

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗРАХУНКУ ЗОНИ
РАДІОПОКРИТТЯ МОБІЛЬНИХ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи ТСДМ-63
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Малишенко Д.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Твердохліб М.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ - 2019

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Телекомунікаційних систем та мереж

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

телекомунікаційних систем та мереж

В.Ф. Заїка

“ ”

_____ 2019 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Малишенкові Дмитру Олександровичу

1. Тема роботи: “Методи оптимізації розрахунку зони радіопокриття мобільних базових станцій”,

керівник роботи Твердохліб Микола Григорович, к.т.н., доцент,

затверджені наказом вищого навчального закладу від 14.11.2019 №518.

2. Строк подання студентом роботи 20.12.2019 р.

3. Вихідні дані до 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 графічного матеріалу (назва слайдів презентації):
1. Мета роботи;
 2. Структура мережі технології LTE;
 3. Послідовність мережевого стільникового планування;
 4. Етапи оптимізації радіомережі LTE;
 5. Розрахунки ефективності збільшення пропускної спроможності стільника (1);
 6. Розрахунки ефективності збільшення пропускної спроможності стільника (2);
 7. Засоби автоматизованого моделювання;
 8. Проектування покриття системи стільникового зв'язку за допомогою автоматизованого пакету RPS-2;
 9. Розробка програми розрахунку зони радіопокриття мережі стільникового зв'язку технології LTE в середовищі MathCad (1).
 10. Розробка програми розрахунку зони радіопокриття мережі стільникового зв'язку технології LTE в середовищі MathCad (2).
 11. Висновки.

6. Дата видачі завдання 11.09.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	27.09.19	Викон
2.	Концептуальні аспекти технологій LTE	15.10.19	Викон
3.	Дослідження процесу мережевого стільникового планування LTE-мереж	31.10.19	Викон
4.	Автоматизовані засоби проектування стільникової мережі зв'язку	15.11.19	Викон
5.	Розробка програми розрахунку зони радіопокриття базової станції	29.11.19	Викон
6.	Висновки, вступ, реферат	10.12.19	Викон
7.	Розробка презентації	18.12.19	Викон

Студент

Малишенко Д.О.

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Твердохліб М.Г.

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 82 сторінки, 26 рисунків, 11 таблиць, 28 джерел.

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 оптимізації розрахунку зони радіопокриття мобільних базових станцій.

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

В 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.

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1. КОНЦЕПТУАЛЬНІ АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЙ LTE	11
1.1 . Архітектура мережі LTE	11
1.2 . Особливості планування радіомережі LTE	19
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МЕРЕЖЕВОГО СТІЛЬНИКОВОГО ПЛАНУВАННЯ LTE-МЕРЕЖ	28
2.1 . Аналіз трафіку і покриття	28
2.2 . Номінальний стільниковий план	31
2.3 . Вибір об'єктів розміщення базових станцій	38
2.4 . Особливості оптимізації радіомереж LTE	43
3. АВТОМАТИЗОВАНІ ЗАСОБИ ПРОЕКТУВАННЯ СТІЛЬНИКОВОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ	50
3.1 . Інтелектуальні технології при проектуванні мереж стільникового зв'язку	50
3.2 . Проектування покриття системи стільникового зв'язку за допомогою автоматизованого пакету RPS - 2	57
4. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ РОЗРАХУНКУ ЗОНИ РАДІОПОКРИТТЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ	65
4.1 . Основні теоретичні положення методики попереднього планування мережі при розробці програми	65
4.2 . Розробка алгоритму розрахунку зони радіо покриття	69
4.3 . Програма попереднього розрахунку зони радіопокриття мережі стільникового зв'язку технології LTE в середовищі MathCad	74
ВИСНОВКИ	76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ATM	(Asynchronous Transfer Mode) – асинхронний режим передачі;
BER	(Bit Error Rate) - ймовірність появи бітових помилок;
ITU-T	(International Telecommunication Union) - Міжнародний телеко- мунікаційний союз;
ISI	(Intersymbol Interference) - міжсимвольна інтерференція;
LTE	(Long Term Evolution) - еволюція в довгостроковій перспективі;
MIMO	(Multiple Input Multiple Output) - декілька входів та виходів;
NGN	(Next Generation Network) – мережа наступного покоління;
OFDM	(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – мультиплексуван- ня ортогонально розділених несучих;
TMN	(Telecommunication Menegment Network) – мережа управління телекомунікаціями;
UMTS	(Universal Mobile Telecommunications System) - універсальна мо- більна телекомунікаційна система;
Wi-Fi	(Wireless Fidelity) - безпроводна 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 отримують 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 методам оптимізації розрахунку зони радіопокриття мобільних базових станцій, є актуальною.

Мета роботи - дослідження методів оптимізації розрахунку зони радіопокриття мобільних базових станцій.

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.

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

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати магістерської атестаційної роботи доповідалися на конференціях Державного університету телекомунікацій та опубліковано в науковому журналі “Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку”.

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 покоління 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 виставлення рахунків

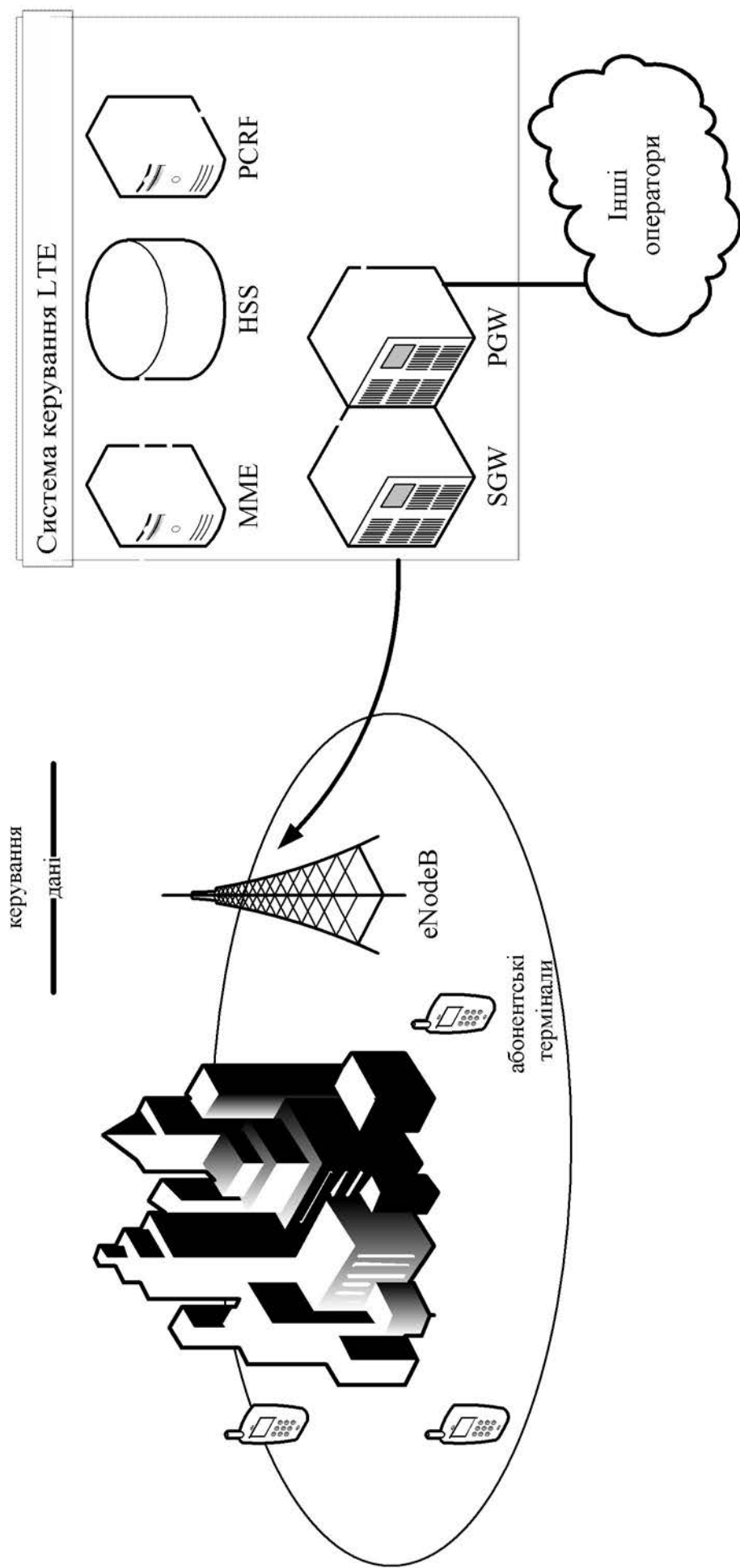


Рисунок 1.1. Структура мережі стандарту LTE

- 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 технології 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. Функція управління 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 He - 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 SAE повинна 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.

