

МАКАРИШКІН Д. А., ЛЮБАРСЬКИЙ М. В., МІШАН В. В.
Хмельницький національний університет

СУЧАСНІ РАДІОТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЗВ'ЯЗКУ M2M

Системи зв'язку п'ятого покоління (5G) забезпечують збільшення швидкості передачі даних, використання наднадійного зв'язку із малою затримкою (URLLC), мають високу спектральну ефективність, широкі можливості підключення та підвищену енергоефективність. Мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів і фільтром (F-OFDM) є сигналом, який отримують на виході фільтра. F-OFDM порівняно з OFDM забезпечує зниження позасмугового випромінювання, що покращує характеристики системи. Стаття присвячена порівнянню сигналів CP-OFDM і F-OFDM.

Ключові слова: сигнали CP-OFDM, сигнали F-OFDM, спектральна густина потужності, sinc-фільтр, ймовірність помилки на біт.

DENYS MAKARISHKIN, M. LYUBARSKY, V. MISHAN
Khmelnitsky National University

MODERN RADIO TECHNOLOGIES FOR M2M COMMUNICATION

The aim of the study is to analyze the functioning of the PRACH system in overload conditions, when a large number of M2M devices with different priorities establish their connection to the access network.

Fifth-generation (5G) systems provide increased data rates, use of low-latency over-the-counter (URLLC), have high spectral efficiencies, extensive connectivity, and increased energy efficiency. Multiplexing with orthogonal frequency division multiplexing and filter (F-OFDM) is a signal received at the output of the filter. F-OFDM compared to OFDM provides a reduction in out-of-band radiation, which improves system performance. The article is devoted to the comparison of CP-OFDM and F-OFDM signals.

Connecting multiple M2M devices to the network in a short period of time can cause a surge in PRACH channel loading due to its limited capacity. It is also interesting to note that the PRACH preambles, randomly selected by M2M devices, can be considered as code "channels" that do not overlap. When two or more terminals choose an identical preamble (channel), a situation resembling a typical collision between data packets occurs. This interpretation allows us to study the process of competition between M2M devices, based on the known results obtained for multi-channel random access protocols. As a result, it is possible to obtain an exact approximation in a given range of parameters of the PRACH system, such as the number of available preambles (M) and competing terminals (U), the size of the delay window, etc.

Keywords: CP-OFDM signals, F-OFDM signals, power spectral density, sinc filter, bit error probability.

Мета дослідження – аналіз функціонування системи PRACH в умовах перевантаження, коли велике число облаштувань M2M, що мають різний пріоритет, встановлює своє з'єднання з мережею доступу.

Постановка проблеми

Застосування сучасних систем IoT для забезпечення енергоефективних рішень в енергетичному секторі має багато переваг, про які було зазначено в попередніх розділах. Однак для розгортання Інтернету речей у енергетичній сфері необхідні нові рішення та тенденції для підвищення ефективності Інтернету речей та подолання пов'язаних із цим проблем.

Організація з'єднання M2M-пристроїв з мережею. Для встановлення початкового з'єднання з мережею LTE облаштування M2M, такі як сенсори, лічильники і вимірники, можуть використати канал випадкового доступу RACH.

Оскільки протокол функціонування цього каналу початково не враховував особливості міжмашинної взаємодії, представляє інтерес дослідження параметрів його роботи у випадках, коли мережа доступу схильна до сплесків завантаження, пов'язаних з одноразовим підключенням великого числа M2M-пристроїв.

Процедура випадкового доступу в системі LTE приведена на рис. 1.

Спочатку термінал посилає на БС LTE повідомлення Msg 1, що називається преамбулою, використовуючи при цьому фізичний канал випадкового доступу PRACH. При цьому конкретна преамбула для передачі вибирається випадковим чином з безлічі заздалегідь зарезервованих для цієї мети послідовностей. Слід зазначити, що число доступних для організації випадкового доступу послідовностей може бути менший, ніж найбільше можливе їх число в 64



Рис. 1. Порядок процедури випадкового доступу в системі LTE

преамбули, залежно від налаштувань мережі доступу. Якщо два термінали або більше вибрали ідентичні преамбули, а потім відправили їх до одного і того ж моменту часу, на стороні БС може виникнути колізія. Преамбули також можуть не досягти БС при недостатньому значенні випромінюваної терміналом потужності.

