг.
- Управління начисленням оплати. Обов'язково передбачає онлайн тарифікацію, тобто абонент і оператор можуть в реальному часі відслідковувати стан рахунку. PCRF повинен підтримувати декілька моделей начислення плати: по наданому об'єму послуг, по затраченому часу на надання послуг, по факту надання послуг, а також комбіновані моделі.

PCRF повинен підтримувати вище вказані функції навіть коли абонент знаходиться за межами мережі оператора. [9]

1.3.6. User equipment

User equipment – абонентське обладнання мереж стандартів UMTS та LTE. На відміну від мережі GSM, абонентські термінали в мережах UMTS та LTE не обмежуються лише мобільними телефонами. Модулі для доступу в стільникову мережу можна знайти в багатьох звичних приладах як побутового, так і промислового значення. При чому це можуть бути не тільки мобільні, а й стаціонарні пристрої, наприклад модеми, адже LTE забезпечує високу

швидкість передачі даних, і користувачі часто використовують модеми для забезпечення домашнього ПК чи телевізору доступом до мережі.

В специфікаціях 3GPP зустріти термін «категорія UE». Це сукупність інформації (параметрів), яка визначає максимальну пропускну здатність для UE. З розвитком LTE та випуском нових випусків довжина списку категорій UE стає все довшою і довшою, а інтерпретація категорій ускладнюється. Є окремі категорії, що визначають властивості для терміналів, що використовуються в мережах інтернету-речей, адже в 3GPP існують стандарти, що передбачаються розгортання таких мереж на базі LTE. В таблиці 1.3 вказано максимально можливу швидкість завантаження в обох напрямках.

Таблиця 1.3. Категорії UE та максимальна можлива швидкість завантаження [5]

Категорія UE	Максимальна завантаження, Мбіт/с	швидкість downlink,	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	3000		1500
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 визначили набір з 6 смуг частот, від 1.4 МГц до 20 МГц. Вони показані в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Смуги частот для мережі LTE. [4]

	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

Ресурсний блок представляє основну одиницю для повітряного інтерфейсу LTE. Планувальник eNode B виділяє 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 використанням однієї несучої (SC-FDMA). Є 12 піднесучих на один ресурсний блок, тому кількість піднесучих дорівнює $12 \cdot$ кількості ресурсних блоків, рисунок 1.9. Кожна піднесуча має смугу 15 кГц, тому загальна ширина піднесучих дорівнює $15 \text{ кГц} \cdot$ кількість піднесучих. Ширина піднесучих низхідної лінії зв'язку включає додаткові 15 кГц для розміщення нульової піднесучої в центрі всіх інших піднесучих. Нульова піднесуча забезпечує 15 кГц порожнього спектру, в межах якого нічого не передається. Загальна ширина піднесучих менше, ніж ширина каналу, щоб забезпечити згортання викидів і забезпечити захисні смуги. Більша ширина каналу забезпечує підтримку більшої пропускної здатності. Менші ширини каналів забезпечують підтримку нижчої пропускної здатності, але їх легше розмістити в межах існуючих розподілів спектру. 3GPP також визначає інтервал між піднесучими в 7,5 кГц (на додаток до 15 кГц). Інтервал між піднесучими становить 7,5 кГц використовується лише у сотах, які призначені для мультимедійних трансляцій Є 24, а не 12 піднесучих на ресурсний блок при використанні інтервалу 7,5 кГц, тому загальна ширина ресурсного блоку

залишається такою ж. LTE Advanced забезпечує підтримку агрегації каналів, що дозволяє паралельно використовувати декілька каналів. Це ефективно збільшує пропускну здатність каналу до суми окремих компонентів.

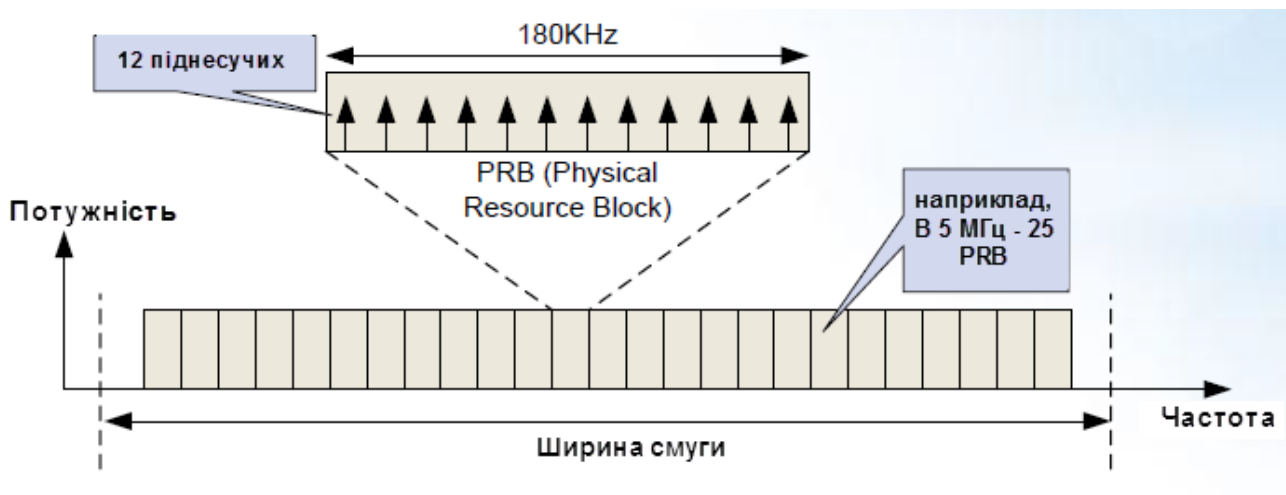


Рисунок 1.9. Концепція поділу спектру на піднесучі і ресурсні блоки [11]

1.4.2. Частотний і часовий дуплекс

В LTE було визначено підтримку частотного і часового дуплексу. Частотний дуплекс полягає у використанні двох окремих смуг спектру для передачі в низхідному і висхідному напрямках, тобто користувацький термінал і eNB передають і приймають дані використовуючи різні частотні смуги. Часовий дуплекс полягає у використанні однієї смуги спектру для передачі в низхідному і висхідному напрямках. Користувацький термінал і eNB не можуть передавати дані одночасно так як використовують один канал, тому вони роблять це і встановлені проміжки часу. Принцип організації каналів передачі вказано на рисунку 1.10.



Рисунок 1.10. Ілюстрація принципів дуплексу з частотним і часовим поділом

Частотний дуплекс є більш кращим варіантом для систем, де вимога до пропускної здатності в висхідній і низхідній лінії зв'язку є відносно симетричною. Частотний дуплекс може забезпечити вищу пропускну здатність, оскільки передача даних може бути безперервною в обох напрямках. Ємність пари каналів є вищою ніж ємність одного каналу при часовому дуплексі, проте вимагає більшу кількість спектру. Частотний дуплекс простіший для розгортання з точки зору вимог синхронізації. Загалом, дві сусідні станції не повинні бути синхронізовані по часу. Сусідні станції при часовому дуплексі повинні бути синхронізовані, щоб уникати взаємної інтерференції.

Часовий дуплекс є більш кращим варіантом для систем, де передача даних є дуже асиметричною, оскільки співвідношення між низхідною і висхідною лінією зв'язку може змінюватися, а тим часом смуга частот залишається повністю використаною. При частотному дуплексі часто спостерігається ситуація, коли низхідна лінія є більш завантажена в той час, як висхідна залишається слабо використана. Проте ці канали коштують операторам однакових затрат за використання. При часовому дуплексі обладнання має бути синхронізовано по часу, що несе певну ускладненість пристроїв. Проте, при частотному дуплексі збільшується шум при прийомі сигналу та збільшуються втрати при передачі.

1.4.3. Частотні смуги

Частотні смуги, що були утверджені 3GPP для використання в системі LTE при частотному дуплексі, вказано в таблиці 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 цих смуг частот також були встановлені для можливості використання в системі UMTS. Це забезпечує можливість перерозподілу спектру для використання для LTE, або сумісного використання обома технологіями. Також нумерація смуг, що можуть бути використані для UMTS та LTE співпадають. Деякі смуги встановлені для можливості використання в системі GSM. Це також забезпечує можливість перерозподілу спектру для використання для LTE, або сумісного використання обома технологіями. Це надає операторам гнучкість у виборі стратегії по використанню доступного частотного діапазону.

Як видно, більшість смуг передбачають розміщення частин смуг для організації висхідної лінії зв'язку перед частинами, що передбачені для низхідної лінії. Це рішення зроблено для того, щоб підвищити енергоефективність користувацького обладнання, так як передача на нижчих частотах має більшу ефективність розповсюдження, тобто вихідна потужність терміналу буде нижчою, ніж при використанні більш високих частот. Це пояснюється властивостями розповсюдження радіохвиль. [4]

В таблиці 1.6 вказано затверджені смуги частот для використання у системі LTE при 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 цих смуг частот також були встановлені для можливості використання в системі UMTS. Це забезпечує можливість перерозподілу спектру для використання для LTE, або сумісного використання обома технологіями. Проте спільне використання є складним, так як буде велика ймовірність виникнення взаємної інтерференції. Також нумерація смуг, що можуть бути використані для UMTS та LTE не співпадають. В LTE нумерація починається з 33, в той час як в UMTS позначається літерами a, b, c, d, e та f. [4]

1.5. Метод просторового кодування сигналу MIMO

Однією з передових технологій, впроваджених в LTE, є використання технології використання декількох антен під назвою Multiple Input Multiple Output (MIMO). Системи MIMO використовують більше однієї передавальної антени для передачі сигналу та більш ніж однієї приймальної антени, використовуючи ту ж саму частоту. MIMO не є новою технологією, в бездротових локальних мережах WLAN використовується протягом багатьох років. Для LTE це нова технологія і вона використовується для збільшення пропускної здатності і спектральної ефективності на додачу до покращення, що було отримано завдяки використанню нового методу доступу OFDMA. Загальний принцип роботи системи MIMO показано на рисунку

Використання технології MIMO направлено на вирішення двох задач:

- Підвищення якості зв'язку за рахунок просторового часового/частотного кодування і/або формування променя (beamforming);
- Підвищення швидкості передачі даних при використанні просторового мультиплексування.

MIMO включає в себе просторове мультиплексування, попереднє кодування та рознесення передачі. Принцип просторового мультиплексування полягає в тому, що сигнали передаються з двох або більше різних антен з різними потоками даних, а на стороні приймача потоки даних будуть розділені за допомогою методів обробки сигналів. Це збільшує максимальну швидкість передачі даних на коефіцієнт 2 при використанні конфігурації MIMO 2x2, і на коефіцієнт 4 при використанні конфігурації MIMO 4x4.

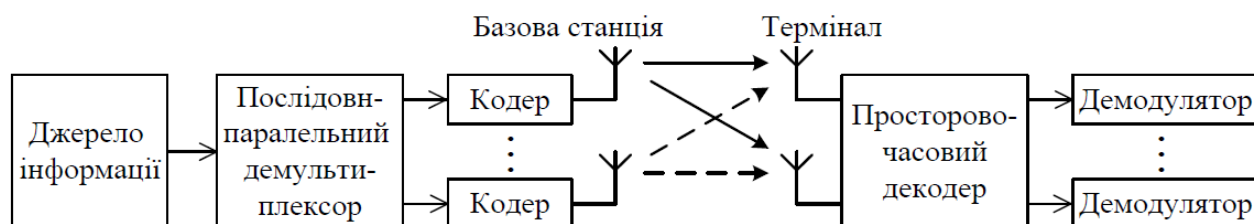


Рисунок 1.11. Загальний принцип роботи системи MIMO [4]

В LTE просторове мультиплексування реалізують на основі багатошарових структур. Інформаційний потік, що передається, розділяють на окремі шари (layers). Далі потоки окремих шарів за допомогою спеціальних кодуючих матриць перетворюють у потоки, що передаються через окремі антени, число яких може досягати 8. Кількість шарів визначає ранг структури. Послідовність операцій в передавальному обладнанні при просторовому мультиплексуванні пояснює рисунок 1.12.

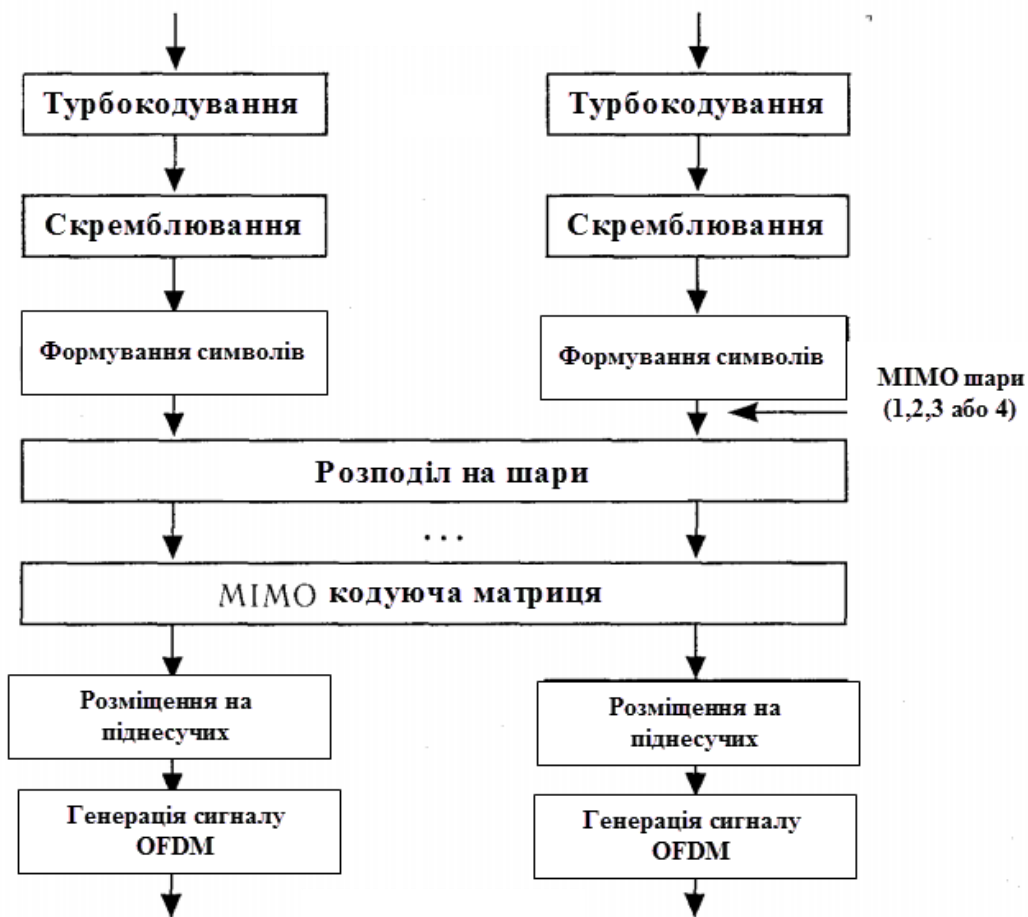


Рисунок 1.12. Операції в передавачі при просторовому мультиплексуванні [4]

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

При багатокодовому мультиплексуванні інформаційний блок розділяють на декілька субблоків. До кожного субблоку додають свій перевірочний код, далі відбувається збиткове кодування і формування модулюючих символів. При цьому в субблоках можуть бути використані різні модуляційно-кодуючі схеми.

