

УДК 621.396

Максимюк Т. А., аспірант. Тел. +380633299117. E-mail: taras.maksymyuk@gmail.com

Брич М. В., аспірант. Тел. +380934602865. E-mail: brych@ua.fm

Климаш М. М., доктор техн. наук, проф. Тел. +380504319807. E-mail: mklimash@polynet.lviv.ua
(Національний університет «Львівська політехніка»)

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ФРАКТАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ

Maksymyuk T. A., Brych M. V., Klymash M. M. Optimization of heterogeneous mobile network paramemers based on the fractal geometry model. High base stations density results in significant interference that decreases the efficiency of heterogeneous network. Moreover, the complexity of multi-tier heterogeneous networks does not allow effective planning of cellular and backhaul infrastructure. In case of high users quantity and their relatively high mobility the large variation of traffic intensity in small cells is observed. Thus, the network planning and load balancing is complicated due to various opportunities for user to get connection that requires centralized control plane for making the decision of optimal spectrum allocation. Taking into account the complex multi-tier structure, geometric planning and load balancing approaches are of great interest. In this paper, the new approach for structural synthesis of multi-tier cellular infrastructure is proposed based on the fractal geometry. We have considered main issues, which influence on network characteristics such as spectrum reuse, interference and utilization of available spectrum. We have determined the optimal balance between cellular and wireless backhaul spectrum. Furthermore, the method of adaptive dynamic radio access network reconfiguration is proposed for the case of high traffic variability. The cases of cells overloading and underutilization have been studied and the equation for signal-to-interference plus noise ratio has been derived.

Keywords: 5G, heterogeneous network, fractal geometry model, spectrum reuse, interference

Максимюк Т. А., Брич М. В., Климаш М. М. Оптимізація параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі. Запропоновано фрактальну геометричну модель для розрахунку та оптимізації параметрів багаторівневої коміркової інфраструктури гетерогенної мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління. Розроблено метод адаптивної динамічної реконфігурації мережі радіодоступу з централізованим управлінням для балансування навантаження та оптимізації енергетичних та спектральних параметрів мережі.

Ключові слова: 5G, гетерогенна мережа, фрактальна геометрична модель, повторне використання спектру, інтерференція

Максимюк Т. А., Брыч Н. В., Климаш М. Н. Оптимизация параметров гетерогенных сетей мобильной связи на основе фрактальной геометрической модели. Предложена фрактальная геометрическая модель для расчета и оптимизации параметров многоуровневой сотовой инфраструктуры гетерогенной сети мобильной связи пятого поколения. Разработан метод адаптивной динамической реконфигурации сети радиодоступа с централизованным управлением для балансировки нагрузки и оптимизации энергетических и спектральных параметров сети.

Ключевые слова: 5G, гетерогенная сеть, фрактальная геометрическая модель, повторное использование спектра, интерференция

Вступ. Інтенсивний розвиток технологій в останні роки призвів до появи великої кількості багатofункціональних 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 перевищить населення планети. Тому, протягом останніх двох років активно ведуться дослідження у напрямку розробки мереж мобільного зв'язку наступного покоління, названих мережами 5G. 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 [1, 2]. 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 недостатності спостерігається вже зараз. Одним із варіантів подолання проблеми підвищення пропускної

здатності мережі в умовах обмеженого спектру є впровадження гетерогенної багаторівневої архітектури мережі мобільного зв'язку [3].

Переваги концепції гетерогенних мереж мобільного зв'язку очевидні: підвищення коефіцієнту використання спектру, значно вища пропускна здатність радіоканалів, простота впровадження нових базових станцій та легкість масштабування. Однак, гетерогенні мережі характерні рядом недоліків. Зокрема, висока густина базових станцій спричиняє значно вищий рівень інтерференції у мережі, знижуючи її ефективність, а складність багаторівневих гетерогенних мереж не дає змогу ефективно планувати інфраструктуру базових станцій та їх опорної транспортної системи [4, 5]. Крім того, відсутність єдиної площини керування знижує ефективність гетерогенної мережі в умовах значної варіації абонентського навантаження за рахунок неефективного використання пропускної здатності комірок гетерогенної мережі [6]. Гетерогенні мережі характерні більш частими хендоверами у зв'язку із малим радіусом комірок. При великій кількості абонентів та їх відносно великій мобільності спостерігається висока варіація навантаження у комірках. У звичайних коміркових мережах мобільного зв'язку, де можливості підключення абонента обмежені трьома базовими станціями, планування та балансування спектральних ресурсів можна ефективно здійснювати на основі існуючої ієрархічної системи керування. Планування та балансування навантаження у складних гетерогенних мережах із багаторівневою архітектурою ускладнюється, оскільки практично у будь-якій точці мережі абонент може вибрати з десятків можливих варіантів підключення, що потребує єдиної централізованої площини керування та прийняття рішення стосовно розподілу частотних ресурсів. Із урахуванням складності багаторівневої структури, в гетерогенних мережах мобільного зв'язку особливого значення набувають геометричні моделі планування та розроблені на їх основі алгоритми балансування навантаження.

В даній статті пропонується новий підхід до структурного синтезу покриття гетерогенних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління з використанням фрактальної геометричної моделі та централізованої площини керування мережею радіодоступу.

Фрактальна модель топологічної структури багатошарової гетерогенної мережі мобільного зв'язку. Для підвищення ефективності процесу розрахунку параметрів багатошарової гетерогенної мережі на етапі проектування, а також для ефективного балансування навантаження та мінімізації пропонується фрактальна модель структури гетерогенної мережі, яка представлена на Рис. 1.

