

Raport științific și tehnic privind implementarea proiectului

Sistem de evaluare a gradului de utilizare a spectrului RF în vederea introducerii rețelelor 5G (Spectrum-5G)

Contract PN-III-P1-1.1-PD-2016-1696 nr. PD_154/10.10.2018

Studiu legat de proiectarea sistemului de evaluare a gradului de ocupare a spectrului RF

Sinteză – etapă de execuție UNICĂ nr. 1 / 2018

Perioada octombrie – decembrie 2018

Obiectivele care au fost urmărite pentru etapa pe 2018 a proiectului sunt cuprinse în categoria de planificare și documentare în vederea dezvoltării sistemului de evaluare a gradului de ocupare a spectrului. Activitățile prevăzute în planul de realizare al proiectului corespunzător primei etape de execuție, corespunzătoare anului 2018, au cuprins:

- efectuarea unor studii referitoare la diferitele benzi de frecvență și tehnologii radio care sunt prevăzute pentru folosire în rețelele 5G, precum și de proiectarea hardware și software a sistemului de evaluare a gradului de ocupare a spectrului RF;
- o prima etapă de selectare și achiziția a elementelor hardware necesare.

Stadiul actual legat de standardizarea rețelelor 5G include o primă versiune a standardului, elaborat de către 3GPP, atât în ceea ce privește funcționarea (*non-standalone*) a rețelelor (specificațiile în acest caz au fost elaborate în decembrie 2017) [1], cât și în cazul funcționării de sine stătătoare (*standalone*) (specificațiile în acest caz au fost elaborate în iunie 2018) [2].

Din punctul de vedere al benzilor de frecvență care sunt preconizate pentru folosire în cadrul viitoarelor rețele 5G, se deosebesc două mari categorii după cum urmează:

- Benzile de frecvență sub 6 GHz (FR1);
- Benzile de frecvență între 24,25 GHz și 52,6 GHz (FR2).

În cadrul strategiei naționale pentru 5G, document recent pus în dezbatere publică [3], sunt prezentate resursele de frecvență care sunt utilizate pentru sistemele de comunicații mobile 2G, 3G și 4G de către operatorii care sunt titularii drepturilor în prezent (vezi fig. 1).

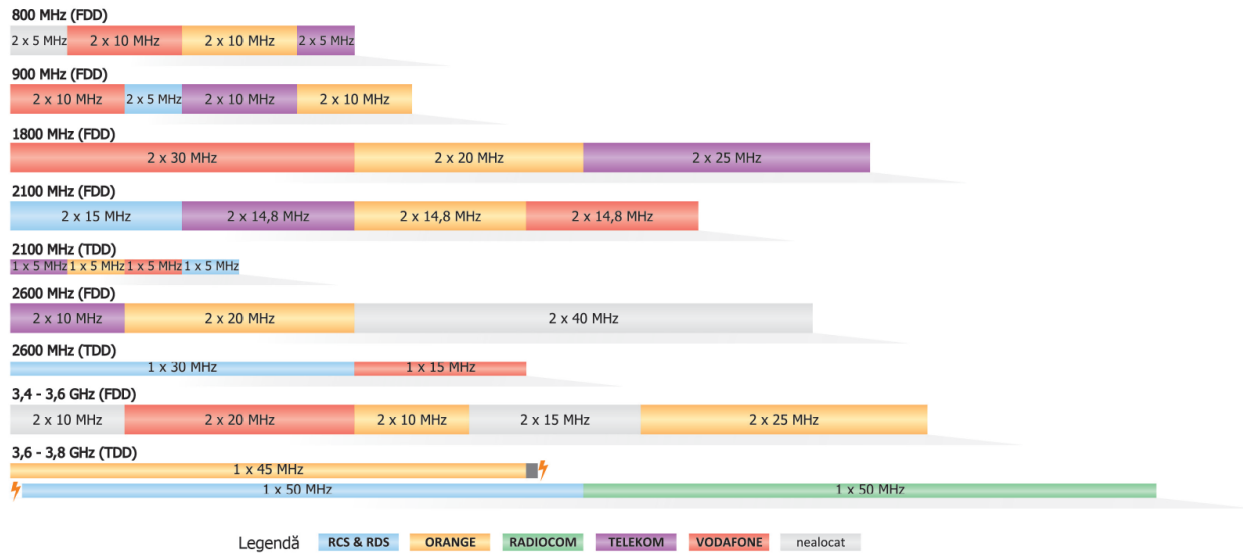


Fig. 1. Benzile de frecvență utilizate în România pentru sistemele de comunicații mobile 2G, 3G și 4G și titularii drepturilor [3]

