

Система вивантаження даних за технологією D2D у неліцензованому діапазоні частот у складі систем зв'язку 5G

(Представлено: к.т.н., доц. С.І. Пільтай)

При постійному зростанні кількості користувачів та обсягів даних, що вони передають між собою, сучасні мережі систем зв'язку не завжди можуть впоратися із завантаженням. Як альтернатива мережевого ущільнення для збільшення ємності мережі використовується вивантаження мобільного трафіка на пряме з'єднання пристрій–пристрій D2D (device-to-device) між обладнанням користувачів, що знаходяться у безпосередній близькості один до одного. Таким чином, взаємодія D2D є однією із найбільш перспективних напрямів розвитку систем зв'язку, оскільки стає новим компонентом додатково до мобільної мережі. Важливим є те, що ця технологія забезпечує взаємодію користувачів мобільної мережі без використання централізованої інфраструктури, зменшуючи її навантаження. Така взаємодія дозволяє вивантажувати потоки даних із мобільної мережі в систему D2D, що може функціонувати на неліцензованих частотах. У результаті система D2D забезпечує для зв'язку більш короткі з'єднання, підвищену енергетичну ефективність та більш покращену організацію потоків трафіка. Розвиток технології D2D є простим та надійним способом підвищення пропускної здатності стільникових мереж зв'язку без необхідності переробки їх структури. Але при цьому виникає низка особливостей, що пов'язані з врахуванням інтерференції та розподілом ресурсів радіоканалу. В роботі розглянуто модель системи прямих з'єднань D2D із мобільною підтримкою, що обслуговує потоки користувацьких даних (сесії), а також спосіб керування вивантаженням трафіка із мобільної мережі на з'єднання D2D. Наведені теоретичні та модульовані результати дозволяють здійснювати дослідження мережі зв'язку із можливістю взаємодії D2D, оцінити її ємність та енергетичну ефективність. Запропонований математичний підхід враховує динаміку трафіка користувача у часі та розміщення вузлів мережі у просторі, що підтверджується за допомогою результатів моделювання.

Ключові слова: мережі п'ятого покоління; пристрій–пристрій; розподілені мережі; енергетична ефективність.

Актуальність теми. Швидкий розвиток мереж 5G спонукає збільшення обсягів даних, що передаються абонентами, а це призводить до ущільнення мережевої інфраструктури. Ущільнення є причиною зменшення зон покриття малих комірок та збільшення їх кількості в місцях їх значного завантаження, що дозволяє підвищити ємність та якість системи. Водночас збільшення щільності мережевого покриття призводить до ускладнення системи. В результаті є необхідними альтернативні підходи до покращення якості зв'язку. Тому використання технології D2D дозволяє збільшити швидкість передачі даних та підвищити енергетичну ефективність системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Багато робіт присвячено дослідженню радіотехнології 5G із прямими з'єднаннями D2D [1–3]. Сучасні системи зв'язку 5G не завжди ефективно використовують радіоресурси, тому важливо враховувати розміщення вузлів мережі у просторі із динамікою її трафіка в часі. Тому для цього використовують методи стохастичної геометрії [4] із підходами теорії масового обслуговування [5–7]. Використання теорії масового обслуговування дозволяє моделювати динаміку системи на рівні сесій [8]. У з'єднаннях D2D сесія – це потік даних у реальному часі від одного користувача мережі до іншого. У дослідженнях часто використовується метод дослідження нових сесій згідно з пуасонівським точковим процесом для аналізу мобільних та локальних мереж [9], для вивчення способів виявлення сусідів [10], для визначення розподілів випромінюваної потужності та значень SINR у мережах D2D [11]. У таких системах важливо оцінити енергетичне споживання типової користувацької сесії з урахуванням моделі споживання потужності [12]. Але у більшості випадків використання стохастичної геометрії не дозволяє врахувати динаміку системи зв'язку в часі. Крім того, у наявній літературі відсутні підходи, що дозволяють здійснювати просторово-часове моделювання системи D2D із мережевою взаємодією.