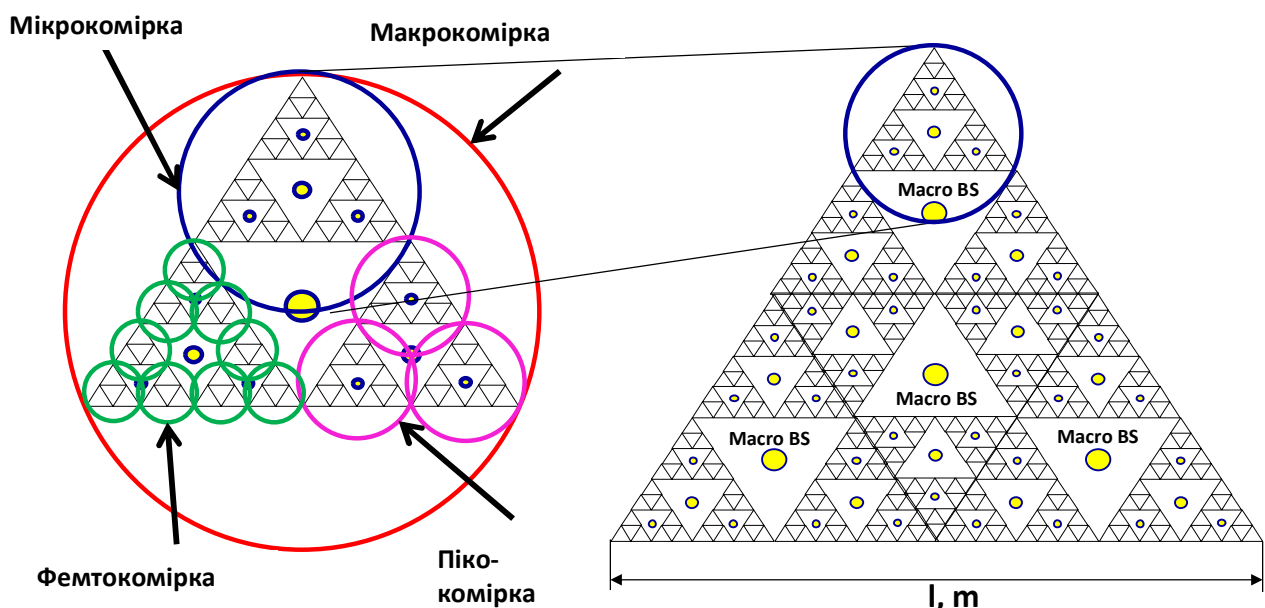


Рис. 1. Гнучке планування покриття на основі фрактальної моделі трикутника Серпінського

Як показано на Рис. 1, межа комірки визначається як коло описане навколо довільного трикутника при умові, що базова станція розміщена у центрі цього кола. При розрахунку покриття, базова фігура визначає позицію макрокомірки, в той час як фігури наступних ітерацій визначають позиції малих комірок відповідного рівня. Важливою перевагою гетерогенних мереж мобільного зв'язку є те, що вони дозволяють підвищити ефективність використання спектральних ресурсів за рахунок територіально рознесених спільночастотних мікро-, піко- та фемтокомірок, які функціонують в зоні покриття макрокомірки.

На відміну від однорівневих мереж, розрахунок повторного використання частот у багаторівневих гетерогенних мережах є складною задачею, оскільки необхідно одночасно враховувати покриття та розподіл спектру для різних типів комірок у мережі [8-10]. Додатковою складністю є те, що у гетерогенних мережах присутні два види інтерференції: внутрішньорівнева та міжрівнева, що потребує вдосконалення існуючих методів планування спектру. Крім того, при щільному впровадженні передавальних станцій, суттєво ускладнюється завдання побудови опорної транспортної інфраструктури, що потребує нових підходів до її побудови. Прокладання оптичної кабельної мережі до кожної передавальної станції є надзвичайно складним завданням і потребує значних капітальних затрат.

В даний час, провідні компанії на ринку мобільного зв'язку активно працюють над безпроводною інфраструктурою опорної мережі, яка б дала змогу швидко та ефективно підключати нові передавальні станції або змінювати позиції існуючих, без значних витрат. Проте, це потребує додаткових спектральних ресурсів та нових методів передавання даних у безпроводному каналі із високою спектральною ефективністю. Крім того, при проектуванні безпроводної транспортної інфраструктури необхідно враховувати інтерференцію між різними транспортними каналами, а також між транспортними каналами та каналами мобільних користувачів. Тому, повторне використання частот для безпроводної опорної транспортної мережі також потребує детального розрахунку та планування.

На Рис. 2 показано запропоновану модель повторного використання частот для спектру коміркової мережі.

Для дворівневої структури коміркової мережі для базового шаблону немає повторного використання частот, оскільки смуги F1, F2, F3 використовуються по одному разу для мікрокомірок, і смуга F4 використовується для макрокомірки.

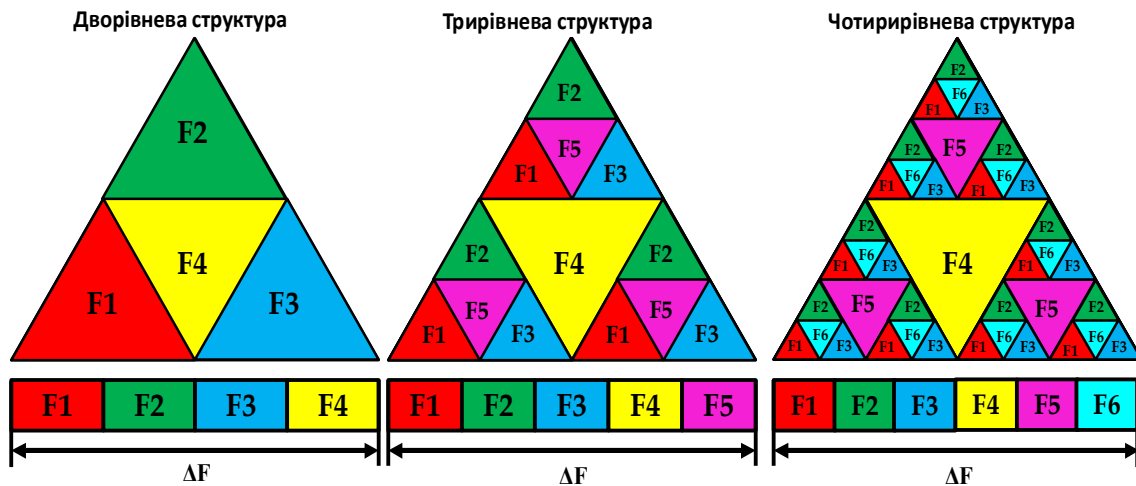
Для трирівневої гетерогенної структури смуги F1, F2, F3, F5 використовуються по три рази для рознесених мікрокомірок та піко комірок, в той час як смуга F4 використовується для макрокомірок.

