

## АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ КЕШУВАННЯ КОНТЕНТУ В БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖАХ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ

*З розвитком технологій послуги мобільного зв'язку змінюють акцент з послуг, які орієнтовані на встановлення з'єднання, на послуги, які орієнтовані на передачу контенту. Одним із можливих напрямків розвитку архітектури мобільних мереж є створення безпроводових мереж, які орієнтовані на передачу контенту. Одним із підходів для зменшення навантаження на базову мережу оператора та зменшення затримки передачі в таких мережах є кешування найбільш популярного контенту на ділянці «останньої милі» - базових станціях (БС) та кінцевих терміналах користувачів (КТ). На відміну від проводових мереж, унікальною властивістю безпроводових мереж, які орієнтовані на передачу контенту, є мобільність користувачів. Тому, в роботі розглядаються основні властивості моделі мобільності користувачів та можливість використання цієї додаткової інформації для збільшення ефективності механізмів кешування.*

*Ключові слова: кешування, безпроводові мережі, мобільність.*

**Вступ.** В останні роки йде швидке зростання трафіку, що припадає на мобільну передачу даних, як наслідок збільшення кількості мобільних пристроїв, таких як смартфони та планшети. Зокрема, послуги мобільного зв'язку змінили направленість з послуг, які орієнтовані на встановлення з'єднання (наприклад, телефонні дзвінки) на послуги, які орієнтовані на передачу контенту (наприклад, передача медіа файлів або відео трансляції). Основним напрямком забезпечення зростаючих потреб пропускної здатності мережі є її ущільнення, тобто розміщення більшої кількості точок доступу чи базових станцій (БС). Не зважаючи на те, що це дозволить збільшити пропускну здатність перспективних стандартів 4G та 5G, такий підхід створить значне навантаження на опорну мережу оператора, що з'єднує точки доступу. Таким чином, оператор мобільного зв'язку буде вимушений витратити значні кошти на модернізацію опорної мережі для передачі мобільного трафіку з мультимедійним контентом. Однак, така модернізація може бути економічно не вигідною у зв'язку з тим, що цей тип трафіку характеризується імпульсністю та регіональністю. Альтернативним підходом може служити використання безпроводових мереж, що орієнтовані на передачу контенту з підтримкою кешування.

На сьогодні, пристрої що знаходяться на «останній милі», такі як БС та кінцеві термінали користувачів (КТ), мають пам'ять великих об'ємів, що може використовуватись для зберігання «популярного» контенту, що найбільш часто запитується користувачами. Зі зменшенням вартості пристроїв зберігання даних великого об'єму, з кожним роком зростає економічна ефективність використання механізмів кешування порівняно з прокладанням нових високошвидкісних каналів для опорної мережі оператора зв'язку [1]. Більш того, об'єми пам'яті пристроїв зберігання даних на мобільних КТ також зростають, що потенційно може бути використано для кешування. Такий підхід дозволить зменшити затримки передачі даних та перевантаження опорної мережі [2], так як користувачі зможуть отримати необхідні файли від БС, що їх обслуговує, або від інших користувачів, що знаходяться в зоні досяжності, без необхідності використання опорної мережі оператора зв'язку.

Створення проводових мереж, що орієнтовані на контент, вже розглянуто та реалізовано. В таких мережах частини контенту безпосередньо маршрутизуються та доставляються на пакетному рівні, а пакети з контентом автоматично кешуються на маршрутизаторах на шляху доставки. Для безпроводових мереж, ширококомовна природа радіоканалу принципово вплине на механізми кешування та доставку файлів. Особливістю безпроводових мереж є мобільність користувачів. Вона ускладнює розробку механізмів кешування в мережах, що орієнтовані на передачу контенту, однак її можна використати для отримання додаткової інформації, яка може бути використана для кешування, як, наприклад, мобільність була використана для модернізації протоколів маршрутизації в епізодичних

мережах [3]. Вплив мобільності на механізми кешування розглядається лише частково [4], і більшість досліджень проводиться з фіксованою топологією мережі.

Тому, метою даної роботи є аналіз механізмів кешування в безпроводових мережах, які орієнтовані на контент, з урахуванням мобільності користувачів.

