ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ЗОНИ ПОКРИТТЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ’ЯЗКУ П’ЯТОГО ПОКОЛІННЯ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи АРДМ-61
спеціальності
172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)
Масюк В.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник Кременецька Я.А.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Лавріненко К.І.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Макаренко А.О.
(прізвище та ініціали)

Київ - 2022

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МВТ
_____ Н.В. Руденко
"___" _____ 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Масюку Владиславу Олеговичу

1. Тема роботи: "Методи збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління",
керівник роботи Кременецька Я.А., д.т.н.,
затверджені наказом вищого навчального закладу від 12 жовтня 2022 р. №122.

2. Строк подання студентом роботи 20 грудня 2022 р.
3. Вихідні дані до роботи:
   1. Гетерогенні 5G-мережі;
   2. Методи збільшення зони покриття мобільного зв'язку;
   3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Стан проблеми гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління.
   2. Методи функціонування конвергентних гетерогенних мереж при нестаціонарних енергетичних та спектральних параметрах.
   3. Методи збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління.

5. Графічна частина роботи представлена на 12 слайдах презентації.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	15.10.22	Викон.
2.	Стан проблеми гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління	31.10.22	Викон.
3.	Методи функціонування конвергентних гетерогенних мереж при нестаціонарних енергетичних та спектральних параметрах	15.11.22	Викон.
4.	Методи збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління	29.11.22	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	10.12.22	Викон.
6.	Розробка презентації	20.12.22	Викон.

Студент _____ Масюк В.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Кременецька Я.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Направляється студент Масюк В.О. (прізвище та ініціали) до захисту магістерської роботи

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка (шифр і назва спеціальності)

на тему: Методи збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління

Магістерська робота і рецензія додаються.

Директор інституту _____ (підпис) Кравченко В.І. (прізвище та ініціали)

Довідка про успішність

Масюк В.О. (прізвище та ініціали) за період навчання в Навчально-науковому інституті телекомунікацій, з 2021 року до 2023 року повністю виконав (ла) навчальний план за напрямом підготовки, спеціальністю з таким розподілом оцінок за:
національною шкалою: відмінно 11 %, добре 50 %, задовільно 39 %;
шкалою ECTS: A 11 %; B 6 %; C 44 %; D 33 %; E 6 %.

Провідний фахівець інституту _____ (підпис) _____ (прізвище та ініціали)

Висновок керівника магістерської роботи

Студент Масюк Владислав Олегович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою в тому числі рекомендаціями МСЕ. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Магістерська робота виконана на високому рівні і заслуговує оцінку "відмінно", а студент Масюк Владислав Олегович - присвоєння кваліфікації "Магістр з телекомунікацій та радіотехніки".

Керівник роботи _____ (підпис) Кременецька Я.А. (прізвище та ініціали)

" " _____ 2022 року

Висновок кафедри про магістерську роботу

Магістерську роботу розглянуто. Студент Масюк В.О. (прізвище та ініціали) допускається до захисту даної роботи в Державній екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ (підпис) Руденко Н.В. (прізвище та ініціали)

" " _____ 2022 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

по магістерській кваліфікаційній роботі

Студента Масюка Владислава Олеговича

на тему: "Методи збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління"

Актуальність:

Незважаючи на велику кількість різноманітних рішень для мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, невирішеними досі залишаються задачі ефективного передавання сигналів у радіоканалах, при наявності великої кількості завад у гетерогенних мережах, конвергенції різних технологій радіодоступу для ефективного надання сервісів у гетерогенних мережах, а також задачі моделювання складних багаторівневих структур для оптимізації процесів планування.

Тому тема обраних досліджень є актуальною та своєчасною.

Позитивні сторони:

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

Недоліки:

1. Перший розділ перенасичено означеннями мережевих технологій, які в наступних розділах не використані.
2. У роботі не вказано на основі чого оцінюється достовірність результатів, отриманих з використанням програмного симулятора (рис. 3.12).

Висновки:

Незважаючи на дрібні недоліки магістерська кваліфікаційна робота заслуговує оцінку **"відмінно"**, а студент Масюк Владислав Олегович - присвоєння кваліфікації "Магістр з телекомунікацій та радіотехніки".

Якість проекту (роботи)	
Виконано на замовлення підприємства	
Виконано за тематикою НДР	
Виконано з макетом	
Виконано з застосуванням ЕОМ та МПТ	√
Має практичну цінність	√
Проект-частина комплексної теми	

Підпис рецензента доцент каф. ТСМ (Лаврінець К.І.)

Підпис засвідчую

Підпис особи, що засвідчує ( )

М.П.

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 83 сторінки; 25 рис., 1 таблиця, 44 джерела.

Об'єкт дослідження – процес функціонування конвергентної гетерогенної мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління в умовах обмеженого спектрального ресурсу.

Предмет дослідження - параметри та характеристики гетерогенних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, що визначають енергетичну та спектральну ефективність.

Мета роботи - дослідити методи збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління.

Метод дослідження – в процесі досліджень використано такі теоретичні засади, як основи теорії сигналів, теорія ймовірності, теорія статистики, теорія стохастичної геометрії, теорія фракталів та методи імітаційного моделювання.

В першому розділі встановлено, що стандарти п'ятого покоління поставлені перед вимогою підвищення пропускної здатності у тисячу разів у порівнянні з існуючими мережами LTE при тому, що спектральний ресурс для мереж мобільного зв'язку не буде істотно збільшуватись. Це, в свою чергу, потребує нових підходів до підвищення спектральної та енергетичної ефективності мереж мобільного зв'язку.

Другий розділ присвячено моделям конвергенції технології D2D з комірковими мережами мобільного зв'язку. Розраховано моделі поширення сигналів у радіоканалах між базовою станцією та абонентським пристроями, а також у каналах між самими абонентськими пристроями, що дає змогу визначити мінімальну необхідну відстань між D2D доменами для забезпечення вимог до інтерференції у каналах зв'язку.

Третій розділ присвячений моделям планування багаторівневих гетерогенних мереж мобільного зв'язку, а також задачам балансування навантаження, реконфігурації та централізованого керування мережею. Для цього у розділі запропоновано фрактальну геометричну модель багаторівневої коміркової структури гетерогенної мережі.

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНА МЕРЕЖА, LTE, ЗОНИ ПОКРИТТЯ, CLOUD RADIO ACCESS NETWORKS, ГЕТЕРОГЕННІ МЕРЕЖІ, 5G, SINR, OFDM, D2D

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 8
ВСТУП 10
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5-ГО ПОКОЛІННЯ 12
1.1 Рішення та вимоги для мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління 12
1.2 Просторове ущільнення мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління 15
1.3 Спектральне ущільнення мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління 22
1.4 Особливості та вимоги до радіоінтерфейсів мереж п'ятого покоління 27
1.5 Основні невирішені проблеми у гетерогенних мережах мобільного зв'язку п'ятого покоління 30
2 МЕТОДИ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОНВЕРГЕНТНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА СПЕКТРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРАХ 39
2.1 Конвергенція гетерогенних мереж з використанням технології міжтермінальної взаємодії 39
2.2 Розподіл та планування спектральних ресурсів 49
2.3 Вирішення проблеми інтерференції у конвергентних мережах на основі міжтермінальної взаємодії 53
3 МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ЗОНИ ПОКРИТТЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ 58
3.1 Моделювання мереж мобільного зв'язку з використанням стохастичних моделей 58
3.2 Багатошарова гетерогенна мережа мобільного зв'язку: фрактальна модель топологічної структури 66
ВИСНОВКИ 77
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 78
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 83

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

3GPP - The 3rd Generation Partnership Project

4G - 4th Generation

5G - 5th Generation

AP - Access Point

B5G - Beyond 5G

BS - Base Station

DL - Downlink. Data transmission from BS to UEs

E-UTRA - Evolved Universal Mobile Telecommunications System Terrestrial Radio Access

EPC - Evolved Packet Core. LTE core network

gNB - gNode B (supporting NR and connectivity to NGC)

LOS - Line-Of-Sight

LTE - Long Term Evolution. Wireless cellular standard of 4th generation

MIMO - Multiple-Input and Multiple-Output

mmWave - Millimeter-wave. Millimeter-wave is the band of spectrum between 30 GHz and 300 GHz

NGC - Next Generation Core Network

NLOS - Non-Line-Of-Sight

NOMA - Non-Orthogonal Multiple Access

NR - New Radio

NSA - Non-Stand-Alone

PHY - Physical layer which refers to the implementation of physical layer functions

QoE - Quality of Experience

RAN - Radio Access Network. Element of a cellular network, main purpose of it is to provide connection to users

SLS - System-Level Simulator. Simulator, which emulates the network environment

SNR - Signal-to-Noise Ratio

TR - Technical Report

TS - Technical Specification

UE - User Equipment. Mobile user device used for communication

UL - Uplink. Data transmission from UEs to BS

ВСТУП

Магістерська робота присвячена методам збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління.

Інтенсивний розвиток технологій в останні роки призвів до появи великої кількості багатофункціональних абонентських пристроїв, що спричинило різке зростання трафіку у мережах мобільного зв'язку. Відповідно до прогнозів компанії Cisco, до 2025 року кількість мобільних пристроїв зросте до 50 мільярдів, що в сім разів перевищує населення планети. Тому, протягом останніх двох років активно ведуться дослідження у напрямку розробки мереж мобільного зв'язку наступного покоління, названих мережами 5G. Зокрема, сумарна пропускна здатність мережі повинна бути підвищена у 1000 разів, забезпечуючи при цьому 100 кратне підвищення швидкості передавання даних для кінцевих користувачів. Це в свою чергу потребує значного збільшення спектральних ресурсів мережі, оскільки для забезпечення зростаючих вимог до пропускної здатності необхідні значно більші частотні смуги. Одним із варіантів підвищення пропускної здатності мережі в умовах обмеженого спектру є впровадження гетерогенних мереж мобільного зв'язку.

Переваги концепції гетерогенних мереж мобільного зв'язку очевидні: підвищення коефіцієнту використання спектру, значно вища пропускна здатність радіоканалів, простота впровадження нових базових станцій та легкість масштабування. Однак, гетерогенні мережі характерні рядом недоліків: висока густина базових станцій спричиняє значно вищий рівень інтерференції у мережі, знижуючи її ефективність, складність багаторівневих гетерогенних мереж не дає змогу ефективно планувати інфраструктуру базових станцій та їх опорної транспортної системи. Крім того, відсутність єдиної площини керування знижує ефективність гетерогенної мережі в умовах значної варіації абонентського навантаження за рахунок неефективного використання пропускної здатності комірок гетерогенної мережі. Гетерогенні мережі характерні більш частими хендоверами у зв'язку із малим радіусом комірок. При великій кількості абонентів та їх відносно великій мобільності спостерігається висока варіація навантаження у комірках. У звичайних коміркових мережах мобільного зв'язку, де можливості

підключення абонента обмежені трьома базовими станціями, планування та балансування спектральних ресурсів можна ефективно здійснювати на основі існуючої ієрархічної системи керування. Планування та балансування навантаження у складних гетерогенних мережах із багаторівневою архітектурою ускладнюється, оскільки практично у будь-якій точці мережі абонент може вибирати з десятків можливих варіантів підключення, що потребує єдиної централізованої площини керування та прийняття рішення стосовно розподілу частотних ресурсів. Із урахуванням складності багаторівневої структури, в гетерогенних мережах мобільного зв'язку особливого значення набувають геометричні моделі планування та розроблені на їх основі алгоритми балансування навантаження.

Мета роботи – дослідити методи збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління.

Об'єкт дослідження – процес функціонування конвергентної гетерогенної мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління в умовах обмеженого спектрального ресурсу.

Предмет дослідження – параметри та характеристики гетерогенних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, що визначають енергетичну та спектральну ефективність.

Методи дослідження – в процесі досліджень використано такі теоретичні засади, як основи теорії сигналів, теорія ймовірності, теорія статистики, теорія стохастичної геометрії, теорія фракталів та методи імітаційного моделювання.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати магістерської роботи доповідалися на:

- III міжнародній науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУТ, 30 листопада 2022 р.;

- XV науково-технічній конференції «Сучасні інфокомунікаційні технології», Київ: ДУТ, 9 грудня 2022 р.

Публікації. Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі "Наукові записки Державного університету телекомунікацій, – 2022, – №1".

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5-ГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Рішення та вимоги для мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління

Мережі мобільного зв'язку стрімко розвиваються протягом останнього десятиліття, що зумовлено великою популярністю смартфонів та планшетів на ринку обчислювальної техніки. Ця тенденція очікувано буде зберігатися у найближчому майбутньому, оскільки ринок безпровідних пристроїв невпинно розширюється, проникаючи у всі сфери людського життя. Відповідно, стрімке зростання обсягів трафіку у мережах мобільного зв'язку ставить нові вимоги до їх пропускної спроможності. Провідні компанії на ринку технології мереж мобільного зв'язку узгодили вимоги щодо тисячократного підвищення інформаційної ємності у мережах п'ятого покоління. Ключовими факторами, які впливають на інформаційну ємність мереж мобільного зв'язку є кількість базових станцій, доступні ресурси спектру та спектральна ефективність каналів безпровідного зв'язку. Ці три фактори узагальнюються класичним Шеннонівським рівнянням [43]:

$$R < C = m\left(\frac{W}{n}\right)\log_2\left(1+\frac{S}{I+N}\right), \tag{1.1}$$

де W - смуга пропускання базової станції, n - коефіцієнт завантаженості базової станції (позначає кількість користувачів, що обслуговуються даною базовою станцією), m - коефіцієнт просторового мультиплексування (кількість просторових каналів між базовою станцією та абонентами), S - потужність сигналу, I та N - потужності інтерференційних завад та адитивного білого гаусівського шуму, відповідно.

Смуга пропускання каналу базової станції W може бути розширена за рахунок використання додаткового спектру, що в результаті призводить до лінійного підвищення пропускної здатності мережі при умові, що всі інші значення у формулі (1.1) є константами. Коефіцієнт завантаження n ($n>1$) може бути зменшений за рахунок впровадження більшої кількості базових станцій,

причому абонентський трафік повинен бути розподілений якомога рівномірніше між усіма базовими станціями. Коефіцієнт просторового мультиплексування можна підвищити шляхом використання більшої кількості приймально-передавальних антен на стороні базової станції та абонентських пристроїв, за умови їх взаємної кореляції [44].

Для вирішення поставлених проблем, була запропонована концепція гетерогенної мережі, яка інтегрує різні технології радіодоступу та різні розміри комірок під спільною керуючою системою [43]. Гетерогенні мережі дають змогу знизити коефіцієнт завантаженості шляхом збільшення густини комірок у заданій зоні обслуговування. Окрім зниження коефіцієнта завантаженості, збільшення густини комірок призводить до позитивного ефекту зменшення втрати потужності сигналу у каналі зв'язку, що в результаті призводить до збільшення рівнів потужності корисного сигналу та інтерференційної завади, дозволяючи знехтувати впливом адитивних температурних шумів *N*. Відповідно, можна зробити висновок, що пом'якшення інтерференційних впливів є першочерговим завданням для підвищення ефективності каналів зв'язку у мережах п'ятого покоління. Дана проблема вимагає нових адаптивних механізмів координації ресурсів між базовими станціями у поєднанні з передовими технологіями цифрової обробки сигналів у приймальних абонентських пристроях [41].

Вищезгадані чинники підвищення інформаційної ємності безпровідних мереж можуть бути узагальнені в рамках концепції ущільнення мережі. Ущільнення безпровідної мережі є комбінацією просторового ущільнення (підвищення співвідношення *m/n*) та спектрального ущільнення (збільшення спектральної смуги *її)*. Просторове ущільнення здійснюється шляхом збільшення кількості приймально-передавальних антен (на базовій станції та абонентському пристрої) та збільшення густини базових станції у заданій зоні обслуговування при забезпеченні приблизно рівномірного розподілу абонентів між ними. Спектральне ущільнення передбачає агрегацію частотних смуг з усіх можливих діапазонів, починаючи від 500 МГц до 300 ГГц. Об'єднання потенційно несуміжних частотних смуг з рознесених спектральних діапазонів спричиняє ряд

проблем проектування антенних систем та приймально- передавальних модулів, які необхідно вирішити при розробленні пристроїв для мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління [40].

Проте, просторове ущільнення разом із агрегацією спектру не призведе до суттєвого виграшу, якщо воно не буде доповнено ущільненням транспортної мережі, яка з'єднує базові станції із опорною мережею оператора мобільного зв'язку. Просторово-ущільнені мережі часто потребують безпровідної транспортної мережі в умовах відсутності прямої видимості, у зв'язку із складністю прокладання провідної оптичної транспортної мережі. З іншого боку, доступність оптичної транспортної мережі з високою пропускною здатністю та невеликою затримкою в зонах зі щільною забудовою відкриває нові можливості для хмарних мереж радіо доступу C-RAN (Cloud Radio Access Networks) з координованою мультивузловою обробкою сигналів [41]. У таких системах обробка сигналів великої кількості базових станцій є централізованою на базі єдиної обчислювальної системи з використанням хмарних обчислень. Це потенційно дає змогу трансформувати мережі мобільного зв'язку з обмеженням по інтерференції у мережі, в яких інтерференцією можна знехтувати. За рахунок усунення інтерференції, C-RAN дозволяє забезпечити усім користувачам надзвичайно високий рівень якості обслуговування. Дана технологія дає змогу істотно підвищити ефективність за рахунок одночасного врахування канальної інформації отриманої від великої кількості абонентських пристроїв [42-44]. Проте, така архітектура вимагає надзвичайно складних методів цифрової обробки сигналів, і тому є доцільною лише при високій густині абонентського навантаження в умовно обмеженій зоні обслуговування (стадіони, місця проведення масових заходів, тощо), де побудова складної інтегрованої інфраструктури та значна надлишковість зворотного каналу є виправданими високими вимогами до пропускної здатності та показників якості обслуговування.

Не зважаючи на те, що більшість досліджень спрямовані на централізоване керування ресурсами та компенсацію/уникнення інтерференції, зумовлені їх відносно швидким впровадженням, очікується, що методи децентралізованого

керування ресурсами та компенсації інтерференції будуть активно розвиватись та впроваджуватись у майбутніх гетерогенних мережах 5-го покоління [5].

1.2 Просторове ущільнення мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління

Гетерогенна архітектура мережі мобільного зв'язку з варіативним розміром комірок

Висока щільність базових станцій є основною вимогою для зменшення коефіцієнта завантаженості мережі *n* та збільшення потужності корисного сигналу *S* [5]. Проте, встановлення додаткових базових станцій вимагає залучення значних інвестицій, що ускладнює процес планування мережної інфраструктури. Тому, впровадження безпровідних точок доступу (малих комірок, які можуть бути змонтовані як всередині приміщень так і ззовні) є більш ефективною альтернативою до макрокомірок [3]. Зовнішні малі комірки, відомі як піко-комірки, зазвичай використовують компактні базові станції з потужністю передавання близько 30 дБм [4]. Компактні розміри та низька потужність передавання дозволяє суттєво знизити капітальні та експлуатаційні затрати у порівнянні із класичною інфраструктурою макрокомірок. У місцях із відсутністю оптичної транспортної інфраструктури, релейні ретрансмітери можуть бути альтернативою до піко-комірок. Релейні ретрансмітери використовують спектральні ресурси макрокомірки не лише для того щоб забезпечити доступ для мобільних користувачів, але й для передавання трафіку від материнської базової станції, яка має опорну оптичну транспортну мережу.

З точки зору користувача релейні ретрансмітери функціонують як окрема піко-комірка, проте на стороні базової станції релейні ретрансмітери обслуговуються як звичайні термінали користувачів, з високою пропускною здатністю каналу. Відповідно, розподіл однієї і тієї ж самої частотної смуги між макрокомірками, піко-комірками та релейними ретрансміттерами вимагає нових підходів у проектуванні мережної інфраструктури. Зокрема, при використанні хендоверу на основі метрики потужності сигналу, багато мобільних користувачів

в зоні видимості піко-комірки, можуть обслуговуватись макрокоміркою, яка має вищий рівень потужності корисного сигналу. Це спричиняє додаткові інтерференційні завади у висхідному каналі піко-комірки. Крім того, висока потужність передавання базової станції макрокомірки у низхідному каналі може негативно впливати на покриття піко- комірок, зменшуючи їх ефективну зону обслуговування та, відповідно, знижуючи ефективність їхнього використання. Навіть при оптимальному плануванні покриття, малі комірки можуть використовуватись неефективно, враховуючи високу варіацію абонентського навантаження. Для боротьби із цим явищем, була запропонована технологія динамічного розширення комірок CRE (Cell Range Expansion) [5]. Технологія динамічного розширення комірок вирішує проблему недозавантаженості піко-комірок шляхом зміщення меж хендоверу на користь малих комірок. Крім того, зміна розміру комірок дозволяє ефективно балансувати навантаження в комірці та ефективно використовувати переваги гетерогенних мереж.

Проте, механізм динамічного розширення комірок призводить до підвищення рівня інтерференційних завад у низхідному каналі, оскільки частина користувачів, які примусово переключені на обслуговування піко- коміркою, отримують значно потужніший інтерферуючий сигнал від макрокомірки. Подолати інтерференцію у низхідному каналі можна шляхом механізму часткового використання ресурсів, при якому базова станція макрокомірки не використовує частину спектральних ресурсів для зменшення рівня інтерференції для користувачів на межі піко-комірки. Дані ресурси використовуються макрокоміркою лише для передавання широкомовних спільних контрольних каналів CCC (Common Control Channels) та опорних сигналів CRS (Common Reference Signals). Інформація контрольних каналів дозволяє піко-комірці врахувати та компенсувати інтерференцію, що забезпечує достатньо високий рівень співвідношення потужності корисного сигналу до шуму та інтерференції SINR (Signal-to-Noise-Plus-Interference Ratio):

$$SINR = \frac{S}{N + I}, \tag{1.2}$$

Часткове використання ресурсів, знижує ефективність макрокомірок, проте дає змогу отримати виграш у загальній продуктивності гетерогенної мережі за рахунок підвищення ефективності малих комірок [6].

Втрат ефективності макрокомірок за рахунок часткового використання ресурсів можна уникнути шляхом використання методів передавання даних з обмеженнями по потужності передавання, зоні випромінювання та швидкості передавання. Це вимагає більш технологічно складних абонентських пристроїв з новими механізмами компенсації інтерференції.

Нові механізми компенсації інтерференції поєднують лінійні та нелінійні методи компенсації інтерференції. Лінійна компенсація інтерференції реалізується шляхом обробки просторової мінімальної середньоквадратичної помилки [7]. Нелінійна компенсація інтерференції включає оцінку та відтворення інтерферуючого сигналу в абонентському терміналі з подальшим його врахуванням при декодуванні результуючого сигналу [8]. Нелінійна компенсація інтерференції використовує оцінку інтерференційних завад на рівні модульованого символу або на рівні кодованих блоків даних.

Помилки внаслідок поширення сигналу асоційовані з рівнем модуляції можна подолати за рахунок механізму м'якої компенсації інтерференції на основі довірчого інтервалу оцінки інтерферуючих символів. Помилки на рівні кодованих блоків даних переважно стійкі до помилок поширення сигналу, проте вимагають чіткого узгодження між спектральною ефективністю каналу та потужністю інтерферуючого сигналу в приймачі цільового абонента. Обидва підходи вимагають інформації про багато параметрів інтерферуючого сигналу, таких як позиційність модуляції, схема просторового мультиплексування, тип пілотного сигналу (цільовий/широкомовний) та співвідношення між трафіком даних та пілотних сигналів [9].

Крім того, виправлення помилок на рівні кодованих блоків потребує інформації про символьну швидкість та розподіл ресурсів для даних кожного абонента. Ці параметри повинні бути або оцінені "всліпу" або отримані шляхом підтримки контрольного рівня мережі. Підтримка контрольного рівня мережі

дозволяє усунути складність "сліпої" оцінки в терміналі користувача, проте оцінка "всліпу" необхідна при функціонуванні абонента в існуючих мережах мобільного зв'язку [6].

Конвергенція протоколів безпровідного доступу в гетерогенних мережах мобільного зв'язку

На сьогоднішній час стрімкий розвиток технологій призводить до появи широкого спектру пристроїв у мережах мобільного зв'язку. Сучасні смартфони та планшети мають характеристики, які співмірні з характеристиками настільних комп'ютерів та лептопів. Більшість з цих пристроїв оснащені кількома радіоінтерфейсами такими як GSM, WCDMA, LTE, Wi-Fi та Bluetooth. Відповідно, поява великої кількості таких пристроїв у мережі мобільного зв'язку ставить нові вимоги щодо продуктивності мережної інфраструктури. Тому, в процесі формування вимог до мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, одним із важливих аспектів виділяється конвергенція існуючих протоколів безпровідного передавання даних, абонентських пристроїв та сервісів в мережі. Відповідно змінились вимоги до мережної інфраструктури, яка повинна бути гетерогенною з метою забезпечення ефективної взаємодії різних технологій під контролем єдиної площини управління [11].

