

Universitatea “Politehnica” din București
Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

Antenă miniaturală pentru protocolul de comunicație LoRa

Proiect de diplomă

prezentat ca cerință parțială pentru obținerea titlului de
Inginer în domeniul *Electronică și Telecomunicații*,
programul de studii de licență *Tehnologii și Sisteme de
Telecomunicații*

Conducător științific

as. dr. Alexandru TATOMIRESCU

Absolvent

Marius-Mihail GURGU

2020

TEMA PROIECTULUI DE DIPLOMĂ
a studentului **GURGU F.C. Marius-Mihail , 443C-TST.**

1. Titlul temei: Antenă miniaturală pentru protocolul de comunicație LoRa

2. Descrierea contribuției originale a studentului (în afara părții de documentare) și specificații de proiectare:

Scopul acestei lucrări este proiectarea și realizarea fizică a unei antene în tehnologie microstrip pentru protocolul de comunicație LoRa. Antena va funcționa în banda de frecvență situată între 863 și 870 MHz și va avea dimensiunile mai mici sau egale cu o zecime din lungimea de undă (aproximativ 34 cm) la frecvența de lucru. În banda de trecere, coeficientul de reflexie al antenei va fi de maxim -6 dB. Acești parametri de proiectare vor fi îndepliniți în programele de simulare APnet FDTD Code (bazat pe metoda diferențelor finite în domeniul timp) și CST, urmând ca performanțele efective ale antenei fizice să fie măsurate și comparate cu cele obținute în urma simulărilor numerice.

Pentru a cuantifica performanța antenei, se va măsura coeficientul de reflexie în banda de frecvență specificată cu analizorul de rețea, iar valoarea va fi comparată cu parametrii unor antene comerciale din prezent. În urma măsurătorilor, se vor formula concluziile cu privire la caracteristicile antenei și la eventualele îmbunătățiri care ar putea fi aduse acesteia.

Pentru a pune în valoare aplicabilitatea antenei, aceasta va fi folosită pentru un nod LoRa implementat pe o plăcuță PCB dotată cu microcontroller și senzori care transmite date către un gateway LoRa realizat cu o plăcuță de dezvoltare Raspberry Pi. Datele achiziționate de senzorii nodului LoRa vor fi prelucrate și afișate prin intermediul unei interfețe web.

3. Resurse folosite la dezvoltarea proiectului:

Medii de simulare: Matlab, APnet FDTD Code, CST; Placa de dezvoltare: Raspberry Pi

4. Proiectul se bazează pe cunoștințe dobândite în principal la următoarele 3-4 discipline:

Microunde, Circuite de Microunde, Antene și Propagare, Proiect 3

5. Proprietatea intelectuală asupra proiectului aparține: studentului

6. Data înregistrării temei: 2019-11-26 15:24:28

Conducător(i) lucrare,

As. Dr. Ing. Alexandru TATOMIRESCU

Student,

Director departament,

Conf. dr. ing. Eduard POPOVICI

Decan,

Prof. dr. ing. Mihnea UDREA

Cod Validare: **95a87c145e**

Copyright © 2020, *Marius-Mihail GURGU*

Toate drepturile rezervate.

Autorul acordă UPB dreptul de a reproduce și de a distribui public copii pe hîrtie sau electronice ale acestei lucrări, în formă integrală sau parțială.

Declarație de onestitate academică

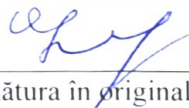
Prin prezenta declar că lucrarea cu titlul "*Antenă miniaturală pentru protocolul de comunicație LoRa*", prezentată în cadrul Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației a Universității "Politehnica" din București ca cerință parțială pentru obținerea titlului de *Inginer* în domeniul *Inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale*, programul de studii *Tehnologii și sisteme de telecomunicații* este scrisă de mine și nu a mai fost prezentată niciodată la o facultate sau instituție de învățământ superior din țară sau străinătate.

Declar că toate sursele utilizate, inclusiv cele de pe Internet, sunt indicate în lucrare, ca referințe bibliografice. Fragmentele de text din alte surse, reproduse exact, chiar și în traducere proprie din altă limbă, sunt scrise între ghilimele și fac referință la sursă. Reformularea în cuvinte proprii a textelor scrise de către alți autori face referință la sursă. Înțeleg că plagiatul constituie infracțiune și se sancționează conform legilor în vigoare.

Declar că toate rezultatele simulărilor, experimentelor și măsurărilor pe care le prezint ca fiind făcute de mine, precum și metodele prin care au fost obținute, sunt reale și provin din respectivele simulări, experimente și măsurători. Înțeleg că falsificarea datelor și rezultatelor constituie fraudă și se sancționează conform regulamentelor în vigoare.

Moreni, 05.06.2020

Absolvent *Marius-Mihail GURGU*



(semnătura în original)

CUPRINS

Lista figurilor	9
Lista tabelelor.....	11
Lista abrevierilor	13
Introducere	17
Capitolul 1 Descrierea protocolului LoRa	19
1.1 Parametri generali.....	19
1.2 Clase de funcționare	21
1.3 Securitate	22
1.4 Scenarii de utilizare și limitări.....	23
Capitolul 2 Proiectarea antenei microstrip prin simulare numerică.....	29
2.1 Clasificarea antenelor	29
2.2 Parametrii de performanță ai antenelor	30
2.3 Principiul simulării numerice	32
2.4 Alegerea tipului potrivit de antenă	33
2.5 Simularea numerică a prototipului inițial în AFC	35
2.6 Simularea numerică a prototipului îmbunătățit în CST.....	40
2.7 Modelul final miniaturizat.....	43
2.8 Comparatii cu alte modele miniaturale de antene	45
2.9 Măsurarea coeficientului de reflexie al antenei fizice	46
Capitolul 3 Configurarea rețelei LoRaWAN	49
3.1 Echipamente hardware folosite	49
3.2 Conectarea modulelor rețelei.....	52
3.3 Dezvoltarea unei aplicații de măsurare a temperaturii	57
Concluzii și posibile îmbunătățiri	59
Bibliografie	61
Anexă	65

LISTA FIGURILOR

Figura 1.1 – Topologia LoRaWAN	19
Figura 1.2 – Spectrogramă care evidențiază modulația folosită în LoRa, Sursa: [7]	20
Figura 1.3 – Mecanismul de funcționare ADR funcționare, Sursa: [6]	20
Figura 1.4 – Sincronizarea transmisie-recepție din perspectiva nodului.....	21
Figura 1.5 – Exemplificare a clasei B de funcționare	22
Figura 1.6 – Partiționarea cheilor în LoRaWAN	22
Figura 1.7 – Timpul necesar transmisiunii prin aer în funcție de dimensiunea pachetului, Sursa: [14]	25
Figura 1.8 – Traficul rețelei LoraWAN în funcție de numărul de noduri, Sursa: [14]	26
Figura 2.1 – Circuitul Thévenin echivalent al unei antene în regim de transmisie.....	29
Figura 2.2 – Ilustrare a unei celule FDTD de tip Yee, împreună cu vectorii \mathbf{H} și \mathbf{E}	32
Figura 2.3 – Structura folosită la simularea numerică	33
Figura 2.4 – Structura antenei F-inversat.....	34
Figura 2.5 – Structura antenei de tip "patch"	34
Figura 2.6 – Principiul iterativ de proiectare al antenei	35
Figura 2.7 – Antenă IFA miniaturizată, design propriu	36
Figura 2.8 – Circuit echivalent pentru antena F-inversat	36
Figura 2.9 – Coeficientul de reflexie al tensiunii, condiția de terminare a simulării setată la -10 dB	37
Figura 2.10 – Coeficientul de reflexie al tensiunii, condiția de terminare a simulării setată la -40 dB	38
Figura 2.11 – Caracteristica de radiație în planurile YoZ, respectiv XoZ și câștigul liniar al antenei la frecvența de 868 Mhz.....	38
Figura 2.12 – Caracteristica de radiație tridimensională (scară în dB).....	39
Figura 2.13 – Componentele \mathbf{E}_x , \mathbf{E}_y și respectiv \mathbf{E}_z ale câmpului electric din zona de câmp apropiat, vizualizate în planul XoY	39
Figura 2.14 – Componentele \mathbf{H}_x , \mathbf{H}_y și respectiv \mathbf{H}_z ale câmpului magnetic din zona de câmp apropiat, vizualizate în planul XoY	40
Figura 2.15 – Structura modificată a prototipului inițial	41
Figura 2.16 – Modificarea coeficientului de reflexie cu dimensiunea L_m	41
Figura 2.17 – Reprezentarea câștigului în formă polară în planurile YoZ, respectiv XoZ (valori logaritmice).....	42
Figura 2.18 – Caracteristica de radiație tridimensională (scară logaritmică)	42
Figura 2.19 – Curentul de suprafață (reprezentare logaritmică)	43
Figura 2.20 – Cele 2 variante finale ale antenei proiectate	43
Figura 2.21 – Variația coeficientului de reflexie cu lungimea elementului radiant, varianta 1	44
Figura 2.22 – Varianta 2 a modelului are un coeficient de reflexie îmbunătățit.....	44
Figura 2.23 Curentul de suprafață pentru cele două antene, reprezentare logaritmică	45
Figura 2.24 – Măsurarea coeficientului de reflexie folosind analizorul de rețea.....	46
Figura 2.25 – Coeficientul de reflexie al antenei în banda 600-1000 MHz.....	47
Figura 2.26 – Impedanța antenei reprezentată pe diagrama Smith în banda 600-1000 MHz.....	47
Figura 3.1 – Configurația plăcuței Raspberry Pi 4 Model B	49
Figura 3.2 – Configurația plăcuței Dragino LoRa / GPS_HAT, Sursă: [31]	50
Figura 3.3 – Configurația plăcuței Arduino Nano, Sursa: [32].....	51
Figura 3.4 – Chip-ul RFM96 împreună cu poziționarea pinilor, Sursa: [33].....	51

Figura 3.5 – Antena miniaturală proiectată în tehnologie PCB	52
Figura 3.6 – Interfața SPI de comunicație.....	53
Figura 3.7 – Gateway LoRa implementat cu Raspberry Pi și Dragino LoRa / GPS_HAT	54
Figura 3.8 – Gateway-ul a fost înregistrat în rețeaua globală TTN	54
Figura 3.9 – Nod LoRa folosit pentru testarea rețelei.....	55
Figura 3.10 – Pachetele transmise de nod au fost primite de serverul TTN	56
Figura 3.11 – Interfața web de înregistrare a datelor primite de gateway	57
Figura 3.12 – Configurația sistemului IoT utilizat.....	57

LISTA TABELELOR

Tabel 1.1 – Raportul de pierdere al pachetelor în funcție de distanță, zone urbane, Sursa: [16].....	24
Tabel 1.2 – Raportul de pierdere al pachetelor în funcție de distanță, zone maritime, Sursa: [16] ...	25
Tabel 2.1 – Compararea parametrilor antenelor proiectate cu alte modele miniaturale.....	45

LISTA ABREVIERILOR

A

ABP	Activation By Personalisation	Activare prin Personalizare
ADR	Adaptive Data Rate	Rată de Date Adaptivă
AES	Advanced Encryption Standard	Standard Avansat de Criptare
AFC	APNet FDTD Code	Cod APNet FDTD
API	Application Program Interface	Interfață Aplicație Program

B

BLE	Bluetooth Low Energy	Bluetooth de Joasă Energie
-----	----------------------	----------------------------

C

CSS	Chirp Spread Spectrum	Spectru Împrăștiat Chirp
CST	Computer Simulated Technology	Tehnologie de Simulare Computerizată

D

DR	Data Rate	Rată de date
----	-----------	--------------

F

FDTD	Finite-Difference Time-Domain	Domeniu Timp cu Diferențe Finite
------	-------------------------------	----------------------------------

G

GPIO	General Purpose Input/Output	Intrare/Ieșire de Scop General
------	------------------------------	--------------------------------

H

HAL	Hardware Abstraction Layer	Nivel de Abstractizare Hardware
-----	----------------------------	---------------------------------

I

IDE	Integrated Development Environment	Mediu Integrat de Dezvoltare
IFA	Inverted-F Antenna	Antenă F-inversat
ILA	Inverted-L Antenna	Antenă L-inversat
ISM	Industrial, Scientific, Medical	Industrial, Științific, Medical
IoT	Internet of Things	Internetul Obiectelor

L

LPWAN	Low Power Wide Area Network	Rețea Extinsă de Putere Mică
LoRa	Long Range	Rază Lungă

LoRaWAN	Long Range Wide Area Network	Rețea Extinsă de Rază Lungă
LoS	Line of Sight	Linie cu Vizibilitate Directă
M		
MAC	Media Access Control	
MIC	Message Integrity Code	Codul Integrității Mesajului
MISO	Master Input Slave Output	
MOSI	Master Output Slave Input	
O		
OSI	Open Systems Interconnection	Interconectarea Sistemelor Deschise
OTAA	Over The Air Activation	Activare pe Calea Aerului
P		
PCB	Printed Circuit Board	Placă cu Cablaj Imprimat
R		
RSSI	Received Signal Strength Indicator	Indicator al Puterii Semnalului Recepționat
S		
SBC	Single Board Computer	
SCLK	Serial Clock	Ceas Serial
SF	Spreading Factor	Factor de Împrăștiere
SMA	SubMiniature version A	
SPI	Serial Peripheral Interface	
SS	Slave Select	
T		
TDMA	Time-Division Multiple Access	Acces Multiplu cu Diviziune în Timp
TTN	The Things Network	Rețeaua Obiectelor

INTRODUCERE

MOTIVAȚIA ALEGERII TEMEI

În contextul actual, în care tehnologiile de tip IoT capătă aplicații în diverse domenii (industrial, medical, organizarea resurselor urbane, etc.), lucrarea de față își propune proiectarea unei antene miniaturale în tehnologie microstrip care să poată fi folosită în banda europeană ISM cu frecvența centrală de 868 MHz [1]. Pentru a pune în evidență utilitatea și caracteristicile antenei, aceasta va fi testată în cadrul protocolului LoRa, într-o aplicație tipică de transmisie la distanță a datelor printr-un canal radio.

Un sistem IoT este extrem de complex, incluzând o diversitate de resurse hardware și software interconectate, de la cele mai simple dispozitive mecanice, până la soluții Big Data. Motivul pentru care acest proiect urmărește dezvoltarea unei componente aparent triviale (antena) din întregul sistem se bazează pe o previziune pe termen mediu-lung: numărul de noduri inteligente echipate cu senzori va crește exponențial în viitor. Cum fiecare din acești senzori va fi echipat cu o antenă pentru comunicații radio, va exista o nevoie importantă de antene miniaturale, eficiente și ieftine.

Chiar dacă antena va fi folosită aici pentru un protocol specific de comunicație, acest lucru nu limitează aplicabilitatea ei la respectivul protocol. Având în vedere că banda de frecvență folosită este nelicențiată, antena va putea fi folosită în viitor și pentru alte protocoale nou apărute. Mai mult decât atât, frecvența aleasă permite un compromis optim între dimensiunile antenei (implicit ale dispozitivului ca întreg), energia necesară transmisiunii și distanța la care se poate face comunicația.

OBIECTIVE GENERALE ȘI METODOLOGIE

Pentru a cuantifica performanța antenei, au fost trasate următoarele obiective:

- Dimensiunile antenei trebuie să fie mult mai mici decât lungimea de undă corespunzătoare frecvenței de 868 MHz (aproximativ 34 cm)
- Modulul coeficientului de reflexie al tensiunii va fi de maxim -6 dB în banda de trecere (863-870 MHz)
- Antena va putea fi folosită într-o aplicație IoT de transmisie a datelor la distanță prin protocolul LoRa

Acești parametri vor fi îndepliniți în programul de simulare numerică electromagnetică CST, urmând ca în urma proiectării fizice să fie măsurat efectiv coeficientul de reflexie cu analizorul de rețea. În urma măsurătorilor, se va putea aprecia dacă obiectivele inițiale propuse au fost îndeplinite parțial sau total.

Pentru a stabili parametrii de interes și a proiecta antena, au fost folosite cunoștințele dobândite la cursul de Antene și Propagare, împreună cu anumite capitole din „Antenna Theory – Analysis and Design” [2] scrisă de Constantine A. Balanis: Capitolul 1 – Introducere, Capitolul 2 – Parametrii

fundamentali ai antenelor, Capitolul 11 – Antene independente de frecvență, miniaturizarea antenelor și antene fractale, Capitolul 14 – Antene microstrip.

Lucrarea este organizată în 3 capitole, astfel:

1. Capitolul 1 descrie succint funcționarea rețelei LoRaWAN și principalii săi parametri de interes.
2. Capitolul 2 stabilește parametri de performanță care vor fi folosiți în proiectare, după care descrie detaliat realizarea a 3 prototipuri de antene, urmând ca în cele din urmă unul din ele să fie ales pentru realizarea fizică.
3. Capitolul 3 este compus din clasificarea componentelor hardware folosite și configurarea acestora pentru crearea unei rețele LoRaWAN. În final, este dezvoltată o aplicație care testează funcționarea rețelei.

CAPITOLUL 1 DESCRIEREA PROTOCOLULUI LORA

1.1 PARAMETRI GENERALI

LoRa este o tehnologie de telecomunicații fără fir care urmărește să transmită date la distanțe mari folosind cât mai puțină energie și să asigure o densitate mare de dispozitive IoT conectate la aceeași rețea [3]. LoRaWAN reprezintă un protocol de comunicație deschis pentru rețele de tip LPWAN care asigură o lățime de bandă foarte limitată (300 bps – 11 kbps), în comparație cu rețelele celulare, WiFi, Nb-IoT sau Bluetooth, dar se adresează unor aplicații care necesită conectarea unor dispozitive la mare distanță și au un mare grad de autonomie (bateriile nodurilor rezistă până la 10 ani).

LoRaWAN este de fapt un protocol de nivel 2 în stiva OSI, făcând legătura între dispozitivele dotate cu senzori și un gateway special conectat la un server care asigură conexiunea la Internet, așa cum se poate observa în *Figura 1.1*. Topologia utilizată este de tip „Star-of-Stars” [4], nodurile nu pot comunica direct între ele (Machine-to-Machine), fiind necesară trecerea tuturor pachetelor prin gateway.

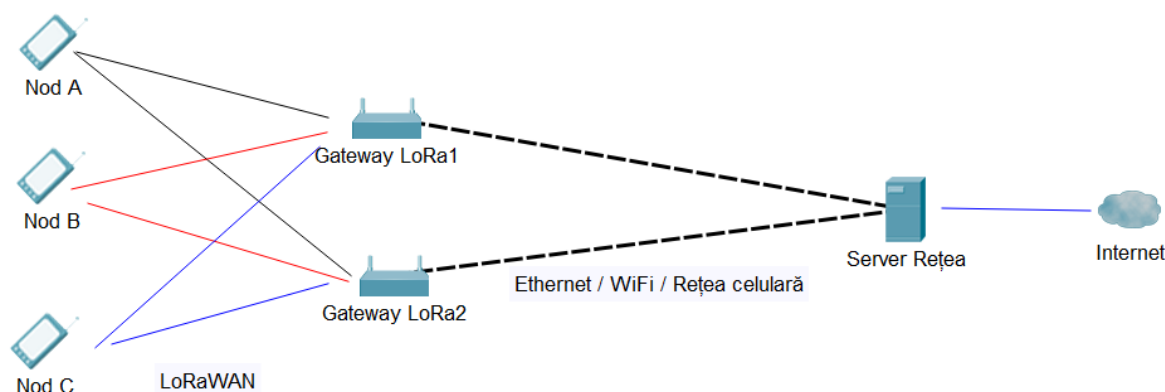


Figura 1.1 – Topologia LoRaWAN

Benzile de frecvență folosite de LoRa sunt benzi ISM care nu necesită licență și au valori diferite ale frecvențelor centrale în funcție de regiune [5], puterea emisă maximă fiind limitată la 25 mW: Europa – 868 sau 433 MHz, SUA – 915 MHz. LoRa poate folosi benzi de 125, 250 sau 500 KHz, în funcție de regiune.

Dimensiunea pachetului este cuprinsă între 51 – 222 biți [5], iar modulația utilizată este una proprietară Semtech bazată pe CSS, o tehnică cu rezistență bună la zgomot deoarece împarte puterea semnalului pe toată banda utilă. Protocolul folosește o variabilă SF care stabilește durata unui chirp – vezi *Figura 1.2*, astfel încât se poate mări distanța de transmitere a datelor în dauna lățimii de bandă. ADR este un mecanism prin care, măsurând puterea semnalului recepționat de la nod, serverul de rețea determină ce SF trebuie folosit pentru a maximiza viteza de transmitere a datelor, asigurându-se în același timp că informația ajunge la dispozitiv [6]. A se vedea *Figura 1.3*, unde axa absciselor reprezintă distanța de la gateway la nod.

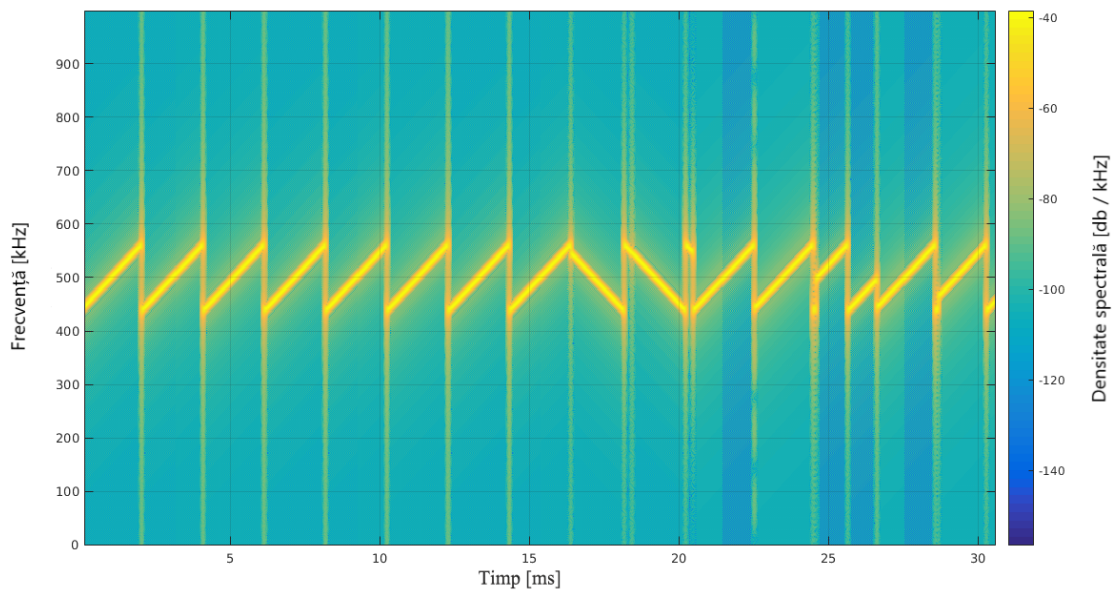


Figura 1.2 – Spectrogramă care evidențiază modulația folosită în LoRa, Sursa: [7]

De asemenea, în *Figura 1.2* primele 7 chirp-uri sunt necesare pentru ca receptorul să fie înștiințat că primește un pachet Lora, următoarele două sunt folosite pentru sincronizare, iar mesajul propriu-zis este codificat în ultimele 5 chirp-uri. Diferite salturi de frecvență sunt utilizate pentru a diferenția simbolurile între ele.

