

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII AL REPUBLICII
MOLDOVA**

**Universitatea Tehnică a Moldovei
Facultatea Electronică și Telecomunicații
Departamentul Telecomunicații și Sisteme Electronice**

**Admis la susținere
Șefă departament TSE:
Tîrșu Valentina, conf. univ., dr.**

20 ianarie 2025

**Analiza eficienței energetice a tehnologiei de rețea
LoRaWan pentru diverse aplicații**

Teza de master

Student:

**Burbulea Vasile
gr. SCE – 231M**

Conducător:

**Șestacova Tatiana
conf. univ., dr.**

Chișinău, 2025

REZUMAT

Autorul: Burbulea Vasile, gr. SCE - 231M

Titlul tezei de master: Analiza eficienței energetice a tehnologiei de rețea LoRaWan pentru diverse aplicații

Structura lucrării: Constă din pagini de titlu, aviz, rezumat, introducere, 3 capitoli, concluzii, bibliografie.

Cuvinte cheie: arhitectură de rețea, topologie, LoRaWan, modulară, MLF, eficiență energetică.

Problematica studiului: Analiza eficienței energetice a tehnologiilor de rețea în funcție de condițiile de transmisie a datelor.

Scopul lucrării: Analiza tehnologiei de rețea LoRaWan eficientă din punct de vedere energetic, ținând cont de echipamentul selectat pentru această tehnologie.

Obiectivele:

1. Analiza proiectelor LPWAN existente;
2. Cercetarea arhitecturii și claselor dispozitivelor LoRaWan;
3. Examinarea particularităților modulației utilizate în LoRaWan;
4. Studiul particularităților de aplicare a vitezei adaptive a datelor în LoRaWan;
5. Calculul consumului de energie al dispozitivelor LoRaWan;
6. Determinarea nivelurilor de atenuare și raporturile semnal-zgomot în timpul transmiterii de date în sistem LoRaWan

Metode aplicate: Analiza analitică a eficienței energetice a tehnologiilor de rețea.

Rezultatele obținute: Consumul de energie al dispozitivelor LoRaWan a fost calculat. Nivelurile de atenuare necesare și raportul semnal-zgomot pentru transmisia de date în rețelele LoRaWan sunt determinate în funcție de modelul selectat al mediului de propagare a undelor radio: model de spațiu liber, model cu două fascicule și model de umbrire.

Se arată că consumul de energie al dispozitivelor LoRaWan selectate depinde de modurile de funcționare ale modulelor, consumul mediu de curent a fost de 28,1 μA , ceea ce confirmă eficiența energetică ridicată a acestor dispozitive.

SUMMARY

Author: Burbulea Vasile, gr. SCE-231M

Title: Analysis of energy-efficient LoRaWan network technology for various applications.

Thesis structure: consists of title pages, Review, Summary, Introduction, Conclusions, Bibliography.

Key words: network architecture, topology, LoRaWan, modulation, LFM, energy efficiency

Research problem: Analysis of energy efficiency of network technologies depending on data transmission conditions.

Thesis purpose: Analysis of energy-efficient LoRaWan network technology, taking into account the equipment selected for this technology.

Objectives:

1. Analyze existing LPWAN projects;
2. Study the architecture and classes of LoRaWan devices;
3. Examine the features of modulation used in LoRaWan;
4. Determine peculiarities of using adaptive data rate in LoRaWan;
5. Calculate the power consumption of LoRaWan devices;
6. Determine the attenuation levels and signal-to-noise ratios when transmitting data in the LoRaWan system.

Applied methods: Analytical analysis of the energy efficiency of network technologies.

The obtained results: The power consumption of LoRaWan devices has been calculated. The required attenuation levels and signal-to-noise ratio for data transmission in LoRaWan networks are determined by the selected model of the radio wave propagation medium: free space model, two-beam model, and shadow model.

It is shown that the power consumption of the selected LoRaWan devices depends on the operating modes of the modules, the average current consumption was 28.1 μkA , which confirms the high energy efficiency of these devices.

