

ТЕХНОЛОГІЇ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

УДК 621.391

П. О. Гуськов, А. С. Цуркан, О. М. Шпур, Б. А. Бугиль, М. М. Климаш
Національний університет "Львівська політехніка"

МОДЕЛЬ МЕРЕЖІ РАДІОДОСТУПУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АДАПТИВНОГО ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ

© Гуськов П. О., Цуркан А. С., Шпур О. М., Бугиль Б. А., Климаш М. М., 2016

Запропоновано метод адаптивного структурного синтезу мережі радіодоступу. Цей метод призначений для побудови мережі радіодоступу з використанням принципів детермінованої та стохастичної геометрії. Використовуючи засоби імітаційного моделювання, розроблено модель гетерогенної мережі, яка залежно від просторової локалізації та розподілу абонентського навантаження формує структуру мережі радіодоступу. Отримано залежності пропускну здатності, системної спектральної ефективності та розподілу навантаження по кожному структурному елементу мережі.

Ключові слова: 5G, мережа радіодоступу, малі комірки.

P. Huskov, A. Tsurkan, O. Shpur, B. Buhyl, M. Klymash
Lviv Polytechnic National University

RADIO ACCESS NETWORK MODEL WITH ADAPTIVE STRUCTURE SYNTHESIS

© Huskov P., Tsurkan A., Shpur O., Buhyl B., Klymash M., 2016

Constantly increasing demand by mobile devices for higher data rates and new multimedia services support creates unprecedented challenges for future fifth generation (5G) mobile networks: 1000 times higher system capacity, up to 100 times higher peak user data rates and 10 times lower energy efficiency of today's 4G networks.

This stipulates changes of modern radio access networks (RAN). Existing deterministic approaches for RAN deployment and analysis that are used for optimal resource allocation are not compatible with future multitier heterogeneous networks, especially because of the fixed cells' radius restrictions and the impossibility to respond to non-uniform load conditions.

According to mentioned requirements, reasonable deployment expenditures and consistent quality of experience assurance small cells occur the most reasonable solution. In comparison to macrocells, low-cost small cells offer a significant capacity gain due to spatial reuse of spectrum.

This paper presents the new approach for small cells deployment based on adaptive RAN structure synthesis method that generates the base stations on/off switching patterns and serves users by appropriate RAN entities according to current load distribution and network conditions. We consider three-tier Heterogeneous network where we integrate macro-, femto- and picocells.

A method for services differentiation between RAN structural entities on different layers that support traffic aggregation is proposed. We developed simulation model that reflects the functioning of a RAN in real time and displays dependences of the network capacity, system spectral efficiency and load distribution on each RAN structural entity.

The main advantages of proposed approach are flexibility, adaptability to non-uniform spatially distributed traffic and energy efficiency. The results show that with a slight decrease in the average throughput per UE (2–4 %) was observed the gain in energy consumption, by reducing the number of active elements in RAN structure by 30–40 %.

Future activities to this work involve assessing the network structure on the number of handovers, the development of intelligent frequency planning methods and the evaluation of backhaul capacity on overall performance in case of small cells deployment.

Key words: 5G, RAN, small cells.

Вступ

Зростання попиту користувачів на послуги з високими вимогами до швидкості передавання даних спонукає операторів мобільного зв'язку та постачальників мережевої інфраструктури до прийняття інноваційних рішень під час побудови мереж радіодоступу [1]. Однак, з погляду пропускної здатності мережі, за останнє десятиліття розширення смуги частот під мобільні мережі, впровадження передових схем модуляції та кодування відіграли меншу роль, ніж підвищення пропускної здатності мобільної мережі за рахунок зменшення розміру комірок та підвищення щільності їх розміщення. Це виправдовує особливий інтерес дослідників та вендорів до розробок малопотужних базових станцій (піко- та фемтокомірок) у мережах мобільного зв'язку [2, 3].

Разом з тим, класичне розуміння комірки чи сектора, що ґрунтується на критерії мінімальної відстані та припущенні, що абоненти в зоні покриття розміщені рівномірно, в реальних мережах не завжди є виправданим. Параметри рівня радіодоступу повинні визначатись згідно зі сценарієм функціонування в результаті адаптації мережі під потреби абонентів за необхідності максимізації пропускної здатності, рівномірності обслуговування групи абонентів, мінімізації затримки тощо [4].

Архітектура мережі радіодоступу

Відомо, що архітектура мобільних мереж є тривірневою [2, 3, 7], тому в роботі архітектуру гетерогенної мобільної мережі подано у вигляді п'яти логічних рівнів (рис. 1).

