

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Інфокомунікацій \_\_\_\_\_  
(повна назва)  
Кафедра \_\_\_\_\_ Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського \_\_\_\_\_  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Методи використання фемтостільників у системах мобільного зв'язку 4G.  
Methods for Using Femtocells in 4G Mobile Communication Systems  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи \_\_\_\_\_ ТСММ-19-1 \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Хачіров Е.Ф. \_\_\_\_\_  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)  
Тип програми: \_\_\_\_\_ освітньо-наукова \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма: Телекомунікаційні системи та  
\_\_\_\_\_ мережі \_\_\_\_\_  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: професор кафедри ІКІ ім. В.В.Поповського  
\_\_\_\_\_ Москалець М.В. \_\_\_\_\_  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ Лемешко О.В. \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище,  
ініціали)

2021р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Інфокомунікацій \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-наукова \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Телекомунікаційні системи та мережі \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту \_\_\_\_\_ Хачірову Едуарду Федоровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Методи використання фемтостільників у системах мобільного зв'язку 4G. Methods for Using Femtocells in 4G Mobile Communication Systems  
затверджена наказом по університету від «10» березня 2021 р. № 343 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 21.05.2021р.

3. Вихідні дані до роботи: Технологія мобільного зв'язку 4G LTE. Сценарії моделювання використання фемтостільників: у приміщенні, зовні, на межі макростільника. Модель поширення радіохвиль Окамура-Хата. Режими розгортання фемтомережі: 1) розподіл виділеного спектра (DSA) -FAP використовує виділений діапазон, який не використовується в макромережі; 2) розподіл загального спектра (SSA) – FAP використовує ті ж частоти, що і макромережі; 3) закрыта група (CSG) – FAP доступний лише для локальної групи користувачів, що знаходяться всередині приміщення, відповідно до встановленого списком доступу; 4) відкрита група користувачів (OSG) – всі MSs мають доступ до обслуговування FAP. Методи теорії упаковки об'єктів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

1. Аналіз передумов та технічних проблем когнітивних фемтостільникових у мережах мобільного зв'язку LTE.

2. Методика територіального планування мережі мобільного зв'язку LTE з використанням фемтостільників
3. Аналіз варіантів розгортання фемтостільників у мережах 4G
4. Моделювання ефективності функціонування мережі 4G з фемтостільниками
5. Методика планування мережі 4G з використанням фемтостільників на основі оптимальних методів упаковки об'єктів
5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій: Демонстраційний матеріал у вигляді ppt-презентації; 1. Титульна сторінка; 2. Мета; 3. Існуюча модель територіальної структури розміщення бс в мережі LTE 4. Концепція використання технологій мікростільників у системах мобільного зв'язку 4G 5. Моделі планування фемтостільників; 6. Результати розрахунку пропускної здатності мережі 4G. 7. Модель планування фемтостільників у міському середовищі; 8. Результати розрахунку пропускної здатності фемтостільників у міському середовищі; 9. Модель розміщення фемтостільників на основі теорії упаковки об'єктів; 10. Алгоритм розміщення фемтостільників у макрокомірці; 11. Висновки.

#### 6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		(підпис)	(дата)
Основна частина	професор Москалець Микола Вадимович		24.05.2021

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	10.03.2021	Виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	19.03.2021	Виконано
3	Розробка 1 розділу	02.04.2021	
4	Розробка 2 розділу	12.04.2021	Виконано
5	Розробка 3 розділу	23.04.2021	Виконано
6	Розробка 4 розділу	10.05.2021	Виконано
	Розробка 5 розділу	15.05.2021	
7	Оформлення кваліфікаційної роботи	19.05.2021	Виконано

Дата видачі завдання 10 березня 2021 року

Студент \_\_\_\_\_ Хачіров Е.Ф.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ професор Москалець М.В.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи містить 103 с., 38 рис., 3 табл., 30 джерел.

LTE, МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ФЕМТО, ФЕМТОСТІЛЬНИК, КОМІРКА, МАКРОМЕРЕЖА, ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ, МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Мета роботи – дослідження ефективності методів використання фемтостільників у системах мобільного зв'язку 4G LTE.

Об'єкт дослідження – фемтостільники мережі мобільного зв'язку 4G LTE.

Предмет дослідження – пропускна здатність макромережі мобільного зв'язку при розподілі ресурсів з використанням фемтостільників.

Проведено аналіз ефективних методів просторового розміщення елементів мережі мобільного зв'язку. У роботі розглянуті варіанти структурних перетворень, що дозволяють збільшувати продуктивність мережі за рахунок використання макро- і мікростільникових осередків, які ефективно застосовуються в місцях щільних кластерних груп абонентів. Показано, що використання макро- і мікростільникових структур дозволяє в 1,5-2 рази збільшити продуктивність мережі.

## THE ABSTRACT

Explanatory note contains: 103 p., 38 fig., 3 tabl., 30 sources.

LTE, MOBILE COMMUNICATION, FEMTO, FEMTOCELL, CELL, MAC-NETWORK, NETWORK PLANNING, PLANNING METHODOLOGY, BANDWIDTH, POSSIBILITY

The purpose of the work is to study the effectiveness of methods of using femtocells in 4G LTE mobile communication systems.

The object of study - femtocells of the 4G LTE mobile network.

The subject of the study is the bandwidth of the mobile macro network in the allocation of resources using femtocells.

The analysis of effective methods of spatial arrangement of elements of a mobile communication network is carried out. The paper considers variants of structural transformations that allow to increase network productivity through the use of macro- and microcellular cells, which are effectively used in places of dense cluster groups of subscribers. It is shown that the use of macro- and microcellular structures allows to increase the network productivity by 1.5-2 times.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів.....	Стр. 8
.....	
Вступ.....	9
1 Передумови та технічні проблеми когнітивних фемтостільникових систем LTE.....	10
1.1 Тенденції розвитку мобільних мереж зв'язку 4G.....	10
1.2 Поточна стандартизація.....	12
1.3 Технологія довгострокового розвитку LTE.....	12
1.4 Мережі фемтостільників.....	17
1.4.1 Потреба в базовій станції з малим стільником.....	19
1.4.2 Аспекти розгортання фемтостільників.....	20
1.4.3 Механізми доступу.....	21
1.5 Техніка когнітивного радіо.....	24
1.5.1 Функції когнітивних мереж.....	25
1.5.2 Спектральне зондування.....	26
1.6 Управління когнітивною мережею з використанням фемтостільників.....	28
.....	29
1.6.1 Централізована мережева архітектура.....	30
1.6.2 Розподілена мережева архітектура.....	31
1.6.3 Гібридна мережева архітектура.....	33
1.7 Когнітивні фемтостільники в системах LTE.....	
1.8 Технічні проблеми при функціональному розгортанні мережевих систем фемтостільників.....	35
1.8.1 Рішення про спектр і ефективність розподілу.....	37
1.8.2 Забезпечення поінформованості про QoS через транзитну мережу.....	38
1.8.3 Управління ресурсами і планування мережі.....	39
Інтернет.....	42
1.8.3 Управління ресурсами і планування мережі.....	43

1.8.4 Проблема оптимізації завад.....	
1.8.5 Проблеми з мобільністю.....	
1.8.6 Проблеми самоорганізації та енергоефективності.....	44
2 Методика територіального планування мережі мобільного зв'язку LTE з використанням фемтостільників.....	44
2.1 Існуюча методика частотного планування безпроводових мереж 4G.....	58
2.2 Модель Окамура-Хата.....	59
2.3 Розрахунок пропускної здатності в мережах фемто / піко / макростільниками в міському середовищі.....	63
2.3.1 Модель енергетичного розрахунку з урахуванням механізмів поширення в міських умовах.....	64
2.3.2 Модель поширення в приміщенні.....	66
3 Аналіз варіантів розгортання фемтостільників у мережах 4G.....	73
3.1 Аналіз ефективності використання фемтостільників.....	73
3.2 Способи розгортання фемтостільників, що використовуються для збільшення пропускної здатності у мережах 4G.....	76
4 Моделювання ефективності функціонування мережі 4G з фемтостільниками.....	81
4.1 Сценарії моделювання фемтостільників у мережі 4G.....	
4.2 Рекомендації щодо розподілу фемтостільників.....	
4.3 Моделі пропускної здатності фемтостільника за умов поширення радіохвиль у міському середовищі.....	
5 Методика планування мережі 4G з використанням фемтостільників на основі оптимальних методів упаковки об'єктів.....	
ВИСНОВКИ.....	100
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	101

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

БС - базова станція

3GPP - 3rd Generation Partnership Project - партнерська асоціація груп телекомунікаційних компаній, головною метою створення якої є розробка і затвердження стандартів для мережевих технологій третього покоління

4G - 4th Generation - четверте покоління пересувного (мобільного) радіозв'язку

Band - радіочастотний спектр

CDD - Cyclic Delay Diversity – рознесення за циклічною затримкою

EPC - Evolved Packet Core - структура для надання конвергентної передачі голосу і даних в 4G LTE мережах

FDD - Frequency Division Duplex - дуплекс з частотним розділенням

FDM - Frequency-Division Multiple - мультиплексування з частотним поділом каналу

GW – Gateway - шлюз

LTE - Long Term Evolution - довготерміновий розвиток

MBSFN - Multicast-broadcast single-frequency network - мультимедійний ширококомовний сервіс для одночастотної мережі

MIMO - Multiple Input Multiple Output - системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами

OFDM - Orthogonal frequency-division multiplexing - мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналу

OFDMA - Orthogonal Frequency-Division Multiple Access - це метод забезпечення передачі інформації багатьом користувачам одного радіо спектра на основі технології OFDM

QAM – Quadrature Amplitude Modulation –квadrатурно-ампліудна модуляція

SNR - signal-to-noise ratio - відношення сигнал/шум

## ВСТУП

Протягом останніх десятиліть відзначається бурхливе зростання споживання трафіку, що надається системами мобільного зв'язку. Це зростання призвело до того, що спочатку виділені для цього зв'язку та задіяні в ньому фізичні ресурси (частотно-часові та просторово-поляризаційні) почали вичерпуватися. Для вирішення задачі подальшого зростання числа споживачів були знайдені нові види та структури сигналів, методи економії радіочастотного спектру, нові схеми множинного (багатостанційного) доступу, оператори, що працюють в Україні (Київстар, Астеліт, Vodafone та ін.) знайшли рішення колективного використання ресурсів і обладнання. Одною з найбільш проблематичних задач підвищення ефективності мобільних систем зв'язку є обмеженість можливостей щодо множинного доступу. Спроби перевести мобільні системи в інші більш високочастотні діапазони сантиметрових або міліметрових хвиль представляються поки не конструктивними, оскільки для цього будуть потрібні величезні кошти на заміну всього обладнання базових і абонентських станцій. Водночас, ще не до кінця вичерпані всі резерви фізичних ресурсів, зокрема просторових. Слід зазначити, що просторові параметри, які на сьогодні задіяні в задачах рознесеного прийому систем зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами MIMO (Multiple Input Multiple Output), при побудові мікро і фемтостільників та ін., використовуються в пасивному варіанті, забезпечуючи при цьому потрібну енергетику в лініях мобільного зв'язку. Більш ефективним є активне їх використання, що розширює простір параметрів доступу. В роботі розглянуто стан поточних досліджень фемтостільників з особливим акцентом на ключові технічні проблеми управління міжрівневими радіозавадами, розподілу ресурсів, забезпечення QoS, багаторівневого доступу до спектру і того, як забезпечити контроль потужності над когнітивними функціями.

Таким чином, в даній кваліфікаційній роботі здійснюється розробка питань, щодо дослідження методів структурних перетворень, що дозволяють збільшувати продуктивність мережі за рахунок використання макро- і мікростільникових осередків, які ефективно застосовуються в місцях щільних кластерних груп мобільних користувачів.

# 1 ПЕРЕДУМОВИ ТА ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ КОГНІТИВНИХ ФЕМТОСТІЛЬНИКОВИХ СИСТЕМ LTE

## 1.1 Тенденції розвитку мобільних мереж зв'язку 4G

Очікується, що системи мобільного широкосмугового зв'язку 4G вирішать невідомі проблеми систем третього покоління (3G) і нададуть широкий спектр нових послуг, обробляючи прогнозовані обсяги трафіку і задовольняючи постійно зростаючі потреби користувачів в швидкості передачі даних доступним способом. Термін 4G широко використовується для позначення декількох типів систем зв'язку з безпроводовим доступом, не обмежуючись стільниковими телефонними системами. Передбачається, що 4G забезпечить високу швидкість; висока ємність, низька вартість бітів і послуги на основі IP. 4G – це інтегрована глобальна IP-мережа, заснована на підході відкритих систем [1]. Підвищена потреба мобільних клієнтів в регульованій смузі пропускання змусить операторів оптимізувати використання можливостей базової станції. На відміну від попередніх поколінь, здатність базової станції ефективно задовольняти потребу в послугах всіх своїх мобільних клієнтів буде сильно обмежена і в основному буде залежати від обмежень її інфраструктури, а також від розподілу послуг між її мобільними клієнтами. Проте, у зв'язку з успішним розгортанням стільникових мереж 3G в усьому світі увага індустрії мобільного зв'язку тепер прикута до еволюції безпроводових широкосмугових систем, що виходить за рамки 3G, щоб задовольнити кінцевих користувачів. Майбутня система стільникового широкосмугового зв'язку 4G прогнозує потенційно плавну інтеграцію цих нових технологій, щоб підтримувати ефективний зв'язок з високою швидкістю передачі даних, підтримуваний глобальним роумінгом і персональними послугами, змінюваними користувачем [2].

Існує три різних можливих підходу до розвитку майбутніх мереж 4G. По-перше, це збільшення пропускної здатності стільника з використанням нових технологій, таких як LTE, який замінює магістральні станції WiMAX. По-друге, це підвищення спектральної ефективності з використанням реконфігурованих технологій, таких як CR і вдосконалені антенні системи. Третій підхід полягає в розробці нових архітектур для мобільних мереж, які допомагають забезпечити

автономний зв'язок. Комбінація цих технологій і механізмів, а то й всіх трьох, призведе до нового покоління ефективних мереж 4G, які можуть бути розгорнуті для задоволення величезних потреб в трафіку і різних відповідних технологій. На рисунку 1.1 показані різні запропоновані рішення для майбутньої стандартизації систем 4G. У майбутніх мережах буде використовуватися IP-середовище для всіх запитів трафіку, включаючи голос, відео і віщальні середовища, які можуть отримати доступ до наземних і безпроводових мереж. Це інтегровано в майбутні рішення 4G і його додатки. Разом з інтелектуальними терміналами 4G може забезпечити легкий доступ до широкосмугових послуг і розуміння особистих профілів завантаження.

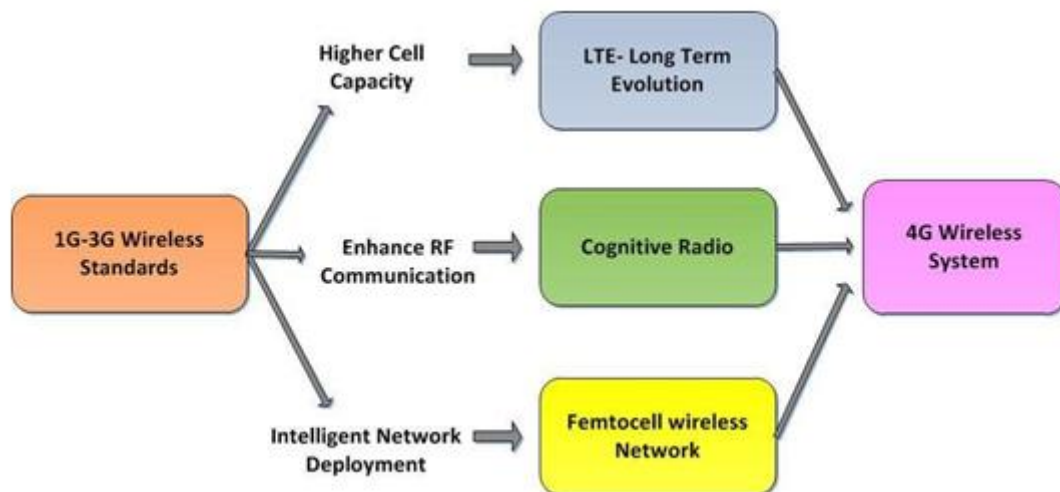


Рисунок 1.1 – Майбутні системи 4G з різними технічними додатками

Це забезпечує безперервне покриття для користувача, який змінює термінали або непомітно перемикається між лежачими в основі фіксованими і мобільними мережами. Це дуже важливо для однорангових мереж і для мобільного користувача, який переміщається між різними терміналами однієї мережі або з терміналами третіх сторін. Коротше кажучи, мережа 4G надає окремим користувачам повний контроль над конфіденційністю та витратами. Це природне продовження сучасних технологій широкосмугового Інтернету і мобільних мереж 3G, таких як UMTS.

У цьому розділі розглядаються ключові технічні проблеми, що виникають при управлінні розгортанням системи фемтостільників. Існує так багато вимог для мінімізації витрат на фемтостільники для ефективної конкуренції з повсюдною

технологією Wi-Fi. Основна проблема при розгортанні фемтостільників - це завади для базової станції макростільниками. Розглядаються й інші функції фемтостільників, включаючи управління ресурсами, управління розподілом спектра, забезпечення QoS через транзитну мережу Інтернет і дозвіл доступу до фемтостільників [3]. Передача обслуговування і мобільність також є дуже важливими аспектами в мережах фемтостільників, оскільки існують різні типи передачі обслуговування фемтостільників від/до макростільника. Крім того, в безпроводових мережах наступного покоління дуже важливо враховувати енергоспоживання.

## 1.2 Поточна стандартизація

Як і для будь-якої іншої нової технології, промислова стандартизація є дуже важливим фактором як з точки зору ринкового визнання, так і з точки зору економії в масштабі (тобто Екосистеми). Фемтостільники не виняток [4]. На початку 2008 року тема стандартизації фемтостільників UMTS викликала величезний інтерес у багатьох операторів мобільного зв'язку, і зусилля з пошуку способу включити цю можливість в UMTS Release 8 почалися з великою інтенсивністю. У квітні 2009 року Проект партнерства третього покоління (3GPP) у співпраці з фемто-форумом та форумом широкосмугового зв'язку випустив перший в світі стандарт фемтостільників. Цей стандарт охоплює різні аспекти розгортання фемтостільників, включаючи архітектуру мережі, радіозавади, управління фемтостільників, забезпечення і безпеку [5]. Одночасно ряд операторів - AT & T (США), O2, Motorola (Європа) і Softbank (Японія) - проводять випробування фемтостільників перед виходом на ринок. 3GPP - це основна організація за міжнародними стандартами, що займається мобільними мережами, які використовують сімейства технологій радіоінтерфейсу GSM/UMTS і LTE. Тому 3GPP пов'язує стандарти фемтостільників UMTS [6]. Хоча зусилля по стандартизації все ще тривають, застосовувані в даний час технології є надихаючим керівництвом для розробки будь-яких моделей на майбутнє.

## 1.3 Технологія довгострокового розвитку LTE

Технологія четвертого покоління структурована для задоволення основних вимог до збільшення ємності і покращеної продуктивності мережі. LTE призначений для забезпечення високої швидкості передачі даних, низької затримки і оптимізації пакетів. Тим часом, в LTE немає домену з комутацією каналів, голосовий зв'язок засновано на протоколі передачі голосу через Інтернет (VoIP) поверх IP-протоколу з комутацією пакетів. LTE підтримує широкий діапазон смуг пропускання від 1,25 МГц до 20 МГц. Смуга пропускання 20 МГц забезпечує пікову швидкість передачі даних 326 Мбіт/с при використанні 4x4 Multiple Input Multiple Output (MIMO). Для висхідної лінії зв'язку MIMO в даний час не реалізований, тому швидкість передачі даних по висхідній лінії зв'язку обмежена 86 Мбіт/с. Будучи розвитком LTE, LTE-Advanced повинна бути зворотно сумісною в тому сенсі, що повинна бути можливість розгорнути LTE-Advanced в спектрі, вже зайнятому LTE, без впливу на існуючу LTE клеми [7].

LTE пропонує важливі розробки в порівнянні з попередніми технологіями, такими як високошвидкісний пакетний доступ (HSPA) і універсальна мобільна телекомунікаційна система (UMTS), представляючи новий рівень РНУ і покращуючи центральну мережу. Основними причинами цих змін в конструкції системи мережі радіодоступу (RAN) є потреба в забезпеченні більш високої спектральної ефективності, меншої часової затримки і більшої багатокористувацької гнучкості, ніж у розгорнутих в даний час мережах. При розробці і стандартизації LTE, а також при впровадженні виробниками обладнання моделювання необхідні для тестування і оптимізації алгоритмів і процедур. Це повинно виконуватися як на фізичному рівні (канальний рівень), так і в контексті мережі (системний рівень) [8].

У мережах LTE і LTE-Advanced як метод множинного доступу було вибрано мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM) [9], оскільки воно може забезпечити високі швидкості передачі даних і ефективність використання спектра. В OFDM вся смуга пропускання ділиться на невеликі піднесучі або паралельні канали, які потім використовуються для передачі зі зниженою швидкістю передачі сигналів. Ці піднесучі ортогональні один одному, що означає, що вони складаються з набору окремих піднесучих і між ними немає завад. Кожну частоту піднесучої вибирають так, щоб ціле число циклів в періоді символу. Частота піднесучої показана в наведеному нижче рівнянні:

$$f_{cs} = k\Delta f, \quad (1.1)$$

де  $\Delta f$  - рознесення піднесучих. У них не обов'язково повинна бути одна і та ж фаза, тому велике ціле число циклів в символному часі  $T$ .

Піднесущая спочатку модулюється символом даних або 1, або 0, результуючий символ OFDMA потім формується простим додаванням модульованого сигналу несучої. У технологіях LTE і LTE-Advanced в якості процесу множинного доступу вибирається прямокутний OFDM, оскільки він може забезпечувати високі швидкості передачі даних і ефективність використання спектра. У системах LTE, заснованих на OFDM, користувачі мультиплекуються за часом і частотою за допомогою планувальника, який динамічно виділяє піднесучі для різних користувачів в різні моменти часу відповідно до попередньо визначених метриками планування. Тому множинні передачі на основі OFDM за допомогою когнітивних радіостанцій були відомі як ефективна система, що відповідає вимогам майбутніх когнітивних безпроводових мереж [9].

OFDM - це спектрально ефективна структура передачі, яка розділяє потік даних з високою швидкістю передачі даних на кілька паралельних вузькосмугових потоків даних з низькою швидкістю передачі даних, що їх називають піднесучими. Цей розподіл виконується таким чином, що піднесучі ортогональні один одному, що усуває необхідність в піднесучих, що не перекриваються, щоб уникнути завад між несучими. Перша несуча вибирається так, щоб її частота містила ціле число циклів в періоді символу, як показано на рисунку 1.2.

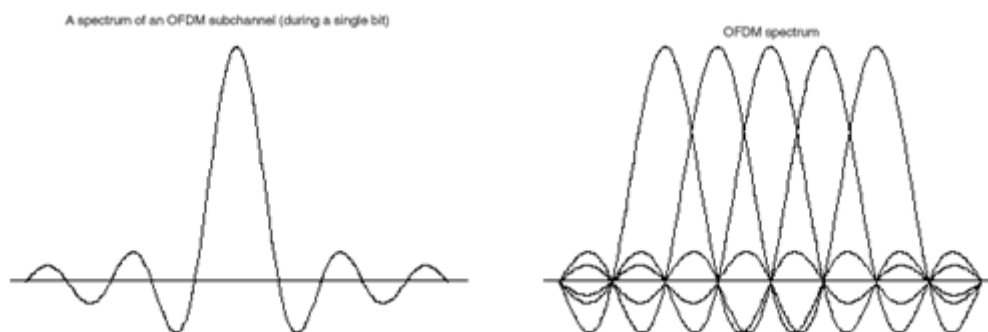


Рисунок 1.2 – Частотно-часове подання піднесучої OFDM

Щоб зробити піднесучі ортогональними один одному, сусідні піднесучі рознесені на [9]:

$$BW_{sc} = BW N_{sc}, \quad (2.2)$$

де  $BW$  означає номінальну смугу пропускання високошвидкісного потоку даних, а  $N_{sc}$  відноситься до кількості піднесучих.

OFDM пропонує високу спектральну ефективність, дозволяючи перекривати спектр піднесучих. Для того, щоб це працювало, необхідно зменшити ІСІ завад між несучими між піднесучими. Це досягається за рахунок того, що піднесучі взаємно ортогональні. Ортогональність між піднесучими підтримується за рахунок ретельного вибору інтервалу між піднесучими і економія смуги пропускання за допомогою OFDM в порівнянні з традиційною системою з тієї ж пропускнуою здатністю піднесучої.

OFDM, як показано на рисунку 1.3, ділить смугу частот на вузькі ортогональні частини, звані піднесучими. Піднесучі включають в себе несучі даних, пілотні несучі і піднесучі постійного струму (DC). Носії даних використовуються для перенесення даних; пілотні несучі використовуються для визначення каналу, а DC маркує центр каналу. Традиційна система використовує захисну смугу між сусідніми піднесучими. З іншого боку, спектри піднесучих OFDM перекриваються, що призводить до більш високої спектральної ефективності.

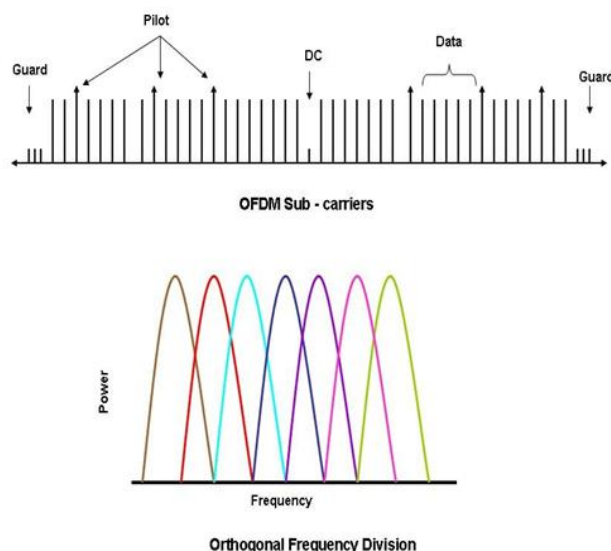


Рисунок 1.3 – Смуга частот OFDM

Кожна піднесуча модулюється за допомогою традиційної схеми модуляції, такий як квадратурна амплітудна модуляція (QAM) або фазова маніпуляція (PSK) з низькою швидкістю передачі символів. Ортогональність піднесучих означає, що кожна піднесуча має ціле число циклів протягом періоду символу, отже, існує різниця цілого числа циклів між будь-якими двома піднесучими протягом періоду символу. Це гарантує, що спектр кожної піднесучої має нульове значення на центральній частоті кожної з інших піднесучих в системі [10].

OFDMA - відмінний вибір схеми мультиплексування для низхідної лінії зв'язку 3GPP LTE. Хоча це пов'язано з деякою складністю з точки зору планування ресурсів смуги пропускання, воно значно перевершує підходи з перетворенням пакетів з точки зору ефективності та затримки. У OFDMA користувачам виділяється певна кількість піднесучих на запрограмований період часу. У специфікаціях LTE вони називаються блоками фізичних ресурсів (PRB). Таким чином, PRB мають як часовий так і частотний вимір. Розподіл PRB обробляється функцією планування на базовій станції 3GPP (eNodeB) [11].

Структура кадру LTE має тривалість 10 мс, як показано на рисунку 1.4. Кожен кадр ділиться на 10 підкадрів, довжина кожного підкадру становить 1,0 мс. Кожен підкадр додатково ділиться на два слоти, кожен тривалістю 0,5 мс. Слоти складаються з 6 або 7 символів OFDM, в залежності від того, чи використовується нормальний або розширений циклічний префікс.

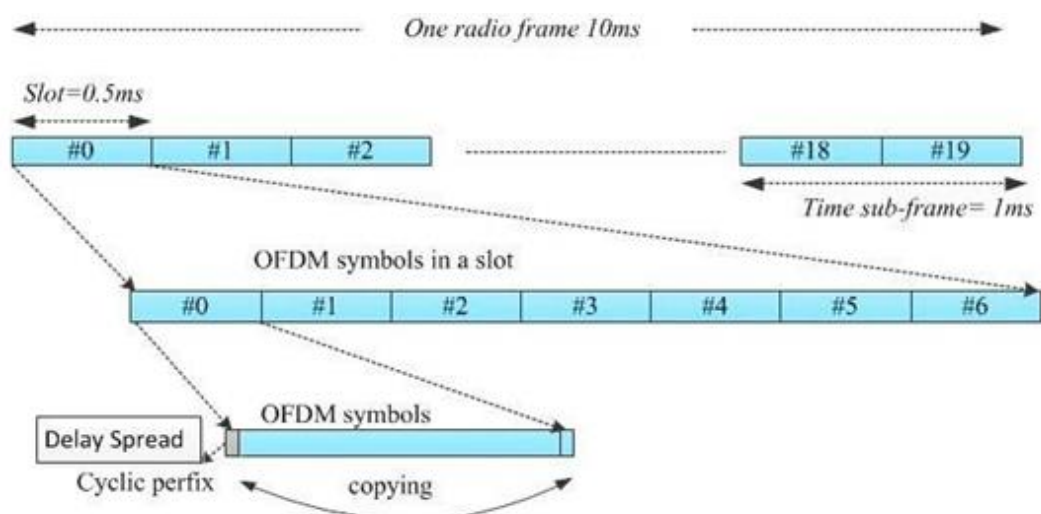


Рисунок 1.4 – Структура кадру LTE

Вимоги до висхідного каналу LTE відрізняються від вимог до низхідного каналу з кількох причин. Не дивно, що споживана потужність є ключовим фактором для терміналів UE. Множинний доступ з однієї несучої і частотної області (SC-FDMA) добре підходить для вимог висхідного каналу LTE. Базова архітектура передавача і приймача дуже схожа (майже ідентична) на OFDMA і забезпечує таку ж ступінь захисту від багатопроменевого поширення [11].

