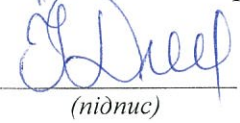
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методи оптимізації розрахунку зони радіопокриття базової станції для LTE-мережі»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

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



(підпис) Іван ДЕРЕВ`ЯНКО *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-62
Іван ДЕРЕВ`ЯНКО

Керівник: Анатолій МАКАРЕНКО

Рецензент: А. Грищевич

Київ – 2023

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дерев`янку Івану Івановичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Методи оптимізації розрахунку зони радіопокриття базової станції для LTE-мережі»,
керівник кваліфікаційної роботи Анатолій МАКАРЕНКО, д.т.н., професор,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 19.10.2023 р. №145.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Архітектура і загальні властивості LTE-мережі.
   2. Мережеве стільникове планування.
   3. Автоматизовані засоби проектування стільникової мережі зв'язку.
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Концептуальні аспекти технологій LTE.
   2. Дослідження процесу мережевого стільникового планування LTE-мереж.
   3. Автоматизовані засоби проектування стільникової мережі зв'язку.
   4. Розробка програми розрахунку зони радіопокриття базової станції.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	19.10.23	Викон.
2.	Концептуальні аспекти технологій LTE	31.10.23	Викон.
3.	Дослідження процесу мережевого стільникового планування LTE-мереж	15.11.23	Викон.
4.	Автоматизовані засоби проектування стільникової мережі зв'язку	29.11.23	Викон.
5.	Розробка програми розрахунку зони радіопокриття базової станції	07.12.23	Викон.
6.	Висновки, вступ, реферат	11.12.23	Викон.
7.	Розробка презентації	18.12.23	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Іван ДЕРЕВ`ЯНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій МАКАРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 90 стор., 36 рис., 13 табл., 28 дж.

Мета роботи – дослідження методів планування та оптимізації безпроводових телекомунікаційних мереж.

Об'єкт дослідження - є процес доступу в безпроводових LTE-мереж.

Предмет дослідження – методи оптимізації зони радіопокриття базової станції для LTE-мережі при її попередньому плануванні.

Короткий зміст роботи: В магістерській роботі проведено аналіз архітектури і загальних властивостей технології LTE. Досліджено процес мережевого стільникового планування, який складається з: аналізу трафіку і покриття; номінального стільникового плану; вибору об'єктів розміщення базових станцій. Проведено дослідження стану питання автоматизованих засобів проектування стільникових мереж зв'язку. Виконано проектування покриття системи стільникового зв'язку за допомогою автоматизованого пакету RPS - 2. Розроблено програму автоматизації розрахунку зони радіопокриття базової станції при попередньому плануванні LTE-мережі в MathCad.

Галузь застосування – цифрова мережа зв'язку України.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АРХІТЕКТУРА LTE, СТІЛЬНИКОВА МЕРЕЖА, БАЗОВА СТАНЦІЯ, ПОСЛІДОВНІСТЬ ПЛАНУВАННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ, РАДІОПОКРИТТЯ, ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС RPS2, MATHCAD, МАТРИЦЯ

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 90 pages, 36 pictures, 13 table, 28 sources.

The purpose of the work - research of methods of planning and optimization of wireless telecommunication networks.

Object of research – there is a process of accessing wireless LTE networks.

Subject of research – methods of optimizing the radio coverage area of the base station for the LTE network during its preliminary planning.

Summary of the work: The master's work analyzed the architecture and general properties of LTE technology. The process of network cellular planning was studied, which consists of: traffic and coverage analysis; nominal cellular plan; selection of base station accommodation facilities. A study of the state of the issue of automated means of designing cellular communication networks was conducted. The coverage design of the cellular communication system was carried out using the RPS-2 automated package. The program for automating the calculation of the radio coverage area of the base station during the preliminary planning of the LTE network in MathCad was developed.

The field of application is the digital communication network of Ukraine.

KEYWORDS: LTE ARCHITECTURE, CELL NETWORK, BASE STATION, SEQUENCE PLANNING, DESIGN, RADIO COVERAGE, RPS2 SOFTWARE, MATHCAD, MATRIX

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Дерев`янко І.І. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Методи оптимізації розрахунку зони радіопокриття базової станції для LTE-мережі

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

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

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Дерев`янко Іван Іванович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Дерев`янка Івана Івановича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій МАКАРЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

“ ” _____ 2023 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Дерев`янко І.І.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

“ ” _____ 2023 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Дерев`янка Івана Івановича

на тему: «Методи оптимізації розрахунку зони радіопокриття базової станції для LTE-мережі»

Актуальність:

Зростаючий вплив технологій широкосмугового безпроводового доступу на наше життя переоцінити неможливо. ШБД розглядається нині як необхідність, а технологія LTE є найбільш затребуваною. Разом з тим в відомій науково-технічній літературі даним питанням і шляхам вирішення поставлених завдань приділена не велика увага.

Тому, тема магістерської роботи, є актуальною. Запропонована тема має практичне значення та є доцільною і своєчасною.

Позитивні сторони:

Робота дозволяє досить повно оцінити загальну характеристику, сутність та структуру поставленої проблеми. Дається чітке визначення мети роботи, об'єкту та предмету дослідження. Сформульовано наукові проблеми і представлено використані методи дослідження.

Недоліки:

1. В роботі варто приділити увагу, крім програми RPS-2, програмно-апаратному комплексу TEMS.
2. В роботі не описано, чи дозволяє розроблена програма динамічно відображати розподіл стільників в регіоні в залежності від поточних результатів обчислення.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Дерев`янко Іван Іванович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент: ДТН. проф. _____ А. Гриценкова

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 9
ВСТУП 11
1 КОНЦЕПТУАЛЬНІ АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЙ LTE 13
1.1 Архітектура мережі LTE 13
1.2 Особливості планування радіомережі LTE 22
1.3 Аспекти планування радіомереж LTE 30
1.4 Особливості частотного планування в мережах LTE 39
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МЕРЕЖЕВОГО СТІЛЬНИКОВОГО ПЛАНУВАННЯ LTE-МЕРЕЖ 50
2.1 Аналіз трафіку і покриття 50
2.2 Номінальний стільниковий план 55
2.3 Вибір об'єктів розміщення базових станцій 65
2.4 Особливості оптимізації радіомереж LTE 70
3 АВТОМАТИЗОВАНІ ЗАСОБИ ПРОЕКТУВАННЯ СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ 77
3.1 Інтелектуальні технології при проектуванні мереж стільникового зв'язку 77
3.2 Проектування покриття системи стільникового зв'язку за допомогою автоматизованого пакету Atoll 82
3.3 Програма попереднього розрахунку зони радіопокриття мережі стільникового зв'язку технології LTE в середовищі MathCad 89
ВИСНОВКИ 91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 92
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСШ – відношення сигнал/шум;

ЕОМ – електронно – обчислювальна машина;

МСІ – міжсимвольна інтерференція;

МСЕ – Міжнародний союз електрозв'язку;

НВЧ – надвисокі частоти;

ТКС – телекомунікаційні системи;

ЦОС – цифрова обробка сигналів;

ШПФ – швидке перетворення Фур'є;

ATM (Asynchronous Transfer Mode) – асинхронний режим передачі;

BER (Bit Error Rate) - ймовірність появи бітових помилок ;

BPSK (Binary Phase-Shift Keying) – двійкова фазова модуляція;

CDMA (Code Division Multiple Access) - множинний доступ із кодовим розділенням каналів;

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) – Європейський інститут з стандартизації в області телекомунікацій;

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) - Інститут Інженерів з Електроніки та Електротехніки;

ITU-T (International Telecommunication Union) - Міжнародний телекомунікаційний союз;

ISI (Intersymbol Interference) - міжсимвольна інтерференція;

LTE (Long Term Evolution) - еволюція в довгостроковій перспективі;

MAN (Metropolitan Area Network) – регіональна мережа;

MIMO (Multiple Input Multiple Output) - декілька входів та виходів;

NGN (Next Generation Network) – мережа наступного покоління;

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – мультиплексування ортогонально розділених несучих;

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурна амплітудна

модуляція;

QPSK (Quantitude Phase Shift Keying) – квадратурна відносно фазова модуляція;

TMN (Telecommunication Menegment Network) – мережа управління телекомунікаціями;

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

Wi-Fi (Wireless Fidelity) - безпровідна технологія з'єднання комп'ютерів в мережу;

Wi-MAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – глобальна сумісність для мікрохвильового доступу.

ВСТУП

З ростом числа користувачів мобільного Інтернету постійно зростає потреба в широкосмуговому доступі (ШПД) не лише в домашніх умовах або, скажемо на робочому місці, а й у будь-якій точці знаходження сучасного користувача Інтернету, мобільний ШПД стає з кожним днем поширенішим. Велика частина з цих користувачів отримають послуги мобільного ШПД, завдяки сучасним мережам з підтримкою таких мережевих протоколів передачі даних LTE (Long Term Evolution) [1].

Люди, які йдуть в ногу з розвитком технічного прогресу, вже сьогодні можуть використовувати Інтернет або працювати з електронною поштою прямо з ноутбуків, з підтримкою технології HSPA, а також обмінюватися мультимедійним контентом (фото, відео, музика) з телефонів в яких підтримується технологія 3G. З появою технології LTE, користуватися такими послугами стане набагато зручніше і комфортніше. Напевно в мережах, побудованих на технології LTE, з'являться і інші послуги, які дуже залежать від ширини каналу зв'язку. З таких послуг можна виділити, наприклад, онлайн-ігри, мобільний відео-блогінг, інтерактивне ТБ, професійні послуги [2].

Перехід на стандарт LTE принесе важливі переваги як для абонентів так і для операторів тих, що надають послуги мобільного ШПД.

1. Ємність і продуктивність. Одна з основних вимог, що пред'являються Release 8 проекту 3GPP до систем LTE - підтримка максимальної швидкості завантаження даних до 100 Мбіт/с. Такі вимоги говорять про те, що система LTE, більше, ніж будь яка технологія, відповідає ключовим вимогам, що пред'являються до систем 4G.

2. Простота. Система LTE забезпечує роботу в смузі частот різної ширини, починаючи від значень помітно нижче 5 МГц (1.5 МГц) і до смуги 20 МГц. LTE також може бути реалізована на основі різних принципів розподілу сигналів, частотного (FDD - Frequency Division Duplex) і часового (TDD - Time Division Duplex). Зараз для роботи систем LTE передбачено 10 парних і 4 непарні

діапазони частот. У подальших планах застосування і інших частотних діапазонів. Тому оператори можуть спочатку запускати LTE в "нових" частотних діапазонах, де простіше отримати смуги в 10 МГц (чи 20 МГц), а далі покроково впроваджувати LTE в усіх інших доступних діапазонах.

3. Широкий вибір терміналів. Окрім мобільних телефонів, в мережах LTE працюватиме велика кількість комп'ютерів, нетбуків, ноутбуків, ігрових приставок і інших пристроїв, оснащених модулем роботи з LTE-мережею.

З впровадженням LTE, оператори зможуть ефективно використовувати виділені їм діапазони частот, а також досягти мети в області мобільного ШПД і пов'язаних з цією технологією послуг.

LTE-мережа відповідає вимогам до мереж мобільного зв'язку наступного покоління - як для існуючих операторів 3GPP/3GPP2, так і для нових операторів. Ця технологія дозволить надавати продуктивніші послуги мобільного ШПД для дуже великої аудиторії, застосовуючи комбінацію максимальних швидкостей і великої пропускної потужності системи у будь-якому напрямі.

Інфраструктура LTE розроблена так, що розгортання і експлуатація буде більш проста, з цією метою розроблена гнучкіша технологія, здатна працювати в широкому класі частотних діапазонів.

Тому, тема магістерської роботи, присвяченої аналізу методів планування та оптимізації безпроводових телекомунікаційних мереж, є актуальною.

Об'єкт дослідження – є процес доступу в безпроводових LTE-мереж.

Предмет дослідження – методи оптимізації зони радіопокриття базової станції для LTE-мережі при її попередньому плануванні.

Мета роботи - дослідження методів планування та оптимізації безпроводових телекомунікаційних мереж.

Методи дослідження - методи системного аналізу, елементи методів теорії ієрархічних багаторівневих систем, методи програмування.

1 КОНЦЕПТУАЛЬНІ АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЙ LTE

1.1 Архітектура мережі LTE

Розглянемо структуру мережі LTE (рис. 1.1) [3].

З схеми мережі LTE, представленої вище, вже видно, що структура мережі сильно відрізняється від мереж стандартів 2G і 3G. Істотні зміни зазнала і підсистема базових станцій, і підсистема комутації. Була змінена технологія передачі даних між обладнанням користувача і базовою станцією. Також піддалися зміні і протоколи передачі даних між мережевими елементами. Вся інформація (голос, дані) передається у вигляді пакетів. Таким чином, вже немає розділення на частини оброблювальні або тільки голосову інформацію, або тільки пакетні дані.

Можна виділити наступні основні елементи мережі стандарту LTE:

- Serving SAE Gateway або просто Serving Gateway (SGW) - обслуговуючий шлюз мережі LTE, призначений для обробки і маршрутизації пакетних даних тих, що поступають із/в підсистему базових станцій. По суті, замінює MSC, MGW і SGSN мережі UMTS. SGW має пряме з'єднання з мережами другого і третього поколінь того ж оператора, що спрощує передачу з'єднання в/із них по причинах погіршення зони покриття, перевантажень і тому подібне.
- Public Data Network (PDN) SAE Gateway або просто PDN Gateway (PGW) - шлюз до мереж інших операторів. Якщо інформація (голос, дані) передаються із/в мережі даного оператора, то вони маршрутизуються саме через PGW.
- Mobility Management Entity (MME) - вузол управління мобільністю. Призначений для управління мобільністю абонентів мережі LTE.
- Home Subscriber Server (HSS) - сервер абонентських даних. HSS є об'єднанням VLR, HLR, AUC виконаних в одному пристрої.
- Policy and Charging Rules Function (PCRF) - вузол виставляння рахунків

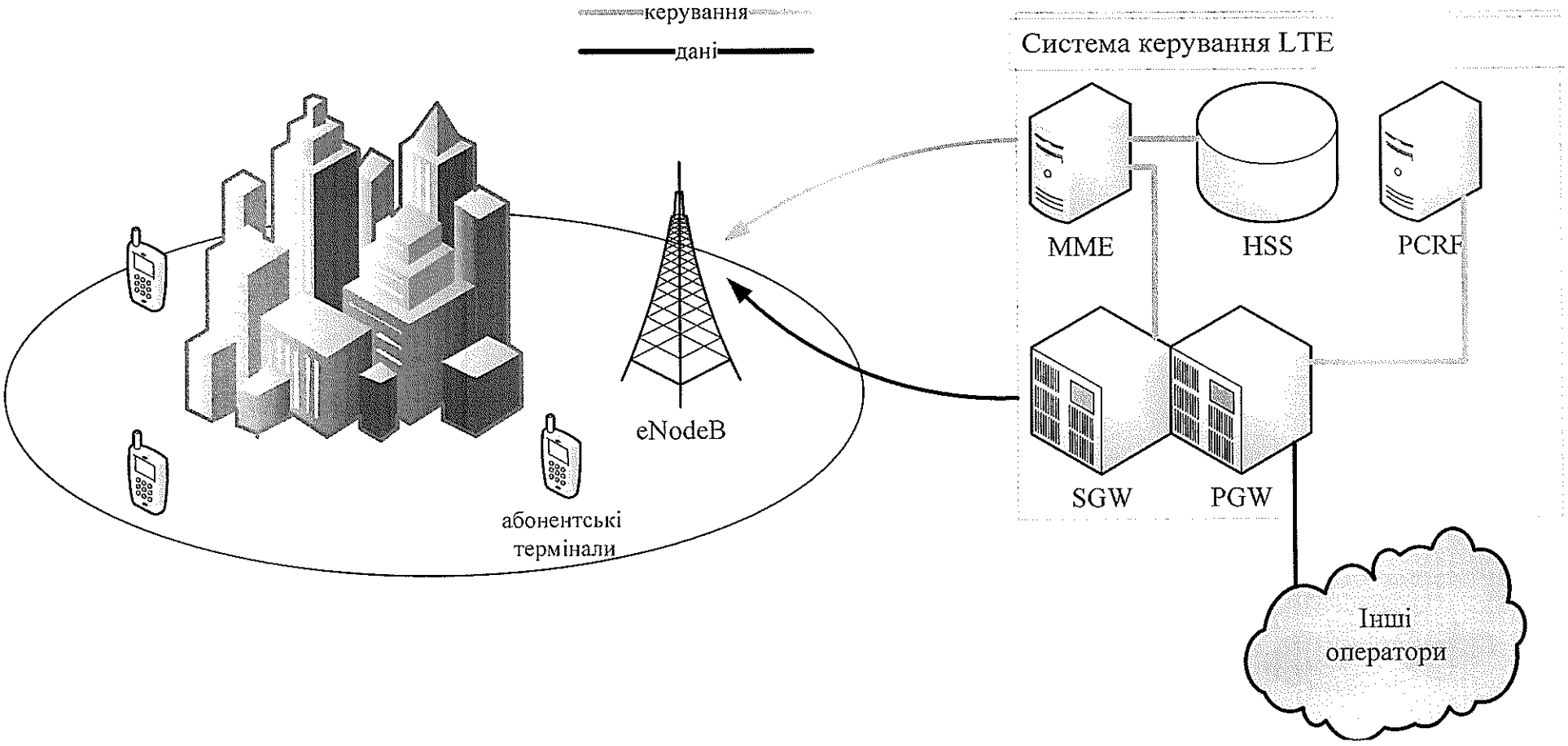


Рис. 1.1. Структура мережі стандарту LTE

- абонентам за надані послуги зв'язку.

Всі перераховані вище елементи відносяться до системи комутації мережі LTE. У системі базових станцій залишився лише один знайомий нам елемент - базова станція, яка отримала назву enodeb. Цей елемент виконує функції і базової станції, і контролера базових станцій мережі LTE. За рахунок цього спрощується розширення мережі, оскільки не потрібне розширення ємкості контролерів або додавання нових.

Основні вимоги до архітектури мережі LTE можна узагальнити наступним чином [4]:

1. Підтримка мереж радіодоступу як стандартів 3GPP, так і стандартів 3GPP. При цьому інформація про можливі технологіях доступу повинна передаватися на абонентський термінал із зазначенням пріоритетів технологій, встановлених оператором.

2. Повна сумісність базової мережі SAE з базовими мережами стандартів 3GPP, починаючи з Release 6.

3. Забезпечення мінімальних затримок передачі даних згідно з протоколами площині управління C-plane. Наприклад, інтервал часу переходу мобільного терміналу зі стану Idle (термінал знаходиться у стані Attached протоколу GMM, виділений IP – адресу, термінал зареєстрований в підсистемі IMS) у стан початку прийому / передачі даних по протоколах U-plane повинно бути не більше 200 мс.

4. Чіткий функціональний розподіл між елементами мережі SAE, що дозволяє уникнути додаткових затримок передачі даних згідно з протоколами C-plane через дублювання функцій.

5. Встановлення IP - з'єднання з індивідуальними параметрами QoS при мінімальній кількості транзакцій.

6.Функціяуправління мобільністю мережі LTE має вирішувати завдання управління мобільністю як в мережі E-UTRAN, так і між мережами E-UTRAN та мережами радіодоступу інших типів.

7. Функція управління мобільністю мережі LTE повинна взаємодіяти з терміналами різних типів: фіксованими, мобільними і мобільними.

8.Функція управління мобільністю мережі LTE повинна надавати оператору мережі LTE можливість управляти мережами доступу, використовуваними абонентами.

9. Процедури підтримки мобільності терміналів (хендовери) у мережах E-UTRAN, між мережами E-UTRAN та іншими мережами радіодоступу 3GPP (процедура Inter-RAT Handover), а також між мережами E-UTRAN/ 3GPP та мережами радіодоступу Не - 3GPP повинні бути реалізовані з мінімальною втратою пакетів даних в режимі реального часу (наприклад, для додатків VoIP) і в режимі, інваріантному часу (наприклад, для перегляду web-ресурсу).

10. Процедура оновлення даних про місцезнаходження абонентського терміналу в мережі повинна забезпечувати мінімальне завантаження каналів сигналізації.

11. Архітектура мережі SAE повинна забезпечувати оптимальну маршрутизацію при знаходженні абонента в міжмережевому роумінгу.

12. Для надання гнучкого доступу до мережі LTE користувачам, що знаходяться у роумінгу, архітектура мережі SAEповинна забезпечувати доступ через різні мережі безпроводового широкосмугового доступу WLAN у відповідності з існуючими договорами доступу між оператором візитною мережі VPLMN і візитними операторами мережі WLAN, причому такі договори між візитними операторами мережі WLAN і оператором домашньої мережі HPLMN не потрібні.

13. Підтримка IP – протоколів різних версій (IPv4 та IPv6), а також режиму мовлення IP-Multicast.

14. Забезпечення такого рівня безпеки користувачів (аутентифікація, ідентифікація, шифрування даних), який був би не нижче, ніж в існуючі мережі 3GPP з пакетною комутацією і комутацією каналів. Процедура аутентифікації не повинна залежати від типу і технології мережі доступу

15. Доступ до мереж LTE повинен надаватися абонентам згідно з існуючими USIM-картками (Release 99). При цьому база даних HSS повинна відповідати Release 5.

16. Підтримка всіх існуючих у цей час принципів тарифікації.

17. Архітектура SAE має забезпечувати гнучке використання ресурсів мережі, коли всі елементи мережі (вузли) розглядаються як єдиний розподілений ресурс. Прикладом стала структура інтерфейсу Iu-flex, визначена в Release 5, згідно з якою контролер RNC може мати інтерфейс з декількома вузлами SGSN / MGW.

На рис. 1.2 зображена архітектура мережі LTE.

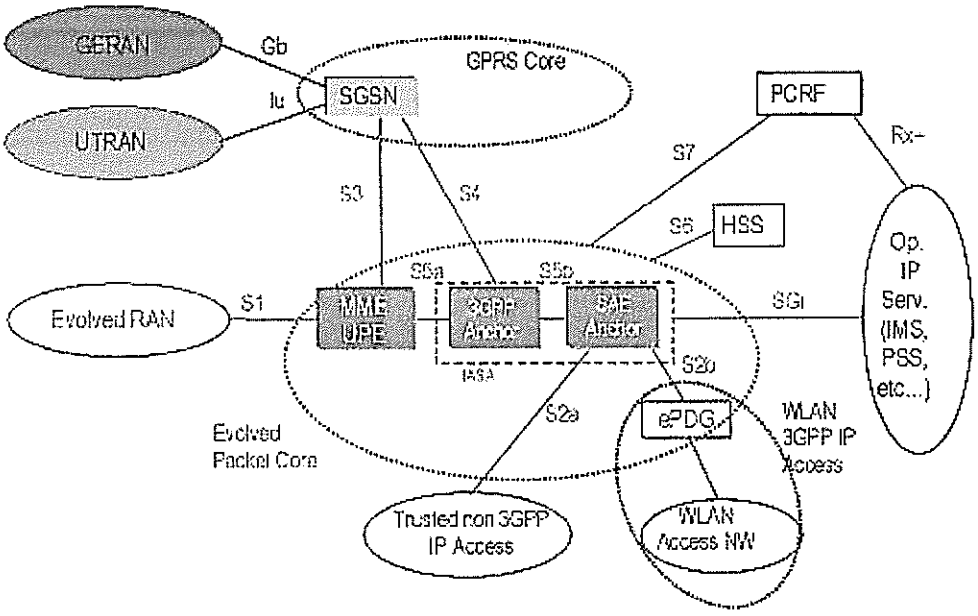


Рис. 1.2. Архітектура мережі LTE

Мережа LTE складається із двох найважливіших компонентів: мережі радіодоступу E-UTRAN та базової мережі SAE(System Architecture Evolution).

Основними вимогами проекту 3GPP до мережі SAE були: максимально можливе спрощення структури мережі і виключення дублюючих функцій мережевих протоколів, характерних для системи UMTS [5].

Мережа радіодоступу E-UTRAN розглянута в ряді технічних специфікацій, згідно з якими вона складається тільки з базових станцій eNB (evolved Node B). Базові станції eNB є елементами повнозв'язної мережі E-UTRAN і з'єднані між собою за принципом «кожен з кожним «за допомогою інтерфейсу X2. Інтерфейс X2 підтримує хендовер мобільного терміналу в стані LTE ACTÍV B. Кожна базова

станція має інтерфейс Sic базової мережею SAE, побудованої за принципом комутації пакетів.

Базова мережа SAE, іноді звана мережею EPC (Evolved Packet Core), містить вузли MME/UPE, що складаються з логічних елементів MME iUPE. Логічний елемент MME (Mobility Management Entity), який відповідає за вирішення задач управління мобільністю абонентського терміналу та взаємодіє з базовими станціями NB мережі E-UTRAN за допомогою протоколів площині управління C-plane (інтерфейс S1-C). Логічний елемент UPE (User Plane Entity) відповідає за передачу даних користувачів, згідно з протоколами площині користувача U-plane і взаємодіє з eNB за допомогою інтерфейсу S1- U [11].

Завдяки інтерфейсу S1 базові станції з'єднані з декількома вузлами MME/UPE, що дозволяє більш гнучко використовувати мережевий ресурс. Такий інтерфейс називають Sl-flex.

Мережа LTE має наступні функціональні відмінності від мережі UMTS[6]:

1. Базові станції eNB виконують функції управління радіоресурсу (Radio Resource Management - RRM): управління радіоканалами (Radio Bearer Control) управління доступом (Radio Admission Control), управління мобільністю (Connection Mobility Control), динамічний розподіл ресурсів (Dynamic Resource Allocation). Таким чином, в мережі радіодоступу E-UTRAN базові станції eNB управляють протоколами радіоінтерфейсу, комбінуючи виконання функцій базових станцій Node B і більшість функцій контролера RNC мережі UMTS.

2. Мережний елемент керування мобільністю MME відповідає за розподіл повідомлень виклику (paging) до базових станцій eNB. Крім того, MME управляє протоколами площині управління: призначення ідентифікаторів абонентських терміналів, забезпечення безпеки мережі, перевірки автентичності повідомлень абонентів і управління роумінгом.

3. Мережі і елемент площині користувача UPE виконує стиснення заголовків IP-протоколів, шифрування потоків даних, термінацію пакетів даних площині користувача, комутацію пакетів даних при забезпеченні мобільності користувача. Крім того, UPE управляє протоколами користувацького рівня,

наприклад, зберіганням поточного статусу абонентського терміналу (АТ) перериванням стану LET_IDLE рівні абонентських терміналів.

Однією з найважливіших задач керування в мережі LTE є максимально ефективне використання радіоресурсу. Дане завдання вирішується за допомогою сукупності функцій управління радіоресурсу RRM (управління радіоресурсу мережі E-UTRAN, управління службою передачі даних в радіоканалі, управління мобільністю, управління доступом, динамічний розподіл ресурсів)і за допомогою протоколу управління радіоресурсу RRC. Вимоги до функцій управління радіоресурсу наведені в TR 25.913.

Управління радіоресурсу мережі E-UTRAN (Inter Cell RRM) забезпечує управління ресурсами групи стільників з метою підвищення ефективності використання частотного спектру і мінімізації завадових взаємного впливу абонентських терміналів і базових станцій, а також підпідтримку мобільності. Керування службою передачі даних в радіоканалі (RB Control) реалізовано в базових станціях eNB мережі E-UTRAN і забезпечує встановлення, підтримання та звільнення радіоканалів передачі даних із заданими параметрами в мережі E-UTRAN. Основними завданнями є контроль і управління всіма активними сесіями передачі даних з урахуванням параметрів якості послуг (QoS), виділення ресурсів для знову активуються сесій.

