

**МЕТОД ДИНАМІЧНОГО ФОРМУВАННЯ
СТРУКТУРИ РІВНЯ РАДІОДОСТУПУ ДЛЯ МЕРЕЖ 5G**

© Гуськов П. О., Максимюк Т. А., Климаш М. М., 2015

Розглянуто концепцію гнучкого функціонального роздвоєння протокольного стека між центральною платформою керування та локальними точками радіодоступу у вигляді програмної платформи для координованого керування рівнем радіодоступу. Запропоновано метод динамічного формування структури мережі радіодоступу перепризначенням контролеру безпроводного кластера та реконфігурації транспортної підсистеми, що дає змогу підвищити ефективність функціонування безпроводного кластера та досягти вищих показників пропускну здатності без застосування додаткових RAP.

Ключові слова: 5G, C-RAN, NFV, безпроводний кластер.

P. O. Huskov, T. A. Maksymyuk, M. M. Klymash
Lviv Polytechnic National University

METHOD OF DYNAMIC RAN SYNTHESIS FOR 5G NETWORKS

© Huskov P. O., Maksymyuk T. A., Klymash M. M., 2015

Nowadays, plenty of smart phones and tablets result in increased demands for bandwidth and availability of mobile networks. According to recent studied, 5G is expected to bring significant improvement such as 10-100-fold peak data rates, 1000-fold network capacity and 10-fold energy efficiency. There are two key enablers of these requirements: ultra-dense deployment of small cells and centralized signal processing.

In this paper, we focus on flexible and adaptive management for 5G mobile networks. We propose the dynamic RAN (Radio Access Network) synthesis method that includes two main stages: reassignment of the WCM (Wireless Cluster Management) controller and dynamic backhaul reconfiguration. Former increases the performance of wireless cluster, while backhaul remains unchangeable that allows to decrease the RAN convergence time. The latter allows to improve capacity of backhaul links by virtualization and topology modifying. In addition, proposed system exploits flexibilities of backhaul network technologies to adapt the backhaul network to requirements of RAN.

Further insights show that backhaul properties play an important role in future radio access networks with cooperation of radio access points. Modern optical backhaul networks cannot guarantee that cooperation techniques will be applied ubiquitously in radio access networks. Hence, new cooperation techniques and algorithms must rely not only on the information from the RAN, but also incorporate the conditions of backhaul and core network.

Simulation results showed that the proposed method drastically increases the feasibility of wireless cluster, especially in high-load scenarios and enables to achieve higher performance capacity without using additional RAP. It has showed that with the increasing number of active users within the cluster the proposed method allows to get higher levels of cluster feasibility through effective adaptation of the RAN structure according to the users' requirements.

Key words: 5G, C-RAN, NFV, wireless cluster.

Вступ

В останні три десятиліття на ринок безпроводного зв'язку істотно зросла кількість абонентів у всьому світі, стрімко збільшує попит як на голосовий зв'язок, так і на послуги веб-серфінгу, передачу відеоданих у реальному часі тощо. Сьогодні в світі використовується більше ніж 3 млрд

безпроводних пристроїв (переважно мобільні телефони, ноутбуки та планшетні комп'ютери), і їх кількість в 2025 р., за прогнозами, становитиме 100 млрд [1]. У майбутньому безпроводний доступ використовуватиметься повсюдно і для різноманітних завдань. Наприклад, мільярди комунікаторів, мобільних пристроїв, датчиків будуть підключені до глобальної мережі Інтернет і слугуватимуть основою для багатьох нових додатків.

Підтримка постійного зростання кількісних та якісних вимог зумовлює потребу у вищій спектральній ефективності мобільних мереж. Централізовані мережі радіодоступу C-RAN – Centralized (Cloud) Radio Access Network) на основі множини малих комірок останнім часом активно розробляють та впроваджують багато операторів мобільного зв'язку та провайдерів (China Mobile [2], SoftBank, LightRadio [3], Liquid Radio [4]). У класичній C-RAN множина комірок приєднана до центра обробки даних, де виконується попередня обробка радіосигналів. Надалі радіосигнали передаються від центра обробки даних до точки радіодоступу по виділених лініях (Fronthaul – FH). Жорсткі вимоги щодо характеристик транспортної підсистеми радіодоступу є основним недоліком C-RAN. У зв'язку з необхідністю прокладання оптичних волокон відомі методи розгортання C-RAN характеризуються недостатньою гнучкістю і масштабованістю [5, 6].

Як наслідок, для практичного впровадження систем мобільного зв'язку наступного покоління необхідно розвивати методи оцінки безпроводного каналу, компенсації інтерференції та визначення складових користувацького кластера (сукупності базових станцій, що обслуговують абонента). Також зміна підходу до побудови рівня радіодоступу зумовлює необхідність врахування впливу структурних та функціональних параметрів транспортного рівня RAN (Radio Access Network) на функціонування розподіленої мережі.

Отже, під час формування нових підходів до побудови мобільних мереж п'ятого покоління варто враховувати такі вимоги: підтримка (потенційно динамічна) гнучкої централізації функцій RAN; врахування особливостей транспортної підсистеми і апаратних можливостей, вимог трафіку та енергоефективності; наявність мережевого контролю для оркестрації та моніторингу функцій, розподілених на різних мережевих одиницях [7].