При розробці стандарту LTE-A було здійснено перший крок в напрямку гетерогенної мережної інфраструктури за рахунок впровадження релейного передавання [12]. Проте, мережі LTE-A не є повністю гетерогенними, оскільки вони використовують єдиний протокол для передавання даних з використанням ліцензованих спектральних ресурсів. Одним з перспективних варіантів є використання технології UMA (Unlicensed Mobile Access), яка дозволяє операторам обслуговувати абонентів з використанням існуючої інфраструктури мереж Wi-Fi [13]. Проте, обмежена кількість каналів ускладнює множинний доступ до мережі для великої кількості абонентів, що суттєво погіршує якість сервісу. Крім того, характеристики Wi-Fi сигналу є менш стабільними у порівнянні з сигналами коміркових мереж, що потребує ефективних механізмів хендоверу. Використання неліцензійного спектру призводить до значного рівня

інтерференції з іншими Wi-Fi пристроями. Більше того, необхідно розробити нову політику тарифікації послуг в таких мережах.

Останні вдосконалення стандарту LTE-A дозволяють забезпечити конвергенцію між базовими станціями eNB та точками доступу Wi-Fi шляхом централізованої координації на стороні модуля управління мобільністю MME (Mobility Management Entity) та сервісного (S-GW) і пакетного (P-GW) шлюзів. Крім того, вдосконалені спектральні маски для передавачів та приймачів дають змогу усунути проблему інтерференції між каналами Wi-Fi та LTE у діапазоні 2.4 ГГц [14].

Обчислювальні можливості сучасних терміналів мобільного зв'язку дають змогу використовувати міжтермінальну взаємодію (M2M (Machine-to-Machine) або D2D (Device-to-Device)) для надання послуг в мережі мобільного зв'язку [15]. Технологія міжтермінальної взаємодії дає змогу терміналам користувача, які знаходяться поблизу, встановлювати прямі канали зв'язку між собою, уникаючи необхідності одночасної взаємодії обох пристроїв з обслуговуючою базовою станцією.

D2D може підвищити ефективність мереж мобільного зв'язку шляхом зниження затримки та споживаної потужності, а також підвищити пікові швидкості передавання даних. Крім того, міжтермінальна взаємодія дає змогу впроваджувати нові види послуг, такі як інтерактивні мережні відео-ігри, контекстно-орієнтовані сервіси, геолокаційні-сервіси, тощо. Крім того, велика кількість міжтермінальних зв'язків, які використовують одну і ту ж смугу частот досягає коефіцієнту перевикористання спектру у макрокомірці значно вище від одиниці за рахунок використання технології когнітивного радіодоступу [16].

Технологія когнітивного радіодоступу дає змогу інтелектуально використовувати спектральні ресурси, які ліцензовані під інші технології, у випадку коли в певний момент часу ці ресурси не використовуються первинною системою [17]. Така технологія забезпечує ефективне функціонування гетерогенної інфраструктури в спільному спектральному ресурсі. Для ефективного впровадження когнітивних радіомереж, необхідно розглядати

широке коло питань, включаючи технології смарт-антен, зондування та моніторинг спектру, методи обробки радіосигналів, принципи програмно конфігурованого радіодоступу SDR (Software Defined Radio), управління доступом до середовища (MAC), самоорганізація, маршрутизація, адаптивне управління мережею, тощо [18].

Важливими аспектами у конвергентних мережах мобільного зв'язку є архітектура, організація процесу надання сервісів та уникнення інтерференції в таких мережах з метою підвищення їх енергетичної та спектральної ефективності. На рис. 1.1. показано архітектуру конвергентної мобільної мережі з гетерогенною безпровідною інфраструктурою.

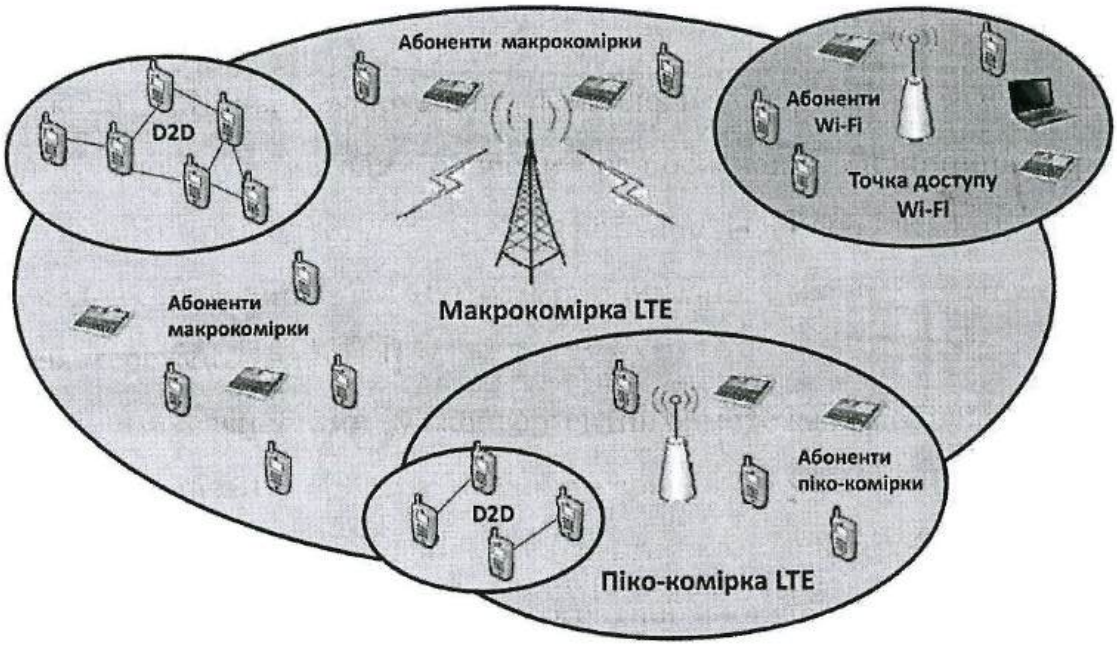


Рис.1.1. Гетерогенна мережа радіодоступу з конвергенцією протоколів LTE-A, Wi-Fi та D2D

У роботі [9], авторами запропоновано гібридну архітектуру з вторинною міжтермінальною мережею на базі стандарту IEEE 802.11 для того щоб підвищити пропускну здатність у комірці мережі мобільного зв'язку. Архітектура базується на релейному передаванні трафіку від базової станції до мобільних вузлів шляхом організації між ними мережі типу ad-hoc для покращення якості каналу зв'язку. Авторами запропоновано кілька методів пошуку та вибору релейних вузлів, а також бізнес моделі для мотивації кінцевих користувачів

використовувати свої пристрої у загальній мережній інфраструктурі.

У роботі [7] авторами проведено порівняння різних критеріїв вибору релейного вузла на основі низького рівня інтерференції, найкращого каналу та найкоротшої відстані. Визначено, що вибір релейного вузла на основі критерію якості каналу забезпечує суттєво вищу ефективність мережі у порівнянні із вибором на основі критерію мінімальної відстані.

У роботі [11], запропоновано метод динамічного релейного передавання, що знижує обсяг сигнальної інформації, яка необхідна при встановленні з'єднання шляхом зменшення кількості вузлів, які розглядаються в якості потенційних релейних передавачів на основі критерію їх відстані від базової станції.

Спрощені механізми контролю за доступом були запропоновані у роботі [22], які припускають, що спектральні ресурси та потужність передавання для міжтермінальних каналів контролюються базовою станцією LTE.

Альтернативний варіант запропонований у роботі [23], у якому запропоновано використання протоколу множинного доступу з прослуховуванням середовища та уникненням колізій для передавання даних у мережах D2D.

Проте, існуючі методи інтеграції технології D2D у коміркові мережі характерні низьким коефіцієнтом повторного використання спектру та неоднорідною якістю сервісу [24]. Крім того, невирішеною залишається проблема інтерференції у зв'язку із мобільністю абонентів та постійною зміною характеру інтерференційних впливів у мережі. Тому, необхідно розробити нові моделі конвергенції коміркових та міжтермінальних мереж, які б дозволили більш ефективно використовувати спектр та усунути проблему інтерференції між абонентськими пристроями. [11].

1.3 Спектральне ущільнення мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління

Сучасний розвиток технологій безпровідного доступу, які проникають у всі сфери життєдіяльності, призвів до різкої недостачі спектральних ресурсів. Впровадження мереж 5-го покоління є ускладненим, оскільки високі вимоги до пропускної здатності вимагають значно ширших частотних смуг. Крім того, більшість прийнятних ділянок спектру вже зайняті існуючими технологіями радіодоступу, або зарезервовані для застосування військовими чи спецслужбами. Наразі є два способи використання спектральних діапазонів для бепровідного радіодоступу [15]:

Повне очищення окремих смуг спектру від будь-яких технологій зв'язку та їх відповідне ліцензування для надання послуг мобільного зв'язку. Це стосується смуг в діапазонах 700 Мгц, 1800 МГц, 2100 МГц, 2600 МГц та ряду інших.

Когнітивне використання неліцензованого спектру при нагоді, якщо в даний момент він не використовується пріоритетною технологією зв'язку. Даний варіант прийнятний для абонентів з низькою мобільністю, які не змінюють розташування протягом тривалого часу, проте потребують постійного сервісу з високими вимогами до пропускної здатності. Це стосується смуг 2.4 ГГц, 5 ГГц, і 60 ГГц. Крім того є ряд діапазонів, які недовикористовуються у часі або розташуванні. Зокрема, діапазон 3.5 ГГц у США та діапазон 2.3 ГГц у Європі. У цих діапазонах приблизно 250 МГц спектру може бути виділено додатково для використання мережами мобільного зв'язку в певних розташуваннях на обмежений проміжок часу [16]. Незважаючи на те, що дані діапазони використовуються іншими технологіями зв'язку, існуючі методи спільного використання спектру та динамічного керування радіоресурсами дозволяють інтегрувати дані смуги в ліцензовані смуги мереж мобільного зв'язку, забезпечуючи при цьому плавний хендовер та високі показники якості обслуговування. Технології спільного доступу до спектру дають змогу на рівні управління радіоресурсами накопичувати достатні смуги частот для забезпечення необхідних вимог до

показників якості обслуговування, за рахунок координації між мережею мобільного зв'язку та пріоритетними технологіями неліцензійному частотному діапазоні. В ряді робіт було запропоновано методи когнітивного радіодоступу, які дозволяють динамічно перерозподіляти спектр залежно від вимог до пропускної здатності та поточного стану завантаженості неліцензійних частотних діапазонів [27]. При цьому, когнітивний радіодоступ є повністю прозорим для користувачів та не вимагає змін у протоколах передавання даних, що дає змогу впроваджувати дані методи без зміни інсуючої інфраструктури.

Використання спектральних смуг міліметрового діапазону довжин хвиль

Існуючі мережі мобільного зв'язку переважно розгортаються у спектральному діапазоні нижче 3 ГГц. Одним з перспективних напрямків розвитку мереж 5G є використання вищих частотних діапазонів, таких як діапазон міліметрових хвиль (від 30 до 300 ГГц) [28, 29]. Особливістю міліметрового діапазону хвиль є те, що вони забезпечують значно ширші спектральні смуги, даючи змогу суттєво підвищити пропускну здатність у комірці. Іншою перевагою міліметрових хвиль є значно компактніші розміри передавальних та приймальних антен, що дає змогу використовувати більш ефективні схеми просторового мультиплексування за рахунок збільшення кількості антен як на стороні базової станції так і на стороні абонентського пристрою. Проте, використання вищих частотних діапазонів тягне за собою ряд проблем, які необхідно вирішити. Необхідно розробити нові підходи до організації радіоканалів у діапазоні високих частот, які б дали змогу ефективно використовувати переваги та, водночас, усувати недоліки хвиль міліметрового діапазону. Зокрема, значні загасання потужності сигналу в діапазоні високих частот можна компенсувати більшою кількістю передавально-приймальних антен та більш складними алгоритмами просторового мультиплексування, які б дозволили підвищити енергетичну ефективність каналів зв'язку. Існуючі методи діаграмоутворення у поєднанні із алгоритмами просторового мультиплексування та компенсації інтерференції можуть підвищити енергетичну та спектральну ефективність мереж мобільного зв'язку при їх впровадженні у вищому спектральному діапазоні. Крім того, значне

затухання хвиль міліметрового діапазону робить їх перспективними для використання в піко та фемтокомірках, де необхідно забезпечувати значну пропускну здатність в обмежених зонах. Це дозволить зменшити відстань між спільноканальними комірками і відповідно підвищити ефективність використання радіочастотних ресурсів в гетерогенних мережах. Для ефективного впровадження мереж мобільного зв'язку у спектральному діапазоні 30-300 ГГц, необхідно вирішити ряд проблем пов'язаних із кінцевими абонентським пристроями. Існуючі термінали мобільного зв'язку підтримують багато радіо інтерфейсів у різних частотних діапазонах. Наразі пристрої здатні ефективно функціонувати у діапазоні від 800 МГц до 2.7 ГГц, проте впровадження вищих частотних діапазонів вимагає суттєвого вдосконалення апаратної частини терміналів мобільного зв'язку [8]. Крім того, необхідно вдосконалити антенні системи для кінцевих абонентських пристроїв з метою забезпечення їх ефективного функціонування у будь-якому частотному діапазоні від 800 МГц до 300 ГГц.

Ущільнення передавально-приймальних антенних систем MIMO

Однією з перспективних технологій для мереж мобільного зв'язку 5-го покоління є великомасштабні антенні системи MIMO (multiple-input multiple-output, які використовують велику кількість передавальних антен (до кількох сотень) на стороні базової станції, що дає змогу обслуговувати багато користувачів, використовуючи ті ж частотно-часові ресурси [28]. Великомасштабні MIMO системи випромінюють енергію сигналу з вузькою діаграмою спрямованості, що дає змогу суттєво знизити потужність випромінювання. Проте, продуктивність великомасштабних MIMO систем є обмеженою у зв'язку із зонах скінченним розсіюванням сигналу, пов'язаним із особливостями каналу зв'язку [22]. Ступені свободи системи строго визначені обмеженою роздільною здатністю масиву антен. Крім того, проблема оцінки параметрів каналу та попереднього кодування нелінійно ускладнюється при збільшенні кількості антен. Тому, великомасштабні системи MIMO є більш привабливими при часовому мультиплексуванні каналів, при якому пілотні сигнали та зворотній зв'язок про стан каналу не обмежують кількість

передавальних антен. Проте, виникає проблема накладання пілотних сигналів суміжних комірок, у зв'язку із високим коефіцієнтом їхнього повторного використання пов'язаного з малим часом когерентності каналу зв'язку. Це призводить до помилок в оцінці каналу та зниження продуктивності мережі [23]. Гарантування необхідного рознесення для великої кількості антен є дуже громіздким та затратним завданням з практичної точки зору. Тому, пропускна здатність великомасштабних антенних систем є доволі обмеженою. Проте, вищезгадані тенденції до використання вищих частотних діапазонів відкривають нові перспективи для великомасштабних антенних систем за рахунок зменшення їх розмірів і, як наслідок, більш простого та менш затратного розгортання.

Спектральне ущільнення безпровідної опорної транспортної інфраструкури

Незважаючи на те, що ущільнення коміркової інфраструктури забезпечує значне підвищення пропускної здатності в мережі, реальна якість обслуговування абонентів не може покращитись без відповідного вдосконалення опорної транспортної інфраструктури. Є два ключових підходи до вирішення проблеми розгортання опорної транспортної мережі. Перший підхід полягає у прокладанні оптичної кабельної інфраструктури, що забезпечує високу пропускну здатність та малу затримку. Кабельна інфраструктура дозволяє ефективно впроваджувати такі технології як координоване обслуговування, програмно-конфігуровані мережі радіо доступу та мережі C-RAN, інфраструктура малих комірок часто будується у місцях де прокладання кабельної опорної мережі є складним і неоптимальним з практичної точки зору (опорні стовпи, стіни будівель, тощо). Тому, безпровідна транспортна мережа є більш оптимальним рішенням для складно доступних розташувань базових станцій. Безпровідна транспортна мережа використовує опорний вузол агрегації, який під'єднаний до кабельної оптичної мережі, і обслуговує кілька малих комірок. Враховуючи характеристики поширення сигналу, для безпровідних транспортних каналів в умовах непрямої видимості використовують діапазон частот нижче 6 ГГц, в той час як для каналів прямої видимості використовують міліметровий діапазон. Використання безпровідної

транспортної інфраструктури є більш гнучким, проте вимагає значно більшої спектральної ефективності у порівнянні із комірковими мережами. Потенційними рішеннями для підвищення ефективності безпровідної транспортної інфраструктури можна назвати наступні:

- Збільшення часу когерентності каналу зв'язку для того щоб зменшити надлишковість пілотних сигналів, забезпечуючи при цьому досипаній рівень співвідношення сигнал/шум для використання надвисокопозиційних методів модуляції (4096-КАМ і вище).
- Ефективне проектування каналів непрямої видимості для оптимального застосування просторового мультиплексування між опорним передавачем та цільовим приймачем.
- Використання розподілених антенних систем MIMO для просторового мультиплексування між кількома опорними передавачами та кількома опорними приймачами.
- Використання великомасштабних антенних систем у смугах міліметрового діапазону, що забезпечить значний виграш у цільовому діаграмо утворенні, а також динамічне спільне використання спектру між транспортними каналами та каналами доступу.

Впровадження міліметрового діапазону хвиль для транспортної інфраструктури дає змогу досягнути високого значення коефіцієнта просторового мультиплексування (змінна у формулі (1.1)). Крім того, в ряді робіт було розглянуто особливості використання двовимірних антенних систем, які характеризуються гнучкістю у діаграмоутворенні як у вертикальному так і в горизонтальному напрямку, забезпечуючи цільове діаграмоутворення для опорних каналів точок доступу малих комірок.

1.4 Особливості та вимоги до радіоінтерфейсів мереж п'ятого покоління

Нові методи безпровідного доступу та алгоритми розподілу радіоресурсів є необхідними для гетерогенних мереж п'ятого покоління. Обмеження, що стосуються дозволених рівнів потужності сигналу, як в межах, так і за межами номінальної виділеної смуги частот повинні бути враховані в процесі розподілу радіочастотних ресурсів та виборі методу передавання сигналу. Дані обмеження є важливими з точки зору уникнення інтерференції між різними системами радіодоступу. Особливого значення, дані аспекти набувають у системах з агрегацією несучих або гетерогенних мережах мобільного зв'язку, які передбачають співіснування кількох технологій радіодоступу у одній географічній зоні. Дана проблематика була широко досліджена у контексті когнітивних мереж радіодоступу [25-27]. Очевидно, що більш ефективного використання спектру можна досягнути у випадку, коли сигнали більш щільно розміщені у частотному домені. Проте, ущільнення сигналів у частотному домені потребує мінімізації рівня випромінюваної потужності за межами смуги частот, яка виділена для передавання сигналу. Крім того, у системах з непослідовним ортогональним частотним мультиплексуванням (NC-OFDM - Non-contiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing), проблема позасмугового (OOB - Out-of-Band) випромінювання є ще більш вагомою, оскільки необхідно мінімізувати взаємну інтерференцію між «сусідніми» системами радіодоступу [28,29].

У [30] було встановлено вимоги до спектральної густини еквівалентної ізотропної випромінюваної потужності (EIRP - Equivalent Isotropic Radiated Power):

$$P_{OOB} < \max(P_{IB} - A, 84), \qquad (1.3)$$

де P_{OOB} — потужність позасмугового випромінювання, PB — потужність внутрішньосмугового випромінювання, A - коефіцієнт витоку суміжної смуги (від -74 до -54 дБ). Дані вимоги були прийняті Комітетом з електронного зв'язку на Європейській конференції поштового зв'язку та телекомунікацій та запропоновані у якості стандарту ETSI (European Telecommunications Standards Institute) для

безпровідних пристроїв [31].

Схожі вимоги були затверджені Федеральною комісією зв'язку FCC (Federal Communications Commission), де було встановлено ліміт для позасмугового випромінювання на рівні -72.8 дБ у смузі 100 кГц по відношенню до сумарного внутрішньосмугового випромінювання у смузі 6 МГц [32].

Серед факторів, які негативно впливають на рівень позасмугового випромінювання у сучасних системах безпровідного доступу можна виділити два основних [33]:

1. Процес модуляції сигналу, який характерний високим рівнем позасмугового випромінювання у бічних гармоніках сигналу з ортогональним частотним мультиплексуванням OFDM.

2. Нелінійними ефектами, які виникають у прийомопередавачах мобільних пристроїв, підсилювачах та інших компонентах радіочастотної частини терміналів мобільного зв'язку.

Другий фактор суттєво залежить від фізичних параметрів апаратного забезпечення. В ряді досліджень було запропоновано достатньо ефективні рішення для апаратної частини, які дають змогу знизити рівень позасмугового випромінювання до -100 дБм на 100 кГц, навіть для пристроїв які функціонують у смузі 30 МГц [34]. Тому, більш важливим завданням є вдосконалення існуючих методів модуляції сигналу з ортогональним частотним мультиплексуванням з метою зниження рівня позасмугового випромінювання та підвищення енергетичної та спектральної ефективності радіоінтерфейсу гетерогенних мереж мобільного зв'язку.

Існуючі стандарти радіодоступу четвертого покоління використовують технологію множинного доступу з ортогональним частотним мультиплексування OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [35].

З точки зору теорії сигналів це означає, що скалярний добуток між двома сигналами на сусідніх несучих частотах $S_k(t)$ і $S_l(t)$ дорівнює нулю:

$$\langle S_k(t), S_l(t) \rangle = \int_0^T S_k(t) S_l(t) dt = 0, k \neq l, \quad (1.4)$$

де T - період передавання сигналів. За рахунок ортогональності, сигнали на сусідніх піднесучих можуть перекриватись по спектру, не взаємодіючи між собою.

Сигнал з ортогональним частотним мультиплексуванням формується шляхом розбиття широкосмугового по спектру та послідовного в часі інформаційного потоку з швидкістю передавання R (біт/с) на N вузькосмугових по спектру та паралельних у часі потоків з швидкістю передавання *№ії'* (біт/с). У такому випадку, пропускна здатність системи не змінюється оскільки:

$$N \cdot \frac{R}{N} = R, \left[\frac{біт}{с}\right]. \tag{1.5}$$

Такий підхід дає змогу уникнути проблеми міжсимвольної інтерференції між сусідніми по часу символами, шляхом збільшення тривалості імпульсу пропорційно до часової дисперсії каналу зв'язку [36].

Значну роль в енергетичній ефективності безпровідних мереж передавання даних відіграє метод модуляції. Основна мета кожного методу модуляції полягає в забезпеченні високої пропускної здатності, належної якості передавання в умовах зашумленого каналу зв'язку, використовуючи при цьому мінімальну кількість енергії. Одним із найефективніших, за вищезгаданими показниками, методом модуляції в сучасних безпровідних системах є квадратурна модуляція, яка використовується в таких мережах як: LTE, WiMAX, DVB-T (T2), Wi-Fi та інших мережах радіодоступу [37].

Для випадку квадратурно-амплітудної модуляції (QAM - Quadrature Amplitude Modulation) сигнал з ортогональним частотним мультиплексуванням записується наступним чином [37]:

$$s_{OFDM/QAM}(t) = \sum_{k=1}^{N} g_k(t)\left[A_{kI}\cos(\omega kt) - A_{kQ}\sin(\omega kt)\right] \tag{1.6}$$

де $g(t)$ - форма прототипного імпульсу, A, AQ - синфазна та квадратурна амплітуда символу, $rn=2nf$, f - частота піднесучої, k - індекс піднесучої, N - кількість піднесучих OFDM сигналу.

OFDM задовольняє вимоги щодо забезпечення високошвидкісного передавання дискретної інформації по радіоканалах, оскільки в структурі сигналу є особливості, що забезпечують стійкість до завад, які виникають у радіоканалах [38-41]. Висока спектральна ефективність OFDM сигналу дозволяє обмежити смугу частот необхідну для забезпечення необхідної швидкості передавання [18-24]. Використання великої кількості піднесучих частот визначає такі його властивості як стійкість до вузькосмугових завад [15-18] та частотно-селективних завмирань [19-21] внаслідок багатопроменевого поширення хвиль.

Проте, у контексті гетерогенних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, які передбачають когнітивне використання спектру різними технологіями радіодоступу, існуючі підходи до організації радіоканалів є малоефективними та негнучкими з точки зору ступенів вільності для кінцевого абонента. Тому, потрібні нові методи організації когнітивних радіоінтерфейсів, а також нові алгоритми модуляції та мультиплексування сигналів, які б дали змогу забезпечити ефективне функціонування радіоканалів з точки зору енергетичних та спектральних характеристик.

1.5 Основні невирішені проблеми у гетерогенних мережах мобільного зв'язку п'ятого покоління

Зменшення розміру комірок та відповідне збільшення їх кількості на одиницю площі, призводить до того, що абонентські пристрої підлягають більш сильному впливу інтерференційних завад. Інтерференція між макрокоміркою та спільноканальними малими коміками зростає у зв'язку з дисбалансом у загасанні сигналу та випромінюваній потужності різних типів комірок. Це спричиняє суттєву деградацію якості прийнятого сигналу на стороні абонентських пристроїв. У гетерогенних мережах з високою густиною, окрім інтерференції на рівні макрокомірок, виникає інтерференція пов'язана із неоднорідним розташуванням малих комірок, що порушує геометрію мережі та відповідно ускладнює боротьбу з інтерференцією. Це призводить до того, що пропускна здатність мережі вцілому є істотно обмежена саме інтерференцією між спільноканальними комірками, а не

потужністю передавання базових станцій. Тому, для ефективного впровадження гетерогенних мереж, найважливішим аспектом є подолання всіх видів інтерференції.