#### 1.4 Мережі фемтостільників

Фемтостільник - це економічне рішення для забезпечення високошвидкісного зв'язку всередині приміщень замість звичайних макростільникових мереж. Зокрема, когнітивні фемтостільники розглядаються в стільникових мережах наступного покоління, таких як системи 3GPP LTE і WiMAX802.16e. Незважаючи на те, що фемтостільник має великі переваги для поліпшення покриття для зовнішніх/внутрішніх користувачів, проблеми управління завадами і мобільністю є критичними проблемами при роботі таких мереж.

Недавні дослідження передбачили, що 50 телефонних дзвінків і 70 послуг передачі даних відбудуться в приміщенні. У системах наступного покоління з'являться більш інтелектуальні пристрої, і зміст їх послуг потребують більшої пропускної здатності мережі, ніж існуючі сьогодні [12]. Оскільки обслуговування абонентів всередині приміщень з підвищеним попитом на обслуговування з боку базових станцій макростільників є дорогим, потрібні нові рішення для поліпшення покриття / пропускної здатності всередині приміщень. Відповідно до робочих процедур фемтостільника, модуль фемтостільника адаптує свою зону обслуговування, щоб уникнути нанесення шкоди іншим службам передачі в цій зоні, обслуговуючи близько 4-8 клієнтів. Однак це визначення не включає обмеження на кількість очікуваних фемтостільників в певній галузі. Іншими словами, зростання кількості FBS може вплинути на продуктивність мережі, споживаючи всі локально доступні ресурси без централізованого зіставлення з функцією доступу до спектру.

FBS - це базові станції з низьким енергоспоживанням, що працюють в ліцензованому спектрі, які можуть інтегрувати мобільні та Інтернет-технології в будинку за допомогою оптоволоконного з'єднання або цифрової абонентської

лінії (DSL). FBS можуть бути розгорнуті на відкритому повітрі в якості ретрансляційні станції або в приміщенні для надання ексклюзивного доступу абоненту. Наприклад, замість оператора, який володіє всіма базовими станціями в районі міста, базові станції фемтостільників можуть бути придбані окремими особами або невеликими організаціями. Мережева архітектура розгортання фемтостільників проілюстрована на рисунку 1.5.

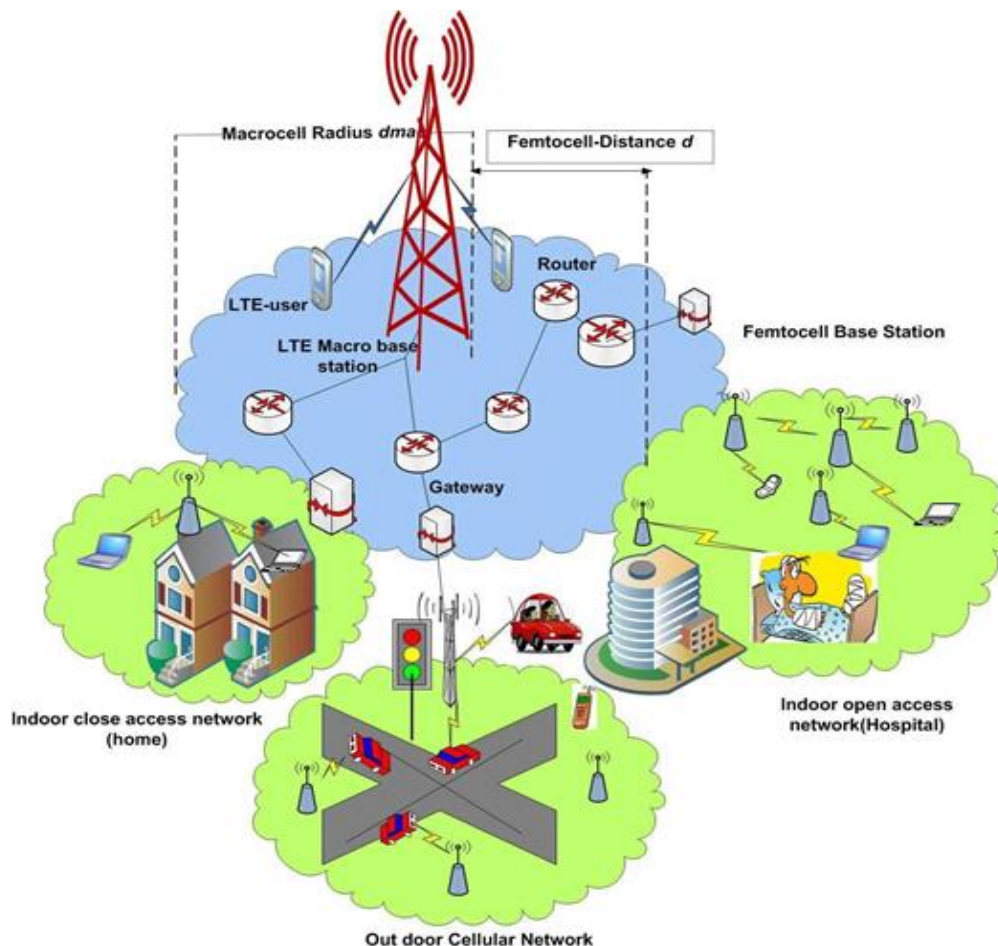


Рисунок 1.5 – Розгортання фемтостільників в безпроводових системах 4G

Фемтостільник генерує сигнал на персональне мобільне обладнання і підключає його до мережі оператора через Інтернет. Це дозволяє поліпшити покриття і пропускну здатність для кожного користувача в зоні покриття своєї точки доступу.

Додатки та послуги повинні надаватися з відповідними рівнями безпеки і, нарешті, кілька «зелених» аспектів, таких як необхідний рівень потужності або

енергії, активація або деактивація енергоспоживаючих пристроїв тощо, щоб створити в майбутньому екологічно безпечні мережі та інфраструктури.

#### 1.4.1 Потреба в базовій станції з малим стільником

Двома основними обмеженнями безпроводового з'єднання є дальність і ємність. Якщо постачальник послуг хоче поліпшити покриття, він або встановлює макрокомірки і забезпечує високу потужність, або він може використовувати меншу базову станцію, яка забезпечує покриття тільки до кількох сотень метрів, а також забезпечує високі швидкості передачі даних при більш низькій потужності. Навіть з економічної точки зору було виявлено, що фемтостільники забезпечують більш дешеве рішення в порівнянні з установкою макростільників більш високої потужності для забезпечення тієї ж якості обслуговування. Мета фемтостільників - забезпечити надійний зв'язок з використанням існуючого широкосмугового інтернет-з'єднання. Є три основні причини потреби в фемтостільниках в поточних послугах стільникового зв'язку показані на рисунку 1.6.

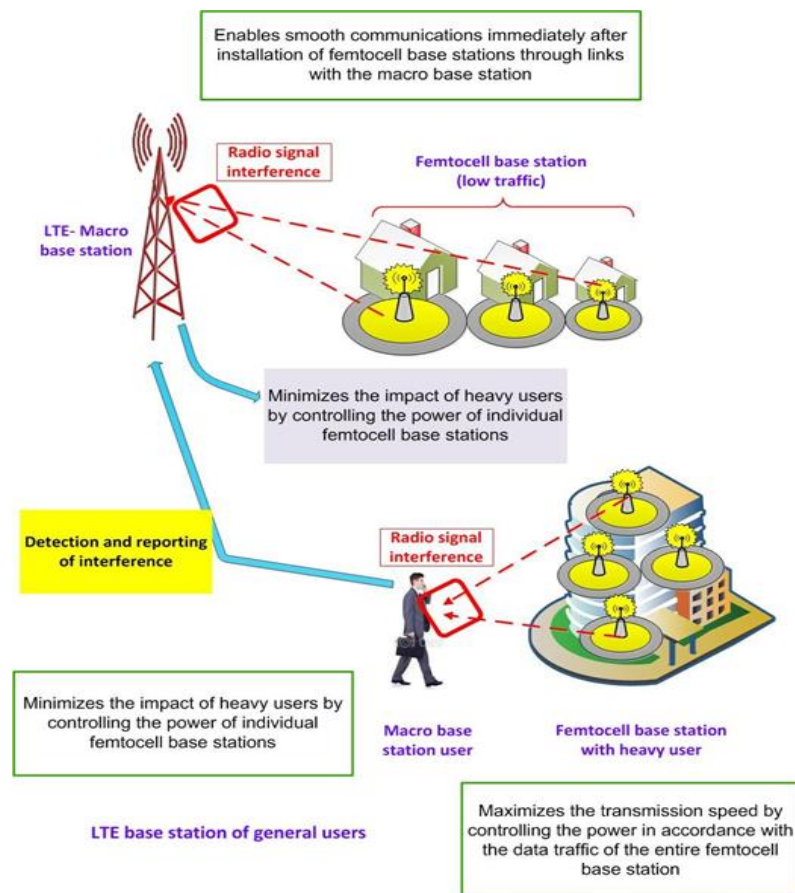


Рисунок 1.6 – Отримані знання про фемтостільники

Покриття: оскільки макрокомірки не можуть забезпечити добре покриття всередині приміщення, фемтостільники можуть забезпечувати високий рівень сигналу всередині приміщення. Покриття фемтостільників обмежене кількома сотнями метрів або менше, що знаходиться в межах обстановки будинку або офісу. Чим менше відстань між передавачем і користувачем, тим вище потужність сигналу.

Пропускна здатність: скорочення відстані між фемтостільником і кінцевим користувачем, призводить до більш високого рівня сигналу, і фемтостільники можуть обслуговувати кілька користувачів, вони можуть виділяти більшу частину своїх ресурсів (потужність передачі і пропускна здатність) кожному абоненту. Тоді менша кількість користувачів використовує ті ж спектральні ресурси, що економить більше ресурсів для інших користувачів [3]. Іншими словами, користувач майже отримує приватну смугу пропускання із загальної смуги пропускання.

Потужність: зростання числа мобільних користувачів призводить до величезного навантаження на базові станції макростільникової мережі. Розгортання фемтостільників відверне багатьох користувачів від макрокомірки до станцій фемтостільників, щоб знизити навантаження на макрокомірки [13].

Крім того, можна ефективно підтримувати баланс з кінцевими користувачами, використовуючи загальну інфраструктуру між макрокомірками і фемтостільниками як на відкритому повітрі, так і в приміщенні.

#### 1.4.2 Аспекти розгортання фемтостільників

Широкопasmові безпроводові мобільні мережі четвертого покоління, зокрема LTE і вище, розглядають питання, пов'язані з розгортанням фемтостільників [14]. Можливість розгортання фемтостільників в мережі вивчається організаціями по розробці стандартів, такими як 3GPP [15]. Часто вважається, що розгортання фемтостільників, базових станцій з низьким енергоспоживанням разом з передбачуваними об'єктами значно знижує енергоспоживання стільникових радіомереж, оскільки зменшується відстань

зв'язку, потрібна менша потужність на біт і доступні ресурси спектра розподіляються між меншою кількістю користувачів.

Вплив управління доступом для фемтостільників особливо істотно в сценарії інтегрованого розгортання макрокомірки і фемтостільника. Наприклад, коли мережі макрокомірки і фемтостільника використовують одну і ту ж несучу, очікується, що цей сценарій гетерогенного розгортання буде стандартом, а не винятком, оскільки оператори мереж макрокомірки, можливо, не матимуть іншого вибору для отримання якомога більшої кількості користувачів від їх кошторисного спектру за рахунок розгортання систем фемтостільників з поєднаним каналом.

При прикладному розгортанні фемтостільникових систем розташування FBS випадковим і нескоординованим чином неминуче і може створювати сценарії з високими завадами і мертві зони, особливо в безпроводовому середовищі [16]. Вплив завад на призначене для користувача устаткування макро/фемтостільників (UE) залежить від потужності, використання смуги пропускання, щільності фемтостільників, а також від методів управління доступом фемтостільників, що працюють в суміщеному каналі. Вплив завад викликано фемтостільниками на пропускну здатність і покриття макростільниками для систем високошвидкісного спадного каналу для пакетного доступу (HSDPA), і існує кілька методів зменшення, що варіюють потужність каналу управління, ізоляцію зони потужності і адаптивне управління потужністю [17].

### 1.4.3 Механізми доступу

Фемтостільникові системи розгортаються з використанням одного з трьох наступних методів [18]. Сценарій для фемтостільника, розгорнутого як базові станції відкритого, закритого і гібридного доступу, показаний на рисунку 1.7.

#### 1.4.3.1 Метод закриття доступу

Фемтостільник може бути розташований в областях мережі з близьким доступом, таких як будинки або офіси, що означає, що FBS надає послуги меншій кількості клієнтів, і тільки зареєстровані мобільні телефони можуть мати доступ до такого фемтостільника, а макрокористувач не має доступу до неї FBS. З опису закритого доступу тільки користувачам, які вказані в списку дозволеного доступу FBS, надається доступ до базової станції. Основна причина цього типу

розгортання - гарантувати поінформованість користувачів, коли вони знаходяться в зоні дії FBS. Однак при розгортанні цього методу виникає одна критична проблема, коли непідписаний користувач входить в зону покриття фемтостільника, і цей користувач відсутній в списку дозволеного доступу, оскільки це система закритого доступу.

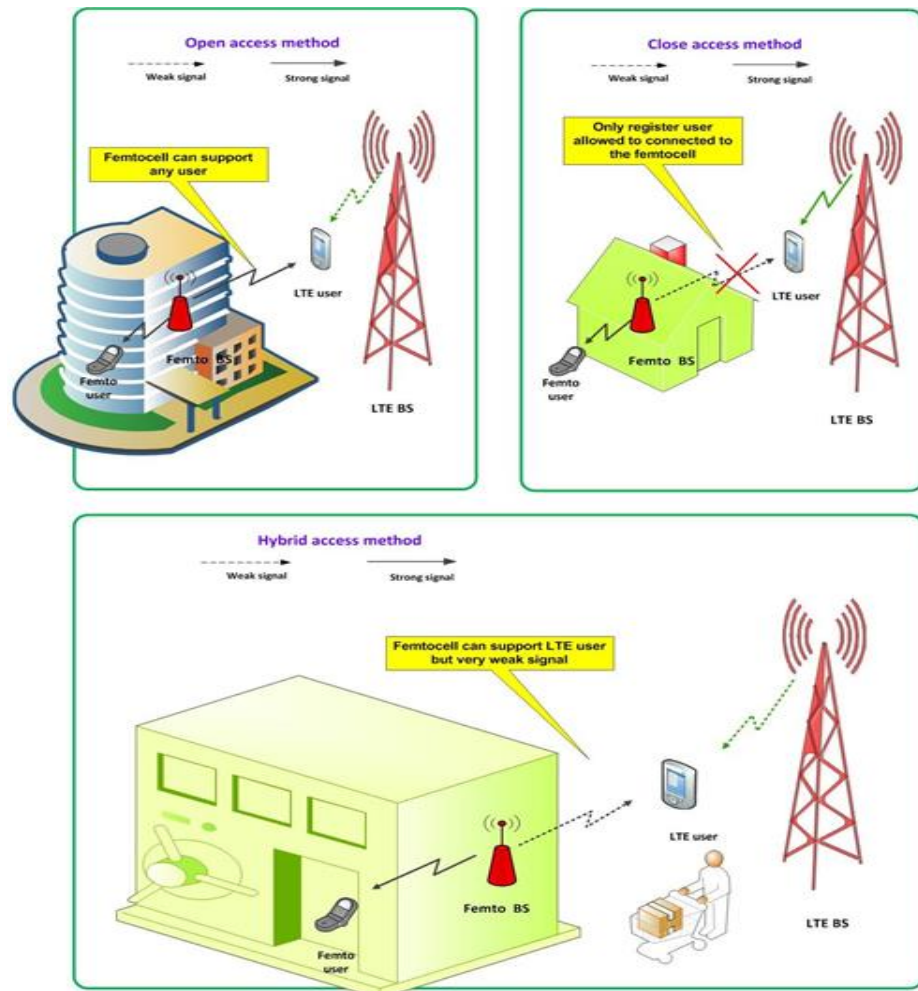


Рисунок 1.7 – Методи доступу до фемтостільників

Як правило, відвідуючий макрокористувач в зоні покриття фемтостільника як і раніше буде намагатися отримати доступ до FBS через те, що сигнал потужності пілот-сигналу закритої FBS зазвичай набагато вище, ніж пілот-сигнал BS макростільника в межах покриття FBS. Проте, ці зусилля не увінчаються успіхом через те, що відвідуючі макрокористувачі не включені в перелік дозволеного доступу FBS. Перевага цього методу полягає в зменшенні кількості передач обслуговування в цій конкретній мережі і в тому, що кожен користувач

може отримати високу швидкість передачі даних, перебуваючи поруч з фемтостільниковою станцією через обмежену кількість користувачів.

#### 1.4.3.2 Метод відкритого доступу

Базові станції фемтостільників розгортаються на відкритих майданчиках, таких як аеропорти або лікарні. Будь-який користувач має право доступу до цих FBS, і в цьому випадку немає необхідності в реєстрації. Повний відкритий доступ відбувається, коли будь-який користувач наближається до BS, поки UE знаходиться в зоні дії фемтостільника, якщо, звичайно, на ньому є доступна ємність ресурсів. Незважаючи на те, що вона підходить для розгортання фемтостільника, що належить оператору, повністю відкрита схема доступу може завадити, в разі житлового фемтостільника, уповноваженому користувачу підключатися до її FBS через використання ємності користувачами макрокомірки [19]. Очевидно, що відкритий доступ вигідний мережевим операторам, оскільки надає недорогий спосіб розширення їх пропускну здатності мережі за рахунок безкоштовного використання сторонніх транспортних мереж. Відкритий доступ також знижує міжкомпонентні завади, дозволяючи сильним джерелам завад просто використовувати фемтостільники і координувати свої дії з існуючими користувачами через неї. Однак небажана передача обслуговування може бути збільшена для багатьох користувачів, що входять і залишають такі фемтостільники, викликаючи помітне зниження якості обслуговування [20].

#### 1.4.3.3 Гібридний метод доступу

У деяких випадках можливе виникнення підходу відкритих і закритих методів доступу для додатків фемтостільників. У такій моделі незареєстрованим абонентам дозволений доступ до базової станції фемтостільника, але тільки для обмеженого використання ресурсів. Гібридний доступ заснований на обмеженій кількості ресурсів, доступних для всіх користувачів, як показано на рисунку 1.7, в той час як інші працюють в режимі закритої групи абонентів. Коли метод доступу блокує використання ресурсів фемтостільника для підмножини користувачів в межах своєї зони покриття, в такій зоні неявно визначається новий набір сигналів, що заважають. Отже, розгортання фемтостільників закритих абонентських груп робить проблему зменшення завад ще складнішою. Гібридні методи доступу досягають компромісу між впливом на продуктивність передплатників і рівнем доступу, що надають не передплатникам. Отже, спільне використання ресурсів фемтостільників між користувачами і особами, які не є користувачами, має бути

точно налаштоване, інакше абоненти можуть відчувати, що вони платять за послугу, якої повинні користуватися інші. Таким чином, вплив на абонентів повинно бути мінімізовано з точки зору продуктивності [21].

Гібридний метод доступу в фемтостільникових мережах OFDMA полягає в управлінні спільним використанням ресурсів OFDMA (частоти і часу) між абонентами і неабонентами. Отже, ці ресурси необхідно визначити. У OFDMA підканали системи містять ряд піднесучих, які можуть бути суміжними або псевдовипадково розподіленими по спектру, щоб використовувати або багатокористувацьке, або частотне рознесення, і вибір одного або іншого режиму поділу на канали залежить від точності інформації про стан каналу [22].

### 1.5 Техніка когнітивного радіо

Когнітивна радіомережа недавно стала багатообіцяючим методом для поліпшення використання існуючого радіочастотного спектру. Когнітивне радіо - це інтелектуальна система безпроводового з'єднання, яка обізнана про навколишнє середовище і використовує методологію розуміння через побудову, щоб витягувати уроки з навколишнього середовища і адаптувати свої внутрішні стани до статистичних варіацій вхідної радіочастоти шляхом внесення відповідних змін до певних робочих параметрів (наприклад, потужність передачі, несуча частота і стратегія модуляції) в режимі реального часу, маючи на увазі дві основні мети: (і) високонадійний зв'язок в будь-який час і в будь-якому місці і (ii) ефективне використання радіочастотного спектру [23], як показано на рисунку 1.8. Радіо є адаптивним, коли воно може автономно змінювати свої робочі параметри відповідно до характеристик навколишнього середовища, в якому воно знаходиться. Наприклад, радіостанція, яка змінює характеристики фільтра проміжної частоти (ПЧ) у відповідь на характеристики використовуваного каналу, може вважатися адаптивною. Іншими словами, адаптивний радіозв'язок повинен мати можливість вносити зміни в свої робочі параметри, такі як рівень потужності, модуляція, частота тощо. Радіостанція 802.11a демонструє рівень адаптивності, оскільки вона здатна визначати бітову помилку.

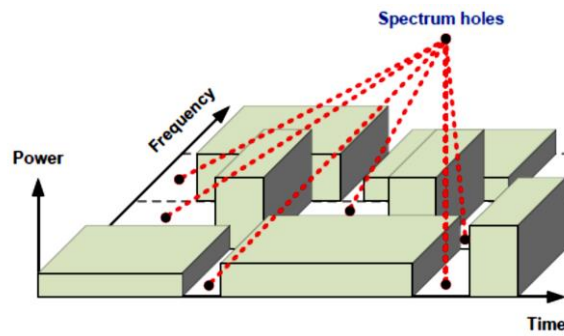


Рисунок 1.8 – Можливості спектру когнітивного радіо

Швидкість (BER) свого каналу та адаптує модуляцію до швидкості передачі даних і відповідної прямої корекції помилок (FEC), яка встановлює BER на прийнятний рівень для додатків передачі даних [24]. Різні протоколи в MAC, мережах, транспортному і прикладному рівнях повинні адаптуватися до змін в середовищі CR. З іншого боку, модуль CR використовується для встановлення інтерфейсів між різними рівнями і управління параметрами протоколу на основі інтелектуальних алгоритмів [25].

Когнітивне радіо можна запрограмувати на передачу і прийом на різних частотах і на використання різних технологій доступу до передачі, підтримуваних його апаратною конструкцією. Таким чином, когнітивне радіо може запропонувати новий спосіб вирішення проблеми недовикористання спектра. Це досягається шляхом вимірювання радіосередовища з дwoєю метою визначення тих піддіапазонів радіоспектра, які недостатньо використовуються основними (тобто успадкованих) користувачами. Однак для досягнення цих цілей автономним чином розраховані на багато користувачів мережі когнітивного радіо повинні бути здатними до самоорганізації.

### 1.5.1 Функції когнітивних мереж

Хоча існує безліч сценаріїв співіснування між первинною і вторинною мережами, обов'язково досягнення певного рівня співпраці, щоб запобігти будь-яким завадами, що виникають в результаті конфлікту між когнітивною та первинною мережами або між когнітивними мережами. Ця ситуація стає ще більш складною в гетерогенному безпроводовому середовищі, що складається з двох типів мереж: первинної і вторинної. Таким чином, спільні схеми необхідні для забезпечення безперебійного зв'язку і досягнення оптимального доступу до

спектру. Мережі IEEE 802.11 виконують операції прослуховування розмови при передачі. Отже, вони є найкращими доступними стандартами для моделювання майбутньої когнітивної мережі з нульовими висновками. Однак існує кілька досліджень про відмінності між традиційними мережами і когнітивними здібностями, і вони були розглянуті в [26, 27].

Фізичні процеси когнітивного радіо, засновані на колі пізнання, зображені на рисунку 1.9.

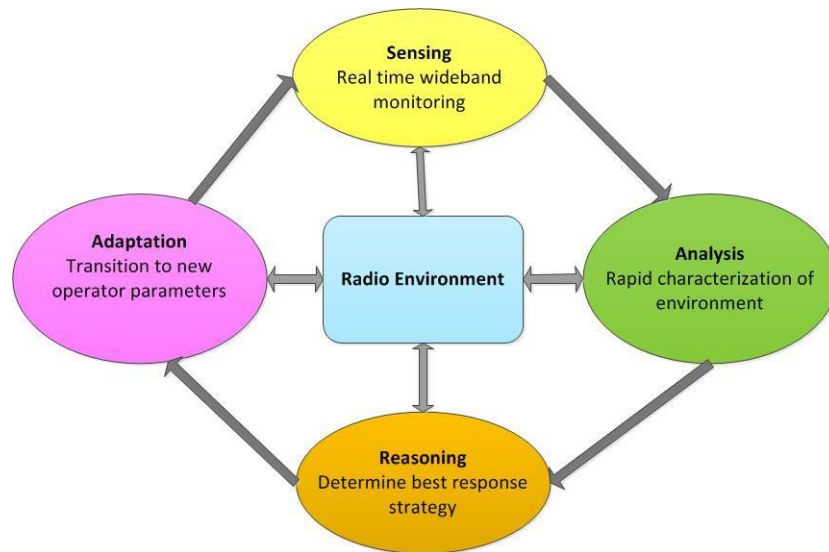


Рисунок 1.9 – Операції з когнітивним радіо

Пізнання проілюстровано на прикладі гнучкого використання радіочастотного спектру і обліку переваг користувачів. Здатність когнітивного радіо адаптуватися і витягувати уроки з минулої поведінки особливо важлива в баченні того факту, що розуміння взаємодії між шарами ускладнено. Проте, існує кілька архітектур протоколів, що включають адаптацію, але часто не обговорюється інтелект, навчання або попереджувальна адаптація.

### 1.5.2 Спектральне зондування

Когнітивне радіо може визначати спектр і виявляти «дірки в спектрі», тобто ті смуги частот, які не використовуються ліцензованими користувачами або мають обмежені завади всередині них. Зондування спектра може виконуватися централізованим або розподіленим способом. При централізованому зондуванні

спектра за процес зондування відповідає центральний блок, також званий контролером зондування. Інформація зондування передається різним вторинним користувачам з використанням каналу управління. Спільне зондування спектра більш точне і може скоротити час виявлення первинного сигналу [28].

#### 1.5.2.1 Спільне використання спектра

Методи спільного використання спектра зазвичай зосереджені на двох типах рішень: спільне використання спектра всередині мережі CR (спільне використання спектра всередині мережі) і між декількома співіснуючими мережами CR (спільне використання спектра між мережами) [29]. Після вибору відповідної смуги спектра при ухваленні рішення про спектр канали зв'язку в цьому спектрі повинні бути призначені користувачеві CR при визначенні його потужності передачі, щоб уникнути завад основної мережі (виділення ресурсів). Потім користувач CR вирішує, коли потрібно отримати доступ до спектру уникати зіткнень з іншими користувачами CR (доступ до спектру).

Когнітивне радіо може включати механізм, що дозволяє спільне використання спектра відповідно до умов угоди між ліцензіатом та третьою стороною. Ця функція вибирає відповідний протокол MAC для доступу до дірок в спектрі. У протоколі рівня MAC може бути гарантовано розумний поділ спектру між різними користувачами. Крім того, управління між базовими станціями може бути досягнуто, щоб уникнути конфлікту з первинними користувачами (PU), а також з іншими парами вторинних користувачів (SU). Це може бути зроблено шляхом узгодження наявних можливостей використання спектра для спільного використання їх на разовій основі або в режимі реального часу без необхідності попереднього розподілу спектра між усіма користувачами. У спільній мережі когнітивного радіо основні користувачі можуть здавати в оренду свій спектр користувачам когнітивного радіо на певний час, а натомість вони можуть отримувати потужність спільної радіопередачі від когнітивних користувачів. Однак когнітивне радіо може мати алгоритми, які можуть дозволити спільне використання спектра з точки зору узгоджених угод між ліцензійною мережею. Таким чином, спільне використання спектру грає важливу роль у збільшенні використання спектра.

#### 1.5.2.2 Рішення щодо спектру

Ця функція може аналізувати інформацію, отриману при зондуванні спектра. Перед прийняттям рішення про доступ до спектру слід виміряти

характеристики виявлених дірок в спектрі, ймовірність появи PU і можливі помилки зондування. Після вибору підходящого діапазону CR повинен оптимізувати доступні системні ресурси для досягнення необхідної мети. Мережі CR вимагають можливості вибору найкращого діапазону спектра серед доступних діапазонів відповідно до вимог додатків до QoS. Ця ідея називається спектральним рішенням і являє собою досить важливу, але ще не досліджену тему.

Рішення про спектр тісно пов'язане з характеристиками каналу і операціями основних користувачів. Рішення про спектр зазвичай складається з двох етапів: по-перше, кожна смуга спектра характеризується на основі не тільки локальних спостережень користувачів CR, але і статистичної інформації первинних мереж. Потім, ґрунтуючись на цій характеристиці, можна вибрати найбільш підходящу смугу спектра. Іншими словами, користувач CR знаходить кращу смугу спектра для задоволення QoS користувача вимоги (стійка швидкість, затримка, джиттер, середній час сеансу, допустима швидкість втрат тощо) і характеристики спектра. Користувачам CR потрібно рішення про спектр на початку передачі. За допомогою спостереження РЧ користувачі CR характеризують доступні діапазони спектра, враховуючи потужність прийнятого сигналу, завади і кількість користувачів, які в даний час проживають в спектрі, які також використовуються для розподілу ресурсів в класичних безпроводових мережах [30].

#### 1.5.2.3 Ідентифікація місця розташування

Вкрай необхідна здатність визначати місцезнаходження користувачів спектра для визначення відповідних робочих параметрів, таких як потужність і частота, дозволені для оточуючих місць розташування. У смугах частот, таких як ті, які використовуються для супутникових низхідних ліній зв'язку, які призначені тільки для прийому і не передають дані, технологія визначення місця розташування може бути придатною технікою для запобігання завад, оскільки зондування не зможе визначити місце розташування найближчих приймачів.

#### 1.5.2.4 Виявлення мережі

Щоб когнітивний радіотермінал міг визначити кращий спосіб зв'язку, він повинен спочатку дізнатися про доступні мережі доступу навколо нього шляхом тривалого моніторингу. Ці мережі досяжні або через спрямований одноступеневий зв'язок, або через когнітивні вузли ретрансляції з безліччю

переходів. Можливість виявлення одно- або багатопрогонових мереж доступу має вирішальне значення для забезпечення надійних з'єднань.