Управління мобільністю (Connection Mobility Control) дозволяє вибирати обслуговуючу базову станцію eNB для мобільного терміналу, передавати обслуговування мобільного терміналу від однієї базової станції eNB (хендовер) до іншої. Вибір обслуговуючої eNB здійснюється мобільним терміналом на основі власних вимірів у стані RRC CONNECTED і порівняння отриманих вимірювань з встановленими пороговими значеннями. Хендовер реалізований на основі аналізу вимірювань як мобільного терміналу, так і базової станції eNB, а також поточного завантаження обслуговуючої та сусідніх стільників, політикою оператора з регулювання трафіку.

Підтримку мобільності абонентського терміналу в мережі SAE забезпечує логічний елемент MME. Основними функціями MME є:

- керування мобільністю абонентського терміналу, що перебуває у стані RRC_IDLE (Idle State Mobility Handling);

- управління безпекою мобільного зв'язку (NAS Security) відповідно до протоколів, що відносяться до групи протоколів «рівня без доступу» і що забезпечують, наприклад, аутентифікацію користувачів, управління ключами шифрування даних;

- управління службою передачі даних мережі SAE (SAE Bearer Control).

Параметри функцій управління радіоресурсу мережі E-UTRAN (Inter Cell RRM), управління службою передачі даних в радіоканалі (RB Control)та управління мобільністю (ConnectionMobility Control) можуть бути кластеризовані відповідно до вимог оператора.

Основним завданням управління доступом (Radio Admission Control) є формування рішень про надання доступу мобільному терміналу до мережі E-UTRAN. Дане завдання вирішується на основі багатокритеріального аналізу завантаження мережі радіодоступу, вимог мобільного терміналу до параметрів QoS.

Динамічний розподіл ресурсів (Dynamic Resource Allocation; Scheduler) відповідає за планування черговості передачі пакетів даних і дозволяє динамічно виділяти і перерозподіляти ресурси мережі радіодоступу, включаючи канальні ресурси, потужність випромінювання базових станцій, ресурси буферизації при обробці пакетів даних з урахуванням параметрів QoS.

Протокол управління радіо ресурсу RRC площині C-plan забезпечує:
- мовлення службової інформації відповідно до протоколів, що відносяться до груп протоколів «рівня з доступом «і «рівня без доступу «(відповідно AS- Access Stratum і NAS - Non-Access Stratum);

- пейджинг мобільного терміналу;

- встановлення, підтримання та закриття RRC - з'єднань між абонентським терміналом і мережею E-UTRAN;

- управління ключами шифрування;

- встановлення, підтримання та закриття служб передачі даних в радіо-

каналі (Radio Bearers) типу «точка - точка «і «точка – багато точка» з заданими параметрами QoS;

- мобільність абонентських терміналів.

Крім того, протокол RRC забезпечує виконання ряду інших функцій. Протокол збіжності пакетних даних (Packet Data Convergence Protocol - PDCP) площин U - plane iC – Plane забезпечує усунення надмірності (стиснення) службової інформації, обсяг якої може бути порівнянний з обсягом корисної інформації, що передається в пакетах даних, а також шифрування / дешифрування даних.

Протокол управління радіоканалом(Radio Link Control – RLC) забезпечує[7]:

- сегментацію і компоновку пакетів даних протоколів більш високого рівня (Protocol Data Unit - PDU) змінної довжини в менші блоки корисного навантаження (Packet Unit - PU); розмір блоку PU визначається відповідно до швидкості передачі інформації в радіоканалі;

- конкатенцію (зчленування) коротких пакетів PDU верхнього рівня;

- заповнення залишку поля даних блоку PU, якщо зчленування неприйнятно;

- передачу даних користувача з підтвердженням і непідтвердженням прийому згідно з параметрами QoS;

- виправлення помилок методом повторної передачі (ARQ) пакетів даних;

- збереження на більш високому рівні порядку доставки пакетів PDU про передачу даних з підтвердженням прийому;

- виявлення дублювання пакетів PDU для доставки їх на більш високий рівень тільки один раз;

- управління швидкістю передачі даних;

- контроль порядкових номерів пакетів.

1.2 Особливості планування радіомережі LTE

На відміну від UMTS, на планування радіомережі LTE може вплинути цілий ряд чинників, обумовлених принциповими особливостями цієї технології [8]:

1. Новий метод множинного доступу (OFDMA, SC - FDMA).

2. Наявність відмінностей в організації мережі і оцінці її пропускної спроможності при різних видах дуплексу FDD і TDD.

3. Адаптація схем модуляції і кодування (AMC). Описані раніше процедури адаптації в радіоканалах LTE в основному базуються на інформації про якість каналу CQI, що передається в спеціальних каналах зворотного зв'язку. Індикатор CQI (Channel quality indicator) є мірою стану каналу для усіх користувачів мережі і є дискретною величиною (зазвичай з 30 рівнями) для оцінки відношення сигнал/шум SNR в приймачі. На рис. 1.3 показаний приклад моделі відображення SNR в дискретні значення CQI.

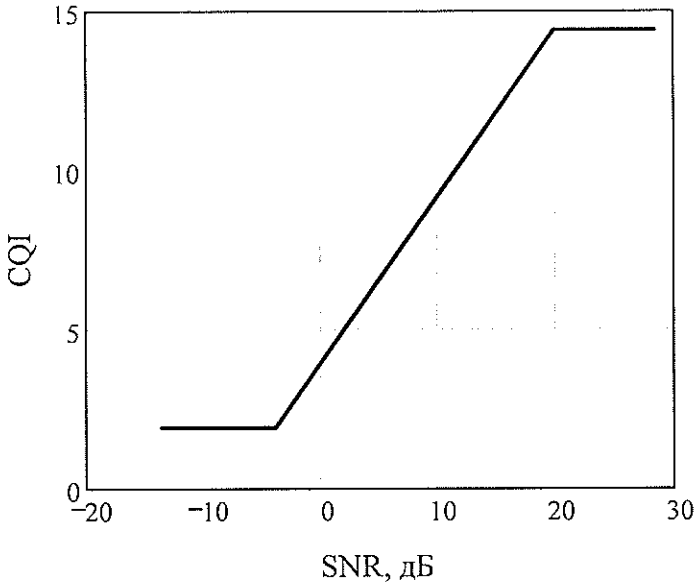


Рис. 1.3. Модель відображення SNR в значення CQI

Індикатор CQI використовується в якості вхідного параметра для планувальника базової станції eNode B при адаптивному виборі схеми модуляції і кодування AMC, плануванні і призначенні радіоресурсу. Тому від точності CQI

залежить ефективність використання цього ресурсу. Перетворення CQI в радіоінтерфейсі зв'язане з деякими неточностями, обумовленими квантуванням, часовими затримками, усереднюванням SNR та ін. Це викликає необхідність коригування CQI в eNode B. Найбільш простий спосіб такого коригування - перерахунок значень CQI за допомогою деякого обмежувального параметра LAM (Link Adaptation Margin)

$$CQI_0 = CQI - LAM. \quad (1.1)$$

Параметр LAM вказує величину, на яку зменшується поточне значення CQI перед використанням його в алгоритмі адаптації. Якщо значення LAM позитивне, то CQI0 буде зменшене, і це викличе призначення ресурсів каналу для низької швидкості передачі даних, і навпаки. Це зрештою робить вплив на такі плановані параметри радіомережі, як швидкість і якість передачі даних. На рис. 1.4 показана залежність максимальної швидкості передачі даних для одного користувача від відношення сигнал/шум при AMC і повторних передачах HARQ з адаптивними значеннями індикатора CQI.

4. Маштабованість ширини радіоканалу, тобто можливість планувати радіоканали різної стандартизованої ширини (1,4 МГц, 3 МГц, 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц і 20 МГц). При плануванні цих каналів слід виходити з того, що ефективність LTE в порівнянні з UMTS/HSPA досягається при ширині каналу не менше 10 МГц. Крім того, стандартом встановлено, що в деяких ідентифікованих смугах радіочастот плануватися можуть не усі з перерахованих каналів.Для кожного значення швидкості передачі даних або пропускної спроможності стільника існує оптимальна ширина каналу, при якій зона радіопокриття є максимальною. Поза сумнівом, цей факт має бути врахований при плануванні радіомережі LTE і буде розглянутий нижче.

5. Використання агрегованого спектру за рахунок його комбінації (об'єднання) в різних смугах частот (рис. 1.5). Існує декілька варіантів і сценаріїв такої агрегації. Приклади найбільш пріоритетних сценаріїв використання агрегованого спектру на даний момент показані в табл. 1.1.

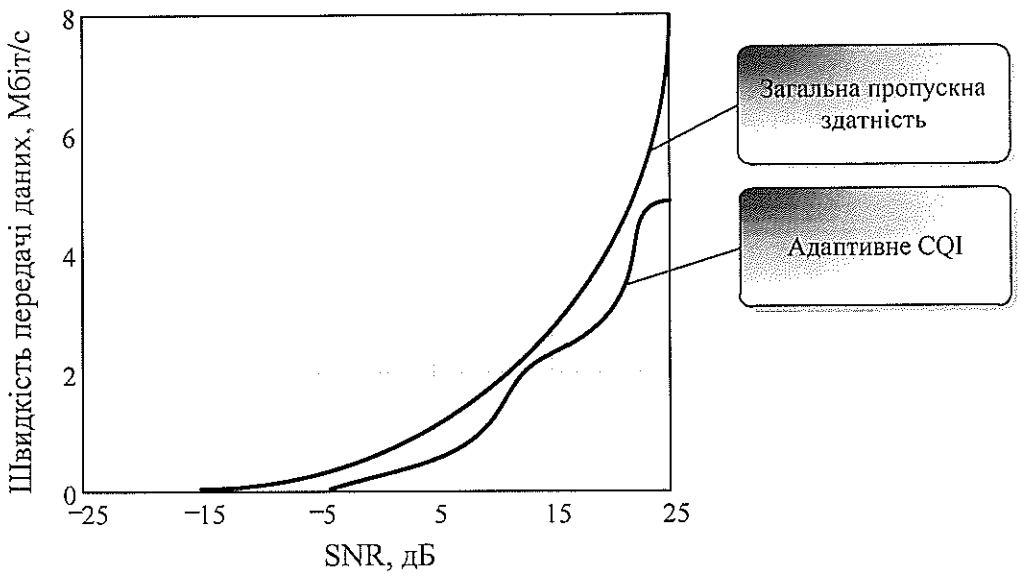


Рис. 1.4. Залежність швидкості передачі даних для одного користувача від SNR при AMC/HARQ з адаптивними значеннями CQI

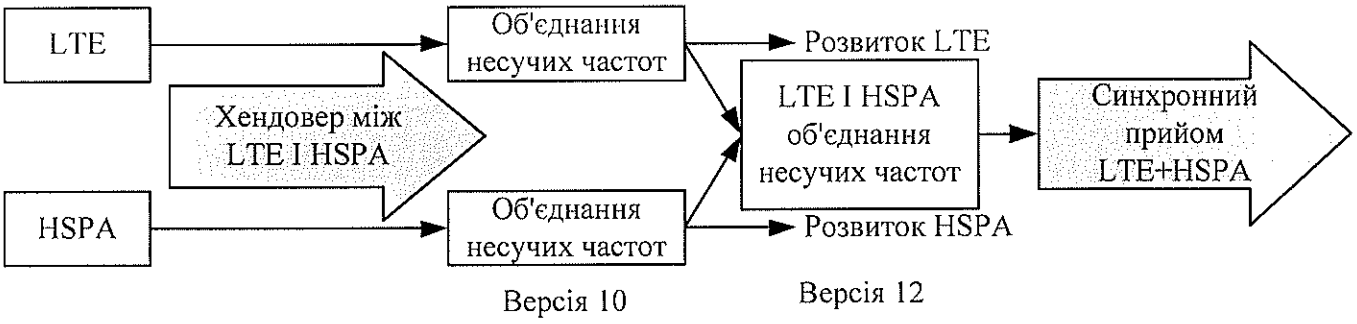


Рис. 1.5. Агрегація радіочастотного спектру для LTE і HSPA в стандартах 3GPP

1. Широке використання мульти-антенної технології MIMO. При плануванні радіомереж з цією технологією необхідно враховувати декілька умов і особливостей її застосування. По-перше, ефективність алгоритмів MIMO вище в умовах інтенсивних перевідбитих сигналів, яскраво виражених в міських умовах, ніж в умовах відкритої місцевості. По-друге, збільшення пропускної спроможності за рахунок передачі декількох потоків даних по просторових

Таблиця 1.1

Пріоритетні сценарії використання агрегованого спектру [9]

Агрегація суміжних несучих частот в спільній смузі	
FDD	UL/DL: 2x20 МГц (Band 3 - 1800 МГц)
TDD	UL/DL: 50 МГц (Band 40 - 2300 - 2400 МГц)
Агрегація несуміжних несучих частот, в різних смугах	
Район 1 (Європа, Африка)	UL/DL: 40 МГц; 20 МГц / суміжні (Band 7 - 2,6 ГГц) + 20 МГц/суміжні (Band 20 - 800 МГц)
	UL/DL: 40 МГц; 20 МГц / суміжні (Band 3 - 1800 МГц) + 20 МГц/ суміжні (Band 20 - 800 МГц)
	UL/DL: 40 МГц; 20 МГц /суміжні (Band 1 - 2,6 ГГц) + 20 МГц/ суміжні (Band 3 - 1800 МГц)
Район 2 (Америка)	UL/DL: 20 МГц; 10 МГц /суміжні (Band 5 - 850 МГц) + 10 МГц/ суміжні (Band 12 - 700 МГц)
	UL/DL: 10 МГц; 5 МГц /суміжні (Band 17- 700 МГц) + 5 МГц/ суміжні (Band 4 - 1,7/2,1 ГГц)
Район 3 (Азіатський-Тихоокеанський регіон)	UL/DL: 20 МГц; 10 МГц /суміжні (Band 1 -1,9/2,1 ГГц) + 10 МГц/суміжні (Band 18/193)
	UL/DL: 40 МГц; 20 МГц / суміжні (Band 38-2,6 ГГц/TDD) + 20 МГц/ суміжні (Band 40 - 2,3 ГГц / TDD)

Продовження таблиці 1.1

Пріоритетні сценарії використання агрегованого спектру [10]

Агрегація несуміжних частот, що несуть, в загальній смузі	
FDD/TDD	Hi
	UL/DL: 698 -716 МГц/728 -746 МГц UL/DL: 704 - 716 МГц/734 - 746 МГц UL/DL: 815 - 830 МГц/860 - 875 МГц; 830 - 845 МГц 875 - 890 МГц

каналах при MIMO найвідчутніше поблизу від базової станції, де відношення сигнал/шум відносно велике, на краю стільнику воно недостатньо. Окрім цього, конфігурація передавальних антен на базовій станції робить вплив на загальний рівень сигналу, що приймається по декількох просторових каналах, а також на виграш від просторового мультиплексування при MIMO, тобто виграш в пропускній спроможності. Як правило, на практиці застосовуються дві такі конфігурації: антени з крос-поляризацією (X-pol) і антени з вертикальною поляризацією (V-pol) і просторовим рознесенням (4А і більше). Вплив їх на загальний рівень сигналу, що приймається, приблизно однаковий з невеликою перевагою другої конфігурації в умовах прямої видимості і першої конфігурації у відсутності такий. Зміна загального рівня сигналу, що приймається, на різному віддаленні від базової станції при описаних конфігураціях антен показана на рис. 1.6. З точки зору виграшу від просторового мультиплексування антени з крос-поляризацією мають великі переваги при прямій видимості. За відсутності прямої видимості помітної різниці між конфігураціями немає. Ці висновки необхідно враховувати при плануванні радіомереж LTE.

Приведені результати показують, що перевага при MIMO слід віддавати антенам з крос-поляризацією [11].

Перші результати польового тестування MIMO в мережі LTE. Деякі з цих результатів приведені нижче. Експериментальні функції розподілу пропускної спроможності Downlink в тестовому фрагменті мережі LTE в міських умовах при

ширині каналу 10 МГц в діапазоні 2,6 ГГц. Максимальне віддалення від базової станції, на якому робилися виміри на швидкості 5-30 км/год, складало 720 м.

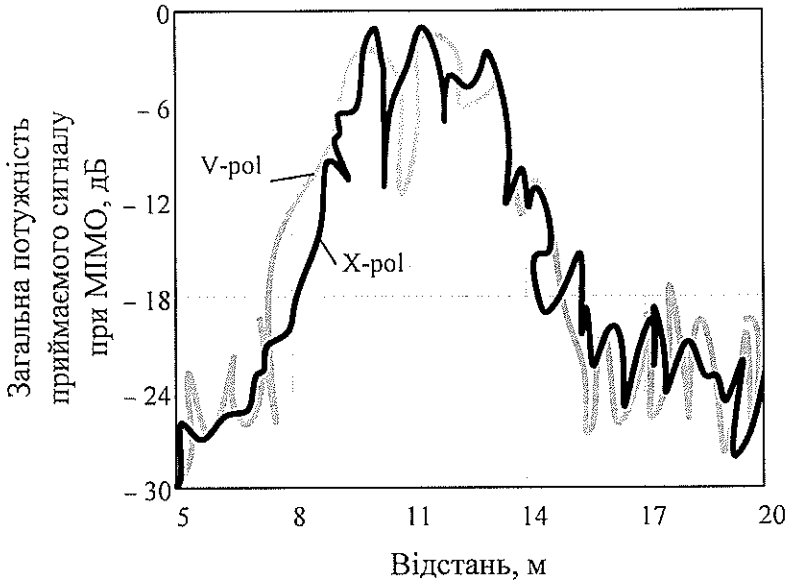


Рис. 1.6. Загальна потужність сигналу, що приймається, при різних типах антен MIMO

З метою аналізу реальної ефективності MIMO ці функції були отримані для різних умов: підвищена і знижена потужність передачі (34 дБп і 24 дБп), передача в режимах SIMO (1x2, 1x4) і MIMO (4x2, 4x4) при різних конфігураціях антен. Крім того, тестувалися випадки корельованого і некорельованого використання антен. На базовій станції застосовувалися 4 антени (панелі), кожна з яких складалася з чотирьох колонок X-поляризованих елементів (+45°, - 45°), рознесених по горизонталі на відстань 0,7λ (~8 см). Випадок корельованих антен - коли використовувалися елементи з однаковою поляризацією в двох або чотирьох колонках однієї панелі з просторовим рознесенням між ними 0,7λ. Це показано на рисунку як «4x4». Випадок некорельованих антен - коли використовувалися дві колонки X-елементів з великим рознесенням між ними (25λ чи 2,8 м). У абонентському пристрої були використані дві антени з горизонтальною поляризацією і дві антени з вертикальною поляризацією, просторове рознесення

між цими антенами складало 20 см (~ 1,7λ).

При MIMO велика пропускна спроможність досягається в умовах міста, причому, різниця між містом і передмістям по пропускній спроможності складає при вірогідності 0,5 менше 10 Мбіт/с. Таке співвідношення пропускної спроможності в Downlink має місце при вищому значенні потужності передачі в місті (34 дБп) і нижчому значенні її в передмісті (18 дБп). З порівняння функцій розподілу можна зробити висновок, що при зниженій потужності передачі в місті спостерігаються невеликі відмінності між ефективністю різних конфігурацій передавальних антен (кількість і тип поляризації елементів).

Найбільша пропускна спроможність досягнута при конфігурації 4x4 MIMO з чотирма некорельованими передавальними антенами на базовій станції e - NB (дві суміжні колонки X-елементів) і чотирма приймальнями антенами у вигляді попарно ортогональних елементів в абонентському обладнанні UE. Найменш ефективним виявився сценарій з двома передавальними антенами, що мають кросполяризацію (e - NB: x), і двома приймальнями антенами з однаковою вертикальною поляризацією (UE:).

Ці результати показують, що ефективність технології MIMO в міських умовах залежить від конфігурації антен, особливо якщо розглядати центр стільника і її межу. З приведених графіків видно, що складніша конфігурація антен MIMO ефективніше на межі зони обслуговування стільнику, ніж поблизу від базової станції. Виграш по пропускній спроможності в Downlink при переході від 2x2 MIMO до 4x4 MIMO складає в центрі стільнику близько 50%, на краю стільнику - більше, ніж в 2 рази.

7. Скоординована багатоточкова передача CoMP.

8. Стандартизовані функції ретрансляції в радіомережі.

9. Можливість самоконфігурування і самооптимізації радіомережі SON (Self Organizing Networks). Велика завантаженість мереж (великі об'єми трафіку) у поєднанні з великою кількістю базових станцій, які використовують декілька смуг і діапазонів частот, ускладнюють завдання планування і оптимізації радіомережі LTE. Функціональна можливість SON в LTE допомагає розв'язати цю проблему, а

також скоротити капітальні і експлуатаційні витрати, особливо на етапі будівництва і запуску мережі LTE в експлуатацію. Додаткові можливості по самоорганізації мережі LTE визначені в стандартах 3GPP Rel'10. До цих можливостей відносяться: балансування навантаження як усередині мережі LTE, так і між мережами LTE, UMTS і LTE; координація впливу перешкод між стільниками за рахунок не лише скоординованого призначення частотного ресурсу в суміжних стільниках, але і за рахунок часткового повторного використання радіочастот; автоматична поточна оптимізація зони покриття і пропускної спроможності, які в традиційних умовах досягаються за рахунок проведення спеціальних тестових вимірів; адаптивна конфігурація радіомережі, аж до автоматичного виключення окремих базових станцій залежно від трафікового навантаження в мережі.

Загальний принцип функціонування підсистеми SON (близькі по своєму функціоналу до етапів планування радіомережі) [12]:

- Self - configuration. Це автоматична процедура по налаштуванню (конфігурації) нових базових станцій e - Node в мережі LTE. Автоматичне налаштування включає два етапи: етап основної установки і етап початкової конфігурації.
- Self - optimization. Це процедура, в ході якої базова станція і абонентський пристрій здійснюють виміри, за результатами яких робиться автоматичне налаштування мережі.
- Self - Healing. Ця процедура здійснює «загоєння мережі», тобто виявлення і локалізацію цілого ряду збоїв в мережі, а також її самовідновлення (приміром, зниження вихідної потужності e - Node у разі перегрівання, або автоматичне перемикання на попередню версію програмного забезпечення).
- Automatic Neighbor Relation (ANR). Ця процедура автоматично формує списки сусідів (сусідніх стільників).
- Coverage and Capacity Optimization - процедура автоматичної оптимізації зони покриття і пропускної спроможності стільника в мережі LTE. Ця процедура спрямована на автоматичне виявлення проблем покриття і

пропускної спроможності на основі комплексних вимірів у базовій станції і звітів, що отримуються від абонентських пристроїв. Таке рішення зводить до мінімуму втручання фахівця і знижує часові затримки зворотного зв'язку. Вирішуючи перераховані завдання, процедура забезпечує мінімізацію внутрісистемних перешкод. Типовий варіант процедури показаний на рис. 1.7.

1.3 Аспекти планування радіомереж LTE

Особливості, пов'язані з плануванням радіомережі LTE, відносяться до декількох областей. По-перше, це планування параметрів радіомережі, яке включає три процедури [13]:

• розподіл ідентифікаторів фізичних стільників PCI (Physical Cell Identity). Ця процедура схожа з процедурою планування кодів скремблювання в UMTS, оскільки ідентифікатори PCI однозначно визначають суміжні стільники в певній географічній області і не повинні повторюватися на деякій відстані. Відстань повторного використання PCI вибирається з міркувань, щоб абонентський термінал не зміг приймати сигнал від двох стільників з однаковими ідентифікаторами. У радіомережі LTE є 504 різні ідентифікатори PCI. Відмітимо, що PCI служать також для розподілу таких параметрів ресурсу в Downlink і Uplink, як опорні або тестові сигнали RS (Reference Signal);

• планування параметрів фізичного каналу випадкового доступу PRACH (Physical Random Access Channel)

• планування послідовностей (кодів) в опорних сигналах Uplink.

Відмічені процедури будуть пояснені нижче.

Другою областю є частотне планування. Тут головними чинниками є:

• раціональний вибір ширини радіоканалу з точки зору ефективного використання наявного радіочастотного ресурсу і досягнення максимальної пропускної спроможності;

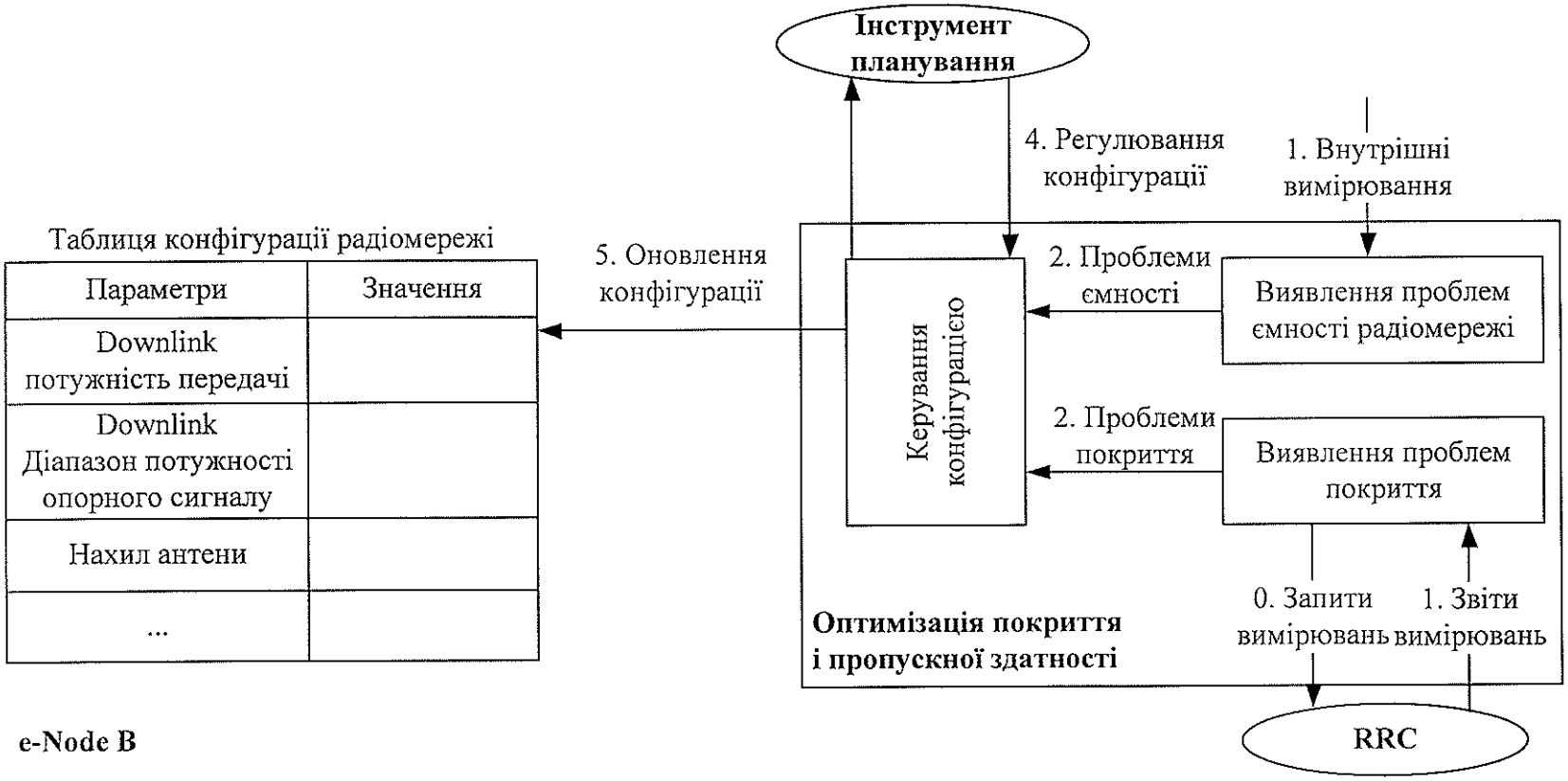


Рис. 1.7. Варіант архітектури оптимізації радіопокриття і пропускної спроможності в мережі LTE

• раціональний вибір сценарію агрегованого використання наявного радіочастотного спектру для досягнення оптимальних показників планованої мережі як по пропускній спроможності, так і по зоні радіопокриття. Тут йдеться про правильний вибір і поєднання низьких і високих діапазонів частот;

• облік різного впливу сусідніх частотних каналів у власній мережі і в суміжній мережі іншого оператора при різній їх ширині, оскільки маски спектру сигналу мають при цьому деякі відмінності;

• необхідність компенсації взаємних перешкод між суміжними стільниками за допомогою частотного планування.

