Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання
(повна назва)
Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*

Методика планування мережі мобільного зв'язку 4G LTE
(тема)

Виконав:
здобувач *3* року навчання,
групи *ТРІМІзу-23-1*
Олександр ГОРДІЄНКО
(власне ім'я, прізвище)
Спеціальність *172 Електронні комунікації та радіотехніка*
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми *освітньо-професійна*
Освітня програма *«Інформаційно-мережна інженерія»*
(повна назва освітньої програми)
Керівник *зав. каф. ІМІ Микола МОСКАЛЕЦЬ*
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ *Микола МОСКАЛЕЦЬ*
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Здобувачка  / *Олександр ГОРДІЄНКО*/

Керівник / *Микола МОСКАЛЕЦЬ* /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*

Спеціальність *172 Електронні комунікації та радіотехніка*
(код і повна назва)

Тип програми *освітньо-професійна*
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма *«Інформаційно-мережна інженерія»*
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«*26*» *червня* 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачці Гордієнко Олександр Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _Методика планування мережі мобільного зв'язку 4G LTE_
затверджена наказом університету від _18__05_____20_26_ р. № _74 Стз._____
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _22_06_ 20_26_ р.
3. Вихідні дані до роботи
вимоги стандарту 3GPP LTE Advanced
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Порівняльний аналіз концептуальних підходів, щодо планування мереж мобільного зв'язку
4.2 Методи планування і оптимізації мережі мобільного зв'язку зв'язку 4G LTE
4.3 Методика розрахунку параметрів мережі мобільного зв'язку 4G LTE
4.4 Методика визначення просторово-технічних параметрів мережі стандарту 4G LTE
4.5 Методика оцінки енергетичних складових радіоканалу в мережі мобільного зв'язку 4G LTE
4.6 Аналіз методів управління канальним ресурсом в мережі 4G LTE .
4.7 Синтез блок-схеми алгоритму планування мережі мобільного зв'язку 4G LTE

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) демонстраційний матеріал у вигляді ppt-презентації.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Отримання завдання	18.05.2026	*виконано*
2.	Збір матеріалів для дослідження	23.05.2026	*виконано*
3.	Розробка 1 розділу	31.05.2026	*виконано*
4.	Розробка 2 розділу	05.06.2026	*виконано*
5.	Розробка 3 розділу	12.06.2026	*виконано*
6.	Розробка 4 розділу	14.06.2026	*виконано*
7.	Розробка 5 розділу	16.06.2026	*виконано*
8.	Розробка 6 розділу	18.06.2026	*виконано*
9.	Оформлення кваліфікаційної роботи	21.06.2026	*виконано*

Дата видачі завдання *18 травня 2026 р.*

Здобувач _____ _____
(підпис)

Керівник роботи _____ *(зав. каф. Микола МОСКАЛЕЦЬ)*
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи містить 102 с., 23 рис., 11 табл., 17 джерел, 1 додаток.

МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ, ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ’ЯЗКУ, ЧАСТОТНО-ТЕРІТОРІАЛЬНИЙ ПЛАН, КЛАСТЕРНІ МОДЕЛІ, АЛГОРИТМ ПЛАНУВАННЯ, ВЗАЄМНІ ЗАВАДИ, КОЕФІЦІЄНТ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСУ, СЕКТОРОВАНІ КЛАСЕРИ.

Об'єкт дослідження – процес планування мережі мобільного зв’язку 4G LTE із застосуванням кластерних моделей і методів повторного використання частотного ресурсу.

Предмет дослідження – вдосконалення методики планування 4G LTE за рахунок впровадження ефективних моделей частотного і територіального планування, аналізу схем кодування і модуляції спільно з виборрм моделей поширення радіохивль.

Мета роботи – розробка питань, щодо вдосконалення методики планування для мережі мобільного зв’язку 4G LTE на основі використання частотних кластерних моделей і аналізу параметрів конфігурації системи 4G LTE.

Методи дослідження – аналіз, формалізація, синтез, моделювання, порівняння.

Проводиться розробка питань вдосконалення методики планування для мережі мобільного зв’язку 4G LTE за рахунок впровадження ефективних моделей частотного і територіального планування мережі з використанням аналізу конфігурації схем доступу, модуляції і кодування в системі LTE.

Кінцевий результом є створення алгоритму планування початкового наближення мережі LTE s частотно-територіального плану з високим коефіцієнтом повторного використання частотного ресурсу та низьким відсотком невиконання показника якості рівня взаємних внутрішньо-системних завад.

В роботі представлено дослідження продуктивності низхідного каналу технології LTE з урахуванням: ширини частотного каналу, різних типів модуляції та швидкості кодування інформації.

ABSTRACT

The explanatory note to the diploma thesis contains 102 pages, 23 figures, 11 tables, 17 references and one app.

PLANNING METHODOLOGY, MOBILE COMMUNICATION NETWORK PLANNING, FREQUENCY-TERRITORIAL PLAN, CLUSTER MODELS, PLANNING ALGORITHM, MUTUAL INTERFERENCE, FREQUENCY REUSE FACTOR, SECTORIZED CLUSTERS.

The object of the research is the process of planning a 4G LTE mobile communication network using cluster models and frequency reuse methods.
The subject of the research is the improvement of the 4G LTE planning methodology through the implementation of efficient frequency and territorial planning models, analysis of coding and modulation schemes, and the selection of radio wave propagation models.

The purpose of the work is to develop approaches for improving the planning methodology of 4G LTE mobile communication networks based on the use of frequency cluster models and the analysis of 4G LTE system configuration parameters.
Research methods include analysis, formalization, synthesis, modeling, and comparison.

The work addresses the development of approaches for improving the planning methodology of 4G LTE mobile communication networks through the implementation of efficient frequency and territorial network planning models using the analysis of access schemes, modulation, and coding configurations in the LTE system.

The final result is the development of an algorithm for the initial planning approximation of an LTE network with a frequency-territorial plan characterized by a high frequency reuse factor and a low percentage of failure to meet the quality indicators related to mutual intrasystem interference levels.

The paper presents a study of LTE downlink performance considering channel bandwidth, various modulation types, and information coding rates.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, символів, одиниць і термінів…..... 8
Вступ…… 10
1 Порівняльний аналіз концептуальних підходів, щодо планування мереж мобільного зв’язку……. 12
1.1 Особливості планування систем мобільного зв’язку другого покоління на основі стандарту GSM…… 12
1.2 Особливості планування систем мобільного зв’язку третього покоління на основі стандарту UMTS…….. 13
1.3 Особливості планування систем мобільного зв’язку четвертого покоління LTE…… 14
1.4 Порівняльна характеристика технологій мобільного зв’язку стандартів 2-4G…….. 15
2 Методи планування і оптимізації мережі мобільного зв’язку 4G LTE……..…… 18
2.1 Концепція планування мережі LTE…….. 18
2.2 Особливості частотного планування мобільної мережі з ортогональним частотним розподілом каналів……... 22
2.3 Алгоритм частотно-територіального планування……... 24
2.4 Оптимізація мережі мобільного зв’язку LTE…….. 31
2.4.1 Структурна оптимізація……. 31
2.4.2 Параметрична оптимізація…… 32
2.5 Модель побудови початкового наближення мережі LTE на основі частотних кластерів…… 33
2.6 Кластерні моделі з повторним використанням частот……... 40
2.7 Синтез алгоритму початкового наближення мережі LTE…….. 43
3 Методика розрахунку параметрів мережі мобільного зв’язку 4G LTE……... 45
3.1 Методика розрахунку пропускної здатності мережі мережі мобільного зв’язку 4G LTE…… 45
3.2 Методика оцінка ємності проектованої мережі мобільного зв’язку 4G LTE…… 50

3.3 Розташування базових станцій на території місцевості……..... 51

3.4 Інтеграціїя проектованої мережі LTE в конвергентну мережу. 55

4 Методика визначення просторово-технічних параметрів мережі стандарту 4GLTE……. 57

4.1 Визначення структури і тип частотного кластера при розрахунку просторових параметрів мережі 4G LTE……. 57

4.2 Визначення просторових параметрів мережі 4G LTE……. 58

4.3 Оцінка середньої пропускної здатності та ємності мережі 4G LTE……... 64

5 Методика оцінки енергетичних складових радіоканалу в мережі мобільного зв’язку 4G LTE…… 68

5.1 Аналіз енергетичного бюджету радіолінії LTE……. 68

5.2 Методика оцінки ємності мережі LTE……... 74

5.3 Аналіз порівняння типів дуплексу…… 76

5.4 Аналіз вибору частотних діапазоныв роботи мережі LTE……. 77

5.5 Оцінка середньої пропускної здатності та ємності при передачі даних в мережі мобільного зв’язку LTE……. 80

6 Синтез блок-схеми алгоритму планування мережі мобільного зв’язку 4G LTE…….. 83

6.1 Вдосконалення блок-схеми алгоритм планування мережі мобільного зв’язку 4G LTE…….. 83

6.2 Рекомендації по вдосконаленню методики планування мережі мобільного зв’язку 4GLTE……. 85

Висновки……. 86

Перелік джерел посилання……..…… 87

Додаток А. Результати дослідження пропускної здатності низхідного каналу зв'язку технології 4G LTE…… 89

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

АФТ – антенно-фідерний тракт

БС – базова станція

ГІС – геоінформаційною системою

ЕМС – електромагнітна сумісність

ЗП – зон покриття

ЗПЗ – зон покриття за зв’язком

ЗО – зон обслуговування

ЗВП – зон взаємних перешкод

ММЗ – мережі мобільного зв’язку

ОПР – особа, яка приймають рішення

3GPP – 3rd Generation Partnership Project

4G – 4th Generation Band

CDD – Cyclic Delay Diversity

CDMA – Code Division Multiple Access

EPC – Evolved Packet Core

E-UTRAN – Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

FDD – Frequency Division Duplex

FDM – Frequency-Division Multiple

GW – Gateway

GSM – Global System for Mobile Communications)/3G

LTE – Long Term Evolution

MCS – Modulation and Coding Scheme

MBSFN – Multicast-broadcast single-frequency network

MIMO – Multiple Input Multiple Output

OFDM – Orthogonal frequency-division multiplexing

OFDMA – Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

QoS – Quality of Service

RSCP – Received Signal Code Power

SINR –Signal to Interference plus Noise Ratio

ВСТУП

Історія систем мобільного зв’язку налічує вже кілька десятиліть. Слід зазначити, що на сьогодні питання частотно-територіального планування в мережах мобільного зв’язку стандарту LTE (Long-Term Evolution) є найменш розробленими та потребують подальших досліджень. Зокрема, важливим є розв’язання задачі початкового наближення, коли вся мережа декомпонується на однорідні фрагменти, для яких визначаються розподіл базових станцій за зонами обслуговування, параметри базової мережі та розподіл частотного ресурсу [1].

Планування початкового наближення мережі мобільного зв’язку стандарту LTE має багато спільного з плануванням мереж мобільного зв’язку стандартів 2G (GSM – Global System for Mobile Communications)/3G (UMTS – Universal Mobile Telecommunications System), оскільки також являє собою покрокове визначення її просторово-технічних параметрів. Водночас побудова початкового наближення для більшості стандартів мереж мобільного зв’язку 2G/3G здійснюється для «тотальної» послуги, якою є передача голосової інформації. Знайдене ріщення, в процесі планування мережа мобільного зв’язку, буде рішенням, відносно якого проводяться оцінки зони покриття, абонентської ємності, якості зв’язку, швидкості передачи, пропускної здатності тощо для інших видів послуг [2], [3].

У кваліфікаційній роботі проводиться розробка питань вдосконалення методики планування початкового наближення мережі мобільного зв’язку 4G LTE на основі праметрів схем модуляції каналу, моделей та методів повторного використання радіочастотного ресурсу, моделей поширення радіохвиль.

У першому розділі проведиться япорівняльний аналіз концептуальних підходів, щодо планування мереж мобільного зв’язку.

Удругому розділі розглянуто методи планування і оптимізації мережі мобільного зв’язку LTE.

У третьому розділі наведено практичні аспекти розрахунку параметрів мережі мобільного зв’язку 4G LTE відповідно запропоновваній методиці планування.

У четвертому розділі проводиться аналіз методики визначення просторово-технічних параметрів мережі стандарту 4G LTE з метою запропонування вдосконалення методики планування.

У п’ятому розділі представлено методику оцінки енергетичних складових радіоканалу в мережі мобільного зв’язку 4G LTE і аспектів для подальшого вдосконалення алгоритму планування.

У шостому розділі запропоновано блок-схему алгоритму планування мережі мобільного зв’язку 4G LTE з урахуванням аспектів по вдосконаленню методики планування

1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНЦЕПТУАЛЬНИХ ПІДХОДІВ, ЩОДО ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1. Особливості планування систем мобільного зв'язку другого покоління на основі стандарту GSM

Для систем мобільного зв'язку на основі стандарту GSM характерне класичне частотно-територіальне планування:

- мережа будується на основі частотних кластерів;
- сусідні стільники використовують різні частоти;
- застосовується жорстке повторне використання частот;

Ключовими особливостями, що характеризують системи мобільного зв'язку стандарту стандарту GSM є:

- фіксовані радіоканали;
- структура кадруTDMA (Time Division Multiple Access);
- мережа чітко орієнтована на голосовий трафік;
- ємність системи, яка визначається кількістю таймслотів.

Показником якісного планування є виконання головного показника якості – зниження соканальних завад на основі виконання критерію SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) – захисного відношення сигнал/(завада+шум) [1]:

$$SNR = \frac{P_{сигн}}{\sum_{i=1}^{n} P_{i_зав} + P_{ш}}, \qquad (1.1)$$

- де $P_{сигн}$ - потужність корисного сигналу,Вт;
- $P_{i_зав}$ - потужність завадового сигналу,Вт;
- $P_{ш}$ - потужність теплового шуму,Вт.

Частотний кластер вибирається таким чином, щоб забезпечити допустиме співвідношення сигнал/завада.

1.2 Особливості планування систем мобільного зв'язку третього покоління на основі стандарту UMTS

В системах моіблього зв'язку третього покоління на основі стандарту UMTS усі стільники працюють на одній частоті, оскільки на фізичному рівні використовується технологія множинного доступу з кодовим розподілом каналів CDMA (Code Division Multiple Access) тому класичне частотне планування практично відсутнє.

Головна проблемою в даних мережах є внутрішньосистемна інтерференція.

До основних особливостей систем мобільного зв'язку UMTS слід віднести:

- регулювання потужності випромінювання передавачів базових і абонентських станцій в залежності від зміни навантаження (ефекти «Дихання сот»);
- при збільшенні навантаження зростає рівень завад і реалізується механізмзменшення радіусу соти (це один із ключових ефектів WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access);
- абонент може одночасно обслуговуватися кількома БС (базова станція) в режимі м'якого хендоверу (Soft Handover).

До переваг систем мобільного зв'язку третього покоління слід віднести:

- підвищення надійності зв'язку;
- зниження ймовірності блокування виклику.

Суттєвими недоліками вважають:

- збільшення вторинного трафіку;
- зростання навантаження в мережі.

Планування навантаженням в UMTS реалізують на основі алгоритму територіального покриття, яке безпосередньо залежить від завантаження з необхідністю враховування наступних показників якості:

- відношення енергії символа до потуності теплового шуму (Ec/No);
- показник рівня потужності прийнятого пілотного сигналу RSCP (Received Signal Code Power)
- показник зростання рівня внутрішньосистемних завад порівняно з фоновим шумом (interference rise).

Планування навантаженням (Load Planning) у мережах UMTS полягає у визначенні такої конфігурації радіомережі, за якої забезпечується необхідна ємність, якість обслуговування (QoS) та покриття при допустимому рівні завантаження комірок. На відміну від GSM, у UMTS система є інтерференційно-обмеженою. Це

означає, що головним фактором, який обмежує ємність мережі, є рівень внутрішньосистемних завад.

1.3 Особливості планування систем мобільного зв'язку четвертого покоління LTE

Основним завданням мереж мобільного зв'зяку LTE є забезпечення високої пропускної здатності на основі протоколів і процедур пакетної комутації і передачі даних.

Планування систем мереж LTE значно складніше за GSM, оскільки у якості технології абонетського доступу до ресурсів мережі здійснюється за допомогою технології OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

До ключових особливостей технології LTE слід віднести:

– у рамках використання технології множинного доступу OFDMA замість фіксованих каналів використовуються ресурсні блоки RB (Resource Block), тобто кожному абоненту динамічно виділяється частина ресурсу.

– у центрі соти всі базові станції можуть використовувати весь спектр із невеликою потужністю (Frequency Reuse Reuse = 1);

– у рамках розв'язання проблеми міжсотової інтерференції застосовуються процедури Soft Frequency Reuse (SFR – Soft Frequency Reuse),(FFR Fractional Frequency Reuse); ICIC(Inter-Cell Interference Coordination) та динамічного розподілу потужності;

– планування відбувається з використанням показника SINR і забезпечується якість на основі показників RSRP (Reference Signal Received Power), RSRQ (Reference Signal Received Quality);

– від показника SINR залежать: схема модуляції (MCS – Modulation and Coding Scheme), швидкість передачі, кількість використовуваних RB;

– планувальник центральний елемент мережі LTE (scheduler), який керує кількістю RB, пріоритетами; показниками QoS (Quality of Service); схемою модуляції MCS, потужністю передачі;

– використання багатоантенної технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) з просторовим мультиплексуванням, що суттєво впливає на покриття, ємність, енергетичний бюджет.

В таблиці 1.1 представлено данні, щодо порівняння методів оптимізації технологій GSM / UMTS / LTE. Відповідно китеріям головного завдання, типу оптимізації мережі, основного ресурсу, показника якості, основної проблеми. З аналізу даних табл.1.1 можна бачити, що гнучкість мережі LTE є надвисокою в порівнянні з іншими технологіями.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів оптимізації технологій GSM/UMTS/LTE

№	Критерій	GSM	UMTS	LTE
	1	2	3	4
1.	Головне завдання	Частотний поділ	Керування інтерференцією	Керування ресурсами
2.	Тип оптимізації	Частотна	Інтерференційна	Багатокритеріальна
3.	Основний ресурс	Частота	Код	RB
4.	Основний показник якості	C/I (відношення потужність несівної сиглалу/потужність завади)	Ec/No (відношення енергії біта до спектральной потужності теплового шуму)	SINR (відношення сиглал/завада+шум)
5.	Основна проблема	Соканальні завади	Внутгришня інтерференція	Міжсотова інтерференція
6.	Гнучкість мережі	Низька	Середня	Висока

1.4 Порівняльна характеристика технологій мобільного зв’язку стандартів 2-4G

Опираючись на проведений аналіз, мажно зробити певні висновки. В технології мобільного зв’язку GSM реалізовано просту та добре формалізовану систему планування. Основний акцент – частотний план і покриття з ефективністю для голосового трафіку. В технології мобільного зв’язку UMTS здійснено перехід до інтерференційно-обмежених мереж, де планування стало залежати від навантажен-

ня. З’явилися ускладнені процедури м’якого хендоверу (soft handover) і «дихання сот». Системи четвертого покоління LTE за критерієм планування відрізняються Багатокритеріальниістю.Основними завданнями при цьому є:

- покриття;
- ємність;
- швидкість;
- QoS;
- інтерференція.

Частотне планування замінено динамічним керуванням ресурсами.

В табл. 1.2 представлено дані, щодо порівняння GSM / UMTS / LTE за методикою планування радіомережі

Таблиця 1.2 – Порівняння GSM / UMTS / LTE за методикою планування

№	Параметр	GSM (2G)	UMTS (3G)	LTE (4G)
	1	2	3	4
1.	Основна послуга	Голосовий зв’язок	Голосовий зв’язок + пакетна передача даних	Високошвидкісна передача даних
2.	Метод доступу	FDMA/TDMA	WCDMA (кодовий поділ каналів)	OFDMA (DL), SC-FDMA (UL)
3.	Основний критерій планування	Покриття та частотний план	Покриття + ємність + інтерференція	Ємність + швидкість передачі + інтерференція
4.	Тип трафіку	Комутація каналів	Змішаний	Повністю пакетний
5.	Частотне планування	Жорстке повторне використання частот	Частотне планування мінімальне	Гнучкий розподіл ресурсних блоків
6.	Коефіцієнт повторного використання	N > 1	Зазвичай reuse = 1	reuse = 1, Soft/FFR
7.	Основний обмежувальний фактор	Частотні завади	Інтерференція	Міжсотова інтерференція

Продовження таблиці 1.2

№	Параметр	GSM (2G)	UMTS (3G)	LTE (4G)
	1	2	3	4
8	Планування покриття	За рівнем сигналу	За рівнем Ec/No, RSCP	За SINR, RSRP, RSRQ
9	Радіоресурс	Частотні канали	Коди	Ресурсні блоки (RB)
10	Планування ємності	За кількістю таймслотів	За навантаженням та interference rise	За RB і scheduler
11	Хендовер	Жорсткий	М'який (Soft HO)	Жорсткий
12	Роль планувальника	Мінімальна	Обмежена	Ключова
13	Вплив навантаження на покриття	Невеликий	Високий («дихання сот»)	Середній
14	Тип оптимізації	Частотно-територіальна	Інтерференційна	Багатокритеріальна
15	Основна модель мережі	Кластерна	Інтерференційна	Кластерно-ресурсна
16	Використання MIMO	Ні	Обмежене	Широко використовується
17	Основна мета оптимізації	Мінімізація завад	Баланс ємності та покриття	Баланс швидкості, ємності та покриття

Еволюція GSM → UMTS → LTE привела від статичного частотного планування до динамічного керування радіоресурсами та інтерференцією. При цьому складність проєктування мережі суттєво зросла, а основним критерієм ефективності LTE-мереж стала не лише зона покриття, а й забезпечувана користувачу швидкість передачі даних та ємність мережі.

2 МЕТОДИ ПЛАНУВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G LTE

2.1 Концепція планування мережі LTE

Аналіз стану та перспектив розвитку мереж мобільного радіозв'язку виявляє низку проблем загального характеру, основними з яких є [2], [3]:

– об'єктивна необхідність розширення діапазону використовуваних радіочастот для підвищення канальної ємності обладнання та пропускної здатності систем зумовлює додаткові труднощі під час планування мереж (вибір місць розгортання базових станцій та обґрунтування значень параметрів їх елементів);

– тривалий термін окупності вкладених коштів викликає необхідність визначення раціональної стратегії розвитку рухомих служб зв'язку з урахуванням особливостей конкретного району;

– збільшення кількості та динаміки користувачів на обмеженій території потребує забезпечення ефективного управління мережею.