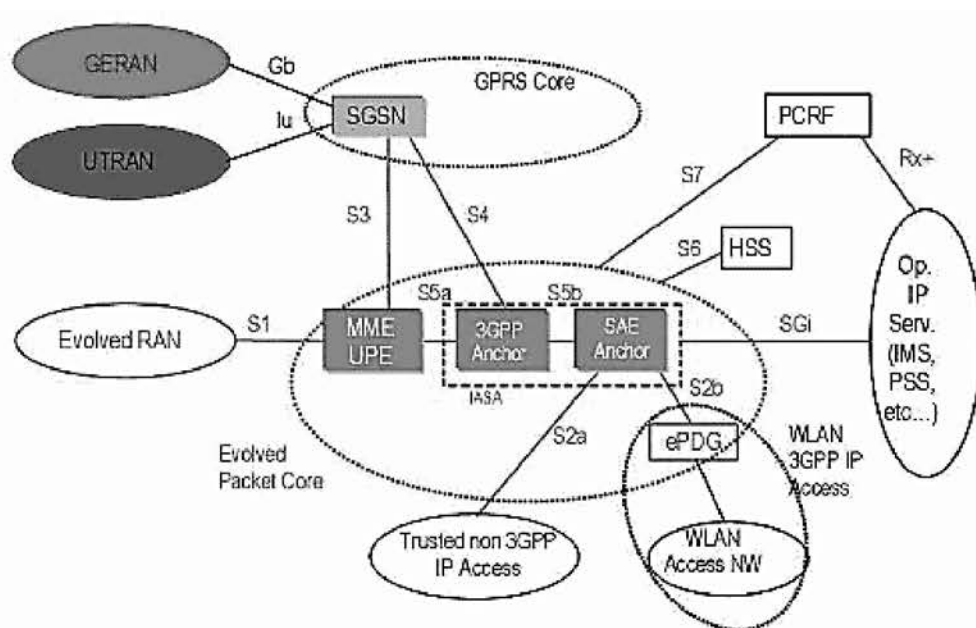


Рисунок 1.2. Архітектура мережі LTE

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 ACTIVE. Кожна базова станція має інтерфейс S1c базової мережею SAE, побудованої за принципом кому-

тації пакетів.

Базова мережа SAE, іноді звана мережею EPC (Evolved Packet Core), містить вузли MME/UPE, що складаються з логічних елементів MME і UPE. 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 S1-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 користувачького рівня, наприклад, зберіганням поточного статусу абонентського терміналу (AT) перериванням стану

LET_IDLE рівні абонентських терміналів.

Однією з найважливіших задач керування в мережі LTE є максимально ефективно 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 підтримку 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 (Connection Mobility 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 каналні ресурси, потужність випромінювання базових станцій, ресурси буферизації при обробці пакетів даних з урахуванням параметрів QoS.

Протокол управління радіо ресурсу RRC площині S-plane 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 радіоканалі (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 і C - 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 при 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.

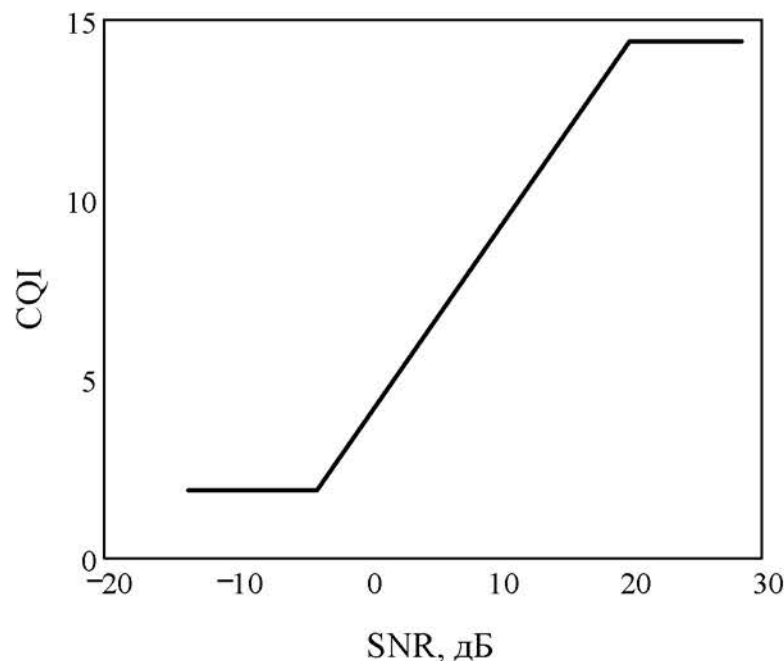


Рисунок 1.3. Модель відображення SNR в значення CQI

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 зна-

чень 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. Масштабованість 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.

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, Росія, 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	Ні
	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 вииграш від просторового мультиплексування при MIMO, тобто вииграш в пропускну́й 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 (4A 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 такої. 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.

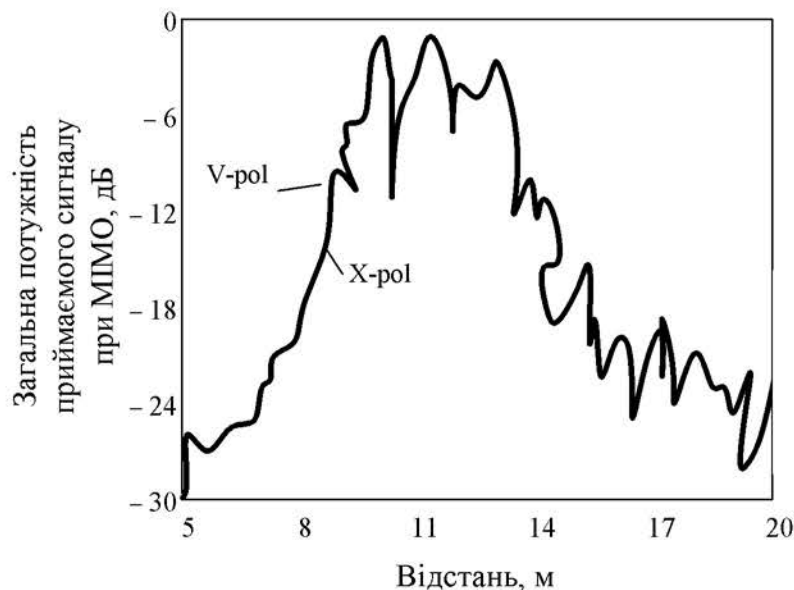


Рисунок 1.6. Загальна потужність сигналу, що приймається, при різних типах антен MIMO

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 ($+45^\circ$, -45°), рознесених по горизонталі на відстань $0,7\lambda$ (~ 8 см). Випадок корельованих антен - коли використовувалися елементи з однаковою поляризацією в двох або чотирьох колонках однієї панелі з просторовим рознесенням між ними $0,7\lambda$. 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 ($\sim 1,7\lambda$).

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 приймальними 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 приймальними 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 радімережі.
9. Можливість самоконфігурування і самооптимізації радімережі SON (Self Organizing Networks). Велика завантаженість мереж (великі об'єми трафіку) у по-

єднанні 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 пропускнуєї 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 перемикавання 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.

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 проєктованої стільникової системи є одним з найважливіших чинників. Вкладені у будівництво системи кошти мають окупатися в заданий період. При проєктуванні конкретної системи, група фахівців з технічної, фінансової, маркетингової сторони проєкту 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 проєкту.

Пропускна спроможність системи. На початковому етапі проєктування системи під пропускну спроможністю системи розуміють передбачувану кількість обслуговуваних абонентів. Пропускна спроможність мережі на етапі проєктування 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.

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

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

де N - кількість каналів трафіку; A - 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.; T - середній час розмови впродовж з'єднання, с.

Відповідно до вимог операторських ліцензій, величина відмов усередині вітчизняних стільникових мереж загального користування приймається на рівні $P_{\text{від}} \leq 5\%$, 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 (РЕЗ) цивільного і спеціального призначення, працюючими у відповідних частотних діапазонах і в межах координацій-

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

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 сотів 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.

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.

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 стільника не має ідеального шестигранника, як показано на рис. 2.4, а має складнішу форму, див. рис. 2.5.