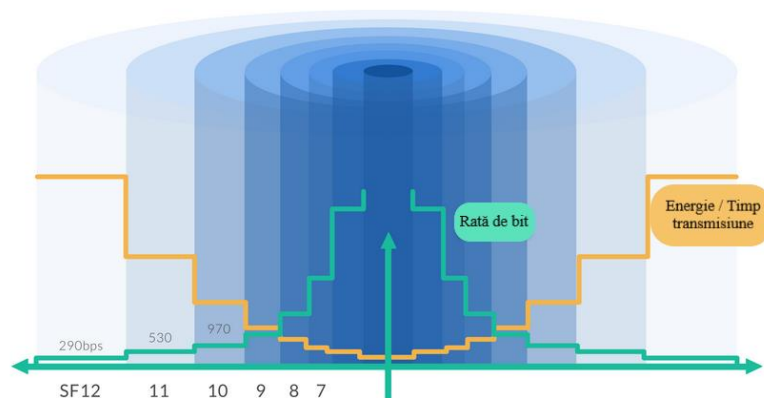


Figura 1.3 – Mecanismul de funcționare ADR, Sursa: [6]

Benzile de frecvență ISM pot fi folosite cu un factor de umplere de 0.1%, 1% sau 10%, în funcție de frecvența benzii, regula reprezentând un standard european; mai mult decât atât, rețelele publice LoRa (The Things Network) permit unui nod să încarce date (legătura ascendentă) pentru maxim 30 de secunde în 24 de ore și să primească de la gateway (legătura descendentă) maxim 10 mesaje în 24 de

ore [8]. Aceste reguli de funcționare permit, cel puțin la nivel teoretic, ca mii de noduri să poată fi conectate la gateway-uri în aceeași arie de funcționare fără ca ele să interfereze.

Cu alte cuvinte, ADR folosește factorul de împrăștiere SF pentru a controla debitul transmisiei și distanța maximă la care aceasta poate avea loc. De exemplu, dacă nodul se află în apropierea gateway-ului și interferențele sunt mici, se poate folosi valoarea $SF = 7$, lucru care scade timpul necesar transmisiunii și mărește debitul de date. În caz că nodul se află la mare distanță de gateway, atunci va primi o cerere de mărire a valorii SF, astfel încât conexiunea să persiste. Acest mecanism permite un compromis optim între consumul de energie și rata de pierdere a pachetelor, fiind unul dintre motivele care face diferența între o rețea WAN clasică și o rețea LPWAN, în care autonomia îndelungată a nodurilor joacă un rol crucial.

1.2 CLASE DE FUNCȚIONARE

Nodurile LoRa sunt clasificate în 3 clase de funcționare [9], după cum urmează:

Clasa A reprezintă cel mai simplu mod de funcționare și este necesar ca toate nodurile din rețea să-l poată implementa. Este potrivit pentru senzorii care trimit mesaje planificat, cum ar fi nivelul apei dintr-un rezervor, la fiecare 10 minute, sau pentru nodurile care trimit pachete atunci când o anumită condiție este îndeplinită – de exemplu, temperatura ambientală a scăzut sub un anumit prag.

După ce nodul trimite un pachet pe legătura ascendentă, acesta așteaptă să primească un mesaj pe legătura descendentă timp de două sloturi de timp, așa cum se poate observa în *Figura 1.4*. Este posibil ca în cele două ferestre de recepție nodul să primească un mesaj care nu îi este adresat, însă poate să stabilească acest lucru doar după ce demodulează mesajul primit de la gateway și verifică câmpul MIC.

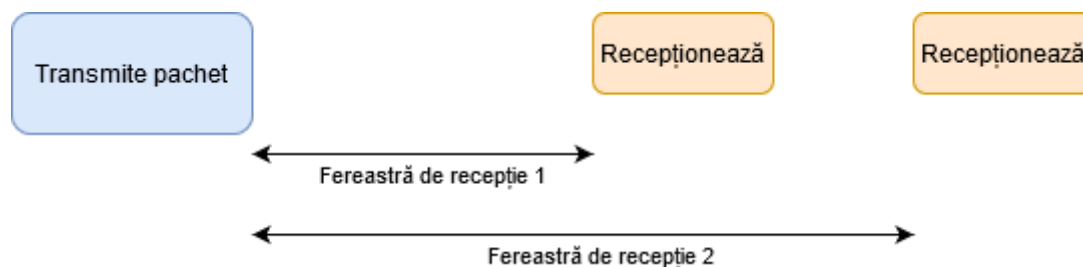


Figura 1.4 – Sincronizarea transmisie-recepție din perspectiva nodului

Clasa B include nodurile care au nevoie de mai multe ferestre de recepție decât cele din clasa anterioară. Aceste sloturi în care senzorul primește mesaje pe legătura descendentă sunt programate în timp, iar sincronizarea este posibilă datorită pachetelor complementare schimbate între nod și gateway la intervale periodice de timp.

Așa cum se poate observa în

Figura 1.5, modul de funcționare al clasei B îl include pe cel din clasa A, doar că adaugă mai multe sloturi de timp în care nodul poate recepționa mesaje.

Clasa C oferă posibilitatea nodurilor de a se afla în stare de recepție tot timpul, atât timp cât nu transmit date către gateway. Chiar dacă utilizarea lui este cea mai facilă, acest tip de funcționare este cel mai consumator de energie, reducând semnificativ durata de viață a bateriei senzorului.

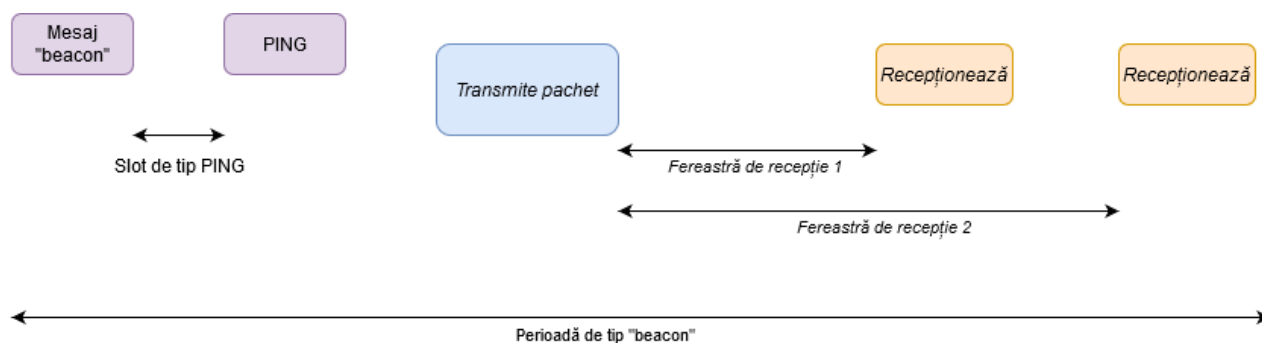


Figura 1.5 – Exemplificare a clasei B de funcționare

1.3 SECURITATE

Una dintre cele mai dificile probleme ale unui sistem IoT este securitatea transmiterii datelor. Densitatea mare a dispozitivelor și cantitatea enormă a datelor agregate ridică și mai multe bariere atunci când vine vorba de respectarea unor standarde minime care să asigure confidențialitatea informațiilor. La acest lucru se adaugă faptul că puterea limitată de procesare a nodurilor și cerințele impuse de autonomie în cadrul unei rețele LPWAN nu permit folosirea unor tehnici de criptare prea avansate.

S-ar putea argumenta că mesajele transmise de nodurile unei rețele de senzori sunt triviale, însă acest lucru nu scade importanța asigurării securității. Având în vedere că aceste sisteme vor fi utilizate în contexte critice (mașini autonome, monitorizări industriale, etc.) și că au rol direct în automatizarea deciziilor, securitatea rămâne o cerință fundamentală. În acest sens, trebuie asigurate 3 proprietăți ale comunicației sigure:

- ✓ Autentificarea – serverul aplicației verifică dacă mesajul primit provine de la un dispozitiv cunoscut
- ✓ Integritatea – pachetul primit trebuie să fie nealterat, altfel este ignorat
- ✓ Confidențialitatea – datele transmise trebuie să fie inaccesibile unui atacator care interceptează mesajele

Cele 3 proprietăți enumerate mai sus sunt implementate efectiv prin 4 chei criptografice, algoritmul AES 128-bit și un tip particular de generare și schimb al cheilor [10].

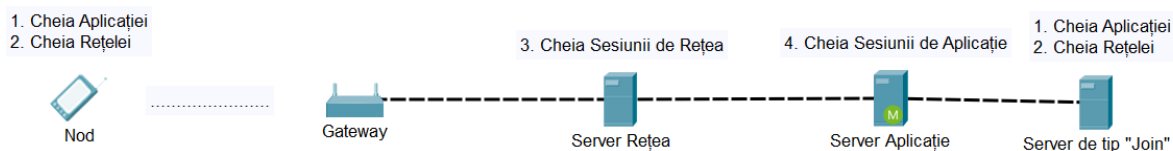


Figura 1.6 – Partiționarea cheilor în LoRaWAN

În Figura 1.6 este reprezentat felul în care partiționarea celor 4 tipuri de chei ar trebui să asigure un grad ridicat de securitate. În practică însă, din comoditate (pentru a facilita citirea pachetelor și a scădea costurile), cele 3 servere – rețea, aplicație și de tip „Join” – sunt rulate pe aceeași platformă hardware. Dacă un atacator reușește să acceseze acest punct al sistemului, întreaga securitate este compromisă.

Pentru a putea detalia felul în care este asigurată securitatea într-o rețea LoRaWAN, este necesară o scurtă descriere a celor două tipuri de introducere a unor noi noduri într-o rețea preexistentă: activare prin personalizare (ABP) și activare pe calea aerului (OTAA). Modul ABP este facil, cheia aplicației și a rețelei fiind scrise direct în codul rulat de microcontroller-ul nodului, neputând fi schimbate în timp. În cazul OTAA, cheile sunt generate dinamic la începutul fiecărei sesiuni de comunicație dintre nod și gateway, lucru care îmbunătățește semnificativ securitatea întregului sistem. Principalul dezavantaj OTAA este că produce trafic suplimentar în rețea deoarece are nevoie să primească o confirmare de la gateway la inițializarea fiecărei sesiuni (a cărei durată este decisă arbitrar de către dezvoltator în codul rulat de nod). Chiar și așa, modul ABP nu ar trebui să fie folosit decât în perioada de testare a sistemului, OTAA fiind soluția semnificativ mai sigură.

În plus, creatorii LoRa recomandă folosirea unui modul hardware protejat la atacurile de tip „forță brută” [11]. Dacă pur și simplu se stochează codul rulat de nod într-o memorie flash, un atacator cu acces fizic la acesta poate afla cu ușurință cheile de criptare. De asemenea, în cazul aplicațiilor de importanță critică, se poate adăuga un nivel suplimentar de securitate la nivel software: de exemplu, se poate folosi criptarea asimetrică pentru a îmbunătăți securitatea sistemului.

1.4 SCENARII DE UTILIZARE ȘI LIMITĂRI

Una dintre principalele provocări întâmpinate la proiectarea unui sistem IoT este alegerea optimă a protocolului de comunicație care să asigure transportul datelor. În momentul de față există o multitudine de tehnologii LPWAN (SigFox, NB-IoT, Ingenu, etc.) destinate platformelor IoT. Compararea acestora în funcție de factori cuantificabili depășește scopul acestei lucrări, însă au fost făcute diverse studii [12] [13] [14] care încearcă să clasifice tehnologiile folosind atât parametri tehnici de performanță, dar și alte variabile, cum ar fi costul de producție al nodurilor și infrastructura deja existentă.

1.4.1 Măsurători ale distanței la care protocolul este utilizabil

Un important avantaj al rețelei LoRaWAN este că asigură, cel puțin teoretic, comunicația la distanțe de 2–5 km în spații urbane și chiar depășește 10 km în zona rurală, unde zgomotul este mult mai scăzut și fenomene dăunătoare cum ar fi propagarea multicală sunt diminuate datorită reliefului și lipsei clădirilor. Recordul absolut de distanță obținut cu protocolul LoRa este de 766 km [15]. Valoarea a fost înregistrată în cadrul unui proiect care implica folosirea de baloane meteorologice. Condițiile fizice favorabile au permis atingerea acestei distanțe care se apropie de valoarea maximă posibilă, folosind o putere de transmisie de 25 mW. Pachetul recepționat de un gateway din Grenoble (Franța) de la nodul aflat în Iriza (Spania) a fost transmis cu un factor de împrăștiere $SF = 11$ și conținea următoarele date:

- **Moment de timp:** 2019-07-13 19:31:23
- **Nod:** servet4high
- **Recepționat de :** cea-chamrousse-gateway
- **Acuratețea locației:** 0.00
- **RSSI:** -120 dBm
- **RSZ:** -14.25 dB
- **DR :** SF11BW125

- **Distanță:** 766231 m
- **Altitudine:** 24859 m

Este evident că o asemenea distanță de transmisiune excepțională poate fi obținută doar în cazuri foarte specifice, a se observa faptul că altitudinea nodului era de aproximativ 25 km, deci era posibilă o legătură LoS între senzor și gateway, neobstrucționată de obiecte. În cazuri obișnuite de utilizare o asemenea valoare nu poate fi reprodusă, deci nu este relevantă, însă recordul de distanță evidențiază limitele tehnologice ale modulației utilizate și robustețea acesteia la zgomot și interferențe.

În [16] au fost efectuate măsurători ale distanței efective de utilizare folosind un gateway cu antenă omnidirecțională având un câștig de 2 dBi, montat la 24 m față de nivelul mării. Nodul era echipat cu un circuit Semtech SX1272 și o antenă în formă de F realizată în tehnologie microstrip. Pentru a facilita obținerea unei distanțe cât mai mari s-a folosit factorul de împrăștiere $SF = 12$ care are o rată de transmisie de doar 293 bps, dar care asigură o sensibilitate a receptorului de -137 dB. Folosind ecuația Friis (Ecuația 1.1), se poate estima că, folosind o putere de transmisie de 14 dBm (regulațiile europene nu permit mai mult în banda ISM de 868 MHz), valoarea distanței maxime atinge câteva sute de kilometri.

$$P_r = P_t + D_t + D_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)$$

Ecuația 1.1 – Relația Friis permite calcularea distanței maxime de transmisiune în spațiul liber

Evident că în situații practice, raza de acțiune este mult mai mică, așa cum se poate observa în *Tabel 1.1* și *Tabel 1.2*. Testele din cele două tabele au fost făcute în zone urbane, folosind o mașină dotată cu un nod LoRa, respectiv zone maritime. Datorită interferențelor și propagării multicale din zona urbană, distanța efectivă în care protocolul poate fi folosit scade semnificativ în orașe. Merită menționat și faptul că măsurătorile verifică robustețea teoretică a modulației CSS la propagarea multicale și efectul Doppler (mașina a atins viteze de până la 100 km/h).

Având în vedere rezultatele măsurătorilor, se poate concluziona că protocolul LoRa asigură o rază relativ mare de comunicație între noduri și gateway, în comparație cu tehnologiile care folosesc frecvențe mai mari și alte tipuri de modulație.

Distanță [km]	Pachete transmise	Pachete primite	Raport de pierdere al pachetelor
0-2	894	788	12 %
2-5	1215	1030	15 %
5-10	3898	2625	33 %
10-15	932	238	74 %
Total	6813	4506	43 %

Tabel 1.1 – Raportul de pierdere al pachetelor în funcție de distanță, zone urbane, Sursa: [16]

Distanță [km]	Pachete transmise	Pachete primite	Raport de pierdere al pachetelor
5-15	2998	2076	31 %
15-30	690	430	38 %
Total	3688	2506	32 %

Tabel 1.2 – Raportul de pierdere al pachetelor în funcție de distanță, zone maritime, Sursa: [16]

1.4.2 Densitatea dispozitivelor

Atunci când a fost dezvoltat, s-a urmărit ca protocolul LoRa să fie cât mai simplu pentru a reduce costurile de producție ale nodurilor. Astfel, în afară de diviziunea în frecvență pe 9 canale și ortogonalitatea asigurată de factori de împrăștiere SF diferiți, protocolul nu beneficiază de tehnici mai avansate de acces multiplu (de exemplu, TDMA). LoRa este bazat pe principiul de utilizare al protocolului ALOHA fără ferestre temporale, deci este foarte predispus la coliziuni odată ce densitatea nodurilor crește.

Pentru a preveni acest lucru, dezvoltatorii au impus limite stricte de utilizare a timpului de transmisie alocat fiecărui nod. Senzorul poate transmite maxim 30 de secunde cumulat în 24 de ore și poate primi maxim 10 pachete de date pe calea descendentă într-o zi [17]. Mai mult decât atât, legislația europeană impune un factor de umplere de 0.1%, 1% sau 10% [18] în funcție de canalele LoRa aflate în banda ISM de frecvență 863–870 MHz. Se pune problema dacă aceste limite impuse de reducere a debitului transmisiunii sunt suficiente dacă densitatea dispozitivelor crește peste un anumit nivel, așa cum este de așteptat într-un sistem IoT.

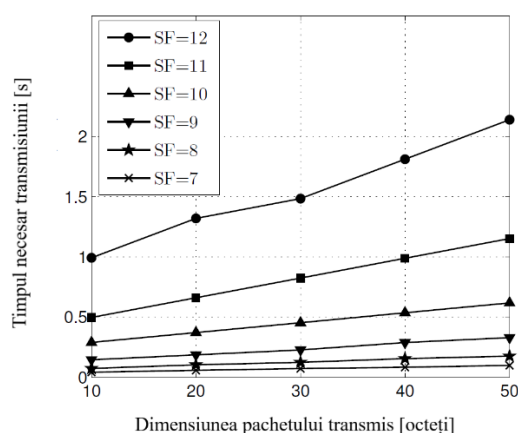


Figura 1.7 – Timpul necesar transmisiunii prin aer în funcție de dimensiunea pachetului, Sursa: [14]

În Figura 1.7 se poate observa că timpul necesar transmisiunii prin aer crește semnificativ odată cu mărirea pachetului de date. Acest lucru relevă importanța compromisului care trebuie făcut între distanța maximă de transmisie, debitul de date atins (ambele controlate prin factorul de împrăștiere SF) și dimensiunea pachetelor transmise în funcție de cerințele aplicației, astfel încât să fie în același timp respectate normele enumerate mai sus. Mecanismul ADR, împreună cu un algoritm eficient implementat pe microcontroller-ul nodului LoRa, asigură optimizarea sistemului în acest sens.

Teoretic, un singur gateway ar trebui să fie capabil să deservească o rețea formată din mii de noduri [19]. În realitate, însă, nu există o rețea de o asemenea complexitate care să verifice ipotezele formulate prin măsurători. Chiar și așa, se pare că evitarea coliziunilor și respectarea normelor de

transmisiune limitează drastic numărul nodurilor conectate într-o anumită rețea, așa cum se poate observa în *Figura 1.8*.

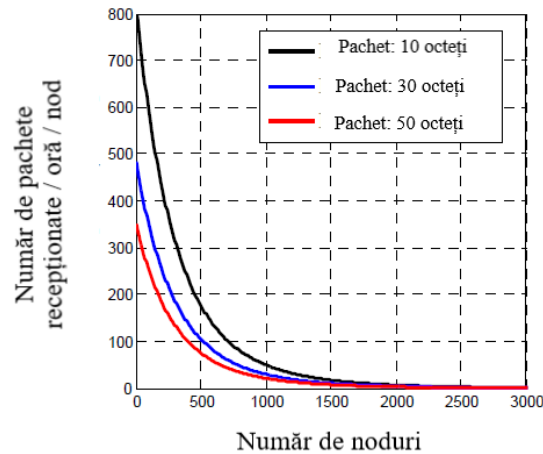


Figura 1.8 – Traficul rețelei LoRaWAN în funcție de numărul de noduri, Sursa: [14]

Un model simplist care evidențiază problemele generate de o mare densitate a nodurilor și coliziuni este o analogie cu protocolul ALOHA. Practic, LoRaWAN poate fi concepută ca o superpoziție de rețele ALOHA independente [14], fiecare canal și fiecare factor de împrăștiere SF reprezentând o rețea separată. Coliziunile apar atunci când două noduri încearcă să transmită simultan folosind același canal și același SF.

1.4.3 Scenarii de utilizare

Odată ce au fost stabilite principalele caracteristici ale protocolului, avantajele, dar și limitările acestuia, este posibilă enumerarea câtorva scenarii de utilizare, dar și motivul pentru care acestea pot sau nu folosi cu succes LoRaWAN.

A. Geolocalizare

LoRaWAN oferă posibilitatea localizării geografice a senzorilor prin triangulație. Folosind timpul necesar propagării unui pachet recepționat de cel puțin 3 gateway-uri, se poate estima precizia unui nod cu o precizie de zeci sau sute de metri în funcție de zona (urbană / rurală) în care se află nodul. În [20] este prezentată o aplicație de localizare a unei populații de rinoceri. În cazul respectiv braconierii foloseau sisteme care blocau semnalul GPS, așa că o soluție alternativă ca LoRa a putut fi implementată, oferind și costuri mai scăzute, iar rezultatele fiind satisfăcătoare. Cu doar 4 gateway-uri a fost acoperită o suprafață de 50 km², mediana erorii de localizare fiind de ordinul zecilor de metri.

B. Monitorizare în timp real

Pentru aplicații în care se cere latență redusă, de ordinul milisecundelor, și comunicație frecventă (volum mare de date transmise), este evident că LoRa nu reprezintă o soluție fezabilă datorită lărimii reduse de bandă și limitărilor impuse de utilizarea unei benzi de frecvență nelicențiate. În asemenea cazuri se pot folosi tehnologii LPWAN alternative, cum ar fi NB-IoT [13].