Зазначені проблеми значною мірою можуть бути вирішені шляхом широкого використання технологій геоінформаційних систем (ГІС-технологій) під час планування мереж мобільного радіозв'язку.

При цьому геоінформаційною системою (ГІС) прийнято називати сукупність комп'ютерних засобів і програмного забезпечення, що дозволяє вводити, підтримувати, аналізувати та відображати всі види географічних і просторових об'єктів, а також інших даних, пов'язаних із ними. ГІС дає змогу виконувати комплексні просторові операції над множиною об'єктів і пов'язаними з ними даними.

Система планування повинна забезпечувати побудову мереж стільникового наземного мобільного радіозв'язку в діапазонах частот їх застосування, підвищення якості рішень, що приймаються під час вибору місць розташування базових станцій, а також можливість оптимізації структурно-топологічних і технічних характеристик мереж мобільного радіозв'язку.

ГІС також можуть застосовуватись для організаційно-технічного управління системами мобільного радіозв'язку.

Як геоінформаційні системи доцільно використовувати системи, що дозволяють працювати на різних платформах (Windows та ін.) і створювати застосунки, орієнтовані на конкретні задачі користувача.

Система повинна забезпечувати розрахунок:

– зон покриття (ЗП) БС, де рівень радіосигналу не нижчий за заданий, але при цьому не гарантується можливість радіозв'язку в усій зоні покриття;

– зон покриття за зв'язком (ЗПЗ) BS, у яких виконуються вимоги до якості зв'язку;

– зон обслуговування (ЗО) базових станцій (БС) за заданим рівнем поля на їх межі з контролем можливості забезпечення радіозв'язку в межах зони;

– зон взаємних перешкод (ЗВП) за основним і побічними каналами прийому, що визначаються накладанням ЗП на ЗО базових станцій, де відношення сигнал/завада менше захисного співвідношення.

Інструменти системи планування повинні забезпечувати побудову ЗО та ЗП як з урахуванням значень рівня поля всередині зони, так і без нього. В останньому випадку будується лише межа зони, в якій поле сигналу передавача БС перевищує заданий рівень.

План розміщення БС мережі та їх параметри (потужність передавача, втрати в антенному фідері, діаграма спрямованості антени, висота її встановлення та орієнтація) є вихідними для розрахунку і вводяться користувачем. План розміщення БС мережі та результати розрахунків ЗО і ЗП відображаються на карті. Рівні поля в зонах відображаються кольором.

Для розрахунку основних втрат під час поширення радіохвиль повинні враховуватись рельєф місцевості, план житлової забудови, наявність водойм і лісових масивів. Система має бути орієнтована на обов'язкове використання моделей поширення радіохвиль, описаних у рекомендаціях МККР, МСЕ та ін.

Зона покриття збігається із зоною обслуговування у випадку, якщо випромінювана потужність мобільних (абонентських) радіостанцій (МС) перевищує випромінювану потужність базової станції. При цьому дальність зв'язку визначається потужністю випромінювання базової станції. В іншому випадку, якщо потужність випромінювання МС менша за потужність випромінювання БС, то МС не зможе забезпечити необхідний рівень сигналу на вході приймача БС, перебуваючи на межі ЗП її передавача, і дальність зв'язку обмежується потужністю випромінювання МС.

Використовуючи теорему взаємності для базових втрат, можна здійснювати розрахунок зон покриття від абонентських радіостанцій різної потужності шляхом заміщення фактичного передавача БС на еквівалентний.

Випромінювана потужність еквівалентного передавача вважається рівною випромінюваній потужності передавача МС. За нормовану діаграму спрямованості (ДС) еквівалентної антени приймається нормована ДС приймальної антени БС. Зона покриття такого еквівалентного випромінювача і буде зоною обслуговування БС для абонентських станцій із заданими параметрами. У межах цієї зони забезпечується двосторонній радіозв'язок між МС і БС.

Якщо на БС використовується рознесений прийом, то під час розрахунку ЗО величина енергетичного виграшу за рахунок рознесеного прийому додається (при вираженні цих величин у децибелах) до коефіцієнта підсилення еквівалентної антени МС.

У системі має бути передбачена можливість розрахунку зон завад від усіх БС проєктованої мережі. Зона завад оцінюється у вигляді зони покриття передавача БС, у якій рівень електромагнітного поля перевищує мінімально допустимий рівень напруженості поля, зменшений на величину захисного відношення «сигнал/завада» у суміщеному (сусідньому) каналі прийому.

Достатньою умовою повного виключення завад у парі БС є відсутність взаємних перетинів ЗО та ЗВП.

Узагальнена функціональна схема системи частотно-територіального планування наведена на рис. 2.1 і містить три модулі:

1) Системний модуль, який містить застосунки ГІС, системні бібліотеки та файли проєктів.
2) Модуль електронної карти місцевості поточного проєкту, що включає такі таблиці:
   - лінії рівня;
   - квартали житлової забудови;
   - дороги (у розрахунках не використовуються);
   - водойми;
   - лісові масиви.
3) Модуль поточного проєкту, що містить таблиці вихідних даних і результати розрахунків за частотно-територіальним планом поточного проєкту.

Для розрахунку втрат поширення система повинна використовувати такі географічні дані:

- ізолінії висоти рельєфу місцевості над рівнем моря;
- квартали забудови;
- водні об'єкти (моря, озера, річки);

– лісові масиви.

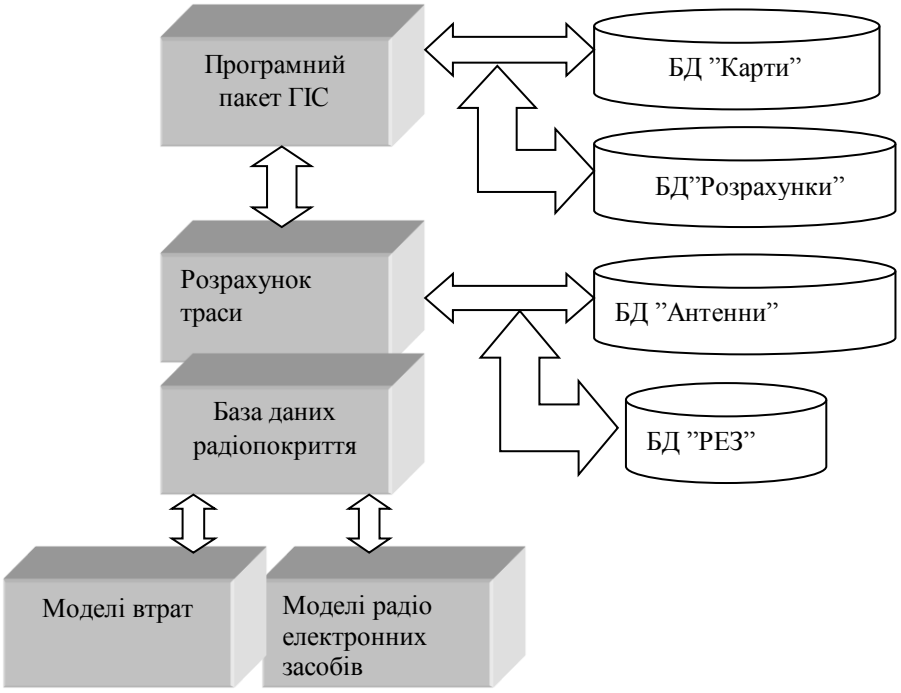


Рисунок 2.1 – Узагальнена функціональна схема системи планування мережі мобільного зв’язку

Геоінформаційний модуль, що входить до складу програмного комплексу, дозволяє налаштувати відображення карти та сформувати матрицю висот рельєфу місцевості, яка імпортується в програму та використовується під час виконання розрахунків.

Зони обслуговування розраховуються для кількох типів абонентських радіостанцій, що відрізняються рівнем еквівалентної випромінюваної потужності.
Зони покриття будуються з урахуванням діаграми спрямованості передавальної антени БС при заданій потужності на виході передавача з урахуванням втрат у комбайнері та в антенно-фідерному тракті (АФТ).

Під час формування таблиці вихідних даних для планування виконується вибір антени для кожної БС і задається потужність її передавача.

Система дозволяє отримати дані про внутрішньосистемну електромагнітну сумісність (ЕМС), на основі яких можна побудувати або оптимізувати частотний план мережі. Для цього будуються ЗП БС до рівня, що дорівнює рівню на межі ЗО, зменшеному на величину захисного відношення. Перетини таких зон покриття із зонами обслуговування являють собою зони можливих завад. За таким принципом система розраховує таблицю взаємних завад БС мережі (матриця ЕМС).

Дані про рівні поля сигналів і завад усередині зон обслуговування та покриття дозволяють розв'язати задачу аналізу ЕМС, зокрема з урахуванням алгоритмів регулювання потужностей передавачів абонентських і базових станцій, виділення каналів рухомим абонентам і передачі із зони в зону.

Слід зазначити, що в реальній мережі завади можуть бути відсутні навіть у разі часткового перетину ЗО та ЗВП. У процесі проєктування це потребує додаткового розгляду.

Під час розв'язання цієї задачі необхідно виходити з того, що в мережах мобільного зв'язку рівень внутрішньосистемної завадозахищеності визначається за інших рівних умов характером регулювання потужностей передавачів абонентських і базових станцій та низкою інших факторів, наприклад алгоритмами естафетної передачі абонентів, надання каналу й іншими особливостями системи радіозв'язку.

Операторам мереж мобільного радіозв'язку пропонуються різноманітні системи частотно-територіального планування, які відрізняються набором функціональних можливостей, вартістю, умовами постачання та масштабами впровадження в країні.

До найбільш відомих закордонних систем частотно-територіального планування належать програмні продукти, розроблені компаніями AIRCOM, Ericsson, Forsk, Agilent Technologies, Nokia та ін.

Усі перелічені системи побудовані на основі ГІС-технологій. Із них можливість планування мереж останнього покоління (LTE) підтримується лише програмним забезпеченням TEMS CellPlanner (Ericsson, Швеція), Atoll (Forsk, Франція).

2.2 Особливості частотного планування мобільної мережі з ортогональним частотним розподілом каналів

До систем мобільного зв'язку з ортогональним частотним розподілом каналів належать мережі стандарту LTE. Однією з ключових особливостей LTE є можливість розгортання мережі в уже існуючих діапазонах систем GSM і W-CDMA. Такий процес називається повторним використанням спектра (рефармінгом частотного ресурсу).

Можливість реалізації повторного використання спектра визначається низкою факторів: шириною доступної смуги частот, вимогами до якості обслугову-

вання абонентів, географічними умовами, характеристиками базового й абонентського обладнання, а також обраною моделлю повторного використання частот.

Технологія LTE допускає використання смуги частот, починаючи від 1,4 МГц із подальшим розширенням до 3, 5, 10, 15 і 20 МГц. Це дозволяє поетапно перетворювати діючі мережі GSM/W-CDMA у мережі LTE. На початковому етапі оператор може виділити під LTE мінімальну смугу 1,4 МГц, а потім поступово збільшувати ширину каналу в міру зниження навантаження на застарілі мережі GSM. Такий підхід забезпечує плавний перехід абонентів на нову технологію зв'язку при мінімальних одноразових витратах [4].

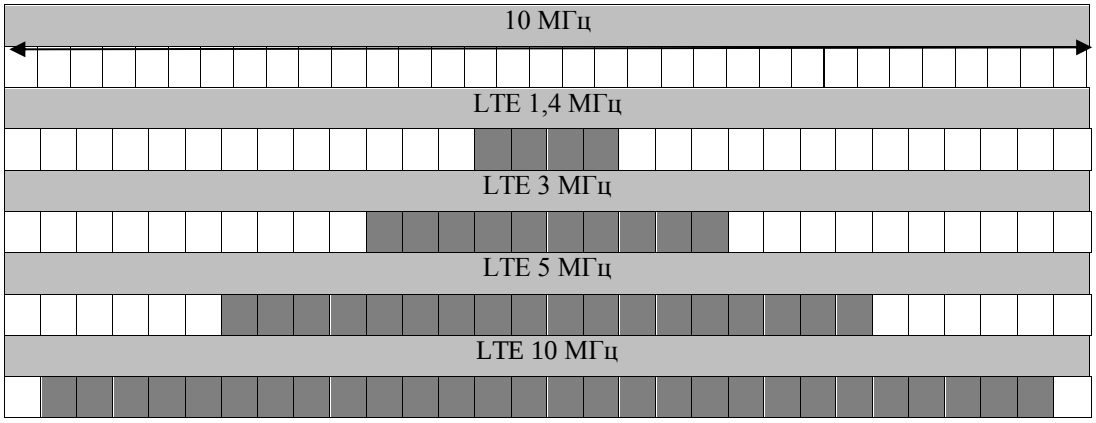


Рисунок 2.2 – Реформування спектра GSM під спектр LTE [4]

Можливі такі варіанти використання частотних смуг мережами LTE та LTE з повторним використанням спектра W-CDMA/GSM [4]:

– GSM-900 (доступний частотний ресурс 35 МГц, використовується двома–чотирма операторами зі смугами менше 10 МГц) — канали LTE шириною 1,4–5 МГц;

– GSM-1800 (доступний частотний ресурс 75 МГц, використовується двома–чотирма операторами «другої хвилі GSM» зі смугами понад 10 МГц) – канали LTE шириною 5–10 МГц;

– W-CDMA-2100 (доступний частотний ресурс 60 МГц, використовується операторами зі смугами понад 10 МГц) – канали LTE шириною 5–10 МГц;

– LTE-2300–2400 (доступний частотний ресурс 70 МГц) — допускається використання каналів шириною 5, 10 і 15 МГц.

При спільному використанні однієї й тієї самої смуги частот сегментами GSM і LTE необхідно забезпечити частотне рознесення їхніх несучих. Рекомендації щодо цього наведені в табл. 2.1.

Доцільно, щоб мережа LTE та існуюча стільникова мережа мобільного зв’язку стандарту GSM, на яку передбачається «накладання» мережі LTE, мали однакову зону обслуговування, а базові станції цих мереж розташовувалися в спільних позиційних районах. Можливість такого побудування мережі GSM/LTE можна перевірити шляхом оцінки бюджетів втрат на лініях «вгору» та «вниз». Нагадаємо, що бюджет втрат є показником, який характеризує допустимі втрати в радіолінії для заданого стандарту стільникового мобільного зв’язку.

Таблиця 2.1 – Рекомендації щодо рознесення частот [4]

Смуга частот, яку займає система LTE, МГц	Рознесення по частоті, МГц
10 (50 ресурсних блоків)	5
5 (25 ресурсних блоків)	2,5
3 (15 ресурсних блоків) Н	1,6
1,4 (6 ресурсних блоків)	0,8

Для розрахунку бюджету втрат і зон покриття базових станцій мережі GSM/LTE можна скористатися відповідними методиками та довідковими даними. Оцінки бюджету втрат і зон покриття базових станцій мережі GSM/LTE показують, що сегменти GSM і LTE, які працюють в одній смузі частот, мають близькі значення допустимих втрат на трасі та подібні зони покриття.

При цьому сегмент LTE може бути «накладений» на діючу мережу мобільного зв’язку стандарту GSM і мати з мережею GSM спільну зону обслуговування та однакові місця розташування базових станцій. Це повністю вирішує проблему визначення просторових параметрів сегмента LTE, і надалі необхідними залишаються лише оцінка ємності та побудова частотного плану сегмента LTE, «накладеного» на діючу мережу стільникового мобільного зв’язку стандарту GSM.

2.3 Алгоритм частотно-територіального планування

Розглянемо детальніше побудову мережі LTE-2300–2400. У цьому випадку необхідно повністю визначити просторові параметри мережі. Складність розв’язання цього завдання передбачає використання методу наближень відповідно до алгоритму частотно-територіального планування, наведеного на рис. 2.3,

який розкриває послідовність і зміст етапів побудови початкового наближення та оптимізації мережі.

Для підвищення точності побудови початкового наближення мережі вся територія обслуговування LTE-2300–2400 умовно поділяється на фрагменти з однорідною морфоструктурою місцевості (відкрита місцевість, приміський район або міська забудова) та однаковою щільністю абонентського трафіку. Відповідно, розміри зон обслуговування та параметри всіх базових станцій у межах цих територій приймаються однаковими.

Під час початкового планування радіомережі мобільного радіозв'язку статистичні дані про роботу мережі відсутні.

У зв'язку з цим обґрунтованість рішень, що приймаються на етапі планування, залежить від точності вихідних даних і використовуваних математичних моделей, коректності формулювання поставлених задач і методик оцінювання параметрів мережі, спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє моделювати основні параметри мережі мобільного зв'язку на основі використання адекватних моделей, а також від досвіду осіб, які приймають рішення (ОПР).

До основних груп показників оцінювання ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку на етапі планування можна віднести:

– показники, що характеризують якість ведення інформаційного обміну (якість послуг);

– системні показники, що характеризують просторово-технічні параметри мережі мобільного зв'язку;

– економічні показники, що характеризують вартість побудови (модернізації) мережі мобільного зв'язку, вартість експлуатації та прибуток від комерційної експлуатації мережі;

– експлуатаційні показники, що характеризують організацію процесу управління мережею та підтримання її у працездатному стані.

Показники якості послуг характеризують ведення інформаційного обміну абонентів як між собою, так і з мережевими інформаційними ресурсами.

До основних показників якості послуг, що враховуються на етапі планування, слід віднести доступ до мережі, доступ до послуги, безперервність і повноту послуг.

До основних системних показників мереж мобільного зв'язку належать просторово-технічні параметри мережі (обладнання базових станцій і антен), функціональні параметри мережі (розподіл частотних смуг, канали доступу, параметри

хендовера тощо), тематичні карти просторового розподілу основних характеристик мережі (покриття, інтерференції, доступних видів модуляції та швидкостей передавання, розподілу трафіку передавання мови й даних тощо), табличні значення площинних параметрів мережі (площі зон покриття мережі/БС/сектора, пропускної здатності мережі/БС/сектора, втрат покриття сектора через інтерференцію, втрат трафіку мережі/БС/сектора через інтерференцію тощо).



Рисунок 2.3 – Алгоритм частотно-територіального планування мережі

До основних економічних показників слід віднести показники, що характеризують витрати, доходи та ефективність бізнесу оператора.

До основних експлуатаційних показників мереж мобільного зв'язку належать організаційні (прийнята система управління та організаційна структура служби експлуатації, рівень кваліфікації та наявність досвіду роботи управлінського

й технічного персоналу, організація гарантійного та післягарантійного обслуговування і ремонту обладнання та програмного забезпечення), функціональні (обсяг, періодичність збору та аналізу статистичних даних про роботу мережі; час виявлення, прийняття рішення та усунення аварійної ситуації), матеріально-технічні (наявність матеріальних запасів і підмінного фонду обладнання, наявність сертифікованого вимірювального обладнання для проведення моніторингу мережі мобільного зв'язку) тощо.

Таким чином, ефективність функціонування мереж мобільного зв'язку оцінюється досить великою кількістю показників, які необхідно враховувати під час прийняття рішень на етапі планування мережі. Визначальним при проєктуванні мережі мобільного зв'язку 4GLTE є планування радіомережі, що являє собою ітеративний процес із виконанням таких кроків [5]:

- синтез структури мережі;
- призначення частот/кодових зсувів;
- прогнозування напруженості поля сигналу в зоні дії мережі радіозв'язку;
- аналіз зони обслуговування для кожної комірки та мережі загалом;
- оцінювання внутрішньосистемної електромагнітної сумісності;
- аналіз функціонування мережі з урахуванням взаємних завад.

Елементами радіомережі є базові станції. Базові станції, що знаходяться на достатній відстані одна від одної, можуть повторно використовувати одну й ту саму частоту/кодовий зсув. Під час опису процедури синтезу необхідно враховувати тип системи. Процес планування здійснюється поступово, крок за кроком, і виливається у пропозиції щодо побудови мережі радіозв'язку та аналізу її роботи.

Часова та логічна послідовність дій під час планування радіомережі містить низку етапів [6]:

1) Отримання вихідних даних.

2) Калібрування математичної моделі поширення радіохвиль на основі вимірювань напруженості поля в найбільш характерних точках зони обслуговування мережі.

3) Побудова мережі початкового наближення.

4) Прив'язка ділянок розгортання базових станцій, визначених планом побудови мережі (початкового наближення), до місцевості та ітеративна оптимізація мережі при широкому використанні засобів програмного забезпечення, що підтримують функції синтезу мережі та аналізу експлуатаційних характеристик.

Очевидно, що на результати планування суттєво впливають системні фактори, посилюючи складність і неоднозначність вирішення задачі планування мережі.

Задача планування стільникової мережі може бути сформульована як задача пошуку такої мережі радіозв'язку s", яка задовольняє вихідні вимоги (обмеження) і при цьому має значення сукупності (вектора) показників якості K(s"), найкраще в сенсі безумовного критерію переваги $K(s") \leq K(s')$. Якщо виконується ця умова, то кожен із показників якості оптимізованої мережі повинен бути не гіршим, ніж у вихідної мережі, причому щонайменше один із цих показників якості має бути кращим, ніж у мережі s' [7], [8].

У такій постановці задача планування мережі належить до задачі векторної (багатокритеріальної) оптимізації.

Слід зазначити, що методи векторного синтезу (оптимізації), засновані на безумовному критерії переваги, забезпечують знаходження «не найгіршого рішення», а в математичному відношенні зводяться до мінімізації єдиного показника – апаратного або частотного ресурсу мережі.

Під час планування використовуються характеристики відповідного стандарту, приймально-передавального обладнання та антен, умови поширення радіохвиль, необхідна напруженість поля корисного сигналу на вході приймальних пристроїв, допустиме співвідношення «сигнал/завада», навантаження на одного абонента, допустиме блокування викликів тощо.

Особливу важливість мають питання, пов'язані з енергетичним балансом між елементами мережі, оскільки від їх вирішення залежать основні параметри стільникової мережі.

Якісне проєктування радіомережі повинно задовольняти очікувану щільність трафіку при мінімальній кількості встановленого радіообладнання з урахуванням можливості збільшення пропускної здатності мережі при зростанні запитів на передавання трафіку.

Ця задача може вирішуватися за рахунок оптимізації місць розташування базових станцій, потужності передавачів, висоти антен та їх типів.

Успішно вирішити поставлену вище задачу можна лише шляхом поєднання методів математичного синтезу, пов'язаного із суттєвою ідеалізацією мережі, з евристичним синтезом, під яким розуміють складний творчий процес, що полягає у пошуку прийнятних рішень на основі використання накопичених даних та інженерного досвіду.

