

Ленков І.В., Гусак Б.Т., Фесенко П.О.

ІНСТРУМЕНТ ОЦІНКИ ПРОДУКТИВНОСТІ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ З БЕЗПІЛОТНИКАМИ У СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖАХ 4G

Lenkov I.V., Gusak B.T., Fesenko P.O. Wireless Drones Performance Assessment Tool in 4g Cellular Networks. A measurement tool for evaluating wireless drone performance on cellular networks is provided. Android software records various LTE settings, estimates TCP and UDP bandwidth, and tracks GPS location information. Examples of measurement results are given.

Keywords: LTE, LTE-A, drones, wireless, communications, drones, LTE measurement tool, bandwidth, wireless self-organizing networks, frequency spectrum, cognitive radio, efficiency, technology, networks.

Ленков І.В., Гусак Б.Т., Фесенко П.О. Інструмент оцінки продуктивності бездротового зв'язку з безпілотниками у стільникових мережах 4g. Представлено вимірвальний інструмент для оцінки продуктивності бездротового зв'язку з безпілотниками по стільникових мережах.. Програмне забезпечення Android записує різні параметри LTE, оцінює пропускну здатність TCP і UDP і відстежує інформацію про розташування GPS. Наведені приклади результатів вимірювань.

Ключові слова: LTE, LTE-A, безпілотники, бездротовий зв'язок, зв'язок, безпілотні літальні апарати, інструмент вимірювання LTE, пропускну здатність.

Ленков І.В., Гусак Б.Т., Фесенко П.О. Інструмент оценки производительности беспроводной связи беспилотников в сотовой сети 4G.

Представлено измерительный инструмент для оценки производительности беспроводной связи с беспилотниками по сотовым сетям. Программное обеспечение Android записывает различные параметры LTE, оценивает пропускную способность TCP и UDP и отслеживает положение GPS. Приведенные примеры результатов измерений.

Ключевые слова: LTE, LTE-A, беспилотники, беспроводная связь, связь, беспилотные летательные аппараты, инструмент измерения LTE, пропускная способность.

Вступ

Постановка проблеми. Комерційний і промисловий ринок додатків для невеликих безпілотних літальних апаратів швидко зростає і надає можливості, зокрема, в галузі спостереження, моніторингу, транспорту, управління в надзвичайних ситуаціях і сільського господарства, а також у багатьох інших областях. Що стосується бездротового зв'язку, дрони зазвичай оснащені Wi-Fi. Беручи до уваги, що цього достатньо для додатків з низькими вимогами до покриття, стільникові мережі можуть забезпечити покриття великої площі, що особливо важливо для автономних польотів, які виходять за межі прямої видимості (LoS). Однак сучасні стільникові мережі, включаючи Advanced Term Evolution Advanced (LTE-A), не оптимізовані для використання з антенними пристроями [1]. Наприклад, антени базової станції зазвичай нахилені вниз, щоб обслуговувати користувачів на землі, а не на літаючих пристроїв. Технічні удосконалення необхідні для оптимізації можливості з'єднання з дронами, наприклад, управлінням під час радіоперешкод та підчас передачею обслуговування (хендовер) [2]. Майбутні стільникові системи - з вдосконалим формуванням променя, управлінням променем і повнорозмірним багатоканальним виходом (FD-MIMO) - можуть усунути недоліки, щоб забезпечити кращу можливість підключення до антени [3], [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У декількох експериментальних дослідженнях вивчалася зв'язок безпілотників з Wi-Fi (див. [5] - [8]), але лише деякі з них стосуються зв'язку безпілотників на стільниковій основі (див. [1], [2], [9] - [11]). Щоб вивчати безпілотники з стільниковим зв'язком, потрібен інструмент оцінки, що дозволяє аналізувати продуктивність в поточних і майбутніх проектах 3GPP і відповідним чином розробляти програми для дронів.