Метою статті є дослідження нового підходу до аналізу взаємодії прямих з'єднань D2D у неліцензованому спектрі та інфраструктурних мобільних з'єднань у ліцензованому спектрі, коли мережа оператора має можливість вивантажувати абонентські сесії в шар D2D.

Викладення основного матеріалу. Сьогодні можливість установа з'єднання D2D в ліцензованому частотному діапазоні має низку складнощів, зокрема складність відповідного керування системою зв'язку, що створює труднощі під час реалізації такого підходу на практиці. На неліцензованій частоті процес виявлення сусідів є енерговитратним, установа прямого з'єднання ускладнене, відсутні надійні засоби підтримки безперервності зв'язку. Але всі недоліки можна частково або повністю усунути за використання мережевого сприяння, що надасть користувачам додаткові відомості, які є доступними ліцензованим мережам.

Щоб система D2D працювала, необхідно виявити сусідів та встановити пряме з'єднання. Вони можуть бути організовані розподілено, але мережеве сприяння забезпечує низку переваг. Оскільки мобільна мережа здатна відстежувати місцезнаходження абонентів, яких вона обслуговує, то може знизити відсоток часу, що користувач витрачає на виявлення інших пристроїв чи послуг, повідомляючи його тоді, коли пристрої є поблизу. Це дозволяє користувачам не застосовувати технологію D2D для виявлення та перемикається на неї лише у момент безпосереднього встановлення з'єднання, що економить ресурс батареї та радіоресурс.

Мережеве сприяння забезпечує анонімність користувачів під час виявлення сусідів та установа з'єднання D2D шляхом маскуванню їх ідентифікаторів. Отже, термінали ідентифікуються на рівні додатків та далі використовують тимчасові ідентифікатори каналного рівня для роботи зі з'єднанням D2D, що дозволяє їм залишатися анонімними для всіх пристроїв мережі, окрім своїх безпосередніх D2D-партнерів.

На рисунку 1 зображені учасники типової сесії D2D, де більшість D2D-сервісів мають можливість відстеження даних та послуг для обміну, що розміщуються на іншому сервері додатків. Він розташований у мережі Інтернет, до якої мають доступ всі зареєстровані абоненти. Спеціалізований модуль відстеження контенту вносить до протоколу всі доступні дані та послуги, якими обмінюються користувачі, аутентифікує їх та авторизує доступ до контенту. В традиційних хмарних серверах така функція відстеження контенту звичайно суміщена із системою для його доставляння.

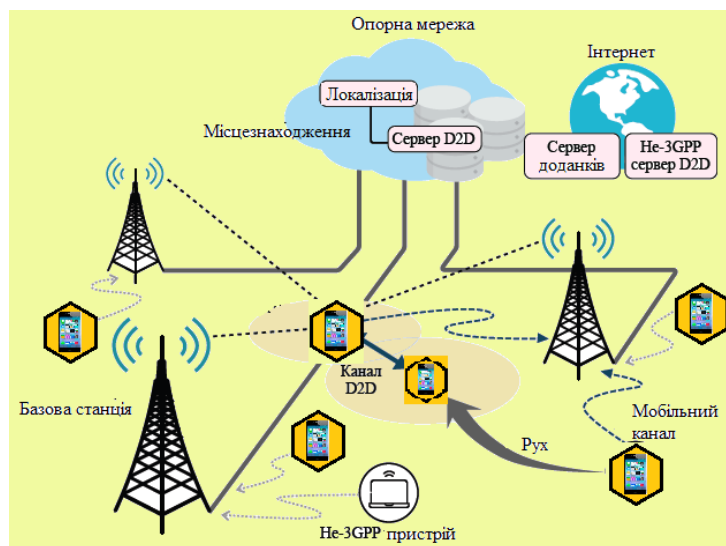


Рис. 1. Система вивантаження на основі з'єднань D2D

Розміщення сервера D2D в опорній мережі мобільного оператора має переваги. При порушенні абонентом правил роботи, що встановлені у мережі D2D, він може бути виключений із системи на основі своєї апаратної адреси. Мережеве сприяння можна реалізувати через керуюче з'єднання 3GPP, що гарантує низьку колову затримку між сервером D2D та користувачем за великої завантаженості системи. Сервер D2D отримує безпосередній доступ до функцій локалізації користувачів, щоб знати їх поточне місцезнаходження.

