

CSUD Nr. 4101N/06.08.2026

REFERAT CONDUCĂTOR DE DOCTORAT (MEMORIU ȘTIINȚIFIC)

Subsemnatul prof. univ. dr. ing. Valentin POPA, având funcția didactică de profesor universitar la Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor din cadrul Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava, am evaluat în calitate de **conducător de doctorat** teza de doctorat intitulată

Contribuții în domeniul monitorizării spectrului de radiofrecvență pentru rețelele sistemelor IoT

elaborată de studentul doctorand Partemie-Marian MUTESCU

constatând următoarele aprecieri și concluzii.

Analiza tezei

Actualitatea temei lucrării de doctorat

Pe lângă sistemele de comunicații tradiționale care se dezvoltă permanent, cucerind benzi de frecvență în domenii din ce în ce mai înalte, spațiul radio s-a aglomerat semnificativ în zilele noastre și datorită dezvoltării rețelelor Internet of Things (IoT) care, uzual, operează în spectrul radio cuprins între 400 MHz și 6GHz. Uzual, aceste rețele IoT utilizează protocoale de comunicație precum LoRa, Sigfox sau Zigbee. În același timp, rețelele celulare utilizate pentru telefonie mobilă au trecut la integrarea unor servicii dedicate rețelelor IoT prin Narrowband IoT (NB-IoT) și prin noi servicii de tip Massive Machine-Type Communications (mMTC), o tehnologie cheie din rețelele 5G, concepută pentru a conecta simultan un număr masiv de dispozitive. După cum lesne constatăm astăzi, densitatea dispozitivelor conectate la nivel de celulă de telefonie mobilă a crescut semnificativ, standardul 5G specificând deja scenariile care prevăd densități de peste 1 mil dispozitive/km².

Majoritatea dispozitivelor IoT operează în spectrul radio deja menționat, preponderent în benzi de frecvență nelicențiate, dar care au o lărgime de bandă limitată atunci când o raportăm la numărul imens de dispozitive care utilizează resursele de spectru radio, neexistând încă un mecanism centralizat de coordonare a accesului la canalele de comunicație din aceste benzi nelicențiate. Toate acestea conduc la o limitare drastică a comunicațiilor și la creșterea considerabilă a ratei erorilor, ceea ce conduce în final la viteze efective de comunicații foarte

mici și chiar la imposibilitatea efectuării comunicațiilor cu dispozitivele IoT, în anumite intervale de timp.

Monitorizarea spectrului radio, în special în cadrul benzilor de frecvență nelicențiate se impune ca un instrument esențial în cadrul procesului de gestionare a resurselor din spectrul de radiofrecvență respectiv, caracterizat prin existența unor medii de comunicație diverse, în care coexistă mai multe tehnologii și protocoale de comunicații radio afectate sistematic de condițiile radio variabile și de multiple interferențe.

Prin lucrarea sa de doctorat, doctorandul tratează o temă de cercetare care vizează evaluarea unor metode moderne de monitorizare și analiză a spectrului radio adaptate noilor cerințe legate de apariția numeroaselor sisteme IoT, analizând atât tehnici clasice de monitorizare a spectrului radio cât și acele abordări bazate pe algoritmi AI. Doctorandul identifica și răspunde unor provocări actuale legate de caracterul limitat al spectrului radio și de complexitatea tot mai ridicată a mediului radio, determinată de coexistența multiplelor protocoale de comunicație radio în benzi nelicențiate. Scopul principal al tezei l-a reprezentat, pe lângă o riguroasă fundamentare teoretică, introducerea, dezvoltarea și validarea experimentală a unor tehnici avansate de monitorizare a spectrului radio, orientate către aplicațiile IoT, care, ulterior să poată fi extinse către alte tehnologii emergente.

În **Capitolul II** al tezei de doctorat, doctorandul face o trecere în revistă a tehnicilor de monitorizare a spectrului radio, începând de la metodele clasice, precum tehnica de detectare a nivelului de energie primit (Energy Detection – ED), până la metode avansate bazate pe algoritmi AI. Doctorandul evidențiază avantajele și limitările tehnicilor tradiționale, în special dependența de estimarea corectă a nivelului de zgomot și furnizarea unei decizii binare privind starea canalului radio. O atenție specială este acordată principalele categorii de algoritmi AI și aplicabilității lor în monitorizarea spectrului radio, în special pentru operarea în benzi nelicențiate și în situația unor regimuri de raport semnal zgomot (SNR) scăzut.