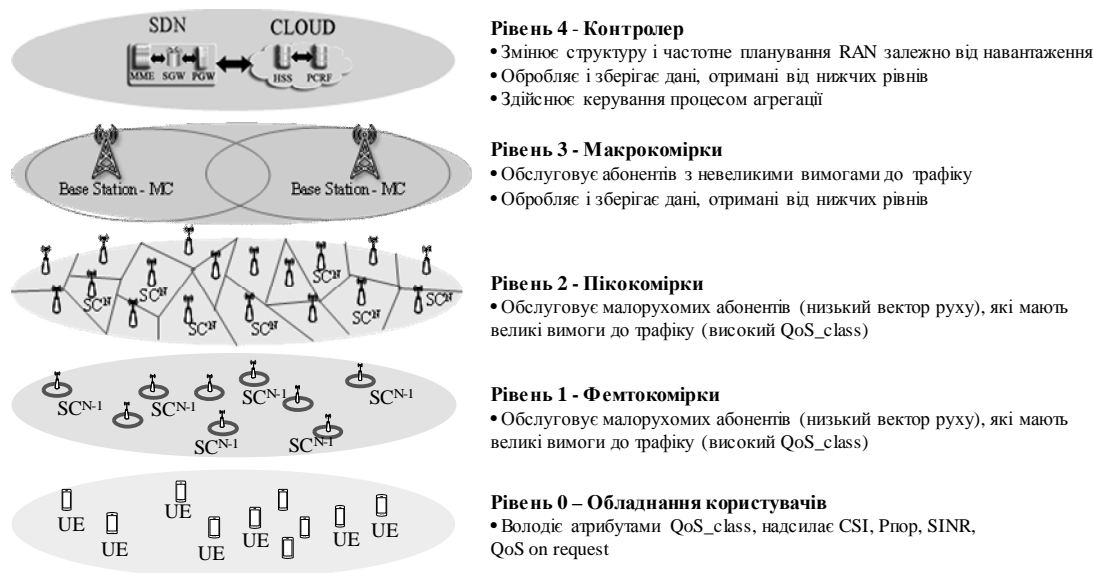


Рис. 1. Архітектура мережі радіодоступу

На рівні контролера реалізовано функції керування мережею. Цей рівень володіє програмними й апаратними засобами, що забезпечують локалізацію абонента, визначення його швидкості й напрямку руху, розрахунок параметрів низхідного та висхідного каналів. До його функцій також належать: зміна структури і частотного планування рівня радіодоступу залежно від навантаження; аналіз стану мережі та якості обслуговування; безперервний аналіз даних, що отримуються від

нижчих рівнів, – вектор зміни відстані до базової станції для кожного користувача, загальна кількість активних користувачів мережі; побудова і зміна карти навантаження; розподіл абонентів у структурі рівня радіодоступу; керування процесом агрегації ресурсів.

Рівень макрокомірок (MC – Macro Cell) здійснює обслуговування рухомих абонентів, яких не можуть обслуговувати комірки нижчих рівнів. Крім того, макрокомірка може відігравати роль шлюза, через який комірки нижніх рівнів підключені до мережі.

Рівень пікокомірок (SC^N – Small Cells) обслуговує абонентів з високими вимогами до трафіку (високий клас QoS) та низькими параметрами мобільності (низький вектор руху). Пікокомірки змінюють стани залежно від навантаження: стан очікування – базова станція (БС) прослуховує середовище, надсилає Broadcast_ID, визначає вектор зміни відстані до БС, активний стан – БС працює у нормальному режимі, володіє інформацією про допустимих $\{Fi\}$ та поточних $\{Si\}$ абонентів.

Структура рівня пікокомірок формується згідно з параметричним процесом МНСРР (Matern's hard-core point process) та теселяцією Вороного [5–7]. МНСРР використовується для моделювання місця розташування базових станцій, а теселяція Вороного дає змогу відтворити покриття досліджуваної площі без проміжків та перекриттів.

Фемтокомірки (SC^{N-1} – Small Cells) встановлюються тільки в місцях великого скупчення абонентів і мають функції, аналогічні з пікокомірками.

Абонентські пристрої формують вимоги до мережі та навантаження, що може бути обслуговане рівнями макро-, піко- та фемтокомірок або декількома з рівнів одночасно за умови підтримки мобільним терміналом функцій агрегації спектра.