На рисунку 2 показано загальний принцип роботи системи. В ній передбачається послідовний контроль доступу із мережевою взаємодією для нових сесій, що надходять у систему. Процедура сприяння у виборі мережі доступу, що функціонує у мобільному шарі, здійснює спробу вивантаження сесії, яка надійшла на обслуговування в шар D2D. У випадку успіху вивантажена у шар D2D сесія обслуговується у ньому без переривань до моменту завершення та потім покидає систему. В іншому випадку запускається процедура доступу в мобільний шар згідно з алгоритмом MR або FU. Таким чином, якщо певна сесія не може бути допущеною навіть у мобільний шар, то вона вважається остаточно заблокованою та покидає систему, не отримавши обслуговування.

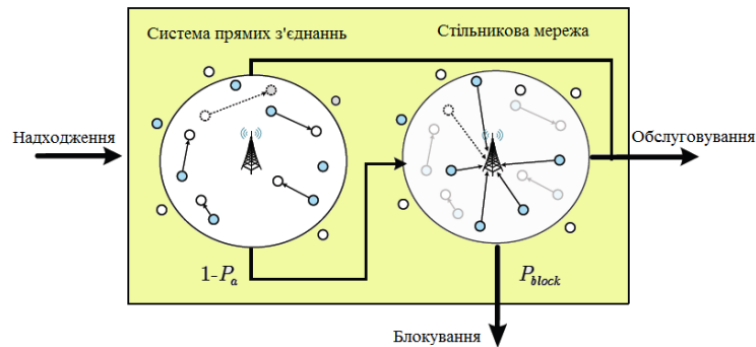


Рис. 2. Робота системи

Інтенсивність надходження сесії на перший шар D2D складає λ і має пуасонівський характер. Таким чином, сесії, що були неприйняті в шарі D2D, протікають згідно з пуасонівськими процесами інтенсивності: $\lambda(1 - p_a)$, де p_a – імовірність допуску сесії в шарі D2D. Тоді загальна імовірність блокування визначається:

$$p_{bl} = 1 - [p_a + (1 - p_b)(1 - p_a)], \quad (1)$$

де p_a – імовірність допуску сесії в шарі D2D, p_b – імовірність блокування сесії в мобільному шарі.

Важливою характеристикою роботи системи є енергетичне споживання для типової абонентської сесії за умови, що вона задовольняє вимоги щодо мінімальної швидкості передачі даних та виражається законом Літла:

$$E = \frac{E[P]}{\lambda * p_a}. \quad (2)$$

Ймовірності пов'язані рівнянням:

$$p_a + p_b = 1. \quad (3)$$

У централізованих мобільних мережах LTE всі з'єднання виконуються через базову станцію, а у розподілених мережах WLAN є можливість здійснювати прямі з'єднання між обладнанням користувачів. Але у останньої технології є такий стримуючий фактор, як відсутність ефективних методів виявлення сусідів та встановлення і підтримки з'єднання через технічні складнощі. Сучасні смартфони можуть використовувати декілька технологій радіодоступу одночасно, а тому мобільний зв'язок може сприяти системі WLAN під час встановлення з'єднання D2D. Отже, до складу архітектури мобільного зв'язку мають бути введені додаткові модулі для організації керування, гарантування безпеки, відстеження контенту, а також контролю з'єднань D2D. Тому необхідно здійснити надійну ізоляцію таких модулів, краще розділити функції керування з'єднанням та функції відстеження контенту. Перевагою такого підходу є простота інтеграції технології D2D з існуючою архітектурою мобільного зв'язку LTE.

Максимальна швидкість у передавальних терміналах визначається:

$$V_{max} = w \cdot \log[1 + SINR_{max}]. \quad (4)$$

Отже, максимальне значення швидкості в мережі LTE становить біля 60 Мбіт/с.

