

## МОДЕЛІ КОНВЕРГЕНЦІЇ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5-го ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ D2D

**Maksymyuk T. A., Yaremko O. M., Pitsyk M. V. Convergence models of 5G heterogeneous mobile networks based on D2D technology.** Future 5G mobile networks have taken the challenge of 1000-fold capacity increasing comparing with existing LTE networks. The promising approach for 5G is network densification by introducing additional small cells and Device-to-Device (D2D) technology. In this article, we propose two models for D2D convergence in a cellular network environment. Geometry based convergence model takes into account physical distance between base station and corresponding user's device. To deal with SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio) maintenance, we propose an energy based convergence model, which takes into account path losses of D2D links and transmission power of end devices. We derive mathematical model with objective function to determine optimal transmission power for each device. The optimal criterion is maximizing of SINR values in the network. Due to the random walk behavior, some D2D domains, which utilize same spectrum, may be eventually close enough to create harmful interference to each other. We propose two different approaches for interference cancelation between D2D domains with assistance from base station. In coordinated reallocation, base station connects all devices within interfering cells, while eliminating all existing D2D connections. Another approach is joint transmission between base station and D2D with time division multiplexing (TDM). In this case, the TDM frame with duration  $T_s$  is divided into  $M$  subframes, where  $M$  is the number of interfering D2D domains. Each D2D has a predefined time slot for its own transmission through D2D link, while others D2D domains are served by base station. Simulation results have shown that proposed approaches increases spectral efficiency up to 83%.

**Keywords:** convergence, heterogeneous mobile networks, 5G, Device-to-Device, SINR, spectral efficiency, interference, coordinated reallocation

**Максимюк Т. А., Яремко О. М., Піцик М. В. Моделі конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління на основі технології D2D.** Мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління повинні забезпечити тисячократне збільшення спектральної ефективності. Дані вимоги можна забезпечити шляхом просторового ущільнення мережі та використання технології D2D, що дає змогу більш ефективно використовувати спектральні ресурси. Проте, така архітектура призводить до суттєвого зростання інтерференції між спільно-канальними передавачами. У статті запропоновано моделі конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі геометричних та енергетичних параметрів. Для уникнення інтерференції між динамічно-змінними D2D доменами, запропоновано методи координованої реконфігурації та узгодженого передавання у конвергентних мережах. Результати моделювання показують вигреш запропонованих методів з точки зору спектральної ефективності на 29% та 83% для D2D доменів та комірок, відповідно.

**Ключові слова:** конвергенція, мобільний зв'язок, гетерогенна мережа, 5G, Device-to-Device, SINR, спектральна ефективність, інтерференція, координована реконфігурація

**Максимюк Т. А., Яремко О. М., Піцик М. В. Модели конвергенции гетерогенных сетей мобильной связи 5-го поколения на основе технологии D2D.** Сети мобильной связи пятого поколения должны обеспечить тысячекратное увеличение спектральной эффективности. Данные требования можно обеспечить путем пространственного уплотнения сети и использования технологии D2D, что позволяет более эффективно использовать спектральные ресурсы. Однако, такая архитектура приводит к существенному росту интерференции между общеканальными передатчиками. В статье предложены модели конвергенции гетерогенных сетей мобильной связи на основе геометрических и энергетических параметров. Во избежание интерференции между динамично-переменными D2D доменами, предложены методы координированной реконфигурации и согласованной передачи в конвергентных сетях. Результаты моделирования показывают выигрыш предложенных методов с точки зрения спектральной эффективности на 29% и 83% для D2D доменов и сот, соответственно.

**Ключевые слова:** конвергенция, мобильная связь, гетерогенная сеть, 5G, Device-to-Device, SINR, спектральная эффективность, интерференция, координированная реконфигурация

**Вступ.** Мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління поставлені перед новими викликами. Зокрема, сумарна пропускна здатність мережі повинна бути підвищена у 1000 разів, забезпечуючи при цьому 100-кратне підвищення швидкості передавання даних для кінцевих користувачів. Очікується, що в мережах наступного покоління пропускна здатність для одного користувача повинна становити від 1 Гбіт/с до 10 Гбіт/с, в залежності від їх мобільності [1]. Враховуючи тенденцію стрімкого зростання кількості пристроїв у мережі, можна зробити висновок, що у майбутніх мережах густина абонентського навантаження у комірці суттєво зросте. Це в свою чергу потребує значного збільшення спектральних ресурсів мережі, оскільки для забезпечення зростаючих вимог до пропускної здатності необхідні значно ширші частотні смуги. Проте, спектральні ресурси є обмеженими, а проблема їхньої недостачі спостерігається вже зараз. Одним із варіантів подолання проблеми підвищення пропускної здатності мережі в умовах обмеженого спектру є ущільнення мережі. Ущільнення мережі поєднує агрегацію спектру та збільшення кількості комірок на одиницю площі. Агрегація спектру у поєднанні із новими методами передавання сигналів у радіоканалах дає змогу досягнути високої пропускної здатності для кінцевих користувачів. Просторове ущільнення дає змогу досягнути більшої продуктивності мережі за рахунок впровадження великої кількості малих комірок та використання технології міжтермінальної взаємодії D2D (Device-to-Device) для підвищення коефіцієнта перевикористання спектру [2]. Як показують попередні дослідження, комбінація просторової та спектральної агрегації дозволяє досягнути 1000-кратного підвищення пропускної здатності у комірковій мережі. Проте, в умовах недостатнього спектрального ресурсу, просторове ущільнення мережі обмежується зростаючим рівнем інтерференції, що не дає змогу необмежено підвищувати пропускну здатність гетерогенної мережі.