Диференціація трафіку згідно з вимогами до рівня радіодоступу

У процесі обробки потоків даних контролер здійснює їх класифікацію відповідно до вимог щодо якості обслуговування. Основними елементами, які керують процесом пріоритизації трафіку на цьому рівні, є PCRF (Policy and Charging Rules Function) та PCEF (Policy and Charging Enforcement Function). Клас, до якого належить той чи інший трафік, визначають на основі параметра QCI (QoS Class Identifier). Параметр QCI є міткою у пакеті IPv4. QCI може набувати один із дев'яти станів (рис. 2), кожен з яких асоціюється з певним типом сервісу (ToS).

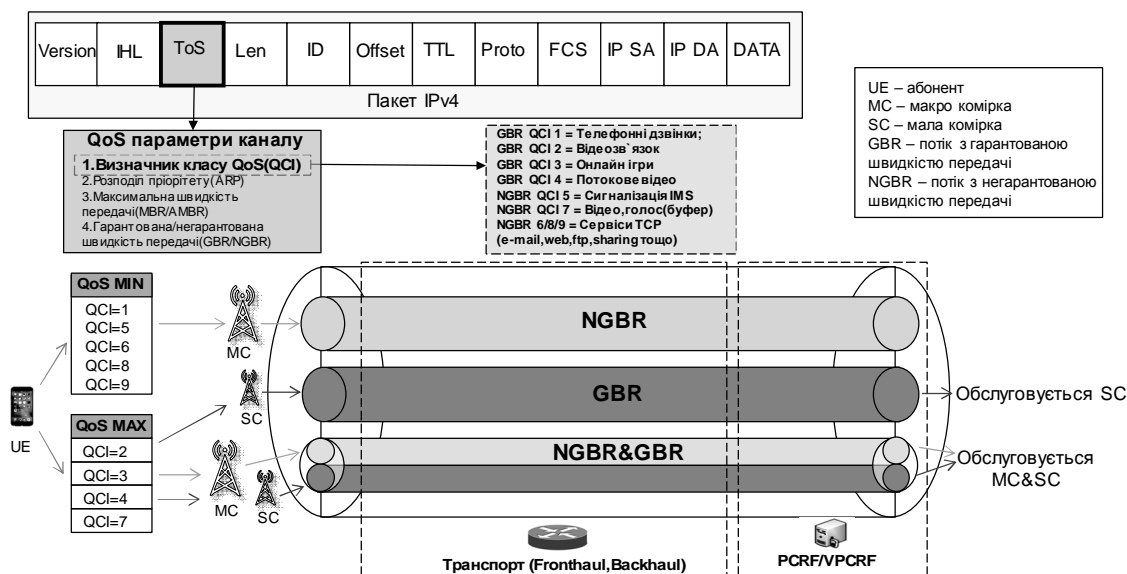


Рис. 2. Диференціація класів трафіку

При цьому можливо реалізувати чіткий, впорядкований алгоритм обслуговування різнотипних сервісних запитів на відповідних рівнях, застосовуючи централізовані механізми керування трафіком. Для абонентів, які користуються мобільними додатками різних типів

одночасно, використання пріоритезації трафіку дає змогу використати різні канали передавання, які підпорядковані базовим станціям різних рівнів, або ж використати об'єднаний канал GRB & NGBR.

Метод адаптивного структурного синтезу мережі радіодоступу

Відповідно до наведених передумов щодо забезпечення пропускну здатності для кожного абонента формується структура мережі радіодоступу відповідно до запропонованого у роботі методу. Основні етапи роботи методу логічно розділені на три логічні частини (рис. 3). На початковому етапі усі абоненти підключаються до базової станції макрорівня. UE формує запит на обслуговування (QoS_request), який відсилається по висхідному каналу (UL) до базових станцій. У всіх базових станціях рівнів SC^N та SC^{N-1} низхідний канал вимкнений, увімкнутим залишається лише висхідний, макрокомірки залишаються постійно увімкнутими. Надалі на рівнях SC^N та SC^{N-1} відбувається локалізація навантаження UE_i. Після того, як на БС макрорівня прийшла інформація від абонентів, БС макрорівня дає вказівку базовим станціям рівнів SC^N і SC^{N-1} розрахувати вектор зміни відстані мобільного користувача до БС, обчисливши зміну потужності сигналу (ΔP_{UL_UEi}).

У результаті для кожної базової станції рівнів SC^N і SC^{N-1} формується матриця “допустимих абонентів” {F}, що містить інформацію про всіх абонентів, яких потенційно може обслужити конкретна базова станція рівнів SC^N або SC^{N-1} .

