

УДК 621.396

ПРОЕКТУВАННЯ МЕРЕЖІ C-RAN ЗА КРИТЕРІЄМ НАСКРІЗНОЇ ЗАТРИМКИ

П.О. Гуськов, Р.І. Бак, А.Л. Швець, Р.С. Колодій, Б.В. Коваль

*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна*

У статті проведено дослідження впливу обмеження максимальної затримки на ефективність функціонування C-RAN (Cloud Radio Access Network). Вдосконалено метод формування структури C-RAN, шляхом врахування взаємного розміщення точок радіодоступу RRH (Remote Radio Head) та BBUP (Base Band Unit Pool) при обмеженні максимальної затримки. На основі імітаційного моделювання проведено аналіз ефективності розміщення BBUP та розподілу середнього значення затримки в мережах C-RAN.

Ключові слова: C-RAN, LTE, 5G, затримка.

Вступ. На сьогоднішній день науковці та дослідники приділяють багато уваги розробці нових методів побудови мереж радіодоступу з централізацією керування та основних функцій. Такі підходи багато в чому наслідують останні досягнення в технологіях провідної передачі транспортних мереж та присвячені методам віртуалізації ядра мобільної мережі та інтеграції програмного управління [1,2].

Розділення функцій базової станції дає змогу проектувати нові та вдосконалювати існуючі мобільні мережі, забезпечуючи при цьому достатній рівень ефективності керування та не потребуючи повної зміни її функціональних частин [3]. При розділенні функцій базової станції необхідно враховувати вплив додатково внесеної затримки, що може суттєво впливати на ефективність функціонування мережі в цілому. Таким чином затримка є одним із ключових показників продуктивності сучасних систем зв'язку [4,5].

Аналіз затримки в C-RAN. Затримка може бути виміряна часом, що необхідний для двосторонньої передачі IP-пакета від терміналу через мобільну мережу до сервера. Час кругової передачі (RTT – Round-Trip Time), суттєво впливає на якість сприйняття послуг (QoE) у порівнянні з затримкою в одну сторону (OWD – One-Way Delay). Для спрощення приймається, що RTT розраховується за формулою:

$$\tau_{RTT} = 2 * \tau_{OWD}, \text{ мс} \quad (1)$$

де: τ_{OWD} – одностороння затримка.

Значення для найкращого та найгіршого випадків кругової затримки наведено у таблиці 1 [6]. RTT складається із затримки, що вносять наступні підсистеми: мережа радіодоступу (RAN), транспортна підсистема, яка в свою чергу складається з двох частин (fronthaul – від RRH до BBU та backhaul – від BBU до

ядра мережі), ядро мережі (EPC), магістральні лінії та кінцеві сервери обробки даних. Для спрощення в магістральних лініях враховуємо тільки затримку поширення.

$$\tau_{ETE} = \tau_{RAN} + \tau_{BH} + \tau_{EPC} + \tau_{BB} + \tau_S \quad (2)$$

де: τ_{RAN} – RTT в RAN, τ_{BH} – RTT в ВН, τ_{EPC} – затримка в ядрі мережі, τ_{BB} – RTT в магістральній мережі, τ_S – затримка сервера.

Таблиця 1

Компоненти кругової затримки з кінця в кінець

τ , мс	RAN	ВН	EPC	IP Backbone	Сервери	RTT
Мін.	7	2	1	30	1	41
Макс.	10	12	4	300	4	330

Зазначимо, що затримка EPC та серверів обробки даних може суттєво змінюватись в залежності від кількості та типу сесій і запитів, що обробляються. При використанні зв'язування мережевих послуг NSC (Network Service Chaining), деякі пакети можуть отримувати додаткову затримку, особливо ті, що ще не були включені в потокові таблиці OpenFlow. Цей факт веде до необхідності врахування ще однієї компоненти при обчисленні загальної кругової затримки з кінця в кінець [7].

$$\tau_{ETE}^{NSC} = \tau_{ETE} + \tau_{NSC} \cdot \tilde{n} \quad (3)$$

де τ_{ETE} – загальна кругова затримка з кінця в кінець без врахування NSC, τ_{NSC} – затримка, що пов'язана з NSC.

