

Universitatea POLITEHNICA din București

ȘCOALA DOCTORALĂ ETTI-B

Nr. Decizie 611 din 03.11.2020

REZUMAT DE TEZĂ DE DOCTORAT

ALGORITMI DE DETECTIE SPECTRALA PENTRU SISTEMELE CU ACCES OPORTUNIST LA SPECTRU

Autor: Ing. Alsammarraie Mahmood Jalal Ahmad

Conducător de doctorat: Prof. Vlădeanu Călin

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Dr. Ing. Gheorghe Brezeanu	de la	Univ. Politehnica București
Conducător de doctorat	Prof. Dr. Ing. Călin Vlădeanu	de la	Univ. Politehnica București
Referent	Prof. Dr. Ing. Daniela Tărniceriu	de la	Univ. Tehnică Gheorghe Asachi Iași
Referent	Prof. Dr. Ing. Ioan Nicolaescu	de la	Academia Tehnică Militară Ferdinand I București
Referent	Prof. Dr. Ing. Ion Marghescu	de la	Univ. Politehnica București

BUCUREȘTI, NOIEMBRIE 2020

Cuprins

Cuprins.....	ii
Capitol 1: Introducere	1
1.1 Prezentarea domeniului de studiu al tezei de doctorat	1
1.2 Scopul tezei de doctorat	2
1.3 Conținutul tezei de doctorat	2
Capitol 2: Radio cognitiv.....	3
2.1 Concepte de tehnologie radio cognitivă.....	3
2.1.1 Utilizator principal și utilizator secundar.....	3
2.2 Structura radio cognitivă	4
2.3 Aplicații radio cognitive.....	4
2.4 Funcția de detectare a spectrului	4
2.5 Arhitectura radio cognitivă.....	5
Capitol 3: Algoritmi de detectare a energiei clasice și algoritmi adaptivi de detectare a energiei clasice	6
3.1 Detectarea energiei.....	6
3.2 Detectarea clasică a energiei (CED).....	6
3.2.1 Principiul de funcționare CED.....	6
3.2.2 Setarea pragului CED	6
3.3 Detectarea adaptivă a energiei clasice (ACED).....	7
3.3.1 Optimizarea setării pragului ACED.....	7
Capitol 4: Detectarea energiei îmbunătățite și algoritmi adaptivi de detecție a energiei îmbunătățite.....	7
4.1 Algoritm îmbunătățit de detectare a energiei (IED).....	8
4.1.1 Setare prag IED.....	8
4.2 Pragul adaptiv pentru algoritmul IED	8
4.2.1 Rezultate teoretice și de simulare	8
Capitol 5: Algoritmi de detectare a energiei cu trei evenimente și algoritmi adaptivi de detectare a energiei cu trei evenimente	10
5.1 Algoritm simplu de detectare a energiei în trei evenimente (3EED).....	10
5.2 Algoritm de prag adaptativ pentru detectarea energiei în trei evenimente (A3EED)	

5.2.1	Rezultate teoretice și de simulare	11
5.2.2	Detectarea energiei în trei evenimente cu prag adaptativ pentru detectarea spectrului în sistemele radio cognitive pe convexitatea probabilității de eroare a deciziei	13
5.2.2.1	Simulări și rezultate numerice.....	14
Capitol 6: Metode cooperative de detectare a spectrului		17
6.1	Detectarea spectrului cooperativ AF utilizând trei utilizatori secundari pentru radio cognitiv	17
6.2	Detectarea cooperativă folosind trei utilizatori secundari	17
Capitol 7: Concluzii		19
7.1	Rezultate obținute	19
7.2	Contribuții originale	19
7.3	Lista lucrărilor publicate	21
7.4	Perspectivă de dezvoltare ulterioară.....	21

Capitol 1: Introducere

Sistemele și rețelele wireless cresc în fiecare zi, ceea ce duce la creșterea cererii de resurse spectrale cu scopul de a le acomoda în acest sens și, în consecință, va rezulta o penurie de resurse de spectru. O tehnologie care vizează depășirea acestei deficiențe se numește Radio Cognitiv (CR), care oferă o soluție revoluționară în combaterea acestei probleme. Rețelele de comunicații wireless existente sunt reglementate de o strategie de alocare fixă a spectrului, care s-a dovedit ineficientă, conform unor investigații recente privind utilizarea spectrului. CR atinge o eficiență maximă de utilizare a spectrului prin acces oportunist la părți neutilizate temporar ale spectrului.

1.1 Prezentarea domeniului de studiu al tezei de doctorat

În ultimii ani s-a acordat multă atenție studierii resurselor spectrului de frecvențe, deoarece tehnologiile wireless s-au dezvoltat foarte rapid, împreună cu aplicațiile lor. Având în vedere limitările spectrului radio, acoperirea cererii pentru lățime de bandă mai mare și volume mai mari de date este o reală provocare care presupune crearea unei tehnologii capabile să găsească noi modalități de a valorifica benzile de frecvență disponibile. CR a primit o recunoaștere din ce în ce mai mare ca un potențial răspuns eficient la problema aglomerării spectrale prin încorporarea noțiunii de utilizare a spectrului oportunist ca una dintre inovațiile populare cheie pentru generațiile viitoare de rețele wireless. Un element cheie al tehnologiei CR este detectarea spectrului, care permite CR-urilor să identifice lacunele spectrale. Mai mult, una dintre tendințele emergente este îmbunătățirea calității utilizării spectrului de radio în cadrul accesului dinamic al spectrului (DSA) și al detectării spectrului (SS). Comunicațiile wireless s-au dezvoltat rapid și, deși au fost efectuate cercetări aprofundate și lucrări de dezvoltare pentru tehnologii mai eficiente, deficitul de spectru radio disponibil este considerat o problemă cheie pentru dezvoltarea în continuare a acestui domeniu. Accentul a fost acordat strategiilor DSA și CR ca soluții posibile la problema deficitului de spectru pentru următoarea generație de rețele de comunicații fără fir, inclusiv a cincea generație (5G) [1].

Comisia Federală pentru Comunicații (FCC) definește un CR ca fiind: ”un sistem sau un radio care își detectează mediul de operare electromagnetic și își poate confirma dinamic și separat parametri de funcționare radio pentru a regla funcționarea sistemului, cum ar fi atenuarea interferențelor, maximizarea debitului, accesarea piețelor secundare și facilitarea interoperabilității” [2]. Banda comercială industrială științifică și medicală (ISM) de 2,4 GHz, datorită disponibilității sale internaționale, este o bandă de frecvență comună potrivită pentru sistemele fără fir cu costuri reduse. O mare problemă este că utilizatorii care operează în același sistem radio pot interacționa semnificativ între ei. Cu toate acestea, nu există mecanisme adecvate de sincronizare sau de gestionare a resurselor radio pentru multitudinea de rețele care rulează în benzile ISM, ceea ce contribuie la

utilizarea ineficientă a acestor benzi de frecvență. Pentru a depăși aceste probleme, s-au găsit recent tehnici avansate pentru CR și procesarea semnalului. Abordarea bazată pe software de relocare este foarte apreciată în cele mai noi tehnologii CR datorită fiabilității sale. Conform acestei metode, sistemele de utilizator secundar (SU) primesc informații despre furnizarea de spectru dintr-o bază de date care oferă cunoștințe despre funcționarea utilizatorului principal (PU) în regiunea geografică în care este planificat să funcționeze SU [3].

Una dintre activitățile cheie ale CR este de a identifica un domeniu de comunicare fără interferențe. Mai mult, tehnicile bazate pe detectarea spectrului sunt de mare importanță ca element complementar în rețelele CR bazate pe baze de date și ca o posibilă cale de dezvoltare viitoare, în special în comunicarea pe distanțe scurte. Cooperarea și monitorizarea repetată cu un alt utilizator sunt necesare pentru detectarea spectrului robust și extrem de sensibil datorită schimbării stării canalului.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Scopul principal al acestei cercetări este de a revizui și examina câteva tehnici semnificative pentru SS și proiectarea algoritmilor îmbunătățiți de detectare a spectrului, care permit implementarea unor senzori eficienți pe bază de CR. Detectarea prin cooperare introduce o opțiune potențială care poate face procesul de detectare mai precis. Având în vedere că tema metodelor SS îmbunătățite este foarte largă, cercetarea se limitează la focusul asupra detectării eficiente necooperante.

Pentru început, algoritmi ED și conceptele lor au fost studiate pentru a se stabili în ce direcție acestea trebuiau dezvoltate. În primul rând, sunt investigați algoritmul clasic ED (CED) [4] și câteva versiuni îmbunătățite de performanță ale CED, cum ar fi algoritmi ED îmbunătățit (IED) [5] și algoritmi de detectare a energiei în trei evenimente (3EED) [6]. S-a observat că îmbunătățirea algoritmilor depindea de măsurarea energiei de detectare per slot și că prin creșterea numărului de teste, rezultatele s-au îmbunătățit și ele. Mai mult, adaptarea pragului de decizie cu valoarea variației zgomotului a fost demonstrată ca o altă metodă semnificativă de creștere a performanței pentru algoritmul CED în [7]. Pornind de la această premisă de adaptare a pragului, sunt dezvoltate mai multe versiuni adaptive ale algoritmilor IED și 3EED pentru scăderea probabilității de eroare de decizie (DEP) în sistem.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Această teză este organizată după cum urmează.