## 1.6 Управління когнітивною мережею з використанням фемтостільників

Когнітивні радіомережі мають різні режими управління доступом до спектру, щоб спільно використовувати можливості передачі між різними користувачами. Функціональність таких налаштувань визначається рівнем очікуваної взаємодії між користувачами і багатьма іншими технічними особливостями працюючих систем. Таким чином, когнітивна мережа може відноситися до однієї з трьох категорій: централізоване, розподілене і гібридне управління.

### 1.6.1 Централізована мережева архітектура

В цьому режимі когнітивної мережі задіяний центральний об'єкт, а саме Spectrum брокер, який грає важливу роль в управлінні ресурсами спільного використання спектра між різними мережами безпроводового покоління. Таким чином, централізований брокер спектра може координувати доступ до спектру в заданій області та розподіляти короткострокові заняття спектра конкуруючих постачальникам безпроводових послуг і кінцевим користувачам, як показано на рисунку 1.10.

Брокер або сервер спектра - це центральний мережевий об'єкт, який грає важливу роль в розподілі спектру ресурсів між безпроводовими гетерогенними мережами. У методі брокера спектра [32] сервер має можливість підключатися до будь-якої мережі і співіснувати з первинними і вторинними радіостанціями в загальному середовищі централізовано, посередницький механізм на рівні локальної мережі спрямований на значне збільшення використання спектра при одночасному зниженні вимог складності когнітивних функцій. розгортання системи.

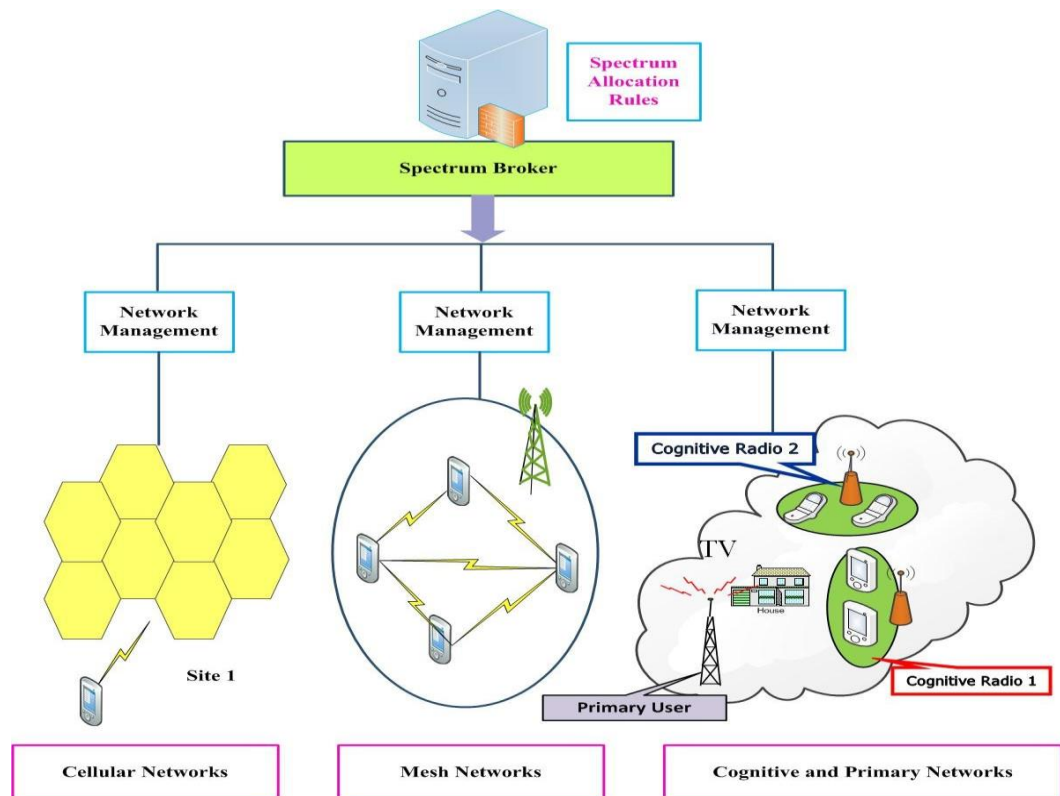


Рисунок 1.10 – Архітектура централізованого управління мережею

Централізований сервер спектра може співставляти інформацію про навколишнє безпроводове середовище і завади за допомогою локальних вимірювань з різних терміналів, а потім пропонувати пропозиції щодо ефективного використання спектра [33].

### 1.6.2 Розподілена мережева архітектура

Найбільш поширений додаток для управління когнітивними мережами передбачає відсутність централізованої інфраструктури управління. Цей режим управління послугами, а саме розподілене управління, має справу з різними методами самокерування, які дозволяють приймати рішення про доступ до спектру розподіленим чином, як показано на рисунку 1.11.

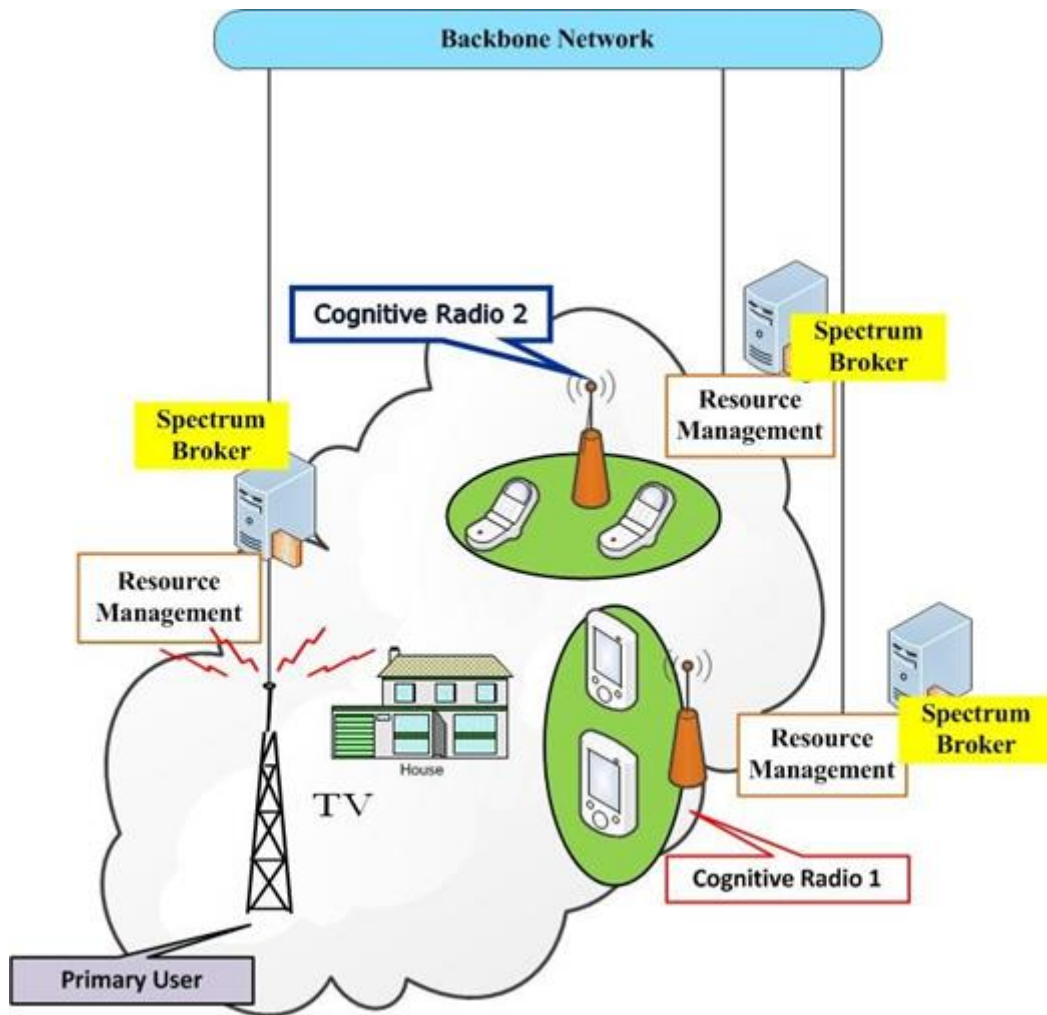


Рисунок 1.11 – Розподілена мережева архітектура

Отже, стратегічні послуги для розгляду динамічних мережевих середовищ повинні бути адаптовані до різних операційних середовищ і доступності ресурсів. На підставі цієї вимоги і попередніх досліджень в галузі управління мережами [34] і [35], отже, кожен когнітивний вузол має можливість розподіляти можливості спектра відповідно до локальних стратегій. Ця політика розподілу спектра виконується на основі локального узгодження між когнітивними вузлами в локальній області [36]. Таким чином, місцеві самоорганізовані групи домовляються про призначення дірок в спектрі будь-якого обладнання кінцевих користувачів в своїх групах і оточуючих вузлах перед остаточною адаптацією.

Процес управління розподілом ресурсів когнітивних мереж виконується об'єктом управління використанням спектра в вузлі базової станції. Ця організація ділиться інформацією, яка була зібрана як в результаті місцевих спостережень, так і в результаті спільного зондування, щоб визначити, де

неліцензовані користувачі можуть отримати доступ до вільного спектру на індивідуальній основі [17]. Для передачі в розподіленій системі когнітивний вузол спочатку починає ширококомовну розсилку запиту своїм сусідам в тому ж домені, щоб уникнути будь-яких завад. Сусіди починають приєднуватися до групи і відповідати запитувачу із Координаційного або старшого когнітивного вузла. Старший вузол групи буде нести відповідальність за прийняття рішення про остаточний розподіл запиту на передачу та інформування інших сусідніх вузлів. Когнітивні вузли можуть обмінюватися інформацією і повідомленнями координації, використовуючи виділений канал керування загальним спектром (CSCC) з більш високою потужністю і, отже, з більшою дальністю передачі через багатоланкову маршрутизацію. Фактично, найбільш вірогідний сценарій конфлікту спектра може статися, коли два когнітивних вузла готові передавати одночасно, що надається тривалим часом, витраченим на видачу запиту на передачу [18] і [19].

### 1.6.3 Гібридна мережева архітектура

У цьому підході до управління централізована і розподілена моделі об'єднані для створення гібридної системи спільного використання спектра. Брокер спектра буде основним органом управління використанням спектра для видачі реквізитів передачі від груп щоразу, коли виникає конфлікт в доступі до спектру між сусідніми вузлами різних груп, як показано на рисунку 1.12.

З іншого боку, управління доступом до спектру всередині груп здійснюється з використанням розподіленої моделі. Це означає, що старший вузол групи є основною особою, яка приймає рішення про доступ до спектру в своїх групах, що надається, оскільки він є контактним вузлом з брокером спектра. CSCC використовується для обміну схемами використання спектра для локальних груп і між старшим вузлом групи і брокером спектра. Старший вузол вибирається радіостанціями груп через його тривалий досвід і роботи в локальній безпроводовій мережі через переговори між усіма вузлами групи. Основна перевага цієї моделі полягає в тому, що вона дозволяє брокеру спектра обробляти запити інших операторів і скорочує обсяг обміну інформацією через CSCC [20].

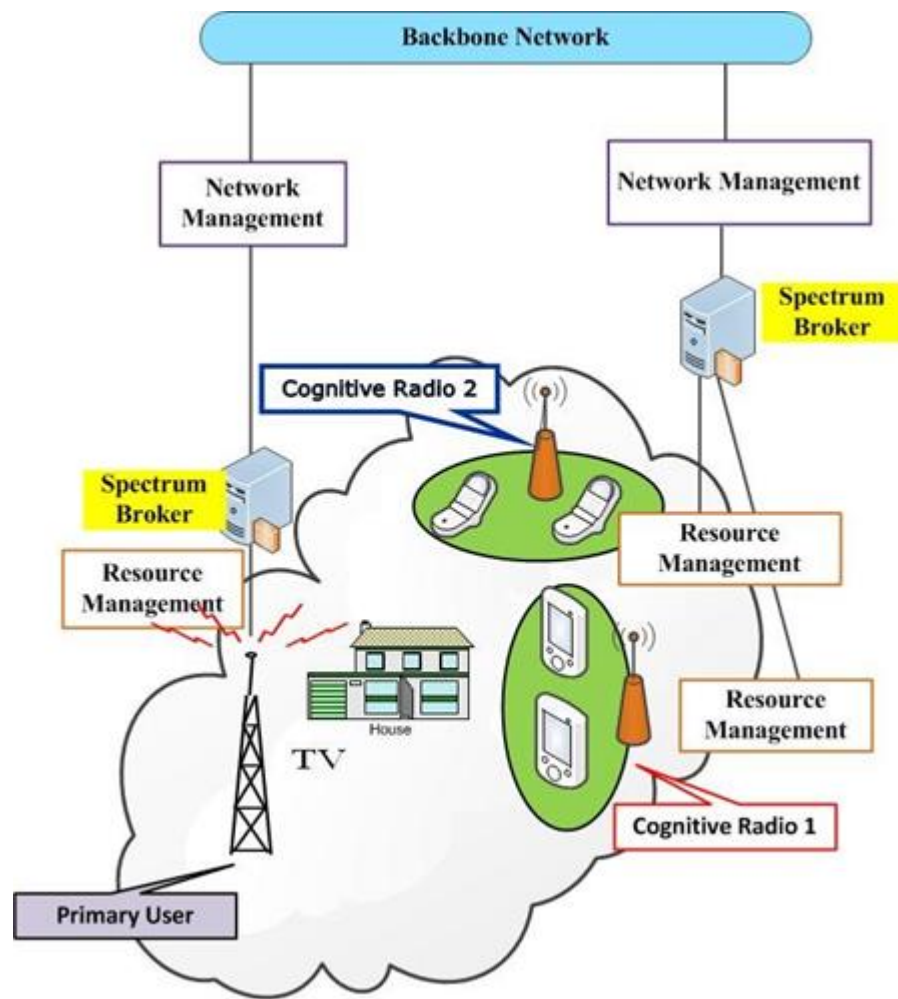


Рисунок 1.12 – Архітектура гібридної мережі

### 1.7 Когнітивні фемтостільники в системах LTE

Когнітивний радіозв'язок фемтостільникових мереж може стати частиною майбутніх безпроводових мереж Інтернет. Ця нова парадигма співіснування когнітивних радіо- і фемтостільників засновані на заздалегідь визначених конвергентних областях послуг, і задача полягає в тому, щоб об'єднати пропускну здатність різних ресурсів для надання широкосмугового доступу як стаціонарним, так і мобільним когнітивним користувачам. Однак високі вимоги до пропускну здатності мобільних кінцевих користувачів в майбутньому можуть зажадати більше ресурсів, ніж те, що в даний час є для існуючих мереж макростільниками. Отже, мережі фемтостільників гратимуть життєво важливу роль в підтримці

внутрішнього середовища, такого як аеропорти, лікарні або будинки. Поліпшення доставки даних для інтернет-сервісів може бути пов'язано зі створенням нової міжрівневої структури в шлюзовому маршрутизаторі. Це покращує гнучкість і ефективність когнітивних фемтостільників при доступі до спектру. З іншого боку, нові концепції дизайну збільшують реконфігурованість системи для реагування на зміни в безпроводового середовища в реальному часі [18].

В даному дослідженні розглядаються дворівневі мережі, що складаються з накладених один на одного систем макрокомірок і когнітивних фемтостільників. В межах перекривних зон покриття в такій дворівневій системі для користувача устаткування (UE) має можливість доступу або до базової станції макростільника, або до базової станції фемтостільника, і воно може перемикає рівень доступу, виконуючи безшовну вертикальну передачу обслуговування. У цій тезі користувач, який здійснює доступ до BS макростільника, називається UE, а користувач, який має доступ до BS фемтостільника, називається FUE обладнання користувачів фемтостільників. Після отримання ліцензованого спектру оператор безпроводового стільникового зв'язку може прийняти різні підходи до використання спектра в безпроводовій оверлейній мережі. Принциповий підхід полягає в тому, що дворівневі мережі спільно використовують ліцензований спектр, так що макростільник і фемтостільник працюють в режимі повторного використання частоти в одному каналі. Такий підхід називається використанням частотної ефективності. Інші аспекти зосереджені на управлінні ресурсами, щоб уникнути дворівневих завад, коли кожен рівень радіозв'язку має більш доступну сукупність спектра, але відчуває вищі міжрівневі завади. З іншого боку, ця робота буде йти далі в вивченні можливості ретрансляційних мереж, що вимірюють потенційне підвищення енергоефективності, яке може забезпечити розгортання певної кількості релейних фемтостільникових вузлів з низьким енергоспоживанням.

Розглянуто дослідження можливої економії енергії, яка можлива для когнітивних мобільних мереж за рахунок використання нового концептуального бачення для мережі зеленого управління, як показано на рисунку 1.13.

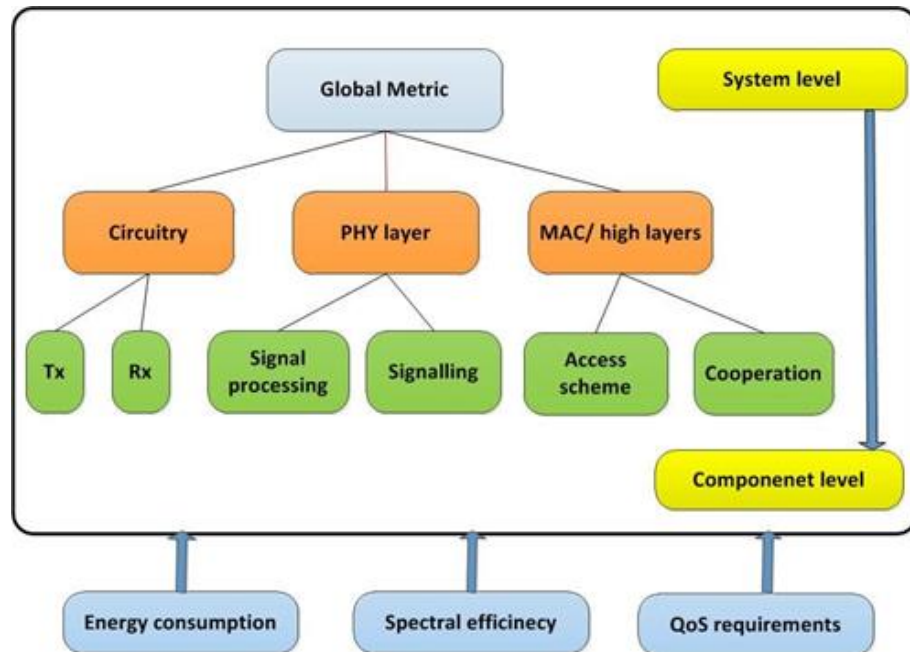


Рисунок 1.13 – Структура управління зеленою мережею

Ця економія енергії досягається за рахунок надання функції, яка динамічно переводить низько завантажені комірки в сплячий режим, під час якого радіосхеми ефективно відключаються, зменшуючи потужність енергоспоживання мереж. Основна мета всієї конструкції - максимізувати досяжну пропускну здатність системи, зводячи до мінімуму потребу в когнітивних фемтостільниках для харчування. Крім того, в роботі досліджувався ефект від розгортання когнітивної фемтосільникової мережі в системі передачі LTE. В даній дисертації реалізована схема фемтостільника, схвалена 3GPP для LTE, і досліджується її оцінка продуктивності.

Підвищення енергоефективності безпроводового зв'язку може бути досягнуто тільки в тому випадку, якщо поліпшення будуть випробувані у всьому ланцюжку зв'язку для різних сценаріїв експлуатаційного навантаження. Точно так же розрахований на багато користувачів планувальник дійсно повинен розподіляти часові і частотні ресурси, щоб мінімізувати вартість енергії передачі, при одночасному дотриманні вимог QoS всіх активних користувачів, допущених базовою станцією. Миттєве завантаження системи грає важливу роль в спільному проекті оптимізації.

Розгорнуті в даний час базові станції зазвичай проектуються так, щоб задовольняти попит на трафік в години пік. Проте, навантаження стільникового

трафіку протягом дня помітно змінюється. Деякі дослідження вказали, що для економії енергії базові станції повинні виконувати динамічне навантаження і схему енергетичного стану, яка врівноважує додаткове навантаження на певний оптимальний набір базових станцій, таким чином підтримуючи мінімальне споживання енергії [11].

## 1.8 Технічні проблеми при функціональному розгортанні мережевих систем фемтостільників

### 1.8.1 Рішення про спектр і ефективність розподілу

Управління каналами в мережах фемтостільників - одна з основних функцій, радикально відрізняються від існуючих мереж мобільного зв'язку. Розгортання спектральної технології зростає швидше, ніж визначення доступності спектра. Отже, в міру того, як смуги частот або вільні білі діри стають все більш дефіцитними і недоступними для безпроводових технологій наступного покоління, широкий спектр послуг зажадає радіочастотного спектру в якості ресурсу для правильної роботи. Це призводить до важливого дослідження ефективного використання спектра. При розробці функції прийняття рішення про спектр досі залишаються невирішеними кілька проблем [21]:

- модель прийняття рішення: оцінка ємності спектра з використанням відносини сигнал/шум (SNR) недостатня для характеристики смуги спектра в мережах CR. Додатки вимагають різних вимог до QoS, тому розробка функції прийняття рішення про спектр на основі адаптивного спектра і моделей прийняття рішення про спектр все ще залишається проблемою дослідження;

- взаємодія з реконфігурацією: методи CR дозволяють реконфігурувати параметри передачі для оптимальної роботи в певній смузі спектру. Наприклад, навіть якщо SNR змінюється, швидкість передачі даних і BER можуть підтримуватися за рахунок використання адаптивної модуляції замість рішення про спектрі. Отже, для прийняття рішення про спектр потрібна спільна структура з реконфігурацією;

- рішення про спектр для неоднорідних діапазонів спектра: в даний час певні діапазони спектра призначені для різних цілей, в той час як деякі діапазони залишаються неліцензованими. Таким чином, мережа CR повинна підтримувати

операції по прийняттю рішень про спектр як в ліцензованих, так і в неліцензованих діапазонах.

Однак розгортання виділеного каналу може бути незастосовно при щільному розгортанні фемтостільників. Як наслідок, може виявитися доцільним зробити так, щоб макрокомірки і фемтостільники спільно використовували доступний спектр. Спільна робота макрокомірки і фемтостільників враховувалася шляхом динамічного регулювання потужності передачі [12]. Призначення ресурсів ортогонального спектра між центральною макрокоміркою і базовими станціями фемтостільника усуває міжрівневі завади [13]. Стратегія розподілу спектра ортогонального доступу проілюстрована на рисунку 1.14.

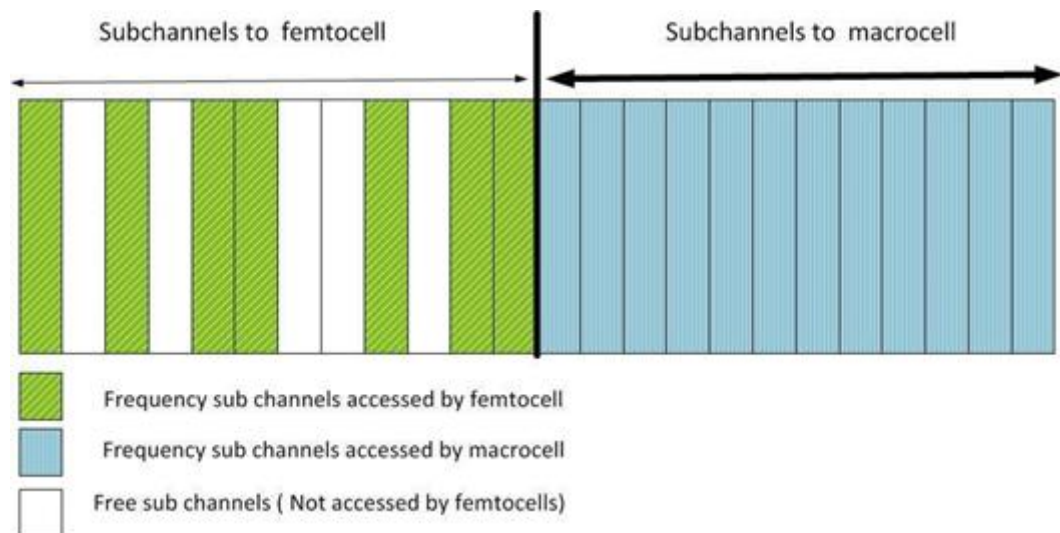


Рисунок 1.14 – Поділ спектру на підканали

Щоб уникнути постійних колізій з сусідніми фемтостільниками при доступі до спектру, кожен фемтостільник може отримати доступ до випадкової підмножини кандидатних частотних підканалів, де кожен підканал доступний з однаковою ймовірністю. Оператори мобільного зв'язку можуть розгорнути базові станції фемтостільників, які працюють на крос-канальній або суміщеній основі з існуючої макрокоміркою. Хоча робота на виділеному каналі є прагматичною стратегією, робота в суміщеному каналі також має переваги через потенційно підвищену спектральну ефективність за рахунок повторного використання просторової частоти. З іншого боку, робота в одному каналі може викликати більше завад між BS.

Робота зі спільним використанням спектра може бути бажана для операторів через брак спектра і гнучкості під час розгортання [14] із загальним спектром між рівнями. Однак радіозавади між користувачами стільникового зв'язку і точками доступу фемтостільників, а також між користувачами точок доступу і BS макрокомірки, ймовірно, будуть чинником, що обмежує пропускну здатність.

### 1.8.2 Забезпечення поінформованості про QoS через транзитну мережу Інтернет

Виділений і розподілений характер FBS породжує безліч технічних проблем для зростаючих вимог мультимедійних додатків, і це вимагає більшого управління доступними ресурсами системи.

Щоб вибрати відповідний діапазон спектра, мережі когнітивного радіо повинні підтримувати зв'язок з урахуванням QoS з урахуванням динамічного і неоднорідного спектрального середовища. Фемтостільник може взаємодіяти з системою безпроводового зв'язку без будь-яких вимог для установки додаткового обладнання в мережах безпроводового зв'язку завдяки використанню контролера радіомережі (RNC). Технологія мобільного Інтернет-телебачення (IPTV) яка була розроблена для мобільного зв'язку, представляє собою типову послугу конвергенції радіомовлення і телекомунікацій, як показано на рисунку 1.15.

«Мобільне IPTV» стане важливою послугою системи International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced). Таким чином, робота повинна проводитися в напрямку розробки базових технологій для стільникових мереж на основі «мобільного IPTV» і систем персонального безпроводового IP-віщання. Транзитне сполучення по Інтернет-протоколу (IP) вимагає QoS для чутливого до затримок трафіку і забезпечення паритету послуг з макрокомірками. Крім того, він повинен забезпечувати достатню пропускну здатність, щоб не створювати вузьких місць для трафіку. У той час як існуючі мережі макростільників забезпечують гарантії затримки в межах 15 мс, поточні транзитні мережі не обладнані для забезпечення стійкості до затримок [15].

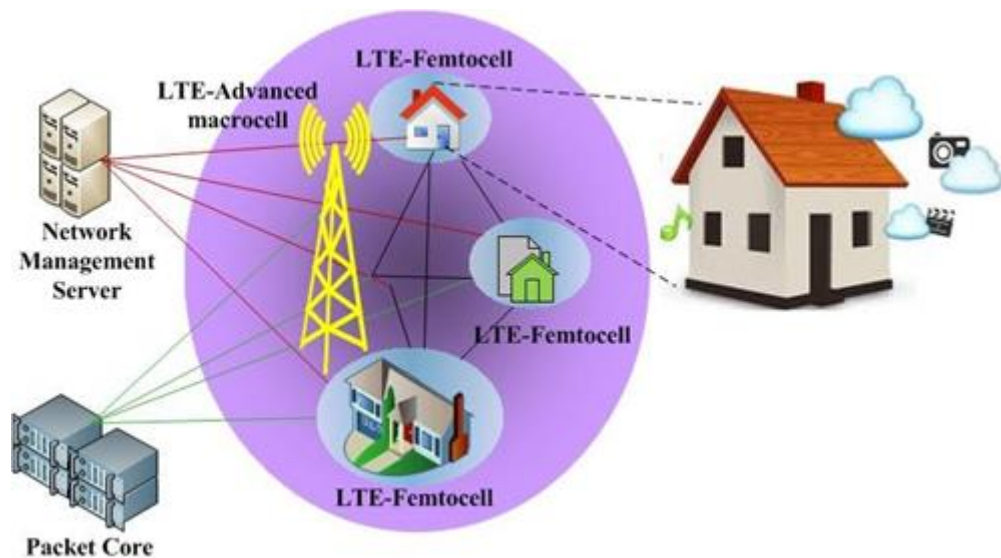


Рисунок 1.15 – Технології мобільного зв'язку (IPTV) для систем наступного покоління

Відсутність об'єктивності мережі становить серйозну проблему, за винятком сценаріїв, коли провайдер транспортних мереж є тією ж фірмою або знаходиться в тісних стратегічних відносинах з оператором стільникового зв'язку.

### 1.8.3 Управління ресурсами і планування мережі

Управління ресурсами – одна з найбільш важливих функцій когнітивної фемтостільникової мережі, оскільки система покладається на неї, щоб гарантувати певне цільове QoS, підтримувати заплановану зону покриття і в той же час забезпечувати високу пропускну здатність мережі. Процедури контролю для управління радіоресурсами в мережах з фемтостільниками повинні управляти радіоресурсами, незважаючи на обмежену пропускну спроможність магістралі. Для досягнення ефективного використання пропускну здатності магістралі будуть потрібні нові сценарії маршрутизації даних між користувачами, що обслуговуються одними і тими ж FBS [16]. Ці цілі часто мають тенденцію бути суперечливими, наприклад, рівні QoS можуть бути збільшені за рахунок покриття або зменшення пропускну здатності і навпаки. Ключовою задачею для поліпшення використання спектра шляхом обробки когнітивних користувачів фемтостільників для забезпечення динамічного доступу до спектру без порушення PU є управління ресурсами, яке повинно мати ефективний механізм

МАС, який може ефективно і адаптивно розподіляти потужності передачі і смуги спектра між користувачами CR на основі довкілля. Крім маршрутизації, необхідні методи ефективного використання спектра для управління потужністю, планування і передачі ширококомовних послуг. Крім того, в новій системі зі зростаючим числом користувачів необхідні нові політики допуску користувачів і методи ідентифікації FBS.