Інтерференція суттєво обмежує продуктивність мережі. Використання спільного частотного діапазону для гетерогенної мережі ускладнюється за рахунок динамічної природи міжтермінальних мереж, що спричиняє нестабільну інтерференційну картину [2]. Використання спільного частотного діапазону для коміркових та D2D мереж дає змогу підвищити спектральну ефективність мережі, проте вимагає нових підходів для боротьби з інтерференцією [3]. Невизначеність локалізації мобільних користувачів і, як наслідок, плаваючі межі доменів міжтермінальних мереж призводить до складної проблеми інтерференції у гетерогенних мережах (Рис. 1).

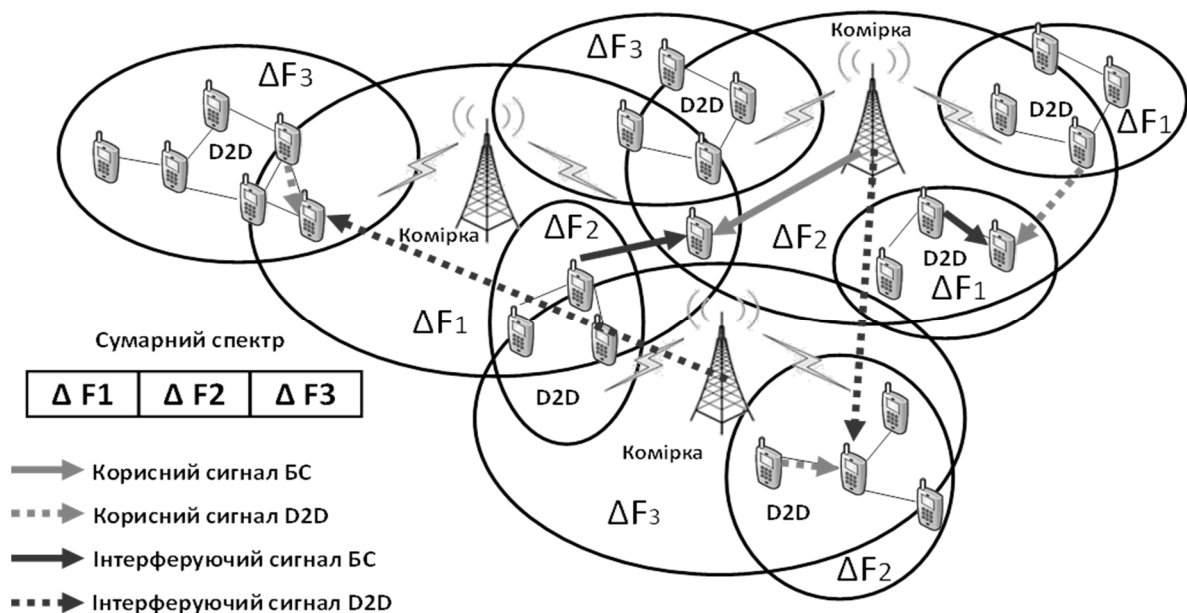


Рис. 1. Повторне використання спектру та інтерференційні завади в гетерогенній мережі з використанням технології D2D

Конвергенція гетерогенних мереж з використанням технології міжтермінальної взаємодії, дає змогу підвищити спектральну ефективність за рахунок більш оптимального передавання інформаційних потоків від базової станції до абонентських пристроїв. Дана технологія передбачає, що тільки обмежене число мобільних терміналів буде зв'язуватися безпосередньо з базовою станцією (БС). Ці термінали називаються вузлами з прямим підключенням (ВПП). Інші вузли підключаються до ВПП як до точки доступу. Такі термінали називаються вузлами з опосередкованим підключенням (ВОП). Кожен термінал може працювати як ВПП або ВОП в залежності від поточних умов у каналі зв'язку. Основна відмінність цього підходу від існуючих рішень когнітивного радіо полягає у принципах реалізації радіоінтерфейсу. Сучасні когнітивні мережі використовують неліцензований спектр технології Wi-Fi та Bluetooth для зв'язку між терміналами. Проте, цього недостатньо для нових мобільних мереж з високою пропускну здатністю у зв'язку із обмеженою кількістю доступних каналів. Тому, пропонується альтернативний розв'язок проблеми, який передбачає спільне використання спектрального діапазону для міжтермінального обміну та зв'язку між ВПП та БС [4]. ВПП безпосередньо отримує частотні ресурси від базових станцій. Абонент, який є фактичним власником даного ВПП використовує тільки частину інформаційного потоку для свого сеансу зв'язку. Решта інформації проходить транзитом через ВПП до всіх ВОП, використовуючи інші спектральні ресурси. В такому випадку використовується адаптивний метод повторного використання частотних ресурсів для того щоб уникнути інтерференції, покращити завадозахищеність та забезпечити належний рівень якості сприйняття послуг. Цей метод передбачає конвертування несучих частот у ВПП, для того щоб відокремити спектр передавання сигналів з базової станції до ВПП, від спектру який використовується в міжтермінальній мережі.