Для чотирирівневої гетерогенної структури частотні смуги F1, F2, F3, F6 використовуються дев'ять раз для несусідніх піко та фемтокомірок, F5 використовується три рази для мікрокомірок, і F4 – для макрокомірки відповідно.

На Рис. 3 показано модель повторного використання частот для опорної транспортної інфраструктури. Для того щоб унеможливити інтерференцію між транспортними каналами та реалізувати більш гнучку транспортну інфраструктуру ми пропонуємо використовувати багаторангові шляхи для транспортних каналів. Для дворівневої гетерогенної структури використовується однорангова транспортна мережа без повторного використання частот. Смуги F1', F2', F3' використовуються по одному разу для забезпечення транспортних каналів до мікрокомірок.

Для дворівневої гетерогенної інфраструктури смуги F1', F2', F3', F5' використовуються по три рази для забезпечення транспортних каналів мікрокомірок та пікокомірок.

Для чотирирівневої гетерогенної інфраструктури смуги F1', F2', F3', F6' використовуються по дев'ять разів для транспортних каналів пікокомірок та фемтокомірок, в той час як смуга F5' використовується три рази для транспортних каналів мікрокомірок.



Сумарна доступна смуга: $\Delta F = 60 \text{ МГц}$

Доступна смуга для дворівневої структури = $F1 + F2 + F3 + F4 = 15 + 15 + 15 + 15 = 60 \text{ МГц}$,

($F1 = F2 = F3 = F4 = 15 \text{ МГц}$)

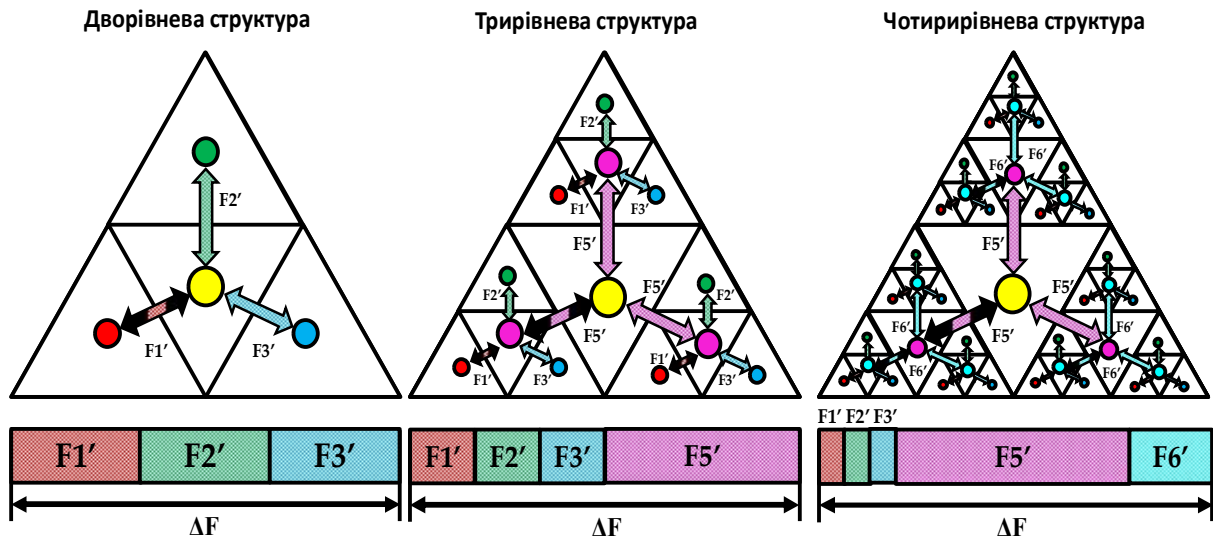
Доступна смуга для трирівневої структури = $3 \cdot F1 + 3 \cdot F2 + 3 \cdot F3 + 3 \cdot F5 + F4 = 3 \cdot 12 + 3 \cdot 12 + 3 \cdot 12 + 3 \cdot 12 + 12 = 156 \text{ МГц}$,

($F1 = F2 = F3 = F4 = F5 = 12 \text{ МГц}$)

Доступна смуга для чотирирівневої структури = $9 \cdot F1 + 9 \cdot F2 + 9 \cdot F3 + 9 \cdot F6 + 3 \cdot F5 + F4 = 9 \cdot 10 + 9 \cdot 10 + 9 \cdot 10 + 9 \cdot 10 + 3 \cdot 10 + 10 = 400 \text{ МГц}$,

($F1 = F2 = F3 = F4 = F5 = F6 = 10 \text{ МГц}$)

Рис. 2. Фрактальна модель повторного використання частот в багаторівневій гетерогенній мережі для коміркового спектру



Сумарна доступна смуга: $\Delta F = 90 \text{ МГц}$

Доступна смуга для дворівневої структури = $F1' + F2' + F3' = 30 + 30 + 30 = 90 \text{ МГц}$,

($F1' = F2' = F3' = 30 \text{ МГц}$)

Доступна смуга для трирівневої структури = $3 \cdot F1' + 3 \cdot F2' + 3 \cdot F3' + 3 \cdot F5' = 3 \cdot 15 + 3 \cdot 15 + 3 \cdot 15 + 3 \cdot 45 = 270 \text{ МГц}$,