C. Aplicații cu necesități asincrone de comunicație

LoRa se poate folosi cu succes în aplicații de tip „smart city”, pentru organizarea resurselor limitate din orașe, cum ar fi semnalizarea locurilor libere de parcare și controlul inteligent al iluminării. Aceste cazuri acceptă întârzieri ale transmiterii datelor, iar pachetele necesită transmisie asincronă, în momentul îndeplinirii anumitor condiții. Astfel, se justifică folosirea LoRa pentru a reduce costurile și a asigura în același timp o bună funcționare a sistemului proiectat.

CAPITOLUL 2 PROIECTAREA ANTENEI MICROSTRIP PRIN SIMULARE NUMERICĂ

Înainte de proiectarea propriu-zisă și detalierea etapelor parcurse în cadrul simulării numerice, este necesară o clasificare sintetică a principalelor tipuri de antene, împreună cu parametrii fundamentali care determină performanța unei antene. Astfel, se va putea decide în mod obiectiv ce tip de antenă este potrivită pentru nodurile din rețeaua LoRaWAN.

În *Figura 2.1* – Circuitul Thévenin echivalent al unei antene este prezentat un model simplificat al unei antene care ține cont de următorii parametri:

- R_p – rezistența care modelează pierderile antenei sub forma disipării de căldură
- R_r – rezistența de radiație a antenei cuantifică ce parte din puterea trimisă de generator este radiată în spațiul liber
- X_a – reactanța antenei variază cu frecvența și este nulă la frecvența de rezonanță

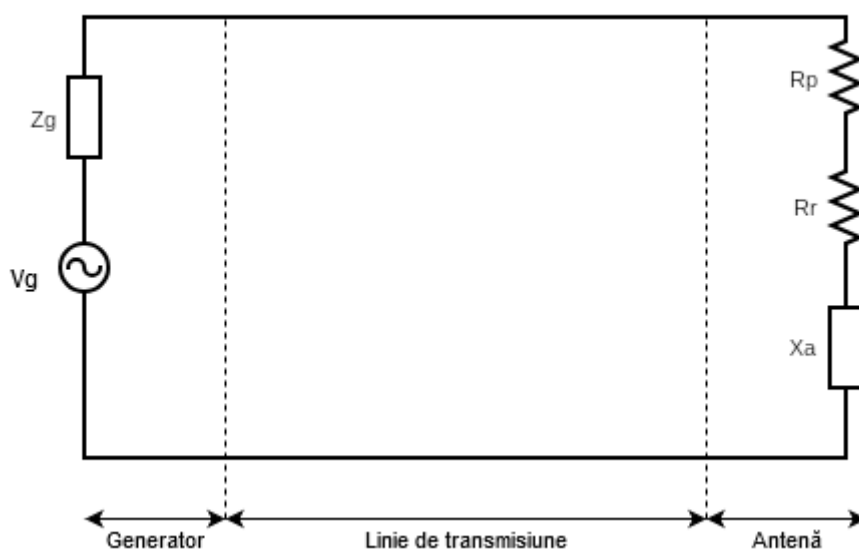


Figura 2.1 – Circuitul Thévenin echivalent al unei antene în regim de transmisie

Impedanța antenei este:

$$Z_A = R_r + R_p + jX_a$$

2.1 CLASIFICAREA ANTENELOR

Antena poate fi considerată un adaptor de impedanță care asigură legatura între două medii de propagare pentru undele electromagnetice: aerul și circuitul (indiferent dacă este compus din ghiduri de undă, cabluri coaxiale, etc.). În continuare sunt prezentate tipurile principale de antene clasificate în funcție de structura lor [21] :

- **Antene filare** – monopol, dipol, colineară, helix, buclă, etc. Acestea sunt cele mai uzuale antene datorită structurii lor simple și a proiectării facile.
- **Antene cu apertură** – sunt folosite la frecvențe înalte fiind conectate la ghiduri de undă metalice.
- **Antene microstrip** – sunt fabricate în tehnologie PCB, fiind formate din planul de masă, substrat dielectric și element radiativ metalic. Au două avantaje substanțiale: sunt ușor de miniaturizat și fabricarea este ieftină.
- **Antene cu reflector** – au aplicații în comunicații la mare distanță, cum ar fi cele satelitare, datorită faptului că au directivitate mare care permite recepționarea cu succes a semnalelor de nivel mic.
- **Antene tip lentilă** – sunt fabricate din material dielectric și permit concentrarea undelor radio într-o anumită direcție, reducând împrăștierea acestora.

2.2 PARAMETRII DE PERFORMANȚĂ AI ANTENELOR

Pentru a cuantifica și adapta performanța antenei proiectate pentru transmiterea datelor folosind modulația LoRa este necesară definirea parametrilor fundamentali. Această clasificare nu este exhaustivă, scopul ei fiind să faciliteze luarea de decizii în ce privește designul antenei proiectate.

2.2.1 Impedanța de intrare și coeficientul de reflexie al tensiunii

În secțiunea 2.1 a fost prezentat modelul simplificat al unei antene. Impedanța de intrare a antenei, definită ca raportul dintre tensiune și curent la bornele acesteia, este utilă în adaptarea la circuitul de alimentare și la calculul coeficientului de reflexie al tensiunii (raportul dintre amplitudinea undei reflectate și cea a undei incidente) cu următoarea formulă:

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_C}{Z_A + Z_C}$$

- Z_A – impedanța de intrare a antenei
- Z_C – impedanța caracteristică a circuitului de alimentare

Coeficientul de reflexie al puterii este:

$$\Gamma_P = |\Gamma|^2$$

Impedanța de intrare a antenei este funcție de frecvență. Banda de frecvență în care lucrează antena poate fi definită în funcție de o valoare limită corespunzătoare coeficientului de reflexie al tensiunii. De exemplu, pentru un modul al coeficientului de reflexie al tensiunii egal cu -6 dB, un sfert din puterea activă de la intrarea a antenei va fi reflectată înapoi în generator, iar celelalte 3 sferturi din valoarea puterii va fi radiată sau disipată sub formă de căldură.

O observație importantă este aceea că, în cazul în care se respectă condiția de transfer maxim al puterii de la generator la antenă – impedanța generatorului este egală cu impedanța conjugată a antenei – jumătate din puterea generatorului este disipată sub formă de căldură în rezistența internă a acestuia, cealaltă jumătate fiind radiată de antenă în spațiul liber sau disipată sub formă de căldură. Deoarece în cazul de față este folosită o putere de transmisiune mică (până la 25 mW), nu este necesar un mecanism special care să asigure disiparea optimă a căldurii din rezistența internă a generatorului, așa cum se întâmplă la antenele de putere mare.

Un alt parametru în strânsă legătură cu impedanța antenei și coeficientul de reflexie al tensiunii este raportul de undă staționară. Definit ca raportul dintre valoarea maximă a unei staționare și valoarea minimă a acesteia, acest parametru reprezintă un indicator intuitiv și totodată exact al adaptării dintre antenă și circuitul de alimentare pentru o anumită frecvență. Poate fi calculat astfel:

$$\sigma = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

În mod ideal, atunci când antena este perfect adaptată, coeficientul de reflexie al tensiunii este nul, iar raportul de undă staționară unitar.

2.2.2 Directivitatea

Directivitatea este definită ca „raportul dintre intensitatea radiației într-o anumită direcție și media intensității radiației în toate direcțiile” [22]. Matematic, acest lucru poate fi exprimat prin formula:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

- D – directivitatea
- U – intensitatea radiației
- U_0 – intensitatea radiației antenei izotrope
- P_{rad} – puterea totală radiată

Într-un sistem de comunicații mobile, cum este LoRaWAN, în care cel puțin unul din terminale se poate afla în mișcare, este important ca antenele folosite de noduri și gateway-uri să fie omnidirecționale. În acest fel, semnalul poate fi transmis și recepționat optim indiferent de poziția nodurilor la un moment dat.

2.2.3 Eficiența totală

Pierderile de putere se datorează în principal următoarelor fenomene [23]:

- dezadaptare între impedanța antenei și circuitul de alimentare (coeficient de reflexie al tensiunii nenul)
- conductivitatea finită a metalului din care este confecționată antena
- conductivitatea nenulă a dielectricului din componența antenei

Eficiența totală a unei antene ia în calcul toate aceste pierderi, fiind un parametru critic ce modelează performanța unei antene în cazul sistemelor IoT, unde autonomia îndelungată este una din principalele preocupări ale oricărui dezvoltator. Eficiența totală este ușor de definit (1), dar dificil de măsurat, necesitând o cameră ecranată electromagnetic și anecoidă.

$$\eta_{tot} = \eta_{rad}(1 - |\Gamma|^2) \quad (1)$$

ν_{tot} = eficiența totală

ν_{rad} = eficiența radiației (subunitară datorită pierderilor în metal și dielectric)

Γ = coeficientul de reflexie al tensiunii

2.2.4 Câștigul

Matematic, câștigul unei antene poate fi definit în funcție de intensitatea radiației, dar în practică este mai util de folosit legătura liniară dintre câștig și eficiența radiației:

$$G = \nu_{\text{rad}} D$$

Se observă că parametrul câștig este în strânsă legătură cu directivitatea, singura diferență fiind că în calculul câștigului se iau în considerare și pierderile cauzate de materialele reale.

Este important de menționat că atât câștigul, cât și directivitatea sunt funcții de două variabile: azimut și elevație. În practică însă (inclusiv în această lucrare), de cele mai multe ori se folosesc termenii de „câștig” și „directivitate” pentru a desemna „câștigul maxim”, respectiv „directivitatea maximă”.

2.3 PRINCIPIUL SIMULĂRII NUMERICE

Folosirea formulelor matematice pentru determinarea parametrilor este utilă doar în cazul în care structura antenei este simplă (monopol, dipol). Atunci când este necesară analiza unei antene cu o structură complexă, metoda analitică devine dificilă, așa că se preferă utilizarea unor simulatoare numerice care aproximează bine comportamentul real al antenei studiate. În cadrul lucrării de față au fost folosite două astfel de programe: AFC și CST.

Metoda **FDTD** este o tehnică de analiză numerică inventată în 1934 de matematicianul Kane S. Yee [24], cu mult înainte de inventarea tranzistorului, într-o vreme când puterea de calcul era mult limitată față de standardul din prezent. Avantajul particular al metodei este că folosește domeniul timp pentru calcul, deci poate acoperi o bandă largă de frecvență într-o sigură simulare.

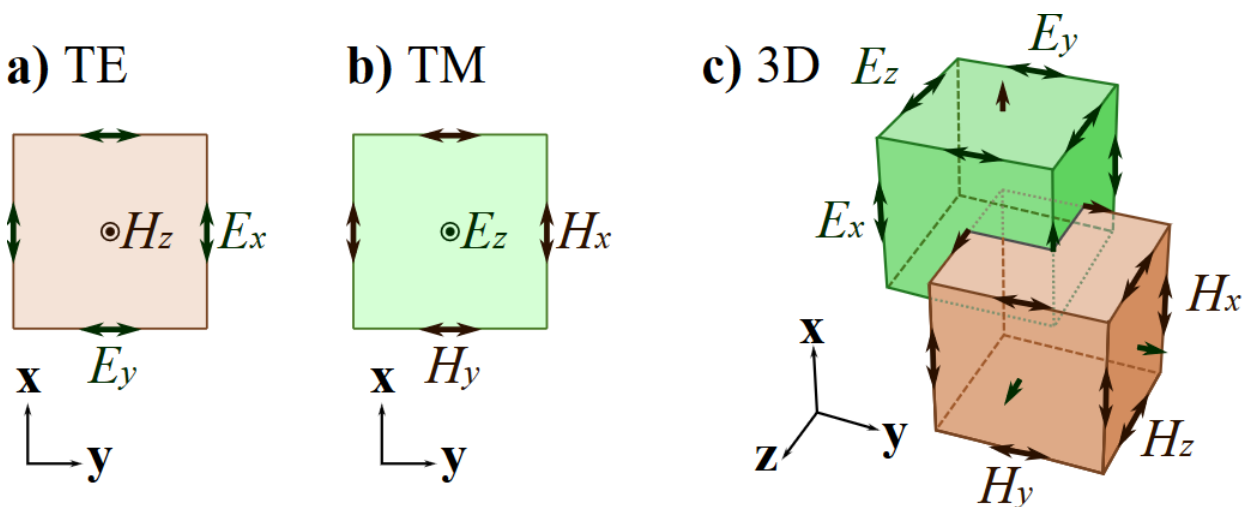


Figura 2.2 – Ilustrare a unei celule FDTD de tip Yee, împreună cu vectorii \mathbf{H} și \mathbf{E} , Sursa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FDTD_Yee_grid_2d-3d.svg

Folosind un aparat matematic a cărei descriere și înțelegere depășește (cu mult) scopul prezentei lucrări, metoda rezolvă ecuațiile lui Maxwell în formă diferențială, calculând valoarea intensității câmpului electric \mathbf{E} într-o anumită celulă din spațiu la un moment de timp. Apoi, intensitatea câmpului magnetic \mathbf{H} din aceeași celulă spațială este calculată pentru următorul moment de timp, ș.a.m.d. Procesul este repetat până când se atinge condiția necesară de terminare a simulării, de pildă energia totală din volumul simulat scade sub un anumit prag stabilit a priori.

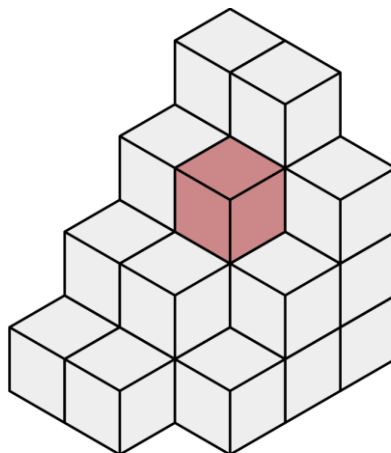


Figura 2.3 – Structura folosită la simularea numerică, Sursa: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Voxels.svg>

Pentru ca această metodă să ofere rezultate corecte, este necesar ca dimensiunea celulei să fie mult mai mică decât lungimea de undă corespunzătoare frecvenței folosite în simulare [24]. De asemenea, se obține un compromis între timpul necesar simulării și acuratețea acesteia modificând condiția de terminare a simulării în funcție de cantitatea de energie rămasă în domeniul simulat. De exemplu, odată ce energia scade sub -40 dB, comparativ cu energia inițială, se consideră că simularea poate fi oprită. O valoare prea mică a pragului de energie provoacă timp mare de simulare, în timp ce o valoare prea mare conduce la rezultate eronate.

2.4 ALEGEREA TIPULUI POTRIVIT DE ANTENĂ

Ținând cont de clasificarea tipurilor de antene și definirea parametrilor acestora în secțiunile anterioare, poate fi luată o decizie cu privire la designul antenei proiectate. În Europa, frecvența centrală folosită de LoRa este de 868 MHz, așa că o antenă clasică de tip dipol va avea o lungime aproximativă de 17 cm, iar un monopol în jur de 8,6 cm. Este important de observat că antena monopol poate fi eficient folosită doar dacă se află pe un plan de masă cu dimensiunea comparabilă cu 2 lungimi de undă. Având în vedere că se dorește proiectarea unei antene cu dimensiuni mult mai mici decât lungimea de undă $\lambda \cong 34$ cm corespunzătoare frecvenței de 868 MHz, este necesară folosirea tehnologiei microstrip care facilitează miniaturizarea.

În continuare, având în vedere că banda de frecvență utilizată este îngustă, există două posibilități: antenă microstrip de tip „patch” sau antenă F-inversat. Dimensiunile acestora sunt prezentate în Figura 2.4 și Figura 2.5. În cazul celei din urmă dimensiunile rezultă direct din lungimea de undă corespunzătoare frecvenței de rezonanță. La frecvența de 868 MHz, elementul radiant va avea aproximativ 8,6 cm. În ce privește dimensiunile L și W ale antenei „patch”, acestea se calculează cu următoarele formule deduse experimental:

$$W = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}f}$$

$$L = \frac{c_0}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

c_0 – viteza luminii în vid

ϵ_r – permitivitatea electrică relativă a substratului dielectric

f – frecvența de rezonanță a antenei

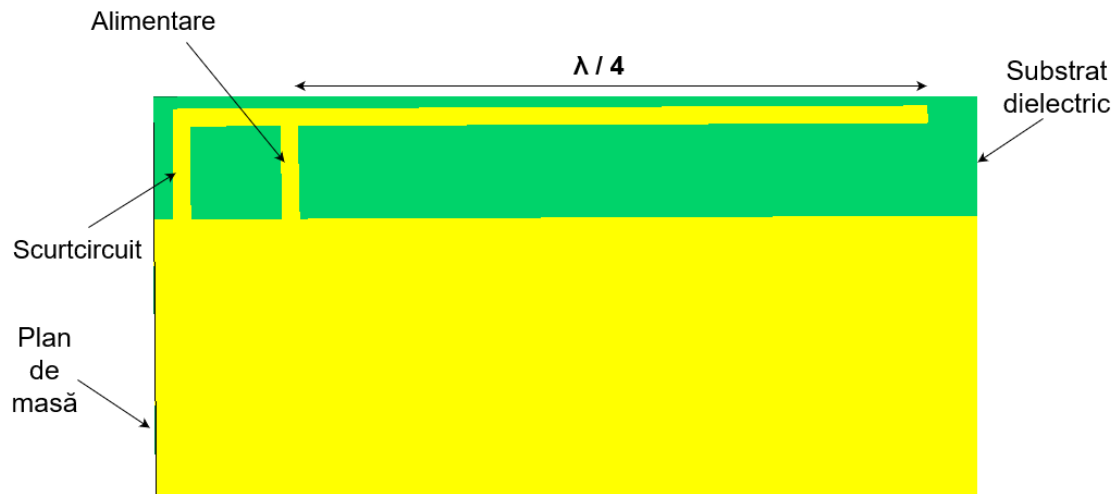


Figura 2.4 – Structura antenei F-inversat

La frecvența de lucru, dimensiunile L și W vor avea aproximativ 8,2 cm, respectiv 10 cm. Planul de masă al antenei „patch” va trebui evident să fie mare mare decât L și W, așa cum se poate observa în Figura 2.5. Avantajul major al antenei F-inversat este că elementul radiant poate fi șerpuit astfel încât să ocupe mai puțin spațiu, lucru care nu este posibil în cazul antenei „patch”. Un alt argument important în favoarea modelului F-inversat este proprietatea sa de a fi omnidirecțional. Antena „patch” este directivă, lobul principal fiind situat perpendicular pe planul de masă, sub care nu există energie radiată. Fiind vorba despre terminalul mobil al unui sistem de comunicații, este preferabilă folosirea unei antene omnidirecționale.

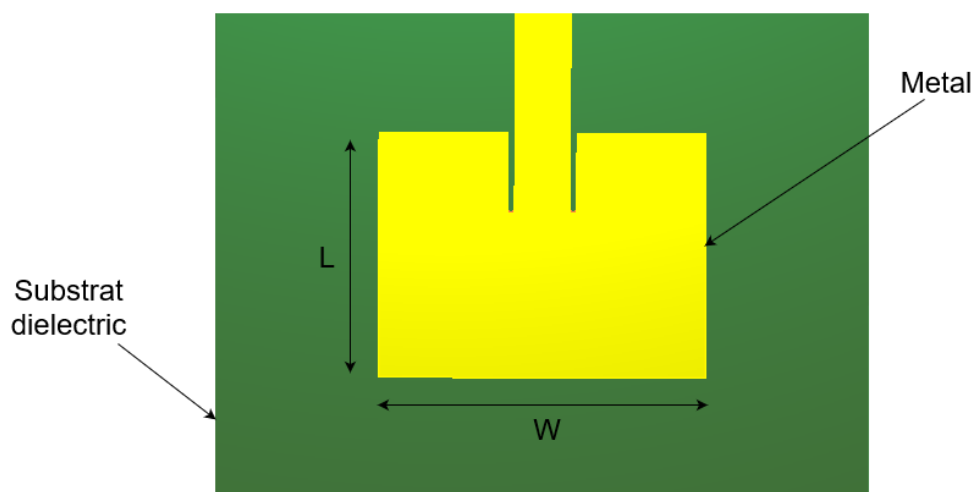


Figura 2.5 – Structura antenei de tip "patch"

Deoarece antena F-inversat prezintă proprietăți mai bune de miniaturizare, am ales acest model pentru a proiecta prototipul. Odată ce o versiune inițială a antenei are performanțe îndeajuns de bune în ce privește coeficientul de reflexie al tensiunii în banda de frecvență 863-870 MHz și eficiența totală, atunci se poate trece într-o etapă ulterioară, în care se va încerca miniaturizarea antenei, dar cu păstrarea (cel puțin parțială) a proprietăților inițiale.

Metodologia folosită este simplă, dar eficientă și poate fi rezumată prin diagrama din Figura 2.6. Prin iterații multiple se ajunge în cele din urmă la o versiune de antenă care satisface cerințele impuse inițial. Partea dificilă constă în identificarea elementelor antenei care pot fi ajustate în bucla de feedback astfel încât să fie optimizată impedanța de intrare și frecvența de rezonanță.