В LTE число кодів при передачі обмежено двома, а число шарів (ранг) – чотирма. Можливі варіанти просторового мультиплексування в залежності від

принятого рангу пояснює рисунок 1.13. На них показано розподіл модулюючих символів по окремим шарам при використанні однокодового (CW0) і багатокодового (CW1, CW2) варіантів. Число передавальних антен не може бути менше за ранг.

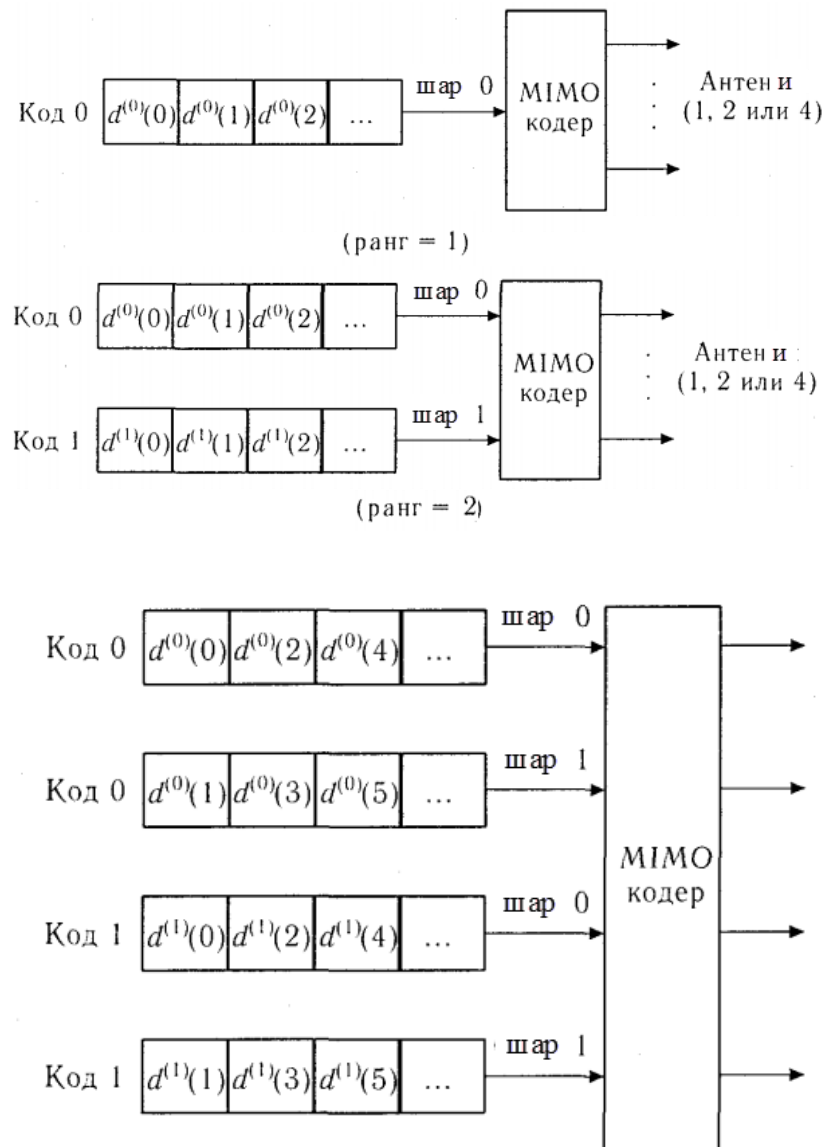


Рисунок 1.13. Поток символів при передачі з різними рангами [4]

Стандартом LTE передбачено 9 класів передачі:

- Клас 1. Одна передавальна антена, звичайна передача, 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. Зі сторони UE можливе управління числом шарів
- Клас 4. Просторове мультиплексування з замкненою петлею зворотнього зв'язку. Можливе використання двох кодів при передачі. Зі сторони UE поступають команди керування рангом передачі і індексом матриці передкодування
- Клас 5. Багатокористувацький MIMO з замкненою петлею зворотнього зв'язку.
- Клас 6. Просторове мультиплексування з замкненою петлею зворотнього зв'язку. Ранг = 1
- Клас 7. Робота зі спеціальним опорними сигналами. Ранг = 1
- Клас 8. Робота зі спеціальними опорними сигналами. Ранг = 2
- Клас 9. Робота зі спеціальними опорними сигналами. Ранг може досягати 8. [4]

Висновки до розділу 1

Розглянуто історію виникнення четвертого покоління бездротового зв'язку стандарту LTE, показано основні особливості цієї технології, проведено порівняння з технологією третього покоління UMTS, в тому числі реальним тестуванням.

Було розглянуто архітектуру мережі, коротко показано функції кожного елемента, особливості частотного спектру, що використовується для роботи мережі та організацію фізичного каналу.

2. Реалізація мережі бездротового доступу

2.1. Загальний огляд

Радіомережа LTE є частиною мережі LTE, що включає до себе eNodeB, UE та інтерфейс між ними. Так як ця частина мережі безпосередньо з'єднується з користувачами, вона повинна бути здатною забезпечувати обмін інформацією з UE в певній зоні покриття з задовільним рівнем якості сервісів.

У контексті систем стільникового зв'язку планування радіомережі – це процес визначення місць розташування базових станцій, визначення частотних каналів і радіо-параметрів бездротової системи зв'язку для забезпечення достатнього покриття та ємності підключень для забезпечення необхідного рівня якості послуг, що надаються користувачеві. Планування покриття стосується географічної зони, де мережа має забезпечувати наявність сигналу з достатньою потужністю, щоб забезпечити доступ до голосових або пакетних послуг, а планування ємності визначає здатність системи забезпечити доступ до сервісів заданій кількості абонентів. [6]

Існують послідовні етапи планування стільникової радіомережі, починаючи від простого аналізу до математичного моделювання за допомогою комп'ютеру і відповідного ПО; тобто від номінального планування до детального та продовження оптимізації. Для розгортання нової стільникової мережі або розширення існуючої мережі процес планування радіомережі не є єдиним процесом при плануванні та проектуванні мережі; воно повинно відбуватися в тісній координації з процесами планування опорної мережі а також мережі трансмісії. Але в цій роботі акцент зроблено на процесах номінального та детального планування покриття мережі LTE, розглянуто методику розрахунку, використано сучасні програмні засоби для математичного моделювання покриття, в останньому розділі показано результати моделювання в обраному районі Києва за заданими вхідними даними.

2.2. Процес планування радіомережі

Головна ціль планування покриття – забезпечити економічно ефективне рішення для радіомережі з точки зору покриття, ємності та якості. Залежно від обраного головного критерію, покриття або ємності, результат планування може бути різним та забезпечувати різні потреби бізнесу. Критерій обирається залежно від регіону, де буде проводитися планування, а також бізнес-стратегії. З іншого боку, мережа повинна бути здатною відповідати нинішнім та майбутнім вимогам.

У випадку розробки та запуску в комерційну роботу нової мережі LTE, процес планування поділяється на етапи підготовки, номінального планування, детального планування, запуску мережі та оптимізації, як показано на рисунку 2.1. Далі кожен з етапів буде коротко описано.

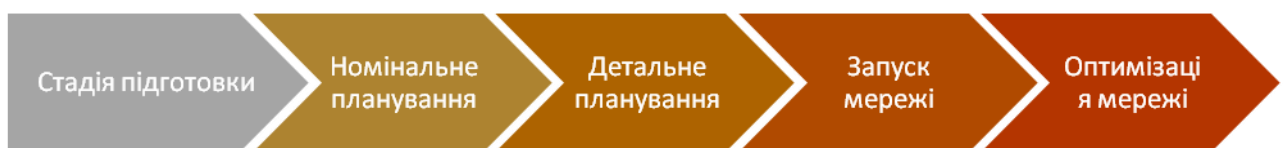


Рисунок 2.1. Етапи планування радіомережі.

2.2.1. Стадія підготовки

Оскільки ця фаза є початком процесу, вона починається з підготовки вимог до покриття і ємності. Вимоги до покриття включають визначення областей покриття, ймовірність надання сервісів і пов'язаний з нею рівень сигналу, наприклад отримана потужність опорного сигналу (RSRP). З іншого боку, вимоги до ємності включають прогноз трафіку (загальна кількість абонентів, що підтримується мережею) і профіль трафіку в обраній області. На цьому етапі також виконується вибір доступних смуг частот, визначення областей за типом (міська зі щільною забудовою, міська, приміська або сільська), а також вибір моделі поширення.

2.2.2. Номінальне планування.

На цьому етапі буде проведено розрахунок енергетичного бюджету та визначення оптимальних значень в обраній області базуючись на її властивостях. З енергетичного бюджету буде визначено максимальне допустиме затухання при розповсюдженні та радіус соти, що буде використано на етапі детального планування для проведення математичного моделювання очікуваного покриття за допомогою програмних засобів планування і оптимізації мережі. На цьому етапі також оцінка розрахунок пропускної спроможності мережі для визначення кількості необхідних базових станцій, які будуть відповідати вимогам ємності.

Результатом обчислень на даному етапі є радіус соти для різних типів місцевості, підтримувана кількість користувачів однією базовою станцією, а отже і кількість базових станцій, що задовольняє потребам покриття та ємності, що були визначені на попередньому етапі. На рисунку 2.2. показано блок-схему, що узагальнює кроки при номінальному плануванні.

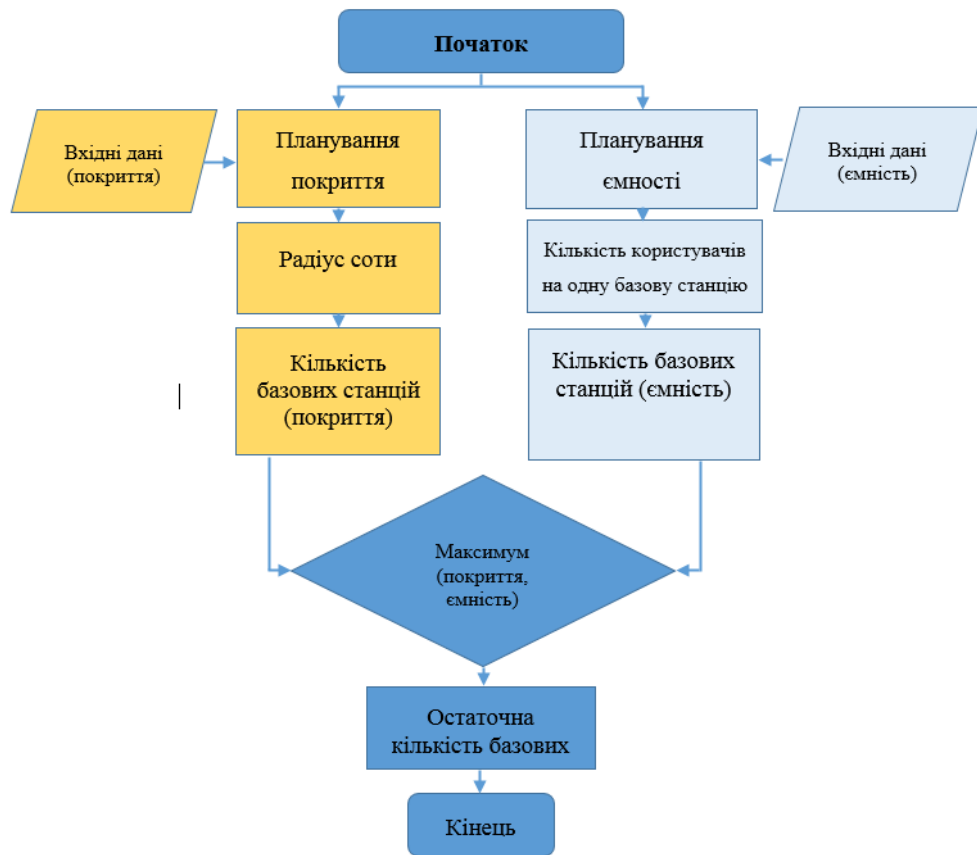


Рисунок 2.2. Пояснення процесу номінального планування. [7]

2.2.3. Детальне планування.

Використовуючи результати, отримані на етапі номінального планування, на етапі детального планування визначаються початкові місця розташування базових станцій, вибір типу антени, вибір азимуту, механічного, електричного вертикального нахилу. Після цього, використавши параметри, що використовувалися при номінальному плануванні та вибравши модель розповсюдження, за допомогою ПО для планування радіомережі буде пораховано прогнозоване покриття.

Так як при номінальному плануванні територія для обчислень розглядається як рівна, під час прогнозування покриття ми можемо зіткнутися з дірами в покритті через особливості рельєфу або забудови. Тому, щоб досягти оптимального результату, потрібно проводити оптимізацію до запуску мережі.

Також на цьому етапі кожна з запланованих станцій-кандидатів перевіряється на відповідність вимогам по покриттю та ємності. Під час обстеження ділянок, на яких планується розміщення, будуть визначені вимоги до придбання/оренди ділянки, рішення щодо будівництва базової станції, доступу до об'єкта тощо.

2.2.4. Запуск мережі

На цьому етапі розгортання мережі та побудова сайтів проводиться на основі результатів, отриманих на етапах детального планування. Визначивши модель розгортання, буде проведено розгортання всієї мережі та прийняття мережі.

2.2.5. Оптимізація мережі

Оптимізація мережі - це не одноразова робота, а процес, що триває протягом всього часу експлуатації мережі. Щодо попередньої оптимізації, перевірка параметрів сот, цілей покриття та пропускної спроможності буде проведена для попередньої оптимізації цільової мережі. На цій фазі будуть зіставлені номінальні та детальні результати планування з фактичними показниками продуктивності мережі, і налаштування мережевих параметрів буде проводитися доки мережа не буде відповідати узгодженим ключовим показникам ефективності (KPI) перед комерційним запуском. Після того, як мережа працює в комерційному використанні, оператор продовжує проводити оптимізацію мережі знову і знову, щоб задовольнити попит своїх клієнтів або уникнути нарікань на роботу (проблеми покриття, рівень успішності дзвінків та зниження продуктивності тощо) [7]

2.3. Планування покриття LTE

Завдання планування покриття полягає у визначенні зони присутності покриття, в якій необхідно забезпечити достатню потужність радіосигналу для користувачів на межі соти. Це робиться шляхом оцінки бюджету радіолінії DL та UL для отримання максимально допустимої втрати розповсюдження (MAPL

– maximum allowed propagation losses) на основі необхідного рівня співвідношення «сигнал-інтерференція+шум» (SINR) на приймальній стороні. [7]

MAPL розраховується для DL та UL для різних типів рельєфу використовуючи відповідну модель розповсюдження для того, щоб в результаті отримати значення радіусу соти. Так як властивості DL та UL різні, то для визначення площі соти, а отже і кількості базових станцій з точки зору покриття, слід враховувати ефективний радіус соти. На рисунку 2.3 показано загальний процес планування покриття LTE. Результативне планування вимагає правильного вибору моделі розповсюдження, детальну інформацію подано в наступних підрозділах.