До третьої області відносяться особливості розрахунку бюджету радіолінії:

• попередні оцінки параметрів планованої мережі LTE можуть робитися в трьох сценаріях, як показано на рис. 1.8: окреме з'єднання (Single - Downlink), окремий стільник з багатьма користувачами (Single - Cell Multi - User), багато стільників з багатьма користувачами (Multi - Cell Multi - User) [14]

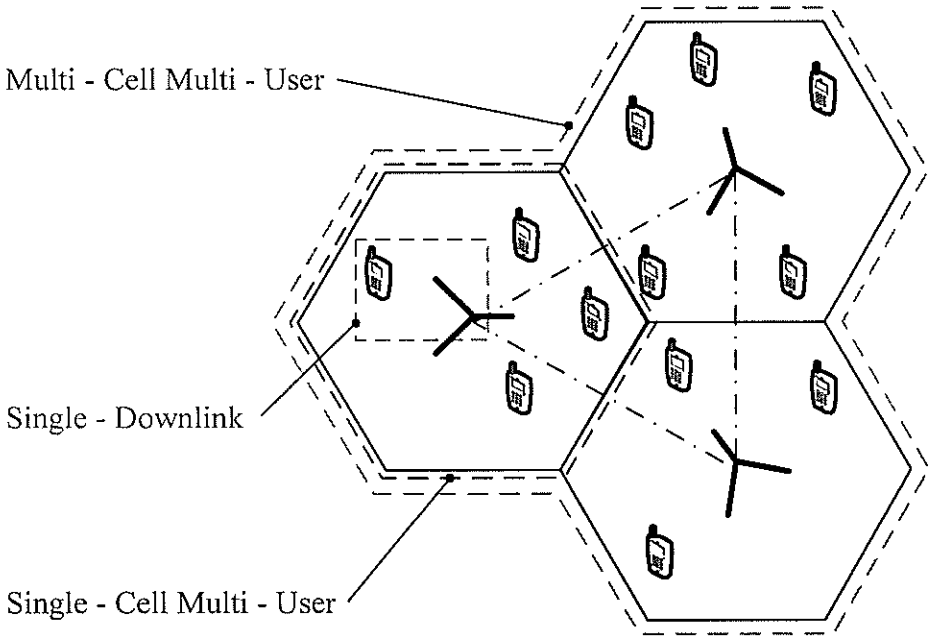


Рис. 1.8. Сценарії для оцінки параметрів планованої мережі LTE

Single - Downlink - сценарій, в якому оцінюється тільки одне низхідне з'єднання між базовою станцією і абонентським обладнанням одного

користувача. З точки зору планування дозволяє досліджувати параметри службових і призначених для користувача каналів, а також ефективність алгоритмів MIMO.

Single - Cell Multi - User - сценарій, в якому оцінюються з'єднання з потенційно активними користувачами в межах одного стільники. Дозволяє додатково досліджувати параметри радіомережі з урахуванням внутрішньостільникового завантаження і процедур планування радіоресурсів, а також ефективність розрахованих на багато користувачів режимів MIMO.

Multi - Cell Multi - User - сценарій, в якому оцінюються основні параметри усієї мережі. Дозволяє досліджувати усі параметри реальної радіомережі з урахуванням внутрісистемних перешкод від суміжних стільників;

• мають враховуватися відмінності між двома типами дуплексу (FDD і TDD) при плануванні радіомереж (їх сумісність) і при оцінці швидкостей передачі даних в них, а також специфіка TDD в плані синхронізації стільників і конфігурації передач (DL/UL);

• бюджет радіолінії в LTE повинен враховувати автоматичне балансування навантаження в мережі.

Планування параметрів радіомережі LTE [15].

Планування PCI. На цьому етапі здійснюється розподіл опорних сигналів RS в низхідному і висхідному напрямі. Передача таких сигналів має істотні відмінності в Downlink і Uplink. На рис. 1.9 показаний розподіл символів опорних сигналів в Downlink в одному ресурсному елементі. На рисунку показані символи двох таких сигналів R_0 і R_1 призначених для передачі через дві антени MIMO. Особливість такого розподілу RS полягає в наступному. У часовій області усі опорні сигнали синхронізовані, тобто передаються одночасно в трьох суміжних стільниках (у секторах однієї базової станції з номерами Cell 1, Cell 2 і Cell 3). Але в частотній області при такому плануванні PCI опорні сигнали не перекриваються, що призводить до зменшення взаємного впливу стільників в Downlink.

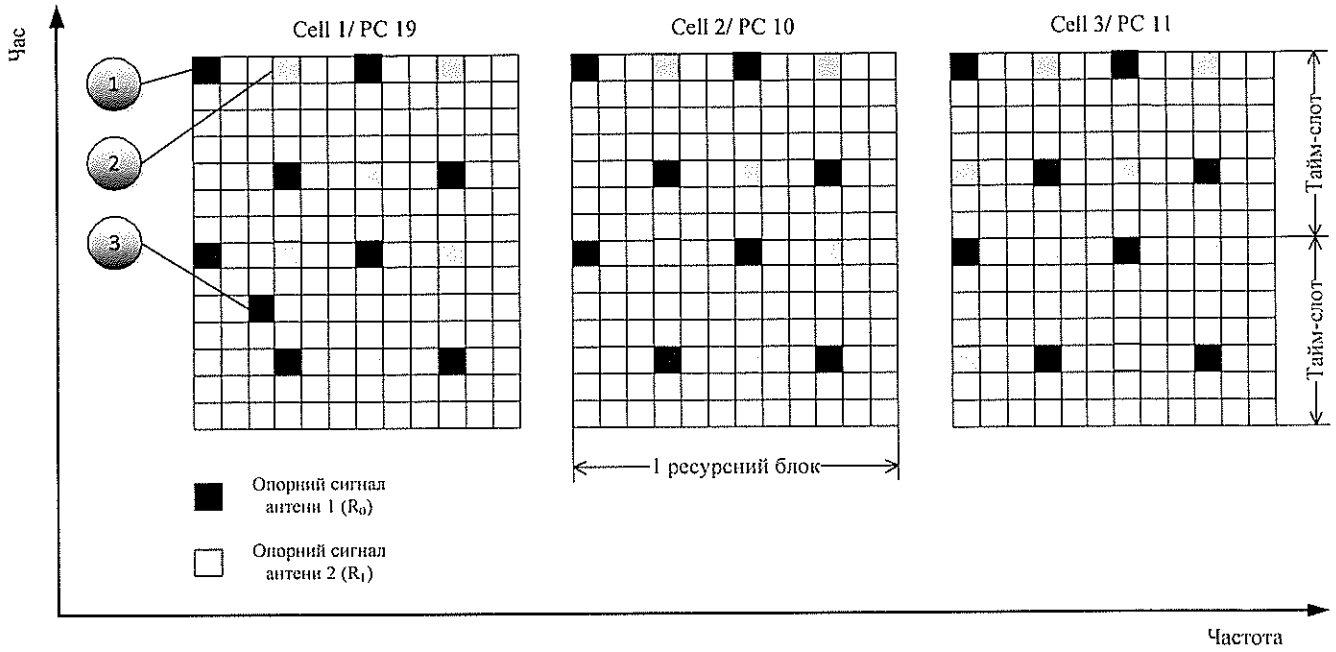


Рис. 1.9. Розподіл опорних сигналів RS в Downlink: 1 - передавальна антена 1; 2 - передавальна антена 2; 3 - 1 ресурсний елемент

У наведеному прикладі розглянутий випадок, коли сусідні (суміжні) стільники «синхронізовані» за часом, тобто часове зміщення між ними відоме, що може бути досягнуто при плануванні мережі із залученням засобів GPS. З іншого боку, за відсутності такої синхронізації між сайтами не вдасться строго скоординувати перешкоди між ними. Крім того, розглянутий приклад демонструє координацію перешкод від суміжних стільників, що створюються лише опорними сигналами RS. При плануванні радіомереж LTE важливо розглядати і рішення, що дозволяють враховувати перешкоди, які створюють в сусідніх стільниках фізичні канали, у тому числі канали передачі даних.

Планування і передача опорних сигналів в Uplink дещо відрізняються від Downlink. У висхідному напрямі передаються два типи опорних сигналів. Один з них надає інформацію для декодування висхідних фізичних каналів PUSCH і PUCCH (Demodulation Reference Signal). Другий, зондуючий, сигнал (Sounding Reference Signal) служить для оцінки висхідних каналів базовою станцією. За цією оцінкою відбувається планування ресурсу для передачі абонентським терміналом.

Опорний сигнал Demodulation Reference Signal передається в загальному

фізичному каналі PUSCH. Він будується з кодової послідовності Задов-Чу, розділеною на 30 груп. Таким чином, для формування сигналу Demodulation Reference Signal є 30 різних послідовностей. Їх слабка взаємна кореляція дозволяє знизити вплив перешкод між стільниками. З позицій планування ця властивість означає, що для сусідніх стільників необхідно вибирати різні базові послідовності [16]. При цьому найбільш простим способом планування є представлення номера послідовності і у вигляді PCI по модулю 30, тобто

$$u = (PCI) \bmod 30,\ i = 0,\ldots, 29. \tag{1.2}$$

Цей спосіб є простим, але має істотний недолік внаслідок того, що послідовності будуть повторюватися в кожному 30-му стільнику. У стандартах 3GPP визначені додаткові механізми планування і розподілу описаних послідовностей. Зокрема, ці механізми передбачають застосування відповідного циклічного зрушення базової послідовності Задов-Чу для кожного стільника і псевдовипадковий вибір (зрушення) послідовності (Sequence hopping). При цьому використовується позитивна властивість послідовностей Задов-Чу, що полягає в тому, що два циклічні зрушення однієї і тієї ж послідовності ортогональні.

У першому випадку для зменшення взаємних перешкод між стільниками необхідно вибрати для них різні циклічні зрушення CS (Cyclic shift) базової послідовності. Ця схема може бути застосована до стільників (секторів) одного сайту, як показано в прикладі на рис. 1.10.

На рис. 1.10 в кожному стільнику одного сайту виділяється одна і та ж послідовність і (на першому сайті 0-а, на другому сайті 1-а і т. д.). Для цієї послідовності в кожному з стільників використовується своє циклічне зрушення (CS = 0, CS - x і CS = 2x, де x - деяке значення зрушення). Окрім циклічного зрушення, тут також введений ще один параметр Δs, за допомогою якого при виборі номера послідовності визначається деяке зміщення значення PCI, щоб виключити їх пряму залежність

$$u = (PCI + \Delta s) \bmod 30, \tag{1.3}$$

де $\Delta s = 0,\ldots, 29$ - передається в широкомовному каналі BCCH.

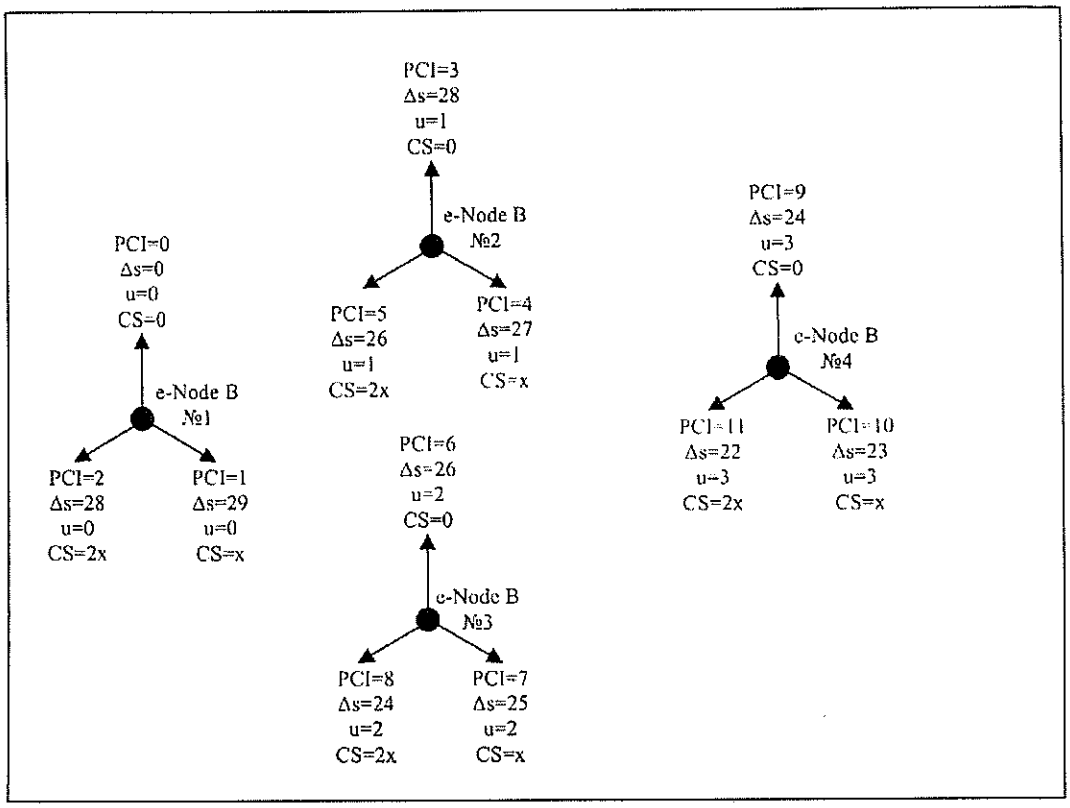


Рис. 1.10. Приклад планування Reference Signal в Uplink при циклічних зрушеннях кодової послідовності Задов-Чу

Застосування циклічних зрушень також зручне при розрахованому на багато користувачів рішенні MIMO (MU - MIMO), коли кожен абонентський термінал використовує у висхідному каналі Reference Signal з різними циклічними зрушеннями.

У разі Sequence hopping базові послідовності Задов-Чу вибираються в кожному n-у тайм-слоті псевдовипадковим чином

$$u_n = (\nu_n + PCI + \Delta s) \bmod 30 \qquad (1.4)$$

де $u_n = 0,\ldots,29$ - псевдовипадковий параметр, що визначає крок «стрибків» номера вибираної послідовності, і задається індексом $\mu = [PCI/30]$ ($\mu = 0,\ldots, 16$).

Стільники, в яких використовуються одні і ті ж «стрибки» (один і той же індекс μ), утворюють деяку групу - кластер, як показано на рис. 1.11 [17].

Планування параметрів каналу PRACH. Для процедури випадкового

доступу абонентський термінал передає спеціальну преамбулу в каналі PRACH. Ця преамбула вибирається випадковим чином з 64 послідовностей Задов-Чу. Отже, для кожного стільника необхідно мати свій унікальний набір з 64 таких послідовностей в межах відстані їх повторного використання, тобто відстані повтору. Так, при невеликій відстані повтору (декілька кілометрів) 64 преамбули можна отримати з однієї кореневої послідовності Задова-Чу.

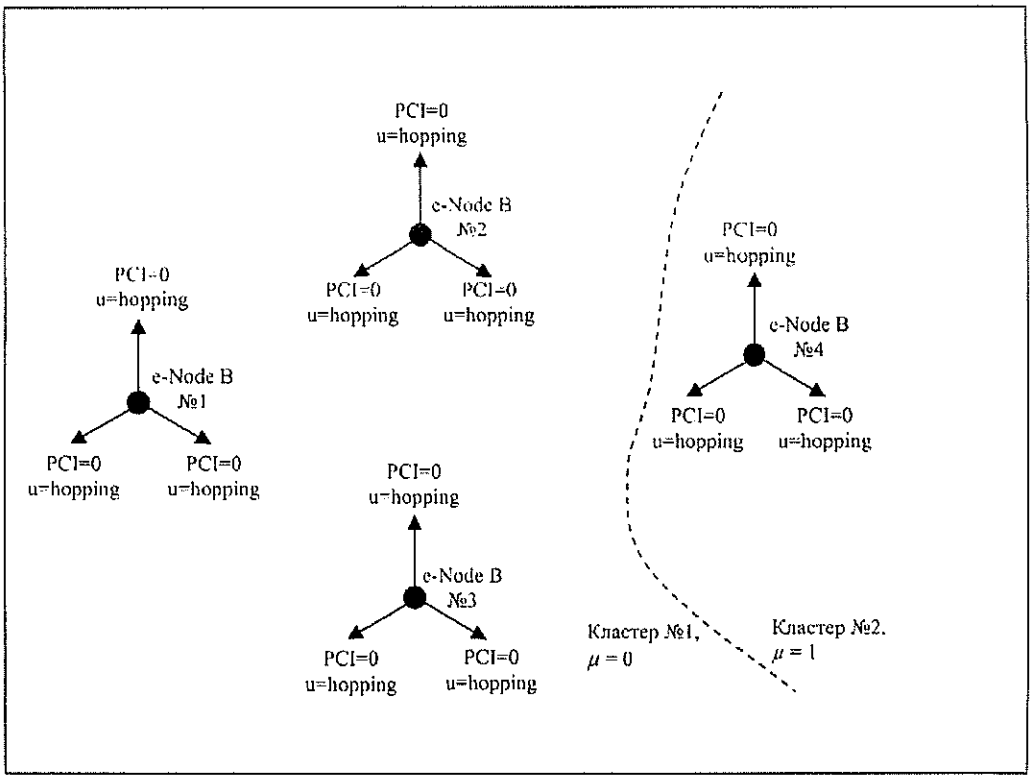


Рис. 1.11. Приклад планування Reference Signal в Uplink при Sequence hopping

Враховуючи цю особливість, завдання планування параметрів каналу PRACH можна представити, як максимізацію розміру стільнику для випадкового доступу і виділення послідовностей Задова-Чу в стільниках. У табл. 1.2 вказана необхідна кількість цих послідовностей для різних відстаней випадкового доступу, які характеризуються індексом конфігурації каналу PRACH. Цей індекс передається в широкомовному каналі BCCH в цілях зниження навантаження на мережеві інтерфейси.

Таблиця 1.2

Необхідна кількість послідовностей для різних відстаней випадкового доступу

Індекс конфігурації PRACH	Кількість кореневих послідовностей Задова-Чу	Відстань випадкового доступу, км
1	1	0,7
2	2	1,0
3	2	1,4
4	2	2,0
5	2	2,5
6	3	3,4
7	3	4,3
8	4	5,4
9	5	7,3
10	6	9,7
11	8	12,1
12	10	15,8
13	13	22,7
14	22	38,7
15	32	58,7
0	64	118,8

1.4 Особливості частотного планування в мережах LTE

Головною особливістю частотного планування, є раціональність розподілу наявного радіочастотного ресурсу в радіомережі LTE. При цьому йдеться про способи розподілу цього ресурсу між стільниками мережі, при яких взаємні перешкоди будуть мінімальними. Особливо це важливо в гетерогенних мережах LTE для ефективного використання доступного радіочастотного ресурсу і досягнення максимальної пропускної спроможності в планованій мережі [18].

Розглядаючи це питання, слід зауважити, що в самій системі стандартами 3GPP вже передбачені деякі процедури динамічного планування радіоресурсу в сусідніх стільниках. Так, в радіоінтерфейсі LTE застосовується низькошвидкісна передача індикатора потужності RNTPI (Relative Narrowband Transmit Power Indicator). Базова станція в кожному ресурсному блоці (RB) передає для сусідніх стільників коротке повідомлення RNTPI (1 біт) про статус потужності передачі в одному RB, вказуючи на те, перевищує потужність заданий поріг або ні. Отже, сусіднім стільникам повідомляється, яку потужність випромінювання чекати в тій або іншій частині робочого спектру. На основі цієї інформації планується розподіл ресурсу частот в суміжних стільниках для мінімізації взаємних перешкод. Аналогічні процедури можуть здійснюватися і у висхідному напрямі.

У загальному випадку спеціальне частотне планування в радіомережі LTE, особливо в макро-стільникових структурах, відсутнє, і увесь частотний ресурс одночасно використовується в усіх стільниках. Це може викликати появу перешкод на межі стільників, тому зниження впливу цих перешкод вимагає відповідної координації при плануванні. Така координація для LTE носить назву Inter - Cell Interference Coordination (ICIC) і полягає в динамічному (алгоритмічному) призначенні частот в суміжних стільниках, при якому вони повторюються з деяким коефіцієнтом, відмінним від одиниці. У цьому плані в радіомережах LTE розрізняють декілька варіантів повторного використання радіочастот:

• тверде (фіксоване) - Hard Frequency Reuse;

• часткове (парціальне) - Fractional Frequency Reuse;

• м'яке (гнучке) - Soft Frequency Reuse.

Перераховані варіанти пояснені на рис. 1.12 для коефіцієнта повторного використання радіочастот, рівного 3.

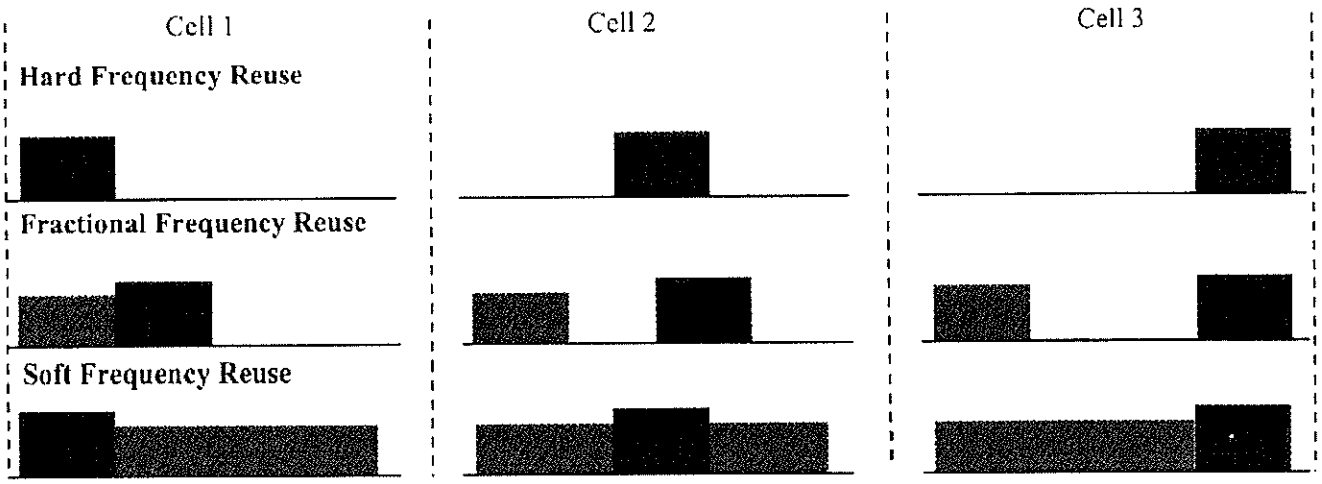


Рис. 1.12. Варіанти повторного використання радіочастот в мережі LTE

Варіант твердого повторного використання радіочастот також використовується в мережах LTE. Стосовно LTE такий варіант означає, що усі піднесучі частоти, в межах наявного ресурсу можуть бути розділені на три, чотири або сім наборів, кожен з яких призначається в суміжних стільниках. Як показано на рисунку, в кластері з трьох стільників призначається три різні набори частот піднесучих. Практично це означає, що ресурс одного радіоканалу шириною 15 МГц при плануванні може бути розділений на три групи ресурсу по 5 МГц. При такому плануванні базові станції в кластері не використовують один і той же набір піднесучих частот. Це усуває перешкоди на краях суміжних стільників, проте ефективність використання спектру зменшується в кількість разів, рівну коефіцієнту повтору частот, в нашому випадку - в 3 рази.

Ідея часткового повторного використання радіочастот полягає в тому, що наявний ресурс ділиться на дві частини. Одна з цих частин використовується в усіх стільниках з коефіцієнтом повтору, рівним одиниці, тоді як інша частина розділена між різними стільниками, подібно до варіанту Hard Frequency Reuse.

Таким чином, базовим станціям будуть призначені повністю повторювані частоти для покриття середньої частини стільнику при нижчій потужності, а інші частоти, повторювані з коефіцієнтом 3, - для покриття усього стільнику з вищою потужністю.

При м'якому варіанті повторного використання радіочастот в кожному стільнику використовується увесь радіочастотний ресурс, але з різною потужністю по спектру, як показано в нижній частині рис. 1.12.

Ефективність використання наявного радіочастотного ресурсу можна підвищити при плануванні за рахунок раціонального вибору в мережі LTE робочої ширини каналу. На підставі приведених в табл. 1.3 даних можна припустити, що вибір стандартної ширини каналу 20 МГц дасть деякий надлишок смуги (резерв) через її надмірності. Такий надлишок складає 20 МГц - 18.02 МГц ≈ 2 МГц, де 18,02 МГц - значення реальної (ефективною) ширини каналу, і може бути спланований за певних умов для додаткового каналу шириною 1.4 МГц без додаткових витрат спектру.

Таблиця 1.3

Ефективність використання наявного радіочастотного ресурсу

Стандартна ширина каналу, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Рознесення піднесучих частот	15 кГц					
Кількість піднесучих частот	73	181	301	601	901	1201
Ефективна ширина каналу, МГц	1,1	2,72	4,52	9,02	13,52	18,02

При частотному плануванні, коли використовується агрегована смуга каналу, слід мати на увазі вимоги по необхідному рознесенню між суміжними компонентами, що агрегуються. У стандартах 3GPP встановлено правило по вибору такого рознесення в LTE [19]:

• значення рознесення між центральними частотами суміжних агрегованих компонент має бути кратним 300 кГц для того, щоб забезпечити сумісність растру 100 кГц в LTE і одночасно зберегти ортогональність піднесучих частот, з

інтервалом між ними 15 кГц;

• значення такого рознесення Δf_p повинне визначатися відповідно до наступного виразу

$$\Delta f_p = \frac{W_{c1} + W_{c2} - 0.1|W_{c1} - W_{c2}|}{0.6} 0.3 \left(\text{Ì Ãö}\right) \qquad (1.5)$$

де $W_{C(1)}$, $W_{C(2)}$ - ширина смуги двох суміжних компонент агрегованого спектру;

| x | - абсолютне значення x.

