

**МОДЕЛИРАНЕ И ОЦЕНКА НА НАДЕЖДНОСТТА НА
LORAWAN МРЕЖИ****Красен Ангелов¹, Пламен Ташев¹, Панайотис Когнас²**¹ *Технически университет – Габрово, България*² *Международен Елински Университет - Кавала, Гърция***MODELING AND RELIABILITY ASSESSMENT OF
LORAWAN NETWORKS****Krasen Angelov¹, Plamen Tashev¹, Panagiotis Kogias²**¹ *Technical University of Gabrovo, Bulgaria*² *International Hellenic University - Kavala Campus, Greece***Abstract**

The rapid development of the Internet of Things has led to the emergence of many low-power, long-range, and low-bitrate wireless networking technologies. One of the widely applied technologies is LoRaWAN. It is a convenient solution for communication in sensor networks applied to build the infrastructure for smart cities. Despite the great advantages of LoRaWAN technology, its potential is still not well explored and its limitations are unclear, as not enough research has been done in this direction yet. This report explores and analyzes the performance of LoRaWAN, focusing on reliability assessment from the perspective of channel access in the physical layer of the network.

Keywords: LoRaWAN, performance analysis, reliability assessment, PER, PLR.**ВЪВЕДЕНИЕ**

За да уловят вълната на Интернет на нещата, много компании разработват нови приложения и услуги, които се нуждаят от огромен брой устройства с ниска мощност, за да бъдат свързани помежду си. Липсата на комуникационни технологии, приложими за такива сценарии, привлече голям интерес от световните органи за стандартизация като 3GPP или IEEE Standard Committee, както и от малките и средни предприятия (МСП). Докато първите се опитват да разработят общи технологии, които могат да се използват в широк набор от сценарии, напр. NB-IoT [1] и WiFi HaLow [2], МСП се фокусират върху бързото развитие на нишови технологии, за да овладеят нововъзникващия пазар преди телекомуникационните лидери. Сред такива нишови технологии са Sigfox [3] и LoRa/LoRaWAN. Както Sigfox, така и LoRa са патентовани технологии. Въ-

преки това Semtech, разработчикът на LoRa, публикува спецификация за LoRaWAN [4], отваряйки вратата за дълбока независима оценка на ефективността.

Тъй като спецификацията на LoRaWAN [4] беше публикувана през 2015 г., все още няма достатъчно яснота и изследвания по отношение на нейната ефективност. По-конкретно, [5-7] представят накратко LoRa, като се фокусират основно върху неговите приложения и физическия (PHY) слой и обръщат малко внимание на протокола за контрол на достъпа до средата (MAC). Някои резултати от изпитвания и симулация в сценарий с малък брой устройства са представени в [8,9]. В [10,11] е използван класическия подход, подобен на ALOHA, за оценка на ефективността на LoRaWAN в сценарий с голям брой устройства, но не е осигурено валидиране чрез симулация или експериментално. Такъв подход е неприложим и

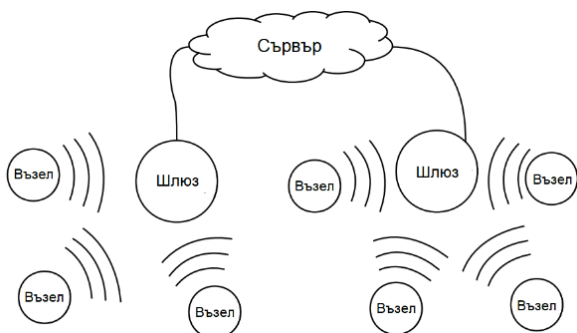
многократно надценява капацитета на мрежата. В този доклад се оценява производителността и надеждността на LoRaWAN мрежа при много по-реалистични условия.

ФАКТОРИ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ НАДЕЖДНОСТТА

По-надолу ще бъдат изброени и разглеждани накратко основните фактори, които пряко влияят върху надеждността и производителността на LoRaWAN мрежите:

А) LoRaWAN мрежова архитектура

Типичната LoRaWAN мрежа се състои от крайни устройства (сензори или задвижващи механизми, наричани още възли), шлюзове и сървър, който събира и анализира информация, извлечена от възлите [12]. Топологията на мрежата е тип „звезда“, което означава, че групи от възли са свързани към шлюзове чрез безжична LoRa връзка, докато шлюзовете са свързани към отдалечен сървър чрез IP мрежа (фиг. 1). Сървърът може да е облачно базиран.