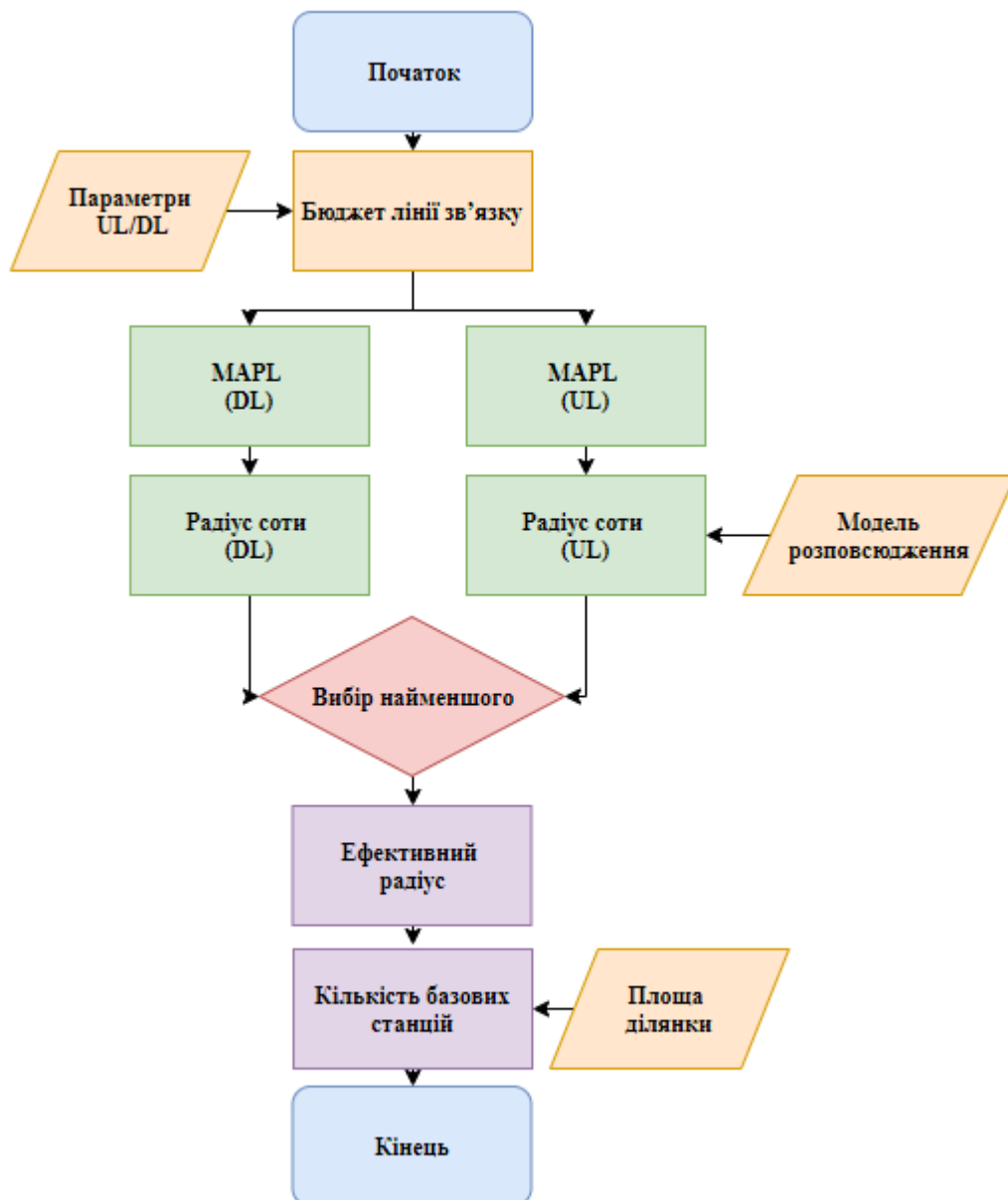


Рисунок 2.3. Загальний процес планування покриття LTE

2.3.1. Модель розповсюдження

У бездротовій стільниковій системі зв'язку інформація (або голосова, або дані) передається за допомогою електромагнітних хвиль між передавальними та приймальними антенами. Сила сигналу електромагнітних хвиль стає слабшою під час його поширення через навколишнє середовище. Різниця сили 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 практично вимірних даних та враховують усі фактори середовища, тоді як детерміновані моделі базуються на теоретичному аналізі, і їх можна використовувати у різних сценаріях без впливу на точність.

Ця робота базується на емпіричній моделі та коротко розглядає основні емпіричні моделі розповсюдження, які на даний момент використовуються для визначення втрат розповсюдження.

2.3.1.1. Модель Окамура-хата

Ця модель використовується для планування покриття макрос от, де висота антени зазвичай вище, ніж навколишні перешкоди. Основна втрата розповсюдження для цієї моделі – дифракція та розсіювання по дахах біля базової станції. Ця модель може використовуватися для діапазону частот 150-1000 МГц і 1500-2000 МГц для будь яких типів місцевості для висоти антени приймача 1-10 м і для висоти антени 30-200м. Втрати розповсюдження для моделі Окамура-Хата визначають за формулою: [8]

$$(2.1)$$

де f – частота у МГц;

h_{bc} – висота підвісу антени базової станції в метрах;

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

d – відстань між базовою станцією та абонентом в км;

L_0 – затування 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 А і В залежать від частоти:

- Для частоти 150-1000 МГц, А=69.55 , В=26.16
- Для частоти 1000-2000 МГц, А=46.3 , В=33.9

2.3.1.2. Модель COST231-Hata

Форум з наукових досліджень європейського союзу розробив цю модель, щоб розширити частотний діапазон для моделі Окамура-Хата. Втрата розповсюдження розраховується за такою формулою: [8]

(2.2)

де d – відстань між базовою станцією та абонентом в км;

f – частота у МГц;

h_a – висота антени абоненту в метрах;

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

$a(h_a)$ – корекційний показник для значення висоти антени абоненту, що визначається в залежності від типу території:

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

$$\alpha(h_a) = [3.2 * [\log(11.75 * h_a)]^2 - 4.79] - \frac{\text{передмістя}}{\text{сільській}} \text{ місцевості} \quad (2.2b)$$

2.3.1.3. Модель Ericsson 9999

Ця модель була розроблена, щоб покращити модель Окамура-Хата та COST231-Hata, враховуючи середовище розповсюдження. Вона включає більше типів (міська зі щільною забудовою, міська, передмістя, сільська) Ця модель була розроблена Ericsson та може використовуватися частотами від 150МГц до 2 ГГц, з висотою антени базової станції від 20 до 200 і висотою антени абонента від 1 до 5 м. Втрати розповсюдження для цієї моделі розраховуються за формулою: [8]

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

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

де d – відстань між базовою станцією та абонентом в км;

h_a – висота антени абоненту в метрах;

h_{bc} – висота підвісу антени базової станції в метрах;

f – частота у МГц;

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

Також є інші моделі розповсюдження, які можна використовувати для прогнозування LTE, які показано в таблиці 2.1. Ці моделі використовуються для різних діапазонів частот та типів місцевості. Потрібно правильно вибрати 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

Ціль розрахунку енергетичного бюджету – визначити MAPL між передавальною антеною і абонентом в напрямках DL та UL. Порівнюючи MAPL зі втратами розповсюдження обраної моделі можливо обчислити радіус соти для різних типів місцевості. Енергетичний бюджет включає багато факторів, що впливають на фінальне покриття. Ці фактори включають втрати проникнення у будівлі, втрати фідера, підсилення антени, інтерференційний запас радіолінії, щоб розрахувати всі підсилення та втрати.

Параметри енергетичного бюджету можна згрупувати на параметри, що стосуються поширення, параметри, пов'язані з обладнанням, і специфічні параметри LTE. Параметри, пов'язані з розповсюдженням, включають втрати проникнення, втрату тіла, втрати фідера та фоновий шум. Параметри, пов'язані з обладнанням, - це специфікації, надані виробником, така як потужність передавача, чутливість приймача та підсилення антени. Специфічні параметри LTE включають інтерференційний запас, запас швидкого затухання, покриття на межі соти і використовуваний тип MIMO. У цьому розділі обговорюються основні параметри.

- Максимальна потужність передавача eNodeB. Значення потужності передавача на шлях передачі. Типова величина або 43 дБм (20Вт) або 46 дБм (40Вт).
- Коефіцієнт підсилення (КП) антени eNodeB. Вибір коефіцієнта антени залежить від вимог до покриття. Антена з низьким КП (15-17 дБі) використовується при щільній забудові, тоді як антена з високим КП (18-

20 дБі) може бути використана в сільській місцевості, на магістралях щоб розширити покриття.

- Максимальна потужність передавача UE. Значення потужності передавача абонента, що залежить від класу обладнання. Нині класифіковано один клас з максимальною потужністю – 23 дБм. [9]
- КП антени UE. Базуючись на специфікаціях 3GPP, передбачається, що антена UE має КП – 0 дБ.
- Втрати тіла. Це втрата, що 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. [9]
- Втрати у фідері. Враховує затухання, що відбуваються у фідері, радіоперемикачах та конекторах на шляху між антеною на eNodeB. Втрати можуть сягати 3 дБ відповідно до характеристик обладнання.
- Ефективна ізотропно випромінювана потужність (від англ. EIRP - Equivalent Isotropically Radiated Power). Показує потужність, яку б випромінювала теоретично ізотропна антена для досягнення максимальної щільності потужності у напрямку максимального підсилення антени.

EIRP на одну піднесучу розраховується за формулами: [9]

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

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

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 на границі соти. Це мінімальна цільова пропускна здатність UE, яка повинна бути досягнута на межі соти. Вона визначає послугу, яку можна надавати на краю соти; відповідно, вона визначає мінімальну схему модуляції та кодування (MCS), яку слід використовувати. Цей параметр зазвичай надається оператором мережі на основі необхідних 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, за забезпечує демодулювання сигналу для UL, і він пов'язаний з MCS для DL. Значення SINR отримують з результату моделювання на рівні системи і це залежить від конструкції приймача. Таким чином, SINR є 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 eNodeB. Типове значення для показника шуму становить від 6 до 8 дБ.
- Чутливість приймача: Чутливість приймача визначає рівень (поріг) сигналу, при якому може бути виявлений сигнал з певною якістю. Він відноситься до антенного роз'єму і повинен враховувати демодуляцію та необхідну якість вихідного сигналу. Чутливість приймача на піднесучій можна обчислити так:

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

- де SINR – поріг 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.

- Втрата від проникнення: втрата при проникненні вказує на згасання радіосигналів через перешкоду будівлі від внутрішнього терміналу до eNodeB і навпаки. Це залежить від характеру будівель та типу захищеності цільової зони покриття. Таблиця 2.2 підсумовує типовий діапазон втрат при проникненні для різних скупчень: [9]

Таблиця 3.2. Втрата від проникнення для різних типів місцевості [9]

Тип місцевості	Типове значення (дБ)	Типове значення (дБ)
Місто зі щільною забудовою	19-25	19
Місто	15-18	15
Передмістя	10-14	11
Сільська	5-8	8

- Запас на загасання, обумовлене затіненням сигналу. Вказує показник загасання через перешкоди, наприклад будівлі. Щоб мінімізувати цей ефект та забезпечити потрібне покриття на межах соти, потрібно враховувати цей запас. Цей запас приймає значення від 5 до 12 дБ та залежить від типу місцевості, як показано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Стандартні значення запасу на загасання. [9]

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

У таблиці 2.4. підсумовано всі вищевказані показники, що враховуються при розрахунку енергетичного бюджету, зазначено формули, по яким буде вестися 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
Піднесучі для передачі	$D = 12 * C$
Потужність на піднесучу (дБм)	$E = A - 10 * \log(D)$
Підсилення антени передавача (дБі)	G
Втрати у фідері (дБ)	H
Втрати тіла (дБ)	I
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 того, як значення MAPL обчислене як для UL, так і для DL на основі таблиці 2.4, наступним кроком планування покриття є визначення радіусу комірки за допомогою відповідної моделі поширення. З припущенням, що площа покриття соти є гексагональною за формою, площа соти може бути обчислена, використовуючи радіус соти, знайдений з MAPL.

Як показано на малюнку 2.5, площа соти залежить від конфігурації сайту. Це можуть бути всенаправлені, двосекторні або трисекторні сайти, і таким чином радіус соти обчислюється для кожної конфігурації. Нарешті, загальна кількість ділянок обчислюється шляхом ділення цільової площі покриття на одну площу ділянки, як показано у формулі (2.12).

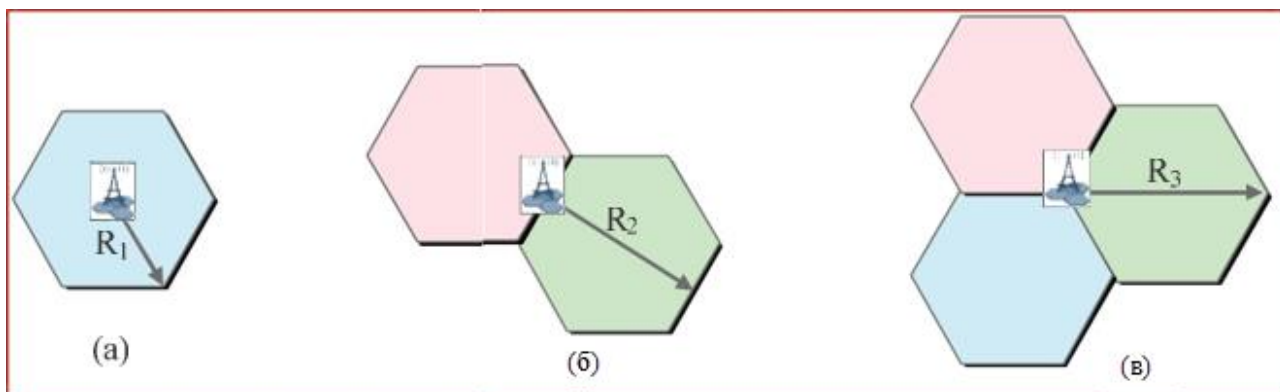


Рисунок 2.4. Типи конфігурації сайтів, всенаправлена(а), двох секторна(б), трьох секторна(в)

Для кожної з конфігурацій площа покриття базової станції розраховується за формулами: [10]

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 базових станцій буде визначено за формулою:

$$N_{bc} = \frac{S_T}{S_a} \quad (2.12)$$

2.4. Планування ємності LTE

Після оцінки розміру покриття базової станцій та підрахунку кількості проводиться оцінка ємності, щоб перевірити, чи може вказаний підрахунок сайтів забезпечити ємність користувачів. Відповідно до визначення, ємність - це максимально досяжний набір швидкостей в каналах з малою ймовірністю помилки. Оскільки цей показник являє собою порог продуктивності, розглядається агрегована швидкість переданих даних. При збільшенні використання 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 пропускної здатності, що підтримується мережею, виходячи з наявної пропускної здатності та стану каналу кожного користувача. Узагальнений процес планування ємності, показаний на рисунку 2.6.

Як показано в процесі, оцінювання ємності потребує двох завдань, щоб завершити оцінку; а саме:

- 1) Оцінка пропускної здатності, що відповідає аналізу конфігурації;

- 2) Оцінка кількості підтримуваних абонентів на соту або базову станцію залежно від моделі трафіку.