У зв’язку з цим доцільно виконати декомпозицію загальної задачі на низку часткових задач, у вирішенні яких обов’язковими є активна участь експертів і застосування спеціального програмного забезпечення.

Алгоритм частотно-територіального планування мережі включає низку етапів (рис. 2.3).

Перший етап планування полягає у підготовці електронної карти місцевості (ЕКМ), що містить дані, які описують рельєф місцевості, забудову території, лісові та водні масиви, а також у отриманні достовірних даних щодо:

- висоти місцевості;
- морфоструктури (землекористування);
- розподілу населення, транспортних потоків та інших факторів, що впливають на щільність трафіку;
- прогнозу кількості абонентів;
- вимог до робочих характеристик для забезпечення відповідної якості радіозв’язку;
- ймовірності блокування;
- бюджету втрат;
- рекомендованих ділянок для розміщення базових станцій, що відповідають вимогам щодо наявності ліній прив’язки до мережі зв’язку загального користування, електроживлення, можливості розміщення обладнання, встановлення антен тощо;
- наявних у розпорядженні смуг частот;
- сумісності з іншими системами;
- мережевих інтерфейсів.

Очевидно, що для планування мережі потрібен досить великий набір вихідних даних, достовірність яких може суттєво вплинути на адекватність прийнятого рішення.

На цьому етапі проводиться оцінювання бюджету втрат – показника, що характеризує допустимі втрати в радіолінії для заданого стандарту стільникового мобільного зв’язку.

Другий етап полягає у побудові вихідної мережі (мережі початкового наближення). На цьому етапі вся мережа декомпозується на однорідні фрагменти на основі значень щільності трафіку, стосовно яких визначаються розподіл базових станцій за зонами обслуговування, параметри базової мережі та розподіл частотного ресурсу (кодових зсувів).

Такий підхід до побудови мережі (на основі абонентської ємності) призводить до однакових розмірів сот у межах фрагмента мережі та необхідності вирішення задач стикування неоднорідних фрагментів мережі на їхніх межах, тобто до необхідності вирішення задач розщеплення сот.

При використанні розщеплення можливі два типи сот: з однаковими секторами («великі» та «малі» соти) і з різними секторами («перехідні» соти). Рішення, отримане на етапі побудови вихідної мережі, є найважливішим етапом планування і повинно являти собою частотно-територіальний план стільникової мережі радіозв'язку, який може бути використаний як мережа початкового наближення.

Більш детально питання побудови початкового наближення стільникових мереж мобільного зв'язку з частотно-часовим, кодовим та ортогональним частотним розділенням каналів розглядаються далі.

Третій етап включає прив'язку ділянок розгортання базових станцій до карти місцевості та ітеративну оптимізацію параметрів базової мережі з використанням геоінформаційної бази даних і спеціального програмного забезпечення, що дозволяє здійснювати розрахунок напруженості поля сигналу в зоні дії мережі. Оптимальний набір просторово-технічних параметрів мережі найбільшою мірою повинен відповідати умовам функціонування мережі мобільного зв'язку (ММЗ) у годину найбільшого навантаження.

Основними факторами, що ускладнюють процедуру оптимізації просторово-технічних параметрів ММЗ, є необхідність урахування різних показників якості мережі, які часто мають суперечливий характер, а також неможливість використання строгих математичних методів оптимального синтезу через складність системи та процесів, що в ній відбуваються.

Найбільш конструктивним, як зазначалося раніше, є застосування методів багатокритеріальної (векторної) оптимізації, які передбачають декомпозицію всієї процедури оптимізації на низку етапів з активною участю на кожному з них осіб, які приймають рішення (ОПР).

Ітеративна оптимізація параметрів базової мережі початкового наближення проводиться з метою підвищення ефективності мережі при широкому використанні методів моделювання та електронних карт місцевості. У процесі оптимізації всі введені на етапі побудови початкового наближення припущення знімаються та здійснюється уточнення параметрів відповідно до умов реальної мережі, аналіз мережі, адаптація плану розгортання радіомережі до умов територіальних обме-

жень зони обслуговування, покращення її конфігурації, структури та параметрів з метою нарощування ємності мережі та підвищення якості послуг.

При цьому виникає необхідність уточнення частотно-територіального плану, отриманого раніше, оскільки змінюються місця розташування базових станцій та їх параметри. Автоматизація процесу розрахунку параметрів мережі мобільного зв'язку здійснюється з використанням програмного комплексу, узагальнена функціональна схема якого наведена на рис. 2.1.

2.4 Оптимізація мережі мобільного зв'язку LTE

На етапі оптимізації можливі зміни конфігурації БС, вибір антен та задання їхньої спрямованості з метою задоволення вимог до якості обслуговування, пропускної здатності та забезпечення послуг при мінімальних витратах. У процесі вирішення задачі здійснюється структурна та параметрична оптимізація мережі мобільного зв'язку.

2.4.1 Структурна оптимізація

Структурна оптимізація відбувається на основі здійснення прив'язки ділянок розгортання базових станцій, визначених планом побудови мережі початкового наближення, до місцевості та проводиться ітеративна оптимізація при широкому використанні геоінформаційної бази даних і спеціального програмного забезпечення, що підтримує функції аналізу зон обслуговування базових станцій. У процесі уточнення місцеположення базових станцій та визначення потужності передавачів, висоти й типів антен та їх орієнтації остаточне рішення знаходять ітераційним методом.

Якісна оптимізація радіомережі повинна задовольняти очікувану щільність трафіку (яка закладається замовником для даних обслуговування абонентів) при мінімальній кількості встановленого радіообладнання з урахуванням можливості збільшення пропускної здатності мережі при зростанні запитів на передавання трафіку. Ця задача, насамперед, може вирішуватися за рахунок оптимізації місць розташування БС, у ході якої здійснюється:

- прив'язка БС до місцевості;
- побудова тіньової карти;
- встановлення репітерів;

– урахування вторинного трафіку.

М’яка естафетна передача абонентів (м’який хендовер) у мережах із кодовим розділенням каналів можлива в тих випадках, коли МС супроводжуються кількома БС. Тому, крім розрахунку корисного трафіку, необхідно враховувати й вторинний. При збільшенні навантаження та розширенні зони покриття частка вторинного трафіку природним чином зменшуватиметься за рахунок скорочення кількості вільних сусідніх секторів і кількості вільних каналів. Вважається, що для нормальної роботи мережі достатньо, щоб вторинний трафік становив 30–40 % від основного.

Оптимізація мережевої структури передбачає мінімізацію кількості БС при задоволенні заданих системних параметрів і забезпеченні якості послуг.

Оптимізація може полягати у переміщенні деяких БС на нове місце або збільшенні кількості секторів. В останню чергу розглядаються варіанти, що потребують збільшення кількості БС, оскільки це призводить до подорожчання мережі.

Одним із методів структурної оптимізації мережі є використання ретрансляторів (репітерів). Репітери можуть встановлюватися в місцях із низьким рівнем сигналу (у тунелях, будівлях, підземних автостоянках тощо) і тим самим розширюють зону покриття мережі.

2.4.2 Параметрична оптимізація

Здійснюється переважно шляхом зміни характеристик антенних пристроїв і потужності передавачів базових станцій. Вибір антен БС з кращими характеристиками підсилення та рівнем бічних пелюсток, зміна орієнтації антен, їх висоти та нахилу пелюстки основного випромінювання дозволяють покращити якість частотно-територіального плану.

У процесі антенної оптимізації вирішується задача вибору кутів нахилу та азимутів антен. Зокрема, керування кутами нахилу та азимутами антен дозволяє зменшити внутрішньосистемну інтерференцію та здійснювати регулювання зони обслуговування БС за рахунок концентрації й утримання потужності сигналу в межах соти, покращити якість м’якого хендовера та скоротити зони типу «soft/softer», коли мобільна радіостанція супроводжується 2–3 базовими станціями одночасно, і відповідно збільшити абонентську ємність мережі.

Особливості експлуатації мереж зв’язку з кодовим розділенням каналів полягають у тому, що базові станції мають відносно низький рівень потужності, а

достатньо великий відсоток абонентів перебуває в режимі постійного перемикання між двома та більше сотами.

Зменшення надлишкового перекриття між ними за рахунок регулювання зон покриття залежно від навантаження на соту (кількість абонентів, обсяг трафіку даних тощо) зменшує інтерференцію від сусідніх БС та виключає надлишкові перемикання суміжних базових станцій.

Цю проблему вирішує застосування антен БС з електрично регульованим кутом нахилу діаграми спрямованості (ДС), які забезпечують формування чіткіших меж уздовж зони покриття. Ефект зменшення площі ДС у міру збільшення кута нахилу можна порівняти з ефектом «закривання парасолі». У системах з електричним керуванням ефект від нахилу ДС майже однаковий в усіх азимутальних напрямках, що дозволяє зберігати форму ДС при зміні кутів нахилу.

Проблему локальних тіньових зон, що виникають усередині зон обслуговування БС через вплив великих неоднорідностей (наприклад, висотних будівель), можна вирішувати шляхом зміни висоти підвісу антен БС. У міру підняття антени передавача БС над міською забудовою швидко зникають відбиття в її найближчому оточенні та збільшується кількість майданчиків на будівлях, які «освітлюються» передавачем. Їх щільність зростає в напрямках, протилежних напрямку на джерело випромінювання. Переважний вплив мають відбиття від цих майданчиків, що відбуваються за законами, близькими до законів геометричної оптики.

Таким чином, у процесі оптимізації знаходиться варіант, у якому топологічна структура, технічні параметри мережі мобільного зв’язку та сформований частотно-територіальний план забезпечують вирішення поставленої задачі.

2.5 Модель побудови початкового наближення мережі LTE на основі частотних кластерів

У процесі планування слід виходити з бюджету втрат і заданого частотного ресурсу (смуги частот), яким володіє мережа. Частотний ресурс мережі визначає кількість ресурсних блоків і, відповідно, пікові швидкості передавання даних у каналах «вгору» та «вниз». Проведемо оцінку бюджету втрат мережі LTE-2300-2400 за заданих смуг частот [9].

Завдання побудови початкового наближення мережі LTE може бути сформульоване таким чином. За заданої смуги частот необхідно визначити просторові параметри мережі (кількість базових станцій і розміри їхніх зон обслуговування)

за умови, що пікові швидкості передавання даних по лініях «вниз» і «вгору» є максимальними, а кількість базових станцій у складі мережі не перевищує допустимого значення.

Іншим варіантом може бути розв'язання задачі мінімізації кількості базових станцій у складі мережі за заданих значень пікових швидкостей передавання даних по лініях «вниз» і «вгору».

У мережі LTE-2300-2400, на відміну від GSM 900/1800, як зазначалося раніше, кожній абонентській станції для інформаційного обміну призначається ресурсна сітка, яка складається з піднесучих частот, згрупованих у ресурсні блоки.

Ресурсний блок містить 12 піднесучих частот із кроком Δf =15 кГц (усього 180 кГц). Кожній абонентській станції залежно від ширини смуги частот каналу на певний час може бути виділено деяку кількість ресурсних блоків [9] – [12].

Таким чином, під час частотного планування мережі LTE-2300-2400 слід оперувати не окремими частотами, а смугами частот.

Розглянемо можливість побудови початкового наближення мережі LTE-2300-2400 на основі частотних кластерів. Нагадаємо, що основним критерієм під час вибору частотного кластера є виконання вимог щодо допустимого співвідношення «сигнал/завада» (с/з) у точці приймання за основним і побічним каналами.

Величина (с/з) (порогове співвідношення «сигнал/завада»), як правило, є відомою.

Для вибору типу кластера (С) необхідно задатися значенням імовірності того, що відношення «сигнал/завада» у точці приймання виявиться нижчим за необхідне Р(С).

Як завади в цьому випадку розглядаються завади абонентським станціям, які створюють базові станції сусідніх кластерів, що працюють на повторно використовуваних частотах. Імовірність невиконання вимог щодо допустимого відношення «сигнал/завада» у точці приймання Р(С) оцінює стійкість зв'язку під час переміщення мобільного абонента в зоні обслуговування мережі.

Оптимальним буде кластер, для якого $P(C) \leq P(C)$.

Конфігурація частотного кластера безпосередньо впливає на ємність усієї мережі загалом. На практиці можуть застосовуватися моделі жорсткого, дробового та м'якого повторного використання частот.

При жорсткому повторному використанні частот уся робоча смуга частот поділяється на фіксовану кількість смуг, які призначаються сотам, що входять до кластера. При цьому виключається можливість виникнення міжсотової інтерфе-

ренції в кластері, тобто призначення однакових смуг частот у сотах кластера є недопустимим.

При дробовому повторному використанні частот уся робоча смуга частот поділяється на фіксовану кількість смуг. У кожній соті, що входить до кластера, для «ближніх» користувачів використовується одна й та сама смуга частот.

При цьому всі соти недовикористовують робочу смугу частот, оскільки інші смуги частот розподілені між базовими станціями кластера для обслуговування «дальніх» користувачів. Розподіл цих смуг частот на межах сот здійснюється з урахуванням виключення можливості виникнення міжсотової інтерференції в кластері.

При м’якому повторному використанні частот уся смуга частот поділяється на фіксовану кількість смуг. Кожна сота кластера використовує всю смугу робочих частот, але одна зі смуг частот виділяється користувачам, які перебувають на межі соти («дальнім» користувачам). Розподіл цих смуг частот на межах сот, що входять до кластера, здійснюється з урахуванням виключення можливості виникнення міжсотової інтерференції в кластері.

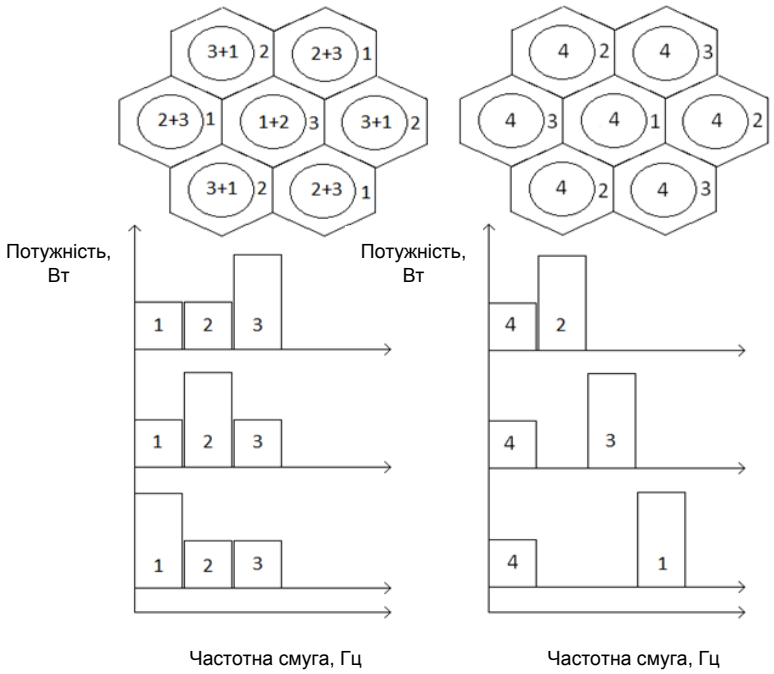
Класифікація користувачів на «ближніх» і «дальніх» ґрунтується на відстані між базовою станцією та користувачем, оціненій за потужністю прийнятого пілотного сигналу.

Жорстке повторне використання частот застосовується в мережах GSM 900/1800. Раніше було показано, що коефіцієнт повторного використання частот у мережі GSM 900/1800, побудованій на основі частотних кластерів, залежить від розмірності кластера та параметрів морфоструктури мережі.

У разі м’якого повторного використання частот кожна базова станція використовує всю робочу смугу частот, і коефіцієнт повторного використання частот у мережі залежить лише від кількості базових станцій у мережі. При дробовому повторному використанні частот уся робоча смуга частот використовується лише в кластері, а коефіцієнт повторного використання частот у мережі залежить від розмірності кластера та параметрів морфоструктури мережі.

Отже, застосування м’якого повторного використання частот призводить до зростання ємності мережі та до збільшення коефіцієнта повторного використання частотного ресурсу мережі. Застосування дробового повторного використання частот є менш ефективним.

Приклади несекторизованих кластерів при м’якому та дробовому повторному використанні частот наведені на рис. 2.4 [9].



а) б)

а – м’яке повторне використання частот із трьома піднесучими;

б – дробове повторне використання частот із чотирма піднесучими.

Рисунок 2.4 – Приклади схем м’якого та дробового повторного використання частот:

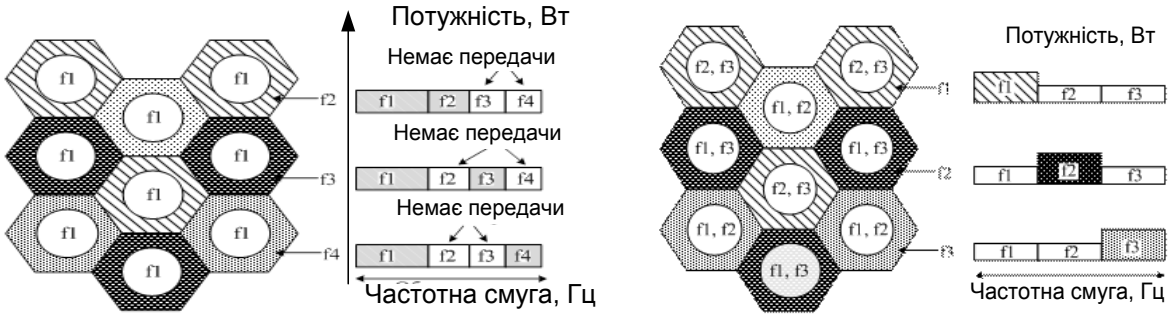
При м’якому повторному використанні частот загальний частотний ресурс поділяється на смуги на піднесучих частотах (у нашому випадку — на трьох піднесучих f1, f2, f3).

Для «ближніх» користувачів у центрі сот використовуються дві смуги частот (рис. 2.5.1). Для «дальніх» користувачів на краях сот, які утворюють кластер розмірністю N=3 використовується по одній смузі частот.

Таким чином, «дальні» користувачі не зазнаватимуть інтерференції від сусідніх сот.

Усі базові станції кластера повністю використовують частотний ресурс. Коефіцієнт повторного використання частот у кластері дорівнює трьом.

При дробовому повторному використанні частот загальний частотний ресурс поділяється на смуги на піднесучих (у нашому випадку – на чотирьох піднесучих частотах).



а) б)

Рисунок 2.5 – Побудова стільникової мережі на основі несекторизованих кластерів [9]:

а) з м’яким повторним використанням частот;

б) з дробовим повторним використанням частот.

На рис. 2.5 а) показано розподіл частотних смуг (f2, f3, f4) для користувачів на краях сот («дальніх» користувачів), які утворюють кластер розмірністю C=3.

Користувачі в центрі сот («ближні» користувачі) використовують смугу частот на піднесучій f1.

При цьому «дальні» користувачі не зазнаватимуть інтерференції від сусідніх сот, і досягається повне використання частотного ресурсу в кластері.

Слід зауважити, що застосування секторних антен у цьому конкретному варіанті поділу загальної смуги частот на піднесучі дає змогу досягти повного використання частотного ресурсу в соті та збільшити, таким чином, коефіцієнт повторного використання частот у мережі, який дорівнюватиме кількості базових станцій у мережі.. Приклад секторизованого кластера розмірністю (7, 21) при м’якому повторному використанні частот наведено на рис. 2.6.

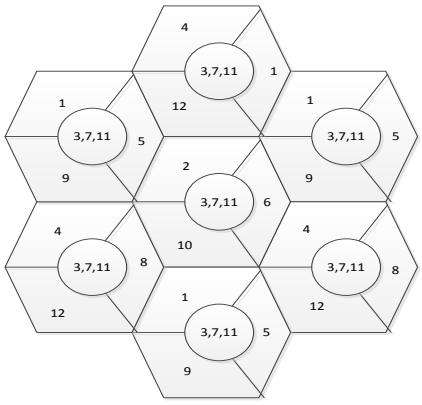


Рисунок 2.6 – Побудова стільникової мережі на основі секторизованих базових станцій із дробовим повторним використанням частот [10]

Однак при цьому не виключається можливість виникнення інтерференції від сусідніх сот (секторів).

Тут загальний частотний ресурс поділяється на смуги частот на семи піднесучих частотах. Для «ближніх» користувачів у центрі сот використовуються по чотири смуги частот. Для «дальніх» користувачів у секторах на краях сот, що утворюють кластер, використовується по одній смузі частот.

Таким чином, «дальні» користувачі не зазнаватимуть інтерференції від сусідніх сот. Усі базові станції кластера повністю використовують частотний ресурс.

Встановлення різних потужностей передавання ресурсних блоків забезпечує можливість застосування в мережі мобільного зв'язку стандарту LTE різних моделей повторного використання частот, починаючи від повного повторного використання з однаковою потужністю для всіх ресурсних блоків і переходячи до жорсткого, дробового та м'якого повторного використання частот. Повне повторне використання частот передбачає використання кожною сотою, незалежно від місцезнаходження абонентів у соті, усієї смуги частот.

Розподіл ресурсних блоків користувачам у цьому випадку здійснює планувальник базової станції.

Розклад щодо розподілу ресурсів базова станція повідомляє абонентським станціям через спеціальний керуючий канал.

Розподіл частотного ресурсу для «ближніх» і «дальніх» користувачів при застосуванні дробового або м'якого повторного використання може змінюватися залежно від навантаження та інших характеристик мережі, тому можливі й інші варіанти частотних кластерів.

Після оцінки бюджету втрат і визначення конфігурації частотного кластера з'являється можливість визначити просторові параметри мережі (кількість базових станцій і розміри їхніх зон обслуговування), параметри базових станцій, скласти частотний план та оцінити ємність мережі LTE.

Планування за ємністю та за покриттям у мережі LTE, як і в мережах інших стандартів, є взаємопов'язаними.

Метою планування за покриттям є забезпечення працездатності мережі та її сервісів у заданій зоні. Метою планування за ємністю є виконання вимог щодо трафіку, зменшення кількості відмов і зниження затримок в обслуговуванні.

Практика показує, що для досягнення балансу між покриттям та ємністю доцільно використовувати не менше двох ієрархічних рівнів (сегментів) мереж, які працюють у різних частинах діапазону частот. Частоти одного сегмента по-

винні бути нижчими за частоти іншого. При цьому на різних рівнях можуть використовуватися різні радіотехнології. Наприклад, у міських умовах за високої щільності абонентів зони обслуговування базових станцій за площею можуть бути значно меншими за максимально можливі, але мають бути оптимізовані за пропускною здатністю.