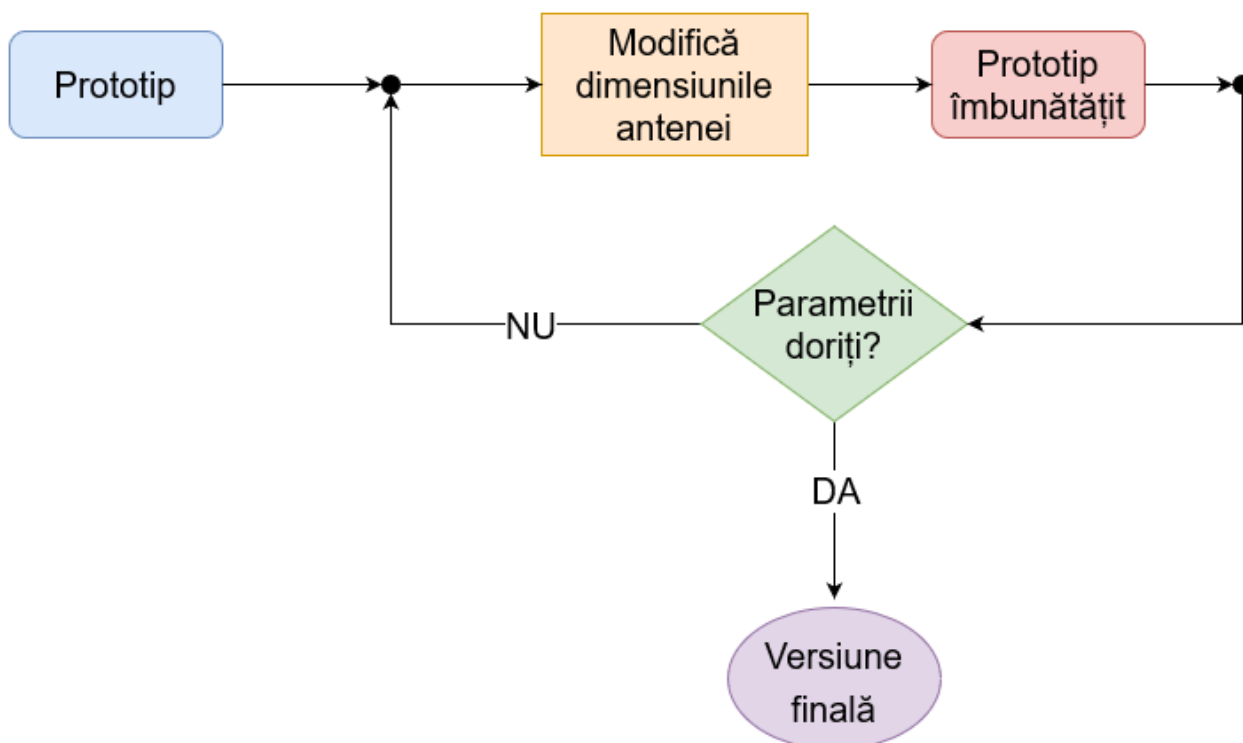


Figura 2.6 – Principiul iterativ de proiectare al antenei

2.5 SIMULAREA NUMERICĂ A PROTOTIPULUI ÎNĂL ÎN AFC

Am folosit ca punct de plecare antena LoRa propusă de Trinh et al. în [25]. Elementul radiant măsoară $0.06 \lambda \times 0.1 \lambda$ la frecvența de 868 Mhz, fiind fabricat în tehnologie PCB pe un substrat din FR-4 de dimensiuni $34 \times 80 \times 0.8$ mm. În ce privește miniaturizarea, atunci când se compară dimensiunile antenei cu lungimea de undă, se iau în considerare doar mărimile elementului radiant deoarece planul de masă este folosit pentru plasarea componentelor integrate (microcontroller, modul LoRa, senzori, etc.), deci spațiul nu este irosit.

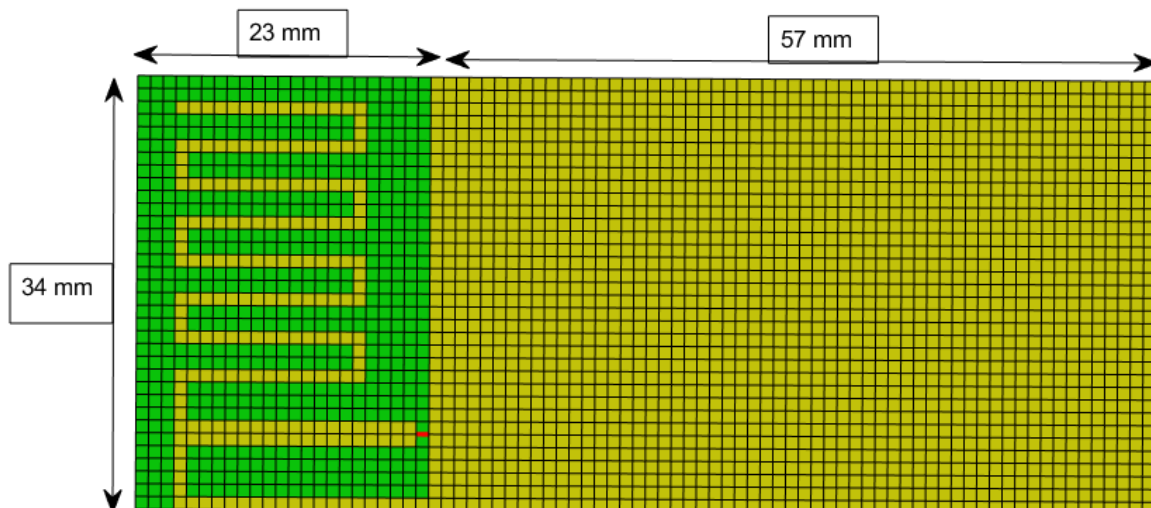


Figura 2.7 – Antenă IFA miniaturizată, design propriu

Pentru a putea descrie ajustările făcute în cadrul optimizării antenei, este necesară o scurtă prezentare a elementelor constitutive ale antenei în F-inversat. În primul rând, brațul radiant principal, situat în stânga planului de masă (Figura 2.7) este șerpuit pentru a reduce spațiul ocupat, însă dimensiunea lui efectivă rămâne aproximativ un sfert de lungime de undă (86 mm) la frecvența de 868 MHz.

În al doilea rând, scurtcircuitul dintre brațul radiant și planul de masă acționează ca un inductor. Fără scurtcircuit, antena are un comportament preponderent capacitiv. Folosind teoria liniei de transmisiune, se poate obține dimensiunea potrivit valoarea inductanței deplasând poziția sursei de alimentare dinspre scurtcircuit de-a lungul brațului radiant, astfel încât condensatorul și inductorul echivalente să fie la rezonanță la frecvența de lucru. Acest model este descris folosind elemente de circuit concentrate în Figura 2.8.

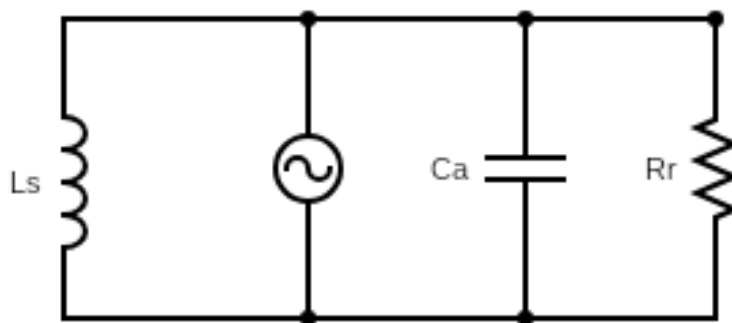


Figura 2.8 – Circuit echivalent pentru antena F-inversat

- L_s – inductanța echivalentă a scurtcircuitului
- C_a – capacitatea echivalentă a brațului radiant
- R_r – rezistența de radiație

Cum planul de masă măsoară $\lambda / 4$ la frecvența de lucru, iar brațul radiant are aproximativ aceeași dimensiune, se poate compara antenna F-inversat cu un monopol clasic „îndoit” peste planul de masă și scurtcircuitat corespunzător astfel încât antenna să fie adaptată la un circuit de alimentare cu impedanța uzuală de 50Ω .

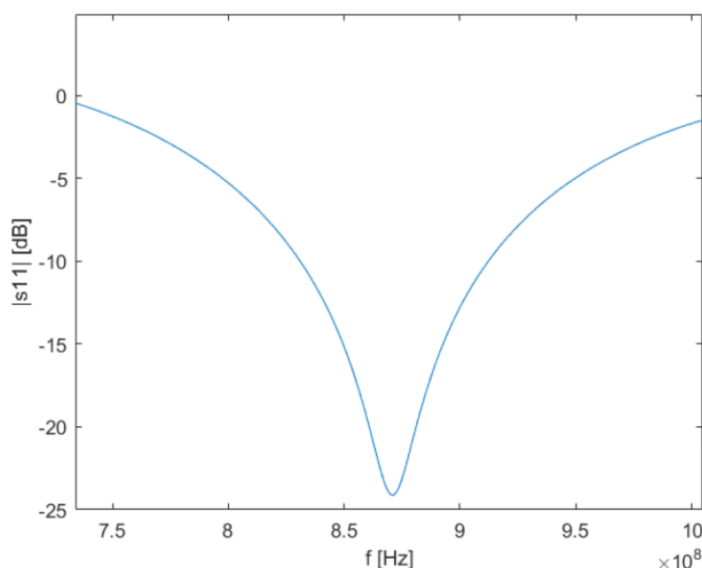


Figura 2.9 – Coeficientul de reflexie al tensiunii, condiția de terminare a simulării setată la -10 dB

Așa cum se poate observa în Figura 2.9, antenna este rezonantă la $f = 868$ MHz și are o bandă de frecvență la -6 dB de 133 MHz. Datorită benzii relativ largi pentru o IFA, aceasta poate fi folosită atât în banda de frecvență ISM europeană, cât și în cea americană. Dacă se dorește acest lucru, frecvența de rezonanță ar putea fi ușor mutată la 892 MHz, media aritmetică dintre banda americană și cea europeană.

Pentru a regla frecvența de rezonanță, banda și impedanța reală la rezonanță, am variat 2 parametri: distanța sursei față de scurtcircuitul care leagă structura radiativă de planul de masă și lungimea efectivă a brațului radiant. Modificând lungimea antenei prin adăugarea sau eliminarea unei secțiuni de 15 mm, se poate regla frecvența de rezonanță. Apropiind sursa de scurtcircuit, frecvența de rezonanță și impedanța scad în timp ce banda devine mai largă.

Figura 2.9 a fost obținută cu o condiție de terminare a simulării atunci când energia totală prezentă în volumul simulat scade sub -10 dB. În Figura 2.10 se poate observa că se schimbă radical coeficientul de reflexie al tensiunii atunci când setez condiția de terminare la -40 dB.

Chiar dacă frecvența de rezonanță nu este situată exact la 868 MHz – frecvența folosită de LoRa, valoarea poate fi reglată fin ori prin poziția scurtcircuitului, ori prin modificarea lungimii antenei, mai exact a porțiunii în zigzag (șerpuite). Motivul pentru care nu am încercat să ating 868 MHz în fiecare simulare este simplu: nu este fezabil din punct de vedere al timpului (o simulare folosind condiția de terminare la -40 dB durează 40 de minute pe un calculator uzual – algoritmul era gândit să fie rulat în paralel pe o mașină de calcul cu mare putere de procesare) și nu ar fi fost tocmai relevant. Interesul principal al realizării primului prototip era mai buna înțelegere a modului în care se pot modifica

parametrii unei antene, astfel încât proiectarea să fie făcută empiric, prin metoda științifică de „încercare și eroare”. În secțiunile următoare va fi realizată optimizarea exactă a antenei.

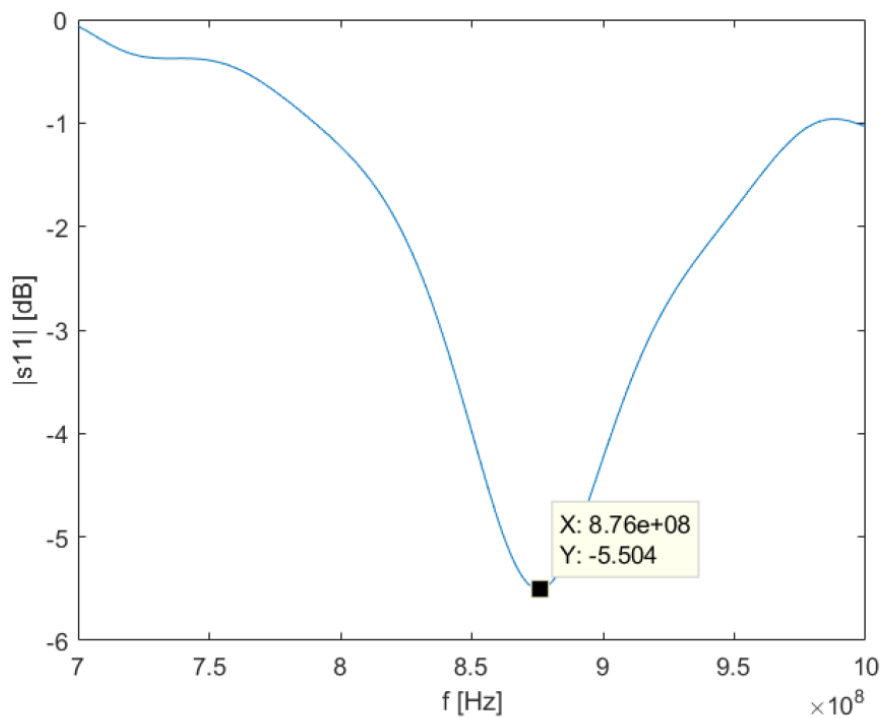


Figura 2.10 – Coeficientul de reflexie al tensiunii, condiția de terminare a simulării setată la -40 dB

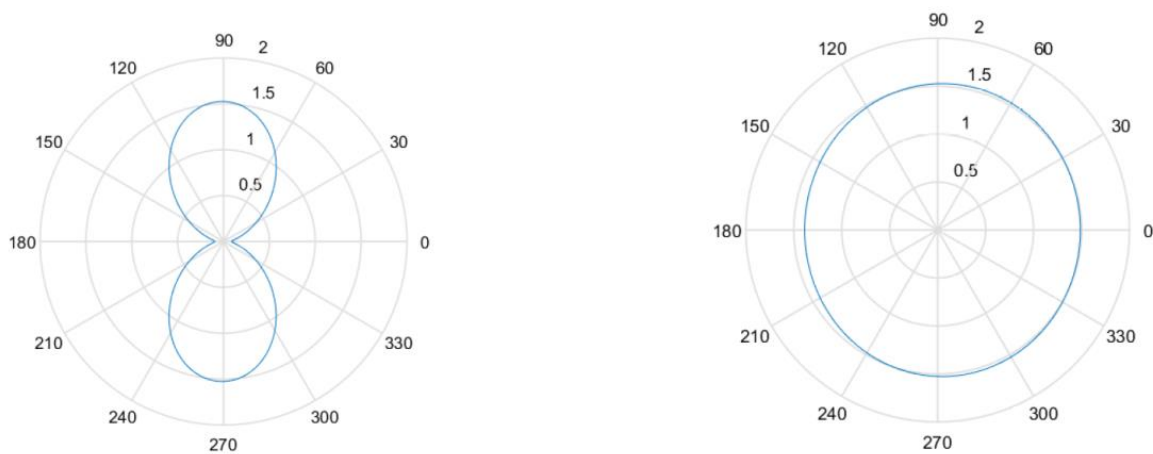


Figura 2.11 – Caracteristica de radiație în planurile YoZ , respectiv XoZ și câștigul liniar al antenei la frecvența de 868 Mhz

Se observă în Figura 2.11 și Figura 2.12 că antena este omnidirecțională, având caracteristica de radiație asemănătoare cu cea a unui dipol. Câștigul este de 1,5 (1,76 dB). Având în vedere că antena aparține unui nod mobil al rețelei, valoarea redusă a câștigului, împreună cu proprietatea de omnidirecționalitate reprezintă un avantaj deoarece transmisiunea va fi posibilă indiferent de poziționarea terminalului în raport cu gateway-ul.

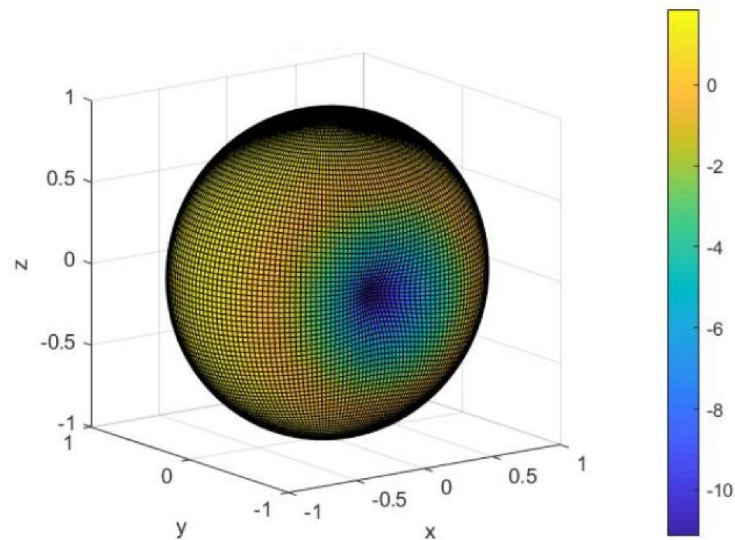


Figura 2.12 – Caracteristica de radiație tridimensională (scară în dB)

În Figura 2.13 se poate observa cum la extremitatea din dreapta a antenei există un câmp electric puternic, sugerând că acea parte a elementului radiativ se comportă ca un condensator. Din acest motiv se utilizează scurtcircuitul cu rol de inductor de lângă alimentare. Inductanța se anihilează reciproc cu valoarea capacitivă, iar structura poate radia, la frecvența de rezonanță impedanța fiind reală.

Un cuplaj nedorit este cel dintre planul de masă și elementul radiativ al antenei. Acest efect poate fi redus prin „ridicarea” antenei față de planul de masă, adică măbind distanța dintre elementul radiativ și planul de masă, ajustare al cărei efect va fi explorat în secțiunea următoare a lucrării.

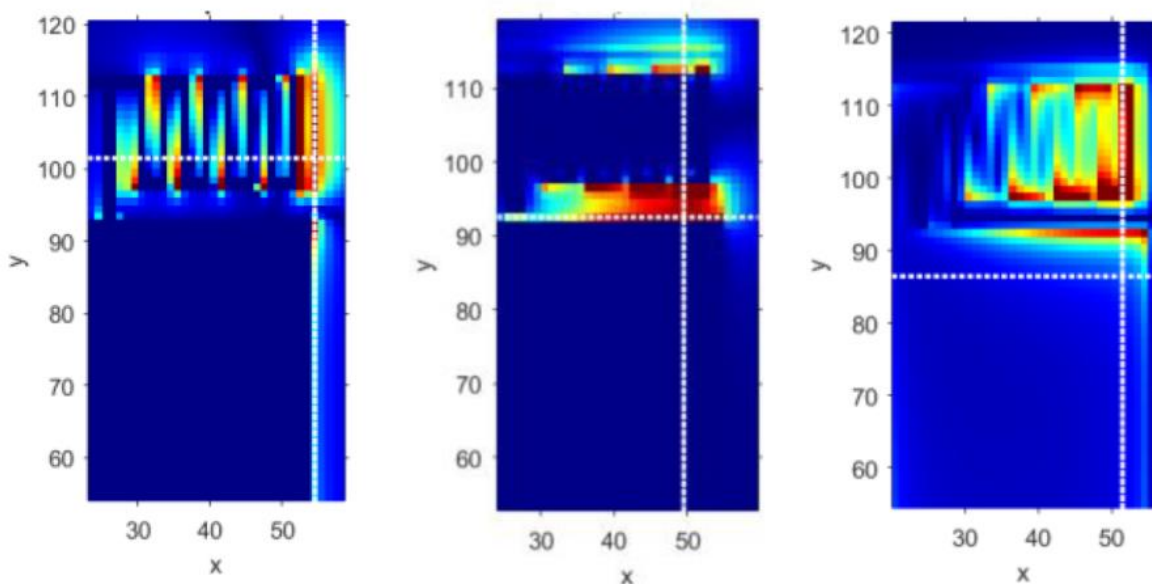


Figura 2.13 – Componentele E_x , E_y și respectiv E_z ale câmpului electric din zona de câmp apropiat, vizualizate în planul XoY

În continuare, se vor analiza elementele magnetice din câmpul apropiat, mai precis va putea fi observat felul în care circulă curentul electric prin conductor. Este interesant de observat în paralel cum poziția maximumului câmpului electric (Figura 2.13) coincide cu minimumul câmpului magnetic din Figura 2.14, simularea numerică confirmând cu exactitate teoria liniilor de transmisiune.

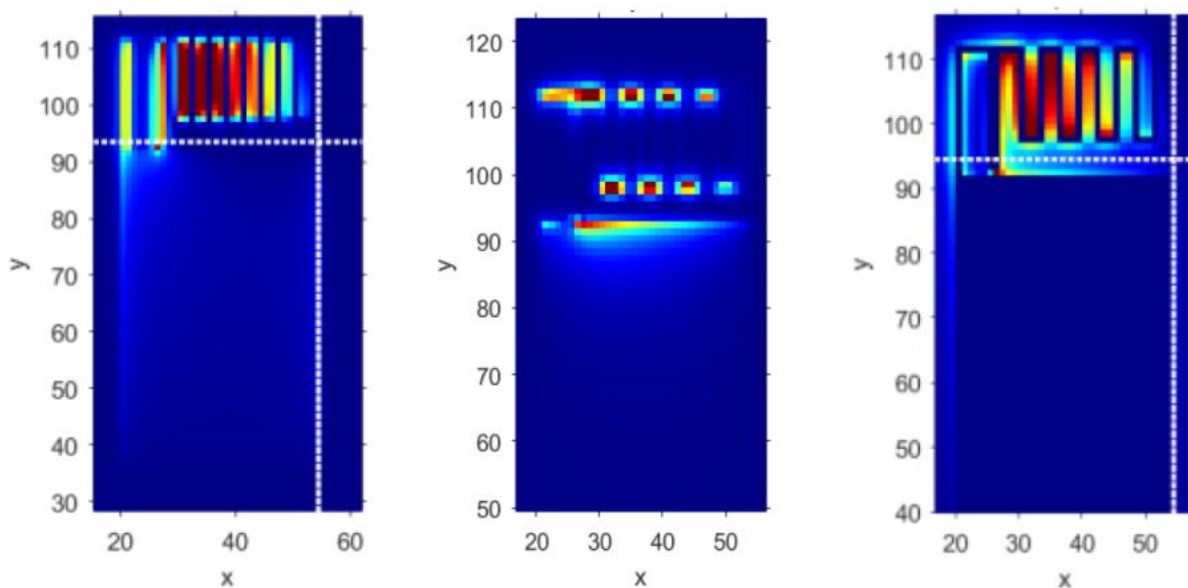


Figura 2.14 – Componentele H_x , H_y și respectiv H_z ale câmpului magnetic din zona de câmp apropiat, vizualizate în planul XoY

Așa cum era de așteptat, componenta H_y este maximă acolo unde elementul radiativ este curbat și densitatea electronilor aflați în mișcare prin conductor crește semnificativ. Spre deosebire de cazurile clasice de proiectare PCB, unde este complet nerecomandabilă folosirea conductoarelor curbate la 90 sau 180 de grade, aici puterea utilizată pentru transmisie/recepție este foarte mică, deci nu există niciun pericol ca metalul să cedeze în timp în acele puncte critice.