Кількість сайтів на основі ємності буде визначена для задоволення загального попиту на трафік в мережі. [9]

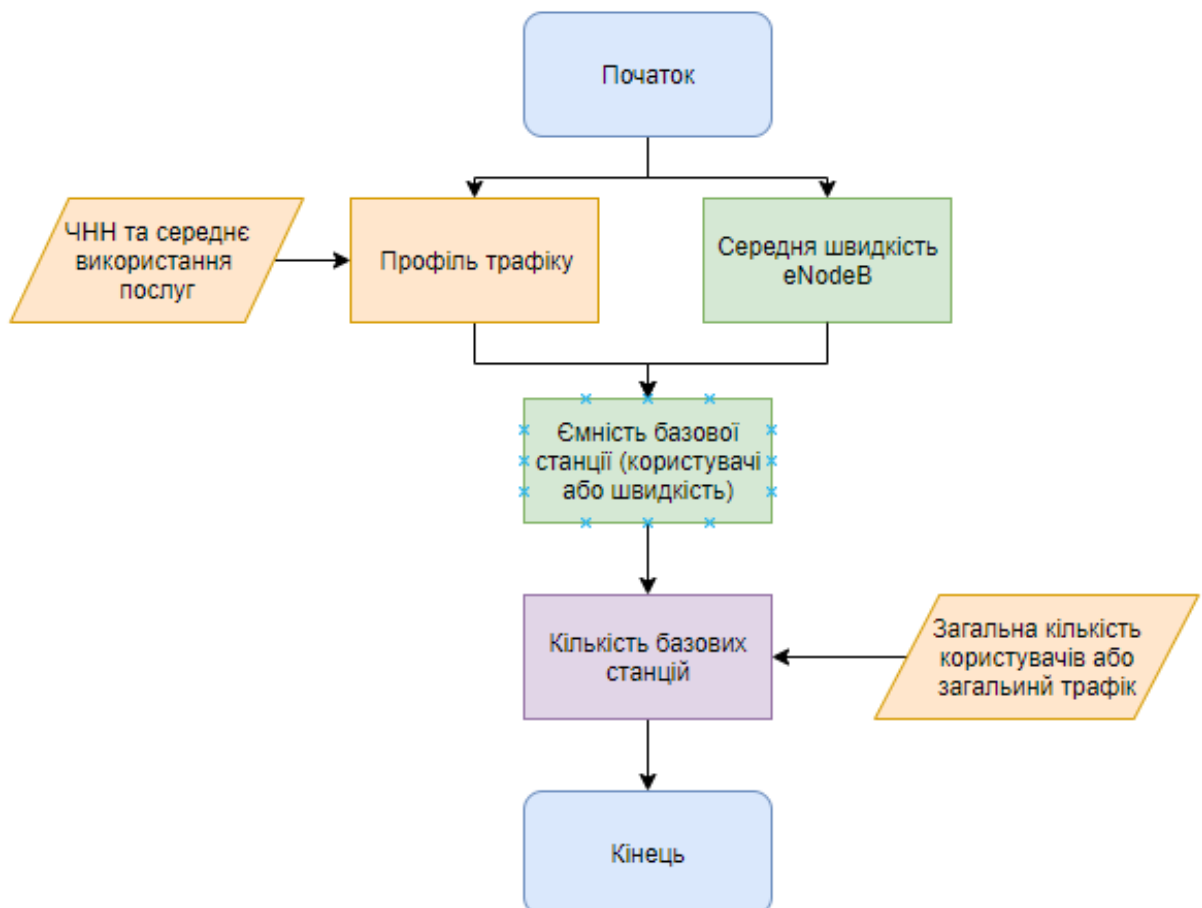


Рисунок 2.6. Загальний процес планування ємності [10]

2.4.2. Розрахунок середньої швидкості на соту/базову станцію

Середня пропускна здатність сектору/базову станції є важливим фактором планування ємності LTE. Оцінку можна отримати за допомогою моделювання або на основі польового вимірювання. Ось три підходи, за допомогою яких можна отримати середню пропускну здатність сектору в LTE.

1. Підхід постачальника

У такому підході постачальники припускають, середню пропускну здатність eNodeB з власного досвіду, як із моделювання, так і з вимірювань. Як тільки пропускну здатність eNodeB відома, максимальна кількість підтримуваних абонентів на eNodeB може бути оцінена, приймаючи обсяг даних кожного абонента за місяць та їх пропускну здатність протягом годин зайнятості. Розширений розрахунок цього підходу наведено в таблиці 2.5. [9]

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

Такий підхід отримує пропускну здатність соти за допомогою використання моделювання. Для цього потрібні два моделювання; моделювання на системному рівні, що забезпечує вірогідність SINR з таблиці розподілу середнього рівня SINR та імітацію пропускну здатності, яка забезпечується при відповідному значенні SINR.

Моделювання каналу імітує зв'язок між передавачем і приймачем. Воно дозволяє досліджувати підсилення MIMO, вплив адаптивної модуляції і кодування, моделювання каналного коду та повторної передачі. З іншої сторони, моделювання на системному рівні дає оцінку продуктивності на всій мережі аналізуючи велику кількість eNodeB, що забезпечують покриття в певній локації, в якій знаходяться багато терміналів, що рухаються.

При такому підході до розрахунку, розраховується ймовірність виникнення заданого SINR на межі соти. Тоді значення SINR для підтримки кожної схеми

кодування і модуляції генеруються на основі моделювання каналу. Таким чином пропускна здатність соти може бути розрахована за формулою: [9]

$$Cell_Throughput = \sum SINR \cdot (SINR_OccPro * SINR_AveThroughput)$$

(2.13)

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

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

Коли значення середньої швидкості базової станції обраховано по заданій формулі, кількість базових станцій може бути розраховано, використовуючи таблицю 2.6.

Таблиця 3.6. 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

На досягнення пропускної здатності DL і UL впливають смуга пропускання (1,4, 3, 5, 10, 15 і 20 МГц), загальна накладні 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 обчислення доступних ресурсних блоків каналів трафіку. Тут обчислення PDSCH показано наступним чином, і аналогічна методика може бути використана для отримання середньої пропускну здатності сектора на основі наявних RB для PUSCH: [8]

Визначення доступних ресурсних блоків для PDSCH

$$RB_{\text{д}} = RB_{\text{з}} - O_f - O_c - O_p \quad (2.14)$$

Визначення доступних символів PDSCH

$$S_{\text{д}} = RB_{\text{д}} * NSC_{RB} - NSY_{SC} \quad (2.15)$$

Визначення ємності на один сектор

$$T = S_{\text{д}} * SE$$

(2.16)

Де $RB_{\text{д}}$ – наявні ресурсні блоки за винятком накладних витрат;

$S_{\text{д}}$ – наявні символи;

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

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

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

$$T_{\text{с}} = \frac{[(RB)_{\text{д}} * DL_{\text{з}} * T]}{100} \quad (2.17)$$

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

Таблиця 2.7. Розрахунок кількості базових, 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 основі ємності може бути розрахована за допомогою двох методів. Перший спосіб полягає в тому, щоб отримати кількість абонентів, що підтримуються на одному сайті, як показано в 1-му та 3-му підходах, і тоді кількість сайтів визначається наступною формулою:

$$(2.18)$$

З іншого боку, другий метод використовує підхід, заснований на моделюванні, шляхом визначення пропускної здатності сайту та обчислює кількість сайтів наступним чином:

$$(2.19)$$

2.5. Оптимізація перед запуском

Як і інші стільникові мережі, такі як GSM або UMTS, мережа LTE також потребує оптимізації після розгортання для забезпечення кращого покриття та швидкості. Процес оптимізації включає кілька етапів. Починається з проведення драйв-тестів, де всі параметри продуктивності перевіряються після

ввімкнення мережі. Виходячи зі зібраних даних, планувальники аналізують продуктивність мережі та можуть запропонувати оптимізацію параметрів, таких як висота антени, азимут, нахил (механічний або / та електричний) та список сусідів.

Зазвичай процес оптимізації є ітераційним, без конкретних кроків ; швидше це набір послідовних процедур, що характеризують продуктивність мережі та покриття в цільовій області. Цільова продуктивність мережі може бути оцінено за показниками RSRP, SINR та успішності передачі. Узагальнений процес оптимізації LTE показаний на рисунку 2.7. Процес починається із встановлення цілей оптимізації для встановлення RSRP, SINR та успішності передачі. Потім проводяться вимірювання, щоб перевірити, чи досягнуто бажані показники, чи ні. Якщо цілі не будуть досягнуті, необхідно провести аналіз з точки зору покриття та хендоверів, щоб виявити першопричини. Нарешті, коригування параметрів буде здійснено на основі запропонованих рішень для завершення завдання оптимізації.

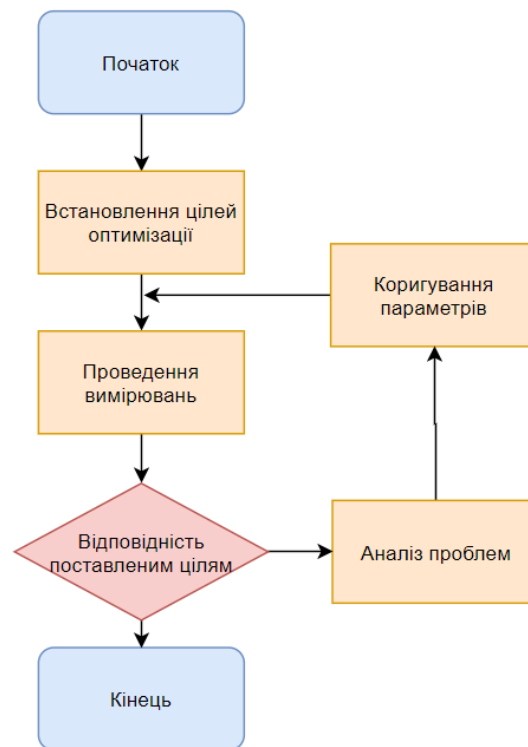


Рисунок 2.7. Загальний процес оптимізації LTE [11]

Ця робота розглядає планування мережі за сценарієм розгортання нової мережі, тому процес оптимізації після запуску не розглядається. Натомість розглядається оптимізація перед запуском мережі. Вона включає в себе підбір розташування базових станцій та параметрів для забезпечення цілей, поставлених при номінальному плануванні і енергетичному бюджеті. Це може бути досягнуто шляхом зміни розташування сайтів та коригування початкових параметрів антен.

2.5.1. Перестановка місць розташування базових станцій.

У випадку проектування нової мережі, початкові місця розташування базових станцій виконується за допомогою інструментів для планування. Ці початкові площадки можуть бути розміщені у таких місцях, як дороги, річки та інші місця, що не підходять для розташування. У рамках ранньої оптимізації, невідповідні місця розташування повинні бути перенесені як мінімум на можливі, 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 рівномірно для всіх базових станцій у цільовій області для простоти під час ранніх планувальних робіт. Ці параметри потрібно коригувати, виходячи із стану місцевості та результатів аналізу покриття за допомогою інструментів для планування. Ці коригування можна досягти вручну, обробляючи кожен сайт окремо, або для всієї мережі, використовуючи інструмент для планування.

Загалом, всі питання, розглянуті у третьому розділі, показували, як підрахувати необхідну кількість сайтів за покриттям та ємністю. Як описано на рисунку 3.2, максимум з двох буде взято для подальшого аналізу та прогнозування. Це робиться шляхом моделювання параметрів за допомогою інструменту для планування для отримання оптимального значення. Оскільки необхідна кількість базових станцій визначається, розглядаючи територію як

географічно рівну, під час прогнозування ми можемо зіткнутися з дірами покриття через особливості місцевості. Оптимізація перед розгортанням, тобто перестановка висоти антени, зміна азимуту, нахилу, перестановка місця розташування під час розміщення або збільшення розміру сайтів буде розглядатися до отримання оптимального результату прогнозування.

У наступному розділі, главі 4, необхідні параметри визначаються як для покриття, так і для ємності. Виходячи з максимальної кількості сайтів, прогнозування покриття та оцінка ємності здійснюються за допомогою інструменту для планування, Forsk Atoll. Крім того, обговорюються аналіз та представлення результатів симуляції для оцінки результатів на основі заданих вимог.

Висновки до розділу 2

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

В кожному з пунктів надаються параметри, які враховуються при плануванні, вказано їх типові значення та формули для розрахунків. Надано методичку для розрахунку

Ціллю номінального планування є визначення кількості базових, що необхідно розмістити на території, яка обрана для побудови мережі, щоб задовольнити потреби до покриття та ємності. При оцінці необхідно враховувати обидва аспекти, як покриття, так і ємність.

Також розглянуто основні підходи детального планування та ранньої оптимізації. При правильному підході до цих етапів, витрати на побудову мережі та оптимізацію після запуску можуть бути суттєво зменшені.

3. Розрахунок зон покриття для мережі LTE

3.1. Вступ

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 базових станцій для цільової території

Як тільки буде завершено підрахунок базових станцій, 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 пропускну здатності 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 компромісувати 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 меж 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 дисертаційній 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 A	$FA=2*0.42/FA=1*0.62$	0.84	0.62
Фактор B	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)	$E = A - 10 * \text{Log}(D)$	15.21
Підсилення антени передавача (дБі)	G	17
Втрати у фідері (дБ)	H	0.5
Втрати тіла (дБ)	I	0
EIRP на піднесучу	$J = E + G - H - I$	31.71
Параметри приймача UE		
Фактор A	$FA = 2 * 0.42$	0.84
Фактор B	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)	$M = K + L - 174 + 10 * \text{log}(15 \text{кГц})$	-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	
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)	$E = A - 10 * \log(D)$	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)	$M = K + L - 174 + 10 * \log(15 \text{кГц})$	-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.

3.3.1.2. 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 рисунку 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.