У сільській місцевості ситуація протилежна. Тут щільність абонентів невисока, і базові станції встановлюються на максимальній відстані одна від одної так, щоб кожна базова станція покривала максимально можливу територію.

Під час оцінки ємності мережі LTE-2300-2400 необхідно виходити з профілю послуг і дисципліни обслуговування користувачів. Як приклад оцінимо кількість абонентів при телефонному навантаженні, яке може бути обслужене сектором базової станції в годину найбільшого навантаження (ГНН). Кількість каналів обслуговування в LTE при телефонному навантаженні дорівнює кількості ресурсних блоків.

У системі масового обслуговування з відмовами при обслуговуванні мовного навантаження максимальна кількість обслуговуваних абонентів залежить від допустимої ймовірності блокування виклику в ГНН (відмови в обслуговуванні) та кількості фізичних каналів трафіку. Задамо навантаження, що надходить від одного абонента, 0,03 Ерл та ймовірність блокування виклику 2%. Розрахунки показують, що у смузі 5 МГц доступно 25 ресурсних блоків, тому при загальному вхідному навантаженні 17,5 Ерл маємо 583 абоненти. У смузі 10 МГц доступно 50 ресурсних блоків, тому при загальному вхідному навантаженні 40,3 Ерл маємо 1343 абоненти і т. д.

Під час оцінки ємності та пропускної здатності сектора базової станції в ГНН при передаванні даних необхідно виходити з алгоритму роботи планувальника базової станції, який на кожному часовому інтервалі передавання, виходячи зі стану радіоканалу, якості переданих інформаційних пакетів і дисципліни обслуговування, приймає рішення та передає користувачам інформацію не лише про призначення ресурсних блоків, а й про параметри передавання (метод модуляції та тип кодування).

Таке рішення дозволяє максимізувати ємність і пропускну здатність соти та виконати вимоги до якості радіозв’язку в умовах обмежених ресурсів базової станції.

Швидкості передавання інформації залежать від методу модуляції піднесучих у ресурсних блоках, типу кодування та кількості ресурсних блоків. Техноло-

гія LTE пропонує різні можливості щодо передавання даних у каналах «вниз» і «вгору». Базова станція має можливість керувати параметрами завантаження залежно від доступного їй ресурсу.

Новий виклик, який надходить від абонентської станції або стаціонарної мережі, буде прийнятий лише в тому випадку, якщо вимоги щодо обслуговування цього виклику будуть повністю виконані.

Таким чином, планувальник, виходячи з доступного частотно-енергетичного ресурсу базової станції, приймає рішення, скільки каналів і з яким пріоритетом взяти на обслуговування.

Розрахунки показують, що під час планування мереж LTE та обґрунтування ширини смуги частот каналів немає однозначної відповіді, який зі сценаріїв є найкращим. Це зумовлено тим, що виграш у піковій швидкості передавання даних потребує не лише більшого частотного ресурсу, а й більшої кількості базових станцій у складі мережі, що позначається на вартості реалізації проєктів.

Отже, показники ефективності функціонування LTE-мережі мають суперечливий характер, і для розв’язання задач обґрунтованого прийняття рішень під час планування та оптимізації LTE-мереж доцільно використовувати багатокритеріальні методи аналізу та вибору.

2.6 Кластерні моделі з повторним використанням частот

Схеми розподілу частот визначають процеси та алгоритми, які використовуються для ефективного використання обмежених частотних ресурсів як у макростільниках, так і у фемтостільниках у системі 4G. Основною метою будь-якої схеми розподілу частот є підвищення загальної продуктивності системи та максимізація спектральної ефективності обмеженої смуги частот [13].

Кожна з таких схем використовує відомий метод розподілу частот, зосереджуючись на підходах, що базуються на концепції повторного дробового використання частоти (FFR), яка була вперше запропонована у мережах GSM [1]. Цей підхід вирішує проблеми поганого покриття в зоні краю, які є значущими для будь-якої мобільної стільникової системи [2].

Універсальна схема повторного використання, відома як «Повторне використання-1», передбачає призначення всіх частотних ресурсів для повторного використання усіма макростільниками та фемтостільниками в системі (рис.2.7а). Основною перевагою цієї схеми є здатність використовувати всі доступні частоти,

що призводить до збільшення спектральної ефективності обмеженої смуги пропускання.

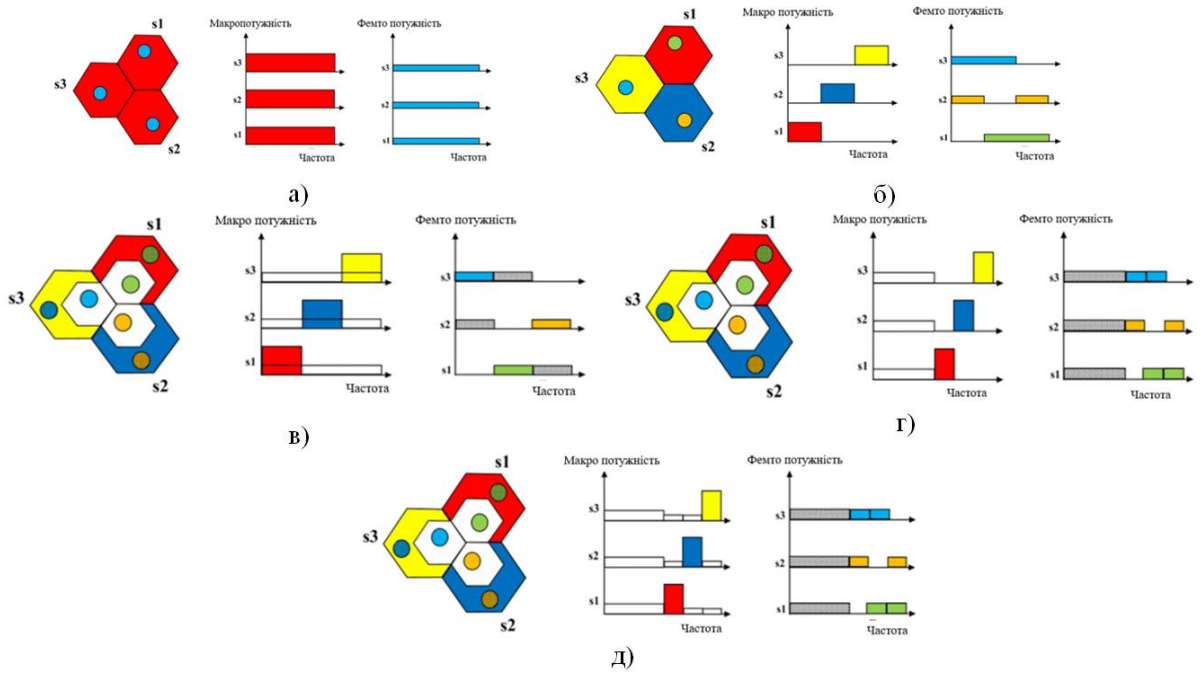


Рисунок 2.7 – Схеми повторного використання [13]:

а) повторное використання-1;

б) повторное використання-3;

в) м'яке повторне використання частоти – SFR;

г) часткове повторне використання частоти – PFR;

д) м'яке дробове повторне використання частоти – SFFR

Це, однак, може призвести до збільшення міжсистемних завад у системі, оскільки всі макро- та фемтостільники одночасно використовують однакову пропускну здатність для обслуговування своїх підключених абонентів.

Застосування схеми «Повторне використання-3» продемонструвало, що воно може забезпечити кращі результати порівняно з іншими варіантами коефіцієнтів повторного використання [2]. У схемі повторного використання-3 весь частотний діапазон рівномірно розподіляється на три піддіапазони, таким чином, що кожному стільнику відводиться тільки один із доступних піддіапазонів (рис.2.7б). Важливою особливістю цієї схеми є те, що частотний ресурс повторно використовується кожним третім стільником, а не кожним окремим стільником, як у випадку «Повторне використання-1».

Схема м'якого частотного повторного використання (SFR) розділяє зону покриття макростільника на дві області: внутрішню (центральну) та крайову. Фемтостільники також класифікуються на центральні та крайові відповідно до їхнього положення у макростільнику, як видно на рис.2.7в. Часовий інтервал розділений на дві частини.

У схемі SFR перший часовий інтервал відводиться для доступу до центральних абонентських станцій, які можуть вільно використовувати всю ширину частот протягом цього періоду (аналогічне схемі «Повторное використання-1»)? [13].

Другий часовий інтервал призначений для доступу до крайових абонентських станцій. Весь частотний ресурс у другому інтервалі поділяється порівну на три піддіапазони, щоб крайові абонентські станції кожного сектору макростільника могли отримати доступ тільки до одного із трьох доступних піддіапазонів частот (використання, аналогічне «Повторному використанню-3»), як видно на рис. 2.7в. Рівень потужності передачі для крайової області встановлюється втричі вище, ніж для центральної області.

Один з варіантів реалізації концепції повторного використання дробової частоти (FFR) відомий як часткове повторне використання частоти (PFR). Цей метод був введений як засіб розподілу ресурсів у мережах макростільників. Концепція PFR в певному сенсі подібна до SFR, оскільки вона також розділяє зону покриття макростільників на центральну і крайову області.

На рис.2.7г детально розглядається процес розподілу частот для макростільників у концепції часткового повторного використання частоти (PFR). У цій схемі весь ресурс пропускної здатності системи розділений на 6 піддіапазонів, які позначені як A, B, C, D, E і F. Три з цих піддіапазонів (загальні піддіапазони) призначені для центрального макрообладнання користувача (МОК) в будь-якому секторі, в той час як залишені три піддіапазони використовуються для доступу до граничного макрообладнання користувача у трьох різних секторах. Піддіапазон D, наприклад, може бути призначений граничному МОК у секторі 1. Рівень потужності передачі у піддіапазонах, що використовуються граничним МОК, складає 2/3 загальної потужності передачі, призначеної для макро-БС, тоді як у піддіапазонах для центрального МОК він становить 1/3 [13].

На рис 2.7.д зображено процес розподілу частот для макростільників, що використовується в схемі м'якого дробового повторного використання частоти (SFFR), яке представляє собою інший варіант концепції динамічного розподілу ресурсів (FFR). Схоже на SFR і PFR, SFFR розділяє зону покриття макростільни-

ками на дві основні області: центральну та крайову. Оптимальний радіус центральної області встановлено на рівні 63% від розрахованого радіуса внутрішнього кола. Концепція SFFR схожа на PFR, за винятком деяких особливостей.

Таким чином, розглянуті варіанти структурних перетворень, дозволяють збільшувати продуктивність мережі за рахунок використання макро- і мікростільникових осередків, які ефективно застосовуються в місцях щільних кластерних груп абонентів.

2.7 Синтез алгоритму початкового наближення мережі LTE

Під час планування радіомережі LTE доцільно дотримуватись загальноприйнятої часової та логічної послідовності дій:

- отримання вихідних даних;
- калібрування математичної моделі поширення радіохвиль на основі вимірювань напруженості поля в найбільш характерних точках зони обслуговування мережі;
- побудова мережі початкового наближення;
- прив’язка ділянок розгортання базових станцій, визначених планом побудови мережі початкового наближення, до місцевості;
- ітеративна оптимізація мережі із широким використанням програмних засобів, що підтримують функції синтезу мережі та аналізу експлуатаційних характеристик.

Узагальнений алгоритм планування мереж мобільного радіозв’язку наведено на рис. 2.8.

Завдяки можливості використання різних схем модуляції та кодування (MCS), мережа LTE на основі вимірювання співвідношення сигнал/шум на приймальній стороні може гнучко адаптуватися до змінних умов поширення сигналу.

Необхідне співвідношення сигнал/шум на прийомі змінюватиметься залежно від типу використовуваної модуляції сигналу та швидкості надлишкового кодування, оскільки кожна MCS висуває власні вимоги до якості каналу.

На етапі побудови початкового наближення вся мережа декомпозується на однорідні фрагменти, для яких визначаються розподіл базових станцій за зонами обслуговування, параметри базової мережі та розподіл частотного ресурсу.

Виходячи із сформульованих вище обмежень, мережа має регулярну однорідну структуру, тобто вузли eNB розташовані на однаковій відстані один від од-

ного, технічні характеристики та кількість приймально-передавальних пристроїв, а також висоти підвісу антен, азимути й кути нахилу є однаковими для всіх eNB.

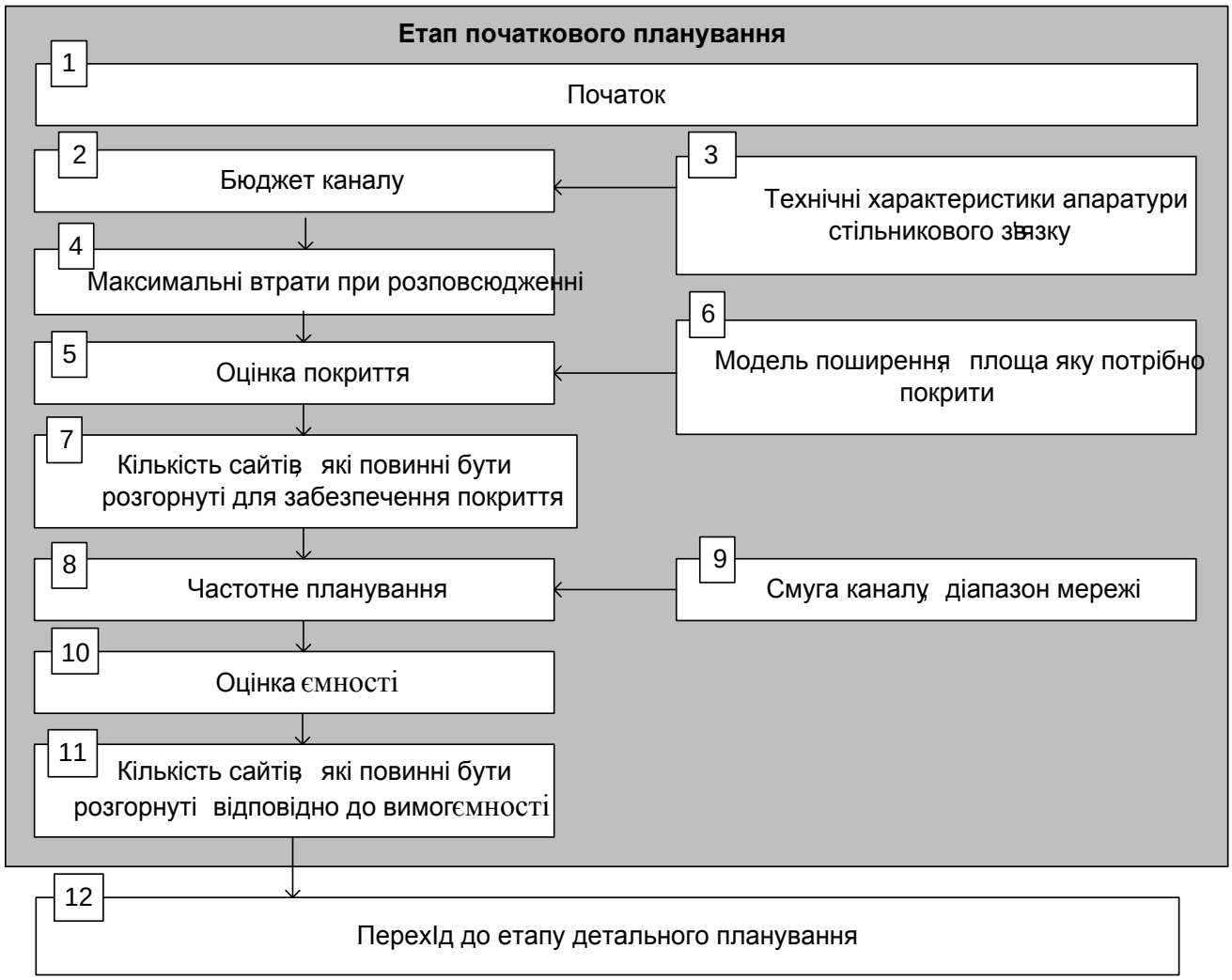


Рисунок 2.8 – Блок-сзема узагальненого алгоритму планування мереж мобільного радіозв'язку

Основна складність на початковому етапі планування мереж LTE полягає у формулюванні вимог до мережі початкового наближення та пошуку балансу між ємнісними, швидкісними й просторовими показниками мережі.

3 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G LTE

3.1 Методика розрахунку пропускної здатності мережі мережі мобільного зв'язку 4G LTE

Вибір території для проектування мережі визначається необхідністю оцінки зони покриття мережі 4G у залежності від характеристик місцевості – міської, сільської або змішаної. У якості прикладу, проводемо розрахунок для сільської місцевості П'ятихатського району, площа якого становить 1683 км². Сільська місцевість характеризується низькою щільністю населення, тому базові станції LTE (e_{NB}) розташовуються на великій відстані одна від одної, щоб покрити значні території. У зв'язку з цим для ефективного проектування мережі необхідно правильно підібрати радіочастотний спектр. Для П'ятихатського району доцільним є використання діапазонів 1710 – 1785 МГц для uplink та 1805 – 1880 МГц для downlink із застосуванням частотного дуплексу FDD. Середня спектральна ефективність мережі LTE в цьому випадку залишається на рівні 20 МГц, що забезпечує достатню пропускну спроможність для обслуговування потенційних абонентів району. Планування мережі передбачає врахування великого радіуса покриття для кожної базової станції та оптимізацію розташування антен для забезпечення рівномірного покриття сільської території. У таблиці 3.1 [1] наведено значення спектральної ефективності для різних конфігурацій MIMO на основі 3GPP Release 9, які використовуються при розрахунку пропускної спроможності мережі LTE.

Таблиця 2.1 – Середня спектральна ефективність для мережі LTE [14]

Лінія	Схема MIMO	Середня спектральна ефективність(біт/с/Гц)
1	2	3
UL	1×2 1×4	1,254 1,829
DL	2×2 4×2 4×4	2,93 3,43 4,48

Для системи FDD середня пропускна здатність одного сектора e_{NB} може бути отримана шляхом прямого множення ширини каналу на спектральну ефективність каналу [9]:

$$R = S \cdot W, \tag{3.1}$$

де S – середня спектральна ефективність, біт/с/Гц;

W – ширина каналу, МГц;

W = 20 МГц.

Використовуючи формулу (3.1) слід розрахувати пропускну здатність одного сектора базової станції:

– для лінії DL: $R = 3{,}43 \cdot 20 = 68{,}6$ Мбіт/с,

– для лінії UL: $R = 1{,}829 \cdot 20 = 36{,}58$ Мбіт/с.

Далі розраховуємо пропускну спроможність мережі, щоб обчислити пропускну спроможність базової станції $R_{e_{NB}}$, помножимо кількість секторів базової станції на пропускну здатність одного сектора, у однієї базової станції e_{NB} число секторів дорівнює трьом, формула виглядатиме так [9]:

$$R_{e_{NB}} = R \cdot 3. \tag{3.2}$$

Отже, слід визначити обчислити пропускну спроможність базової станції використовуючи формулу (2.2):

– для лінії DL: $R_{e_{NB}} = 68{,}6 \cdot 3 = 205{,}8$ Мбіт/с,

– для лінії UL: $R_{e_{NB}} = 36{,}58 \cdot 3 = 109{,}74$ Мбіт/с.

Далі потрібно провести розрахунок стільників у запланованій мережі LTE. Розрахунок здійснюється шляхом розрахунку загальної кількості каналів, які виділені для розгортання проектованої мережі LTE. В мережах LTE під радіоканалом мається на увазі такий термін, як ресурсний блок, який має ширину 180 кГц [2].

Кількість каналів визначається зі співвідношення:

$$N_k = \left(\frac{\Delta F\Sigma}{\Delta F_k}\right), \tag{3.3}$$

де $\Delta F\Sigma$ – смуга частот, виділена для роботи мережі і дорівнює 75 МГц.

Використовуючи формулу (2.3) слід розрахувати кількість каналів:

$$N_k = \left(\frac{75}{0{,}18}\right) \approx 416 \text{ каналів.}$$

Далі слід встановити кількість каналів $N_{к.сек.}$, необхідних для обслуговування абонентів у першому секторі першого стільника:

$$N_{к.сек.} = \left[\frac{N_k}{N_{kl} \cdot M_{сек}}\right], \quad (3.4)$$

де N_k – загальне число каналів;

N_{kl} – розмірність кластера, що обирається з урахуванням кількості секторів e_{NB}, приймемо рівним семи;

M_{cek} – кількість секторів e_{NB}, прийнята рівною трьом.

За допомогою формули (3.4) потрібно провести розрахунок кількості каналів необхідних для обслуговування абонентів у першому секторі першого стільника:

$$N_{к.сек.} = \left[\frac{416}{7 \cdot 3}\right] = 19 \text{ каналів.}$$

Далі слід обчислити кількість каналів трафіку в одному секторі одного стільника $N_{кт.сек}$:

$$N_{кт.сек} = N_{кт1} \cdot N_{к.сек}, \quad (3.5)$$

де $N_{кт1}$ – кількість каналів трафіку в одному радіоканалі, що визначається стандартом радіо-доступу.

Для мережі LTE-A слід обрати значення $N_{кт1} = 1$.

Використовуючи формулу (3.5) слід розрахувати кількість каналів трафіку в одному секторі одного стільника $N_{кт.сек}$:

$$N_{кт.сек} = 1 \cdot 19 = 19 \text{ каналів.}$$

Відповідно до моделі Ерланга, потрібно визначити номінальне навантаження в секторі одного стільника $A_{сек}$ при можливому значенні ймовірності блокування рівній 0,1% та обчисленому вище значенні $N_{кт.сек}$. На рисунку 3.1 зображено номінальне навантаження в секторі одного стільника $A_{сек}$ при можливому значенні ймовірності блокування рівній 0,1% для 19 каналів.