Мета даної статті являє собою такий інструмент, а саме інструмент вимірювання стільникового дрона (CDMT). Він об'єднує кілька важливих функцій для оцінки стільникового зв'язку в повітряних мережах, таких як моніторинг рівня сигналу і інформації про стільник, оцінка продуктивності протоколу управління передачею (TCP) і протоколу призначених для користувача дейтаграм (UDP), а також відстеження координат глобальної системи позиціонування (GPS).

Деякі результати, отримані за допомогою CDMT, представлені в цій статті. Ми демонструємо інструмент в дії, використовуючи дрон AscTec Pelican на смартфоні Android. У нашому експерименті ми спостерігаємо деякі передачі обслуговування (хендовер) пінг-понгу і визнаємо, що пропускна здатність downlink (DL) вище на землі, тоді як пропускна здатність uplink (UL) вище в повітрі. Додаткові результати з передачі обслуговування і пропускної здатності з використанням CDMT наведені в [12] і [13].

Виклад основного матеріалу дослідження

Хоча деякі інструменти вимірювання LTE з різними функціями доступні безкоштовно, наскільки нам відомо, жоден з них не об'єднує всі параметри, підтримувані CDMT. Більш того, вони зазвичай орієнтовані виключно на TCP в якості протоколу транспортного рівня. Комерційні рішення, що пропонують аналогічні параметри, такі як CDMT, коштують дорого і часто знаходяться в мережі оператора [14], [15]. Характеристики продуктивності та потужності LTE, 3G і Wi-Fi аналізуються в [16]. Інструмент Android 4GTest [17] використовується для характеристики продуктивності мережі LTE. Він використовує модель клієнт-сервер з декількома серверами, розгорнутими в різних місцях, і дозволяє користувачам перемикатися між типами мереж для збору результатів вимірювання продуктивності. Модель для характеристики часу проходження сигналу в обох напрямках і пропускної здатності за рівнем сигналу була отримана з вимірів за допомогою спеціального вимірювального інструмента в [10]. Інструмент використовує модель клієнт-сервер, яка записує продуктивність UDP в DL. Він не є загальнодоступним і може відстежувати тільки кілька параметрів стільникових мереж.

Nemo Handylid Handleld Measurement Solution [9] - це комерційне додаток для тестування мережі на базі Android. Він надає безліч відповідних параметрів, в тому числі: затримка встановлення з'єднання, час завантаження, time-to-connectdelay, опорний сигнал прийнятої потужності (RSRP), якість сигналу (RSRQ), широта, довгота, висоти, а також інформацію про сусідні соти. Цей інструмент був використаний для вимірювань LTE за допомогою дрона в [10]. Було відзначено, що рівень сигналу в цьому випадку збільшується від -93 дБм до -74 дБм до тих пір, поки дрон не досягне висоти 34 м, а потім знову зменшиться з ростом висоти польоту.

Інша вимірювальна кампанія з дроном і Nemo була проведена для аналізу сигналів LTE (RSRP і ставлення сигнал / перешкода) в щільних середовищах на висоті до 350 м [11].

Тут рівень сигналу збільшується, коли дрон долає висоту будівель через зв'язок LoS з базовими станціями. Однак більш високі втрати і перешкоди від сусідніх комірок негативно впливають на потужність сигналу.

У дослідженні [20] розглядаються LTE і Wi-Fi і аналізуються, чи повинні транспортні протоколи вибирати кращу мережу або краще використовувати багатошляхові TCP. Додаток «Cell vs WiFi» [12] вимірює і порівнює продуктивність LTE і WiFi на пристроях Android. Додаток в даний час недоступно. Доступні інструменти є або пропрієтарними і не є вільно доступними, або мають просту конструкцію, яка не враховує всі важливі параметри, необхідні для аналізу стільникового зв'язку дронів. Таким чином, ми розробили інструмент вимірювання, який підтримує як TCP, так і UDP і збирає інформацію про рівень сигналу, що використовуються смугах частот і сусідніх комірок.