În **Capitolul III** doctorandul propune o primă contribuție legată de o îmbunătățire a tehnicii clasice ED prin integrarea unui algoritm AI în lanțul de procesare a semnalelor și propune o arhitectură hibridă în care o rețea neuronală de tip feed-forward estimează componenta de zgomot a semnalului recepționat, permițând actualizarea dinamică a pragului de detecție utilizat în cadrul acestei tehnici de detectare. Fiind implicat un algoritm AI și o rețea neuronală, lucrarea propune o metodologie de generare a setului de date utilizat pentru antrenarea rețelei și o analiză

comparativă a mai multor configurații ale rețelei neuronale, împreună cu evaluarea performanței sistemului propus în raport cu un caz ideal în care valorile SNR sunt cunoscute la nivelul receptorului. Rezultatele ne arată că metoda propusă conduce la obținerea unor performanțe comparabile sau superioare în regimuri de SNR scăzut, demonstrând astfel capacitatea algoritmului AI de a estima adaptiv varianța zgomotului chiar și în absența unor informații cunoscute anterior pentru respectivul canal de comunicații. Totuși, concluzia acestor cercetări ne arată că, deși integrarea AI crește performanța tehnicii ED în medii radio în care zgomotul și transmisiile radio sunt variabile, aceasta metodă rămâne limitată prin natura sa binară.

În **Capitolul IV** al tezei de doctorat sunt cercetate posibilitățile utilizării metodelor bazate pe algoritmi AI și implementarea unor algoritmi AI aplicați în cadrul unor metode avansate de detecție pentru monitorizarea spectrului radio în rețele IoT, care utilizează serii temporale în fază și cuadratură (IQ). După ce realizează o analiză comparativă a tehnicilor clasice de învățare automată utilizate pentru clasificarea modulațiilor radio, evidențiind limitările acestora, doctorandul ne propune o metodă pentru generarea unui set de date sintetic dedicat comunicațiilor IoT, construit prin simularea condițiilor realiste de propagare. O abordare nouă și interesantă este legată de includerea în aceasta nouă metodă a unei clase (cu set de date specific) asociată lipsei semnalelor radio pe canalul de comunicație.

Pe baza acestui set de date, doctorandul proiectează și antrenează o arhitectură de tip Convolutional Neural Network (CNN) pentru clasificarea modulațiilor radio, obținând performanțe ridicate atât în evaluarea empirică (~98% acuratețe), cât și în scenarii reale de inferență radio. În continuare, doctorandul ne propune o arhitectură hibridă care include tehnici clasice de procesare a semnalelor radio cu algoritmi AI, permițând detecția și clasificarea simultană a mai multor transmisii radio într-o bandă largă de frecvență, precum și extragerea unor metrici avansate de analiză a spectrului radio (frecvență centrală, lățime de bandă, grad de ocupare). Rezultatele experimentale obținute în condiții reale demonstrează o rată de detecție de peste 96%, o precizie de peste 99% în clasificare și erori reduse în estimarea parametrilor semnalelor radio detectate, validând aplicabilitatea practică a soluției propuse pentru monitorizarea spectrului radio în comunicații IoT.

Capitolul V al lucrării de doctorat prezintă proiectarea, dezvoltarea și evaluarea arhitecturii de monitorizare a spectrului radio pentru comunicații IoT, bazată exclusiv pe algoritmi AI, utilizând reprezentări timp-frecvență ale semnalelor radio sub formă de spectrograme. Spre

deosebire de arhitecturile prezentate și evaluate anterior, această arhitectură are capacitatea de a detecta, clasifica și genera metrici de analiză a canalelor de comunicație exclusiv pe baza informațiilor furnizate de către algoritmul AI implementat. Doctorandul analizează pentru început limitările abordărilor convenționale, în special în cazul transmisiilor multiple justificând astfel tranziția către rețele neuronale de detecție a obiectelor din spectrograme, care devin astfel capabile să identifice, clasifice și să localizeze simultan mai multe transmisii radio în planul timp-frecvență. Dar diversele arhitecturi existente și diversele metrici ce pot fi luate în calcul nu conduc la rezultate similare. După ce realizează o analiză comparativă între diverse astfel de arhitecturi și metrici, doctorandul evidențiază avantajele soluțiilor de tip YOLO (o rețea neuronală bazată pe un algoritm de inteligență artificială de ultima generație) în ceea ce privește precizia, latența de inferență și scalabilitatea în aplicații de monitorizare a spectrului radio.