Види інтерференції у гетерогенних мережах мобільного зв'язку

Сучасні безпровідні пристрої оснащені кількома радіоінтерфейсами, такими як GSM, WCDMA, LTE, Wi-Fi та Bluetooth, одночасне використання яких є важливим аспектом у гетерогенних мережах, які підтримують різні технології радіодоступу [22]. Враховуючи близькість передавачів, які функціонують у спільних або суміжних частотних смугах, інтерференція від передавача може бути за потужністю вищою від потужності корисного сигналу на сусідньому приймачі. Наприклад канали LTE у діапазонах 2300-2400 МГц, 2496-2690 МГц та 2500-2570 МГц є безпосередньо сусідніми до смуг Wi-Fi та Bluetooth в діапазоні 2.4 ГГц. Це спричиняє суттєвий рівень взаємної інтерференції незважаючи на високоефективні смугові фільтри.

Крім того, ряд каналів LTE в діапазоні 800 МГц може взаємно інтерферувати із діапазоном 2.4 ГГц через третю гармоніку. Це може спричинити проблему електромагнітної сумісності та привести до деградації обох каналів. Схожа проблема є і з діапазоном 5 ГГц, який використовується в стандарті Wi-Fi.

В ряді робіт було запропоновано методи подолання крос-інтерференції між радіоінтерфейсами шляхом чіткого координування ресурсів в часовій, частотній або енергетичній площині [23]. Проте, це часто призводить до компромісів у продуктивності кожного радіоінтерфейсу в зв'язку із обмеженим використанням радіоресурсів. Більш ефективним методом є використання інформації про інтерферуючий сигнал, що дає змогу використовувати активну компенсацію інтерференції [24]. Крім того, такий підхід дає змогу забезпечити дуплексний зв'язок в одному частотному каналі одночасно використовуючи його як для передавання так і для приймання інформації [25]. Проте, високий рівень крос-інтерференції перешкоджає ефективній компенсації інтерференції, що обмежує ефективність даного методу.

Однією із найбільш важливих технологій для забезпечення ефективного

функціонування гетерогенних мереж є технологія координації та компенсації інтерференції ICIC (Intercell Interference Cordination/Cancellation) [26]. Для того щоб забезпечити ефективне детектування і подальше обслуговування абонента у піко-комірці, яка випромінює значно нижчий рівень потужності ніж ближня макрокомірка, було запропоновано часове розподілення ресурсів для мереж LTE. У такому випадку, попередньо визначені підкадри періодично звільняються макрокомірками, за винятком контрольних та опорних сигналів, що дає змогу малим коміркам використовувати дані ресурси для цільових користувачів, з меншим рівнем інтерференційних завад. Такі підкадри отримали назву майже порожніх підкадрів ABS (Almost Blank Subframe) [27].

Крім того, сучасні мобільні приймачі з функцією компенсації інтерференції дозволяють значний гістерезис при хендовері (9 дБ і вище), що дає змогу реєструватися у сусідніх малих комірках, навіть якщо їх рівень сигналу є дещо нижчим ніж у макрокомірці [28]. В результаті, малі комірки можуть збільшувати покриття і обслуговувати більшу частину абонентського трафіку, що суттєво розвантажує макрокомірку. Часове розділення ресурсів дозволяє використовувати спільний частотний діапазон для макрокомірки та малих комірок у її межах, уникаючи при цьому неефективного розподілу спектру. Іншим варіантом подолання інтерференції у гетерогенних мережах є технологія багатопотоковості [29]. Дана технологія дозволяє мобільним абонентам отримувати кілька потоків у низхідному каналі від кількох комірок.

Враховуючи нерівномірний розподіл трафіку комірки та його просторово-часову варіацію, багатопотоковість дає змогу оптимально балансувати навантаження і підвищити ефективність мережі шляхом додаткового рознесення на приймальній стороні. Це, в свою чергу, знижує рівень інтерференції у каналі.

Підвищення ефективності радіоінтерфейсів у гетерогенних мережах мобільного зв'язку

В умовах гетерогенних мереж з високою неоднорідністю радіоканалів, пов'язаною із різним розміром комірок, а також наявністю підмереж на основі D2D взаємодії, виникає проблема вибору ефективних методів передавання даних

у радіоканалах. Існуючі методи розроблялись для мереж з відносно великим розміром комірок та з урахуванням великої часової дисперсії каналів зв'язку. Дані методи використовують захисні інтервали для того щоб уникнути між символьної інтерференції, що погіршує спектральну ефективність системи. В гетерогенних мережах, часова дисперсія каналу зв'язку суттєво впливає лише для макрокомірок, в той час як для мікро-, піко- та фемтокомірок, вплив багатопроменевого поширення хвиль на часове запізнення сигналу є менш відчутним. Тому, використання захисного інтервалу у малих комірках є недоцільним з точки зору спектральної ефективності. З іншого боку, більш вагомою проблемою постає міжканальна інтерференція за рахунок більшої кількості користувачів і відповідного більш щільного розташування абонентських пристроїв, а також наявністю «плаваючих» D2D доменів, які призводять до високої нестаціонарності каналів зв'язку. Це вимагає більш точної синхронізації між передавальною та приймальною станцією для забезпечення умови ортогональності між піднесучими частотами. Крім того, навіть при збереженні ортогональності, у сучасних системах виникає проблема десенсибілізації, що суттєво ускладнює процес обслуговування абонентів розташованих близько один до одного [30]. Десенсибілізація - різновид перехідних завад (взаємних впливів) між сусідніми несучими частотами, при якому сигнал з високою потужністю для одного пристрою, спричиняє надто високий рівень завад для іншого пристрою, який працює у сусідній смузі частот, що унеможливлює демодуляцію сигналу цим пристроєм. Крім того, використання спектральної агрегації різних діапазонів, може спричиняти проблему інтерференції третьої гармоніки, яка виникає між смугами, несучі частоти яких відрізняються за значенням у три рази. В існуючих системах дані проблеми не є вирішеними, що потребує вдосконалення існуючих методів передавання сигналів у радіоканалах. Зокрема, важливо розробити нові методи модуляції сигналів з урахуванням частотно-часових параметрів радіоканалу, з метою вибору ефективних параметрів сигналу для конкретних умов у гетерогенній мережі мобільного зв'язку.

Управління навантаженням та проблема хендоверу у багаторівневих

гетерогенних мережах

Гетерогенні мережі характерні більш частими хендоверами у зв'язку із малим радіусом комірок. Наприклад, при діаметрі комірки приблизно 100 метрів і швидкості руху абонента 30 км/год, хендовер буде здійснюватись через кожні кілька секунд. При великій кількості абонентів та їх відносно високій мобільності буде спостерігатися висока варіація навантаження між комірками. Недавні дослідження мереж LTE показали, що навіть у мережах з невисокою щільністю спостерігаються часті хендовери при використанні спільного частотного діапазону [31]. В [32] досліджено, що ефективність хендоверу в гетерогенних мережах не є настільки високою як у макрокоміркових структурах. Асиметрія покриття низхідного та висхідного каналу у гетерогенних мережах також ускладнює механізм керування мобільністю [33]. Покриття низхідного каналу для макрокомірки є значно більшим від покриття малих комірок, у зв'язку із вищою потужністю передавання. Проте, це твердження не зберігається для висхідного каналу, оскільки в даному випадку передавачем виступає мобільний пристрій. Якщо хендовер базується лише на потужності прийнятого сигналу, одночасне керування мобільністю у висхідному та низхідному каналі є доволі складним завданням.

Для забезпечення швидкого хендоверу лише у разі крайньої необхідності, було запропоновано кілька методів керування мобільністю. Простим рішенням є групування абонентів за їх мобільністю. В такому випадку, відносно стаціонарні абоненти обслуговуються малими комірками, в той час як абоненти з високою мобільністю обслуговуються макрокоміркою [34]. Більш ефективний метод керування мобільністю передбачає формування віртуальних комірок шляхом кластеризації декількох малих комірок [35]. Мобільні абоненти можуть детектувати кластер комірок як окрему фізичну комірку, що дозволяє розширити межі хендоверу межами віртуальної комірки. Альтернативним підходом є адаптивний хендовер, на основі гістерезисного рівня, який змінюється в залежності від швидкості абонента [36]. Крім того, взаємодія між сусідніми комірками дозволяє оптимальніше керувати хендовером між кластерами малих

комірок та макрокоміркою.

Проблема планування та аналізу топологічно складних гетерогенних мереж мобільного зв'язку

Є два підходи до планування та моделювання коміркових мереж мобільного зв'язку: детермінована та стохастична геометрія. Детермінована геометрія широко використовується протягом тривалого часу для планування покриття коміркових мереж GSM (Global System for Mobile Communications), UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) та LTE (Long Term Evolution) [37]. Дані методи є ефективними для однорідної топології мережі із фіксованим розміром комірок із врахуванням інтерференції між спільночастотними комірками. Проте, у міських умовах із високою густиною навантаження та мобільністю абонентів, ефективність детермінованої геометрії стрімко спадає у зв'язку з великою флуктуацією навантаження комірок та щільною забудовою, що негативно впливає на геометрію мережі.

Для гомогенних однорівневих мереж типовою моделлю є двовимірна гексагональна сітка, яка широко використовується для спрощеного моделювання у великому географічному масштабі. На рис. 1.2 представлено існуючі моделі для планування коміркових структур мереж мобільного зв'язку для кругових (0-тип) та трьох-секторних-тип) сайтів, та зображено існуючі методи повторного використання частот у коміркових структурах.

Проте, в гетерогенних мережах середні потужності передавання, висоти антен базових станцій, розсіювання в каналі, пропускна здатність та густина базових станцій є різними для різних шарів мережі, і тому традиційні гексагональні моделі є далекими від реальності [38]. Тому, необхідно розробити нові моделі для планування та аналізу багаторівневих гетерогенних мереж. Крім того, необхідно розробити нові моделі трафіку для аналізу перевантаження в мережі, розвантаження макрокомірок та хендоверу у гетерогенних мережах.

Стохастична геометрія є перспективним рішенням для ймовірнісного моделювання випадкових топологій гетерогенних мереж, щоб забезпечити прогнозування ймовірнісних параметрів таких як співвідношення сигналу до

шуму та інтерференції), ймовірність обслуговування та розподіл навантаження [39].

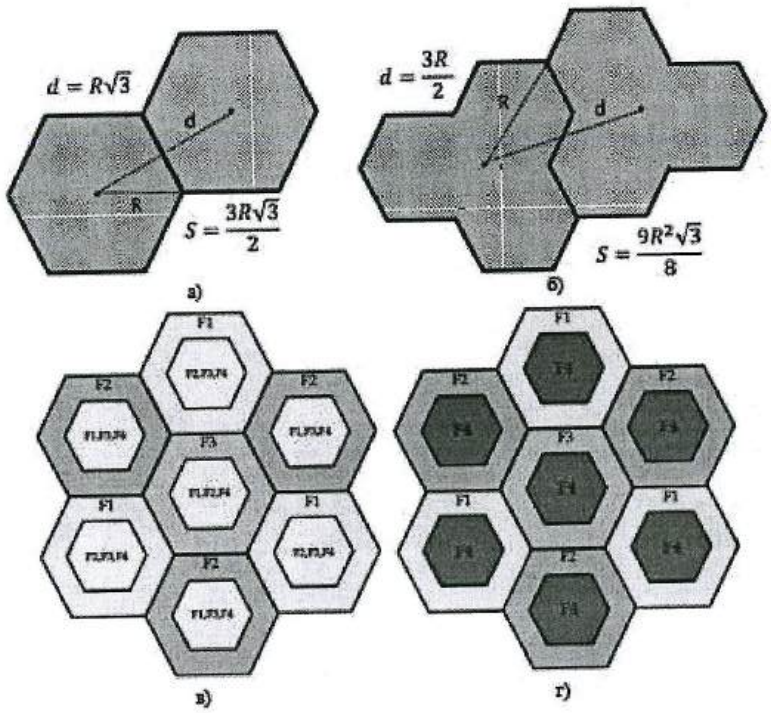


Рис.1.2 Методи планування коміркових структур для кругових - а), трьох секторних сайтів - б) та методи повторного використання частот з м'яким - в), і частковим повторним використання - г)

Як наслідок, гетерогенні мережі часто моделюються як повністю стохастична система. Для моделювання *K*-рівневої гетерогенної мережі, передавачі малих комірок випадково розташовуються за стохастичним процесом [40-42]. Для моделювання *K*-рівневих високоущільнених мереж, позиції малих комірок можуть бути визначені стохастичним процесом, оскільки більшість малих комірок впроваджені без належного планування. Найбільш широко використовуваним методом для стохастичного моделювання є Пуассонівський точковий процес, який забезпечує відносно точну аналітичну модель для аналізу топології гетерогенних мереж [43]. Для підвищення точності планування топології гетерогенних мереж було запропоновано параметричний точковий процес, який обмежує мінімальну відстань між сусідніми базовими станціями

малих комірок [44]. Параметричний точковий процес є різновидом Пуассонівського точкового процесу із забезпеченням необхідної рознесеності базових станцій. Розподілений та централізований контроль мінімальної відстані між базовими станціями дозволяють підлаштувати розташування базових станцій для забезпечення високого значення ймовірності покриття, пропускної здатності та ефективного балансування навантаження.

Найпоширенішими методами для моделювання гетерогенних коміркових мереж є:

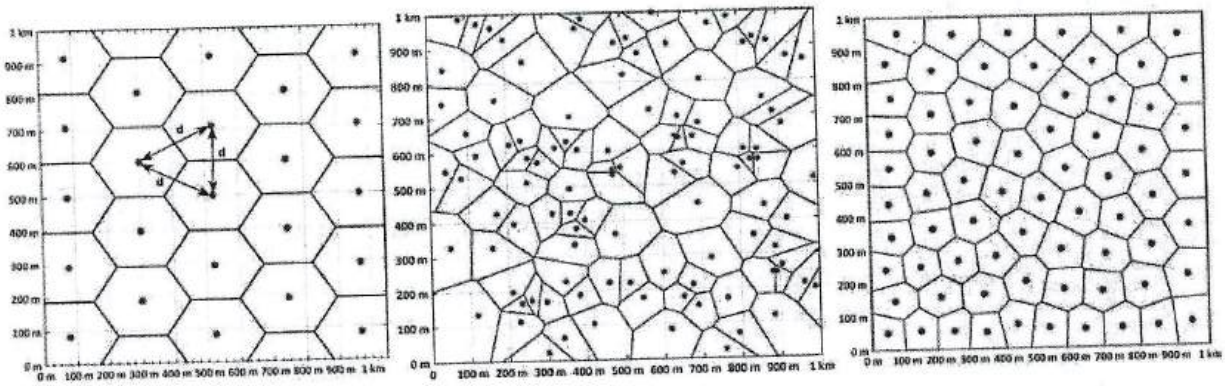
- *Пуассонівський точковий процес.* Простий двовимірний точковий процес, який використовується для моделювання позицій базових станцій для однорівневої та *K*-рівневої коміркової мережі за Пуассонівським розподілом. Пуассонівський точковий процес також використовується для моделювання позицій користувачів та розподілу SINR у комірці.
- *Параметричний точковий процес.* Модифікація Пуассонівського точкового процесу з обмеженням мінімальної відстані між вузлами. Ця модель є найбільш прийнятною для планування позицій базових станцій в межах одного рівня гетерогенної мережі із забезпеченням більш точного планування позицій базових станцій. [4].
- *Теселяція Вороного.* Найбільш прийнятний підхід для моделювання випадкових зон покриття малих комірок у щільному міському середовищі. Теселяція використовується для заповнення скінченної двовимірної території без перекривань. З геометричної точки зору теселяція проводиться шляхом проведення еквідистантних ліній між усіма парами сусідніх точок, за умови їх перпендикулярності до прямої проведеної через даними точками [9].

Як показано на рис.1.3.в параметричний точковий процес забезпечує більш рівномірне розташування базових станцій і є проміжним варіантом між гексагональною сіткою (рис.1.3.а) та Пуасонівським точковим процесом (рис.1.3.б). В ряді робіт було підтверджено переваги параметричного точкового процесу у ймовірності обслуговування та балансуванні навантаження [15-18].

Проте, наразі немає оптимальних моделей, які б дали змогу аналізувати

параметри багаторівневих гетерогенних мереж. Тому, подальші дослідження в даній області є необхідними для того щоб знайти ефективну модель для планування та аналізу гетерогенних мереж.

На практиці, розгортання мережі в умовах міста із щільною забудовою ускладнюється за рахунок неоднорідності абонентського навантаження та нерівномірного загасання сигналу, що порушує фіксовану геометричну структуру. Встановлення базових станцій за гексагональним шаблоном не дозволяє розрахувати оптимальний розмір комірок для забезпечення вимог до пропускної здатності. Тому, стохастична геометрія є більш прийнятним підходом до планування коміркових структур з випадковими параметрами.



а) б) в)

Рис. 1.3. Моделі планування структур коміркових мереж: гексагональна сітка - а), Пуассонівський точковий процес - б) та параметричний точковий процес - в)

Проте, при плануванні багаторівневих структур гетерогенних мереж мобільного зв'язку моделі на основі стохастичної геометрії не дають змогу оцінити взаємозв'язок між різними рівнями гетерогенної мережної структури. Тому подальші дослідження в даній галузі є необхідними для того щоб розробити нові методи планування складних багаторівневих коміркових структур гетерогенних мереж мобільного зв'язку.

2 МЕТОДИ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОНВЕРГЕНТНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА СПЕКТРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРАХ

2.1 Конвергенція гетерогенних мереж з використанням технології міжтермінальної взаємодії

Моделі інтеграції міжтермінальних мереж у коміркову інфраструктуру

Конвергенція гетерогенних мереж з використанням технології міжтермінальної взаємодії, дає змогу підвищити спектральну ефективність за рахунок більш оптимального передавання інформаційних потоків від базової станції до абонентських пристроїв. Дана технологія передбачає, що тільки обмежене число мобільних терміналів буде зв'язуватися безпосередньо з базовою станцією (БС). Ці термінали називаються вузлами з прямим підключенням (ВПП). Інші вузли підключаються до ВПП як до точки доступу. Такі термінали називаються вузлами з опосередкованим підключенням (ВОП). Кожен термінал може працювати як ВПП або ВОП в залежності від поточних умов у каналі зв'язку. Основна відмінність цього підходу від існуючих рішень когнітивного радіо полягає у принципах реалізації радіоінтерфейсу. Сучасні когнітивні мережі використовують неліцензований спектр технології Wi-Fi та Bluetooth для зв'язку між терміналами. Проте, цього недостатньо для нових мобільних мереж з високою пропускною здатністю у зв'язку із обмеженою кількістю доступних каналів. Тому, припускаємо альтернативний розв'язок проблеми, який передбачає спільне використання спектрального діапазону для міжтермінального обміну та зв'язку між ВПП та БС [7]. ВПП безпосередньо отримує частотні ресурси від базових станцій. Абонент, який є фактичним власником даного ВПП використовує тільки частину інформаційного потоку для свого сеансу зв'язку. Решта інформації проходить транзитом через ВПП до всіх ВОП, використовуючи інші спектральні ресурси. В такому випадку використовується адаптивний метод повторного використання частотних ресурсів для того щоб уникнути інтерференції, покращити завадозахищеність та забезпечити належний рівень

якості сприйняття послуг. Цей метод передбачає конвертування несучих частот у ВПП, для того щоб відокремити спектр передавання сигналів з базової станції до ВПП, від спектру який використовується в міжтермінальній мережі. Архітектуру запропонованої когнітивної системи зображено на рис.2.1

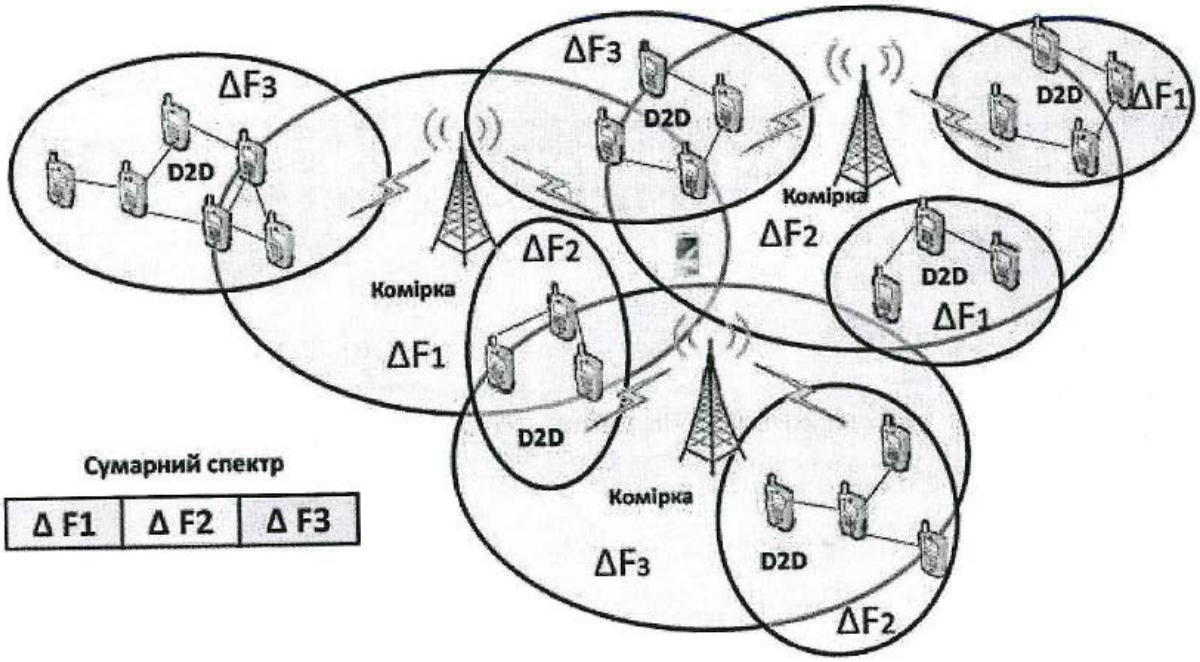


Рис.2.1. Архітектура конвергентної гетерогенної мережі на основі міжтермінальної взаємодії

Існуючі D2D мережі зазвичай використовують мережні протоколи Wi-Fi або Bluetooth. Проте, протоколи Wi-Fi та Bluetooth забезпечують набагато меншу пропускну здатність, ніж стандарт LTE-A. Для того, щоб підтримувати якість комунікації користувачів, незалежно від їх розташування, пропонується новий підхід до розподілення пропускної здатності рівномірно в межах комірки. В даному випадку для безпровідного доступу між множиною вузлів утворюється мережа, в якій один з вузлів виступає в ролі точки доступу. Цей вузол вибирається за критерієм якості каналу зв'язку та максимальної кількості сусідніх вузлів [7]. Ця модель є аналогічною до моделі класичної гетерогенної мережі з відмінністю у тому, що малі комірки є динамічними і точкою доступу в них є один, або декілька терміналів. ВОП приєднані до ВПП чи до інших ВОП за

критерієм максимального відношення сигнал/шум. Таким чином, D2D знижує навантаження на базову станцію та підвищує продуктивність мережі. Запропоновано чотири базових топології для конвергенції D2D та LTE-A, які показані на рис. 2.2 [39].

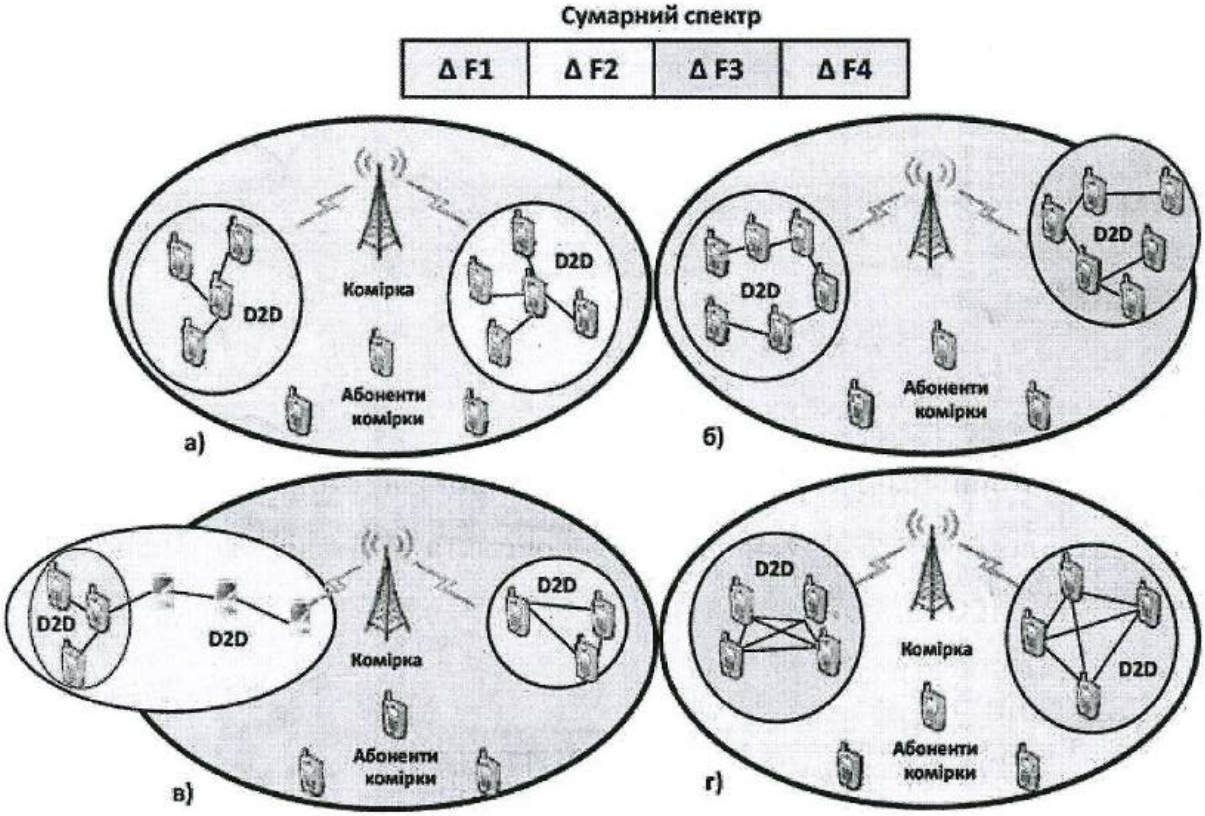


Рис. 2.2. Базові топології D2D мереж: точка доступу на основі топології «зірка» - а), деревоподібна топологія D2D - б), гібридна топологія D2D - в) та повнозв'язна топологія D2D - г)

Найпростішою архітектурою є точка доступу на основі конвергенції D2D і стільникової мережі, яка використовується в існуючих системах. У такому випадку головний вузол (ВПП) вибраний за критеріями забезпечення максимальної продуктивності та рівня заряду акумулятора. Головний пристрій створює мережу D2D із зіркоподібною топологією, до якої підключаються усі інші користувачі. При такій топології, один ВПП використовує всі стільникові ресурси та розділяє їх з іншими пристроями D2D. Однак, цей сценарій є ненадійним, оскільки один вузол обробляє усі запити, що збільшує ймовірність його перевантаження. Іншим варіантом є використання послідовної D2D

топології, з використанням багаторангових шляхів (рис. 2.2.б). У цьому випадку керуючий пристрій підключає тільки обмежену кількість пристроїв. Крім того, кожен пристрій може бути вторинним головним вузлом, який може забезпечити доступ іншим мобільним пристроям. Дана топологія дає змогу балансувати трафік між користувачами, керуючи потоками даних у ВПП. Проте, така мережа теж є ненадійною, оскільки відмова одного вузла призводить до втрати зв'язку на всіх решта вузлах. Третя топологія є гібридною з двох перших, як показано на рис. 2.2.в. Дана топологія припускає, що потоки даних можуть бути розподілені відповідно до типу користувачів сервісу. Найбільш надійною є повнозв'язна топологія (рис.2.2.г), яка дає змогу використовувати багатошляхову маршрутизацію для передавання інформаційних потоків через D2D мережі. Крім того, така топологія істотно відрізняється від попередніх тим, що всі D2D пристрої можуть бути одночасно як споживачами так і провайдерами зв'язку, тим самим збільшуючи надійність сеансу.