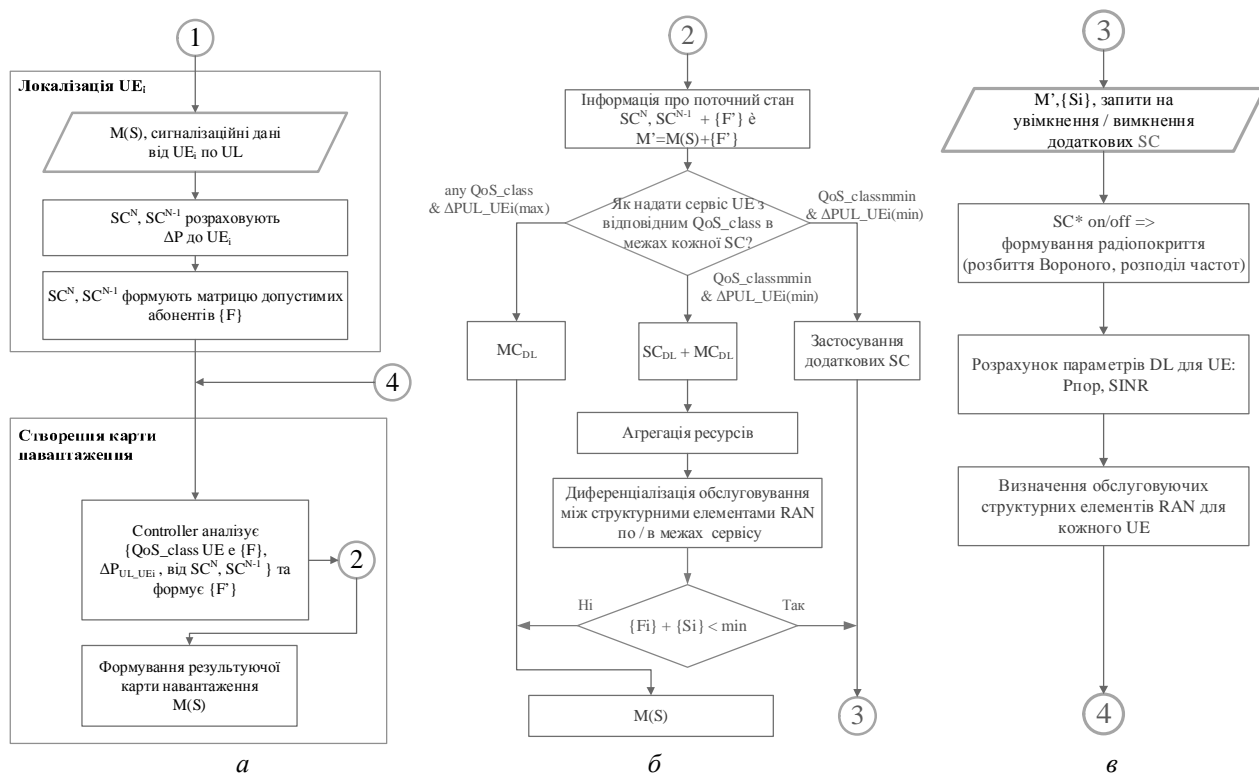


Рис. 3. Блок-схема алгоритму формування адаптивної структури мережі радіодоступу: а – локалізація та створення карти навантаження; б – аналіз поточного стану мережі; в – перебудова структури мережі радіодоступу

Наступним кроком є створення карти навантаження. На контролері відбувається аналіз матриць {F_i}, {S_i} (1) та визначення множини абонентів, яких не можуть обслужити комірки нижніх рівнів через невідповідність параметрів якості.

$$F_i = [UE_{fes_1}, UE_{fes_2}, \dots, UE_{fes_n}], S_i = [UE_{act_1}, UE_{act_2}, \dots, UE_{act_n}], \quad (1)$$

де UE_{fes_n} – абонентський пристрій, який розміщений у радіусі дії SC^N або SC^{N-1} та потенційно може бути обслугований базовими станціями рівнів SC^N або SC^{N-1} , UE_{act_n} – абонентський пристрій, який обслуговується в цей момент SC^N , SC^{N-1} .

Керуюча інформація передається на нижчий рівень і формується результуюча карта поточного навантаження $M(S)$ (2).

$$M(S) = \sum_i S_i + \sum_i F_i. \quad (2)$$

Для кожної базової станції рівня SC^N та SC^{N-1} утворюються матриці $\{F'\}$ (3), що містять інформацію про абонентів, яких повинна обслуговувати конкретна базова станція.

$$F'_i = F_i - \sum_i UE_{neg_i}, \quad (3)$$

де UE_{neg_i} – абонентський пристрій, якого не може обслужити конкретна базова станція через невідповідність параметрів низхідного каналу або мобільності.