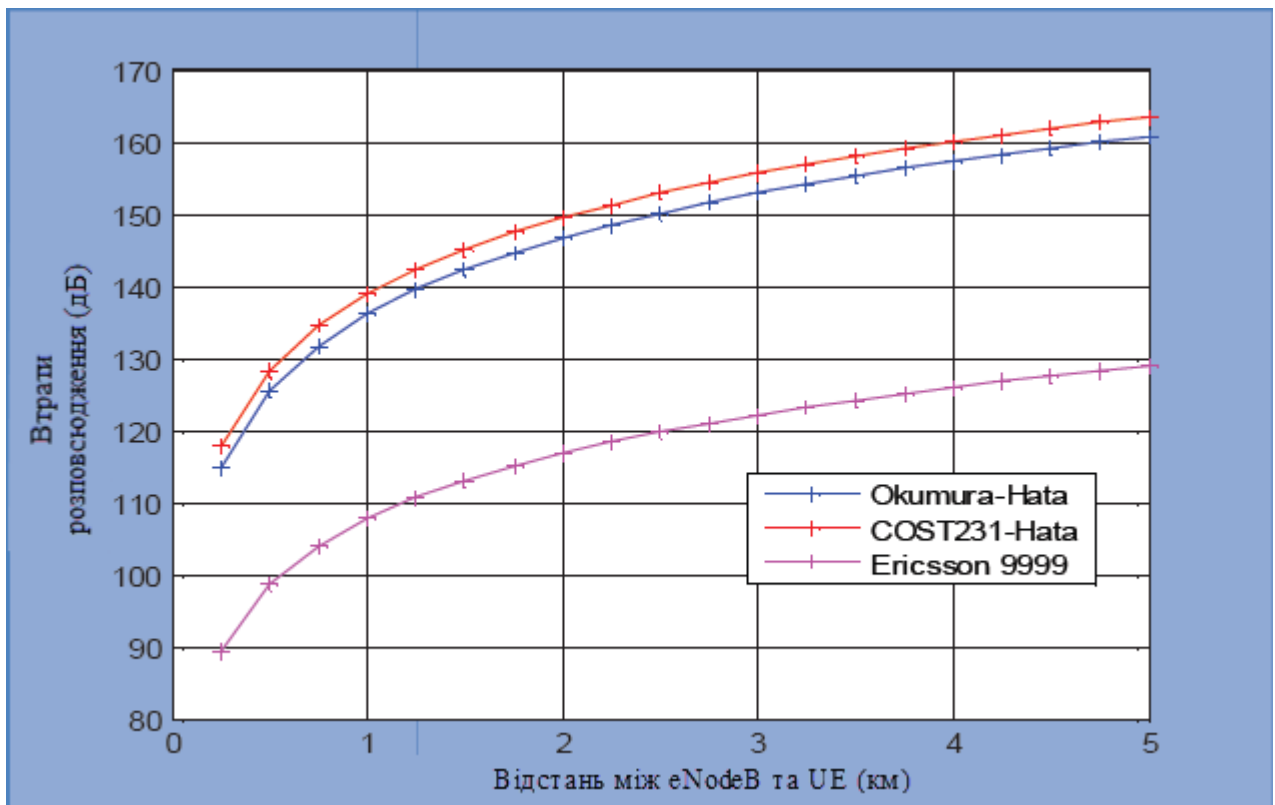


Рисунок 3.1. Порівняння моделей розповсюдження

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:

$$d_{UL} = 0.41 \text{ км}$$

$$d_{DL} = 0.47 \text{ км}$$

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, $R_{\text{еф}}$ (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

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 у час 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 запускених 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_{Π} – 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 $3 \cdot 37,63 = 112,89 \approx 113$ 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
	Золота	Срібна	Бронзова	
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	$d = (((a \cdot 8 \cdot 10^6) / b) \cdot c) / 3600$
Використання сервісів (%)	10	40	50	P
Загальна середня пропускна здатність на користувача (кбіт/с)	120,37			$T = \sum P \cdot d$
Середня пропускна здатність базової станції, Мбіт/с	113			e
Максимальна кількість користувачів на одну базову станцію	939			$f = (e \cdot 1000) / T$

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 рисунку 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).

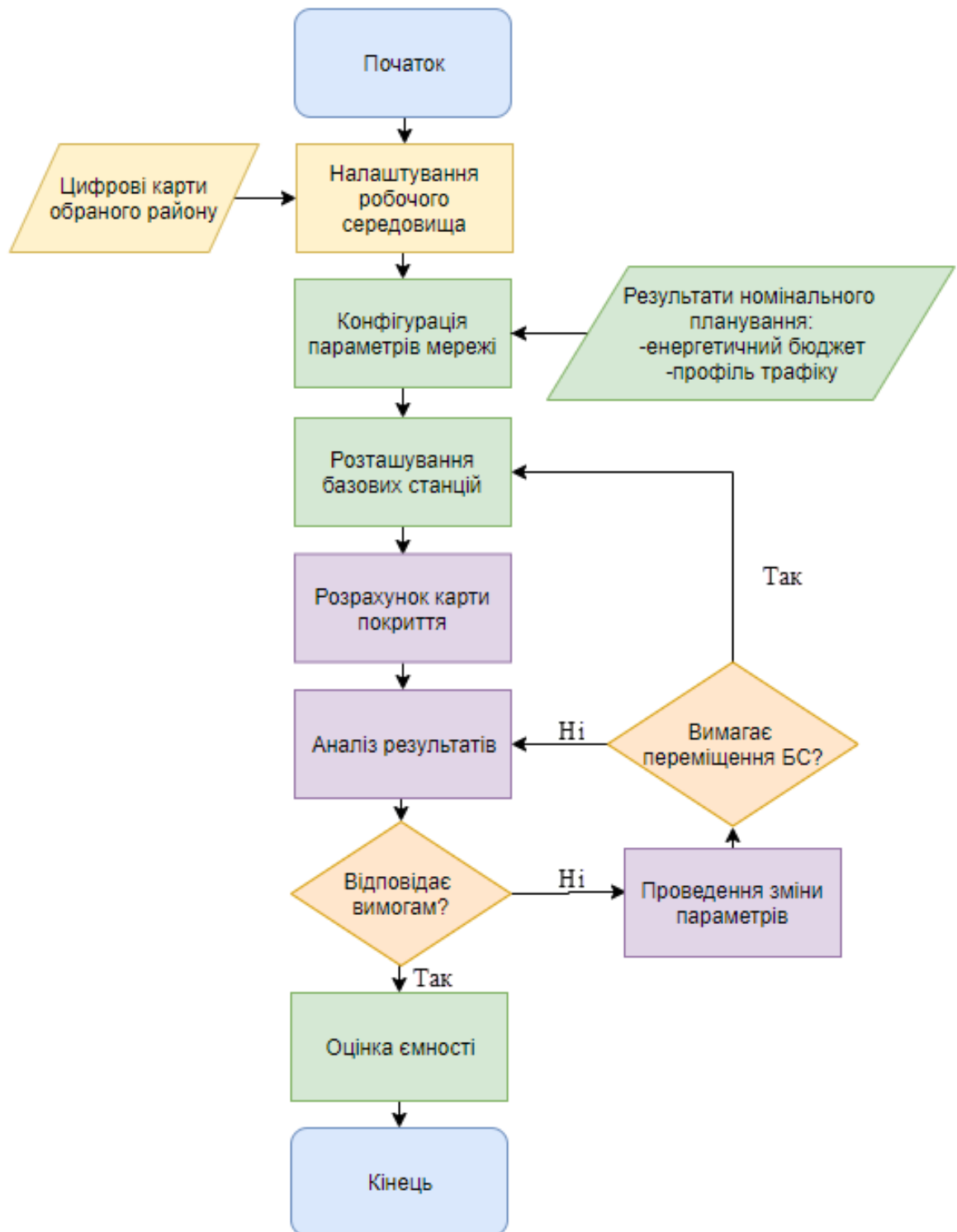


Рисунок 3.2. Процес проведення симуляції

Другий набір вхідних даних – це параметри, визначені на етапі номінального планування. Вони використовуються для встановлення мережевих 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-Hata	
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 станції. Спочатку ці базові налаштовані так, як показано в таблиці 3.10. Залежно від попередніх результатів моделювання, можливо змінювати ці параметри для покращення результатів. Список базових станцій 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°, 17 дБі, 1800 МГц	35 м	0°	0°	0°
2	65°, 17 дБі, 1800 МГц	35 м	120°	0°	0°
3	65°, 17 дБі, 1800 МГц	35 м	240°	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 рисунку 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.

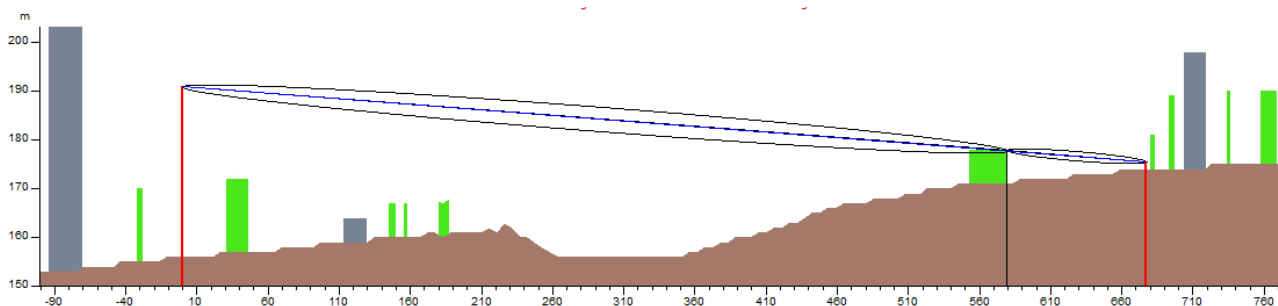


Рисунок 3.5. Приклад географічного профілю між eNodeB та UE

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 рисунку 3.6 показаний моделювання покриття на основі "кращого рівня сигналу" в цільовій області.

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.

Таблиця 3.11. Умови моделювання покриття «найкращого рівня сигналу»

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

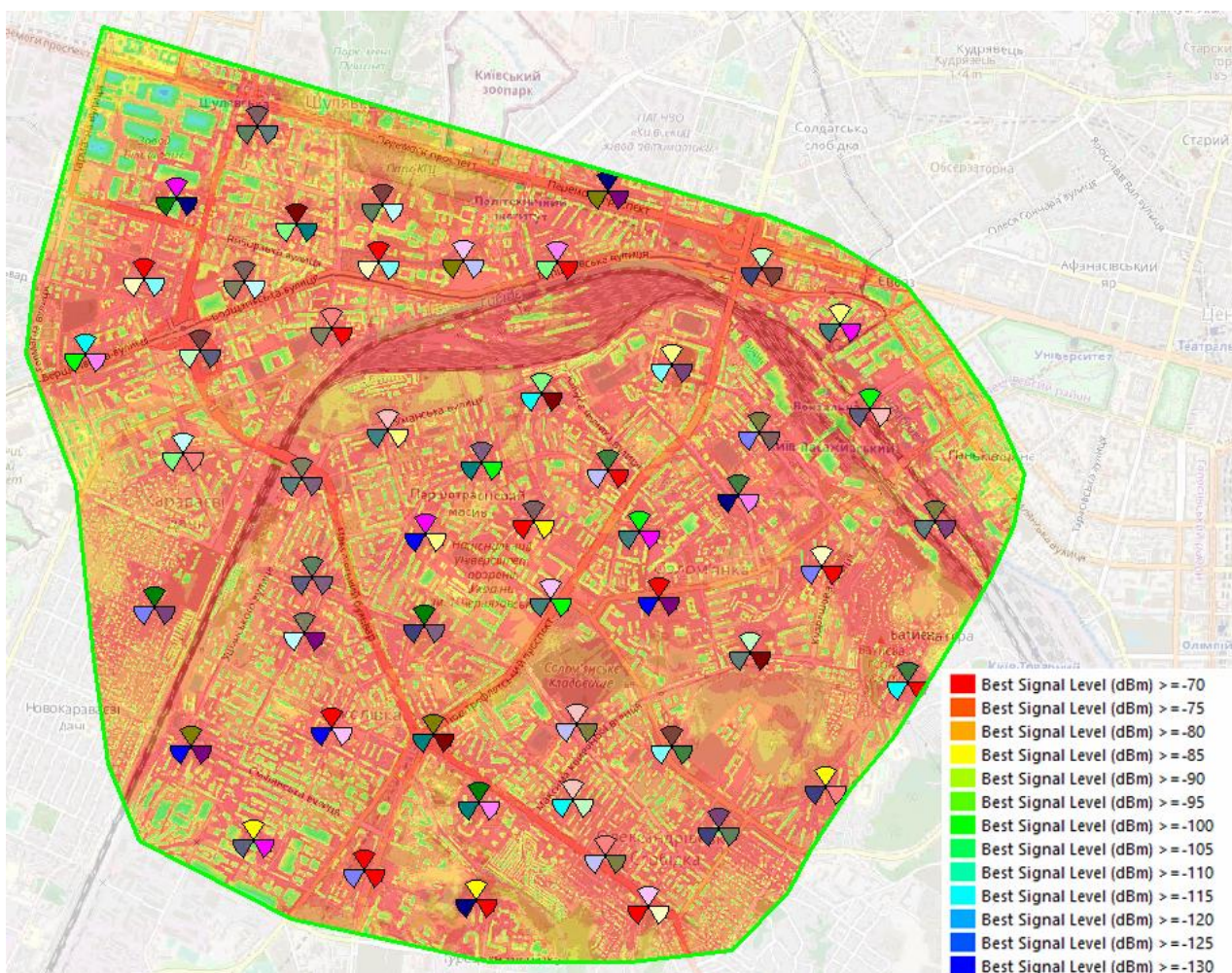


Рисунок 3.6. Результат моделювання покриття за рівнем сигналу

Відповідно до результатів, показаних на гістограмі на рисунку 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.

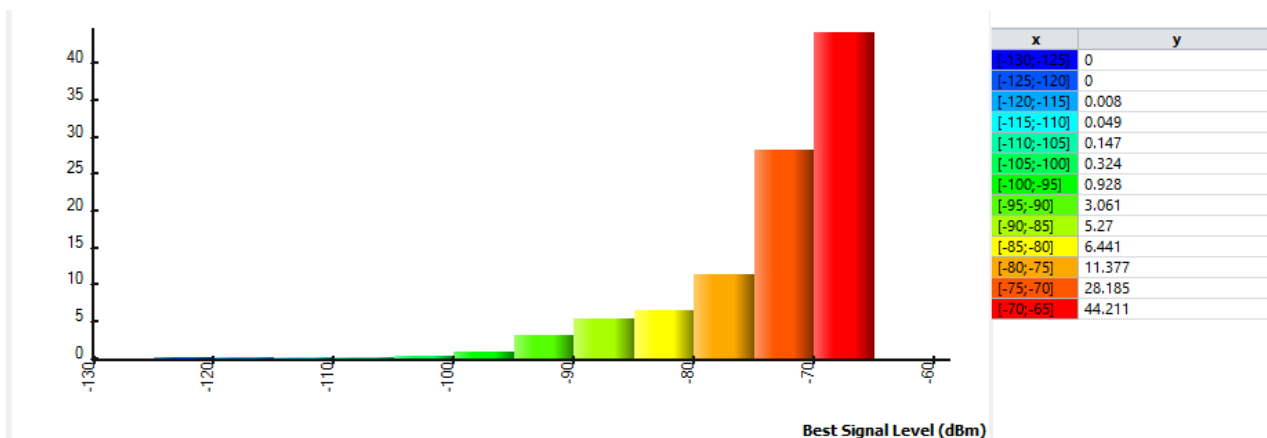


Рисунок 3.7. Результат моделювання покриття за рівнем сигналу у виді гістограми

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.