2.6 SIMULAREA NUMERICĂ A PROTOTIPULUI ÎMBUNĂTĂȚIT ÎN CST

Având în vedere rezultatele din secțiunea anterioară, au fost identificate următoarele caracteristici care, odată modificate, conduc la îmbunătățirea performanțelor antenei:

- Creșterea lungimii planului de masă (pentru a măsura aproximativ un sfert de lungime de undă) mărește atât eficiența, dar și banda de frecvență
- Eliminarea cuplajului electric dintre elementul radiativ și planul de masă va permite antenei să radieze mai multă putere, deci eficiența va crește; acest lucru este posibil dacă se modifică poziționarea relativă a elementului radiativ față de planul de masă

Pentru a realiza cele două modificări am folosit modelul de antenă propus în [26], care poate fi observat în *Figura 2.15* – Structura modificată a prototipului inițial. Dimensiunile planului de masă au fost mărite, însă suprafața ocupată de elementul radiativ a rămas aproximativ aceeași. Grosimea substratului de electric de 1,6 mm a fost păstrată deoarece nu are un efect semnificativ asupra valorii frecvenței de rezonanță sau eficienței.

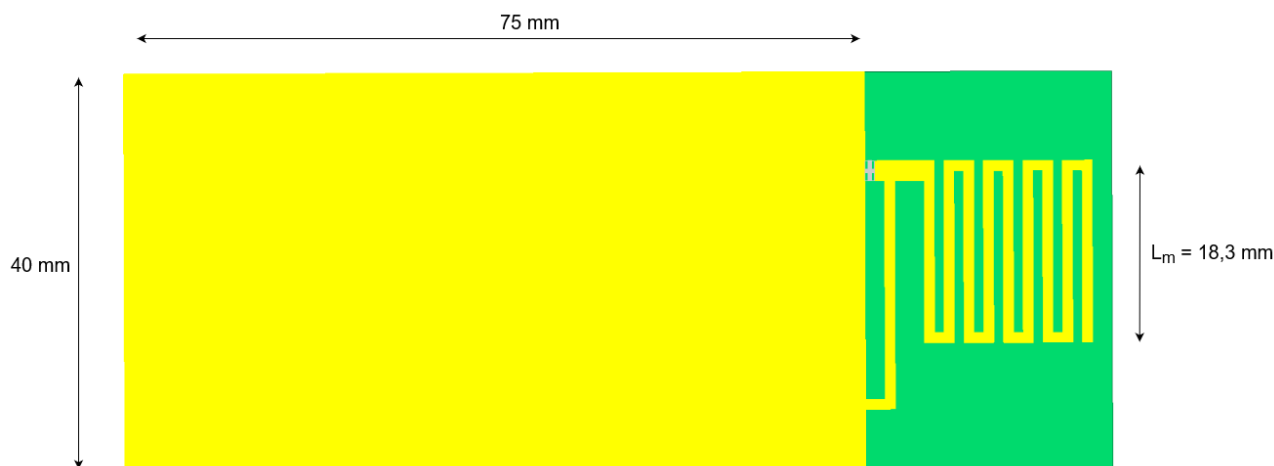


Figura 2.15 – Structura modificată a prototipului inițial

Simularea a fost efectuată în CST deoarece timpul de simulare în AFC pentru o condiție de terminare setată la -40 dB din energia aflată inițial în spațiul simulat (valoare care oferă rezultate semnificativ mai precise decât -10 dB) depășea 30 de minute. Așadar, a fost preferată folosirea unui program care permite simularea într-un timp mult mai scurt, păstrând în același timp precizia rezultatelor.

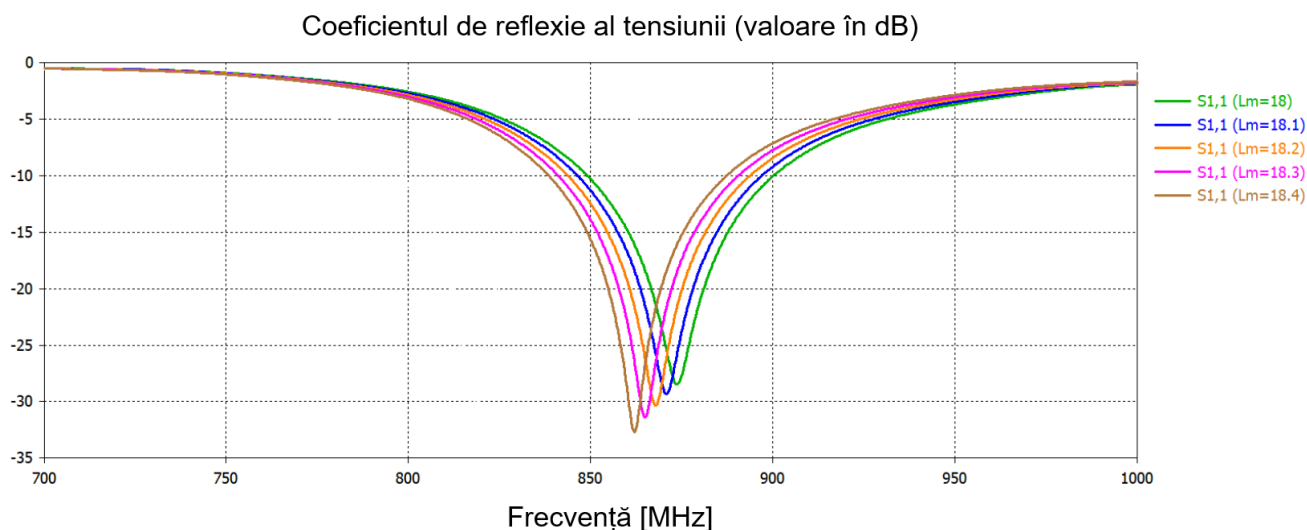


Figura 2.16 – Modificarea coeficientului de reflexie cu dimensiunea L_m

Modificarea frecvenței de rezonanță este facilă: prin micșorarea sau alungirea elementului radiativ se poate ajusta fin la ce frecvență este rezonantă antena. Astfel, aceasta poate fi ușor adaptată funcționării la frecvența de 925 MHz utilizată de LoRa pe continentul american.

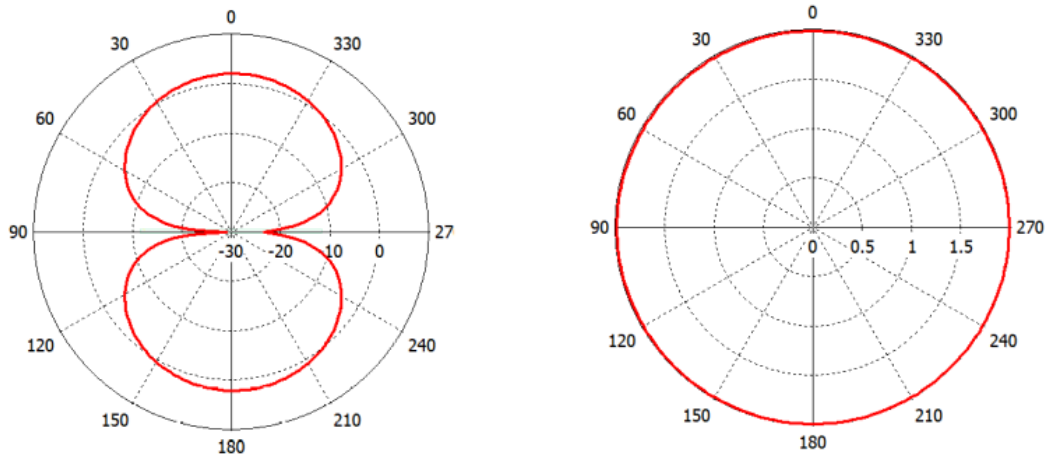


Figura 2.17 – Reprezentarea câștigului în formă polară în planurile YoZ, respectiv XoZ (valori logaritmice)

În ce privește caracteristica de radiație a antenei, aceasta și-a păstrat forma omnidirecțională, dar câștigul s-a mărit de la 1,5 (1,76 dB) la 1,58 (1,98 dB). În Figura 2.18 poate fi observată diagrama de radiație tridimensională, având aceeași formă ca modelul inițial din Figura 2.12.

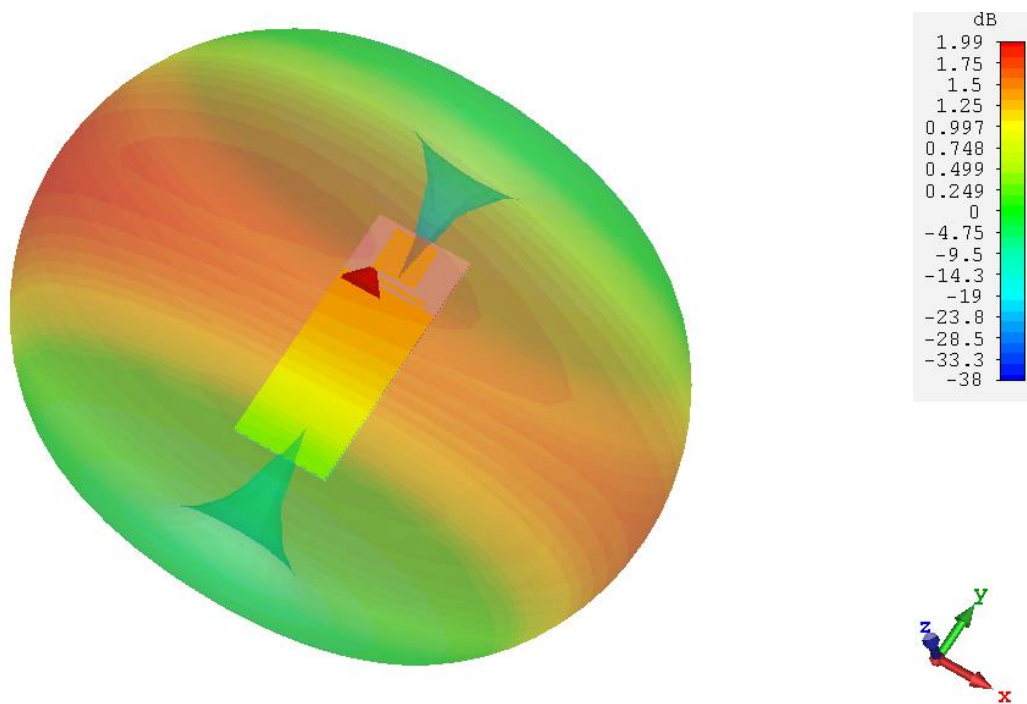


Figura 2.18 – Caracteristica de radiație tridimensională (scară logaritmică)

În Figura 2.19 – Curentul de suprafață (reprezentare logaritmică) este reprezentată distribuția curentului pe suprafața antenei. Ca în cazul anterior, cele mai mari valori se obțin acolo unde linia microstrip este șerpuită. De asemenea, în imaginea de mai jos este pus în evidență efectul pelicular datorat frecvenței mari de lucru de 868 MHz, mai ales în cazul planului de masă.

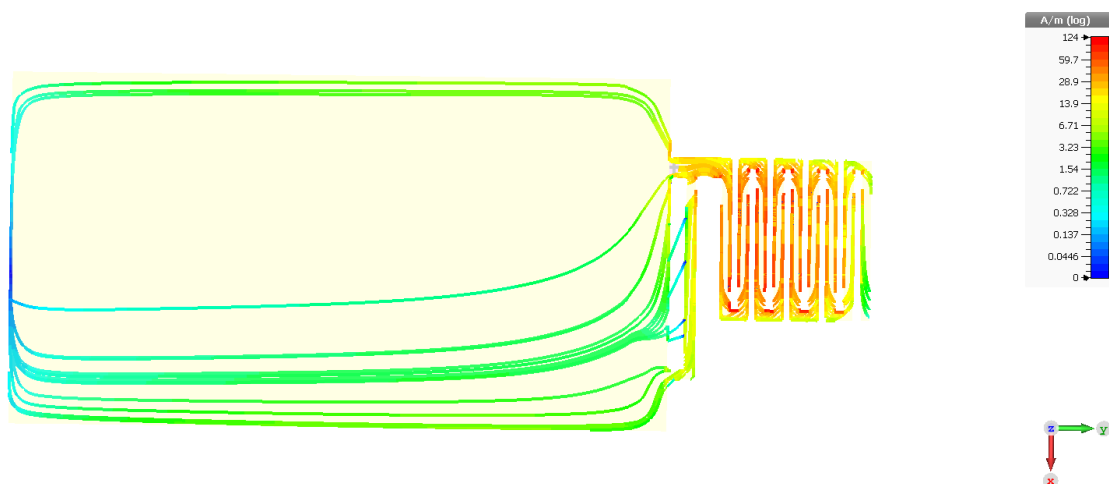


Figura 2.19 – Curentul de suprafață (reprezentare logaritmică)

2.7 MODELUL FINAL MINIATURIZAT

În cele din urmă am realizat un model miniaturizat, împărțind planul de masă în două și reducând drastic suprafața ocupată de elementul radiant la dimensiunile de $0,087 \times 0,03 \lambda$. Cu alte cuvinte, am sacrificat valoarea eficienței totale a antenei pentru a reuși miniaturizarea, așa cum vor demonstra rezultatele de mai jos. Au existat două variante finale ale antenei, așa cum se poate observa în Figura 2.20

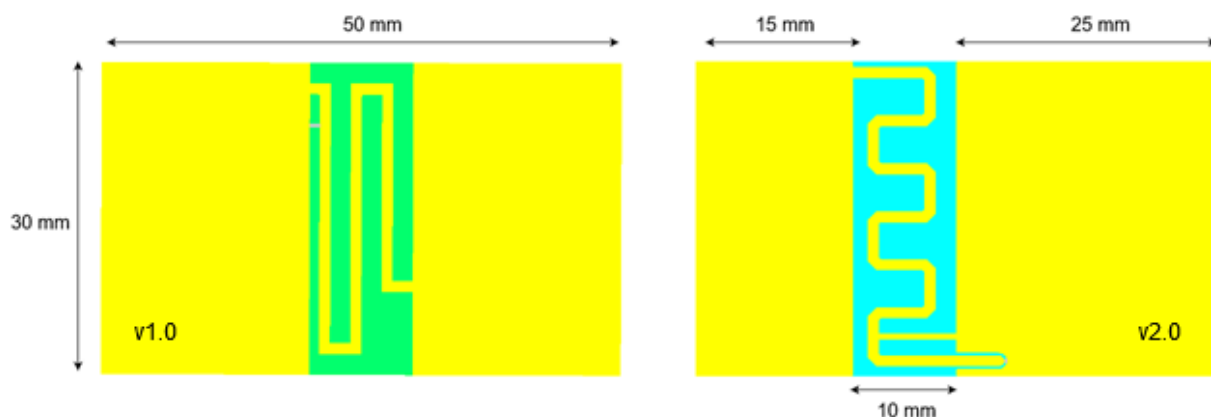


Figura 2.20 – Cele 2 variante finale ale antenei proiectate

Lungimea electrică a celor două modele este comparabilă, elementul radiant având dimensiunea egală cu aproximativ un sfert de lungime de undă. Modelul din dreapta folosește un substrat dielectric cu grosimea de 0,8 mm, jumătate din grosimea primei variante, pentru a reduce pierderile datorate conductivității nenule ale materialului folosit (FR4). Motivul pentru care planul de masă are dimensiuni asimetrice în cel de-al doilea caz este dat de dimensiunile modului LoRa și ale bateriei reîncărcabile ce vor fi amplasate pe cablajul imprimat.

În Figura 2.21 și Figura 2.22 pot fi observate valorile coeficientului de reflexie pentru cele două antene. Chiar dacă eficiența de radiație este practic identică (80%) în ambele cazuri, varianta a doua prezintă o mult mai bună adaptare, așadar eficiența totală este semnificativ îmbunătățită: de la 69% aceasta crește la 78%. Odată obținută frecvența de rezonanță corespunzătoare, eficiența devine, odată

cu câștigul, cel mai important parametru al unei antene utilizată într-un sistem IoT, în care autonomia îndelungată este crucială.

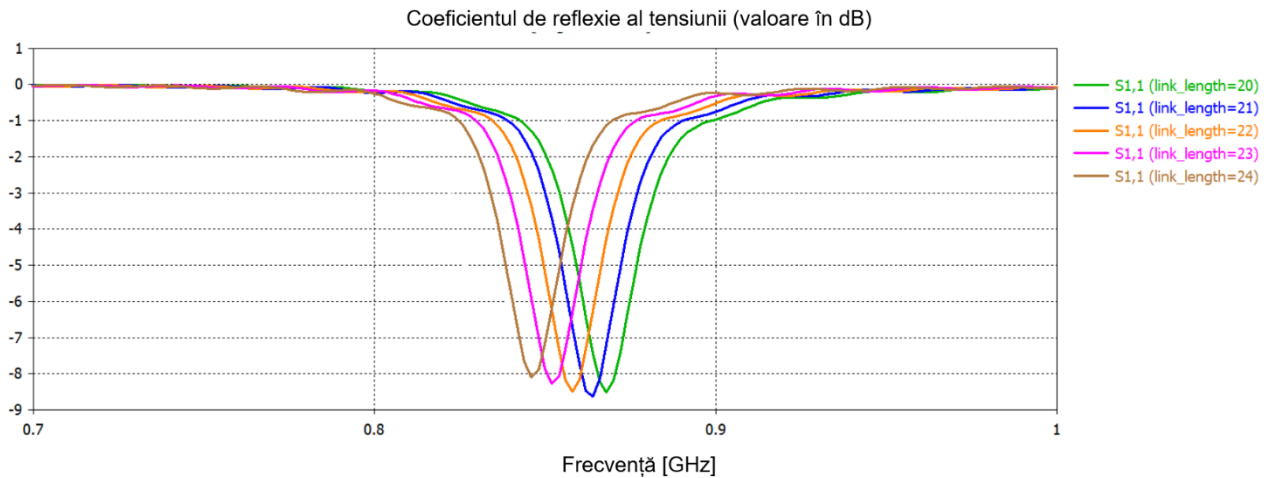


Figura 2.21 – Variația coeficientului de reflexie cu lungimea elementului radiant, varianta 1

Nu doar valoarea coeficientului de reflexie este îmbunătățită în cazul variantei 2, dar și banda de frecvență măsurată la -6 dB a crescut cu 50% de la 12 MHz (cazul 1) la 18 MHz (cazul 2). Cum LoRa folosește în Europa doar frecvențele din intervalul 868-870 MHz, banda antenei este suficientă. Motivul principal pentru care se dorește totuși îmbunătățirea acesteia este că simularea nu poate oferi date complet corecte, deci circuitul realizat fizic va avea o frecvență de rezonanță puțin diferită de cea simulată. Așadar, o bandă mai largă este preferabilă.

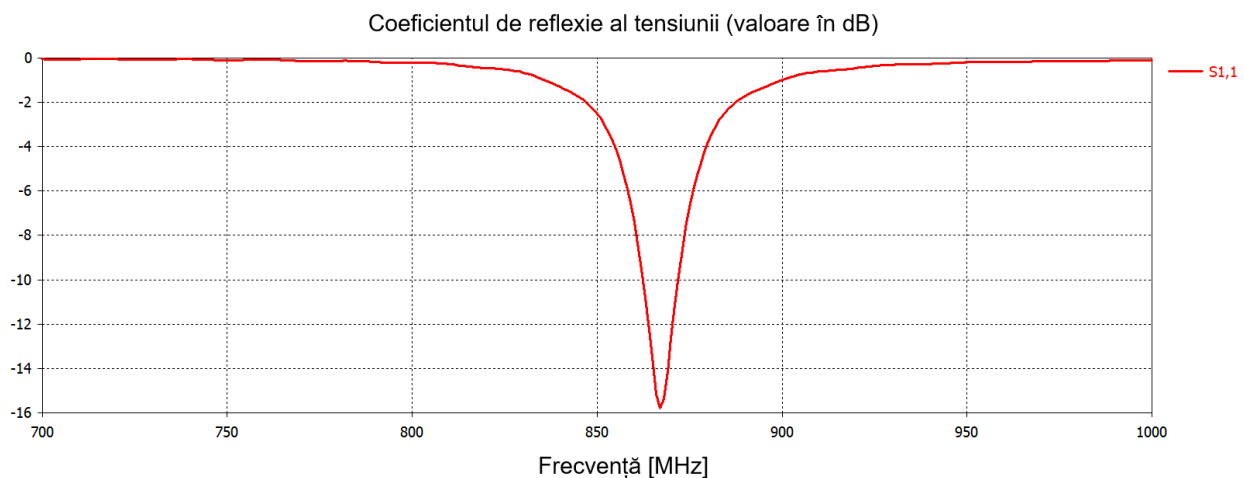


Figura 2.22 – Varianta 2 a modelului are un coeficient de reflexie îmbunătățit

Pentru a explica valorile mai bune ale benzii de frecvență, eficienței, câștigului și coeficientului de reflexie este necesară analiza curentului de suprafață din Figura 2.23.

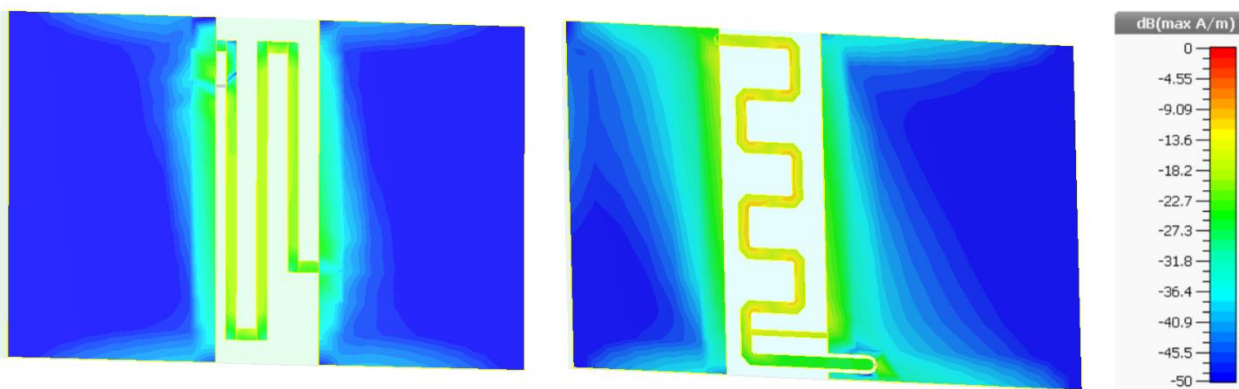


Figura 2.23 Curentul de suprafață pentru cele două antene, reprezentare logaritmică

Pentru a îmbunătăți performanța antenei, șerpuirea elementului radiativ a fost realizată fără curburi de 180 de grade, care, din cauza efectului pelicular, provoacă o distribuție neuniformă a curentului și afectează atât eficiența radiației, dar și diagrama de radiație. În plus, din cauză că liniile microstrip ale primului model erau foarte apropiate (2 mm), iar curenții din acestea au sens opus, o parte din liniile câmpului magnetic radiat se anulează reciproc, conducând la deteriorarea diagramei de radiație.