На основі керуючої інформації та карти поточного навантаження формується результуюча матриця $\{M'\}$ (4), яка містить інформацію про стан абонентів, що вже є на обслуговуванні поточної структури рівня радіодоступу, та інформацію про абонентів, яких потенційно повинна обслужити конкретна базова станція.

$$M'(S) = \sum_i S_i + \sum_i F'_i. \quad (4)$$

Система вирішує, як надати сервіс UE з відповідним класом QoS у межах кожної SC. Вибір здійснюють на основі трьох правил:

1. Якщо для UE високе значення вектора зміни відстані до БС, то його бере на обслуговування макрокомірка. Також макрокомірка обслуговуватиме абонентів з будь-яким QoS, якщо немає можливості підключити їх до SC.

2. Якщо в абонента низьке значення вектора зміни відстані до БС та клас QoS, а під'єднання його до активних структурних елементів рівня радіодоступу не спричинить перевантаження, то система підключить його до відповідної SC і за можливості одночасно до базової станції MC (не всі UE підтримують одночасне передавання на декількох частотах). Система розділить сервіси за таким принципом: UE з $QoS_class = \max$ обслуговувались базовими станціями рівнів SC^N або SC^{N-1}, а усі UE з $QoS_class = \min$ макробазовою станцією. Після цього здійснюють перевірку матриць $\{F_i\}$ і $\{S_i\}$, щоб з'ясувати, чи є потреба у вимкненні базових станцій рівнів SC^N або SC^{N-1}. Якщо така потреба виникла, то керування передається до третього етапу, якщо ж такої потреби не виникло, то перебудовується карта поточного навантаження і керування передається на перший етап алгоритму.

3. Якщо для UE низьке значення вектора зміни відстані до БС та $QoS_class = \max$ і немає можливості підключення його до активних структурних елементів рівня радіодоступу, приймають рішення про застосування додаткових малих комірок та керування передається на третій етап загального алгоритму.

Після отримання інформації про UE_i , що мають бути обслужені конкретною базовою станцією, та матриці $\{S_i\}$, яка містить інформацію про активних абонентів рівнів SC^N, SC^{N-1} контролер вирішує, які базові станції рівня SC^N необхідні для обслуговування поточного навантаження. У результаті відбувається перебудова структури мережі радіодоступу. Після цього здійснюється перевірка та розрахунок параметрів низхідного каналу для абонентів у межах зони обслуговування та визначення обслуговуючих структурних елементів рівня радіодоступу для кожного UE_i .

Характер зміни навантаження зумовлює модифікацію структури мережі радіодоступу: якщо навантаження невелике, ввімкнена тільки невелика частина малих комірок; у разі великого навантаження на мережу структура рівня радіодоступу максимально деталізована, а навантаження на кожен структурний елемент високе.

Модель мережі радіодоступу з інтеграцією множини малих комірок

На основі запропонованого методу формування структури мережі радіодоступу побудовано імітаційну модель, яка дає змогу оцінити ефективність його функціонування у тривірневій гетерогенній мобільній мережі. Імітаційну модель розроблено з використанням мови програмування C++ Builder та симулятора LTE-A Downlink System Level Simulator [8]. Вихідні параметри моделювання подано в таблиці.

Параметри моделювання

Тип комірок	МС	SC ^N	SC ^{N-1}
Потужність випромінювання	46 дБп	23–30 дБп	до 23 дБп
Ширина каналу	20 МГц	15 МГц	5 МГц
Режим передавання	МІМО 4х4	МІМО 2х2	МІМО 2х2
Радіус дії	1200 м	200–300 м	50 м
Модуляція	64QAM		
Максимальна кількість БС на рівні	3	25	15
Кількість абонентів (UE)	80 UE протягом усього часу моделювання / додаткові 60 UE в години пікового навантаження		
Розподіл абонентів	Рівномірний / Пуассонівський		
Мобільність абонентів	модель просторового броунівського руху		

Параметри мобільності абонентів визначають за допомогою моделі просторового броунівського руху (5) [9]. Абонентам присвоюється довільний напрям руху f та швидкість n ; де f – рівномірно розподілена величина, а n – нормально розподілена. Модель можна використати для відтворення руху пішоходів та автомобільного руху

$$pdf(v) = \frac{1}{s_v \sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{(v - \bar{v})^2}{2s_v^2}\right). \quad (5)$$

На рис. 4 зображено вплив просторово розподіленого навантаження на структуру мережі радіодоступу та відсоток активних малих комірок за пікових значень сумарної пропускної здатності на мережу: 150 Мбіт/с (рис. 4, а) та 1500 Мбіт/с (рис. 4, б).