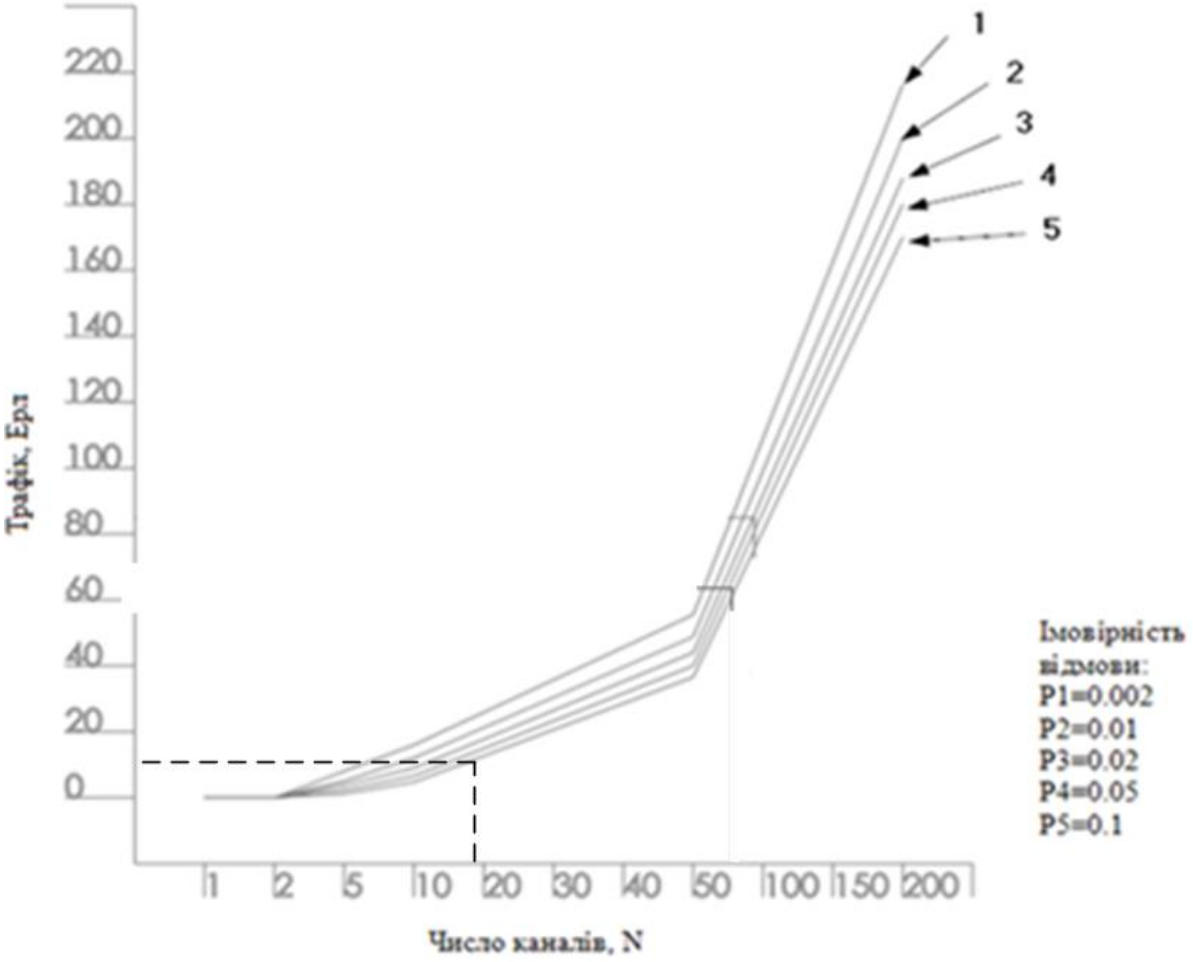


Рисунок 3.1 – Номінальне навантаження в секторі одного стільника $A_{сек}$ при можливому значенні ймовірності блокування рівній 0,1% для 19 каналів [9]

Наступний крок – оцінка ємності проектованої мережі із зіставленням результатів із вже розрахованою мережею. Спершу слід визначити середній трафік одного абонента в ГНН [15]:

$$R_{т.ГНН} = \left(\frac{T_Т \cdot q}{N_{ГНН} \cdot N_д}\right), \tag{3.9}$$

де $T_Т$ – середній трафік одного абонента на місяць, $T_Т$ = 30 Гбайт/міс;

q – коефіцієнт для міської місцевості, q = 2;

$N_{ГНН}$ – число ГНН на день, $N_{ГНН}$ = 6;

$N_д$ – число днів з ГНН у місяці, $N_д$ = 12.

Для розрахунку середнього трафіку одного абонента в час найвищого навантаження слід використати формулу (3.9):

$$R_{т.ГНН} = \left(\frac{30 \cdot 2}{6 \cdot 12}\right) = 0{,}83 \text{ (Мбіт/с)}.$$

Далі – необхідно визначити загальний трафік проектованої мережі в ГНН $R_{заг./ГНН}$:

$$R_{заг./ГНН} = R_{т.ГНН} \cdot N_{акт.аб}, \quad (3.10)$$

де $N_{акт.аб}$ – число активних абонентів у мережі.

Число активних абонентів у мережі визначається як 70% від загального числа потенційних абонентів $N_{аб}$, тобто $N_{акт.аб}$ = 3131.59=3132 абонентів. Визначивши $R_{т.ГНН}$ та $N_{акт.аб}$ слід провести розрахунок загального трафіку проектованої мережі в ГНН використовуючи формулу (3.10): $R_{заг./ЧНН} = 0{,}83 \cdot 3132 = 2599{,}56$ (Мбіт/с).

Таким чином, умова $R_N > R_{заг./ЧНН}$ матиме вигляд: $R_N = 11043{,}9 > 2599{,}61$ (Мбіт/с). Відповідно проектована мережа не піддаватиметься перевантаженням у ГНН.

Середня планована пропускна здатність R_N проектованої мережі розраховується шляхом додавання кількості базових станцій на середню пропускну здатність базових станцій [16]:

$$R_N = \left(R_{e_{NB\,DL}} + R_{e_{NB\,UL}}\right) \cdot N_{e_{NB}}. \quad (3.8)$$

Отже, використовуючи формулу (3.8) потрібно розрахувати плановану пропускну здатність проектованої мережі: $R_N = (205{,}8 + 109{,}74) \cdot 35 = 11043{,}9$ (Мбіт/с).

3.2 Методика оцінка ємності проектованої мережі мобільного зв'язку 4G LTE

Наступний крок – оцінка ємності проектованої мережі із зіставленням результатів із вже розрахованою мережею. Спершу слід визначити середній трафік одного абонента в ГНН [16]:

$$R_{т.ГНН} = \left(\frac{T_T \cdot q}{N_{ГНН} \cdot N_д}\right), \quad (3.9)$$

де T_T – середній трафік одного абонента на місяць, T_T = 30 Гбайт/міс;

q – коефіцієнт для міської місцевості, q = 2;

$N_{ГНН}$ – число ГНН на день, $N_{ГНН}$ = 6;

$N_д$ – число днів з ГНН у місяці, $N_д$ = 12.

Для розрахунку середнього трафіку одного абонента в час найвищого навантаження слід використати формулу (3.9): $R_{т.ГНН} = \left(\frac{30 \cdot 2}{6 \cdot 12}\right) = 0{,}83$ (Мбіт/с).

Далі – необхідно визначити загальний трафік проектованої мережі в ГНН $R_{заг./ГНН}$:

$$R_{заг./ГНН} = R_{т.ГНН} \cdot N_{акт.аб}, \quad (3.10)$$

де $N_{акт.аб}$ – число активних абонентів у мережі.

Число активних абонентів у мережі визначається як 70% від загального числа потенційних абонентів $N_{аб}$, тобто $N_{акт.аб}$ = 3131,59=3132 абонентів. Визначивши $R_{т.ГНН}$ та $N_{акт.аб}$ слід провести розрахунок загального трафіку проектованої мережі в ГНН використовуючи формулу (3.10): $R_{заг./ЧНН} = 0{,}83 \cdot 3132 = 2599{,}56$ (Мбіт/с).

Таким чином, умова $R_N > R_{заг./ЧНН}$ матиме вигляд $R_N = 11043{,}9 > 2599{,}61$ (Мбіт/с), відповідно проектована мережа не піддаватиметься перевантаженням у ГНН.

3.3 Розташування базових станцій на території місцевості

Планування радіомережі LTE-A буде проводитися в сільській місцевості, а це означає, що щільність абонентів буде невисока і базові станції будуть встановлюватися на максимальній відстані одна від одної аби кожна e_{NB} охопила всю територію. У зв'язку з цим потрібно підібрати відповідний частотний діапазон. У цьому випадку потрібно керуватися правилом, що чим вища частота, тим більша пробивна здатність радіосигналу. Діапазон роботи частот LTE 1800 FDD, (1710 – 1785 МГц / 1805 – 1880МГц). Карта виділеного району представлена на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Область розгортання мережі

На рисунку 3.2 представлений П’ятихатський район який має наступні дані:

– площа території S ≈ 1683 км^2;

– чисельність населення ≈ 44 737осіб.

Для мережі LTE-A слід визначити радіус зони покриття, якщо висота базової станції $h_{БС} = 40$ м і абонентської станції $h_{МС} = 1{,}5$ м.

Для визначення зони покриття та величини загасання сигналу слід використати моделлю розрахунку Окамури-Хата.

Відповідно до цієї моделі величина загасання сигналу під час поширенні в сільських районах дорівнює [16]:

$$PL = 69{,}55 + 26{,}16 \cdot lgF - 13{,}82 \cdot lgh_{БС} - a(h_{MC}) + (44{,}9 - 6{,}55 \cdot lgh_{БС}) \cdot lgR, \quad (3.11)$$

де F – робоча частота в МГц;

$h_{БС}$ – висота підйому антени БС у м;

h_{MC} – висота підйому МС у м;

R – дальність зв'язку, км;

$a(h_{MC})$ – поправочний коефіцієнт, що використовується при висоті антени МС відмінної від еталонної, що дорівнює 1,5 м.

Коригувальний фактор для малих і середніх міст розраховується за формулою [16]:

$$ah_{MC} = (1{,}1lgF - 0.7) \cdot h_{MC} - (1{,}56lgF - 0{,}8). \quad (3.12)$$

Отже, використовуючи формулу (3.11) слід визначити коригувальний фактор для малих і середніх міст [16]:

$$ah_{MC} = (1{,}1lg1800 - 0{,}7) \cdot 1{,}5 - (1{,}56lg1800 - 0{,}8) = 0{,}043 \text{ дБ}.$$

Далі слід розрахувати максимально допустимі втрати при поширенні в канал [16]і:

$$L = P_{EIRP} - S_{RX} + G_{RX.A} - L_{RX.F} - M_{BUILD} - M_{INT} - M_{SHADE} + G_{HO}, \quad (3.13)$$

де P_{EIRP} – ЕІІМ передавача;

S_{RX} – чутливість приймача;

$G_{RX.A}$ – коефіцієнт посилення антени приймача, 18 дБ на лінії UL і 0 дБі на лінії DL;

$L_{RX.F}$ – втрати у фідерному тракті приймача, 0,4 дБ у лінії UL;

M_{BUILD} – запас на проникнення в приміщення, 8 дБ;

M_{INT} – запас на перешкоди, у напрямку DL – 8,51 дБ, UL – 3,8 дБ;

M_{SHADE} – запас на затінення, 8,5 дБ;

G_{HO} – виграш від хендовера, 2,5 дБ.

У базовій станції радіочастотний блок кожного сектора оснащений двома приймачами з вихідною потужністю 20 Вт (43 дБм). Базова станція працює на лінії вниз у режимі MIMO 4x2 з використанням крос-поляризованої антени.

Оскільки розрахунок для абонентської станції (АС) на краю стільники, тобто тієї, що приймає сигнали від БС із низьким відношенням сигнал/шум (ВСШ), то БС передає сигнали на цю АС у режимі рознесеної передачі. За рахунок складання потужностей сигналів двох передавачів у просторі можна отримати енергетичний виграш (3 дБ). Як АС розглядається стільниковий телефон (EIRP 23 дБм). EIRP для передавача визначається формулою [16]:

$$P_{EIRP} = P_{TX} + G_{TX.DIV} + G_{TX.A} - L_{TX.F}, \quad (3.14)$$

де P_{TX} – вихідна потужність, дорівнює 55,5 дБм для лінії DL і 30 дБм для UL;

$G_{TX.DIV}$ – виграш від складання потужності передавачів, 3 дБ на лінії DL, у лінії UL відсутній;

$G_{TX.A}$ – коефіцієнт посилення антени, в DL дорівнює 20 дБі, в UL – 0 дБі;

$L_{TX.F}$ – втрати у фідерному тракті, 0,4 дБ у лінії DL, в UL відсутні.

Таким чином, потрібно використати формулу (3.13) для розрахунку EIRP для передавача:

– для лінії DL дорівнює:$P_{EIRP} = 55{,}5 + 3 + 20 - 0{,}4 = 78{,}1$ дБ,

– для лінії UL дорівнює:$P_{EIRP} = 30$.

Чутливість приймача визначається за формулою [16]:

$$S_{RX} = P_N + M_{SNR} + L_N, \quad (3.15)$$

де P_N – потужність теплового шуму приймача, у лінії DL дорівнює (-104,4 дБм), UL дорівнює (-118,4 дБм);

M_{SNR} – необхідне відношення сигнал/шум приймача, дорівнює для лінії DL – мінус 0,32 дБ, UL – 0,65 дБ;

L_N – коефіцієнт шуму приймача, у лінії DL рівний 7 дБ, UL – 2,5 дБ.

Використовуючи формулу (2.14) слід визначити чутливість приймача:

– для лінії DL: $S_{RX} = -104{,}4 - 0{,}32 + 7 = -97{,}72$ дБм,

– для лінії UL: $S_{RX} = -118{,}4 - 0{,}65 + 2{,}5 = -116{,}55$ дБ.

Тепер використовуючи отримані дані слід скористатися формулою (3.13) для розрахунку максимально допустимих втрат при поширенні в каналі:

– для лінії DL: $L = 78{,}1 + 97{,}72 - 0{,}4 - 8 - 8{,}51 - 8{,}5 + 2{,}5 = 152{,}91$ дБ,

– для лінії UL: $L = 30 + 116{,}55 + 18 - 0{,}4 - 8 - 3{,}8 - 8{,}5 + 2{,}5 = 146{,}35$ дБ.

Із двох значень МДП, отриманих для UL та DL, обирають значення для низхідної лінії (DL), за яким виконують подальший розрахунок радіуса дії базової станції. Це пояснюється тим, що в даному випадку саме DL є обмежувальною лінією за дальністю зв'язку та визначає максимальну зону радіопокриття.

Використовуючи формулу (3.12), обчислюється відстань між передавачем і приймачем (R), вона визначає радіус дії базової станції:

$$\lg R = \frac{152{,}91 - 69{,}55 - 26{,}16\lg 1800 + 13.82\lg 40 + 0{,}043}{(44{,}9 - 6{,}55\lg 40)} = 0{,}592.$$

Звідси визначається, що радіус дії базової станції (R) дорівнює 3,90 км.

Таким чином, використовуючи формулу (3.12) слід визначити величину загасання сигналу під час поширенні в сільських районах :$PL = 69{,}55 + 26{,}16 \cdot \lg 1800 - 13{,}82 \cdot \lg 40 - 0{,}043 + (44{,}9 - 6{,}55 \cdot \lg 40) \cdot \lg 3{,}90 = 152{,}86$ дБ.

Отже, загасання сигналу під час поширення в сільському районій становить 152,86 дБ.

Тепер знаючи задану площу території та радіус дії БС (3.90км^2), слід визначити кількість базових станцій в П'ятихатському районі:

$$N_{e_{БС}} = \frac{S}{S_{eb}}, \qquad (3.15)$$

де S – площа місцевості для якої проводяться розрахунки;

S_{eb} – площа дії базової станції.

Площа дії базової станції дорівнює:

$$S_{eb} = \pi R^2, \qquad (3.16)$$

де R – радіус дії базової станції.

Таким чином, використовуючи формулу (2.16) слід визначити площу дії базової станції: $S_{eb} = \pi * 3{,}90^2 = 48$ км^2.

Визначивши площу дії базової станції потрібно використати формулу (2.15) для визначення кількості базових станцій в П’ятихатському районі: $N_{e_{\text{БС}}} = \frac{1683}{48} = 35$.

Для П’ятихатського району розроблено ситуаційний план розміщення базових станцій e_{NB} на території планування мережі. Основною метою проєктування є забезпечення суцільного радіопокриття всієї території району. Ключовим завданням даного проєкту є гарантування стабільного рівня радіосигналу, зокрема в межах населених пунктів із підвищеною щільністю населення. З урахуванням зазначених вимог, а також особливостей рельєфу місцевості, виконано розміщення 35 базових станцій**,** що відображено на рисунку 3.3**.**

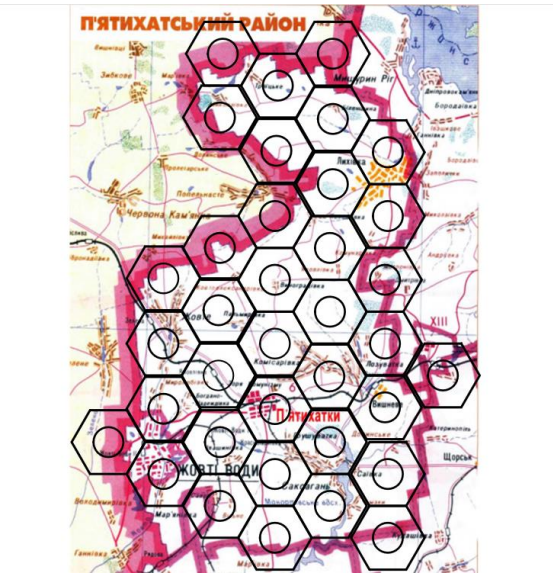


Рисунок 3.3 – План розміщення базових станцій на території П’ятихатського району

3.4 Інтеграціїя проектованої мережі LTE в конвергентну мережу

Для аналізу ефективності інвестицій у проєктовану мережу LTE-A використовуються показники, що базуються на результатах розрахунку ємності мережі, інформаційного навантаження та параметрів радіопокриття. Відповідно до отриманих розрахункових даних встановлено, що для забезпечення широкосмугового мобільного доступу за технологією LTE-A на території П’ятихатського району необхідно розгорнути 35 базових станцій. Після введення мережі в експлуатацію передбачається виконання етапу її оптимізації з метою підвищення ефективності використання транспортних і радіоресурсів.

Передавання трафіку від базових станцій e_{NB} до ядра мережі EPC здійснюється через транспортну мережу, побудовану на базі волоконно-оптичних ліній зв'язку із застосуванням технології спектрального ущільнення каналів DWDM. Агрегація та передавання IP/Ethernet-трафіку з базових станцій виконується з використанням маршрутизаторів операторського класу Cisco ASR 920 та Cisco NCS 540, які забезпечують комутацію, маршрутизацію та підтримку механізмів якості обслуговування в IP/MPLS-транспортній мережі.

Оптичний рівень транспортної мережі реалізується на базі DWDM-платформ Cisco NCS 2006 та Cisco NCS 2015, що входять до серії Cisco NCS 2000 та призначені для побудови регіональних і магістральних мереж зв'язку. Передавання даних у транспортному сегменті здійснюється по одномодовому оптичному волокну стандарту ITU-T G.652.D, яке забезпечує низькі втрати сигналу та сумісність із сучасними DWDM-системами. З'єднання між оптичним і пакетним рівнями мережі реалізується за допомогою інтерфейсів Gigabit Ethernet та 10 Gigabit Ethernet. Ядро мережі LTE (Evolved Packet Core) виконує функції управління мережею, організації абонентських сесій, керування послугами, тарифікації та забезпечує взаємодію з зовнішніми мережами, зокрема 2G, 3G, не-3GPP, Internet, ISDN та IMT. Увесь мережевий трафік у проектованій мережі передається з використанням IP-протоколу, що відповідає концепції повністю пакетної архітектури мереж LTE-A.

На етапі планування мережі LTE-A першочерговим завданням є вибір підходу до побудови транспортної мережі та мережі радіодоступу E-UTRA. З цією метою розглядаються три основні варіанти організації інфраструктури: повне будівництво мережі з використанням власних ресурсів оператора, оренда елементів транспортної інфраструктури у сторонніх операторів, а також комбінований підхід, що поєднує обидва зазначені варіанти.

Під час техніко-економічного обґрунтування побудови мережі LTE-A приймається припущення, що проєктування та подальшу експлуатацію мережі здійснює умовний оператор мобільного зв'язку операторського класу (наприклад, "Vodafone" чи "Київстар"). За таких умов доцільним є застосування універсального підходу до побудови мережі LTE-A, відповідно до якого частина елементів транспортної інфраструктури може бути орендована, тоді як інша частина реалізується власними ресурсами оператора. Зазначений підхід забезпечує зниження початкових капітальних витрат, підвищення гнучкості розвитку мережі та ефективність її подальшої експлуатації.

4 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВО-ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ 4GLTE

4.1 Визначення структури і тип частотного кластера при розрахунку просторових параметрів мережі 4G LTE

Побудову мережі LTE доцільно здійснювати на основі частотних кластерів, що являють собою групу суміжних стільників, у якій при використанні всього частотного ресурсу мережі однозначно може бути розв’язана задача досягнення максимальної ємності мережі за умови забезпечення прийнятного рівня внутрішньосистемних завад.

У разі успішного розв’язання задачі формування такої групи стільників її можна використовувати як деяку мінімальну структурну одиницю при плануванні мережі LTE. Мережа початкового наближення будуватиметься шляхом повторення однакових частотних кластерів у межах зони обслуговування.

Конфігурація частотного кластера безпосередньо впливатиме на такі найважливіші параметри системи, як рівень внутрішньосистемних завад і реалізована мережева ємність. При цьому значно спрощується задача збільшення ємності мережі, оскільки кожен частотний кластер мережі, що відповідає вимогам за рівнем внутрішньосистемних завад, є оптимальним за цим параметром.

Частотний кластер вибирається виходячи з очікуваного абонентського навантаження та значення ймовірності виникнення внутрішньосистемних завад P(C), де C – розмірність частотного кластера.

Як приклад на рис. 2.6 наведено фрагмент несекторизованого частотного кластера з дробовим повторним призначенням частот. Уся смуга частот, виділена системі, складається з чотирьох рівних смуг f1, f2, f3 та f4.

При такій структурі кожна базова станція, що входить до кластера, використовує до 50 % частотного ресурсу мережі при повному використанні всієї смуги частот у кластері. Детально процедура побудови частотного кластера в мережах LTE при дробовому та м’якому призначенні частот розглянута в [14].

Основною складністю при побудові структури частотного кластера за заданої ймовірності виникнення внутрішньосистемних завад є максимізація ємності та пропускної здатності кластерної структури, виходячи з доступного частотного ресурсу мережі. Ця задача на сьогоднішній день потребує додаткових досліджень.