Припускаємо, що стрімкий розвиток обчислювальної потужності смартфонів та планшетів, дасть змогу впровадити повнозв'зну топологію D2D мережі, для досягнення найвищої продуктивності мережі. Для того щоб у повній мірі вирішити проблему конвергенції у майбутніх мережах необхідно задовольнити ряд вимог. По-перше, виробники мобільних пристроїв повинні суттєво підвищити їх комунікаційні та обчислювальні можливості, для того щоб забезпечити складні алгоритми управління потоками та обробки сигналів. Крім того, ресурс автономної роботи таких пристроїв повинен бути значно вищим, оскільки пристрої стануть більш енергозатратними. По-друге, необхідно розробити та стандартизувати нові протоколи для взаємодії пристроїв у D2D мережах. Третє завдання полягає у вдосконаленні існуючих методів маршрутизації інформаційних потоків для ефективного функціонування гетерогенних конвергентних мереж.

Порівняння чотирьох можливих варіантів реалізації конвергентної мережі наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняння чотирьох різних сценаріїв впровадження D2D

Сценарій конвергенції	**Переваги**	**Недоліки**
Точка доступу на основі топології «зірка»	• просте розгортання • просте управління зв'язком • динамічне завантаження каналу	• можливість перевантаження • відсутність механізмів контролю якості • низька надійність
Деревоподібна топологія D2D	• балансування трафіку • багаторангові маршрути • можливість простого контролю якості	• тільки статичні маршрути • низька надійність • низький коефіцієнт використання каналу
Гібридна топологія D2D	• вільне балансування трафіку • багатоланкові маршрути • динамічне завантаження каналу	• складне розгортання • відносно низька надійність • тільки статичні маршрути
Повнозв'язна топологія D2D	• контроль трафіку • точний контроль якості • динамічні алгоритми багаторангової маршрутизації • висока надійність	• складне розгортання • складне управління мережею • складні методи маршрутизації • високий рівень інтерференції у мережі

Геометрична модель конвергенції міжтермінальних мереж у межах комірки

Розглянемо випадок коли *N* вузлів рівномірно розподілені у круглій комірці з радіусом *R*. При N, середня відстань від вузла до базової стації визначається шляхом зважування усіх радіусів та ділення їх суми на суму ваг цих радіусів:

$$E(R)=\frac{\int_0^R f(r)\cdot r\cdot dr}{\int_0^R f(r)\cdot dr}, \qquad (2.1)$$

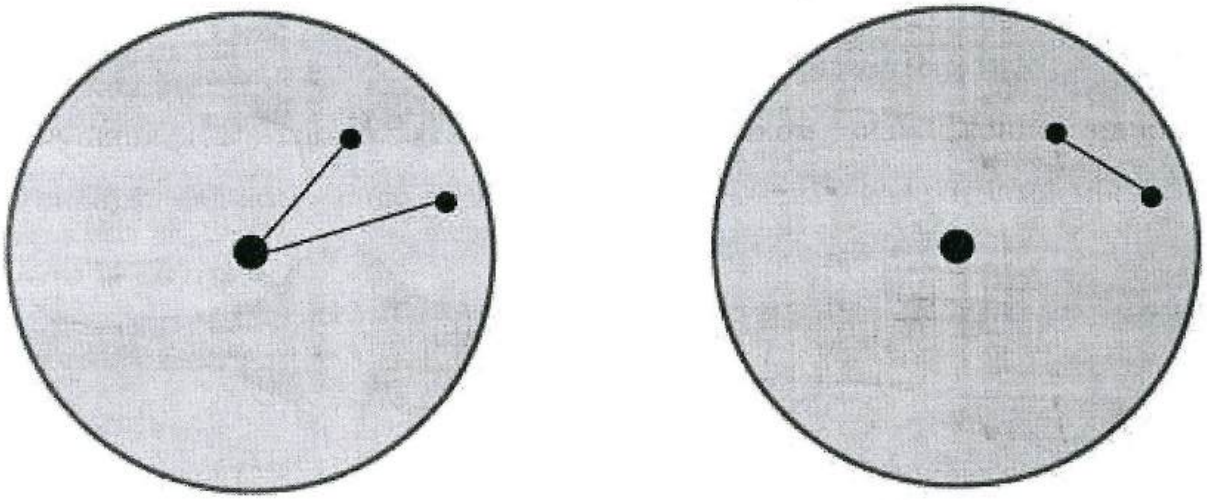
де *(г)* - вагова функція, яка записується як:

$$f(r)=2\pi r,\ 0<r<R. \tag{2.2}$$

Функція (2.1) зважує кожен радіус, шляхом знаходження відповідної довжини кола, яка йому відповідає. Підставляючи (2.2) у (2.1) отримаємо:

$$E(R)=\frac{\int_0^R 2\pi r^2 dr}{\int_0^R 2\pi r dr}=\frac{\frac{2}{3}\pi r^3\Big|_0^R}{\pi r^2\Big|_0^R}=\frac{2R}{3}, \tag{2.3}$$

Відстань у (2.3) є середньою відстанню між випадковим абонентським пристроєм та базової станції комірки (рис. 2.3.а). Канали D2D в свою чергу створюються без участі базової станції, як показано на рис. 2.3.б.



а) б)

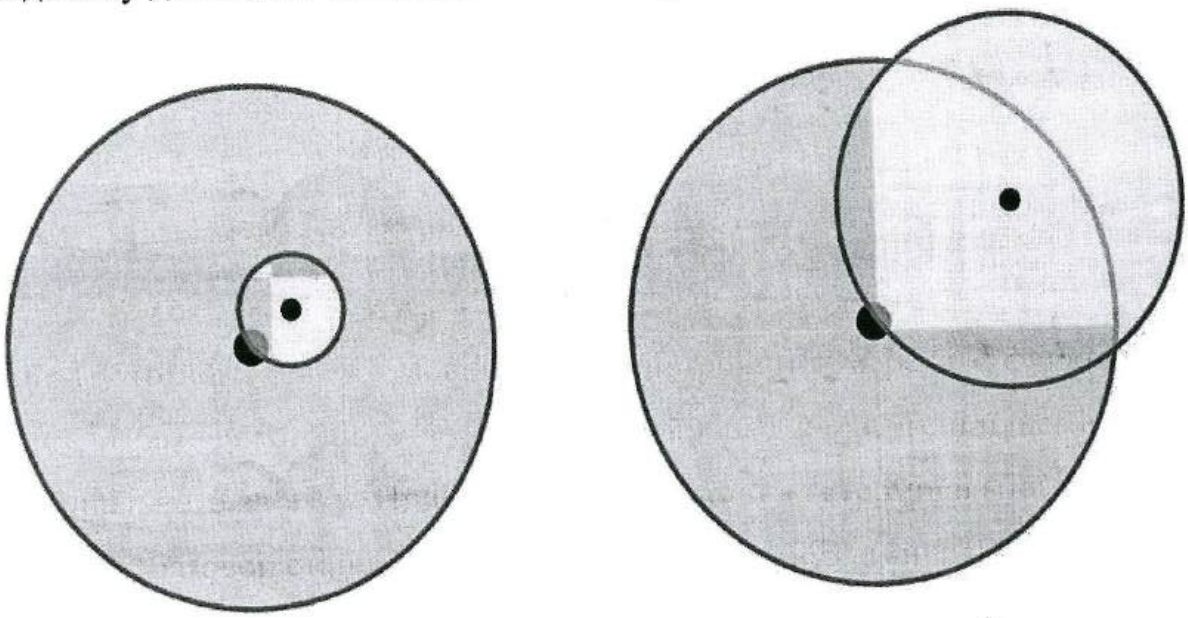
Рис. 2.3. Схематичне зображення відстаней між базовою станцією та абонентами - а) та між двома абонентами - б)

Середня відстань між двома випадковими вузлами в межах одного кола з радіусом *Я* визначається як [15]:

$$E(r)=\frac{128R}{45\pi}\approx 0.954R. \tag{2.4}$$

З (2.4) випливає, що середня відстань між двома пристроями у міжтермінальній мережі залежить від відстані цієї мережі до коміркової базової

станції. Тобто відстань між довільними пристроями в мережі є функцією від їх відстані до базової станції, що ускладнює процес конвергенції коміркового та міжтермінального зв'язку. При збільшенні відстані міжтермінальної мережі (D2D домену) від базової станції середня відстань між вузлами в D2D домені буде зростати. Взаємозв'язок середньої відстані між вузлами у D2D домені від відстані цього домену до базової станції показаний на рис. 2.4.



а) б)

Рис. 2.4. Межі D2D домену в залежності від відстані до базової станції при розташуванні абонента поблизу базової станції - а) та на межі дії комірки - б)

Як показано на рис. 2.4 кращі можливості для D2D зв'язку виникають при збільшенні користувачів від центру комірки. Найпростішим варіантом для міжтермінального зв'язку є вибір найкоротшої відстані між вузлами. В такому випадку максимальна дальність таких каналів є меншою від *R*. При відстані більше від *R*, пріоритетним каналом стає канал до базової станції.

В реальних умовах, рішення про перемикання локальних сеансів зв'язку з каналів коміркового зв'язку на канали D2D залежить від поточних умов у системі. Враховуючи обмежені енергетичні ресурси абонентських пристроїв, важливим аспектом при виборі способу передавання є споживана потужність та енергетична ефективність. При прийнятті рішення про перемикання абонента, який

обслуговується комірковою базовою станцією на обслуговування через D2D канал є характеристики каналів зв'язку між ними.

Іншим важливим параметром є тип передаваного трафіку. Зокрема, для коротких та нечастих коротких повідомлень використання D2D не дає відчутних переваг, оскільки обсяг сигнальної інформації для узгодженого передавання даних є співмірним з обсягом передаваного трафіку. З іншого боку для передавання великих обсягів даних протягом тривалого часу, перенаправлення потоку даних з коміркового зв'язку до міжтермінального дає змогу суттєво розвантажити базову станцію за рахунок зменшення кількості одночасних зв'язків на стороні базової станції.

Проте, наявність великої кількості міжтермінальних сеансів зв'язку близько один до одного, може спричиняти суттєвий рівень інтерференції між ними, що унеможливлює їх ефективне функціонування. При достатній рознесеності доменів міжтермінальних мереж інтерференція послаблюється за рахунок збільшення шляху поширення інтерферуючого сигналу і, як наслідок, його великого загасання.

Тому, для подальшої ефективної конвергенції технологій коміркового та міжтермінального зв'язку необхідно враховувати моделі поширення сигналу у радіоканалах між базовою станцією та абонентським пристроями та каналах між самими абонентськими пристроями, що дасть змогу ефективно визначати необхідне рознесення D2D доменів для забезпечення вимог до інтерференції у каналах зв'язку.

Узагальнимо модель для довільної кількості пристроїв у мережі, задовольняючи умову мінімальної відстані між ними d_{mn}. У такому випадку, загальну структуру мережі можна представити як гексагональну сітку сформовану на основі рівносторонніх трикутників зі стороною d_{mn}, як показано на рис. 2.5.

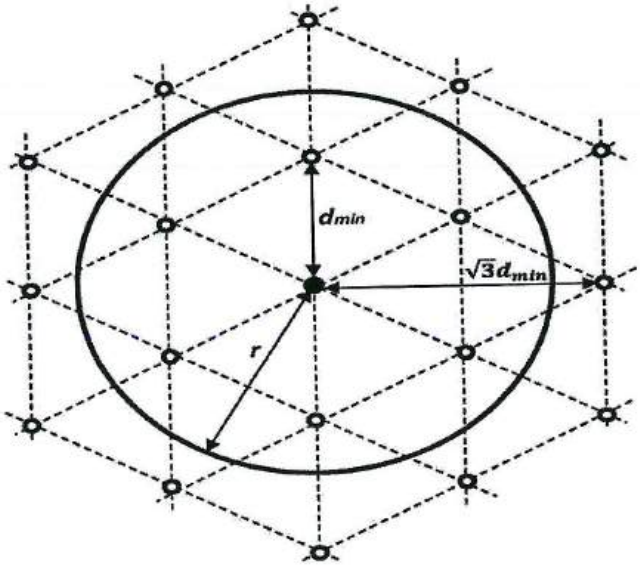


Рис. 2.5. Гексагональне представлення розподілу пристроїв у мережі при забезпеченні мінімальної відстані між вузлами

Найгіршим з точки зору інтерференції є випадок, коли вузол в центрі працює в режимі приймання даних, а усі решта вузли передають дані. Як можна побачити з рис. 2.5, при забезпеченні мінімальної відстані між сусідніми вузлами, інтерферуючі пристрої розташовані за гексагональною структурою. Відповідно, по 6 інтерферуючих пристроїв для кожного шестикутника. Для того щоб визначити кількість інтерферуючих вузлів, необхідно визначити кількість шестикутників, які вписуються у коло з радіусом *г*. Варто зазначити, що у такому варіанті конвергенції усі пристрої, які не задовільняють умову мінімального рознесення, обслуговуються комірковою інфраструктрою мережі мобільного зв'язку.

Згідно класичної геометрії, довжина ребра шестикутника дорівнює відстані від його вершини до центру кола, описаного навколо даного шестикутника. Відповідно, довжини ребер парних та непарних шестикутників можна визначити за наступним співвідношенням:

$$\upsilon_h = \begin{cases} \frac{h+1}{2} d_{\min}, & \text{при непарному } h \\ \frac{h}{2}\sqrt{3} d_{\min}, & \text{при парному } h \end{cases}. \qquad (2.5)$$

Схематично парні та непарні шестикутники зображені на рис. 2.6.

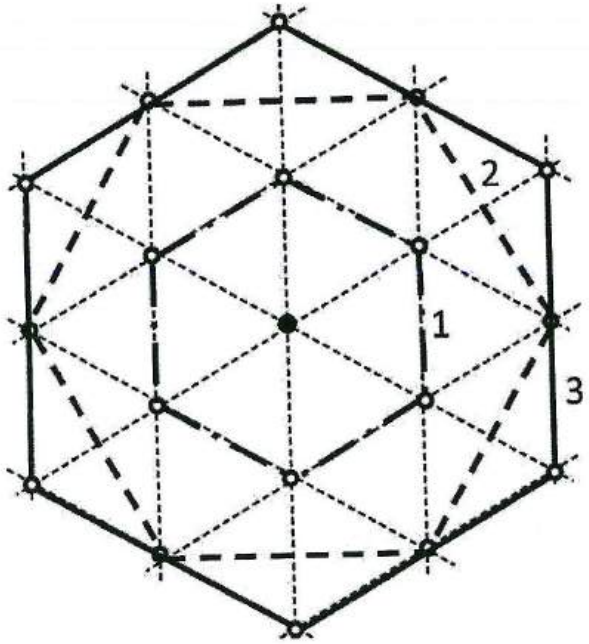


Рис. 2.6. Схематичне зображення парних та непарних шестикутників для визначення інтерферуючих вузлів

Кількість шестикутників, які вписуються у комірку з радіусом *г*, при забезпеченні умови мінімального рознесення пристроїв d_{mln}, визначається як сума усіх парних *г \3cI$_{ИШ}$,* та непарних *г/гі.$_{min}$* шестикутників. Відповідно, максимальна кількість інтерферуючих вузлів згідно із геометричною моделлю (рис. 2.5) розраховується наступним чином:

$$N = 6\left\lfloor \frac{r}{d_{\min}} \right\rfloor + 6\left\lfloor \frac{r}{\sqrt{3}d_{\min}} \right\rfloor. \tag{2.6}$$

При умові, що усі вузли передають із максимальною потужністю P_{Tmax}, верхня межа потужності інтерферуючого сигналу, який отримується центральним вузлом може бути розрахована за наступною формулою:

$$P_{I_{max}} = \sum_{i=1}^{N_{непарних}} \frac{P_{T\,max}}{PL\left(d_{N_{непарних}\,i}\right)} + \sum_{i=1}^{N_{парних}} \frac{P_{T\,max}}{PL\left(d_{N_{парних}\,i}\right)}, \tag{2.7}$$

де *PL(d)* - втрати потужності сигналу при поширенні у вільному просторі, *непарних, гарних* — сумарна кількість вузлів у непарних та парних шестикутниках, відповідно:

$$N_{непарних} = 6\left\lfloor \frac{r}{d_{\min}} \right\rfloor, N_{парних} = 6\left\lfloor \frac{r}{\sqrt{3}d_{\min}} \right\rfloor. \quad (2.8)$$

Як зазначено вище, відстань між інтерферуючими вузлами до центрального вузла визначається як довжина ребра шестикутника на вершині якого розташований даний вузол.

Варто зазначити, що у найгіршому випадку необхідне значення *SINR* може не задовольнятись для деяких окремих вузлів. Проте, на практиці такі випадки є нечастими, оскільки більшість вузлів не будуть передавати дані з максимальною потужністю і розташування вузлів не буде таким щільним як на рисунку 2.4.

Енергетична модель конвергенції міжтермінальних мереж з комірковими

Загасання сигналу - це втрата потужності сигналу при поширенні його у вільному просторі. Моделі поширення сигналу дають змогу оцінити загасання сигналу у каналі зв'язку як функцію від відстані між передавальною та приймальною антеною та інших параметрів. Для даного дослідження ми використовуємо модель поширення на основі логарифмічної відстані, яка дає змогу оцінити поширення сигналу у зонах з високою густиною абонентського навантаження [16]. Дана модель широко використовувалась у різних дослідженнях, і характерна простотою та достатньою точністю відтворення реального загасання сигналу у каналі зв'язку. Розподіл та планування спектральних ресурсів

Переважна більшість систем мобільного зв'язку використовують частотний дуплекс (FDD - Frequency Division Duplex) для розділення висхідного та низхідного каналу. У ряді випадків, може використовуватись часовий дуплекс (TDD - Time Division Duplex). У запропонованій моделі конвергенції ми припускаємо використання як часового так і частотного дуплексу. Враховуючи особливості конвергентної мережі, D2D можуть використовувати як часовий так і частотний дуплекси розділення каналів при тому, що коміркова інфраструктура повинна функціонувати без суттєвих змін у методах розділення висхідного та низхідного каналу. Цього можна досягнути шляхом виділення необхідних частотно-часових ресурсів для висхідного та низхідного каналів. На рис. 2.10

показано варіанти взаємодії абонентських пристроїв у висхідному та низхідному каналі.

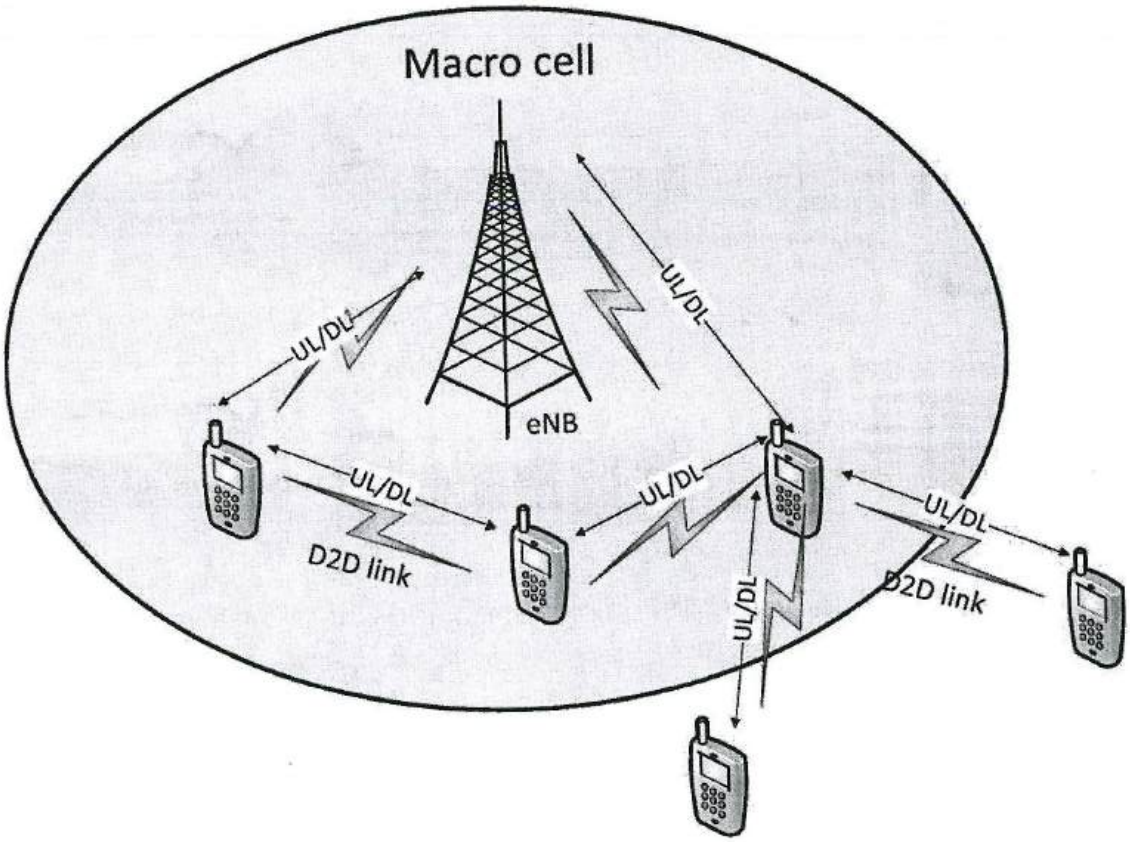


Рис. 2.10. Організація висхідних та низхідних каналів у конвергентній гетерогенній мережі

Як показано на рис. 2.10, мобільні пристрої у конвергентній мережі мають змогу використовувати як коміркову інфраструктуру так і D2D з'єднання. Причому, один пристрій одночасно може використовувати коміркову інфраструктуру для низхідного каналу та D2D канал для висхідного каналу, або навпаки. Усі можливі варіанти розподілу спектральних ресурсів представлені на рис. 2.11 [5, 22-24, 37]. Рис. 2.11.а показує варіант коли спектр висхідного каналу спільно використовується як базовою станцією, так і D2D доменом. У такому випадку, активні D2D домени можуть спричиняти інтерференцію до базової станції. Тому, для уникнення інтерференції D2D домени можуть здійснювати передавання сигналів лише у випадку, коли базова станція неактивна, або рівень інтерференції не є критичним, тобто забезпечується критичне значення *SINR*.

Проте, D2D канали, які знаходяться поблизу базової станції, можуть

спричиняти значний рівень інтерференції до базової станції, тому їх функціонування є недоцільним для даної схеми розподілу радіоресурсів. При використанні схеми розподілу спектральних ресурсів із спільним низхідним каналом (рис. 2.11.б), виникає проблема інтерференції від базової станції до приймальних пристроїв у D2D каналах. У такому випадку, D2D канали не спричинятимуть значного рівня інтерференції для пристроїв, які обслуговуються базовою станцією, враховуючи високий рівень потужності сигналу базової станції у низхідному каналі. Проте, базова станція може спричиняти суттєвий рівень інтерференції для D2D каналів, особливо у випадку коли базова станція обслуговує користувача на межі комірки, а D2D канал знаходиться поблизу базової станції.

