

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

МАКСИМЮК ТАРАС АНДРІЙОВИЧ



УДК 621.396

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО
ПОКОЛІННЯ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник - доктор технічних наук, доцент
Пелішок Володимир Олексійович, Національний
університет "Львівська політехніка", професор кафедри
телекомунікацій

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Сайко Володимир Григорович, Державний університет
телекомунікацій, завідувач кафедри радіотехнологій

доктор технічних наук, доцент
Гаркуша Сергій Володимирович, Вищий навчальний
заклад Укоопспілки "Полтавський університет економіки
і торгівлі", проректор з наукової роботи

Захист дисертації відбудеться "27" листопада 2015 р. о 14:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218 XI навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "24" жовтня 2015 р.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор*



А.П. Бондарєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток технологій в останні роки призвів до появи великої кількості багатофункціональних абонентських пристроїв, що спричинило різке зростання трафіку у мережах мобільного зв'язку. Відповідно до прогнозів компанії Cisco, до 2020 року кількість мобільних пристроїв зросте до 50 мільярдів, що в сім разів перевищує населення планети. В останні роки активно ведуться дослідження у напрямку розробки мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G). Мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління поставлені перед новими викликами такими як 1000-кратне підвищення пропускної здатності, зменшення часу затримки, а також зниження енергоспоживання. Це, в свою чергу, потребує значного збільшення спектральних ресурсів мережі, оскільки для забезпечення зростаючих вимог до пропускної здатності необхідні значно більші частотні смуги. Проте, спектральні ресурси є обмеженими, а проблема їхньої недостачі спостерігається вже зараз. Для підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу була запропонована концепція гетерогенних мереж, яка полягає у використанні мікро- та піко-комірок у зоні макрокомірки. Крім того, гетерогенні мережі передбачають використання технології D2D (Device-to-Device) безпосереднього передавання даних між абонентськими пристроями без звернення до базової станції, що дає змогу ефективніше використовувати наявний спектральний ресурс. Таким чином, гетерогенні мережі частково вирішують завдання підвищення пропускної здатності мережі в умовах обмеженого спектру за рахунок збільшення доступної частотної смуги на одиницю площі. Тому, гетерогенні мережі розглядаються як один з основних елементів для переходу до мереж мобільного зв'язку 5G.

Проблематика підвищення ефективності мереж мобільного зв'язку активно досліджувались такими провідними українськими та зарубіжними вченими як М.М. Климаш, Л.Н. Беркман, А.І. Семенко, С. Г. Бунін, І. П. Лісовий, К. С. Сундучков, В.М. Безрук, Л. С. Глоба, В.О. Пелішок, В. Г. Сайко, С.В. Гаркуша, М. Jo, Н. Hwa-Chen, X. Ge, С. Cho, М. Dohler, М. Haenggi, А.L.F. de Almeida та багатьма іншими.

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

Таким чином, необхідність тисячкратного підвищення пропускної здатності мережі в умовах обмеженого спектрального ресурсу, при забезпеченні низького рівня інтерференції в мережі є невирішеним на сьогодні протиріччям у світовій та вітчизняній науці. Тому, потребує вирішення науково-практична задача розроблення моделей та алгоритмів підвищення пропускної здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку в умовах обмежених спектральних ресурсів та нестационарності енергетичних параметрів мережі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетних науково-дослідних тем «Дослідження та розроблення телекомунікаційних мережних систем для застосувань телематики та телеметрії» (ДБ/КОМ), (2011-2012 рр.), № держреєстрації 0111U001223, «Моделі та структури конвергентних телекомунікаційних мереж на основі CLOUD-технологій» (ДБ/CLOUD), (2013-2014 рр.), № держреєстрації 0113U003138, «Методи побудови та моделі інформаційно – телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN – технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN) (2015-2016), № держреєстрації 0115U000444, а також науково-дослідних тем Національного дослідницького фонду Республіки Корея «Research on the Next Generation Green Wireless Cellular Networks», (2012-2014), № реєстрації 2012-0004811 та програми Міністерства освіти Республіки Корея «Brain Korea 21Plus».

Мета і завдання дослідження. Метою представленої дисертаційної роботи є підвищення ефективності багаторівневих гетерогенних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління за енергетичними та спектральними параметрами в умовах обмеженого спектрального ресурсу та неоднорідної інтенсивності навантаження.

В межах дисертаційних досліджень були сформульовані та розв'язані наступні завдання:

1. Аналіз поточного стану та тенденцій розвитку мереж мобільного зв'язку в напрямку мереж п'ятого покоління.
2. Класифікація технічних рішень для забезпечення вимог до мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління.
3. Розроблення моделей для конвергенції технологій радіодоступу у гетерогенних мережах мобільного зв'язку п'ятого покоління, які б враховували енергетичні та спектральні характеристики.
4. Розроблення моделей та алгоритмів обслуговування користувачів у конвергентних гетерогенних мережах мобільного зв'язку для підвищення їх енергетичної та спектральної ефективності.
5. Підвищення ефективності процесу проектування коміркової інфраструктури та планування ресурсів гетерогенної мережі мобільного зв'язку шляхом розроблення нових геометричних моделей багаторівневих структур з урахуванням особливостей гетерогенної мережної інфраструктури.

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

Предметом дослідження є параметри та характеристики гетерогенних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління що визначають енергетичну та спектральну ефективність.

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

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено метод централізованої динамічної реконфігурації багаторівневої коміркової структури, що дає змогу вдосконалити процес керування спектральними ресурсами, чим досягається підвищення спектральної ефективності гетерогенної мережі;

2. Вперше запропоновано фрактальну модель багаторівневої коміркової структури, яка дає змогу підвищити спектральну ефективність гетерогенних мереж мобільного зв'язку на етапі проектування, шляхом детермінованого структурного синтезу з урахуванням енергетичних та спектральних параметрів мережі, а також ймовірнісних параметрів просторового розподілу інтенсивності навантаження в мережі на основі масштабно-інваріантного геометричного шаблону;

3. Вперше запропоновано модель конвергенції технологій радіодоступу в гетерогенній мережі мобільного зв'язку, яка враховує інтерференцію між спільноканальними D2D доменами, чим досягається підвищення спектральної ефективності конвергентної гетерогенної мережі мобільного зв'язку.

4. Отримав подальший розвиток метод координованого обслуговування у конвергентній гетерогенній мережі мобільного зв'язку шляхом реалізації узгодженого передавання даних між комірковою інфраструктурою та D2D доменом, що дало змогу знизити рівень інтерференції в мережі, чим досягається підвищення її спектральної ефективності;

5. Удосконалено метод передавання сигналів у радіоінтерфейсі з ортогональним частотним мультиплексуванням, шляхом урахування характеристик радіоканалів, що дає змогу досягти компромісу між енергетичною та спектральною ефективністю у гетерогенній мережі мобільного зв'язку.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх безпосереднього застосування в існуючих мережах мобільного зв'язку четвертого покоління та перспективних гетерогенних мережах мобільного зв'язку п'ятого покоління для підвищення їх енергетичної та спектральної ефективності.

1. Розроблений алгоритм координованого обслуговування між коміркою та D2D доменом у конвергентній гетерогенній мережі дає змогу ефективно уникати інтерференції, яка виникає при випадковому зближенні спільно-каналних D2D доменів, чим досягається підвищення ефективності використання спектру до 83% та 29% для комірок та D2D доменів відповідно.
2. Запропонована багаторівнева архітектура для конвергентної гетерогенної мережі дає змогу зменшити кількість запитів від абонентських пристроїв до базової станції, за рахунок використання багаторангових шляхів у D2D доменах, що додатково підвищує ефективність використання спектральних ресурсів на 7% у порівнянні із існуючими мережами LTE-A (Long Term Evolution - Advanced).
3. Розроблений алгоритм реплікації контенту на основі багаторівневої архітектури гетерогенної мережі дає підвищити якість надання контекстно-орієнтованих сервісів, за рахунок використання ресурсів абонентських пристроїв, що, в свою чергу, знижує затримку при наданні хмарних сервісів для кінцевих користувачів за рахунок зменшення часу пошуку контенту, а також дає змогу формувати обчислювальні кластери на основі D2D доменів,

що підвищує ефективність глобальних обчислювальних платформ на основі хмарних технологій.