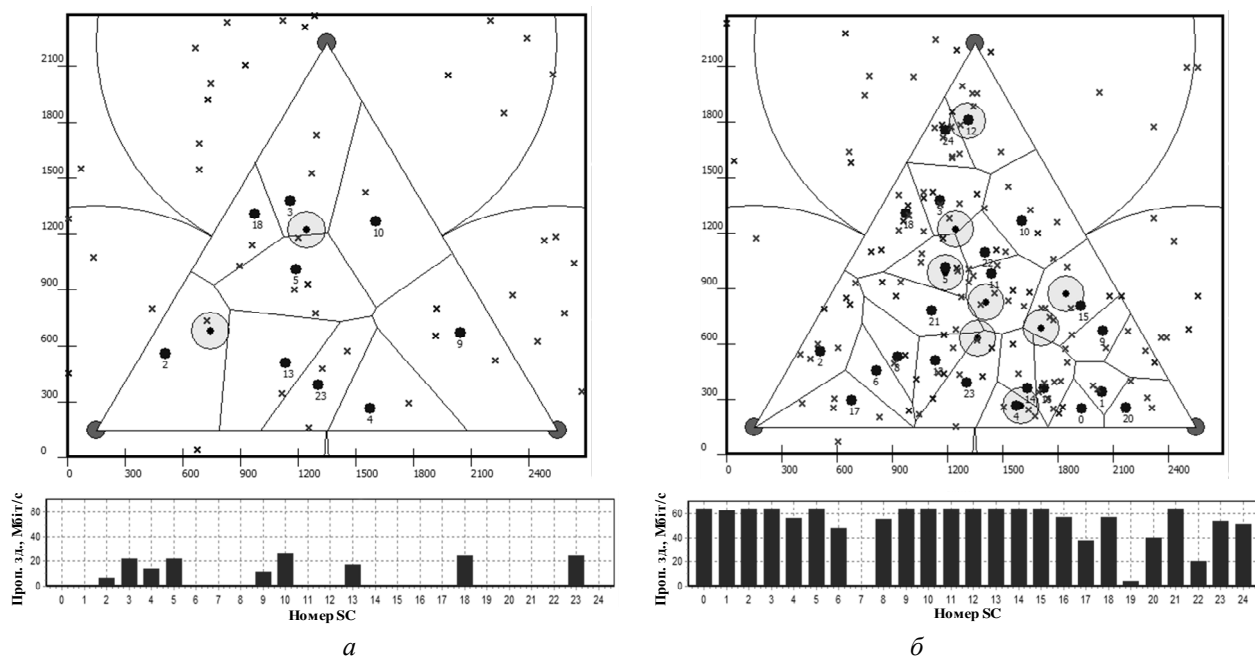


Рис. 4. Структура мережі радіодоступу і навантаження на кожну з базових станцій за сумарної пропускної здатності на мережу: а – 150 Мбіт/с; б – 1500 Мбіт/с

В результаті моделювання оцінювались: сумарна пропускна здатність, що надається абонентам кожним з рівнів базових станцій, частка активних малих комірок та системна спектральна ефективність мережі. Системна спектральна ефективність визначається як відношення суми середніх швидкостей передавання даних до використаної смуги пропускання та площі покриття.