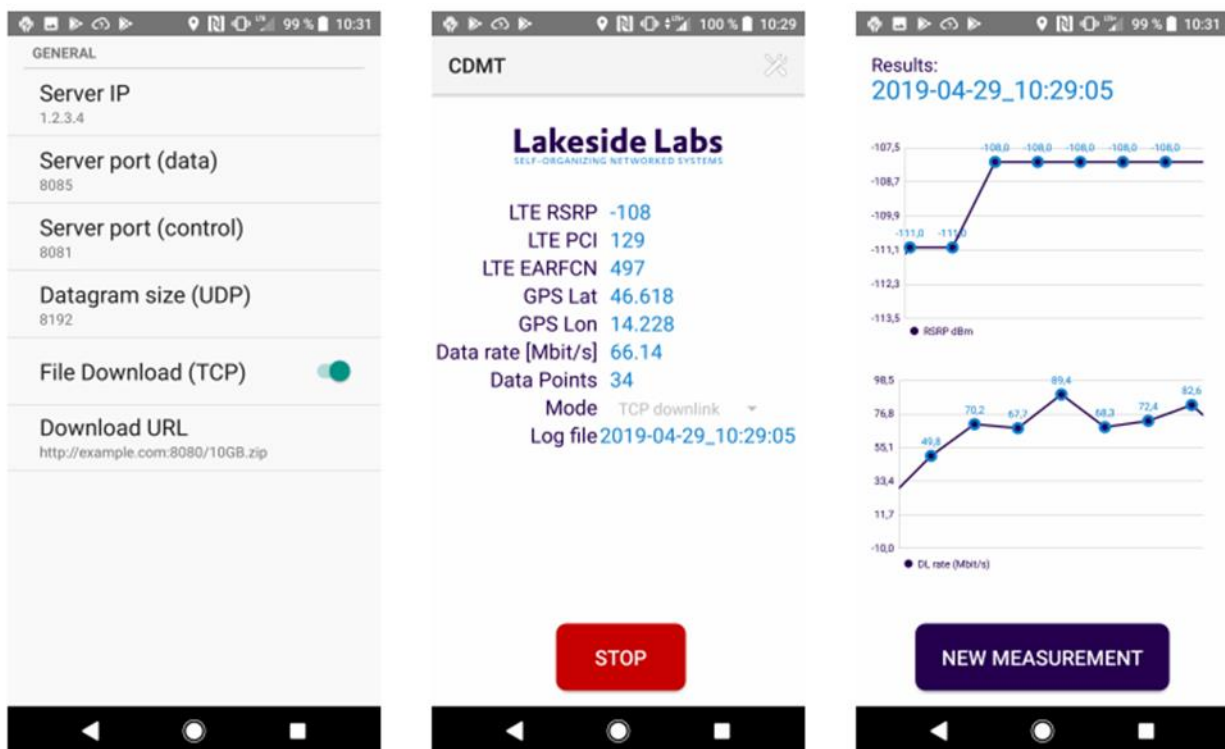


Рис. 1. Скріншоти CDMT:(a) Конфігурація (b) Запуск експерименту (c) Огляд результатів

Три метрики, пов'язані з силою сигналу LTE, доступні на пристроях Android: RSRP, RSRQ і RSSNR (відношення опорного сигналу сигнал-шум). По-перше, RSRP забезпечує середню потужність, що приймається елементом ресурсу, що несе опорний сигнал в будь-якому символі. Він варіюється від -44 дБм до -140 дБм [13]. Він в основному використовується для вибору стільника і передачі обслуговування. Проте, висока пропускна здатність може спостерігатися навіть при низькому RSRP. По-друге, RSRQ надає додаткову інформацію про те, коли виконувати передачу обслуговування (хендовер). Це вказує на якість опорного сигналу з типовими значеннями в діапазоні від -19,5 дБ (найгірший) і -3 дБ (кращий) [13]. По-третє, RSSNR вимірює ставлення сигнал / шум прийнятого сигналу. Він використовується для оцінки якості сигналу і є додатковим параметром для прийняття рішень про передачу обслуговування. Типові значення знаходяться в діапазоні від 30 дБ (найкраще) до -20 дБ (найгірше) [14]. UE відправляє ці параметри обслуговуючій базової станції (eNodeB) в якості звіту про вимірювання. Відповідно, eNodeB приймає рішення про передачу обслуговування на основі отриманих звітів [15].