În aceeași strategie națională pentru 5G [3] sunt de asemenea menționate benzile de frecvență care urmează a fi utilizate în viitoarele rețele 5G, pentru care urmează să fie organizată o licitație în partea a doua a anului 2019:

- Banda de frecvențe 3,4-3,8 GHz, care este considerată de către RSPG (grupul de consultare publică în domeniul politicilor de alocare a spectrului radio la nivelul Comisiei Europene) ca fiind cea mai potrivită pentru o utilizare imediată de către rețelele 5G [4] [5];
- Frecvențele în banda de 700 MHz, care sunt potrivite pentru dezvoltarea acoperirii rețelelor 5G pe zone extinse, datorită atenuării mai reduse a semnalelor radio pentru frecvențe mai joase. În cazul acestei benzi se preconizează utilizarea infrastructurii deja existente;
- Banda de frecvențe 24,25-27,5 GHz, care poate oferi largimi de bandă de ordinul sutelor de MHz, necesare pentru obținerea performanțelor specificate în [1] și [2] (viteze de până la 20 Gbps în condiții stabile pentru utilizatori în mișcare).

Din punctul de vedere al tehnologiilor radio care sunt avute în vedere pentru nivelul fizic în cadrul rețelelor 5G, există diferite variante considerate potrivite pentru a se reuși obținerea performanțelor care sunt specificate în standardul 3GPP, care pot fi grupate în mai multe categorii după cum urmează:

- Tehnologii de tip multi-purtătoare, precum CP-OFDM[6] , Windowed OFDM (WOFDM)[7], Unique-Word OFDM (UW-OFDM)[8], Discrete Fourier Transform-spread OFDM (DFT-s-OFDM)[9];
- Tehnologii bazate pe o singură purtătoare, precum Continuous Phase Modulation-Single Carrier- FDMA (CPM-SC-FDMA) [10][11], Differential Quadrature Amplitude Modulation (DQAM)[12];

- alte tehnologii, precum Bi-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (B-OFDM)[13], Filter Bank Multi-carrier (FBMC)[14], Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM)[15], Universal Filtered Multicarrier (UFMC)[16].

Legat de proiectarea din punct de vedere hardware și software a sistemului de evaluare a gradului de ocupare a spectrului RF care urmează a fi implementat în cadrul proiectului, a fost propusă o arhitectură preliminară a sistemului care este prezentată în figura 2.

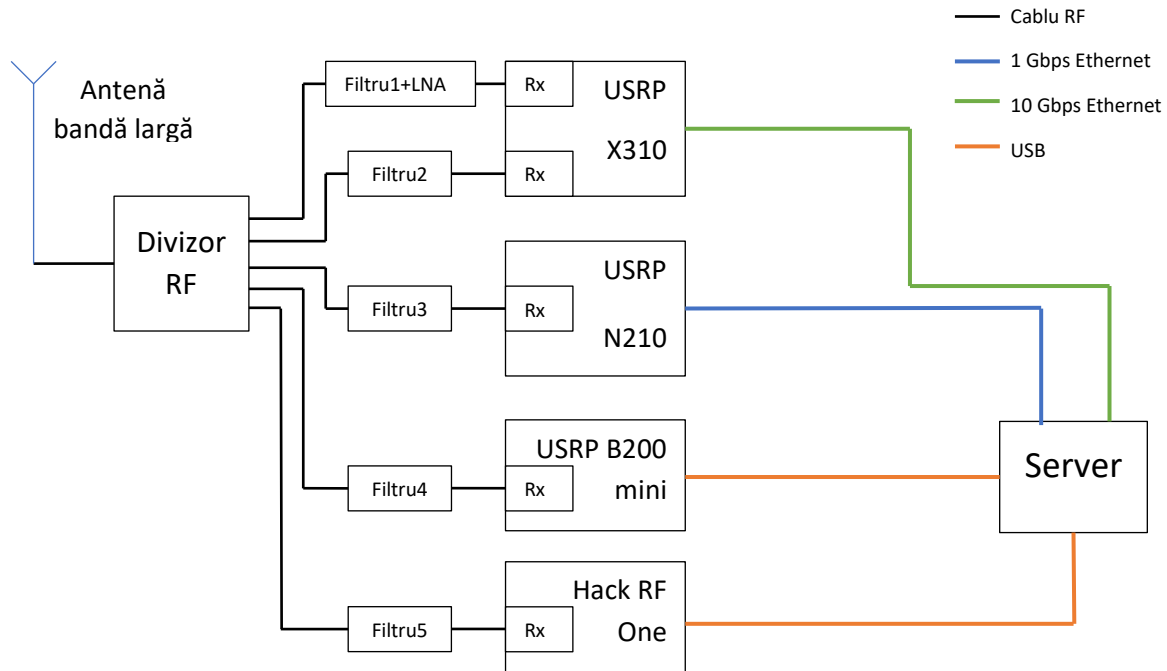


Fig. 2. Arhitectura preliminară a sistemului de evaluare a gradului de ocupare a spectrului RF