Планування мережі і управління ресурсами повинні взаємодіяти один з одним, щоб відповідати зазначеним вище вимогам для ефективного використання обмежених радіоресурсів. Планування мережі, спрямоване на статичну настройку цих елементів на високому рівні, управління радіоресурсами в FBS має забезпечити ефективні і дієві механізми настройки, щоб динамічно збалансувати ці обмеження в міру зміни навколишнього середовища.

#### 1.8.4 Проблема оптимізації завад

Одна з найважливіших проблем - це втручання. Як правило, завади виникають між елементами мережі, які належать різним рівням мережі, тобто завади між фемтостільниками і макростільниками. Однак є два види завад в мережах зв'язку фемтостільників; перша називається міжрівневою завадою, яка виникає між фемтостільником і макрокоміркою, а інша називається завадою на одному рівні, яка виникає між фемтостільником і іншими фемтостільниками, яка розгортається в зоні покриття основної макрокомірки [17].

Наприклад, UE фемтостільника і UE макростільника діють як джерело міжрівневих завад висхідної лінії зв'язку для обслуговуючої базової станції макростільника і найближчих фемтостільників, відповідно. З іншого боку, обслуговуюча базова станція макростільника і фемтостільника викликають міжрівневі завади низхідної лінії зв'язку для UE фемтостільників і найближчих UE макростільників, відповідно. Знову ж таки, в мережах фемтостільників на основі OFDMA міжрівневої завади висхідного або спадного каналів виникають тільки тоді, коли агресором і жертвою використовуються одні й ті ж підканали [18]. Однак цей підхід вимагає більш високої спектральної ефективності, оскільки обидва рівні мають доступ до всіх ресурсів. Проте, в такій конфігурації виникають міжрівневі завади, які можуть погіршити загальну продуктивність мережі, якщо завади не будуть ефективно усунені.

Як показано на рисунку 1.16, завади виділеного фізичного каналу низхідної лінії зв'язку (DL-DPCH) від макростільника, працюючого в суміщеному каналі, до фемтостільника можуть бути змодельовані як відношення прийнятої потужності DL-DPCH до завад від навантаження фемтостільника і завад від спільної каналної макрокомірки базової станції. Сильні завади в низхідній лінії зв'язку (DL) від макрокомірки повинні бути добре організовані для задоволення вимог QoS як користувачів фемтостільників, так і користувачів макрокомірки. Проблеми з завадами можуть виникати через те, що базова станція DL макростільника, підключена до віддаленого мобільного користувача фемтостільника, може згодом бути заблокована через присутність ближчого користувача фемтостільника DL, який використовує ту ж частоту/час.

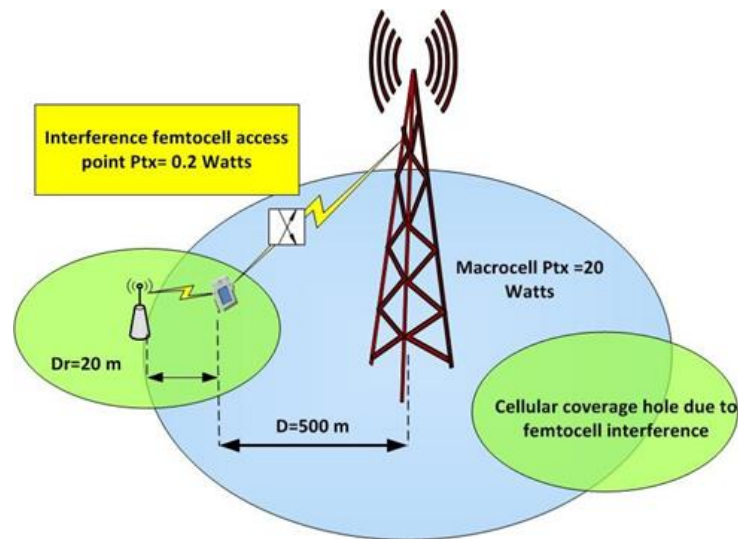


Рисунок 1.16 – Завади низхідної лінії зв'язку макрокомірки користувачеві фемтостільника

З іншого боку, мобільний користувач висхідної лінії зв'язку (UL), підключений до макростільника, може бути заблокований через присутність ближнього користувача UL, підключеного до фемтостільника, що використовує ту ж частоту/час, як показано на рисунку 1.17.

Отже, методи управління завадами важливі для зменшення впливу фемтостільника на макрокомірку [19].

Приклад: розглянемо зворотний канал OFDM з параметрами:

- відстань користувача макрокомірки до макрокомірки = 500 метрів;
- відстань користувача макрокомірки до фемтостільника = 30 метрів;
- радіус фемтостільника = 40 метрів;

- посилення обробки = 128 дБ;
- показник втрат на трасі = 4 дБ.

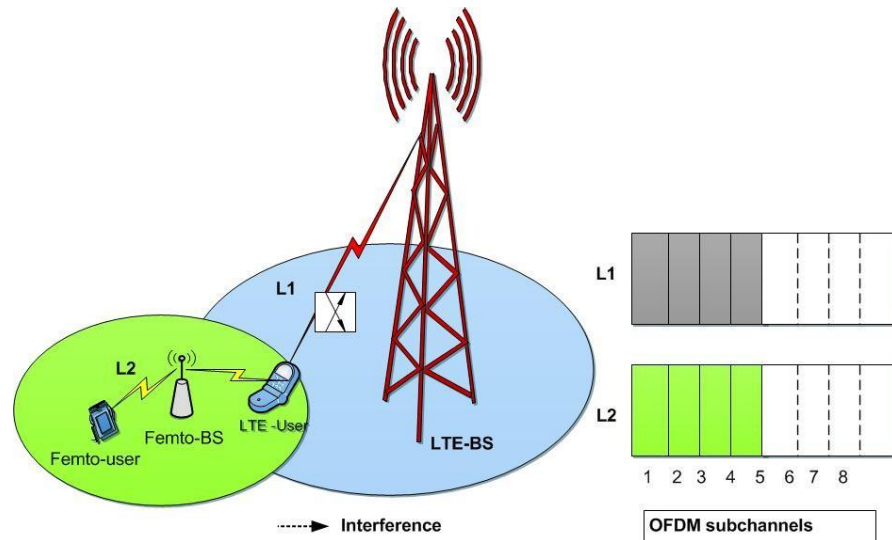


Рисунок 1.17 – Завади низхідної лінії зв'язку в суміщеному каналі OFDM LTE-фемтостільників

Бажана потужність прийому  $P = 0$  дБм (1 мВт). Потужність завад від користувача до фемтостільника:

$$P = 10 \lg \left( \frac{500^4}{30^4} \right) = 4887 \text{ дБ} \quad (2.3)$$

Придушення завад OFDM:

$$P = 10 \lg(128) = 21.07 \text{ дБ} \quad (2.4)$$

Відношення сигнал/завада на фемтостільнику = -27,8 дБ.

У цьому сценарії користувач макростільника підключається до базової станції макростільника на межі стільника. Цей користувач знаходиться в тій же зоні FBS, доступ до якої не дозволено. Таким чином, повністю завантажена FBS створює завади користувачеві макрокомірки в низхідній лінії зв'язку. Краще

рішення для цього випадку полягає в тому, що для підтримки ємності потрібна процедура адаптивного управління потужністю, яка може бути збільшена до 16%.

### 1.8.5 Проблеми з мобільністю

У зворотному випадку хендовер від фемтостільника до макрокомірки ускладнюється. Отже, повинна підтримуватися безшовна передача обслуговування між BS макрокомірки і системами фемтостільників, а також між FBS, але на звичайних швидкостях. Когнітивні користувачі фемтостільників тимчасово є відвідувачами спектра. Отже, якщо конкретний сектор спектра, який використовується користувачем LTE, потрібно, зв'язок необхідно продовжити в іншій вільній ділянці спектра. Крім того, для вищезазначених системних вимог очікується, що радіоінтерфейс LTE забезпечить додаткову оптимізацію для роботи фемтостільника. Наприклад:

- звіт про вимірювання сигналу для підтримки розширеного управління завадами, управління радіоресурсами щоб визначити своє місцезнаходження фемтостільників;
- оптимізація сканування, вибору, входу в мережу і передачі обслуговування UE на бажані BS в багаторівневих мережах, що складаються з BS макрокомірок і великої кількості BS фемтостільників. Ці функції дозволять додатково оптимізувати роботу фемтостільників і спростити їх використання [30]. Мобільні користувачі повинні мати можливість вибрати відповідну операційну мережу, щоб можна було використовувати відповідний доступ. Проблеми передачі обслуговування між когнітивними фемтостільниковими мережами також можна розглядати в рамках вибору стільника.

Управління мобільністю може захопити кращий доступний канал, активність основного користувача в обраному діапазоні може зажадати, щоб користувач змінив свій робочий діапазон (діапазони) спектра, що називається мобільністю спектра. Кожен раз, коли користувач CR змінює свою частоту, мережеві протоколи можуть зажадати зміни робочих параметрів. Мета управління мобільністю спектра - забезпечити плавний і швидкий перехід, що веде до мінімального зниження продуктивності під час передачі спектра. Важливою вимогою протоколів управління мобільністю є інформація про тривалість передачі спектра. Ця інформація може бути надана алгоритмом зондування. Після

того, як інформація про затримку стане доступною, поточний зв'язок може бути збережено з мінімальним погіршенням продуктивності [30].

#### 1.8.6 Проблеми самоорганізації та енергоефективності

Зусилля по підвищенню енергоефективності інформаційних і комунікаційних систем в мережах мобільного радіозв'язку останнім часом привертають велику увагу. Крім скорочення викидів вуглекислого газу в галузі, у мережевих операторів є сильний економічний стимул до скорочення енергоспоживання своїх систем. В даний час більше 80% енергії в мобільному зв'язку споживається в мережі радіодоступу, а точніше в базових станціях [21]. Удосконалення в принципі можуть бути досягнуті трьома способами: по-перше, зниженням енергоспоживання базової станції або за рахунок використання більш енергоефективного обладнання, або за рахунок використання нового передового програмного забезпечення для регулювання енергоспоживання в залежності від дорожньої ситуації в залежності від відстані до мобільної станції. По-друге, оптимізацією окремих сайтів за рахунок використання більш ефективних і адаптивних до навантаження апаратних компонентів, а також програмних модулів. По-третє, за допомогою інтелектуальної мережі стратегії розгортання, ефективно зменшують кількість вузлів в мережі, необхідну для досягнення певних показників продуктивності, таких як покриття спектральної ефективності. Щоб забезпечити адаптацію до змін в мережевому середовищі (тобто зміни і властивостей сусідніх макростільників/фемтостільників), виконується поточний процес вимірювання і самооптимізації для адаптації таких параметрів, як код скремблювання, потужність пілот-сигналу і максимальна потужність передачі даних, методика режиму очікування та енергозбереження. Це забезпечує мінімальний вплив на макростільникову мережу і гарантує максимальну продуктивність фемтостільника при заданих обмеженнях. Щоб уникнути високих експлуатаційних витрат і надлишкового енергоспоживання, фемтостільник повинен підтримувати plug-and-play і реалізовані алгоритми самоконфігурації і самооптимізації. Крім того, кількість ділянок на квадратний кілометр діє обернено пропорційно діапазону. Це може створити велике навантаження на споживання енергії для невеликої зони покриття [22].

## 2 МЕТОДИКА ТЕРИТОРІАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ LTE З ВИКОРИСТАННЯМ ФЕМТОСТІЛЬНИКІВ

### 2.1 Існуюча методика частотного планування безпроводових мереж 4G

При проектуванні бездротових систем радіозв'язку і, зокрема, стільникових систем зв'язку виникає необхідність у визначенні зони обслуговування базової станції, в якій буде забезпечений зв'язок з заданими якістю і надійністю, і мінімально допустимої відстані між БС мережі зв'язку, які використовують одні і ті ж частотні канали і тому можуть створювати один одному завади.

Для розрахунку зон обслуговування БС і мінімально допустимої відстані між БС в мережі зв'язку необхідно враховувати:

- потужності передавачів БС і абонентських станцій;
- параметри антенно-фідерного тракту приймально-передавальної апаратури (характеристики діаграми спрямованості приймальної антени, її діюча висота, втрати в антенно-фідерном тракті і т.п.);
- рівень зовнішніх і внутрішніх шумів на вході приймача і його чутливість;
- статистичні закономірності поширення радіохвиль в умовах пересіченій місцевості і міської забудови;
- параметри радіоканалу зв'язку (характер місцевості, ступінь урбанізації і т.д.);
- електричні параметри апаратури, яка використовується (робоча частота, тип модуляції, ширина смуги пропускання приймача і т.д.);
- системні параметри бездротових систем зв'язку (наявність інтермодуляційних завад, інтенсивність трафіку, характер повторного використання частоти і т.д.). Розглянуті параметри визначаються стандартами БТС, які використовуються операторами систем рухомого зв'язку. Крім того, необхідно враховувати умови поширення радіохвиль в місті і передмістях. У БТС зв'язок здійснюється між стаціонарною БС і рухомим абонентським терміналом, при цьому параметри лінії зв'язку (або каналу зв'язку) безупинно змінюються. Тому при описі поведінки сигналів, що поширюються в міських або приміських умовах, користуються статистичними методами.

При поширенні радіохвиль в міських умовах існує декілька явищ, що викликають зміну сигналу в точці прийому. Середній рівень сигналу головним

чином обумовлений технічними характеристиками БС і АС, а також відстанню між БС і АС. Розрахунок середнього рівня втрат здійснюється на підставі відомих методик з урахуванням рельєфу місцевості і забудови.

Рельєф місцевості, а також будівлі, розташовані по прямій, що з'єднує БС і АС, викликають екранування і дифракцію переданого БС сигналу. В результаті відбуваються коливання сигналу щодо середнього рівня (повільні завмирання), які підпорядковуються логарифмічно-нормальному закону розподілу ймовірності (або гауссовському розподілу в дБ). Нарешті, неоднорідності (будівлі, пагорби і т.д.), що знаходяться в околиці точки прийому, викликають явище многолучевості, тобто в точку прийому, крім прямої хвилі від БС, надходять також безліч відбитих від неоднорідностей хвиль. В результаті відбуваються коливання сигналу (швидкі завмирання) щодо рівня сигналу, підданого повільним завмиранням, які підкоряються імовірнісним законом розподілу Релея.

Таким чином, рівень прийнятого АС сигналу визначається середнім рівнем загасання, що залежать від відстані і технічних характеристик БТС, який в свою чергу має розкид, який визначається повільними і швидкими завмираннями. Розкид залежить від необхідної ймовірності прийому сигналу БС у зоні обслуговування абонентів ССПО.

Визначення розмірності кластера. Мережі бездротового, в тому числі, мобільного зв'язку будують на основі частотно-територіальних планів. При цьому обслуговується територію поділяють на зони обслуговування БС. Сама БС розташовується в центрі такої зони. Якщо на БС використовується ненаправлена антена, то межа зони обслуговування базових станцій є окружність.

У такій моделі кордону трьох сусідніх зон перетинаються в одній точці. Поєднавши точки перетину, отримують кордону зони обслуговування БС у вигляді шестикутника, званого соті. Щоб уникнути взаємних завад сусідні БС повинні працювати на різних частотах. При частотному плануванні складають кластер.

Число таких сот в кластері називається його розмірністю. Якщо за розмірність в системі координат прийняти відстань між вузлами, то можна знайти два цілих числа і відповідно по осях, які не мають загального дільника і задовольняють рівності  $a^2 + ab + b^2 = N$ , де  $N$  — число каналів, що належать одному ряду суміщеного каналу.  $N$  — називається ромбічним числом. Відстань між

сполученими каналами в такому ромбі одно  $\sqrt{N}$ . В табл. 2.1 представлені значення  $a$  і  $b$  і відповідні цим значенням ромбіческие числа. Поняття розмірності кластера, прийняте в стільникових системах рухомого зв'язку, збігається з поняттям ромбіческого числа, прийнятого в мережах ТВ і ЗВ радіомовлення. Тому розмірність кластера можна визначати за допомогою ромбічних чисел, отриманих на основі методу координаційних кілець.

Таблиця 2.1 – Ромбічні числа

$a \backslash b$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3	7	13	21	31	43	57	73	91	111	133	157
2			19		39		67		103		147	
3				37	49		79	97		139	169	
4					61		93		199		181	
5						91	109	129	151		201	229
6							127				223	

Дійсно, можливі різні частоти в одній центральній і шести прикордонних сотах (рис. 2.1).

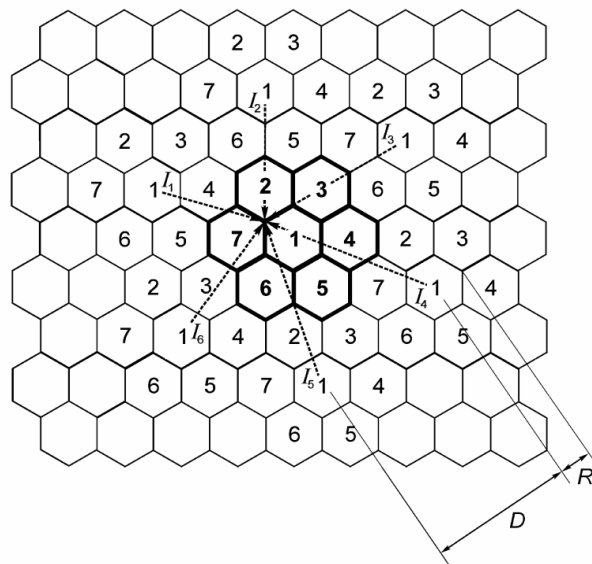


Рисунок 2.1 – Модель повторного використання частот при розмірності кластера  $N = 7$

Всі частотні канали системи ділять між БС кластера. Кожній БС присвоюється група каналів. Так, якщо в рухомій системі використовується всього  $N_f = 119$  частотних каналів і кластер розмірністю 7, то група частотних каналів, що припадають на одну соту, містить число частот

$$N_{fc} = \frac{N_f}{N} = \frac{119}{7} = 17$$

Частотно-територіальний план складають так, щоб рівень шумових завад не перевищував допустимих значень для заданого стандарту, що дозволяє багаторазово повторювати кластер і реалізувати переваги стільникових систем.

Основна перевага будь-яких стільникових систем – ефективне використання виділеної смуги частот за рахунок багаторазового повторення кластера на території. Це дозволяє обслуговувати велику кількість абонентів при обмежених ресурсах спектра частот.

На рис. 2.1 наведено фрагмент частотно-територіального плану для моделі мережі з використанням кластера розмірністю  $N = 1$ . Цифрами позначений номер групи робочих частот в соте. Жирними лініями виділено центральний кластер. Пунктиром показані шляхи приходу шумових завад суміщеного каналу на АС, що знаходиться на кордоні стільники 1.

Розглянемо випадок, коли на вхід антени АС надходять корисний сигнал і шість сигналів, що заважають (рис. 2.1). Потужність сигналу АС, прийнятого антеною, відповідно до (2.5):

$$P_{ts} = P_{ts} / W \quad (2.1)$$

де  $P_{ts} = P_{nep} G_{np}$  — еквівалентна ізотропно випромінювана потужність передавача;  $W$  — втрати загасання, які при використанні моделі Окамури-Хата визначаються за формулою (2.2) або

$$W(R, f) = 10^{-6,955} f^{-2,616} h_1^{1,382} R^{4,49-0,655 \lg(h_1)} \quad (2.2)$$

З (2.2) випливає, що потужність сигналу, прийнятого антеною АС, обернено пропорційна відстані до джерела сигналу:

$$P_{ts} = \frac{P_{ts}}{CR^{-(4,49-0,655\lg(h_1))}} = \frac{P_{ts}}{CR^{-x}} \quad (2.3)$$

де  $C = 10^{-6,955} f^{-2,616} h_1^{1,382}$ ;  $x = 4,49 - 0,655 \lg(h_1)$ .

Очевидно, що найменше відношення сигнал / завада буде на кордоні сот. З рис. 2.7 випливає, що сумарна потужність сигналів, що заважають

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6. \quad (2.4)$$

Відповідно до (2.4) і рис. 2.1 завади від відповідних базових станцій рівні:

$$\begin{aligned} I_1 &= P_{ts} / C(R + \rho_3)^{-x}; \quad I_2 = P_{ts} / C\left(\sqrt{R^2 + R\rho_3 + \rho_3^2}\right)^{-x}; \\ I_3 &= P_{ts} / C\left(\sqrt{R^2 + R\rho_3 + \rho_3^2}\right)^{-x}; \quad I_4 = P_{ts} / C(R - \rho_3)^{-x}; \\ I_5 &= P_{ts} / C\left(\sqrt{R^2 + R\rho_3 + \rho_3^2}\right)^{-x}; \quad I_6 = P_{ts} / C\left(\sqrt{R^2 + R\rho_3 + \rho_3^2}\right)^{-x}; \end{aligned} \quad (2.5)$$

де  $R$  — відстань між БС, що працюють в суміщених каналах;  $\rho_3$  — радіус зони обслуговування БС.

З (2.4) і (2.5) випливає, що сумарна потужність завад для однорідної і регулярної мережі

$$I_{\Sigma} = P_{ts} \left[ \frac{1}{C(R + \rho_3)^{-x}} + \frac{2}{C\left(\sqrt{R^2 + R\rho_3 + \rho_3^2}\right)^{-x}} + \frac{2}{C\left(\sqrt{R^2 - R\rho_3 + \rho_3^2}\right)^{-x}} + \frac{1}{C(R - \rho_3)^{-x}} \right]. \quad (2.6)$$

Тоді відношення сигнал / завада

$$\frac{S}{I_{\Sigma}} = \frac{\rho_3^{-x}}{(R + \rho_3)^{-x} + 2\left(\sqrt{R^2 + R\rho_3 + \rho_3^2}\right)^{-x} + 2\left(\sqrt{R^2 - R\rho_3 + \rho_3^2}\right)^{-x} + (R - \rho_3)^{-x}} \quad (2.7)$$

З огляду на те що коефіцієнт соканального повторення  $q = R\rho_3$ , запишемо через значення цього параметра:

$$\frac{S}{I_{\Sigma}} = \frac{1}{(q+1)^{-x} + 2\left(\sqrt{q^2 + q + 1}\right)^{-x} + 2\left(\sqrt{q^2 - q + 1}\right)^{-x} + (q-1)^{-x}} \quad (2.8)$$

Для того щоб знайти коефіцієнт соканального повторення, необхідно вирішити рівняння (2.31) для відносини сигнал / завада, що визначається стандартом стільникового рухомого зв'язку. Після визначення параметра по (3.46) можна визначити необхідну розмірність кластера для даного стандарту стільникового зв'язку. Необхідно відзначити, що розмірність кластера визначається з універсальної моделі однорідної мережі і береться з ряду чисел

$$N = 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21, 25, 27 \text{ и др.} \quad (2.9)$$

Для підвищення ефективності використання виділеного діапазону частот, тобто для зменшення коефіцієнта соканального повторення частот  $q$ , в стільникових системах рухомого зв'язку на БС використовують секторні антени з шириною головної пелюстки діаграми спрямованості або. Крім того, необхідно враховувати щільність розподілу навантаження на території міста, що призводить при обмеженому числі каналів на БС, до збільшення щільності розміщення базових станцій в центрі міста і зменшення їх щільності на околицях.

Порядок частотного планування. Для складання повного частотного плану мережі мобільного зв'язку, тобто плану впровадження конкретних номіналів частот для кожної з БС, встановлених на території міста, необхідно попередньо визначити основні параметри цього плану:

- розмірність кластера  $N$ ;
- число секторів обслуговування в одній соті ( $M = 1$  при  $\theta_{0,5} = 360^\circ$ ;  $M = 3$  при  $\theta_{0,5} = 120^\circ$  і  $M = 6$  при  $\theta_{0,5} = 90^\circ$ , де  $\theta_{0,5}$  — ширина діаграм спрямованості антен БС);
- число  $k$  БС, які необхідно встановити на території міста;
- радіус однієї соти  $\rho_s$ , км;
- рівень потужності передавача БС,  $P_{BC}$  дБВт;
- висота підвісу  $h_{BC}$ , м, антени БС (висота антени АС приймається рівною  $h_{AC} = 1,5$  м).

Перераховані параметри можна визначити, якщо відомі наступні дані:

- $F$  — смуга частот, МГц, виділена для передачі сигналів БС мережі в даному місті;
- $F_k$  — смуга частот, МГц, яку займає одним частотним каналом мережі;
- $n_a$  — число абонентів, які одночасно можуть використовувати один частотний канал (для GSM  $n_a = 8$ );
- $N_a$  — число абонентів, яке повинна обслуговувати мережа в даному місті;
- $\beta$  — активність одного абонента в годину найбільшого навантаження, Ерл;
- $p_a$  — допустима ймовірність блокування виклику в мережі;
- $\rho_o$  — необхідне захисне відношення для приймачів мережі;
- $p_t$  — відсоток часу, протягом якого допускається, щоб відношення сигнал / завада на вході приймача в мережі було менше захисного відношення  $\rho_o$ ;
- $S$  — площа міста, км<sup>2</sup>, в якому розгорнута мережа;
- $\alpha$  — параметр, дБ, що визначає діапазон випадкових флуктуації рівня сигналу в місці прийому (для мережі СПР  $\alpha = 4...10$  дБ);
- $p_{AC}$  — чутливість приймача АС, дБВт;
- $G_{BC}$  — коефіцієнт посилення антени БС, дБ.

Процедура визначення основних параметрів частотного плану для мережі складається з восьми етапів.

1. Визначається загальна кількість частотних каналів, що виділяються для розгортання мережі в даному місті:

$$n_k = \text{int}(F/F_k) \quad (2.9)$$

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

2. Обчислюється необхідна розмірність кластера при заданих  $\rho_o$  і  $p_t$  для чого використовується співвідношення

$$p(N) = 100 \int_{[10 \lg(1/\beta_c) - \rho_c]/(\alpha_p)} \exp(-t^2/2) dt. \quad (2.10)$$

Дана формула пов'язує відсоток часу  $p(N)$ , протягом якого відношення сигнал / завада на вході приймача АС нижче захисного відношення  $\rho_c$ .

Величини  $\beta_e$  і  $\alpha_p$  залежать від параметрів  $q = R/\rho_3 = \sqrt{3N}$ ,  $\alpha$  а також від  $M$ . Відсоток часу  $p(N)$  убиває з ростом  $N$ . При заданих  $\rho_3, \alpha$  і  $M = 1; 3; 6$  виконується розрахунок значень  $p(N)$  для декількох величин  $N$  (т.е.  $q$ ). Значення  $N$ , при якому виконується умова  $p(N) \leq p_t$  приймається за розмірність кластера мережі.

3. Знаходиться число частотних каналів, яке використовується для обслуговування абонентів в одному секторі однієї соти:

$$n_s = \text{int}(n_k / MN).$$

4. Визначається допустима телефонний навантаження в одному секторі однієї соти, Ерл,

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

де  $n_0 = n_s n_a$ .

5. Розраховується число абонентів, що обслуговуються однієї БС при заданій ймовірності блокування,

$$N_{BC} = M \text{int}(A / \beta)$$

6. Визначається число БС в мережі

$$K = \text{int}(N_a / N_{BC})$$

7. Знаходиться радіус однієї стільники

$$\rho_3 = \sqrt{S / (\pi K)}.$$

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

$$P_{AC} = P_{BC} + G_{BC} - 69,55 - 26,16 \lg(f_{MHz}) + 13,82 \lg h_{BC} - (44,9 - 6,55 \lg h_{BC}) \lg \rho_3.$$

Таким чином, наведена процедура дозволяє знайти всі необхідні параметри частотного плану мережі. При складанні повного частотного плану необхідно, знаючи число частотних каналів, що припадають на кожну БС, і конфігурацію кластера, використовуюваного для побудови мережі, визначити конкретні номінали частот, які виділяються для роботи всіх БС одного кластера. Причому повинні бути зведені до мінімуму завади між сотами, в яких застосовуються сусідні частотні канали, а також інтермодуляційні завади між частотними каналами, задіяними в одному секторі стільники.

Приклад частотного планування. Розглянемо приклад частотного планування мережі стандарту GSM. Задамо наступні дані:

$$F = 7,2 \text{ МГц}; \beta = 0,025; p_a = 0,1, p_t = 10\%, \alpha = 6 \text{ дБ}, S = 706,8 \text{ км}^2; N_a = 60000; \\ h_{BC} = 30 \text{ м}; G_{BC} = 12 \text{ дБ}.$$

Додаткові вихідні дані для системи GSM:

$$\rho_0 = 9 \text{ дБ}; F_k = 0,2 \text{ МГц}; P_{AC} = -132 \text{ дБВт}; n_a = 8.$$

В даному випадку  $n_k = 36$ . Розрахунок по п. 2 показує, що при заданих  $\rho_0$  і  $p_t$  отримаємо  $N = 4$  і  $M = 3$ , причому  $n_s = 3; A = 20,6; N_{BC} = 2472; K = 25; R_0 = 3 \text{ км}; P_{BC} = 1 \text{ Вт}$ .

## 2.2 Модель Окамура-Хата

Методики, засновані на широкому застосуванні емпіричних графіків (моделі Окамури і Рекомендації 370 і 529 МСЕ), досить незручні для практичного застосування, особливо при автоматизації розрахунків з використанням ПК. Тому М. Хата отримав аналітичну модель передбачення втрат поширення сигналів як результат прямої апроксимації кривих Окамури.

Модель медіанний втрат на трасах наземної рухомого зв'язку Окамура-Хата зафіксована в Рекомендаціях і повідомленнях МККР і покладена в основу стандартної моделі COST 231 Хата, рекомендованої ETSI. Проведені практичні

дослідження показують хороші результати збігу практично вимірених значень рівнів сигналів і розрахованих з використанням моделі Окамура-Хата.

Модель Окамура-Хата дозволяє отримувати досить точні значення медіанний втрат на трасах наземної рухомого зв'язку при наступних обмеженнях:

- частота сигналу  $f = 100...1500$  МГц;
- дальність зв'язку  $R = 1...100$  км;
- висота підйому антени БС  $h_{BC} = 30...200$  м;
- висота підйому антени АС  $h_{AC} = 1...10$  м.