В ідеальному випадку роботи шару D2D рівень випромінюваної потужності для кожного передавача встановлюється індивідуально, щоб досягти максимального значення загальної пропускної спроможності системи зв'язку. Але на практиці це реалізувати не можливо внаслідок дуже високих накладних витрат на передачу сигнальних повідомлень, тому використовують спрощені сценарії. Тому автор вважає, що потужність передачі є постійною та рівень шуму в каналі зв'язку не перевищує деяке фіксоване значення. Щоразу, коли умова не виконується на приймальному боці, передавач відмовляється від відправки даних та відповідний користувач покидає шар D2D.

Сценарій моделювання показує вивантаження користувацьких сесій із системи LTE під час з'єднання WiFi-Direct за наявності мережевого сприяння. Відповідно є обмеження, де мобільне покриття суміщене із зоною обслуговування мережі D2D якогось транспортного вузла. Отже, досліджується ізольована комірка у вигляді кола радіуса $R = 120$ м, на яку не діє інтерференція з боку сусідніх комірок. У цій області абоненти обмінюються невеликими фрагментами даних мультимедіа з мінімально необхідною швидкістю передачі 4,8 Мбіт/с, оскільки тривалість сесії як експоненти – 3 с, а типова посилка з даними від абонента містить 2 Мбіт інформації. Однією із основних характеристик системи є її ємність, що визначається кількістю сесій, що можуть обслуговуватися одночасно. На рисунку 3, а подана величина порівняння для базової мережі LTE та для системи із підтримкою зв'язків D2D, що показує значні переваги (покращення порядку 21 %) за використання прямих з'єднань. Неперервні лінії показують результати моделювання (М), тоді символи відповідають значенням, що отримані теоретично (Т). Отже, загальний характер залежностей засвідчує збільшення середньої кількості активних сесій включно до моменту насичення, що залежить від типу розміщення вузлів, способу планування радіоресурсів та методу інтеграції прямих з'єднань.

Ймовірність блокування системи (рис. 3, б) пов'язана з її ємністю та визначається відсотком запитів на обслуговування, що не можуть бути задоволені мережею зв'язку. Мобільна сесія буде заблокована, якщо вона не може бути включена в розклад передач на момент свого надходження, в той час в мережі D2D є (1) відхилення сесії через перевищення межі інтерференції від одночасно передаючих терміналів та (2) відхилення через перевищення ефективної тривалості з'єднання за мінімальними вимогами до швидкості передачі.

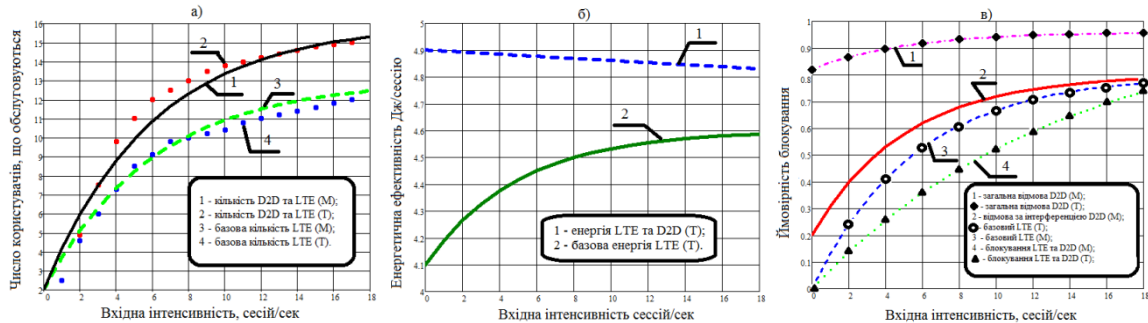


Рис. 3. Залежність: а) ємності системи; б) енергоспоживання користувачів; в) ймовірності блокування для сесії

В мережі D2D за низького завантаження відмови пов'язані переважно з перевищенням ефективної довжини з'єднання, а при збільшенні завантаження збільшується відсоток відмов, що пов'язані з перевищенням межі за інтерференцією. У мережі LTE блокування сесій не відбувається за межею, попри роботу алгоритму планування. Але на практиці мобільна система зв'язку ніколи не досягає повного завантаження, що привело б до 100 % блокування. Це пояснюється тим, що мережа продовжує допускати нові сесії за умови, що їх обслуговування може бути включене у розклад передачі. У випадку високого завантаження пріоритетності набувають ті сесії, що мають більш високі швидкості передачі (рис. 4).