Se observă că semnalul de radiofrecvență este captat prin intermediul unei antene de bandă largă (gama de frecvență cel puțin de până la 6 GHz), care ulterior este distribuit către mai multe platforme de tip radio definit prin software (SDR) prin intermediul unui divizor de putere de radiofrecvență de bandă largă. Platformele SDR vor monitoriza diferite benzi de frecvență, selectate prin intermediul unor circuite de filtrare. Pentru benzile de frecvență mai înaltă vor fi adăugate și amplificatoare de zgomot redus (LNA) pentru creșterea nivelului semnalelor detectate în vederea obținerii unor performanțe îmbunătățite în cadrul procesului de detecție spectrală. Majoritatea platformelor SDR menționate în cadrul schemei sunt deja disponibile în dotarea curentă a UPB, cu excepția platformei USRP B200 mini, care va fi achiziționată pe parcursul anului 2019. Informațiile provenite de la platformele SDR vor fi ulterior centralizate folosind un server performant, astfel încât să fie posibilă achiziția simultană a datelor pentru diferite benzi de frecvență. Din punct de software, se preconizează utilizarea medului de dezvoltare GNU Radio pentru controlul și captura datelor provenite de la platformele SDR și utilizarea mediului MATLAB pentru estimarea gradului de ocupare a spectrului pe baza datelor colectate, folosind diferiți algoritmi de detecție spectrală.

Componentele necesare pentru implementarea sistemului care au fost achiziționate pe parcursul anului 2018 sunt:

- Un amplificator de zgomot redus (LNA) MiniCircuits ZX60-V63+ (gamă de frecvență 0,05 până la 6 GHz, câștig de 21,9 dB la 0,05 GHz, câștig de 15.4 dB la 6 GHz);
- Un divizor de putere cu 4 ieșiri MiniCircuits ZN4PD1-63HP-S+ (gamă de frecvență 250 MHz până la 6 GHz, atenuare de inserție 1 dB);
- Server Fujitsu Primergy RX300;
- Router wireless Asus 4G-AC68U AC1900.

Au fost achiziționate de asemenea echipamente necesare pentru testarea și validarea în condiții de laborator a sistemului implementat.

De asemenea, pe parcursul anului 2018 echipa de cercetare a dezvoltat o variantă optimizată a unui algoritm de detecție spectrală bazat pe detecția de energie.

Pe măsură ce numărul sistemelor de comunicații radio a crescut semnificativ în ultimele decenii, una dintre resursele-cheie necesare, care este spectrul de frecvență, a devenit supraaglomerată. Cu toate acestea, diferite campanii de măsurare efectuate recent [17] [18] au dezvăluit faptul că mai multe benzi de frecvență sunt de fapt utilizate într-un grad foarte scăzut.

Contradicția aparentă care se ridică din comentariile anterioare poate fi explicată prin luarea în considerare a modelului actual de licențiere a spectrului, care este unul static. Aceasta înseamnă că majoritatea benzilor de frecvență sunt deținute de operatorii de rețea, care au dreptul exclusiv de a transmite în acele benzi. O astfel de abordare conduce, în majoritatea cazurilor, la o utilizare extrem de ineficientă a resurselor de frecvență.

O posibilă soluție la această problemă este accesul dinamic la spectru (DSA) [19], care presupune că utilizatorii secundari (SU, fără licență) au permisiunea de a utiliza resurse de frecvență atât timp cât utilizatorii primari (PU, licențiați) nu le utilizează în mod activ. Acest tip de abordare a fost deja integrat în diferite standarde existente [18] [20] și se preconizează a fi una dintre tehnologiile-cheie pentru rețelele 5G viitoare [21] - [24].

Orice echipament compatibil cu DSA trebuie să identifice benzile de frecvență disponibile prin efectuarea unui proces de detectare a spectrului în timp real (SS). Diferite metode SS sunt cunoscute [25], dintre care una dintre cele mai populare este detecția energiei [26].

Algoritmul clasic de detecție a energiei (CED) [26] prezintă mai multe dezavantaje, cele mai importante fiind legate de performanța slabă în mediile cu raport redus de semnal-zgomot (SNR) și de sensibilitatea crescută la modificările nivelului de zgomot. Pentru a depăși aceste dezavantaje, au fost propuși algoritmi îmbunătățiți.