На рис. 2.11.в, показано комбінований варіант спільного використання спектру між базовою станцією та D2D каналами для висхідного, і низхідного каналів. Такому варіанту притаманні недоліки обох попередніх схем, але він також має суттєву перевагу, оскільки для D2D каналів виділяється більше радіочастотних ресурсів. Спільне використання спектру між комірковими та D2D каналами дає перевагу у випадку, коли базова станція обслуговує ближніх користувачів, у той час як користувачі на краю комірки використовують канали D2D, при умові, що забезпечується мінімальна відстань *dmin* між пристроями, які обслуговуються базовою станцією та D2D доменом. Проте, інтерференція між базовою станцією та D2D каналами суттєво обмежує ефективність схем розподілу частотного ресурсу, які представлені на рис.2.11.а - 2.11.в.

У запропонованій моделі, мінімальна відстань між D2D каналами d_{min}, яка виведена попередніх пунктах, прямопропорційно залежить від максимальної довжини D2D каналів *dD2Dmax*.

У випадку, коли максимальна довжина каналу від базової станції до мобільного пристрою є рівною радіусу комірки, усі D2D канали будуть у зоні ймовірної інтерференції. Тому, при схемах розподілу частотних ресурсів зі спільним використанням висхідного і (або) низхідного каналу, використання D2D не дасть суттєвої переваги.

Тому, у даній моделі запропоновано використання фіксованих частотних муг для D2D каналів. Перевагою такого підходу є уникнення інтерференції між D2D каналами та базовою станцією, що дозволяє спростити процес множинного доступу в мережі. Проте, це не підвищує ефективність використання спектру базовою станцією, оскільки весь її спектр використовується лише для коміркових з'єднань. Враховуючи, що у мережах мобільного зв'язку, висхідний та низхідний канали переважно не є симетричними, оскільки користувачі переважно більше завантажують контент, ніж відправляють його у мережу.

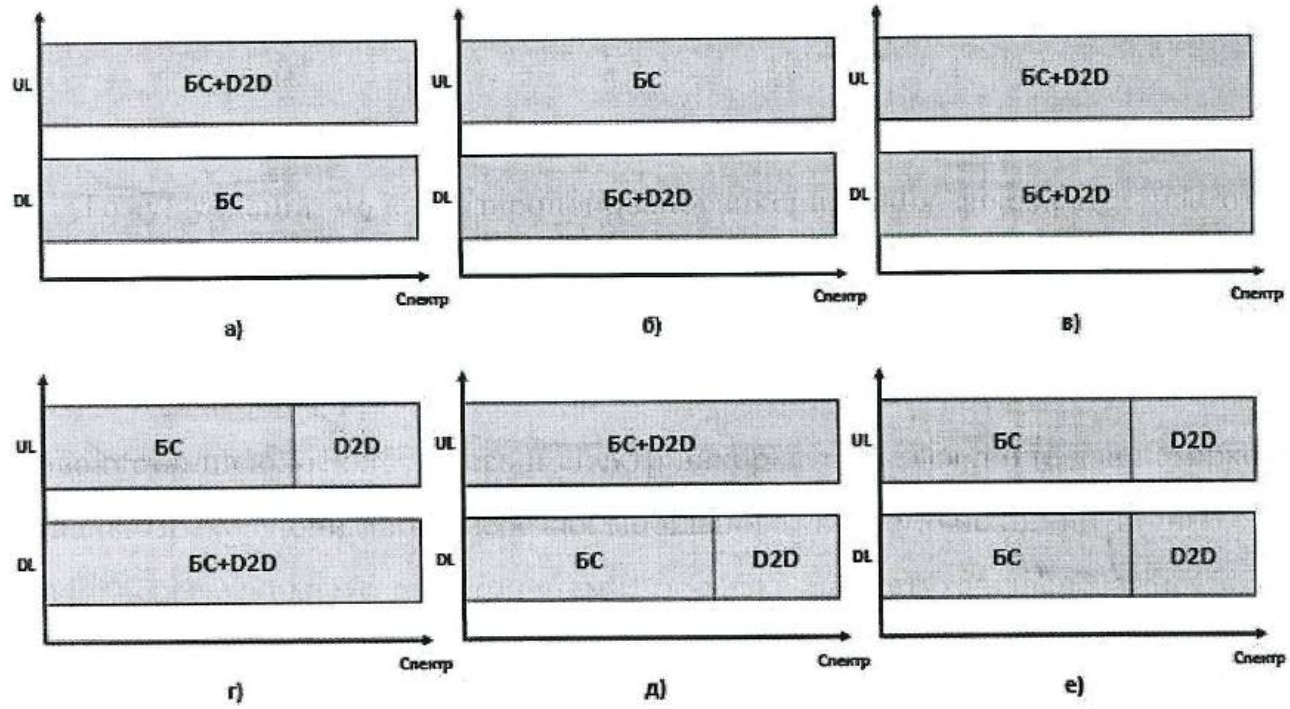


Рис. 2.11. Стратегії розподілу спектральних ресурсів у конвергентній гетерогенній мережі мобільного зв'язку

Проте, у ряді випадків спостерігається, що висхідний канал потребує більше ресурсів, ніж низхідний. Це може бути зумовлено, певними сценаріями надання сервісу, у яких користувач відвантажує великі обсяги даних у мережу (завантаження фото або відео на персональну сторінку у соціальній мережі, синхронізація робочих даних із хмарними сховищами, передавання потокового відео, тощо).

Тому, ми припускаємо можливість використання різних схем розподілу

спектральних ресурсів, таких як спільне використання лише низхідного каналу при фіксованих смугах у висхідному (рис. 2.11.г), спільне використання лише висхідного каналу при фіксованих смугах у низхідному (рис. 2.11.д) та фіксоване розділення як для низхідного, так і для висхідного каналу (рис. 2.11.е). Крім того, слід зазначити, що фіксоване розділення смуг не є статичним, тобто при перевантаженні каналів базової станції чи D2D каналів, здійснюється перерозподіл фіксованих частотних смуг у мережі [23, 24].

2.2 Вирішення проблеми інтерференції у конвергентних мережах на основі міжтермінальної взаємодії

Використання спільного частотного діапазону для гетерогенної мережі ускладнюється за рахунок динамічної природи міжтермінальних мереж, що спричиняє нестабільну інтерференційну картину [7]. Використання спільного частотного діапазону для коміркових та D2D мереж дає змогу підвищити спектральну ефективність мережі, проте вимагає нових підходів для боротьби з інтерференцією.

Ми пропонуємо використання координованого обслуговування між комірковою та між термінальною мережею, для вирішення проблеми інтерференції [7]. Основною проблемою для D2D є динамічна поведінка користувачів, що тягне за собою динамічно-змінну топологію мережі. Звісно при створенні нових міжтермінальних з'єднань та вибору частоти для них, враховується існуюча інтерференційна картина в мережі. Проте, динамічна зміна позицій таких мереж призводить до того, що спільночастотні D2D домени можуть опинитися в одному місці, що призведе до високого рівня інтерференції в таких мережах.

В такій ситуації базова станція починає обслуговувати усі вузли таких мереж окремо. Альтернативним варіантом є використання координованого обслуговування (CoMP - Coordinated Multi Point), як показано на рис. 2.13 [18].

У CoMP системах кілька базових станцій обслуговують одного користувача, координуючись швидкою транспортною мережею зв'язку для підвищення

швидкості передавання та зменшення інтерференції між комірками. Підвищення потужності сигналу та зменшення завад може бути досягнуто шляхом узгодженого формування діаграми спрямованості антенних решіток з використанням декількох передавальних антен та врахування взаємної інтерференції між користувачами. Для скоординованого планування формування антенних решіток, дані всіх користувачів в суміщеному каналі не мають бути доступні для всіх комірок в мережі, потребуючи небагато інформації про планування та якість каналу користувачів.

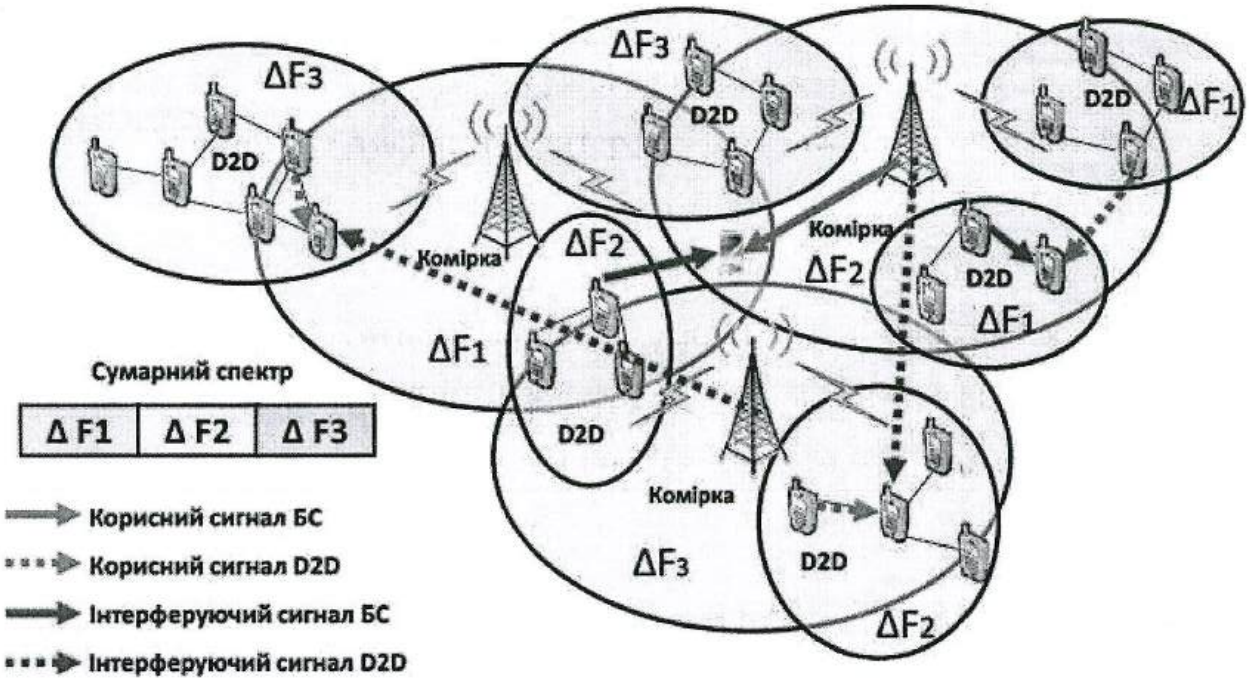


Рис. 2.12. Повторне використання спектру та інтерференційні завади гетерогенній мережі з використанням міжтермінальної взаємодії

Для майбутніх гетерогенних мереж більшість комірок повинні бути готовими до обслуговування великої кількості пристроїв. Крім своїх власних переваг, схеми CoMP можуть бути додатково використані в контексті гетерогенних мереж для координації передавання в різних масштабах, таких як планування координації та ортогоналізацій ресурсів між різними рівнями комірок (наприклад, макро- і фемтокомірки), і кластеризації точок передавання всередині

комірки для спільної обробки.

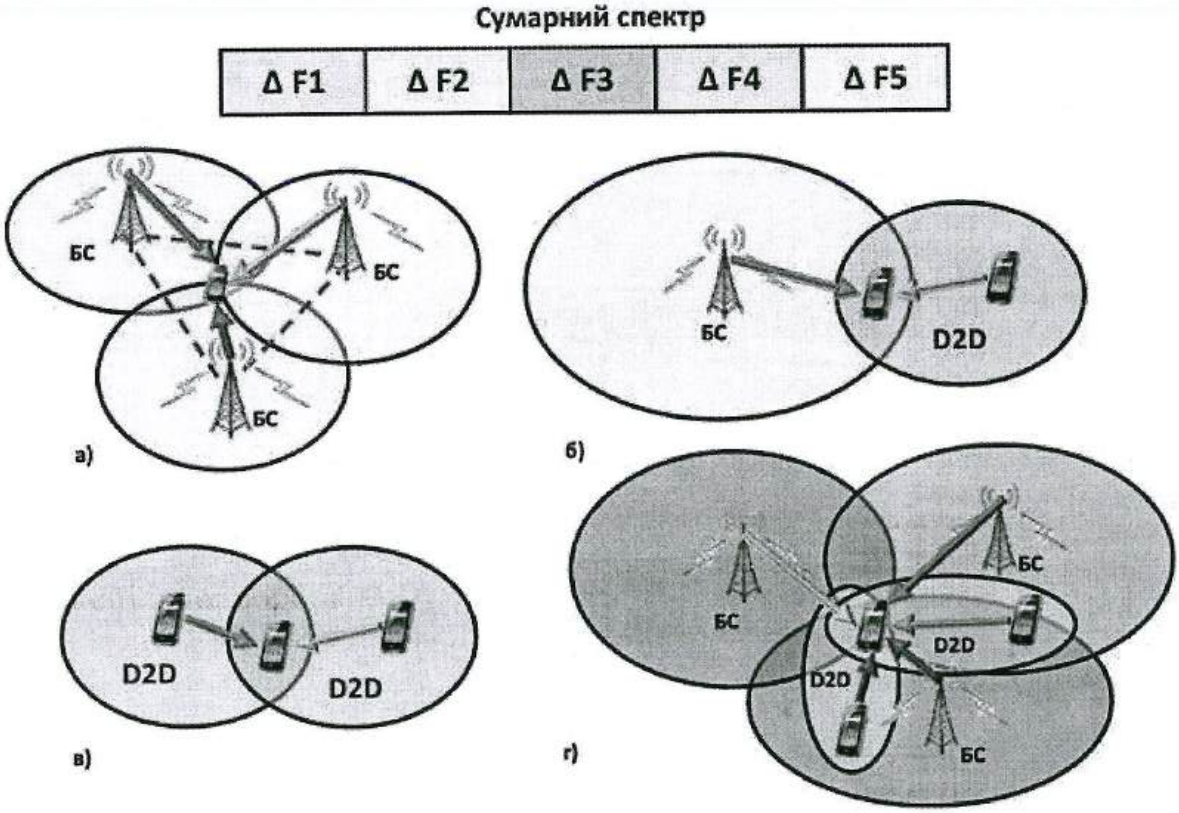


Рис. 2.13. Можливі варіанти використання CoMP в мобільних конвергентних мережах: CoMP між комірками – а), CoMP між коміркою та D2D мережами – б), CoMP між D2D – в) та CoMP між кількома комірками та кількома D2D мережами – г)

У всіх цих випадках можна досягти підвищення ефективності використання частотних ресурсів та координації рівня інтерференційних завад. Класичний варіант передавання CoMP, який полягає в узгодженому формуванні діаграми спрямованості та узгодженій обробці може бути використаний в мережі між кількома комірками, як показано на рис.2.13, а.

На рис. 2.13.б представлено варіант CoMP, де користувачі мають можливість одночасно використовувати коміркові та D2D підключення. Крім того є варіант одночасного обслуговування абонента кількома D2D мережами, як показано на рис. 2.13.в. Такий підхід, потребує точного протоколу управління потоком даних, може використовуватись лише у повнозв'язних D2D мережах.

Повна конвергенція коміркових та міжтермінальних мереж дає змогу використовувати механізми координованого обслуговування між усіма можливими типами з'єднань в гетерогенній мережі, як показано на рис. 2.13.г. Такий тип координованого обслуговування представляє великий інтерес, оскільки він дає змогу об'єднати продуктивність LTE-A з масштабованістю сенсорних мереж, що є вагомим кроком до реалізації мереж 5G.

На рис. 2.14. покроково показано приклад уникнення інтерференції у гетерогенних мережах шляхом використання взаємодії між комірковою та D2D інфраструктурою.

Ми розглядаємо два способи уникнення інтерференції на основі координації з базовою станцією: координована реконфігурація та узгоджене передавання. Як показано на рис. 2.14, якщо дві під мережі D2D наближаються одна до одної, використовуючи однаковий спектр, між ними виникає інтерференція. Це призводить до зниження відношення *SINR* нижче критичного рівня, тобто:

$$SINR_i < SINR_{кр}.$$

Для того щоб уникнути інтерференції та забезпечити належний рівень пропускної здатності у гетерогенній мережі використовуємо критерій оптимальності енергетичних параметрів мережі [11]:

$$\begin{aligned} &\max\left(\sum_i SINR_i\right),\ \forall i \in \mathbf{N}, \\ &\text{при } \min(\mathbf{SINR}) \geq SINR_{кр}, \\ &\mathbf{SINR} = \{SINR_1, SINR_2, \ldots, SINR_N\},\ k \in \mathbf{N} \end{aligned} \tag{2.9}$$

У випадку координованої реконфігурації, базова станція бере на себе обслуговування усіх пристроїв, що тягне за собою розрив усіх між термінальних з'єднань. Базова станція обслуговує усі пристрої до того моменту, поки міжтермінальні мережі не створяться наново з використанням різних частотних ресурсів, як показано на рис. 2.14.а.

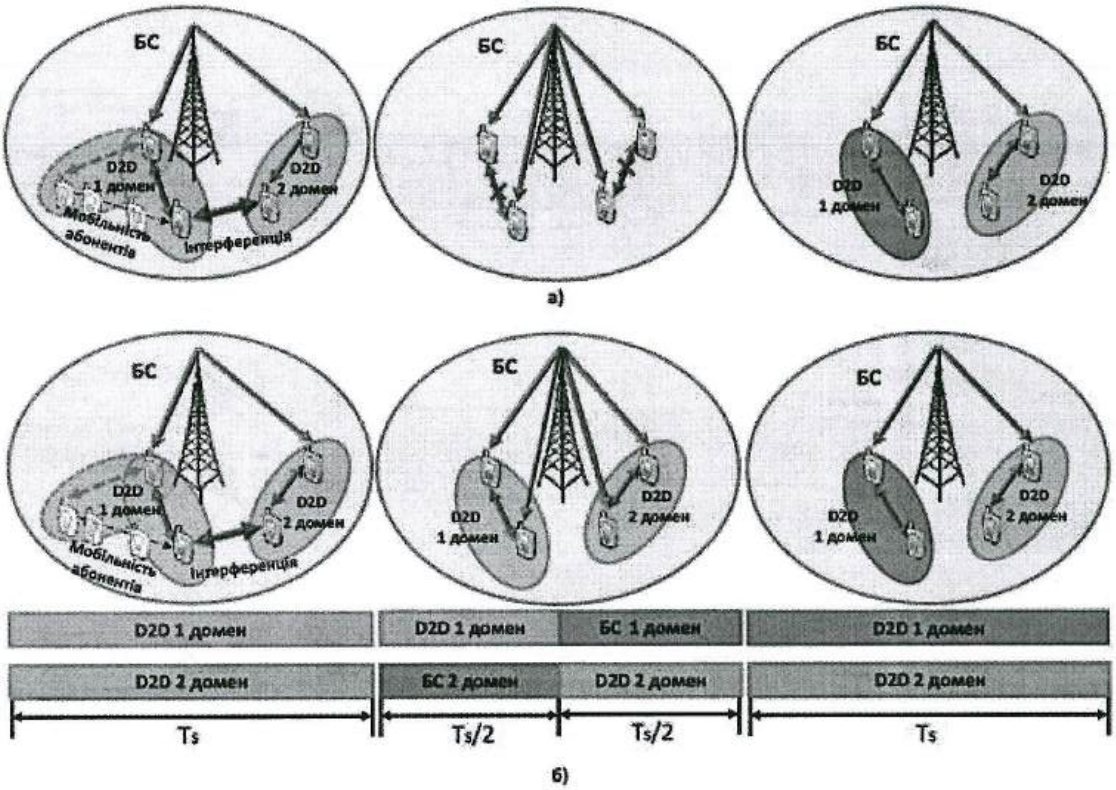


Рис. 2.14. Способи уникнення інтерференції у гетерогенних мережах: координована реконфігурація – а) та узгоджене передавання – б)

Більш складний спосіб полягає у часовому мультиплексуванні каналів передавання між базовою станцією та міжтермінальними мережами. У такому випадку, часовий кадр тривалістю *Ts* розділяється на *M* підкадрів, де *M* - кількість інтерферуючих D2D мереж. Як показано на рис. 2.14.6 (для випадку *M*=2), перша підмережа D2D передає дані протягом першого підкадру тривалістю *Ts*/2, у той час коли абоненти другої під мережі обслуговуються базовою станцією. Протягом наступного підкадру тривалістю *Ts*/2, перша D2D мережа обслуговується базовою станцією, у той час як друга D2D мережа використовує міжтермінальні з'єднання для передавання інформації. Таке часове розділення здійснюється до тих пір поки інтерферуючі мережі D2D не переконфігуруються у різні спектральні смуги. Основною відмінністю між двома способами є те, що узгоджене передавання зберігає існуючі міжтермінальні зв'язки, в той час як координована реконфігурація передбачає їх видалення. На практиці, обидва підходи використовуються в залежності від поточної ситуації.

3 МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ЗОНИ ПОКРИТТЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

3.1 Моделювання мереж мобільного зв'язку з використанням стохастичних моделей

Однорівнева коміркова мережа може бути просто змодельована за Пуассонівським точковим процесом. Базові станції просторово розподілені з густиною A, потужністю передавання P та значенням SINR $в$. Ймовірність того, що користувач буде обслуговуватись i-ю базовою станцією із значенням SINR більше від в називається ймовірністю обслуговування [16]:

$$P_c(\lambda,\beta,P)=\frac{\alpha\beta^{-2/\alpha}}{2\pi\csc\left(2\pi\alpha^{-1}\right)}, \tag{3.1}$$

де a позначає експоненту загасання в каналі зв'язку.

Використання класичного Пуассонівського точкового процесу забезпечує точне наближення параметрів мережі, проте характерне рядом недоліків. Зокрема, такий процес повертає випадкову топологію без урахування мінімальної відстані між сусідніми базовими станціями. Таким чином, планування за Пуассонівським процесом призводить до дуже близького розташування передавачів як показано на рис.3.1.

Це призводить до неадекватної структури мережі, а також погіршення точності моделювання та розрахунку параметрів, залежних від мережі, таких як потужність передавання та SINR. Тому, параметричний точковий процес використовується для моделювання більш адекватної мережної структури за рахунок фіксованого параметру мінімальної відстані між довільною парою вузлів. Параметричний точковий процес здійснюється на основі Пуассоніського процесу, шляхом видалення усіх точок, які не задовольняють умову мінімальної відстані між довільною парою вузлів.

Проте, з аналітичної точки зору параметричний точковий процес є більш складним та менш точним у зв'язку із порушенням ймовірнісного розподілу мережних параметрів.

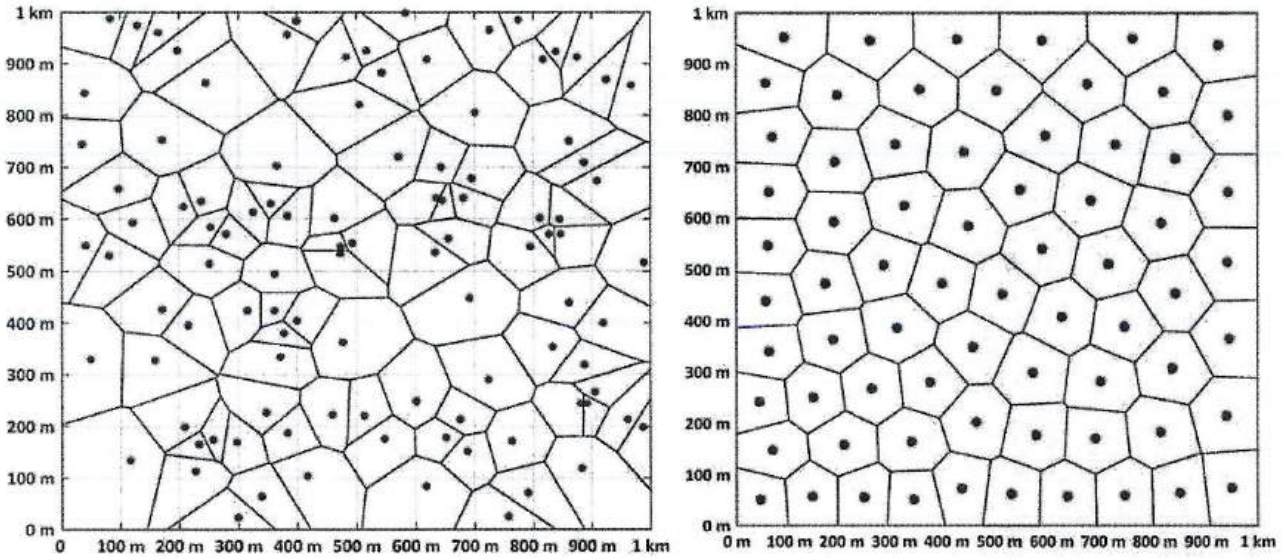


Рис. 3.1. Порівняння однорівневого покриття мережі з використанням теселяції Вороного для: (а) - Пуассонівського точкового процесу, (б) - параметричного точкового процесу

Рис. 3.1 відображає різницю між покриттям мережі на основі Пуассонівського точкового процесу та параметричного точкового процесу. Результати показують, що параметричний точковий процес є проміжним варіантом, який поєднує елементи детермінованої та стохастичної геометрії. У деяких випадках параметричний процес повертає майже детерміновану топологію, що дає змогу планувати покриття у сільській місцевості. З іншого боку, Пуассоніський точковий процес є більш прийнятним для міського середовища із щільною забудовою, яка негативно впливає на поширення та загасання сигналу.