4.2 Визначення просторових параметрів мережі 4G LTE

У процесі визначення просторових параметрів мережі проводиться оцінка бюджетів втрат, радіусів «ближньої» та «дальньої» зон, визначення потужностей передавачів для «ближньої» і «дальньої» зон та визначення кількості базових станцій в однорідній мережі.

Бюджет втрат визначає максимально допустимі втрати на трасі поширення радіохвиль (MAPL) для конкретного виду сигнально-кодової конструкції за заданих параметрів приймально-передавального обладнання мережі.

Бюджет втрат не залежить від вибраної моделі втрат поширення сигналу, але повинен враховувати напрямок зв'язку по лініях «вгору» та «вниз», оскільки в стільникових системах потужність передавача абонентської станції зазвичай менша за потужність передавача базової станції.

Результати оцінок бюджету втрат [2] при різних конфігураціях обладнання та використовуваних сигнально-кодових конструкціях показують, що обмежувальною за дальністю зв'язку є лінія «вгору», оскільки мобільна станція, на відміну від базової, має меншу потужність передавача та ненаправлену антену.

При цьому допустимі втрати зі збільшенням смуги робочих частот системи зменшуються, і для збереження енергетичного балансу між каналами необхідно обмежувати кількість ресурсних блоків, що припадають на абонентську станцію:

- при смузі частот каналу 10 МГц допустимі втрати перебувають у межах 125,8–148 дБ, і доцільно обмежувати кількість ресурсних блоків, що виділяються абонентській станції, до чотирьох;
- при ширині смуги частот каналу 15 МГц допустимі втрати перебувають у межах 121,8–144,2 дБ, і доцільно обмежувати кількість ресурсних блоків, що виділяються абонентській станції, до восьми;
- при ширині смуги частот каналу 20 МГц допустимі втрати перебувають у межах 117,8–139,9 дБ, і доцільно обмежувати кількість ресурсних блоків, що виділяються абонентській станції, до 16.

Чутливість приймачів і рівні максимально допустимих втрат на лінії радіозв'язку пов'язані з типом модуляції (видом використовуваної сигнально-кодової конструкції) та смугою частот, займаною системою.

Збільшення смуги частот удвічі (з 10 до 20 МГц) призводить до погіршення чутливості на 3–5 дБ і зменшення максимально допустимих втрат на трасі радіозв'язку (бюджету втрат) на 6–8 дБ.

Таблиця 4.1 – Необхідні значення відношення сигнал/завда+шум в залежності від схему модуляції MCS [17]

Модуляційно-кодуюча схема	Умови прийому, Гц	Мережеве навантаження, %	Необхідне значення с/ш, дБ
1	2	3	4
QPSK 1/3	EPA, 5	30	–3,6
	EVA, 5	30	–2,5
	ETU, 70	30	–2,3
QPSK 1/3	EPA, 5	70	0,3
	EVA, 5	70	1,8
	ETU, 70	70	2,1
16-QAM 3/4	EPA, 5	30	–
	EVA, 5	30	5
	ETU, 70	30	–
16-QAM 3/4	EPA, 5	70	11,6
	EVA, 5	70	12,4
	ETU, 70	70	–
64-QAM 5/6	–	30	–
64-QAM 5/6	EPA, 5	70	19,4
	EVA, 5	70	19,6
	ETU, 70	70	–
Варіанти умов прийому: Extended Pedestrian A (EPA) – UE знаходиться у пішіхода; Extended Vehicular A model (EVA) – UE знаходится внутри автомобіля; Extended Typical Urban model (ETU) – стандартна модель міськох забудови			

Оцінка бюджету втрат починається з конкретизації необхідного (допустимого) відношення сигнал/шум на вході приймачів у лініях «вгору» та «вниз». Значення відношення с/ш залежно від використовуваної модуляційно-кодової схеми (MCS), умов прийому, рівня завантаження мережі та кількості приймальних антен наведені в таблицях [3, 4].

Отримане значення MAPL надалі використовується для визначення максимального радіуса стільника (максимально можливої відстані між приймачем і передавачем).

При плануванні мережі остаточне значення MAPL визначається з урахуванням запасів на інтерференцію, затінення та проникнення в будівлю/автомобіль.

Запас на інтерференцію залежить від числа повторно використовуваних частот і завантаження в стільнику [2].

Запас на затінення враховує затухання сигналу внаслідок руху абонентського термінала, оскільки при цьому часто втрачається пряма видимість між абонентською та базовою станціями. Цей запас гарантує відсоток локальних зон у межах покриваної території, де рівень сигналу буде вищим за необхідне значення.

Запас на проникнення застосовується щодо будівель, автомобілів тощо, тобто до тих об’єктів, усередині яких необхідно провести оцінку рівня сигналу. Величина запасу залежить від поглинальних властивостей матеріалу об’єкта, його конструктивних особливостей і робочого діапазону частот системи зв’язку.

Як правило, запас на проникнення приймають рівним 8 дБ при використанні абонентської станції всередині автомобіля та 20 дБ і більше — усередині будівель.

Нижче наведено деякі результати аналізу, зокрема:

– графіки залежності максимально допустимих втрат MAPL (дБ) і радіуса стільника (км) при різних видах модуляції від кількості ресурсних блоків у діапазоні 2,6 ГГц (рис. 4.1);

– залежність максимального радіуса стільника від використовуваної модуляційно-кодової схеми (рис. 4.2) при роботі мережі в діапазоні 2600 МГц і виділених смугах 1,4 МГц (6 РБ) та 20 МГц (100 РБ).

Результати аналізу показують таке:

– зі зростанням смуги частот, вираженої в кількості виділених системі ресурсних блоків (РБ), зменшується MAPL і, відповідно, зменшується максимально допустимий радіус стільника;

– при роботі мережі в діапазоні частот 2600 МГц при 6 РБ і 100 РБ відношення максимальних радіусів $\frac{R_{QPSK1/3}}{R_{64\text{-}QAM\,5/6}}$ приблизно дорівнює 3,5 і практично не змінюється зі зменшенням частоти зв’язку.

Отримане значення бюджету втрат надалі використовується для визначення радіусів «ближньої» та «дальньої» зон. Задаючись частотним діапазоном і кількістю ресурсних блоків, можна оцінити для всього набору сигнально-кодових конструкцій розподіл швидкостей передавання в стільнику за різних умов прийому.

При визначенні потужності передавачів у «ближній» та «дальній» зонах використовуються статистичні і дифракційні моделі розрахунку середніх втрат на трасі поширення.

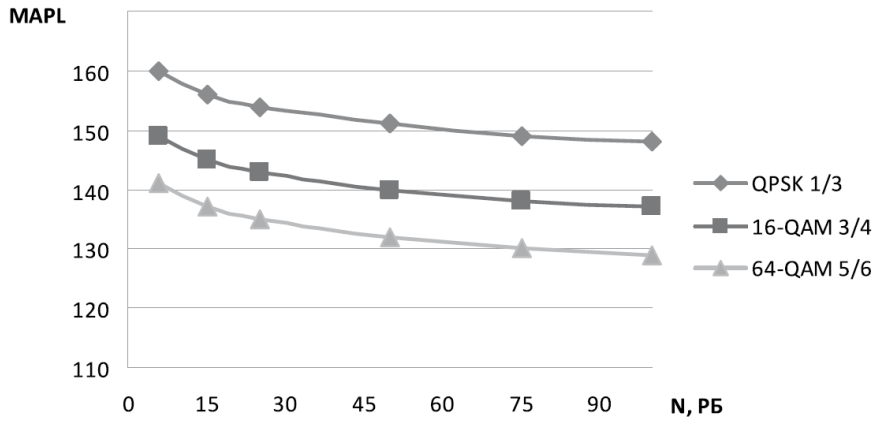


Рисунок 4.1 – Залежність максимально допустимих втрат MAPL, дБ [17]

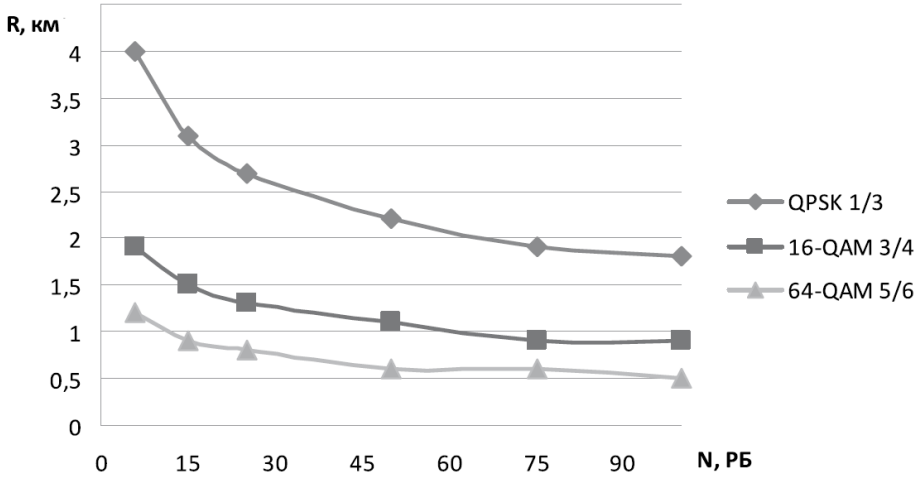


Рисунок 4.2 – Залежність радіусу стільника $R_{comu_\max}$, км [17]

На рис.4.3 та 4.4 представлені залежність МДВ від необхідного відношення сигнал-шум для різних видів модуляції при 6 і 100 ресурсних блоках і залежність

максимального радіуса від типу модуляції діапазон №28 (700 МГц) при 6 і 100 ресурсних блока відповідно.

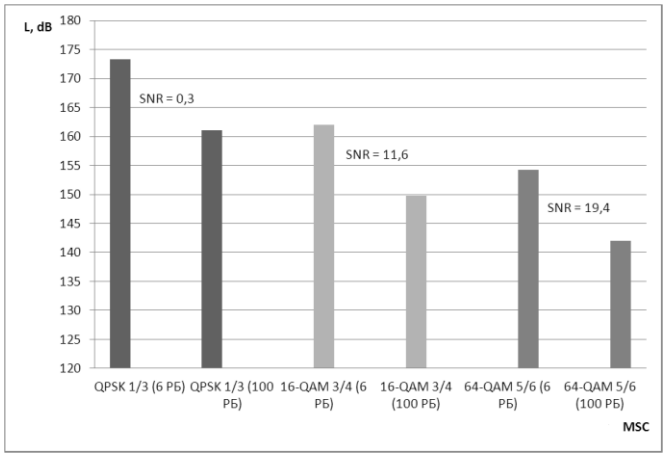
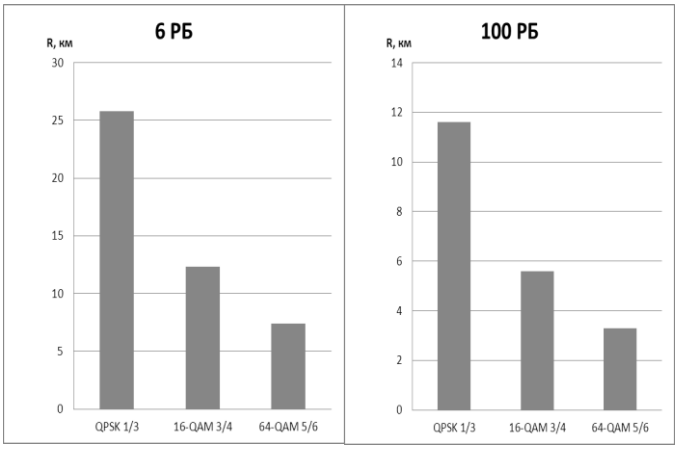
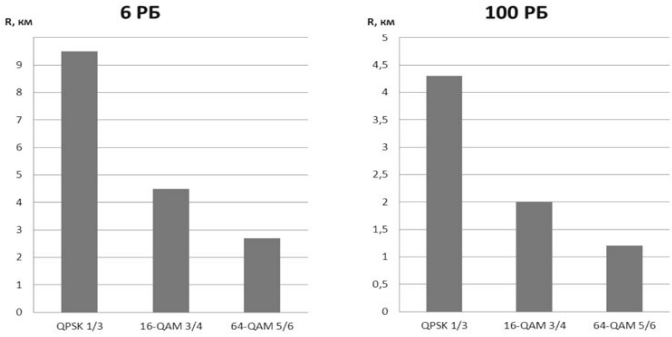


Рисунок 4.3 – Залежність МДВ від необхідного відношення сигнал-шум для різних видів модуляції при 6 і 100 ресурсних блоках [18]



а)



б)

Рисунок 4.4 – Залежність максимального радіуса від типу модуляції 6 і 100 ресурсних блока [18]

а) діапазон №28 (700 МГц),

б) діапазон №7 (2600 МГц)

Будемо вважати, що відношення потужності випромінювання передавача базової станції в «ближній» зоні до потужності в «дальній» зоні є пропорційним відношеню [17]:

$$\frac{P_{випр_БЗ}}{P_{випр_ДЗ}} = (\frac{r}{R})^k, \quad (4.1)$$

де r – радіус «ближньої» зони стільника;

R – радіус стільника;

k – параметр, що характеризує умови радіозв'язку ($k = 4$ у міських умовах, $k = 2$ – в умовах відкритої місцевості).

На основі отриманого значення максимально допустимого радіуса стільника проводиться розрахунок площі стільника та визначається кількість базових станцій в однорідному фрагменті мережі

$$N_{БС} = \frac{S_{зони}}{S_{соти}}, \quad (4.2)$$

де $S_{зони}$ – площа зони обслуговування мережі;

$S_{соти}$ – площа обслуговування базової станції.

Таким чином, при визначенні просторових параметрів мережі необхідно задатися частотним діапазоном, кількістю ресурсних блоків, розподілом швидкостей передавання в стільнику, конфігурацією обладнання та умовами функціонування системи LTE.

4.3 Оцінка середньої пропускної здатності та ємності мережі 4G LTE

При оцінці середньої швидкості передавання даних у прямому каналі будемо вважати, що розподіл абонентських терміналів у зоні обслуговування базових станцій є рівномірним. Базові станції надають абонентам максимально можливу швидкість передавання у відповідних сегментах «ближньої» та «дальньої» зон [2], [5]. У загальному випадку середня швидкість передавання в «ближній» і «дальній» зонах у прямому каналі визначається за формулою [20]:

$$V_{сер} = \sum_{i=1}^{15} P_i V_{txi}, \qquad (4.3)$$

де i – номер внутрішнього сегмента у відповідній зоні (для LTE $i = 1...15$);

P_i – ймовірність перебування абонента в i -му сегменті відповідної зони;

V_{txi} – швидкість передавання, що забезпечується в i -му сегменті відповідної зони.

Середня швидкість передавання в соті являє собою суму середніх швидкостей передавання в «ближній» та «дальній» зонах. Середня швидкість передавання даних залежить від розподілу абонентів у зонах обслуговування мережі. Своєю чергою, середня пропускна здатність мережі залежить від алгоритму розподілу ресурсів прямого каналу (алгоритму роботи планувальника). Як показують дослідження [2], алгоритм роботи планувальника суттєво впливає на параметри якості обслуговування.

У мережах LTE питання забезпечення заданої дисципліни обслуговування, наприклад урахування пріоритетності абонентів або абонентського трафіку, надання ресурсів абоненту в тому чи іншому обсязі тощо, покладено на планувальник мережі. Планувальник являє собою програмний продукт, що здійснює в режимі реального часу керування частотно-часовими ресурсами системи [2, 5].

Наприклад, планувальник базової станції може керувати ресурсом, виходячи з алгоритму пропорційно-справедливого призначення ресурсу. За такого алгоритму роботи в кожному субкадрі планувальник призначає пріоритети користувацьким трафіковим каналам і, відповідно, ухвалює рішення про початок передавання трафіку того чи іншого абонента.

Для забезпечення максимальної пропускної здатності можна використовувати алгоритм виділення ресурсу на основі максимального показника рівня перешкод. Такий алгоритм дає змогу суттєво підвищити пропускну здатність, оскільки враховує показник якості кожного каналу та обслуговує насамперед користувачів із «добрим» каналом. До основного недоліку цього алгоритму можна віднести негарантоване надання ресурсів за високого навантаження на мережу абонентам із низьким співвідношенням с/ш. Якщо необхідна пропускна здатність перевищує допустимі значення, то необхідний перерозподіл трафіку між сусідніми базовими станціями за допомогою естафетної передачі абонентів, що перебувають на межі зони обслуговування.

Методика оцінювання числа рівномірно розподілених по зоні обслуговування користувачів мобільного Інтернету (трафік являє собою пуассонівський потік) у сталому режимі функціонування мережі наведена в [2].

Число абонентів у зоні обслуговування можна визначити як сумарний потік від усіх абонентів у ГНН.

Варіант стандарту LTE, заснований на частотному дуплексі, використовує симетричні смуги частот, призначені для передавання даних у лініях «вгору» та «вниз» відповідно. Враховуючи той факт, що в мобільних мережах передавання даних частка трафіку на лінії «вниз» становить близько 80 % усього трафіку, що передається мережею (ситуація асиметричного трафіку), оцінювання потенційних можливостей мережі LTE щодо обслуговування користувачів слід проводити з урахуванням кількості абонентів, прийнятих на обслуговування прямим каналом [2].

З огляду на складність профілю трафіку системи LTE середній час зайняття каналу одним абонентом $\vec{T}_c$ є величиною, яку можна отримати лише статистичним способом. Під час попереднього проєктування для отримання оціночних розрахунків слід задатися низкою значень $\vec{T}_c$ та рівнем завантаження базової станції в ГНН.

Величину навантаження можна визначити, виходячи із заданого рівня відмов у з'єднанні. Для багатоканальних систем масового обслуговування з обмеженою чергою довжиною mmm ймовірність відмов визначається за формулою [17] – [20]:

$$P_{від} = \frac{\rho^{n+m}}{n^m n!} P_0, \tag{4.4}$$

$$P_0 = [1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^{n+1}}{n \times n!} \times \frac{1 - (\frac{\rho^n}{n})^m}{1 - \frac{\rho}{n}}]^{-1}, \tag{4.5}$$

де P_0 – імовірність того, що всі канали системи вільні;

n – кількість каналів систем масового обслуговування;

m – довжина черги;

ρ – навантаження одного каналу.

Задаючись допустимим значенням імовірності відмов, знаходимо відповідне їй значення $\rho = \frac{\lambda}{n}\vec{T}_c$, де λ – потік заявок від усіх абонентів у ГНН. Число абонентів в зоні облсуговування можна визначити як [18]:

$$N_{аб} = \frac{n\rho}{\lambda_1 \vec{T}_c}, \tag{4.6}$$

де λ_1 – потік заявок від одного абонента в ГНН.

В системі значення $\rho = 0,3$ при 100 ресурсних блоках (нехай на канал трафіку припадає один ресурсний блок), λ_1= одній заявці на годину і $\vec{T}_c = 1/12$ г., то число абонентів, прийнятих на обслуговування базовою станцією в ГНН, дорівнює 360.

Очевидно, що задача оцінювання середньої пропускної здатності та ємності мережі може бути розв’язана для заданого профілю абонентського трафіку й алгоритму роботи планувальника, а в умовах трансформації трафіку від пуассонівського потоку до самоподібного потребує окремого дослідження.

Частотне планування включає розв’язання таких задач:

– призначення смуг частот секторам базових станцій;

– розподіл ідентифікаторів PCI (Physical Cell Identity – фізичний ідентифікатор соти);

– планування преамбули під час випадкового доступу в каналі PRACH (Physical Random Access Channel – фізичний канал випадкового доступу);

– планування пілотних сигналів.

Призначення смуг частот секторам базових станцій здійснюється відповідно до частотного кластера, використаного під час побудови однорідного фрагмента мережі, за аналогією з частотним призначенням у стандарті GSM. У стандарті LTE визначено 504 унікальні ідентифікатори соти PCI, які розраховуються на основі первинного та вторинного сигналів синхронізації. Алгоритм застосування P-SCH аналогічний механізму розподілу скремблювального коду в системах WCDMA [2]. Вторинний сигнал синхронізації є ідентифікатором соти. Під час планування мережі для базових станцій, зони обслуговування яких розташовані

поруч або перекриваються, необхідно використовувати різні ідентифікатори для зниження рівня взаємних перешкод.

Питання частотного планування загалом розглядаються в низці праць, однак у них відсутні конкретні методики та рекомендації щодо застосування [2, 7, 8].

Розглянуті питання визначення просторово-технічних параметрів мережі стандарту LTE на основі сформованих підходів до розв'язання задачі планування мереж мобільного зв'язку необхідно відзначити необхідність вдосконалення методики планування з урахуванням:

- побудови частотних кластерів за заданої ймовірності виникнення внутрішньосистемних перешкод, що забезпечують максимізацію ємності кластерної структури;
- визначення просторових параметрів мережі, виходячи з кількості виділених ресурсних блоків, розподілу швидкостей передавання, конфігурації обладнання та умов функціонування;
- оцінювання середньої пропускної здатності та ємності мережі для заданого профілю абонентського трафіку й алгоритмів роботи планувальників;
- частотного планування та відповідних рекомендацій щодо частотних розносів.

5 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СКЛАДОВИХ РАДІОКАНАЛУ В МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G LTE

Планування радіомереж LTE має певні відмінності від аналогічного процесу для інших технологій. Відмінності зумовлені типом багатостанційного доступу на базі OFDM, наявністю двох типів дуплексу — частотного (FDD) і часового (TDD), а під час планування мереж із часовим дуплексом доводиться шукати компроміс між радіопокриттям та ємністю мережі. Проілюструємо можливості мереж LTE з різними типами дуплексу та в різних діапазонах частот, оцінивши їх радіопокриття та ємність.

Існують два основні варіанти планування мереж: з метою формування максимальної площі покриття або з метою забезпечення необхідної ємності. Ці задачі інколи суперечать одна одній. Наприклад, у міських умовах за високої щільності абонентів зони обслуговування базових станцій (БС) за площею значно менші за максимально можливі, але оптимізовані за пропускною здатністю. У сільській місцевості ситуація часто протилежна: щільність абонентів невисока, і базові станції встановлюються на максимальній відстані одна від одної так, щоб кожна БС покривала максимально можливу територію. Але і в тому, і в іншому випадку оцінюють як радіопокриття, так і ємність мережі для виявлення в проєкті мережі факторів, що обмежують її характеристики.