Capitolul 2 conține prezentarea conceptului de sistem CR, împreună cu componentele sale. Detectarea spectrului este, de asemenea, explicată, precum și informații generale cu privire la detectarea energiei.

În capitolul 3, este prezentat algoritmul CED și se analizează performanța sa teoretică. De asemenea, este explicată setarea pragului, acesta fiind un parametru important configurat de proiectantul sistemului pentru a controla performanța detectării spectrului. În plus, este explicată o versiune adaptivă a acestui algoritm (denumită Adaptive CED (ACED)), iar performanța sa DEP este analizată teoretic. Mai mult, expresia analitică a pragului de decizie adaptivă este prevăzută pentru CED.

În capitolul 4, este propus și dezvoltat un algoritm IED adaptiv (AIED). Mai mult, performanța teoretică este estimată, iar simulările Monte Carlo sunt rulate pentru ambii algoritmi, adică ACED și AIED. Rezultatele arată că algoritmul AIED propus depășește ACED în termeni de DEP.

Capitolul 5 prezintă o nouă versiune adaptivă a algoritmului 3EED pentru SS în sistemele CR. O expresie analitică a pragului optim de decizie este dezvoltată pentru minimizarea DEP a algoritmului A3EED. Folosind simulări complexe, se obțin rezultate numerice, care confirmă expresiile analitice derivate și demonstrează performanța îmbunătățită a algoritmului.

În capitolul 6, este propus un algoritm de detecție cooperativă amplificată și transmisă modificată. De asemenea, un model de canal simplificat este prezentat prin analiza teoretică și prin simulare a probabilității de detectare cooperativă a algoritmului, cu câștiguri semnificative de detecție constatate în comparație cu cazul necooperativ.

Capitolul 7 rezumă rezultatele obținute în cercetare, contribuțiile originale sunt explicate și, în cele din urmă, sunt discutate perspectivele dezvoltării ulterioare.

Capitol 2: Radio cognitiv

Tehnologia radio cognitivă poate fi utilizată pentru a satisface cererea viitoare a rețelei de comunicații mobile utilizând gestionarea complexă a sursei dinamice [8]. Mai multe abilități noi, inclusiv rețeaua, reziliența, agilitatea și detectarea sunt integrate în CR pentru a permite spectrului să fie utilizat într-un mod eficient.

2.1 Concepte de tehnologie radio cognitivă

Există mai multe concepte noi care au apărut odată cu utilizarea tehnologiei radio cognitive ca una dintre principalele tehnologii pentru sistemele radio din următoarele decenii. În subsecțiunile următoare, unele dintre principiile cheie care stau la baza tehnologiei CR sunt explicate pentru a facilita înțelegerea subiectelor prezentate ulterior.

2.1.1 Utilizator principal și utilizator secundar

În contextul tehnologiei CR, pot fi definite două tipuri de utilizatori, PU (utilizatorii autorizați) cărora li se acordă de obicei acces preferențial la spectru și acești utilizatori

principali sunt utilizatorii originali, care își pot accesa spectrul dedicat necondiționat oricând, oriunde. Iar al doilea tip de utilizatori sunt SU-urile (utilizatorii fără licență), care pot utiliza spectrul pe care PU-urile sunt autorizate să îl folosească numai atunci când PU nu utilizează în mod activ spectrul.

2.2 Structura radio cognitivă

CR este o clasă Software Radio (SR) cu funcții și interfețe suplimentare, care include luarea deciziilor, detectarea mediului și învățarea modului de realizare a performanțelor necesare. CR gestionează funcționarea aplicațiilor software de nivel înalt pentru a se potrivi cu un asistent digital personal (PDA) în domeniul software. Pentru a înțelege structura CR, trebuie să examinăm radiourile software și versiunea lor realistă a SDR, deoarece reflectă componenta de bază CR.

2.3 Aplicații radio cognitive

Adaptabilitatea înconjurătoare a făcut CR-ul faimos în lumea comunicațiilor. CR oferă diferite avantaje în diferite domenii, cum ar fi domeniul guvernamental, public, militar, comerț și securitate.

2.4 Funcția de detectare a spectrului

Detectarea spectrului este una dintre funcționalitățile vitale ale unui radio cognitiv, luând în considerare ținta principală pentru starea radio. În literatură, sunt propuse diferite metode de detectare a spectrului [9] [10]:

- Detectarea energiei.
- Filtru potrivit.
- Detectarea ciclostationară.

Procedurile distinctive răspund nevoilor diferite, având în vedere circumstanțele și dezavantajele lor favorabile. Detectia bazată pe energie este cea mai simplă strategie, detectarea bazată pe ciclostatie poate necesita unele date despre celelalte calități ale semnalului clientului și detectarea pe bază de filtru potrivit necesită toate datele semnalului clientului.

Detectarea spectrului cognitiv implică astfel strategii rapide și eficiente pentru identificarea lacunelor din spectru [11]. Metoda de detectare ar fi suficient de inteligentă pentru a recunoaște diverse sisteme de contact în mediul ambiant și pentru a putea extinde măsurătorile de scanare cu scopul de a umple toate golurile de spectru disponibile în toate dimensiunile posibile.

- **Detectarea energiei**

Detectarea energiei este considerată a fi cea mai comună tehnică de detectare a semnalului datorită simplității sale în ceea ce privește aplicația practică [12]. În abordarea ED, energia radio a semnalului recepționat este măsurată pentru a decide dacă o bandă de frecvență este sau nu ocupată [13].

- **Detectarea filtrelor potrivite**

Un filtru asortat este o strategie de detectare ideală, deoarece extinde proporția semnal la zgomot (SNR) a semnalului primit. Filtrul potrivit care poate fi utilizat în CR a fost de asemenea denumit detector coerent. Acesta poate fi considerat cel mai bun sistem de detectare dacă CR știe despre forma de undă PU. Este extrem de precis, deoarece maximizează SNR-ul obținut. Principalul avantaj al detectării filtrelor potrivite este timpul scurt de detectare pentru a obține o performanță bună, deoarece este utilizată detectarea coerenței [14].

- **Detectarea ciclostationară**

Detectarea ciclostationară este o tehnică specială de detectare care permite detectorului de energie să distingă semnalul PU de zgomot și interferențe. Semnalele dispozitivelor wireless sunt în general modulate și generate cu o anumită periodicitate. În cazul în care semnalul PU prezintă proprietăți ciclostationare solide, acesta poate fi identificat la valori SNR scăzute. Un semnal este considerat a fi ciclostationar (în sens larg) dacă autocorelația sa este o funcție periodică a timpului t cu o anumită perioadă. Detectarea ciclostationară poate fi efectuată așa cum este prezentat în [15]. Aceasta poate fi recunoscută prin analiza Funcției de autocorelație ciclică (CAF) a semnalelor recepționate, date ca:

$$R_y^{(\alpha)}(\tau) = \mathbb{E}[y(t + \tau) y^*(t - \tau) e^{-j2\pi\alpha t}] \quad (1)$$

unde α este frecvența ciclică, $*$ reprezintă conjugat complex și $E[\cdot]$ denotă așteptare. Schimbarea discretă a CAF poate fi apoi calculată pentru a obține funcția de corelație spectrală (SCF), numită adițional spectru ciclic, care este o funcție bidimensională în ceea ce privește frecvența ciclică. În cele din urmă, identificarea este finalizată prin căutarea frecvenței ciclice unice referitoare la vârful din planul SCF.

2.5 Arhitectura radio cognitivă

Rețeaua CR va rula într-un context specific, în care gama operațională va include frecvențe licențiate și fără licență, iar frecvențele licențiate vor fi atribuite diferitelor sisteme cu

diferite tehnologii de rețea. Funcționarea în acest mediu divers are nevoie de o infrastructură de rețea specială care să se poată adapta cu ușurință și să funcționeze eficient în acest mediu.

Capitol 3: Algoritmi de detectare a energiei clasice și algoritmi adaptivi de detectare a energiei clasice

3.1 Detectarea energiei

Detectarea energiei este cea mai răspândită tehnică de localizare a semnalului datorită circuitului său de bază într-o aplicație funcțională. Rolul detectorului de energie este de a descoperi energia semnalului obținut și de a o potrivi prin limită [16].

3.2 Detectarea clasică a energiei (CED)

3.2.1 Principiul de funcționare CED

Principiul detecției clasice a energiei (CED), care este denumit și detecție radiometrică, măsoară energia receptoare pe intervalul de bază în perioada de observare și anunță starea curentă a canalului ca fiind ocupată (ipoteza $H1$) dacă energia măsurată este mai mare decât un prag stabilit corect sau altfel, ca fiind inactivă (ipoteza $H0$) [4].