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 C 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 T_A , 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 кла-

сичній 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 EMC (C/I, C/A).

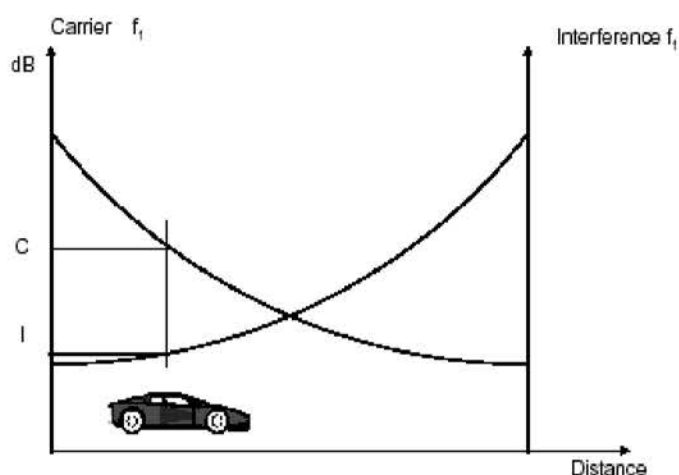


Рисунок 2.1. Інтерференція по основному каналу (C/I - Carrier - to - Interference)

Вимоги до внутрішньосистемної EMC, 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 EMC проводиться на етапі видачі НКРС дозволів на використання операторами зв'язку конкретних радіочастот. Внутрішньосистемна EMC має аналізуватися і розраховуватися оператором.

Внутрішньосистемна EMC мереж стільникового зв'язку забезпечує відсутність взаємних радіоперешкод між працюючими в цій мережі радіозасобами. Основним критерієм внутрішньосистемної EMC являється припустима величина рі-

вня 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 напрямках, 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 означає 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 В1 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:

$$\frac{N_c}{N_{\text{ч}}}, \quad (2.3)$$

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

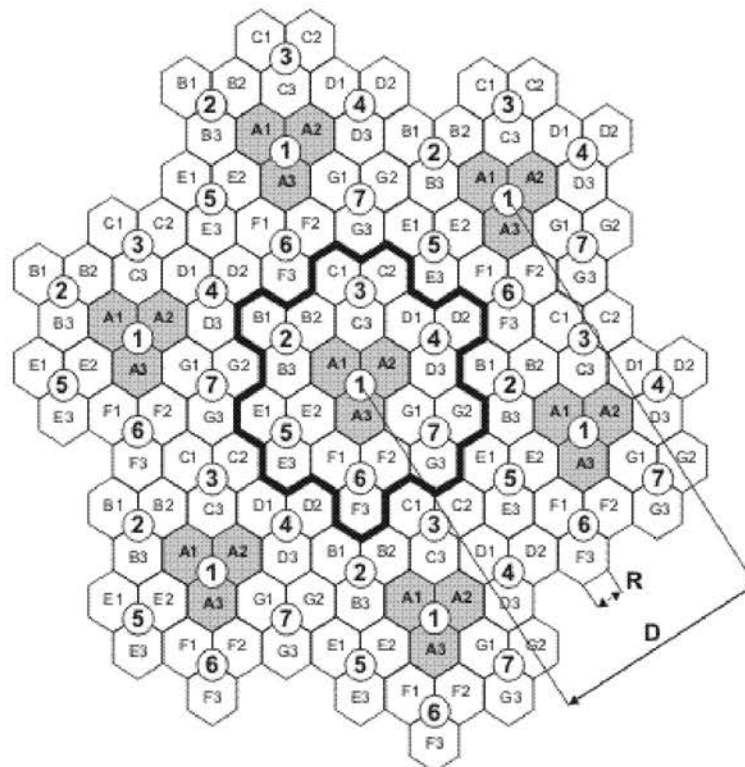


Рисунок 2.2. Кластер 7/21, $k_{\text{вик}}=4.58$

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:

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

$$q_s = \frac{D_s}{R} = \sqrt{3 \cdot k_{\text{вик}}}, \quad (2.4)$$

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:

$$C/I = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{j} \cdot q_s^j \right), \quad (2.5)$$

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

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

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

ти 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 розташувати 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° , 120° , 240° .

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 $12 - 18 \lambda$ або 4 - 5 метрів.

2. Вертикальне рознесення. При вертикальному рознесення значення $12 - 18 \lambda$ 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 пропускну здатності і ґрунтується на вимірах.

Вкажемо найбільш значимі аспекти, пов'язані з оптимізацією радіомережі LTE в цілях підвищення її ефективності. До таких аспектів можна віднести: засто-

сування у базовій станції малoshумливих підсилювачів ТМА (Tower Mounted Amplifier), застосування в Downlink режимі рознесеної передачі TxDiv (Tx Diversity), збільшення потужності базової станції і використання додаткових несучих частот.

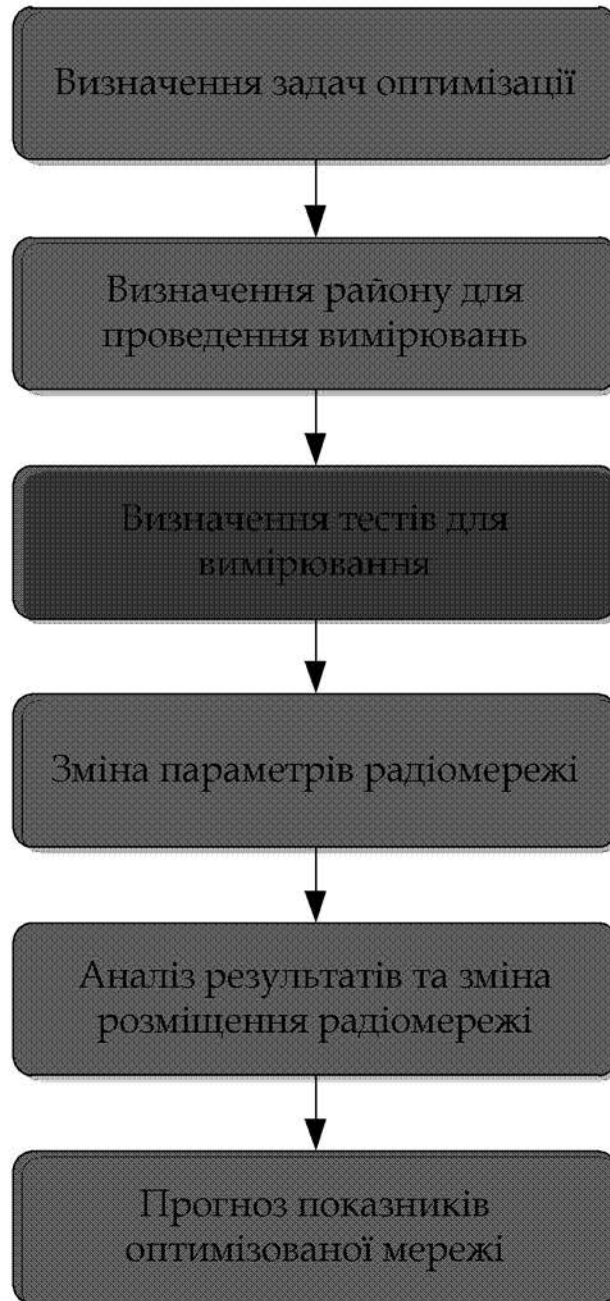


Рисунок 2.8. Етапи оптимізації радіомережі LTE

Застосування ТМА. Вигода від застосування малoshумливих 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 тракці 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 вигреш - в мікростільнику для пішохода.

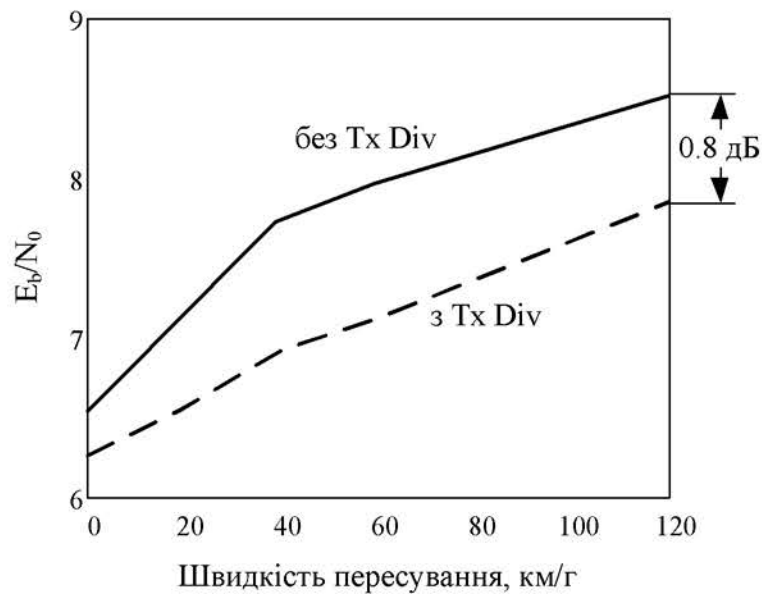


Рисунок 2.9. Поліпшення E_b/N_0 при рознесеній передачі

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;
- вигреш 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 стро-

гого 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. Рисунок 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.