5.1 Аналіз енергетичного бюджету радіолінії LTE

Аналіз радіопокриття починають із обчислення енергетичного бюджету, або максимально допустимих втрат на лінії (МДВ). Принцип розрахунку ілюструється на рис. 3.1. МДВ розраховується як різниця між еквівалентною ізотропно випромінюваною потужністю (ЕІВП) передавача та мінімально необхідною потужністю сигналу на вході приймача спряженої сторони, за якої з урахуванням усіх втрат у каналі зв'язку забезпечується нормальна демодуляція сигналу в приймачі.

Розглянемо приклади розрахунку енергетичного бюджету для систем LTE з частотним і часовим дуплексом, що працюють у діапазоні 2600 МГц. Причому для системи з часовим дуплексом розглянемо два варіанти конфігурацій кадру 1 і 2, формат спеціального субкадру – 7. Системна смуга для всіх систем приймається рівною 20 МГц, тобто у випадку FDD системна смуга буде розділятися на два

канали по 10 МГц для лінії вгору (UL) і лінії вниз (DL), а у випадку TDD вся смуга 20 МГц використовуватиметься як для UL, так і для DL.

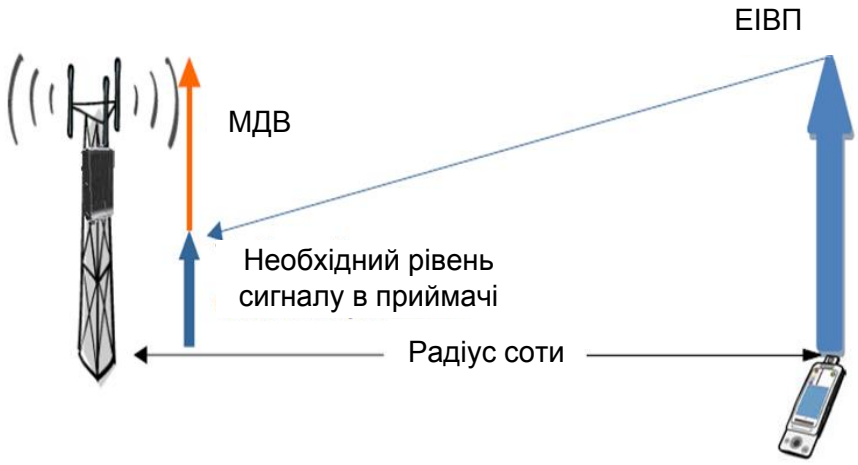


Рисунок 5.1 – Принцип розрахунку енергетичного бюджету радіолінії LTE

Розглянемо БС, РЧ-блок кожного сектора якої оснащений двома приймально-передавальними пристроями, вихідна потужність передавачів – 20 Вт (43 дБм). РЧ-блок установлюється в безпосередній близькості до антени. Базова станція працює на лінії вниз у режимі MIMO 2×2 з використанням крос-поляризованої антени. Оскільки енергетичний бюджет розраховується для абонентської станції (АС) на краю соти, тобто такої, що приймає сигнали від БС із низьким відношенням сигнал/шум (ВСШ), то БС передає сигнали на цю АС у режимі рознесеного передавання. За рахунок складання потужностей сигналів двох передавачів у просторі можна отримати енергетичний виграш (3 дБ). Як АС розглядаємо USB-модем, клас 3 – ЕІВП 23 дБм.

Результати розрахунку енергетичного бюджету радіолінії LTE наведено в табл. 5.1.

Енергетичний бюджет значною мірою залежить від співвідношення тривалості кадрів на лініях UL та DL. Якщо в системі FDD конфігурація кадрів є однаковою для ліній висхідного та низхідного зв’язку: кадр включає 10 субкадрів тривалістю по 1 мс, то в системі TDD використовується асиметрична структура кадру для ліній UL та DL.

Таблиця 3.1 – Енергетичний бюджет для умов середньої міської забудови [19].

	Параметр	Конфігурація схеми доступу					
		FDD 10 + 10 МГц		TDD 20 МГц (Конф. Кадру 1)		TDD 20 МГц (Конф. Кадру 2)	
1	2	3		4		5	
		DL	UL	DL	UL	DL	UL
	Антенна система	2x2	1x2	2x2	1x2	2x2	1x2
	Співвідношення тривалості кадрів DL/UL	100%	100%	54%	42%	74%	23%
Передавач							
P_{Tx}	Вихідна Потужність, дБм	43	23	43	23	43	23
G_{TxDiv}	Виграш від складання передавачів, дБ	3	-	3	-	3	-
G_{TxA}	Коефіцієнт Посилення антени, дБм	18	0	18	0	18	0
L_{TxF}	Втрати у фідерному тракті	0,4	-	0,4	-	0,4	-
P_{EIRP}	ЕІВП, дБм $P_{EIRP} = P_{Tx} + G_{TxDiv} + G_{TxA} - L_{TxF}$	63,6	23	63,6	23	63,6	23
Приймач							
	Швидкість передачі даних на краю стільника, кбіт/с	4210	128	4510	128	5910	128
N_{PRB}	Кількість ресурсних блоків	45	2	86	4	98	20
	Схема модуляції та кодування QPSK	6	5	6	6	5	1
	Ефективна швидкість кодування	0,45	0,28	0,46	0,38	0,38	0,14
P_N	Потужність теплового шуму, дБм	-104,4	-118,4	-101,4	-115,4	-101,4	-108,4
M_{SNR}	Належно співвідношення сигнал-шум, дБ	-0,24	0,61	-0,23	0,01	0,03	-4,35
L_N	Коефіцієнт шуму приймач, дБ	7,0	2,5	7,0	2,5	7,0	2,5
S_{Rx}	Чутливість приймач, дБм $S_{Rx} = P_N + M_{SNR} + L_N$	-97,6	-115,3	-94,6	-112,8	-94,3	-110,2
G_{RxA}	Коефіцієнт Посилення антени, дБм	0	18	0	18	0	18
L_{RxF}	Втрати у фідерному тракті, дБ	-	0,4	-	0,4	-	0,4

Продовження таблиці 5.1

		Конфігурація схеми доступу					
	Параметр	FDD 10 + 10 МГц		TDD 20 МГц (конф. кадру 1)		TDD 20 МГц (конф. кадру 2)	
1	2	3		4		5	
Інші запаси / виграш							
M_{Int}	Запас на перешкоду, дБ	8,51	3,8	8,53	3,8	10,65	3,8
M_{Build}	Запас на проникнення до приміщення, дБ	17		17		17	
M_{Shade}	Запас на затінення, дБ	8,7		8,7		8,7	
G_{HO}	Виграш від хендовер, дБ	2,5		2,5		2,5	
Максимально допустимі втрати $L_{MAPL} = P_{EIRP} - S_{Rx} + G_{RxA} - L_{RxF} - M_{Build} - M_{int} - M_{shade} + G_{HO}$							
L_{MAPL}	МДВ, дБ	129,5	128,9	126,5	126,5	124,2	123,9
Радіус стільника в умовах середньої міської забудови							
d	Радіус соти, км	0,53		0,45		0,38	
S_{BS}	Площа покриття трьохсекторного сайту, кв. км	0,54		0,4		0,28	

На рис. 5.2 зображено 7 конфігурацій кадру в системі TDD2 (пронумеровані по вертикалі), який також складається з 10 субкадрів по 1 мс (субкадри пронумеровані по горизонталі):

– DwPTS – поле для передачі керуючої інформації та користувацьких даних на лінії низхідного зв’язку (10 символів OFDM);

– GP – захисний інтервал для перемикання з лінії низхідного зв’язку на лінію висхідного зв’язку (2 символи OFDM);

– UpPTS – поле для передачі на лінії висхідного зв'язку керуючої інформації, переважно каналу доступу (2 символи OFDM).

0	DL	S	UL	UL	UL	DL	S	UL	UL	UL
1	DL	S	UL	UL	DL	DL	S	UL	UL	DL
2	DL	S	UL	DL	DL	DL	S	UL	DL	DL
3	DL	S	UL	UL	UL	DL	DL	DL	DL	DL
4	DL	S	UL	UL	DL	DL	DL	DL	DL	DL
5	DL	S	UL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL
6	DL	S	UL	UL	UL	DL	S	UL	UL	DL
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Рисунок 5.2 – Конфігурації кадрів у системі TDD [19]

Слід звернути увагу, що спеціальний субкадр дозволяє передавати користувацьку інформацію лише на лінії низхідного зв'язку (рис.5/3).



Рисунок 5.3 – Структура спеціального субкадра [19]

У системах з адаптивними схемами MCS дальність зв'язку залежить від гарантованої швидкості передавання даних для користувача на межі соти. У наведених прикладах на лінії вгору для користувача на межі соти гарантується швидкість 128 кбіт/с. Залежно від типу дуплексу та співвідношення тривалостей кадру UL/DL для передавання цього потоку даних необхідно виділяти різну кількість ресурсних блоків (1 ресурсний блок = 180 кГц × 1 мс).

Вибір оптимальної кількості ресурсних блоків $N_{РБ}$ та схеми MCS здійснюється за результатами моделювання канального рівня, виходячи із заданої якості обслуговування при мінімізації необхідного відношення сигнал/шум.

Наведені в табл. 5.1 значення M_{SNR} отримані для моделі каналу «Enhanced Pedestrian A 5». Запас на завади M_{INT} визначається за результатами моделювання системного рівня залежно від навантаження в сусідніх сотах. Значення M_{INT}, наведені в табл. 5.1, відповідають навантаженню сусідніх сот на рівні 90 %.

Для забезпечення зв'язку всередині приміщень до енергетичного бюджету необхідно додати запас на проникнення радіохвиль у приміщення M_{IND}. Для діапазону 2600 МГц можуть використовуватись такі типові значення запасу на проникнення:

- 22 дБ — в умовах щільної міської забудови;
- 17 дБ — в умовах середньої міської забудови;
- 12 дБ — в умовах розрідженої забудови (передмістя);
- 8 дБ — у сільській місцевості (на відкритій місцевості в автомобілі).

Оскільки зони радіопокриття сусідніх сот, як правило, перекриваються, то при виникненні глибоких завмирань в обслуговуючій соті абонентська станція може виконати хендовер до соти з кращими характеристиками приймання. Цей ефект можна інтерпретувати як виграш від хендоверу G_{HO}.

Із двох значень максимально допустимих втрат (МДВ), отриманих для UL і DL, обирають мінімальне, за яким надалі виконується розрахунок радіуса соти. Обмежувальною лінією за дальністю зв'язку, як правило, є лінія вгору.

Слід звернути увагу, що в табл. 5.1 максимально допустимі втрати на лініях UL і DL приблизно однакові, а різниця між ними становить менше 1 дБ. У наведених прикладах швидкості передавання на лінії вгору були фіксованими, а на лінії вниз швидкість для кожного випадку підбиралась таким чином, щоб збалансувати максимально допустимі втрати для обох ліній.

У табл. 5.1 дані радіусів сот для обмежувальної лінії з найменшим значенням МДВ – для лінії вгору в умовах середньої міської забудови. Для розрахунку дальності зв'язку в даному випадку використовується модель поширення радіохвиль COST231-Hata, при цьому висота підвісу антен базової станції приймається рівною 30 м.

На рис. 5.4 наведено порівняння радіопокриття трьохсекторної базової станції LTE з частотним дуплексом (FDD) та часовим дуплексом (TDD).

Найкращим радіопокриттям за однакової гарантованої швидкості передавання даних у висхідній лінії (UL) характеризується система FDD. Це пояснюється тим, що для передавання одного й того самого потоку даних у трьох розглянутих системах у висхідній лінії необхідно виділяти різну кількість частотних ресурсів, що перебуває в оберненій залежності від тривалості кадру, оскільки тривалість кадру UL відрізняється:

- 10 мс – для системи FDD;

- 4 мс – для системи TDD, конфігурація 1;
- 2 мс – для системи TDD, конфігурація 2.

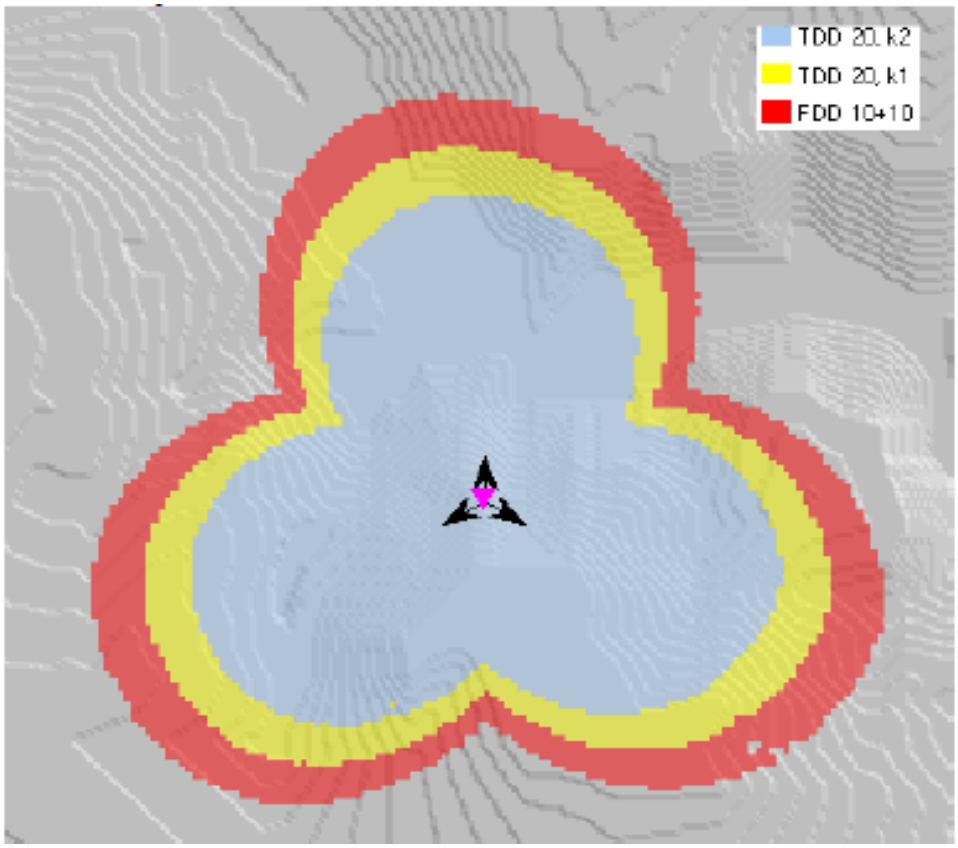


Рисунок 5.4 – Порівняння радіопокриття трьохсекторної БС FDD та TDD [14]

Чим більша кількість частотних ресурсів виділяється користувачу, тим вищою є потужність теплових шумів у вхідних колах приймача та тим гіршою стає його чутливість.

Водночас у розглянутих випадках система TDD може забезпечити вищу пропускну здатність на низхідній лінії (DL) порівняно із системою FDD завдяки асиметричній структурі кадрів DL та UL, що наведено в табл. 1.

5.2 Методика оцінки ємності мережі LTE

Ємність, або пропускну здатність, мережі оцінюють на основі середніх значень спектральної ефективності соти за певних умов функціонування. У табл. 5.2 наведено значення середньої спектральної ефективності соти LTE FDD у макро-

мережі для двох випадків, специфікованих 3GPP як сценарій 1 (відстань між сайтами 500 м) та сценарій 3 (відстань між сайтами 1732 м).

В обох випадках характеристики оцінювалися для діапазону 2 ГГц, ширини каналу 10 МГц (10 + 10 МГц у дуплексі), за втрат на проникнення в будівлю 20 дБ та в середньому за наявності 10 активних користувачів у соті.

Наведемо приклад розрахунку пропускної здатності для мереж трьох конфігурацій, розглянутих у попередньому розділі. При цьому використовуватимемо значення спектральної ефективності для сценарію 1 (відстань між сайтами 500 м), як найбільш близького до розмірів сот, отриманих у попередньому розділі.

Таблиця 5.2 – Середня спектральна ефективність у макромережі LTE [20]

Лінія	Схема MIMO	Середня спектральна ефективність (біт/с/Гц)	
		Сценарій 1	Сценарій 3
UL	1 x2	0,735	0,681
	1x4	1,103	1,038
DL	2x2	1,69	1,56
	4x2	1,87	1,85
	4x4	2,67	2,41

Для системи FDD середня пропускна здатність соти може бути отримана шляхом прямого множення ширини каналу на спектральну ефективність.

Для системи TDD можна прийняти спектральну ефективність рівною аналогічним значенням для системи FDD, а при розрахунку пропускної здатності враховувати частку тривалості кадру, що припадає на лінію вгору або вниз.

Розрахуємо середню пропускну здатність соти на низхідній лінії (DL) для конфігурації кадру 1:

$$R_{TDD} = S_{FDDaverage} \times W \times T_{\%} = 1{,}69 \times 20000 \times 0{,}54 = 18{,}25 \text{ Мбіт/с}, \quad (5.1)$$

де $S_{FDDaverage}$– середня спектральна ефективність;

W - ширина каналу;

$T_{\%}$- частка тривалості кадру на лінії.

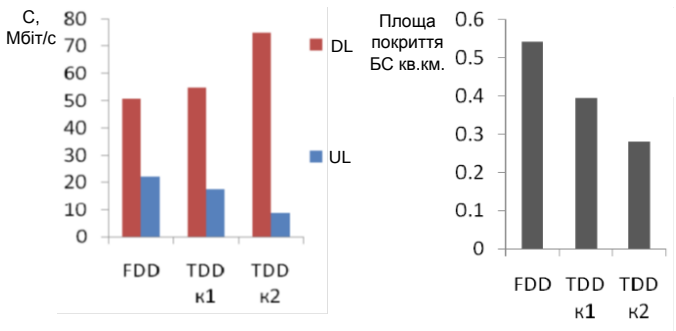
Результати розрахунку пропускної здатності трьохсекторних базових станцій наведені в табл. 5.3 [10].

Таблиця 5.3 – Середня пропускна здатність трьохсекторної БС [20]

Параметр	Конфігурація схеми доступу					
	FDD 10+10 МГц		TDD 20 МГц (конф. кадра 1)		TDD 20 МГц (конф. кадра 2)	
1	3		4		5	
Лінія	DL	UL	DL	UL	DL	UL
Співвідношення кадрів, %	100	100	54	42	74	23
Спектральна ефективність, біт/с/Гц	1,69	0,735	1,69	0,735	1,69	0,735
Середня пропускна здатність соти, Мбіт/с	16,9	7,35	18,25	6,32	25,01	3,38
Середня пропускна здатність БС, Мбіт/с	50,7	22,05	54,75	18,96	75,04	10,14

5.3 Аналіз порівняння типів дуплексу

За діаграмами на рис. 5.5 можна порівняти середню пропускну здатність і площу покриття трисекторного сайту для трьох розглянутих конфігурацій системи LTE (за даними табл. 5.1 та табл. 5.3).



а) б)

Рисунок 5.5 – Порівняння пропускної здатності та площі покриття трисекторної базової станції при різних конфігураціях системи LTE

а) середня пропускну здатність;

б) площу покриття

Якщо пропускна здатність на низхідній лінії в системах FDD і TDD з конфігурацією кадру 1 є приблизно однаковою, то радіопокриття вже помітно відрізняється.

Універсального підходу щодо вибору конфігурації системи LTE не існує. Якщо тип дуплексу визначається наявністю або відсутністю парного спектра в оператора, то на вибір конфігурації кадру в TDD можуть впливати вимоги як до радіопокриття, так і до пропускної здатності. Чим більшою є асиметрія кадру TDD і тривалість кадру на низхідній лінії, тим, на жаль, більшими стають обмеження щодо площі радіопокриття.

Операторам можна рекомендувати на початковому етапі розвитку мережі за невеликого трафіку використовувати конфігурацію кадру 1 та орієнтуватися на неглибоке/вуличне покриття (гарантувати доступ до послуг у будівлях лише біля вікон або в автомобілях). Надалі, зі зростанням трафіку та ущільненням сайтів, доцільно переходити до інших конфігурацій кадру з більшою асиметрією.

5.4 Аналіз вибору частотних діапазоныв роботи мережі LTE

Для трьох розглянутих конфігурацій системи діапазону 2600 МГц розрахуємо необхідну кількість трисекторних сайтів для обслуговування деякого мегаполіса площею 880 км².

У табл. 5.4 наведено результати розрахунку, а також розподіл класів забудови/місцевості, що визначають умови поширення радіохвиль.

Таблиця 5.4 – Розрахунок кількості базових станцій діапазону 2600 МГц для обслуговування мегаполіса

Клас місцевості	Щільна забудова	Середня забудова	Рідка забудова	Відкрита місцевість, парки	Разом
1	2	3	4	5	6
% місцевості	20	45	15	20	100
Площа міста по класам, кв. км	176	396	132	176	880
Витрати на проникнення в будівлю, дБ	20	17	12	8	

Продовження табл. 5.4

Клас місцевості	Щільна забудова	Середня забудова	Рідка забудова	Відкрита місцевість, парки	Разом
1	2	3	4	5	6
% місцевості	20	45	15	20	100
Площа міста по класам, кв. км	176	396	132	176	880
Витрати на проникнення в будівлю, дБ	20	17	12	8	
FDD 10+10 Мгц					
МДВ, дБ	123,9	128,9	133,9	137,9	
Радіус соти, км	0,31	0,53	1,32	4,0	
Кількість сайтів	926	732	39	6	1703
TDD 20 Мгц (конф. кадра 1)					
МДВ, дБ	121,5	126,5	131,5	135,5	
Радіус соти, км	0,27	0,45	1,12	3,41	
Кількість сайтів	1268	1002	54	8	2332
TDD 20 Мгц (конф. кадра 2)					
МДВ, дБ	118,9	123,9	128,9	132,9	
Радіус соти, км	0,23	0,38	0,95	2,9	
Кількість сайтів	1781	1408	75	11	3275

В табл. 5.5 наведена оцінка числа базових станцій у мережі LTE FDD діапазону 800 МГц. Енергетичний бюджет розраховується також, як для діапазону 2600 МГц. Відмінності для діапазону 800 МГц полягають у меншому коефіцієнті підсилення антени БС (15 дБ замість 18 дБ) і в менших втратах на проникнення в будівлю (в середньому їх приймають на 3 дБ менше).