3.2.2 Setarea pragului CED

Procesul utilizat pentru a determina rezoluția algoritmului de prag este un aspect important deoarece reprezintă un parametru care este configurat de proiectantul sistemului pentru a controla performanța detectării spectrului. Pragul λ poate fi selectat pentru cea mai bună compensare între probabilitatea de detectare P_d și probabilitatea unei alarme false P_{fa} . Cu toate acestea, acest lucru necesită informații despre zgomotul și puterea semnalului detectat. Deși puterea de zgomot poate fi evaluată, puterea semnalului este dificil de ghicit, deoarece depinde de mai mulți factori diferiți, cum ar fi caracteristicile de transmisie și răspândire. Pragul este de obicei selectat empiric pentru a satisface o cerință sau țintă P_{fa} [17], pragul λ necesar pentru probabilitatea țintă de alarmă falsă dată ca:

$$\lambda = (Q^{-1}(P_{fa, target}^{CED})\sqrt{2N} + N) \sigma_n^2 \quad (2)$$

3.3 Detectarea adaptivă a energiei clasice (ACED)

CR este considerat o tehnologie inteligentă de comunicații wireless pentru a remedia ineficiența politicii de alocare a spectrului fix [18] [19]. SS este considerat una dintre principalele sarcini dificile din sistemul CR, deoarece are nevoie de o complexitate redusă și o corectitudine ridicată pentru accesul dinamic al spectrului [20]. Metrica de eficiență a SS este de obicei calculată ca un compromis între sensibilitate și selectivitate și poate fi măsurată prin nivelurile de alarmă falsă și probabilitățile de detectare.

3.3.1 Optimizarea setării pragului ACED

Compensarea dintre P_d și P_f este concepută pentru a minimiza probabilitatea de eroare de decizie P_e în raportul de utilizare a spectrului de PUs α ($0 < \alpha < 1$) și pragul λ ca:

$$\min(P_e(\lambda)) = \min\{(1 - \alpha)P_f + \alpha(1 - P_d)\} \quad (3)$$

unde $(1 - P_d)$ denotă probabilitatea de detectare greșită, ceea ce sugerează că PU este absent, dar, de fapt, este prezent. $\alpha(1 - P_d)$ etermină probabilitatea deciziei de eroare pentru PU-urile prezente cu utilizarea spectrului α . La fel, $(1 - \alpha)P_f$ este probabilitatea erorii de decizie pentru absența PU. Astfel, ideea este de a găsi un prag adaptativ pentru a minimiza probabilitatea de eroare de decizie. Ecuația poate fi scrisă într-un mod simplu ca:

$$\lambda^* \approx \frac{2 \sigma_n^2 \cdot (1 + SNR)}{(2 + SNR)} (N \rightarrow +\infty) \quad (4)$$

Capitol 4: Detectarea energiei îmbunătățite și algoritmi adaptivi de detecție a energiei îmbunătățite

A fost propus un algoritm îmbunătățit de detectare a energiei (IED), care estimează energia medie pe mai multe sloturi de detectare consecutive.

Propunem un algoritm de prag adaptativ îmbunătățit de detectare a energiei (AIED), care necesită unele cunoștințe a priori despre semnalul utilizatorului principal (PU), cum ar fi ciclul său mediu de funcționare și SNR. Am comparat performanța algoritmului AIED cu algoritmul ACED pentru diferite valori ale SNR și ale ciclului de funcționare. Pentru aceeași probabilitate de eroare de decizie, demonstrăm un câștig SNR de detectare mai mare de 1 dB de AIED peste ACED, în regim SNR scăzut, pentru valori ridicate ale ciclului de funcționare.

4.1 Algoritm îmbunătățit de detectare a energiei (IED)

4.1.1 Setare prag IED

Pragul simplu sau denumit și prag fix al schemei IED a fost sugerat în [5] pentru a demonstra dacă semnalul PU este prezent sau nu în mediul unui AWGN cu un SNR definit. În fiecare slot de detectare i , cu testul de energie E_i al PU-ului în slotul prezent (testul prezent în CED), metoda IED efectuează încă două teste la rând, prima măsoară energia medie calculată în ultimele sloturi de detectare L și cealaltă examinare este de a măsura energia din slotul anterior E_{i-1} .

4.2 Pragul adaptiv pentru algoritmul IED

În [7], a fost propusă o metodă de prag adaptiv pentru a îmbunătăți performanțele algoritmului CED. Să luăm în considerare un model de transmisie PU cu un număr mediu de B sloturi ocupate consecutive urmate de un număr de sloturi $T-B$ inactiv. Această problemă de optimizare poate fi definită ca:

$$\lambda_{\text{opt}}(\alpha, SNR) = \arg \min_{\lambda} P_e^{ED}(\lambda, \alpha, SNR) \quad (5)$$

pentru ACED, o expresie exactă a valorii pragului optim este derivată în [7]. Din păcate, pentru algoritmul IED de prag adaptativ nu se poate determina o expresie exactă a pragului optim. Cu toate acestea, folosind expresiile P_d^{IED} și P_f^{IED} determinate în [5], putem determina pragul optim folosind problema de minimizare din (5).

4.2.1 Rezultate teoretice și de simulare

Aici, analizăm performanțele ACED și AIED în termeni de probabilitate de eroare de decizie, notată ca P_e . Pentru algoritmul AIED, am luat în considerare următoarele valori ale parametrilor: $L = 3$ și $M \in \{1, 2, 3\}$. Cu toate acestea, pentru $M = 2$, valoarea maximă P_e pentru AIED este obținută la $\alpha = 0,43$. În cele din urmă, pentru $M = 3$, valoarea maximă P_e pentru AIED este obținută la $\alpha = 0,44$. În Figura 2, am reprezentat un grafic similar cu cel din Figura 1, $P_e(\alpha)$ pentru $SNR = -20$ dB. În acest caz, valoarea maximă a P_e pentru AIED se obține la $\alpha = 0,5$ pentru $M = 1$, la $\alpha = 0,47$ pentru $M = 2$ și la $\alpha = 0,45$ pentru $M = 3$. Comparând rezultatele din Figura 2 cu cele de la Figura 1, observăm că, atunci când SNR scade, diferența dintre valorile maxime de P_e pentru ACED și AEID crește (pentru aceeași valoare a M).

Am reprezentat în Figura 3 valorile P_e SNR pentru diferite valori de $\alpha = \text{ct}$. După cum se observă în figurile 1 și 2, datorită simetriei uniforme a graficelor ACED $P_e(\alpha)$ în

jurul valorii de $\alpha \cong 0.5$, valorile maxime ale lui P_e se obțin pentru valoarea ciclului de funcționare α în jurul valorii de 0.5, în timp ce valorile minime ale lui P_e sunt obținute pentru $\alpha \leq 0.1$ și $\alpha \geq 0.9$ (pentru orice valoare a SNR).

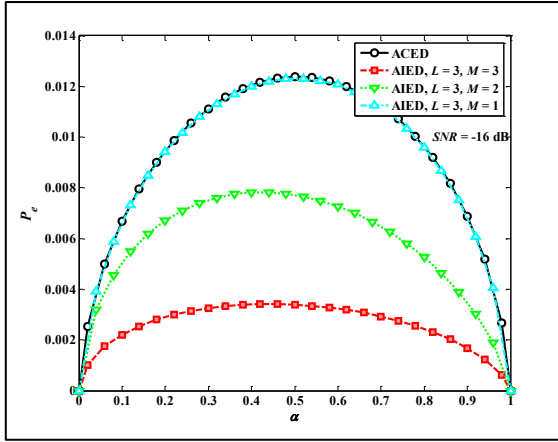


Fig. 1 Probabilitatea de eroare în funcție de α (SNR = -16 dB).

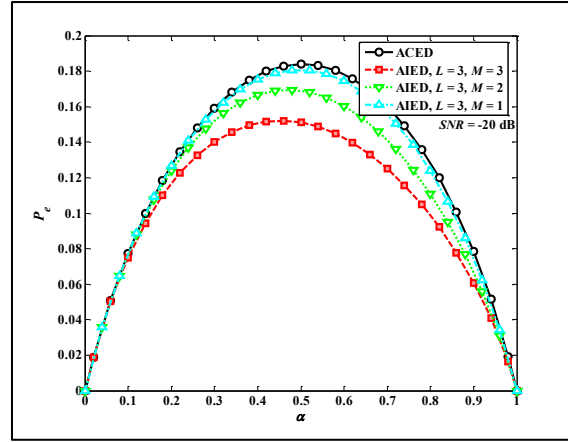


Fig. 2 Probabilitatea de eroare în funcție de α (SNR = -20 dB).

Trebuie să menționăm că în Figura 3 am reprezentat atât graficele P_e teoretice, cât și cele de simulare pentru algoritmi ACED și AIED, având în vedere cele trei valori reprezentative $\alpha \in \{0.1, 0.5, \text{ and } 0.9\}$. Pentru AIED, am considerat cele mai bune valori ale parametrilor, $M = L = 3$.

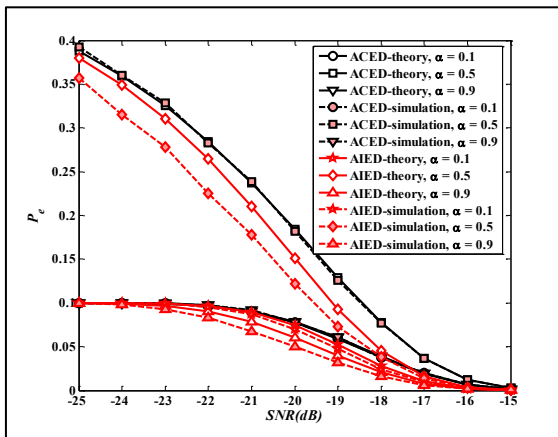


Fig. 3 Probabilitatea de eroare în funcție de SNR.