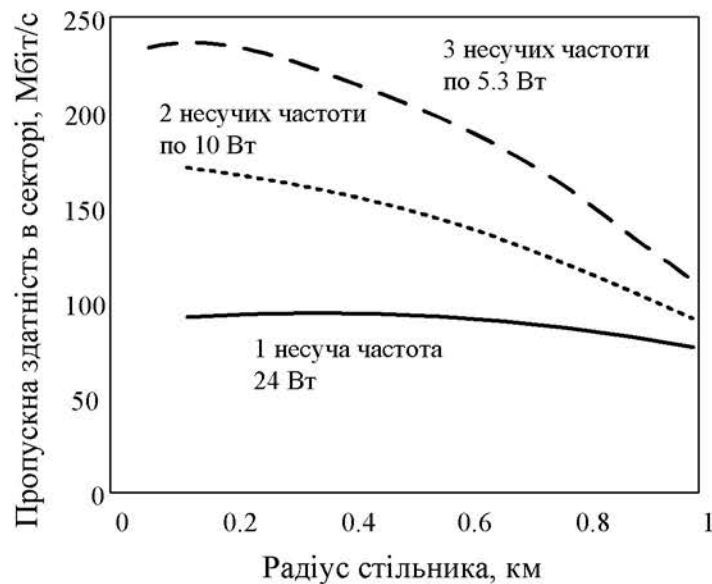


Рисунок 2.10. Пропускна спроможність в секторі мережі LTE при декількох несучих частотах (умови міста)

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 пропускну 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).

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 [13]:

- статистичні;
- детерміновані;
- квазидетерміновані.

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 недосконалість 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 А, В, С), 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 В [12]. Це обумовлено тим, що при малій вірогідності відмови моделі Ерланга В 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):

- Програмні комплекси:
 - Програмний комплекс (ПК) RADIUS [22];
 - RPS2: Radio Planning System 2 [23];
 - Автоматизована методика (АМ) розрахунку зон покриття НПФ «Гей-

- зер» [24];
- Програмний комплекс ONEPLAN RPLS [25];
- Програмне забезпечення Actix Analyzer [24,25];
- Сімейство програмних продуктів SCHEMA (Ізраїль).
- Апаратні комплекси:
 - Аналізатор радіомереж; S®TSMU.
- Програмно-апаратні комплекси:
 - Контрольно-вимірювальна система (КВС) «Маска»;
 - Система «Корунд» [25];
 - TS 9951 (Rohde; Schwarz, Німеччина);
 - Agilent E7475A [26];
 - TEMS Investigation (Еріксон, Швеція);
 - QVoice (AsCom, Швейцарія).

Порівнюючи різні продукти, що виконують функції аналізу і оптимізації мереж рухливого радіозв'язку можна зробити наступні висновки.

Апаратні комплекси аналізу радіомереж видають інформацію в дозованому виді, не дозволяючи повністю і усеосяжно оцінити обстановку.

Найбільшу достовірність і наочність забезпечують програмно-апаратні комплекси, призначені для аналізу існуючих мереж. Проте отримання реальної картини роботи мережі можливо тільки в результаті систематичного і ретельного обстеження мережі, що частенько зв'язане зі значними часовими і ресурсними витратами. Слід зазначити, що програмно-апаратні комплекси аналізу стільникових мереж дозволяють отримати якнайповнішу інформацію про їх функціонування і виникаючі проблеми, на підставі яких при подальшій обробці виконується оптимізація і розширення мережі.

Програмні комплекси, призначені для проектування і оптимізації радіомереж безумовно дозволяють виконувати моделювання мереж на початкових етапах її розвитку, а також на етапі оптимізації до внесення змін. Проте існуючі методи розрахунку зон покриття відрізняються або невисокою точністю у зв'язку з неможливістю адаптувати загальноприйнятий алгоритм розрахунку для конкретних

умов, або низькою швидкістю роботи, що викликано складною фізичною моделлю і великою кількістю чинників, що враховуються.

Існуючі системи аналізу і оптимізації роботи мережі стільникового зв'язку у більшості своїй характеризуються високою вартістю, що не дозволяє багатьом компаніям закуповувати їх для власних потреб. Попри те, що на ринку існують організації, що пропонують послуги моніторингу і проектування стільникових мереж, повноцінного рішення завдань оптимізації мережі вони не можуть запропонувати із-за епізодичного характеру діяльності.

Слабким місцем більшості програм проектування мереж зв'язку є розрахунок навантаження на мережу. Ця інформація може бути отримана в результаті довготривалих досліджень. Проте дослідження такого роду рідкісні і у більшості своїй закриті. В той же час, відсутність інформації про необхідну місткість і пропускну спроможність призводить до перекоосу мережі, і як наслідок, до низької якості обслуговування абонентів.

Також слід зазначити, що велика частина сучасних систем не надає можливості аналізу доступності послуг різних типів. В той же час такого роду інформація, заснована на аналізі показників мережі з урахуванням вимог якості різних послуг, досить затребувана при аналізі роботи мережі в цілому і для обґрунтування рішень по оптимізації існуючої інфраструктури.

У зв'язку з цим є потреба в створенні системи, яка б разом з досить точним і швидким розрахунком покриття вирішувала б вказані завдання планування мережі.

На початковому етапі пропонується використання для розрахунку зони покриття стільникової мережі моделі Окамура-Хата [17]. Ця модель отримала найбільш широке поширення при розрахунках втрат на трасі поширення сигналу. Також ця модель рекомендована МСЕ (Міжнародний союз електров'язку) - Рекомендація МСЕ 567, оскільки вважається досить достовірною. Модель ґрунтується на результатах експериментальних досліджень, виражених в графіках вимірів напруженості поля радіосигналів (криві Окамури), на підставі яких М. Хатою були отримані емпіричні формули. Ця модель характеризується наступними обмежен-

нями: відстань між приймачем і передавачем не більше 10 км, висоти передавальної і приймальної антени не більше 200 м і 10 м відповідно. Модель достовірна для частот від 30 до 1500 МГц. Надалі ця модель була розширена на діапазон 1500-2000 МГц (модель COST 231). У зв'язку з тим, що модель ґрунтується на результатах практичних вимірів, у складі емпіричних виразів є присутніми поправочні коефіцієнти, залежні від висоти мобільної станції і типу місцевості. Ці параметри є наближеними і були отримані за результатами вимірів в м. Токіо в 1960-х роках. У зв'язку з цим при розрахунках доцільне уточнення їх стосовно конкретної ситуації.

Пропонується використання в якості вказаних коефіцієнтів нечітких чисел, при цьому функція приналежності задається експертом на основі аналізу місцевості передбачуваної установки випромінюючих засобів. Далі за допомогою інструментів нечіткої математики модель Окамура-Хата (COST 231) наводиться до нечіткого виду, і з її використанням вирішується завдання розрахунку зони покриття.

Метою дослідження є отримання величин довірчих інтервалів для отримання наближенішої до реальності картини покриття, а також визначення меж застосовності отриманої моделі.

Велике поширення при розрахунках втрат на лінії отримала модель Бертони. Вона дозволяє врахувати ряд додаткових чинників, пов'язаних з поверховістю будівель, шириною вулиць і так далі. Модель є дифракційною аналітичною моделлю, розробленою для розрахунків загасань в міських і приміських зонах. Модель застосовна для діапазону частот до 2200 МГц і побудована на основі рівнянь хвилевої оптики, враховуючи поширення радіохвиль в умовах міської забудови. Модель Бертони не враховує ряд параметрів забудови, таких як вид будівельних матеріалів, різну орієнтацію вулиць і ін. У зв'язку з цим цю модель також пропонується розглянути з позицій нечіткої математики. Параметри висоти середнього рівня дахів, ширина вулиць в умовах складної міської забудови значною мірою приблизна, тому використання в цій якості нечітких чисел представляється доцільним.