Фиг. 1. Топология на LoRaWAN мрежа

LoRaWAN възлите са разделени в три класа: А, В, С.

Клас А поддържа основната LoRaWAN функционалност, задължителна за всички устройства. Клас А позволява двупосочна комуникация. Ако натоварването на мрежата е ниско, клас А осигурява най-ниската консумация на енергия за възлите, но са възможни дълги закъснения в даунлинк канала. Клас В реализира двупосочна комуникация в предварително резервирани времеви слотове в даунлинк канала. Разпространението на слотовете се извършва от шлюза. Устройствата от клас С прослушват канала непрекъснато, като по този начин осигуряват най-ниската латентност в даунлинк канала, но

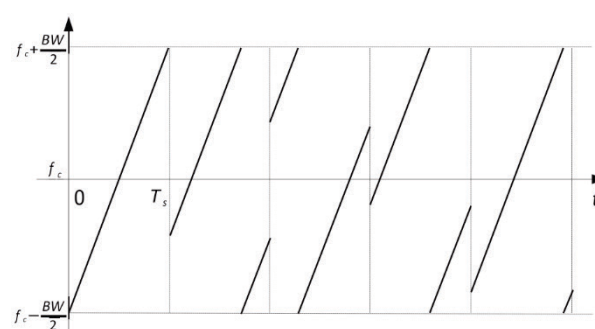
изискват изключително висока консумация на енергия.

В този доклад се разглежда работата на LoRaWAN устройства от клас А.

Б) LoRaWAN модулация

LoRaWAN използва модулационна схема, която е адаптация на Chirp-Spread Spectrum (CSS) модулацията [13]. Първоначално проектирана през 1940 г. за радари, CSS се използва широко във военните и защитени комуникации поради относително ниските си изисквания за мощност при предаване и присъщата устойчивост от смущаващи ефекти, като многолъчево разпространение на сигналите, фединга, Доплеровия ефект и интерференцията в честотната лента [14].

В LoRa всеки символ може да бъде представен като синусоидален сигнал, честотата на който се променя циклично в рамките на прозореца BW около централната честота f_c . По-конкретно, вариацията на честотата започва с някаква стойност, след което се увеличава до максималната си стойност $f_c + BW/2$, а след това пада до минимума $f_c - BW/2$ и продължава да расте до достигане на първоначалната си стойност (фиг. 2). Броят на възможните начални стойности е 2^{SF} , където факторът на разпространение SF определя броя на предадените битове в символ.



Фиг. 2. Топология на LoRaWAN мрежа

Поради кодирането за корекция на грешки, броят на информационните битове е по-малък и скоростта на битовете е равна на

$$R_b = \frac{SF}{T_s} CR = \frac{SF \cdot BW}{2^{SF}} CR \quad (1)$$

където CR е дълбочината на кода за корекция на грешки, която може да бъде 4/5,

4/6, 4.7 или 4/8, а T_s е продължителността на символа, която зависи както от SF, така и от честотната лента, както следва:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2)$$

По този начин трите параметъра BW , SF и CR ще определят скоростта на предаване на LoRa връзка от точка до точка. По-високите SF стойности водят до по-ниска скорост, но в същото време по-висока чувствителност. Например, съгласно [15], в 125kHz канал Semtech SX1276 LoRa устройство може да получи пакет при -125 dBm, когато $SF = 7$, но когато $SF = 12$, чувствителността е -137 dBm. За дълбочина на кода 4/5 битовата скорост е съответно 293 bps и 5468 bps, съответно за $SF = 12$ и $SF = 7$.

Забележителна характеристика на такава модулационна и кодираща схема е, че LoRa устройството може правилно да получи две припокриващи се предавания с различни коефициенти на разширение в един и същи канал.

Наборът от налични скорости на данните зависи от регионалните спецификации. Таблица 1 изброява възможните скорости на данни за ISM честотната лента за Европа EU 863-880 MHz.

Таблица 1. Скорост на данните в ISM честотната лента EU 863-880 MHz

№	Коефициент на разширение SF	Ширина на канала BW, kHz	Дълбочина на кода CR	RHU скорост, bps	RF чувствителност, dBm
0	12	125	4/6	250	-137
1	11	125	4/6	440	-136
2	10	125	4/5	980	-134
3	9	125	4/5	1760	-131
4	8	125	4/5	3125	-128
5	7	125	4/5	5470	-125
6	7	250	4/5	11000	-122

В) Структура на рамката

Тъй като LoRaWAN е проектиран за комуникация с ниска мощност и ниска скорост, използването на тежък TCP/IP протокол едва ли е препоръчително. По тази причина LoRaWAN е олекотен протокол, който може директно да се използва от сензорни и контролни приложения за комуникация с шлюза.