4. Отримана методика аналізу властивостей локалізації сигналу в частотно-часовій площині, що дає змогу збалансувати частотно-часові параметри сигналу під характеристики каналу зв'язку в радіоінтерфейсі з ортогональним частотним мультиплексуванням, за рахунок чого досягається підвищення енергетичної та спектральної ефективності радіоканалів до 12% та до 25%, відповідно.
5. Модифікований метод квадратурно-амплітудної модуляції дає змогу підвищити енергетичну ефективність радіоканалів на 8% у порівнянні зі звичайною квадратурно-амплітудною модуляцією.

Основні результати роботи використані та впроваджені:

- у Львівській філії ПАТ «Укртелеком» під час розроблення пропозицій щодо планування та побудови гетерогенної коміркової інфраструктури для впровадження мережі мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління;

- у ПП «Цифрові технології» (м. Львів) для покращення якості обслуговування абонентів при наданні контекстно-орієнтованих сервісів на основі концепції мобільних хмарних обчислень;

- у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» для підвищення спектральної ефективності точок доступу безпроводних телекомунікаційних мереж як локального так і глобального масштабу;

- у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсів лекцій з дисциплін «Системи мобільного зв'язку», «Технології мереж мобільного зв'язку» та «Радіомережі коміркового зв'язку».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором особисто. У працях опублікованих у співавторстві авторові належать: у роботах [1,3,14,15,16,20,27-33,36,38] – постановка задач досліджень та розробка імітаційної моделі радіоінтерфейсу мережі мобільного зв'язку, [2,21,42] – способи підвищення ефективності низхідного каналу мережі LTE, [5,22-24,37] – методи та алгоритми перегруповування частотно-часових каналів, [4,13,18,35] – розрахунок енергетичних параметрів радіоканалів, [6] – модифікований метод квадратурно-амплітудної модуляції, [7,11,39,40] – модель конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку, [8,19] – стохастичні моделі структур гетерогенних мереж, [10] – фрактальна геометрична модель багаторівневої коміркової структури гетерогенної мережі мобільного зв'язку, [9] – алгоритм багаторівневої реплікації контенту в гетерогенних мережах мобільного зв'язку, [4,18,35] – методика просторового аналізу розподілу абонентського навантаження, [12,26] – модель оптимального розподілу спектральних ресурсів мережі на основі фрактальної геометрії, [25,41] – розрахунок параметрів опорної транспортної інфраструктури та ядра мережі мобільного зв'язку.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідалися та обговорювалися на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку. Телекомунікаційні системи і технології» (Харків, 18-21 жовтня 2011 р.),

«Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій» (Львів, 2011,2012,2013,2014), «Computer Science & Engineering» (Львів, 2011, 2013), «Нові технології в телекомунікація» (Вишків, 2012, 2013), «IEEE Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (Львів-Славсько, 2012, 2014), «П'ятнадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем» (Львів, 3-6 квітня 2012 р), «Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення» (Житомир, 2012 р.), «Проблеми телекомунікацій» (Київ, 24-27 квітня 2012 р.), «Internet Education Science» (Вінниця, 1-5 жовтня 2012 р.), «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (Лівадія, 24-27 квітня 2012 р.), «IEEE Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» (Поляна-Свалява, 2013, 2015), «IEEE Perspective Technologies and Methods in MEMS Design» (Поляна-Свалява, 2013), «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» (Харків, 22-24 квітня 2013 р.), «IEEE Microwave and Telecommunication Technology» (Севастополь, 8-14 вересня, 2013), «Computational Problems of Electrical Engineering and Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering» (Roztoky u Křivoklátu, 8-14 вересня, 2013), «IEEE Black Sea Conference on Communications and Networking» (Кишинів, 27-30 травня, 2014), «IEEE Microwaves, Radar, and Wireless Communications» (Гданськ, 16-18 червня, 2014), «IEEE Microwaves, Radar, and Wireless Communications» (Гданськ, 16-18 червня, 2014), «IEEE Problems of Infocommunications.Science and Technology» (October 13-15, 2015), «Advanced Information and Communication Technologies» (October, 2015). Також результати роботи обговорювались на засіданні кафедри телекомунікацій.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 42 наукових праці, серед них статей у періодичних фахових виданнях – 17 [2-19], з них в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз – 11, у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 23 [20-42], 1 патент [2] та 1 розділ у колективній монографії [1].

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 180 сторінок, в тому числі: 61 рисунок, 10 таблиць, 180 найменувань списку використаних джерел на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено базові концепції дисертаційної роботи. Розкрито суть і стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, наукову новизну, практичну цінність. Наведено дані про результати роботи, їх практичне значення, апробацію цих результатів на наукових конференціях.

В **першому розділі «Аналіз технологічних рішень та вимог для гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління»** – проведено огляд літературних джерел за темою дисертації для визначення вимог до мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління. На підставі аналізу останніх релевантних робіт та існуючих концепцій розвитку мереж мобільного зв'язку встановлено, що

стандарти п'ятого покоління поставлені перед вимогою підвищення пропускної здатності у тисячу разів у порівнянні з існуючими мережами LTE при тому, що спектральний ресурс для мереж мобільного зв'язку не буде істотно збільшуватись. Це, в свою чергу, потребує нових підходів до підвищення спектральної та енергетичної ефективності мереж мобільного зв'язку. В рамках проблематики, що розглядається у даній дисертаційній роботі необхідно виділити сукупність першочергових взаємопов'язаних задач, розв'язання яких у комплексі дасть змогу підвищити енергетичну та спектральну ефективність для забезпечення вимог, які ставляться до мереж 5G:

1. Необхідно провести додаткові дослідження з метою визначення оптимальної межі між пропускною здатністю та інтерференцією при територіальному ущільненні комірок у гетерогенній мережі.
2. Гетерогенна архітектура мережі та конвергенція технологій радіодоступу потребує подальших досліджень з метою вибору ефективної конфігурації, яка б забезпечила високу енергетичну та спектральну ефективність.
3. Невирішена задача планування покриття багаторівневої гетерогенної мережі з урахуванням інтерференції потребує розроблення нових підходів до моделювання топологічних структур та частотних ансамблів, як на етапі планування, так і в процесі експлуатації мережі.
4. Складна структура конвергентної гетерогенної мережі потребує нових алгоритмів централізованого керування мережними ресурсами та балансування навантаження, які б забезпечили адаптивність до динамічно-змінних параметрів мережі.
5. Враховуючи гетерогенну структуру мережі, спостерігається значна відмінність між характеристиками радіоканалів, що ускладнює використання фіксованих параметрів для усіх передавальних та приймальних станцій, і як наслідок, потребує нових підходів для вибору ефективної конфігурації радіоінтерфейсу мережі мобільного зв'язку.

Другий розділ «Моделі та алгоритми функціонування конвергентних гетерогенних мереж мобільного зв'язку при нестационарних енергетичних та спектральних параметрів» – присвячено моделям конвергенції технології D2D з комірковими мережами мобільного зв'язку. Розраховано моделі поширення сигналів у радіоканалах між базовою станцією та абонентськими пристроями, а також у каналах між самими абонентськими пристроями, що дає змогу визначити мінімальну необхідну відстань між D2D доменами для забезпечення вимог до інтерференції у каналах зв'язку.

Таким чином, для будь-яких пар вузлів $i-j$ та $k-l$, які одночасно функціонують в одній спектральній смузі повинна задовольнятися умова:

$$\left\{ \min(d_{ik}, d_{il}, d_{jk}, d_{jl}) \geq d_{\min} \left(\max(d_{ij}, d_{kl}) \right) \right\} \rightarrow \{SINR_m \geq SINR_{xp}\}, \quad (1)$$

де m – може бути будь-яким вузлом серед $\{i, j, k, l\}$, d_{\min} – мінімальне необхідне рознесення спільно-канальних D2D доменів, для забезпечення критичного рівня співвідношення потужності сигналу до шуму та інтерференції SINR (signal-to-interference-plus noise ratio).