Algoritmul IED propus în [27], și îmbunătățit în [28], decide prezența utilizatorilor primari pe baza informațiilor din mai multe sloturi de detecție spectrală. În [29] este introdus un algoritm de detecție pentru care pragul de detectare este adaptat pentru a minimiza probabilitatea de eroare de decizie. Adaptarea ferestrei de detectare în scenarii dinamice cu intervale de timp ocupate și libere este considerată în [30]. Pe baza rapoartelor de utilizare a spectrului care pot fi calculate pe baza modelării ocupării spectrului [31], autorii lucrării [32] propun o metodă

adaptivă pentru calcularea unui prag de decizie optim. O funcție de cost care depinde de activitatea utilizatorilor primari este folosită în algoritmul de detecție de energie descris în [33].

Algoritmul îmbunătățit propus este o versiune adaptivă a algoritmului 3-Event Energy Detection (3EED) publicat în [34] [35]. Comparăm performanța algoritmului propus cu algoritmul Adaptive CED (ACED) [32] pentru diferite scenarii și discutăm rezultatele obținute.

Într-o lucrare anterioară [34], am propus algoritmul simplu (sau cu prag fix) 3EED pentru a detecta prezența semnalului PU într-o rețea radio cognitiv (CR) afectată de zgomot alb gaussian aditiv (ZAGA), care este caracterizată de un anumit raport semnal-zgomot (RSZ). În fiecare slot de detecție i , calculăm mai întâi energia E_i din slotul curent (algoritmul CED efectuează numai acest test). Dacă acest test E_i eșuează, atunci 3EED efectuează un al doilea test în slotul anterior E_{i-1} (de fapt, acest test a fost efectuat înainte și rezultatul său este pur și simplu citit din memorie). Dacă și numai dacă testul E_{i-1} nu a reușit, algoritmul 3EED va executa un al treilea test în următorul slot E_{i+1} . Prin urmare, al treilea slot introduce o întârziere suplimentară de detecție, dar, de asemenea, crește considerabil performanțele de detecție [35]. De fapt, ambele teste suplimentare în 3EED, comparativ cu CED, permit SU să detecteze mai precis prezența semnalului PU în cazul scăderilor temporare de energie sau în cazul absenței semnalului PU [34].

Performanțele oricărui algoritm de detecție depind puternic de valoarea selectată pentru pragul de decizie. În [34], expresia pragului de decizie a fost determinată pentru 3EED, având în vedere o valoare țintă a probabilității false de alarmă $P_{fa,target}^{3EED}$, care depinde și de probabilitatea de alarmă falsă a CED [26] [27] [28]:

$$\begin{aligned} \lambda_{P_{fa}} &= \left[Q^{-1} \left(P_{fa,target}^{CED} \right) \sqrt{2N} + N \right] \sigma_n^2 \\ &= \left[Q^{-1} \left(1 + \sqrt[3]{P_{fa,target}^{3EED} - 1} \right) \sqrt{2N} + N \right] \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (1)$$

unde N este numărul de eșantioane de semnal per slot de detecție, σ_n^2 este variația AWGN, iar $Q(\cdot)$ denotă funcția Q . Pragul introdus în (1) este stabilit pentru a garanta eficiența spectrală a SU în rețeaua CR, utilizând o valoare specificată pentru $P_{fa,target}^{3EED}$.

Pe de altă parte, în rețeaua CR, dacă vrem să garantăm utilizarea în siguranță a spectrului pentru PU (fără interferențe cauzate de SU), atunci probabilitatea corectă de detecție a semnalului PU, adică $P_{d,target}^{3EED}$, trebuie să fie stabilită ca țintă. Urmând o procedură similară cu cea din (1), se poate obține pragul de decizie pentru o valoare $P_{d,target}^{3EED}$ dată [28]:

$$\begin{aligned} \lambda_{P_d} &= \left[Q^{-1} \left(P_{d,target}^{CED} \right) \sqrt{2N} + N \right] (\sigma_n^2 + \sigma_s^2) \\ &= \left[Q^{-1} \left(1 + \sqrt[3]{P_{d,target}^{3EED} - 1} \right) \sqrt{2N} + N \right] (\sigma_n^2 + \sigma_s^2) \end{aligned} \quad (2)$$

unde σ_s^2 este varianța semnalului PU.

În cazul algoritmului simplu (non-adaptiv) 3EED, testele de energie se efectuează în toate sloturile de detecție utilizând o valoare fixă pentru pragul de decizie λ determinată utilizând fie (1), fie (2), în funcție de criteriul de performanță selectat.

În paragrafele anterioare am prezentat abordarea cu prag fix pentru un algoritm ED. Un prag de decizie adaptiv a fost dovedit a oferi performanțe mai bune de detecție. De exemplu, în

[32], pragul de decizie este setat adaptiv pentru algoritmul CED și se analizează impactul acestui mecanism adaptiv asupra performanțelor decizionale. De fapt, valoarea pragului este setată pentru a minimiza probabilitatea de eroare de decizie pentru valorile cunoscute ale ciclului de funcționare a PU și ale RSZ. Am urmat aceeași procedură pentru algoritmul IED în [28].