Розподіл функцій на рівні радіодоступу в децентралізованих програмно-керованих мережах

Існує компроміс між централізованою обробкою, що вимагає високопродуктивної транспортної підсистеми (Fronthaul – FH), і децентралізованою обробкою з використанням традиційної транспортної підсистеми (Backhaul – BH) для передавання користувацьких і сигналізаційних даних до точок радіодоступу (RAP – Radio Access Point).

Централізація обробки і управління в мобільних мережах п'ятого покоління повинні бути гнучкими і адаптуватися до вимог реальних послуг. Це зумовлює необхідність знаходження компромісу між повною централізацією, як в C-RAN, і децентралізацією, як у мобільних мережах 2–4 поколінь. Такий підхід дає змогу частково централізувати функції та характеристики RAN залежно від поточного навантаження на рівень радіодоступу та досягти теоретичних меж пропускної здатності та енергоефективності системи.

Центральним елементом такої системи є гнучке функціональне роздвоєння протокольного стека між центральною платформою керування та локальними точками радіодоступу (рис. 1). Варто зазначити, що набір централізованих/локально розподілених функцій може варіюватись залежно від поточного сценарію функціонування (завантаження комірок, мобільності користувачів, типів сервісів). Функціональне роздвоєння протокольного стека може реалізовуватись на кожному протокольному рівні або на межі між рівнями.

Підсумовуємо основні характеристики програмної платформи для координованого керування рівнем радіодоступу:

1. Надання необхідної ємності сегменту безпроводної мережі, що дає змогу адаптувати процес доставки мобільних сервісів під конкретні вимоги оператора та користувачів.
2. Віртуалізація ресурсів і функцій RAN для оптимального використання, управління та масштабованості мережі мобільного зв'язку.

3. Об'єднання ресурсів дає змогу підтримувати складніші сценарії спільного використання мережі, за яких віртуальні оператори пропонують спеціальні послуги, що створюють різноманітні можливості для бізнесу. Це становить особливий інтерес у разі щільного розгортання мереж 5G, де кількість варіантів розгортання може бути обмеженою.

4. Еластичність шляхом масштабування мережевих ресурсів на центральній підсистемі обчислень, а також розширенням кількості активних точок радіодоступу.

5. Моніторинг сервісів у реальному часі, що дає змогу операторам ефективно контролювати і продавати (здавати в оренду) послуги RAN (послуги централізованої обробки та використання RAP).

6. Гнучкі механізми контролю доступності сервісів та тарифікації для різних користувачів.

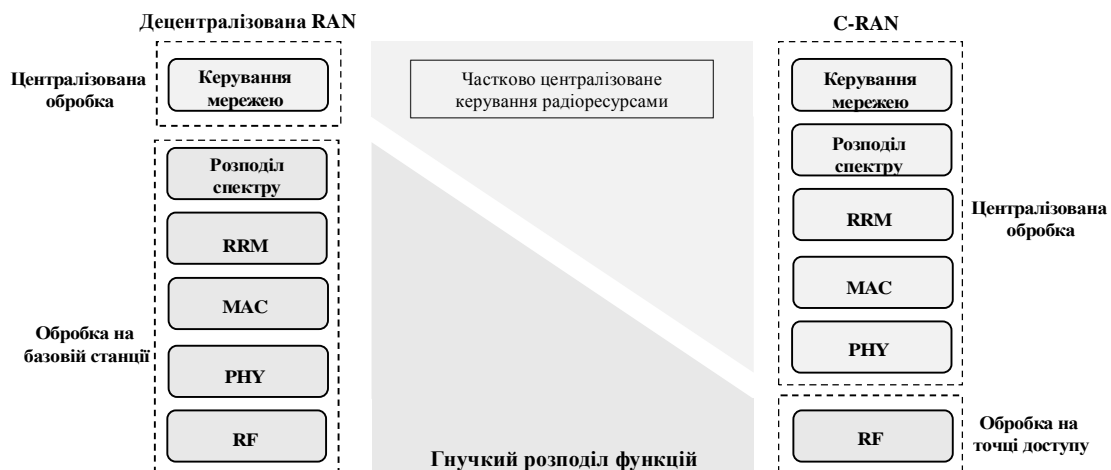


Рис. 1. Гнучкий розподіл функцій радіодоступу

Поєднання платформи керування та однієї або декількох точок радіодоступу формує безпроводний кластер (віртуальну базову станцію eNB), який є функціональним еквівалентом eNB у архітектурі 3GPP LTE. Контролер керування безпроводним кластером (Wireless Cluster Management Controller) відповідає за розміщення, узгоджене виконання розподілених функцій, управління та конфігурацію компонентів veNB. VeNB є прозорими для архітектури 3GPP, тому що підтримують стандартні інтерфейси 3GPP (S1-U, S1-MME, X2) до обладнання ядра мережі та інших віртуальних eNB. Передавання даних у домені veNB повинно виконуватись з урахуванням вимог функцій різних рівнів і можливостей транспортної підсистеми, що зв'язує платформу RANaaS і RAP.

Гнучка централізація функцій рівня радіодоступу впливатиме на роботу протокового стека 3GPP LTE [8] і може бути обмежена можливостями взаємодії між окремими протоколами. Загалом, що ближче до фізичного рівня роздвоєння протокового стека, то вищі накладні витрати і жорсткішими є вимоги до транспортної підсистеми. Коротко розглянемо вплив ступеня централізації RAN на особливості функціонування.