**Геометрична модель конвергенції D2D мереж з комірковою інфраструктурою.** Розглянемо випадок коли  $N$  вузлів рівномірно розподілені у круглій комірці з радіусом  $R$ . При  $N \rightarrow \infty$ , середня відстань від вузла до базової стації визначається шляхом зважування усіх радіусів та ділення їх суми на суму ваг цих радіусів:

$$E(R) = \frac{\int_0^R f(r) \cdot r \cdot dr}{\int_0^R f(r) \cdot dr}, \quad (1)$$

де  $f(r)$  – вагова функція, яка записується як:

$$f(r) = 2\pi r, \quad 0 < r < R. \quad (2)$$

Функція (1) зважує кожен радіус, шляхом знаходження відповідної довжини кола, яка йому відповідає. Підставляючи (2) у (1) отримаємо:

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

Відстань у (3) є середньою відстанню між випадковим абонентським пристроєм та базової станції комірки (Рис. 2.а). Канали D2D в свою чергу створюються без участі базової станції, як показано на Рис. 2.б.

Середня відстань між двома випадковими вузлами в межах одного кола з радіусом  $R$  визначається як:

$$E(r) = \frac{128R}{45\pi} \approx 0.954R. \quad (4)$$

З (4) випливає, що середня відстань між двома пристроями у міжтермінальній мережі залежить від відстані цієї мережі до коміркової базової станції. Тобто відстань між довільними пристроями в мережі є функцією від їх відстані до базової станції, що ускладнює процес конвергенції коміркового та міжтермінального зв'язку. При збільшенні відстані міжтермінальної мережі (D2D домену) від базової станції середня відстань між вузлами в D2D домені буде зростати. Взаємозв'язок середньої відстані між вузлами у D2D домені від відстані цього домену до базової станції показаний на Рис. 3.

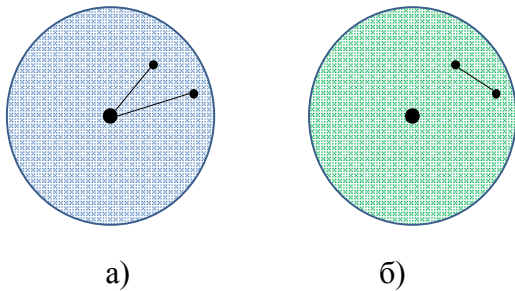


Рис. 2. Схематичне зображення відстаней: між базовою станцією та абонентами – а) та між двома абонентами – б)

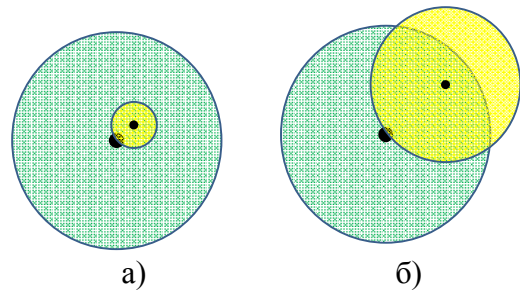


Рис. 3. Межі D2D домену в залежності від відстані до базової станції: при розташуванні абонента поблизу базової станції – а) та на межі дії комірки – б)

Як показано на Рис. 3, кращі можливості для D2D зв'язку виникають при збільшенні користувачів від центру комірки. Найпростішим варіантом для міжтермінального зв'язку є вибір найкоротшої відстані між вузлами. В такому випадку максимальна дальність таких каналів є меншою від  $R$ . При відстані більше від  $R$ , пріоритетним каналом стає канал до базової станції.

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

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

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

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

**Енергетична модель конвергенції D2D мереж з комірковою інфраструктурою.** Загасання сигналу – це втрата потужності сигналу при поширенні його у вільному просторі. Моделі поширення сигналу дають змогу оцінити загасання сигналу у каналі зв'язку як функцію від відстані між передавальною та приймальною антеною та інших параметрів. Для даного дослідження ми використовуємо модель поширення на основі логарифмічної відстані, яка дає змогу оцінити поширення сигналу у зонах з високою густиною абонентського навантаження [5]. Дана модель широко використовувалась у різних дослідженнях, і характерна простотою та достатньою точністю відтворення реального загасання сигналу у каналі зв'язку. За даною моделлю, загасання у безпроводному каналі зв'язку у міському середовищі визначається як:

$$PL(d) = PL_0 + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + x, [\text{дБ}], \quad (5)$$

при

$$PL_0 = 20 \lg\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right), [\text{дБ}], \quad (6)$$

де  $PL_0$  – загасання у вільному просторі для відстані  $d_0 < d$ ,  $d$  – відстань від передавальної антени до приймальної;  $n$  – експонента втрат у каналі;  $x$  – випадкова величина, яка описується гаусівським розподілом з нульовим середнім значенням і відображає випадковий характер відбивань при поширенні сигналу.

Для відображення різних типів каналів у гетерогенній конвергентній мережі, модифікуємо параметри моделі. Для макрокоміркових мереж  $d_0$  приймається рівним 1 км, для мікрокоміркових мереж – 100 м, і 1 м для безпроводних мереж у приміщеннях. Експонента втрат для вільного простору становить  $n=2$ . При наявності перешкод на шляху поширення сигналу, значення експоненти загасання становить  $n > 2$ , і зростає при збільшенні їх кількості. Для двопроменевої моделі поширення сигналу –  $n=4$ .

При фіксованих значеннях параметрів системи ми нехтуємо параметром відбивань  $x$ , модифікуючи формулу (5) до функції однієї змінної  $d$ :

$$PL(d) = 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + C, [\text{дБ}], \quad (7)$$

де  $C$  – константа, яка залежить від обраних параметрів системи, таких як розміри комірок, та експонента загасання.