Для заданої швидкості передачі даних існує оптимальна смуга (ширина каналу) в Downlink і Uplink і її оптимальність визначається критерієм максимального розміру зони радіопокриття. Це обумовлено тим, що існує деякий компромісний стан, коли при фіксованій потужності базової станції зменшення смуги передачі, тобто кількості ресурсних блоків RB, що виділяються, призводить до збільшення потужності передачі в ресурсному блоці (збільшенню щільності потужності), і, як результат, збільшується відношення сигнал/шум в RB. Це збільшення обумовлює підвищення (чи збереження) швидкості передачі даних за рахунок адаптивного вибору модуляції вищого порядку і скорочення кількості повторних передач за кращих умов в радіоканалі. Таким чином, слід чекати, що зменшення ширини каналу не призводить однозначно до істотного і пропорційного зниження швидкості передачі даних в нім. На рис. 1.13 показано, як залежать значення необхідної чутливості приймача від ширини каналу для різних фіксованих швидкостей передачі даних. Для наочності припускається, що увесь ресурс в Downlink виділяється одному користувачеві. Необхідна чутливість приймача є енергетичним параметром і побічно відбиває розмір зони радіопокриття, оскільки, чим менше значення чутливості, тим більші втрати на трасі поширення сигналу допустимі, тобто допустима велика дальність зв'язку.

З рисунка видно, що при малих швидкостях передачі даних (до 1 Мбіт/с) помітна істотна залежність необхідної чутливості приймача від ширини каналу внаслідок того, що значна надмірність смуги обумовлює ріст шумів в каналі. При одній і тій же смузі потрібно велику енергетику сигналу для передачі даних з більшою швидкістю. В якості головного висновку можна зробити висновок, що

для кожної швидкості передачі даних існує оптимум ширини каналу, при якому потрібно мінімальну енергетику сигналу, що приймається, при максимально досяжному розмірі зони радіопокриття.

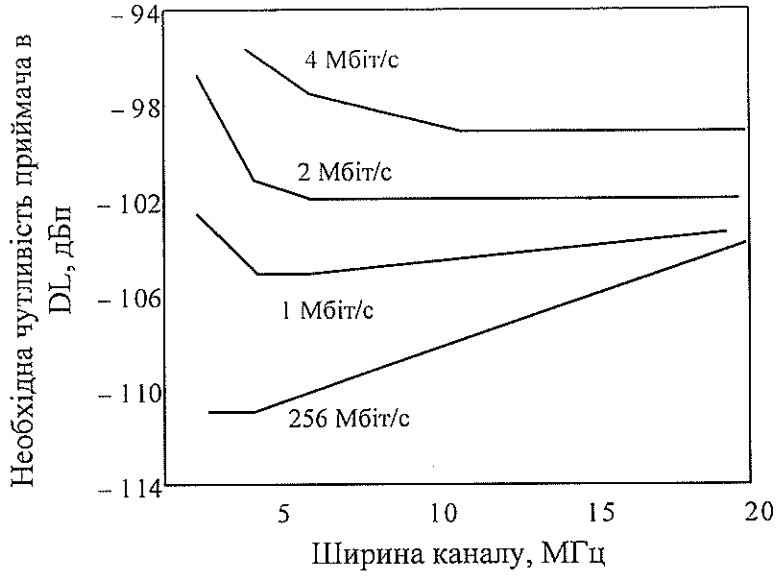


Рис. 1.14. Необхідна чутливість приймача в DL для різних швидкостей передачі даних в різних по ширині каналах LTE

Бачимо, що передача даних з сумарною швидкістю 4 Мбіт/с в каналі буде оптимальною при його ширині 10 МГц і більше, а для швидкості передачі даних 256 кбіт/с - при ширині каналу 1.4 МГц. Показані в прикладі швидкості передачі даних для кожної з смуг не є граничними в LTE, вони узяті лише для того, щоб проілюструвати загальну тенденцію в поведінці радіоінтерфейсу. Цю тенденцію можна використовувати при плануванні радіомережі таким чином. Нехай вимагається забезпечити в мережі деяке значення пропускної спроможності R, яке досяжне при певній ширині каналу Δf_0. З огляду на те, що ми не маємо в розпорядженні такої смуги, постараємося досягти R_{max} в каналі з меншою шириною. Для прикладу візьмемо значення R = 4 Мбіт/с, для якого оптимальна ширина каналу Δf_0 = 10 МГц. Відповідно до графіків на рис. 1.14 вибраного значення швидкості передачі даних можна досягти і в каналі при Δf = 5 МГц, але в меншій зоні радіопокриття, або в тій же зоні, але зі збільшенням потужності

базової станції більш ніж на 2 дБ. З фізичної точки зору це очевидно, оскільки підвищити спектральну ефективність для збільшення швидкості передачі даних у вужчій смузі можна за рахунок вищої енергетики в радіоканалі. Така енергетика могла б дозволити використовувати MIMO, модуляцію вищого порядку і скоротити число повторних передач.

Слід зауважити, що використання описаного підходу до планування мережі вимагає додаткової оцінки верхньої межі, за межами якої збільшення енергетики в радіоканалі LTE вже не дасть відміченого вище ефекту, оскільки відповідно до теореми Шенона надмірне збільшення енергетики призводить до насичення його пропускної спроможності.

Особливості бюджету радіолінії в LTE.

На відміну від радіоінтерфейсу UMTS ортогональність каналів LTE є строгішою, а міра прояву внутрісистемних перешкод набагато нижча, в усякому разі теоретично. Крім того, радіоінтерфейс LTE є стійкішим до ряду таких негативних впливів в радіоканалі, як:

• міжсимвольна інтерференція через багатопроменеве розповсюдження сигналу - практично усувається за рахунок введення циклічного префікса в часову структуру OFDM-сигналу;

• міжчастотна інтерференція через доплерівські зрушення між піднесучими частотами, при високих швидкостях переміщення абонентського терміналу - проявляється слабко через низькі значення частотного рознесення між ними (15 кГц при нормальному циклічному префіксі);

• спотворення форми сигналу через нелінійності в передавачі (вектор помилки магнітуди EVM) - частково понижено в передавачі абонентських пристроїв за рахунок застосування спеціальної модуляції SC - FDMA.

Головним параметром Link Budget в радіоінтерфейсі LTE є відношення сигнал/шум в радіоканалі [20]. Для розрахунків бюджету радіолінії LTE це відношення задають для одного ресурсного блоку. При цьому основними (домінуючими) є зовнішні внутрісистемні перешкоди від сусідніх стільників. В якості таких перешкод в Downlink розглядаються сумарні перешкоди: зовнішні -

від суміжної смуги частот або суміжного частотного каналу I_{ext}, і внутрішні - від суміжних стільників I_{inter}, як показано на рис. 1.15.

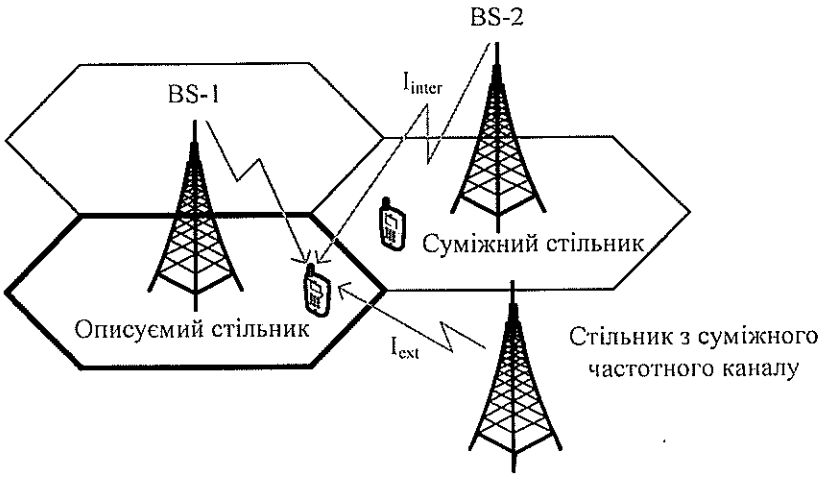


Рис. 1.15. Джерела перешкод в радіомережі LTE

Отже, відношення сигнал/шум на вході приймача k-го абонентського пристрою (UE), обслуговуваного j-ю базовою станцією (BS), можна виразити таким чином

$$\left(\frac{Ð_ñ}{2}\right)_{RB} = \frac{Ð_ñ(j,k)}{I(j,k)}, \tag{1.6}$$

де $Ð_ñ(j,k) = P^{RB}/\mathrm{Pathloss}\left(BS_j, UE_{j,k}\right)$ - потужність корисного сигналу від j-ї BS на вході приймача k-го UE; P^{RB} - потужність передачі базової станції в одному ресурсному блоці RB; $P^{RB}/\mathrm{Pathloss}\left(BS_j, UE_{j,k}\right)$ - втрати на трасі поширення сигналу між j-м BS і k-м UE.

Сумарні перешкоди, включаючи потужність внутрішнього шуму приймача P_N можна виразити в наступному виді

$$I(j,k) = I_{inter}(j,k) + I_{ext}(j,k) + P_N, \tag{1.7}$$

де $I_{inter}(j,k)=\sum_{l=1,l\neq j,}^{Ncell} P_l^{RB}/Pathloss(BS_l,UE_{j,k})$ $I_{ext}(j,k)=\sum_{m}^{Next.cell} iRSS_{uw}(BS_m,UE_{j,k})\times$

$\times iRSS_b(BS_m,UE_{j,k})$ - перешкоди від суміжних каналів, які є продуктом позасмугових випромінювань $iRSS_{mwanted}$ і перешкодами блокування $iRSS_b$; N_{cell} - кількість суміжних стільників завад в загальному частотному каналі; N_{ext_cell} - кількість стільників завад в суміжних частотних каналах; N - кількість RB (кількість частот, що піднесуть), що приймаються; M - максимальна кількість RB. що призначається у базовій станції [21].

Аналогічним чином задається відношення сигнал/шум у бюджеті радіолінії Uplink з тією лише різницею, що у висхідних каналах вимагається враховувати регулювання потужності випромінювання абонентським пристроєм.

Характеризуючи такий параметр, як відношення сигнал/шум в LTE, слід зробити декілька зауважень.

По-перше, в радіомережі LTE основний вплив на абонентський пристрій можуть робити перешкоди від сусідніх стільників на краю обслуговуючого стільнику. Рівень цього впливу залежатиме від активності випромінювання в цих стільниках, тобто від міри їх завантаженості. З цієї причини відношення сигнал/шум в Link Budget LTE повинно відбивати цю завантаженість. У [10] приведено аналітичне вираження для відношення сигнал/шум SINR, в яке входить коефіцієнт завантаження n_{DL} в сусідніх стільниках

$$SINR=\frac{1}{\frac{\eta}{SIR_{min}}+\frac{P_N\cdot Pl(d)}{P_{BS}^E}}, \qquad (1.8)$$

де $SIR_{min}=P_c/I_{max}$ - відношення потужностей корисного сигналу P_c і максимальних перешкод від сусідніх стільників на краю стільника I_{max}; P_N - потужність шуму в приймачі; P_{BS}^E - еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність базової станції у власному стільнику; $Pl(d)$ - втрати при поширенні сигналу на відстань d, що враховують запас на повільні завмирання (Shadowing

margin).

Приведений вираз описує компроміс між трьома параметрами планування мережі: розміром стільника d, середнім завантаженням мережі n_{DL} і пропускною спроможністю на краю стільника, вираженого у формі відношення SINR. На рис. 1.16 показана залежність пропускної спроможності на краю стільнику в мережі LTE від її розміру при різному завантаженні в сусідніх стільниках (коефіцієнт n_{DL}) і ширині каналу 10 МГц.

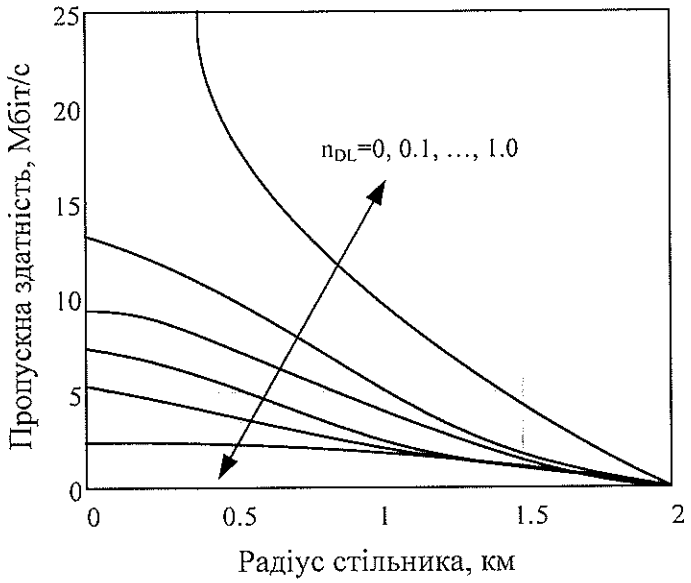


Рис. 1.16. Пропускна спроможність на краю стільнику LTE

Як видно з рисунка, пропускна спроможність на краю стільнику LTE при невеликих її розмірах сильно залежить від завантаження сусідніх стільників. При високому завантаженні мережі LTE рівень перешкод різко зростає з огляду на те, що увесь частотно-часовий ресурс цих стільників стає зайнятим, і його скоординований розподіл (координація міжстільникових перешкод) стає неефективним і навіть неможливим.

По-друге, для розрахунків при плануванні радіомережі LTE можна використовувати вже наявні експериментальні дані по рівнях SINR, необхідних для досягнення конкретних значень спектральної ефективності в мережі. На рис. 1.17 наведений приклад експериментальних залежностей спектральної

ефективності в мережі LTE від відношення SINR.

По-третє, в ході досліджень, що проводяться, емпіричним шляхом були отримані поправочні коефіцієнти, що дозволяють при розрахунках робити корекцію оцінок каналу LTE (Channel Estimation Correction Factors). Ці коефіцієнти можуть бути використані при розрахунках пропускної спроможності або спектральної ефективності в реальних каналах (при корекції ідеальних умов, що задаються). Значення емпіричних коефіцієнтів корекції приведені в табл. 1.4.

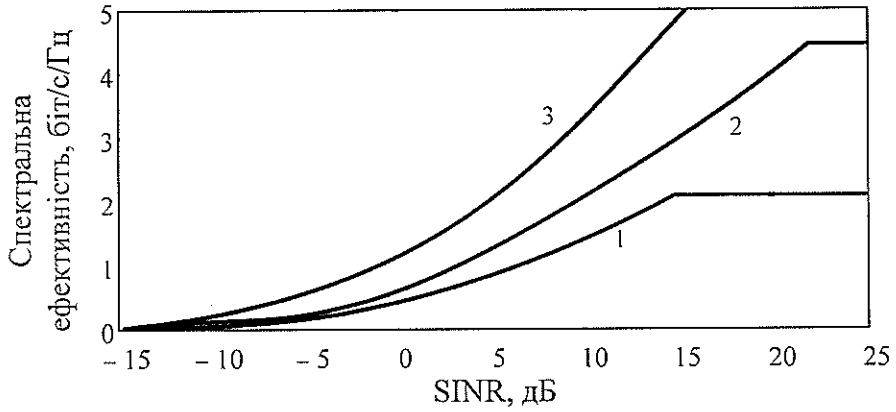


Рис. 1.17. Залежність спектральної ефективності LTE від SINR: 1 - Uplink; 2 - Downlink; 3 - Шенона

Таблиця 1.4

Значення емпіричних коефіцієнтів корекції

Радіомережа	Downlink		Uplink	
	Середина стільнику	Край стільнику	Середина стільнику	Край стільнику
LTE FDD	0,97	0,95	0,938	0,836
LTE TDD	0,95	0,93	0,964	0,909
WiMAX	0,94	0,93	0,938	0,836

І нарешті, при плануванні радіомереж LTE необхідно брати до уваги наявну кореляцію втрат у власній і суміжних стільниках мережі. Проста модель кореляції

повільних завмирань сигналу при OFDMA використовується при розрахунках для радіоканалів Uplink. На рис. 1.18 показані значення ρ такої кореляції для двох типів втрат L [22].

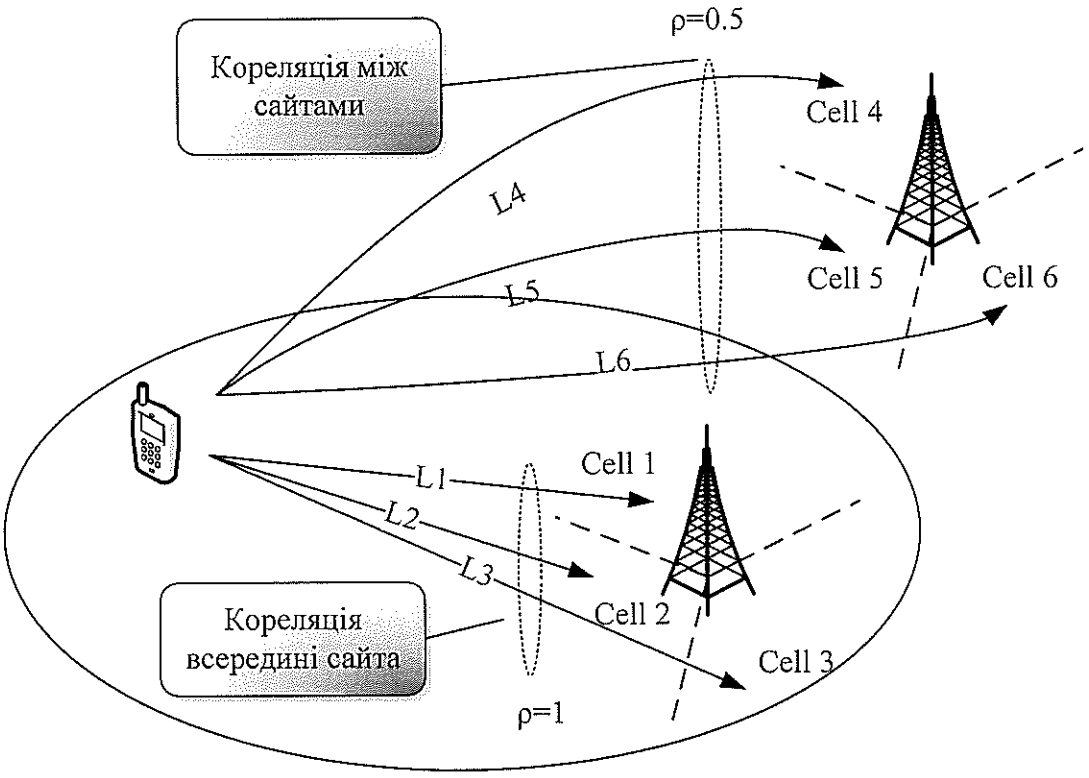


Рис. 1.18. Кореляція втрат в радіомережі LTE

Сценарій, показаний на рис. 1.18, відповідає трьох-секторній організації сайтів.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МЕРЕЖЕВОГО СТІЛЬНИКОВОГО ПЛАНУВАННЯ LTE-МЕРЕЖ

2.1 Аналіз трафіку і покриття

Послідовність мережевого стільникового планування представлена у вигляді блок-схеми на рис. 2.1.

Вартість системи. Ціна проектованої стільникової системи є одним з найважливіших чинників. Вкладені у будівництво системи кошти мають окупатися в заданий період. При проектуванні конкретної системи, група фахівців з технічної, фінансової, маркетингової сторони проекту мають розробити бізнес-план, в якому, виходячи з умов ринку, технічних і фінансових можливостей оператора мають бути оцінені об'єми можливих витрат і об'єми передбачуваного прибутку від реалізації конкретного проекту.

Пропускна спроможність системи. На початковому етапі проектування системи під пропускною спроможністю системи розуміють передбачувану кількість обслуговуваних абонентів. Пропускна спроможність мережі на етапі проектування має бути вибрана достатньою, для задоволення усієї потенційної ємності ринку мобільного зв'язку в наміченому регіоні.

Покриття (зона обслуговування). Зона радіопокриття мережі міського стільникового зв'язку, має охоплювати усю територію міста, приміських населених пунктів і шляхів повідомлень.

Вірогідність блокування викликів. Вірогідність блокування викликів або (GoS - Grade of Service) - відсоток невдалих спроб встановлення з'єднання, викликаних перевантаженнями в мережі, обчислюється за формулою Ерланга Б і використовується для розрахунку вірогідності блокування викликів при заданій величині навантаження і заданій кількості каналів трафіку.

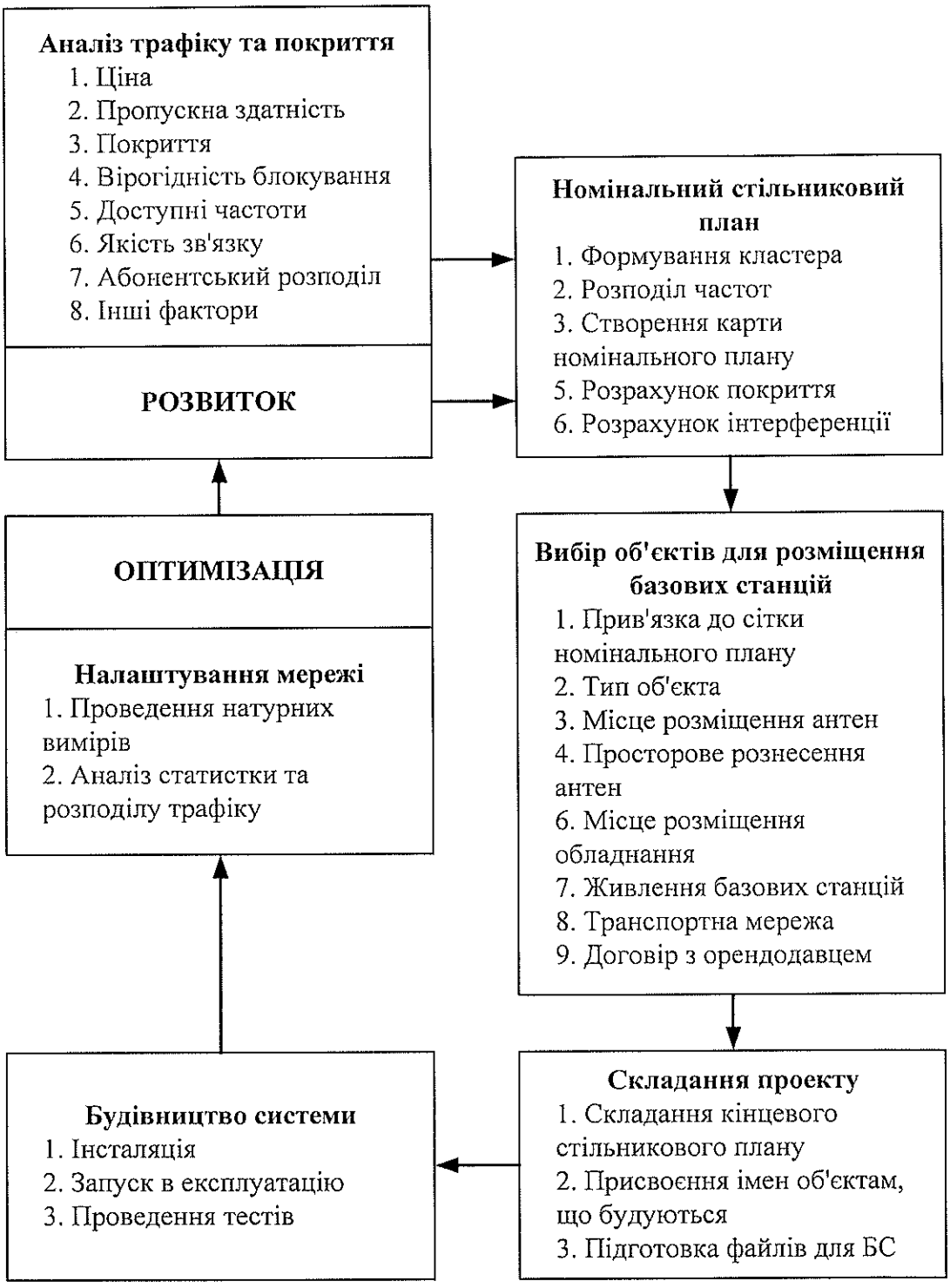


Рис. 2.1. Процес мережевого стільникового планування

Вірогідність надходження викликів в мить, коли усі канали зайняті, може бути розрахована по формулі:

$$B_{\text{áëîê}} = \frac{A^N}{N!\sum_{Z=0}^{N}\frac{A^Z}{Z!}}, \quad (2.1)$$

де N - кількість каналів трафіку; А - обслуговуване навантаження, ерланг;

Навантаження на одного абонента може бути пораховане по формулі:

$$A = \frac{n \cdot T}{3600}, \quad (2.2)$$

де n - кількість з'єднань за проміжок часу, наприклад, 1 година або 3600 с.; Т - середній час розмови впродовж з'єднання, с.

Відповідно до вимог операторських ліцензій, величина відмов усередині вітчизняних стільникових мереж загального користування приймається на рівні $P_{від} \leq 5\%$, а навантаження на одного абонента 0.015 ерланг. Іноді, закладаючи запас на проектування, розрахунок трафіку роблять виходячи з навантаження (вхідний + вихідний), на одного абонента в ГНН (годину найбільшого навантаження) рівного 0.025 ерланг і вірогідність блокування 2%. Досвід роботи стільникових мереж, показує, що середнє навантаження, що створюється одним абонентом коливається на рівні (0.007 - 0.016) ерл.

Для простоти розрахунків, результати обчислень за формулою Ерланга Б, прийнято представляти у вигляді таблиці Ерланга, табл. 2.1.

Аналіз доступних частот. При аналізі доступних для планування частот, найважливішим пунктом є оцінка електромагнітної сумісності (ЕМС) підсистеми базових станцій BSS. ЕМС розглядається на двох рівнях:

- міжсистемна ЕМС;
- внутрісистемна ЕМС.

У рамках вимог міжсистемної ЕМС розглядаються питання, що відносяться до забезпечення спільної роботи приймально-передавального устаткування підсистем BSS з радіоелектронними засобами (РЕС) цивільного і спеціального призначення, працюючими у відповідних частотних діапазонах і в межах

координаційних відстаней. Основою для забезпечення міжсистемної ЕМС являється розподіл частотного діапазону, визначений Регламентом радіозв'язку МСЕ.