Для довільного випадку трьох D2D каналів з випадковою топологією (рис. 1) виведено кінцеві рівняння для оптимізації енергетичних параметрів конвергентної мережі.

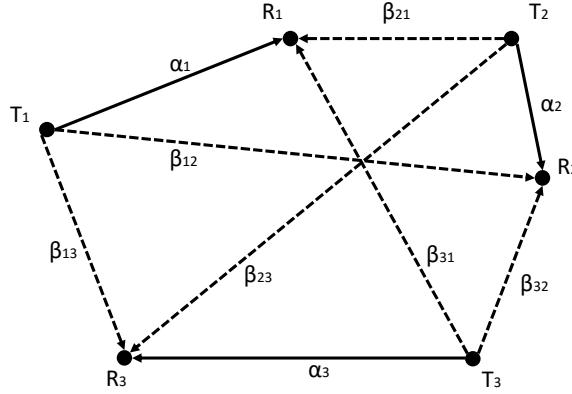


Рис. 1. Граф випадкової топології D2D домену для 3-х передавальних та 3-х приймальних вузлів

Вузли T_1, T_2, T_3 передають дані до вузлів R_1, R_2, R_3 . Потужність сигналу на вході приймача визначається як:

$$P_{R_i} = P_{T_i} \alpha_i, \quad (2)$$

де P_{R_i} – потужність сигналу на вході приймача R_i , P_{T_i} – потужність передавача T_i , α_i – фактор загасання сигналу при поширенні.

Потужність інтерферуючого сигналу від вузла T_i до вузла R_j визначається як:

$$I_{R_j, T_i} = P_{T_i} \beta_{ij}, \quad (3)$$

де I_{R_j, T_i} – потужність інтерферуючого сигналу від вузла T_i до вузла R_j , P_{T_i} – потужність передавача T_i , β_{ij} – фактор загасання сигналу при поширенні від вузла T_i до вузла R_j . Відповідно, кінцеве рівняння для трьох каналів у матричному вигляді записується як:

$$\begin{pmatrix} -\alpha_1 & SINR_{кр} \beta_{21} & SINR_{кр} \beta_{31} \\ SINR_{кр} \beta_{12} & -\alpha_2 & SINR_{кр} \beta_{32} \\ SINR_{кр} \beta_{13} & SINR_{кр} \beta_{23} & -\alpha_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{T_1} \\ P_{T_2} \\ P_{T_3} \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} -SINR_{кр} N \\ -SINR_{кр} N \\ -SINR_{кр} N \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Рівняння (4) узагальнюється для довільної кількості вузлів M :

$$\begin{pmatrix} -\alpha_1 & SINR_{кр} \beta_{21} & SINR_{кр} \beta_{31} & \dots & SINR_{кр} \beta_{M1} \\ SINR_{кр} \beta_{12} & -\alpha_2 & SINR_{кр} \beta_{32} & \dots & SINR_{кр} \beta_{M2} \\ SINR_{кр} \beta_{13} & SINR_{кр} \beta_{23} & -\alpha_3 & \dots & SINR_{кр} \beta_{M3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SINR_{кр} \beta_{1M} & SINR_{кр} \beta_{2M} & SINR_{кр} \beta_{3M} & \dots & -\alpha_M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{T_1} \\ P_{T_2} \\ P_{T_3} \\ \vdots \\ P_{T_M} \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} -SINR_{кр} N \\ -SINR_{кр} N \\ -SINR_{кр} N \\ \vdots \\ -SINR_{кр} N \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Рівняння (5) може бути розв'язаним, якщо відомі значення загасання та мінімальні вимоги до співвідношення потужності сигналу до шуму та інтерференції. У такому випадку, з використанням запропонованої моделі можна легко визначати необхідні параметри для конвергентних гетерогенних мереж на основі міжтермінальної взаємодії.

Важливим аспектом у конвергентних гетерогенних мережах є динамічна поведінка користувачів, що призводить до варіації відстаней між D2D доменами.

Це призводить до того, що спільно-частотні D2D домени можуть опинитися критично близько один до одного, спричиняючи високий рівень інтерференції в мережі. Для усунення інтерференції у такому випадку, у розділі запропоновано розвинутий метод координованого обслуговування, який передбачає узгоджене передавання між базовою станцією та D2D доменом. Розроблено два способи уникнення інтерференції між комірковою інфраструктурою та D2D домонами: координована реконфігурація та узгоджене передавання (рис. 2)

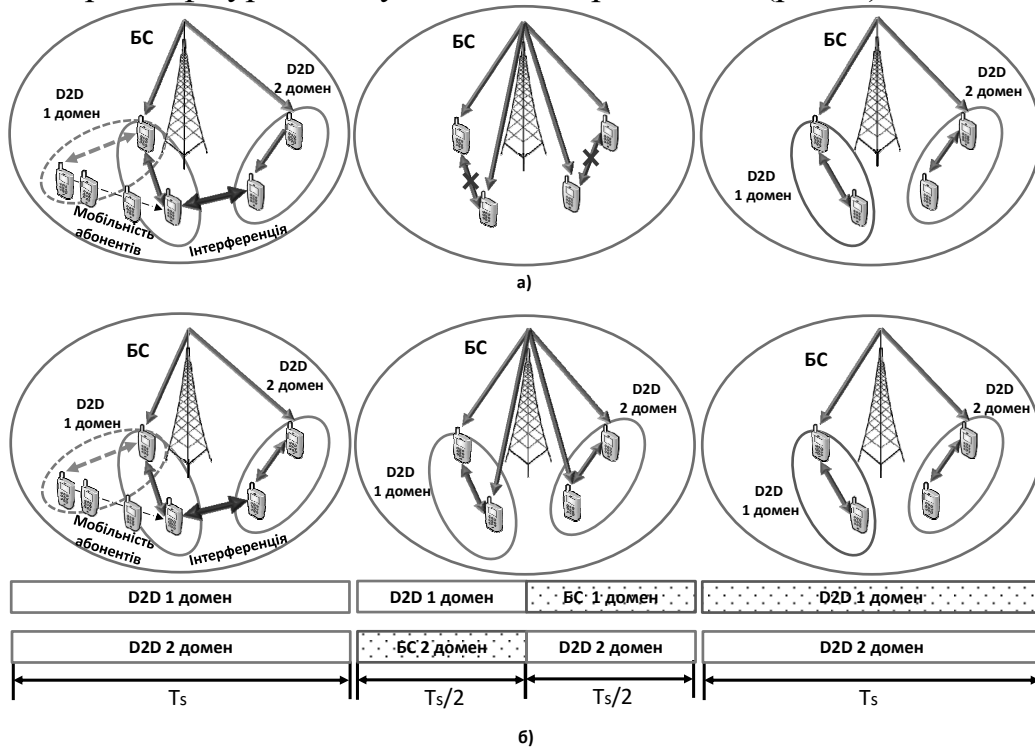


Рис. 2. Способи уникнення інтерференції у гетерогенних мережах: координована реконфігурація – а) та узгоджене передавання – б).