CUPRINS

INTRODUCERE	7
1 ANALIZA GENERALĂ A CARACTERISTICILOR TEHNOLOGIEI LoRaWAN	9
1.1 Cerințe pentru sistemele de contorizare inteligentă.....	9
1.2 Prezentare succintă a proiectelor existente LoRaWAN	11
1.3 Analiza arhitecturii LoRaWAN și a claselor de dispozitive utilizate.....	12
1.4 Analiza tehnologiei de modulare în rețelele LoRaWAN	15
2 ANALIZA EFICIENȚEI ENERGETICE A TEHNOLOGIEI DE REȚEA LoRaWAN PENTRU DIVERSE APLICAȚII	22
2.1 Rată de biți adaptivă	22
2.2 Operarea rețelelor de difuzare în rețele M2M	27
2.3 Tehnologii de economisire a energiei	34
2.3.1 Economie de energie la nivel de microcontroler.....	34
2.3.2 Rețele eficiente energetic	35
2.3.3 Estimarea consumului de energie al dispozitivelor Internet of Things	37
3 CALCULUL CONSUMULUI DE ENERGIE AL DISPOZITIVELOR LORAWAN	39
3.1 Metodologia de calcul al consumului de energie al dispozitivelor de rețea de comunicații.	39
3.2 Șablon de spațiu liber LoRaWAN	41
3.3 Model LoRaWAN cu fascicul dublu	43
3.4 Modelul „Umbrire”.....	47
3.5 Determinarea nivelului de atenuare și a raportului semnal-zgomot în timpul transmisiei de date în sistemul LoRaWan	52
CONCLUZII	57
BIBLIOGRAFIE	58

INTRODUCERE

Dezvoltarea rapidă a rețelelor de comutare de pachete la începutul anilor 2000 -a dus la faptul că comunitatea globală de telecomunicații s-a dezvoltat mai întâi și apoi a început să implementeze o nouă paradigmă pentru dezvoltarea comunicațiilor - rețelele de generație următoare. S-a presupus că principalii utilizatori ai unor astfel de rețele ar fi oamenii și, prin urmare, numărul maxim de abonați va fi întotdeauna limitat de populația planetei Pământ. Cu toate acestea, dezvoltarea semnificativă a identificării prin radiofrecvență (RFID), răspândirea rețelelor de senzori fără fir (WSN) și creșterea explozivă a utilizării smartphone-urilor și a tabletelor au contribuit la apariția unui număr imens de dispozitive tehnice integrate în Internet. („lucruri”) care sunt interconectate.

Potrivit diviziei de consultanță a Cisco IBSG (Internet Business Solutions Group), se estimează că numărul de dispozitive conectate la Internet va ajunge la 50 de miliarde până în 2020. În opinia lor, „Internetul lucrurilor” este doar un moment în timp în care numărul de obiecte materiale conectate la Internet a depășit numărul persoanele care folosesc World Wide Web. Astfel, conform calculelor, tranziția evolutivă de la „Internetul oamenilor” la „Internetul În general, „Internetul lucrurilor” este înțeles ca un ansamblu de diverse dispozitive, senzori și actuatori autonomi, conectate într-o rețea folosind -orice canale de comunicație disponibile (cu fir sau fără fir), folosind diferite protocoale de interacțiune între ele și un singur acces. protocol către rețeaua globală. Internetul este utilizat în prezent ca o rețea globală, iar protocolul comun este IP. Cele mai importante diferențe ale „Internetului lucrurilor” sunt un număr semnificativ mai mare de obiecte conectate, dimensiunile lor mai mici, rate în general scăzute de transfer de date, precum și nevoia de a crea noi infrastructuri și standarde alternative.

Pentru dispozitivele terminale de rețea, care îndeplinesc de obicei funcțiile de colectare și analiză a datelor, viteza și volumul transferului de informații nu sunt la fel de importante ca durata de funcționare a dispozitivului fără întreținere și încărcare suplimentară (măsurată în luni și ani), dimensiunile generale și costul canalului de comunicare. Pentru a îndeplini cerințele de mai sus, sunt implementate în mod activ noi tipuri de rețele cu consum redus de energie LPWAN (Low Power Wide Area Networks), care, spre deosebire de rețelele de date 3G, 4G sau LTE, rezolvă eficient sarcinile.

Prin urmare, *scopul* tezei de master este analiza eficienței energetice a tehnologiei de rețea LoRaWan pentru diverse aplicații luând în considerare echipamentul selectat pentru această tehnologie.

Pentru a atinge acest scop, este necesar să se rezolve următoarele **obiective**:

1. Analiză a proiectelor LPWAN existente;
2. Cercetarea arhitecturii și a claselor dispozitivelor LoRaWan;
3. Examinarea particularităților modulației utilizate în LoRaWan;
4. Studiul particularităților de aplicare a vitezei adaptive a datelor în LoRaWan;
5. Calculul consumului de energie al dispozitivelor LoRaWan;
6. Determinarea nivelurilor de atenuare și raporturile semnal-zgomot în timpul transmiterii de date în sistem LoRaWan.