Якщо преамбула була прийнята успішно, то БС LTE (що називається також eNodeB) підтверджує цей факт шляхом відправки у відповідному інтервалі повідомлення Msg 2, відомого як відповідь випадкового доступу RAR. Для цього терміналу висилається покажчик на радіоресурси фізичного колективного каналу по лінії вниз PDSCH, які містять його повідомлення RAR. Оскільки eNodeB повинна встановити, який з терміналів передав яку преамбулу, ініціюється так званий процес дозволу колізії. Після закінчення деякого часу обробки повідомлення RAR термінали, що беруть участь, передають повідомлення Msg 3, яке є запитом на встановлення контролю за радіоресурсами RRC. Його відправка відбувається у фізичному колективному каналі по лінії вгору PUSCH з використанням радіоресурсів, вказаних в повідомленні Msg 2. Процедура випадкового доступу завершується після успішного прийому від eNodeB повідомлення Msg 4, яке називається налаштуванням з'єднання RRC.

Коли схожі повідомлення Msg 3 вирушають більш ніж одним терміналом із-за попередньої колізії їх повідомлень Msg 1 (преамбула), на стороні eNodeB у кращому разі може бути прийнято тільки одне з них, що призводить до відсилання відповідного повідомлення Msg 4 успішному терміналу. Інакше, якщо термінал не отримав очікуваного ним повідомлення Msg 4, він запускає процедуру випадкового доступу наново після деякого інтервалу відстрочення, вибраного випадковим чином у рамках певного вікна, що задається значенням індикатора відстрочення. Вузьке місце даного протоколу, особливо за наявності безлічі терміналів, що вимагають одночасного доступу, пов'язане з ростом вірогідності виникнення колізії (див. рис. 2,а). Проте доставка повідомлення RAR усередині виділеного інтервалу очікування також може потерпіти невдачу в силу обмежених радіоресурсів каналу PDCCH. Більше того, можливо, що сполучення Msg 3 і Msg 4 з деякою вірогідністю спотворюються при передачі.

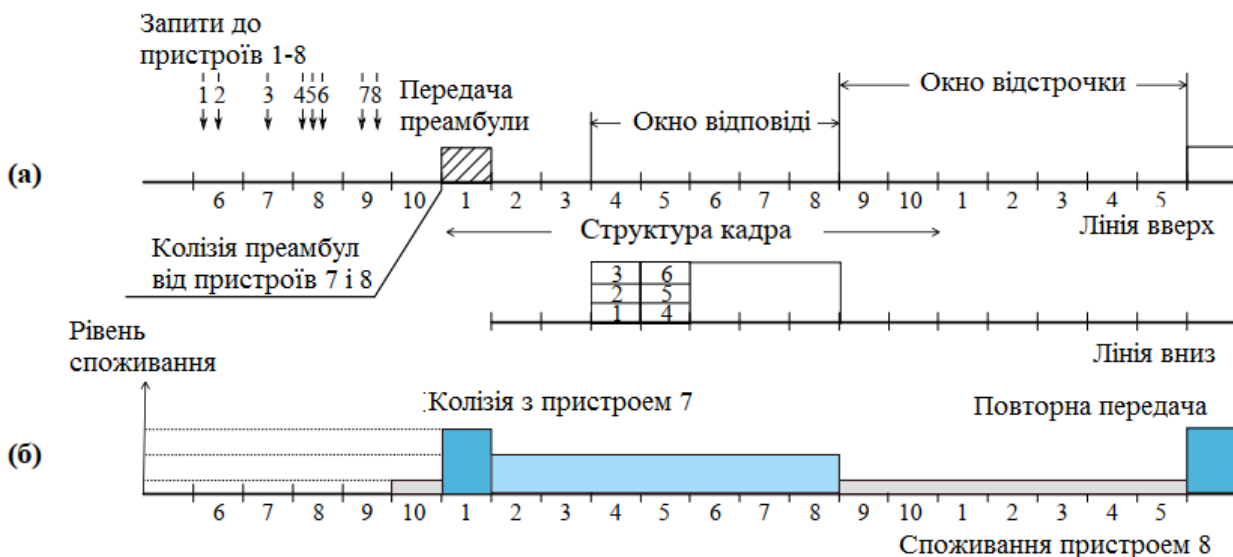


Рис. 2. Приклад роботи процедури випадкового доступу в часі (а) і приклад енергоспоживання для терміналу номер 8 (б)

Модельовання переважань в мережі доступу. У цьому типовому сценарії стільника системи зв'язку 3GPP LTE містить M ідентичних M2M-пристроїв. Кожне з них вибирає підкадр для початку процесу передачі по лінії вгору згідно з рівномірним розподілом (тип трафіку 1) або бета-розподіл (тип трафіку 2) на інтервалі $[1; N]$. Передача преамбули, що займає в точності один підкадр, може здійснюватися в кожному підкадрі з номером b , тобто в слотах $1, b + 1, \dots, b \cdot i + 1, i \in N^+$. Після активації облаштування M2M вважається зайнятим до моменту завершення своєї процедури випадкового доступу. Інакше цей пристрій називається неактивним. У тих підкадрах, де відбувається обслуговування (тобто коли запланована можливість передачі PRACH), кожен зайнятий пристрій вибирає одну з s преамбул випадковим чином за рівномірним законом і відправляє її.