La fel ca în [28], considerăm aici un model de transmisie al PU care include un număr mediu de sloturi consecutive B ocupate, urmate de un număr de sloturi libere T-B, unde T reprezintă numărul total de sloturi din modelul de transmisie. Pentru acest model, ciclul de funcționare al transmisiei PU este definit ca $\alpha = B/T$.

Apoi, definim metrica de performanță care trebuie optimizată pentru orice algoritm de detecție de energie (funcția de cost), adică probabilitatea de eroare de decizie dată de [32] [28]:

$$P_e^{3EED}(\lambda, \alpha, SNR) = (1 - \alpha) P_{fa}^{3EED}(\lambda, \sigma_n^2) + \alpha [1 - P_d^{3EED}(\lambda, SNR)] \quad (3)$$

unde P_d^{3EED} și P_{fa}^{3EED} reprezintă probabilitățile de detecție corectă și respectiv de alarmă falsă conform cu algoritmul 3EED. Aceste două probabilități sunt exprimate ca funcții ale pragului de decizie și ale variațiilor semnalului PU și ale zgomotului. Analizând expresia din (3), observăm că primul termen specifică probabilitatea unei erori de decizie, care presupune că slotul de detecție a fost găsit ocupat fără a avea transmisia PU în acest slot (alarmă falsă). Fiecare eveniment de alarmă falsă apare numai atunci când PU nu este ocupat și acesta este motivul pentru care apare factorul de ponderare $1 - \alpha$ pentru primul termen din (3). În mod similar, al doilea termen din (3) specifică detecțiile pierdute care apar în sloturile ocupate, unde PU transmite cu o rată α .

Apoi, pragul de decizie va fi setat să minimizeze valoarea P_e^{3EED} dată de (3). Prin urmare, această problemă de optimizare este definită de [32] [28]:

$$\lambda_{opt}(\alpha, SNR) = \arg \min_{\lambda} P_e^{3EED}(\lambda, \alpha, SNR) \quad (4)$$

unde λ_{opt} reprezintă pragul optim. În [32], autorii au determinat și expresia exactă pentru pragul optim de decizie. Cu toate acestea, este dificil să se deducă o expresie similară a pragului optim de decizie pentru algoritmul 3EED adaptiv propus de către noi (A3EED). Prin urmare, alegem să determinăm valoarea pragului optim folosind expresiile P_d^{3EED} și P_{fa}^{3EED} determinate în [34] și prin implementarea în MATLAB a unui algoritm de căutare bazat pe forță brută pentru minimizarea valorii din (4). În [28], am observat că complexitatea acestui algoritm de căutare bazat pe forță brută crește cu dimensiunea setului de valori din intervalul de căutare pentru λ . Prin urmare, ca și în [28], reducem complexitatea algoritmului de căutare prin exploatarea proprietăților de monotonie ale funcției Q^{-1} din expresiile probabilităților țintă și din (1) și respectiv (2):

$$\begin{aligned} P_{fa, target}^{3EED} < 0.4 &\Rightarrow Q^{-1}(P_{fa, target}^{3EED}) > 1 \Rightarrow \lambda_{p_{fa}} > (N + \sqrt{2N})\sigma_n^2 \\ P_{d, target}^{3EED} > 0.5 &\Rightarrow Q^{-1}(P_{d, target}^{3EED}) < 1 \Rightarrow \lambda_{p_d} < (N + \sqrt{2N})(\sigma_n^2 + \sigma_s^2) \end{aligned} \quad (5)$$

Având în vedere că pragul de decizie pentru A3EED trebuie să satisfacă ambele condiții din (5), putem aplica procedura de căutare numai pentru următorul interval restrâns pentru λ [28]:

$$(N + \sqrt{2N})\sigma_n^2 < \lambda_{opt} < (N + \sqrt{2N})(\sigma_n^2 + \sigma_s^2) \quad (6)$$

În figura 3, prezentăm algoritmul A3EED, care utilizează căutarea semi-analitică pentru pragul optim [28] [34].

```

Require:  $\alpha, SNR, L$ 
Estimate  $\lambda_{opt} = \{\lambda \mid \min P_e(\lambda, \alpha, SNR)\}$ ;
for each sensing slot  $i$  do
  Estimate and save energy  $E_i$ ;
  if  $E_i > \lambda_{opt}$  then
     $q_i = 1$ ;
  else
    Read  $E_{i-1}$  (saved in slot  $i-1$ );
    if  $E_{i-1} > \lambda_{opt}$  then
       $q_i = 1$ ;
    else
      Estimate  $E_{i+1}$ ;
      if  $E_{i+1} > \lambda_{opt}$  then
         $q_i = 1$ ;
      else
         $q_i = 0$ ;
      end if
    end if
  end if
end if
end for

```

Fig. 3. Descrierea algoritmului adaptiv 3EED (A3EED).