При цьому в моделі застосовується досить зручна класифікація типів місцевості:

- великі міста. Дана зона характеризується наявністю установ і індустріальних підприємств, великим числом висотних будівель і небоскребов. Рух автотранспорту вкрай жваве практично для будь-якого часу доби;

- невеликі і середні міста. Щільно населена зона з великим числом установ, що включають окремі висотні будівлі. Дорожній рух досить інтенсивне і залежить від часу доби;

- передмістя. Велике число будівель переважно дачного типу, а також допоміжних споруд (типу складу, сховища, невеликого магазину). Помірне рух автотранспорту;

- сільська (відкрита) місцевість. Незабудована земля (відкритий простір). Необроблена або частково оброблена грунт з невеликими далеко відстоять групами будов.

Відповідно до цієї моделі загасання сигналу, дБ, при поширенні в міських районах

$$W = 69,55 + 26,161 \lg f - 13,82 \lg h_{BC} - a(h_{AC}) + (44,9 - 6,55 \lg h_{BC}) \lg R \quad (2.11)$$

де  $f$  робоча частота, МГц;  $h_{BC}$  – висота підйому антени БС, м;  $h_{AC}$  – висота підйому антени АС, м;  $R$  – дальність зв'язку, км;  $a$  – поправочний коефіцієнт, який використовується при висоті антени АС, відмінною від еталонної, рівної 1,5 м.

Вирази для виходять різними для великих і середніх міст, а також (у разі великих міст) для різних частотних діапазонів:

для міста середніх розмірів

$$a(h_{AC}) = (1,1 \lg f - 0,7) h_{AC} - (1,56 \lg f - 0,8); \quad (2.12)$$

для великого міста

$$a(h_{AC}) = 3,2(\lg 11,75h_{AC})^2 - 4,97; \quad (2.13)$$

Втрати при поширенні в передмісті, дБ,

$$W_s = W - 2\lg(f/28)^2 - 5,4; \quad (2.14)$$

на відкритій (сільській) місцевості

$$W_o = W - 4,78(\lg f)^2 + 18,33\lg f - 40,94; \quad (2.15)$$

де – втрати поширення в міських районах (3.1).

Розміри зони покриття базової станції будуть визначатися дальністю зв'язку між БС і АС, яка виходить шляхом вирішення першого рівняння передачі:

$$P_{np} = P_{nep} + G_{nep} + G_{np} + W_{CB} + W_{дон} = P_{изл} - W(R, h_{BC}, h_{AC}) - W_m - W_s; \quad (2.16)$$

де  $P_{np}$  — рівень потужності ПС на вході приймальної антени, дБ/мВт;  
 $P_{изл} = P_{nep} + G_{nep}$  — рівень ефективної ізотропно випромінюваної потужності передавача, дБ/мВт;  $W(R, h_{BC}, h_{AC}) = W_{CB} + W_{дон}$  — загасання сигналу при поширенні, дБ, визначається за формулами (3.1)-(3.5);  $W_m$  — додаткові втрати сигналу, дБ, при роботі з портативної АС,  $W_m = 3$  дБ;  $W_s$  — додаткові втрати сигналу, дБ, при роботі з портативної АС в будівлі або автомобілі (для автомобіля  $W_s = 8$  дБ, для будівлі  $W_s = 15$  дБ).

Рівень ефективної ізотропно випромінюваної потужності передавача з урахуванням втрат в елементах передавального тракту

$$P_{изл} = P_{нрд} - W_{фнрд} - W_{днрд} - W_{\kappa} + G_{нрд}, \quad (2.17)$$

де  $P_{нрд} = 10\lg P'_{нрд} + 30$  — рівень потужності передавача, дБ/мВт;  $P'_{нрд}$  — потужність передавача, Вт;  $W_{фнрд} = \gamma_{нрд} l_{фнрд}$  — втрати в фідері антени передавача, дБ;  $\gamma_{нрд}$  — погонне загасання в фідері антени передавача, дБ/м;  $l_{фнрд}$  — довжина фідера

антени передавача, м;  $W_{\text{дпрд}}$  — втрати в дуплексері на передачу, дБ;  $W_{\text{к}}$  — втрати в комбайнера (пристрої складання), дБ;  $G_{\text{прд}}$  — коефіцієнт посилення антени передавача в напрямку зв'язку, дБ.

Основною умовою забезпечення зв'язку буде необхідність перевищення рівня потужності сигналу на вході приймальної антени по відношенню мінімально необхідного рівня потужності  $P_{\text{ПС мин}}$ , дБм, визначається технічними характеристиками приймача:

$$P_{\text{пр мин}} = P_{\text{прм}} + W_{\text{фпрм}} + W_{\text{дпрм}} - K_{\text{МШУ}} - G_{\text{прм}} \quad (2.18)$$

де  $P_{\text{прм}} = 20 \lg P'_{\text{прм}} - 10 \lg R_{\text{прм}} - 90$  — чутливість приймача, дБ/мВт;  $P'_{\text{прм}}$  — чутливість приймача, мкВ (в разі, якщо чутливість приймача задається в дБм, то в якості  $P_{\text{прм}}$  використовується саме це значення);  $R_{\text{прм}}$  — вхідний опір приймача, Ом;  $W_{\text{фпрм}} = \gamma_{\text{прм}} l_{\text{фпрм}}$  — втрати в фідері антени приймача, дБ;  $\gamma_{\text{прм}}$  — погонное загасання в фідері антени приймача, дБ/м;  $l_{\text{фпрм}}$  — довжина фідера антени приймача, м;  $W_{\text{дпрм}}$  — втрати в дуплексному фільтрі на прийом, дБ;  $K_{\text{МШУ}}$  — коефіцієнт посилення антенного тракту прийому (МШУ), дБ;  $G_{\text{прм}}$  — коефіцієнт посилення антени приймача в напрямку зв'язку, дБ.

У системах мобільного зв'язку рівень потужності сигналу на вході приймальної антени є випадковою величиною, яка добре описується логнормальний законом розподілу. Для підвищення ймовірності забезпечення зв'язку необхідної якості необхідний додатковий запас рівня потужності сигналу на вході приймальної антени  $P_{\text{пр доп}}$ .

Цей запас визначається статистичними параметрами сигналу на трасах рухомого зв'язку, а саме стандартними відхиленнями сигналу за місцем ( $\sigma_d$ , дБ) і за часом ( $\sigma_1$ , дБ).

При цьому численні експериментальні дослідження показали, що значення  $\sigma_d$  залежить в основному від ступеня нерівності місцевості і діапазону частот,  $\sigma_1$  — від дальності зв'язку.

При поширенні сигналу над горбистій поверхнею втрати поширення збільшуються в порівнянні з випадком середнепересеченої місцевості. Для оцінки ступеня нерівності місцевості використовують параметр  $\Delta h$ , м, який може

бути визначений за рис. 3.4 як різниця між висотами  $h(90\%)$  і  $h(10\%)$  місцевості на трасі, перевищує в 90% і 10% точок профілю відповідно. Параметр  $\Delta h$  дозволяє ввести умовну класифікацію типів місцевості.



Рисунок 2.2 – Визначення горбистості місцевості  $\Delta h$

Таблиця 2.2 – Характеристика типів місцевості

Тип місцевості	Значення параметра $\Delta h$ , м
Рівнинна або водна поверхня	0...25
Рівнинно-горбиста (среднепересічена)	25...75
Горбиста (дуже пересічених)	75...150
Гориста	150...400
Дуже високі гори, не менше	400

Експериментальні дослідження, проведені для багатьох районів, показують, що для відстаней понад 10 км стандартне відхилення, дБ, для діапазону частот 300 ... 3000 МГц можна визначити за формулою

$$\sigma_d = 9,5 \lg(\Delta h / 50) + 9.$$

На відстанях менше 10 км стандартне відхилення залежить від дальності зв'язку  $R$ , км. Для практичних обчислень ці дані в діапазоні 300 ... 3000 МГц з високим ступенем точності апроксимуються формулою

$$\sigma_d = 4,1 \lg(R) + 5.$$

Стандартне відхилення сигналу за часом залежить від дальності зв'язку і для точок прийому, розташованих на відстані менше 100 км від передавачів,

$$\sigma_t = 6,5[1 - \exp(-0,036R)].$$

Узагальнене значення стандартного відхилення сигналу за місцем і за часом

$$\sigma = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_t^2}.$$

Додатковий запас рівня сигналу

$$P_{\text{ПС доп}} = k_{mp} \sigma,$$

де  $k_{mp}$  — коефіцієнт логнормального розподілу, який би необхідну надійність зв'язку, визначається як аргумент нормальної функції розподілу:

$$P(k_{mp}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{k_{mp}} \exp(t^2 / 2) dt,$$

значення якої дорівнює необхідної ймовірності забезпечення зв'язку і може бути знайдено шляхом вирішення даного рівняння. деякі значення  $k_{mp}$  і  $P(k_{mp})$  наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 Значення величин  $k_{mp}$  и  $P(k_{mp})$

$P(k_{mp})$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99
$k_{mp}$	0	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	2,326

Таким чином, для того щоб потужність сигналу на вході приймальної антени  $P_{np}$ , визначається за (2.16), перевищувала мінімальну потужність сигналу на вході приймальної антени  $P_{np, \text{мин}}$  яка визначається по (2.9), виходячи з чутливості приймача, із заданою вірогідністю, необхідно, щоб виконувалася умова

$$P_{\text{пр мин}} \geq P_{\text{пр мин}} + P_{\text{пр доп}} \quad (2.19)$$

де  $P_{\text{пр доп}}$  визначається по (2.10) і табл. 2.2 для заданої ймовірності  $P$ .

Виходячи з вищевикладеного, методика прогнозу зон покриття БС для мереж мобільного зв'язку буде наступною:

1. Відповідно до виразом (2.18) обчислюється рівень ефективної ізотропно випромінюваної потужності передавача  $P_{\text{изл}}$ .
2. Визначається мінімально необхідний рівень сигналу на вході приймальної антени  $P_{\text{пр мин}}$  хв за формулою (2.19).
3. Визначається величина додаткового запасу рівня потужності сигналу  $P_{\text{пр доп}}$  забезпечує необхідну надійність зв'язку.
4. Обчислюється необхідний рівень потужності сигналу на вході приймальної антени, що забезпечує необхідну надійність зв'язку:

### 2.3 Розрахунок пропускної здатності в мережах фемто / піко / макростільниками в міському середовищі

У зв'язку зі стрімким зростанням попиту на послуги бездротового, в тому числі мобільного зв'язку у фахівців виникає необхідність відповідного збільшення пропускної здатності мереж. При цьому велика увага приділяється розвитку мережевої інфраструктури. Одним з ключових напрямків в цьому розвитку є покриття Фемтостільників мікро і макромережі. Це мережі (FAP), які можуть бути встановлені або кінцевими користувачами, або постачальником послуг. FAP використовують дозволені ділянки радіочастотного спектру і мають IP-з'єднання.

Коли мобільні користувачі знаходяться в рамках покриття макроантенни (значення  $C / 1$  близько 20 дБ), то це означає хороші пропуск-ву здатність каналу і швидкість передачі даних в ньому. Але коли мобільні користувачі наближаються до кордонів стільникового зв'язку, особливо всередині будівель, значення  $C / 1$  падає до рівня -3 дБ. Це означає, що обладнання користувачів схильне до істотного впливу завад і має дуже низьку швидкість прийому / передачі даних.

Досвід експлуатації бездротових телекомунікаційних систем показує, що фемтостільники стають сьогодні все більш популярними, а їх використання є вдосконаленим рішенням для користувачів, віддалених від антен мікростільників.

Фемтостільників створюють сигнал, що надає комунікацію між користувачами фемтосети, виступаючи при цьому потужною завадою для сусідніх користувачів мікросетей та інших фемтосетей. Цей вибір між вдосконаленим сигналом для одних користувачів і зростаючими завадами для інших - основна проблема поширення фемтосетей. Важливе значення в побудові остаточної конфігурації мережі, об'єднаної з фемтостільників, має досягнення найкращого співвідношення сигнал / шум, яке впливає на надання сигналу високого якості всім користувачам.

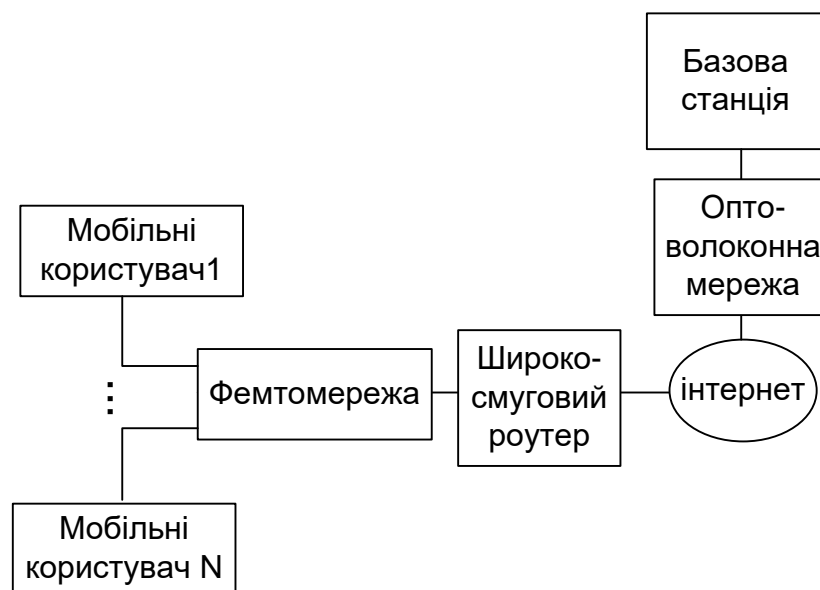


Рисунок 2.3 – Ієрархія фемто / пікосети

Вирішення вищезазначених проблем можливе шляхом моделювання каналу зв'язку в міських і приміських умовах при розвитку стратегії макромережі, об'єднаних з фемтостільників і пікосети (рис. 2.6).

Для оцінки стану такого об'єднання фемто / піко / макростільниками, розглянемо мультипараметричну стохастичну модель для прогнозування поширення сигналу як всередині, так і зовні приміщення.

2.3.1 Модель енергетичного розрахунку з урахуванням механізмів поширення в міських умовах

Розглянута вище модель Окамура-Хата використовується при побудові бездротових мереж на відкритому просторі поза приміщенням, зазвичай відбувається на пересіченій місцевості. Для оцінки просторового загасання в умовах застосування фемтостільників необхідно брати до уваги умови в межах приміщення, а також профіль конкретної місцевості. Профіль цього може варіюватися від злегка горбистого до високогірного. Має враховуватися також присутність дерев, будівель і інших природних завад для радіохвилі. Для прогнозування просторового загасання в умовах забудованої території можуть бути корисними різноманітні моделі поширення.

Для прогнозування параметрів поширення радіосигналу в міському середовищі, що поєднує в собі облік багатопроменевого поширення уздовж прямих вулиць, які перетинають і прилеглих до них вулиць, а також природні та штучні завади, розподілені на пересіченій місцевості безладно (по Пуассону, для звичайного потоку розсіювачів). Розглянемо деякі нові методи прогнозування загасання радіосигналу, яке здійснюється за різними сценаріями з різними висотами базових станцій (BS) і абонентських антен. Залежно від висот стільників антен BS і мобільного користувача (MS) існує кілька сценаріїв для забудованої території. Тут ми представимо найбільш загальний сценарій, який в основному поширений в реальних міських умовах, т. Е. В умовах, коли антена BS розташована вище або на рівні дахів, а антена MS знаходиться нижче рівня дахів.

Для спрощення основний стохастичною моделі можна виділити три можливі сценарії в умовах міського середовища:

- умови псевдовидимості (Quasi-LOS);
- умови непрямой видимості (Non-LOS) з одноразовою дифракцією, розсіюванням і відображенням;

3) умови Non-LOS з багаторазовою дифракцією, розсіюванням і відображенням.

Розглянемо перший сценарій - Quasi-LOS (рис. 2.4, а). В даному випадку множник загасання

$$W_1(R) = -32,4 - 20 \log f - 20 \log R - W_{fading} + (G_{BS} + G_{MS}) [dB], \quad (2.10)$$

де

$$W_{fading} = 10 \log \left[ \gamma_0 R \frac{F(z_1, z_2)}{h_2 - h_1} \right] = 10 \log \left[ \gamma_0 R \frac{F(z_1, z_2)}{\Delta h} \right] - \quad (2.11)$$

множник, що враховує можливі завмирання, обумовлені характером траси;

$$F(z_1, z_2) = \begin{cases} (h_1 - z_1) + \frac{\Delta h}{n+1}, & h_1 > z_1, z_2 > h_2 > z_1 \\ \frac{(h_2 - z_1)^{n+1}}{(n+1)(\Delta h)^{n+1}}, & h_1 < z_1, z_2 > h_2 > z_1 \end{cases} - \quad (2.12)$$

профіль забудови (рис. 3а)

Тут  $f$  — робоча частота, МГц;  $R$  — відстань між антенами BS і MS з висотою  $z_1$  і  $z_2$  відповідно, км;  $G_{BS}$  і  $G_{MS}$  — посилення антен;  $F(z_1, z_2)$  — профіль будівель між антенами BS і MS, визначений для даного сценарію як (2.11);  $h_1$  і  $h_2$  — мінімальна і максимальна висоти будівлі;  $n$  — параметр полиноміального поширення будівель;  $\gamma_0 = 2\bar{R}v/\pi$  — одномірні контури будівель, км<sup>-1</sup>;  $\bar{R}$  — середня ширина / довжина будівель (в залежності від розташування будівлі з урахуванням напрямку променів антени);  $v$  — щільність будівель на квадратний кілометр.

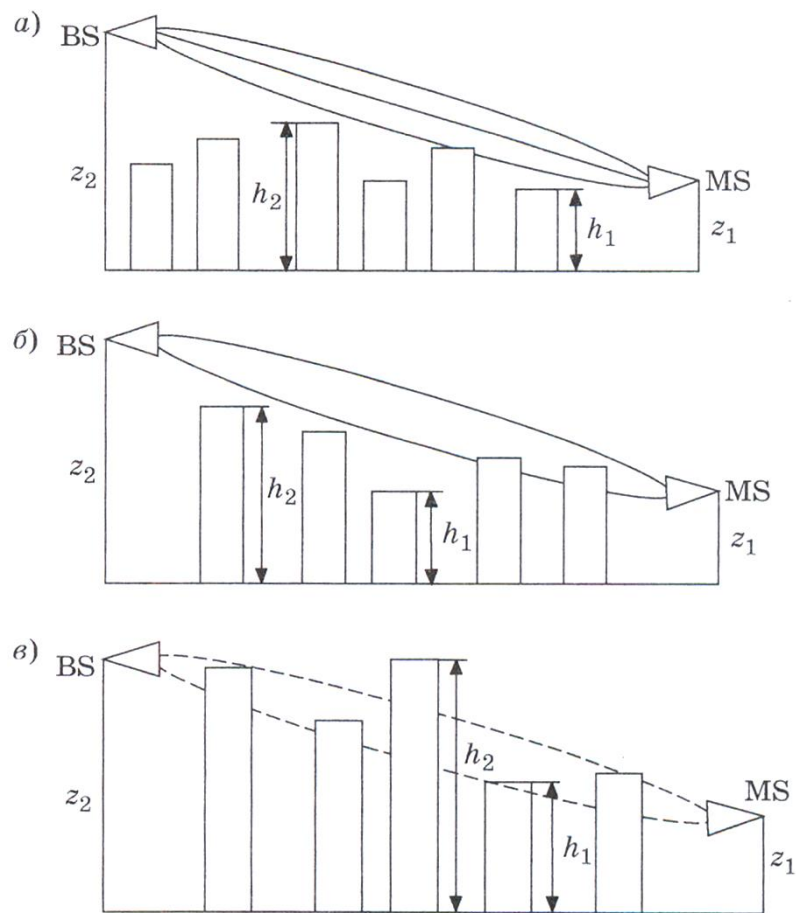


Рисунок 2.4 – Антена BS над дахами, антена MS під дахами з видимістю 85-100 % (а), 50 % (б) і 10-20 % (в) між ними

Другий сценарій - Non-LOS з одноразовою дифракцією (рис. 2.7, б). тут маємо

$$W_2(R) = -32,4 - 30 \log f - 30 \log R - W_{fading} + (G_{BS} + G_{MS}) [\text{дБ}], \quad (2.13)$$

де

$$W_{fading} = 10 \log \frac{\gamma_0 I_v F(z_1, z_2)}{|\Phi \left[ \frac{\lambda R}{4\pi^3} + (z_2 - \bar{h})^2 \right]^{1/2}} \quad (2.14)$$

Третій сценарій - Non-LOS з багаторазовою дифракцією (рис. 2.7, в). В даному випадку:

$$W_3(R) = -41,3 - 30 \log f - 30 \log R - W_{fading} + (G_{BS} + G_{MS}) [\text{дБ}], \quad (2.15)$$

де

$$W_{fading} = 10 \log \frac{\gamma_0^4 l_v^3 F^4(z_1, z_2)}{\lambda |\Phi|^2 \left[ \frac{\lambda R}{4\pi^3} + (z_2 - \bar{h})^2 \right]}. \quad (2.16)$$

Тут

$$F(z_1, z_2) = \begin{cases} (h_1 - z_1) + \frac{(\Delta h)^2 - (h_2 - z_2)^2}{2\Delta h}, \\ h_1 > z_2, h_2 > h_1 > z_1 \\ \frac{(h_2 - z_1)^2 - (h_2 - z_2)^2}{2\Delta h}, \\ h_1 < z_2, h_2 > h_1 > z_1 \end{cases}; \quad (2.17)$$

$l_v$  — когерентний масштаб шорсткості стіни при дифузному відображенні або розсіянні;  $|\Phi|$  — абсолютна величина коефіцієнта відбиття, зазвичай отримується з класичних формул, що залежать від діелектричних характеристик стін будівель  $[\Phi] \in (0, 2 \dots 0,5)$ .

### 2.3.2 Модель поширення в приміщенні

Радіоканали в приміщенні відрізняються від традиційних мобільних радіоканалів - площа покриття набагато менше, а різновидів оточення набагато більше при меншому масштабі територіального розносу передавача і приймача.

Поширення радіосигналу в будівлі сильно залежить від наступних характеристик: положення будівлі, використаних при будівництві матеріалів, типу будівлі, його форми, архітектури та т.п. Великий вплив на рівень і характер поширення сигналу надає різноманітна конфігурація предметів в конкретному приміщенні будівлі: откриття / зачинені двері або вікно, рівень стелі і розташування меблів і ін., в тому числі і місце розташування антени.

Для каналів в приміщенні пропонується також наступна модель:

$$\begin{aligned}
W_T = & -32,44 - 20 \log f - 10 \log \left[ \frac{\gamma_0 (R + \tilde{R})}{r} \sin^2 \frac{r}{2} \right] - 2,4 [\gamma_0 (R + \tilde{R})] - 10 \log [T_{wall} \cdot T_{floor}] - \\
& 10 \log \frac{r[(R + \tilde{R}) - r \cos \varphi]}{(R + \tilde{R})^2 - r^2} - 8,6 \frac{|\ln(XR_{wall})|}{a'(\varphi)(R_n + \tilde{R}) - z \cos \varphi} + (G_{BS} + G_{MS}) [\text{дБ}],
\end{aligned} \tag{2.18}$$

де  $r$  — відстань між антенами BS і MS;  $T$  — тип матеріалу:  $|T_{wall}| = \sum_{i=1}^N |T_{wi}|$ ,  $|T_{floor}| = \sum_{i=1}^N |T_{fi}|$ ,  $|T_{fi}| \equiv |T_{wi}| = \sqrt{1 - \chi |R_n|}$ ;  $R_n$  — відстань між антеною BS і завадою;  $\tilde{R}$  — відстань між завадою і антеною MS:  $\tilde{R} = \sqrt{(r^2 + R^2 - 2Rr \cos \varphi)}$ ;  $\varphi$  — кут між напрямком прямого і відбитого від перепони радіопроменів;  $X$  — відношення між шириною кімнат і відстанню між кімнатами, розташованими вздовж коридору;  $0,1 < \chi < 1$  — вимірний фактор.

## 3 АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ РОЗГОРТАННЯ ФЕМТОСТІЛЬНИКІВ У МЕРЕЖАХ 4G

### 3.1 Аналіз ефективності використання фемтостільників

Важливим способом збільшення пропускної здатності мереж є розвиток мережевої просторової інфраструктури. Однак зазначені тенденції вимагають принципово нових підходів для економічно ефективного розвитку цієї інфраструктури.

Одним із ключових напрямків у цій області є використання фемтостільників, а також традиційних мікро- і макромереж. Точки доступу фемтостільникової МС (FAP) є невеликими, недорогими і малопотужними і можуть бути встановлені або кінцевим користувачем, або постачальником послуг і, як правило, займають дозволений спектр і підтримують IP-з'єднання.

В останні роки промисловість стала активно випускати точки доступу фемтостільникової мережі (FAPs), оскільки вони володіють малим радіусом дії і в складі макромережі базових станцій зі стандартними радіусами мобільного зв'язку стає можливим збільшення пропускної здатності для користувача макромережі (рис.3.1).

Ідеологія використання технології фемтостільників були розроблені комітетами по стандартизації на популярних форумах 3GPP, 3GPP2 і WiMAX і є висококласним технологічним рішенням у задачах підвищення пропускної здатності систем безпроводового зв'язку різних стандартів. Основні переваги даних технологій проявляються в наступному:

- 1) оптимальне радіопокриття всередині будівель і приміщень;
- 2) енергозберігаючі властивості акумуляторних батарей абонентських станцій (MS) в умовах малих радіусів зон радіопокриття;
- 3) розширення спектру додаткових видів послуг, інформаційних послуг, у зв'язку з розташуванням FAPs в безпосередній близькості від абонентських станцій домовласників (розумний будинок та ін.);
- 4) можливість подальшого розвитку інфраструктури мережі на основі принципів самоорганізації багатоканальних багатоінтерфейсних систем (гетерогонні, adhoc, MANET, mesh-мережі).

Ключовим питанням даного десятиліття є оптимізація пропускної здатності каналу в безпроводових мережах четвертого покоління (LTE, WiMAX). Актуальною стає задача розробки методики розрахунку і планування фемтостільникового зв'язку. На сьогодні вже відомий ряд методів, заснованих на передових багатоантенних технологіях МІМО, використанні адаптивних антенних систем, фазованих антенних решітках, смарт-антен поряд із застосуванням методів частотно-територіального планування (від макро- до піко- і фемтостільників), які дають можливість забезпечити кращі показники за якістю обслуговування користувачів.

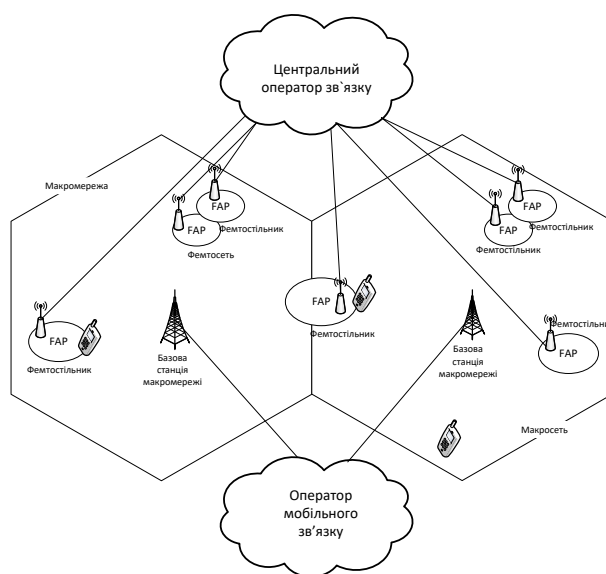


Рис.унок 3.1 – Ієрархія фемто-макростільників

У рамках вирішення проблеми побудови методики планування мережі з використанням фемтостільників, на сьогодні не існує загальної моделі для прогнозування поширення сигналу, особливо при реалізації фемтостільник в приміщеннях будівель. Особливу роль у даному випадку відіграє середовище поширення сигналу і всілякі перепони на шляху його поширення: меблі, люди під час руху, стіни і перекриття будівлі різної товщини, вікна та ін. предмети.

Сигнально-завадова обстановка в мережах мобільного зв'язку оцінюється в умовах електромагнітних впливів як внутрішньосистемного, так і межсистемного характеру, і ключовим питанням є оцінка якості обслуговування абонента, пропускної здатності і швидкості передачі даних у каналі. На дані показники певною мірою впливають фактори, пов'язані з розташуванням абонента в зоні

радіопокриття антени макромережі із забезпеченням необхідного ОСПШ для розглянутого стандарту мобільного зв'язку. Однак, коли мобільні користувачі наближаються до кордонів осередку роботи базової станції, або знаходяться всередині будівель, значення ОСПШ може зменшитися до рівня -3 дБ. Це означає, що обладнання користувачів не отримує необхідний рівень потужності корисного сигналу у зв'язку з загасанням електромагнітної енергії або піддаються істотному впливу взаємних завад, що позначається на зменшенні швидкості прийому/передачі даних. Включення точок доступу FAP, завади між фемтостільниками і (або) піко- фемтостільниками і їх взаємодію з базовими станціями макромережі залишається ключовою проблемою оцінки пропускної здатності і спектральної ефективності каналу зв'язку, яка потребує вирішення [25-27].

### 3.2 Способи розгортання фемтостільників, що використовуються для збільшення пропускної здатності у мережах 4G

Розглянемо способи розгортання мереж фемтостільників, що використовуються для збільшення пропускної здатності в системах нового покоління. Будемо враховувати, що взаємні завади між фемтостільників і (або) піко / фемтостільників – ключова проблема для поліпшення пропускної здатності і спектральної ефективності каналу зв'язку.

Розглянемо макромережі, де  $\tilde{M}$  — кількість станцій макроелементи мережі (mMS), сполучених з базовою станцією макромережі (mBS). Нехай  $\Delta F_{mac}$  позначає доступну смугу спектра для макроелементи мережі. Крім того, розглянемо простий планувальник, який визначає рівну пропускну здатність  $\Delta F_{m,i} = \Delta F_{mac} / \tilde{M}$  для кожної з mMS. Тоді, за відсутності будь-яких фемтостільників, пропускну здатність каналу mMS можна представити у вигляді:

$$C_{m,i}^{(nf)} = \frac{\Delta F_{mac}}{\tilde{M}} \log_2 \left( 1 + \frac{\tilde{M} P_{m,i}}{\Delta F_{mac} N_0} \right), \quad (3.1)$$

де  $(nf)$  відноситься до сценарію без фемтостільників;  $P_{m,i}$  — приймальна потужність для  $i$ -й mMS, а  $N_0$  — рівень шуму. Як видно з (3.1), пропускну

здатність mMS буде збільшуватися зі зменшенням  $\tilde{M}$  при збільшенні  $\Delta F_{mac}$  і з ростом  $P_{m,i}$ . Таким чином, пропускна здатність каналу для користувача в приміщенні буде нижче, ніж для користувача на вулиці; рівень пропускної здатності залежить від втрат при проникненні через стіну, що зменшують значення  $P_{m,i}$ .