($F1' = F2' = F3' = 15 \text{ МГц}$, $F5' = 45 \text{ МГц}$)

Доступна смуга для чотирирівневої структури = $9 \cdot F1' + 9 \cdot F2' + 9 \cdot F3' + 9 \cdot F6' + 3 \cdot F5' = 9 \cdot 5 + 9 \cdot 5 + 9 \cdot 5 + 9 \cdot 15 + 3 \cdot 60 = 450 \text{ МГц}$,

($F1' = F2' = F3' = 5 \text{ МГц}$, $F5' = 60 \text{ МГц}$, $F6' = 15 \text{ МГц}$)

Рис. 3. Фрактальна модель повторного використання частот в багаторівневій гетерогенній мережі для спектру транспортної мережі

Метод динамічної реконфігурації мережі на основі фрактального аналізу багаторівневої гетерогенної структури. Важливим аспектом при експлуатації гетерогенної мережі є адаптивність до варіації абонентського навантаження [6]. Для цього ми пропонуємо динамічну реконфігурацію з централізованим керуванням. Реконфігурація гетерогенної мережі є надзвичайно складним завданням у зв'язку з великою кількістю змінних параметрів у мережі. Як наслідок, абонентський термінал має багато ступенів вільності, оскільки він може обслуговуватись макро-, мікро-, піко-, або фемтокомірною в залежності від потужності сигналу та доступних спектральних ресурсів. Важливим фактором є завантаженість малих комірок гетерогенної мережі.

В ряді випадків спостерігається, що коефіцієнт використання пропускну здатності малих комірок може бути достатньо низьким. В такому випадку, така комірка є неефективною і потребує реконфігурації. Ми розглядаємо два варіанти реконфігурації комірок у гетерогенній мережі: активація/деактивація та зміна розміру. Активація додаткової комірки потрібна у зонах, де густина абонентів та, відповідно, вимоги до пропускну здатності стрімко зростають. Деактивація використовується при надзвичайно низькому рівні завантаженості, коли комірка є неефективною, а всі її абоненти можуть бути легко передані на обслуговування сусіднім коміркам або макрокомірці з використанням механізмів горизонтального чи вертикального хендоверу. Відповідно, мережна інфраструктура повинна бути надлишковою, для того щоб підтримувати динамічну активацію/деактивацію комірок. Більш плавним та гнучким механізмом є технологія адаптивної зміни розміру комірок для того щоб балансувати навантаження у гетерогенній мережі. Технологія адаптивної зміни розміру комірок функціонує на основі зміни потужності передавання базової станції, що дозволяє штучно збільшувати або зменшувати завантаженість комірки шляхом захоплення більшої кількості абонентів, у періоди з низьким навантаженням, або “відрізання” частини абонентів на краю малої комірки, у періоди коли комірка перевантажена.

Завдяки використанню масштабно-інваріантної структури мережі, фрактальний аналіз дозволяє підлаштовуватись під будь-яку мережну топологію, відповідно змінюючи роздільну здатність базового шаблону. Проте, динамічна реконфігурація потребує централізованого програмного керування гетерогенною мережною інфраструктурою. Ми пропонуємо метод динамічної реконфігурації гетерогенної мережі на основі програмно-конфігурованої мережі SoftRAN (Software Defined Radio Access Network) [3]. У мережах SoftRAN центральний контролер виконує функції моніторингу завантаженості усіх малих комірок гетерогенної мережі та визначає необхідність їх реконфігурації. Взаємодія контролера з малими комірками здійснюється через базову станцію макрокомірки. Запропонований метод динамічної реконфігурації визначає ефективні параметри мережі на основі моніторингу внутрішньорівневої та міжрівневої інтерференції, завантаженості каналів та мобільності абонентів. Запропонований метод функціонує за описаним нижче алгоритмом.

Крок 1. На даному етапі проводиться генерація фрактального шаблону, який відтворює структуру покриття багаторівневої гетерогенної мережі з належною точністю. За рахунок самоподібної структури фрактальний шаблон може масштабуватись до тих пір поки його роздільна здатність (найменший трикутник або квадрат) не дозволить наближено відтворити позиції усіх комірок мережі. Генерація фрактального шаблону на основі трикутника Серпінського здійснюється з використанням системи афінних перетворень базового трикутника:

$$\begin{aligned} f_1\left(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}\right) &= \begin{bmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ f_2\left(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}\right) &= \begin{bmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \end{bmatrix} \\ f_3\left(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}\right) &= \begin{bmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/4 \\ \sqrt{3}/4 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

Перетворення (1) ітеративно повторюються до тих пір поки не буде виконана умова:

$$\min(d) = l_i, \quad (2)$$

де d – відстань між двома довільними передавальними станціями, l_i – довжина сторони найменшого елемента фрактального шаблону.

Крок 2. Після досягнення необхідної роздільної здатності фрактального шаблону, здійснюється його підлаштування під реальну мережну структуру. Ця процедура проводиться ітеративно починаючи з більших комірок до менших поки не буде досягнуто максимального наближення мережної структури. В результаті отримується фрактальна модель мережі.

Крок 3. Моніторинг показників функціонування та виявлення проблем в гетерогенній мережі. Якщо продуктивність мережі задовольняє вимоги до показників ефективності, даний крок повторюється. Якщо виявлено перевантаження деяких комірок, переходимо до кроку 4.1. Якщо завантаженість деяких комірок є нижче порогового рівня, тоді переходимо до кроку 4.2.

Крок 4.1. Проблема перевантаження комірок може бути вирішена трьома способами. Причому, кожен із способів може використовуватись як окремо так і у поєднанні з іншими двома способами, залежно від поточних умов. Розглянемо дані способи більш детально:

1. Перегрупування смуг спектру з недовантажених комірок у перевантажені без зміни структури мережі. Це дає змогу вирівняти навантаження між комірками, проте може погіршити інтерференційну картину в мережі за рахунок зменшення відстані між спільноканальними комірками.