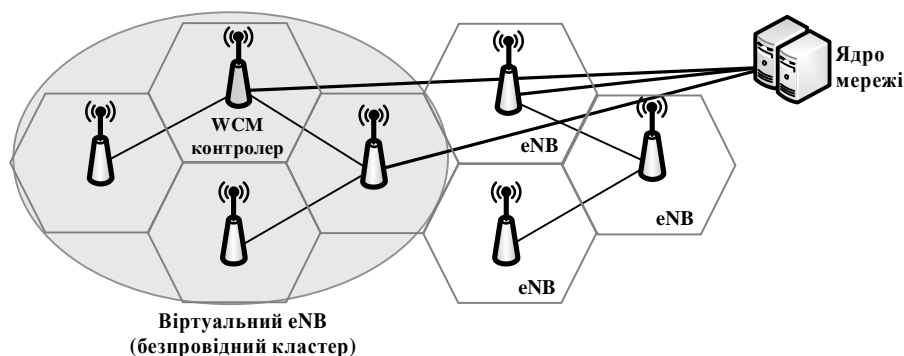


Рис. 2. Безпроводний кластер як віртуальне eNB

Використання централізованого функціонування на фізичному рівні дає змогу виконувати віддалені обчислення (отримання та обробка інформації про поточний стан каналу – CSI (Channel State Information), кодування/декодування, модуляція тощо) та залежить від кількості користувачів, що обслуговуються однією точкою доступу. На фізичному рівні оцінка стану каналу і декодування у висхідній лінії (UL – uplink) може забезпечити істотний приріст продуктивності за рахунок централізованої роботи, використовуючи глобальну інформацію про стан мережі та значні обчислювальні ресурси.

У разі обробки інформації від декількох користувачів централізована обробка може бути розділена на локальні обчислення безпосередньо на точках радіодоступу, спільні обчислення між точками радіодоступу і віддалену обробку на рівні ядра мережі. Прикладом обробки інформації від декількох користувачів може бути MPTD (Multi-Point Turbo Detection), що передбачає перенесення користувачів, підключених до різних точок радіодоступу, на спільний пул ресурсів та використання інтерференції між користувачами як джерел інформації. MPTD є повністю централізованим, тоді як існує альтернативний варіант INP (in-network processing), який є централізованим і ґрунтується на взаємному обміні інформацією між сусідніми точками радіодоступу.

Іншим прикладом інтерфейсу між фізичним і каналним рівнями є протокол надійності з'єднань H-ARQ. H-ARQ являє собою схему адаптації каналу, в якій звіти про передавання, що належать до каналного рівня, використовуються для прийняття рішення про повторну передачу. H-ARQ створює жорсткі вимоги до синхронізації. В 3GPP LTE з частотним розподілом каналів (FDD) зворотний запит HARQ повинен бути відправлений протягом 3 мс після прийому відповідного кадру. У сценарії з централізованим декодуванням це означає, що сумарна затримка передачі в двох напрямках через транспортну підсистему разом з затримкою на обчислення повинна бути меншою за 3 мс.

Координоване планування може отримати перевагу за централізації з упровадженням передових алгоритмів ICIC високої обчислювальної складності. Однак планування чутливе до недосконалої та застарілої інформації про стан каналу, яку необхідно брати до уваги. Планування і сегментація вносять додаткові обмеження через те, що схеми модуляції та кодування (адаптація лінії зв'язку) вибирають безпосередньо на точках радіодоступу.

Централізоване управління радіоресурсами (RRC) [9–11] дозволить динамічно змінювати структуру рівня радіодоступу (створювати безпроводні кластери різної конфігурації та розмірів, переводити неактивні комірки в режим очікування) та ефективно балансувати мережеве навантаження.

Вплив особливостей транспортної підсистеми на якісні характеристики рівня радіодоступу

Порівняно з традиційним розгортанням макрокоміркового покриття (мережі GSM, LTE), транспортна підсистема мобільних мереж п'ятого покоління, що потенційно використовують велику кількість малих комірок (small cells – SC), стає важливою частиною інфраструктури.

Транспортна підсистема рівня радіодоступу (ВН) повинна бути гнучкою і адаптивною до змінних сценаріїв використання та флуктуацій навантаження. Це викликає необхідність в оптимізації транспортного рівня, що дасть змогу реконфігурувати ВН залежно від параметрів управління RAN, щоб забезпечити ефективне функціонування мережі залежно від фактичного ступеня централізації [12–15].

Таблиця 1

Вплив характеристик транспортної підсистеми на особливості реалізації платформи координованого керування RAN

		Приріст продуктивності	Вимоги		Складність
			Ємність	Затримка	
Упровадження (ступінь централізації)	повна	відсутній	дуже високі	високі	низька
	часткова	відсутній	середні	середні	низька
	розподілена	відсутній	високі	середні	середня
Кластеризація	статична	незначний	середні	середні	середня
	динамічна	значний	середні	середні	висока

		Приріст продуктивності	Вимоги		Складність
			Ємність	Затримка	
Сигналізація	спільний канал	відсутній	T: середні, C: відсутні.	T: середні, C: відсутні.	низька
	виділений канал	відсутній	T: високі, C: середні.	T: відсутні, C: високі.	середня

Примітка. T – транспортна площа, C – сигналізаційна площа.