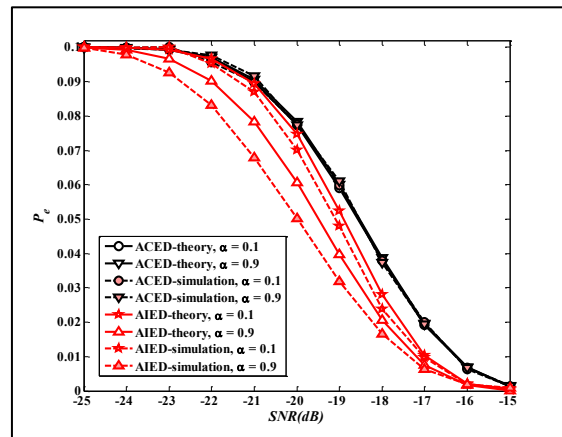


Fig. 4 Probabilitatea de eroare în funcție de SNR pentru $\alpha \in \{0.1, 0.9\}$.

Se observă că pentru ACED graficele de simulare se potrivesc perfect graficelor teoretice [7]. Pe de altă parte, graficele P_e de simulare pentru AIED nu aproximează cu exactitate rezultatele teoretice. Acest lucru se explică prin faptul că pragul de decizie nu

este estimat cu precizie pentru IED [5]. Cu toate acestea, pragul de decizie este ales pentru a seta o limită superioară pentru performanțele algoritmului IED. Prin urmare, toate rezultatele simulării P_e descrise în Figura 3 pentru AIED sunt mai mici decât rezultatele determinate teoretic. Analizând rezultatele din Figura 3, putem vedea că în intervalul $SNR \in [-24, -17]$ dB, AIED oferă un câștig SNR de detectare peste ACED mai mare de 1dB pentru aceeași valoare de $\alpha \geq 0.5$. Pentru o vizualizare mai bună, prezentăm în Figura 4 doar graficele P_e pentru $\alpha \in \{0.1, 0.9\}$. În Figura 4 se poate observa că pentru $\alpha = 0.9$ AIED oferă un câștig SNR peste ACED mai mare de 1 dB în mijlocul intervalului SNR considerat (pentru $SNR \in [-21, -19]$ dB). De asemenea, pentru $\alpha = 0.1$ AIED oferă un câștig SNR mai mic în comparație cu ACED mai mare de 0.6 dB în secțiunea superioară a intervalului SNR considerat (pentru $SNR \in [-17, -15]$ dB). De asemenea, este interesant de observat că pentru valori mai mici de $\alpha < 0.5$, îmbunătățirea performanței AIED P_e față de ACED este mai mică decât în intervalul mai mare de $\alpha \geq 0.5$. Această asimetrie a fost observată și în parcele AIED înclinare din figurile 1 și 2.

Analiza probabilității de eroare de decizie pentru algoritmul AIED propus, în comparație cu algoritmul clasic adaptativ ED ACED, a relevat că primul oferă un câștig SNR de detectare față de cel de-al doilea. Cu toate acestea, detectarea câștigului SNR depinde de valorile ciclului de funcționare PU. Prin urmare, AIED funcționează cel mai bine pentru rețelele PU ocupate, cicluri de funcționare mai mari de 50%.

Capitol 5: Algoritmi de detectare a energiei cu trei evenimente și algoritmi adaptivi de detectare a energiei cu trei evenimente

Se consideră algoritmul de detectare a energiei cu trei evenimente (3EED) pentru detectarea spectrului pentru care se găsește o aproximare exactă a pragului optim de decizie care minimizează probabilitatea de eroare de decizie utilizând metoda Newton cu convergență forțată într-o singură iterație. Algoritmul propus este analizat și ilustrat cu rezultate numerice obținute din simulări care se potrivesc îndeaproape cu rezultatele teoretice și arată că depășește algoritmul convențional ED pentru detectarea spectrului.

5.1 Algoritm simplu de detectare a energiei în trei evenimente (3EED)

Algoritmul 3EED simplu (sau prag fix) a fost propus pentru a detecta prezența semnalului PU în rețeaua CR afectată de AWGN, care este specificată de un anumit SNR [6]. În fiecare slot de detectare i , testați mai întâi energia E_i din slotul curent (algoritmul CED efectuează numai acest test). Dacă acest test E_i nu reușește, atunci, 3EED efectuează un

al doilea test în slotul anterior E_{i-1} . Dacă și numai dacă testul E_{i-1} a eșuat, 3EED va rula un al treilea test în slotul următor E_{i+1} . Ambele teste suplimentare în 3EED, în comparație cu CED, permit SU să detecteze mai precis prezența semnalului PU în caz de căderi temporare de energie sau absența semnalului PU [6].

Pragul de decizie λ este determinat pe baza unui nivel de performanță dorit, care este specificat în termeni de probabilitate țintă de valoare de alarmă falsă P_{fa} deoarece este de obicei cazul detectoarelor constante de alarmă fals [6].

$$\lambda = \left[Q^{-1} \left(1 + \sqrt[3]{P_{fa} - 1} \right) \sqrt{2N} + N \right] \sigma_n^2 \quad (6)$$

5.2 Algoritm de prag adaptativ pentru detectarea energiei în trei evenimente (A3EED)

Propunem un nou algoritm de detectare a energiei în trei evenimente prag adaptativ (A3EED) care minimizează probabilitatea de eroare de decizie pentru SNR date și valorile medii ale ciclului de funcționare ale semnalului utilizatorului principal. Comparând performanța decizională a acestor algoritmi, pentru valori SNR scăzute, demonstrăm un câștig SNR decizional mai mare de 1 dB de A3EED peste ACED. Am prezentat abordarea pragului fix pentru un algoritm ED. S-a arătat un prag de decizie adaptiv pentru a oferi performanțe mai bune de detectare. Pragul de decizie va fi setat pentru a minimiza valoarea P_e^{3EED} . Prin urmare, această problemă de optimizare este definită de [7] [21]:

$$\lambda_{opt}(\alpha, SNR) = \arg \min_{\lambda} P_e^{3EED}(\lambda, \alpha, SNR) \quad (7)$$

unde λ_{opt} reprezintă pragul optim.

5.2.1 Rezultate teoretice și de simulare

Performanțele algoritmilor ACED și A3EED sunt analizate în termeni de probabilitate de eroare de decizie P_e . Prin urmare, comparăm, pentru ambii algoritmi, valorile teoretice ale lui P_e estimate cu rezultatele simulărilor Monte Carlo. În Figura 5, pentru o valoare SNR de -16 dB, trasăm valorile teoretice ale lui P_e . Pentru ACED și A3EED au fost reprezentate grafic, în funcție de ciclul de funcționare α . Pentru fiecare valoare de α , valoarea pragului de decizie optimă este determinată astfel încât să se atingă valoarea minimă P_e . Analizând rezultatele din Figura 5, observăm că A3EED depășește ACED, pentru orice valoare α .

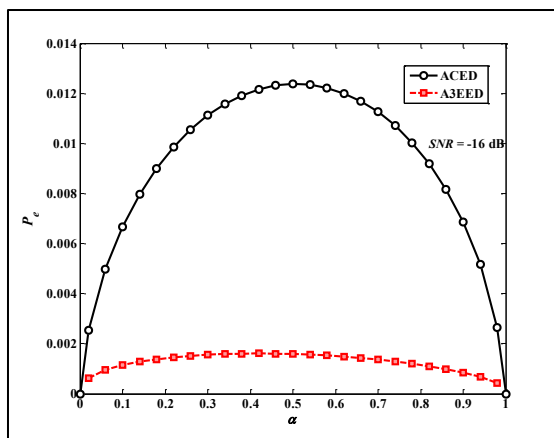


Fig. 5 Probabilitatea de eroare în funcție de α (SNR = -16 dB).

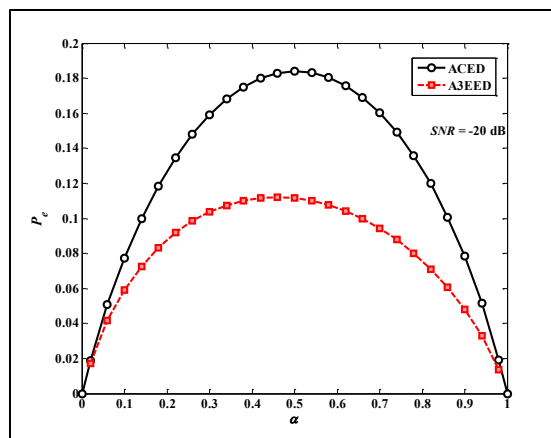


Fig. 6 Probabilitatea de eroare în funcție de α (SNR = -20 dB).

De asemenea, se poate observa că valoarea maximă P_e pentru ACED se obține la $\alpha = 0.5$ [7], în timp ce pentru A3EED se obține la o valoare mai mică de $\alpha = 0.42$. Această diferență între maximele parțialelor ACED și A3EED P_e demonstrează că A3EED funcționează mai bine în regiunea valorilor mari pentru ciclul de funcționare sau are o performanță asimetrică în ceea ce privește valorile α . Urmând aceeași procedură, graficele P_e pot fi obținute pentru orice valoare SNR cuprinsă între -25 dB și -15 dB. În mod similar, în Figura 6, am reprezentat $P_e(\alpha)$, pentru SNR = -20 dB. În acest caz, valoarea maximă P_e pentru A3EED este atinsă la $\alpha = 0.46$. Comparând rezultatele din Figurile 5 și 6, observăm că diferența dintre valorile maxime P_e pentru ACED și A3EED crește atunci când SNR scade. De fapt, atunci când SNR scade, atunci P_e crește, pentru aceeași valoare α .