Інтерференція для i -го користувача визначається за наступною формулою:

$$SINR_i = \frac{P_i h_{x_i} - PL_i}{\sum_{j=1}^K (P_j h_{x_j} - PL_j) + \sigma^2}, \quad (3)$$

де P_i – потужність передавання обслуговуючої базової станції;

P_j – потужність передавання інтерферуючої базової станції;

h_x – реакція каналу зв'язку;

σ^2 – константа адитивного білого Гаусівського шуму

PL – загасання потужності сигналу в каналі між передавачем та приймачем:

$$PL_i = 10 \log \left(\frac{4\pi d_i}{\lambda_i} \right), \quad (4)$$

де d_i – відстань від передавальної станції абонентського терміналу;

λ_i – довжина хвилі.

При використанні такого способу, сумарна пропускна здатність комірки не змінюється оскільки смуги були перерозподілені. Проте, при перенесенні частотних смуг зменшуються відстані між спільноканальними комірками, що призводить до зниження енергетичної ефективності і, як наслідок, погіршення якості обслуговування користувачів. Для вирівнювання інформаційної картини в мережі, переходимо до кроку 5.

2. Перегрупування структури мережі без перерозподілу спектру. Дана процедура здійснюється шляхом зменшення радіусу перевантажених комірок та відповідного збільшення радіусу недовантажених комірок. Це дає змогу ефективно перерозподілити навантаження у мережі. Проте, зменшення зони дії малої комірки часто призводить до примусового хендверу користувачів на обслуговування макрокоміркою, що може призвести

до погіршення якості обслуговування. При використанні такого способу, загальна пропускна здатність мережі не змінюється, проте змінюється інтерференційна картина, у зв'язку із зміною потужності передавання базових станцій. Для вирівнювання інтерференційної картини переходимо до кроку 5.

Крок 4.2. Детальний аналіз недовантажених зон та прийняття рішення для перерозподілу ресурсів з використанням наступних трьох способів:

1. Перегрупування смуг спектру із комірок з завантаженістю нижче порогового рівня. Дана процедура проводиться в три етапи. Спочатку, спектральні ресурси недовантаженої комірки перерозподіляються між іншими комірками. На другому етапі здійснюється примусовий хендвер абонентів, які обслуговуються даною коміркою, на обслуговування базової станції. Після цього, комірка деактивується. Якщо кілька сусідніх комірок є недовантаженими, тоді їх можна деактивувати, і замінити на одну комірку, яка покриє зону обслуговування усіх трьох. Відповідно сумарна пропускна здатність мережі знизиться, а також знизиться рівень інтерференції у гетерогенній мережі. Вирівнювання інтерференції проводиться у кроці 5.

2. Перегрупування структури мережі та перерозподіл спектральних ресурсів з малих комірок у макрокомірку. Ця процедура проводиться шляхом збільшення розміру недовантажених комірок та подальшого перегрупування спектральних смуг. Відповідно, надлишкові комірки деактивуються, що дає змогу знизити рівень інтерференції у мережі. Вирівнювання інтерференції проводиться у кроці 5.

3. Перегрупування надлишкових спектральних смуг з малих комірок до макрокомірки. Дана процедура знижує сумарну пропускну здатність мережі, за рахунок нижчого коефіцієнту повторного використання частот. Проте, це дає змогу знизити рівень інтерференції у мережі шляхом примусового хендверу абонентів з низьким SINR з малих комірок у макрокомірку. Вирівнювання інтерференції проводиться у кроці 5.

Крок 5. Попередні кроки не забезпечують ефективну реконфігурацію мережі у повній мірі, оскільки вони враховують лише вимоги до пропускної здатності та балансують навантаження враховуючи лише кількісні показники перегрупування спектру. До якісних показників спектру відносяться частоти несучих коливань каналів зв'язку. Для того щоб забезпечити ефективний перерозподіл частотних каналів необхідно виконати умову:

$$\max \left(\sum_i SINR_i \right) = \max \left(\sum_i \frac{P_i h_{x_i} - PL_i}{\sum_{j=1}^K (P_j h_{x_j} - PL_j) + \sigma^2} \right), \quad (5)$$

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.

Даний крок повторюється ітеративно, шляхом зміни номінальних значень несучих частот у комірках, поки не буде виконана умова (5), після чого алгоритм повертається до кроку 2. Приклад роботи запропонованого методу показаний на Рис. 4.

На Рис. 4.а, показано базову структуру гетерогенної мережі, яка складається з макрокомірки, однієї мікрокомірки, трьох піко комірок та трьох фемтокомірок. Розглянемо ситуацію, коли мікрокомірка (затінена область на Рис. 4.а) є перевантаженою. В такому

випадку, структура мережі змінюється шляхом зменшення радіусу перевантаженої пікокомірки та відповідного збільшення радіусів сусідніх недовантажених комірок. Відповідно, це тягне за собою ланцюгову реакцію зміни розміру інших комірок у заданій області, з відповідним перегрупуванням спектральних ресурсів. Альтернативним рішенням є зміна перевантаженої комірки трьома меншими комірками, що збільшить наявні спектральні ресурси в перевантаженій зоні мережі (Рис.4.в).