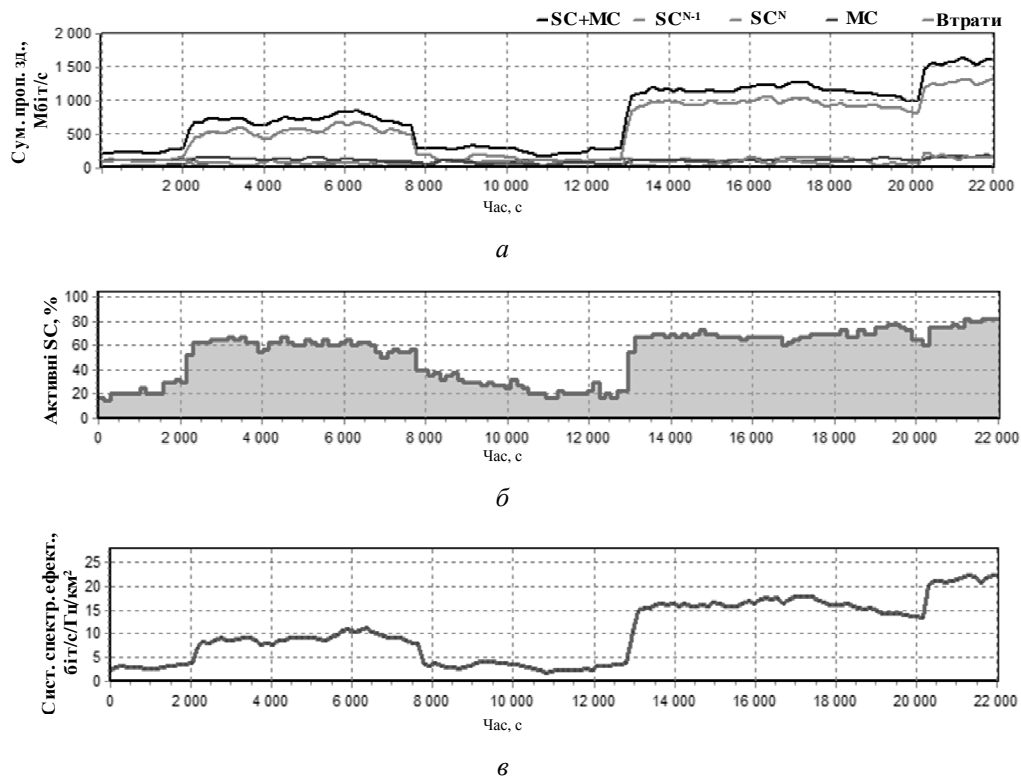


Рис. 5. Результати моделювання: а – навантаження на мережу;
б – відсоток активних малих комірок; в – системна спектральна ефективність мережі

Порівняємо параметри сегмента мережі радіодоступу в два моменти часу. Зі збільшенням сумарної пропускної здатності з 150 до 1500 Мбіт/с зросла частка активних SC з 36 % до 92 %, а системна спектральна ефективність з 3 до 23 біт/с/Гц/км² (рис. 5, б, в).

На основі статистичних результатів, отриманих внаслідок 25 серій моделювання, побудовано часову залежність частки активних SC (рис. 6, а) і густину розподілу імовірності середнього значення пропускної здатності для абонента $F(x)$ (рис. 6, б) для трьох випадків моделювання:

1. Працює лише макрокомірка, SC^N та SC^{N-1} вимкнені.
2. Структура мережі постійна – увімнені усі SC^N та SC^{N-1}.
3. SC^N та SC^{N-1} вмикаються і вимикаються за методом адаптивного формування структури рівня радіодоступу.

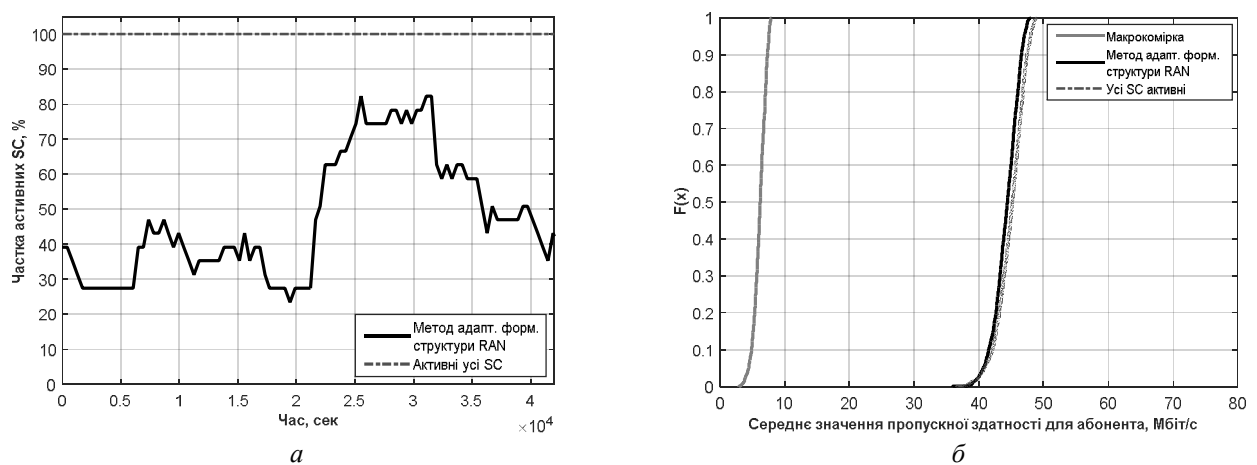


Рис. 6. Статистичні дані моделювання:
а – частка активних SC;
б – густина розподілу імовірності надання абоненту пропускної здатності

За пікового навантаження запропонований метод адаптивного формування структури мережі радіодоступу дає змогу досягти пропускної здатності 48–52 Мбіт/с для кожного абонента, тоді як середній відсоток активних малих комірок варіюється у межах 40–60 %, що спричинено нерівномірною локалізацією та розподілом абонентського навантаження. У результаті досягається підвищення енергоефективності мережі та зниження частоти хендверу за рахунок підвищення площі покриття окремими малими комірками.