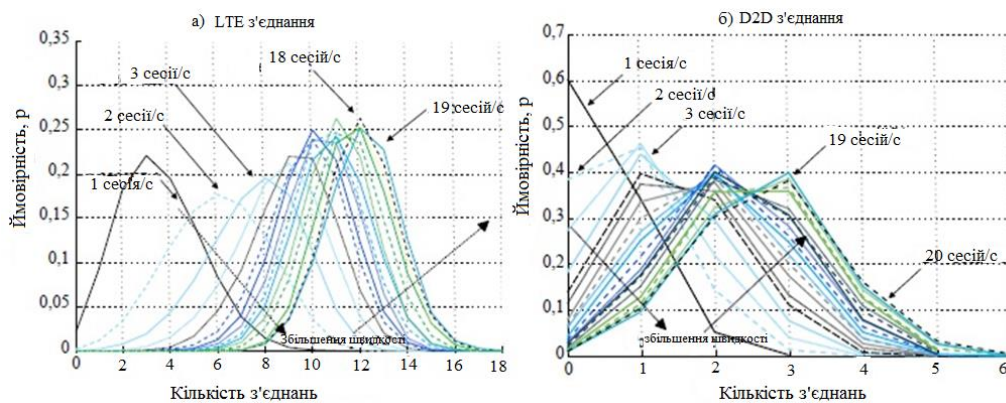


Рис. 4. Розподіл числа: а) LTE з'єднань; б) D2D з'єднань

Отже, на низьких інтенсивностях вхідного потоку сесій з'єднання D2D суттєво впливає на значення енергетичної ефективності в інтегрованій системі, покращуючи її аж до 15 %. Але зі збільшенням завантаження, коли шар D2D більше не може приймати на обслуговування додаткові сесії, приріст енергетичної ефективності стає менш значним.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Ефект зменшення енергетичного споживання залежить від конкретних параметрів передавачів. Таким чином, запропонований підхід аналізу системи зв'язку D2D є корисним у випадку здійснення розрахунку енергетичної ефективності для необхідної моделі споживання потужності в заданому діапазоні значень інтенсивності вхідного потоку сесій. Отже, вивантаження трафіка користувача з мережі LTE на прямі з'єднання D2D, що функціонують за технологією WiFi-Direct, за сприяння з боку мобільної інфраструктури суттєво знижує можливість блокування сесії та одночасно підвищує енергетичну ефективність передачі даних.

Список використаної літератури:

1. Outage analysis of device-to-device communication system / Z.Hussain, A.R. Khan, H.Mehdi, S.M.A. Saleem // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Радіотехніка, Радіоапаратобудування. – 2018 – № 74. – С. 36–43.
2. Булашенко А.В. Використання прямих з'єднань у системі вивантаження даних D2D із мережним кодуванням : матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів «Радіоелектроніка в XXI столітті» / А.В. Булашенко, В.А. Гнищецький. – Київ, 2020. – С. 13–15.

3. Булашенко А.В. Забезпечення високої якості мережі 5G за допомогою технології D2D : матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» / А.В. Булашенко, В.В. Гладун. – Київ, 2019. – С. 57–59.
4. ElSawy H. Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless network: a survey / H.ElSawy, E.Hossain, M.Haenggi // IEEE Communications Surveys and Tutorialss. – 2013. – Vol. 15, № 3. – P. 996–1019.
5. Queuing algorithm for effective target coverage in mobile crowd sensing / A.A. Obinikpo, Y.Zhang, H.Song et al. // IEEE Internet of Things Journal. – 2017. – Vol. 4, № 4. – P. 1046–1055.
6. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М. : КомКнига, 2005. – 397 с.
7. Вишневский В.М. Системы массового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационных сетей / В.М. Вишневский, А.Н. Дудин // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 8, Т. 78. – С. 3–59.
8. Перспективы использования технологии D2D в сотовых сетях / А.Я. Омётов, К.А. Жиданов, С.В. Беззатеев, Е.А. Кучерявый // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия : Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2019. – № 3, Т. 12. – С. 56–66.
9. Madadi P. Shared rate process for mobile users in Poisson networks and applications / P.Madadi, F.Baccelli, G.Veciana // IEEE Transactions on Information Theory. – 2018. – Vol. 64, № 3. – P. 2121–2141.
10. Baccelli F. On the design of device-to-device autonomous discovery / F.Baccelli, N.Khude, R.Laroia // 2012 Fourth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2012). – Bangalore, India, 2012. – P. 1–9.
11. Distributions of transmit power and SINR in device-to-device networks / M.C. Erturk, S.Mukherjee, H.Ishii, H.Arslan // IEEE Communications Letters. – 2013. – Vol. 17, № 2. – P. 273–276.
12. Kim H. Leveraging dynamic spare capacity in wireless systems to conserve mobile terminals energy / H.Kim, G.Veciana // IEEE ACM Transactions on Networking. – 2010. – Vol. 18, № 3. – P. 802–815.