Г) Достъп до канала

LoRaWAN мрежата работи в няколко честотни канала, които се определят от конфигурацията на шлюза. Броят на разпределени-

те канали зависи от регионалните ограничения и мрежовите опции. Някои канали са запазени за предаване на данни, един канал е запазен за отговорите на шлюза за рамки, а някои канали се използват за предаване на заявки за присъединяване към шлюза.

Д) Скорост на данните

Както вече бе споменато по-горе, в LoRaWAN мрежите възлите могат индивидуално да използват всяка от възможните скорости на данни и те ще определят от комбинация от чирочина на честотната лента и коефициент на разширение. Мрежата може да използва механизъм за адаптивен контрол на скоростта на данни, който позволява на контрол на скоростта на крайните устройства чрез съответни MAC команди. Спецификацията обаче не описва точно механизма и все още е открит въпросът кои измервания трябва да се вземат предвид, когато се решава дали дадено устройство трябва да превключи от една скорост на предаване на данни към друга [16]. Скоростта на данни, използвана за предаване на данните по даунлинк канала, зависи от скоростта на връзката по ъплинк канала и от конфигурируемия мрежов параметър $RXIDROffset$, който варира от 0 до 5

Е) Работен цикъл

В работния цикъл има ограничение, според което дадено устройство не може да използва честотна лента за определен период от време след предаване в тази лента. Ако времето за предаване е с продължителност $TimeOnAir$ и работният цикъл е равен на $DutyCycle$, тогава каналът не е достъпен за период от

$$T_{off} = \frac{TimeOnAir}{DutyCycle} - TimeOnAir \quad (3)$$

Например, ако дадено устройство предава рамка с дължина 1s и коефициентът на запълване е равен на 1%, тогава лентата е недостъпна за 99 s.

Ж) Съществуващи проблеми

Един по-подробен анализ на механизмите за регулиране на скоростта, достъпа до канала и логическата обмяна на данни в работния цикъл показва, че съществуват известно количество проблеми, които значително ще повлияят върху производителността и надеждността на мрежата.

Първият проблем е свързан с това дали шлюзът трябва да прослушва канала по време на интервала между приемането на рамка и предаването на отговор. Ако шлюзът трябва да прослушва канала, стандартът не определя поведението на шлюза, когато трябва да предаде отговор а каналът изглежда зает с някакво предаване. Възможно решение е да се отмени чакащо предаване в главния канал, тъй като може да създаде колизия във възела, и да се предаде отговорът само в даунлинк канала. Друго решение е да се избере такава скорост на данни за отговора, която позволява да се избегнат две припокриващи се предавания при една и съща скорост на данни.

Подобен проблем възниква, когато две рамки се предават в припокриващи се интервали от време в различни канали (или в един и същ канал с различни коефициенти на разширение). Ако шлюзът има само един даунлинк канал, той не може да предава отговори на двете рамки по време на съответните втори прозорци за получаване, тъй като тези отговори трябва да се предават с минималната (същата) скорост на предаване на данни.

Третият въпрос е политиката за препредаване. Препоръчителното поведение за повторно предаване е да се избере произволно забавяне между 1 и 3 секунди. Въпреки това, продължителността на рамката и на потвърждението може да бъде повече от 1 секунда, което води до голяма вероятност от повторна колизия с рамка или с потвърждение. Използването на множество канали за предаване на рамки подобрява ситуацията, като на практика увеличава интервала за произволен избор на забавяне, но този интервал все още е фиксиран, което ограничава скалируемостта на мрежата. Може да е по-добре да се използва процедурата за двоично експоненциално забавяне, подобна на тази, използвана в Wi-Fi мрежите.

Четвъртият проблем е политиката за избор на скорост на данни за препредаване. От една страна, намалявайки скоростта на данни, подобряваме надеждността на предаването. От друга страна, ако устройствата намалят скоростта на данни за повторно предаване, всички те могат да завършат на най-

ниската скорост на данни, което значително увеличава вероятността от колизии.