На Рис. 4 показано відмінність між короткими та довгими D2D каналами.

Рис. 4.а показує випадок, при якому  $d_{D2D} < d_b$ , тобто рознесення D2D доменів є суттєво більшим від їх розмірів. У цьому випадку відношення потужності сигналу до шуму та інтерференції забезпечується на необхідному рівні.

На Рис. 4.б зображено ситуацію, при якій розмір D2D домену є співмірним з відстанню між цими доменами. У такому випадку сусідні D2D домени створюють значно більші інтерференційні завади, якщо вони функціонують у тих самих спектральних смугах.

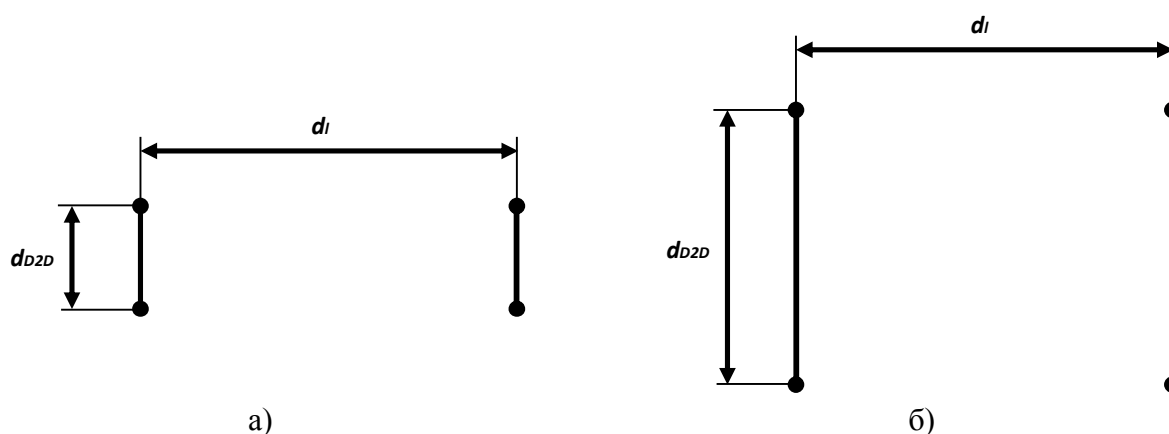


Рис. 4. Співвідношення розмірів D2D доменів до їх рознесення: для коротких – а) та довгих – б) D2D каналів

Розглянемо випадок коли два D2D канали працюють одночасно, використовуючи спільні частотні смуги (Рис. 5). На рисунку показано приклад встановлення D2D каналу між вузлами  $i$  та  $j$ , коли вузол  $i$  взаємодіє з вузлом  $j$ , при тому, що вузол  $k$  передає дані до вузла  $l$ . У такому випадку, відношення потужності сигналу до шуму та інтерференції для вузла  $i$  визначається наступним чином:

$$SINR_i = \frac{P_{R_{ij}}}{P_{R_{ik}} + N}, [\text{дБ}], \quad (8)$$

де  $P_{R_{ij}}$  – потужність сигналу отриманого від вузла  $i$  до вузла  $j$ ;  $P_{R_{ik}}$  – потужність інтерферуючого сигналу від вузла  $k$ ;  $N$  – потужність адитивного білого гаусівського шуму.



Рис. 5. Виникнення інтерференції між спільно-канальними D2D доменами.

Зауважимо, що в подальших результатах рівнем адитивного шуму можна знехтувати, оскільки при високій щільності конвергентних гетерогенних мереж, інтерференція постає основним обмежуючим фактором. Отже, формулу (8) можна переписати у вигляді:

$$SINR_i = P_{R_{ij}} - P_{R_{ik}}, [\text{дБ}], \quad (9)$$

при

$$P_{R_{ij}} = P_{T_j} - PL(d_{ij}), [\text{дБ}], \quad (10)$$

$$P_{R_{ik}} = P_{T_k} - PL(d_{ik}), [\text{дБ}], \quad (11)$$

де  $P_{T_j}$  і  $P_{T_k}$  – потужності передавання вузлів  $j$  та  $k$ , відповідно;  $PL(d)$  – втрати при поширенні сигналу;  $d_{ij}$  – відстань між приймачем та інтерферуючим передавачем.

Втрати потужності сигналу визначаються на основі формули (7). Підставляючи (10) та (11) у формулу (9), отримаємо [5]:

$$SINR_i = P_{T_j} - PL(d_{ij}) - P_{T_k} - PL(d_{ik}), [\text{дБ}]. \quad (12)$$

Припустимо, що максимальна дальність D2D каналу становить  $d_{D2Dmax}$ , а всі пристрої мають максимальну потужність передавання  $P_{Tmax}$ . Також встановимо мінімальні вимоги до співвідношення потужності сигналу до шуму та інтерференції на рівні  $SINR_i > SINR_{кр}$  (дБ). Якщо інтерферуючий пристрій  $k$  є надто близьким до вузла  $i$ , вимоги до значення SINR можуть не задовольнятися навіть, якщо вузол  $j$  буде передавати дані з максимальною потужністю  $P_{Tj} = P_{Tmax}$ . Тому, важливо визначити необхідні умови, при яких мінімальне значення відстані  $d_{min}$  між приймачем  $i$  та інтерферуючим передавачем  $k$ , буде задовольняти умові мінімального рівня інтерференції:

$$\{d_{ik} = d_{min}\} \rightarrow SINR_{кр} \leq SINR_i. \quad (13)$$

Отже, формула (12) модифікується наступним чином:

$$SINR_{кр} \leq SINR_i = P_{Tj} - PL(d_{ij}) - P_{Tk} - PL(d_{min}), [\text{дБ}]. \quad (14)$$