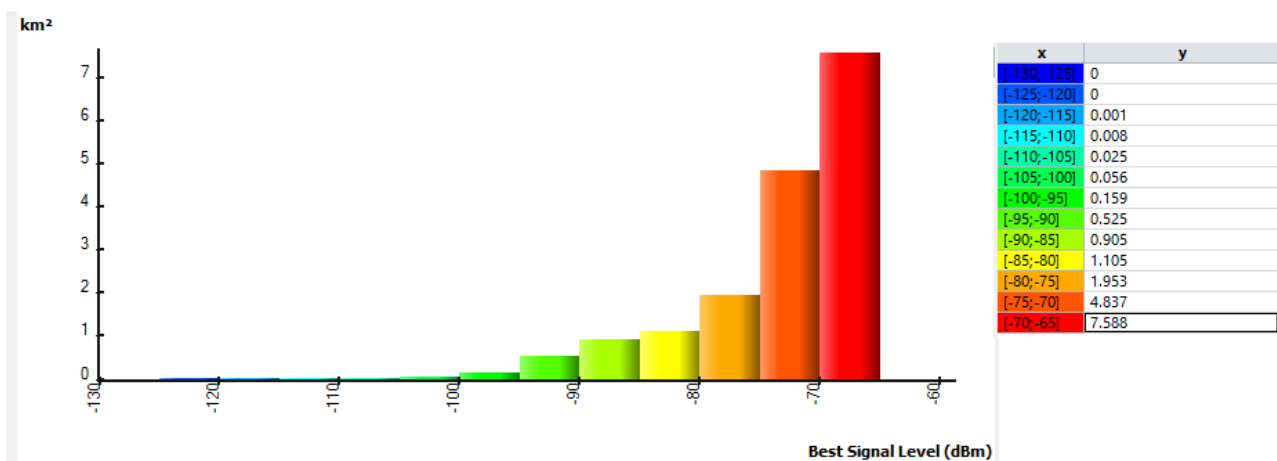


Рисунок 3.8. Результат моделювання покриття за рівнем сигналу у виді гістограми

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
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 PDCCH 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

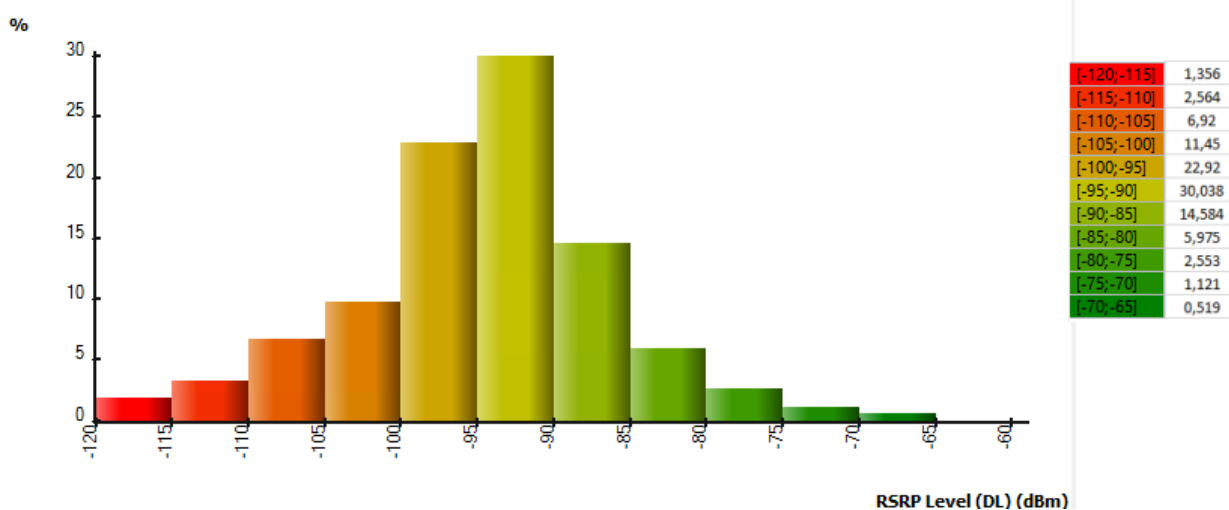


Рисунок 3.9. Результат моделювання за показником RSRP

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 рисунку 3.10 показано прогнозування покриття за значенням SINR для сигналу низхідній лінії зв'язку.

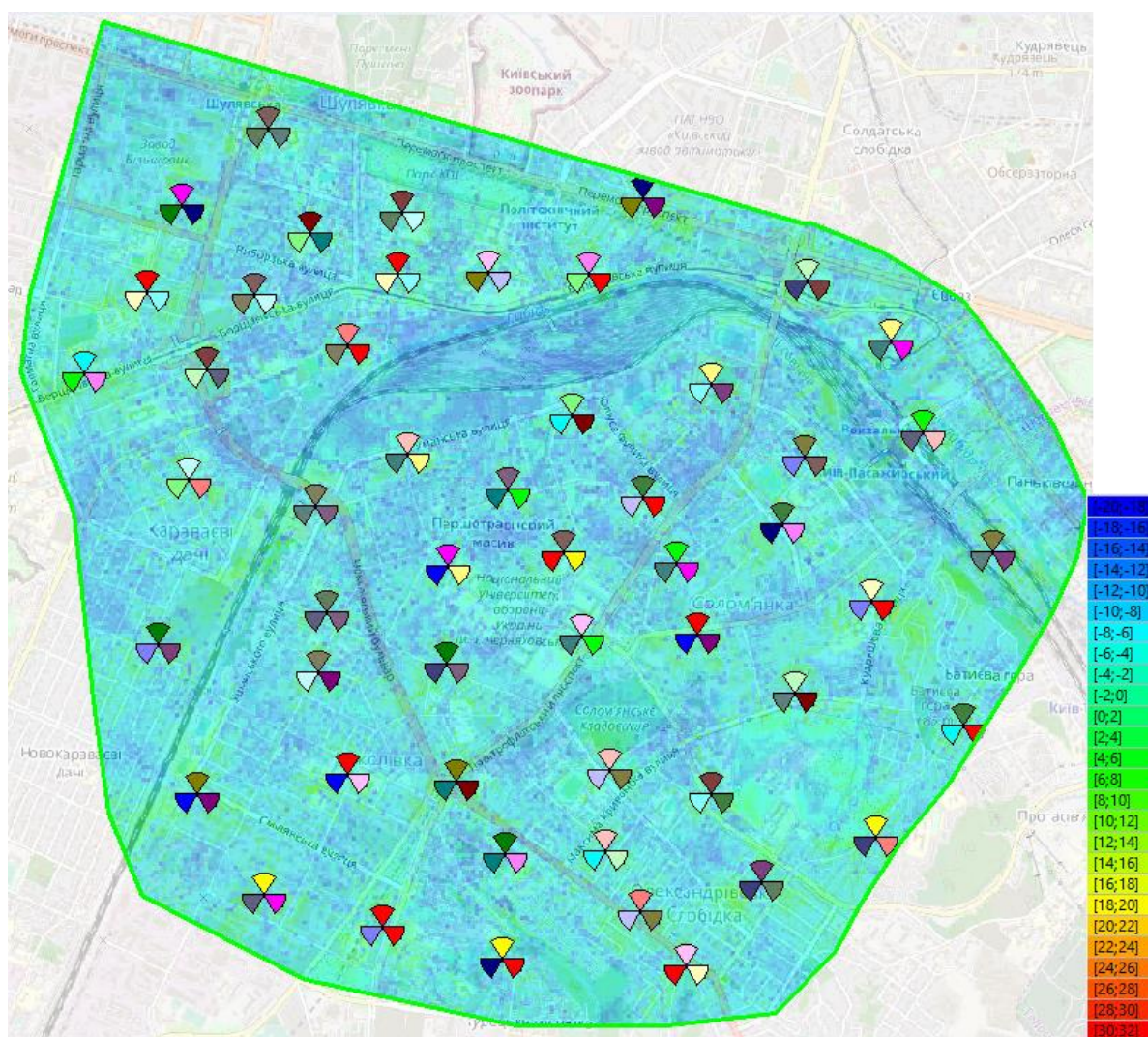


Рисунок 3.10. Результат моделювання за показником SINR

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

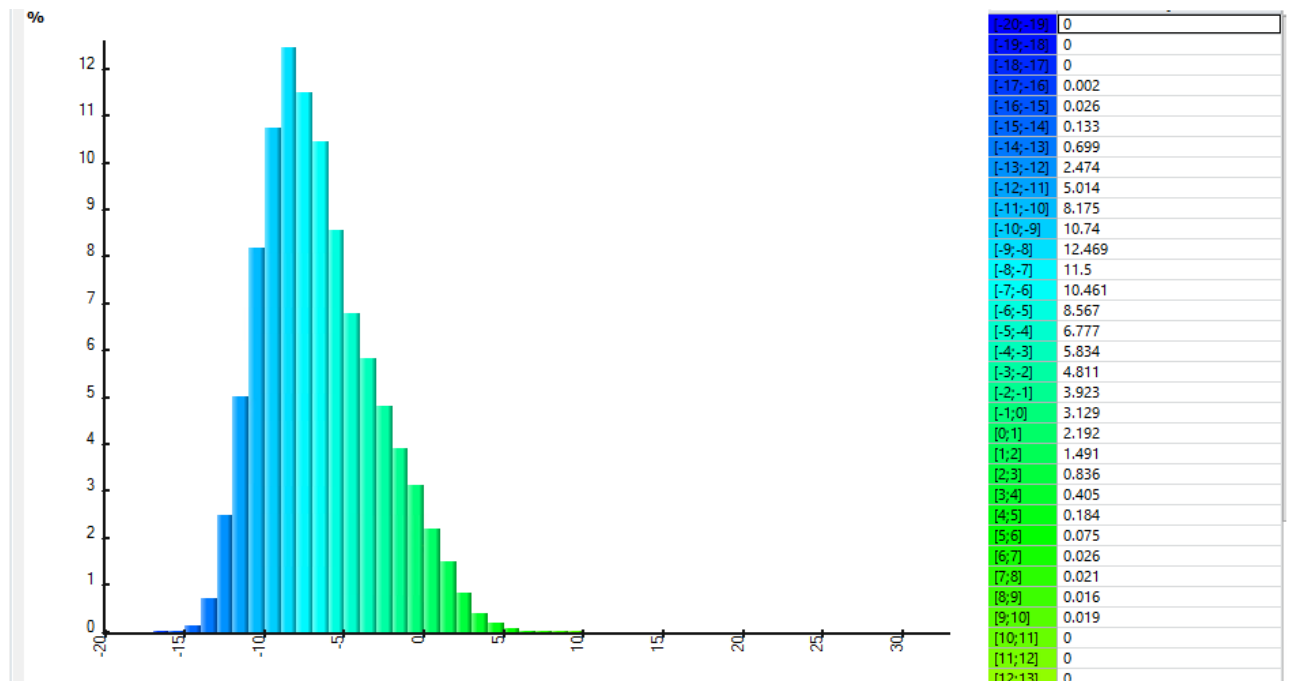


Рисунок 3.11. Результат моделювання за показником SINR у вигляді гістограми

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.

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 азимуту 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 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 рисунку 3.13 та в таблиці 4.11.

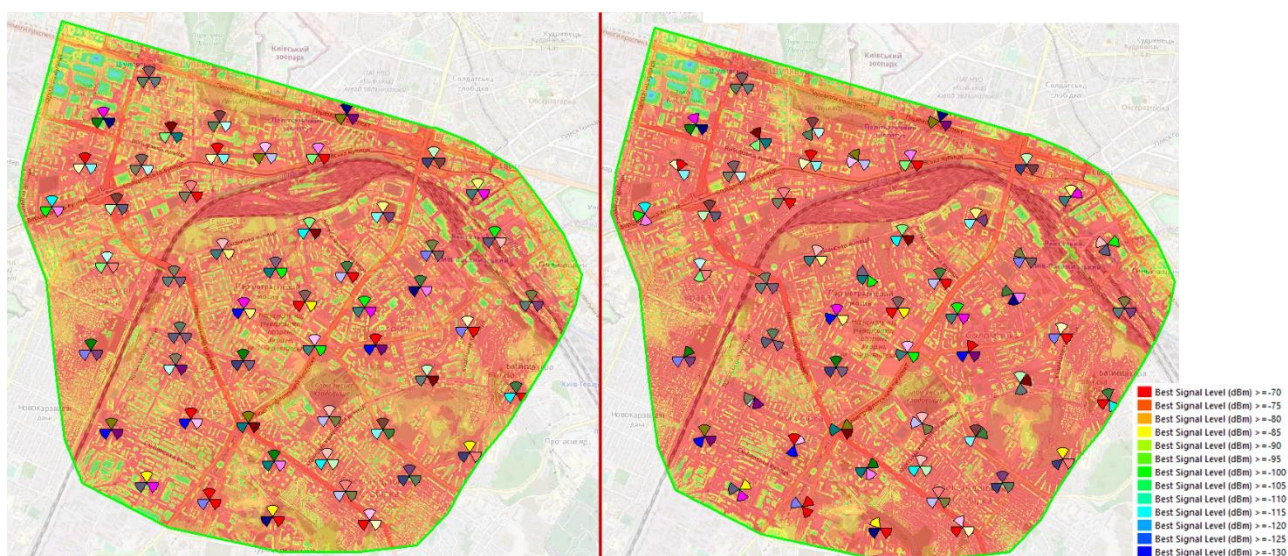


Рисунок 3.12. Карта покриття за рівнем сигналу до (зліва) та після (праворуч) оптимізації

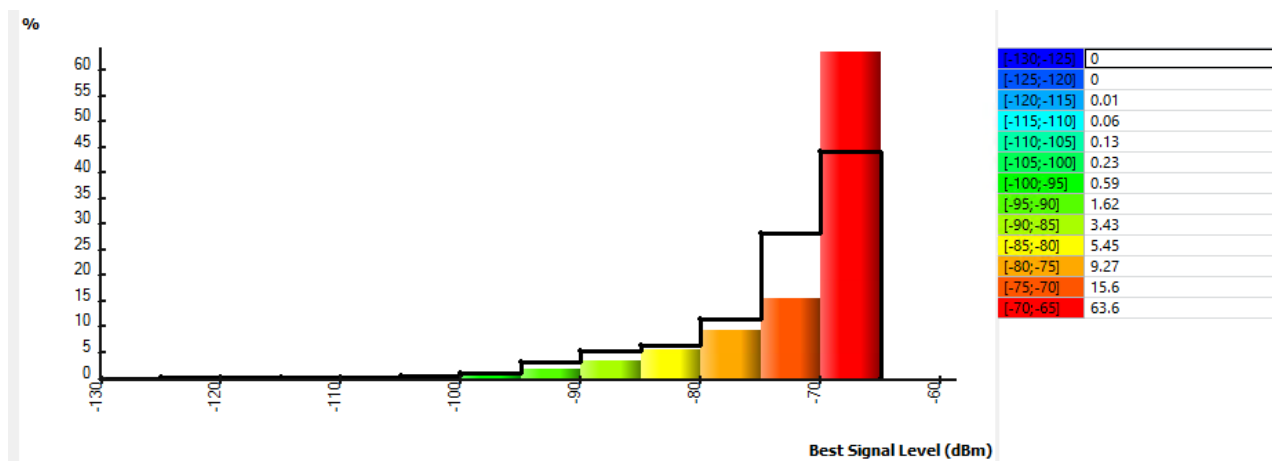


Рисунок 3.13. Порівняння результатів моделювання зі рівнем сигналу у виді гістограм.

Чорним кольором показано попередній результат.

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.