Цю проблему можна вирішити при використанні фемтостільників в закритих приміщеннях, що призведе до збільшення потужності сигналу (і при звичайних налаштування – до більшої пропускної здатності) для користувачів в приміщенні і забезпечить більш високу пропускну здатність каналів. Далі розглянемо три різних режиму розгортання фемтостільників, а також досліджуємо їх вплив на пропускну здатність каналу для користувачів макроелементів та фемтостільників. Тут же розглянемо три різних режиму розгортання фемтостільників:

- виділений канал в порівнянні з поєднаним каналом;
- відкритий доступ (OSG) в порівнянні з закритою групою абонентів групою (CSG);
- фіксована потужність передачі низхідного каналу в порівнянні з адаптивною потужністю передачі цього каналу.

При виділеному каналі фемтостільників виділяється окремий спектр – DSA (пропускна здатність –  $\Delta \tilde{F}_{fem}$ ), на відміну від макроелементів. Хоча це в основному усуває потенційні завади від макромережі, однак частотні ресурси при цьому використані неефективно.

Пропускну здатність mMS з виділеним каналом можна записати як

$$C_{m,i}^{(dc)} = \frac{\Delta F_{mac} - \Delta \tilde{F}_{fem}}{M} \log_2 \left( 1 + \frac{MP_{m,i}}{(\Delta F_{mac} - \Delta \tilde{F}_{fem})N_0} \right), \quad (3.2)$$

де  $\Delta \tilde{F}_{fem}$  – смуга пропускання фемтостільників;

$i$  – індекс mMS;

$M < \tilde{M}$  – число мобільних станцій зв'язку, об'єднаних з макросами.

Число користувачів  $(\tilde{M} - M)$  не використовують частотний ресурс макромережі. Очевидно, що пропускна здатність макроелементів може бути

збільшена при зменшенні виділяється частотного ресурсу для фемтостільників  $\Delta\tilde{F}_{fem}$  (рис.3.2).

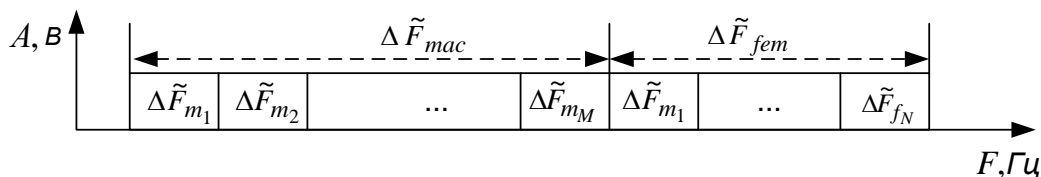


Рисунок 3.2 – Режим виділеного спектру DSA

Порівнюючи рівняння (3.1) і (3.2), відзначимо, що з введенням фемтостільників маємо менш доступний спектр для мережі макроелементів. Однак  $\tilde{M} - M$  користувачів зміщуються на мережі фемтостільників і більше не використовують частотні ресурси макроелементів. Таким чином, в цілому пропускна здатність каналу користувача макроелементи може бути збільшена із зменшенням значень  $\Delta\tilde{F}_{fem}$  і  $M$ .

З іншого боку, пропускна здатність мобільної станції фемтостільника (fMS) з виділеним каналом може бути записана як

$$C_{m,i}^{(nf)} = \frac{\Delta\tilde{F}_{mac}}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{NP_{f,i}}{\Delta\tilde{F}_{mac} N_0} \right) \quad (3.3)$$

де  $N$  – кількість користувачів фемтостільників;

$P_{f,i}$  – потужність сигналу від БС фемтостільників (fMS);

Смуга пропускання для кожного користувача фемтостільників може бути такою ж як і для користувачів макромережі  $\Delta\tilde{F}_{fi} = \frac{\Delta\tilde{F}_{fem}}{N}$ .

Режим використання, розподіл загального спектру (SSA) дає можливість більш ефективно використовувати наявний спектр, оскільки абоненту не потрібно шукати доступні канали в осередку в різних діапазонах частот, однак в даному режимі можливе істотне збільшення взаємних завад між користувачами фемтостільників і макромережі (рис.3.3).

Порівняння рівнянь (3.2) і (3.3) показує, що навіть якщо смуга пропускання для кожного користувача  $(\Delta F_{f,i}) = \Delta\tilde{F}_{fem} / N$  може бути такою ж, як і пропускна

здатність для користувачів макроелементи в приміщенні без будь-яких фемтостільників прийняті потужності  $P_{f,i}$  як правило, істотно збільшуються із застосуванням фемтостільників, підвищуючи пропускну здатність для користувачів в приміщенні.

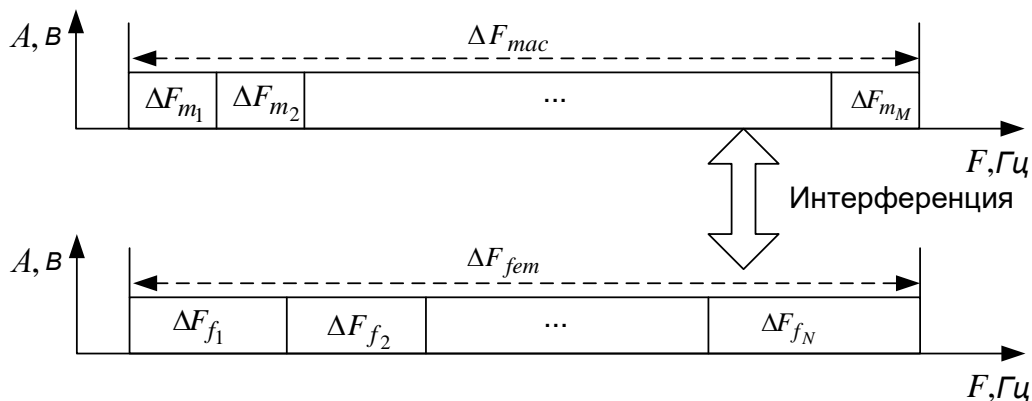


Рисунок 3.3. Режим загального спектру SSA

Суміщений канал із застосуванням фемтостільників дає можливість більш ефективно використовувати наявний спектр – SSA. Макроелемент як і фемтостільників, матиме більшу пропускну здатність в розрахунку на одного користувача при використанні суміщеного каналу (відповідно,  $\Delta F_{m,i} > \tilde{\Delta F}_{m,i}$  і  $\Delta F_{f,i} > \tilde{\Delta F}_{f,i}$ ). Крім того, процес пошуку осередку для mMMS стає простіше, оскільки не потрібно шукати осередки в різних діапазонах частот (наприклад з метою передачі). Однак при використанні суміщеного каналу будуть з'являтися певні завади в Фемтостільників і макроелементів.

Пропускна здатність каналу mMMS при реалізації суміщеного каналу фемтостільника можна записати в наступному вигляді:

$$C_{m,i}^{(cc)} = \frac{\Delta F_{mac}}{M} \log_2 \left( 1 + \frac{MP_{m,i}}{I_{fem} + \Delta F_{mac} N_0 / M} \right) \quad (2.22)$$

де верхній індекс означає суміщений канал фемтостільника і  $I_{fem}$  — загальні завади, які спостерігаються у всіх сусідніх мережах фемтостільників. Порівнюючи рівняння (2.22) і (2.19), бачимо, що пропускна здатність в розрахунку на одного користувача поліпшується з використанням сполученого

каналу ( $\Delta F_{m,i} > \Delta \tilde{F}_{m,i}$ ). Однак в mMS також спостерігаються завади від сусідніх мереж фемтостільників, які можуть погіршити пропускну здатність, якщо вони істотні. Отже, поліпшується пропускну здатність чи ні по відношенню до варіанту з виділеним каналом, залежить як від  $\Delta \tilde{F}_{fem}$ , так і від  $I_{fem}$ . Аналогічним чином порівняння рівнянь (3.2) і (3.3) показує, що поліпшення пропускну здатності каналу по відношенню до варіанту із застосуванням фемтостільників залежить як від  $M$ , так і від  $I_{fem}$ .

З іншого боку, пропускну здатність fMS із застосуванням поєднаного каналу можна записати як

$$C_{m,i}^{(dc)} = \frac{\Delta F_{fem}}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{P_{f,i}}{I_{mac} + \Delta F_{fem} N_0 / N} \right), \quad (3.4)$$

де  $\Delta F_{fem} = \Delta F_{mac} \gg \Delta \tilde{F}_{fem}$ .

Це передбачає значне збільшення пропускну здатності на одного користувача фемтостільника, яке проісходить через завади  $I_{mac}$ , спостережуваних від користувачів макроелементів та базових станцій mBS. Оскільки пропускну здатність FAR впливає на пропускну здатність каналу лінійно, а завади впливають на пропускну здатність каналу за логарифмічною закону, застосування суміщеного каналу, як правило, призводить до поліпшення загальної пропускну здатності в порівнянні з використанням виділеного каналу.

Відкритий доступ і закрита група. Для мереж фемтостільників відкритого доступу можливе приєднання будь-якого з mMS. Для CSG-фемтостільників, з іншого боку, конкретний mMS, який може приєднатися до конкретної мережі фемтостільників, обмежений певною груп. Тому для CSG-режиму конкретна мережа фемтостільників може отримати суттєві завади (і викликати їх) від mMS, що знаходиться недалеко від поєднаного каналу, оскільки допуск до мережі фемтостільників йому не буде надано. Зміна пропускну здатності каналу для CSG- і OSG- режиму описано за допомогою рівнянь (2.22) і (2.23). Для режиму відкритого доступу фемтостільників буде обслуговувати більшу кількість fMS, поскільки знаходяться неподалік mMS впливатимуть на фемтостільники. Тому пропускну здатність, доступна для одного користувача fMS ( $\Delta F_{fem} / N$ ), буде зменшуватися (2.22). Однак ті mMS, які приєднуються до Фемтостільників, як

правило, викликають найсильніші завади для них. Таким чином, тривалість завад  $I_{mac}$  буде значно знижуватися в режимі відкритого доступу, і тільки далеко знаходяться mMS будуть як і раніше бути причиною завад. Це, як правило, можна компенсувати звуженням смуги частот для fMS, що поліпшить і пропускну здатність фемтостільника. Аналіз рівняння (2.23) показує, що режим відкритого доступу дозволить збільшити пропускну здатність для користувача макроелементи ( $\Delta F_{mac}/M$ ), підвищуючи пропускну здатність для решти польователів, пов'язаних з макроелементом. За результатами моделювання OSG-режим забезпечує більш високу загальну продуктивність системи і більш широке охоплення, в той час як режим CSG має велику поверхневу пропускну здатність в цілому (визначається як відношення пропускну здатності системи з фемтостільниками до пропускну здатності системи без фемтостільників). Слід зазначити, що режим відкритого доступу в порівнянні з CSG може мати ряд проблем, пов'язаних з безпекою, додатковим навантаженням на транзитне сполучення для власника фемтостільника і т. д.

Фіксована потужність в порівнянні з адаптивною потужністю передачі низхідного каналу. Априорі фіксовану потужність mBS розподіляють для FAP, що знаходяться у відповідній макромережі, як правило, на рівні 13 або 20 дБ. У випадку з адаптивною потужністю передачі fBS може налаштувати потужність передачі з урахуванням завад, викликаних / отриманих у / від макроячейки і інших сусідніх фемтостільників. Наприклад, найближчі до mBS фемтостільники можуть передавати на максимальному рівні потужності (через значні завади з боку mBS), при наближенні фемтостільника до країв комірки може зменшитися їх потужність передачі, і завади mBS будуть слабкіше. Зменшення fBS-потужності передачі буде також зменшувати завади  $I_{fem}$  в мережі макроячейки (2.22). Для фемтостільника з більш низькою потужністю передачі спостерігається зниження пропускну здатності конкретних мереж, незважаючи на те, що пропускну здатність макроячейки може збільшитися. Типовий підхід для управління потужністю таким чином, що коефіцієнт завад сигналу буде стреміться до 0 дБ на кордонах фемтостільника.

Будемо розглядати макромережі, що складаються з  $\tilde{M}$  – станцій макроелементи мережі (mMS) і взаємодіючих з базовою станцією макромережі (mBS).

При побудові фемтостільників як правило розглядають три різних режиму їх розгортання, що істотно впливає на пропускну здатність каналу користувачів як макроелементів, так і самих фемтостільників:

1. Розподіл виділеного спектру (DSA) - фемтостільники (FAP) використовують виділений діапазон, який не використовується в макромережі. В цілому, такий режим в основному усуває потенціальні внутрішньосистемні завади від решти макромережі, однак частотні ресурси при цьому використовуються неефективно.

2. Розподіл загального спектру (SSA) - FAP вживає той же частоти, що і макромережі.

3. Відкрита група користувачів (OSG) - всі MSs мають доступ до обслуговування FAP. Для мереж фемтостільників відкритого доступу можливо приєднання будь-якого з mMS. З іншого боку, конкретний mMS, який приєднується, обмежується певною групою. Таким чином, конкретна мережа фемтостільників може отримати суттєві завади від приєднання mMS знаходиться в суміщеному каналі, оскільки допуск до мережі по основному каналу доступу йому надано не буде.

4. Закрита абонентська група (CSG) - FAP доступний лише для локальної групи користувачів, що знаходяться всередині приміщення, у відповідно до встановленого списку доступу.

Проведемо моделювання даних режимів у наступному розділі.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖІ 4G З ФЕМТОСТІЛЬНИКАМИ

### 4.1 Сценарії моделювання фемтостільників у мережі 4G

Процес моделювання фемтостільників у проводиться поетапно.

1. Вибирається міське середовище і виконується картографування місцевості (вулиці / приміщення).

2. Визначаються конкретні параметри проекту у вигляді процентного розподілу користувачів стільникового зв'язку за категоріями. Проводиться розташування користувачів в приміщенні відповідно до заданого процентним співвідношенням.

3. Проводиться розташування користувачів фемтостільникас виділенням трьох областей на карті:

- центральний радіус – радіус, близький до BS (близько 150 м);
- межа осередку – кільце навколо центрального радіусу (150 - 200 м);
- поза області – все інше.

Розташування фемтостільника проводиться рівномірно звичайним порядком

4. Розраховується просторове загасання відповідно до моделі для приміщень і вулиці.

Наступні кроки пов'язані тільки з користувачами, розташованими в центрі обраної пікосоти.

5. Будується карта індикатора потужності сигналу (RSSI), що показує потужність сигналу кожного MS в залежності від положення щодо BS (прямий шлях), розрахована відповідно до карти приміщення / вулиці і обраною моделлю розгортання.

6. Розраховується пропускна здатність каналу для різних конфігурацій мережі. Для кожної конфігурації мережі виробляються окремі розрахунки. Дослідження проводяться для чотирьох конфігурацій: CSG SSA, CSG, DSA, OSG SSA, OSG DSA.

7. Перевірити базовий сценарій мереж, що включає використання пікосоти без розгортання фемтостільника. При розподілі пропускної здатності

користувачів, 50% з яких перебували в приміщенні, лише у 13% спостерігається пропускна здатність каналу вище 0,4 Мбіт / с (рис. 4.1).

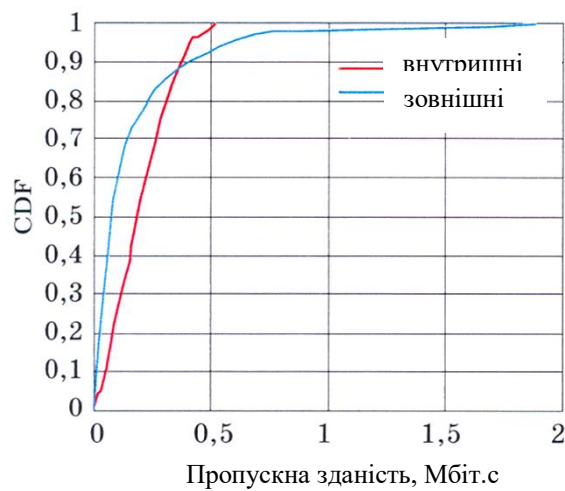


Рисунок 4.1 – Розподіл пропускної здатності користувачів в мережах без фемтостільників

8. Далі досліджуємо впливу розміщення FAP в мережі. Для цього слід розглядати два відмінних підходу розгортання FAP (CSG і OSG):

а) негативний сценарій, де 75% центральних і 25% граничних користувачів визначені як фемтопользователі;

б) позитивний сценарій, де 10% центральних і 80% граничних користувачів - фемтокористувач.

В результаті розрахунків можливі варіанти (рис.4.3):

– кращим варіантом (позитивним сценарієм), при якому менша кількість користувачів (FAP) розташоване близько до BS, потужність сигналу відносно висока, а більшу кількість знаходиться на кордонах сот, де потужність сигналу набагато менше в зв'язку з загасанням його в каналі, – все це відбувається при видаленні від центру стільники;

– гіршим варіантом (негативним сценарієм), при якому більша кількість FAP розташоване поруч з радіусом BS, де потужність сигналу BS висока, а одночасно велику кількість FAP викликає вкрай високі і небажані завади. З іншого боку, на кордонах сот, де очікувалося поліпшення сигналу FAP, ми отримали протилежний результат при іспользова–нні меншої кількості FAP.

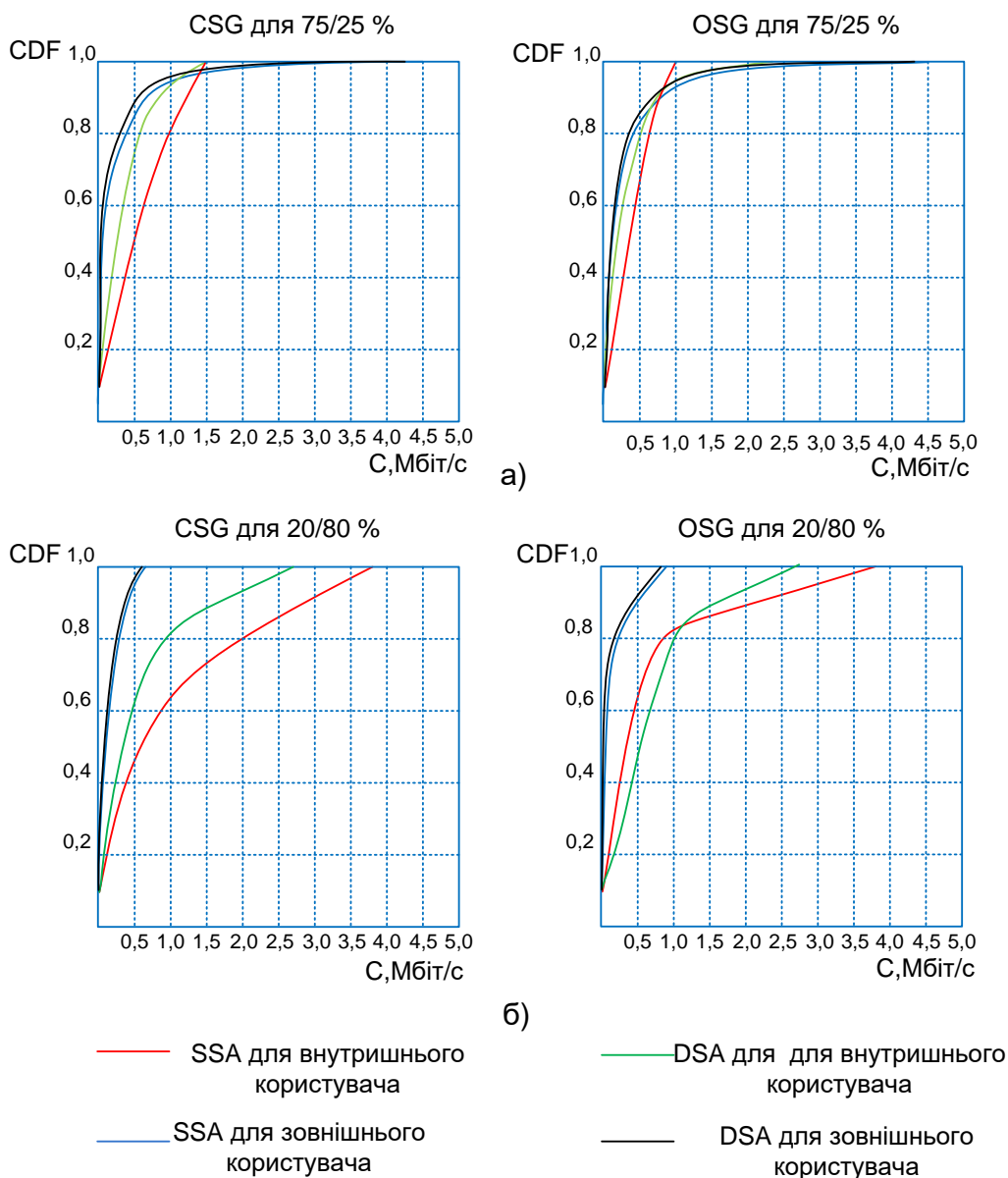


Рисунок 4.3 - Пропускна здатність при негативному (а) і позитивному (б) сценарії для чотирьох користувачів в приміщенні (зліва) і на вулиці (праворуч)

Сценарії складаються з параметрів (відсотків FAP), кожен з яких може набувати наступних значень:

- в приміщенні - 25%, 50%, 75%;
- в центрі, на кордоні, за радіусом - 25%, 50%, 75%, 100%.

На рисунку 4.2 представлена модель рівномірної густини розподілення FAP.

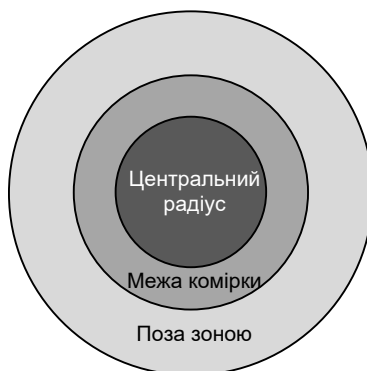


Рисунок 4.2 – Модель рівномірної густини розподілення FAP.

Усього є 192 різних сценарію (таблиця 4.1) для кожного підходу (CSG / OSG), тому були взяті середні результати для 10 різних експериментів в кожному сценарії. Таким чином було проведено 1920 експериментів для кожного стану навантаження мережі - щільною і розрядженою. Всього, таким чином, було проведено 3840 експериментів.

Таблиця 4.1 – Сценарії моделювання

Користувачі в приміщенні, %	FAP, %		
	в центрі	на межі	поза зоною
25	25	25	25
25	25	25	50
25	25	25	75
25	25	25	100
25	25	50	25
...			
75	25	25	25
...			
75	100	100	100

#### 4.2 Рекомендації щодо розподілу фемтостільників

Можна вказати на ситуацію, що складається при різному розташуванні FAP (рис.4.4).

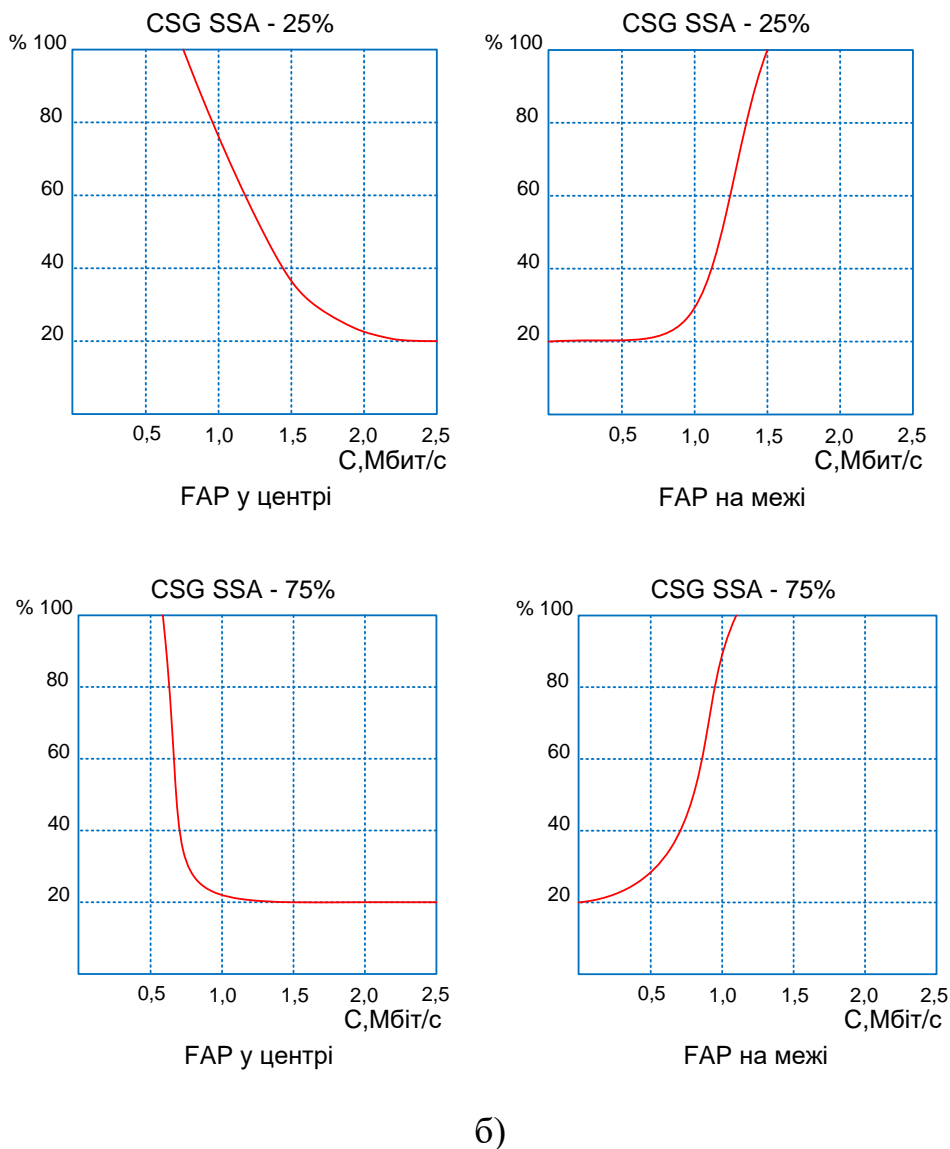


Рисунок 4.4 – Відсоток користувачів і пропускна здатність при 25% -м (а) і 75% -м (б) розгортанні для CSG SSA

З аналізу рис.4.4 видно, що збільшення відсотка користувачів у приміщенні в піко-/мікростільниках призводить у загальному до зменшення пропускної здатності каналу (від 0,8-1,3 до 0,51 Мбіт/с) внаслідок загасання сигналу при проникненні через стіну, яка сильно знижує його потужність.

Та ж тенденція спостерігається для користувачів, що знаходяться на кордоні (FAP на кордонах). Очевидно, користувачі в приміщенні відчувають незручність від загасання сигналу при проникненні через стіну, яка сильно знижує його потужність і пропускну здатність. Тому для більшого числа користувачів в

приміщенні характерні нижчі середні показники пропускної здатності каналу. Така ж ситуація спостерігається для OSG SSA (рис.4.5).

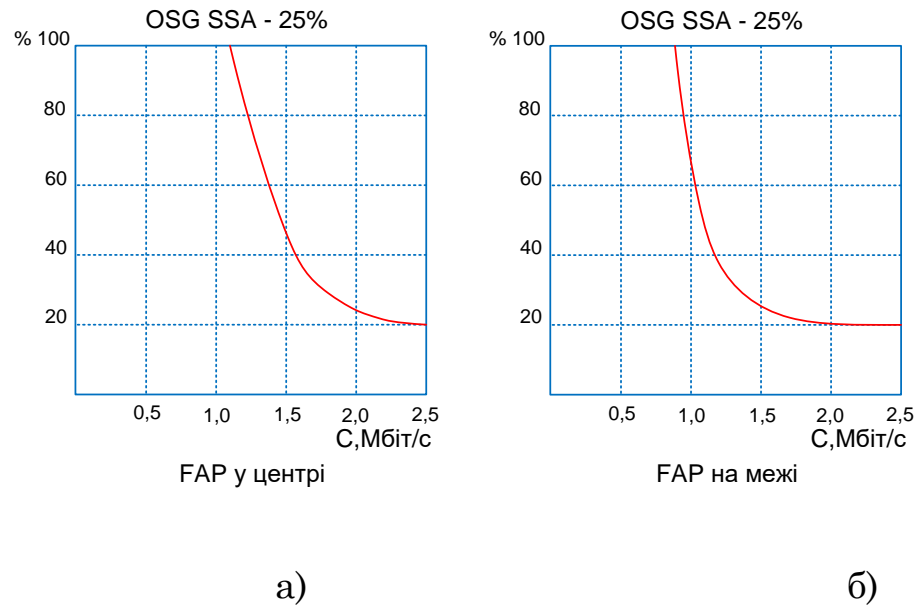


Рисунок 4.5 – Відсоток користувачів і пропускна здатність при OSG SSA

На рис.4.6, а і б представлені результати для CSG DSA, що показують ту ж ситуацію, що і для користувачів у центрі стільників. Різниця з'являється лише для користувачів на кордоні (рис.4.6, в) – тут тенденція менш помітна.