У найгіршому випадку, інтерферуючий вузол передає з повною потужністю  $P_{Tk} = P_{Tmax}$ . Тоді,  $SINR_{кр} = SINR_i$ . Підставляючи ці значення у формулу (14) отримуємо:

$$SINR_{кр} = P_{Tmax} - PL(d_{ij}) - P_{Tmax} - PL(d_{min}) = PL(d_{min}) - PL(d_{ij}), [\text{дБ}]. \quad (15)$$

Підставляючи (7) у (15) для розрахунку загасання потужності сигналу, отримуємо:

$$SINR_{кр} = 10n \lg(d_{min}) + C - (10n \lg(d_{ij}) + C), [\text{дБ}], \quad (16)$$

що після скорочення  $C$  та розв'язку логарифмів можна переписати як:

$$d_{min} = \left[ 10^{\frac{SINR_{кр}}{10n}} \right] d_{ij}, [\text{дБ}]. \quad (17)$$

Формула (17) відображає шукане співвідношення мінімальної необхідної відстані між спільноканальними D2D доменами для забезпечення необхідного рівня інтерференції між ними.

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

$$\left\{ \min(d_{ik}, d_{il}, d_{jk}, d_{jl}) \geq d_{min} \left( \max(d_{ij}, d_{kl}) \right) \right\} \rightarrow \{SINR_m \geq SINR_{кр}\}, \quad (18)$$

де  $m$  – може бути будь-яким вузлом серед  $\{i, j, k, l\}$ , а  $d_{min}$  визначається за формулою (17).

Розглянемо випадок для трьох одночасних D2D каналів з випадковою топологією представлений на Рис. 6.

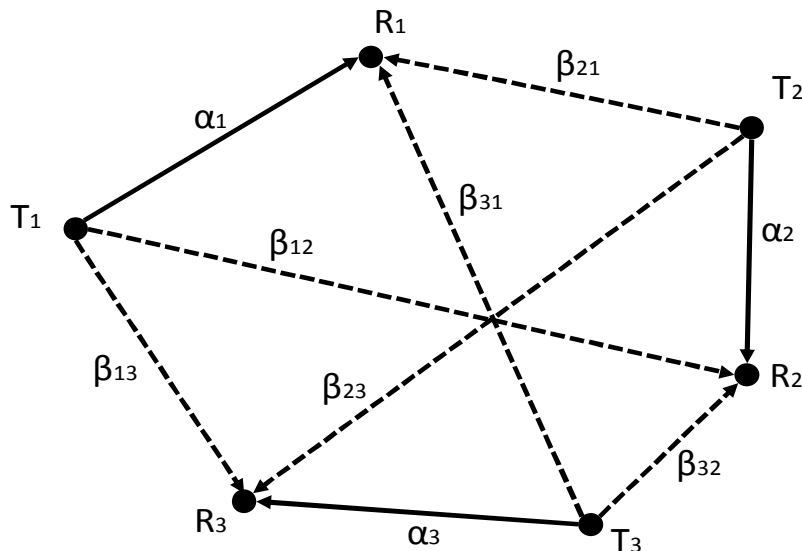


Рис. 6. Випадкова топологія мережі D2D та загасання сигналу при поширенні між вузлами

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

$$P_{R_i} = P_{T_i} \alpha_i, \quad (19)$$

де  $P_{R_i}$  – потужність сигналу на вході приймача  $R_i$ ;  
 $P_{T_i}$  – потужність передавача  $T_i$ ;  
 $\alpha_i$  – фактор загасання сигналу при поширенні.

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

$$I_{R_j, T_i} = P_{T_i} \beta_{ij}, \quad (20)$$

де  $I_{R_j, T_i}$  – потужність інтерферуючого сигналу від вузла  $T_i$  до вузла  $R_j$ ;  
 $P_{T_i}$  – потужність передавача  $T_i$ ;  
 $\beta_{ij}$  – фактор загасання сигналу при поширенні від вузла  $T_i$  до вузла  $R_j$ . Причому взаємозв'язок між фактором загасання  $\alpha$  (або  $\beta$ ) та втратами при поширенні сигналу  $PL$  визначається із наступного співвідношення:

$$\alpha = \beta = \frac{1}{PL}. \quad (21)$$

Для оптимізації потужності передавання у D2D мережі запишемо основні рівняння для співвідношення потужності сигналу до шуму та інтерференції для кожного каналу:

$$\left. \begin{aligned} SINR_1 &= \frac{P_{T_1} \alpha_1}{P_{T_2} \beta_{21} + P_{T_3} \beta_{31} + N} \geq SINR_{кр} \\ SINR_2 &= \frac{P_{T_2} \alpha_2}{P_{T_1} \beta_{12} + P_{T_3} \beta_{32} + N} \geq SINR_{кр} \\ SINR_3 &= \frac{P_{T_3} \alpha_3}{P_{T_1} \beta_{13} + P_{T_2} \beta_{23} + N} \geq SINR_{кр} \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

Рівняння (22) можна переписати у наступному вигляді:

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

З формули (23) можна легко перейти до матричного представлення:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 & -SINR_{кр} \beta_{21} & -SINR_{кр} \beta_{31} \\ -SINR_{кр} \beta_{12} & \alpha_2 & -SINR_{кр} \beta_{32} \\ -SINR_{кр} \beta_{13} & -SINR_{кр} \beta_{23} & \alpha_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{T_1} \\ P_{T_2} \\ P_{T_3} \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} SINR_{кр} N \\ SINR_{кр} N \\ SINR_{кр} N \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Запишемо матричне рівняння (24) у вигляді  $Ax < b$  шляхом заміни усіх знаків на протилежні:

$$\begin{pmatrix} -\alpha_1 & SINR_{кр} \beta_{21} & SINR_{кр} \beta_{31} \\ SINR_{кр} \beta_{12} & -\alpha_2 & SINR_{кр} \beta_{32} \\ SINR_{кр} \beta_{13} & SINR_{кр} \beta_{23} & -\alpha_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{T_1} \\ P_{T_2} \\ P_{T_3} \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} -SINR_{кр} N \\ -SINR_{кр} N \\ -SINR_{кр} N \end{pmatrix}. \quad (25)$$



Узагальнюючи рівняння (25) для довільної кількості вузлів  $M$ , отримаємо остаточну систему рівнянь для оптимізації потужності передавання абонентських пристроїв у конвергентній мережі з використанням D2D:

$$\begin{pmatrix} -\alpha_1 & SINR_{кр} \beta_{21} & SINR_{кр} \beta_{31} & \dots & SINR_{кр} \beta_{M1} \\ SINR_{кр} \beta_{12} & -\alpha_2 & SINR_{кр} \beta_{32} & \dots & SINR_{кр} \beta_{M2} \\ SINR_{кр} \beta_{13} & SINR_{кр} \beta_{23} & -\alpha_3 & \dots & SINR_{кр} \beta_{M3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SINR_{кр} \beta_{1M} & SINR_{кр} \beta_{2M} & SINR_{кр} \beta_{3M} & \dots & -\alpha_M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{T_1} \\ P_{T_2} \\ P_{T_3} \\ \vdots \\ P_{T_M} \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} -SINR_{кр} N \\ -SINR_{кр} N \\ -SINR_{кр} N \\ \vdots \\ -SINR_{кр} N \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Рівняння (26) 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 D2D взаємодії.

**Метод координованого обслуговування у конвергентних гетерогенних мережах з використанням D2D.** Основною проблемою для D2D є динамічна поведінка користувачів, що призводить до динамічно-змінної топології мережі. Звісно при створенні нових D2D з'єднань та вибору частоти для них, враховується існуюча інтерференційна картина в мережі. Проте, динамічна зміна позицій таких мереж призводить до того, що спільночастотні D2D домени можуть опинитися критично близько один до одного, що призведе до високого рівня інтерференції в таких мережах. В такій ситуації ефективність мережі суттєво знижується.

При координованому обслуговуванні кілька базових станцій узгоджено передають дані до одного користувача, взаємодіючи між собою через опорну транспортну мережу. Це дає змогу досягнути підвищення швидкості передавання та зменшення інтерференції між комірками [6]. Підвищення потужності сигналу та зменшення завад може бути досягнуто шляхом узгодженого формування діаграми спрямованості антенних решіток з використанням декількох передавальних антен та врахування взаємної інтерференції між користувачами.

Ми пропонуємо використання модифікованого методу координованого обслуговування, який передбачає узгоджене передавання між базовою станцією та ВПП для уникнення взаємних інтерференційних завад. Запропонований метод може бути використаний у гетерогенних мережах різного масштабу для планування та ортогоналізації ресурсів між різними рівнями комірок (наприклад, макро- і фемтокомірок) та кластеризації доменів всередині комірки для спільної обробки та координації різних типів технологій. У всіх цих випадках можна досягти підвищення ефективності використання частотних ресурсів та зменшення рівня інтерференційних завад.

Ми пропонуємо два способи уникнення інтерференції між комірковою інфраструктурою та D2D доменами: координована реконфігурація та узгоджене передавання (Рис. 7).

Як показано на Рис. 7, якщо дві спільно-каналні підмережі D2D наближаються одна до одної, між ними виникає інтерференція. Це призводить до зниження відношення  $SINR$  нижче критичного рівня, тобто:  $SINR_i < SINR_{кр}$ . Для того щоб уникнути інтерференції та забезпечити належний рівень пропускну здатності у гетерогенній мережі використовуємо критерій оптимальності енергетичних параметрів мережі:

$$\begin{cases} \max \left( \sum_i SINR_i \right), \forall i \in N, \\ \text{при } \min(SINR) \geq SINR_{кр}, \\ SINR = \{SINR_1, SINR_2, \dots, SINR_N\}, k \in N \end{cases}. \quad (27)$$