În Figura 7, valorile P_e SNR au fost reprezentate pentru a studia dependența de SNR a performanțelor ACED și A3EED pentru diferite valori de $\alpha = ct$. Așa cum s-a observat deja în figurile 5 și 6, datorită simetriei uniforme a graficelor $P_e(\alpha)$, valorile minime ale lui P_e se obțin pentru $\alpha \leq 0.1$ și $\alpha \geq 0.9$, iar valorile maxime ale lui P_e se obțin pentru valoarea ciclului α în jur de 0.5 (pentru orice valoare a SNR). Mai mult, în Figura 7, am considerat trei valori reprezentative $\alpha \in \{0.1, 0.5, \text{și } 0.9\}$ și am reprezentat grafic atât valorile P_e , cât și cele de simulare. Se poate observa cu ușurință că atât pentru ACED cât și pentru A3EED, graficele de simulare se potrivesc perfect cu graficele teoretice [7] [6] [22]. Această potrivire se explică prin faptul că pragul optim de decizie este estimat cu precizie pentru algoritmi adaptivi. În cele din urmă, analizând rezultatele din Figura 7, putem vedea că, pentru un SNR $\in [-24, -17]$ dB, A3EED oferă un câștig SNR de detectare peste ACED mai mare de 1.3 dB, pentru aceeași valoare de $\alpha \geq 0.5$. Pentru a sublinia câștigul SNR de detecție al A3EED față de ACED, prezentăm în Figura 8 doar graficele P_e pentru $\alpha \in \{0.1, 0.9\}$. Prin urmare, se poate observa că A3EED oferă un câștig SNR peste ACED de aproximativ 1 dB în mijlocul intervalului SNR considerat (pentru SNR $\in [-22, -18]$ dB) pentru $\alpha = 0.1$.

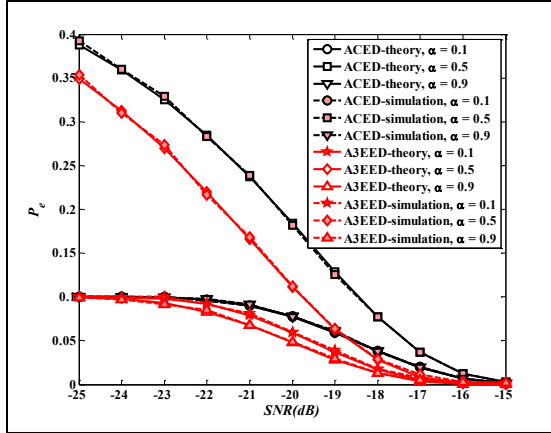


Fig. 7 Probabilitatea de eroare în funcție de SNR.

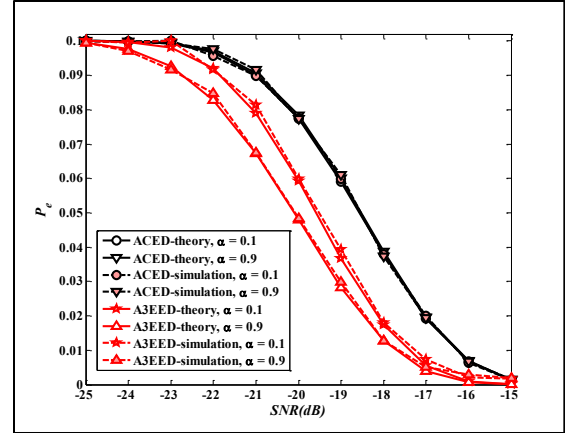


Fig. 8 Probabilitatea de eroare în funcție de SNR pentru $\alpha \in \{0.1, 0.9\}$.

De asemenea, pentru $\alpha = 0.9$ și în același interval SNR, A3EED oferă un câștig SNR mai mare față de ACED, de aproximativ 1.5 dB. Am prezentat și analizat un nou algoritm de prag adaptativ 3EED. Atât rezultatele teoretice, cât și cele de simulare demonstrează că A3EED oferă un câștig decizional SNR față de ACED mai mare de 1 dB. De asemenea, s-a arătat că valoarea acestui câștig SNR depinde de ciclul de funcționare al PU.

5.2.2 Detectarea energiei în trei evenimente cu prag adaptativ pentru detectarea spectrului în sistemele radio cognitive pe convexitatea probabilității de eroare a deciziei

Prezentăm un nou algoritm ED adaptiv cu prag de detectare adaptivă pentru detectarea spectrului, care se bazează pe algoritmul 3EED [6] dar în care pragul de detectare este adaptat similar cu [7], pentru a optimiza probabilitatea de eroare de decizie DEP, care este suma ponderată a probabilităților de detectare ratată și falsă alarmă [7] [23].

Observăm că obținerea unei expresii analitice precise pentru pragul optim este evazivă, deoarece expresiile implicate în găsirea pragului de detectare nu au expresii în formă închisă și necesită aproximări. Cu toate acestea, pentru algoritmi mai eficienți decât CED, având în mod regulat expresii mai complexe pentru DEP, ecuația de optimizare nu este soluționabilă din punct de vedere analitic. Prin urmare, ne propunem să extindem metoda de la [7] la un algoritm ED mai complex și mai eficient, cum ar fi 3EED [6]. Sub aproximarea Gaussiană, DEP pentru orice algoritm ED poate fi scris ca o expresie bazată pe mai mulți termeni de funcție Q .

În primul rând, trebuie să dovedim că DEP este o funcție convexă în valoarea pragului și apoi propunem utilizarea unei metode numerice, cum ar fi metoda Newton [24], pentru a determina iterativ rădăcina ecuației de optimizare analitice nerezolvabile. Cu toate

acestea, principalul dezavantaj al metodelor iterative este creșterea timpului de funcționare, care este o problemă critică pentru algoritmi de detectare a spectrului. Pentru a depăși această problemă, propunem o transformare a funcției de optimizare, astfel încât metoda Newton pentru funcția transformată să convergă mai repede. În cele din urmă, obținem o expresie aproximativă analitică a pragului adaptativ pentru 3EED utilizând o metodă numerică de convergență rapidă. Mai mult, considerăm că această metodă poate fi generalizată pentru majoritatea, dacă nu pentru toți algoritmi de detectare a spectrului bazate pe ED.

O expresie în formă închisă pentru pragul optim de detecție este derivată folosind metoda Newton cu o abordare nouă care reduce numărul de iterații la una singură prin schimbarea monotoniei funcției de optimizare, iar un algoritm 3EED adaptiv este declarat și analizat formal. Propunem o versiune adaptivă a algoritmului de detectare a energiei în trei evenimente publicat în [6] [22]. Comparăm performanța algoritmului propus cu algoritmul ACED [25] pentru diferite scenarii și discutăm rezultatele obținute.

5.2.2.1 Simulări și rezultate numerice

Prezentăm rezultatele numerice obținute din simulări care susțin abordarea propusă pentru calcularea pragului într-un singur pas și ilustrăm performanța algoritmului 3EED cu prag adaptativ. Valorile parametrilor utilizați în simulări sunt numărul de eșantioane într-un slot de detectare $N = 65537$, SNR (γ) este între -25 dB și -15 dB și $T = 500$ sloturi. Semnalul transmis de PU este implementat utilizând modularea Binary Phase Shift Keying (BPSK), iar 2500 de sloturi de detectare au fost luate în considerare în fiecare secvență de transmisie în toate simulările.

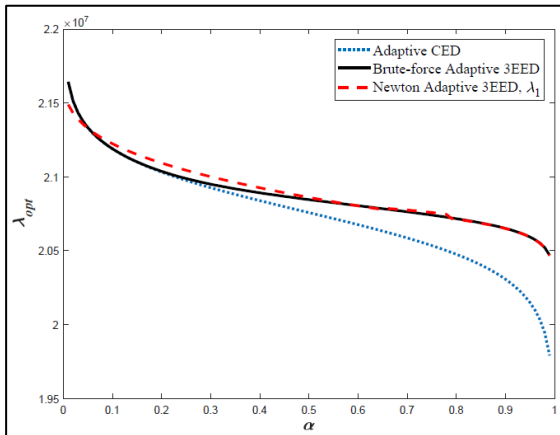


Fig. 9 Prag optim în funcție de α pentru $SNR = -25dB$.

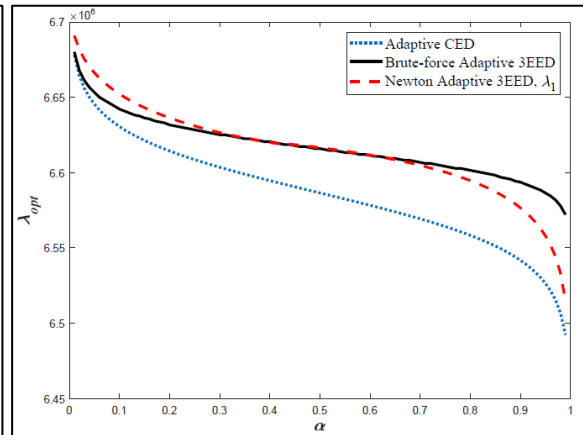


Fig. 10 Prag optim în funcție de α pentru $SNR = -20dB$.