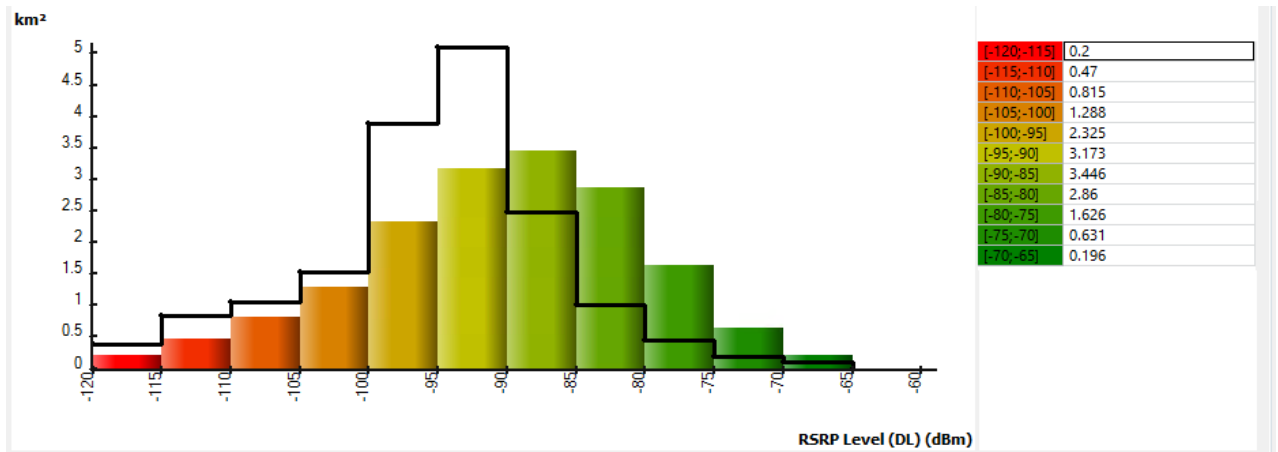


Рисунок 3.14. Порівняння результатів моделювання зі RSRP у виді гістограм. Чорним кольором показано попередній результат.

Таблиця 3.14. Покращення RSRP після оптимізації

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

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 наявності SINR > -3 дБ на 96% площі території. Результат моделювання вказано на рисунку 3.15 в виді карти покриття, а на рисунку 3.16 – в виді гістограми з порівнянням з попереднім результатом.

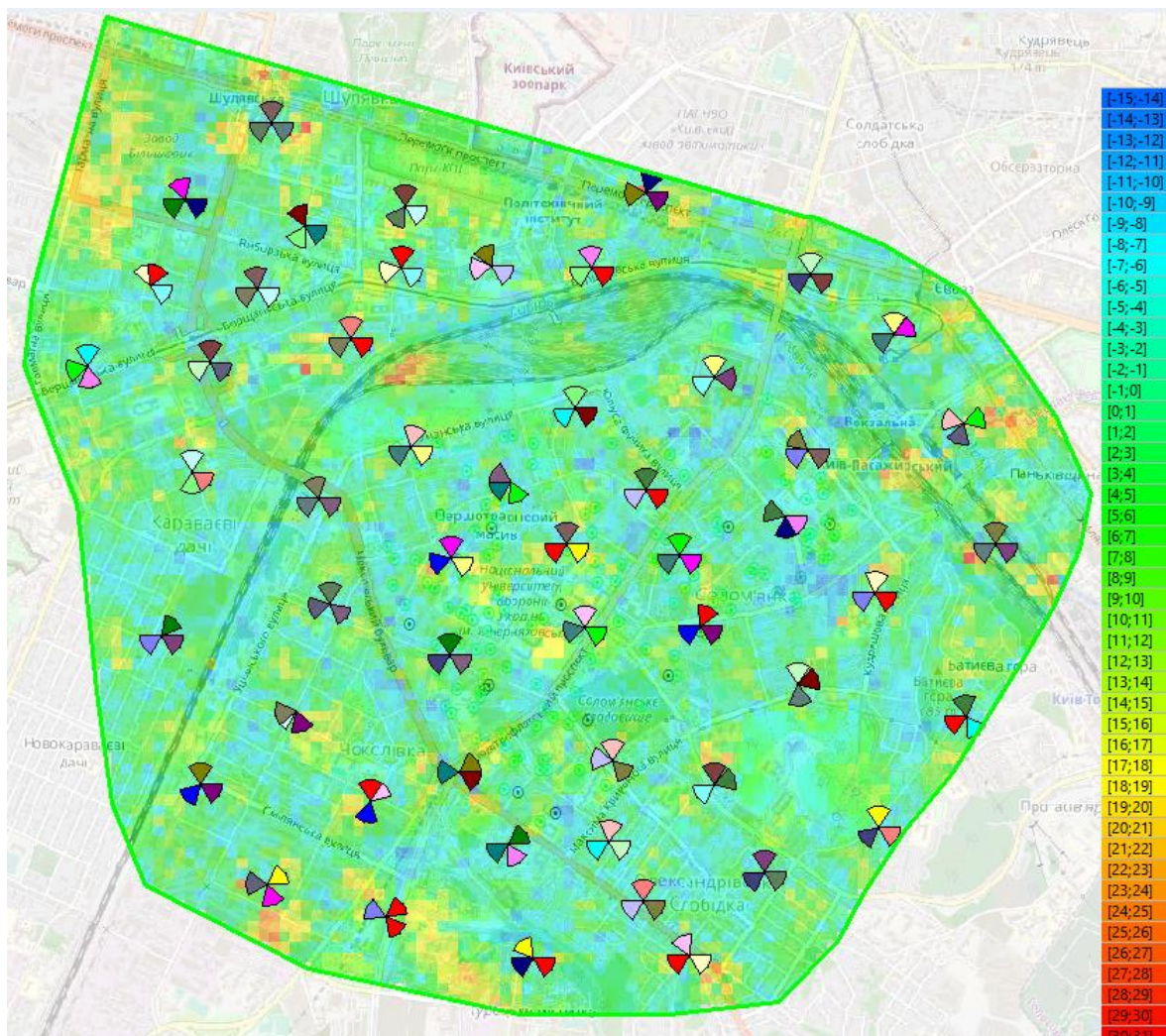


Рисунок 3.15 Результат моделювання за SINR

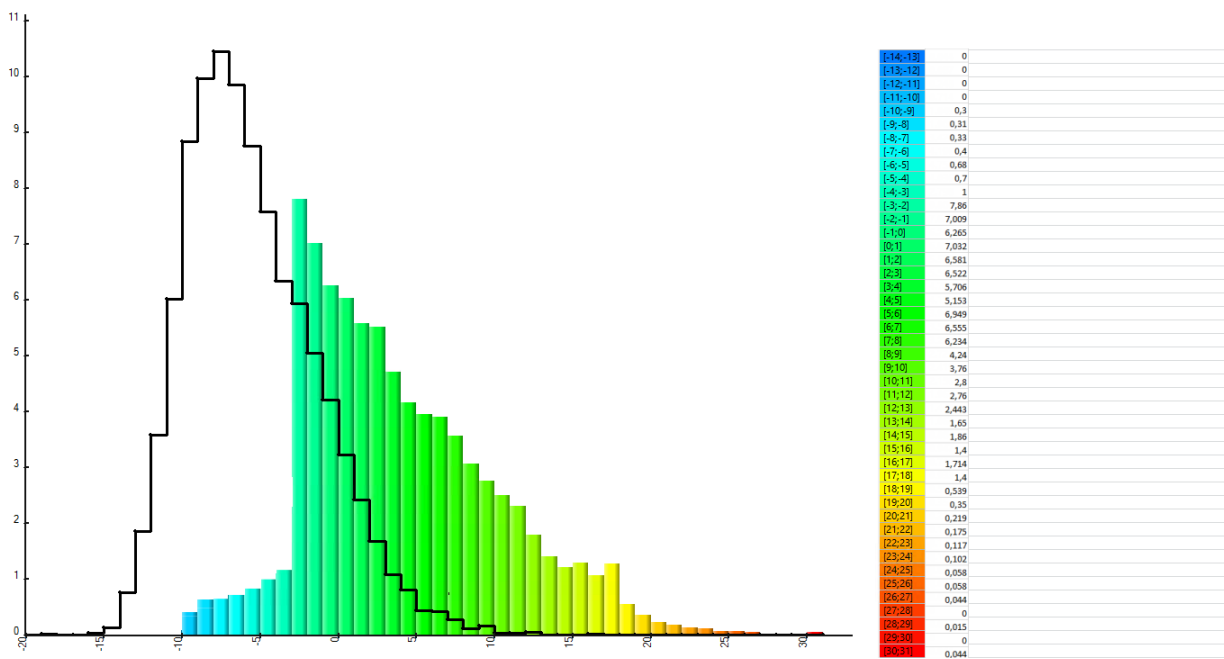


Рисунок 3.16. Порівняння результатів моделювання за SINR віді гістограм. Чорним кольором показано попередній результат.

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 пропускнуої здатності каналу в виді гістограми для висхідної та низхідної лінії. Як видно з результатів, ціль досягнуто та демонструється набагато краща продуктивність.

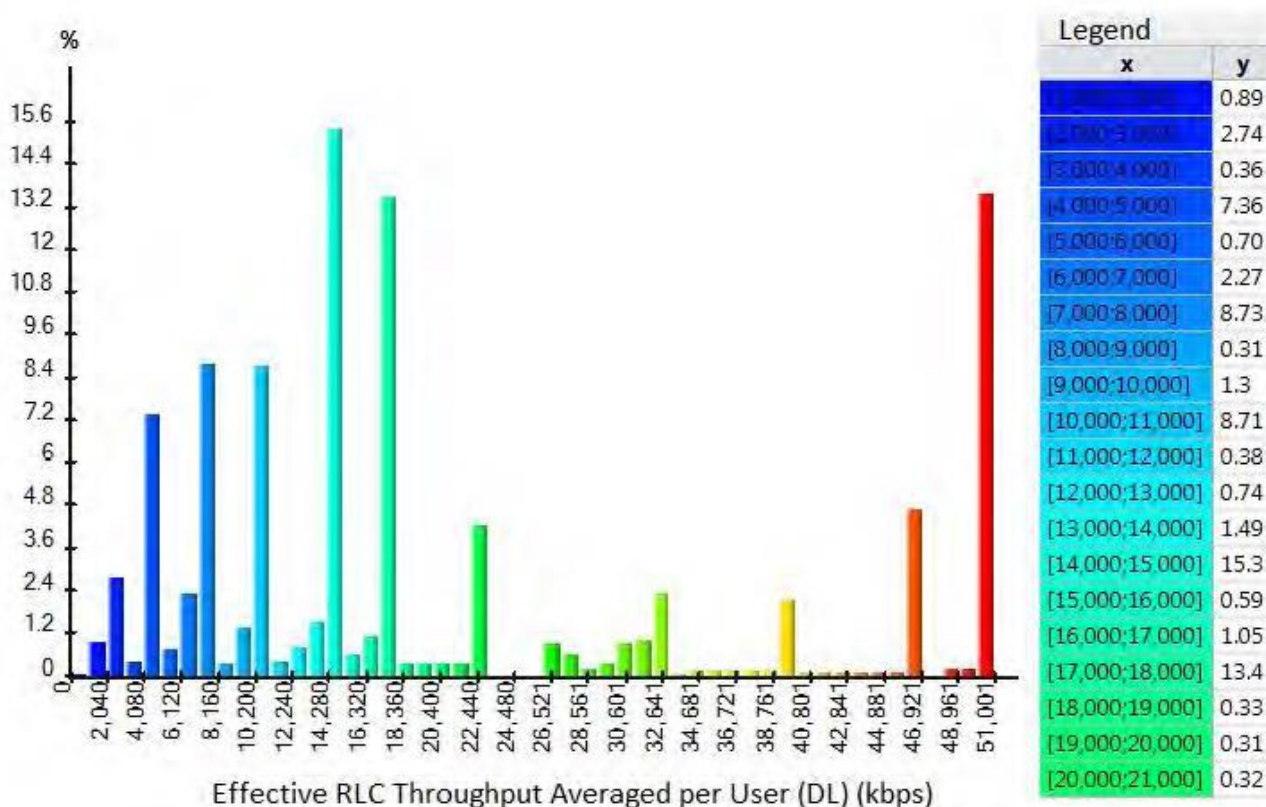


Рисунок 3.17. Результат моделювання пропускнуої здатності для висхідної лінії

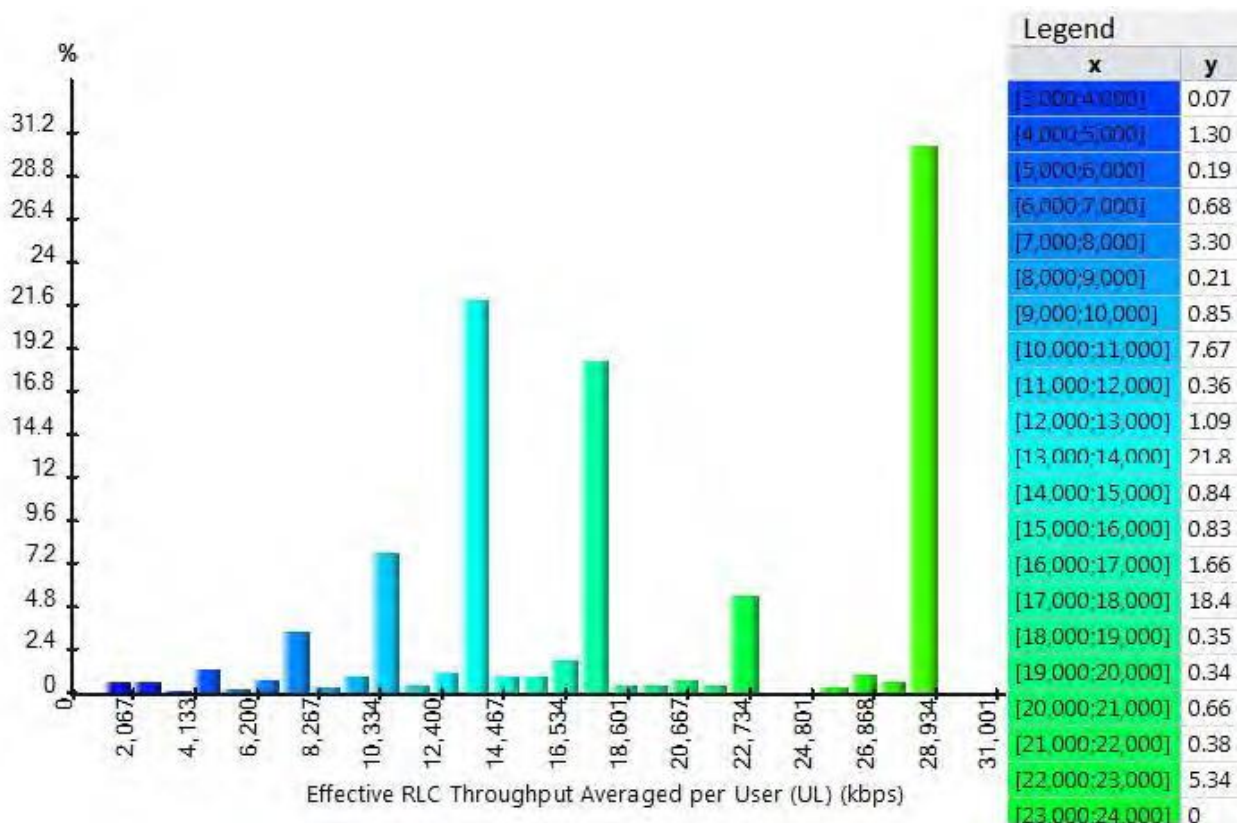


Рисунок 3.18. Результат моделювання пропускної здатності для висхідної лінії

Метод оцінки на основі реалістичного розподілу 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.