**Основна частина.** Розглянемо безпроводову мережу з підтримкою кешування, яка зображена на рис. 1.

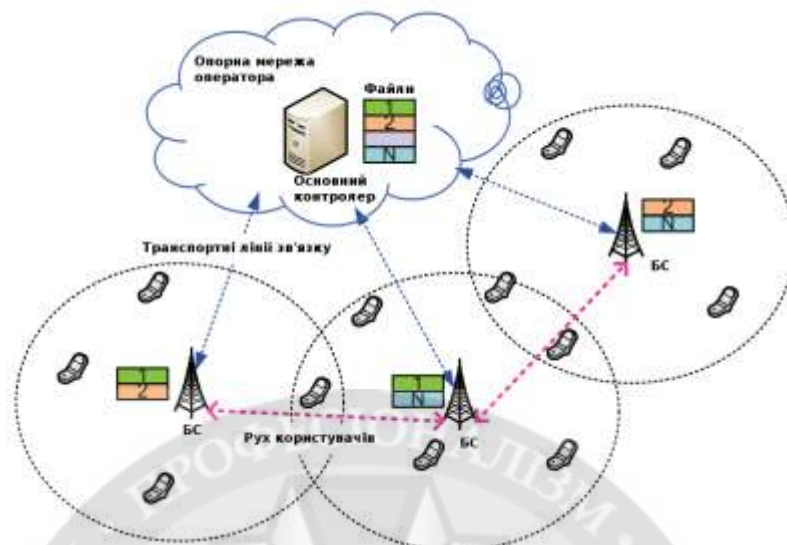


Рис. 1. Безпроводова мережа з підтримкою кешування

Основною проблемою, що необхідно вирішити при розробці механізму кешування є визначення того, яку інформацію та в якому місці кешувати. Робота механізму кешування може залежати від деякої додаткової інформації, яка може бути довгостроковою, тобто зібраною на основі спостережень впродовж тривалого відрізка часу (наприклад, статистика запитів від користувачів, середній час перебування в зоні однієї БС та середній час безпосереднього зв'язку між КТ), та короткостроковою, тобто заснованою на миттєвих змінах важливих параметрів (наприклад, поточна інформація про стан каналу зв'язку або місцезнаходження абонента в реальному часі). Збір довгострокової інформації вимагає зазвичай менше ресурсів, в той час коли короткострокова інформація більш ефективна, але потребує постійного оновлення. Проаналізуємо деякі задачі, які виникають при вирішенні проблеми розробки механізмів кешування в залежності від своєчасності наявної інформації.

Розміщення кешованого контенту зазвичай базується на довгостроковій інформації про систему, і визначає способи ефективного попереднього кешування контенту у доступному сховищі. Для зменшення службового трафіку оновлення додаткової інформації та кешування контенту може виконуватись з низькою періодичністю. Зазвичай, припускається, що довготривалий розподіл популярності деякого контенту відомий апіорі, а топологія мережі є фіксованою. В літературі розглядається механізм кешування з розміщенням кешованого контенту на БС. Зокрема, без кооперації між БС, найліпшою стратегією є зберігання найбільш популярних файлів [5-6].

Розміщення кешованого контенту на КТ доже дозволити користувачам завантажувати необхідний контент більш ефективно за допомогою безпосереднього зв'язку з іншими користувачами з технологією Device to Device (D2D). Порівняно з кешуванням на БС, перевагою кешування на КТ є менші витрати для операторів зв'язку та автоматичне збільшення ємності кешу при збільшенні щільності КТ, так як скупчення КТ утворюють сукупний кеш. Недоліком даного підходу є складність мотивації користувачів для приєднання до сукупного кешу, а також випадковість взаємодії з використанням технології D2D [7].

Однак, більшість досліджень не враховують мобільність користувачів, яку можна відслідковувати на сучасному етапі розвитку технологій. Використовуючи довгострокову статистичну інформацію щодо мобільності користувачів, як, наприклад, імовірнісний розподіл середнього часу перебування користувачів в зоні покриття базових станцій, можна збільшити ефективність більшості механізмів кешування контенту.

Довгострокова інформація потребує меншого службового трафіку, але може втратити актуальність з плином часу, і тому не може гарантувати точність. Наприклад, топологія з'єднань між БС та КТ, або між КТ та КТ може швидко змінюватись через переміщення КТ. Тому, використання не актуальної інформації може призвести до значної кількості помилок в роботі механізму кешування. У випадку, коли є короткострокова інформація, як, наприклад, інформація про запити на завантаження файлів та стан каналів зв'язку, можливо організувати своєчасне оновлення закешованого контенту.