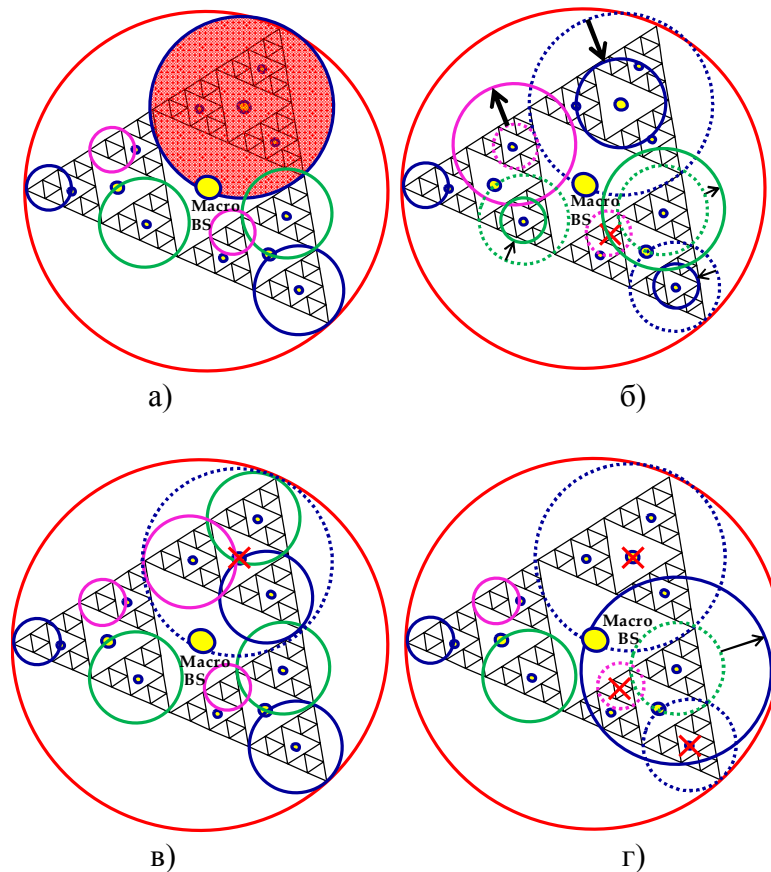


Рис. 4. Реконфігурація мережі для балансування енергетичної та спектральної ефективності:
а) – вихідна структура; б) – реконфігурація структури мережі шляхом зміни радіусу комірок;
в) – реконфігурація структури мережі шляхом збільшення кількості комірок;
г) – реконфігурація структури мережі шляхом збільшення кількості комірок.

Тепер розглянемо випадок, коли мікрокомірка має завантаженість нижче порогового значення. В такому випадку, спектральні ресурси цієї комірки можуть бути перерозподілені між сусідніми комірками та макрокоміркою. Після цього необхідно здійснити примусовий хендовер абонентів, з метою деактивації мікрокомірки та відповідного перегрупування структури мережі як показано на Рис. 4.г.

Моделювання характеристик гетерогенних мереж мобільного зв'язку. Задача ефективного розподілу ресурсів не може бути вирішена у повній мірі без врахування густини абонентського навантаження, інтенсивності трафіку та співвідношення сигналу до шуму та інтерференції у цільовій зоні обслуговування мережі мобільного зв'язку. Моделювання проводилось для зони обслуговування розміром 1000×1000 метрів і таких параметрів [11]:

- параметр Пуассонівського точкового процесу для абонентів у зоні – 1000;
- потужність передавання базової станції макрокомірки – 45 дБм;
- потужність передавання базової станції пікокомірки – 30 дБм;
- потужність передавання базової станції фемтокомірки – 20 дБм;

- порогів рівень чутливості приймача – -90 дБм;
- смуга пропускання – 100 МГц;
- спектральна ефективність – 5 біт/с/Гц;
- конфігурація антенної системи – кругова;
- модель поширення сигналу – COST-232.

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

На Рис. 5 показано результати моделювання співвідношення сигналу до шуму/інтерференції (SINR) та сумарної пропускної здатності для різних рівнів гетерогенної мережі. Для спрощення процесу моделювання прийнято, що уся топологія є однорівневою, тобто враховується лише внутрішньорівнева інтерференція.

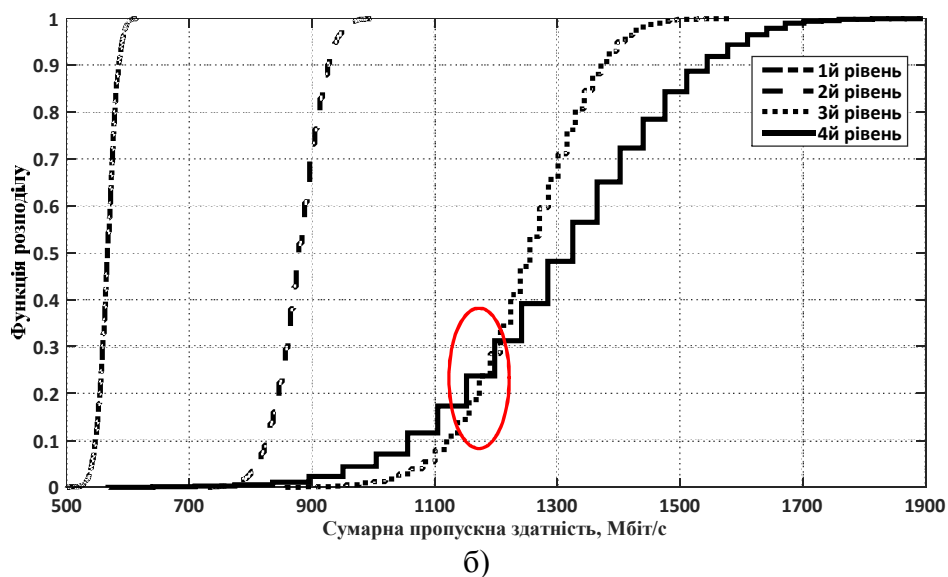
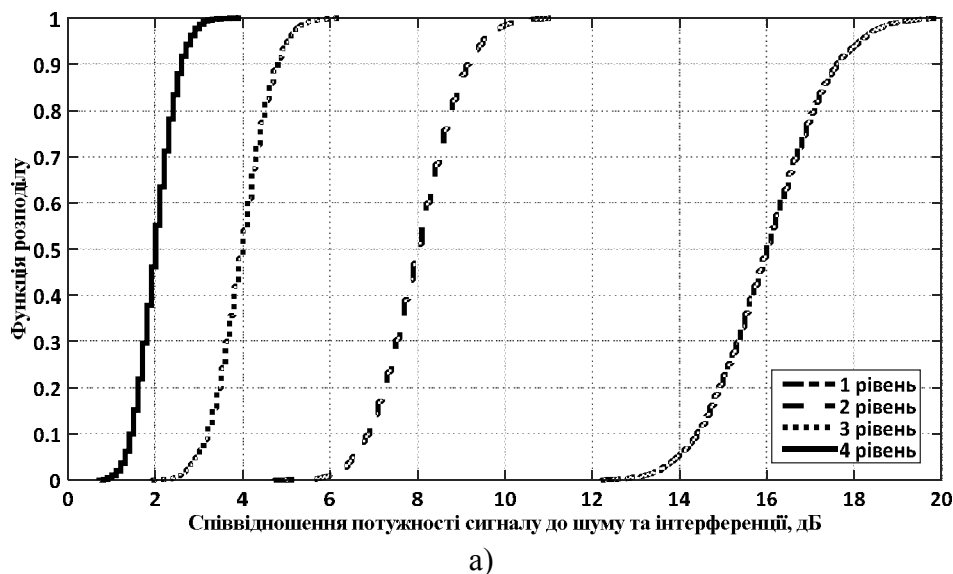