References:

1. Hussain, Z., Khan, A.R., Mehdi, H. and Saleem, S.M.A. (2018), «Outage analysis of device-to-device communication system», *Visnyk NTUU «KPI», Serija Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannja*, Vol. 74, pp. 36–43.
2. Bulashenko, A.V. and Gnytec'kyj, V.A. (2020), «Vykorystannja prjamyh z'jednan' u systemi vyvantazhennja danyh D2D iz merezhevym koduvannjam», *materialy III Vseukrai'ns'koi' naukovo-tehnichnoi' konferencii' studentiv ta aspirantiv «Radioelektronika v XXI stolitti»*, Kyi'v, pp. 13–15.
3. Bulashenko, A.V. and Gladun, V.V. (2019), «Zabezpechennja vysokoi' jakosti merezhi 5G za dopomogou tehnologii' D2D», *materialy mizhnarodnoi' naukovo-tehnichnoi' konferencii' «Radiotekhnichni polja, sygnaly, aparaty ta systemy»*, Kyi'v, pp. 57–59.
4. ElSawy, H., Hossain, E. and Haenggi, H. (2013), «Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless network: a survey», *IEEE Communications Surveys and Tutorialss*, Vol. 15, No. 3, pp. 996–1019.
5. Obinikpo, A.A., Zhang, Y., Song, H. et al. (2017), «Queuing algorithm for effective target coverage in mobile crowd sensing», *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 1046–1055.
6. Gnedenko, B.V. and Kovalenko, I.N. (2005), *Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya*, KomKniga, M., 397 p.
7. Vishnevskii, V.M. and Dudin, A.N. (2017), «Sistemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi vkhodnymi potokami i ikh primenenie dlya modelirovaniya telekommunikatsionnykh setei», *Avtomatika i telemekhanika*, No. 8, Vol. 78, pp. 3–59.
8. Ometov, A.Ya., Zhidanov, K.A., Bezzateev, S.V. and Kucheryavyi, E.A. (2019), «Perspektivy ispol'zovaniya tekhnologii D2D v sotovykh setyakh», *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU, Seriya Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, No. 3, Vol. 12, pp. 56–66.
9. Madadi, P., Baccelli, F. and Veciana, G. (2018), «Shared rate process for mobile users in Poisson networks and applications», *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 64, No. 3, pp. 2121–2141.
10. Baccelli, F., Khude, N. and Laroia, R. (2012), «On the design of device-to-device autonomous discovery», *2012 Fourth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2012)*, Bangalore, India, pp. 1–9.
11. Erturk, M.C., Mukherjee, S., Ishii, H. and Arslan, H. (2013), «Distributions of transmit power and SINR in device-to-device networks», *IEEE Communications Letters*, Vol. 17, No. 2, pp. 273–276.
12. Kim, H. and Veciana, G. (2010), «Leveraging dynamic spare capacity in wireless systems to conserve mobile terminals energy», *IEEE ACM Transactions on Networking*, Vol. 18, No. 3, pp. 802–815.

Булашенко Андрій Васильович – старший викладач кафедри теоретичних основ радіотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- телекомунікації;
- радіоелектроніка.

<https://orcid.org/0000-0002-4987-4978>.

E-mail: appple@i.ua.

Стаття надійшла до редакції 30.07.2020.