Через обмежену ємність сховища для кешованого контенту, необхідно замінити неактуальний контент для збільшення ефективності кешування. Для цього використовуються алгоритми адаптивного кешування, що замінюють неактуальний контент до якого більше не звертаються користувачі та імовірність нових звернень до якого дуже мала [8]. Також, адаптивне кешування можна використати для обслуговування користувачів, що рухаються за задалегідь відомим моделями пересування та мають передбачувані запити. Коли траєкторія руху та уподобання мобільних користувачів відомі, базові станції можуть оновлювати закешовану інформацію відповідно до оцінки майбутніх запитів. Основним завданням в цьому випадку є точне передбачення майбутнього місцезнаходження користувачів та їх запитів, а також визначення частоти з якою необхідно використовувати алгоритми адаптивного кешування.

На практиці, користувачі можуть завантажити лише частину файлу з БС, а не весь файл в цілому, тому що при пересуванні їм може не вистачити часу, на протязі якого вони знаходяться в зоні покриття даної БС. Алгоритми кешування з упередженням дозволяють виконувати безшовну передачу обслуговування та завантаження для користувачів за допомогою попереднього завантаження необхідного контенту на БС, що з найбільшою імовірністю будуть знаходитись на шляху пересування користувача. Однак, запити користувачів та їх місцезнаходження в реальних умовах не відомі, тому для ефективної роботи таких алгоритмів необхідні точні методи передбачення майбутнього місцезнаходження абонента.

Властивості мобільності користувачів можуть бути розділені на просторові властивості та часові властивості. Просторові властивості містять інформацію відносно фізичного місцезнаходження користувача, тоді як часові властивості описують зміну поведінки з часом.

Мобільність користувачів може бути описана *траєкторією руху* користувача. Важлива для кешування інформація, така як БС, що обслуговуватимуть користувача, відстань між користувачем та БС, може бути визначена за допомогою аналізу траєкторії користувача. Для аналізу можуть бути використані різноманітні моделі, як, наприклад, модель випадкових точок [9].

З іншого боку, мобільність користувача може бути оцінена за допомогою оцінки зміни обслуговуючого стільника, яка містить основні відомості про БС, що будуть обслуговувати користувача на його шляху. Порівняно з траєкторією користувачів дана модель містить менш деталізовану інформацію, так як шлях пересування в середині кожного стільника не відомий, але саме інформація про обслуговуючі БС на шляху користувача є найбільш критичною для більшості механізмів кешування. Цей процес можна описати за допомогою моделі ланцюга Маркова [10], число станів рівне числу БС. В ланцюгу Маркова кожен стан описує конкретного користувача, що обслуговується конкретною БС, а імовірність переходу описує імовірність переходу конкретного користувача з зони покриття однієї БС до зони покриття іншої.

Сучасні дослідження показують, що модель мобільності значною мірою залежить від соціальних взаємин між користувачами. Наприклад, було показано, що мобільні користувачі, які мають відносно сильні соціальні зв'язки, з великою імовірністю будуть мати схожі траєкторії [11]. Авторами було запропоновано дворівневу модель мобільності, що спочатку буде соціальний граф, де вершини описують мобільних користувачів, а зважені ребра – силу соціальних зв'язків між користувачами. На другому етапі, будуються соціальні групи і мобільні користувачі в кожній групі рухаються разом. Така інформація може бути корисна при кешуванні на КТ.

Для зображення частоти та тривалості періоду, на протязі якого два користувача з'єднані між собою, використовується часова шкала на якій відображаються випадкові пари мобільних користувачів. Випадкові пари описуються часовим інтервалом контакту та інтервалом між контактами, де інтервалом контакту є часовий інтервал на протязі якого два користувача знаходяться в зоні радіозв'язку, а інтервалом між контактами є часовий інтервал між двома послідовними контактами. Така модель мобільності використовується для вирішення задач маршрутизації в епізодичних мережах [12].

Час перебування в стільнику описує тривалість обслуговування конкретного користувача заданою БС, що може вплинути на об'єм даних, який може отримати користувач від даної БС. В [10] був запропонований алгоритм визначення розподілу часу перебування в стільнику за допомогою аналізу історії пересування мобільного користувача.

Моделі мобільності користувачів зазвичай періодичні, що може бути використано для вирішення завдання оновлення кешованого контенту. Час повернення, що визначається як час, через який випадковий користувач повернеться до місця, в якому він вже перебував. Цей час є мірою періодичності і частоти повторного відвідування користувачем однієї ділянки. В [13] був проведений аналіз розподілу часу повернення, та визначені пікові значення імовірності часу повернення припадають на 24, 48 та 72 години.

В результаті аналізу можна сформулювати потенційні пропозиції щодо використання інформації про мобільність користувачів для побудови механізмів кешування (табл. 1).