Споменатите проблеми са особено важни при силно натоварени мрежи, но те обикновено се пропускат от разработчиците и операторите на LoRaWAN при изграждане на мрежа с малък брой устройства и нисък трафик. По-нататъшното нарастване на популярността на IoT обаче ще увеличи както броя на устройствата, така и броя на мрежите на различни оператори, работещи в една и съща зона в нелицензиран спектър, следователно подобни проблеми не трябва да се пренебрегват.

СЦЕНАРИЙ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

За да се оцени надеждността и ефективността на LoRaWAN протокола, се разглеждат следния сценарий:

Мрежата се състои от N възела, свързани към шлюз. Те работят в 3 основни канала и един даунлинк канал за връзка, като всички канали са с ширина 125 kHz, което е типична конфигурация за ЕС. Устройствата използват скорости на данни от 0 ($SF = 12$) до 5 ($SF = 7$), зададени от шлюза по време на инициализацията на мрежата според мощността на сигнала от крайните устройства.

Както в [8], тук се разглеждат следните вероятности за възел да предава с помощта на специфична скорост на данни: $p_0 = 0,28$, $p_1 = 0,2$, $p_2 = 0,14$, $p_3 = 0,1$, $p_4 = 0,08$ и $p_5 = 0,2$, което съответства на случай, когато крайните устройства са разпределени равномерно в кръгова област около шлюза и загубата от разпространение се описват от модела на Окомура-Хата. Счита се, че възниква колизия, ако поне две предавания с една и съща скорост на данни се припокриват във времето.

Всички възли предават рамки с 64-байтов RNU полезен товар (51-байтов полезен товар на рамка), който съответства на най-големия полезен товар, който може да побере рамка при най-ниската скорост на предаване на данни. Рамките се предават в режим с потвърждение, рамките за потвърждение не пренасят полезен товар. Разглеждаме ситуация, когато възела няма опашка, т.е. ако се генерират две съобщения, той предава най-новото. Съобщенията се генерират по веро-

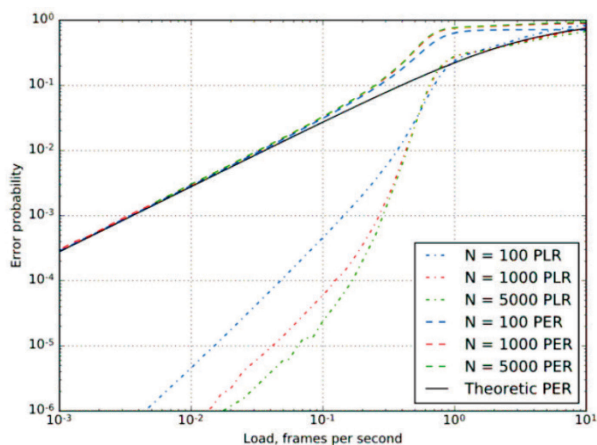
ятностно разпределението на Поасон, т.е. с експоненциално разпределено време между пристиганията им.

Целта на изследването е да се проучи как надеждността на предаване зависи от броя на възлите и натоварването, т.е. броят на пакетите, които се генерират от възлите и да се определи капацитетът на мрежата.

РЕЗУЛТАТИ

Обръща се основно внимание на честотата на грешките на пакетите (PER) и коефициента на загуба на пакети (PLR), а не на максимално добрата пропускателна способност, която мрежата може да осигури. Коефициента на пакетна грешка PER е вероятността предаването на пакет да е неуспешно. Коефициентът на загуба на пакети PLR е вероятността генерираният пакет да не бъде доставен или защото е достигнат лимитът за повторен опит, или защото пакетът е бил изпуснат поради пристигането на нов пакет.

На фиг. 3 са показани получените резултати от симулация за различни стойности на мрежовото натоварване и броя N на възлите. Фигурата също така представя резултати, получени с математически модел за безкраен брой възли.



Фиг. 3. PER и PLR във функция от натоварването на LoRaWAN мрежата

При натоварване по-малко от 0,1 rps (пакета в секунда), коефициентът на загуба на пакети PLR е пренебрежимо малък (под 0,001) и може да се каже, че комуникацията е доста надеждна. Важно е да се отбележи, че за да се постигне такова ниско натоварване в мрежа със 100 възела, средно всеки възел ще генерира пакет по-рядко от веднъж

на 20 минути. Ако $N = 5000$, средно всеки възел ще генерира пакет по-рядко от 2 пакета на ден.