Performanțele algoritmilor ACED și A3EED au fost analizate în funcție de probabilitatea de eroare de decizie (P_e). Prin urmare, au fost comparate, pentru ambii algoritmi, valorile teoretice ale lui P_e estimate după cum a fost descris în paragrafele anterioare cu rezultatele simulărilor Monte Carlo. În toate simulările, valorile parametrilor sistemului sunt considerate ca: $N = 65537$, RSZ între -25 dB și -15 dB, $T = 1000$ și $B = \alpha \cdot T$, unde N , α , B și T au fost definite anterior. De asemenea, în toate simulările, au fost luate în considerare 5.000 de sloturi de detecție în fiecare secvență de transmisie.

În figura 4, pentru o valoare RSZ de -16 dB, valorile teoretice ale P_e pentru ACED și A3EED au fost reprezentate grafic, în funcție de ciclul de funcționare α . Așa cum a fost discutat anterior, pentru fiecare valoare a lui α , valoarea optimă a pragului de decizie este determinată astfel încât valoarea P_e minimă să fie atinsă. Analizând rezultatele din figura 4, observăm că A3EED depășește ACED, pentru orice valoare a lui α . De asemenea, se poate observa că valoarea maximă P_e pentru ACED este obținută la $\alpha=0.5$ [32], în timp ce pentru A3EED se obține la o valoare mai mică a lui $\alpha=0,42$. Această diferență între valorile maxime ale graficelor P_e pentru ACED și A3EED demonstrează că A3EED funcționează mai bine în regiunea valorilor mari pentru ciclul de funcționare sau prezintă o asimetrie în ceea ce privește valorile α . Urmând aceeași procedură, graficele P_e pot fi obținute pentru orice valoare RSZ între -25 dB și -15 dB. În mod similar, în figura 5, am reprezentat $P_e(\alpha)$, pentru RSZ=-20 dB. În acest caz, valoarea maximă P_e pentru A3EED este atinsă la $\alpha=0,46$. Comparând rezultatele din figurile 4 și 5, observăm că diferența dintre valorile maxime P_e pentru ACED și A3EED crește atunci când RSZ scade. De fapt, atunci când RSZ scade, atunci P_e crește, pentru aceeași valoare a lui α .

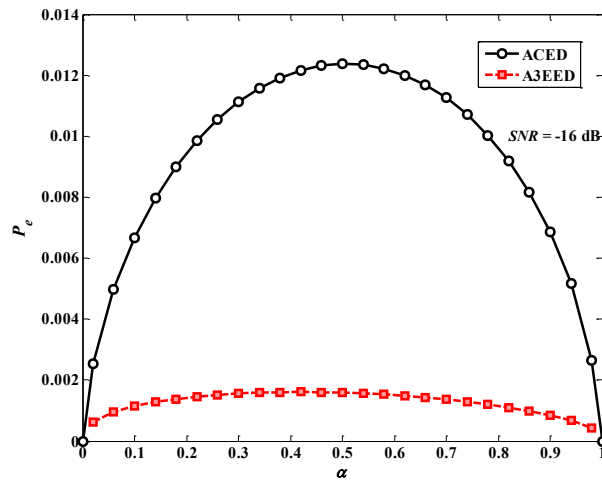


Fig. 4. Probabilitatea de eroare pentru ACED și A3EED ca funcție de α (RSZ=-16dB)

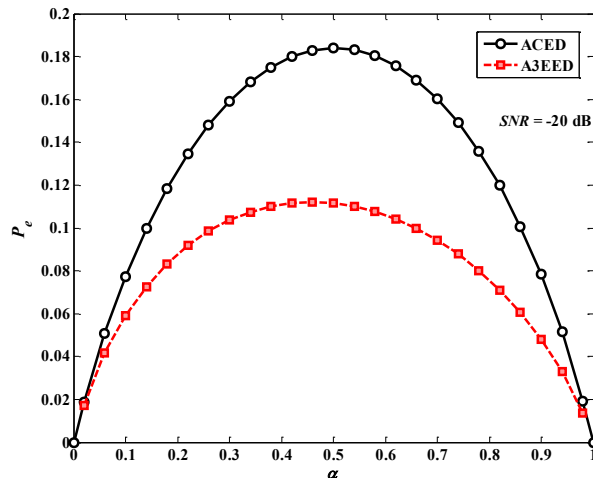


Fig. 5. Probabilitatea de eroare pentru ACED și A3EED ca funcție de α (RSZ=-20dB)