Таблиця 2.1

Таблиця Ерланг

n	.007	.008	.009	.01	.02	.03	.05	.1	.2	.4	n
1	.00705	.00806	.00908	.01010	.02041	.03093	.05263	.11111	.25000	.66667	1
2	.12600	.13532	.14416	.15259	.22347	.28155	.38132	.59543	1.0000	2.0000	2
3	.39664	.41757	.43711	.45549	.60221	.71513	.89940	1.2708	1.9299	3.4798	3
4	.77729	.81029	.84085	.86942	1.0923	1.2589	1.5246	2.0454	2.9452	5.0210	4
5	1.2362	1.2810	1.3223	1.3608	1.6571	1.8752	2.2185	2.8811	4.0104	6.5955	5
6	1.7531	1.8093	1.8610	1.9090	2.2759	2.5431	2.9603	3.7584	5.1086	8.1907	6
7	2.3149	2.3820	2.4437	2.5009	2.9354	3.2497	3.7378	4.6662	6.2302	9.7998	7
8	2.9125	2.9902	3.0615	3.1276	3.6271	3.9865	4.5430	5.5971	7.3692	11.419	8
9	3.5395	3.6274	3.7080	3.7825	4.3447	4.7479	5.3702	6.5464	8.5217	13.045	9
10	4.1911	4.2889	4.3784	4.4612	5.0840	5.5294	6.2157	7.5106	9.6850	14.677	10
11	4.8637	4.9709	5.0691	5.1599	5.8415	6.3280	7.0764	8.4871	10.857	16.314	11
12	5.5543	5.6708	5.7774	5.8760	6.6147	7.1410	7.9501	9.4740	12.036	17.954	12
13	6.2607	6.3863	6.5011	6.6072	7.4015	7.9667	8.8349	10.470	13.222	19.598	13
14	6.9811	7.1154	7.2382	7.3517	8.2003	8.8035	9.7295	11.473	14.413	21.243	14
15	7.7139	7.8568	7.9874	8.1080	9.0096	9.6500	10.633	12.484	15.608	22.891	15
16	8.4579	8.6092	8.7474	8.8750	9.8284	10.505	11.544	13.500	16.807	24.541	16
17	9.2119	9.3714	9.6171	9.6516	10.656	11.368	12.461	14.522	18.010	26.192	17
18	9.9751	10.143	10.296	10.437	11.491	12.238	13.385	15.548	19.216	27.844	18
19	10.747	10.922	11.082	11.230	12.333	13.115	14.315	16.579	20.424	29.498	19
20	11.526	11.709	11.876	12.031	13.182	13.997	15.249	17.613	21.635	31.152	20
21	12.312	12.503	12.677	12.838	14.036	14.885	16.189	18.651	22.848	32.808	21
22	13.105	13.303	13.484	13.651	14.896	15.778	17.132	19.692	24.064	34.464	22
23	13.904	14.110	14.297	14.470	15.761	16.675	18.080	20.737	25.281	36.121	23
24	14.709	14.922	15.116	15.295	16.631	17.577	19.031	21.784	26.499	37.779	24
25	15.519	15.739	15.939	16.125	17.505	18.483	19.985	22.833	27.720	39.437	25
26	16.334	16.561	16.768	16.959	18.383	19.392	20.943	23.885	28.941	41.096	26
27	17.153	17.387	17.601	17.797	19.265	20.305	21.904	24.939	30.164	42.755	27
28	17.977	18.218	18.438	18.640	20.150	21.221	22.867	25.995	31.388	44.414	28
29	18.805	19.053	19.279	19.487	21.039	22.140	23.833	27.053	32.614	46.074	29
30	19.637	19.891	20.123	20.337	21.932	23.062	24.802	28.113	33.840	47.735	30
31	20.473	20.734	20.972	21.191	22.827	23.987	25.773	29.174	35.067	49.395	31
32	21.312	21.580	21.823	22.048	23.725	24.914	26.746	30.237	36.295	51.056	32

Аналіз міжсистемної ЕМС проводиться на етапі видачі НКРЗ дозволів на використання операторами зв'язку радіочастот.

У рамках розгляду міжсистемної ЕМС можуть бути виділені питання забезпечення об'єктної ЕМС. Об'єктна ЕМС повинна забезпечити спільну роботу різних РЕС, що встановлюються на одному об'єкті, і передбачає відсутність взаємних перешкод під впливом випромінюваних радіочастот, їх гармонік і продуктів інтермодуляції.

Якість зв'язку. Якість в системах стільникового зв'язку визначається безліччю чинників. При проектуванні враховують:

- вірогідність блокування (GOS);
- RX Quality;
- SQI.

Аналіз абонентського розподілу. На цьому етапі аналізується:

- щільність забудови території, її нерівномірність;
- напрям і завантаженість автомобільних доріг в цьому районі;
- статистика завантаження існуючих мереж ТМЗК або суспільних наземних мобільних мереж (СНММ).

На підставі отриманих даних визначається топологія стільникової мережі. Топологія підсистем базових станцій BSS будується на основі стільникових структур. Радіуси стільників підбираються відповідно до щільності абонентського навантаження і вимог по пропускній спроможності. Розрізняють 3 градації розмірів стільників:

- макростільники радіусом (3.5 - 35) км;
- мікростільники (0.5 – 3.5) км;
- пікостільники радіусом до 0.5 км.

Таким чином, адаптується топологія підсистеми базових станцій до величини, щільності і територіального розподілу абонентського навантаження.

Інші чинники. При будівництві СНММ важливе так само враховувати:

- можливість появи іншого оператора в регіоні. Якщо такий оператор вже існує, то оцінюється його робота, цінова політика, враховуються недоліки і переваги його мережі;
- оцінюється платоспроможність і матеріальний добробут населення.

І так само інші технічні, економічні, соціальні чинники, що так чи інакше впливають на процес планування.

2.2 Номінальний стільниковий план

Номінальний стільниковий план це графічне зображення майбутньої стільникової мережі і виглядає він як набір стільник, нанесений поверх географічної карти. Але перш ніж визначити розташування BS і стільників на карті, необхідно зробити розрахунки.

Визначення кількості BS. Загальна кількість базових станцій, визначається двома параметрами:

- забезпечення безперервного радіопокриття;
- забезпечення необхідної пропускної спроможності.

На початковому етапі ми не можемо передбачити, як і в якій кількості буде розподілено навантаження в системі. На цьому етапі проектування, нам необхідно забезпечити безперервне радіопокриття заданої території. Необхідно вибирати відстані між BS для того, щоб у разі впровадження приймачів LTE 1800 з метою збільшення ємності, задовольнялися вимоги по рівню і якості сигналу.

Що стосується пропускної спроможності, то можливо досить широко варіювати її величиною за рахунок використання від 1 до 3-х приймачів і напівшвидкісних каналів.

Оптимальна відстань між сусідніми BS і радіус стільників залежить від типу місцевості і від частотного діапазону. Ці величини рекомендовані компанією Ericsson при будівництві поєднаних мереж стандарту LTE представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Оптимальні розміри стільників

	Радіус стільники, км	Відстань між BS, км.
Місто	3.7	5.6
Передмістя	8.1	12.2
Відкрита місцевість	27	41

Ці величини є мірою оцінки необхідної кількості BS за критерієм безперервного покриття.

У місцях, де передбачається велика кількість навантаження BS необхідно розташовувати дещо ближче один до одного, ніж в місцях меншої концентрації трафіку.

Складання карти номінального стільникового плану. Після того, як зібрані дані про передбачуване навантаження і покриття, складається номінальний стільниковий план, який є географічною презентацією мережі на карті, рис. 2.2.

Необхідно відмітити, що номінальний стільниковий план є першим етапом стільникового планування.

Розрахунок покриття і інтерференції. Після того, як отриманий номінальний стільниковий план, проектувальники переходять до розрахунку покриття, частот і інтерференції.

Для найбільш ефективного планування важливо враховувати закони поширення радіохвиль в конкретних умовах. Для цієї мети існують спеціальні комп'ютерні програми, в яких закладені цифрові карти місцевості і використовуються загальноприйняті емпіричні моделі поширення радіохвиль в міській і приміській забудові, такі як "Окамура-Хата", "Лі" та ін.

Обчислювальні програми, засновані на цих алгоритмах, дозволяють:

- передбачати зони покриття базовими станціями;
- передбачати зони інтерференції в майбутній мережі;

Вхідними даними для обчислювальних програм є:

- частотний діапазон;
- розташування BS;
- потужності випромінювання BS;
- параметри антенних систем.

Необхідно враховувати діаграму спрямованості антен.

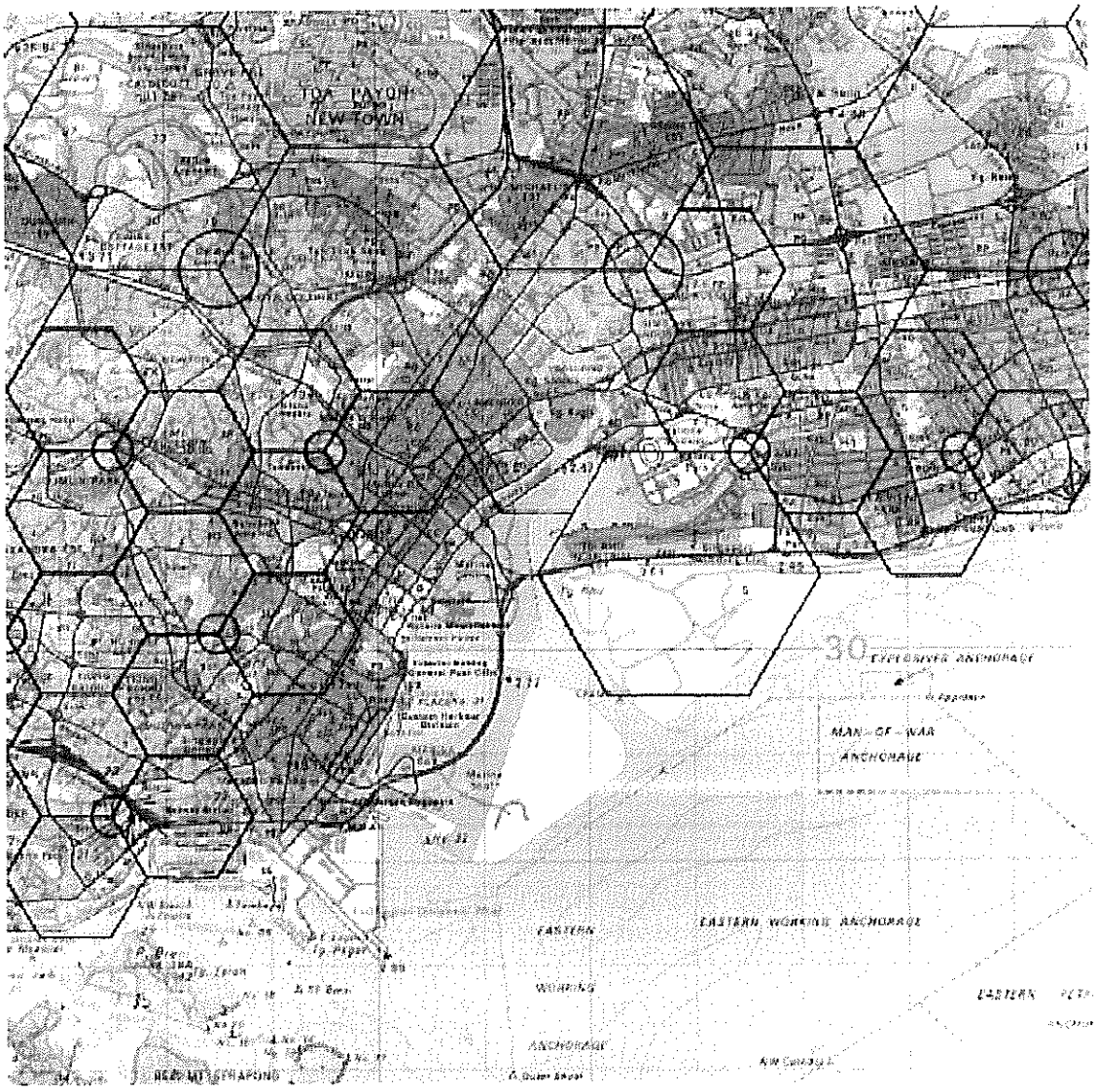


Рис. 2.2. Номінальний стільниковий план

Нижче представлений приклад даних, які необхідно враховувати при виборі антенних систем, табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Параметрів антени Allgon 7331.06

Параметр	Значення
Коефіцієнт підсилення	16 dBi
Поляризація	X - поляризація 45°
Ширина ДН у вертикальній площині по рівню 3 дБ	9°
Ширина ДН в горизонтальній площині по рівню 3 дБ	65°
Максимальна вхідна потужність	300 Вт на порт

Діаграма спрямованості цієї антени наводиться на рис. 2.3.

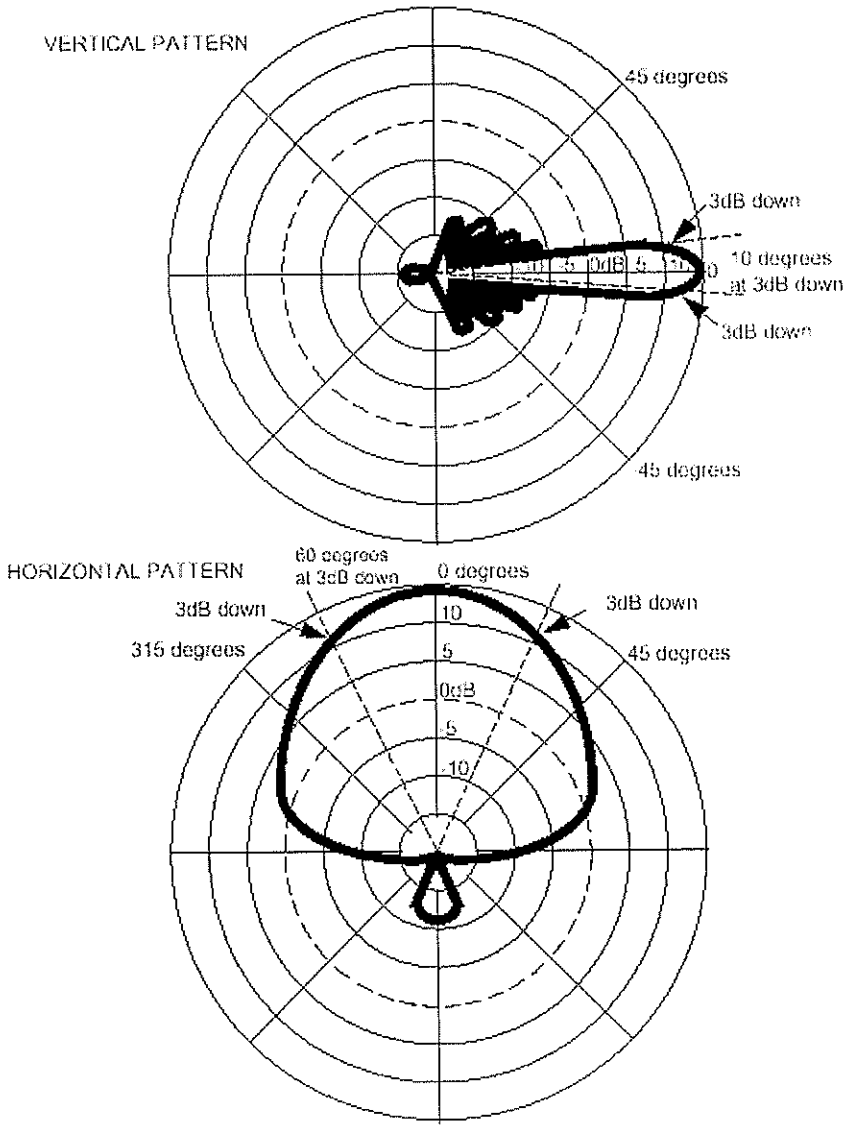


Рис. 2.3. Нормованих діаграм спрямованості у вертикальній і горизонтальній площинах для антени Allgon 7331.06 на частоті 900 МГц

Поширення радіохвиль. Складання номінального стільникового плану є спрощеним (що ідеалізується). Реально, на поширення радіохвиль впливає безліч чинників (рельєф місцевості, будинки, об'єкти, що рухаються, і т. д.). Проблеми, пов'язані із затінюванням, багатопроменевим поширенням радіохвиль впливають на загальне покриття системи. У реальній ситуації форма покриття від одного стільники не має ідеального шестигранника, як показано на рис. 2.4, а має складнішу форму, див. рис. 2.5.

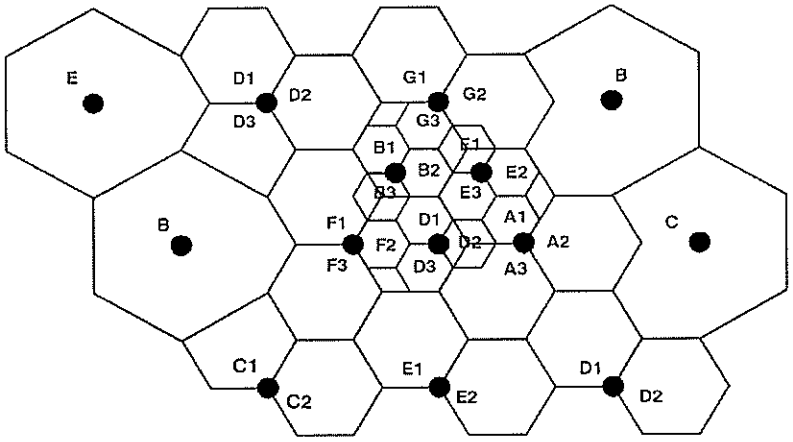


Рис. 2.4. Ідеальна форма стільників

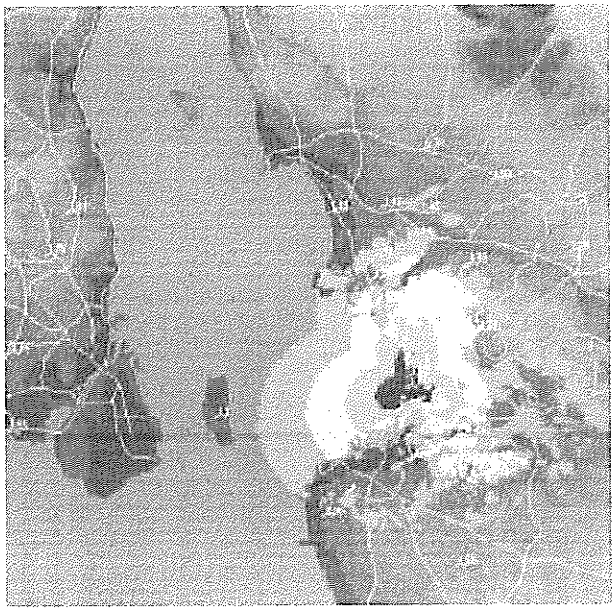


Рис. 2.5. Реальна форма стільників

Окрім проблем, перелічених вище, в системі LTE є наявна ще одна -

проблема часової дисперсії. Ця проблема викликана віддзеркаленням від віддалених об'єктів. Для оцінки цієї проблеми використовується показник якості - відношення C/R Carrier - to - Reflection (відношення основного сигналу С до відбитого сигналу R).

Для відкритих районів поширення радіохвиль здійснюється в зоні прямої видимості. У таких випадках прийом сигналів можливий на досить великих відстанях через мале загасання сигналу.

Але, максимальний радіус стільників в системі LTE складає 35 км. Останнє обумовлене часовим накладенням (Time Alignment). В цьому випадку, щоб уникнути такої проблеми слід використовувати системні опції, наприклад, опцію Extended Range, яка шляхом використання послідовних часових інтервалів TDMA дозволяє збільшити значення TA, і, тим самим, збільшити зону обслуговування до 72 км і більше.

Повторне використання частот. В умовах обмеженого частотного ресурсу, повторне використання частот з виділеного частотного діапазону дозволяє забезпечити безперервне радіочастотне покриття на досить великих територіях. У класичній теорії стільникового планування, стільники групуються в кластери, в кожному кластері використовується фіксований набір частот, який повторюється через певну відстань.

Інтерференція. Окрім забезпечення безперервним покриттям великих територій, повторне використання частот на мережах стільникового зв'язку збільшує і пропускну спроможність системи. Але, як мовиться, - за усе потрібно платити (рис. 2.6). Негативна сторона повторного використання частот - це виникнення інтерференції. В основному, проектувальники стільникових систем оцінюють внутрішньосистемну ЕМС (C/I, C/A).

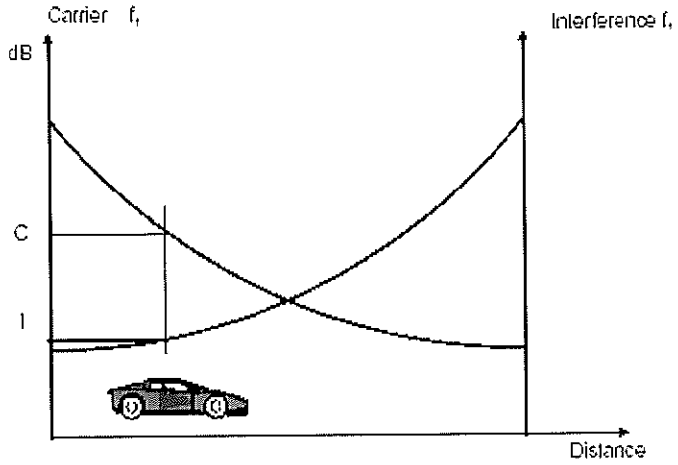


Рис. 2.6. Інтерференція по основному каналу (C/I - Carrier - to - Interference)

Вимоги до внутрісистемної ЕМС, закладені в стандарті LTE:

- по основному каналу: C/I < 9 dB;
- по сусідньому, настроєння (+/-200 кГц): C/A < - 9 dB;
- по сусідньому, настроєння (+/-400 кГц): C/A < - 41 dB.

Аналіз міжсистемної ЕМС проводиться на етапі видачі НКРС дозволів на використання операторами зв'язку конкретних радіочастот. Внутрішньосистемна ЕМС має аналізуватися і розраховуватися оператором.

Внутрішньосистемна ЕМС мереж стільникового зв'язку забезпечує відсутність взаємних радіоперешкод між працюючими в цій мережі радіозасобами. Основним критерієм внутрішньосистемної ЕМС являється припустима величина рівня інтерференції, яка не має бути вища за значення, встановлене стандартом LTE.

До внутрішньосистемної ЕМС відносяться наступні питання:

1. Забезпечення необхідних частотних розв'язок між приймальними і передавальними трактами радіоустаткування в ефірному середовищі і в різних елементах систем антенних фідерів при об'єднанні передавачів і приймачів базових станцій;

2. Відсутність випромінювання на сусідніх радіоканалах в межах одного стільника, а також взаємноспрямованого випромінювання на однакових або сусідніх радіоканалах в суміжних стільниках.

Формування кластерної структури стільників в діапазоні LTE 900 і розподіл частот. Група стільників з різними наборами частот називається кластером. Визначальним його параметром є кількість використовуваних в сусідніх стільниках частот.

Основною ідеєю, на якій базується принцип стільникового зв'язку, є повторне використання частот в несуміжних стільниках. Першим способом організації повторного використання частот, який застосовувався в аналогових системах стільникового рухливого зв'язку першого покоління, був спосіб, що використовує антени базових станцій з круговими діаграмами спрямованості. Він припускає передачу сигналу однакової потужності по усіх напрямах, що для абонентських станцій еквівалентно прийому перешкод від усіх базових станцій з усіх напрямів.

Базові станції, на яких допускається повторне використання виділеного набору частот, віддалені один від одного на відстань D, що називається "захисним інтервалом". Саме можливість повторного застосування одних і тих же частот визначає високу ефективність використання частотного спектру в стільникових системах зв'язку.

Частоти всередині кластера розподіляються так, щоб мінімізувати інтерференцію по сусідньому каналу.

Наприклад, якщо в кластері 21 стільник, див. рис. 2.7 і для них виділений певний частотний діапазон, то кожному стільнику буде виділено 1/21 частина від загального частотного діапазону. Якщо стільники в кластері пронумерувати як A1, A2, A3, … G1, G2, G3 то стільники в сусідніх кластерах теж матимуть номери A1, A2, A3, … G1, G2, G3, а кожний пронумерований стільник в кластері має той же частотний спектр, що і стільник з тим же номером в сусідньому кластері. Якщо стільника в кластері «1», з номером A1, буде сусідами з сотою номер B1 з кластера «2», то виникне проблема з інтерференцією по основному каналу.

Таким чином, для зменшення інтерференції по основному каналу необхідно зберігати максимальну дистанцію між стільниками, що займають загальний частотний спектр в сусідніх кластерах. Загальноприйнята система розподілу

частот усередині кластера 7/21 зображена на рис. 2.7.

Прийнято наступне позначення кластерів:

$$N_{ñ}/N\div, \tag{2.3}$$

де N_c - кількість складових в кластері; $N_{\div}$ - кількість частот в кластері.

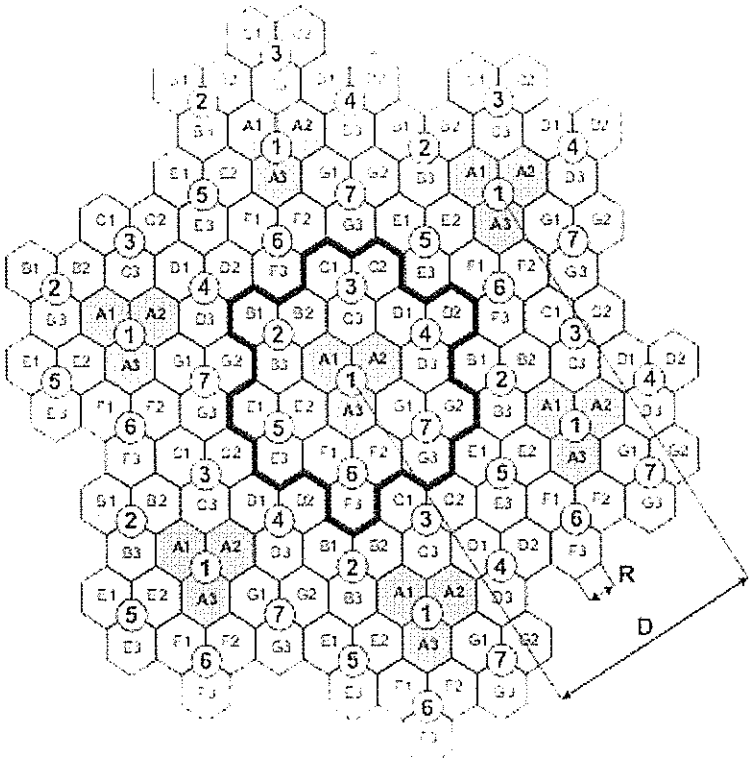


Рис. 2.7. Кластер 7/21, $k_{вик}$=4.58

При використанні трьохсекторних сайтів, чисельне позначення кластера буде кратне 1/3.

При повторному використанні частот необхідно брати до уваги мінімально припустиме просторове рознесення стільників з однаковими частотами D, яке визначається максимально припустимою величиною інтерференції по прямому каналу C/I. Так само величина C/I впливає на якість передаваної мови. У рекомендаціях ETSI для стандарту LTE рекомендується, щоб величина C/I була не нижча 9 дБ, проте компанія Ericsson, як один з провідних виробників обладнання LTE рекомендує, щоб ця величина була не нижча 12 дБ. Для характеристики

щільності плану повторного використання частот використовуються наступні характеристики:

- $k_{вик}$ - коефіцієнт повторного використання частот (кількість сайтів в кластері);
- q_s - відстань між однойменними частотами, оцінена в радіусах стільників R, визначається як:

$$q_s = \frac{D_s}{R} = \sqrt{3 \cdot k_{âèê}}\ , \tag{2.4}$$

де D - мінімальна відстань між двома однойменними частотами, що задовольняє заданій вимозі інтерференції по основному каналу C/I.

Ця формула використовується для загального наближеного розрахунку, в припущенні, що стільники ідеальні шестикутники.

У системі LTE мінімальне значення q_s прийнято брати 3.