Figurile 9 și 10 arată valorile pragului optim de detectare λ_{otp} care minimizează DEP, în funcție de raportul α de utilizare a spectrului, pentru valori SNR de -25 dB și -20 dB corespunzătoare abordării propuse. Observăm că valorile pragului de detectare obținut utilizând abordarea propusă se potrivesc îndeaproape cu cele obținute folosind abordarea (forței brute) [26] pentru valori de α cuprinse între 0.2 și 0.7, în special pentru α în jur de 0,5 și susțin aplicarea abordării numerice pentru calculul pragului. De asemenea, observăm că, conform studiilor efectuate pe canale GSM [27] sau în benzile industriale, ISM [28], acesta este intervalul de valori pentru raportul de utilizare a spectrului α , care este de interes practic pentru accesul SU la spectrul autorizat.

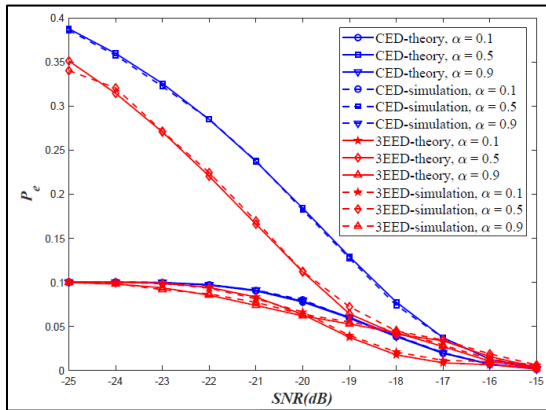


Fig. 11 Probabilitatea de eroare în funcție de SNR pentru $\alpha \in \{0.1, 0.5, 0.9\}$.

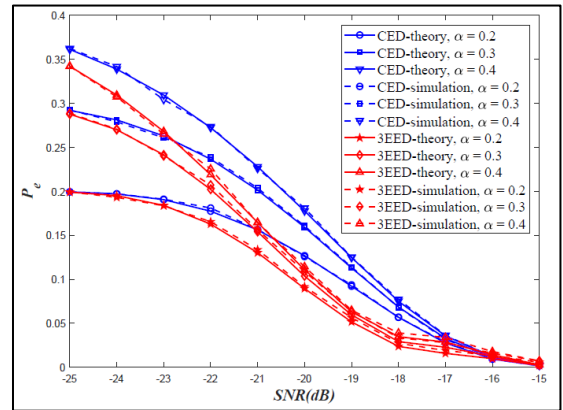


Fig. 12 Probabilitatea de eroare în funcție de SNR pentru $\alpha \in \{0.2, 0.3, 0.4\}$.

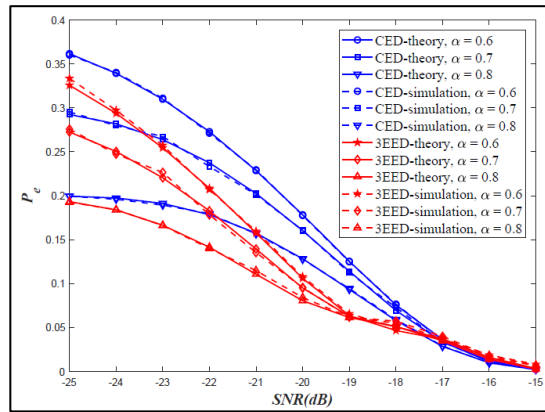


Fig. 13 Probabilitatea de eroare în funcție de SNR pentru $\alpha \in \{0.6, 0.7, 0.8\}$.

Figurile 11, 12 și 13 arată valorile DEP P_e în funcție de SNR γ pentru diferite valori ale raportului de utilizare a spectrului α pentru algoritmul 3EED propus cu prag adaptativ, precum și pentru algoritmul CED adaptiv din [7]. Pe baza graficelor prezentate în figurile 11, 12 și 13, observăm mai întâi că valorile DEP obținute prin simulări Monte Carlo se

potrivesc îndeaproape cu valorile analitice ale DEP pentru algoritmul 3EED propus cu prag adaptativ sau prin expresia DEP corespunzătoare din [7], pentru toate valorile SNR și α . Remarcăm, de asemenea, că algoritmul 3EED propus cu prag adaptativ depășește algoritmul CED adaptiv în cazurile de interes practic corespunzător raporturilor de utilizare a spectrului peste 0.2 și sub 0.7, cu câștig maxim al algoritmului propus în termeni de DEP de aproximativ 1 dB realizat α în jur de 0.5. Mai mult, atât pentru algoritmul 3EED propus cu prag adaptativ, cât și pentru algoritmul CED adaptiv, valoarea DEP devine mai puțin sensibilă la modificările raportului de utilizare a spectrului α pe măsură ce valorile SNR cresc.

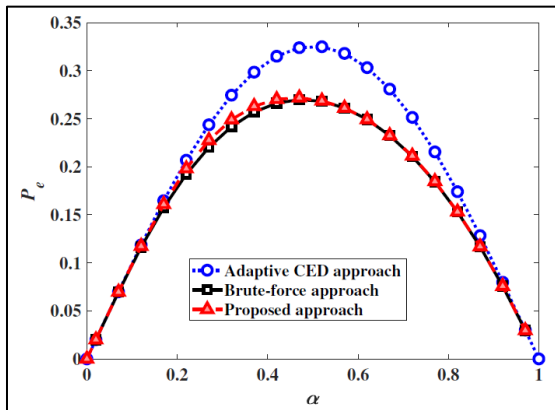


Fig. 14 Probabilitatea de eroare în funcție de α (SNR = -23).

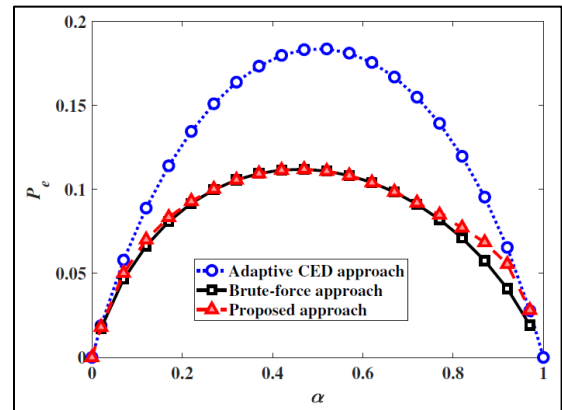


Fig. 15 Probabilitatea de eroare în funcție de α (SNR = -20).

Figurile 14 și 15 arată dependența DEP de raportul de utilizare a spectrului α pentru două valori SNR diferite $\gamma = -23$ dB și $\gamma = -20$ dB. După cum se poate observa, DEP scade odată cu creșterea SNR atât pentru algoritmul 3EED propus cu prag adaptativ, cât și pentru algoritmul CED adaptiv. Mai mult, algoritmul propus îl depășește pe cel CED adaptiv pentru toate valorile raportului de utilizare a spectrului α . Observăm că pentru fiecare valoare a lui α , valorile DEP corespunzătoare sunt minime, deoarece pragul de detectare optim este utilizat pentru acel α .

Este prezentat un nou algoritm ED pentru detectarea spectrului în sistemele CR. Algoritmul propus folosește un prag de detectare adaptivă care este optimizat pentru a minimiza DEP, deoarece valoarea pragului optim se găsește printr-o metodă iterativă într-un singur pas. Rezultatele numerice obținute din simulări sunt prezentate pentru a ilustra performanța algoritmului propus și pentru a-l compara cu algoritmul CED adaptiv. Rezultatele arată că algoritmul propus depășește algoritmul CED pentru detectarea spectrului, rezultând valori mai mici pentru DEP pentru toate valorile raportului de utilizare spectrală care sunt de interes practic pentru sistemele CR care oferă acces SU la spectrul autorizat.

Capitol 6: Metode cooperative de detectare a spectrului

Detectarea spectrului este o caracteristică de bază a radioului cognitiv pentru a evita interacțiunile inutile cu utilizatorii autorizați și pentru a defini frecvența disponibilă pentru creșterea utilizării spectrului. Problema PU invizibil care apare în timp ce PU nu este detectat de stația de detectare ar putea fi rezolvată, iar detectarea cooperantă poate reduce semnificativ timpul de detectare [29]. Cea mai mare dificultate a detectării cooperative a spectrului (CSS) ar fi că are nevoie de dezvoltarea unei rețele eficiente pentru schimbul de informații între CR.

6.1 Detectarea spectrului cooperativ AF utilizând trei utilizatori secundari pentru radio cognitiv

În rețelele CR, SU trebuie să detecteze prezența PU într-un mod rapid și precis și să elibereze canalul pentru PU. Pentru un scenariu de cooperare CR, SU dintr-o anumită zonă poate colabora pentru îmbunătățirea detectării PU. Extindem algoritmul de detectare cooperativă AF prin creșterea numărului de SU colaboratoare de la două la trei [30] [31]. Prin urmare, există mai multe situații pentru care detectarea cooperării depășește scenariul necooperativ. Analizăm probabilitatea ED a algoritmului cooperativ atât teoretic, cât și folosind simulări. Pentru a facilita analiza, propunem un model simplu de canal de pierdere a căii cu putere redusă, care leagă distanța dintre utilizatori de câștigul canalului. Prin urmare, într-un scenariu cooperativ tipic, demonstrăm o creștere a probabilității de detectare între 7.7% și 15.6% în comparație cu scenariul necooperativ.