Також необхідно врахувати додаткову затримку, що пов'язана з розділенням eNodeB (рис. 1):

$$\tau_{eNB} = \tau_{RRH} + \tau_{FH} + \tau_{BBUP} \quad (4)$$

де τ_{RRH} – затримка при обробці в RRH, τ_{FH} – RTT в FH, τ_{BBUP} – затримка при обробці в BBU.



Рис. 1. Компоненти затримки в C-RAN

Фіксоване значення затримки в транспортній підсистемі визначає необхідність зменшення часу обчислень на стороні BBU.

Моделювання процесу функціонування C-RAN. Розроблена модель (рис. 2) дає змогу оцінити ефективність позиціонування структурних елементів RAN, затримку та кількісні характеристик мережевих ресурсів (канал FH, BBUP, канали ВН та ядра).

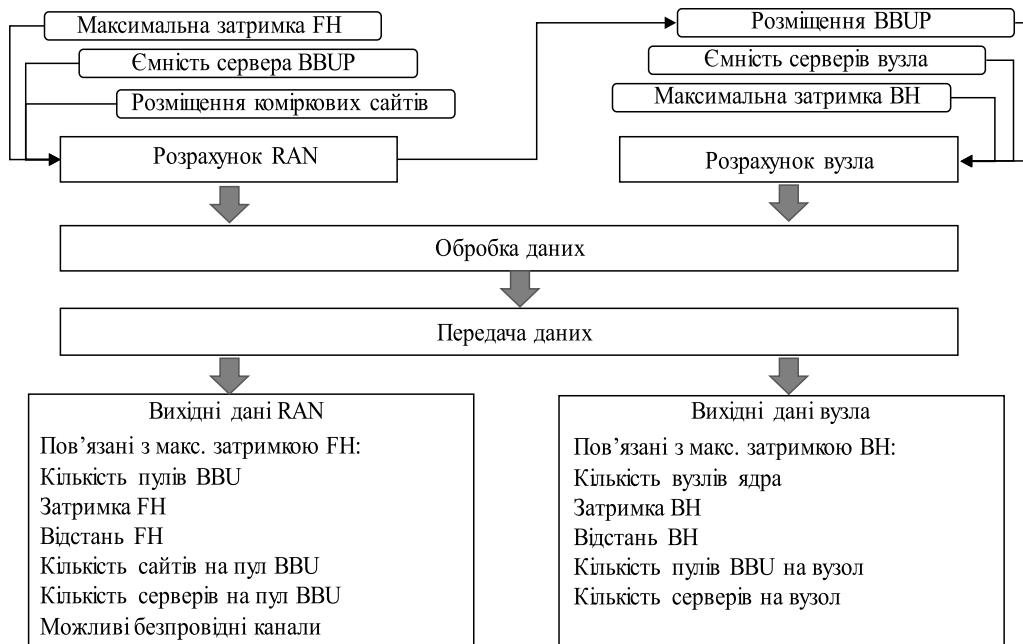


Рис. 2. Модель визначення структури C-RAN та дослідження затримки

Зазначимо, що розміщення RRH є статичним, але їх під'єднання до того чи іншого BBUP може змінюватись. Позиціонування BBUP як вхідних даних для визначення вузлів, береться за умови найбільшої із можливих затримок FH, що використовується при визначенні RAN.

Першим кроком при визначенні структури RAN є позиціонування більшості BBUP. Другим кроком потрібно знайти RRH, що можуть бути підключені до одного із сусідніх BBUP. Третім кроком є створення та розміщення додаткових BBUP для RRH, які залишилися не підключеними. Останнім кроком є підрахунок загальної ємності, яка необхідна у кожному із BBUP. Визначення транспортних вузлів проводиться за аналогічним алгоритмом, але із врахуванням затримки ВН.

Блок обробки даних відповідає за аналіз даних за параметрами затримки, відстані і пропускну здатності, обчислення максимальних обмежень затримки в FH і ВН, обчислення кількості необхідних серверів в BBUP. Блок передачі даних відповідає за узгодження отриманих даних з відповідними математичними моделями.