BIBLIOGRAFIE

1. Roslyakov A.V., Vanyashin S.V., Grebeshkov A. Yu., Samsonov M. Yu. „Internetul lucrurilor”. - Samara: PSUTI, ASTARD 2014. ISBN 978-5-7310-4465-3.
2. Kirichek R., Kulik V. Transmisia de date pe distanță lungă pe rețelele de senzori ubicui zburăți (FUSN) prin utilizarea protocoalelor LPWAN // *Comunicații în informatică și știința informației*. 2016 Vol. 678 p. 442–453. DOI: 10.1007/978-3-319-51917-3_39.
3. Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., Zorzi, M. Long-Range Communications în Benzi fără licență: stelele în devenire în scenariile IoT și Smart City // *IEEE Wireless Communications*. 2016 Vol. 23 Iss. 5 p. 60–97. DOI: 10.1109/MWC.2016.7721743.
4. *Fundamentele Internetului Lucrurilor: un ajutor didactic / NV Papulovskaya; Ministerul Științei și Învățământului Superior al Federației Ruse*. - Ekaterinburg: Editura Uralului. Universitatea, 2022. - 104 p. ISBN 978-5-7996-3537-4.
5. Naik A., „LPWAN Technologies for IoT Systems: Choice Between Ultra Narrow Band and Spread Spectrum” – Roma, Italia: IEEE International Systems Engineering Symposium, 2018. 978-1-5386-4447-8.
6. A. Triantafyllou, P. Sarigiannidis, TD Lagkas, *Protocoale de rețea, scheme și mecanisme pentru internetul lucrurilor (IoT): caracteristici, provocări deschise și tendințe*. *Wirel. comun. Mob. Calculator*. 2018 (2018). ISSN- 2455-5703.
7. Kornilov, A. *Fundamentals of Designing Internet of Things Applications: A Tutorial / A. Kornilov*. - [B. m.]: Ridero, 2018. - 173 p.: ill. ISBN 978-5-4490-4945-2.
8. Schwab, K. *Tehnologiile celei de-a patra revoluții industriale / K. Schwab, N. Davis; tradus din engleză de K. Akhmetov, A. Vrublevsky, V. Karpyuk, A. Kozlov*. - Moscova: Exmo, 2018. - 320 p. ISBN 978-5-04-095268-7.
9. *Aplicație NB-IoT Low-Power și Wide-Area, LPWA*. — Subiect: conținut // TAdviser.ru: [pag — 2019. — URL: <http://www.tadviser.ru/a/323705>.
10. Tikhvinsky VO, Terentyev SV, Yurchuk AB *Rețele de comunicații mobile LTE: tehnologii și arhitectură*. - M.: Eco-Trends, 2010 - 284 p.: ill. ISBN978-5-88405094-5.
11. John Park, Steve Mackay, Edwin Wright, *Transmisia datelor în sistemele de control și management; traducere din engleză* - M.: OOO IDT Group, 2007. - 480 p. ISBN: 978-594833-023-5.
12. Artyushenko VM, Korchagin VA *Analiza caracteristicilor de propagare a undelor radio în piconetele dispozitivelor fără fir cu rază scurtă de acțiune*. // *Probleme teoretice și aplicate ale serviciului*. 2009. Nr. 4 (31) p. 32-37. UDC 629,7.
13. Kumaritova DL, Kirichek RV *Revizuirea și analiza comparativă a tehnologiilor de rețea LPWAN // Tehnologii informaționale și telecomunicații*. 2016 Vol. 4 nr. 4 p.

33–48. ISSN 2307-1303.

14. Tehnologia LoRa: perspective de implementare pe rețelele IoT. V. Tikhvinsky, V. Koval, G. Bochechka, *Comunicații fără fir. First Mile*, nr 6. 2016.UDC 391.82.
15. Sinha, RS, Wei, YQ și Hwang, SH (2017) Un sondaj privind tehnologia LPWA: LoRa și NB-IoT. *ICT Express*, 3, 14-21. ISSN: 2405-9595.
16. Kranz, M. *Internetul lucrurilor. Noua revoluție tehnologică* / M. Kranz; tradus de ZA Mamedyarov. - Moscova: BOMBORA, 2018. - 332 p.: ill. ISBN 9785-04-090627-7.
17. Stepanov NV *Revizuirea sistematizată a caracteristicilor de implementare ale stratului fizic al protocolului LoRa* // *T-Comm: Telecomunicații și transport*. 2023 Vol. 17 nr. 11. P. 11-26. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-11-11-26.