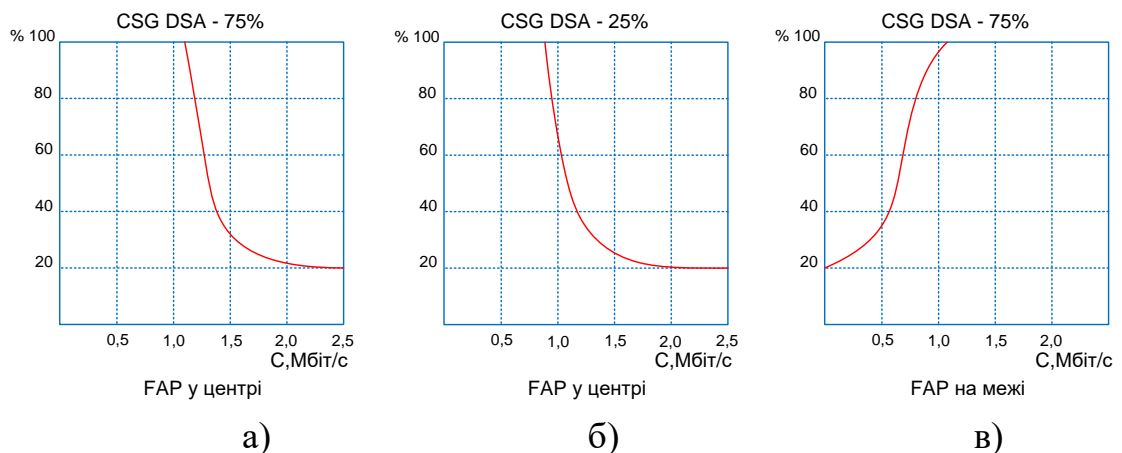


Рисунок 4.6 – Відсоток користувачів і пропускна здатність при CSG DSA для 75% (а) і 25% (б) користувачів в центрі і для 75% (в) на кордоні

Більш високий відсоток FAP в центрі піко / мікростільників призводить до меншої середньої пропускної здатності. Зворотне спостерігається при FAP на кордонах. Причина очевидна - мобільні користувачі в близькості від центральної mBS одержують відносно потужний сигнал, тому тут немає необхідності розміщувати фемтостільники. Включення FAP в центр мікростільники призведе до збільшення шумів і завад, а також до зниження потужності сигналу. З іншого боку, на кордонах сот сигнал стає слабкішим, і тому саме в цій області розумно розміщувати фемтостільники. Розгортання більшої кількості FAP на кордонах призведе до помітного збільшення середньої пропускної здатності каналу для кожного користувача.

Аналогічна ситуація спостерігається для OSG SSA і CSG DSA (рис.4.7).

Різниця виявляється лише для користувачів на кордоні - тут тенденція менш помітна. В даному випадку важливий вид конфігурації.

При SSA для всіх користувачів діапазон однаковий, т. Е. Завади виникають від усіх передавачів в радіусі користувача, в той час як для DSA завади менше через виділеного діапазону. Якщо детально проаналізувати формулу ємності, то видно, що на неї впливають кілька параметрів:  $I$  — інтерференція,  $\Delta F_w$  — пропускна здатність,  $R$  — відстань,  $RSSI$  — індикатор потужності одержуваного сигналу. При SSA незалежно від того, чи є користувач фемто- або пікопользователем, інтерференція, відстань і пропускна здатність залишаються колишніми.

Це відбувається через те, що використовується один діапазон. В даному випадку змінюється лише параметр  $RSSI$ , коли фемто- або піко- користувач знаходиться на потрібному місці щодо антени BS. Зауважимо, що чим більше фемтопользователей на кордоні, тим вище загальна потужність сигналу.

При DSA ситуація складніша. Коли відстань залишається колишнім, пропускна здатність і інтерференція змінюються при різних відсотках розгортання фемтостільників. Це відбувається через виділеного діапазону. При зростанні розгортання FAP інтерференція користувачів пікосоти падає, а для користувачів фемтостільників - зростає, і навпаки. На додаток варто відзначити, що збільшення FAP зменшує пропускну здатність для користувачів фемтостільників і збільшує для користувачів пікосоти. При DSA спостерігається

взаємозалежність між трьома параметрами —  $I$ ,  $\Delta F_w$  і  $RSSI$ , що пов'язано з несуттєвою їх різницею (рис.4.7).

З розглянутих графіків слідує, що включення FAP в центр мікростільниці призведе до збільшення шумів і завад, а також до зниження потужності сигналу. Доцільне розгортання більшої кількості FAP на кордонах, що призведе до помітного збільшення середньої пропускної здатності каналу для кожного користувача на 20%.

Для знаходження оптимальної конфігурації розгортання може бути використаний метод прямого перебору точок установки, що значно ускладнює вирішення.

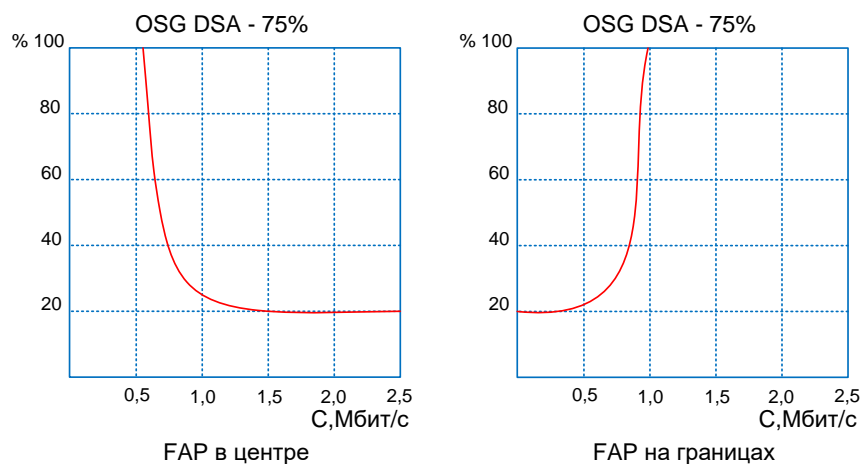


Рисунок 4.7 – Відсоток користувачів і пропускна здатність при OSG DSA: FAP в центрі (а) і на кордоні (б)

Аналіз динаміки стану мобільних мереж і досвід практичного використання фемтостільників показав ряд властивостей таких мереж:

1) незалежно від відсотка розгортання фемтостільників відбувається збільшення пропускної здатності;

2) у разі розташування меншої кількості користувачів абонентської ємності стільниці у відносній близькості від БС (FAP) отримують від БС високу потужність сигналу, а більшу кількість користувачів, при віддаленні від центру стільниці і які можуть знаходитися на кордонах стільник, отримують меншу потужність у зв'язку з її ослабленням в каналі в цілому означає позитивний сценарій з точки зору підвищення пропускної здатності;

3) розташування більшого числа FAP у центральному радіусі БС, де потужність сигналу BS висока, викликає вкрай високі і небажані завади. На кордонах стільників, при використанні меншої кількості FAP, передбачається поліпшення сигналу FAP, проте цього не відбувається.

#### 4.3 Моделі пропускної здатності фемтостільника за умов поширення радіохвиль у міському середовищі

Щоб проаналізувати потенційну пропускну здатність каналу користувачів мобільних мереж з інтегрованими в них фемтостільниками, в цьому розділі представлені рівняння Шеннона, що враховують різні види FAPs, доступні конфігурації (CSG, OSG) і розподіл каналів (DSA, SSA).

Зробимо наступні припущення для моделі пропускної здатності каналу:

1) загальний спектр  $B_t$  задається для FAP і MBS відповідно до розглянутої конфігурації (DSA, SSA, CSG або OSG);

2) всі користувачі отримують однакову пропускну здатність, яка задається згідно з максимально можливим попитом на обслуговування в мережі, тобто кожен MS отримує еквівалентну частину  $B_t$ ;

3) всі FAPs і MBSs передають одночасно для всіх активних користувачів;

4) об'єднані моделі поширення з роботи [17] і даної статті для випадків «з вулиці - в приміщення», «з приміщення - на вулицю», «з приміщення - в приміщення» використані для розрахунку середньої потужності сигналу з урахуванням сильного і слабого загасань і додаткових характеристик поширення, таких як багатократне розсіяння, дифракція і поглинання.

##### 1. Загальне значення спектра для закритої абонентської групи

В цьому випадку смуга пропускання загального спектра ділиться між мережею FAPs і MBSs; ємність для користувача MS, для покриття FAP може бути представлена наступним чином:

$$C_{SSA\_CSG\_indoor\_i} = B_{tN} \log_2 \left( 1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tN} + \sum_{j=1, j \neq i}^J I_j + \sum_{l=1}^L I_l} \right), \quad (4.1)$$

де  $B_{tN} = B_t / N$  - смуга пропускання, приведена до числа користувачів  $N$ , що обслуговуються FAP;  $S_{F_i}$  - потужність сигналу FAP в місці, де знаходиться MS-користувач  $i_F$ , що обслуговуються FAP з  $i_F \in (1:N)$ ;  $kTB_{tN}$  - тепловий шум, де  $k$  - коефіцієнт Больцмана, а  $T$  - температура, К;  $I_j$  - величина завад від сусідніх FAPs з номерами  $j \in (1:J)$ , де  $J$  - загальна кількість FAPs;  $I_l$  - величина завад MBSs з номерами  $l \in (1:L)$ , де  $L$  - загальна кількість MBSs.

Відзначимо, що користувачі MS, які перебували в приміщеннях, вважаються зареєстрованими в CSG, в іншому випадку вони не можуть обслуговуватися FAP.

Ємність для MS-користувача на вулиці, може бути розрахована наступним чином:

$$C_{SSA\_CSG\_outdoor\_i} = B_{tP} \log_2 \left( 1 + \frac{S_{M_i}}{kTB_{tP} + \sum_{j=1}^J I_j + \sum_{l=1, l \neq i}^L I_l} \right), \quad (4.2)$$

де  $B_{tP} = B_t / P$  - смуга пропускання, приведена до числа користувачів  $P$ , що обслуговуються MBS;  $S_{M_i}$  - потужність сигналу MBS в місці, де знаходиться MS-користувач  $i_M$ , що обслуговується FAP з  $i_M \in (1:P)$ .

## 2. Загальне значення спектра для відкритої абонентської групи

Головна відмінність в даному випадку полягає в тому, що MS-користувачі, які знаходяться на вулиці, потенційно можуть обслуговуватися FAP. Таким чином, для MS-користувачів iFO, які обслуговуються FAP і знаходяться на вулиці, пропускну здатність каналу зв'язку можна записати у вигляді

$$C_{SSA\_OSG\_outdoor\_iF} = B_{tN} \log_2 \left( 1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tP} + \sum_{j=1}^J I_j + \sum_{l=1, l \neq i}^L I_l} \right), \quad (4.3)$$

Відзначимо, що рішення по обслуговуванню користувача MS на вулиці за допомогою FAP або MBS було прийнято шляхом простого перемикавання каналів, тобто передавач (FAP або MBS) з найбільшою потужністю сигналу обслуговує MS.

### 3. Значення виділеного спектра для закритої абонентської групи.

У разі вибору виділеного спектра в мережі фемтостільників не спостерігається взаємних завад між MBS і FAP, проте загальна смуга пропускання ділиться між мережами FAP і MBS будь-яким способом (див. Розд. «Результати чисельних розрахунків»). Очевидно, що розподіл може бути несиметричним, тому ємність каналу для користувача MS  $i_F$  в мережі FAP може бути представлена наступним чином:

$$C_{DSA\_CSG\_indoor\_i} = B_{tNd} \log_2 \left( 1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tN} + \sum_{j=1, j \neq i}^J I_j} \right), \quad (4.4)$$

де  $B_{tNd} = B_t \square FNR / N$ ;  $FNR$  - співвідношення мережі FAP, що визначає частину від загального спектра  $B_t$ , розподіленої для мережі FAP.

Ємність для MS-користувача  $i_M$  на вулиці, який обслуговується MBS, розраховується наступним чином:

$$C_{DSA\_CSG\_outdoor\_i} = B_{tPd} \log_2 \left( 1 + \frac{S_{M_i}}{kTB_{tPd} + \sum_{l=1, l \neq i}^L I_l} \right), \quad (4.5)$$

де  $B_{tPd} = B_t \square FNR / P$ .

#### 4. Значення виділеного спектра для відкритої абонентської групи.

При порівнянні OSG з CSG ємність для MS-користувача на вулиці, яка і без того покрита FAP (велика потужність сигналу), може бути розрахована наступним чином:

$$C_{DSA\_OSG\_outdoor\_i\_F} = B_{tNd} \log_2 \left( 1 + \frac{S_{F_i}}{kTB_{tNd} + \sum_{j=1}^J I_j} \right), \quad (4.6)$$

де  $B_{tNd} = B_t \square FNR / N$ .

#### 5. Просторове заповнення.

Для вирішення задачі оптимального розподілу ресурсів в певній галузі сервісу пропонується підхід просторового заповнення [14]. Розглянемо  $B_t = \{b_m^l, m = 1, \dots, M\}$  - набір випадково розподілених фемтостанцій в  $l$ -й міській мережі. Передбачається, що кожна фемтостанція має своє обмеження потужності  $\bar{P}_m^l, \forall m = 1, \dots, M$ , а загальна потужність всієї системи фемтостанцій,

$$P_{total}^l = \sum_{m=1}^M \bar{P}_m^l$$

доступна в рамках макроелементу, дорівнює

Тут розглядається проблема оптимального розподілу потужності серед безладно діючих фемтостанцій в  $B_t$ , в присутності передачі  $\bar{P}_l$  макростанції, яка максимізує загальну (мережеву) пропускну здатність каналу. Слід врахувати, що при роботі в географічній близькості фемтостанції створюють один одному завади. Ці завади і шум від  $m$ -ї фемтостанції можна записати в такий спосіб:

$$I_m^l = \bar{R}_m^l + \sum_{m' \neq m, m'=1}^M R_{m'm}^l + n_m^l, \quad (4.7)$$

де  $R_{m'm}^l$ - отримана потужність від передачі  $i$ -й макростанції і  $m'$ -й фемтостанції відповідно;  $\{n_m^l, m = 1, \dots, M\}$ - шум приймача. Вже згадана тут

проблема може бути змодельована як паралельний канал завад, в якому завади кожної передавальної фемтостанції створює інша фемтостанція в рамках обраної мережі. Вже згадана проблема оптимізації може бути сформульована таким чином:

$$\max_{P_l} \left\{ \sum_m^M C_m^l(p_l, \bar{P}_l) \right\},$$

$$\sum_{m=1}^M P_m^l \leq P_{total}^l, \quad \bar{P}_m^l \geq P_m^l \geq 0, \forall m, \quad (4.8)$$

де  $P_l = [P_1^l, \dots, P_M^l]$  - потужність в стратегії розміщення;  $C_m^l(p_l, \bar{P}_l)$  - ємність каналу в рамках  $l$ -ого фемтостільника. Проблема оптимізації (4.8) складна, тому для її вирішення пропонується ітераційний оптимізаційний підхід просторового заповнення, де існує величезне провідове зустрічне включення між фемтостільниками і центральним вузлом [14].

Для ініціалізації пропонованого підходу будемо вважати, що всі фемтостанції передають дані з деяким фіксованим заданим значенням потужності (підходить для всіх станцій при розгляді різних виробників фемтостанцій).

Протягом першого заданого часового інтервалу кожна фемтостанція отримує канал згідно з умовою (15). Слід звернути увагу на те, що процес цей може виконуватися синхронно або асинхронно. На другому етапі отримана повна інформація про стан каналу відправляється в центральний вузол за допомогою провідового зустрічного включення. На третьому етапі центральний вузол виконує просторове заповнення і приймає рішення про цільову потужність  $v_l$ , яка оптимізує загальну ємність мережі. Нарешті, на четвертому етапі ця цільова потужність  $v_l$  подається на кожен фемтостільник мережі, і кожна фемтостанція регулює свою потужність відповідно до нижченаведеної умови:

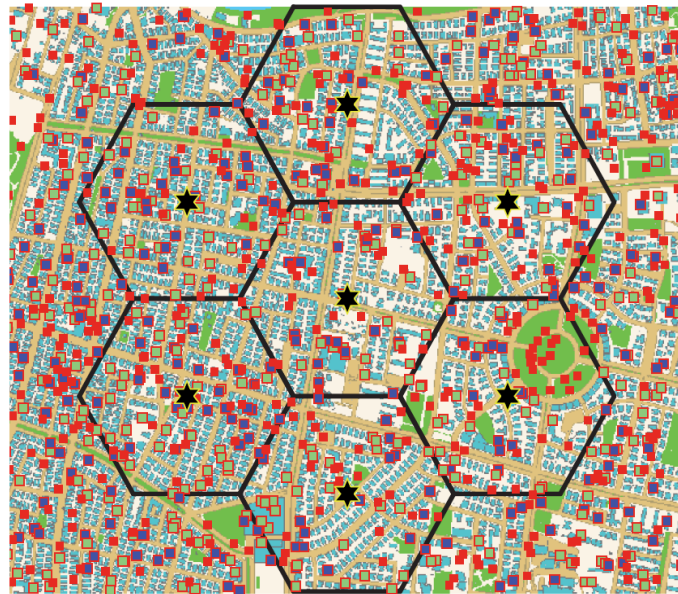
$$P_m^l = \max \left\{ (v_l - I_m^l)^+, \bar{P}_m^l \right\}, \forall m = 1, \dots, M, \quad (4.9)$$

де  $(\cdot)^+$  - позитивна частина аргументу. Процес просторового розподілу виконує цикл з чотирьох стадій пропонованого підходу до тих пір, поки не буде досягнуто зближення просторового розподілу потужності. Звертаємо увагу на те, що пропонований метод розподілу потужності є субоптимальним через наближене значення потужності до значення оптимального рішення, отриманого за допомогою підходу ітераційного заповнення, а також у зв'язку з тим, що для оптимального розподілу потужності може знадобитися передана потужність  $(v_l - I_m^l)^+$  більша, ніж максимально доступна потужність  $\bar{P}_m^l$ .

В умовах щільної міської забудови з великою кількістю фемтомереж пропонований підхід відповідає оптимальній пропускній здатності мережі. Крім того, звертаємо увагу на обчислювальну складність пропонованого підходу розподілу потужності. Відзначимо, що пропонована процедура розподілу потужності повинна виконуватися кожного разу, коли до мережі підключається нова фемтостанція, або фемтостанція відключається, або відбуваються будь-які зміни умов навколишнього середовища.

Проведено чисельне моделювання для різних типів мереж, коли існує три типи стандартних FAPs з максимальною еквівалентною ізотропно-випромінюваною потужністю (ЕІВП) зі значеннями 10, 15, 21 дБм. Один і той же аналіз проводиться після здійснення алгоритму оптимізації потужності з використанням підходу просторового заповнення.

Для моделювання реального розподілу користувачів в міському середовищі була створена наступна модель (подібна методу Монте-Карло): зразком міської обстановки (рис. 4.8), в якому рівномірно розподілені 7 стільників.







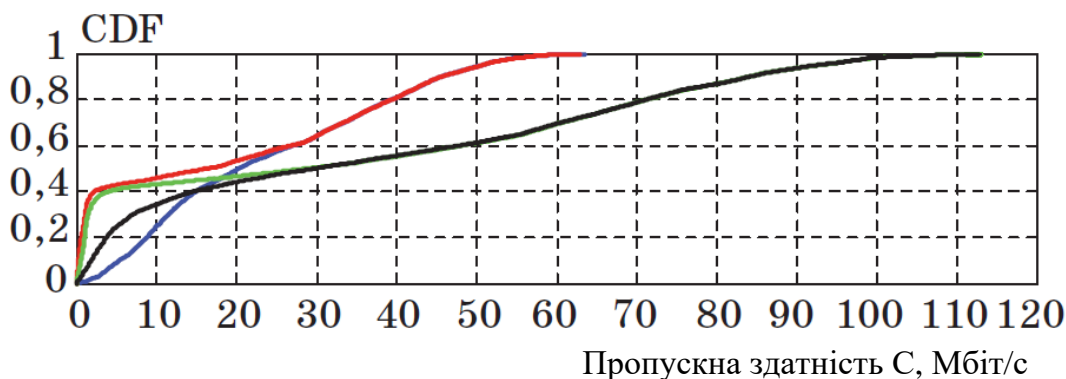
-  Базова станція макрокомірки
-  Внутрішній користувач
-  Зовнішній користувач
-  Користувач фемтостільника

Рисунок 4.8 – Міська обстановка

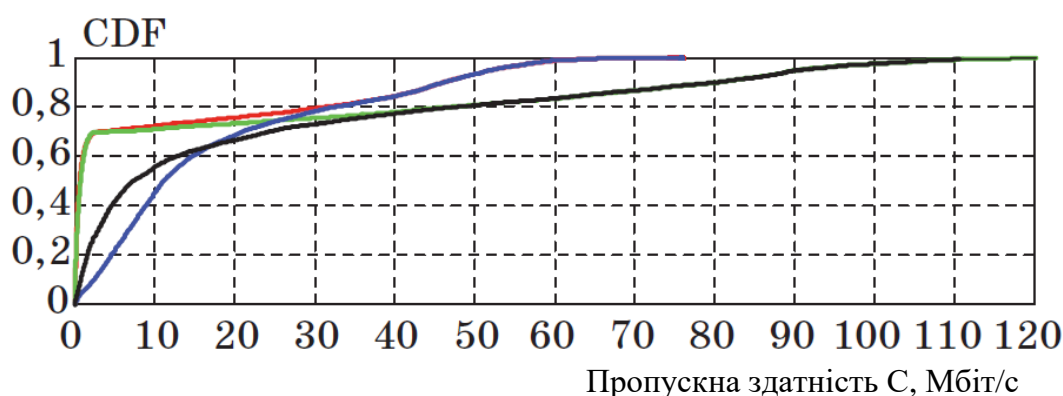
MS-користувачі були рівноімовірно розподілені по стільниках в зазначеному районі, причому частина з них була випадковим чином розподілена в приміщеннях, і були змодельовані різні відсотки викликів з приміщень - 20, 40, 60%, а FAPs були рівноімовірно розподілені між користувачами в приміщеннях.

Моделювалися ситуації з різними процентними співвідношеннями MS-користувачів в приміщеннях, які мають FAPs, а саме 50, 70, 100%. Моделювалося різне розташування FAPs між MS-користувачами: рівномірне, 80% зосереджено на границі стільника, і 20% - в центрі, і навпаки. Були змодельовані всі види конфігурацій FAPs, що описані вище для моделей 1 - 4. Всі дослідження проводилися в межах семи центрально розташованих осередків з передбачуваним повторним використанням частот. Щільність користувачів становила 480 люд./км<sup>2</sup>.

Приблизно 40% користувачів мають обмежену пропускну здатність (менше 2 Мбіт/с); інші 60% користувачів (в приміщенні) мають більш високу пропускну здатність в залежності від їх відстані до FAPs (рис. 4.9, а).



а)



б)

Рисунок 4.9 – Імовірність пропускної здатності у 40% абонентів поза будівлями і 60% всередині приміщень при ЕІВП = 21 дБм; проникнення FAP = 100% (а) і 50% (б)

Чітко видно (рис. 4.9, а і б), що у випадку з OSG MS-користувачі на вулиці мають більш високу пропускну здатність, ніж у випадку з CSG. Крім того, порівнюючи загальну і виділену OSG, слід зазначити, що для користувачів на вулиці пропускна здатність буде вище при виділеній конфігурації, так як при загальній конфігурації спостерігаються взаємні завади між FAPs і MBS. Однак найбільша пропускна здатність системи для OSG спостерігається у випадку з загальним спектром OSG. Ці висновки не очевидні в рівняннях (10) і (13) в зв'язку з невизначеністю того, істотніше чи співвідношення  $B_{lN} > B_{lNd}$ , ніж сума  $\sum_{l=1}^L I_l$  у виразі  $\log(\cdot)$ . Однак з рис. 4.9, а і б випливає, що якщо  $\sim B_{lN}$  більше  $B_{lNd}$  в 2 рази і максимально доступна пропускна здатність каналу становить 120 Мбіт/с для

загального випадку проти 60 Мбіт/с для виділеного спектра, то вплив  $B_{tN} > B_{tNd}$  істотний. Різні ступені проникнення FAPs по-різному впливають на продуктивність системи в цілому в плані пропускної здатності каналу (рис. 4.10, а і б). Найцікавіше дослідження впливу на показники продуктивності додаткових завад від FAP.

У разі SSA в CSG (рис. 4.11, а) слід зазначити, що для користувачів на вулиці продуктивність зворотно пропорційна числу FAPs (модель 1) через завади FAP, вироблених нею від користувачів на вулиці, користувачам з дозволеним доступом.

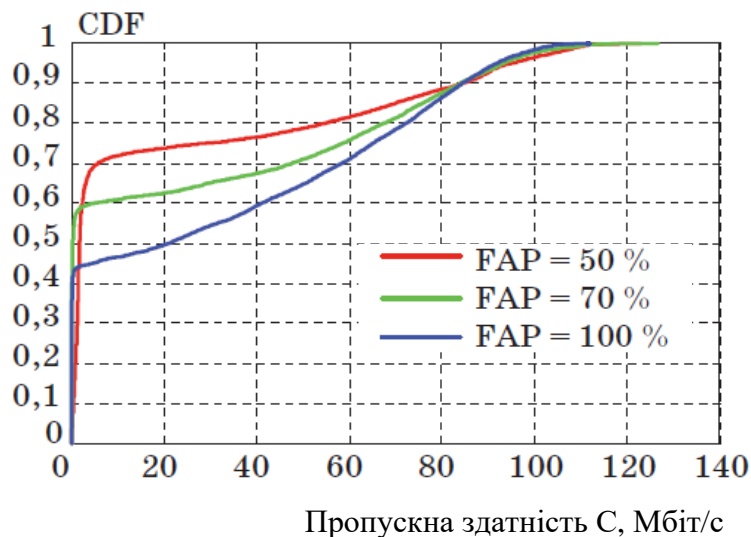
Додаткові завади по прямо пропорційної пропускної здатності каналу до тих пір, поки завади FAP не стають істотними для користувачів FAP (модель 2). Для загального CSG 20% проникнення в приміщення завжди перевершують 40 і 60% проникнення в приміщення, тобто модель 2 проявляється недостатньо.

Додаткові завади з'являються у користувачів в приміщенні, коли один користувач FAP створює завади для інших користувачів FAP (модель 2).

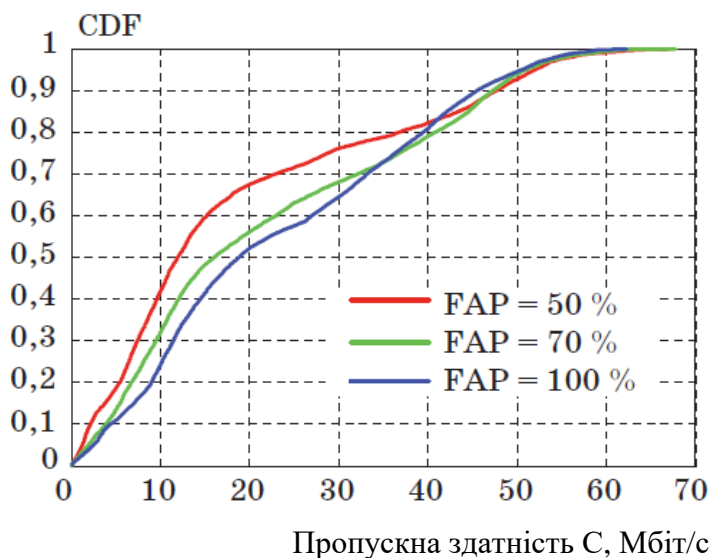
Цей феномен відображений на рис. 4.10, а в місці перетину червоної та синьої ліній при 80 Мбіт/с.

У разі DSA в OSG (див. рис. 4.10, б) FAP не створює завади для користувачів на вулиці, тобто феномен А не спостерігається. Однак феномен Б спостерігається - це перетин червоною і синьою ліній при 40 Мбіт/с.

Проникнення для різних користувачів в приміщення і його вплив на продуктивність системи в цілому оцінюються в даному прикладі для концепції CSG (рис. 4.11, а і б).



а)



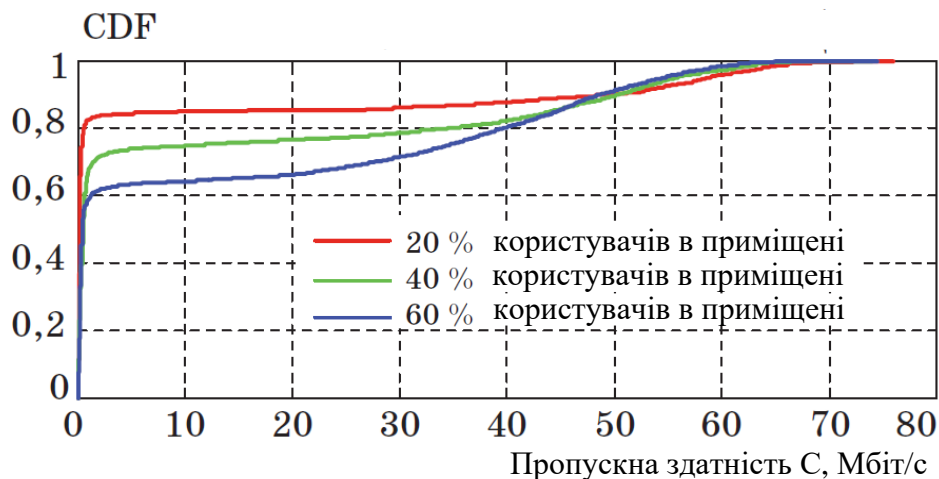
б)

Рисунок 4.10 – Імовірність пропускної здатності у 60% абонентів всередині приміщень при ЕІВП =15 дБм: а - для закритої абонентської групи; б - для відкритої абонентської групи

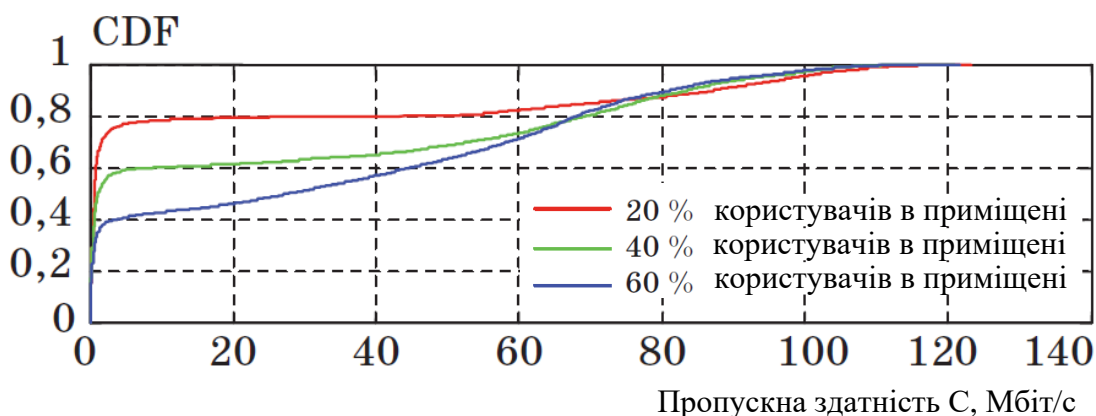
На рис. 4.11, а і б змодельовано проникнення в приміщення 20, 40 і 60% разом з проникненням FAP в 70 і 100%. Змодельована ЕІПМ 21 дБм. Очевидно, що для будь-яких конкретних умов (рівень проникнення для користувачів в приміщення і проникнення FAP) різні варіанти розташування фемтостільників перевершують інші варіанти. Наприклад, для виділених CSG рівень проникнення 20% на вулиці

Були реалізовані дві моделі для 60% проникнення в приміщення і для 100% проникнення FAP в загальний канал CSG (рис. 4.12). Очевидно, що для

користувачів на вулиці (в області CDF до 0,4) спостерігається більш висока загальна пропускна здатність, а для користувачів у приміщенні (в цій конфігурації всі вони - користувачі фемтостільника) ми можемо спостерігати, що загальна пропускна здатність менше, ніж без просторового заповнення.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Імовірність пропускної здатності при  $E_{\text{ВП}} = 21$  дБм: а - для закритої абонентської групи, проникнення  $FAP = 70\%$ ; б - для відкритої абонентської групи, проникнення  $FAP = 100\%$

Найбільш важливим результатом є те, що при розгляді сумарної пропускної здатності для всіх користувачів із застосуванням методу просторового заповнення можна домогтися більшої загальної пропускної здатності каналу.