Адекватність моделей на основі Пуассонівського та параметричного точкових процесів порушується при щільній забудові у великих мегаполісах. Основним фактором є те, що відстань між будівлями є значно меншою від висоти самих будівель. Цей фактор унеможливлює встановлення передавачів базових станцій на дахах будівель, як прийнято для зон з низькою забудовою.

При поширенні сигналу у місцях з щільною та високою забудовою характерні багаторазові відбивання сигналу на шляху між передавальною

станцією та абонентським терміналом, збільшуючи загасання сигналу, що потребує істотного підвищення потужності передавання базових станцій. Тому, провайдери послуг надають перевагу встановленню передавальних станцій якомога нижче, переважно на бічних стінах самих будівель. Відповідно, змінюється геометрія мережі, що не дає змогу застосовувати класичні моделі на основі Пуассонівського та параметричного точкового процесів.

Для підвищення адекватності моделювання покриття мережі розроблено модифіковану модель на основі центроїдної теселяції Вороного [8, 19, 41]. На рис. 3.2 показано змодельовані топології мережі на основі обмеженої теселяції Вороного, яка дає змогу використовувати Манхеттенську метрику, згідно з якою відстань між двома точками дорівнює сумі модулів різниць їх координат. Більш формалізовано, дана метрика записується як:

$$d_M(x,y) = \|x-y\|_1 = \sum_{i=1}^{n} |x_i - y_i|, \tag{3.2}$$

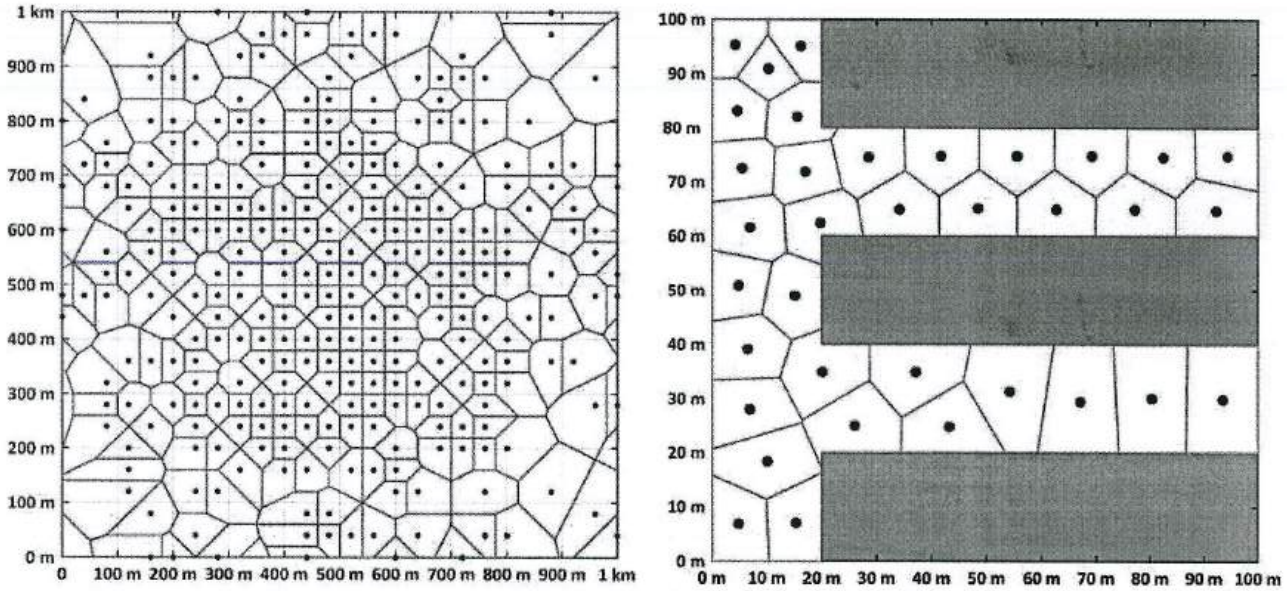
де $ї_м$ - сума довжин проекцій відрізка між точками x та y на осі координат у n- вимірному дійсному просторі з заданою прямокутною системою координат. Формула (3.2) є узагальненою для векторного представлення x та y:

$$x = (x1, x_2 \dots x_n)$$

$$У = (У1, У2 - Уn)$$

Покриття мережі здійснюється на основі алгоритму Ллойда, який призначений для рівномірного розподілу множин точок у підмножини Евклідових просторів. Алгоритм Ллойда послідовно знаходить центри кожного набору розподілу, а та перерозподіляє точки відповідно до того, які з цих центрів знаходяться найближче. Притаманною особливістю алгоритму Ллойда від існуючих алгоритмів є те, що вхідними даними для нього є неперервна геометрична область, а не дискретна множина точок. Тому під час перерозподілу вхідних даних алгоритм Ллойда використовує діаграми Вороного, що дає змогу моделювати рівномірне покриття для обмеженої геометричної області [15]. Крім того, алгоритм дозволяє моделювати покриття для довільної замкнутої області незалежно від її геометричної форми. На рис. 3.2 показано структуру покриття

густо забудованої території у макро та мікро масштабі.



(а) (б)

Рис. 3.2. Моделювання покриття коміркової мережі щільно забудованої місцевості в макромаштабі - а) та мікромасштабі - б)

Як показано на рис. 3.2.б, центроїдна теселяція Вороного відображає адекватну структуру мережі для щільної міської забудови з випадковими позиціями базових станцій. Проте, така модель є узагальненою та не враховує розподіл співвідношення сигналу до шуму та інтерференції у мережі, оскільки вона нехтує відбиванням сигналу від будівель. На рис. 3.2.б показано більш точну мікромодель з урахуванням забудови на основі алгоритму Ллойда для довільної геометричної області, яка відображає розподіл передавальних станцій навколо трьох будівель [8,19]. Дана модель може бути узагальнена для довільної забудови, за умови замкненості зони покриття мережі.

Моделювання структур багаторівневих гетерогенних мереж

Щільне розгортання мережі та поєднання базових станцій різних рівнів ставить ряд нових вимог до планування мережної структури. Існуючі гексагональні моделі не дають змогу ефективно планувати структуру мережі у зв'язку із складністю розрахунків при поєднанні кількох рівнів одночасно. На рис. 3.3 показано варіанти моделювання гетерогенних коміркових структур на основі існуючих гексагональних моделей.

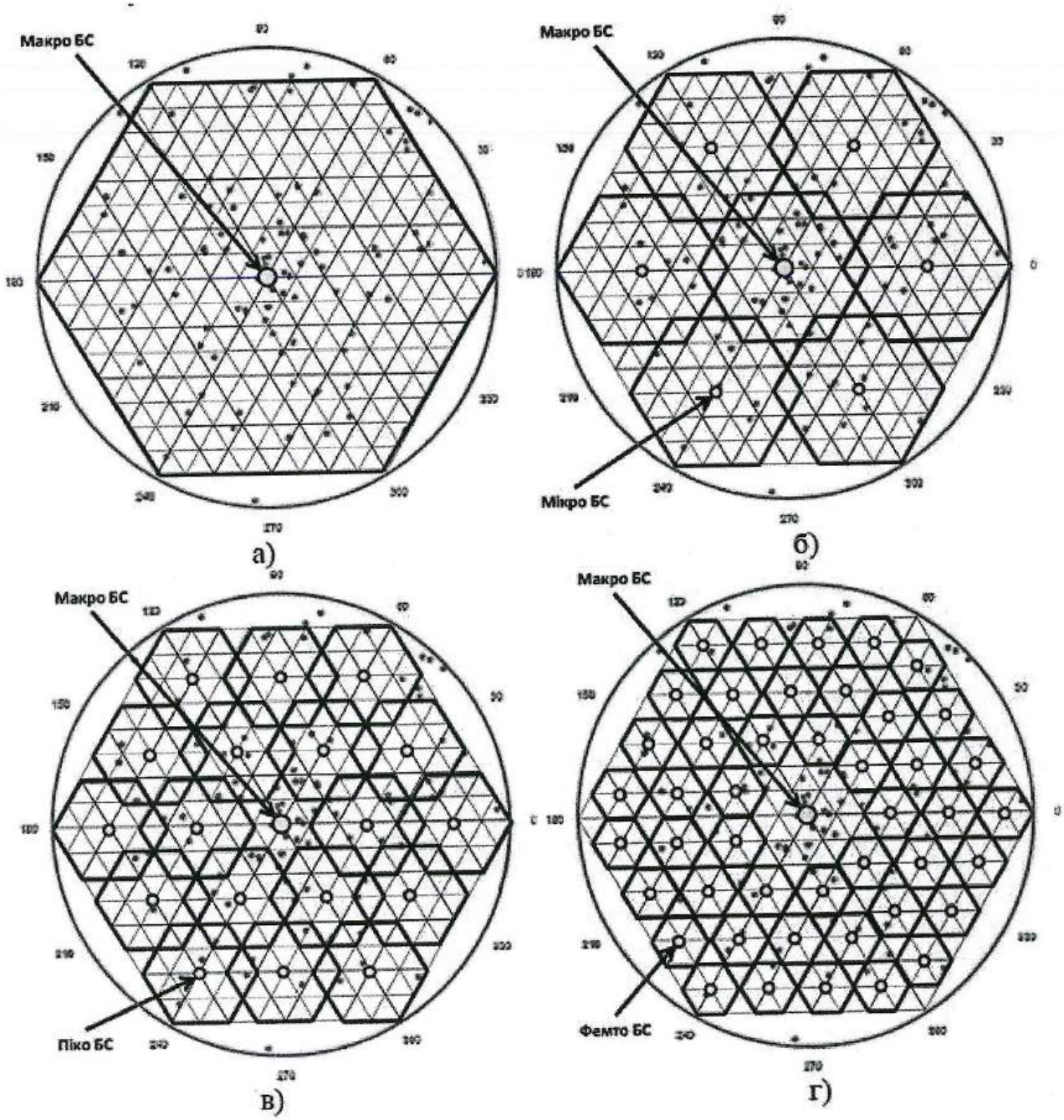


Рис. 3.3. Гексагональна модель структури мережі для макро - а), мікро - б), піко - в) та фемтокомірок - г)

Цілком можливою є ситуація, при якій абонент може бути досить близько до базових станцій як макрокомірки так і малої комірки, що знизить продуктивність хендоверу за критерієм потужності передавання. У такому випадку деякі малі комірки можуть неефективно використовувати пропускну здатність, у той час як макрокомірка буде перевантаженою. Крім того, комірки часто бувають недовантаженими внаслідок варіації абонентського навантаження,

що знижує продуктивність гетерогенної мережі.

Отже, моделювання багаторівневих гетерогенних мереж мобільного зв'язку є більш складним у порівнянні із однорівневими мережами. Необхідно окремо враховувати щільність базових станцій кожного рівня і потім визначати суперпозицію усіх рівнів при розрахунку параметрів для кінцевих користувачів.

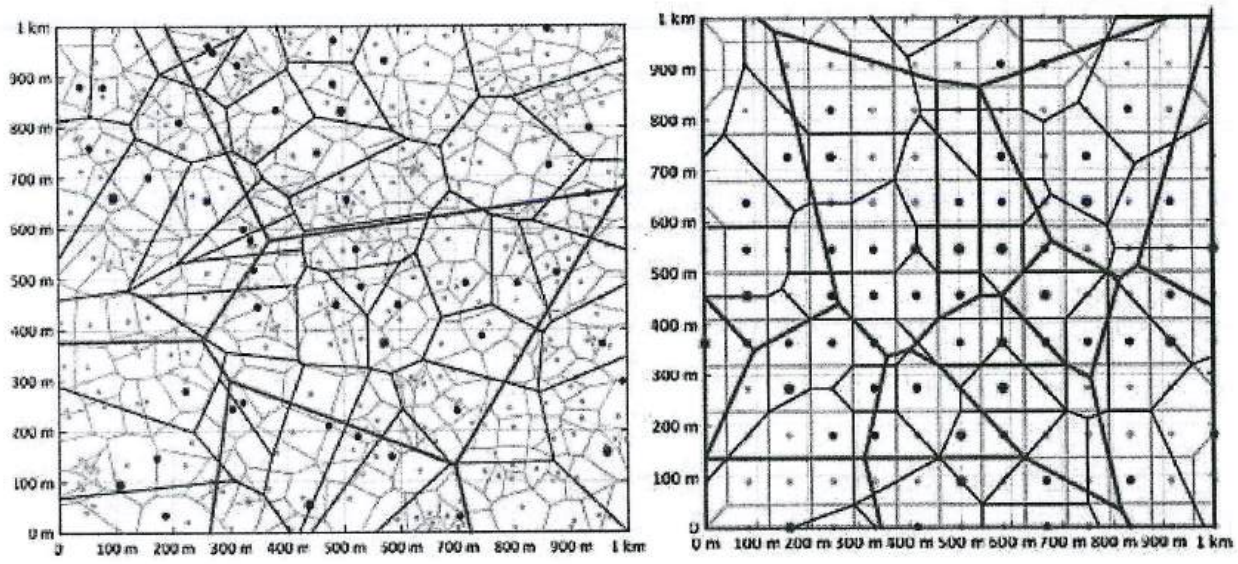
При використанні Пуассонівського точкового процесу для багаторівневої мережі, базові станції і-го рівня є просторово розподіленими із густиною *кі*, потужністю передавання *Pi* та рівнем SINR. Ймовірність обслуговування абонента коміркою *i*-го рівня при забезпеченні значення SINR більшого від *ві* розраховується за наступною формулою [16]:

$$P_{allocanon}(\lambda_i, \beta_i, P_i) = \frac{\alpha}{2\pi \csc\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)} \frac{\sum_{i=1}^{K} \lambda_i P_i^{2/\alpha} \beta_i^{-2/\alpha}}{\sum_{i=1}^{K} \lambda_i P_i^{2/\alpha}} \quad (3.3)$$

Оскільки, загасання сигналу у гетерогенних мережах не є високим у зв'язку із малим розміром комірок, вплив термальних шумів не є високим. З іншого боку, більш щільне розташування комірок і, відповідно, менша відстань між спільноканальними комірками призводить до зростання інтерференції між спільноканальними комірками.

Багаторівневе впровадження спричиняє два типи інтерференції: внутрішньорівнева та міжрівнева. Внутрішньорівнева інтерференція може легко долатися шляхом оптимального розташування передавачів. Більш вагомою задачею є усунення міжрівневої інтерференції між макрокоміркою та малими комірками. У зв'язку із більшою потужністю передавання, макрокомірка може спричиняти інтерференцію для користувачів малих комірок у низхідному каналі, у той час як абонентський термінал може спричиняти інтерференцію для базових станцій малих комірок, якщо він обслуговується макрокоміркою. Тому, розроблення структур з оптимальною геометрією є важливим аспектом для забезпечення ефективного функціонування багаторівневих гетерогенних мереж. На рис. 3.4 показано змодельовані структури 3-рівневих гетерогенних мереж з використанням Пуассонівського точкового процесу [8,19]. Параметри розподілу

становлять: X1=10, X2=50, X3=100, де X1, Л2, X3 відповідають кожному рівню мережі, відповідно.



(а) (б)

Рис. 3.4. Щільна структура *3*-рівневої гетерогенної мережі для випадкового планування - (а) та планування з врахуванням забудови - (б)

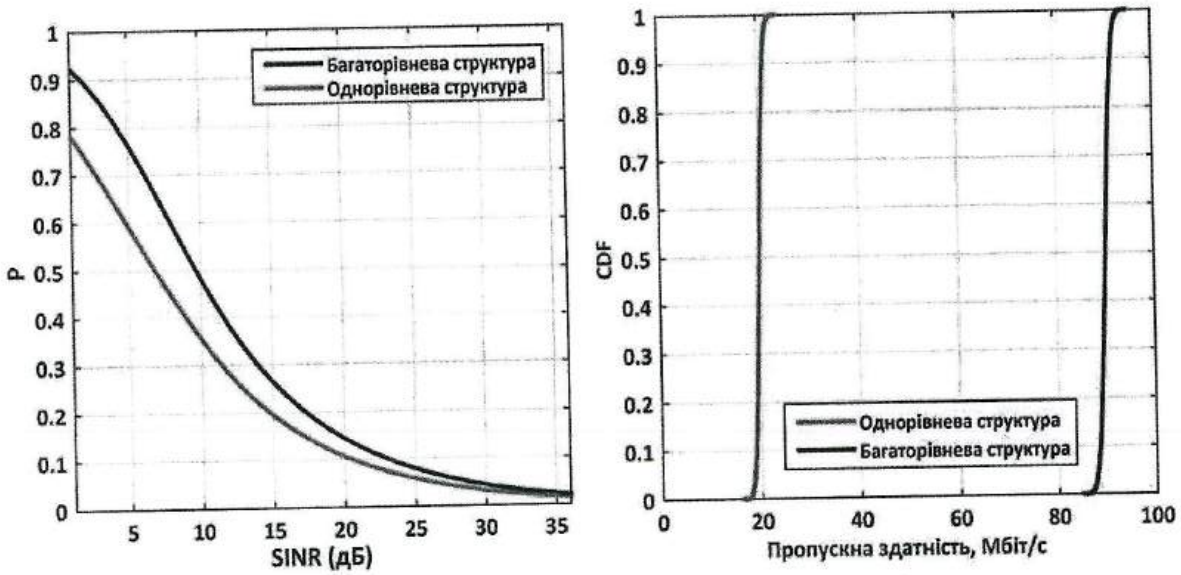
Результати моделювання пропускної здатності та інтерференції у мережі мобільного зв'язку

Моделювання продуктивності гетерогенної мережі проводилось на основі оцінки ймовірності того, що випадковий користувач отримає мінімально необхідний рівень співвідношення сигналу до шуму та інтерференції ^ІМИ) з кумулятивною функцією розподілу, яка усереднена по всіх видимих базових станціях. При моделюванні було задано наступні параметри:

- параметр Пуассонівського точкового процесу для макрокомірок - 10;
- параметр Пуассонівського точкового процесу для пікокомірок - 50;
- параметр Пуассонівського точкового процесу для фемтокомірок - 100;
- параметр Пуассонівського точкового процесу для абонентів у зоні обслуговування - 1000;
- потужність передавання базової станції макрокомірки - 45 дБм;
- потужність передавання базової станції пікокомірки - 30 дБм;
- потужність передавання базової станції фемтокомірки - 20 дБм;

- порогів рівень чутливості приймача - -90 дБм;
- смуга пропускання - 10 МГц;
- спектральна ефективність - 5 біт/с/Гц;
- конфігурація антенної системи - кругова
- модель поширення сигналу - COST-232.

Отримано залежності ймовірності обслуговування від рівня SINR для двох випадків: однорівневої та багаторівневої мережі (рис. 3.4,а). Хоча підвищення густини комірок підвищує рівень інтерференції, результати моделювання показують, що однорівнева топологія мережі забезпечує нижчу ймовірність обслуговування ніж багаторівнева. Це пояснюється тим, що в однорівневій мережі загасання потужності сигналу є вищим. Тому, вплив адитивного шуму є більш суттєвим у порівнянні із впливом інтерференції. Розподіл значення SINR для багаторівневої гетерогенної мережі є більш рівномірним у зв'язку з додатковими передавачами малих комірок, які розташовані ближче до користувачів.



(а) (б)

Рис.3.5 Залежності ймовірності обслуговування від співвідношення SINR - (а) та кумулятивні функції розподілу пропускної здатності - (б) для однорівневої та багаторівневої гетерогенної мережі

На рис. 3.5,б показано кумулятивні функції розподілу пропускної здатності для однорівневої та багаторівневої мережі для ширини спектру 20 МГц та кругової діаграми спрямованості антен базових станцій.

Як показують результати, багаторівнева гетерогенна мережа забезпечує суттєвий виграш у пропускній здатності у порівнянні із однорівневою мережею у зв'язку з вищим коефіцієнтом повторного використання спектру. Варто зазначити, що багаторівневі гетерогенні мережі також забезпечують виграш з точки зору ймовірності обслуговування, проте подальші дослідження необхідні для розрахунку оптимальної кількості рівнів мережі, а також моделювання складних конфігурацій мережі з динамічною варіацією розміру комірок на основі моделей детермінованої та стохастичної геометрії.

3.2 Багатошарова гетерогенна мережа мобільного зв'язку: фрактальна модель топологічної структури

Геометрична модель фрактальної структури мережі

Для підвищення ефективності процесу розрахунку параметрів багатошарової гетерогенної мережі на етапі проектування, а також для ефективного балансування навантаження та мінімізації пропонуємо фрактальну модель структури гетерогенної мережі, яка представлена на рис. 3.6 [10]. Структура називається фрактальною, якщо вона має властивості масштабної інваріантності [16].

Фрактальна модель покриття гетерогенної мережі має наступні властивості:

- Фрактали є самоподібними, що дозволяє легко збільшувати або зменшувати густину мережі простим масштабуванням базового шаблону.
- Фрактальна модель дозволяє отримати узагальнені кінцеві вирази геометрично залежних параметрів для довільного рівня гетерогенної мережі, на основі параметрів початкового шаблону.
- Масштабна інваріантність фрактального шаблону дає змогу адаптувати дану модель для аналізу та розрахунку будь-якого існуючого покриття

гетерогенної мереж.

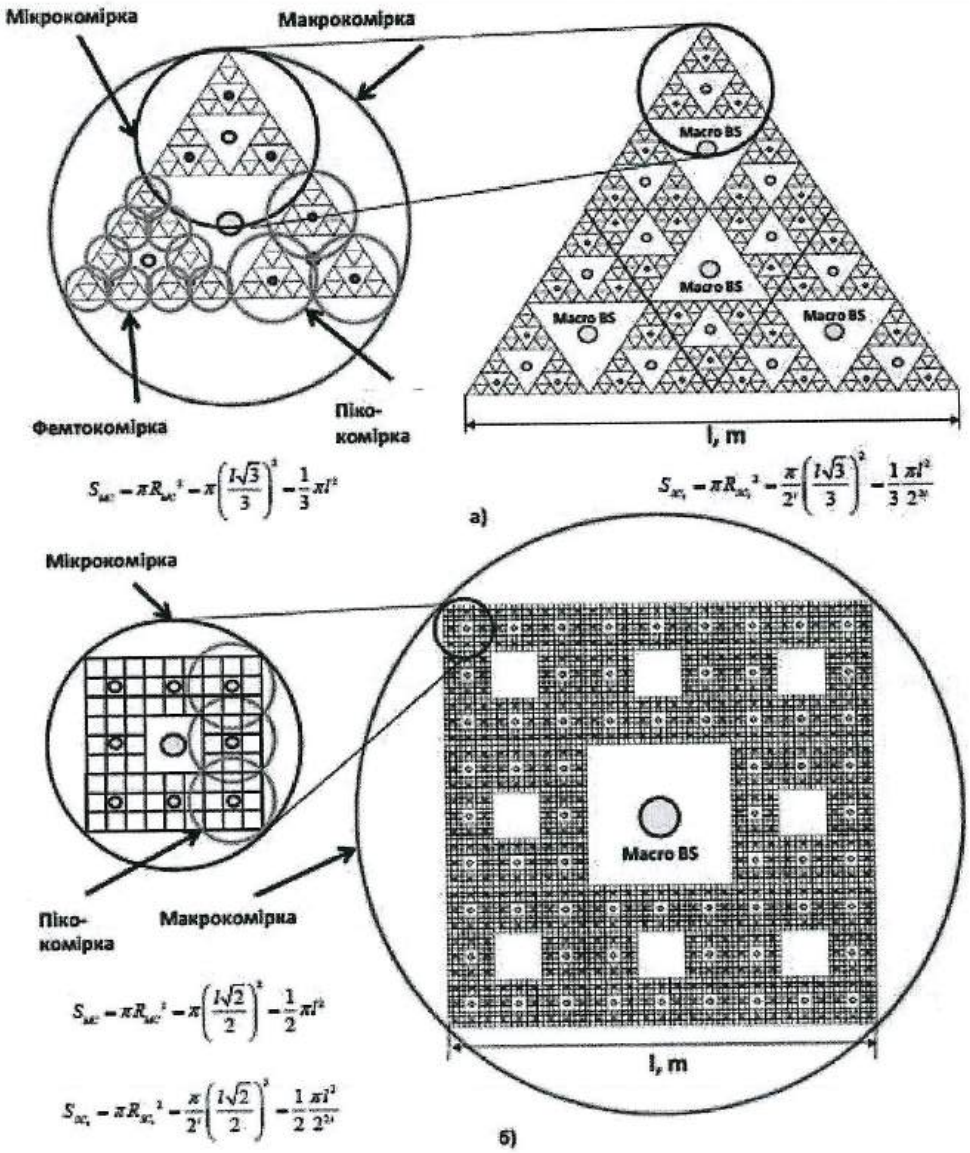


Рис. 3.6. Гнучке планування покриття на основі фрактальних моделей трикутника Серпінського - а) та квадрата Серпінського - б)

Ми пропонуємо два типи фрактального покриття для зон з нерівномірною забудовою та для рівномірно забудованих масивів, використовуючи трикутник або квадрат (килим) Серпінського. Деталізований приклад даних моделей подано на рис. 3.6. Як показано на рис. 3.6., межа комірки визначається як коло описане навколо довільного трикутника (рис. 3.6.а) або квадрата (рис. 3.6.б) при умові, що базова станція розміщена у центрі цього кола. При розрахунку покриття, базова

фігура визначає позицію макрокомірки, в той час як фігури наступних ітерацій визначають позиції малих комірок відповідного рівня.

Модель повторного використання частот у гетерогенній мережі з фрактальною структурою

Важливою перевагою гетерогенних мереж мобільного зв'язку є те, що вони дозволяють підвищити ефективність використання спектральних ресурсів за рахунок територіально рознесених спільночастотних мікро-, піко- та фемто комірок, які функціонують в зоні покриття макрокомірки.