Стільники з однаковими частотами мають бути рознесені в просторі на відстань не менше ніж 3R. Друга вимога говорить, що C/I має бути не менше 12 дБ, за наявності в мережі 6 стільників з однаковими частотами. Для розрахунку величини C/I використовується наступна формула:

$$\tilde{N}/^2 = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{j} \cdot q_s^{\gamma}\right), \tag{2.5}$$

де j - кількість сайтів, що інтерферують; q_s - відстань між однойменними частотами; γ - показник втрат на трасі між MS і BS, табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Значення показника втрат на трасі для різних районів міста.

Міська забудова	Передмістя	Відкрита місцевість
4	3.5	3

Наприклад, якщо в кластері 7 сайтів (K = 7), то 6 сайтів (j = 6), оточує обслуговуючий стільник на відстані D1 = 4.58 R1. Якщо за межами цього набору немає інших кластерів, що містять ту ж частоту то

$$\tilde{N}/I = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{j} \cdot q_s^{\gamma}\right) = 10 \cdot \log\left[\frac{1}{j} \cdot \left(\sqrt{3 \cdot k_{\text{èñï}}}\right)^{\gamma}\right] = 10 \cdot \log\left[\frac{1}{6} \cdot \left(\sqrt{3 \cdot 7}\right)^{4}\right] = 18.6 .$$

Таким чином, при проектуванні систем стільникового зв'язку із застосуванням плану повторного використання частот можна брати за основу кластерну структуру з коефіцієнтом повторного використання $k_{\text{âèê}} > 3$, рис. 2.7.

Якщо ж в системі є присутніми більше 6 кластерів з однойменними частотами, то величина C/I трохи зменшиться. Тому при проектуванні великих мереж необхідно брати просторове рознесення між однойменними частотами з невеликим запасом у бік збільшення відстані.

2.3 Вибір об'єктів розміщення базових станцій

Визначення точки установки базової станції здійснюється виходячи з території обслуговування, конфігурації мережі, особливостей міської забудови, очікуваних параметрів абонентського трафіку в зоні обслуговування BS, розробленій топологічній моделі території обслуговування мережі і частотно-територіального плану.

При виборі об'єктів розміщення базових станцій необхідно використовувати наступне обладнання: Цифровий фотоапарат; Цифрову відеокамеру; Бінокль; Лазерний далекомір; GPS приймач; Компас (для вимірів на землі, у відсутність оточення металевих предметів). Виміри компасом на дахах заборонено через неправильну вказівку напряму на Північ; Вимірник сили сигналу типу TEMS компанії ERICSSON.

При виборі об'єктів розміщення базових станцій необхідно враховувати наступне:

- Прив'язка до сітки номінального плану;

- Тип об'єкту;
- Місце розміщення антен;
- Просторове рознесення антен;
- Існуючі перешкоди;
- Місце розміщення обладнання;
- Живлення базової станції;
- Транспортна мережа;
- Договір з орендодавцем.

Прив'язка до сітки номінального плану. Після того, як складений номінальний стільниковий план, необхідно співробітникам інженерної служби виїхати на місця розташування майбутніх базових станцій (точки, визначені на карті номінального плану). Необхідно, щоб об'єкти, вибрані для розміщення базових станцій, як можна ближче розташовувалися до точок номінального плану. В деяких випадках, на одну точку номінального плану можуть обиратись декілька потенційних об'єктів. Останнє робиться для того, щоб вибрати найкращий об'єкт з точки зору радіочастотного покриття.

Після того, як об'єкт вибраний, необхідно зафіксувати дані про цей об'єкт, а саме:

- координати (широта, довгота);
- висота землі над рівнем моря;
- адреса об'єкту;
- висота об'єкту.

Тип обраного об'єкту. Вимоги до об'єктів, придатних для установки устаткування базових станцій, репітерів і контролерів, пристроїв антенних фідерів, електроживлення і т. д. визначаються згідно з відомчими нормами технологічного проектування ("Комплекси мереж стільникової і супутникової рухливому зв'язку загального користування РД 45.162-2001").

Об'єкти можуть бути:

- виробничі;

- адміністративні;
- житлові і громадські будівлі;
- на спеціальні металоконструкції на даху і стінах будівель;
- антенні, освітлювальні опори, димарі.

Місце розміщення антен. На етапі розрахунку радіопокриття за допомогою програмних засобів обчислення, висоти підвісу антен вибираються приблизно. Наприклад, для середнього міста, висота підвісу антен вибирається в межах 20 - 40 м. Останнє залежить від типу забудови району.

Якщо значення висоти підвісу антени, прийняте при розрахунку, відрізняється на 15% від існуючої, то вважається, що на існуючій висоті можна розташовувати антенні системи.

У випадку якщо висота підвісу антен виходить більше за розрахункову, то слід звернути увагу на виникнення інтерференційних зон.

Якщо ж висота підвісу антен виходить нижче, то необхідно повернутися до етапу розрахунку і переконатися чи не вплинуло це на покриття (виникнення білих плям).

У ідеалі, для побудови оптимальної системи, необхідно, щоб структура стільникової мережі була регулярною, усі сектори мали строгу азимутну прив'язку, наприклад 0^{o}, 120^{o}, 240^{o}.

Практика показує, що добитися регулярної структури досить складно, оскільки не завжди можна належним чином зорієнтувати антени, наприклад, через не забезпечення санітарно-захисних зон.

Просторове рознесення антен. Існує дві причини просторового рознесення антен:

- Забезпечення підсилення сигналу, що приймається, за рахунок просторового рознесення антен базової станції;
- Ізоляція антенних систем.

Просторове рознесення. Для забезпечення підсилення сигналу, що приймається, використовують 2 типи рознесення:

1. Горизонтальне рознесення. Антени розташовуються один від одного на відстані 12 – 18 λ або 4 - 5 метрів.

2. Вертикальне рознесення. При вертикальному рознесення значення 12 - 18 λ необхідно помножити на 5, що відповідає 20 - 25 метрів.

Ізоляція антен. Для ізоляції антен необхідно дотримуватися наступного:

- Горизонтальна ізоляція складає 0.4 м.
- Вертикальна ізоляція складає 0.2 м.

Існуючі перешкоди. Одним і важливих чинників проектування місць розташування базових станцій являється забезпечення прямої видимості на шляху поширення радіохвиль від антен базових станцій. Іншими словами для правильного планування розташування антен базової станції, необхідно, щоб не перекривалася перша зона Френеля. Перша зона Френеля складає 5 метрів.

Окрім існування першої зони Френеля необхідно, щоб забезпечувалася санітарно-захисна зона, а також, щоб поле, що створюється антеною, не засвічувало, наприклад, дах, де можуть проводити роботи люди.

На практиці, для забезпечення санітарно-захисної зони, необхідно щоб в діаграму спрямованості антени не потрапляли, наприклад, будинки на відстані 35 - 50 м.

Місце розміщення обладнання. При виборі місця розташування обладнання базової станції керуються принципом, чим ближче обладнання розміщується до антенної системи, тим краще. Останнє пов'язане із загасанням сигналу в антенному фідері, що сполучає антену і базову станцію. Близьке розташування також обумовлене ціною фідера, чим більше довжина фідера, тим дорожче.

Необхідно також враховувати, що приміщення, де розташовуватиметься базова станція, має бути просторим, тим самим, забезпечуючи можливість подальшого розширення базової станції.

Живлення базової станції. Для того, щоб уникнути несанкціонованого виключення зовнішнього джерела базової станції необхідно, при проектуванні передбачити резервне живлення базової станції. У зв'язку з чим, в приміщенні розміщення базової станції має бути передбачене місце під встановлення

акумуляторних батарей.

Транспортна мережа. Для функціонування мережі LTE потрібно щоб BTS була сполучена з BSC. З'єднання BTS і BSC може здійснюватися через:

- радіоканал;
- оптичне волокно;
- мідні дроти.

Договір з орендодавцем. Перш ніж прийняти рішення про будівництво, необхідно укласти договір-оренду з орендодавцем приміщення, де розташовуватиметься обладнання базової станції і антенних систем. Без наявності договору-оренди рішення про будівництво не приймається.

Складання проекту.

На цьому етапі проектування є усі необхідні дані для проектування мережі, а саме:

- інформація про покриття;
- інформація про місце розташування базових станцій;
- інформація про місце комутатора MSC;
- інформація про місце контролера базових станцій BSC;
- інформація про організацію транспортної мережі.

На підставі наявної інформації, складається остаточний стільниковий план будівництва усієї системи, привласнюються імена об'єктам (BTS, BSC, MSC), що будуються. Окрім цього готуються файли для завантаження стільникових параметрів в BSC (Cell Design Data). У цих даних міститься інформація про усі стільники, що запускаються.

Будівництво системи. На етапі будівництва системи визначається, яке обладнання буде використано при будівництві мережі і як воно буде встановлено.

Вибираються типи антенних систем, конфігурації приймачів BTS. Аналізуються можливості по підключенню до транспортної мережі компанії. При цьому у випадку, застосування радіорелейних ліній зв'язку, визначається також наявність прямої видимості у напрямі вузла радіорелейних ліній або сусідніх BTS.

Якщо розрахунки показують, що виконуються усі вимоги по покриттю і інтерференції, то укладаються договори з власниками приміщень і виконуються роботи по монтажу системи і запуску в роботу.

2.4 Особливості оптимізації радіомереж LTE

При загальній оптимізації LTE-мереж першим кроком є оптимізація її радіопідсистеми, тобто радіомережі LTE. Це обумовлено рядом причин. По-перше, при плануванні радіопокриття і ємності LTE були спроектовані методом розрахунку на моделях, в яких використовувалися апріорі наближені початкові дані (моделі місцевості і середовища поширення сигналу, модель трафіку тощо). Застосовані статистичні моделі точні на тривалому інтервалі спостережень, але в поточному часі їх статистика змінюється навколо середніх значень з деякою дисперсією. При цьому середньоквадратичне відхилення може досягати декількох децибел. По-друге, практичне розгортання мережі додає свою долю похибок в спланованих параметрах. Прикладом цьому може служити відмінність реальної довжини антенного фідера від розрахункового значення, що приведе до зміни втрат в нім, або неточна орієнтація антен базової станції в горизонтальній площині, коли антени орієнтовані в різних системах відліку (по істинному або по магнітному азимуту).

Структура процесу оптимізації радіомережі LTE показана на рис. 2.8.

Початковий етап оптимізації - визначення головного завдання, яке потрібно вирішити в ході її проведення. Основний зміст цього завдання включає перевірку і уточнення заздалегідь спланованих параметрів радіомережі, що стосуються її конфігурації і дизайну. Уточнення цих параметрів при оптимізації спрямоване, в першу чергу, на коригування розміру зони покриття і очікуваної пропускної спроможності і грунтується на вимірах.

Вкажемо найбільш значимі аспекти, пов'язані з оптимізацією радіомережі LTE в цілях підвищення її ефективності. До таких аспектів можна віднести: застосування у базовій станції малошумливих підсилювачів TMA (Tower Mounted Amplifier), застосування в Downlink режимі рознесеної передачі TxDiv (Tx Diversity), збільшення потужності базової станції і використання додаткових несучих частот.

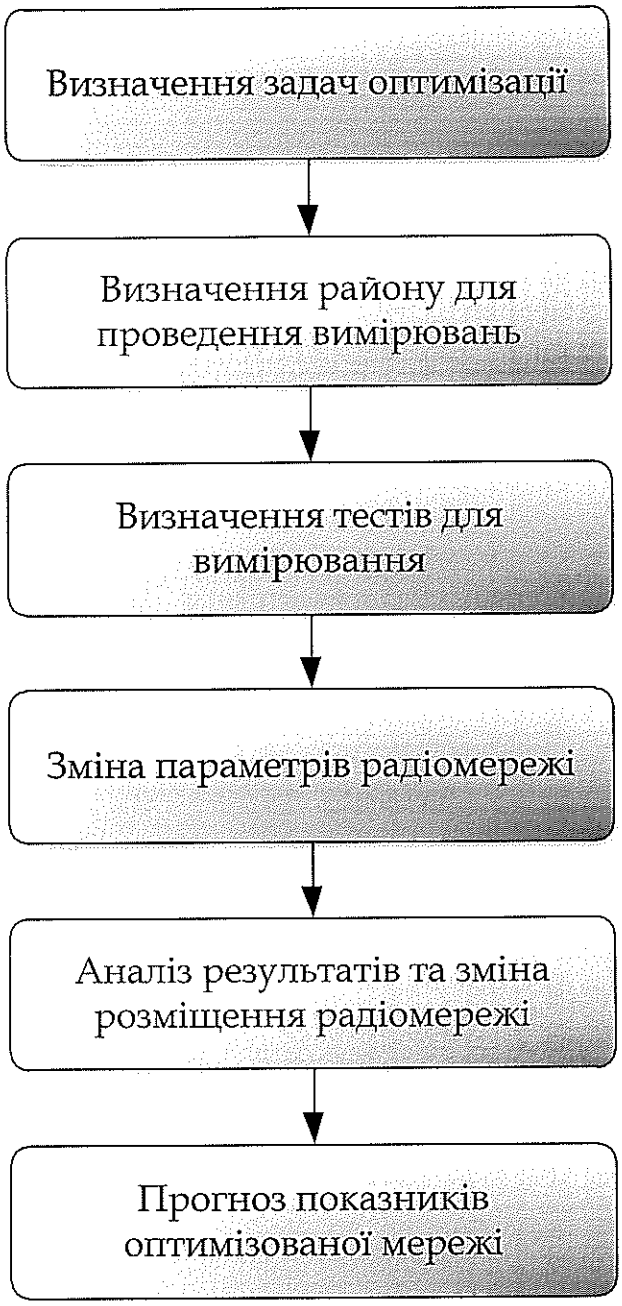


Рис. 2.8. Етапи оптимізації радіомережі LTE

Застосування ТМА. Вигода від застосування малошумливих підсилювачів очевидна. Передусім, це забезпечує зниження коефіцієнта шуму в приймальному тракті (приблизно на 4-5 дБ), а також компенсацію втрат у фідері і елементах з'єднання приймальної антени, що у свою чергу призводить до поліпшення енергетичного бюджету в Uplink. В той же час, окрім поліпшення характеристик прийому ТМА вносить додаткові втрати в тракті передавальної антени. Типове значення цих втрат складає приблизно 0,5 дБ.

Рознесена передача TxDiv. Такий спосіб передання має декілька позитивних властивостей:

• подвоєння потужності передачі, оскільки у базовій станції використовуються два підсилювачі потужності;

• зниження необхідної потужності передачі в кожному низхідному кодовому каналі, тобто зменшення необхідного запасу потужності на компенсацію швидких завмирань;

• поліпшення відношення сигнал/шум E_b/N_0 за рахунок рознесення.

Виграш від подвоєння потужності залежить від розміру стільника, а виграш від рознесення залежить від декількох чинників: від розміру стільника, виду послуги і умов поширення сигналу (рівня багатопроменевості), як показано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Виграш від оптимізації радіомережі LTE

Опції	Виграш в пропускній спроможності, %		
	Місто з щільною забудовою	Місто/передмістя	Сільська місцевість
Подвоєння потужності	~ 0-2	~ 1-8	~ 2-11
Рознесення	~ 8	~ 10	~ 12
Типовий загальний виграш	~ 8	~ 15	~ 20

Динаміка поліпшення необхідного відношення сигнал/шум E_b/N_0 показана на рис. 2.9 порівняно з випадком, коли рознесена передача не застосовується.

Приведені результати свідчать, що середній виграш в пропускній спроможності стільника при рознесеній передачі забезпечується в макростільнику у разі рухливого засобу, а істотний виграш - в мікростільнику для пішохода.

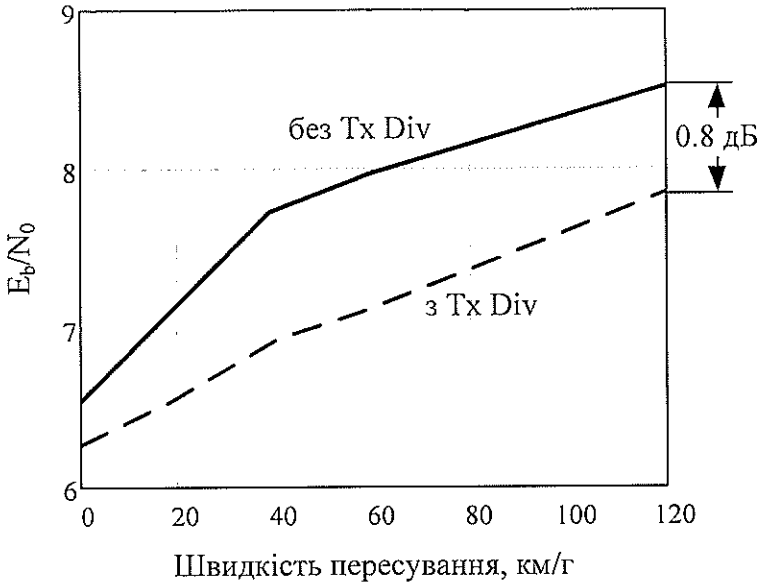


Рис. 2.9. Поліпшення E_b/N_0 при рознесеній передачі

Збільшення потужності базової станції. Щоб оцінити позитивний ефект від збільшення потужності базової станції в мережі LTE, слід проаналізувати залежності, приведені на рис. 2.9. Аналіз графіку показує наступне:

• ефект від збільшення потужності передавача удвічі далеко не відповідає очікуваній пропорційності росту пропускної спроможності, тобто не забезпечується її подвоєння;

• з точки зору виграшу пропускної спроможності збільшення потужності Node B ефективніше в сільській місцевості, ніж в міських умовах;

• виграш по пропускній спроможності більше при збільшенні потужності Node B в області низьких значень (від 5 Вт до 10 Вт), ніж при її збільшенні від 10 Вт до 20 Вт, а тим більше - від 20 Вт до 40 Вт. Розмір цього виграшу залежить також від радіусу стільнику;

• існує поріг збільшення потужності базової станції, вище за яке не буде значимого збільшення пропускної спроможності в осередку.

Використання додаткових несучих частот. При використанні в мережі LTE другої несучої частоти, потужність базової станції ділиться між двома несучими, якщо в передавачі відсутній додатковий підсилювач потужності. При цьому строгого подвоєння пропускної спроможності в Downlink не відбувається,

особливо на краю стільника. У табл. 2.6 приведені експериментальні дані, що показують наскільки збільшується пропускна спроможність осередку при впровадженні додаткової несучої частоти, в різних середовищах.

Таблиця 2.6

Збільшення пропускної спроможності осередку при впровадженні додаткової несучої частоти

Конфігурації несучих частот	Ріст пропускної спроможності в Downlink				
	1 підсилювач потужності в передавачі Node B				
	Середовище:	Місто (щільна забудова)	Місто	Передмістя	Сільська місцевість
	Радіус стільника:	350 м	550 м	1700 м	7000 м
1 несуча + 1 несуча		92%	87%	77%	60%
2 несучих + 1 несуча		41%	37%	27%	15%

Як видно з таблиці, без додаткового підсилювача потужності в передавачі Node B додаткові несучі частоти, дають різний приріст пропускній спроможності в Downlink, який залежить від їх конфігурації, середовища функціонування мережі і розміру зони покриття. Найбільший приріст спостерігається, коли до однієї несучої частоти, в секторі додається друга, менший приріст - при додаванні до двох несучих третьою. При однаковій конфігурації несучих частот, більший приріст спостерігається в міських умовах, ніж в умовах відкритої місцевості. Рис. 2.10 ілюструє ріст пропускної спроможності в секторах мережі LTE різних розмірів в умовах міста при певних значеннях потужності Node B.

Приведені графіки дозволяють доповнити попередні висновки тим, що абсолютний приріст пропускної спроможності при однаковій конфігурації несучих частот, знижується при великих розмірах стільників.

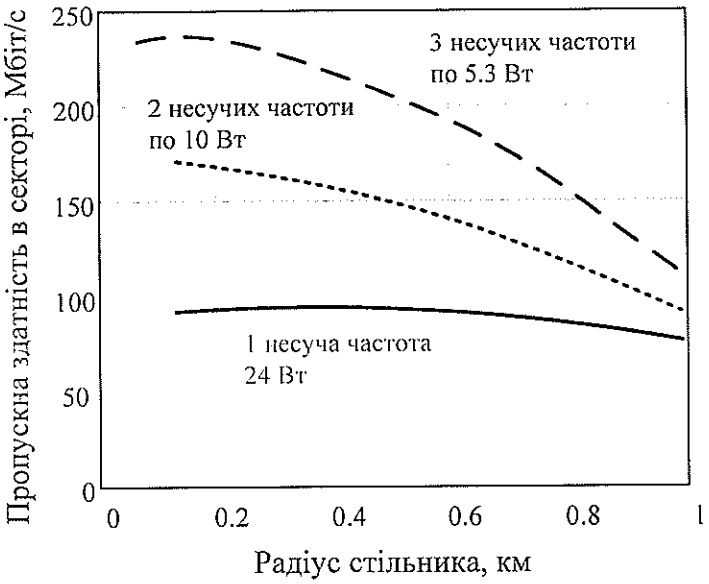


Рис. 2.10. Пропускна спроможність в секторі мережі LTE при декількох несучих частотах (умови міста)

Ефективнішим варіантом використання додаткових несучих частот, в мережі LTE є застосування додаткових підсилювачів потужності в передавачі Node B. Такий варіант дозволяє підвищити потужність (чи зберегти колишній її рівень) на кожній несучій частоті. Ефект такого рішення показаний в табл. 2.7.

Приведені дані свідчать про те, що збільшення потужності на кожній несучій частоті, призводить до деякого росту пропускної спроможності, але по-різному. В протилежність випадку застосування одного підсилювача потужності (табл. 2.6) тут найбільший ефект спостерігається в умовах сільської місцевості. Причому, як і відзначалося вище, більший ефект має місце при фіксованому радіусі стільника, коли збільшення потужності відбувається в області малих її значень (з 5,3 Вт до 10 Вт).

Таблиця 2.7

Ефективний варіант використання додаткових несучих частот

Кількість частот, що несуть	Збільшення потужності на кожній частоті, що несе	Ріст пропускної спроможності в Downlink				
		Середовище:	Місто (щільна забудова)	Місто	Передмістя	Сільська місцевість
		Радіус осередку:	350 м	550 м	1700 м	7000 м
1 несуча	з 20 Вт до 40 Вт		1%	2%	4%	8%
2 несучі	з 10 Вт до 20 Вт		4%	6%	11%	20%
3 несучі	з 5,3 Вт до 10 Вт		6%	9%	17%	31%

3 АВТОМАТИЗОВАНІ ЗАСОБИ ПРОЕКТУВАННЯ СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Інтелектуальні технології при проектуванні мереж стільникового зв'язку

У сучасних мережах стільникового зв'язку затребуваним є не стільки як можна більше покриття території, скільки безперервність надання заявлених послуг. Ці послуги характеризуються різними вимогами до об'єму трафіку, і до його цілісності. Одним з самих невибагливих сервісів є SMS-повідомлення. В той же час голосові послуги є вимогливішими до трафіку і ресурсів мережі, передача real-time відео в мережах мобільного зв'язку може робитися тільки за умови безперервності надання трафіку абонентові.

На етапі проектування мережі стільникового радіотелефонного зв'язку, залежно від стадії, визначаються місця установки базових станцій з урахуванням обслуговування максимальної кількості абонентів із заданою якістю сервісу, конфігурація самих базових станцій, ліній зв'язку і інших елементів мережі. Метою проектування є досягнення оптимального співвідношення «Ефективність (якість)/вартість». При цьому враховується велика кількість різних чинників географічного, геофізичного, соціального, а також антропогенного характеру. Виділяються наступні завдання проектування мережі радіотелефонного зв'язку [1]:

- визначення місць установки базових станцій, необхідних для забезпечення радіопокриття території обслуговування;
- розподіл частотних каналів між стільниками (складання схеми повторного розподілу частот в мережі);
- визначення числа користувачів по розрахованому трафіку і побудова мережі достатньої ємності для їх обслуговування з необхідною якістю;
- оптимізація стільникової мережі по мінімальному числу стільників (мінімальній вартості розгортання мережі) і високої надійності зв'язку.

Кожне з цих завдань важливе і не може розглядатися у відриві від інших. Інакше можливі помилки в побудові мережі.

Зазвичай на практиці використовується наступна методика проектування мережі зв'язку:

- проектування радіопокриття заданої території;
- складання частотно-територіального плану (ЧТП);
- проектування ємності мережі.

Необхідно враховувати, що процеси проектування і оптимізації мережі зв'язку загального користування нерозривно пов'язані між собою і витікають один з іншого, що припускає циклічність цих етапів.

На підставі комп'ютерного моделювання, драйв-тестів, побажань абонентів, з урахуванням економічної доцільності робиться оптимізація і розширення існуючої мережі.

При розгляді мереж мобільного зв'язку можна враховувати чотири глобальні об'єкти оптимізації.

Власне мережа мобільного зв'язку - витрати на розгортання і експлуатацію.

Радіоканал - шляхи проходження радіохвиль від базової станції до абонента і назад.

Доступність послуг - можливість отримання певного набору мережевих послуг у будь-якому місці знаходження абонента в межах обумовленої території.

Якість надання послуг - можливість отримання заявлених послуг з належною якістю у будь-якому місці обумовленої території обслуговування.

Для вирішення даних задач створена досить велика кількість різних програмних і апаратних засобів, кожне з яких має свої достоїнства і недоліки.

Нині дослідниками виділяються три групи моделей (методів) розрахунку зони покриття радіомережі [23]:

- статистичні;
- детерміновані;
- квазідетерміновані.

До статистичних методів розрахунку відносяться моделі Окамура-Хата,

COST 231, Уолфиш-Ікегами і ін. В їх основі лежать узагальнені статистичні формули загасання радіосигналу в різних типах забудови (міська, приміська, сільська). Точність розрахунку залежить від ретельного підбору емпіричних коефіцієнтів, заснованого на аналізі карт місцевості. Зараз більшість операторів стільникового зв'язку використовують для планування мереж програмні продукти, засновані саме на цих моделях, проте недосконаліть комп'ютерних карт місцевості і усереднені коефіцієнти призводять до досить великої помилки. До числа достоїнств цих моделей можна віднести порівняно невеликий час розрахунку.

Детерміновані методи розрахунку зон покриття засновані на використанні фізичних моделей поширення радіохвиль. У них враховуються послаблення у вільному просторі, віддзеркалення від місцевих об'єктів, дифракція на перешкодах, поглинання, заломлення електромагнітних хвиль. Розрахунок заснований на багатопроменевій моделі поширення радіохвиль. Плюсом цієї технології є досить висока точність розрахунку. На практиці детермінований метод практично не застосовується, оскільки в умовах міської забудови із складною архітектурою розрахунок покриття займає величезну кількість часу, порівнянну з часом розгортання мережі. Це викликано не лише обчислювальними витратами на розрахунок багатопроменевого поширення радіохвиль, але і необхідністю точного моделювання міського середовища з урахуванням архітектурних особливостей, матеріалів будов, що практично неможливе в масштабах великого населеного пункту.

Квазідетермінований метод описаний в [11] і відрізняється наступними особливостями: застосовується багатопроменева модель поширення радіохвиль, заломлення замінюється послабленням; використовуються середньостатистичні коефіцієнти віддзеркалення для кожного діапазону частот; поглинання розраховується з урахуванням довжини променя у будові/лісу/парку; використовується адаптивний алгоритм розрахунку, що враховує різні напрями приходу прямої і відбитої хвиль; існує можливість обліку діаграм спрямованості кожної антени.