Як видно з рис. 2., при зближенні спільно-канальних D2D домів, між ними виникає інтерференція. Це призводить до зниження значення $SINR$ нижче критичного рівня, тобто:

$$SINR_i < SINR_{кр}. \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} & \max \left(\sum_i SINR_i \right), \forall i \in N, \\ & \text{при } \min(SINR) \geq SINR_{кр}, \\ & SINR = \{SINR_1, SINR_2, \dots, SINR_N\}, k \in N \end{aligned} \quad (7)$$

У випадку координованої реконфігурації, базова станція бере на себе обслуговування усіх пристроїв, що призводить до розриву усіх інтерферуючих D2D домів. Базова станція обслуговує усі пристрої до того моменту, поки нові D2D домени не створяться наново, задовольнивши умови (1) та (7). Даний процес проілюстрований на рис. 2.а. Більш гнучкий спосіб полягає у часовому мультиплексуванні каналів передавання між базовою станцією та D2D доменом. У

такому випадку, часовий кадр тривалістю T_s розділяється на M підкадрів, де M – кількість інтерферуючих D2D мереж. Як показано на рис. 2.6 (для $M=2$), перший D2D домен передає дані протягом першого підкадру тривалістю $T_s/2$, у той час коли абоненти другого D2D домену обслуговуються базовою станцією. Протягом наступного підкадру тривалістю $T_s/2$, перший D2D домен обслуговується базовою станцією, у той час як другий D2D домен використовує міжтермінальні з'єднання для передавання інформації. Таке часове розділення здійснюється до тих пір поки не буде виконана умова (7) для інтерферуючих D2D доменів. Основною відмінністю між двома способами є те, що узгоджене передавання зберігає існуючі міжтермінальні зв'язки, в той час як координована реконфігурація передбачає їх видалення. На практиці, обидва підходи придатні до застосування в залежності від поточної ситуації.

У третьому розділі «Моделювання та дослідження процесу обслуговування абонентів у конвергентних гетерогенних мережах мобільного зв'язку» запропоновано модель обслуговування абонентів та передавання контенту в конвергентних гетерогенних мережах. Особливістю даної моделі є динамічна мобільна хмарна система MDC (Mobile Dynamic Cloud), яка організовується на основі обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв з використанням D2D та взаємодіє із статичною хмарною системою GSC (General Static Cloud) через базову станцію. MDC використовує ієрархічну архітектуру з розділенням ролей пристроїв в хмарі, залежно від їх апаратних та програмних можливостей. Введення MDC дає змогу зменшити обсяг трафіку, який перенаправляється до GSC, за рахунок використання обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв. Крім того, ефективна агрегація потоків у MDC, сприяє збільшенню продуктивності мережі за рахунку зменшення кількості одночасних з'єднань на стороні базової станції. Враховуючи, що сучасні мережі характерні високим рівнем повторного використання контенту, значний обсяг трафіку, який передається в мережах мобільного зв'язку є надлишковим, оскільки кілька користувачів отримують доступ до одного і того ж самого контенту. Для вирішення даної проблеми розроблено метод реплікації контенту в гетерогенній мережі мобільного зв'язку на основі запропонованої моделі обслуговування.

Оцінка ефективності запропонованих рішень здійснюється на основі розробленої в програмному пакеті Matlab R2015a моделі мережі з використанням стандартизованих бібліотек 3GPP (3rd Generation Partnership Project) LTE System Toolbox. Моделювання процесу передавання даних проводилися з випадковою кількістю одночасних запитів на обслуговування від користувачів. Для моделювання системи використовувались наступні вхідні дані: смуга пропускання – 20 МГц; модуляція – 64 QAM; конфігурація антен – кругова; розподіл абонентів у комірці – рівномірний; ймовірність реплікації контенту – 0.1; критичне значення SINR – -6.2 дБ.

Як показують результати моделювання (рис. 3), пропускна здатність звичайної мережі LTE різко варіюється, залежно від кількості користувачів у комірці. Запропонована конвергентна гетерогенна мережа з D2D показує більш стабільне функціонування мережі, що підвищує пропускну здатність мережі до 4%, у порівнянні із мережею LTE (Long Term Evolution). При використанні алгоритму

реплікації контенту, вигрaш у пропускній здатності збільшується до 7% відносно мережі LTE. Вигрaш у пропускній здатності досягається за рахунок зменшення загальної кількості запитів до базової станції. Крім того, пропускна здатність мережі зростає, при використанні реплікації контенту в залежності від кількості користувачів та коефіцієнта подібності контенту.

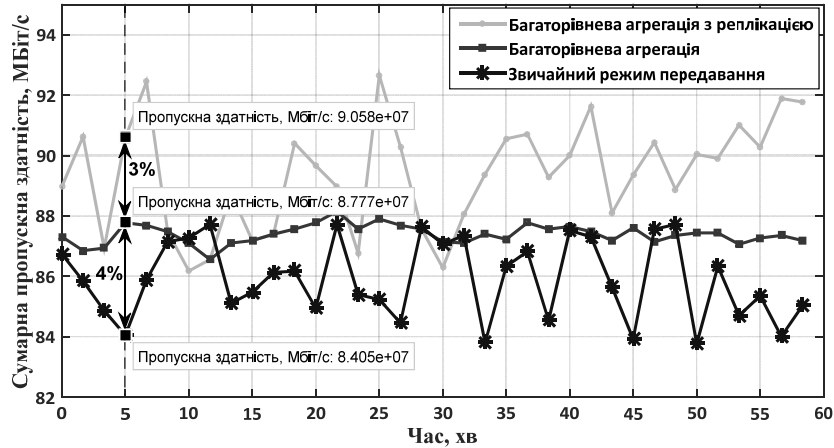


Рис. 3. Порівняння пропускної здатності гетерогенної мережі при різних сценаріях моделювання.

На рис. 4 показано функцію розподілу (CDF) відношення SINR у мережі для розглянутих схем координованого обслуговування. Як показано на рис. 3.а, продуктивність значно підвищується за рахунок використання координованої реконфігурації. Порівнюючи базові сценарії на рис. 3.б, можна зробити висновок, що конвергенція коміркових мереж з D2D доменами суттєво погіршує відношення SINR у мережі. При конвергенції гетерогенних мереж, багато користувачів не можуть обслуговуватись у комірці через те, що значення SINR є нижчим від критичного рівня ($SINR_{кр} = -6.2$ дБ). Це пов'язано із високим рівнем інтерференції від D2D доменів.

Використання запропонованого способу узгодженого передавання, дає змогу підвищити ефективність мережі за рахунок підвищення середнього рівня SINR, як показано на рис. 4.б. Результати підтверджують ефективність запропонованого алгоритму координованого обслуговування з точки зору усунення впливу інтерференції, що відповідно дає змогу підвищити спектральну ефективність для задоволення вимог до мереж 5G.

Для теоретичної оцінки вигрaшу у спектральній ефективності ми аналізуємо кількість користувачів, які отримують значення SINR не менше ніж порогове значення $SINR_{кр} = -6.2$ дБ. Згідно з отриманими результатами, запропонований метод координованого обслуговування дає змогу суттєво знизити рівень інтерференції у мережі. Це, в свою чергу, підвищує значення співвідношення потужності сигналу до шуму та інтерференції (SINR) у мережі та збільшує кількість абонентів, які можуть одночасно обслуговуватись. Відповідно, при використанні запропонованого методу координованого обслуговування можна досягнути вигрaшу в ефективності використання спектру до 83% для коміркової мережі та до 29% для D2D доменів.

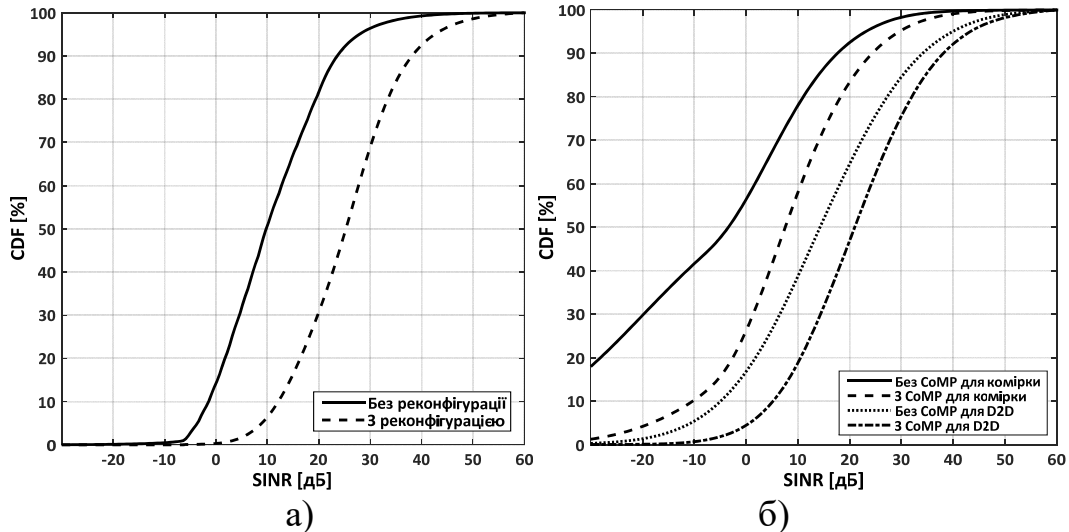


Рис.4. Співвідношення SINR у гетерогенній мережі при координованій реконфігурації – а) та узгодженому передаванні – б).