Отже, обмежені ресурси транспортної підсистеми необхідно враховувати під час роботи з RAN. Основними обмежувальними факторами виступатимуть затримка та інформаційна ємність транспортної підсистеми. Це зумовлює необхідність спільного проектування та оптимізації рівня радіодоступу і транспортної мережі за допомогою стандартних інтерфейсів.

Отже, на реалізацію механізмів координованого керування суттєво впливає ступінь централізації системи та обмеження транспортної підсистеми. В табл. 1 підсумовано вплив характеристик транспортної підсистеми на особливості реалізації платформи координованого керування RAN.

Отже, внаслідок обмежень транспортної підсистеми під час розгортання RAN управління радіоресурсами та критичні до затримки функції виконуються локально, тоді як функції з менш жорсткими вимогами (напр., балансування навантаження) реалізуються віддалено. Якщо доступний транспортний рівень з високими якісними характеристиками з'єднань (оптичні лінії до кожної точки радіодоступу), досягається високий ступінь централізації зсувом функцій нижнього рівня на платформу координованого керування. Впровадження нових алгоритмів може дати змогу використовувати значні обсяги наявних ресурсів ефективніше (наприклад, за допомогою розпаралелювання та експлуатації часових і просторових флуктуацій в ультращільних мережах 5G), що створює величезний потенціал для рознесених обчислень.

Використання програмного керування мережею (SDN) дає змогу уникнути багатьох вищевказаних проблем, застосовуючи централізовані механізми керування трафіком [16]. Розглянемо адаптацію логічно централізованої архітектури за допомогою SDN. Така архітектура містить SDN контролер, який віддалено програмує (реконфігурує або ж модифікує програмне забезпечення) мережеві пристрої та динамічно змінює поведінку мережі. SDN контролер реалізується як частина мережевого контролера і забезпечує необхідні характеристики ВН для розподіленої RAN. Відповідно до інформації про поточний стан мережі навантаження може бути оптимально розділене між множиною малих комірок.

Такий підхід можна ефективно використати для виконання таких завдань:

- Управління мобільністю. Мережі з високою щільністю розбудови генерують більше хендверів через малий розмір комірок. Отже, управління мобільністю повинно здійснюватись не лише на основі інформації про якість радіопокриття, але і на основі завантаженості мережевих сегментів. Застосування SDN рішень дає змогу швидше здійснювати перемикання між RAN та реалізувати механізми керування навантаженням.

- З'єднання фізично розподілених сегментів мережі в єдину логічну структуру. Площина передавання даних для кожного окремого користувача може бути рознесена на декілька передавальних пристроїв (для балансування навантаження), тоді як сигналізаційна площа логічно централізована на мережевому контролері.

- Оптимізація енергетичних ресурсів RAN і ВН. Залежно від запитів користувачів і поточного стану мережі частина обладнання RAN і ВН може бути переведена в режим очікування, що суттєво підвищить енергетичну ефективність системи.

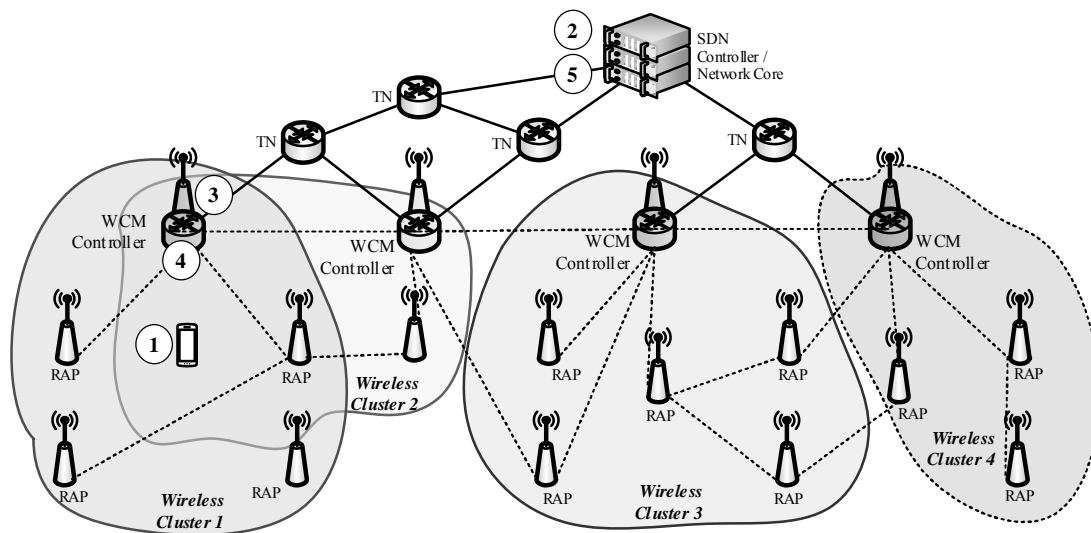


Рис. 3. Управління ресурсами транспортної підсистеми на основі SDN контролера

Використання SDN у мережах 5G також створює певні проблеми. По-перше, цей метод вносить надлишкову сигналізаційну інформацію. По-друге, нетривіальним рішенням залишається вибір того, які функціональні можливості варто делегувати контролеру, а які виконувати локально. По-третє, для мережі оператора необхідно декілька контролерів, що вимагає механізмів розділення мережі на сегменти, а також підтримки необхідного рівня масштабованості й надійності.