Для того, щоб абстрагуватися від наявності «пам'яті» і отримати оцінку величини для даної системи з колізіями, вводиться наступна еквівалентна модель:

1) передбачається, що M2M-пристрої активізуються згідно з розподілом Бернуллі з вірогідністю π . Тоді деякий термінал може ініціювати своє початкове з'єднання з мережею в кожному підкадрі з відповідною вірогідністю $\pi = 1/N$, де N - число підкадрів в початковій системі;

2) далі опускається безпосередній розгляд інтервалу очікування і вікна відстрочення, яке замінюється припущенням про те, що в кожному підкадрі зайнятий пристрій може активізуватися з деякою вірогідністю $\pi_0 = 1/(K_0 + K_1 + K + \omega)$. Це міркування означає, що термінал активізується одного разу

впродовж інтервалу $(K_0 + K_1 + K + \omega)$, якщо його початкова спроба передачі виявилася неуспіхом із-за колізії або ж недостатнього рівня потужності;

3) вірогідність успішного завершення процедури початкового доступу позначається як μ , тобто запит на вхід в мережу обслуговується в поточному підкадрі з деякою вірогідністю μ . Інакше термінал робить спробу дістання доступу до каналу в наступному доступному для нього підкадрі;

4) для простоти найбільше допустиме число спроб передачі однієї преамбули далі не розглядається.

У рамках введеної вище спрощеної системи допущень можна отримати апроксимацію для середньої затримки входу в мережу. Для цього спочатку корисно розглянути ситуацію без виникнення колізій, для якої вірогідність отримання обслуговування ($\tilde{\mu}$) може бути виведена з виразу:

$$E[\tilde{\tau}^{(1)}] = E[\tau^{(1)}]$$

а

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{E[\tau^{(1)}]} = \frac{1}{c_1(K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + \frac{b-K+1}{2} - \bar{w}},$$

де $E[\tau^{(1)}]$ – середня тривалість інтервалу часу між моментом активізації терміналу і моментом отримання ним повідомлення RAR; $E[\tilde{\tau}^{(1)}]$ – середня тривалість відповідного інтервалу у введеної еквівалентній системі. Приведене тут вираження буде використано надалі при описі завантаження системи для M2M-приладів, які уникнули колізій.

В результаті стаціонарний розподіл вірогідності $\omega = \{\omega_0, \omega_1\}$ виражається із співвідношення $\Pi^T \omega = \omega$ і при цьому $\omega_0 + \omega_1 = 1$. Таким чином, середнє значення параметра Q_i може бути знайдене як

$$E[Q_i] = 1 \cdot \omega_1 = \frac{\pi}{\pi + \mu_j},$$

де Q_i – величина, що показує, чи активізовано облаштування i , а μ_i – вірогідність успішної передачі преамбули.

Використовуючи закон Литтла, можливо встановити середній час, проведений системою в змозі j :

$$E[\tau_j^{(1)}] = \frac{E[Q_i]}{\pi} = \frac{1}{\pi + \mu_j}.$$

В можливості j для $j-1$ зайнятих терміналів вірогідність отримати доступ до каналу і вибрати ту ж саму преамбулу, що і облаштування j , складає $\pi \cdot 1/s$ (вірогідність активізації пристрою, помножена на вірогідність вибору ідентичної преамбули). Для неактивних $M-j$ терміналів відповідна вірогідність є $\pi \cdot 1/s$ (вірогідність вступу нового запиту на доступ, помножена на вірогідність вибору ідентичної преамбули).

Результати. На сьогодні система LTE надає ряд виділених каналів для передачі даних від M2M-пристроїв по лінії вгору. Зокрема, канал PRACH використовується терміналами для початкового доступу, а також для того, щоб запросити необхідні радіоресурси, коли вони ще не були надані. Підключення до мережі безлічі облаштувань M2M впродовж короткого інтервалу часу може викликати сплеск завантаження каналу PRACH внаслідок його обмеженої місткості. Важливо нагадати, що робота системи PRACH організована в два етапи (див. рис. 1).