Pe baza acestor analize, doctorandul ne propune o arhitectură scalabilă de monitorizare a spectrului radio care integrează dispozitive SDR (Software Defined Radio). Ne sunt prezentate modurile cum sunt generate și augmentate seturilor de date, cum se realizează antrenarea, validarea și evaluarea lor într-o serie de scenarii de inferență în mediu real. Astfel constatăm că rețeaua neuronală a fost antrenată, validată și evaluată pe un set de date dezvoltat de către doctorand, fapt ce poate fi considerat o contribuție esențială la scalabilitatea arhitecturii de monitorizare a spectrului radio, facilitând extinderea continuă a seturilor de date pentru a include noi tehnologii de comunicație, chiar dacă, pentru aceasta, este necesară o reantrenare a algoritmului pentru fiecare nouă tehnologie care intervine în spectrul radio, limitare pe care doctorandul încearcă să o rezolve prin alte contribuții prezentate în următorul capitol. Chiar și așa, doctorandul concluzionează că această arhitectură propusă oferă un nivel superior de caracterizare a mediului radio comparativ cu tehnicile clasice.

Unele dintre cele mai interesante contribuții aduse de doctorand în cadrul temei cercetate sunt prezentate în **Capitolul VI** care propune o nouă paradigmă de monitorizare a spectrului radio bazată pe detecția zgomotului, cu scopul explicit de a crește capacitatea de generalizare a algoritmilor AI în medii radio eterogene. Așadar, în timp ce cea mai mare parte a cercetărilor din lume se concentrează pe soluții pe detectare a semnalelor care pot apărea pe diferite frecvențe, doctorandul se întreabă de ce să nu detectăm lipsa oricăror semnale pe anumite frecvențe și în anumite perioade de timp, adică de ce să nu detectăm zgomotul în loc de a încerca să detectăm semnalele utile. Pe cale de consecință, în antiteză cu abordările anterioare, în care transmisiile radio erau tratate drept obiecte de interes, iar zgomotul drept fundal, doctorandul ne propune o

metodologie inedită, inversată, în care transmisiile sunt considerate fundal, iar modelul AI este antrenat să detecteze și să localizeze regiunile de zgomot din spectrogramă. Această reformulare permite depășirea limitării fundamentale a modelelor de clasificare și detecție antrenate pe un set de date finit, specific semnalelor radio, apărând astfel posibilitatea de a detecta canale de comunicație libere indiferent de tehnologia radio folosită în transmisia semnalelor radio în domeniul de frecvență luat în considerare.

Folosind arhitectura propusă în această lucrare, rămâne ca principală problemă de rezolvat crearea unui set de date pentru antrenarea algoritmului IA. Astfel, doctorandul ne prezintă în acest capitol procesul de generare a respectivului set de date, care este format din 14.000 de spectrograme. În continuare, doctorandul propune o modelare a canalului de comunicație, o metodologie automată de adnotare a regiunilor de zgomot și, evident, antrenarea unui model de arhitectura YOLO în vederea detecției zgomotului, pe baza setului de date propus. Capacitatea de generalizare este analizată prin variația lății de bandă, a duratei spectrogramelor, a SNR-ului și prin testarea pe tehnologii neutilizate în procesul de antrenare (cum ar fi Bluetooth, Wi-Fi, LTE, 5G NR), demonstrând capabilitățile de generalizare extinse în condiții ale unor degradări minime ale performanței detecției, chiar și în condiții de SNR scăzut. Doctorandul realizează și o validare practică a arhitecturii și algoritmului antrenat, validare care este realizată atât într-un scenariu real cu echipamente SDR în banda de 868 MHz, cât și într-o rețea privată OpenRAN 5G. În mod evident, metodologia ne poate scoate în evidență doar canalele sau intervalele de timp în care canalele sunt libere, fără a putea caracteriza semnalele radio prezente în banda de frecvențe de interes.

Capitolul VII sintetizează concluziile generale ale tezei și evidențiază relevanța rezultatelor obținute în contextul creșterii accelerate a numărului de dispozitive IoT și al presiunii asupra resurselor de spectru radio limitate, sintetizând progresul realizat prin tranziția de la tehnici clasice de detecție către arhitecturi bazate pe algoritmi AI capabile să realizeze detecție, clasificare, localizare timp-frecvență și generare de metrici avansate privind utilizarea spectrului. Sunt discutate rezultatele obținute în scenarii IoT și 5G/LTE, precum și potențialul acestor metode de a susține aplicații viitoare de tip cognitive radio și de alocare dinamică a resurselor în rețele radio caracterizate de un număr mare de dispozitive conectate și de o diversitate crescută a protocoalelor de comunicație utilizate.