Інструмент вимірювання стільникових дронів. CDMT - це інструмент оцінки продуктивності (див. рис. 1), розроблений для платформи Android, який буде використовуватися для повітряних пристроїв, підключених до стільникових мереж 4G. і може бути використаний для наукових досліджень. CDMT записує параметри LTE, такі як RSRP, RSRQ, RSSNR, якість сигналу стільники (CSQ), фізичну ідентифікацію стільника (PCI), індикатор якості каналу (CQI), абсолютний номер радіочастотного каналу E-UTRA (EARFCN), інформація про сусідню соту включаючи PCI, EARFCN, RSRP і RSRQ. Підтримує наскрізні вимірювання для TCP і UDP для DL і UL, затримку пакетів для UDP і реєструє інформацію GPS (час, широта, довгота, висота, кількість доступних супутників, швидкість і прискорення). Всі параметри записуються з частотою 1 Гц.

Щоб виміряти пропускну здатність і час прийому-передачі (RTT), CDMT використовує модель клієнт-сервер, де клієнтське додаток працює на Android. На стороні клієнта необхідно налаштувати конфігурацію мережі сервера (наприклад, IP-адреса і порти) і - в залежності від типу вимірювання - деякі додаткові параметри (наприклад, розмір сегмента

UDP) (рис. 1 (а)). Як тільки параметри налаштовані і серверний додаток запущено, вимірювання можуть бути записані (Рис. 1 (b)). Графічне представлення RSRP і вимірювання пропускної здатності показані після завершення запису (рис. 1 (c)).

Серверний додаток написано на Java. Він складається з двох модулів: модуль управління запускає і зупиняє вимірювання і повідомляє результати клієнту, а модуль даних відправляє або отримує дані через сокети TCP і UDP. Швидкість передачі даних UDP вимірюється на клієнті для тестів низхідній лінії зв'язку (DL) і на сервері для тестів висхідній лінії зв'язку (UL). В останньому випадку сервер повідомляє про досягнуту швидкості передачі даних клієнта, який зберігає її в журналі. Швидкість передачі даних TCP завжди розраховується на клієнті.

Передбачається, що сервер доступний через загальнодоступний IP-адрес. Отже, ми завжди можемо виконати тести для висхідній лінії зв'язку TCP, низхідній лінії TCP і висхідній лінії UDP. Тести низхідній лінії зв'язку UDP можуть бути недоступні, залежно від конфігурації трансляції мережевих адрес (NAT) оператора мобільного зв'язку. CDMT надає тільки просту техніку обходу NAT: клієнт спочатку відправляє UDP-пакет сервера для створення зіставлення в перетворювачі мережевих адрес, а потім сервер використовує зовнішній IP-адрес і комбінацію портів отриманого пакета в якості кінцевої точки для UDP. Однак цей механізм не працює, якщо NAT змінює відображення портів під час вимірювання. Оскільки це мало місце для нашого оператора мобільного зв'язку, ми вибрали настройку імені точки доступу (APN), яка не використовує NAT оператора, а замість цього настройку загальнодоступного IP-адреси на кінцевому пристрої.