Четвертий розділ «Методи планування та моделювання багаторівневих коміркових структур гетерогенних мереж мобільного зв'язку» – присвячений моделям планування багаторівневих гетерогенних мереж мобільного зв'язку, а також задачам балансування навантаження, реконфігурації та централізованого керування мережею. Для цього у розділі запропоновано фрактальну геометричну модель багаторівневої коміркової структури гетерогенної мережі (рис. 5).

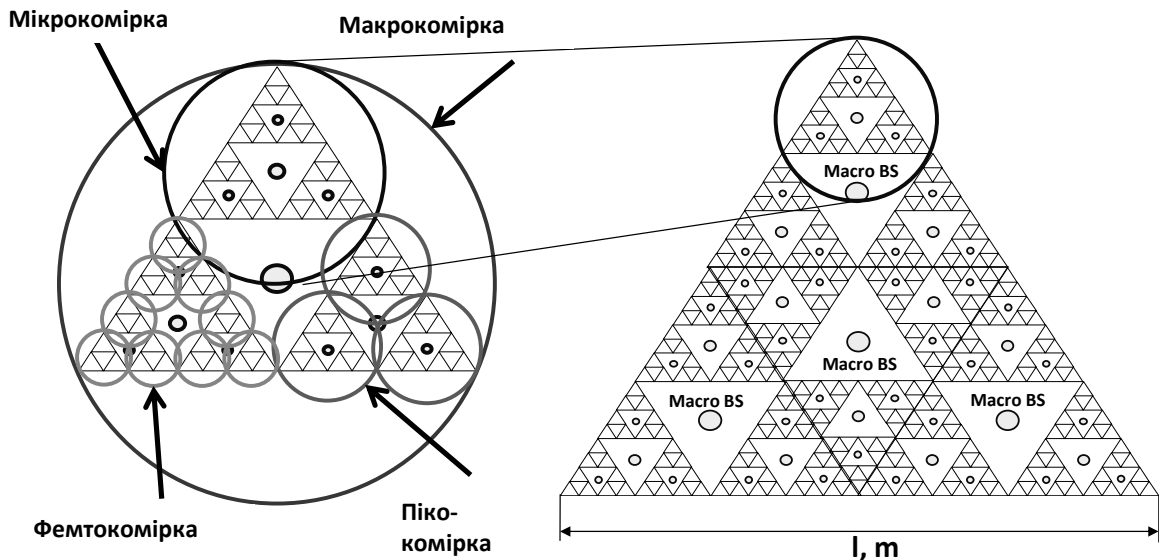


Рис. 5. Гнучке планування покриття гетерогенної мережі на основі фрактальної моделі трикутника Серпінського.

На рис.6 результати моделювання співвідношення SINR та сумарної пропускної здатності для різних рівнів гетерогенної мережі. Для спрощення процесу моделювання прийнято, що уся топологія є однорівневою, тобто враховується лише внутрішньорівнева інтерференція.

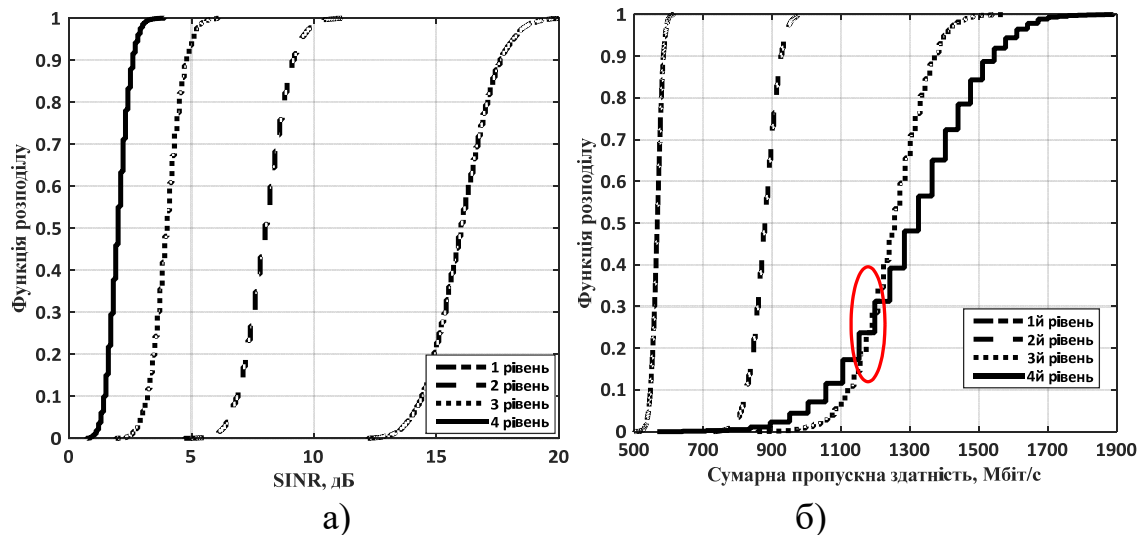


Рис. 6. Функції розподілу значень SINR – а) та сумарної пропускної здатності мережі – б) для різних рівнів гетерогенної мережі.

З рис. 6.а можна побачити. Що варіація значень SINR зменшується при зменшенні розміру комірок. Сумарна пропускна здатність мережі для кожного рівня розраховувалась на основі отриманих значень SINR. Як можна побачити з рис. 6.б, в ряді випадків спостерігається, що пропускна здатність структури четвертого рівня може бути нижчою, ніж в структурі третього рівня. Це можна пояснити тим, що ефективність багаторівневих гетерогенних структур знижується, якщо деякі комірки мають обмежену пропускну здатність транспортного каналу. Тому, важливим аспектом у гетерогенних мережах є балансування навантаження з врахуванням густини користувачів та інтерференції між спільно каналними комірками.

Для того щоб забезпечити ефективний перерозподіл частотних каналів необхідно виконати наступну умову:

$$\max \left(\sum_i SINR_i \right) = \max \left(\sum_i \frac{P_i h_{x_i} - PL_i}{\sum_{j=1}^K (P_j h_{x_j} - PL_j) + \sigma^2} \right), \quad (8)$$

при $i \in (0, \infty)$, $C \geq C_{min}$,

де $SINR_i$ – інтерференція на вході приймача i -го абонента, C – сумарна пропускна здатність гетерогенної мережі, C_{min} – мінімальна сумарна пропускна здатність необхідна для задоволення вимог абонентського навантаження.

П'ятий розділ «Алгоритми передавання сигналів у радіоканалах гетерогенних мережах мобільного зв'язку п'ятого покоління» – присвячений досягненню компромісу між частотними та часовими параметрами сигналів, а також розробленню алгоритмів програмної реконфігурації радіоінтерфейсу з урахуванням характеристик радіоканалів. Конвергентні гетерогенні мережі поєднують ряд технологій та стандартів радіодоступу, що потребує нових підходів для адаптації сигналів до умов радіоканалу. Радіоканали гетерогенних мереж, подекуди характеризуються вимогами до властивостей сигналів, які суперечать один одному.