Етап обробки даних приймає результати отримані на етапах розміщення RAN та вузлів ядра і на їх основі обраховує результат. Затримка каналів FH, відстань між BBUP та їх комірковими сайтами, вимоги щодо продуктивності каналу FH аналізуються для отримання відповідних статистичних даних (максимальне, мінімальне та середнє значення, а також стандартне відхилення від загального випадку). Результатом роботи моделі є визначення наступних параметрів:

- кількість необхідних BBUP/вузлів;
- затримка та відстань FH/ВН;
- частку BBUP/вузлів, що обслуговують єдиний сайт;

- кількість сайтів та необхідна кількість серверів на ВВУР при різних значеннях обмеження максимальної затримки FH;
- кількість ВВУР та необхідна кількість серверів на кожен вузол при різних значеннях обмеження затримки ВН;

Фаза упакування даних здійснюється за допомогою використання бібліотеки Curve Fitting Tool в Matlab, з урахуванням математичних моделей наведених у таблиці 2.

Таблиця 2

**Математичні моделі,
що використовують для опису експериментальних даних**

Назва моделі	Вираз
Раціональна	$f(x) = \frac{a}{x+b}, a, b \in \mathbf{R}$
Лінійна	$f(x) = a * x + b, a, b \in \mathbf{R}$
Квадратична	$f(x) = a * x^2 + b * x + c, a, b, c \in \mathbf{R}$
Експоненційна	$f(x) = a * e^{bx}, a, b \in \mathbf{R}$

У роботі вважається, що модель із значенням коефіцієнта кореляції $R^2 > 0,95$ є доволі точною, для опису даних що досліджуються. Якщо кілька моделей мають близьке значення R^2 і ЗСКП, то обирається та модель, яка більше підходить з теоретичної точки зору.

Аналіз результатів моделювання. Проаналізовано вплив зміни максимальної затримки FH на такі величини: загальна кількість ВВУР ($N_{\text{ВВУР}}$), середня затримка FH ($\mu_{\delta \text{ FH}}$), середня довжина FH ($\mu_{\delta \text{ FH}}$), можлива частка безпроводних підключень ($N_{\text{тв канали}}$), середнє число сайтів на ВВУР ($\mu_{\text{Нсайтів/ВВУР}}$) та середня кількість серверів на ВВУР ($\mu_{\text{Нсервера/ВВУР}}$). Результати подано в таблиці 3.

Таблиця 3

Вплив максимальної затримки на параметри RAN

Змінна	Максимальна затримка FH [μс]						Очікуваний результат	Перевірка
	75	100	125	150	175	200		
$N_{\text{ВВУР}}$	11,00	68,00	52,00	37,00	29,00	22,00	Спадання	+
$\mu_{\delta \text{ FH}}[\mu\text{с}]$	31,84	41,86	54,01	62,20	76,31	75,43	Зростання	+
$\mu_{\delta \text{ FH}}[\text{км}]$	6,36	8,37	10,80	12,40	15,26	15,08	Зростання	+
$N_{\text{тв канали}}[\%]$	8,46	6,53	2,71	2,15	0,66	1,60	Спадання	+
$\mu_{\text{Нсайтів/ВВУР}}$	16,00	27,00	35,00	49,00	63,00	83,00	Зростання	+
$\mu_{\text{Нсервера/ВВУР}}$	29,00	50,00	65,00	91,00	116,00	153,00	Зростання	+

На рисунку 3 зображено залежність кількості необхідних ВВУР в залежності від обмеження максимальної затримки.