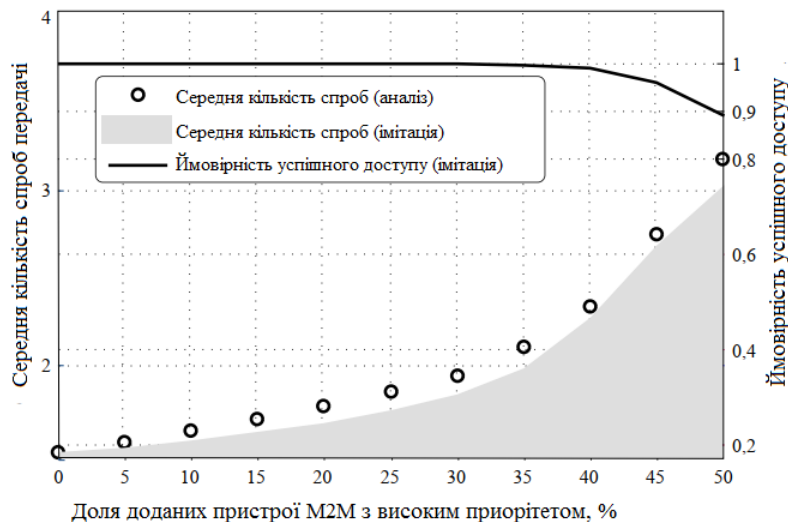


Рис. 3. Характеристики доступу M2M-пристроїв з різними пріоритетами

На першому з них відбувається синхронізація відліку часу по лінії вгору (пов'язана з обміном повідомленнями Msg 1 і Msg 2), коли при передачі преамбул в режимі випадкового доступу використовується поступове підвищення потужності для її підстроювання під стан каналу зв'язку. На другому етапі застосовується повідомлення Msg 3 для відправки службової інформації по лінії вгору на БС (звану eNodeB або eNB), а також повідомлення Msg 4 для подальшого дозволу можливих колізій. Для розуміння того, як велике число M2M-пристроїв впливає на характеристики процедури випадкового доступу в системі LTE, тут і далі наводяться результати моделювання роботи каналу PRACH на рівні протоколу, які були заздалегідь відкалібровані з тестовими даними 3GPP.

Висновки

В зв'язку з цим цікаво спостерігати, що при додаванні близько 40 % високопріоритетних терміналів, що відправляють тривожні повідомлення, до початкової (типової) множини в 30000 низькопріоритетних терміналів, передавальних дані своїх вимірів, різко погіршується якість роботи PRACH.

Цікаво також помітити, що преамбули PRACH, обрані M2M-пристрої випадковим чином, можна розглядати як кодові «канали», що не перекриваються. У разі, коли два або більше за термінал вибирають ідентичну преамбулу (канал), виникає ситуація, що нагадує типову колізію між пакетами даних. Подібна інтерпретація дозволяє вивчати процес змагання між облаштуваннями M2M, спираючись на відомі результати, отримані для багатоканальних протоколів випадкового доступу. Як наслідок, можна отримати точну апроксимацію в заданому діапазоні параметрів роботи системи PRACH, таких як число доступних преамбул (M) і терміналів (U), що змагаються, розмір вікна відстрочення та ін. Проте подібні рішення можна застосовувати лише в окремих випадках, а взагалі кажучи, виникає необхідність проведення безпосереднього чисельного аналізу, який вдається тільки для досить невеликого числа облаштувань/каналів із-за швидко зростаючої обчислювальної складності.

References

1. Datta, S.K.; Bonnet, C. MEC and IoT Based Automatic Agent Reconfiguration in Industry 4.0. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), Indore, India, 16–19 December 2018; pp. 1–5.
2. Hui, H.; Ding, Y.; Shi, Q.; Li, F.; Song, Y.; Yan, J. 5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential. *Appl. Energy* 2020, 257, 113972.
3. Karunarathne, G.R.; Kulawansa, K.T.; Firdhous, M.M. Wireless Communication Technologies in Internet of Things: A Critical Evaluation. In Proceedings of the 2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC), Plaine Magnien, Mauritius, 6–7 December 2018; pp. 1–5.
4. Li, S.; Da Xu, L.; Zhao, S. 5G Internet of Things: A survey. *J. Ind. Inf. Integr.* 2018, 10, 1–9.
5. Gomez, C.; Veras, J.C.; Vidal, R.; Casals, L.; Paradells, J. A Sigfox energy consumption model. *Sensors* 2019, 19, 681.

Рецензія/Peer review : 07.12.2021

Надрукована/Printed : 30.12.2021