Когато натоварването се увеличи, както PER, така и PLR се увеличават значително по две причини. Първо, подходът за разрешаване на колизии, използван в LoRaWAN, е неефективен с голям брой възли и води до лавина от колизии. Единственият начин да се спре тази лавина е съвместното използване на ограничен лимит за повторен опит и малък размер на опашката (в симулацията е 1). Втората причина е, че пакетите пристигат в непразна опашка, което води до изпускане на пакети.

Разработеният математически модел може да се използва за изчисляване на PER, ако натоварването е ниско, и PLR, ако натоварването е високо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладът е представен анализ на LoRaWAN технологията и изследване за оценка на нейната производителност и надеждност в мрежа с голям брой възли. Установи се, че дори с 3 основни канала и 6 скорости на данни (т.е. 18 виртуални канала за предаване), капацитетът на мрежата е около 0,1 51-байтови (Frame Payload) съобщения в секунда. Например, този капацитет съответства на генерирания трафик в мрежа с 5000 възли, всеки от които генерира 2 съобщения на ден. Това силно ограничава възможността за използване на LoRaWAN технологията в много сценарии на интелигентен град.

Възможно решение на този проблем е да се увеличи плътността на LoRaWAN шлюзовете. Това обаче може да доведе до междумрежови смущения. Като бъдеща работа може да се обърне внимание на точната оценка на ефективността на LoRaWAN мрежа в такъв сценарий, съобразен с наличието на интерференция.

БЛАГОДАРНОСТИ

Този доклад и изследванията в него са реализирани по проект „Планиране, проектиране и оптимизация на безжични комуникационни платформи, услуги и решения за 5G и IoT приложения”, договор 2205E/2022 г. към УЦНИТ при ТУ – Габрово.

REFERENCE

- [1] NB-IOT: Enabling business opportunities. White paper, Huawei, 2015.
- [2] Khorov E., A. Lyakhov, A. Krotov, and A. Guschin, A survey on IEEE 802.11ah: An enabling networking technology for smart cities, Computer Communications, Special Issue on Networking and Communications for Smart Cities, vol. 58, pp. 53 - 69, 2015.
- [3] SIGFOX - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things.
- [4] LoRa Alliance, LoRaWAN Specification, 2015.
- [5] Centenaro M., L. Vangelista, A. Zanella, M. Zorzi, Long- Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios, arXiv preprint arXiv:1510.00620, 2015.
- [6] Vangelista L., A. Zanella, M. Zorzi, Long-Range IoT Technologies: The Dawn of LoRaTM,” in Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures, pp. 51-58, Springer, 2015.
- [7] Goursaud C., J. Gorce, Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges, EAI endorsed transactions on Internet of Things, 2015.
- [8] Augustin A., J. Yi, T. Clausen, W. Townsley, A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things, Sensors, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016.
- [9] Tashev P., N. Manchev, K. Angelov, Study and comparative performance analysis of LoRa end devices for street lighting monitoring, Proc. of papers TechCo– Lovech 2022, pp. 47 – 52, 2022 (ISSN: 2535-079X).
- [10] Adelantado F., X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, and J. Melia, Understanding the Limits of LoRaWAN, arXiv preprint arXiv:1607.08011, 2016.
- [11] Tashev P., K. Angelov, N. Manchev, Comparative Analysis of LoRa Modulation Performance for IoT Applications, Proc. of papers UNITECH 2021, 19 November 2021, Gabrovo, Bulgaria, vol. 1, pp. I-163-168, 2021, ISSN: 1313-230X.
- [12] Manchev N., K. Angelov, P. Kogias and S. Sadinov, Development of Multichannel LoRaWAN Gateway for Educational Applications in Low-Power Wireless Communications, 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2019, Electronic ISBN: 978-1-7281-2574-9 (DOI: 10.1109/ET.2019.8878492)
- [13] LoRa™ Modulation Basics, Wireless, Sensing & Timing Product, Application Note, AN1200.22, Rev.2 Semtech Corporation, USA, 2015.
- [14] AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, Rev. 2, Semtech, May 2015.
- [15] LoRa SX1276/77/78/79 Datasheet, Rev. 4., Semtech, March 2015.
- [16] Petric T., M. Goessens, L. Nuaymi, A. Pelov, L. Toutain, Measurements, Performance and Analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN, in 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), pp. 104-110, IEEE, 2016.