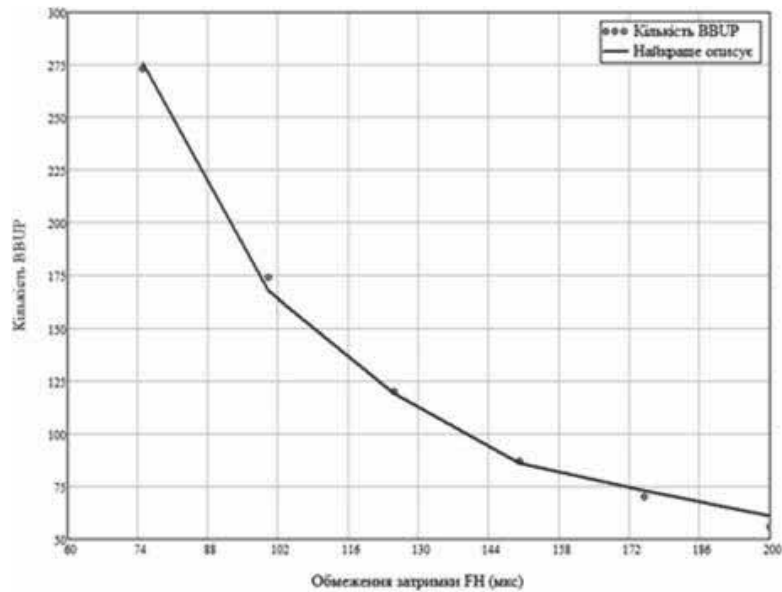


Рис. 3. Залежність кількості ВВУР від обмеження максимальної затримки FH

Очевидно, що зі збільшенням максимальної затримки FH, збільшується також довжина FH. Це призводить до збільшення площі покриття окремими ВВУР, що при покритті однакової площі дає змогу зменшити необхідну кількість ВВУР (56 ВВУР для $\tau_{max} = 200$ мкс та 273 ВВУР для $\tau_{max} = 75$ мкс. Для опису залежності обрано нормальну модель (таблиця 2). Незважаючи на те, що квадратична та експоненціальна моделі мають схоже значення кореляції у порівнянні з нормальною ($<0,98$), її було обрано, тому, що вона монотонно спадає, на відміну від квадратичної моделі, а також середньоквадратичне відхилення майже на половину менше від експоненційної.

Іншим важливим параметром є кількість ВВУР, що обслуговують лише один сайт. Кількість таких, в ідеальному випадку, повинна становити 0, саме в такому випадку у повній мірі використовуються можливості мультиплексування у C-RAN, а також підвищується енергоефективність. У таблиці 4 наведено кількість ВВУР, що обслуговують один сайт у залежності від обмеження максимальної затримки.

Таблиця 4

Кількість ВВУ пулів, що обслуговують лише один сайт

Максимальна затримка FH	75	100	125	150	175	200
Кількість ВВУР	32	14	7	3	3	4

На рис. 4 наведено відсоток ВВУР, що обслуговують лише один сайт у відношенні до загальної кількості ВВУР.

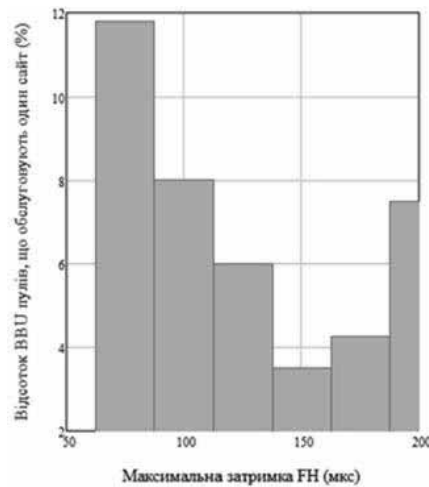


Рис. 4. Частка ВВУР, що обслуговують лише один сайт

Частка ВВУР, що обслуговують лише один сайт, спадає до значення затримки 150 мкс, а далі зростає внаслідок зменшення загальної кількості ВВУР. Результати, зображені на рис. 4 підтверджують ефективність запропонованого методу, оскільки лише при обмеженні максимальної затримки 75 мкс існує більше 10% ВВУР від загальної кількості, що обслуговують лише один сайт. Отримані результати також дають змогу стверджувати про широкі можливості застосування мультиплексування у C-RAN.

При збільшенні обмеження максимальної затримки очікується зростання середнього значення затримки FH (рис. 5).

Середня затримка суттєво менша ніж межа максимальної затримки (наприклад, при обмеженні 200 мкс, середня складає всього 80 мкс). При збільшенні обмеження максимальної затримки спостерігається також збільшення стандартного відхилення, що очевидно, оскільки ВВУР забезпечує з'єднання як до ближніх так і до дальніх сайтів, що є причиною розкиду результатів. Для опису результатів використовується лінійна модель.