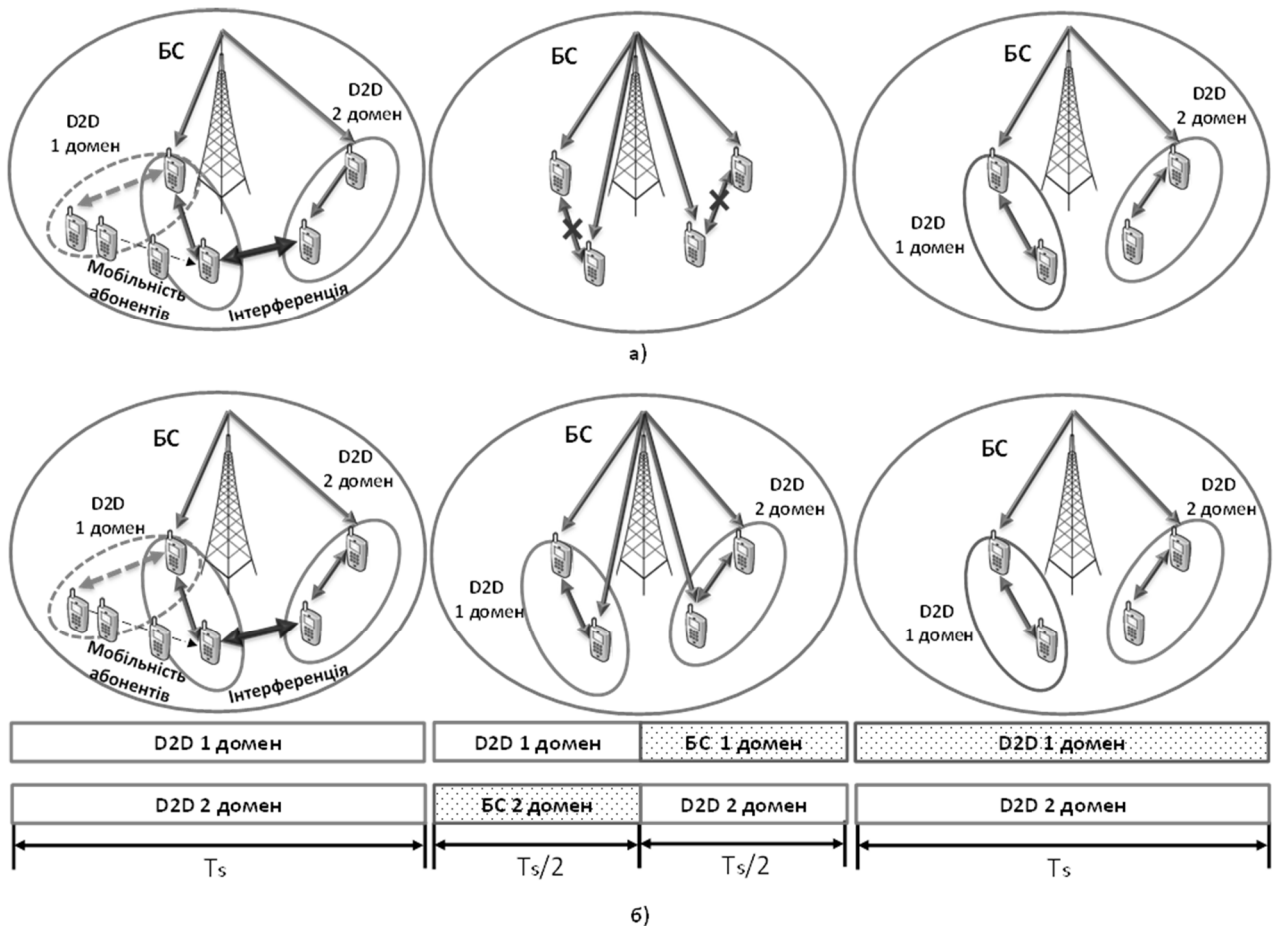


Рис. 7. Способи уникнення інтерференції у гетерогенних мережах: координувана реконфігурація – а) та узгоджене передавання – б)

У випадку координованої реконфігурації, базова станція бере на себе обслуговування усіх пристроїв, що призводить до розриву усіх між поточних термінальних з'єднань. Базова станція обслуговує усі пристрої до того моменту, поки міжтермінальні мережі не створяться наново, задовольнивши умови (18) та (27). Даний процес проілюстрований на Рис. 7.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. 7.б (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 (27) для інтерферуючих D2D доменів. Основною відмінністю між двома способами є те, що узгоджене передавання зберігає існуючі міжтермінальні зв'язки, в той час як координувана реконфігурація передбачає їх видалення. На практиці, обидва підходи можуть застосовуватись в залежності від поточної ситуації.

**Моделювання поведінки конвергентної гетерогенної мережі при використанні методу координованого обслуговування.** Оцінка ефективності запропонованих методів здійснюється на основі розробленої моделі даної системи в програмному пакеті Matlab R2015a. При моделюванні використовувались стандартизовані бібліотеки 3GPP (3rd Generation Partnership Project) LTE System Toolbox [7]. 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;
- критичне значення SINR:  $-6.2$  дБ.

На Рис. 8 показано функцію розподілу (CDF) відношення SINR у мережі для розглянутих схем координованого обслуговування (CoMP – Coordinated Multi Point). Як показано на Рис. 8.а, продуктивність значно підвищується за рахунок використання координованої реконфігурації. Порівнюючи базові сценарії на Рис. 8.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 міжтермінальних мереж.