На відміну від однорівневих мереж, розрахунок повторного використання частот у багаторівневих гетерогенних мережах є складною задачею, оскільки необхідно одночасно враховувати покриття та розподіл спектру для різних типів комірок у мережі. Додатковою складністю є те, що у гетерогенних мережах присутні два види інтерференції: внутрішньорівнева та міжрівнева, що потребує вдосконалення існуючих методів планування спектру. Крім того, при щільному впровадженні передавальних станцій, суттєво ускладнюється завдання побудови опорної транспортної інфраструктури, що потребує нових підходів до її побудови. Прокладання оптичної кабельної мережі до кожної передавальної станції є надзвичайно складним завданням і потребує значних капітальних затрат.

В даний час, провідні компанії на ринку мобільного зв'язку активно працюють над безпровідною інфраструктурою опорної мережі, яка б дала змогу швидко та ефективно підключати нові передавальні станції або змінювати позиції існуючих, без значних витрат [41,42]. Проте, це потребує додаткових спектральних ресурсів та нових методів передавання даних у безпровідному каналі із високою спектральною ефективністю. Крім того, при проектуванні безпровідної транспортної інфраструктури необхідно враховувати інтерференцію між різними транспортними каналами, а також між транспортними каналами та каналами мобільних користувачів. Тому, повторне використання частот для безпровідної опорної транспортної мережі також потребує детального розрахунку та планування [26]. На рис. 3.7 показано запропоновану модель повторного використання частот для спектру коміркової мережі.



Сумарна доступна смуга: $\Delta F = 60 МГц$

Доступна смуга для дворівневої структури – $F1+F2+F3+F4=15+15+15+15=60 МГц$,
$(F1=F2=F3=F4=15 МГц)$

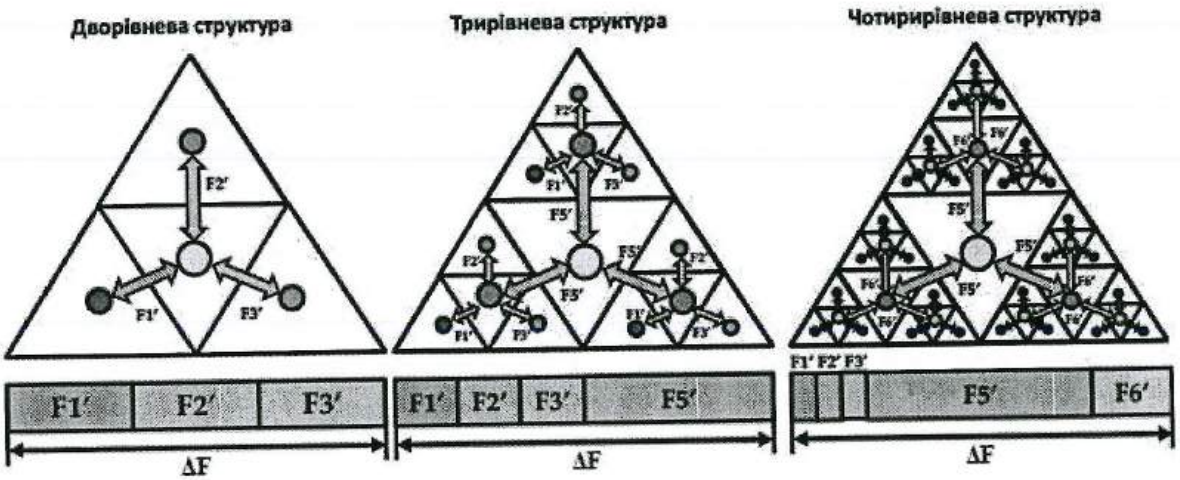
Доступна смуга для трирівневої структури – $3 \cdot F1+3 \cdot F2+3 \cdot F3+3 \cdot F5+F4=3 \cdot 12+3 \cdot 12+3 \cdot 12+3 \cdot 12+12=156 МГц$,
$(F1=F2=F3=F4=F5=12 МГц)$

Доступна смуга для чотирирівневої структури – $9 \cdot F1+9 \cdot F2+9 \cdot F3+9 \cdot F6+3 \cdot F5+F4=9 \cdot 10+9 \cdot 10+9 \cdot 10+9 \cdot 10+3 \cdot 10+10=400 МГц$,
$(F1=F2=F3=F4=F5=F6=10 МГц)$

Рис. 3.7. Фрактальна модель повторного використання частот в багаторівневій гетерогенній мережі для коміркового спектру

Як показано на рис. 3.7, для дворівневої структури коміркової мережі для базового шаблону немає повторного використання частот, оскільки смуги Б1, F2, F3 використовуються по одному разу для мікрокомірок, і смуга F4 використовується для макрокомірки. Для трирівневої гетерогенної структури смуги Б1, F2, Б3, F5 використовуються по три рази для рознесених мікрокомірок та піко комірок, в той час як смуга F4 використовується для макрокомірок. Для чотирирівневої гетерогенної структури частотні смуги Б1, F2, Б3, F6 використовуються дев'ять раз для несусідніх піко та фемтокомірок, F5 використовується три рази для мікрокомірок, і Б4 - для макрокомірки відповідно.

На рис. 3.8 показано модель повторного багаторангові шляхи для використання частот для опорної траснпортної інфраструктури. Для того щоб унеможливити інтерференцію між транспортними каналами та реалізувати більш гнучку транспортну інфраструктуру ми пропонуємо використовувати транспортних каналів.



Сумарна доступна смуга: $\Delta F = 90МГц$
Доступна смуга для дворівневої структури $= F1' + F2' + F3' = 30 + 30 + 30 = 90МГц$,
$(F1' = F2' = F3' = 30МГц)$
Доступна смуга для трирівневої структури $= 3 \cdot F1' + 3 \cdot F2' + 3 \cdot F3' + 3 \cdot F5' = 3 \cdot 15 + 3 \cdot 15 + 3 \cdot 15 + 3 \cdot 45 = 270МГц$,
$(F1' = F2' = F3' = 15МГц,\ F5' = 45МГц)$
Доступна смуга для чотирирівневої структури $= 9 \cdot F1' + 9 \cdot F2' + 9 \cdot F3' + 9 \cdot F6' + 3 \cdot F5' = 9 \cdot 5 + 9 \cdot 5 + 9 \cdot 5 + 9 \cdot 15 + 3 \cdot 60 = 450МГц$,
$(F1' = F2' = F3' = 5МГц,\ F5' = 60MHz,\ F6' = 15МГц)$

Рис. 3.8. Фрактальна модель повторного використання частот в багаторівневій гетерогенній мережі для спектру транспортної мережі

Як показано на рис 3.8, для дворівневої гетерогенної структури використовується однорангова транспортна мережа без повторного використання частот. Смуги P1', P2', P3' використовуються по одному разу для забезпечення транспортних каналів до мікрокомірок. Для дворівневої гетерогенної інфраструктури смуги P1', P2', P3', P5' використовуються по три рази для забезпечення транспортних каналів мікрокомірок та пікокомірок. Для чотирирівневої гетерогенної інфраструктури смуги P1', P2', P3', P6' використовуються по дев'ять разів для транспортних каналів пікокомірок та фемтокомірок, в той час як смуга P5' використовується три рази для транспортних каналів мікрокомірок.

На рис. 3.9 показано залежність виграшу від повторного використання частот для спектрів коміркової та опорної транспортної мережі при збільшенні розміру комірок.

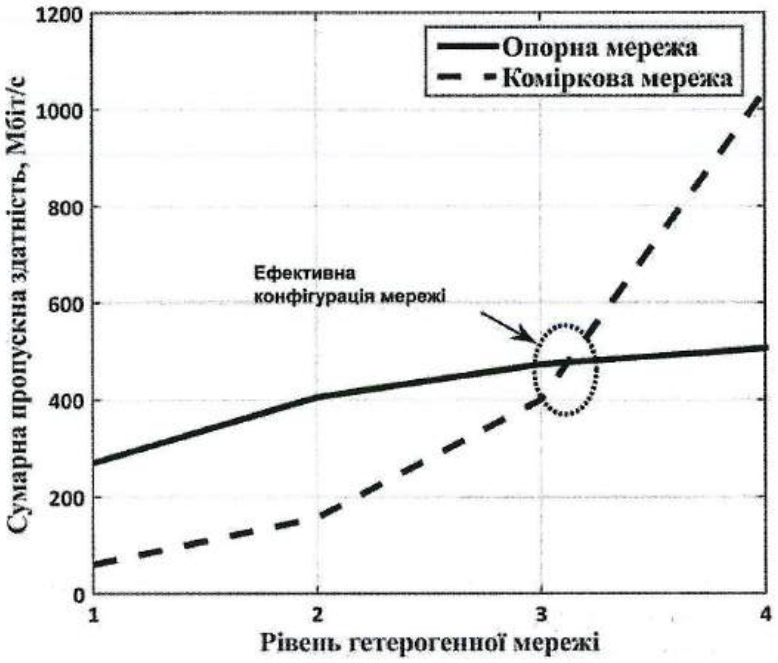


Рис. 3.9. Порівняння сумарної пропускної здатності коміркової та транспортної мережі при збільшенні кількості рівнів гетерогенної структури

Результати показують, що при збільшенні кількості рівнів гетерогенної мережі, доступні спектральні ресурси для коміркової мережі зростають більш стрімко, ніж для транспортної мережі. Це можна пояснити тим, що підвищення пропускної здатності комірок тягне за собою співмірне підвищення пропускної здатності для відповідних їм транспортних каналів. Наприклад, для розглянутого випадку чисельні розрахунки показують, що при чотирирівневій структурі гетерогенної мережі сумарна смуга пропускання комірок стає співмірною із сумарною смугою пропускання опорної транспортної інфраструктури, а саме 400 МГц для комірок та 405 МГц для транспортних каналів.

При подальшому збільшенні кількості рівнів гетерогенної структури опорна транспортна інфраструктура стає обмежуючим фактором продуктивності мережі, що в свою чергу вимагає значно вищої спектральної ефективності транспортних каналів у порівнянні із каналами користувачів. Крім того, при дуже малому розмірі комірок, мобільність абонентів спричиняє біль часті хендовери (кожні кілька секунд), спричиняючи значну варіацію навантаження у комірках, що потребує динамічної реконфігурації як коміркової так і транспортної

інфраструктури.

На рис. 3.10, показано співвідношення між кількістю малих комірок та частотою реконфігурації транспортних каналів, при радіусі макрокомірки - 500 м та поведінки абонентів за моделлю випадкового блукання. Як показують отримані результати, при збільшенні кількості малих комірок, складність процесу обслуговування користувачів зростає експоненційно, що обмежує кількість рівнів гетерогенної мережі. Тому, важливо знайти ефективну конфігурацію для коміркової та транспортної інфраструктури, яка б дала змогу задовольнити поставлені вимоги до пропускної здатності мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління.

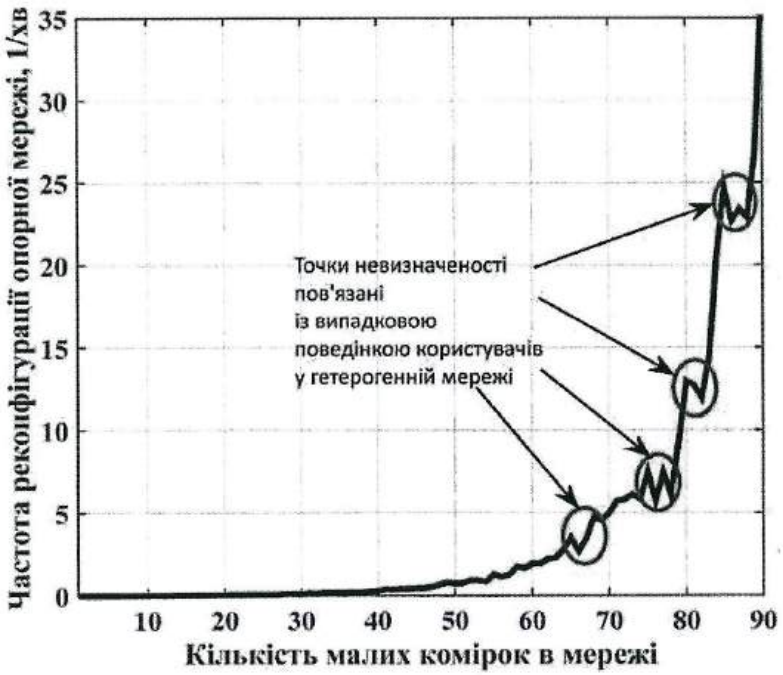


Рис. 3.10. Залежність частоти реконфігурації транспортних каналів від кількості малих комірок у гетерогенній мережі

Результати моделювання сумарної пропускної здатності та інтерференції у гетерогенній мережі мобільного зв'язку

Задача ефективного розподілу ресурсів не може бути вирішена у повній мірі без врахування густини абонентського навантаження, інтенсивності трафіку та співвідношення сигналу до шуму та інтерференції у цільовій зоні обслуговування мережі мобільного зв'язку. Моделювання проводилось для зони обслуговування

розміром 1000*1000 метрів та наступних параметрів:

- параметр Пуассонівського точкового процесу для абонентів у зоні обслуговування - 1000;
- потужність передавання базової станції макрокомірки - 45 дБм;
- потужність передавання базової станції пікокомірки - 30 дБм;
- потужність передавання базової станції фемтокомірки - 20 дБм;
- порогів рівень чутливості приймача -90 дБм;
- смуга пропускання - 100 МГц;
- спектральна ефективність - 5 біт/с/Гц;
- конфігурація антенної системи - кругова
- модель поширення сигналу - COST-232.

На рис. 3.11 окремо показано чотири рівні досліджуваної гетерогенної структури мережі мобільного зв'язку. Повторне використання спектру для коміркової та транспортної мережі здійснюється на основі моделей представлених на рис. 3.7 та рис. 3.8.

Як вже згадувалось раніше, збільшення кількості комірок у цільовій зоні обслуговування підвищує рівень інтерференції між спільноканальними комірками у зв'язку із меншою відстанню між ними, що негативно впливає на співвідношення потужності сигналу до шуму та інтерференції, знижуючи продуктивність гетерогенної мережі. Детермінованість розробленої фрактальної моделі, дає змогу визначити всі відстані до інтерферуючих передавачів. Дана властивість забезпечує адекватну попередню оцінку продуктивності мережі та відповідно підібрати ефективну конфігурацію для обслуговування необхідної кількості абонентів із заданою якістю.

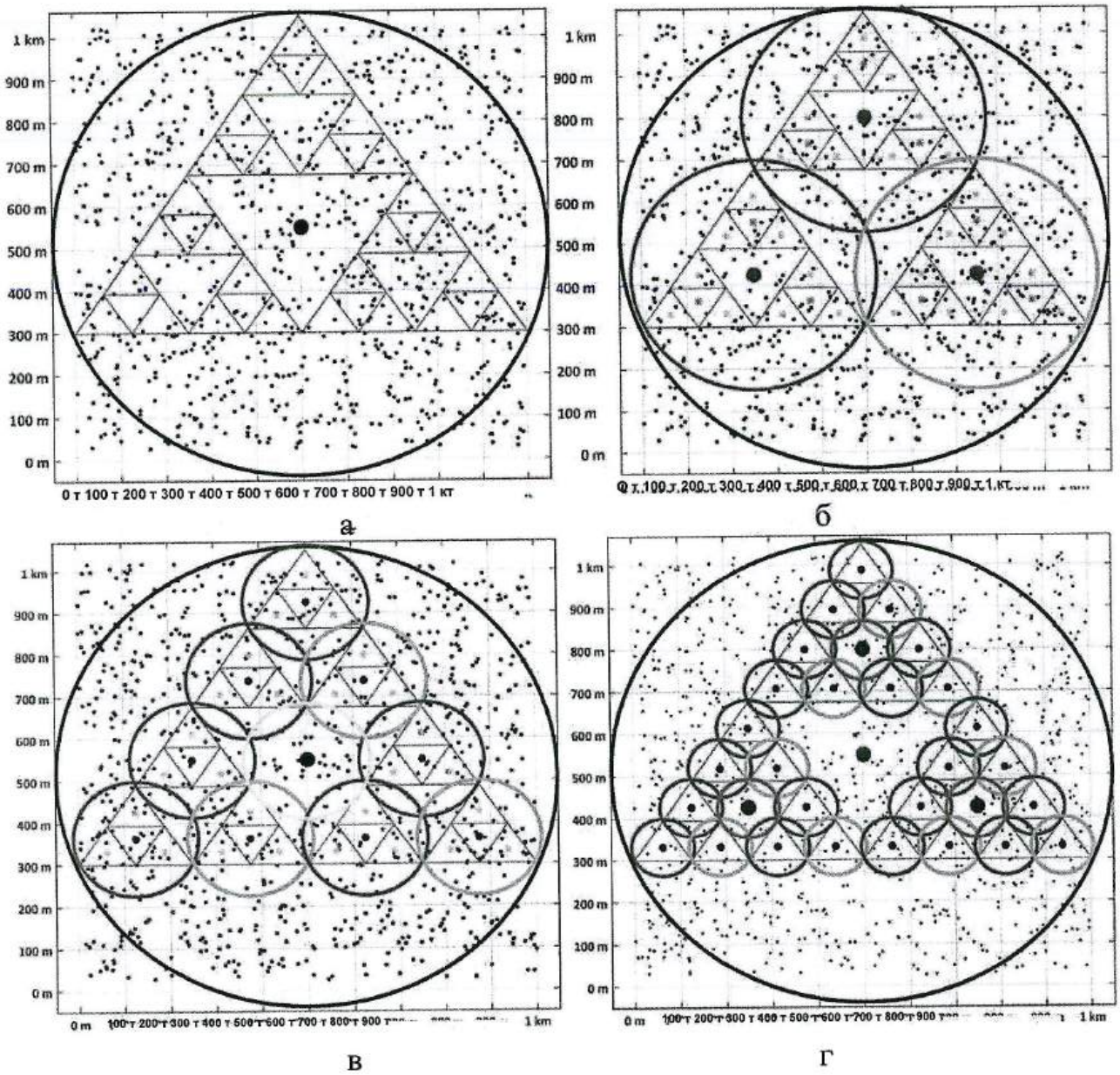
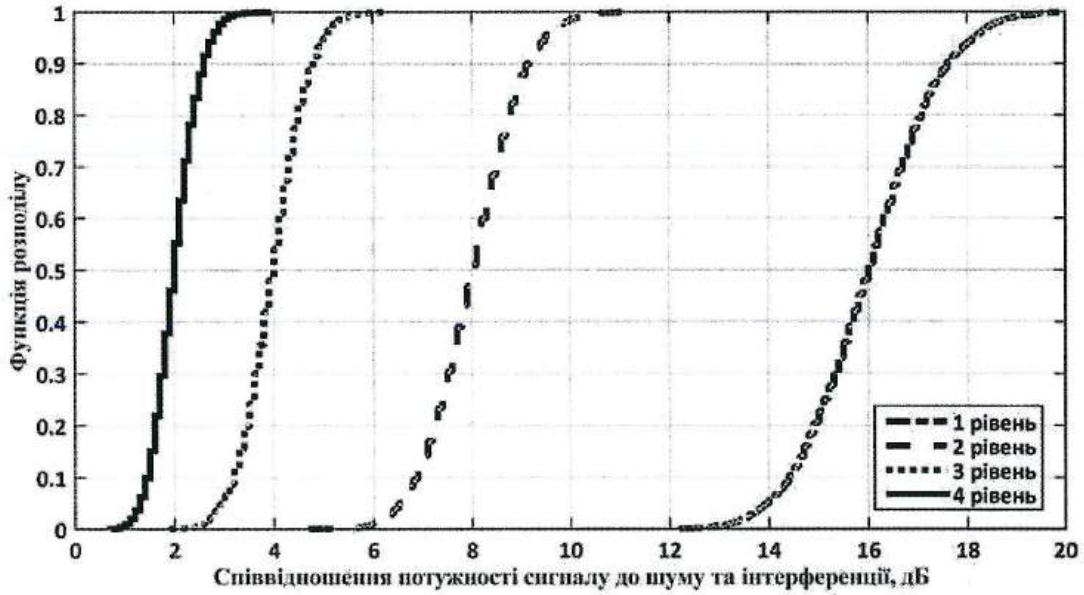
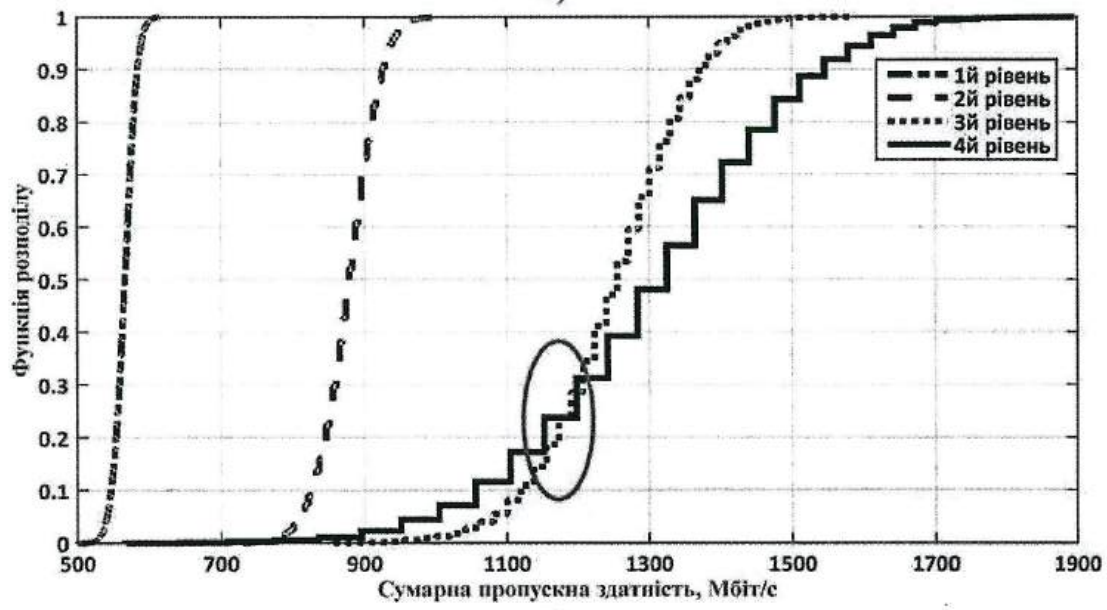


Рис. 3.11. Моделювання окремих рівнів гетерогенної структури мережі: 1й рівень – а), 2й рівень – б), 3й рівень – в), 4й рівень – г)

На рис. 3.12 показано результати моделювання співвідношення сигналу до шуму/інтерференції (SINR) та сумарної пропускної здатності для різних рівнів гетерогенної мережі. Для спрощення процесу моделювання прийнято, що уся топологія є однорівневою, тобто враховується лише внутрішньорівнева інтерференція.



а)



б)

Рис. 3.12. Функції розподілу значень SINR - а) та сумарної пропускної здатності мережі - б) для різних рівнів гетерогенної мережі

З рис. 3.12.а можна побачити, що варіація значень SINR зменшується при зменшенні розміру комірок. Сумарна пропускна здатність мережі для кожного рівня розраховувалась на основі отриманих значень SINR. Як можна побачити з рис. 3.12.б, при досягненні критичного рівня, коли смуга пропускання коміркової мережі стає співмірною із смугою пропускання транспортної мережі (рис. 3.9), спостерігається суттєве зниження сумарної пропускної здатності мережі для структури четвертого рівня. Навіть при рівномірному розподілі абонентів, в ряді

випадків спостерігається, що пропускна здатність структури четвертого рівня (фемтокомірок) може бути нижчою, ніж в структурі третього рівня (пікокомірок).

Отже, можна зробити висновок, що ефективність багаторівневих гетерогенних структур знижується, якщо деякі комірки мають обмежену пропускну здатність транспортного каналу. Також очевидно, що продуктивність гетерогенної мережі є дуже чутливою до густини абонентів у цільовій зоні обслуговування. При недостатній густині абонентів, пікокомірки та фемтокомірки є недовантаженими, що робить їх неефективними з енергетичної точки зору. Тому, важливим аспектом у гетерогенних мережах є балансування навантаження з врахуванням густини користувачів та інтерференції між спільно канальними комірками.

ВИСНОВКИ

Ця робота була написана з метою теоретичного аналізу та подальшої практичної реалізації можливості методів збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління. Таким чином, у роботі зроблено наступне:

1. Проаналізовано поточний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку у напрямку стандартів п'ятого покоління. Визначено основні обмежуючі фактори для впровадження гетерогенних мереж мобільного зв'язку, такі як інтерференція, складність хендоверу, необхідність централізованого керування радіоресурсами, складність реалізації транспортної мережі та відсутність існуючих моделей для структурно-функціонального синтезу багаторівневої коміркової інфраструктури.

2. Здійснено класифікацію потенційних технічних рішень для мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, таких як просторове ущільнення мережі, агрегацію спектру, координоване обслуговування, D2D домени, використання хвиль міліметрового діапазону, багатоантенні системи, технологія програмно-конфігурованих мереж радіодоступу та ряд інших.

3. Адекватність моделей на основі Пуассонівського та параметричного точкових процесів порушується при щільній забудові у великих мегаполісах у зв'язку з тим, що відстань між будівлями є значно меншою від висоти самих будівель.