На рис. 3 показано приклад формування структури рівня радіодоступу з використанням програмного керування. Коли користувацький термінал підключається до мережі (крок 1), визначається якість обслуговування (QoS), якої потребує поточний тип сервісу (крок 2). На підставі необхідних параметрів QoS та інформації про поточний стан завантаженості мережевих ресурсів контролер на рівні ядра мережі визначає/вибирає контролер управління безпроводним кластером (WCM Controller) (крок 3). Надалі здійснюється формування/реконфігурування структурних елементів кластера (крок 4). Відповідно до вибраного контролера WCM, параметрів QoS і поточного стану мережі визначається оптимальний маршрут з урахуванням споживання енергії в RAN і завантаженості транспортної підсистеми. Цей маршрут прокладається за допомогою взаємодії між контролером WCM і задіяними транспортними вузлами за допомогою протоколу OpenFlow або його розширень (крок 5).

Метод динамічного формування структури рівня радіодоступу

У більшості мобільних безпроводних систем кожен користувацький пристрій (UE – user equipment) підключений до однієї обслуговувальної базової станції, яка забезпечує найкращу якість каналу/послуги серед усіх доступних базових станцій. У запропонованій системі обслуговують користувача одразу декілька базових станцій (точками радіодоступу – RAP), що формують безпроводний кластер. Як описано вище, на рівні ядра мережі вибирається окрема точка радіодоступу, що виконує функції контролера безпроводного кластера, а саме: розподіляє потоки даних UE до усіх BS, що співпрацюють, і обчислює інформацію попереднього кодування на основі зібраної CSI (Channel State Information). Кожна BS в межах сформованого кластера може виступати контролером WCM.

На підставі виявлених вузьких місць необхідні зміни повинні бути застосовані до поточної конфігурації транспортної підсистеми.

Розглянемо блок-схему методу динамічного формування структури рівня радіодоступу (рис. 4). На початку аналізують елементний склад та топологію сегмента мережі, в межах якого буде сформований безпроводний кластер. З урахуванням поточного завантаження мережевих

ресурсів, конфігурації транспортної підсистеми, вимог щодо ємності та затримки від окремих UE здійснюється реконфігурація рівня радіодоступу. Такий підхід дає змогу, залежно від фактичних потреб, досягти максимально можливого рівня пропускної здатності для окремих абонентів, розвантажити транспортну підсистему або ж перевести певні мережеві пристрої у режим очікування, що суттєво знизить енергоспоживання системи в години низького абонентського навантаження.

Принцип роботи запропонованого алгоритму такий:

1. UE обмінюється інформацією RSSI з сусідніми RAP. На основі отриманих даних, інформації про поточний стан завантаженості радіоресурсів на окремих RAP та вимог до QoS контролер на рівні ядра мережі визначає можливий елементний склад безпроводного кластера.
2. Вибирається та призначається контролер управління безпроводним кластером.
3. Визначається поточний стан транспортної підсистеми (параметри затримки та пропускної здатності для окремих каналів) у межах кластера (Intra-cluster Backhaul), а також між WCM контролером та ядром мережі (External Backhaul).
4. Періодично здійснюється перевірка оптимальності місцезнаходження WCM контролера та розраховується найефективніше місцезнаходження контролера в межах кластера, що визначатиме розмір кластера та вимоги до транспортної підсистеми.
5. Контролер на рівні ядра мережі ініціалізує процедуру перепризначення контролера на іншу RAP у межах кластера, що відповідає вимогам.
6. Перевіряють, чи не існує критичних обмежень щодо транспортної підсистеми та визначають окремі канали між RAP, що є неефективними (постійно перевантажені або недовантажені).