Пропускна здатність TCP вимірюється шляхом завантаження або вивантаження випадкового потоку даних, створених на сервері або клієнта, відповідно. В якості альтернативи тест низхідній лінії TCP може бути виконаний з використанням протоколу передачі гіпертексту (HTTP) через уніфікований покажчик ресурсу (URL), який вказує на файл, який потім (багаторазово) завантажувється клієнтом до тих пір, поки вимірювання не буде зупинено вручну. У цій конфігурації призначений для користувача сервер вимірювань не бере. Пропускна здатність UDP вимірюється шляхом відправки пакетів даних, що настроюється розміру. Перші чотири байти містять мітку часу відправлення (для розрахунку затримки передачі), а інші байти вибираються випадковим чином. Це вимагає синхронізованих годин на сервері і пристрої Android. Розрахована затримка повертається з використанням сокета управління TCP. Користувач запускає і завершує тестування вручну. Значення вимірювань записуються кожну секунду і зберігаються на клієнтській платформі для подальшого аналізу. Більшість існуючих інструментів не підтримують такий запис, а надають тільки усереднені значення в кінці.

Експериментальне дослідження. Далі описується експериментальне дослідження, яке демонструє можливість CDMT.

1) Налаштування: використовується смартфон Sony Xperia H8216 під управлінням Android 8.0. Він має два чотириядерних процесора з 4 ГБ оперативної пам'яті і чіпсет Qualcomm Snapdragon 845, що підтримує агрегацію несучих LTE (CA). Він встановлений на безпілотний літальний апарат AscTec Pelican, вантажопідйомність якого становить 650 г при часу польоту близько 16 хвилин. Ми оцінюємо пропускну здатність по LTE-A (3GPP Release 13) з наземними і повітряними вимірами. CA активується в DL в чотирьох смугах частот (LTE800, LTE1800, LTE2100 і LTE2600), і не використовується в UL CA. Максимальна вихідна потужність антени становить 46 дБм (рис.2).

Для експериментів UDP обраний розмір пакета 8192 байт. Тести низхідній лінії зв'язку TCP використовують режим завантаження файлу (тобто файл 1 ГБ повторно завантажувється з публічного сервера). Всі інші експерименти (TCP UL, UDP UL і DL) виконуються шляхом настройки CDMT для підключення до сервера вимірювань, розташованому в нашій лабораторії, і запуску вищезгаданого модуля Java. Вимірювання виконуються у вигляді лінійних випробувань від контрольної точки на відстань до 150 м. Дрон налаштований на висоту 50 м.

2) Пропускна здатність: на рис. 2 показана виміряна пропускна здатність на відстані польоту. Вісім кривих дані для пропускної здатності в DL (від eNodeB до UE) і UL (навіпаки) з використанням або TCP, або UDP для вимірювань як з повітря, так і з землі. Представлені криві представляють собою середнє з трьох експериментальних прогонів. Можна помітити, що пропускна здатність TCP вище на землі, ніж в повітрі (як для DL, так і для UL), тоді як для пропускної здатності UDP в UL вірно зворотне. Пропускна здатність UDP в DL на землі і в повітрі приблизно однакова.

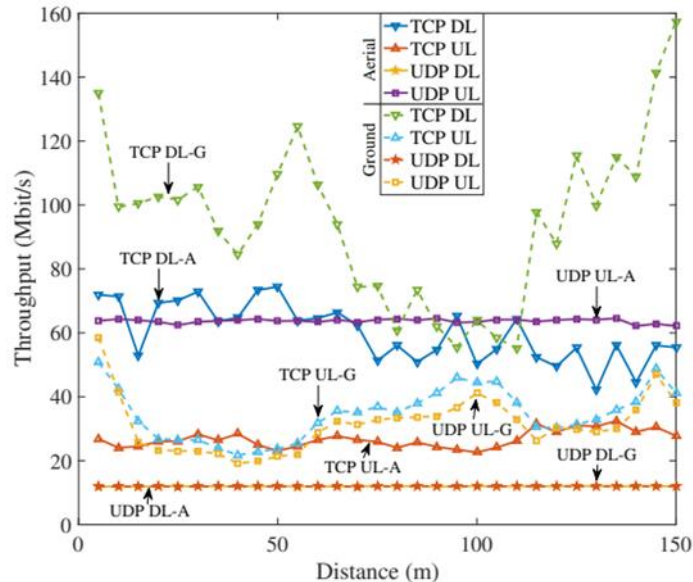


Рис. 2. Середня пропускна здатність на землі та 50 м у повітрі

Поведінка пропускної здатності TCP можна пояснити тим фактом, що RSRP завжди краще на землі (рис. 3). Для UDP RSRP на землі набагато гірше, ніж в повітрі. Однак фактична взаємозв'язок між RSRP і пропускною спроможністю не може бути встановлена.