Надалі для уточнення емпіричних коефіцієнтів цих моделей в створеній си-

стемі необхідно використовувати статистичну інформацію комутатора стільникової мережі: рівень сигналу кожного терміналу в усіх обслуговуючих секторах, дані про тривалість і характер використовуваних послуг, інформацію про посекторне завантаження базової станції в часі. Також використання лігв комутатора мережі дозволить отримати інформацію по завантаженню окремих сегментів впродовж дня, місяця, року, що може бути використано при плануванні ємності мережі.

Використання інформації комутатора дозволить уникнути проблеми пошуку точної цифрової карти місцевості, а також дасть можливість використання програмного продукту в різних регіонах. Також використання інформації комутатора дозволить проводити точкові заходи по оптимізації, тим самим, знижуючи витрати.

Проте в даному випадку доводиться мати справу з даними, чіткий опис яких практично не можливий. Практично усі дані, як використовувані в якості початкових, так і результати розрахунків є нечіткими множинами. У зв'язку з цим виникає завдання у визначенні механізмів розрахунку зон покриття на основі нечіткої математики. Основна трудність полягає у визначенні функцій приналежності і меж нечітких великих кількостей.

3.2 . Проектування покриття системи стільникового зв'язку за допомогою автоматизованого пакету RPS - 2

Універсальна система RPS - 2 призначена для автоматизованого проектування безпроводних 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.

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, російським інтерфейсом, 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	82°12
		N	55°11
	«2»	E	83°16
		N	54°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:

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

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

Проаналізувавши початкові дані і спланувавши розташування базових станцій, ми отримали мережу, представлену на рис. 3.2.

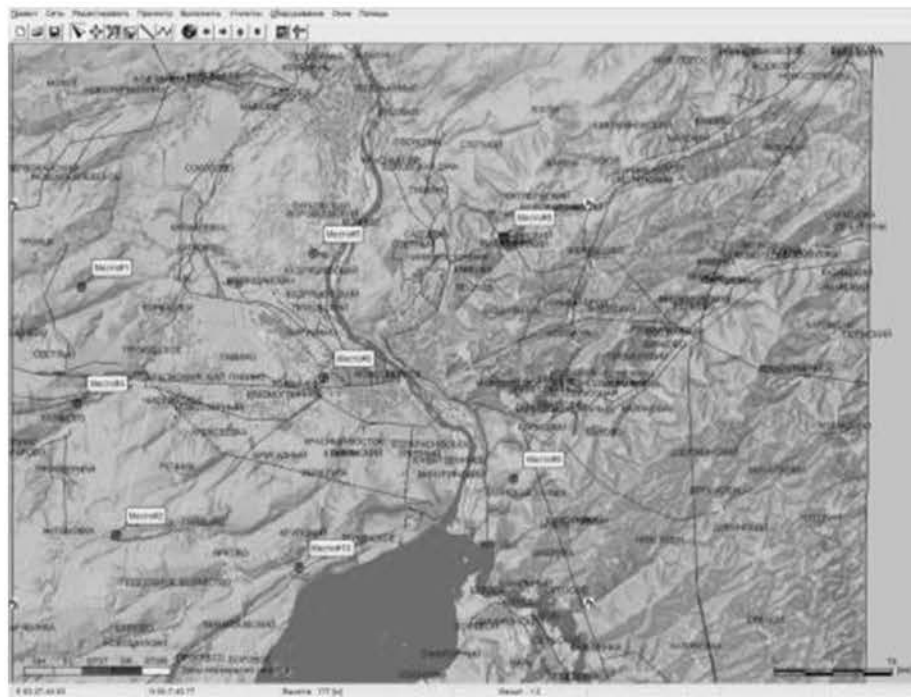


Рисунок 3.1. Розташування базових станцій

Для реалізації цієї мережі було використано 8 базових станцій, що мають характеристики, представлені в табл. 3.2.

Зона прямої видимості показана на рис. 3.3.

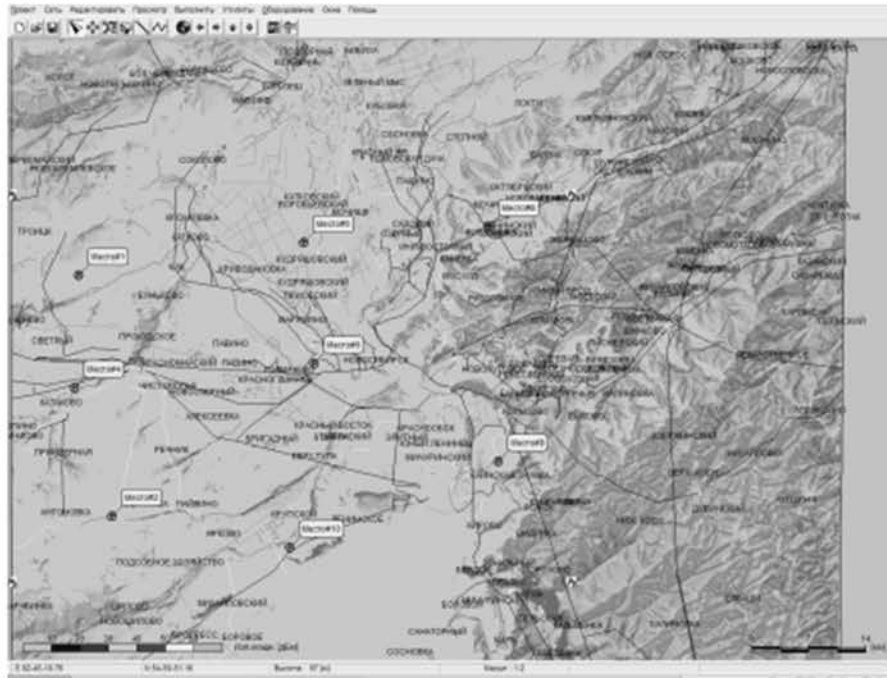


Рисунок 3.2. Зона прямої видимості

Зона покриття сигналу від 8 базових станцій представлена на рис. 3.4. Рівень сигналу - 100 дБп виходить закордон території не більше ніж на 5 км, що відповідає заданим вимогам.

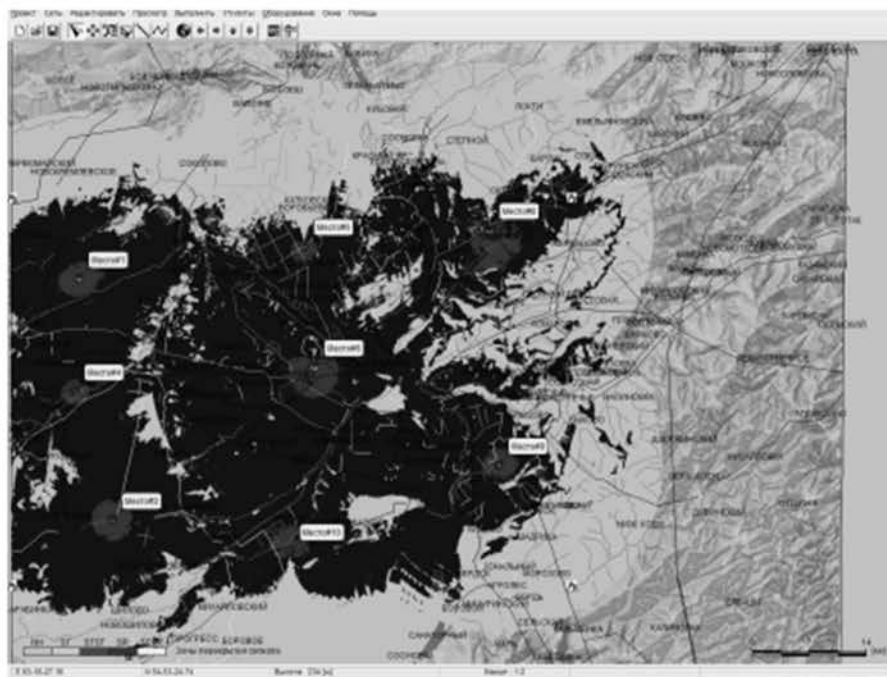


Рисунок 3.3. Зона покриття від усіх базових станцій

Зона перекриття сигналу представлена на рис.3.5. Зона перекриття від 3-х і більше сотень (секторів) не перевищує 30 % території.