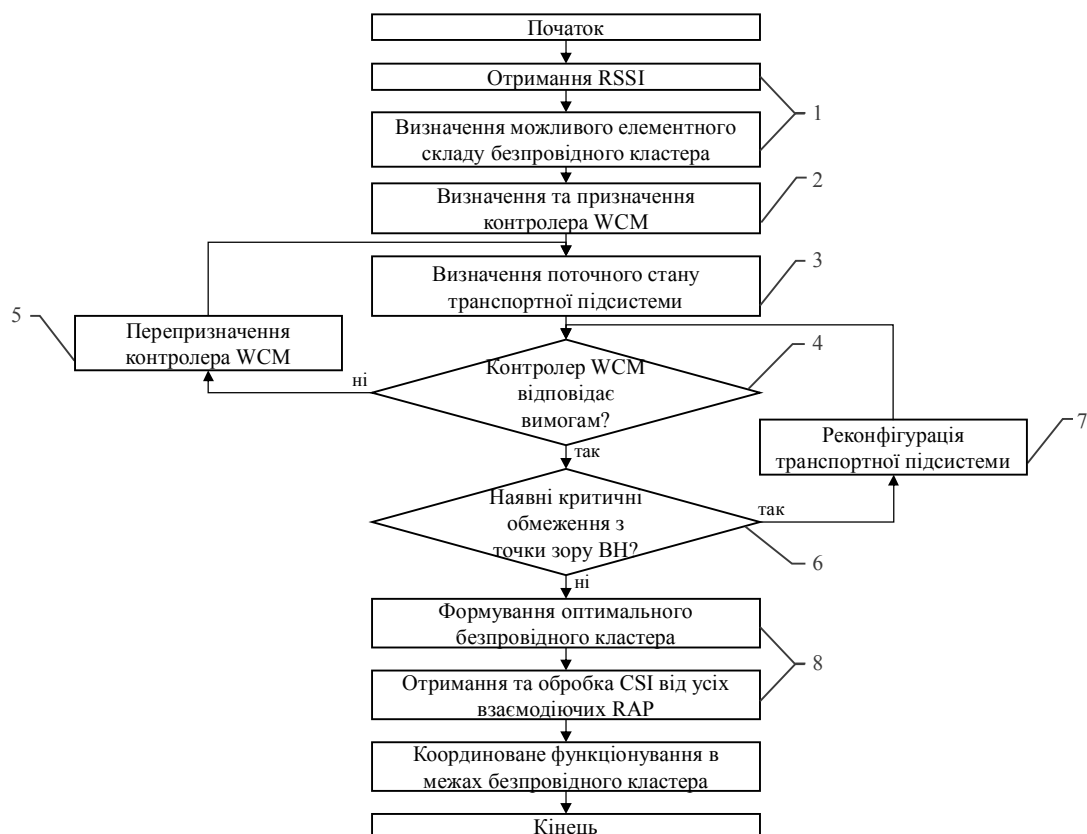


Рис. 4. Блок-схема методу динамічного формування структури рівня радіодоступу

7. Залежно від розподілу функцій контролер на рівні ядра мережі або\та WCM контролер здійснюють реконфігурацію транспортної підсистеми в межах кластера.

8. UE передає CSI до усіх RAP, що взаємодіють, а надалі передає до контролера WCM, який аналізує отримані дані та надсилає усім RAP підтвердження про режим координованого функціонування.

Отже, запропонований метод передбачає зміну структури рівня радіодоступу. По-перше, замість фіксації місця розташування контролера WCM для певного UE на основі безпроводних характеристик каналу запропоновано визначати та програмно реконфігурувати місцеположення контролера в межах безпроводного кластера для ефективного розподілу мережевих ресурсів відповідно до потреб користувачів. По-друге, можлива реконфігурація транспортної підсистеми в межах безпроводного кластера, що дасть змогу досягти необхідних параметрів затримки та інформаційної ємності.

Дослідження ефективності координованого керування рівнем радіодоступу

Щоб отримати уявлення про те, як фактична реалізація транспортної мережі впливає на функціональні можливості безпроводної мережі, проведено імітаційне моделювання. Імітаційна модель розроблена у програмному середовищі MathLab 2015a з використанням симулятора системного рівня LTE Віденського технологічного університету LTE System Level Simulator v1.8 r1375 [17]. Вихідні параметри моделювання наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри моделювання

Параметр	Значення
Кількість RAP	120
Середня відстань між RAP	150 м
Ширина смуга пропускання	10 МГц
Частота несучої	2 ГГц
Спектральна потужність шуму	-174.0 дБп/Гц
Модель втрат у каналі	$128.1 + 37.6 \log(x)$, x, км

Під час проведення моделювання 120 RAP розподіляються в просторі відповідно до гексагонального планування. Середня відстань між RAP становить 150 м, що відповідає міському сценарію розгортання. Після розміщення всіх RAP генеруються зв'язки між ними і будується транспортна мережа. Для врахування мобільності абонентів використовується А-модель [18] з доплерівською частотою 5 Гц.

Припускаємо, що оптичні канали між RAP вносять затримку

$$t = \bar{s} \cdot 1,45 / c, \quad (1)$$

де \bar{s} – довжина шляху, c – швидкість світла, 1,45 – показник заломлення волокна. Це відповідає типовим характеристикам одномодового волокна (SMF).

Пропускна здатність кожного каналу становитиме

$$C_{ch} = f_{1cap} \cdot d_{coop}, \quad (2)$$

де d_{coop} – середня швидкість передачі даних, що необхідна для обслуговування UE. Параметр f_{1cap} – нормоване значення пропускної здатності каналу, яке варіюється від 1.25 до 10. Значення 10 відповідає максимально можливим якісним характеристикам сучасних оптичних мереж доступу.

Розглянемо вибір елементів користувацького кластера. Усі базові станції, розміщені в радіусі $f_{wls} \cdot \bar{s}$, формують можливий елементний склад безпроводного кластера. Параметр f_{wls} використовується для зміни розміру кластера. Значення $f_{wls} = 1$ відповідає користувацькому кластеру, що складається з 3 RAP, а при $f_{wls} = 4$ кластер міститиме 12 RAP.

Після додавання UE до вже сформованого кластера сумарне навантаження на кластер збільшується на величину потоку даних одного користувача і виконується перевірка сумарної затримки. Якщо додавання UE перевантажить один з каналів до RAP_n , UE не може бути членом відповідного кластера. Для спрощення сигнальний трафік не враховується, оскільки порівняно з користувацькими даними він мало впливає на вимоги щодо пропускної здатності.

Всі ці кроки алгоритму встановлення з'єднання та передавання даних повинні бути завершені, поки значення CSI є актуальним. Отже, максимальне обмеження за часом становить 1 мс (відповідно до тривалості підкадру LTE). Необхідно резервувати 0,5 мс для обробки даних на контролері. Частина, що залишилася, може бути використана для транспортування даних безпосередньо до RAP; тобто час повернення (Round Trip Time – RTT) від контролера WCM до усіх RAP у межах кластера повинен бути меншим за 0,5 мс. Для спрощення нехтуємо додатковою затримкою для передачі CSI по висхідному каналу від UE до RAP.