Contribuții originale

Dintre cele mai importante contribuții pe care doctorandul le evidențiază în lucrarea sa de doctorat aș dori să rețin următoarele:

- Antrenarea, evaluarea și implementarea unei rețele neuronale YOLO pentru identificarea comunicațiilor IoT de tip LoRa și Sigfox;
- Elaborarea unui algoritm de generare a metricilor avansate de analiză a spectrului radio și a unei interfețe de vizualizare;
- Dezvoltarea unei metodologii pentru generarea seturilor de date utilizate în antrenarea algoritmilor AI de monitorizare a spectrului radio și realizarea unui set de date propriu;
- Propunerea și evaluarea unei metodologii de monitorizare a spectrului radio prin detecția zgomotului, bazată pe algoritmi AI de detecție a obiectelor;
- Dezvoltarea unei arhitecturi inovative și a unui algoritm AI de monitorizare a spectrului radio, pentru sisteme IoT, care pot fi utilizate atât pentru identificarea semnalelor radio cât și pentru zgomot.

Concluzii

Prin conținutul valoros, teza elaborată de domnul ing. **Partemie - Marian MUTESCU** este rezultatul cercetărilor desfășurate în cadrul școlii doctorale de Inginerie electronică și telecomunicații din cadrul Facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava. Bibliografia include un număr semnificativ de referințe (125), de dată recentă, incluzând lucrările publicate la care doctorandul este coautor. Lista lucrărilor incluse în bibliografie este bine sistematizată, lucrările sunt relevante și orientate spre cercetările efectuate de autorul tezei.

Așa cum am evidențiat mai sus, doctorandul are o serie de contribuții originale, la finalul tezei fiind identificate un număr de 10 astfel contribuții, specificându-se suplimentar și articolele științifice în care au fost valorificate aceste contribuții și publicațiile în care acestea au apărut.

Actualitatea și relevanța cercetărilor efectuate sunt demonstrate și de numărul și calitatea publicațiilor științifice ale autorului. Autorul a prezentat în teză faptul că rezultatele cercetărilor sale sunt publicate în 15 lucrări științifice dintre care, la 9, doctorandul este prim autor. Dintre cele 15 lucrări publicate, 6 sunt publicate în reviste cotate WOS, 5 fiind publicate în reviste aflate în zona Q1/Q2, la 3 dintre acestea doctorandul fiind prim autor. Alături de aceste dovezi ale diseminării cercetărilor doctorale, menționez că doctorandul a făcut parte din două echipe ale unor proiecte de cercetare pe tematica temei de doctorat. Apreciez ca prin aceste publicații și

prin conținutul lucrării de doctorat, doctorandul **Partemie - Marian MUTESCU** a îndeplinit criteriile de evaluare privind conferirea titlului științific de doctor.

În urma activității de coordonare a doctorandului pe durata celor 5 ani de desfășurare a cercetărilor doctorale, după evaluarea lucrării de doctorat și a articolelor științifice cu principalele rezultate obținute de doctorand, consider că doctorandul a dobândit competențe profesionale avansate, dar și o serie de competente transversale specifice nivelului de calificare doctorat.

Apreciez așadar că teza de doctorat **CONTRIBUȚII ÎN DOMENIUL MONITORIZĂRII SPECTRULUI DE RADIOFRECVENȚĂ PENTRU REȚELELE SISTEMELOR IOT**, elaborată de domnul ing. **Partemie - Marian MUTESCU**, redactată într-un limbaj științific de ținută, întrunește toate cerințele impuse de reglementările în vigoare în ceea ce privește admisibilitatea tezei la susținere și acordarea titlului științific de doctor, datorită nivelul calitativ ridicat al tezei, a valorii contribuțiilor sale teoretice și experimentale, precum și a publicării rezultatelor obținute și descrise în teză, în lucrări recunoscute de comunitatea științifică internațională.

În concluzie, teza de doctorat întrunește condițiile de susținere publică în domeniul de doctorat **Inginerie electronică și telecomunicații** și propun conferirea titlului științific de doctor domnului inginer **Partemie-Marian MUTESCU**.

Prof. univ. dr. ing. Valentin POPA

A handwritten signature in dark ink, consisting of stylized, flowing letters, representing the name Valentin Popa.