У розділі запропоновано модифікований метод квадратурно-амплітудної модуляції, який дає змогу підвищити енергетичну ефективність безпровідного каналу зв'язку за рахунок нового алгоритму приймання сигналу. На відміну від звичайної квадратурно-амплітудної модуляції, у запропонованому методі модулюється лише синфазна компонента сигналу на передавальній стороні. У свою чергу, приймач демодулює та відтворює квадратурну компоненту вхідного сигналу, використовуючи таблицю асоціативності складових. Таке рішення дало змогу підвищити співвідношення сигнал/шум на вході приймача на 8% у логарифмічному масштабі (рис. 7).

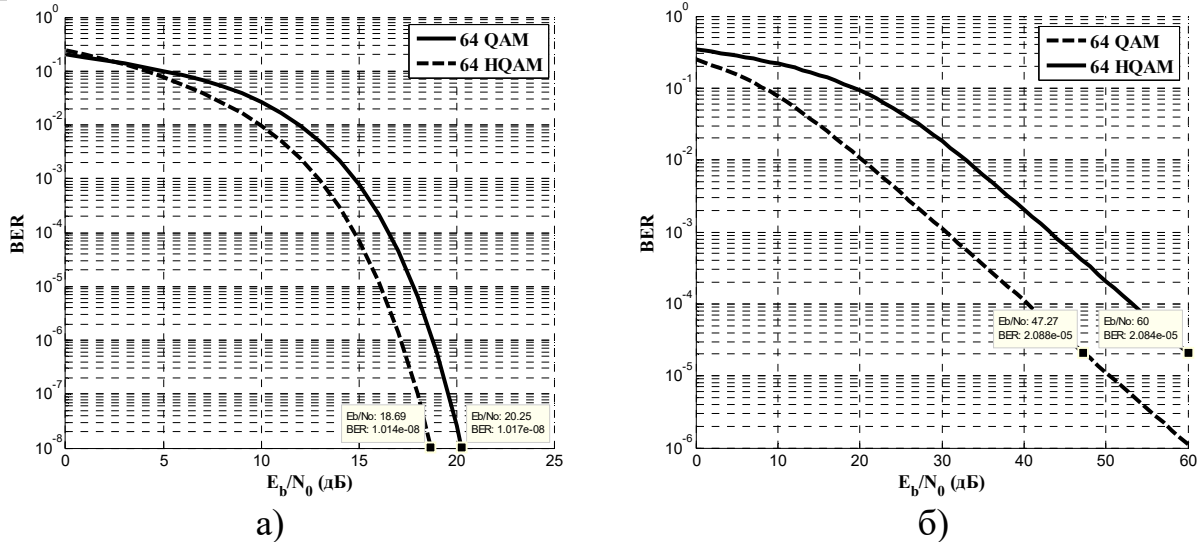


Рис. 7. Порівняльні залежності коефіцієнта появи бітових помилок від співвідношення сигнал/шум для класичної та модифікованої квадратурно-амплітудної модуляції в умовах Гаусівського – а) та Релеївського – б) каналів.

Крім того, у розділі запропоновано удосконалений метод передавання сигналів у радіоінтерфейсі з ортогональним частотним мультиплексуванням, який враховує частотно-часову дисперсію каналів зв'язку при виборі параметрів сигналу, що дає змогу досягти компромісу між енергетичною та спектральною ефективністю у гетерогенній мережі мобільного зв'язку. Таким чином, підлаштування параметрів сигналу під конкретні умови радіоканалу дають змогу у екстремальних випадках досягати підвищення енергетичної ефективності на 12% та спектральної ефективності на 25%.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу розроблення моделей та алгоритмів підвищення пропускної здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку в умовах обмежених спектральних ресурсів та нестационарних енергетичних параметрах мережі, а також розроблення моделей планування багаторівневої структури гетерогенної мережі на етапі проектування для забезпечення вимог до пропускної здатності при підтримці мінімального рівня інтерференції.

1. Проаналізовано поточний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку у напрямку стандартів п'ятого покоління. Визначено основні обмежуючі фактори для впровадження гетерогенних мереж мобільного зв'язку, такі як

інтерференція, складність хендоверу, необхідність централізованого керування радіоресурсами, складність реалізації транспортної мережі та відсутність існуючих моделей для структурно-функціонального синтезу багаторівневої коміркової інфраструктури.

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

3. Запропоновано модель конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку, яка враховує інтерференцію між спільно-канальними D2D доменами, для забезпечення необхідного співвідношення сигналу до шуму та інтерференції та підвищення спектральної ефективності гетерогенної мережі мобільного зв'язку. Використання багаторангових шляхів у D2D доменах на основі запропонованої моделі конвергенції радіоінтерфейсів дає змогу зменшити кількість запитів до базової станції, що додатково підвищує ефективність використання її спектральних ресурсів на 4% за рахунок зменшення обсягу службової інформації. На основі запропонованої моделі розроблено метод реплікації контенту в гетерогенній мережі мобільного зв'язку з багаторівневою агрегацією трафіку, що дає змогу підвищити ефективність використання пропускної здатності радіоканалів на 7%.

4. Вирішено завдання уникнення інтерференції між D2D доменами у гетерогенній конвергентній мережі за рахунок розвинутого методу координованого обслуговування з узгодженим передаванням даних між комірковою інфраструктурою та D2D доменом. На основі даного методу розроблено та промодельовано алгоритм координованого обслуговування, який дає змогу підвищити ефективність використання спектру до 83% для коміркової мережі та до 29% для D2D домену.

5. Вирішено завдання проектування багаторівневої коміркової структури гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі запропонованої фрактальної геометричної моделі. Розроблена модель дає змогу планувати ресурси мережі шляхом розрахунку геометричних параметрів масштабно-інваріантного геометричного шаблону. На основі запропонованої моделі, розроблено метод централізованої динамічної реконфігурації багаторівневої коміркової структури, що дає змогу вдосконалити процес керування спектральними ресурсами, чим досягається підвищення енергетичної та спектральної ефективності гетерогенної мережі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Колективні монографії:

1. Стрихалюк Б. М., Яремко О. Н., Максимюк Т. А. Повышение энергетической и спектральной эффективности радиоканала сети LTE // Научные технологии в инфокоммуникациях. Обработка и защита информации/ за ред. В. М. Безрука, В. В. Баранніка. — Харків: Компанія СМІТ, 2013. — С. 375–384. — ISBN 978-617-621-021-4.

Патенти:

2. Заявка u 2015 05662 Україна, МПК H04B 7/00. Спосіб формування вихідного сигналу адаптивної передавальної антени/ Климаш М.М., Пелішок В.О., Яремко О.М., Максимюк Т.А. - № 16354 заявл. 08.06.2015.

Статті у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

3. В. Stryhalyuk. Performance increasing method of wireless system based on determining time-frequency localization properties of OFDM signal / В. Stryhalyuk, О. Yaremko, Т. Maksymyuk, О. Melnyk // ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes, Krakow, 2012. – vol. 1, №3, P. 49-54. (BazTech).
4. О. Yaremko. The optimal power control method in multiuser cellular networks / О. Yaremko, В. Stryhalyuk, Т. Maksymyuk , О. Lavriv, D. Kozhurov // An International Quarterly Journal on Economics in Technology, New Technologies and Modelling Processes. Vol. 2, No 1. Lublin – Cracow – 2013. P. 63-67. (BazTech).
5. М.М. Климаш. Підвищення ефективності використання частотно-часових ресурсів в мережах GSM /М. М. Климаш, Т. А. Максимюк, М. Я. Шеремета, Р.З. Козловський // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації, Львів, 2013. – № 766, С. 65-71. (Index Copernicus, Google Scholar).
6. Т. Maksymyuk. Quasi-quadrature Modulation Method for Power Efficient Video Transmission over LTE Networks / Т. Maksymyuk, L. Han, X. Ge, H. Chen, M. Jo // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014. – vol. 63, №5, P. 2083- 2092. (Scopus)
7. M. Jo. A Survey of Converging Solutions for Heterogeneous Mobile Networks/ M. Jo, Т. Maksymyuk, R.L. Batista, T.F. Maciel, A.L.F. de Almeida, M. Klymash // IEEE Wireless Communications, 2014. – vol. 21, №8, P. 54-62. (Scopus)
8. Т. Maksymyuk. Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks / Т. Maksymyuk, М. Brych, V. Pelishok // Smart Computing Review, 2015. – vol. 5, №2, P. 89-101.(CrossRef, DBLP, DBPIA, Google Scholar, EBSCO)
9. M. Jo. Device-to-Device (D2D) Based Heterogeneous Radio Access Network Architecture for Mobile Cloud Computing / M. Jo, Т. Maksymyuk, В. Strykhalyuk, С. Cho // IEEE Wireless Communications, 2015. – vol. 12, №3. (Scopus)
- 10.Т. Maksymyuk. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands / Т. Maksymyuk, М. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo. // Smart Computing Review, 2015. – vol. 5, №4, P. 346-355. (CrossRef, DBLP, DBPIA, Google Scholar, EBSCO)
- 11.Т. А. Максимюк. Моделі конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління на основі технології D2D /Т. А. Максимюк, О. М. Яремко, М. В. Піцик // Телекомунікаційні та інформаційні технології, Київ, ДУТ, 2015. – № 3, С. 91-102. (Google Scholar).
- 12.Т. А. Максимюк. Оптимізація параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі /Т. А. Максимюк, М. В. Брич, М. М. Климаш // Наукові записки УНДІЗ, Київ, 2015. – № 4 (38), С. 5-16. (Google Scholar).