Apoi, vrem să analizăm dependența de P_e pentru valorile SNR menționate mai sus. Prin urmare, în figura 6, valorile P_e (RSZ) au fost reprezentate pentru a studia dependența de RSZ a performanțelor ACED și A3EED, pentru diferite valori ale $\alpha=ct$. După cum se observă deja în figurile 4 și 5, datorită simetriei uniforme a graficelor $P_e(\alpha)$, valorile minime ale lui P_e sunt obținute pentru $\alpha \leq 0,1$ și $\alpha \geq 0,9$, iar valorile maxime ale P_e sunt obținute pentru valoarea ciclului de funcționare α în jur de 0,5 (pentru orice valoare a RSZ). Mai mult decât atât, în figura 6, am considerat trei valori reprezentative pentru $\alpha \in \{0,1, 0,5, 0,9\}$ și am reprezentat grafic atât valorile teoretice cât și cele de simulare pentru P_e . Se poate observa cu ușurință că, atât pentru ACED, cât și pentru A3EED, graficele obținute prin simulare se potrivesc perfect cu cele teoretice [32] [34] [35]. 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 6, putem vedea că pentru un RSZ $\in [-24, -17]$ dB, A3EED oferă un câștig RSZ de detecție peste ACED de peste 1,3 dB, pentru aceeași valoare a $\alpha \geq 0,5$.

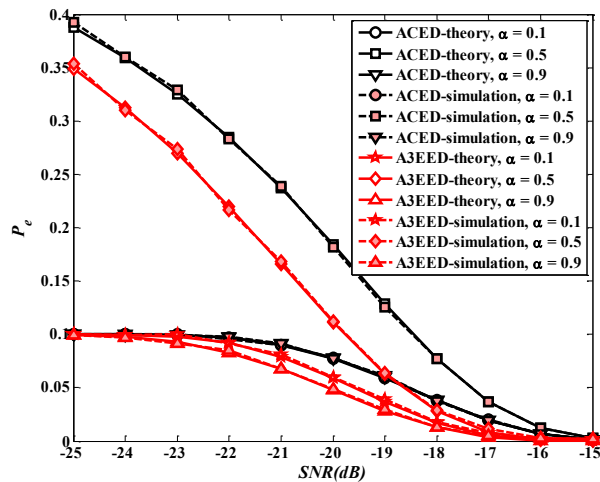


Fig. 6. Probabilitatea de eroare ca funcție de RSZ

Pentru a accentua câștigul RSZ de detecție a A3EED peste ACED, sunt prezentate în figura 7 numai graficele P_e pentru $\alpha \in \{0.1, 0.9\}$. Prin urmare, se poate observa că A3EED oferă un câștig RSZ peste ACED de aproximativ 1 dB în mijlocul intervalului RSZ considerat (adică pentru $RSZ \in [-22, -18]$ dB) pentru $\alpha = 0.1$. De asemenea, pentru $\alpha = 0.9$ și în același domeniu RSZ, A3EED oferă un câștig RSZ mai mare decât ACED, de aproximativ 1,5 dB.

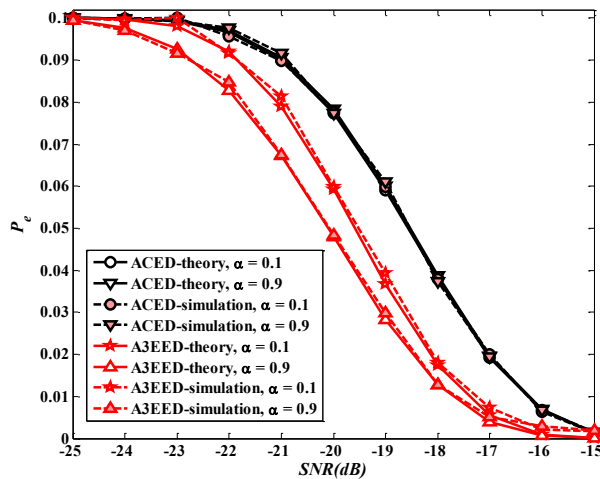


Fig. 7. Probabilitatea de eroare ca funcție de RSZ pentru $\alpha \in \{0.1, 0.9\}$

În concluzie, a fost prezentat și a analizat un nou algoritm de prag adaptiv 3EED (A3EED). Atât rezultatele teoretice cât și cele de simulare demonstrează că A3EED oferă un câștig RSZ de decizie peste ACED de peste 1 dB. De asemenea, a fost arătat că valoarea acestui câștig RSZ depinde de ciclul de funcționare al PU. Ca și direcții viitoare de cercetare, ne propunem să extindem analiza adaptivă a pragurilor la alți algoritmi ED și la alte funcții de cost.