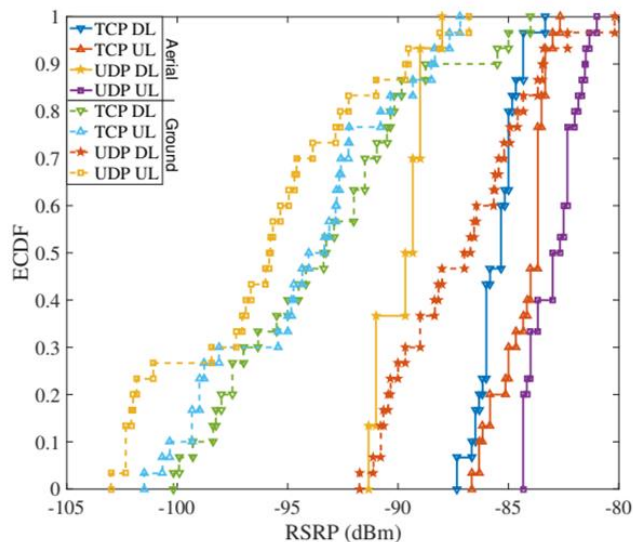


Рис. 3. Емпіричний кумулятивний розподіл RSRP на землі та 50 м в повітрі

3) Передача: в повітряному сценарії в TCP DL ми спостерігали передачу пінг-понгу з PCI 130 на 388 і назад на 130 один раз за один прохід. Під час двох інших запусків хендовера не спостерігалось, оскільки UE завжди було підключено до PCI 130 або 92 відповідно. У наземному сценарії ми спостерігали кілька хендовера для пінг-понгу: в трьох запусках TCP DL зміни були з PCI 263 до 56 і назад до 263, з 130 до 295 і назад до 130, і з 92 до 109 і назад

до 92 В TCP UL передача обслуговування відбувалася з PCI 263 на 56 і назад на 263 (за два проходи) і з 92 на 109 і назад на 92 (за один запуск). У повітряній лінії UL передачі обслуговування не було. Вибрані PCI були 92, 263 і 130 для трьох запусків. У UDP DL хендовера не спостерігалося ні на землі, ні в повітрі. UE підключено до PCI 263 в повітрі і до PCI 359 на землі. У UDP UL UE залишався підключеним до PCI 263 у всіх трьох повітряних експериментах і виконував передачу пінг-понгу з PCI 263 на 56 і назад на 263 у всіх трьох наземних експериментах.

Висновки

Вимірвальний інструмент для стільникового зв'язку (CDMT) призначений для повітряних пристроїв, підключених до мереж 4G. Він може використовуватися для запису параметрів продуктивності LTE, доступних на платформах Android, включаючи пропускну здатність TCP і UDP, і підтримує відстеження через GPS. Ми продемонстрували його працездатність на прикладі результатів вимірвальної кампанії по LTE-A. Ці результати показують кращу пропускну здатність низхідній і висхідній лінії зв'язку TCP на землі і більш високу пропускну здатність висхідній лінії зв'язку UDP в ефірі. Супутня і майбутня робота включає в себе комплексні експериментальні оцінки на різних висотах польоту і адаптацію CDMT для мереж 5G.