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 цьому розділі було проведено проектування за методикою, що було детально розглянуто в другому 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 базові станції. Також для цільової мережі було обрано частотну смугу 1800 МГц, а ширину каналу – 20 МГц.

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

Щоб покращити результати та продуктивність мережі було виконано попередню оптимізацію. Було змінено параметри базових станцій та проведено повторне моделювання. Завдяки виконаним діям було досягнуто цілей, що ставилися до покриття.

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

ВИСНОВКИ

В цій роботі було виконано 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, що необхідні для забезпечення покриття та ємності на певній території. В цій 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 базових 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 результат моделювання швидкості завантаження та кількості одночасних підключень показує, що запланована мінімальна швидкість на межі соти досягається на всій території, а мережа здатна одночасно обслужити 13500 користувачів, що намагаються зареєструватися.

Результати моделювання показують, що при плануванні радіо покриття необхідно використовувати інструмент для моделювання. Завдяки виконанню передбачень карт покриття та їх аналізу, на етапі, що передуює запуску мережі, можливо виконати певні зміни в параметрах мережі та розташуванні базових станцій, що в результаті надає можливість максимально ефективно використовувати кошти, що виділені на розгортання мережі та уникнення додаткових витрат для проведення оптимізації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Jyrki T. J. Penttinen . "The LTE-Advanced Deployment Handbook. The Planning Guidelines for the Fourth Generation Networks", John Wiley & Sons Ltd, 2016
2. Miikka Poikselkam, "Voice over LTE (VoLTE) ", John Wiley & Sons Ltd 2012
3. Ericsson mobility report 2019 [Електронний ресурс] URL:
<https://www.ericsson.com/en/mobility-report>
4. Рижков А.Е. «Системи і мережі радіодоступу 4G: LTE, WIMAX», Линк, Санкт-Петербург, 2012
5. ETSI TS 136 306 standart. [Електронний ресурс]/3GPP 2019 URL:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136306/15.04.00_60/ts_136306v150400p.pdf
6. Malcolm Edwards, "Leveraging the Use of a Radio Frequency Planning (RFP) Design Tool for Modern System Design” [Електронний ресурс] URL:
http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Dec13/1312_HFE_RFplanning.pdf,
7. Ayman Elnashar, Mohamed A. El-saidny, Mahmoud R. Sherif," Design, Development and Performance of 4G-LTE Networks a Practical Approach” John Wiley & Sons, Ltd, 2014
8. Jyrki T. J. Penttinen, "The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile, and Satellite Systems", John Wiley & Sons Ltd., 2015.
9. Stefania Sesia, Stefania Sesia, Matthew Baker, “LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice”, Second Edition, England: John Wiley & Sons Ltd., 2011.
10. Ajay R. Mishra, "Fundamentals of Cellular Network Planning & Optimization", John Willey & Sons Ltd. 2004.

11. Harri Holma and Antti Toskala, "LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced", Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

ДОДАТОК А

Найменування базових станцій, їх географічне положення та висота над рівнем моря.

БС	Широта	Довгота	Висота над рівнем моря
Site0	50.449914622N	30.441649231E	161
Site1	50.448904023N	30.449654645E	154
Site10	50.435831853N	30.496277504E	124
Site11	50.433688263N	30.488246953E	136
Site12	50.428434877N	30.494563866E	190
Site13	50.432091907N	30.476637341E	176
Site14	50.435140025N	30.475161479E	170
Site15	50.421628112N	30.481288163E	188
Site16	50.425342821N	30.477778651E	179
Site17	50.417770159N	30.465938075E	172
Site18	50.420676486N	30.448023149E	183
Site19	50.425644309N	30.460690662E	185
Site2	50.447152983N	30.456091571E	149
Site20	50.428120039N	30.449798347E	181
Site21	50.434826351N	30.459906191E	170
Site22	50.438232308N	30.442433259E	152
Site23	50.431237667N	30.440602136E	174
Site24	50.439547494N	30.457066194E	170
Site25	50.435465339N	30.467588987E	167
Site26	50.44132494N	30.467924826E	163
Site27	50.439745051N	30.48359353E	140
Site28	50.422780006N	30.470819753E	186
Site29	50.424871058N	30.443453852E	180
Site3	50.446170699N	30.439417323E	158
Site30	50.418012077N	30.476347661E	186
Site31	50.419404527N	30.456017834E	182
Site32	50.426280283N	30.470934623E	186
Site33	50.444115926N	30.452864267E	143
Site34	50.453271147N	30.447274968E	170
Site35	50.429675875N	30.483232629E	151

Site36	50.422594688N	30.464124139E	181
Site37	50.430644254N	30.459926409E	181
Site38	50.437219816N	30.450986023E	167
Site39	50.442757716N	30.477231661E	149
Site4	50.442681349N	30.435346546E	157
Site40	50.424326862N	30.454819213E	184
Site41	50.423631421N	30.488856191E	190
Site42	50.431956254N	30.468882756E	178
Site43	50.442977193N	30.443492048E	156
Site44	50.43810591N	30.463815701E	158
Site45	50.449782239N	30.456317704E	166
Site46	50.447318006N	30.468848134E	140
Site47	50.446138349N	30.446559778E	157
Site48	50.437888663N	30.472779459E	172
Site49	50.420247522N	30.473222492E	186
Site5	50.447304129N	30.462200037E	149
Site50	50.436866437N	30.482148566E	151
Site51	50.432733513N	30.45181939E	179
Site6	50.450602074N	30.472435108E	138
Site7	50.447209059N	30.483500821E	128
Site8	50.441027621N	30.493919202E	123
Site9	50.444736085N	30.48918406E	126

ДОДАТОК Б

Значення параметрів базових станцій (азимут, електричний кут нахилу, механічний кут нахилу) до та після оптимізації.

БС	Сектор	Висота антени (м)	Азимут (до)	Азимут (після)	Електричний кут нахилу, (до)	Електричний кут нахилу, (після)	Механічний кут нахилу, (до)	Механічний кут нахилу, (після)
Site0	Site0_1	35	0	340	0	10	0	5
Site0	Site0_2	35	120	120	0	8	0	0
Site0	Site0_3	35	240	240	0	9	0	3
Site1	Site1_1	35	0	335	0	7	0	0
Site1	Site1_2	35	120	120	0	9	0	3
Site1	Site1_3	35	240	210	0	8	0	0
Site10	Site10_1	35	0	0	0	8	0	0
Site10	Site10_2	35	120	120	0	1	0	5
Site10	Site10_3	35	240	240	0	10	0	3
Site11	Site11_1	35	0	10	0	10	0	0
Site11	Site11_2	35	120	120	0	0	0	4
Site11	Site11_3	35	240	240	0	6	0	1
Site12	Site12_1	35	0	350	0	8	0	0
Site12	Site12_2	35	120	241	0	6	0	0
Site12	Site12_3	35	240	145	0	0	0	0
Site13	Site13_1	35	0	25	0	10	0	0
Site13	Site13_2	35	120	120	0	10	0	0
Site13	Site13_3	35	240	240	0	6	0	0
Site14	Site14_1	35	0	0	0	9	0	4
Site14	Site14_2	35	120	120	0	10	0	2
Site14	Site14_3	35	240	240	0	0	0	5
Site15	Site15_1	35	0	0	0	7	0	0
Site15	Site15_2	35	120	120	0	4	0	2
Site15	Site15_3	35	240	235	0	7	0	0
Site16	Site16_1	35	0	0	0	8	0	3
Site16	Site16_2	35	120	70	0	1	0	0
Site16	Site16_3	35	240	235	0	0	0	4
Site17	Site17_1	52	0	321	0	0	0	0
Site17	Site17_2	52	120	120	0	10	0	0
Site17	Site17_3	52	240	240	0	8	0	5
Site18	Site18_1	35	0	55	0	10	0	0
Site18	Site18_2	35	120	160	0	8	0	0
Site18	Site18_3	35	240	275	0	7	0	5
Site19	Site19_1	35	0	55	0	8	0	0
Site19	Site19_2	35	120	120	0	8	0	0
Site19	Site19_3	35	240	270	0	8	0	0

Site2	Site2_1	50	0	5	0	10	0	0
Site2	Site2_2	50	120	125	0	8	0	4
Site2	Site2_3	35	240	255	0	8	0	5
Site20	Site20_1	35	0	260	0	10	0	0
Site20	Site20_2	35	120	160	0	0	0	5
Site20	Site20_3	26	240	240	0	10	0	0
Site21	Site21_1	35	0	0	0	8	0	0
Site21	Site21_2	35	120	120	0	7	0	0
Site21	Site21_3	35	240	250	0	9	0	0
Site22	Site22_1	35	0	0	0	9	0	0
Site22	Site22_2	35	120	125	0	10	0	0
Site22	Site22_3	35	240	180	0	6	0	0
Site23	Site23_1	35	0	40	0	9	0	0
Site23	Site23_2	35	120	120	0	10	0	0
Site23	Site23_3	35	240	240	0	0	0	5
Site24	Site24_1	35	0	15	0	10	0	1
Site24	Site24_2	35	120	120	0	10	0	0
Site24	Site24_3	35	240	240	0	10	0	0
Site25	Site25_1	35	0	0	0	8	0	0
Site25	Site25_2	35	120	120	0	8	0	0
Site25	Site25_3	35	240	240	0	9	0	0
Site26	Site26_1	35	0	0	0	10	0	0
Site26	Site26_2	35	120	120	0	0	0	2
Site26	Site26_3	35	240	235	0	8	0	1
Site27	Site27_1	35	0	310	0	8	0	0
Site27	Site27_2	35	120	120	0	10	0	0
Site27	Site27_3	35	240	240	0	5	0	0
Site28	Site28_1	35	0	10	0	10	0	5
Site28	Site28_2	35	120	120	0	0	0	0
Site28	Site28_3	35	240	240	0	10	0	5
Site29	Site29_1	35	0	0	0	5	0	0
Site29	Site29_2	35	120	120	0	6	0	0
Site29	Site29_3	35	240	225	0	7	0	0
Site3	Site3_1	52	0	25	0	10	0	0
Site3	Site3_2	52	120	120	0	10	0	0
Site3	Site3_3	52	240	340	0	0	0	2
Site30	Site30_1	35	0	335	0	0	0	0
Site30	Site30_2	35	120	120	0	8	0	0
Site30	Site30_3	35	240	240	0	0	0	0
Site31	Site31_1	35	0	53	0	0	0	0
Site31	Site31_2	35	120	140	0	0	0	0
Site31	Site31_3	35	240	295	0	10	0	1
Site32	Site32_1	35	0	0	0	8	0	0
Site32	Site32_2	35	120	135	0	10	0	5
Site32	Site32_3	35	240	280	0	6	0	0
Site33	Site33_1	35	0	0	0	6	0	1
Site33	Site33_2	35	120	120	0	0	0	5

Site33	Site33_3	35	240	240	0	8	0	0
Site34	Site34_1	35	0	0	0	0	0	5
Site34	Site34_2	35	120	120	0	7	0	4
Site34	Site34_3	35	240	240	0	7	0	0
Site35	Site35_1	35	0	0	0	0	0	0
Site35	Site35_2	35	120	70	0	10	0	4
Site35	Site35_3	35	240	170	0	0	0	0
Site36	Site36_1	35	0	55	0	8	0	0
Site36	Site36_2	35	120	150	0	0	0	0
Site36	Site36_3	35	240	240	0	0	0	0
Site37	Site37_1	35	0	0	0	10	0	1
Site37	Site37_2	35	120	120	0	5	0	0
Site37	Site37_3	35	240	240	0	10	0	0
Site38	Site38_1	55	0	345	0	10	0	0
Site38	Site38_2	55	120	120	0	9	0	0
Site38	Site38_3	55	240	240	0	10	0	0
Site39	Site39_1	35	0	0	0	10	0	2
Site39	Site39_2	35	120	95	0	10	0	0
Site39	Site39_3	35	240	240	0	5	0	5
Site4	Site4_1	50	0	0	0	6	0	0
Site4	Site4_2	50	120	170	0	0	0	0
Site4	Site4_3	50	240	255	0	10	0	0
Site40	Site40_1	35	0	0	0	0	0	0
Site40	Site40_2	35	120	45	0	0	0	0
Site40	Site40_3	35	240	195	0	7	0	0
Site41	Site41_1	35	0	0	0	8	0	0
Site41	Site41_2	35	120	120	0	0	0	0
Site41	Site41_3	35	240	230	0	8	0	0
Site42	Site42_1	35	0	0	0	10	0	0
Site42	Site42_2	35	120	120	0	8	0	5
Site42	Site42_3	35	240	255	0	6	0	0
Site43	Site43_1	35	0	0	0	0	0	0
Site43	Site43_2	35	120	125	0	10	0	5
Site43	Site43_3	35	240	240	0	9	0	0
Site44	Site44_1	35	0	300	0	10	0	0
Site44	Site44_2	35	120	155	0	0	0	0
Site44	Site44_3	35	240	240	0	8	0	0
Site45	Site45_1	35	0	0	0	0	0	0
Site45	Site45_2	35	120	120	0	0	0	0
Site45	Site45_3	35	240	215	0	0	0	0
Site46	Site46_1	35	0	355	0	0	0	4
Site46	Site46_2	35	120	120	0	8	0	0
Site46	Site46_3	35	240	240	0	10	0	5
Site47	Site47_1	35	0	350	0	7	0	0
Site47	Site47_2	35	120	120	0	10	0	0
Site47	Site47_3	35	240	240	0	9	0	0
Site48	Site48_1	35	0	0	0	10	0	3

Site48	Site48_2	35	120	120	0	9	0	0
Site48	Site48_3	35	240	240	0	0	0	0
Site49	Site49_1	52	0	0	0	10	0	0
Site49	Site49_2	52	120	120	0	8	0	0
Site49	Site49_3	52	240	240	0	10	0	0
Site5	Site5_1	45	0	260	0	8	0	0
Site5	Site5_2	45	120	120	0	10	0	0
Site5	Site5_3	45	240	335	0	3	0	0
Site50	Site50_1	52	0	290	0	0	0	5
Site50	Site50_2	52	120	120	0	10	0	0
Site50	Site50_3	52	240	175	0	6	0	0
Site51	Site51_1	35	0	0	0	8	0	0
Site51	Site51_2	35	120	130	0	8	0	1
Site51	Site51_3	35	240	255	0	10	0	0
Site6	Site6_1	35	0	20	0	0	0	0
Site6	Site6_2	35	120	120	0	10	0	0
Site6	Site6_3	35	240	265	0	10	0	5
Site7	Site7_1	35	0	0	0	6	0	0
Site7	Site7_2	35	120	120	0	8	0	0
Site7	Site7_3	35	240	240	0	8	0	0
Site8	Site8_1	35	0	70	0	7	0	0
Site8	Site8_2	35	120	285	0	8	0	2
Site8	Site8_3	35	240	200	0	0	0	0
Site9	Site9_1	35	0	0	0	0	0	0
Site9	Site9_2	35	120	65	0	5	0	0
Site9	Site9_3	35	240	240	0	7	0	0