6.2 Detectarea cooperativă folosind trei utilizatori secundari

În sistemele CR, SU transmit atunci când PU licențiați sunt inactivi. În CR cooperativ, SU schimbă informații despre PU pentru a îmbunătăți detectarea PU. Să presupunem un mediu CR în care trei SU, denumiți S1, S2 și S3 funcționează într-un cadru TDMA pentru a trimite date către un receptor comun pentru detectarea unui PU notat cu P, așa cum se arată în Figura 6.3. Când PU începe să transmită, cele trei SU trebuie să oprească transmisia cât mai repede posibil. Aici, aria de interes pentru noi este probabilitatea de detectare SU, care scade odată cu distanța până la P. De exemplu, dacă unul dintre SU (S1) se află la o distanță mare față de P, semnalul primit de S1 de la utilizatorul autorizat este slab, ceea ce face greu pentru S1 să-și detecteze prezența. Prin urmare, cooperarea dintre utilizatorii fără licență poate crește probabilitatea de detecție pentru utilizatorul mai slab, îmbunătățind astfel detecția globală în rețeaua CR. Luăm în calcul această cooperare, considerând S2 și S3 ca relee ale S1, unde toți cei trei utilizatori S1, S2 și S3 sunt SU. Cei trei utilizatori cognitivi

transmit date către un receptor comun, într-o anumită bandă de frecvență, așa cum se arată în Figura 6.3.

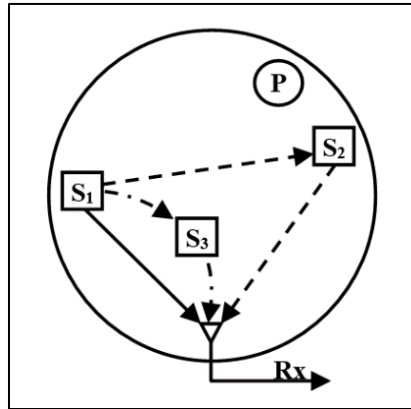


Fig. 16 Cooperarea în rețelele cognitive.

Se utilizează un model de transmisie TDMA și semnalele sunt transmise succesiv, utilizând un protocol AF. Acest sistem este o extindere a sistemului propus în [32] prin creșterea numărului de SU cooperative de la două la trei.

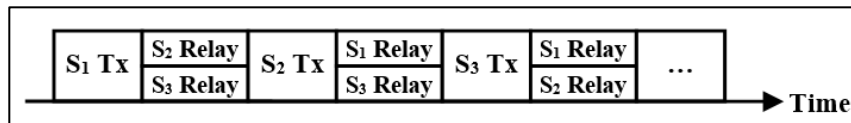


Fig. 17 Cadru TDMA pentru protocolul de releu al SU.

Să presupunem că transmisia TDMA are loc după cum urmează: în primul interval de timp, S1 transmite, iar S2 și S3 ascultă; în al doilea interval de timp, S2 și S3 transmit informațiile primite în intervalul de timp anterior. Trebuie să menționăm că releul SU suplimentar, comparativ cu sistemul din [32], nu va crește timpul de detectare, deoarece ambele relee funcționează simultan. Cu toate acestea, se așteaptă de la releu SU suplimentar să îmbunătățească detectarea PU. Pe lângă cele 3 SU, există un PU care are o prioritate mai mare pentru a ocupa canalul. În acest moment, cea mai esențială acțiune este detectarea corectă a acestui utilizator autorizat. Am propus un algoritm de detecție cooperativă AF modificat, prin creșterea numărului de SU de releu de la unu la doi. De asemenea, am propus un model de canal simplificat, care leagă câștigurile canalului de distanțele dintre SU și PU. Am analizat teoretic și prin simulare probabilitatea de detectare cooperativă a algoritmului și câștiguri semnificative de detectare au fost găsite în comparație cu cazul necooperativ.

Capitol 7: Concluzii

În această teză, prezentăm sistemul CR în general. De asemenea, studiem în detaliu funcția de detectare a spectrului împreună cu algoritmul de detectare a energiei.

Am propus mai multe metode diferite pentru a dezvolta performanța algoritmului ED.

7.1 Rezultate obținute

În capitolul 1 am prezentat o introducere generală despre metoda CR și am menționat domeniul de aplicare al tezei, care este de a proiecta algoritmi îmbunătățiți de detectare a spectrului care pot permite implementarea CR.

În capitolul 2 am furnizat o explicație detaliată despre metodele CR și conceptele sale și a fost descris modul în care funcționează acest algoritm. De asemenea, am clarificat funcțiile de detectare a spectrului.

În capitolul 3 am prezentat performanța teoretică a algoritmului clasic de detectare a energiei, împreună cu setarea pragului. De asemenea, a fost studiată în detaliu versiunea adaptivă a acestui algoritm și performanța acestuia. A fost descris și scenariul pentru ambii algoritmi.

În capitolul 4 a fost propus și dezvoltat un algoritm IED de prag adaptativ și am estimat o performanță teoretică prin utilizarea simulărilor Monte Carlo pentru ambii algoritmi. Rezultatele au fost comparate cu versiunea clasică a acestui algoritm. Studiul probabilității de eroare de decizie pentru algoritmul propus (AIED), comparativ cu algoritmul adaptativ clasic ED ACED, a demonstrat că primul algoritm oferă un câștig SNR față de al doilea algoritm.

În capitolul 5 este prezentat un nou algoritm de detectare al energiei pentru detectarea spectrului în sistemele CR. În acest algoritm s-a propus un prag care a fost dezvoltat pentru a reduce probabilitatea de eroare de decizie. Rezultatele obținute cu ajutorul simulărilor au fost folosite pentru a evidenția eficiența algoritmului propus.

În capitolul 6 am furnizat informații teoretice despre metodele de detectare a spectrului cooperativ. De asemenea, a fost prezentat sistemul care folosea doi utilizatori secundari cooperativi. A fost propus un model de canal simplificat care leagă îmbunătățirile canalului de distanțele dintre utilizatorii secundari și principali. Prin creșterea numărului de utilizatori secundari de releu de la unu la doi, a fost propus și un algoritm de detectare cooperativă AF modificat.

7.2 Contribuții originale

În această secțiune sunt prezentate principalele contribuții originale ale cercetării, împreună cu articolele în care acestea au fost publicate.

[1] Propunere pentru un algoritm IED de prag adaptativ care necesită anumite cunoștințe despre semnalul principal al utilizatorului.

Compararea algoritmului de performanță AIED cu algoritmul adaptativ ED clasic pentru diferite valori ale SNR și ale ciclului de funcționare. Luând în considerare aceeași probabilitate de eroare de decizie, s-a demonstrat un câștig SNR de detectare mai mare de 1 dB de AIED peste ACED, în regimul SNR scăzut, pentru valori ridicate ale ciclului de funcționare.

[2] Propunerea unui nou algoritm de prag adaptativ 3EED (A3EED) care reduce probabilitatea de eroare de decizie pentru un anumit raport al semnalului la zgomot (SNR) și valorile medii ale ciclului de funcționare ale semnalului utilizator primar (PU). Compararea performanței deciziei a arătat că A3EED depășește ACED cu un câștig SNR mai mare de 1 dB..

[3] Revizuirea unor aspecte legate de stratul fizic New Radio, cum ar fi benzile de frecvență, tehnologiile radio. Propunere în contextul unui proiect de cercetare în curs de desfășurare a unui proiect inițial pentru un sistem de evaluare a ocupării spectrului.

[4] Extinderea algoritmului de detecție cooperativă Amplify and Forward (AF) prin creșterea numărului de utilizatori secundari colaboratori de la doi la trei și propunerea unui model simplu de canal de pierdere a căii legii puterii care leagă distanța dintre utilizatori de câștigul canalului. Ca rezultat, s-a dovedit o creștere a probabilității de detectare între 7.7% și 15.6% pentru un scenariu tipic de cooperare, comparându-l cu un scenariu necooperativ.

[5] Propunerea unui nou algoritm ED cu un prag de detectare adaptivă. Algoritmul sugerat este evaluat și demonstrat cu rezultate numerice obținute din simulări care seamănă foarte mult cu rezultatele teoretice și demonstrează că depășește algoritmul tradițional de detectare a spectrului ED (CED).

Am redus la minimum probabilitatea de eroare de decizie (DEP) a algoritmului ED cu trei evenimente (3EED) pentru detectarea spectrului utilizând metoda Newton cu convergență forțată într-o singură iterație.

[6] O comparație între patru platforme SDR diferite dintr-un front-end de radiofrecvență primește o perspectivă de performanță. S-a efectuat un calcul teoretic al cifrei de zgomot pentru partea de recepție a capătului frontal RF al fiecărei platforme. Pentru USRP N210 cu placa fișă WBX RF am obținut cel mai mic NF de pe toate platformele, prin urmare este recomandat ca o soluție optimă pentru aplicații de detectare a spectrului.

[7] Introducerea unei noi scheme de detecție cooperativă AF care utilizează trei utilizatori secundari, cu doi utilizatori secundari care efectuează un releu secvențial și propunerea unei metode trigonometrice pentru a reduce variabilele de câștig de canal de la trei la doi, ceea ce ajută la simplificarea aproximării pragului în algoritm de detectare.