Список використаної літератури

1. B. V. D. Bergh, A. Chiumento, and S. Pollin, "LTE in the sky: Trading off propagation benefits with interference costs for aerial nodes," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 44–50, 2016.
2. X. Lin, V. Yajnanarayana, S. D. Muruganathan, S. Gao, H. Asplund, H.-L. Maattanen, M. Bergstrom, S. Euler, and Y.-P. E. Wang, "The sky is not the limit: LTE for unmanned aerial vehicles," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 4, pp. 204–210, 2018.
3. N. Tadayon, G. Kaddoum, and R. Noumeir, "Inflight broadband connectivity using cellular networks," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1595–1606, 2016.
4. S. D. Muruganathan, X. Lin, H.-L. Maattanen, Z. Zou, W. A. Hapsari, and S. Yasukawa, "An overview of 3GPP release-15 study on enhanced LTE support for connected drones," *arXiv preprint arXiv:1805.00826*, 2018.
5. Y. Gu, M. Zhou, S. Fu, and Y. Wan, "Airborne WiFi networks through directional antennae: An experimental study," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC)*, 2015.
6. T. Andre, K. A. Hummel, A. P. Schoellig, E. Yanmaz, M. Asadpour, C. Bettstetter, P. Grippa, H. Hellwagner, S. Sand, and S. Zhang, "Application-driven design of aerial communication networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 129–137, 2014.
7. E. Yanmaz, R. Kuschnig, and C. Bettstetter, "Channel measurements over 802.11 a-based UAV-to-ground links," in *Proc. IEEE GLOBECOM Workshops*, 2011.
8. A. A. Khuwaja, Y. Chen, N. Zhao, M.-S. Alouini, and P. Dobbins, "A survey of channel modeling for UAV communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2804–2821, 2018.
9. G. Yang, X. Lin, Y. Li, H. Cui, M. Xu, D. Wu, H. Ryden, and S. Redhwan, "A telecom perspective on the Internet of drones: From LTE-Advanced to 5G," *arXiv preprint arXiv:1803.11048*, 2018.
10. L. Sundqvist, "Cellular controlled drone experiment: Evaluation of network requirements," *Master Thesis*, Aalto University, Finland, 2015.
11. G. E. Athanasiadou, M. C. Batistatos, D. A. Zarbouti, and G. V. Tsoulos, "LTE ground-to-air field measurements in the context of flying relays," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 12–17, 2019.
12. A. Fakhreddine, C. Bettstetter, S. Hayat, R. Muzaffar, and D. Emini, "Handover challenges for cellular-connected drones," in *Proc. ACM Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications (DroNet)*, Seoul, Korea, Jun. 2019.
13. S. Hayat, C. Bettstetter, A. Fakhreddine, R. Muzaffar, and D. Emini, "An experimental evaluation of LTE-A throughput for drones," in *Proc. ACM Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications (DroNet)*, 2019.
14. Accuver, "XCAL," <http://www.accuver.com/>, Last accessed Mar. 2019.
15. M. Z. Shafiq, J. Eрман, L. Ji, A. X. Liu, J. Pang, and J. Wang, "Understanding the impact of network dynamics on mobile video user engagement," *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, vol. 42, no. 1, pp. 367–379, 2014.
16. J. Huang, F. Qian, A. Gerber, Z. M. Mao, S. Sen, and O. Spatscheck, "A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks," in *Proc. ACM Int. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*, 2012.
17. 4GTest, "MobiPerf," <https://github.com/huangshu91/MobiPerf>, Last accessed Mar. 2019.

Автори статті

Ленков Іван Вадимович студент кафедри телекомунікаційних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Фесенко Павло Олександрович студент кафедри телекомунікаційних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Гусак Богдан Тарасович студент кафедри телекомунікаційних систем та мереж, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Lyenkov Ivan Vadymovych - student of Department of Telecommunication Systems and Networks, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Fesenko Pavlo Oleksandrovych - student of Department of Telecommunication Systems and Networks, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Husak Bohdan Tarasovych - student of Department of Telecommunication Systems and Networks, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 22.01.2020 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Вишнівський