Таблиця 1

Можливість використання інформації про мобільність користувачів при проектуванні механізмів кешування

	Просторові властивості			Часові властивості		
	Траєкторія користувача	Зміна обслуговуючого стільника	Соціальні групи	Інтервал контакту	Час перебування в стільнику	Час повернення
Кешування на БС	Так	Так	Ні	Ні	Так	Ні
Кешування на КТ	Ні	Ні	Так	Так	Ні	Ні
Адаптивне кешування	Ні	Ні	Так	Ні	Ні	Так
кешування з упередженням	Так	Так	Ні	Ні	Ні	Ні

В безпроводових мережах, що орієнтовані на передачу контенту, користувач при русі може завантажувати необхідні файли з усіх БС, що знаходяться на його шляху. Різні БС можуть кооперативно кешувати запитані файли для підвищення ефективності, тому необхідна додаткова інформація для передбачення всіх БС, що будуть на шляху користувача. Для цього може бути використана інформація про його траєкторію та імовірності зміни обслуговуючих стільників. Порівняно з інформацією про імовірності зміни стільника, інформація про траєкторію користувача містить додаткові дані такі як, наприклад, відстань до БС у різних стільниках, що може знадобитись для більш ефективного кооперативного кешування. В залежності від відстані до БС може змінюватись швидкість передачі, що може вплинути на об'єм інформації, що буде завантажена з різних БС. Більш того, час перебування в стільнику також є критичним для визначення об'єму інформації, що може бути завантажена, і тому також впливатиме на кешування контенту на БС.

При використанні кешування на КТ мобільні користувачі можуть отримувати необхідні файли безпосередньо від інших користувачів за допомогою технології D2D. Для реалізації такого механізму кешування необхідна інформація щодо тривалості контакту між користувачами. Також, соціальні зв'язки дозволять розкласти всю мережу на декілька невеликих соціальних груп для зменшення складності реалізації кешування. Крім того, соціальні групи можуть містити деяку інформацію про контакти, наприклад мобільні користувачі з однієї соціальної групи імовірно будуть більш часто контактувати між собою [14]. Тому, інформація про соціальні групи може бути використана при проектуванні механізмів кешування з розміщенням контенту на КТ.

Закешований контент може адаптивно оновлюватись в залежності від періодичності руху користувачів використовуючи дані про час повернення. Також, мобільні користувачі з різних соціальних груп можуть мати різні уподобання щодо контенту. Тому, модель мобільності кожної соціальної групи може використовуватись для збільшення ефективності алгоритмів адаптивного кешування. Наприклад, в кафе можуть приходити різні групи клієнтів з різними уподобаннями щодо контенту та в різні проміжки часу: студенти можуть заходити на ранкову каву, люди старшого віку можуть заходити на чай пообіді, офісні працівники можуть разом заходити на вечерю. Таким чином, БС навколо кафе можуть адаптивно оновлювати закешований контент для різних груп.

Якщо траєкторія користувача або його зміна обслуговуючих стільників може бути визначена на основі попередніх даних, то можна передбачити які БС будуть його обслуговувати на маршруті. Таким чином, якщо мобільний користувач запитує деякий файл, БС що будуть обслуговувати його на його майбутньому шляху, можуть заздалегідь закешувати необхідний файл або деякий його фрагмент, після чого користувач зможе завантажувати цей файл рухаючись між даними БС. Хоча даний підхід може збільшити навантаження на опорну мережу оператора, але такий механізм попереднього кешування може значно збільшити ефективність системи та зменшити затримки при завантаженні.

**Висновки.** Таким чином, в роботі проведено аналіз можливості використання інформації щодо мобільності користувачів в безпроводових мережах, що орієнтовані на контент. Були розглянуті просторові та часові властивості мобільності, що можуть бути використані для вирішення основних завдань при розробці механізмів кешування.