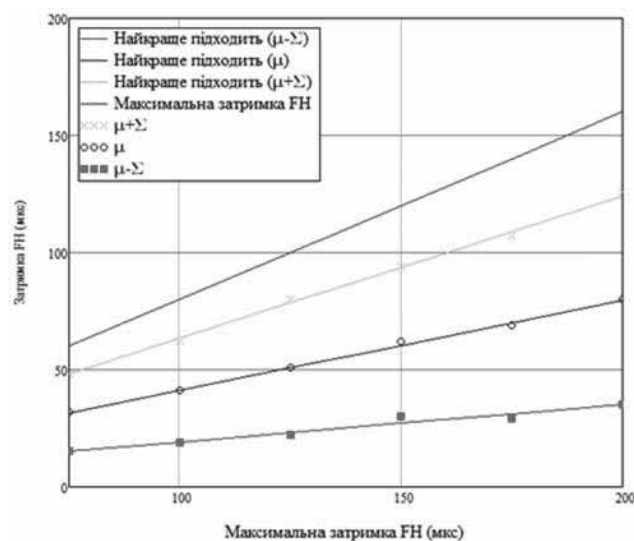


Рис. 5. Відношення середньої до обмеження максимальної затримки FH

У таблиці 5 наведені значення максимальної та мінімальної затримки для різних значень обмеження максимальної затримки. На основі наведених даних можна переконатись, що максимальна затримка FH завжди менша від обмежувачого значення.

Таблиця 5

Максимальні та мінімальні затримки FH для заданих обмежень

Обмеження максимальної затримки FH, мкс	75	100	125	150	175	200
Максимальна затримка FH, мкс	74.62	99.91	124.78	149.92	174.79	199.98
Мінімальна затримка FH, мкс	0					

Запропонована модель добре справляється із поставленими задачами проектування C-RAN, та надає достовірні дані для дослідження затримки при різних конфігураціях мережі.

Сьогодні популярним є проектування мереж із використанням нано- та пікокомірок, тому необхідні подальші дослідження із врахуванням різних типів об'єднання та з'єднання таких комірок з іншими елементами мережі.

Висновки. Проведено дослідження затримки в C-RAN та розроблено модель розрахунку затримки для подальших досліджень. Вдосконалено метод побудови мережі радіодоступу при впровадженні C-RAN, що дає змогу розміщувати BBUP та вузли ядра, враховуючи максимальне обмеження затримки транспортної підсистеми. Такий підхід підвищує ефективність використання ресурсів BBUP.

Проведено дослідження та моделювання середньої затримки в каналі транспортної підсистеми в залежності від обмежень максимальної затримки. Отримані експериментальні дані дають змогу описувати математичними моделями очікувану поведінку мережі при розгортанні мереж наступних поколінь. На основі очікуваного навантаження та значення допустимої затримки оператори мають змогу спрогнозувати витрати на проекти із модернізації мобільних мереж.

Список використаних джерел

1. Гуськов П.О., Огляд стратегії впровадження хмарних мереж радіодоступу / Гуськов П.О., Климаш М.М. // Нові досягнення в галузі інформаційно-комунікаційних технологій - 2015 Львів, 29 жовтня – 1 листопада, 2015. – С. 20-23.
2. Гудіпаті А., Перрі Д., Лі Л.Є., Кетті С., «SoftRAN: Програмно-визначена мережа радіодоступу»: зб. тез доп. 2-го семінару ACM SIGCOMM, Нью-Йорк, США, 2013.
3. Гуськов П.О., Метод динамічного формування структури рівня радіодоступу для мереж 5G / Гуськов П.О., Максимюк Т.А., Климаш М.М. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» №818. Радіoeлектроніка та телекомунікації. – Львів. - 2015. – С. 220-230.