Ця модель має велику точність в порівнянні із статистичними методами, проте обчислювальні витрати значно менше, чим при детермінованому способі.

Наступним етапом проектування після розрахунку покриття є планування ємності мережі для усунення ефекту «перевантаження» базових станцій.

Математичні моделі трафіку, що використовуються в проектуванні систем мобільного зв'язку, характеризуються наступними особливостями [12]:

- потік викликів підкоряється розподілу Пуассона;
- тривалість викликів підкоряється експоненціальному розподілу (моделі Ерланга A, B, C), при цьому різні моделі відрізняються одна від одної реакцією на виклики, що поступають у момент часу, коли усі розмовні канали зайняті. При розрахунках ємності мереж стільникового зв'язку зазвичай використовується модель Ерланга B [12]. Це обумовлено тим, що при малій вірогідності відмови моделі Ерланга B і З дають досить близькі результати, при цьому при вірогідності відмов більше 0.1 порівняно невелике зростання трафіку призводить до різкого росту вірогідності відмови, тобто до різкого погіршення якості обслуговування.

Крім того, у ряді робіт [13,14] визначені алгоритми прогнозування перевантажень стільникових мереж з урахуванням рухливості абонентів.

Незважаючи на велику кількість моделей і методів планування мереж зв'язку, часто реальна якість зв'язку не відповідає прогнозу. У Керівному документі галузі [21] визначені норми на показники якості послуг зв'язку і методики проведення їх оцінних випробувань.

Найточніше оцінити електромагнітну обстановку і якість зв'язку в регіоні дозволяє проведення натурних випробувань, проте для більшої ефективності цих заходів необхідно на початкових етапах проектування проводити математичне моделювання, що призводить до нової ітерації циклу проектування.

Різними фірмами-виробниками нині пропонується велика кількість програмних, програмно-апаратних і апаратних комплексів, що виконують функції моделювання, аналізу і оптимізації мереж зв'язку (рис. 3.1):

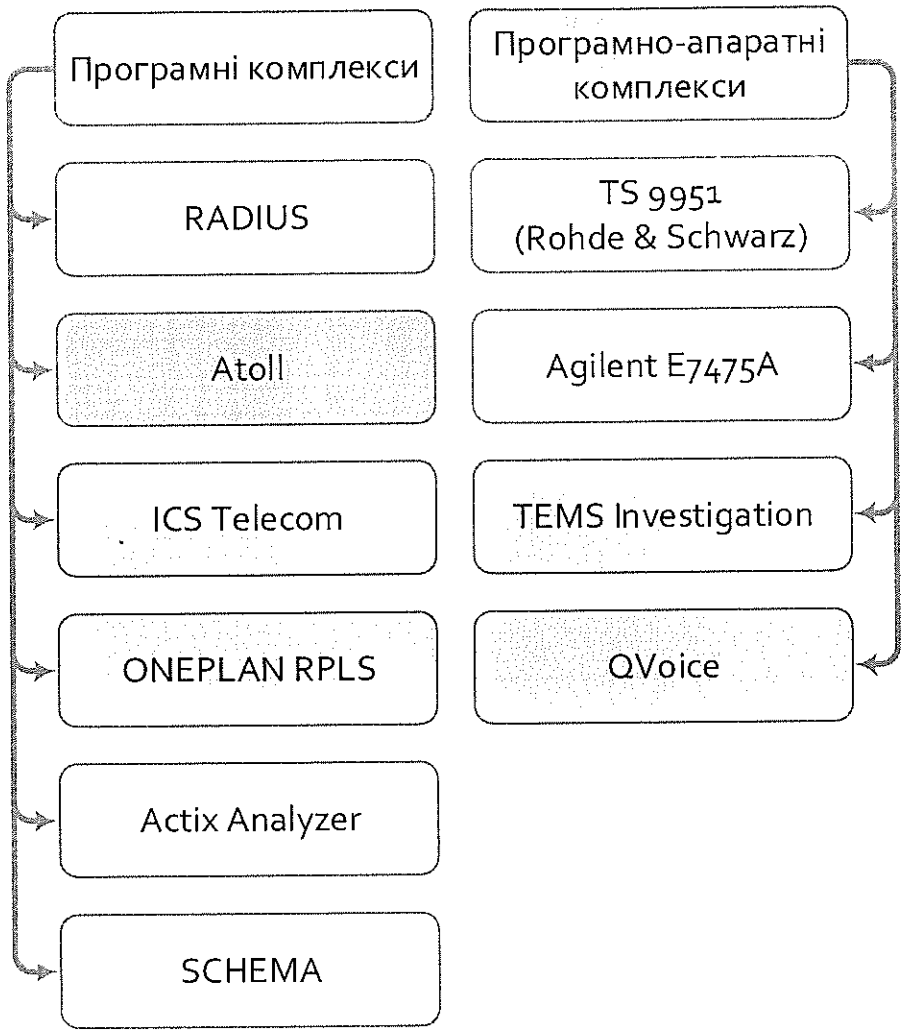


Рис. 3.1. Засоби автоматизованого моделювання, аналізу і оптимізації стільникових мереж зв'язку

- Програмні комплекси:
  - Програмний комплекс (ПК) RADIUS;
  - Atoll [22];
  - ICS Telecom (Франція);
  - Програмний комплекс ONEPLAN RPLS;
  - Програмне забезпечення Actix Analyzer;
  - Сімейство програмних продуктів SCHEMA (Ізраїль).
- Апаратні комплекси:
  - Аналізатор радіомереж; S®TSMU.
- Програмно-апаратні комплекси:
  - TS 9951 (Rohde; Schwarz, Німеччина);

- Agilent E7475A;
- TEMS Investigation (Еріксон, Швеція);
- QVoice (AsCom, Швейцарія).

3.2 Проектування покриття системи стільникового зв'язку за допомогою автоматизованого пакету Atoll

Atoll — це мультитехнологічна платформа для проектування та оптимізації бездротової мережі, яка підтримує бездротових операторів протягом усього життєвого циклу мережі, від початкового проектування до ущільнення та оптимізації.

Atoll включає передові можливості дизайну multi-RAT RAN для технологій радіодоступу 2G, 3G, 4G і 5G. Він підтримує найновіші технологічні досягнення, включаючи масивне MIMO, 3D-формування променя та розповсюдження mmWave для проектування та розгортання мереж 5G.

Atoll надає операторам і постачальникам потужну та унікальну структуру для проектування та оптимізації внутрішніх і зовнішніх мереж радіодоступу.

Функції інтеграції та налаштування Atoll допомагають операторам плавно оптимізувати процеси планування та оптимізації. Atoll підтримує широкий спектр сценаріїв впровадження, від автономних до корпоративних серверних конфігурацій.

Завдяки більш ніж 10 000 активним ліцензіям, встановленим понад 500 клієнтами в 140 країнах, Atoll став галузевим стандартом для планування та оптимізації радіомереж.

Автоматизований пакет Atoll — це програмний інструмент, розроблений для допомоги в проектуванні та плануванні покриття стільникового зв'язку. Atoll — комплексний програмний засіб, що використовується для проектування покриття стільникового зв'язку. Програмне забезпечення оснащене рядом функцій, які дозволяють легко планувати та проектувати покриття мережі. Деякі

функції Atoll включають планування мережі, оптимізацію радіомережі та аналіз продуктивності мережі.

Моделювання Multi-RAT RAN

Atoll — це комплексна мультитехнологічна платформа радіопланування та оптимізації, яка включає уніфіковані мультитехнологічні моделі трафіку, симулятори Монте-Карло та автоматичне планування клітинок (ACP). Atoll може моделювати пов'язані з трафіком аспекти мультитехнологічних мереж і динамічно розподіляти трафік між мережевими рівнями 2G, 3G, 4G і 5G, що включають макро-, мікро-, малі комірки та гарячі точки Wi-Fi.

Проектування мережі 5G

Модульні та розширені можливості моделювання радіотехнології 5G NR Atoll разом із підтримкою розповсюдження mmWave, масивного MIMO та 3D-формування променя надають операторам гнучку та еволюційну структуру для проектування та розгортання мереж 5G.

Вбудовані можливості налаштування

Вбудовані сценарії завдань і можливості інтеграції Atoll забезпечують інтеграцію даних, а також інтеграцію на рівні обслуговування, дозволяючи операторам оптимізувати процеси мережевого планування та оптимізації.

Планування та оптимізація радіочастот на основі прогнозування та вимірювання

Atoll пропонує унікальні можливості використання як прогнозів, так і живих мережевих даних протягом усього процесу планування та оптимізації радіочастотної мережі. Дані живої мережі (KPI, трасування UE/стільника/MDT і краудсорсингові дані) додають реальну інформацію до прогнозів, що дозволяє розширене моделювання розвитку трафіку, ідентифікації гарячих точок і поширення радіосигналу. Дані живої мережі також можуть використовуватися в Atoll для керування процесом планування (вибір місця) і для керування алгоритмами оптимізації AFP (автоматичне частотне планування) і ACP.

Інтегроване моделювання в приміщенні та на вулиці

Новий модуль Atoll In-Building дозволяє проектувати бездротову мережу в

будівлі в рамках Atoll, надаючи операторам унікальні можливості внутрішнього/зовнішнього планування мережі. Atoll In-Building містить повний набір функцій планування всередині приміщень, таких як моделювання планів поверхів і будівельних елементів, розповсюдження всередині приміщень, схеми встановлення обладнання та автоматичний розрахунок номенклатури матеріалів, які дозволяють операторам оптимізувати загальне планування RAN всередині/зовнішнього приміщення. процес.

Atoll здатний моделювати покриття мережі та оцінювати продуктивність мережі, дозволяє оптимізувати мережу, що забезпечує максимальну ефективність роботи мережі. Кроки, пов'язані з проектуванням покриття стільникового зв'язку за допомогою Atoll, включають збір даних, планування мережі, оптимізацію мережі та аналіз продуктивності мережі. Збір даних передбачає збір інформації про територію, яку потрібно охопити, включаючи рельєф місцевості, щільність населення та існуючу інфраструктуру. Планування мережі передбачає проектування покриття мережі, тоді як оптимізація мережі гарантує, що мережа працює з максимальною ефективністю. Аналіз продуктивності мережі передбачає оцінку продуктивності мережі для виявлення будь-яких областей, які потребують покращення.

При проектуванні покриття стільникового зв'язку необхідно враховувати кілька факторів. Одним з найважливіших факторів є рельєф місцевості. Це пояснюється тим, що місцевість і рельєф можуть впливати на потужність сигналу та покриття мережі. Наприклад, у районах з горами або високими будівлями можуть знадобитися додаткові стільникові вежі для забезпечення надійного покриття мережі.

Щільність населення та демографічні показники також є важливими факторами, адже в районах з високою щільністю населення можуть знадобитися додаткові стільникові вежі для розміщення великої кількості користувачів. Крім того, демографічні показники населення можуть впливати на тип необхідного покриття мережі. Наприклад, для районів з великою кількістю людей похилого віку може знадобитися покриття 3G, а для районів з великою кількістю молодих

людей може знадобитися покриття 4G.

Існуюча інфраструктура та покриття це впливові фактори, тому що наявну інфраструктуру можна використовувати для доповнення покриття мережі, зменшуючи потребу в додаткових вежах стільникового зв'язку. Крім того, наявне покриття можна використовувати для визначення областей, які потребують додаткового покриття.

Універсальна система Atoll (рис. 3.2) призначена для автоматизованого проектування безпровідних мереж різної архітектури (радіорелейних, транкінгових, стільникових), що застосовують різні стандарти передачі даних. Використання системи дозволяє в стислі терміни розробити проект нової мережі або розширити вже розгорнуту мережу, оцінити її достоїнства і недоліки, проаналізувати показники елементарної сумісності проектованої мережі з іншими мережами, працюючими в тій же місцевості, і оптимізувати характеристики з урахуванням конкретних графічних умов місцевості при заданому розподілі трафіку і джерел перешкод [22].

Загальні характеристики Atoll, Atoll In-Building і Atoll Microwave:

1. Особливості ГІС

▪ Оптимізовані функції керування картографічними даними з підтримкою цифрових моделей висоти, даних про перешкоди (тип і висота), даних 3D-будівель (вектор/растр), даних про дорожній рух, сканованих карт, векторних даних, даних про населення та клімату;

▪ Інтегрований редактор картографії (вектор/растр) ;

▪ Інтерфейс із інструментами ГІС: MapInfo, ArcGIS, Google Earth;

▪ Підтримка Web Map Services (WMS) і онлайн-карт (Bing, Open Street Maps).

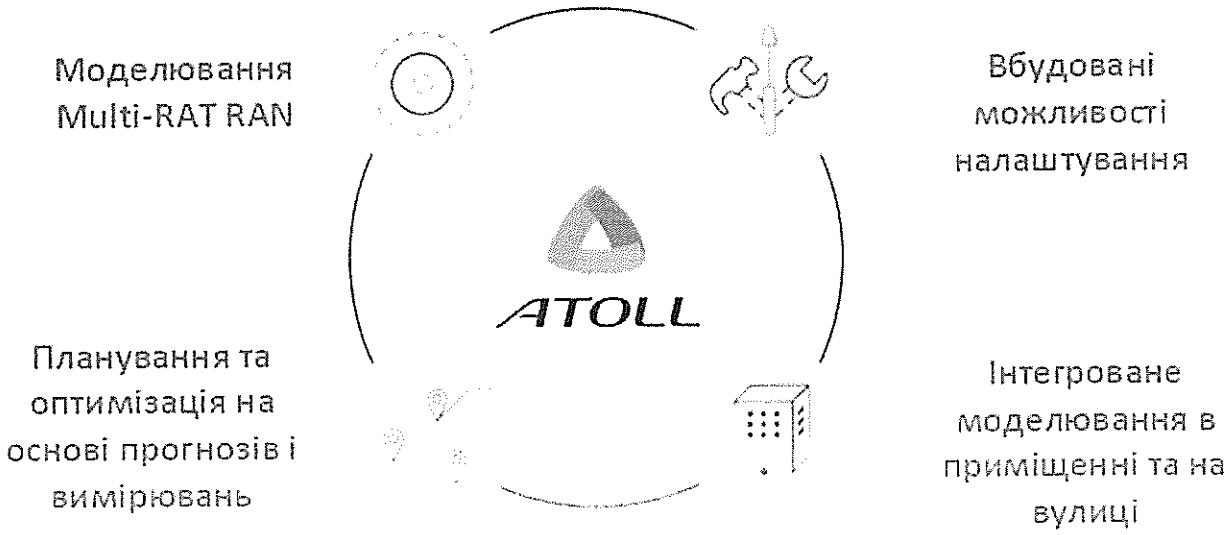


Рис. 3.2. Atoll — мультитехнологічна платформа для проектування та оптимізації бездротової мережі

2. Моделювання поширення:

▪ Повна підтримка графіків прогнозування з різною роздільною здатністю;

▪ Комплексна інтегрована бібліотека моделей розповсюдження;

▪ Високопродуктивні моделі розповсюдження Aster і Aster mmWave з трасуванням променів (опція) ;

▪ Автоматичне налаштування моделі поширення;

▪ Інтеграція моделей зовнішнього розповсюдження.

3. Керування користувачами та базами даних:

▪ Розширений модуль адміністрування, що підтримує доступ до даних і керування привілеями користувачів;

▪ Гнучка структура бази даних, що дозволяє інтегрувати визначені користувачем параметри та спеціальні поля;

▪ Багатокористувацька підтримка, включаючи управління узгодженістю бази даних, синхронізацію даних і відключення/повторне підключення користувача до/від бази даних;

▪ Підтримка автономних, централізованих, розподілених конфігурацій;

▪ Розширені функції імпорту/експорту, що дозволяють швидко

переміщувати дані з іншого програмного забезпечення для радіозв'язку та транспортного зв'язку.

4. Налаштування:

- Мова сценаріїв, що дозволяє інтегрувати визначені користувачем макроси;
- Визначені користувачем обчислення на основі макросів і сценаріїв.

5. Розподілені обчислення та багатопотоковість:

- Багатопотокові/паралельні обчислення в багатоядерних системах;
- Розподілені обчислення на мережевих робочих станціях і серверах.

По своїх функціональних можливостях, точністю і повноті розрахунку характеристик мережі, по зручності призначеного для користувача інтерфейсу, програма RPS - 2 не поступається найбільш відомим зарубіжним аналогам, вигідно відрізняючись від них ціною, доступністю технічної підтримки і супроводу.

RPS - 2 складається з наступних програмних модулів:

- Модуль розрахунку радіорелейних мереж;
- Модуль розрахунку транкінгових і стільникових мереж усіх стандартів;
- Модуль розрахунку широкосмугових мереж;
- Модуль імпорту результатів експерименту, їх відображення, порівняння з розрахунком і коригування параметрів використовуваних моделей за результатами цього порівняння;
- Модуль розрахунків, пов'язаних з розробкою санітарного паспорта місця;
- Автоматичний конвектор цифрової карти із стандартного формату у внутрішній формат представлення картографічних даних;
- Модуль розрахунку аналогових і цифрових систем радіо- і телемовлення.

Конкретні параметри модельованої системи представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Параметри модельованої системи

Стандарт стільникової мережі			LTE
Координати зони покриття (градуси, хвилини)	«1»	E	54°40
		N	55°11
	«2»	E	54°40
		N	55°46
Кількість БС, не більше, шт.			10
Кількість секторів БС, не більше, шт.			2
Висота антен БС, не більше, м			30
Потужність БС, не більше, Вт			38
Чутливість БС, дБп			-100
Потужність МС, дБ			33
Чутливість МС, дБп			-105

Потужність передавача базової/мобільної станції визначається по формулі:

$$P_{dBm} = 10 \times \log \frac{P_{Âò}}{P_i}, \quad (3.1)$$

де P_{dBm} - потужність в децибелах/метр, $P_{Вт}$ - таблично задана потужність у ватах, $P_Н$ - значення нормування потужності, рівне 1 мВт.

Проаналізувавши початкові дані і спланувавши розташування базових станцій, ми отримали мережу, представлену на рис. 3.3.

Однією з переваг використання Atoll для планування та проектування мережі є те, що він забезпечує точні та надійні результати. Програмне забезпечення розроблено для врахування різних факторів, таких як рельєф місцевості, рельєф і щільність населення, під час планування покриття мережі. Це гарантує, що мережа забезпечує надійне покриття для всіх користувачів, незалежно від їх місцезнаходження.

Автоматизований пакет Atoll є ефективним інструментом для проектування покриття стільникового зв'язку, хоча проблемою є складність проектування покриття для великих територій.

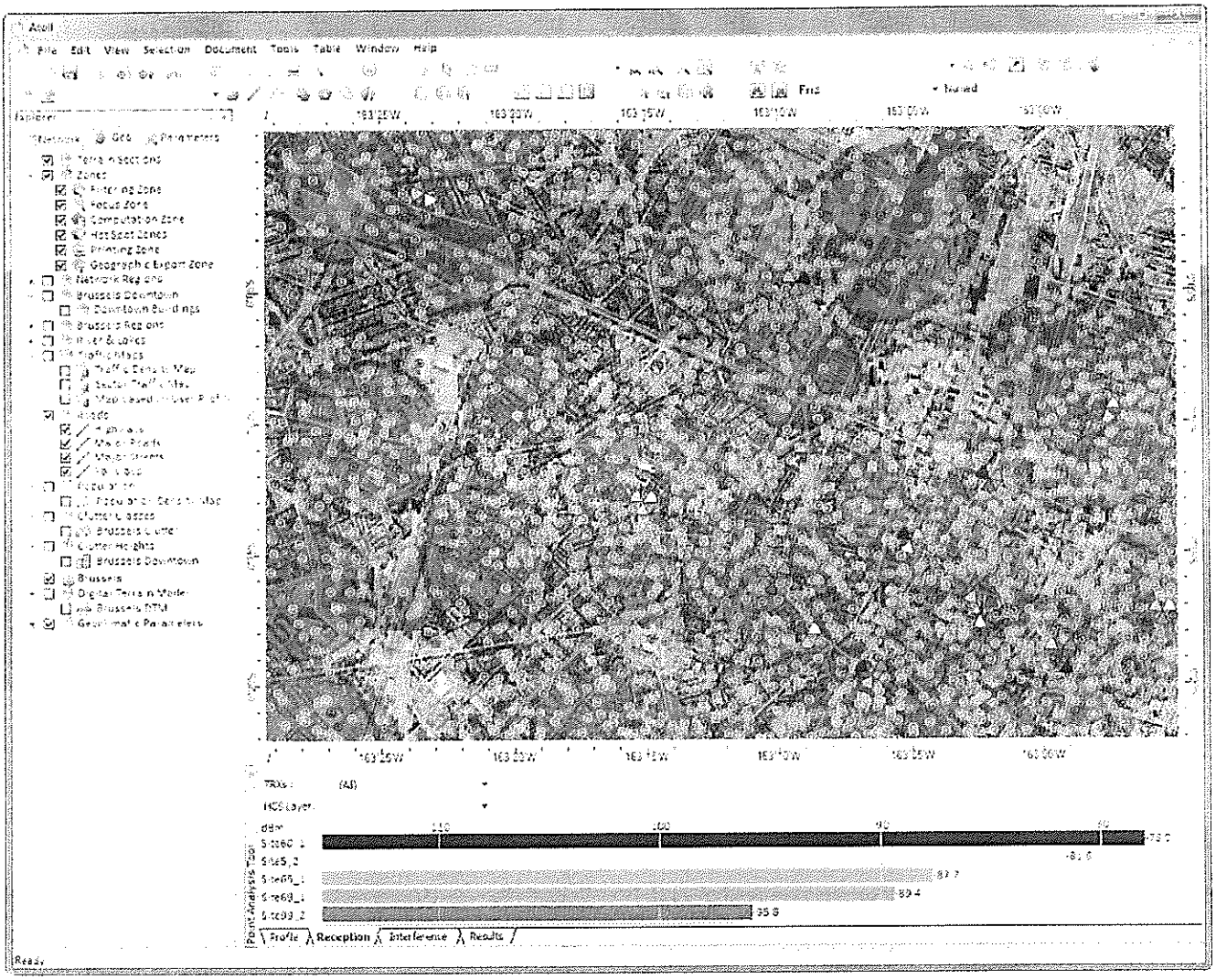


Рис. 3.3. Результати процесу моделювання

3.3 Програма попереднього розрахунку зони радіопокриття мережі стільникового зв'язку технології LTE в середовищі MathCad

За визначеним вище алгоритмом розрахунку зони радіопокриття в інтегрованому середовищі MathCad розроблена програма, що надана нижче. Її перші 13 операторів записані за алгоритмом [11] і виконуються програмно.

П. 14 програмно не виконується і є лише ілюстрацією конкретного випадку - територіального розподілу в регіоні 4-х стільникових кластерів (подібно рис. 5.8 роботи [2]). Справа в тому, що поки не вдалося вирішити засобами графічного редактора MathCad задачу динамічного відображення територіального розподілу стільників в регіоні в залежності від поточних результатів обчислення за

програмою. Що ж стосується п. 15 - розподіл частотного ресурсу між стільниками кластеру, то він виконується програмно і відповідає отриманому у потоковому розрахунку розміру кластера і матриця розподілу частот між стільниками кластера Matrix(N_s,C_c,N_k) динамічно змінюється. Оператор п.15 – це написаний мовою програмування MathCad програмний фрагмент, вбудований у загальну програму.

Довгою вертикальною лінією позначений весь програмний фрагмент обчислення матриці розподілу частот, короткими вертикальними лініями – локальні фрагменти, що відносяться до умов(и), що знаходиться в заголовку лінії. Після присвоєння поточним змінним a_l, p, r значення 1 виконується перший локальний фрагмент – елементам матриці від a_l=1 до a_{Ns}, де Ns – кількість частотних каналів у смузі частот, що виділена під мережу зв'язку, послідовно присвоюються числа натурального ряду. За другим локальним фрагментом в клітинах матриці, що залишаються після номеру Ns ставиться знак "-" прочерку. Третій локальний фрагмент записує саму матрицю.

Результатом розрахунку є матриця розподілу частотного ресурсу між стільниками кластеру показана на рис. 3.4.

Matrix(Ns, Cc, Nk) =

"1A"	"2A"	"3A"	"1B"	"2B"	"3B"	"1C"	"2C"	"3C"
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81
82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	...

Рис. 3.4. Отримана матриця розподілу частотного ресурсу між стільниками кластеру

ВИСНОВКИ

По результатах роботи зробимо наступні висновки:

1. З схеми мережі LTE, видно, що структура мережі сильно відрізняється від мереж стандарту 3G. Істотні зміни зазнала і підсистема базових станцій, і підсистема комутації. Була змінена технологія передачі даних між обладнанням користувача і базовою станцією. Також піддалися зміні і протоколи передачі даних між мережевими елементами. Вся інформація (голос, дані) передається у вигляді пакетів;

2. Завдання проектування мережі радіотелефонного зв'язку:

- визначення місць установки базових станцій, необхідних для забезпечення радіопокриття території обслуговування;
- розподіл частотних каналів між стільниками (складання схеми повторного розподілу частот в мережі);
- визначення числа користувачів по розрахованому трафіку і побудова мережі достатньої ємності для їх обслуговування з необхідною якістю;
- оптимізація стільникової мережі по мінімальному числу стільників (мінімальній вартості розгортання мережі) і високої надійності зв'язку.

3. Розрахунок рівня сигналу показав, що найбільш оптимальною для використання в цій міській зоні являється модель RPS-2. Ця модель має вищий рівень сигналу в порівнянні з Окамура-Хата і Волвіш - Ікегамі, оскільки перша модель переважна для більше урбанізованої місцевості, що виключає вільну від забудови територію, а друга модель не враховує рельєф місцевості.

4. Розроблена програма автоматизації розрахунку зони радіопокриття базової станції при попередньому плануванні мережі в MathCad дозволяє знайти число базових станцій, які необхідно встановити для обслуговування з необхідною якістю заданої кількості абонентів; визначити доцільність застосування секторних антен для зменшення взаємних перешкод між станціями, що працюють у тому самому частотному каналі і розташовані в різних стільниках; знайти параметри, що визначають необхідну енергетику базових станцій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Беркман Л.Н., Толюпа С.В. Інфокомунікаційні мережі нового покоління. - К.: ДУІКТ, 2012. - 288 с.

2. Руденко Н.В. Основи цифрової обробки сигналів в системах цифрового радіозв'язку / Н.В. Руденко, А.О. Макаренко // Навчальний посібник. - Київ.: ДУТ. - 2021. – 107 с.

3. 3GPP, "LTE (Long Term Evolution) and LTE-Advanced," 3GPP, [Електронний ресурс]. Available: https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte. (дата звернення 15.10.2023)

4. 3GPP, "5G," 3GPP, [Електронний ресурс]. Available: https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-5g. (дата звернення 18.10.2023)

5. "User Equipment (UE) in LTE," Tutorialspoint, [Електронний ресурс]. Available: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_user_equipment.htm. (дата звернення 18.10.2023)

6. "Evolved Packet Core (EPC) in LTE," Tutorialspoint, [Електронний ресурс]. Available: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_evolved_packet_core.htm. (дата звернення 10.11.2023)

7. 3GPP, "New Radio (NR) in 5G," 3GPP, [Електронний ресурс]. Available: https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-nr. (дата звернення 10.11.2023)

8. Almquist, P., et al., "Evolved Packet System (EPS)," Ericsson, [Електронний ресурс]. Available: https://www.ericsson.com/en/digital-services/trending/hot-topics/5g-and-lte/evolved-packet-system-eps. (дата звернення 10.11.2023)

9. T. S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice," 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2022.