У зв'язку з швидким зростанням кількості мобільних пристроїв збір інформації про мобільність користувачів означає обробку великих об'ємів даних. Тому, для повноцінного використання цієї інформації в безпроводових мережах, що орієнтовані на контент, необхідно провести додаткові дослідження щодо застосування технологій аналізу Big Data для виділення важливої інформації про мобільність користувачів.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. X. Peng, J. Zhang, S.H. Song, and K. B. Letaief, "Cache size allocation in backhaul limited wireless networks," in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.
2. X. Peng, J.-C. Shen, J. Zhang, and K. B. Letaief, "Backhaul-aware caching placement for wireless networks," in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), San Diego, CA, Dec. 2015.
3. V. Conan, J. Leguay, and T. Friedman, "Fixed point opportunistic routing in delay tolerant networks," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 26, no. 5, pp. 773–782, Jun. 2008.
4. K. Poularakis and L. Tassiulas, "Exploiting user mobility for wireless content delivery," in Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory (ISIT), Istanbul, Turkey, Jul. 2013.
5. K. Shanmugam, N. Golrezaei, A. Dimakis, A. Molisch, and G. Caire, "Femtocaching: Wireless content delivery through distributed caching helpers," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 59, no. 12, pp. 8402–8413, Dec. 2013.
6. M. Maddah-Ali and U. Niesen, "Fundamental limits of caching," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 60, no. 5, pp. 2856–2867, May 2014.
7. N. Golrezaei, P. Mansourifard, A. Molisch, and A. Dimakis, "Base-station assisted device-to-device communications for high-throughput wireless video networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 13, no. 7, pp. 3665–3676, Jul. 2014.

8. H. Ahlegh and S. Dey, "Video-aware scheduling and caching in the radio access network," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 22, no. 5, pp. 1444–1462, Oct. 2014.
9. C. Bettstetter, H. Hartenstein, and X. Pérez-Costa, "Stochastic properties of the random waypoint mobility model," *ACM/Kluwer Wireless Netw.*, vol. 10, no. 5, pp. 555–567, Sept. 2004.
10. J.-K. Lee and J. C. Hou, "Modeling steady-state and transient behaviors of user mobility: formulation, analysis, and application," in *Proc. ACM Mobile Ad Hoc Netw. and Comput. (MobiHoc)*, Florence, Italy, Jun. 2006.
11. D. Wang, D. Pedreschi, C. Song, F. Giannotti, and A.-L. Barabasi, "Human mobility, social ties, and link prediction," in *Proc. ACM Knowledge Discovery and Data Mining (SIGKDD)*, San Diego, CA, Aug. 2011.
12. Сова О.Я., Міночкін Д.А., Романюк В.А., Жук П.В. Модель організації інформаційних ресурсів інтелектуальних систем управління вузлами мобільних радіомереж класу MANET. Збірник наукових праць «Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України». – Х.: ХУПС. – 2015, № 2, - с. 51-57
13. M. C. Gonzalez, C. A. Hidalgo, and A.-L. Barabasi, "Understanding individual human mobility patterns," *Nature*, vol. 453, no. 7196, pp. 779–782, Jun. 2008.
14. O. Semiari, W. Saad, S. Valentin, M. Bennis, and H. V. Poor, "Context-aware small cell networks: How social metrics improve wireless resource allocation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 11, pp. 5927–5940, Jul. 2015.

**Рецензент:** д.т.н., проф. Кравчук С.О., доктор технічних наук, професор кафедри, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут»

к.т.н. Миночкин Д.А.

#### АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ КЭШИРОВАНИЕ КОНТЕНТА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ

*С развитием технологий услуги мобильной связи меняют акцент с услуг, ориентированных на установление соединения на услуги, ориентированные на передачу контента. Одним из возможных направлений развития архитектуры мобильных сетей является создание беспроводных сетей, ориентированных на передачу контента. Одним из подходов для уменьшения нагрузки на базовую сеть оператора и уменьшения задержки передачи в таких сетях является кэширование наиболее популярного контента на участке «последней мили» - базовых станциях (БС) и конечных терминалах пользователей (КТ). В отличие от проводных сетей, уникальным свойством беспроводных сетей, ориентированных на передачу контента, является мобильность пользователей. Поэтому, в работе рассматриваются основные свойства модели мобильности пользователей и возможность использования этой дополнительной информации для повышения эффективности механизмов кэширования.*

*Ключевые слова:* кэширование, беспроводные сети, мобильность.

Ph.D. Minochkin D.A.

#### ANALYSIS OF CONTENT CACHING MECHANISMS IN WIRELESS NEXT GENERATION NETWORKS

*With the development of technology mobile services are changing from services that focus on establishing connection, to services that focus on content delivery. One of the possible directions of mobile networks architecture development is to create wireless networks that focus on the content delivery. One of the approaches to reduce the load on the core network and reducing transmission delay in such networks is caching the most popular content on the "last mile" - base stations (BS) and end-user terminal (EUT). Unlike wired networks, wireless networks have a unique feature that can affect the content delivery and caching – user mobility. Therefore, in this paper the basic properties of user mobility are analyzed and the possibility to use this additional information to increase the effectiveness of caching mechanisms is discussed.*

*Keywords:* caching, wireless networks, mobility.