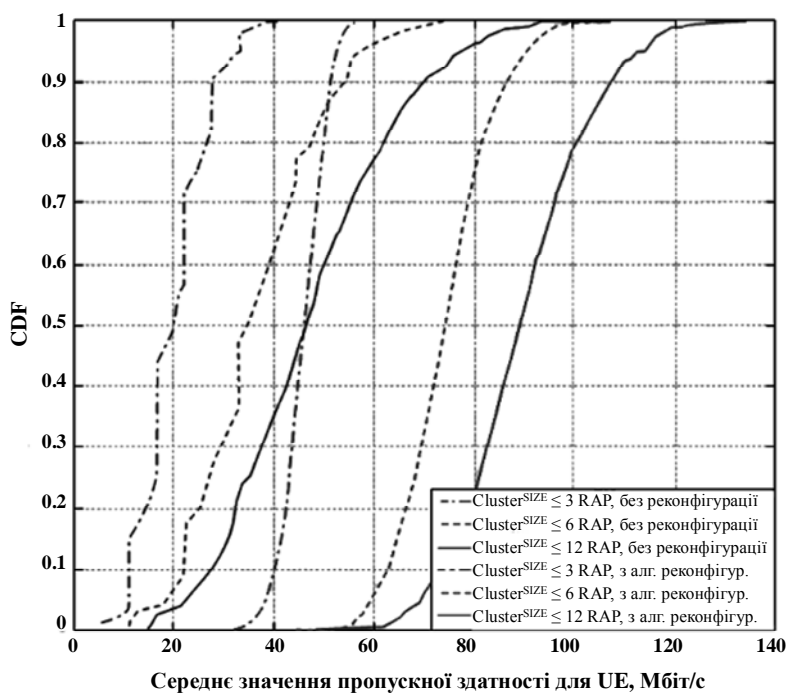


Рис. 5. Кумулятивна функція розподілу середнього значення пропускної здатності

Проведена оцінка показала, що не завжди навіть малі за розміром кластери ефективно функціонуватимуть через обмеження пропускної здатності та затримку транспортної мережі. Це відбувається навіть у разі використання оптичних каналів та 10-кратного перевищення пропускної здатності транспортного сегмента порівняно з пропускною здатністю, що надається окремому UE.

Отже, за координованого функціонування множини RAP найкритичнішими є інформаційна ємність окремих каналів зв'язку та сумарна затримка поширення сигналу від крайових елементів кластера до контролера WCM.

На рис. 5, а показано, що запропонований метод дає змогу отримати істотний вииграш у пропускній здатності для абонентів всередині кластера й особливо актуальний в сценаріях, коли безпроводний кластер формується з великої кількості комірок. З іншого боку, застосування методу динамічного формування структури рівня радіодоступу адаптивно реагує на зміну завантаженості мережевих ресурсів та дає змогу досягти вищих показників пропускної здатності за менших розмірів кластера (менше активних RAP).

Доступність безпроводного кластера виражає співвідношення між пропускною здатністю транспортної та безпроводної частин мережі. Під час моделювання результати отримуються для

1 UE в момент часу. Отже, результати не залежать від кількості пристроїв і показують верхню межу для доступності.

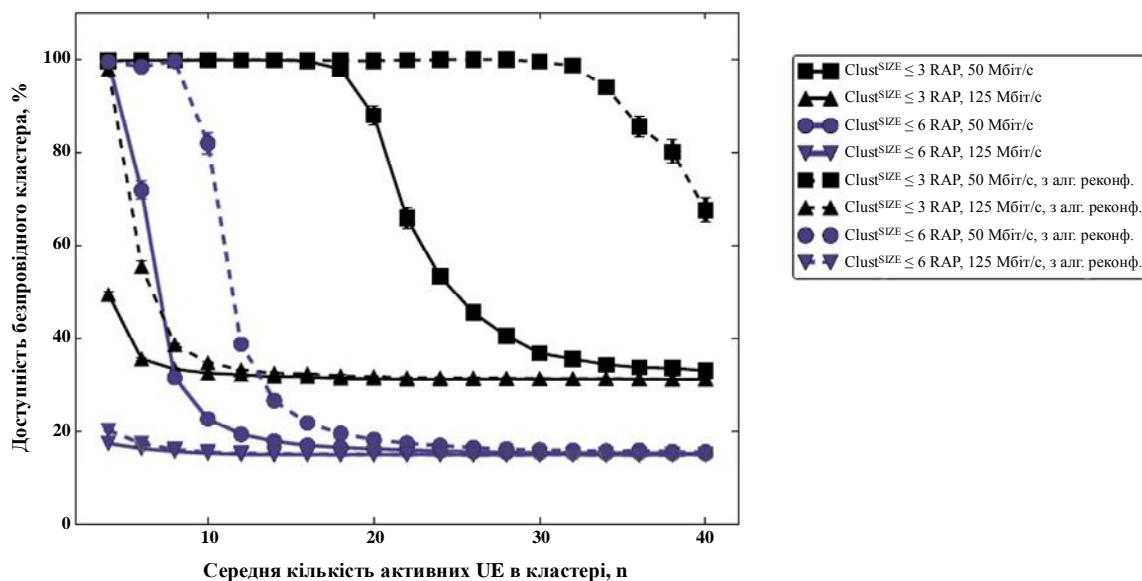


Рис. 6. Вплив методу динамічного формування структури рівня радіодоступу на доступність безпроводного кластера

На рис. 6 зображена залежність доступності безпроводного кластера від середньої кількості активних UE у кластері для кластерів малого ($\text{Clust}^{\text{SIZE}} \leq 3 \text{ RAP}$) та середнього ($\text{Clust}^{\text{SIZE}} \leq 6 \text{ RAP}$) розміру із застосуванням статичного та динамічного методів формування структури рівня радіодоступу. Отримані результати дають підстави, з одного боку, говорити про обмеження розміру користувацького кластера, враховуючи особливості транспортної мережі, а з іншого боку – ставити вимоги до нових транспортних мереж, адаптованих під потреби оператора зв'язку.