13. П. О. Гуськов. Метод динамічного формування структури рівня радіодоступу / Т. А. Максимюк, М. М. Климаш // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів, 2015. – № 818, С. 220-230. (Index Copernicus, Google Scholar).

Статті у журналах, що входять до переліку наукових фахових видань України:

14. М. М. Климаш. Покращення параметрів радіоінтерфейсу LTE/HSOPA / М. М. Климаш, О. А. Лаврів, І. О. Кагало, Б. В. Коваль, Т. А. Максимюк // Комп'ютерні технології друкарства, Львів, 2011. – № 26, С. 130-137
15. В. О. Пелішок. Дослідження частотної ефективності вузькосмугових методів модуляції. / В. О. Пелішок, Т. А. Максимюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів, 2011. – № 705, С. 105-112.
16. Т. А. Максимюк. Дослідження способів підвищення швидкості передавання в нисхідному каналі мобільної мережі LTE / Т. А. Максимюк, М. О. Селюченко // Комп'ютерні технології друкарства, Львів, 2012. – № 27, С. 160-169.
17. Т. А. Максимюк. Метод синтезу OFDM сигналу з оптимальною частотно-часовою локалізацією // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів, 2012. – № 738, С. 198-205.
18. О. М. Яремко. Метод адаптивного розподілення потужності в мобільній мережі при варіації абонентського навантаження / О. М. Яремко, Т. А. Максимюк, Р. І. Бак // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Пухова, Моделювання та інформаційні технології, Київ, 2012. – № 66, С. 137-143.
19. Т. А. Максимюк. Моделі стохастичної геометрії для гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління / Т. А. Максимюк, Р. А. Бурачок, І. Б. Чайковський, М. В. Брич // Комп'ютерні технології друкарства, Львів, 2015. – № 33, С. 112-119.

Публікації у матеріалах конференцій, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

20. The LTE channel transmission rate increasing [Maksymyuk T., Pelishok V.] : матеріали міжнародної конференції [IEEE "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science – 2012"], (Львів-Славське, 21-24 лютого, 2012) – Львів, 2012 – Р. 251-252. (Scopus)
21. Spectral Efficiency Increasing of Cognitive Radio Networks [Klymash M., Jo M., Maksymyuk T., Beliaiev I.] : proceedings of international conference [IEEE "Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics – 2013"], (Polyana-Svalyava, February 19-23, 2013) – Polyana-Svalyava, 2013 – Р. 169-171. (Scopus)
22. Cognitive radio approach for LTE deployment [Jo M., Maksymyuk T., Kyryk M., Han L.] : proceedings of international conference [IEEE "Perspective Technologies and Methods in MEMS Design – 2013"], (Polyana-Svalyava, April 16–20, 2013) – Polyana-Svalyava, 2013 – Р. 63-64. (Scopus)
23. Methods and techniques of spectrum reforming for LTE network deployment [Guskov P., Kozlovskiy R., Maksymyuk T., Klymash M.] : proceedings of

international conference [IEEE “Microwave and Telecommunication Technology – 2013”], (Sevastopol, September 8-14, 2013) – Sevastopol, 2013 – P. 474-475.(Scopus)

24. Dynamic Spectrum Sharing Algorithm for Combined Mobile Networks [Jo M., Klymash M., Maksymyuk T., Kozlovskiy R.] : proceedings of international conference [IEEE Microwaves, Radar, and Wireless Communications – 2014], (Gdansk, June 16-18, 2014) – Gdansk, Poland, 2014 – P. 807-810. (Scopus)
25. Research and Development the Methods of Quality of Service Provision in Mobile Cloud Systems [Beshley M., Maksymyuk T., Stryhalyuk B., Klymash M.]: proceedings of international conference [IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (IEEE BlackSeaCom 2014)], (Chisinau, May 27-30, 2014). – Chisinau, Moldova, 2014. – P. 163-169. (Scopus)
26. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks [Maksymyuk T., Brych M., Masyuk A.]: proceedings of international conference [IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015)], (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, Ukraine – P. 69-72. (Scopus)

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

27. Підвищення ефективності радіоінтерфейсу безпроводних систем наступного покоління [Яремко О.М., Максимюк Т.А, Кричко Д.І.]: матеріали науково-методичної конференції [4-й Міжнародний радіоелектронний форум ”Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку” Матеріали конференції “Телекомунікаційні системи і технології” ТСТ-2011], (Харків, 18-21 жовтня 2011 р.), С. 261-265.
28. Підвищення частотної ефективності вузькосмугових методів модуляції [Пелішок В.О., Максимюк Т.А.] : матеріали науково-методичної конференції [”Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011”], (Львів, 27-30 жовтня 2011 р.) Львів, 2011, С. 92-96.
29. Increasing the spectral efficiency of OFDM signal [Maksymyuk T., Dumych S]: матеріали міжнародної конференції [“Computer Science & Engineering 2011”], (Львів, 24-26 листопада 2011 р.) Львів, 2011, С. 244-245.
30. Метод підвищення спектральної ефективності систем з OFDM [Яремко О.М., Максимюк Т.А.] : матеріали міжнародного науково-технічного симпозиуму [”Нові технології в телекомунікаціях –2012”], (Вишків, 17-21 січня 2012 р.) Вишків, 2012, С. 58-61.
31. Метод синтезу OFDM сигналу на основі вейвлетних функцій [Максимюк Т.А., Думич С.С., Брич М.В.] : матеріали науково-технічної конференції [”П'ятнадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем”], (Львів, 3-6 квітня 2012 р.) Львів, 2012, С. 81.
32. Підвищення ефективності функціонування радіосистем з ортогональним розділенням [Климаш М.М., Максимюк Т.А., Думич С.С.] : матеріали науково-практичної конференції [”Проблеми створення, розвитку та застосування