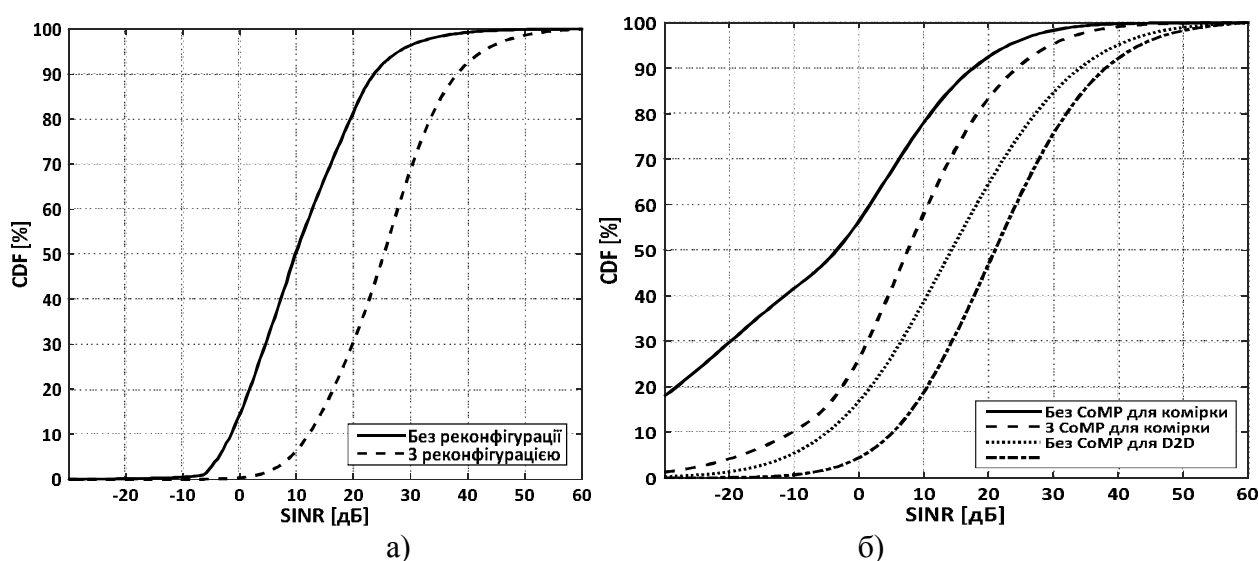


Рис.8. Співвідношення сигнал/шум у гетерогенній мережі:  
при координованій реконфігурації – а) та узгодженому передаванні – б)

Використання запропонованого способу узгодженого передавання, дає змогу підвищити ефективність мережі за рахунок підвищення рівня SINR у мережі, як показано на рис. 8.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 виграшу у спектральній ефективності ми аналізуємо кількість користувачів, які отримують значення SINR не менше ніж порогове значення  $\varphi = -6.2$  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 виграшу в ефективності використання спектру до 83% для коміркової мережі та до 29% для D2D доменів.

**Висновок.** У статті запропоновано ряд моделей та методів для конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління з використанням технології D2D. Розглянуто геометричні та енергетичні підходи для реалізації конвергентних гетерогенних

мереж п'ятого покоління. Запропоновано математичну модель для оптимізації енергетичних параметрів мережі мобільного зв'язку, таких як потужності передавання мобільних пристроїв та відношення потужності сигналу до шуму та інтерференції. Для уникнення інтерференції у гетерогенних мережах з динамічною топологією, запропоновано методи координованої реконфігурації та узгодженого передавання між базовими станціями та D2D доменами. Результати моделювання показують вигоду запропонованих методів на 83% для коміркової мережі та на 29% для D2D доменів, з точки зору спектральної ефективності. Отримані значення підтверджують ефективність впровадження запропонованих рішень в гетерогенних мережах мобільного зв'язку п'ятого покоління.

### **Література**

1. Bhushan N. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G / N. Bhushan, Li Junyi, D. Malladi et al // IEEE Communications Magazine. – USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. – Vol. 52, No. 2. – P. 82-89.
2. Doppler K. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks / K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting et al. // IEEE Communications Magazine. – USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. – Vol. 47, No. 12. – P.42-49.
3. Jo M. Device-to-Device (D2D) Based Heterogeneous Radio Access Network Architecture for Mobile Cloud Computing / M. Jo, T. Maksymuk, B. Strykhalyuk, C. Cho // IEEE Wireless Communications, 2015. – Vol. 12, No. 3.
4. Климаш М. М. 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». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2013. – № 766. – С. 65-71.
5. Yaremko O. The optimal power control method in multiuser cellular networks / O. Yaremko, B. Strykhalyuk, T. Maksymuk, O. Lavriv, D. Kozhurov // ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes, Krakow. – 2013. – Vol. 2, No.1. – P. 63-67.
6. Jo M. A Survey of Converging Solutions for Heterogeneous Mobile Networks/ M. Jo, T. Maksymuk, R.L. Batista, T.F. Maciel, A.L.F. de Almeida, M. Klymash // IEEE Wireless Communications. – 2014. – Vol. 21, No. 8. – P. 54-62.
7. Nohrborg M. LTE Overview 3GPP. A Global Initiative. The Mobile Broadband Standard / M. Nohrborg. – August 2013.

### **Автори статті**

**Максимюк Тарас Андрійович**, аспірант кафедри телекомунікацій,  
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів. Тел. +380 63 329 91 17,  
E-mail: taras.maksymuk@gmail.com,

**Яремко Олег Миколайович**, старший викладач кафедри телекомунікацій,  
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів. Тел. +380 91 916 56 15.  
E-mail: oleg-yaremko@yandex.ru

**Піцик Мар'яна Вікторівна**, асистент кафедри телекомунікацій,  
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів. Тел. +380 63 489 28 06,  
E-mail: mariana\_\_p.m.v.9@ukr.net

Дата надходження в редакцію: 20.08.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М. М. Климаш