4. Ericsson, Вимоги до транспортної підсистеми LTE, Стокгольм, Швеція, 2015. К. Пентікузіс, Ю. Ванг, В. Ху, Mobileflow: на шляху до програмно-керованих мобільних мереж. Журнал зв'язку IEEE 51(7), (2013).
5. Гуськов П.О., Інтелектуальна транспортна підсистема для гетерогенних мереж 5-го покоління / Гуськов П.О., Максимюк Т.А., Кагало І.О. Климаш М.М. // Досвід Розробки та Впровадження Систем АП у Мікроелектроніці. Матеріали міжнародної конференції CADSM 2015 (Львів-Поляна, Україна, 24-27 лютого, 2015) – Видавництво Львівської політехніки, 2015, С.481-483.
6. 3GPP, Група технічних параметрів послуг та системних аспектів, якості обслуговування (QoS) концепції та архітектури (Реліз 13), Звіт TS 23.107, V13.0.0, січень 2016 (<http://www.3gpp.org/DynaReport/23107.htm>).
7. В. Юнгнікель, Відкрита програмно-керована архітектура для транспортної підсистеми мобільних мереж 5-го покоління / К. Габель; М. Паркер; С. Уокер; С. Бок; Дж. Ф. Рієра; В. Маркес; Д. Леві // Прозорі оптичні мережі (ICTON), (2014 16-а Міжнародна конференція, 6-10 липня 2014 р.), Інститут Генріха Фраунгофера, Берлін, Німеччина. – 2014. С. 1-4.

References

1. Huskov P.O., (2015). A Survey on Cloud Radio Access Networks Deployment Strategies / Huskov P.O., Klymash M.M // Advanced Information and Communication Technologies-2015 (Lviv, October 29 – November 1, 2015), pp. 20-23. (in Ukrainian)
2. Gudipati, A., Perry, D., Li, L. E., and Katti, S. (2013). SoftRAN: Software defined radio access network, in Proc. of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking, New York, NY, USA. (in Ukrainian)
3. Huskov P.O. (2015). Method of RAN Dynamic Structure Formation in 5G / Huskov P.O., Maksymyuk T.A., Klymash M.M. // Proceedings of the National University “Lviv Polytechnic» №818. Electronics and Telecommunications. Lviv. - s.220-230 (in Ukrainian)
4. Ericsson, (2013). Characteristics Requirements for LTE Backhaul, Stockholm, Sweden, 2015. K Pentikousis, Y Wang, W Hu, Mobileflow: towards software-defined mobile networks. IEEE Commun. Mag.51(7). (in Ukrainian)
5. Huskov P.O. (2015). Smart Backhauling Subsystem for 5G Heterogeneous Network// Huskov P.O., Maksymyuk T.A., Kahalo I.O., Klymash M.M.// The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics Proceedings of the International Conference CADSM 2015 (Lviv-Poljana, Ukraine February 24-27, 2015) – Lviv Polytechnic Publishing House, p.481-483. (in Ukrainian)
6. 3GPP, Technical Specification Group Services and System Aspects, Quality of Service (QoS) concept and architecture (Release 13), Report TS 23.107, V13.0.0, January 2016 (<http://www.3gpp.org/DynaReport/23107.htm>). (in Ukrainian)
7. V. Jungnickel, (2014). Software-defined open architecture for front- and backhaul in 5G mobile networks / K. Habel ; M. Parker ; S. Walker ; C. Bock ; J. F. Riera ; V. Marques ; D. Levi // Transparent Optical Networks (ICTON), (2014 16th International Conference on 6-10 July 2014), Fraunhofer Heinrich Hertz Inst., Berlin, Germany. pp. 1-4. (in Ukrainian)

C-RAN PLANNING BASED ON END-TO-END LATENCY CRITERION

P.O. Huskov, R.I. Bak, A.L. Shvets, R.S. Kolodiy, B.V. Koval

*Lviv Polytechnic National University,
12, S. Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine
p.huskov@gmail.com*

The article presents the research of impact of maximum latency on C-RAN efficiency. (Cloud Radio Access Network). The method of C-RAN structure synthesis has been improved by coordinating RRH and BBUP location with limitation of maximum latency. The analyses of BBUP location efficiency and mean delay of distribution in C-RAN has been performed based on simulation results.

Keywords: *C-RAN, LTE, 5G, latency.*

Стаття надійшла до редакції 15.03.2016.

Received 15.03.2016.