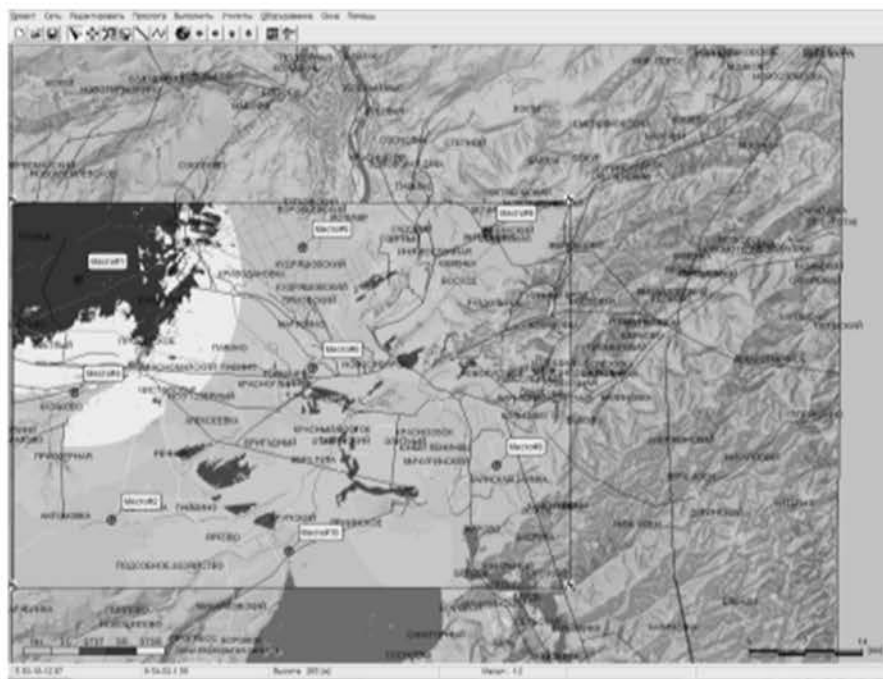


Рисунок 3.4 - Зона перекриття сигналу від 8 базових станцій

Зона наявності зв'язку охоплює більше 70% заданої території і показана на рис. 3.6.

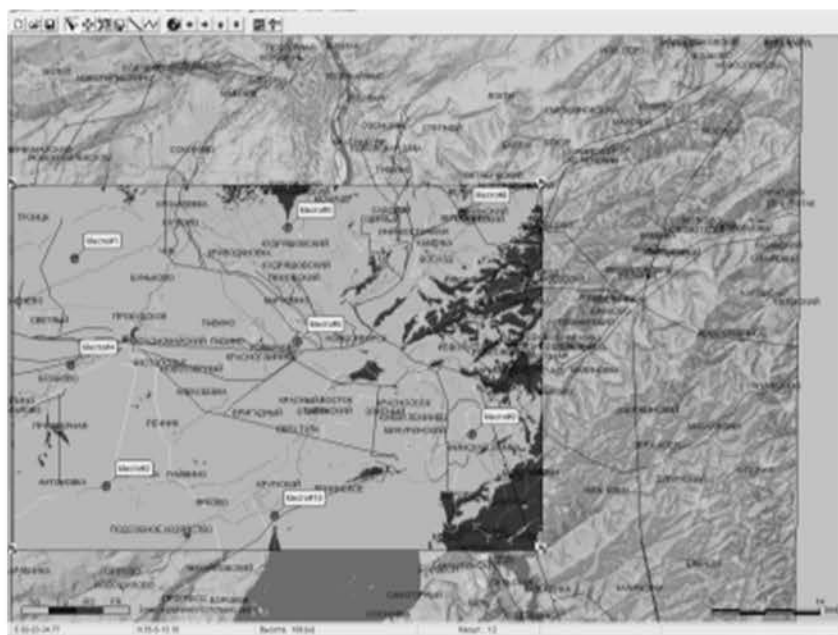


Рисунок 3.5 - Зона наявності (відсутності) зв'язку

Необхідна потужність передавача абонента для зв'язку з базовою станцією в заданій області представлена на рис. 3.7 і складає в основному до 10 дБм.

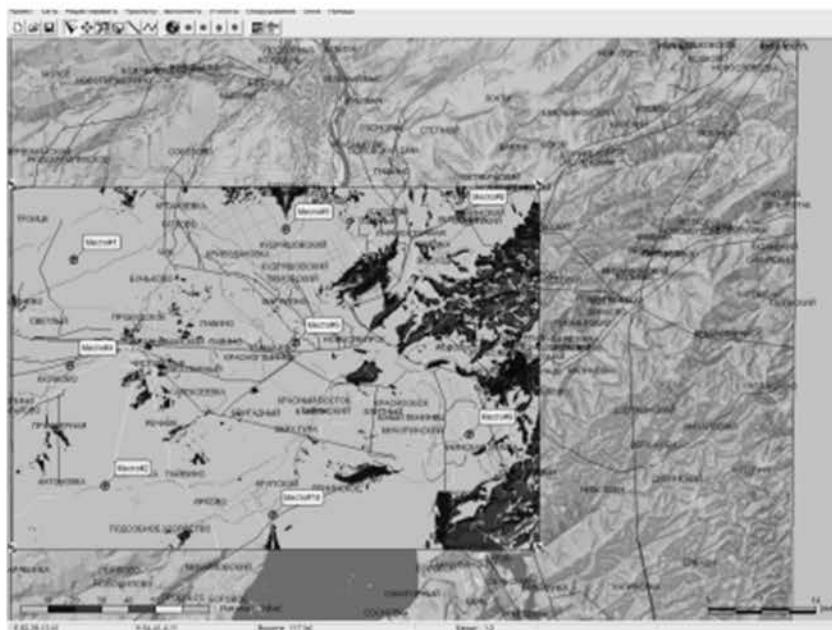


Рисунок 3.6. Розрахунок необхідної потужності передавача абонента для зв'язку з базовою станцією в заданій області

4. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ РОЗРАХУНКУ ЗОНИ РАДІОПОКРИТТЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ

4.1 . Основні теоретичні положення методики попереднього планування мережі при розробці програми

Системи зв'язку з рухомими об'єктами через принципове обмеження на випромінювану ними потужність, що накладається органами державного регулювання, не в змозі однією базовою станцією забезпечити радіопокриття великого за територією регіону через затухання радіохвиль. Тому вони будуються за принципом поділення регіону на певну кількість зон - стільників порівняно невеликої площі. Їх зображують правильними шестикутниками однакового розміру, що примикають один до одного без перекриття та дірок (рис. 4.1). Саме форма стільників й обумовила назву цього виду радіозв'язку – стільниковий.

В стільникових системах з частотним або комбінованим частотно/часовим розподілом каналів при множинному доступі, як, наприклад, у стандарті LTE, наданий оператору за ліцензією частотний діапазон розподіляють між групою сусідніх стільників, що утворюють регіон, званий кластером. Отже, всі БС стільників кластера працюють на різних частотах й не заважають одна одній. Кластер можна представити правильним (“великим”) шестикутником, що містить у собі шестикутники його стільників.

Робочі частоти БС стільників кластерів повторюються, але стільники з однаковими частотними каналами сусідніх кластерів розташовують так, щоб вони були максимально рознесені територіально. Повторне використання частот - це основний принцип побудови системи стільникового зв'язку, який дозволяє суттєво (теоретично - до нескінченості) збільшувати ємність системи, тобто кількість каналів зв'язку, й охопити нею яку завгодно за розмірами територію.

Двомірна структура розташування стільникової мережі, що циклічно повторюється, можлива тільки при певній кількості стільників у кластері [11]:

$$C = i^2 + j^2 + ij, \quad (4.1)$$

де i, j – цілі позитивні числа, у тому числі 0. Отже, можливо 1, 3, 4, 7, 9, 12 і т.д. стільників у кластері.

Величину C визначає відношення [1]

$$D/R = q = \sqrt{3C}, \quad (4.2)$$

Її називають коефіцієнтом послаблення співканальних завад q , що взаємно створюють стільники сусідніх кластерів, які працюють на однакових частотах. При $C = 7$ коефіцієнт $q = 4.6$, при $C = 12$ коефіцієнт $q = 6$. Хоч кількість стільників у кластері не обмежена, обирати C дуже великим недоцільно. По-перше, q зростає пропорційно $C^{1/4}$. По-друге, із збільшенням C зменшується кількість частотних каналів в стільнику, збільшується обсяг обладнання системи, в тому числі й кількість БС. Тому кількість стільників в кластері треба обирати мінімально можливим, яке забезпечує допустиме відношення сигнал/завада.