Рис. 5. Функції розподілу значень SINR – а) та сумарної пропускної здатності мережі – б) для різних рівнів гетерогенної мережі.

З Рис. 5.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. 5.б, при досягненні критичного рівня, коли смуга пропускання коміркової мережі стає співмірною із смугою пропускання транспортної мережі (Рис. 5), спостерігається суттєве зниження сумарної пропускної здатності мережі для структури четвертого рівня. Навіть при рівномірному розподілі абонентів, в ряді випадків спостерігається, що пропускна здатність структури четвертого рівня (фемтокомірок) може бути нижчою, ніж в структурі третього рівня (пікокомірок). Отже, можна зробити висновок, що ефективність багаторівневих гетерогенних структур знижується, якщо деякі комірки мають обмежену пропускну здатність транспортного каналу. Також очевидно, що продуктивність гетерогенної мережі є дуже чутливою до густини абонентів у цільовій зоні обслуговування. При недостатній густині абонентів, пікокомірки та фемтокомірки є недовантаженими, що робить їх неефективними з енергетичної точки зору.

Тому, важливим аспектом у гетерогенних мережах є балансування навантаження з врахуванням густини користувачів та інтерференції між спільно каналними комірками.

Виграш від повторного використання частот коміркового спектру для кожного рівня розраховується за наступними формулами:

$$G_{2\text{й рівень}} = \frac{F1 + F2 + F3 + F4}{\Delta F} = \Delta F, \left(\begin{array}{l} F1 = F2 = F3 = F4 \\ \Delta F = F1 + F2 + F3 + F4 \end{array} \right)$$

$$G_{3\text{й рівень}} = \frac{3 \cdot F1 + 3 \cdot F2 + 3 \cdot F3 + 3 \cdot F5 + F4}{\Delta F} = 2.6\Delta F, \left(\begin{array}{l} F1 = F2 = F3 = F4 = F5 \\ \Delta F = F1 + F2 + F3 + F4 + F5 \end{array} \right) \quad (6)$$

$$G_{4\text{й рівень}} = \frac{9 \cdot F1 + 9 \cdot F2 + 9 \cdot F3 + 9 \cdot F6 + 3 \cdot F5 + F4}{\Delta F} = 6.7\Delta F, \left(\begin{array}{l} F1 = F2 = F3 = F4 = F5 = F6 \\ \Delta F = F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6 \end{array} \right)$$

Виграш від повторного використання частот спектру транспортної мережі для кожного рівня розраховується за наступними формулами:

$$G_{2\text{й рівень}} = \frac{F1' + F2' + F3'}{\Delta F} = \Delta F, \left(\begin{array}{l} F1' = F2' = F3' \\ \Delta F = F1' + F2' + F3' \end{array} \right)$$

$$G_{3\text{й рівень}} = \frac{3 \cdot F1' + 3 \cdot F2' + 3 \cdot F3' + 3 \cdot F5'}{\Delta F} = 3\Delta F, \left(\begin{array}{l} F1' = F2' = F3', F5' = F1' + F2' + F3' \\ \Delta F = F1' + F2' + F3' + F4' + F5' \end{array} \right) \quad (7)$$

$$G_{4\text{й рівень}} = \frac{9 \cdot F1' + 9 \cdot F2' + 9 \cdot F3' + 9 \cdot F6' + 3 \cdot F5'}{\Delta F} = 4.5\Delta F, \left(\begin{array}{l} F1' = F2' = F3', F6' = F1' + F2' + F3', F5' = 3F6' \\ \Delta F = F1' + F2' + F3' + F4' + F5' + F6' \end{array} \right)$$

На Рис. 6.а показано залежність виграшу від повторного використання частот для спектрів коміркової та опорної транспортної мережі при збільшенні розміру комірок.