- інформаційних систем спеціального призначення – 2012"], (Житомир, 2012 р.) Житомир, 2012, С.82-83
33. Підвищення спектральної ефективності радіосистем з ортогональним частотним розділенням [Максимюк Т.А., Думич С.С., Брич М.В.] : матеріали міжнародної науково-технічної конференції ["Проблеми телекомунікацій – 2012"], (Київ, 24-27 квітня 2012 р.), Київ, 2012, С. 207-209.
 34. Методика просторового аналізу властивостей локалізації сигналу в частотно-часовій площині [Максимюк Т.А.] : матеріали міжнародної науково-практичної конференції ["Internet Education Science – 2012"], (Вінниця, 1-5 жовтня 2012 р.) Вінниця, 2012, С. 160-161.
 35. Ітераційний метод керування потужністю у безпроводних системах з нестационарним каналом зв'язку [Яремко О.М., Максимюк Т.А., Рожанківський А.-Т.О.] : матеріали міжнародної науково-технічної конференції ["Сучасні інформаційно-комунікаційні технології – 2012"], (Львів, 24-27 квітня 2012 р.) Львів, 2012, С.73-75
 36. Підвищення завадостійкості сигнальних конструкцій в системах з ортогональним частотним мультиплексуванням [Максимюк Т.А., Пелішок В.О., Ратич А.Т., Брич М.В.] : матеріали науково-методичної конференції ["Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012"], (Львів, 1-4 листопада 2012 р.) Львів, 2012, С.41-44.
 37. Spectrum Sharing in Infrastructure Based Cognitive Radio Networks [Maksymyuk T., Strykhalyuk I.] : proceedings of the international conference ["Computational Problems of Electrical Engineering and Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering – 2013"], (Roztoky u Křivoklátku, 8-14 вересня, 2013) – Roztoky u Křivoklátku, Czech Republic, 2013.
 38. Імітаційне моделювання ймовірнісних характеристик мультисервісного трафіку в мережах LTE [Свиридова О.В., Максимюк Т.А., Чернихівський Є.М.] : матеріали науково-методичної конференції ["Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013"], (Львів, 30 жовтня-2 листопада 2013 р.) Львів, 2013, С. 145-148.
 39. Advanced Wireless Access Methods for 5G Heterogeneous Mobile Networks [Jo M, Maksymyuk T., Kyryk M., Klymash M.] : proceedings of the international conference ["Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science – 2014"], (Lviv-Slavske, Feb. 25- Mar.1, 2014) – Lviv, 2014 – P. 30-32.
 40. Heterogeneous network architecture for mobile cloud computing [Maksymyuk T., Strykhalyuk V.] : матеріали науково-методичної конференції ["Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014"], (Львів, 29 жовтня-1 листопада 2014 р.) Львів, 2014, С.215-220.
 41. Smart Backhauling Subsystem for 5G Heterogeneous Network [Klymash M., Huskov P., Kahalo I., Maksymyuk T.] : proceedings of the international conference [IEEE "Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics – 2015"], (Polyana-Svalyava, 24-27 лютого, 2015) – Polyana-Svalyava, 2015, P.481-483.

42. Deployment of Massive MIMO Systems for 5G Heterogeneous Networks [Maksymyuk T., Jo M., Gavronskiy V.] : proceedings of the international conference [“Advanced Information and Communication Technologies – 2015”], (Lviv, October, 2015) – P.58-61.

АНОТАЦІЯ

Максимюк Т.А. Підвищення енергетичної та спектральної ефективності гетерогенних мереж мобільного зв'язку. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі розроблення моделей та алгоритмів підвищення пропускної здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку в умовах обмежених спектральних ресурсів та нестационарних енергетичних параметрах мережі, а також розроблення моделей планування багаторівневої структури гетерогенної мережі на етапі проектування для забезпечення вимог до пропускної здатності при підтримці мінімального рівня інтерференції.

В роботі детально розглянуто вимоги до мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління та проаналізовано основні технічні рішення, спрямовані на задоволення цих вимог. Запропоновано методику вибору віконних функцій з ефективною локалізацією енергії в частотно-часовій площині з урахуванням взаємних впливів у гетерогенній мережі, що дає змогу підвищити енергетичну та спектральну ефективність радіоканалів, за рахунок зменшення інтерференції у гетерогенних мережах мобільного зв'язку.

Вирішено задачу ефективної інтеграції технології D2D у комірковій мережі шляхом розроблення енергетичної моделі конвергенції та методів координованого обслуговування, що дало змогу підвищити енергетичну та спектральну ефективність у мережі за рахунок усунення інтерференції між D2D доменами.

Запропоновано нову модель фрактального планування та прогнозування параметрів багаторівневої гетерогенної мережі мобільного зв'язку та розроблено на її основі метод балансування навантаження у мережі для підвищення її енергетичної ефективності.

Ключові слова: гетерогенні мережі, 5G, SINR, OFDM, D2D.

АННОТАЦИЯ

Максимюк Т.А. Повышение энергетической и спектральной эффективности гетерогенных сетей мобильной связи пятого поколения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет «Львовская политехника», Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи разработки моделей и алгоритмов повышения пропускной способности гетерогенных сетей мобильной связи в условиях ограниченных спектральных ресурсов и нестационарных энергетических параметрах сети, а также разработки моделей планирования многоуровневой структуры гетерогенной сети на этапе проектирования для обеспечения требований к пропускной способности при поддержке минимального уровня интерференции.

В работе подробно рассмотрены требования к сетям мобильной связи пятого поколения и проанализированы основные технические решения, направленные на удовлетворение этих требований. Предложена методика выбора оконных функций по эффективной локализации энергии в частотно-временной плоскости с учетом взаимных влияний в гетерогенной сети, что позволяет повысить энергетическую и спектральную эффективность радиоканалов, за счет уменьшения интерференции в гетерогенных сетях мобильной связи.

Решена задача эффективной интеграции технологии D2D в сотовые сети путем разработки энергетической модели конвергенции и методов координированного обслуживания, что позволило повысить энергетическую и спектральную эффективность в сети за счет устранения интерференции между D2D доменами.

Предложена новая модель фрактального планирования и прогнозирования параметров многоуровневой гетерогенной сети мобильной связи и разработан на ее основе метод балансировки нагрузки в сети для повышения ее энергетической эффективности.

Ключевые слова: гетерогенные сети, 5G, SINR, OFDM, D2D.

ABSTRACT

T. Maksymyuk. Increasing the energy and the spectral efficiency of fifth generation heterogeneous mobile networks. – As a manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Ph.D. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication networks and systems. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry for education and science of Ukraine, Lviv, 2015.

The thesis is devoted to solving an actual scientific task of developing models and algorithms for throughput increasing in heterogeneous mobile networks with conditions of limited spectral resources and developing models to design the multi-tier structure of heterogeneous network during network planning stage to support throughput requirements while ensuring the minimal level of interference.

Current stage and of development trends of mobile networks towards fifth generation standards has been studied in details. Main limiting factors for heterogeneous mobile networks deployment have been determined such as interference, handover complexity, necessity of centralized radioresources management, backhaul complexity and absence of existing models for structure-functional synthesis of multi-tier cellular infrastructure.

Existing technical solutions for 5G heterogeneous networks have been classified such as network densification, spectral aggregation, coordinated multi-point, D2D, utilization of millimeter waves, multi-antenna systems, software defined radio access networks, etc.

The model of heterogeneous network convergence, which takes into account the interference between co-channel D2D domains to support necessary signal-to-interference plus noise ratio and to increase the spectral efficiency of heterogeneous network. Using the multi-hop routes for D2D domains based on the proposed model of air interfaces convergence allows to decrease number of requests to base station that additionally increase the spectral efficiency by 4% due to less signaling data. Based on the proposed model the method of content replication was developed that allows to increase the throughput utilization efficiency by 7%.

The task of interference avoidance between D2D domains has been solved by introducing the developed coordinated multi-point method with joint transmission between cells and D2D domains. Based on this method an algorithm was developed and simulations have been conducted, that allows to increase the spectral efficiency by 83% and 29% for cells and D2D domains respectively.

The task of multi-tier heterogeneous network design has been solved by introducing fractal geometry model of cellular infrastructure. Developed model allows resource planning by calculations of scale-invariant geometric pattern. Based on the proposed model, the method of centralized dynamic reconfiguration of multi-tier cellular infrastructure that allows to improve process of spectral resources management and increase the spectral and energy efficiency of heterogeneous network.

Keywords: heterogeneous networks, 5G, SINR, OFDM, D2D.

Здано в набір 19.10.2015. Підписано до друку 23.10.2015.

Формат 60x90 1/16. Зам. № 3003.

Тираж 150 прим. Обсяг 0,9 друк. арк.

Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO
у друкарні ПП «Арк-сервіс».

79005, м. Львів, вул. Драгоманова, 16.