У разі OSG MS-користувачі на вулиці отримують більш високу пропускну здатність, ніж в разі CSG. Порівнюючи загальну і виділену OSG, відзначимо, що для користувача на вулиці пропускна здатність буде вище при виділеній

конфігурації. Обчислення із застосуванням просторового заповнення і без нього дали схожі результати, але підхід просторового заповнення дає кращу пропускну здатність каналу для макроз'єднань на вулиці і пікоз'єднань в приміщенні.

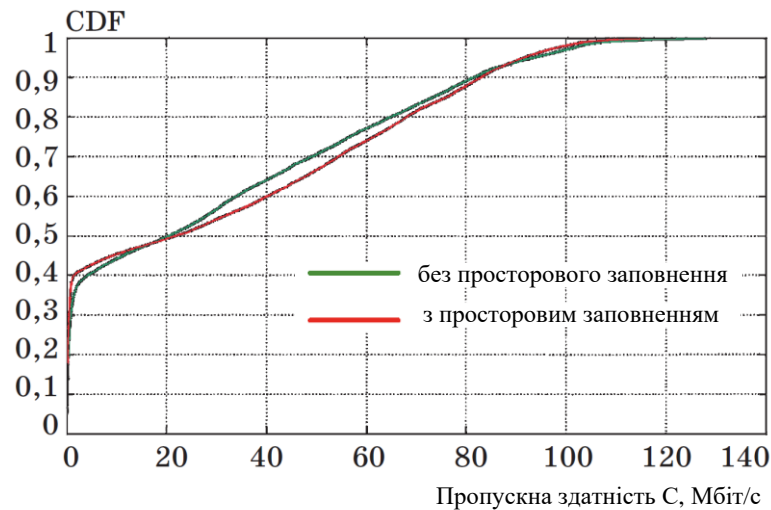


Рисунок 4.12 – Імовірність пропускну здатності для 60 і 100% проникнення FAP в загальний канал CSC

Загальна пропускна здатність збільшується в разі застосування EAP-розширення. У той же час спостерігається і збільшення завад між користувачами.

Підсумовуючі, необхідно врахувати наступні зауваження:

1. Посилення загального ставлення  $S/I$  мережі не завжди призводить до збільшення пропускну здатності, особливо за умови оптимального (або достатнього) розміщення FAP.

2. Виявити тенденцію поведінки мережі в залежності від процентного розгортання FAP. Менша кількість користувачів у центрі не повинна використовувати FAP, проте для користувачів на кордонах розгортання FAP раціонально.

3. Відмічено, що вплив висоти будівель на пропускну здатність для користувачів та загальну ємність мереж. Більше високих будівель призводить до гіршого сценарію NLOS, що пов'язано зі збільшенням просторового загасання та зменшенням ємності. Використання фемтостільників в такий місцевості підвищує пропускну здатність не тільки для користувачів на кордонах, але і для тих користувачів, хто знаходиться в центрі.

## 5 МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ 4G З ВИКОРИСТАННЯМ ФЕМТОСТІЛЬНИКІВ НА ОСНОВІ ОПТИМАЛЬНИХ МЕТОДІВ УПАКОВКИ ОБ'ЄКТІВ

При установці фемтостільників виникають різні ситуації, пов'язані з потребою поліпшення якості обслуговування споживачів. У попередньому підрозділі були розглянуті випадки використання фемтостільників для полегшення доступу на кордонах зони обслуговування БС. Часто виникає необхідність установки відокремленої точки доступу в важкодоступному місці, де електромагнітна хвиля (ЕМВ) доходить сильно ослабленою: в переході, за перепорою, в будинку та ін. В той же час досить типовими є ситуації, коли виникає потреба розташування групи точок доступу, наприклад поблизу і всередині ділових центрів, об'єктів масового перебування народу, в багатоповерхових будинках та ін. Виникає необхідність лінійної установки, установки на площині або в тривимірному просторі зазначених точок доступу фемтостільників. Таким чином, виникає задача розміщення в зоні обслуговування БС точок доступу фемтостільників, як одиночних об'єктів, так і об'єктів, розташованих у лінію на площині або в структурі зони дії (ЗД) БС (рис.3.9).

Очевидно проектування розміщення одиночної ТД не викликає труднощів. Однак при проектуванні установки 2-х і більше ТД – потрібно те чи інше обґрунтування. В якості такого обґрунтування можуть бути: потреба максимально щільного покриття фемтостільників, мінімізації кількості фемтостільників, перерозподілу трафіку в різні періоди діяльності.

Таке завдання успішно вирішується при невеликій кількості фемтостільників 2-5 шляхом прямого перебору варіантів розміщення. Однак зі збільшенням їх кількості завдання розміщення стає – повним і пряме його рішення – проблематичним.

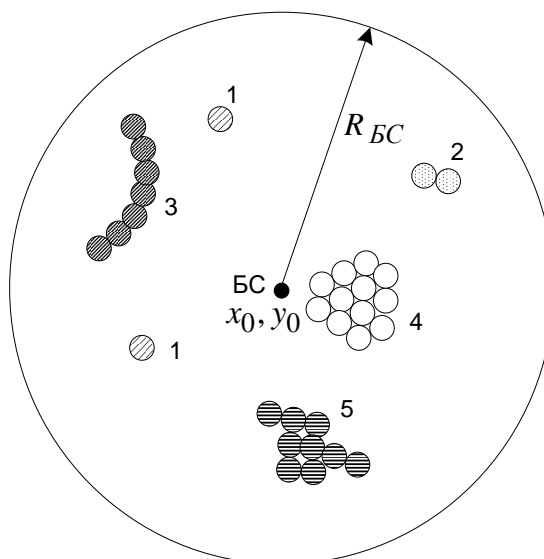


Рисунок 5.1 – Приклад розміщення фемтостільників в зоні обслуговування БС з координатами  $\{x_0, y_0\}$  і радіусом  $R_{BS}$ : 1- одиночне розташування; 2 - група з двох фемтостільників; 3 - лінійне розташування фемтостільників; 4 - компактна група; 5 - складна структура

Координати кожної  $i$ -ї точки доступу фемтостільників  $\{x_i, y_i\}$  або в 3-х мірному просторі  $\{x_i, y_i, z_i\}$ . При радіусі зони обслуговування фемтостільників  $R_{\phi}$ , координати її на площині

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 = R_{\phi i}^2, \quad (5.1)$$

в 3-х мірному просторі

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 = R_{\phi i}^2. \quad (5.2)$$

Зона обслуговування кожної фемтостільників залежить від навколишнього оточення, від наявності перевипромінювачів, завод, затемнень.

При плануванні зон обслуговування, їх структуру представляють у вигляді кіл або шестигранних стільників. У нашому випадку (3.5), (3.6) зона представляється колом або кулею. З огляду на великий розкид розрахункових рівнів поля ЕМВ всередині зони – форма апроксимуючої фігури може бути будь-якою аксіально симетричною: рівнобедрений багатокутник, квадрат, куб, куля та ін. При плануванні фемтостільників всередині будівлі більш адекватною є

геометрична фігура у вигляді куба – контур або обсяг приміщення, в якому розміщується група фемтостільників.

Контур або обсяг, в якому розміщується група фемтостільників можуть мати різну досить складну конфігурацію, що ускладнює вирішення задачі покриття.

Якщо уявити даний обсяг або площину вигляді контейнера, то виникає задача упаковки об'єктами (Фемтостільників) аксіально симетричними фігурами даного контейнера.

Є велика кількість наближених методів упаковки контейнерів об'єктами різної конфігурації:

- генетичні алгоритми оптимізації упаковки прямокутних об'єктів [9];
- послідовно - одиночного розміщення кіл різних радіусів [10];
- методи упаковки циліндрів на основі функцій Стояна [11];
- геометричній комбінаторики [12];
- алгебологічний метод [13];

З огляду на феноменологічний характер запропонованих методів, зіставлення їх ефективності представляється обмеженим. Можна організувати їх попарне порівняння за критеріями обчислювальної складності для одних і тих же умов, за критеріями повноти покриття та ін. Проте значний рівень невизначеності щодо розподілу поля ЕМВ навряд чи дозволить отримати достовірні результати.

Тому вибір того чи іншого методу визначається контекстом розв'язуваної задачі. Ми вибираємо метод одиночного приєднання на основі логічного вибору [13].

У цьому випадку точка об'єкта, найбільш віддалена від початку координат контейнера, матиме координати:

$$(x_{ij}^1 + w_i^1; x_{ij}^2 + w_i^2; \dots; x_{ij}^D + w_i^D). \quad (5.3)$$

Наприклад, положення прямокутного об'єкта в контейнері визначається координатами його лівого верхнього кута.

Необхідно розмістити всі об'єкти в заданому числі контейнерів при виконанні всіх умов коректного розміщення:

- 1) упаковані об'єкти не перекривають один одного, тобто

$$\forall j \in [1; N], \forall d \in [1; D], \forall i, \forall k \in [1; n], i \neq k, \quad (5.4)$$

$$(x_{ij}^d \geq x_{kj}^d + w_k^d) \vee (x_{kj}^d \geq x_{ij}^d + w_i^d).$$

2) упаковані об'єкти розміщуються в межах контейнерів, тобто

$$\forall j \in [1; N], \forall d \in [1; D], \forall i \in [1; n], \quad (5.5)$$

$$(x_{ij}^d \geq 0) \wedge (x_{ij}^d + w_i^d \leq W_j^d).$$

Процедура розміщення TD всередині контейнерів (зон обслуговування) зазвичай починається з прив'язки контейнера до системи координат і вказівки різних точок (вузлів), по відношенню до яких проводиться приєднання TD. Положення  $k$ -го вузла в  $D$ -вимірному контейнері описується вектором

$$X_k = \{x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^D\}. \quad (5.6)$$

При проектуванні фемтостільників на площині утворюється  $j$  контейнерів, всередині яких далі відбувається упаковка.

При розміщенні фемтостільників в будівлі відбувається поділ на  $i$  – рівнів, що відповідають поверховості, на кожному з яких формується свій контейнер  $x_i^d$ ,  $d \in D$ . Положення  $i$ -го контейнера щодо початку координат представимо як  $Q(x_i^d)$ .

При розміщенні TD в контейнері формуються нові рівні.

Наприклад, при приєднанні об'єкта з габаритними розмірами  $\{w^1, w^2, \dots, w^D\}$  до вузла з координатами  $\{x^1, x^2, \dots, x^D\}$  уздовж кожної осі  $\forall d \in [1; D]$  контейнера утворюється нові рівні  $X_k^d : Q(X_k^d) = x^d + w^d$ , причому  $\exists X_j^d : Q(X_j^d) > Q(X_k^d), Q(X_{j-1}^d) < Q(X_k^d)$  (рис.5.2).

Для визначення можливості приєднання об'єкта з габаритними розмірами  $\{w^1, w^2, \dots, w^D\}$  до вузла з координатами  $\{x^1, x^2, \dots, x^D\}$  визначається положення розміщення об'єкта щодо всіх раніше розміщених об'єктів, які перетинають хоча б один рівень з набору  $[X_{i1}^d, X_{i2}^d] \forall d \in [1; D]$ , де  $X_{i1}^d : Q(X_{i1}^d) = x^d$  і  $X_{i2}^d : Q(X_{i2}^d) \geq x^d + w^d$ ,  $Q(X_{i2}^d) < x^d + w^d$ .

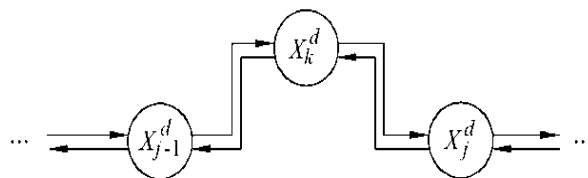


Рисунок 5.2 – Процес додавання нового рівня в двохзв'язному списку рівнів контейнера

На основі методу одиночного приєднання об'єктів і аналізу залишку вільного простору  $i$ -го контейнера побудуємо алгоритм пошуку і видалення вкладених потенційних контейнерів.

Наприклад, при приєднанні прямокутного об'єкта з габаритними розмірами  $w_1 \times w_2$  до розташованого в точці  $\{0;0\}$  вузла порожнього двовимірного контейнера з габаритними розмірами  $W_1 \times W_2$ , в кутах розміщеного об'єкта формуються нові вузли, що містять віртуальні об'єкти, що описуються векторами  $P_2 = \{W_1 - w_1; W_2\}$ ,  $P_3 = \{W_1 - w_1; W_2 - w_2\}$  і  $P_4 = \{W_1; W_2 - w_2\}$ .

Алгоритм розміщення заданої послідовності ортогональних об'єктів в одному контейнері при використанні моделі «віртуальні об'єкти» представлений у вигляді блок-схеми на рис.5.3.

Розглянемо процес ортогонального розміщення ТД  $i$  з габаритними розмірами  $\{w_i^1, w_i^2, \dots, w_i^D\}$  в точці  $\{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D\}$   $D$ -мірного ортогонального контейнера.

При перекритті розміщується ТД потенційним контейнером  $k$  з габаритними розмірами  $\{p_k^1; p_k^2; \dots; p_k^D\}$ , розташованим в точці  $\{x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^D\}$  контейнера, в просторі контейнера утворюються не більше  $2D$  нових потенційних контейнерів з двох наборів:

1) набір потенційних контейнерів з габаритними розмірами  $\{p_k^1; p_k^2; \dots; p_k^{d-1}; x_i^d - x_k^d; p_k^{d+1}; \dots; p_k^D\}$ , розташованих в точці  $\{x_k^1; x_k^2; \dots; x_k^d; \dots; x_k^D\}$  при виконанні умов перекриття  $x_i^d > x_k^d$  і  $x_i^d < x_k^d + p_k^d \quad \forall d \in [1; D]$ ;

2) набір потенційних контейнерів з габаритними розмірами  $\{p_k^1; p_k^2; \dots; p_k^{d-1}; x_k^d + p_k^d - x_i^d - w_i^d; p_k^{d+1}; \dots; p_k^D\}$  розмірами розташованих в точках  $\{x_k^1; x_k^2; \dots; x_k^{d-1}; x_i^d + w_i^d; x_i^{d+1}; \dots; x_k^D\}$  при виконанні умов перекриття  $x_i^d + w_i^d > x_k^d$  і  $x_i^d + w_i^d < x_k^d + p_k^d \quad \forall d \in [1; D]$ .

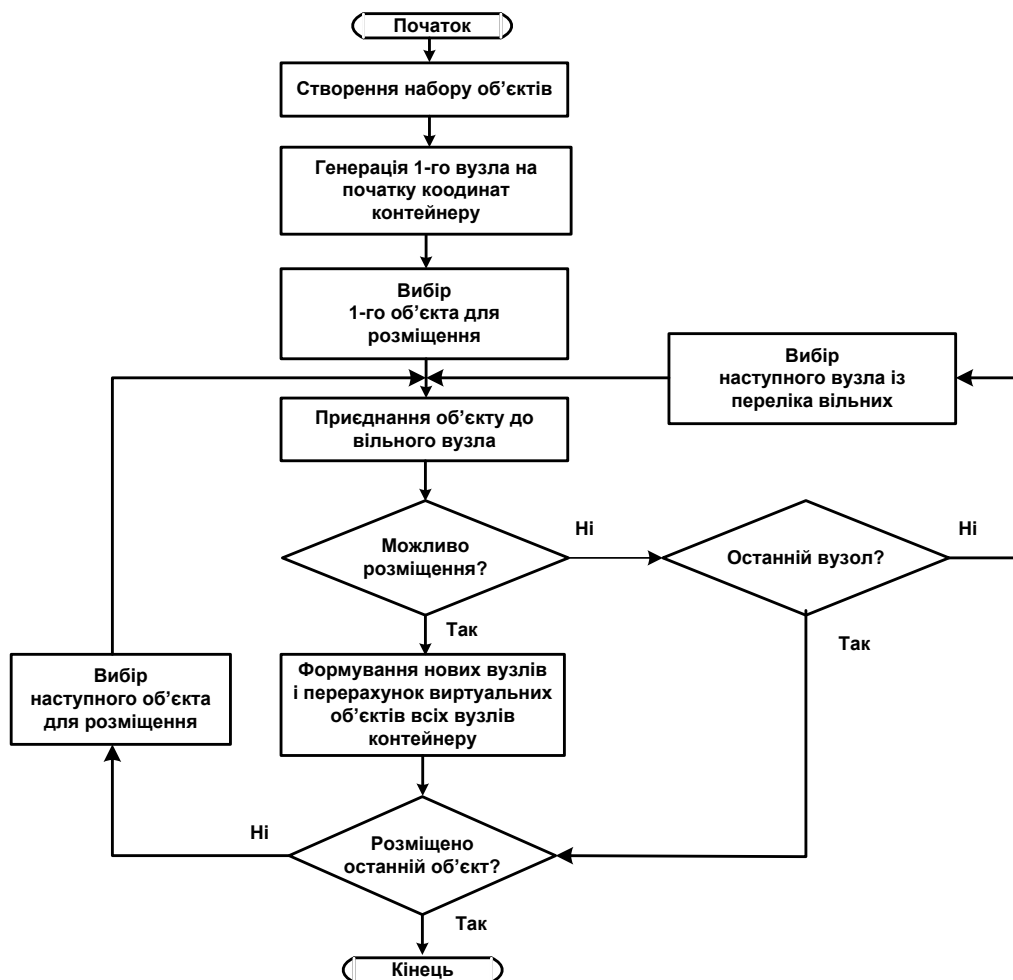


Рисунок 5.3 – Алгоритм розміщення ТД фемтостільників (модель «віртуальні об'єкти»)

Модель потенційних контейнерів описує весь вільний простір контейнера, що виключає ймовірність утворення неконтрольованих локальних пустот контейнера.

Як приклад розглянемо прямокутний двомірний контейнер з габаритними розмірами  $\{L;H\}$ , що містить єдиний потенційний контейнер з габаритними розмірами  $\{L;H\}$ , розташований в точці  $\{0;0\}$  контейнера. При розміщенні в точці контейнера  $\{x;y\}$  прямокутного об'єкта з габаритними розмірами  $\{l;h\}$  утворюються нові потенційні контейнери (рис. 5.4):

1) в точці  $\{0;0\}$  – потенційні контейнери з габаритними розмірами  $\{L;y\}$  і  $\{x;H\}$ ;

2) в точці  $\{x+l;0\}$  – потенціальний контейнер з габаритними розмірами  $\{W-x-l;H\}$ , а в точці  $\{0;y+h\}$  – потенційний контейнер з габаритними розмірами  $\{L;H-y-h\}$ .

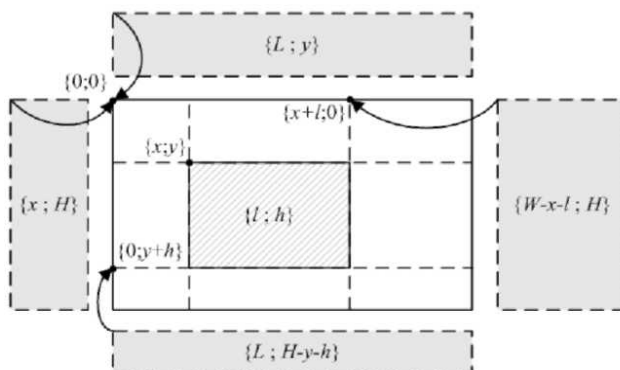


Рисунок 5.4 – Потенційні контейнери двовимірного контейнера

Для перевірки коректності розміщення в деякій точці контейнера ТД з габаритними розмірами  $\{w_1^d, w_2^d, \dots, w_i^d\}$  необхідно виконати єдину перевірку розміщення цієї ТД цілком всередині потенційного контейнера, розташованого в точці розміщення:  $(w_i^d \leq p_k^d) \forall d \in [1; D]$ .

У процесі розміщення ТД в контейнері можливе утворення вкладених потенційних контейнерів, тому після розміщення кожної ТД  $i$  в контейнері  $j$  виконується алгоритм пошуку і видалення вкладених потенційних контейнерів. потенційний контейнер  $k_1$  є вкладеним у потенційний контейнер  $k_2$  (тобто, міститься цілком всередині потенційного контейнера  $k_2$ ), якщо виконуються умови:

$$x_{k_1}^d \geq x_{k_2}^d \text{ і } x_{k_1}^d + p_{k_1}^d \leq x_{k_2}^d + p_{k_2}^d \quad \forall d \in [1; D]. \quad (5.7)$$

На першому етапі алгоритму пошуку потенційних контейнерів формується список  $L_k$ , що складається з потенційних контейнерів  $k: \exists d \in [1; D]: x_k^d \leq x_i^d + w_i^d$ . Далі для кожної пари потенційних контейнерів  $k_1, k_2 \in L_k, k_1 \neq k_2$  виконується перевірка (1) на вкладеність одного потенційного контейнера в інший. Знайдені вкладені потенційні контейнери видаляються з контейнера  $j$ .

## ВИСНОВКИ

Оскільки одним з перспективних рішень побудови мобільних мереж є системи мобільного зв'язку четвертого покоління на базі стандарту LTE, в кваліфікаційній роботі детально проаналізовано основні аспекти підвищення продуктивності даних мереж завдяки використанню фемтостільників.

До переваг відноситься збільшення ємності системи і зменшення вартості передачі одного біта інформації, досягнення значно більш високих швидкостей передачі даних, у порівнянні з існуючими системами третього покоління за рахунок використання ефективних методів розширення інфраструктури мережі.

Розглянуто розвиток мережевої інфраструктури LTE.

Надається огляд впливу розгортання фемтостільників з різними технологіями доступу при підключенні до базової станції макростільника.

Обговорюються технології когнітивного радіо і проблеми їх безпроводового співіснування, щоб дозволити реконфігуровану взаємодію з моделями мереж LTE-фемтостільників. Обговорюється стан поточних досліджень фемтостільників з особливим акцентом на ключові технічні проблеми управління міжрівневими радіозавадами, розподілу ресурсів, забезпечення QoS, багаторівневого доступу до спектру і того, як забезпечити контроль потужності над когнітивними функціями. Складні вимоги до ефективного управління мобільністю представлені для розробки рішень.

Проведено аналіз ефективних методів просторового розміщення елементів мережі мобільного зв'язку. У роботі розглянуті варіанти структурних перетворень, що дозволяють збільшувати продуктивність мережі за рахунок використання макро- і мікростільникових осередків, які ефективно застосовуються в місцях щільних кластерних груп абонентів. Показано, що використання макро- і мікростільникових структур дозволяє в 1,5-2 рази збільшити продуктивність мережі. Відмінністю роботи є застосування методу планування просторового розміщення фемто та мікростільників у мобільній мережі LTE, що базується на теорії оптимізації упаковки 2-х та 3-х мірних об'єктів, що дало можливість подальшого масштабування структури мобільної мережі шляхом поодинокого приєднання об'єктів розміщення на основі логічного вибору з уникненням традиційних *NP*-повних задач перебору.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Поповский В. В. Основы теории телекоммуникационных систем / В. В. Поповский. – LAPLAMBERT: AcademicPublishing, 2018. – 565 с.
2. Поповський В.В., Сабурова С.О., Олійник В.Ф., Лосєв Ю.І., Агєєв Д.В. та ін., Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загальною редакцією В.В.Поповського. – Х.: СМІТ, 2006. – 564 с.
3. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології : підручник Частина 1, за загальною редакцією проф. В.В. Поповського - Х:ТОВ “Компанія СМІТ”,(Ч.1).– 2010. – 470 с.
4. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології : підручник Частина 2, за загальною редакцією проф. В.В. Поповського - Х:ТОВ “Компанія СМІТ”, (Ч.2).–.2010. – 470 с.
5. Маньшин І.С., Хачіров Е.Ф. Методи застосування програмно-конфігурованого радіо у системах мобільного зв'язку / І.С.Маньшін, Е.І. Хачіров // Матеріали шостої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку ЕМС-2020». – Харків, ХНУРЕ. Том 4. – 2020. – с. 72-74.
6. Хачіров Е.Ф., Селіванов К.О., Москалець М.В. Організаційні методи підвищення продуктивності мобільного зв'язку на основі ефективного використання радіочастотного ресурсу / Е.Ф. Хачіров, К.О.Селіванов, М.В. Москалець // 25-й молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХ столітті». – м. Харків. Том 4.– 2021. – С.706-707.
7. Хачіров Е.Ф., Селіванов К.О. Методи використання фемтостільників у системах мобільного зв'язку 4G / Е.Ф.Хачіров, К.О. Селіванов // XXVI Міжнародна науково-практична конференція «Topical issues of practice and science», Великобританія. Лондон,18-21 мая 2021.– С.762-764.
8. Naors Y. Anad Alsaleem, Kashmoola M.A., Moskalets M. Analysis of the efficiency of spacetime access in the mobile communication systems based on an antenna array // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 6, Issue 9 (96). – P. 38–47.
9. Kashmoola M.A., Alsaleem M.Y.A., Alsaleem N., Moskalets M. Model of dynamics of the grouping states of radio electronic means in the problems of ensuring

electromagnetic compatibility. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. №6/9 (102) P. 12-20.

10. Ahmed M.K., Aziz S.F., Alsaleem N.Y. A., Sielivanov K., Moskalets M. Method for determining the responses from a non-linear system using the volterra series // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 4/9 ( 106 ) 2020. P. 34-44.

11. Moskalets M., Kuzminich I. Methods of Femtocells Planning Using Methods of Packaging Optimization. 3rd International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (IEEE PIC S&T` 2016) (IEEE), Kharkiv, NURE, October 4-6, 2016. Харків, 2016. С. 211-213.

12. Markendahl J., Makitalo O. A comparative study of deployment options, capacity and cost structure for macro cellular and femtocell networks // IEEE 21th Intern. Symp. on PIMRC. 2010. P. 145–150.

13. Pirinen P. Co-channel co-existence study of outdoor macro cell and indoor femtocell users // IEEE Wireless Conf. 2010. P. 207–213.

14. Nihtila T. Capacity improvement by employing femtocells in a macrocell HSDPA Network // IEEE. Magister Solutions Ltd. Finland, 2008. 96 p.

15. Mahmoud H., Guvenc I. A comparative study of different deployment modes for femtocell networks // Proc. of IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC). 2009. P. 1–5.

16. Claussen H. Performance of macro- and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure // Proc. Of IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC). Athens, Greece, Sept. 2007. 5 p.

17. Chandrasekhar V., Andrews J. G., Gatherer A. Femtocell networks: A survey // IEEE Communications Magazine. 2008. Vol. 46. N 9. P. 59–67.

18. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О.Тихвинский, С.В.Терентьев, А.Б.Юрчук.— М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.

19. Ермаков С. М. Методы Монте-Карло и смежные вопросы / С. М. Ермаков. – М.: Наука, 1971. – 328 с.

20. Перспективные методы управления использованием радиочастотного спектра / В. В.Бутенко, В. Э. Веерпалу, Е. Е. Володина, Е. Е. Девяткин. // Электросвязь. – 2009. – №5. – С. 9–13. J. Govil, “4G Mobile Communication

Systems: Turns, Trends and Transition,” In Proc. of the IEEE International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT), Korea, November 2007, pp. 13 - 18.

21. D. Amzallag, R. Bar-Yehuda, D. Raz, and G. Scalosub, “Cell Selection in 4G Cellular Networks,” In Proc. of the 27th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), USA, March 2008, PP. 1 - 9.

22. V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, “Femtocell Networks: A Survey,” IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 9, pp. 59 - 67, September 2008.

23. D. Knisely, T. Yoshizawa, and F. Favichia, “Standardization of Femtocells in 3GPP2,” IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 9, pp.76 - 82, September 2009.

24. V. Chandrasekhar, “Coexistence in Femtocell aided Cellular Architectures,” PhD Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Texas at Austin, May 2009.

25. D. Knisely, “Femtocell Standardization,” White Paper, Airvana, USA, May 2010.

26. S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Olsson, S. Wänstedt, K. Zangi, “LTE-Advanced Evolving LTE towards IMT-Advanced”, Ericsson Research, 2008.

27. 4G Americas, “Mobile Broadband Explosion,” Rysavy Research, pp. 1 - 144, August 2012.

28. K. Zheng, B. Fan, J. Liu, Y. Lin, and W. WANG, “Interference Coordination for OFDM-Based Multihop LTE-Advanced Networks,” IEEE Wireless Communication, vol. 18, no. 1, pp. 54 - 63, February 2011.

29. T. Thanabalasingham, “Resource Allocation in OFDM Cellular Networks,” PhD thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, the University of Melbourne, 2006.

30. R. Kim, J. Kwak, and K. Etemad, “WiMAX Femtocell: Requirements, Challenges, and Solutions”, IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 9, pp. 84 - 91, September 2009.