2.8 COMPARAȚII CU ALTE MODELE MINIATURALE DE ANTENE

În Tabel 2.1 – Compararea parametrilor antenelor proiectate cu alte modele miniaturale se poate observa cum variază parametrii de performanță ai antenelor (prototipurile proiectate în lucrarea de față în comparație cu două modele propuse în articole științifice și două modele comerciale) cu dimensiunile elementului radiant. Odată cu scăderea dimensiunilor elementului radiant, eficiența totală și câștigul scad semnificativ. Chiar dacă impedanța antenei se poate regla corespunzător la 50 Ω , deci coeficientul de reflexie are valori sub -5 dB, elementul radiativ nu poate avea dimensiuni mai mici de 0.1λ fără a se face un compromis în ce privește eficiența totală.

Model	Coeficient de reflexie [dB]	Câștig [dBi]	Eficiență totală (%)	Dimensiuni element radiant
Prototip inițial	-5,5	1,76	39	$0,1 \times 0,07 \lambda$
Prototip îmbunătățit	-30	1,98	97	$0,12 \times 0,07 \lambda$
Final v1.0	-8	0,35	69	$0,09 \times 0,03 \lambda$
Final v2.0	-15,8	1,01	78	$0,09 \times 0,03 \lambda$
IFA Logo [25]	-23	0,8	74	$0,1 \times 0,06 \lambda$
IFA Multibandă [27]	-19	-3	30	$0,076 \times 0,04 \lambda$
Patch comercial* [28]	< -5	2,17	66	$0,1 \times 0,1 \lambda$
ILA comercial* [29]	< -5	-0,5	45	$0,015 \times 0,009 \lambda$

Tabel 2.1 – Compararea parametrilor antenelor proiectate cu alte modele miniaturale

În cazul modelelor comerciale, măsurătorile au fost făcute deasupra unor planuri de masă cu dimensiunile de 70 x 70 mm pentru patch, respectiv 80 x 40 mm pentru ILA.

2.9 MĂSURAREA COEFICIENTULUI DE REFLEXIE AL ANTENEI FIZICE

Pentru a verifica dacă antena realizată fizic prin tehnologie PCB este rezonantă a fost folosit montajul din *Figura 2.23*. Având în vedere valoarea mare a frecvenței de lucru (868 MHz), lungimea de undă (aproximativ 34 cm) este comparabilă cu dimensiunile antenei și ale cablului de măsură, deci a fost necesară calibrarea preliminară a analizorului de rețea. În acest scop, la capătul cablului de măsură a fost conectat un conector special, având 3 tipuri de terminații: scurtcircuit, gol și terminație adaptată de $50\ \Omega$ corespunzătoare impedanței caracteristice a cablului coaxial folosit. Cele 3 terminații au fost conectate pe rând la analizorul de rețea, urmând ca ulterior să fie măsurat coeficientul de reflexie al antenei.



Figura 2.24 – Măsurarea coeficientului de reflexie folosind analizorul de rețea

Între cablul analizorului de rețea și antenă a fost conectat un cablu coaxial cu lungimea de aproximativ o jumătate de lungime de undă (repetor de impedanță) pentru ca dimensiunea cablului să nu afecteze măsurarea impedanței antenei. Încă o observație importantă: antena măsurată nu are adăugat scurtcircuitul cu rol de inductor din *Figura 2.20* (v2.0). Deoarece o mică modificare a poziției scurtcircuitului și lipirea componentelor pe plăcuță afectează radical impedanța antenei, acesta poate fi adăugat ulterior doar dacă se poate măsura cât mai exact coeficientul de reflexie pentru a ține cont de erorile de simulare, dar și de toleranțele uzuale ale dimensiunilor în realizarea circuitului PCB.

Diferența dintre valoarea măsurată a coeficientului de reflexie și cea simulată în secțiunea 2.7 se datorează efectului parazit al cablului coaxial conectat la antenă. Neavând la dispoziție o adaptare *balun* (eng. **balanced-unbalanced**) pentru cablul coaxial folosit, acesta devine practic parte din antenă și afectează semnificativ performanțele acesteia. Acest lucru devine ușor de observat când cablul coaxial este atins cu mâna, iar graficul coeficientului de reflexie se modifică semnificativ. Chiar dacă banda de frecvență reală a antenei nu poate fi măsurată corespunzător, coeficientul de reflexie are valoarea de -10,5 dB (0,3 în scară liniară) și se încadrează în parametrii de proiectare.

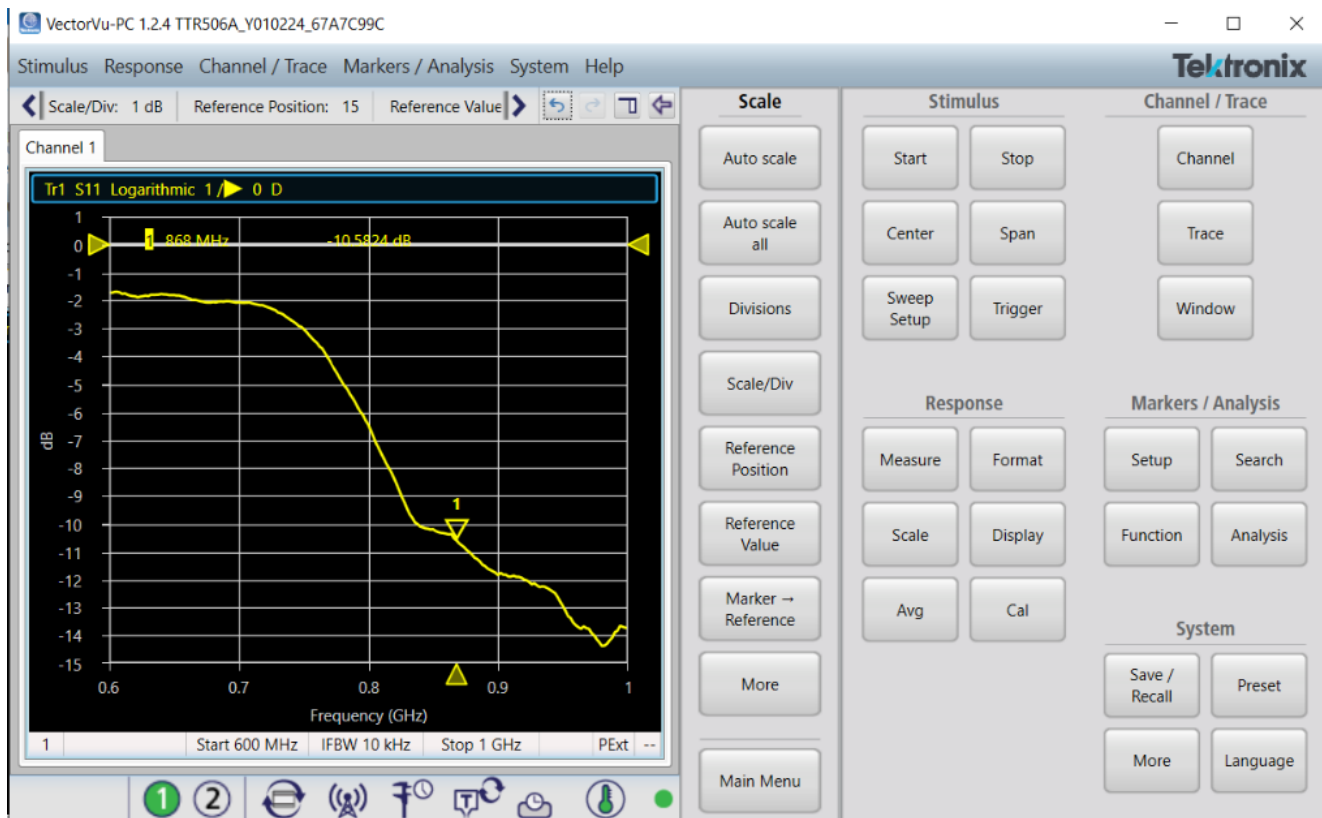


Figura 2.25 – Coeficientul de reflexie al antenei în banda 600-1000 MHz

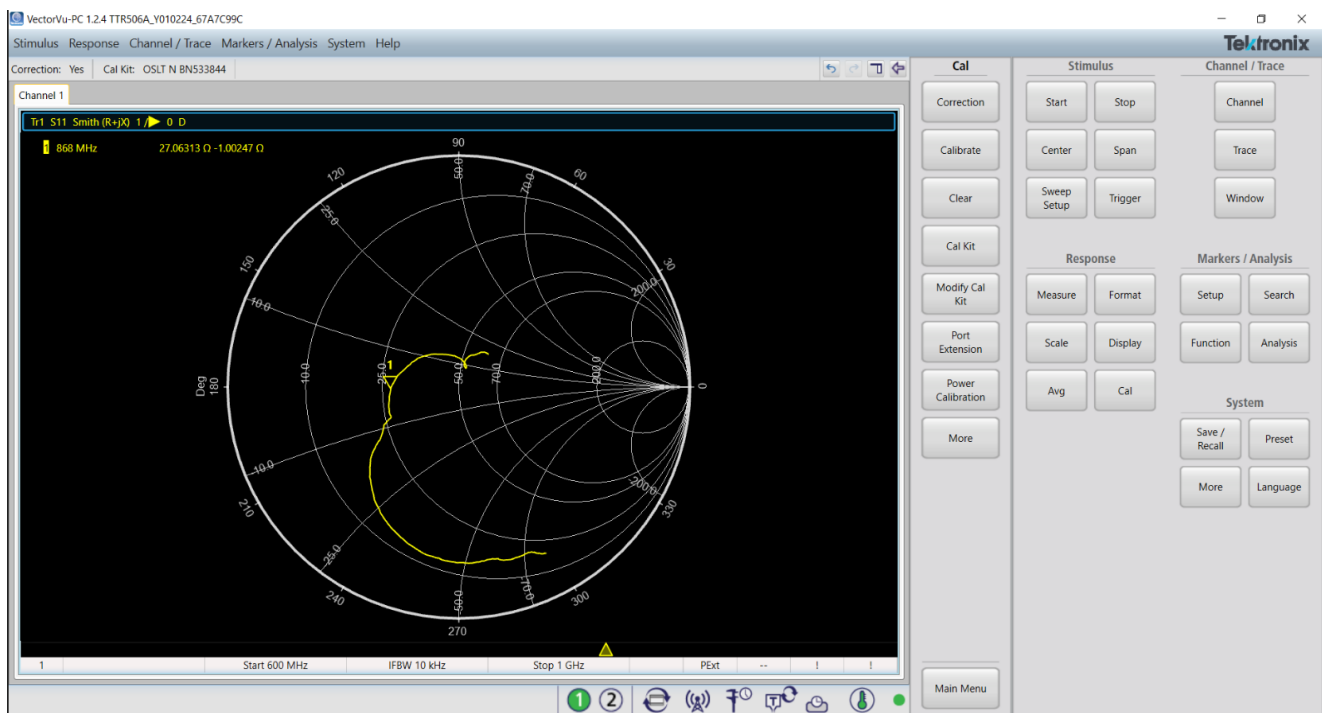


Figura 2.26 – Impedanța antenei reprezentată pe diagrama Smith în banda 600-1000 MHz

CAPITOLUL 3 CONFIGURAREA REȚELEI LORAWAN

Odată ce au fost parcurse etapele anterioare (descrierea protocolului și proiectarea antenei în tehnologie microstrip) este timpul să fie demonstrată aplicabilitatea sistemului configurând o rețea LoRaWAN complet funcțională. La fel ca în cazul proiectării nodului LoRa, costul a reprezentat un factor important în alegerea echipamentelor hardware folosite și nu trebuie neglijat, mai ales dacă se ține cont de amploarea unei rețele IoT reale, formate din mii de senzori și zeci de gateway-uri. De asemenea, trebuie menționat faptul că rețeaua configurată în prezenta lucrare este doar un prototip aflat în stadiul de testare. Pentru lansarea comercială a aplicației atât codul rulat de nod și gateway, dar și echipamentele hardware trebuie testate și optimizate riguros, lucru ce depășește cu mult resursele alocate acestui proiect realizat individual.

3.1 ECHIPAMENTE HARDWARE FOLOSITE

3.1.1 Raspberry Pi 4 Model B

Pentru crearea gateway-ului a fost folosit arhicunoscutul și versatilul SBC Raspberry Pi, versiunea 4. Specificațiile tehnice ale modelului folosit aici sunt [30]:

- Procesor: Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz
- RAM: 4GB LPDDR4-3200 SDRAM
- ROM: microSD Card 32 GB
- Protocoale de comunicație suportate: 2.4 GHz și 5.0 GHz IEEE 802.11ac wireless, Bluetooth 5.0, BLE, Gigabit Ethernet
- Pini I/O de uz general (GPIO): 40
- Porturi USB: 2 porturi USB 2.0 și 2 porturi USB 3.0
- Ieșiri monitor: 2 porturi micro-HDMI (suportă 2 monitoare cu rezoluție 4K simultan)
- Alimentare: port USB Type-C, tensiune 5 V, intensitate 3 A

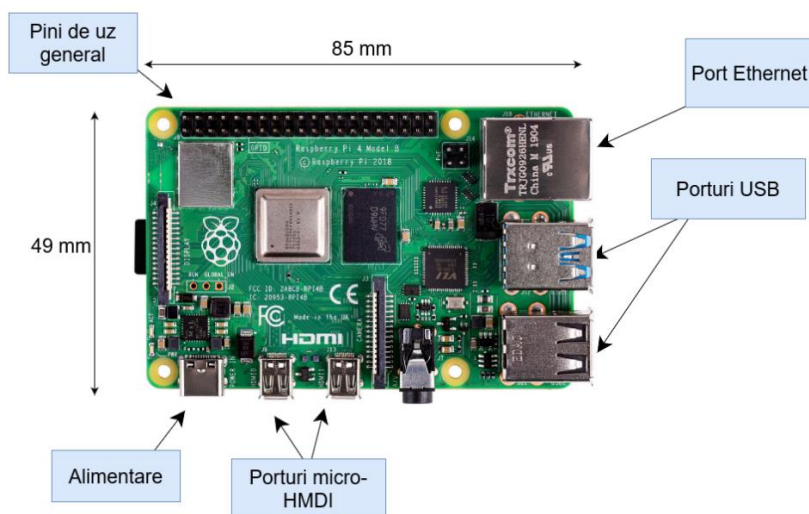


Figura 3.1 – Configurația plăcuței Raspberry Pi 4 Model B

Raspberry rulează o distribuție Linux numită Raspbian care oferă toate caracteristicile unui calculator desktop clasic (inclusiv interfață grafică pentru utilizator), dar care este optimizat special pentru procesorul ARM pe 64 de biți folosit.

3.1.2 Plăcuță Dragino LoRa / GPS_HAT

Dragino LoRa / GPS_HAT este o plăcuță de extensie pentru Raspberry Pi care asigură conexiunea dintre acesta, chip-ul SX1276 și modulul GPS care poate fi folosit facultativ pentru aflarea coordonatelor în timp real ale poziției gateway-ului. În *Figura 3.2* pot fi observate pozițiile celor 2 chip-uri (SX1276 pentru LoRa și cel destinat GPS). De asemenea, plăcuța este dotată cu 2 conectori SMA destinați conexiunii dintre antene și circuite. Trebuie făcută observația că plăcuța este facultativă, conexiunile dintre Raspberry Pi, chip-ul SX1276 și antenă putând fi făcute direct prin fire.

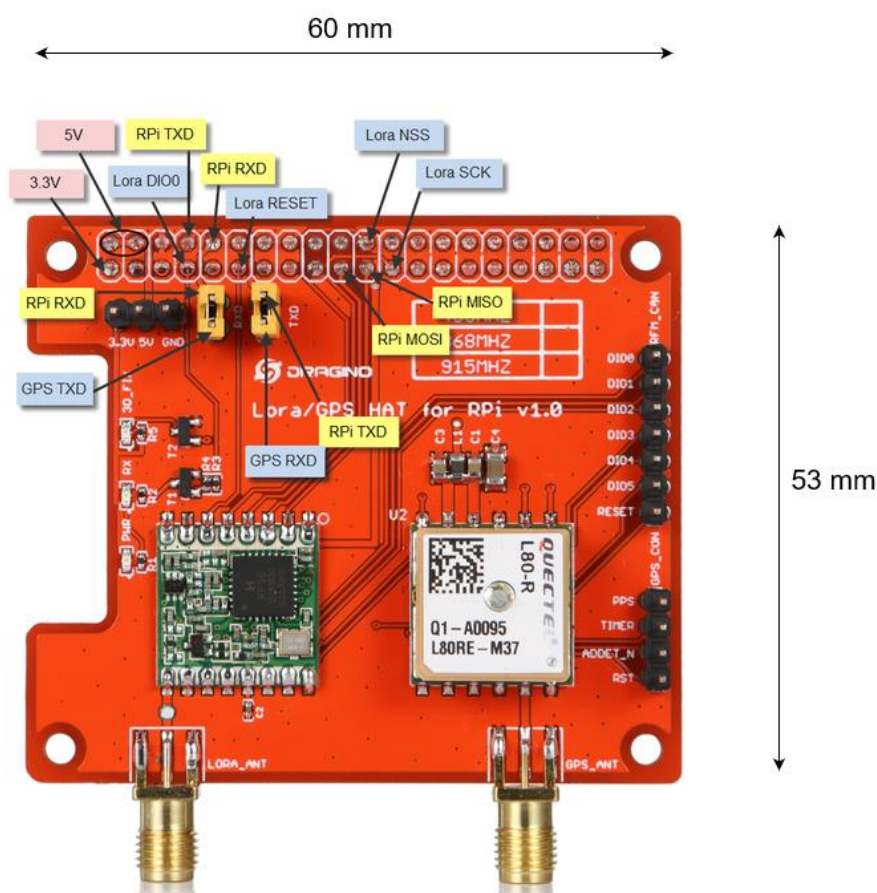


Figura 3.2 – Configurația plăcuței Dragino LoRa / GPS_HAT, Sursă: [31]

3.1.3 Plăcuță Arduino Nano

Cântărind doar 7 grame și având dimensiunile ilustrate în *Figura 3.3*, Arduino Uno este cea mai mică plăcuță Arduino, fiind potrivită pentru o multitudine de proiecte dintre cele mai diverse. În lucrarea de față a fost folosită la testarea codului destinat nodului LoRa. Faptul că plăcuța este dotată cu bootloader și interfață serială în vederea depanării cu Arduino IDE facilitează acest lucru.

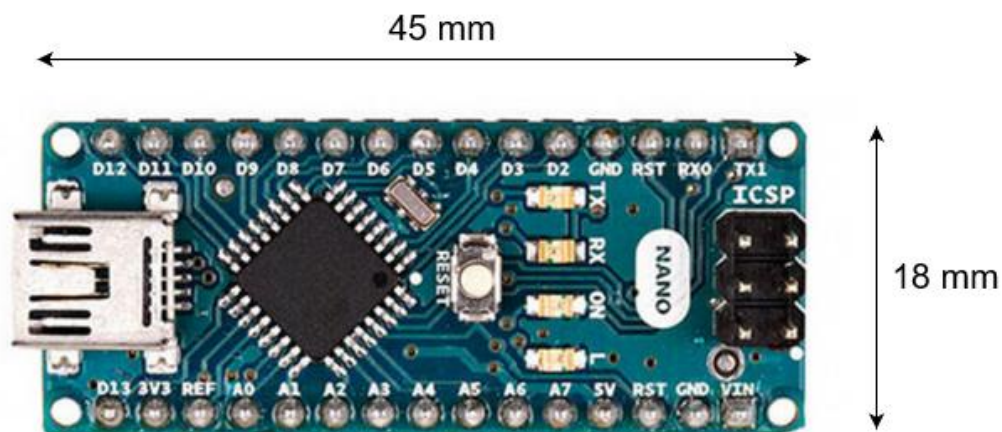


Figura 3.3 – Configurația plăcuței Arduino Nano, Sursa: [32]

Specificații tehnice [32]:

- Microcontroller: Atmega328P pe 8 biți
- ROM: 32 KB dintre care 2 KB pentru bootloader
- RAM: 2 KB
- Frecvența de ceas: 16 MHz
- Număr pini de uz general: 30

Arduino Nano este o plăcuță realizată cu licență de tip sursă deschisă, deci poate fi modificată conform cerințelor unui proiect anume. De asemenea, aici intervine unul dintre avantajele folosirii LoRa: simplitatea algoritmului destinat comunicației permite rularea acestuia pe un microcontroller ieftin pe 8 biți.

3.1.4 Transmițător RFM96

Nucleul întregul sistem este circuitul de mai jos, în care este integrat modemul LoRa SX1276 produs de Semtech. Acesta realizează modulația datelor ce vor fi transmise pe legătura ascendentă și demodulația datelor primite pe legătura descendentă. Tipul modulației bazate pe CSS este secret, fiind proprietatea companiei Semtech. Rolul pinilor folosiți va fi detaliat în secțiunea ce urmează.