7.3 Lista lucrărilor publicate

- [1] Mahmood J. A. Al Sammarraie, A. Marțian, C. Vlădeanu, "Adaptive IED Spectrum Sensing Algorithm for Different Duty Cycle Values," in International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, June 2018. [\[ISI Proceedings\]](#)
- [2] Mahmood J. A. Al Sammarraie, A. Marțian, C. Vlădeanu, "A Modified 3EED Spectrum Sensing Algorithm Using an Adaptive Decision Threshold," in 2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timișoara, Romania, November 2018. [\[ISI Proceedings\]](#)
- [3] A. Marțian, C. Vlădeanu, Mahmood J. A. Al Sammarraie, "On the Introduction of 5G Networks in Romania A novel architecture for spectrum occupancy evaluation," in International Conference on Digital Telecommunications (ICDT), Valencia, Spain, March 2019. [\[ISI Proceedings\]](#)
- [4] C. Vlădeanu, Mahmood J. A. Al Sammarraie, A. Marțian, "Amplify-and-Forward Cooperative Spectrum Sensing Using Three Secondary Users for Cognitive Radio," in International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, July 2019. [\[ISI Proceedings\]](#)
- [5] A. Marțian, Mahmood J. A. Al Sammarraie, C. Vlădeanu, Dimitrie C. Popescu, "Three-Event Energy Detection with Adaptive Threshold for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems," in MDPI sensors journal, June 2020. [\[ISI-Q1, IF 3.275\]](#)
- [6] A. Marțian, Florin L. Chiper, Omer M. Kh. Al-Dulaimi, Mahmood J. A. Al Sammarraie, C. Vlădeanu, Ion Marghescu, "Comparative Analysis of Software Defined Radio Platforms for Spectrum Sensing Applications," in International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, June 2020. [\[ISI Proceedings\]](#)
- [7] Omer M. Kh. Al-Dulaimi, Mahmood J. A. Al Sammarraie, C. Vlădeanu, A. Marțian, Dimitrie C. Popescu, "Cooperative Spectrum Sensing for Three Secondary Users with Sequential Relaying for Cognitive Radio," in International Conference on Communications (COMM), Bucharest, Romania, June 2020. [\[ISI Proceedings\]](#)

7.4 Perspective de dezvoltare ulterioară

Ca cercetare viitoare, o propunere ar fi implementarea algoritmului 3EED adaptiv într-o arhitectură reală definită de software a unui sistem SU și generalizarea metodei de estimare a pragului adaptativ, folosind metoda Newton, pentru orice algoritm ED. Intenția este de a implementa și valida algoritmul propus utilizând platforme SDR din familia USRP. Un focus major ar trebui să fie dedicat optimizării expresiilor care sunt utilizate în algoritm pentru a estima pragul de decizie pentru minimizarea complexității de calcul și a timpului de detectare. O direcție a cercetărilor viitoare poate fi extinderea analizei pragului adaptiv la alți algoritmi de detectare a energiei. O altă direcție a cercetărilor viitoare poate fi analiza

câștigului de agilitate a algoritmului AF și, în măsură, această analiză pentru mai mulți utilizatori secundari de releu.

Bibliografie

- [1] D. Ariananda, M. Lakshmanan, H. Nikookar, "A Survey on Spectrum Sensing Techniques for Cognitive Radio," in *Second International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management*, pp. 74–79, 2009.
- [2] Federal Communications Commission, "ET Docket No 02-135 Spectrum Policy Task Force Report," 2002.
- [3] B. Wang, K. Liu, "Advances in cognitive radio networks: A survey," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, no. 1, pp 5–23, 2011.
- [4] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," in *Proceedings of the IEEE*, vol.55, no.4, pp. 523- 531, 1967.
- [5] M. López-Benítez, F. Casadevall, "Improved Energy Detection Spectrum Sensing for Cognitive Radio," in *IET Communications, Special Issue on Cognitive Comm.*, vol. 6, no. 8, pp. 785-796, 2012.
- [6] C. Vlădeanu, C. V. Năstase, A. Marțian, "Energy Detection Algorithm for Spectrum Sensing Using Three Consecutive Sensing Events," in *IEEE Wireless Comm. Lett.*, vol. 5, pp. 284-287, 2016.
- [7] N. Wang, Y. Gao, X. Zhang, "Adaptive Spectrum Sensing Algorithm Under Different Primary User Utilizations," in *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 9, pp. 1838-1841,, 2013.
- [8] J. Raiyn, "A Self-Optimization of the Dynamic Resource Management Based on the Cognitive Radio," in *Wireless Engineering and Technology No. 2*, pp 87- 92, 2011.
- [9] T. Yucek, H. Arslan, "A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications," in *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.
- [10] S. Kandeepan et al, "Spectrum Sensing and Monitoring," in *EUWB Integrated Project, European Commission funded project (EC: FP7-ICT- 215669)*, 2009.
- [11] A. Marțian, Florin L. Chiper, O. M. Kh. Al-Dulaimi, M. J. A. AlSammaraie, C. Vlădeanu, I. Marghescu, "Comparative Analysis of Software Defined Radio Platforms for Spectrum Sensing Applications," in *International Conference on Communications (COMM)*, Bucharest, Romania, 2020.
- [12] L. J. Cimini , "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing," in *IEEE T Commun*, pp. 665-675, 1985.

- [13] M. A. Abdulsattar, Z. A. Hussein, Energy Detection Technique for Spectrum Sensing in Cognitive Radio: A Survey, *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*, 2012.
- [14] A. Sahai, N. Hoven, R. Tandra, "Some Fundamental Limits on Cognitive Radio," in *Allerton Conf*, pp. 1662–1671, 2004.
- [15] A. Fehske, J. Gaeddert, J. Reed, A New Approach to Signal Classification Using SpectRAL Correlation and Neural Networks, Baltimore, U.S.A: IEEE Dynamic Spectrum Access Networks, 2005.
- [16] P. Pawełczak, "Cognitive Radio: Ten Years of Experimentation and Development," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 3, pp. 90-100, Mar. 2011.
- [17] J. J. Lehtomaki, M. Juntti, H. Saarnisaari, "Threshold Setting Strategies for A Quantized Total Power Radiometer," in *IEEE Signal Processing Letters*, pp. 796-799., 2005.
- [18] J. Mitola, G. Q. Maguire, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal," in *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, 1999.
- [19] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005.
- [20] M. Nekovee, "Impact of Cognitive Radio on Future Management of Spectrum," in *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, pp. 1–6., 2008.
- [21] M. J. A. AlSammarräie, A. Marțian, C. Vlădeanu, "Adaptive IED Spectrum Sensing Algorithm for Different Duty Cycle Values," in *Proceedings of IEEE 12th International Conf. on Communications (COMM 2018)*, 14-16, pp. 51-54, Bucharest, Romania, 2018.
- [22] A. Marțian, C. Vlădeanu, "On the Compromise between Delay and Performance of the Three-Event Energy Detection Algorithm in Cognitive Radio Systems," in *Proceedings of 2016 12th IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, 27-28, pp. 111-115., Timisoara, 2016.
- [23] D. R. Joshi, D. C. Popescu, O. A. Dobre, "Gradient-Based Threshold Adaptation for Energy Detector in Cognitive Radio Systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 19-21, 2011.
- [24] A. Marțian, M. J. A. AlSammarräie, C. Vlădeanu, D. C. Popescu, "Three-Event Energy Detection with Adaptive Threshold for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems," in *MDPI Sensors Journal*, 2020.
- [25] J. Mitola et al, "Accelerating 5G QoE via public-private spectrum sharing," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 77-85, 2014.

- [26] M. J. A. AlSammaraie, A. Martian, C. Vlădeanu, "A Modified 3EED Spectrum Sensing Algorithm Using an Adaptive Decision Threshold," in *International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, 2018.
- [27] M. Luís, R. Oliveira, R. Dinis, L. Bernardo, "RF-Spectrum Opportunities for Cognitive Radio Networks Operating Over GSM Channels," in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 3, no. 4, pp. 731–739, 2017.
- [28] J. J. Lehtomaki, R. Vuotoniemi, K. Umebayashi, "On the Measurement of Duty Cycle and Channel Occupancy Rate," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 11, pp. 2555–2565, 2013.
- [29] A. Bagwari, G. Tomar, S. Verma, "Cooperative Spectrum Sensing Based on Two-Stage Detectors With Multiple Energy Detectors and Adaptive Double Threshold In Cognitive Radio Networks," in *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 36, no. 4, 2013.
- [30] C. Vlădeanu, M. J. A. AlSammaraie, A. Marțian, "Amplify-and-Forward Cooperative Spectrum Sensing Using Three Secondary Users for Cognitive Radio," in *International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, Iasi, Romania, 2019.
- [31] O. M. Kh. Al-Dulaimi, M. J. A. AlSammaraie, C. Vlădeanu, A. Marțian, D. C. Popescu, "Cooperative Spectrum Sensing for Three Secondary Users with Sequential Relaying for Cognitive Radio," in *International Conference on Communications (COMM)*, Bucharest, Romania, 2020.
- [32] G. Ganesan, Y. Li, "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio, Part I: Two User Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 6, pp. 2204-2213, 2007.