Таблиця 5.5 – Розрахунок числа БС діапазону 800 МГц для обслуговування мегаполісу [10]

Клас місцевості	Щільна забудова	Середня забудова	Рідка забудова	Відкрита місцевість, парки	Разом
Площа міста по класам, кв. км	176	396	132	176	880
FDD 10+10 Мгц					
МДВ, дБ	123,9	128,9	133,9	137,9	
Радіус соти, км	0,93	1,56	3,9	11,87	
Кількість сайтів	106	84	5	1	196

На рис. 5.6 представлено порівняння радіопокриття трьохсекторної базової станції в діапазонах роботи 2600 та 800 МГц.

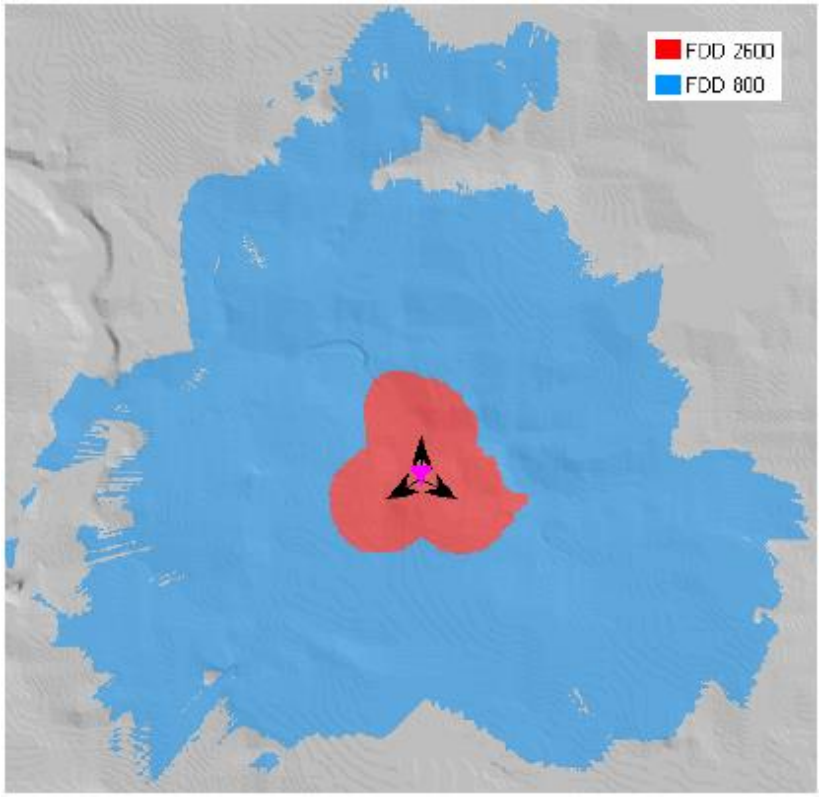


Рисунок 5.6 – Порівняння радіопокриття трьохсекторної базової станції в діапазонах роботи 2600 та 800 МГц [14]

Отримана кількість базових станцій здатна вразити навіть неспеціалістів. Досвід показує, що в місті аналогічної площі оператор стільникового зв’язку має

1500–2000 майданчиків із базовими станціями. Обмеження щодо кількості сайтів зумовлені не лише фінансовими можливостями стільникових компаній, а й відсутністю відповідних майданчиків для встановлення базових станцій.

Тепер розглянемо оцінку кількості базових станцій у мережі LTE FDD діапазону 800 МГц. Енергетичний бюджет розраховується аналогічно до діапазону 2600 МГц. Відмінності для діапазону 800 МГц полягають у меншому коефіцієнті підсилення антени базової станції (15 дБ замість 18 дБ), а також у менших втратах на проникнення сигналу в будівлі (у середньому їх приймають на 3 дБ меншими).

Завдяки кращим умовам поширення радіохвиль у низькочастотному діапазоні 800 МГц площа покриття одного сайту збільшується приблизно на порядок порівняно з діапазоном 2600 МГц. Відповідно, для покриття тієї самої території у діапазоні 800 МГц потрібно приблизно вдесятеро менше сайтів.

Якщо будувати мережу лише в низькочастотному діапазоні, то для досягнення необхідної ємності мережі за високої щільності абонентів доведеться розміщувати сайти близько один до одного. При дуже щільному розташуванні сайтів їхні зони радіопокриття неминуче перекриватимуться (для мереж LTE, що працюють із коефіцієнтом повторного використання частот 1, це є особливо критичним), унаслідок чого зростає рівень внутрішньосистемних завад і погіршується пропускна здатність.

І навпаки, якщо працювати лише у високочастотному діапазоні, неминуче виникатимуть проблеми з радіопокриттям.

Ідея ієрархічної мережі не є новою. Для досягнення балансу між покриттям і ємністю доцільно використовувати щонайменше два ієрархічні рівні, що працюють у високому та низькому діапазонах частот. При цьому на різних рівнях можуть застосовуватися різні радіотехнології.

5.5 Оцінка середньої пропускної здатності та ємності при передачі даних в мережі мобільного зв’язку LTE

Пропускну здатність мережі LTE при передачі даних можна оцінити, базуючись на середніх значеннях спектральної ефективності стільники в певних умовах роботи. Значення середньої спектральної ефективності (біт/с/Гц) в LTE FDD для макромережі наведені в специфікації 3GPP. Використовуючи ці дані, середня пропускна здатність соти знаходиться шляхом прямого множення ширини каналу на спектральну ефективність.

В якості прикладу наведемо оцінку середньої спектральної ефективності системи при даному виді сигналу і конфігурації передачі (без урахування повторної передачі пропущених пакетів) для випадку, якщо абоненту виділений частотний ресурс 15кГц*72 = 1,08 МГц = 6 РБ, модуляційно-кодуюча схема 16-QAM зі швидкістю коду 1/3 (CQI=7). Обмежимося двома передавальними антенами. Під канали управління PCFICH, PHICH і PDCCH відводиться 2 OFDM-символа на піднесучій. Використовується нормальний циклічний префікс CP (7 OFDM-символів на одній піднесе за 0,5 мс).

Аналіз показує, що швидкість передачі даних у даному випадку буде дорівнює загальній кількості переданих OFDM-символів за винятком службових і керуючих і складе (1008000 – 96000 – 144000 – 1152 – 28800)*4*1/3 = 738048*1,33 = 981603 біт/с тобто 0,98 Мбіт/с. Якщо врахувати, що прийом UE здійснюється на 2 антени, а передача ведеться за технологією MIMO 2x2 в режимі просторового мультиплексування, то підсумкова швидкість передачі буде приблизно дорівнює 0,98*2=1,96 Мбіт/с. Середня спектральна ефективність системи при даному виді сигналу і конфігурації передачі (без урахування повторної передачі пропущених пакетів) буде дорівнювати 1,96/1,08 = 1,81 біт/с/Гц [11]).

Таблиця 5.5 – Оцінка пропускної здатності

Конфігурація системи	FDD 20 МГц
Лінія	DL
Середня спектральна ефективність системи	1,8 біт/с/Гц
Середній об’єм трафіку eNB	≈ 15 Мбіт/с
Середній об’єм трафіку 319 eNB	≈ 48 Гбіт/с

На рис.5.7 показано залежність радіуса БС стільники в радіолінії «вниз» від швидкості передачі даних.

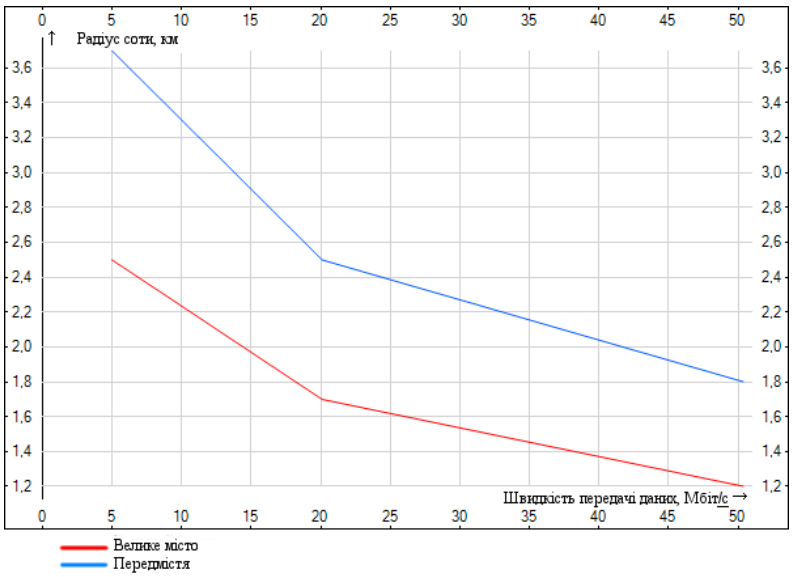


Рисунок 5.7 – Залежність радіуса БС стільники в радіолінії «вниз» від швидкості передачі даних

Залежність радіуса БС стільники в радіолінії «вниз» від швидкості передачі даних при середньої пропускної здатності, який слід очікувати в мережі LTE в смузі 20 МГц (180*100 = 18МГц) в каналі «вниз» за умови, що розподіл абонентів у зоні обслуговування рівномірний, передача ведеться за технологією MIMO 2x2 в режимі просторового мультиплексування, а середня спектральна ефективність системи дорівнює 1,81 біт/с/Гц.

6 СИНТЕЗ БЛОК-СХЕМИ АЛГОРИТМУ ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G LTE

6.1 Вдосконалення блок-схеми алгоритм планування мережі мобільного зв'язку 4G LTE

На основі представлених підходів, щодо розрахунків мережі мобільного зв'язку LTE з використанням кластерних моделей запропоновано алгоритм початкового і детального планування мережі, які представлено на рис.6.1.

У ході побудови мережі початкового наближення виконуються:

- вибір типу частотного кластера;
- визначення просторових параметрів мережі;
- оцінка середньої пропускної здатності та ємності;
- частотне планування.

У процесі побудови мережі оптимізується розподіл просторово-технічних параметрів мережі (ресурсів мережі) за умови забезпечення необхідної якості послуг зв'язку в годину найбільшого навантаження.

У мережі LTE вся смуга частот може використовуватися кожною сотою незалежно від місця розташування абонентів у соті. Розподіл ресурсних блоків у цьому випадку здійснюється за допомогою спеціального планувальника. Інформацію про розподіл ресурсів базова станція передає абонентським станціям через спеціальний керуючий канал.

Користувачі мережі поділяються на «ближніх» і «дальніх» залежно від відстані між базовою станцією та користувачем, яка оцінюється за потужністю прийнятого пілотного сигналу. Це забезпечує розподіл потужності між смугами частот, виділеними відповідно для «дальніх» і «ближніх» користувачів.

При цьому виникають проблеми з міжстільниковою інтерференцією, що потребує динамічного призначення смуг частот. У LTE динамічна координація для зменшення інтерференційного впливу між сотами підтримується сигнальним обміном між базовими станціями через інтерфейс X2, специфікований 3GPP.

Зниження міжстільникової інтерференції відбувається за рахунок розподілу потужності між смугами частот, виділеними для «дальніх» і «ближніх» користувачів відповідно. Усе це потребує витрат ресурсів мережі та призводить до зменшення пропускної здатності й ємності мережі.

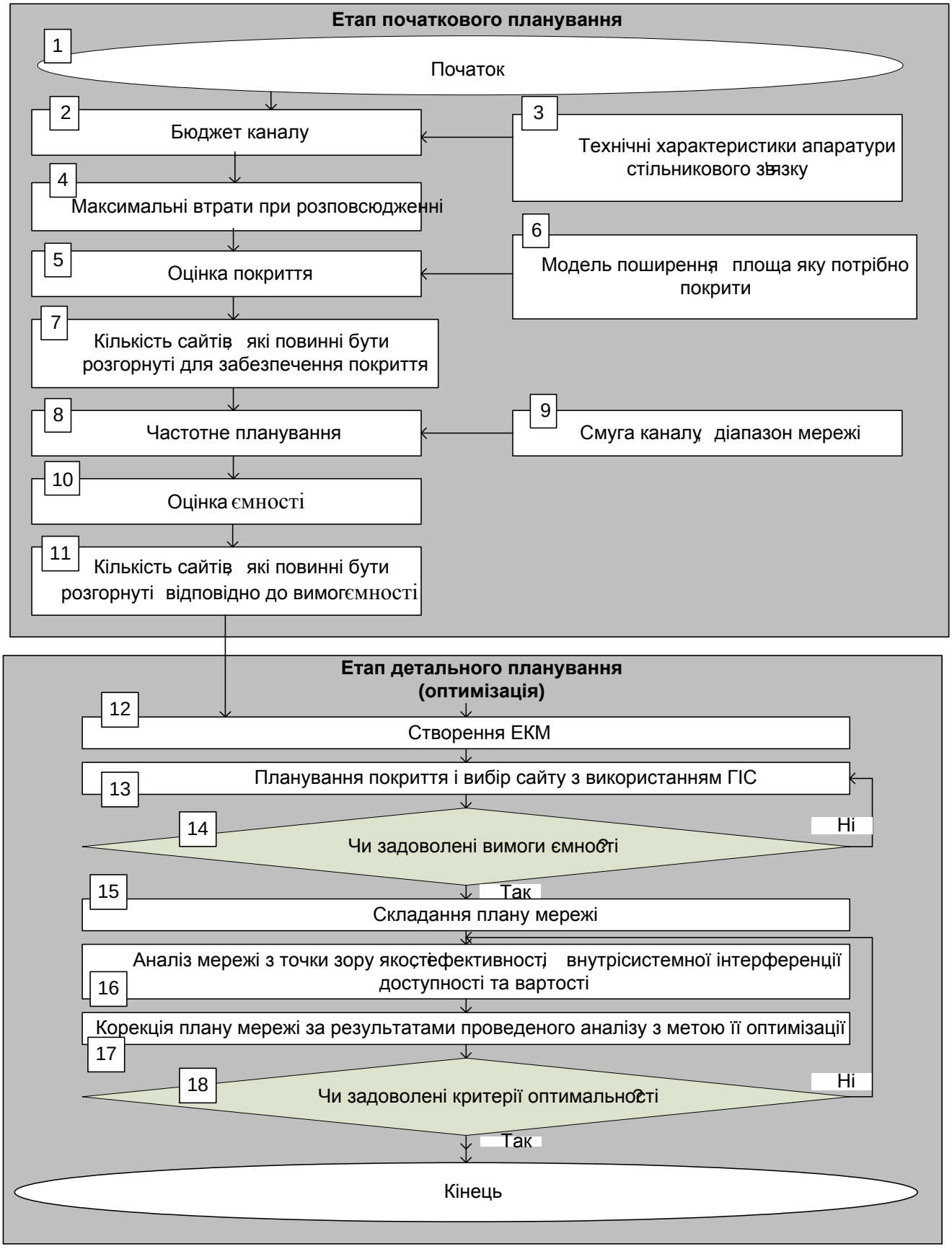


Рисунок 6.1 – Алгоритм побудови мережі початкового наближення LTE

6.2 Рекомендації по вдосконаленню методики планування мережі мобільного зв’язку 4GLTE

Очевидно, що вирішення складної проблеми зниження рівня міжстільникової інтерференції в мережах LTE можливе шляхом використання всіх процедур, закладених у технологію, а також спеціальних кластерних структур.

Для рішень LTE по плануванню можна приймати 1 раз кожну мілісекунду; гранулярність в частотній області 180 кГц. Це допускає відносно швидкі зміни каналу і в часовій, і в частотній області, які повинні простежуватися і відповідно до диспетчера.

Для підтримки планування низхідній лінії зв'язку термінал може забезпечити набір звітів про стан каналу, котрі визначають якість миттєвого каналу низхідній лінії зв'язку і у часовій, і в частотній областях. Стан каналу зазвичай визначають зміни за допомогою опорних сигналів, що передаються по нижній лінії зв'язку. На основі звітів про стан каналу, котрі називають CSI (інформація про стан каналу), диспетчер низхідній лінії зв'язку може розподіляти ресурси для передачі по низхідній лінії зв'язку на різні термінали, при цьому звертаючи увагу на якість каналу в рішенні планування. За принципом, запланованому терміналу може бути призначена довільна комбінація на 180 кГц широких ресурсних блоків для кожного запланованого інтервалу в 1 мсек [14].

Уже згадувалося, що східна лінія зв'язку LTE заснована на ортогональному розподілі різних передач східної лінії зв'язку, і завдання диспетчера висхідної лінії зв'язку розподілити ресурси на часову і частотну на різних терміналах. Рішення планування, прийняті раз за 1 млсек, контролюють, яку групу терміналів допустити до передачі в ячейці протягом певного інтервалу часу і для кожного терміналу в яких частотних ресурсах повинна відбуватися передача і які використовувати параметри передачі, включаючи швидкість передачі даних.

Стан каналу також може враховуватися в процесі планування вихідної лінії зв'язку подібно до планування низхідній лінії зв'язку. Однак отримання інформації про стан каналу вихідної лінії зв'язку не може бути у всіх ситуаціях можливим або бажаним. Тому різні способи отримати рознесення по висхідній лінії зв'язку важливі як доповнення в ситуаціях, коли залежне від каналу планування висхідної лінії зв'язку не вигідно.

ВИСНОВКИ

Світовими фахівцями з інфоокомунікацій розроблено загальні принципи планування мереж мобільного зв’язку, включаючи підготовку вихідних даних, побудову початкового наближення та структурно-параметричну оптимізацію. Розв’язання задачі побудови мережі мобільного зв’язку стандарту LTE передбачає використання методу наближень відповідно до алгоритму частотно-територіального планування.

В кваліфікаційній роботі проведено поглиблений аналіз аспектів планування мереж мобільного зв’язку 4G LTE. В результаті аналізу показано, що ефективність застосованих моделей конфігурації системи, схем кодування і модуляції, моделей частотно-територіальних кластерів в процесі планування значно впливає на якісні показники розгортання мережі, пропускну здатність і рівень внутришньосистемних завад у мережах 4G.

В кваліфікаційній роботі було визначено, що початкове наближення є ефективною важливою передумовою для успішного впровадження технології мобільного зв’язку LTE та подальшій оптимізації мережі.

Наведено практичний розрахунок параметрів радіоканалу иа ємності мережі LTE для типового району із сільскою місцевістю, який показав, що методика вимагає індивідуального підходу до планування через різні умови та особливості.

Проведено імітаційне моделювання оцінки продуктивності низхідного каналу технології LTE за допомогою програмного пакету моделювання – LTE Downlink Resource Element Visualization v1.1. Результати отримані в кваліфікаційній роботі, дають можливість оцінки продуктивності низхідного каналу технології LTE в залежності від змінних параметрів схем кодування при плануванні мереж мобільного зв’язку. Надано рекомендації, щодо доцільності їх впровадження в алгоритм планування мережі мобільного зв'язку 4G LTE

Запропоновано вдосконалення методики побудови мережі початкового наближення мережі LTE на основі методу вибору кластерної структури, аналізу конфігурації мережі на відповідність вимогам щодо ємності та пропускної здатності мережі. Розроблено алгоритм, який розкриває послідовність і зміст етапів побудови початкового наближення та ітеративної оптимізації мережі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Москалець М.В., Коляденко Ю.Ю., Коляденко О.В. Методи доступу у перспективних системах мобільного зв'язку. Монографія. Харків: ХНУРЕ. 2021. 539 с. DOI 10.30837/978-966-659-296-8.

2. Москалець М.В., Бабіч М.Р. Методика планування мережі мобільного зв'язку 4G LTE на основі кластерних моделей. *Сучасні інформаційні технології та системи штучного інтелекту (MIT@AIS-2025).* Матеріали 1-ї Міжнародної науково-практичної конференції.Частина 2, 19-22 травня 2025 р. Харків - Яремче, Україна, Харків 2025. С.28-29.

3. Sassan Ahmadi Ahmadi S. *LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding the 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies*. Oxford : Academic Press, 2014. 1116 p.

4. Khan F. LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance. Cambridge University Press, 2009.

5. Бабіч М.Р., Горбачов В.О., Москалець М.В. Аналіз схем повторного використання частот для мереж мобільного зв'язку 4-5G. *«Радіоелетроніка і молодь У XXI столітті», конференція «Перспективи розвитку інфокомунікацій та інформаційно-вимірювальних технологій».* Матеріали 29-го міжнародного молодіжного форуму 16 – 18 квітня 2025 р., Том 4.С.28-31.

6. Бабіч М.Р., Горбачов В.О. Методи дослідження параметрів невизначеності прямих і польових вимірювань радіоелектронних засобів систем мобільного зв'язку. *Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека (ІКТК-2024).* Матеріали десятої міжнародної науково-технічної конференції, м.Харків, 13-14 листопада 2024 р. ХНУРЕ, С. 100-101.

7. Cox C. Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications. Wiley & Sons, Limited, John, 2012. 352 p.

8.Ahmadi S. LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies. Elsevier Science & Technology Books, 2017.1242 p.

9. Dahlman E., Parkvall S., Sköld J. LTE Radio Access. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. 2014. P. 103–119. URL: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-419985-9.00007-6 (дата звернення: 25.06.2026).

10. Горбачов В.О., Колосов Б.Є., Любімов М.О., Москалець М.В. Дослідження продуктивності низхідного каналу зв'язку технології LTE. *«Радіоелетроніка і молодь У XXI столітті», конференція «Перспективи розвитку інфокомунікацій та інформаційно-вимірювальних технологій».* Матеріали 30-го міжнародного молодіжного форуму 22 – 24 квітня 2026 р., Том 4.С.104-106.

11. Spatial features of lifecell mobile network in the western part of Ukraine / S. Puhach et al. *33*. 2022. No. 33. P. 30–37. URL: https://doi.org/10.26565/2076-1333-2022-33-04 (дата звернення: 25.06.2026).

12. Москалець М.В. Використання методу оптимізації упаковки об'єктів у задачах планування фемтостільників мобільних систем зв'язку. *Наукове періодичне видання "Системи управління, навігації та зв'язку"*. 2017. №2(42). С.185-187.

13. Salo J., Nur-Adam M., Chang K. Practical Introduction to LTE Radio Planning. Wiley and Son, 2010.

14. 3GPP TS 36.104: Base Station (BS) radio transmission and reception, Release 9, April 2011.

15. 3GPP TS 36.101: User Equipment (UE) radiotransmission and reception, Release 11, November 2012.

16. Release 13 Description; 3GPP TR 21.913: Release Description /3GPP. 2015. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/ (дата звернення: 25.06.2026).

17. LTE E-UTRAN and its Access Side Protocols : White Paper / S. Tripathi, V. Kulkarni, A. Kumar; Radisys. 2011. URL: http://go.radisys.com/rs/radisys/images/paper-lte-eutran.pdf (дата звернення: 25.05.2026).