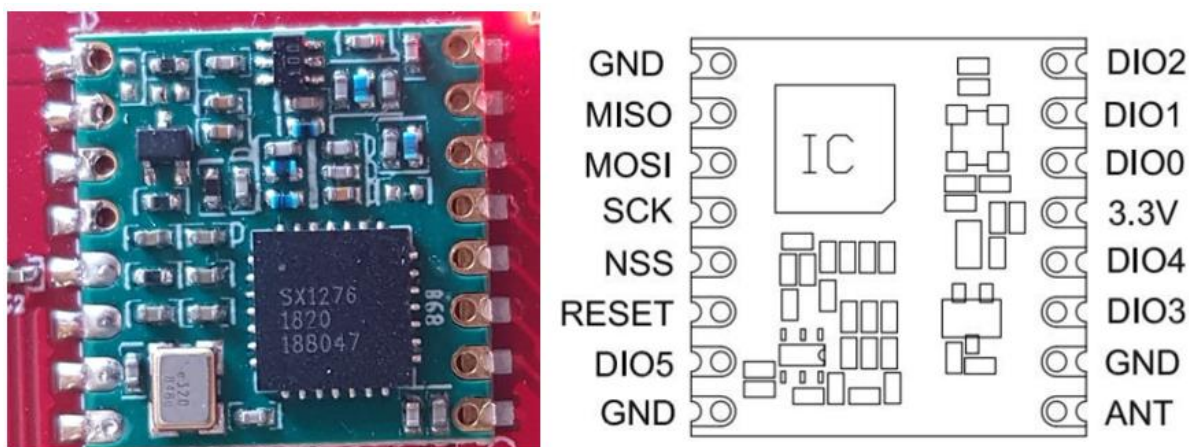


Figura 3.4 – Chip-ul RFM96 împreună cu poziționarea pinilor, Sursa: [33]

Specificații tehnice [34]:

- Alimentare: 3.3 V
- Bugetul legăturii radio: 168 dBm
- Amplificare: 20 dBm
- Sensibilitate: -148 dBm

3.1.5 Antenă miniaturală

Antena dezvoltată în secțiunea 2.7 a fost realizată în tehnologie PCB fără să aibă adăugat scurtcircuitul care adaptează impedanța la 50 Ω , așa cum se poate observa în *Figura 3.5*. Versiunea din stânga reprezintă modelul cablajului imprimat fără componente lipite, iar cea din dreapta este complet echipată cu microcontroller, modul LoRa și baterie.

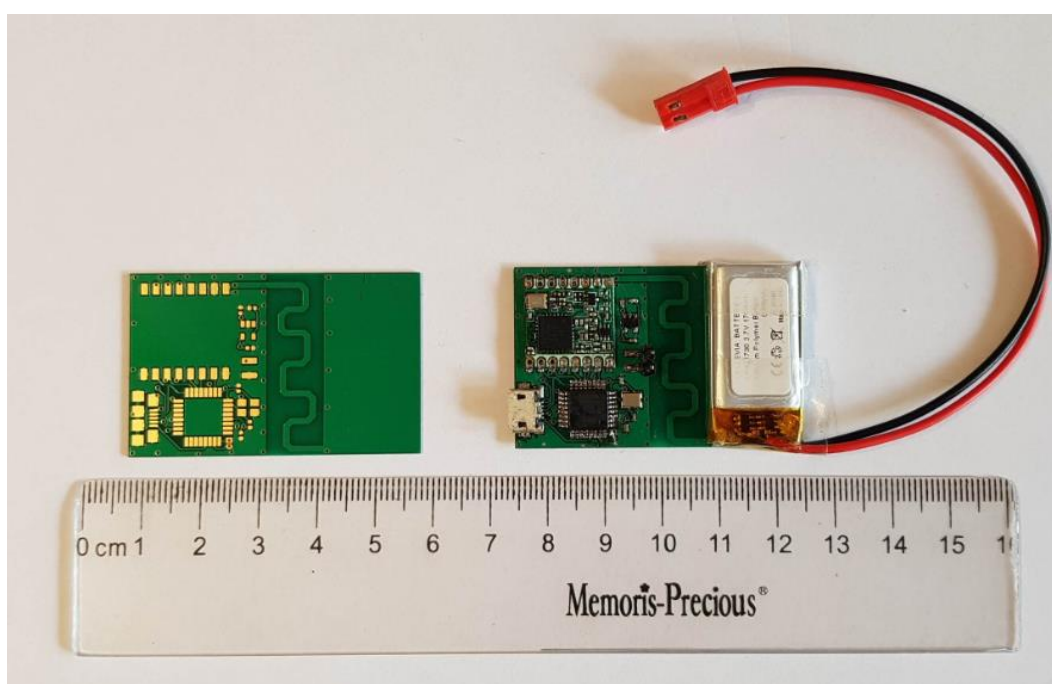


Figura 3.5 – Antena miniaturală proiectată în tehnologie PCB

Componentele plăcuței:

- Microcontroller Atmega328P pe 8 biți (identic cu cel folosit de Arduino Nano)
- Transmițător LoRa RFM96
- Baterie Li Po 3.7 V
- Conector microUSB

3.2 CONECTAREA MODULELOR REȚELEI

Înainte de a conecta transmițătorul RFM96 la plăcuța Arduino, respectiv Raspberry Pi (prin intermediul plăcuței de extensie Dragino) este necesară o scurtă descriere a felului în care funcționează protocolul SPI folosit la comunicația între chip-ul LoRa și microcontroller pentru transmisia datelor.

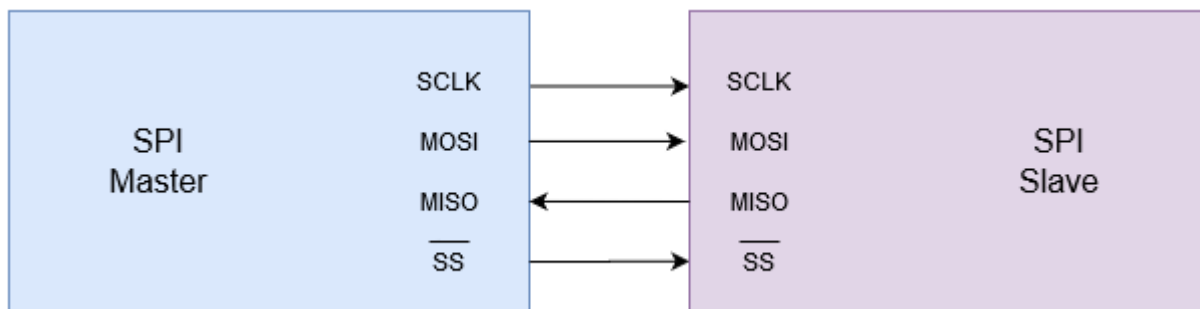


Figura 3.6 – Interfața SPI de comunicație

SPI este un protocol ce permite comunicația serială asincronă full-duplex [35] pe distanță scurtă, utilizat cu precădere în sistemele integrate. Protocolul folosește o arhitectură de tip master-slave și 4 tipuri de semnale pentru sincronizare și transmisia datelor:

- SCLK este semnalul de ceas care provine de la master
- MOSI este semnalul folosit pentru transmisia serială a biților de la master la slave
- MISO este semnalul folosit pentru transmisia serială a biților de la slave la master
- SS, activ în zero, (denumit și CS) este folosit pentru a semnaliza slave-ului că master-ul urmează să transmită date

SPI este implementat hardware și facilitează semnificativ schimbul de date între microcontroller și modemul LoRa, dezvoltatorul nefiind nevoit să definească singur un protocol de comunicație. Debitul poate atinge valori de până la 25 MB/s, singurul dezavantaj fiind că sunt necesari 4 pini pentru a folosi SPI.

3.2.1 Pornirea și înregistrarea gateway-ului în rețeaua TTN

După simpla conectare dintre Raspberry Pi și plăcuța de extensie Dragino, se poate folosi codul de tip sursă deschisă [36] care poate fi compilat și rulat pe sistemul de operare Raspbian. Singurele modificări necesare sunt cele din fișierul *global_conf.json* unde sunt setați pinii folosiți, denumirea gateway-ului, coordonatele sale geografice și parametrii radio folosiți de LoRa.

Trebuie făcută o mențiune importantă: modelul de gateway implementat în lucrarea de față este unul simplu, care permite comunicația pe doar 2 canale radio din cele 9 disponibile. Chiar și așa, se poate proiecta un prototip complet funcțional care să pună în valoare caracteristicile rețelei LoRaWAN. Gateway-urile care pot folosi toate cele 9 canale depășesc bugetul proiectului.

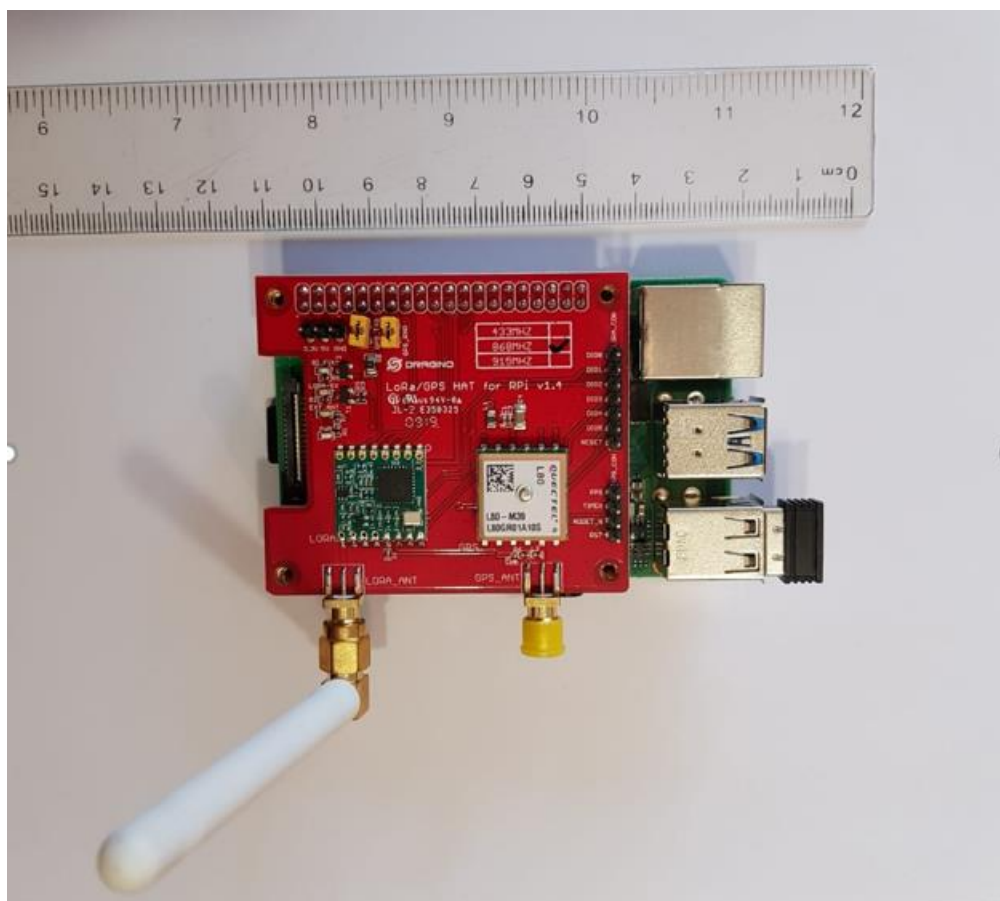


Figura 3.7 – Gateway LoRa implementat cu Raspberry Pi și Dragino LoRa / GPS_HAT

Pentru a înregistra gateway-ul în rețeaua TTN este necesar codul de identificare generat pe baza adresei MAC a dispozitivul hardware. Acesta este folosit pentru identificarea în mod unic a gateway-urilor LoRaWAN la nivel global.

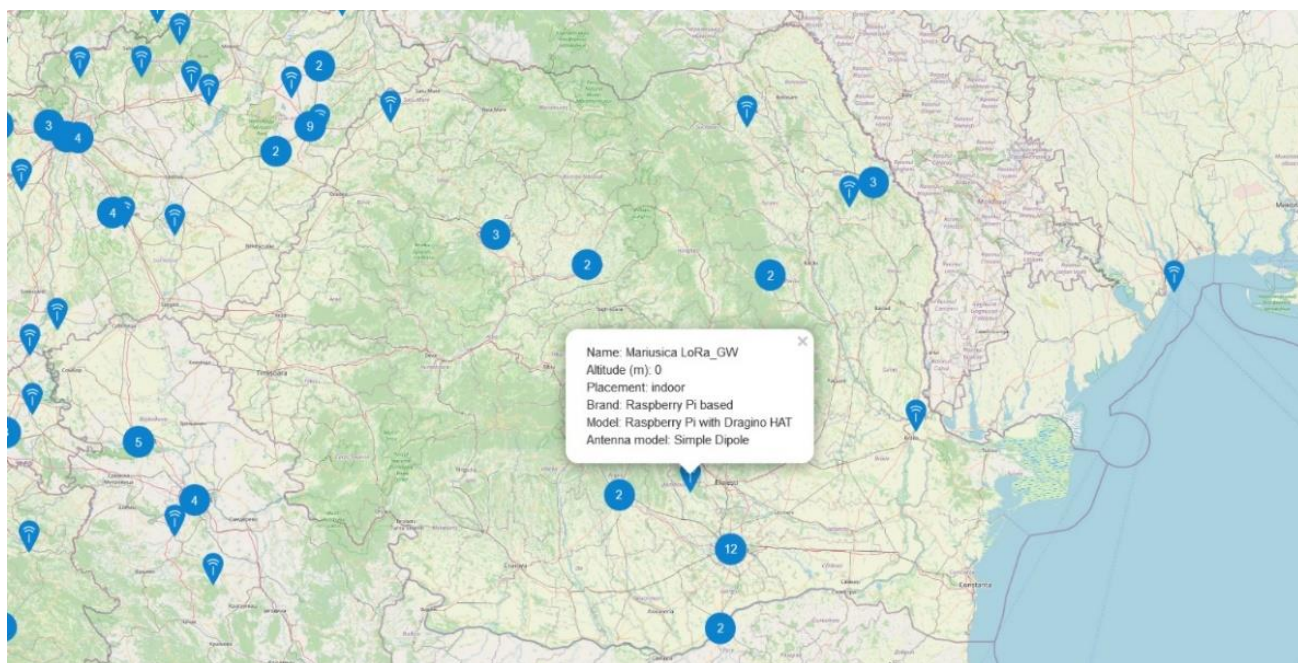


Figura 3.8 – Gateway-ul a fost înregistrat în rețeaua globală TTN

Odată ce gateway-ul a fost înregistrat, acesta poate fi folosit de orice nod LoRaWAN pentru a trimite date, indiferent de proveniența dispozitivelor. Acest lucru încurajează alți utilizatori să își dezvolte propria rețea LoRaWAN care să le deservească proiectele, nemaifiind necesar să dezvolte propriul gateway: infrastructura este deja utilizabilă. Astfel, devine din ce în ce mai clară importanța restricțiilor din subcapitolul 1.4.2, restricții care limitează drastic timpul de transmisiune al dispozitivelor pentru a scădea interferențele care apar odată cu creșterea numărului de noduri din rețea.

3.2.2 Configurarea nodului LoRa controlat cu Arduino Uno

Aceeași interfață SPI este folosită pentru comunicația dintre circuitul RF96M și Arduino, însă de data aceasta nu am mai folosit o plăcuță de extensie, ci am conectat pur și simplu pinii circuitelor cu fire, așa cum se poate observa în *Figura 3.9*. În locul unei antene dedicate, a fost folosit un simplu fir. Chiar dacă eficiența antenei improvizate lasă mult de dorit, sistemul funcționează fără probleme atunci când nodul se află în apropierea gateway-ului.

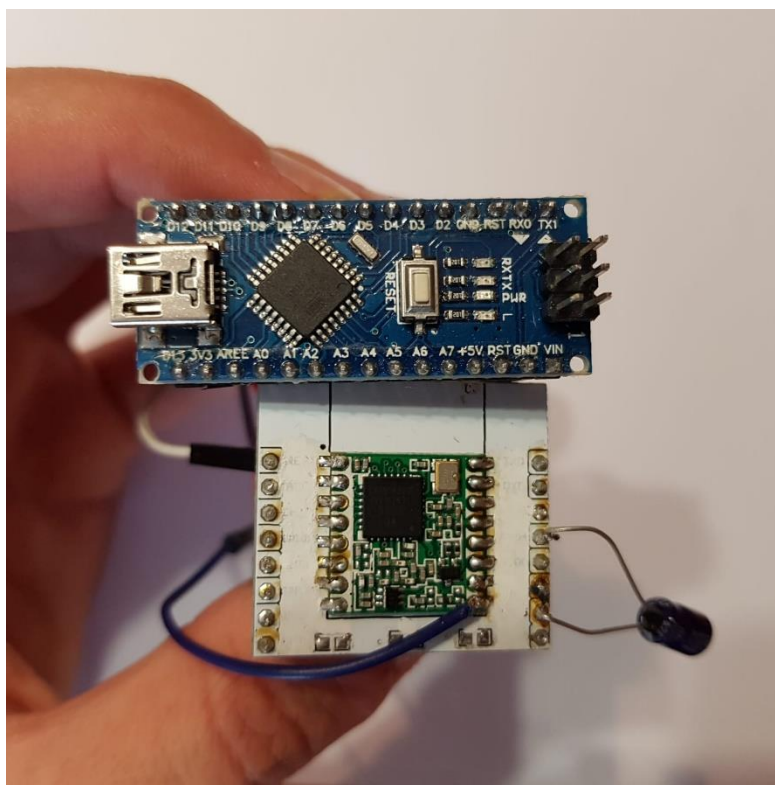


Figura 3.9 – Nod LoRa folosit pentru testarea rețelei

Așa cum am menționat mai sus, gateway-ului are doar 2 canale radio utilizabile. Drept urmare, a fost necesară folosirea ABP ca tehnică de activare a nodului. Acest lucru permite testarea funcționalității rețelei cu gateway-ul curent, fără să limiteze implementarea ulterioară cu OTAA, recomandabil dacă se dorește lansarea comercială aplicației datorită ceințelor de securitate.

Pentru a pune în funcțiune nodul LoRa bazat pe Android Nano, a fost folosit codul din sursa [37] bazat pe API-ul dezvoltat de Laboratorul IBM de Cercetare din Zürich, Elveția și ulterior modificat de Matthijs Kooijman pentru a fi compatibil pe platformele Arduino. La origine, API-ul a fost gândit să funcționeze modular, astfel că implementarea nu este specifică unei platforme hardware anume,

portabilitatea lui fiind asigurată de simpla rescriere a bibliotecii HAL în funcție de dispozitivul folosit. Codul rulat de microcontroller-ul Atmega328P este bazat 3 biblioteci din API-ul menționat mai sus:

- *lmic.h* implementează efectiv protocolul de comunicație LoRaWAN, asigurând sincronizarea
- *SPI.h* are rolul de a asigura comunicația SPI descrisă la începutul subcapitolului 3.2
- *hal.h* asigură interfațarea dintre dispozitivul specific hardware folosit (în cazul de față Arduino) și biblioteca *lmic.h*

Exemplul de program pentru comunicația LoRa găsit în documentația de mai sus a fost adaptat pentru a funcționa cu un gateway cu doar 2 canale radio. Mai mult decât atât, se folosește modul de activare ABP pentru nod, OTAA fiind indisponibil deoarece necesită un gateway capabil să folosească toate cele 9 canale radio folosite de LoRa în Europa.

După ce am adăugat în codul de mai sus cheia sesiunii de rețea și cheia sesiunii de aplicație generate de TTN și descrise în subcapitolul 1.3, am reușit să transmit cu succes pachete de test. Acestea au fost preluate de gateway și transmise server-ului TTN, așa cum se poate observa în *Figura 3.10*, folosind consola TTN disponibilă online oricărui dezvoltator care dorește folosirea rețelei LoRaWAN.

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt	
▲ 13:28:00	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	61.7	7	dev addr: 26 01 11 1F payload size: 26 bytes
▲ 13:27:06	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	61.7	6	dev addr: 26 01 11 1F payload size: 26 bytes
▼ 13:24:54	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	46.3	0	dev addr: 26 01 11 1F payload size: 15 bytes
▲ 13:24:53	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	61.7	4	dev addr: 26 01 11 1F payload size: 26 bytes
▲ 13:23:51	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	61.7	3	dev addr: 26 01 11 1F payload size: 26 bytes
▲ 13:22:54	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	61.7	2	dev addr: 26 01 11 1F payload size: 26 bytes
▲ 13:21:56	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	61.7	1	dev addr: 26 01 11 1F payload size: 26 bytes
▲ 13:20:51	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	61.7	0	dev addr: 26 01 11 1F payload size: 26 bytes

Figura 3.10 – Pachetele transmise de nod au fost primite de serverul TTN

Pachetele de mai sus au fost transmise pe canalul centrat pe frecvența de $f = 863.3$ MHz, modulație LoRA, lățime de bandă $BW = 125$ KHz, factor de împrăștiere $SF = 7$, rata codului $CR = 4/5$ și mărime de 26 de octeți. Adresa dispozitivului atestă, pe lângă pustietatea morenară cu văzduh virgin la asemenea modulație până în momentul de față, că pachetele au fost într-adevăr transmise de dispozitivul Arduino propriu.

3.3 DEZVOLTAREA UNEI APLICAȚII DE MĂSURARE A TEMPERATURII

Folosind ca punct de plecare un exemplu de proiect („ttn-abp” din [37]) care folosea tipul de activare ABP pentru a transmite pachete de test, am modificat codul astfel încât să fie compatibil cu un gateway care lucrează doar cu două canale. În plus, am adăugat o nouă funcționalitate, folosind senzorul integrat de temperatură din microcontroller-ul Atmega328P pentru a măsura temperatura din interiorul chip-ului.

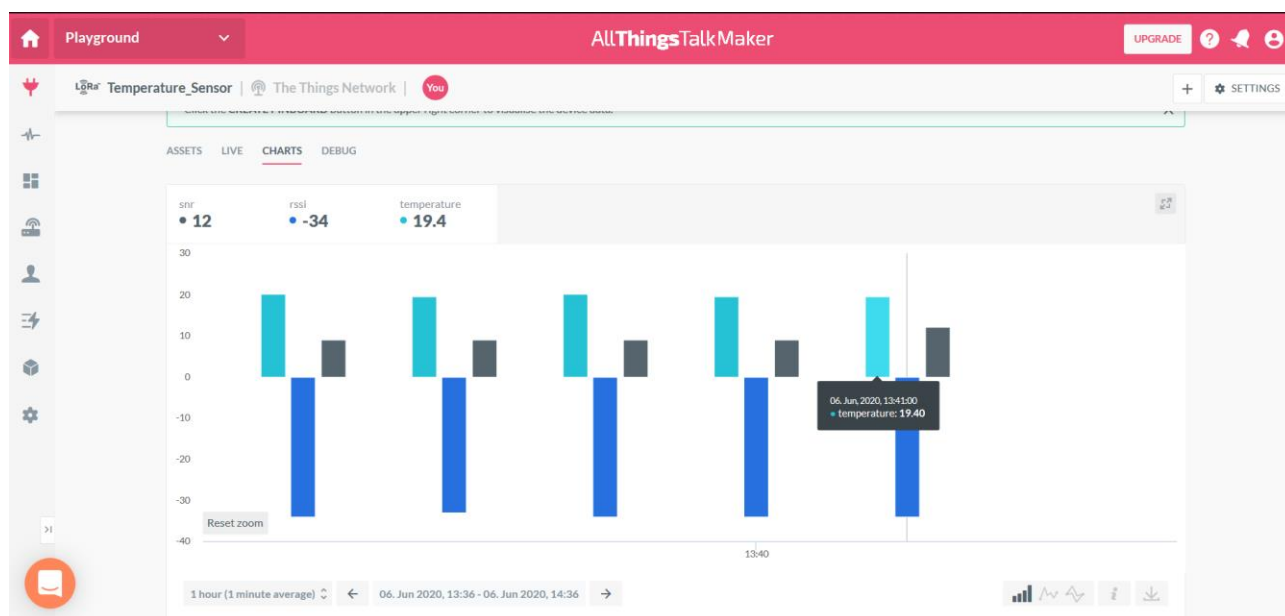


Figura 3.11 – Interfața web de înregistrare a datelor primite de gateway

Chiar dacă senzorul nu este exact, eroarea absolută fiind de ± 10 °C [38], aplicația demonstrează facilitatea transmisiei de date folosind LoRaWAN. Pachetul criptat transmis de nod cu valoarea temperaturii este recepționat de gateway-ul configurat în secțiunea 3.2.1, care, la rândul său transmite datele unui server TTN. Pentru a realiza afișarea datelor, serverul TTN transmite mai departe pachetul platformei „allthingstalk.com” care permite afișarea facilă a temperaturii, împreună cu raportul semnal-zgomot și nivelul RSSI. Valorile ultimilor 2 parametri nu se modifică în timp deoarece nodul nu își modifică poziția față de gateway.