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

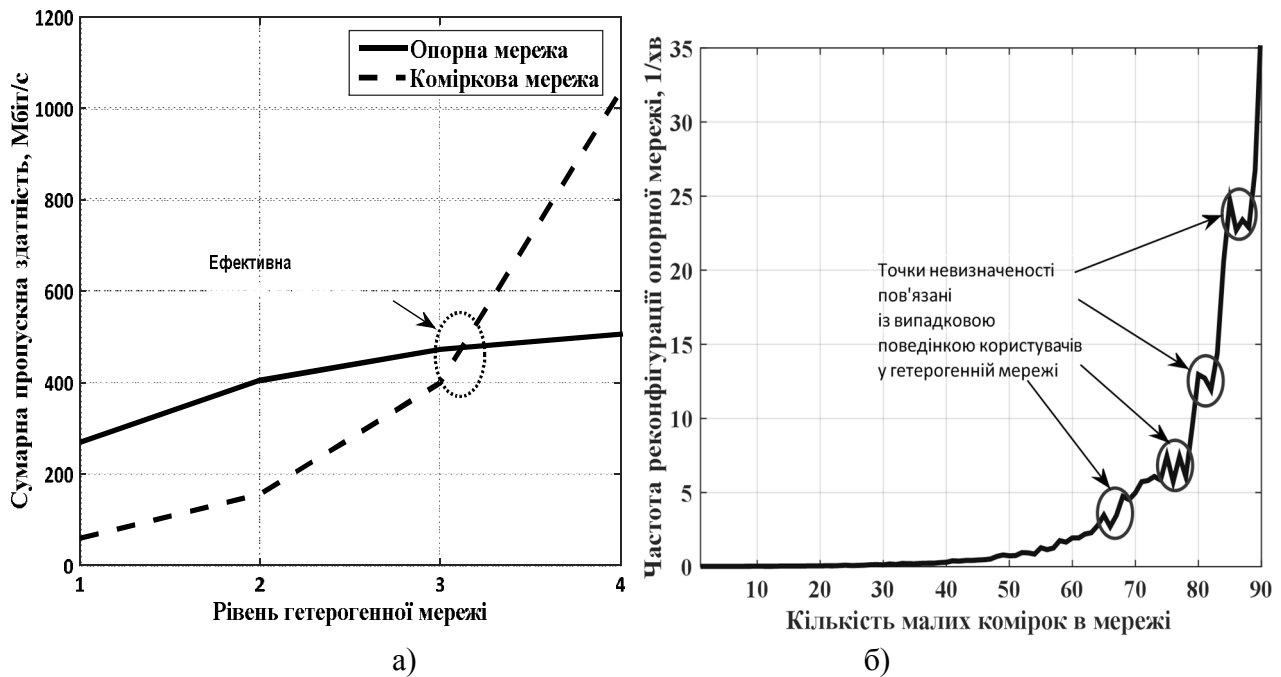


Рис. 6. Порівняння сумарної пропускної здатності коміркової та транспортної мережі при збільшенні кількості рівнів гетерогенної структури – а) та залежність частоти реконфігурації транспортних каналів від кількості малих комірок у гетерогенній мережі – б)

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

На Рис. 6.б, показано співвідношення між кількістю малих комірок та частотою реконфігурації транспортних каналів, при радіусі макрокомірки – 500 м та поведінки абонентів за моделлю випадкового блукання. Як показують отримані результати, при збільшенні кількості малих комірок, складність процесу обслуговування користувачів зростає експоненційно, що обмежує кількість рівнів гетерогенної мережі. Тому, важливо знайти ефективну конфігурацію для коміркової та транспортної інфраструктури, яка б дала змогу задовольнити поставлені вимоги до пропускної здатності мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління.

Висновки. Планування та моделювання коміркової мережі є складним та громіздким завданням. Зростання кількості користувачів послуг мобільного зв'язку призводить до збільшення вимог до інфраструктури мереж мобільного зв'язку. В даній статті запропоновано новий підхід до структурного синтезу багаторівневої коміркової інфраструктури гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі фрактальної геометрії. розглянуто основні чинники, які впливають на характеристики мережі, такі як повторне використання спектру, інтерференція та ефективність використання доступної пропускної здатності.

Визначено баланс між комірковим спектром та спектром безпроводної опорної інфраструктури. Крім того, на основі запропонованої моделі розроблено метод адаптивної динамічної реконфігурації мережі радіодоступу в умовах варіації абонентського

навантаження. Розглянуто випадки перевантаження та недовантаження комірок та виведено залежність для співвідношення сигналу до шуму та інтерференції.

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. Gubbi J. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions / J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami // Future Generation Computer Systems. – 2013. – No. 29. – P. 1645-1660.
3. Jo M. A Survey of Converging Solutions for Heterogeneous Mobile Networks/ M. Jo, T. Maksymyuk, R.L. Batista, T.F. Maciel, A.L.F. de Almeida, M. Klymash // IEEE Wireless Communications. – 2014. – Vol. 21, №8. – P. 54-62.
4. Hwang I. A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks / I. Hwang, B. Song, S. Soliman // IEEE Communications Magazine. – 2013. – Vol. 51, No.6. – P. 20-27.
5. Maksymyuk T. Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks / T. Maksymyuk, M. Brych M., V. Pelishok // Smart Computing Review. – April, 2015. – Vol. 5, No. 2. – P. 89-101.
6. Yaremko O. The optimal power control method in multiuser cellular networks / O. Yaremko, B. Stryhalyuk, T. Maksymyuk, O. Lavriv, D. Kozhurov // ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes, Krakow. – 2013. – Vol. 2, №1. – P. 63-67.
7. Maksymyuk T. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands / T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo // Smart Computing Review. – August, 2015. – Vol. 5, No. 4. – P. 346-355.
8. Guskov P. Methods and techniques of spectrum reforming for LTE network deployment / P. Guskov, R. Kozlovskiy, T. Maksymyuk, M. Klymash // In Proc. of IEEE International Conference on Microwave & Telecommunication technology (CriMiCo'2013), Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013. – P. 474-475.
9. Klymash M. Spectral Efficiency Increasing of Cognitive Radio Networks / M. Klymash, M. Jo, T. Maksymyuk, I. Beliaiev // In Proc. of IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application Of CAD Systems In Microelectronics (CADSM'2013), Lviv, Ukraine, Feb. 2013. – P. 169-171.
10. Jo M. Cognitive Radio Approach for LTE Deployment / M. Jo, T. Maksymyuk, M. Kyryk, L. Han // In Proc. of IEEE International Conference on The IXth International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH'2013), Lviv, Ukraine, April 2013. – P.63-64.
11. Maksymyuk T. The LTE channel transmission rate increasing / T. Maksymyuk, V. Pelishok // In Proc. of IEEE International Conference on the Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET), Feb. 2012., – P. 251-252.

Дата надходження в редакцію: 15.07.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Л. Н. Беркман