4. При великій кількості рівнів гетерогенної структури опорна транспортна інфраструктура стає обмежуючим фактором продуктивності мережі, що в свою чергу вимагає значно вищої спектральної ефективності транспортних каналів у порівнянні із каналами користувачів.

5. При дуже малому розмірі комірок, мобільність абонентів спричиняє більш часті хендовери, що дає значну варіацію навантаження у комірках, що потребує динамічної реконфігурації як коміркової так і транспортної інфраструктури.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Annapureddy S. Coordinated Joint Transmission in WWAN / S. Annapureddy // IEEE Commun. Theory Wksp. - Cancun, Mexico, May 2020.

2. Weiss T. A. Spectrum pooling: An innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency / T. A. Weiss and F. K. Jondral // IEEE Commun. Mag, radio Communications Supplement, Mar. 2019 - vol. 42 - no. 3 - pp. S8-S14

3. C-RAN: The Road Towards Green RAN - White Paper, ver. 3.0 — China: China Mobile Research Institute, Oct. 2018. — 91 p.

4. Choi S.-H. Channel Estimations Using Extended Orthogonal Codes for AF MultipleRelay Networks Over Frequency-Selective Fading Channels / S.-H. Choi, J.-S. Baek, J.-S. Han, and J.-S. Seo // IEEE Transactions on Vehicular Technology, January 2014 - vol. 63 - no. 1 - P.417-42

5. System and method for distributed input distributed output wireless communications / A. Forenza, R. W. Heath Jr, S. G. Perlman, R. Van der Laan and J. Speck - U.S. Patent No. 8,428,162. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2013.

6. Lee J.-H. Probabilistic Limited Feedback Precoding in MIMO Interference Channels / J.-H. Lee // IEEE Communications Letters December, 2012 — vol. 16 - no. 12

7. Insoo N. A Holistic View on Hyper-Dense Heterogeneous and Small Cell Networks / H. Insoo, S. Bongyong, S.S. Soliman // IEEE Communications MagazineUSA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013 - vol. 51 - no. 6 - P.20-27

8. Nakamura T. Trends in small cell enhancements in LTE advanced / T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour et al. // IEEE Communications MagazineUSA - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013 - vol. 51 — no. 2 - P.98-105

9. 3GPP TS 36.104 version 12.1.0, " EUTRA; Base Station Radio Transmission and Reception."

10. Okino K. Pico cell range expansion with interference mitigation toward LTE-

Advanced heterogeneous networks / K. Okino, T. Nakayama, , C. Yamazaki, H. Sato, Y. Kusano // In Communications Workshops (ICC), 2011 IEEE International Conference - June, 2011 - P. 1-5

11. Hu R.Q. Resource Management for Heterogeneous Networks in LTE Systems: tutorial. / R.Q. Hu, Y. Qian // SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering - USA: Springer, 2014. - 93 p.

12. Grant A. Convergence of linear interference cancellation multiuser receivers. / A. Grant, C. Schlegel // Communications, IEEE Transactions - 200 - 149(10) - P. 18241834.

13. Ahmed E. Self-interference cancellation with nonlinear distortion suppression for full-duplex systems / E. Ahmed, A. M. Eltawil, A. Sabharwal // In Signals, Systems and Computers, 2013 IEEE Asilomar Conference - November, 2013 - P. 1199-1203

14. Hong S. K. Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond. / S. K. Hong, J. Brand, J. Choi, M. Jain, J. Mehlman, S. Katti, P. Levis //. Communications Magazine IEEE, 2014 - 52(2) - P. 114-121.

15. Akoum S. Data sharing coordination and blind interference alignment for cellular networks. / S. Akoum, C. S. Chen, M. Debbah, R. W Heath // In Global Communications Conference (GLOBECOM) - 2012, December - P. 4273-4277

16. Liu C. A novel multi-service small-cell cloud radio access network for mobile backhaul and computing based on radio-over-fiber technologies. / C. Liu, L. Zhang, M. Zhu, J. Wang, L. Cheng, G. K. Chang // Lightwave Technology Journal, 201331(17) - P. 2869-2875.

17. Parkvall S. Evolution of LTE toward IMT-advanced / S. Parkvall, A. Furuskär, E. Dahlman // Communications Magazine, IEEE, 2011 - 49(2) - P. 84-91.

18. Bhosale R. D. Performance Evaluation of Unlicensed Mobile Access Using WiFi. / R. D. Bhosale, A. R. Nigavekar // Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), 2015 International Conference IEEE - 2015, February - P. 148-152.

19. Ratasuk R. LTE in unlicensed spectrum using licensed-assisted access / N. Mangalvedhe, A. Ghosh // In Globecom Workshops IEEE - December, 2014 - P. 746-

751

20. Doppler K. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks / K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting et al. // IEEE Communications Magazine - vol. 47, no. 12 - USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. - P.42-49.

21. Silva C. F. M. Radio Resource Management for Device-to-Device Communications in Long Term Evolution Networks / C. F. M. Silva, J. M. B. Silva, T. F. Maciel, F. R. P. Cavalcanti, Ed. Springer // New York, 2014 - http://dx.doi.org/10.1007/978-1- 4614-8057-03.

22. Mitola J. Cognitive radio: making software radios more personal / J. Mitola, G. Q. Maguire // Jr IEEE Personal Communications, 1999 - vol. 6 - no.4 - pp.13-18

23. Chen R. A 0.5-to-3 GHz software-defined radio receiver using discrete-time RF signal processing. / R. Chen, H. Hashemi // Solid-State Circuits, IEEE Journal, 2014 - 49(5) - P. 1097-1111.

24. Bloessl B. (). Timings matter: standard compliant ieee 802.11 channel access for a fully software-based SDR architecture / B. Bloessl, A. Puschmann, C. Sommer, F. Dressler // In Proceedings of the 9th ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation and characterization - 2014, September - P. 57-64

25. Cai X. Energy-efficient Relay MAC with Dynamic Power Control in Wireless Body Area Networks / X. Cai, J. Yuan, X. Yuan, W. Zhu, J. Li, C. Li and S. Ullah // KSII Transactions on Internet and Information Systems - 2013 - Vol.7 - No.7 - P. 1547-1568.

26. Saleh A. RRSEB: A Reliable Routing Scheme For Energy-Balancing Using A Self- Adaptive Method In Wireless Sensor Networks / A. Saleh, B. Ali, H. Mohamad, M. Rasid and A. Ismail // KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2013 - Vol. 7 - No.7 - P.1585-1609.

27. Demestichas P. 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network / P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu and J. Yao // IEEE Vehicular Technology Magazine - vol. 8 - no.3 - P. 47-53

28. Kaufman B. Spectrum sharing scheme between cellular users and ad-hoc

device-to- device users. / B. Kaufman, J. Lilleberg, B. Aazhang // Wireless Communications, IEEE Transactions, 2013 - 12(3) - P. 1038-1049.

29. Jailton J. A quality of experience handover architecture for heterogeneous mobile wireless multimedia networks / J. Jailton, T. Carvalho, W. Valente, C. Natalino, R. Frances, K. Dias // IEEE Communications Magazine, Jun., 2013 - vol. 51 - no. 6 - P. 152-159

30. Mueck M. Novel Spectrum Usage Paradigms for 5G / M. Mueck, W. Jiang, J. Sung // White Paper — USA: IEEE TCCN SIG CR in 5G, 2014. — 77 p.

31. FCC, "Amendment of the Commission's Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550-3650 MHz Band," GN Docket No. 12-354, Notice of Proposed Rule Making, 27 FCC Rcd 15594, 2012.

32. Zhang H. Coexistence of Wi-Fi and heterogeneous small cell networks sharing unlicensed spectrum. H. Zhang, X. Chu, W. Guo, S Wan // Communications Magazine, IEEE, 2015 - 53(3) - P.158-164

33. Khan F. Millimeter-wave mobile broadband with large scale spatial processing for 5G mobile communication / F. Khan, Z. Pi, S. Rajagopal // In IEEE 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Oct. 2012 - P. 1517-1523

34. Rappaport T. S. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! / Rappaport T. S., Sun S., Mayzus R., Zhao H., Azar Y., Wang K., Gutierrez F. // IEEE Access, 2013 - 1 -P. 335-349.

35. Yin B. High-throughput beamforming receiver for millimeter wave mobile communication / Yin B., Abu-Surra S., Xu G., Henige T., Pisek E., Pi Z., Cavallaro J. R. // Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec. 2013 - P. 3697-3702.

36. Pi Z. A millimeter-wave massive MIMO system for next generation mobile broadband / Pi Z., Khan F. // Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Nov. 2012 - P. 693-698.

37. Choi J. Noncoherent trellis coded quantization: A practical limited feedback technique for massive MIMO systems / Choi J., Chance Z., Love D. J., Madhow U. // IEEE Transactions on Communications, 2013 - 61(12), P. 5016-5029.

38. Yin H. A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems / Yin H., Gesbert D., Filippou M., Liu Y. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013 - 31(2) - P. 264-273.

39. Hur S. Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks/ Hur S., Kim T., Love D. J., Krogmeier J. V., Thomas T., Ghosh A. // IEEE Transactions on Communications, 2013 - 61(10), P. 4391-4403.

40. Haykin S. Cognitive radio: Brain empowered wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications - 2(23) - P. 201-220.

41. Mitola J. Cognitive radio -An integrated agent architecture for software defined radio // Ph.D. thesis - Royal Institute of Technology (KTH): Sweden - 2000.

42. Stuber G. L. Interference analysis of TV-band whitespace/ Stuber G. L., Almalfouh S. M., Sale D. //Proceedings of the IEEE, 2009 - 97(4) - P. 741-754.

43. Kryszkiewicz P. Out-of-band power reduction in NC-OFDM with optimized cancellation carriers selection/ Kryszkiewicz P., Bogucka H.// IEEE Communications Letters, 2013 - 17(10) - P. 1901-1904.

44. Wyglinski A. M. Effects of bit allocation on non-contiguous multicarrier-based cognitive radio transceivers/ In Proceedings of the IEEE 64th vehicular technology conference (VTC 2006-Fall), Montreal, QC - 2006.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Презентація по магістерській роботі
на тему:

МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ЗОНИ ПОКРИТТЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

Студента Масюка Владислава Олеговича

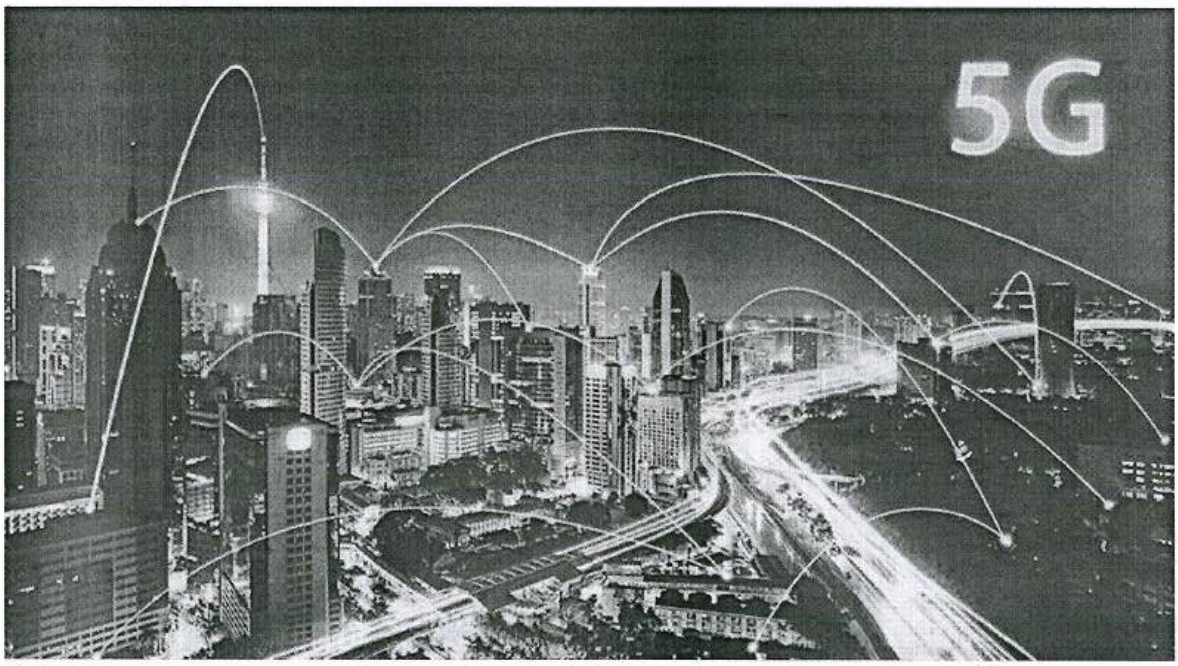
Мета роботи

Мета роботи – дослідити методи збільшення зони покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління.

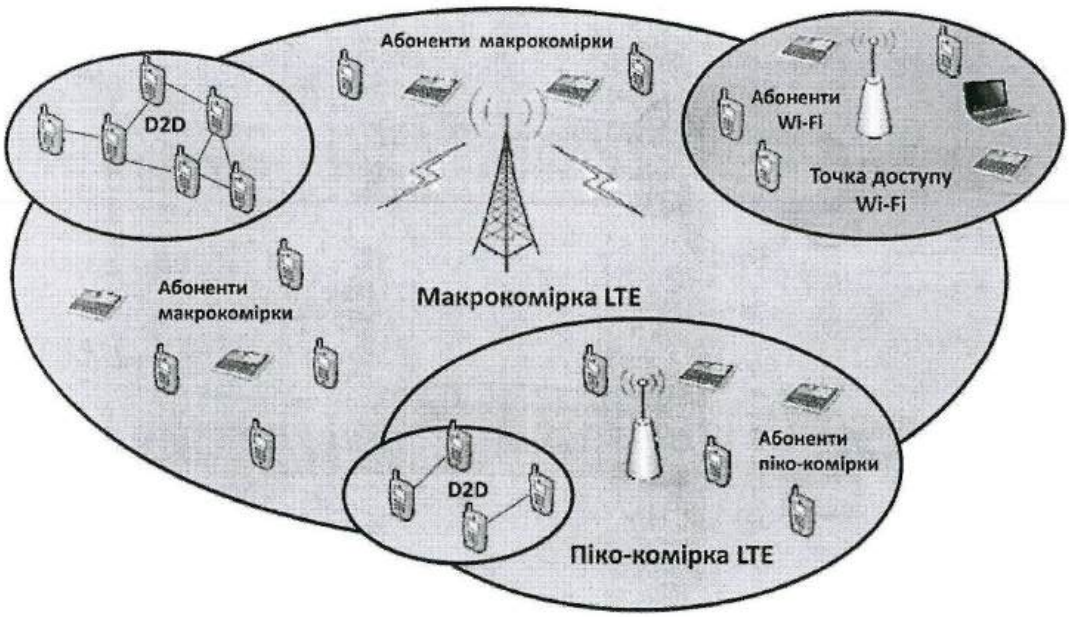
Об'єкт дослідження – процес функціонування конвергентної гетерогенної мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління в умовах обмеженого спектрального ресурсу.

Предмет дослідження – параметри та характеристики гетерогенних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, що визначають енергетичну та спектральну ефективність.

Технології п'ятого покоління



Гетерогенна мережа радіодоступу

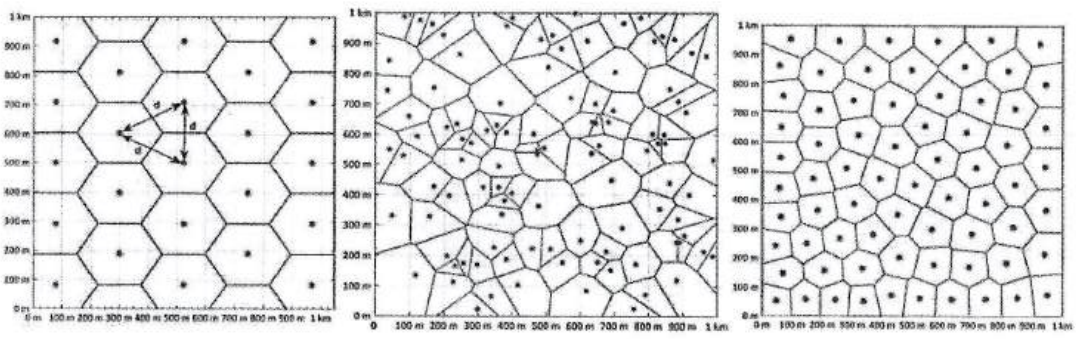


Енергетична та спектральна ефективність

Спектральна ефективність – максимально можливе число біт які можна передати без помилки за 1 секунду в одиночній смузі частот.

Енегетична ефективність – енергетичні витрати на передачу одного біта інформації для забезпечення низькрої ймовірності помилкового прийому одного символу переданого повідомлення.

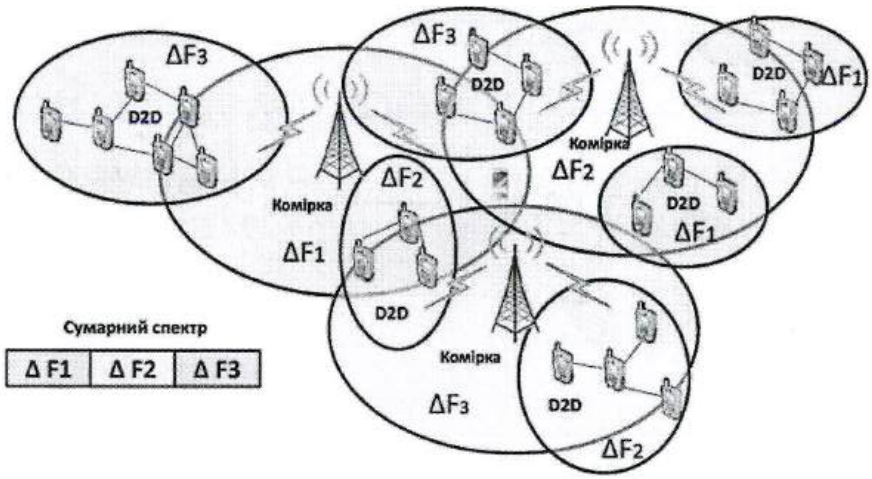
Моделі планування структур коміркових мереж



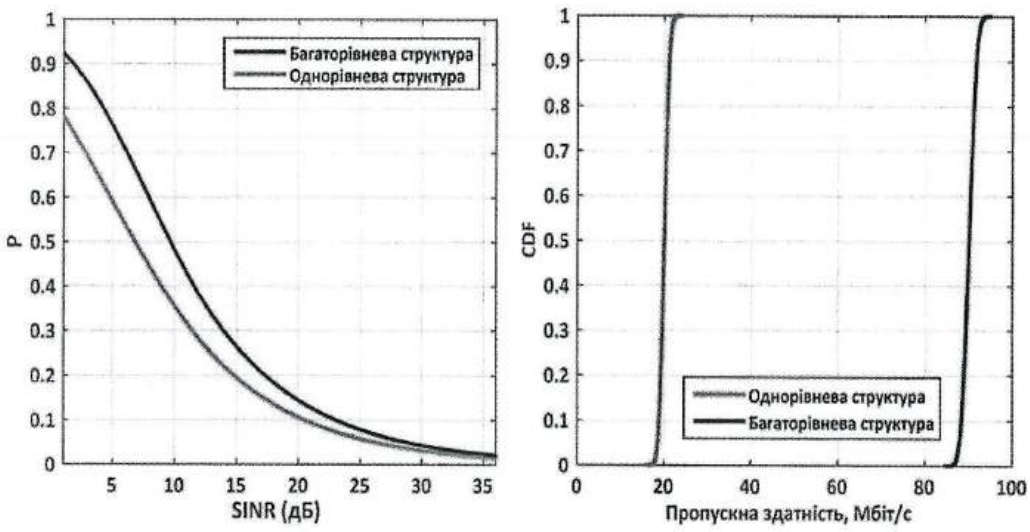
а) б) в)

а) гексагональна сітка, б) Пуассонівський точковий процес,
в) параметричний точковий процес

Архітектура конвергентної гетерогенної мережі на основі міжтермінальної взаємодії



Залежності ймовірності обслуговування від співвідношення SINR



(а) (б)

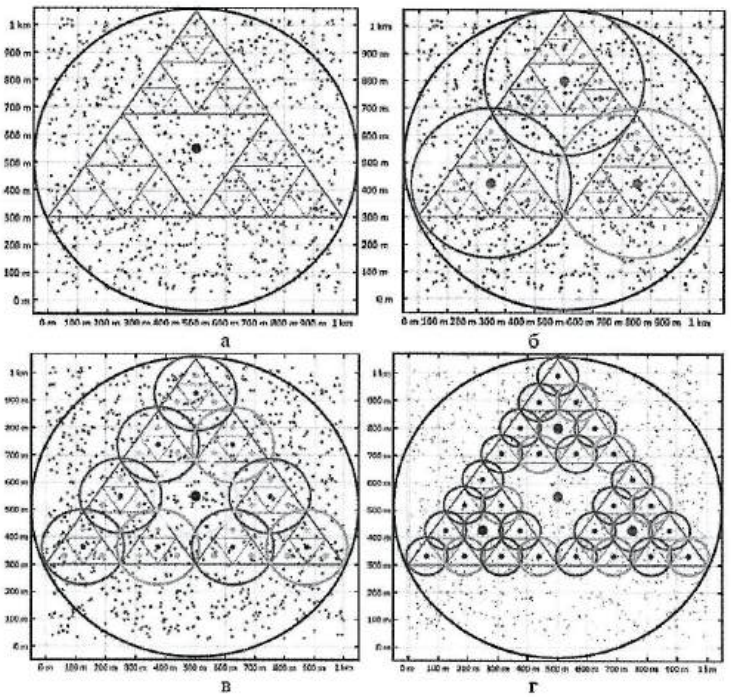
Залежності ймовірності обслуговування від співвідношення SINR (а) функції розподілу пропускної здатності - (б) для одноріvневої та багаторівневої гетерогенної мережі

Результати моделювання мережі мобільного зв’язку

Параметри моделювання:

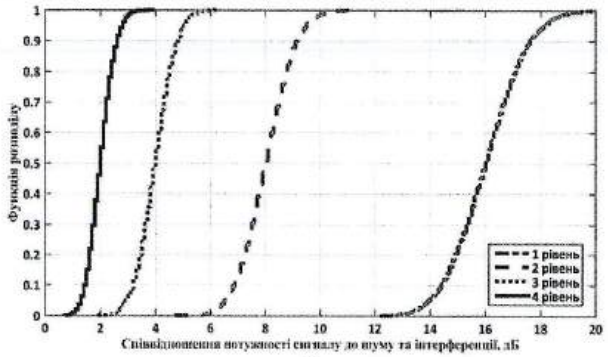
- потужність передавання базової станції макрокомірки - 45 дБм;
- потужність передавання базової станції пікокомірки - 30 дБм;
- потужність передавання базової станції фемтокомірки - 20 дБм;
- порогів рівень чутливості приймача -90 дБм;
- смуга пропускання - 100 МГц;
- спектральна ефективність - 5 біт/с/Гц;
- конфігурація антенної системи - кругова
- модель поширення сигналу - COST-232.

Моделювання окремих рівнів гетерогенної структури мережі

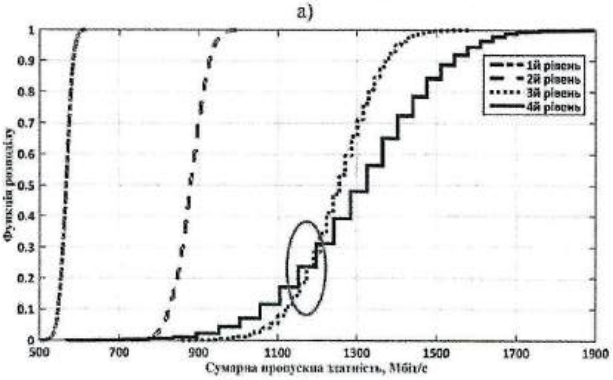


а) 1й рівень
б) 2й рівень
в) 3й рівень
г) 4й рівень

Функції розподілу значень SINR



а)



б)

Висновки

В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

В першому розділі встановлено, що стандарти п'ятого покоління поставлені перед вимогою підвищення пропускної здатності у тисячу разів у порівнянні з існуючими мережами LTE при тому, що спектральний ресурс для мереж мобільного зв'язку не буде істотно збільшуватись. Це, в свою чергу, потребує нових підходів до підвищення спектральної та енергетичної ефективності мереж мобільного зв'язку.

Другий розділ присвячено моделям конвергенції технології D2D з комірковими мережами мобільного зв'язку. Розраховано моделі поширення сигналів у радіоканалах між базовою станцією та абонентським пристроями, а також у каналах між самими абонентськими пристроями, що дає змогу визначити мінімальну необхідну відстань між D2D доменами для забезпечення вимог до інтерференції у каналах зв'язку.

Третій розділ присвячений моделям планування багаторівневих гетерогенних мереж мобільного зв'язку, яка дозволяє збільшувати зону покриття мобільного зв'язку п'ятого покоління за рахунок повного охоплення усіх зон потрібних абонентам. Для цього у розділі запропоновано фрактальну геометричну модель багаторівневої коміркової структури гетерогенної мережі.

Таким чином мета магістерської роботи досягнута.

Апробація результатів магістерської роботи

Основні результати магістерської роботи доповідалися на:

- III міжнародній науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУТ, 30 листопада 2022 р.;

- XV науково-технічній конференції «Сучасні інфокомунікаційні технології», Київ: ДУТ, 9 грудня 2022 р.

Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі "Наукові записки Державного університету телекомунікацій, – 2022, – №1".