Як бачимо, запропонований метод у разі збільшення кількості активних користувачів у межах кластера, тобто зростання навантаження, дає змогу отримати вищі показники доступності, ефективно адаптувавши структуру рівня радіодоступу згідно з вимогами кінцевих абонентів.

Отже, визначення складових кластера, що ґрунтується тільки на вимогах безпроводної частини, знижує продуктивність мережі загалом і спричиняє надлишковий обмін сигналізаційною та користувацькою інформацією. Результати моделювання показують важливість врахування структури транспортного рівня мережі доступу під час формування користувацького кластера.

Висновки

У роботі розглянуто розвиток концепції програмно керованої мережі радіодоступу, що реалізує компроміс між повною централізацією, що характерна для C-RAN, і децентралізацією. Гнучкий розподіл функцій радіодоступу дасть змогу ефективно керувати наявними ресурсами залежно від фактичного сценарію функціонування та вимог окремих користувачів. Набір централізованих/локально розподілених функцій може варіюватись залежно від поточного сценарію функціонування (завантаження комірок, мобільності користувачів, типів сервісів) та реалізовуватись на кожному протокольному рівні або на межі між рівнями.

Запропонований метод динамічного формування структури рівня радіодоступу враховує елементний склад, топологію сегмента мережі, поточний рівень завантаження мережевих ресурсів, конфігурацію транспортної підсистеми, вимоги щодо ємності та затримки окремих UE та дає змогу, залежно від фактичних потреб, максимально ефективно використовувати спектральні ресурси та ресурси транспортної підсистеми за допомогою перепризначення контролеру управління безпроводним кластером та адаптації транспортної підсистеми в межах кластера.

Результати моделювання показують, що застосування запропонованого методу значно підвищує можливості безпроводного кластера, особливо в сценаріях з високим навантаженням та дає змогу досягти вищих показників пропускної здатності без застосування додаткових RAN.

1. Cisco. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 20102015 // in white paper, Feb 2011. 2. China Mobile. C-ran: The road towards green ran // in White Paper. 3. Alcatel Lucent. Lightradio network: A new wireless experience // in White paper. 4. Nokia Siemens Networks, "Liquid radio: Let traffic waves flow most efficiently," in White Paper. 5. C-RAN: The Road Towards Green RAN: [White Paper, ver. 2.5]. – China: China Mobile Research Institute, Oct. 2011. 6. C-RAN: The Road Towards Green RAN: [White Paper, ver. 3.0]. – China: China Mobile Research Institute, Oct. 2011. 7. Bhushan N., Junyi Li, Malladi D. et al. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G / IEEE Communications Magazine.– vol. 52, no. 2 – USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014. 8. Damnjanovic A., Montojo J., Wei et al. Y. A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks / IEEE Wireless Communications– vol. 18, no. 3 – USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011. 9. Hu R. Q., Qian Y. Resource Management for Heterogeneous Networks in LTE Systems / SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering, USA: Springer, 2014. 10. Guskov P., Kozlovskiy R., Maksymyuk T., Klymash M. Methods and techniques of spectrum reforming for LTE network deployment / Proceedings of international conference IEEE "Microwave and Telecommunication Technology", Sevastopol, 2013. 11. Jo M., Klymash M., Maksymyuk T., Kozlovskiy R. Dynamic Spectrum Sharing Algorithm for Combined Mobile Networks / Proceedings of international conference IEEE "Microwaves, Radar, and Wireless Communications", Gdansk, 2014. 12. Maksymyuk T., Strykhalyuk B. Heterogeneous network architecture for mobile cloud computing / Матеріали науково-методичної конференції "Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій", Львів, 2014. 13. Klymash M., Huskov P., Kahalo I., Maksymyuk T. Smart Backhauling Subsystem for 5G Heterogeneous Network / Proceedings of the international conference IEEE "Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics", Polyana-Svalyava, 2015. 14. Biermann T., Scalia L., Choi C., Kellerer W., Karl H. How backhaul networks influence the feasibility of coordinated multipoint in cellular networks // IEEE Communications Magazine, vol.51, no. 8, 2013. 15. Biermann T., Scalia L., Choi C., Karl H. and Kellerer W. Backhaul network pre-clustering in cooperative cellular mobile access networks // IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, IEEE, June 2011. 16. Network Functions Virtualisation: An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action // White Paper, SDN and Open Flow World Congress, Oct. 2012. 17. LTE-A Downlink System Level Simulator v1.8 r1375, <http://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/lte-a-downlink-system-level-simulator> 18. 3GPP TS 36.101, User Equipment (UE) radio transmission and reception, v.8.5.1 / European Telecommunications Standards Institute, March 2008.