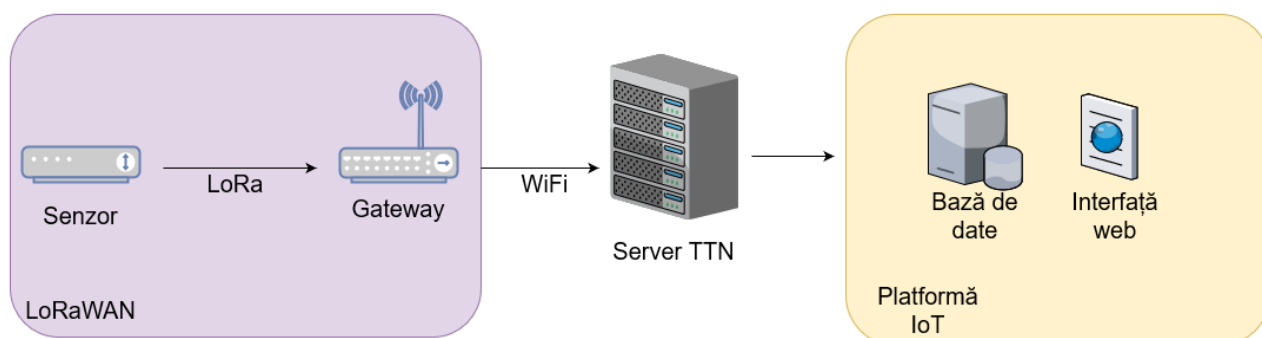


Figura 3.12 – Configurația sistemului IoT utilizat

În Figura 3.12 – Configurația sistemului IoT utilizat poate fi urmărit traseul parcurs de pachetele de date de la senzorul Arduino, până la cel mai înalt nivel, cel de reprezentare a datelor pe platforma dedicată IoT. De asemenea, Anexa cuprinde codul utilizat de microcontroller-ul nodului LoRa.

CONCLUZII ȘI POSIBILE ÎMBUNĂTĂȚIRI

Obiectivul principal al lucrării – proiectarea unei antene miniaturale pentru banda de frecvență ISM centrată pe 868 MHz – a fost atins, fiind îndeplinită și condiția ca valoarea coeficientului de reflexie să nu depășească -6 dB în banda de trecere. Chiar dacă antena nu a fost folosită în rețeaua LoRaWAN configurată, măsurarea coeficientului de reflexie demonstrează performanța modelului proiectat.

Cea mai mare provocare în proiectarea antenei a fost etapa de miniaturizare (secțiunile 2.5 – 2.7), în care s-a făcut tranziția de la modelul conceptual IFA la modelul miniatural propriu-zis. În acest scop au fost necesare cunoștințe ale teoriei liniei de transmisiune, studiul anumitor articole al căror scop era miniaturizarea antenelor microstrip, dar și un model de dezvoltare empiric, bazat pe încercare și eroare în simularea numerică. Efortul depus în această parte a proiectului a fost răsplătit prin obținerea unui model de antenă miniaturizat și ușor de integrat cu dimensiunile elementului radiativ de doar $0,09 \times 0,03 \lambda$. Astfel, restul suprafeței plăcuței electronice poate fi folosit pentru alte componente.

Printre posibilele dezvoltări ulterioare ale proiectului se numără:

- Optimizarea antenei pentru funcționarea în banda de frecvență americană (902-928 MHz).
- Dezvoltarea unui alt model miniaturizat care să funcționeze în banda de frecvență folosită de LoRa în China (486-506 MHz).
- Posibilitatea de a miniaturiza și mai mult modelul, realizând un compromis între dimensiunile reduse și eficiența totală, în funcție de cerințele unei aplicații specifice.
- Accesul la o cameră anecoidă ar permite măsurarea și altor parametri ai antenei, cum ar fi eficiența totală și câștigul, oferind posibilitatea unei cuantificări mai exacte a performanțelor.

În ce privește configurarea rețelei LoRaWAN, aceasta s-a dovedit o alegere fiabilă pentru transmisiunea fără fir a datelor colectate de un senzor. Folosind resurse minime (microcontroller de 8 biți pentru implementarea nodului) și având acces la cod de tip sursă deschisă, a fost posibilă dezvoltarea unei aplicații funcționale de transmitere a datelor și afișarea acestora prin intermediul unei interfețe web intuitive destinate platformelor IoT. În plus, deschiderea unui gateway LoRa (singurul din orașul meu) încurajează alți dezvoltatori să lanseze propriile aplicații.

În concluzie, prin proiectarea unui mic, dar important element pentru un sistem IoT, a fost explorată o gamă largă de cunoștințe care cuprind, dar nu se limitează la: modelarea câmpului electromagnetic de înaltă frecvență, programarea sistemelor integrate, înțelegerea și folosirea unui protocol specific de comunicație fără fir.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Electronic Communications Committee (ECC), „ECO Documentation Database, pp. 94,” 2019. [Interactiv]. Disponibil: ECO Documentation Database. [Accesat 10 04 2020].
- [2] C. A. Balanis, Antenna Theory – Analysis and Design, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [3] Semtech, 06 10 2019. [Interactiv]. Disponibil: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [4] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen și W. M. Townsley, „A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,” *Sensors, ResearchGate*, p. 4, 2016.
- [5] LoRa Alliance, Ianuarie 2018. [Interactiv]. Disponibil: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf. [Accesat 6 Octombrie 2019].
- [6] Semtech, „Curs introductiv LoRa,” 2016. [Interactiv]. Disponibil: <https://lora-developers.semtech.com/resources/lorawan-academy/courses/adaptive-data-rate>. [Accesat 7 Octombrie 2019].
- [7] S. Ghosly, „LoRa Chirp Spread Spectrum Modulation,” 2017. [Interactiv]. Disponibil: <https://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>. [Accesat 7 Octombrie 2019].
- [8] The Things Network, „Duty Cycle for LoRaWAN Devices,” [Interactiv]. Disponibil: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle.html>. [Accesat 7 Octombrie 2019].
- [9] Semtech, „Curs introductiv LoRa - clase de funcționare,” [Interactiv]. Disponibil: <https://lora-developers.semtech.com/resources/lorawan-academy/courses/end-devices-types-of-operation>. [Accesat 11 04 2020].
- [10] LoRa Alliance, „LoRa Security Whitepaper,” 2017. [Interactiv]. Disponibil: https://lora-developers.semtech.com/uploads/static/LoRaWAN_Security.pdf. [Accesat 11 04 2020].
- [11] Semtech, „Best Practices: The Join Procedure,” [Interactiv]. Disponibil: <https://lora-developers.semtech.com/resources/lorawan-academy/courses/best-practices-the-join-procedure>. [Accesat 04 13 2020].
- [12] U. Noreen, A. Bounceur și L. Clavier, „A Study of LoRa Low Power and Wide Area Networks,” în *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing*, 2017.
- [13] LoRa Alliance, „NB-IoT vs LoRa,” 2016. [Interactiv]. Disponibil: https://eleven-x.com/wp-content/uploads/2018/04/LoRa-Alliance-Whitepaper_NBIoT_vs_LoRa.pdf. [Accesat 12 04 2020].
- [14] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro și B. Martinez, „Understanding the limits of LoRaWAN,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, nr. 9, pp. 5-6, 2017.
- [15] The Things Network, „LoRaWAN distance world record broken, twice,” 2019. [Interactiv]. Disponibil: <https://www.thethingsnetwork.org/article/lorawan-distance-world-record>. [Accesat 14 04 2020].
- [16] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, M. Pettissalo și A. Roivainen, „On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology,” *14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, p. 4, 2015.

- [17] The Things Network, „Duty Cycle,” [Interactiv]. Disponibil: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle.html#maximum-duty-cycle>. [Accesat 15 04 2020].
- [18] European Standard, „ETSI EN 300 220-1 V2.4.1,” [Interactiv]. Disponibil: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022001/02.04.01_40/en_30022001v020401o.pdf. [Accesat 15 04 2020].
- [19] K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi și T. Hänninen, „Analysis of the Capacity and Scalability of the LoRa Wide Area Network Technology,” *European Wireless (EW)*, p. 4, 2016.
- [20] LoRa Alliance, „Geolocation Whitepaper,” 2018. [Interactiv]. Disponibil: https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/geolocation_whitepaper.pdf. [Accesat 15 04 2020].
- [21] C. A. Balanis, „1.2 Types of antennas,” în *Antenna Theory – Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 2005, pp. 4-7.
- [22] C. A. Balanis, „Fundamental Parameters of antennas,” în *Antenna Theory – Analysis and Design*, Wiley & Sons, 2005.
- [23] Antenna Theory, „Antenna Efficiency,” [Interactiv]. Disponibil: <http://www.antenna-theory.com/basics/efficiency.php>. [Accesat 2020 05 25].
- [24] K. Yee, „Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 302-307, May 1966.
- [25] L. H. Trinh et al., „Miniature antenna for IoT devices using LoRa technology,” *2017 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, pp. 170-173.
- [26] A. Reha, Y. Mejdoub, A. Elamri și M. Tarbouch, „A Compact PIFA Antenna for Internet of Things Network LoRaWAN at 900 MHz Band,” 2019.
- [27] Ferrero et al., „Miniature Multiband Inverted-F Antenna over an Electrically Small Ground Plane for Compact IoT Terminals,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 1-8, 2018.
- [28] Taoglas, „Foaie de catalog ISMP.868.35.6.A.02,” [Interactiv]. Disponibil: <https://www.taoglas.com/datasheets/ISMP.868.35.6.A.02.pdf>. [Accesat 15 06 2020].
- [29] Taoglas, „Foaie de catalog ILA.08,” [Interactiv]. Disponibil: <https://cdn3.taoglas.com/datasheets/ILA.08.pdf>. [Accesat 15 06 2020].
- [30] Raspberry Pi Foundation, „Raspberry Pi 4 Computer,” [Interactiv]. Disponibil: <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/200206+Raspberry+Pi+4+1GB+2GB+4GB+Product+Brief+PRINT.pdf>. [Accesat 24 04 2020].
- [31] Dragino, „Lora/GPS HAT,” [Interactiv]. Disponibil: https://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora/GPS_HAT. [Accesat 24 04 2020].
- [32] Arduino, „Arduino Nano,” [Interactiv]. Disponibil: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>. [Accesat 04 04 2020].
- [33] Hope RF, „Foaie de catalog transmițător RFM95,” [Interactiv]. Disponibil: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/8/0/4/RFM95_96_97_98W.pdf. [Accesat 25 04 2020].
- [34] Semtech, „Foaie de catalog SX1276,” [Interactiv]. Disponibil: https://semtech--c.na98.content.force.com/sfc/dist/version/download/?oid=00DE0000000JelG&ids=0682R000005PU7fQAG&d=%2Fa%2F2R0000001OKs%2FBs97dmPXeatnbdoJNVMDaKDIQz8q1N_gxDcgqi7g2o&operationContext=DELIVERY&asPdf=true&viewId=05H2R0000003qCB UAY&dpt=. [Accesat 24 04 2020].

- [35] Motorola, „SPI BLock Guide v03.06,” [Interactiv]. Disponibil: https://web.archive.org/web/20150413003534if_/http://www.ee.nmt.edu:80/~teare/ee308l/datasheets/S12SPIV3.pdf. [Accesat 25 04 2020].
- [36] „Dual Channel LoRaWAN Gateway Up and Downlink,” [Interactiv]. Disponibil: https://github.com/bokse001/dual_chan_pkt_fwd/tree/dual_chan_pkt_fwd_up_down. [Accesat 25 04 2020].
- [37] IBM Zurich Research Laboratory și M. Kooijman, „Arduino-LMIC library,” [Interactiv]. Disponibil: <https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic>. [Accesat 27 04 2020].
- [38] Microchip, „AVR122: Calibration of the AVR's Internal Temperature Reference,” [Interactiv]. Disponibil: http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Atmel-8108-Calibration-of-the-AVRs-Internal-Temperature-Reference_ApplicationNote_AVR122.pdf. [Accesat 15 06 2020].

ANEXĂ

```
/* *****
 * Copyright (c) 2015 Thomas Telkamp and Matthijs Kooijman
 *
 * Permission is hereby granted, free of charge, to anyone
 * obtaining a copy of this document and accompanying files,
 * to do whatever they want with them without any restriction,
 * including, but not limited to, copying, modification and redistribution.
 * NO WARRANTY OF ANY KIND IS PROVIDED.
 *
 * Acest cod a fost modificat pentru a putea transmite temperatura folosind
 * senzorul intern de temperatura din microcontroller-ul AtMega328, de pe
 * o placuta Arduino Nano conectata la un modul de transmisiune LoRa.
 *
 * Codul foloseste metoda de activare ABP (Activation-by-Personalization)
 ***** */

#include <lmic.h>
#include <hal/hal.h>
#include <SPI.h>

// Cheia sesiunii de retea generata de consola TTN la inregistrarea dispozitivului
static const PROGMEM u1_t NWKKEY[16] = { 0x24, 0x32, 0x93, 0x5D, 0xCF, 0x27,
0x25, 0xDA, 0x87, 0x44, 0x35, 0x8D, 0x9A, 0x42, 0xAD, 0xAB };

// Cheia sesiunii de aplicatie generata de consola TTN la inregistrarea
dispozitivului
static const u1_t PROGMEM APPKEY[16] = { 0xDB, 0xEF, 0xF3, 0xE3, 0xC4, 0x49,
0x3C, 0xA6, 0xC8, 0x98, 0x50, 0xA8, 0xE3, 0xC0, 0xFB, 0xCF };

// Adresa unica a dispozitivului, utilizata de gateway pentru a transmite datele
primate de nod catre serverul aplicatiei
static const u4_t DEVADDR = 0x26011A32;

// Prototipuri de functie utilizate in cazul activarii OTAA
// Nu pot fi sterse complet deoarece acest lucru genereaza erori
void os_getArtEui (u1_t* buf) { }
void os_getDevEui (u1_t* buf) { }
void os_getDevKey (u1_t* buf) { }

static osjob_t sendjob;
uint8_t temperature[] = "20.20"; // vector utilizat pentru transmiterea temperaturii
cu functia LMIC_setTxData2()

// Intervalul de timp in secunde la care este transmis un pachet
const unsigned TX_INTERVAL = 60;
// Conexiunea pinilor depinde de modul de conectare dintre Arduino Nano si modului
de transmisiune LoRa
const lmic_pinmap lmic_pins = {
    .nss = 10,
    .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
    .rst = 9,
    .dio = {6, 5, 4},
};

int channel = 0; //canal corespunzator frecventei 868.1 Mhz
```

```

int dr = DR_SF7; //Factor de imprastiere SF 7

//Functii citire temperatura

long read_temp()
{
    // Citeste temperatura senzorului
    ADMUX = _BV(REFS1) | _BV(REFS0) | _BV(MUX3);
    // Conversie analog-digitala
    ADCSRA |= _BV(ADEN) | _BV(ADSC);
    // Detecteaza sfarsitul conversiei
    while (bit_is_set(ADCSRA,ADSC));
    // Returneaza valoarea necalibrata a temperaturii
    return ADCL | (ADCH << 8);
}

// Converteste temperatura citita in format virgula mobila
double conv_temp(long raw_temp)
{
    return((raw_temp - 324.31) / 1.22); //coeficienti de calibrare calculati de
    producatorul microcontroller-ului
}

// Dezactiveaza toate canalele in afara de cel folosit
// deoarece gateway-ul utilizeaza un singur canal
void forceTxSingleChannelDr() {
    for(int i=0; i<9; i++) {
        if(i != channel) {
            LMIC_disableChannel(i);
        }
    }
    // Seteaza factorul de imprastiere folosit si puterea de transmisiune in dBm
    LMIC_setDrTxpow(dr, 14);
}

void onEvent (ev_t ev) {
    Serial.print(os_getTime());
    Serial.print(": ");
    switch(ev) {
        case EV_SCAN_TIMEOUT:
            Serial.println(F("EV_SCAN_TIMEOUT"));
            break;
        case EV_BEACON_FOUND:
            Serial.println(F("EV_BEACON_FOUND"));
            break;
        case EV_BEACON_MISSED:
            Serial.println(F("EV_BEACON_MISSED"));
            break;
        case EV_BEACON_TRACKED:
            Serial.println(F("EV_BEACON_TRACKED"));
            break;
        case EV_JOINING:
            Serial.println(F("EV_JOINING"));
            break;
        case EV_JOINED:
            Serial.println(F("EV_JOINED"));
            break;
        case EV_RFU1:
            Serial.println(F("EV_RFU1"));
            break;
        case EV_JOIN_FAILED:

```

```

        Serial.println(F("EV_JOIN_FAILED"));
        break;
    case EV_REJOIN_FAILED:
        Serial.println(F("EV_REJOIN_FAILED"));
        break;
    case EV_TXCOMPLETE:
        Serial.println(F("EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)"));
        if (LMIC.txrxFlags & TXRX_ACK)
            Serial.println(F("Received ack"));
        if (LMIC.dataLen) {
            Serial.println(F("Received "));
            Serial.println(LMIC.dataLen);
            Serial.println(F(" bytes of payload"));
        }
        // Programeaza urmatoarea transmisiune
        os_setTimedCallback(&sendjob, os_getTime()+sec2osticks(TX_INTERVAL),
do_send);
        break;
    case EV_LOST_TSYNC:
        Serial.println(F("EV_LOST_TSYNC"));
        break;
    case EV_RESET:
        Serial.println(F("EV_RESET"));
        break;
    case EV_RXCOMPLETE:
        // Slot de asteptare pentru Clasa A de dispozitive pentru mesaje pe
legatura descendenta
        Serial.println(F("EV_RXCOMPLETE"));
        break;
    case EV_LINK_DEAD:
        Serial.println(F("EV_LINK_DEAD"));
        break;
    case EV_LINK_ALIVE:
        Serial.println(F("EV_LINK_ALIVE"));
        break;
    default:
        Serial.println(F("Unknown event"));
        break;
    }
}

void do_send(osjob_t* j){
    double sensorData = conv_temp(read_temp()); //citeste temperatura senzorului
    Serial.println(sensorData, 2);
    char TempString[6]; // variabila auxiliara pentru conversie float -> char
    dtostrf(sensorData,2,2,TempString); //conversie temperatura float -> char
    Serial.println(TempString);
    temperature[0] = (unsigned char) TempString[0]; //conversie temperatura
char-> unsigned char
    temperature[1] = (unsigned char) TempString[1];
    temperature[2] = (unsigned char) TempString[2];
    temperature[3] = (unsigned char) TempString[3];
    temperature[4] = (unsigned char) TempString[4];
    if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND) {
        Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not sending"));
    } else {
        // Pregateste transmisiunea pe cale ascendenta
        LMIC_setTxData2(1, temperature, sizeof(temperature)-1, 0);
        Serial.println(F("Packet queued"));
    }
}

```

```

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Serial.println(F("Starting"));

    #ifdef VCC_ENABLE
    pinMode(VCC_ENABLE, OUTPUT);
    digitalWrite(VCC_ENABLE, HIGH);
    delay(1000);
    #endif

    // Functii de initializare din biblioteca lmic.h
    os_init();
    LMIC_reset();

    // Seteaza cheile folosite in sesiune de transmisie
    #ifdef PROGMEM
    // In cazul AVR, aceste valori trebuie tranferate din memoria
    // flash in memoria RAM
    uint8_t appskey[sizeof(APPSKEY)];
    uint8_t nwkskey[sizeof(NWKSKEY)];
    memcpy_P(appskey, APPSKEY, sizeof(APPSKEY));
    memcpy_P(nwkskey, NWKSKEY, sizeof(NWKSKEY));
    LMIC_setSession (0x1, DEVADDR, nwkskey, appskey);
    #else
    LMIC_setSession (0x1, DEVADDR, NWKSKEY, APPSKEY);
    #endif

    #if defined(CFG_eu868)
    // Configureaza cele 8 canale de frecventa folosite de LoRa in Europa
    LMIC_setupChannel(0, 868100000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI);
    LMIC_setupChannel(1, 868300000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7B), BAND_CENTI);
    LMIC_setupChannel(2, 868500000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI);
    LMIC_setupChannel(3, 867100000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI);
    LMIC_setupChannel(4, 867300000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI);
    LMIC_setupChannel(5, 867500000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI);
    LMIC_setupChannel(6, 867700000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI);
    LMIC_setupChannel(7, 867900000, DR_RANGE_MAP(DR_SF12, DR_SF7), BAND_CENTI);
    LMIC_setupChannel(8, 868800000, DR_RANGE_MAP(DR_FSK, DR_FSK), BAND_MILLI);
    #elif defined(CFG_us915)
    LMIC_selectSubBand(1);
    #endif

    LMIC_setLinkCheckMode(0);

    // Calea descendenta foloseste SF = 9
    LMIC.dn2Dr = DR_SF9;

    //Foloseste un singur canal datorita gateway-ului
    forceTxSingleChannelDr();

    //Eroare de sincronizare permisa in determinarea ferestrei RX2
    LMIC_setClockError (MAX_CLOCK_ERROR * 10/100);

    // Trimite pachetul pe calea ascendenta
    do_send(&sendjob);
}

void loop() {
    os_runloop_once();
}

```