10. Osseiran A., et al., "The Foundation of the Mobile and Wireless Communications System for 2020 and Beyond: Challenges, Enablers and Technology Solutions," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, no 1,

2020.

11. T. S. Rappaport, et al., "Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 12, pp. 6213-6230, Dec. 2017.

12. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2018). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(4), 2347-2376. doi: 10.1109/COMST.2018.2444095

13. Liu, Y., & Letaief, K. B. (2017). 5G millimeter-wave antenna array: design and challenges. IEEE Communications Magazine, 55(3), 170-177. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600459CM

14. 3GPP. (2020). Evolved Packet Core (EPC); architecture and functional description (Release 16). [Електронний ресурс]. https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3229 (дата звернення 18.11.2023)

15. Samsung Newsroom. (2019, December 18). Samsung announces successful 5G new radio (NR) data connection with the Galaxy S10 5G and prototype 5G equipment. [Електронний ресурс]. https://news.samsung.com/global/samsung-announces-successful-5g-new-radio-nr-data-connection-with-the-galaxy-s10-5g-and-prototype-5g-equipment (дата звернення 18.11.2023)

16. Qualcomm. (2019). LTE (4G) and 5G: Key differences and similarities. [Електронний ресурс]. https://www.qualcomm.com/invention/5g/what-is-5g/lte-4g-5g-key-differences-and-similarities (дата звернення 20.11.2023)

17. 3GPP. (2020). 5G New Radio (NR); Overall description; Stage-2 (Release 16). [Електронний ресурс]. https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3216 (дата звернення 20.11.2023)

18. 3GPPTS 25.101. v.4.13.0 (2016-17). Technical Specification Group Radio Access Network; User Equipment (UE) Radio transmission and Reception (FDD). - Technical Specification (Release 4). 2016.

19. 3GPP TS 25.104. v.4.9.0 (2017-03). Technical Specification Group Radio Access Network; BS Radio transmission and Reception (FDD). - Technical Specification (Release 4). 2017.

20. 3GPPTS 25.133. v.4.18.0 (2017-09). Technical Specification Group Radio Access Network; Requirement for support of radio resource management (FDD). - Technical Specification 3GPP (Release 5). 2017.

21. 3GPP TS 36.211. v.8.5.0 (2018-18). Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation. - Technical Specification. Release 8. 2018.

22. Atoll radio frequency planning & optimisation software | forsk. A Complete Wireless Network Planning& Optimisation Toolset for Mobile Operators | Forsk. URL: https://www.forsk.com/atoll-overview (дата звернення: 20.11.2023).

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Презентація по магістерській роботі на тему:

Методи оптимізації розрахунку зони радіопокриття базової станції для LTE-мережі

Студента Дерев`янка Івана Івановича

Мета роботи

Мета роботи – дослідження методів планування та оптимізації безпроводових телекомунікаційних мереж.

Результати проведених досліджень:

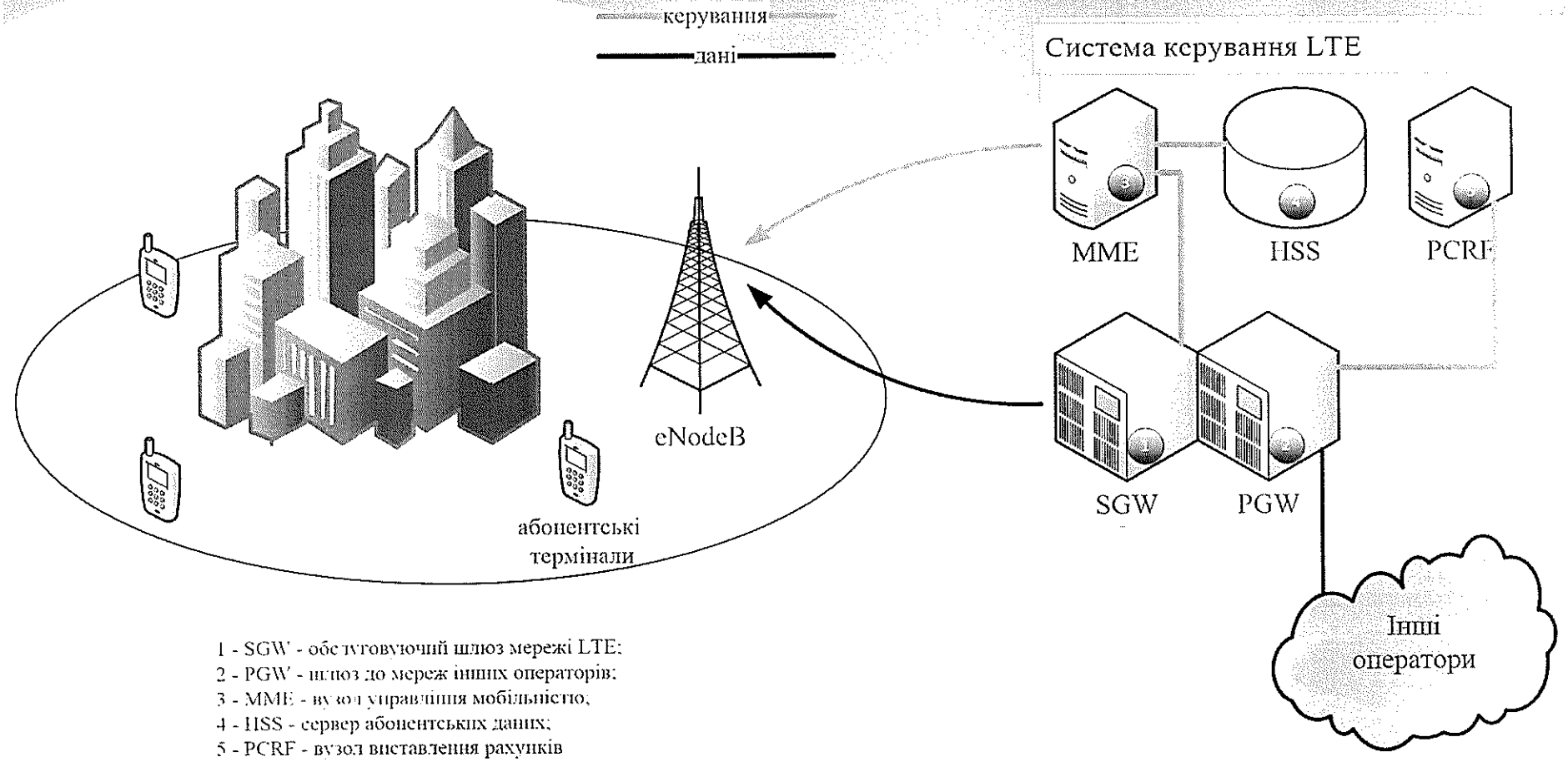
1. Проведено аналіз головних аспектів технологій LTE;
2. Досліджено процес мережевого стільникового планування LTE-мереж;
3. Проведено розрахунки за допомогою автоматизованих засобів проектування LTE-мережі зв'язку;
4. Розроблено програму розрахунку зони радіопокриття базової станції.

Характеристики технології LTE



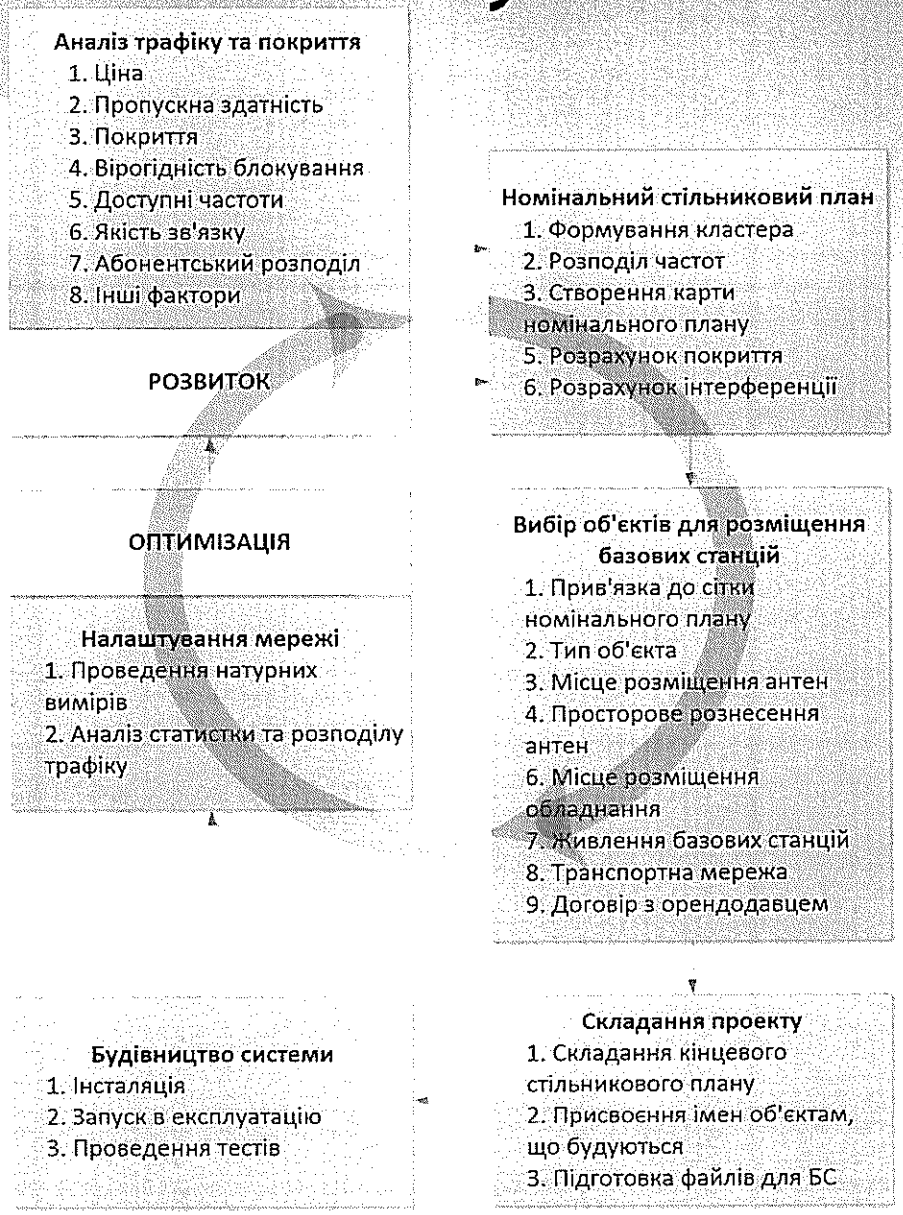
Характеристика	3G	4G (LTE)
Пікова швидкість (DL)	42(63) Мбіт/с	~ 1 Гбіт/с
Середня швидкість (DL)	3 Мбіт/с	15 Мбіт/с
Середня затримка (E2E)	150 мс	50 мс
Активних з'єднань	50/стільник	500/стільник
Підтримка мобільності	~ 300 км/год.	~ 400 км/год.

Структура мережі технології LTE

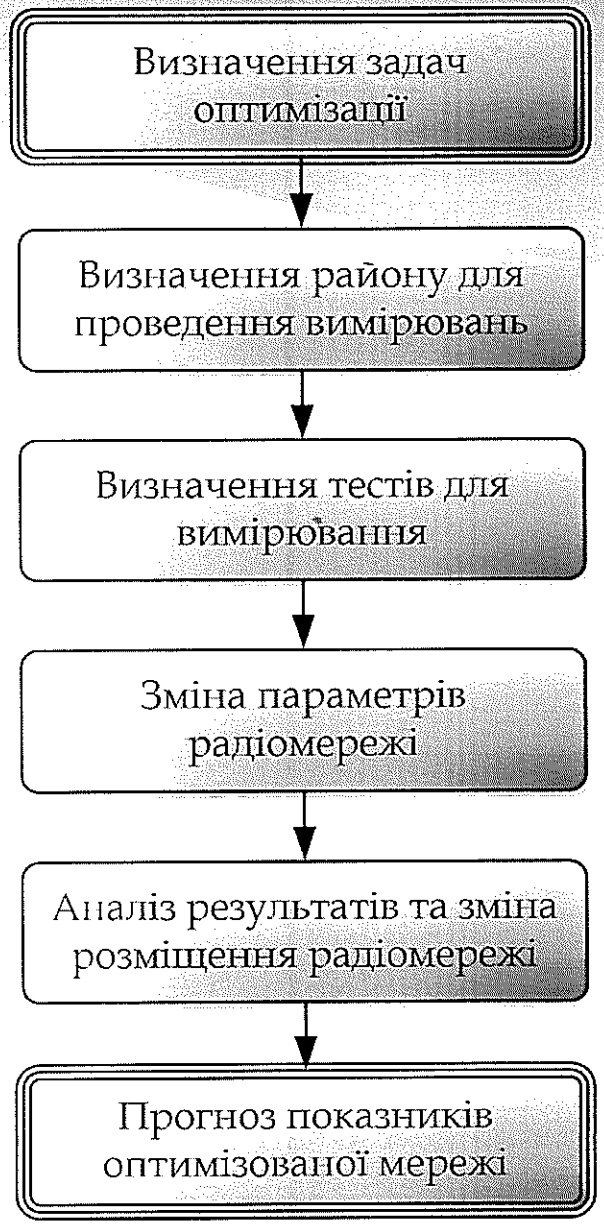


1 - SGW - обслуговуючий шлюз мережі LTE;
2 - PGW - шлюз до мереж інших операторів;
3 - MME - вузол управління мобільністю;
4 - HSS - сервер абонентських даних;
5 - PCRF - вузол виставлення рахунків
абонентам за надані послуги зв'язку.

Послідовність мережевого стільникового планування



Етапи оптимізації радіомережі LTE

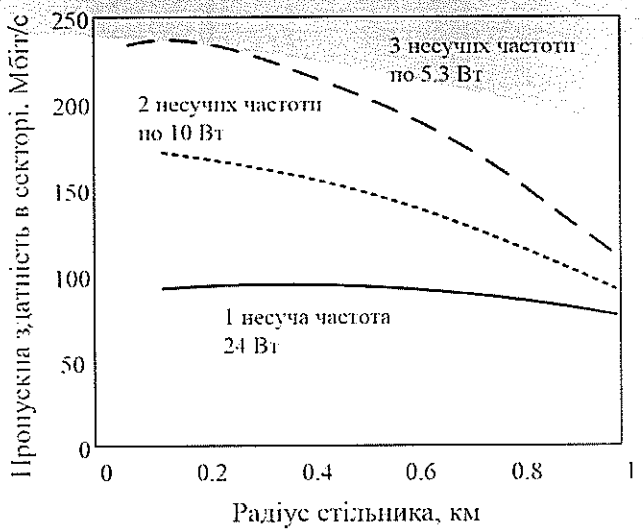


Розрахунки ефективності збільшення пропускної спроможності стільника

Збільшення пропускної спроможності стільника при впровадженні додаткової несучої частоти

Конфігурації несучих частот	Ріст пропускної спроможності в Downlink				
	1 підсилювач потужності в передавачі Node B				
	Середовище:	Місто (щільна забудова)	Місто	Передмістя	Сільська місцевість
	Радіус стільника:	350 м	550 м	1700 м	7000 м
1 несуча + 1 несуча		92%	87%	77%	60%
2 несучих + 1 несуча		41%	37%	27%	15%

Розрахунки ефективності збільшення пропускної спроможності стільника

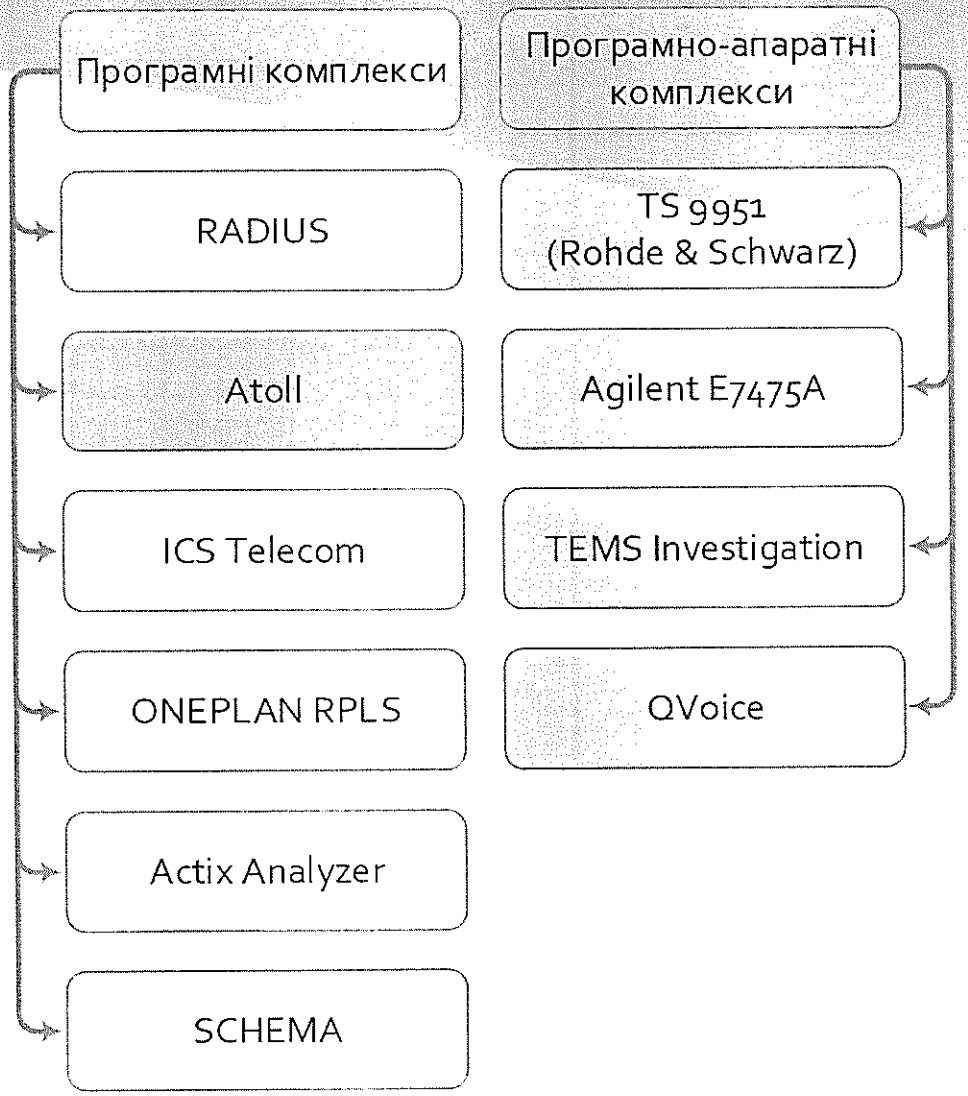


Пропускна спроможність в стільнику мережі LTE при декількох несучих частотах (умови міста)

Ефективний варіант використання додаткових несучих частот

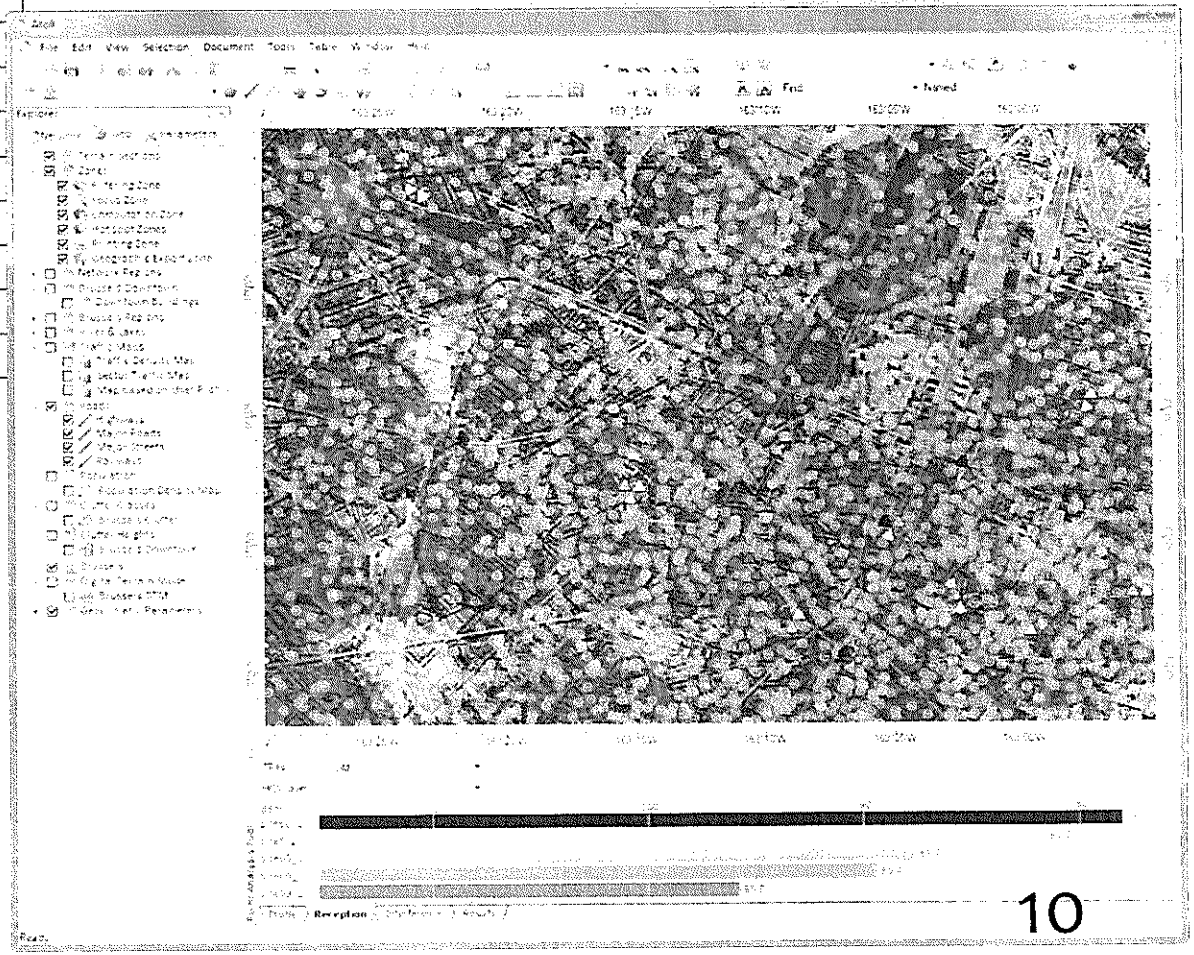
Кількість частот, що несуть	Збільшення потужності на кожній частоті, що несе	Ріст пропускної спроможності в Downlink				
		Середовище:	Місто (щільна забудова)	Місто	Передмістя	Сільська місцевість
		Радіус стільника:	350 м	550 м	1700 м	7000 м
1 несуча	з 20 Вт до 40 Вт		1%	2%	4%	8%
2 несучі	з 10 Вт до 20 Вт		4%	6%	11%	20%
3 несучі	з 5,3 Вт до 10 Вт		6%	9%	17%	31%

Засоби автоматизованого моделювання



Проектування покриття системи стільникового зв'язку за допомогою автоматизованого пакету Atoll

Стандарт стільникової мережі			LTE
Координати зони покриття (градуси, хвилини)	«1»	E	54°40
		N	55°11
	«2»	E	54°40
		N	55°46
Кількість БС, не більше, шт.			10
Кількість секторів БС, не більше, шт.			2
Висота антен БС, не більше, м			30
Потужність БС, не більше, Вт			38
Чутливість БС, дБп			-100
Потужність МС, дБ			33
Чутливість МС, дБп			-105



Розробка програми розрахунку зони радіопокриття мережі стільникового зв'язку технології LTE в середовищі MathCad

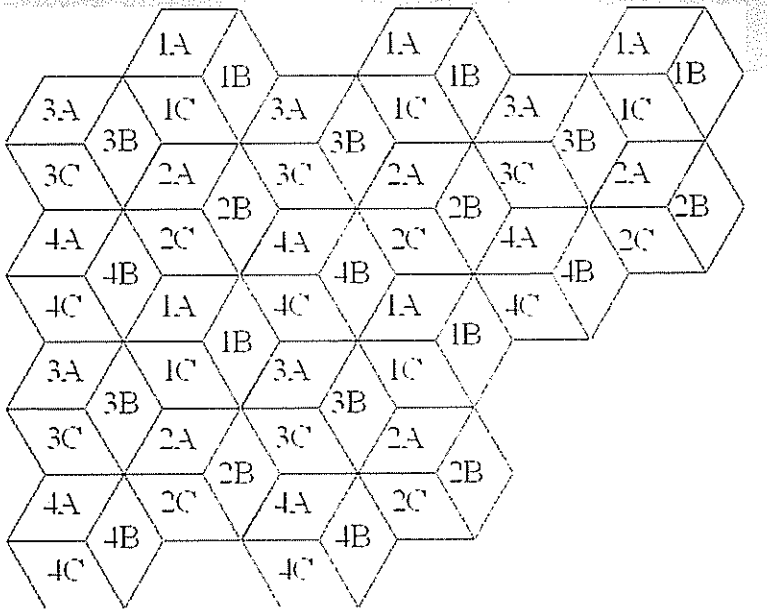
```
Matrix(Ns , Cc , Nk) :=
    a_1 ← 1
    p ← 1
    r ← 1
    for i ∈ 1..Nk
        a_i ← r
        r ← r + 1
    c ← Ns · Cc
    s ← ceil(Nk / c)
    for i ∈ 1..s
        for j ∈ 1..c
            M_i,j ← a_p  if p ≤ Nk
            M_i,j ← "-"  otherwise
            p ← p + 1
    p ← 0
    for i ∈ 1..Ns
        for j ∈ 1..Cc
            p ← p + 1
            T_p ← concat(num2str(j) , vec2str((i + 64)))
    M ← stack(T^T , M)
    M
```

Розробка програми розрахунку зони радіопокриття мережі стільникового зв'язку технології LTE в середовищі MathCad

Matrix(Ns , Cc , Nk) =

"1A"	"2A"	"3A"	"1B"	"2B"	"3B"	"1C"	"2C"	"3C"
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45
46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81
82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	...

Розподіл наданих провайдеру частот між стільниками кластера



Територіальний план стільникової мережі

Висновки

1. В роботі проведено аналіз архітектури і загальних властивостей технології LTE.

2. Досліджено процес мережевого стільникового планування, який складається з: аналізу трафіку і покриття; номінального стільникового плану; вибору об'єктів розміщення базових станцій. Проведено дослідження стану питання автоматизованих засобів проектування стільникових мереж зв'язку.

3. Виконано проектування покриття системи стільникового зв'язку за допомогою автоматизованого пакету RPS - 2.

4. Розроблено програму автоматизації розрахунку зони радіопокриття базової станції при попередньому плануванні LTE-мережі в MathCad.

Апробація результатів магістерської роботи

Основні результати магістерської роботи доповідалися на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУІКТ, 20 грудня 2023 р.

Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі "Наукові записки ДУІКТ, – 2023, – №2".

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Іван Дерев'янко

Назва: Методи оптимізації розрахунку зони радіопокриття базової станції для LTE-мережі

Координатор: Анатолій Макаренко

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:7.6

Коефіцієнт подібності 2:3.2

Тривога: 2

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*