Висновки

У статті запропоновано метод адаптивного структурного синтезу мережі радіодоступу, що здійснює управління макро-, піко- та фемтокомірками відповідно до статистичного розподілу абонентського навантаження у зоні обслуговування. Основні принципи роботи методу ґрунтуються на трьох логічних етапах: локалізація та створення карти навантаження, аналіз поточного стану мережі та перебудова структури мережі радіодоступу. Роботу методу демонструє розроблена імітаційна модель, за допомогою якої в реальному масштабі часу виконано дослідження таких мережових параметрів, як системна спектральна ефективність та поточне навантаження активних піко- і фемтокомірок.

В основі розробленої імітаційної моделі мережі – поєднання детермінованої та стохастичної геометрії, що дає змогу відобразити реальну поведінку мережі радіодоступу в разі впровадження множини малих комірок. Використання такого підходу забезпечує уникнення обмежень відомих детермінованих методів розгортання і аналізу мережі радіодоступу завдяки ефективному розмежуванню зон дії кожної базової станції під час модифікації структури мережі.

У результаті використання імітаційної моделі встановлено, що за незначного зменшення середньої пропускної здатності для кожного абонента (2–4 %) спостерігається виграв у енергоспоживанні, за рахунок зменшення кількості активних елементів у структурі мережі радіодоступу на 40–60 % від загальної кількості.

У подальших дослідженнях заплановано проведення оцінки структури мережі радіодоступу за частотою хендверу, розвиток інтелектуальних методів частотного планування та оцінювання впливу ємності транспортної підсистеми на загальну продуктивність за імплементації множини малих комірок в інфраструктуру оператора мобільного зв'язку.

1. *Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015–2020*. Cisco, Tech. Rep. 2015. URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>. 2. *5G on the horizon: key challenges for the radio-access network* / P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu and J. Yao // *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2013. Vol. 8, no. 3. P. 47–53. 3. *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. 4. Huskov P. O., Klymash M. M. *A Survey on Cloud Radio Access Networks Deployment Strategies* // *Advanced Information and Communication Technologies*. 2015. Lviv, Oct. 29 – Nov. 1 2015. P. 20–23. 5. *Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey* / H. ElSawy, E. Hossain, M Haenggi // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013. Vol. 15, no. 3. P. 996–1019. 6. *On the size distribution of Poisson Voronoi cells* / J. S. Ferenc and Z. Neda // *Physica A*, 2007. Vol. 385, no. 2. P. 518–526. 7. *Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks* / T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok // *Smart Computing Review*, 2015. Vol. 5, No. 2. P. 89–101. 8. *The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation* / Markus Rupp, Stefan Schwarz, Martin Taranetz // *Signals and Communication Technology*. 2016. 9. *Mobility*

Management and Vertical Handover Decision in an Always Best Connected Heterogeneous Network / M. Klymash, M. Seliuchenko, M. Beshley, M. Brych // Proceedings of XIIIth international conference "The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics" CADSM'2015 – Lviv-Poljana. 24–27 Feb. P. 103–105.

References

1. "Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019", Cisco, Tech. Rep., February 2015.
2. P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu and J. Yao, "5G on the horizon: key challenges for the radio-access network", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 47–53, 2013.
3. I. Hwang, B. Song, S. Soliman, "A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no.6, pp. 20–27, 2013.
4. Huskov P. O., Klymash M. M, "A Survey on Cloud Radio Access Networks Deployment Strategies," *Advanced Information and Communication Technologies-2015 (Lviv, October 29 – November 1, 2015)*, 2015, pp. 20–23.
5. H. ElSawy, E. Hossain, M Haenggi, "Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 996–1019, 2013.
6. J. S. Ferenc and Z. Neda, "On the size distribution of Poisson Voronoi cells", *Physica A*, vol. 385, no. 2, pp. 518–526, Nov. 2007.
7. T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok, "Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks", *Smart Computing Review*, 2015. – vol. 5, No. 2, P. 89–101.
8. *The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation / Markus Rupp, Stefan Schwarz, Martin Taranetz // Signals and Communication Technology – 2016.*
9. M. Klymash, M. Seliuchenko, M. Beshley, M. Brych, "Mobility Management and Vertical Handover Decision in an Always Best Connected Heterogeneous Network", *Proceedings of XIIIth international conference "The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics" CADSM'2015 (24–27 February, Lviv-Poljana, Ukraine)*, 2015, pp. 103–105.