Система стільникового зв'язку - це система масового обслуговування, особливістю якої є те, що тільки мала частина користувачів при великій їх загальній чисельності одночасно має потребу в послугах. Тому певною кількістю каналів зв'язку можна обслужити набагато більшу кількість користувачів. Потік заявок на послугу зв'язку (трафік) є випадковою величиною, що вимірюється в Ерлангах (Erl), причому його максимальне значення виявляється у так званий час найбільшого навантаження (ЧНН) доби. Якщо середня інтенсивність трафіка одного користувача складає $A_1 Erl$, то це означає середньостатистичний користувач за час t використовує канал протягом $A_1 t$.

Через те, що загальна кількість користувачів набагато перевищує число частотних каналів зв'язку, є вірогідність того, що користувач не зможе встановити з'єднання через тимчасову відсутність вільних каналів.

Якщо у цьому випадку система працює за принципом: для організації з'єднання треба повторити виклик, то вона зветься системою з втратами. З точки зору користувача, що не може встановити з'єднання, система заблокована. Вірогідність блокування в системах з втратами виражається [3] формулою

Ерланга B

$$p_B = \frac{A^N / N!}{\sum_{k=0}^N (A^k / k!)}, \quad (4.3)$$

Вірогідність того, що всі канали вільні,

$$p_{Bo} = \frac{1}{\sum_{k=0}^N (A^k / k!)}, \quad (4.4)$$

вірогідність того, що зайнято D каналів

$$p_{BK} = p_{Bo} A^D / D! \quad (4.5)$$

Середнє число зайнятих каналів

$$K_c = p_{Bo} \sum_{k=1}^N (A^k / (k-1)!) \quad (4.6)$$

Якщо при тимчасовій відсутності вільних каналів система ставить користувача в чергу і задовольняє його вимогу по мірі звільнення каналів або видаляє з черги за певний термін очікування, то вона зветься системою з очікуванням.

В системі з очікуванням вірогідність затримки (вірогідність того, що виклик, який надійшов, не обслуговується миттєво, а ставиться в чергу без обмеження часу перебування в ній) описується формулою Ерланга C

$$p_C = p_{Co} \frac{A^N N}{N!(N-A)}, \quad (4.7)$$

де

$$p_{Co} = \frac{1}{\sum_{k=0}^{N-1} (A^k / k!) + \frac{A^N N}{N!(N-A)}} \quad (4.8)$$

- вірогідність того, що в цій системі всі канали вільні.

В системі з обмеженням часу очікування та часу обслуговування після очікування, виклик, що надійшов у мить зайнятості всіх каналів, ставиться в чергу, однак час очікування не перевищує середнього терміну обслуговування (середньої тривалості розмови). Якщо за цей час хоча б один канал звільнюється, виклик займає його на частину середнього часу обслуговування, що лишилася, після чого скидається. В такій системі вірогідність відмовлення описується формулою Ерланга А

$$p_A = \sum_{k=N}^{\infty} \frac{A^k}{k!} e^{-A} \quad (4.9)$$

При оцінках ємності систем стільникового зв'язку звичайно використовується модель Ерланга В (модель системи з відмовленнями). Обґрунтуванням цьому є те, що при малих вірогідностях відмовлення моделі Ерланга В та С дають достатньо близькі результати.

В формулу (4.3) входять три параметри: число каналів N , трафік A та вірогідність відмовлення p_B . Якщо відомі любі два параметри, можна однозначно знайти третій. Найбільш доцільно застосувати автоматизований розрахунок у програмованому середовищі – у пакеті MathCad. При ньому вираз (4.3) записується у вигляді функції

$$f(x) = p_B \sum_{k=0}^N (A^k / k!) - A^N / N!, \quad (4.10)$$

де x - один з компонентів (p_B , A або N), що є невідомим. Відносно функції $f(x)$ в програмованому середовищі MathCad виконується операція пошуку найменшого позитивного кореня –

$$\text{solution} := \text{root}(f(x), x) \quad (4.11)$$

при заданні значень двох відомих компонентів та додаткового завдання

початкового значення невідомого x , поблизу якого шукається корінь.

4.2 . Розробка алгоритму розрахунку зони радіо покриття

В роботі [2] чітко виписано алгоритм розрахунку зони радіопокриття при попередньому плануванні мережі за технологією LTE. Він полягає у наступному.

Для складання повного частотного плану мережі СПР, тобто плану впровадження конкретних номіналів частот для кожної з БС, установлених на території міста, необхідно попередньо визначити основні параметри цього плану — розмірність кластера N ; число M секторів обслуговування в одному стільнику ($M = 1$ при $\Theta = 360^\circ$; $M = 3$ при $\Theta = 120^\circ$ і $M = 6$ при $\Theta = 60^\circ$, де Θ — ширина діаграм спрямованості антен БС); число k БС, які необхідно установити на території міста; радіус одного стільника R_o , км; потужність передавача БС P_{bs} , дБВт; висота підвісу h_{bs} , м, антени БС [висота антени мобільної станції (МС) приймається рівною $h_{ms} = 1.5$ м].

Перераховані параметри можна визначити, якщо відомі наступні дані: F — смуга частот у МГц, виділена для передачі сигналів БС мережі СПР у даному місті, F_k — смуга частот у МГц, займана одним частотним каналом системи СПР, n_a — число абонентів, що одночасно можуть використовувати один частотний канал (для системи VMT $n_a = 1$, для LTE $n_a = 8$); N_a — число абонентів, що повинна обслуговувати стільникова мережа СПР у даному місті; β — активність одного абонента в годину найбільшого навантаження в Ерлангах); p_a — припустима імовірність блокування виклику в стільниковій мережі СПР; $\rho_{об}$ — необхідне захисне відношення для приймачів мережі СПР; p_t — відсоток часу, протягом якого допускається, щоб відношення сигнал/перешкода на вході приймача в мережі СПР було менше захисного відношення ρ_o , S — площа міста в км², у якому розгорнута стільникова мережа СПР: α — параметр (дБ), що визначає діапазон випадкових флуктуацій рівня прийнятого сигналу в місці прийому (для систем СПР $\alpha = 4...10$ дБ); P_{ms} — чутливість у дБВт приймача МС; G_{bs} — коефіцієнт, дБ, підсилення антени БС.

У відповідності із роботою [11] алгоритм визначення основних параметрів частотного плану для стільникової мережі СПР у складається з восьми етапів.

1. Визначається загальне число частотних каналів, виділених для розгортання стільникової мережі СПР у даному місті

$$n_k = \text{int}(F/F_k) \quad (4.12)$$

де $\text{int}(x)$ — ціла частина числа x .

4. Обчислюється необхідна розмірність кластера при заданих ρ_0 і ρ_1 для чого використовується співвідношення

$$p(N) = 100 \int_{x_1}^{\infty} \exp(-t^2 / 2) dt \quad (4.13)$$

де

$$x_1 = \left\lfloor 10 \lg(1/\beta_e) - \rho_0 \right\rfloor / \alpha_p \quad (4.14)$$

$$\beta_e = \sum_{i=1}^l \beta_i 10^{0,1(x_i - x_e)} \quad (4.15)$$

Коефіцієнти β_i визначають медіанне значення загасання радіохвиль на i -й трасі поширення перешкоди. Ці коефіцієнти зворотно пропорційні четвертому ступеню довжини траси поширення радіохвиль. Випадкові флуктуації загасання розподілені по логнормальному закону і визначаються величинами x_e і x_i :

$$p(x) = \exp(-x^2 / 2a^2) / (\alpha \sqrt{2\pi}) \quad (4.16)$$

В умовах міста $\alpha = 4 \dots 10$ дБ. Значення l і β_i залежать від того, чи використовуються на БС ненаправлені або секторні антени:

$$\begin{cases} \text{якщо } M = 1, \text{ то } l = 6 \text{ и } \beta_1 = \beta_2 = (q-1)^{-4}; \beta_3 = \beta_4 = q^{-4}; \beta_5 = \beta_6 = (q+1)^{-4}; \\ \text{якщо } M = 3, \text{ то } l = 2 \text{ и } \beta_1 = (q+1)^{-4}; \beta_2 = q^{-4}; \\ \text{якщо } M = 6, \text{ то } l = 1 \text{ и } \beta_1 = (q+1)^{-4}. \end{cases} \quad (4.17)$$

де $q = D/R_0 = \sqrt{3N}$.

Параметр x_e в (4.15) розподілений у нормальному закону ($x_e = 0$).

$$\alpha_e^2 = \bar{x}_e^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left\{ 1 + \left[\exp(\gamma^2 \alpha^2) - 1 \right] \frac{\sum_{i=1}^l \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^l \beta_i \right)^2} \right\}, \quad (4.18)$$

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^l \beta_i \right) \exp \left[(\gamma^2 / 2) (\alpha^2 - \alpha_e^2) \right], \quad (4.19)$$

де

$$\gamma = 0,1 \ln 10. \quad (4.20)$$

Відношення сигнал/перешкода $\rho = 10 \lg(p_s/p_1)$ на вході приймача з урахуванням (4.14) визначається вираженням

$$\rho = x_c - x_e - 10 \lg(\beta_e) \quad (4.21)$$

і розподілено по нормальному закону, причому

$$\bar{\rho} = 10 \lg(\beta_e), \quad (4.22)$$

$$\alpha_p^2 = \alpha^2 + \alpha_e^4. \quad (4.23)$$

Формула (4.13) визначає відсоток часу $p(N)$, протягом якого відношення сигнал/перешкода на вході приймача МС нижче захисного відношення ρ_0 . Величини β_e , і α_p залежать від параметрів $q = D/R_0 = \sqrt{3N}$, α , а також M . Відсоток часу $p(N)$ убуває з ростом N . При заданих ρ_0 , α і $M = 1; 3; 6$ виконується розрахунок значень $p(N)$ для декількох величин N (тобто q). Значення N , при якому виконується умова $p(N) \leq p_t$ приймається за розмірність кластера мережі СПР.

3. Знаходиться число частотних каналів, що використовуються для обслуговування абонентів в одному секторі одного стільника:

$$n_s = \text{int} \left(\frac{n_k}{MN} \right) \quad (4.24)$$

4. Визначається припустиме телефонне навантаження в одному секторі одного стільника (Ерланг):

$$A = \begin{cases} n_0 \left[1 - \sqrt{1 - (p_a \sqrt{\pi n_0 / 2})^{1/n_0}} \right], & \text{при } p_a \leq 2/(\pi n_0), \\ n_0 + \sqrt{\pi / 2 + 2n_0 \ln(p_a \sqrt{\pi n_0 / 2} - \sqrt{\pi / 2})}, & \text{при } p_a > 2/(\pi n_0). \end{cases} \quad (4.25)$$

де

$$n_0 = n \cdot n_a. \quad (4.26)$$

5. Розраховується число абонентів, що обслуговуються однією БС при заданій імовірності блокування

$$N_{bs} = \text{Mint}(A/\beta). \quad (4.27)$$

6 Визначається число БС у стільниковій мережі

$$K = \text{int}(N_a/N_{bs}). \quad (4.28)$$

7. Знаходиться радіус одного стільника

$$R_0 = \sqrt{S/(\pi K)} \quad (4.29)$$

8. Обчислюється P_{bs} при $h_{bs} = \text{const}$, або h_{bs} при $P_{bs} = \text{const}$, для чого застосовують рівняння

$$P_{ms} = P_{bs} + G_{bs} - 70 - 26,16 \lg(f_{\text{МГц}}) + 13,82 \lg h_{bs} - (45 - 6,55 \lg h_{bs}) \lg 0. \quad (4.30)$$

Приведений алгоритм дозволяє знайти всі необхідні параметри частотного плану стільникової мережі СПР. При складанні повного частотного плану необхідно, знаючи число частотних каналів, що приходяться на кожен БС, і конфігурацію кластера, використовуюваного для побудови стільникової мережі, визначити конкретні номінали частот, що виділяються для роботи всіх БС одного кластера. Причому повинні бути зведені до мінімуму перешкоди між стільниками,

у яких застосовуються сусідні частотні канали, а також інтермодуляційні перешкоди між частотними каналами, задіяними в одному секторі стільника.

Представлена процедура розрахунку основних параметрів частотного плану стільникової мережі рухомого радіозв'язку, розгорнутої в місті, дозволяє знайти число базових станцій, які необхідно установити 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.

4.3 . 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_1 , p , r значення 1 виконується перший локальний фрагмент – елементам матриці від $a_1=1$ до a_{N_s} , де N_s – 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 N_s ставиться знак “-” прочерку. Третій локальний фрагмент записує саму матрицю.

Результатом розрахунку є матриця розподілу частотного ресурсу між стільниками кластеру показана на рис. 4.2.

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. Беркман Л.Н., Лапінський В.В. Основи інфокомунікацій: Навч. посібник. - К.: ДУІКТ, 2011. - 276 с.
3. Биккенин Р. Р. Теория электрической связи: учебное пособие для студ. высших учебных заведений / Р. Р. Биккенин, М. Н. Чесноков.—М. : Издательский центр “Академия”, 2012. — 336 с.
4. Макаров С. Б. Телекоммуникационные технологии: введение в технологии GSM: учеб. пособие для высш. учеб. заведений / С. Б. Макаров, Н.В. Певцов, Е. А. Попов, М. А.Сиверс.—М. : Издательский центр “Академия”, 2012.— 256 с.
5. Волков А. Н. UMTS. Стандарт сотовой связи третьего поколения / А. Н.Волков, А. Е. Рыжков, М. А.Сиверс. —СПб. : Издательство “Линк”, 2011.— 224 с.
6. Кааринен Х. Сети UMTS. Архитектура, мобильность, сервисы / Х.Кааринен, А. Ахтиайнен, Л.Лаитинен, С. Найан, В. Ниemi. —М. : Техносфера, 2007.— 464 с.
7. Попов Е. А. Технология GPRS пакетной передачи данных в сетях GSM : учеб. пособие / Е. А. Попов.—СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 182 с.
8. Солонина А. И. Основы цифровой обработки сигналов. Курс лекций / А. И.Солонина, Д. А. Упахович, С. М. Арбузов, Е. Б.Соловьёва. — СПб. : БХВ —Петербург, 2005. — 768 с.
9. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б.Сергиенко.—СПб. : БХВ —Петербург, 2011.— 768 с.
10. Попов В. И. Основы сотовой связи стандарта LTE. - М.: Эко-Трендз, 2005 - 176 с.
11. Ледовской А.И., Слабуха Е.О., Крикун А.И. Зачем нужны расчеты зон радиопокрытия. //Мобильные системы, 2004 №2

12. Шорин О.А. Прогноз перегрузок с учетом подвижности абонентов в сотовых системах связи. // «Мобильные системы», 2005, №1.
13. Шорин О.А. Вероятность перегрузки сотовых систем связи с учетом подвижности абонентов. // «Электросвязь», 2004, №5.
14. 3GPPTS 25.101. v.4.13.0 (2006-12). Technical Specification Group Radio Access Network; User Equipment (UE) Radio transmission and Reception (FDD). - Technical Specification (Release 4). 2006.
15. 3GPP TS 25.104. v.4.9.0 (2007-03). Technical Specification Group Radio Access Network; BS Radio transmission and Reception (FDD). - Technical Specification (Release 4). 2007.
16. 3GPPTS 25.133. v.4.18.0 (2007-09). Technical Specification Group Radio Access Network; Requirement for support of radio resource management (FDD). - Technical Specification 3GPP (Release 5). 2007.
17. 3GPP TS 36.211. v.8.5.0 (2008-12). Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation. - Technical Specification. Release 8. 2008.
18. 3GPP TR 36.808. v.1.0.0 (2010-12). Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Carrier Aggregation; Base Station (BS) radio transmission and reception. - Technical Report (Release 10). 2010.
19. 3GPP TS 36.902. v. 1.0.1 (2008-09). Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-configuration and self-optimizing network use cases and solutions. - Technical Specification (Release 8). 2008.
20. ERC/REC 01-01. Border Coordination of UMTS. - ERC Recommendation 01-01. 2007.
21. ERC/REC/(08)02. Frequency Planning and Frequency Coordination for the GSM 900 (including E-GSM)/UMTS 900, GSM 1800/UMTS 1800 Land Mobile Systems. - ERC Recommendation (08)02. 2008.
22. РД 45.254-2002. Сети сотовой подвижной связи. Нормы на показатели ка-

чества услуг связи и методики проведения их оценочных испытаний.

23. <http://www.sumtech.ru/bank/program/radius.htm> [Электронный ресурс].
24. <http://www.rps2.ru/> [Электронный ресурс].
25. http://www.geyser.ru/services/soft/auto_6.htm [Электронный ресурс].
26. <http://www.rpls.ru/common.htm> [Электронный ресурс].
27. <http://www.raycom-w.ru/actix> [Электронный ресурс].
28. <http://www.mobilecomm.ru/view.php?news=2352> [Электронный ресурс].