De asemenea, în cadrul etapei pe anul 2018 a fost dezvoltată și pagina web care conține informații la zi legate de desfășurarea proiectului, care poate fi accesată la adresa: <http://spectrum5g.radio.pub.ro>.

Publicații:

Activitatea de cercetare științifică derulată pe parcursul anului 2018 a fost concretizată prin publicarea unui articol în volumul unei conferințe internaționale în curs de indexare ISI:

- M. J. Ahmad Al Sammarraie, A. Martian and C. Vlădeanu, “A Modified 3EED Spectrum Sensing Algorithm Using an Adaptive Decision Threshold”, în Proceedings 13th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC2018), pp. 1-4, 8-9 Noiembrie 2018, Timișoara, România.

În concluzie, putem afirma că toate obiectivele etapei pe 2018 a proiectului de cercetare “Sistem de evaluare a gradului de utilizare a spectrului RF în vederea introducerii rețelelor 5G” au fost îndeplinite cu succes.

Bibliografie:

[1] *3GPP First 5G NR Standard Approved*, disponibil online la: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1929-nsa_nr_5g, accesat în noiembrie 2018.

[2] *3GPP Release 15*, disponibil online la: <http://www.3gpp.org/release-15>, accesat în noiembrie 2018.

[3] Strategia 5G pentru Romania, disponibil online la: http://www.ancom.org.ro/uploads/links_files/Strategia_5G_pentru_Romania.pdf, accesat în noiembrie 2018.

[4] *Strategic Roadmap Towards 5G for Europe – Opinion on spectrum related aspects for next-generation wireless systems (5G)*, disponibil online la http://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2013/05/RPSG16-032-Opinion_5G.pdf, accesat în noiembrie 2018.

[5] *Strategic Roadmap Towards 5G for Europe – RSPG Second Opinion on 5G Networks*, disponibil online la: https://circabc.europa.eu/sd/a/fe1a3338-b751-43e3-9ed8-a5632f051d1f/RSPG18-005final-2nd_opinion_on_5G.pdf, accesat în noiembrie 2018.

[6] H. Steendam and M. Moeneclaey, “Different guard interval techniques for OFDM: Performance comparison,” in *Multi-Carrier Spread Spectrum*, ser. Lecture Notes Electrical Engineering, S. Plass, A. Dammann, S. Kaiser, and K. Fazel, Eds. Springer Netherlands, vol.1, pp.11–24, 2007.

[7] B. Muquet, Z. Wang, G. Giannakis, M. de Courville, and P. Duhamel, “Cyclic Prefixing or Zero Padding for Wireless Multicarrier Transmissions” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 12, pp.2136–2148, Dec 2002.

[8] M. Huemer, C. Hofbauer, A. Onic, and J. B. Huber, “Design and analysis of UW-OFDM signals,” *{AEU} - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 68, no. 10, pp. 958 – 968, 2014.

- [9] T. Svensson, T. Frank, T. Eriksson, D. Aronsson, M. Sternad, and A. Klein, "Block interleaved frequency division multiple access for power efficiency, robustness, flexibility, and scalability," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, pp.13, Sep 2009.
- [10] G. Huang, A. Nix, and S. Armour, "Impact of radio resource allocation and pulse shaping on PAPR of SC-FDMA signals," in *Proc. IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–5, Sep 2007.
- [11] M. Wylie-Green, E. Perrins, and T. Svensson, "Introduction to CPM-SCFDMA: A novel multiple-access power-efficient transmission scheme," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 7, pp. 1904–1915, Jul 2011
- [12] N. Svensson, "On differentially encoded star 16QAM with differential detection and diversity," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 586–593, Aug 1995.
- [13] M. Kasparick, G. Wunder, P. Jung, D. Maryopi, "Bi-Orthogonal Waveforms for 5G Random Access with Short Message Support," in *European Wireless Conference (EW'14)*. Barcelona, Spain: IEEE Explorer, pp.1-6, Jun 2014.
- [14] J.-B. Dore, V. Berg, and D. Ktenas, "Channel estimation techniques for 5G cellular networks: FBMC and multiuser asynchronous fragmented spectrum scenario," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 26, no. 1, pp. 15–30, Nov 2014.
- [15] Fettweis Gerhard "GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing", *VTC Spring - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, pp. 1 - 4, Jun 2009.
- [16] V. Vakilian, T. Wild, F. Schaich,, S. ten Brink, J. F. Frigon, "Universal Filtered Multi-Carrier Technique for Wireless Systems Beyond LTE," *9th Int. Workshop on Broadband Wireless Access @ IEEE Iobecom'13*, Atlanta, Dec. 2013.
- [17] M. Hyty et al., "Spectrum Occupancy Measurements: A Survey and Use of Interference Maps," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2386-2414, Fourthquarter 2016.
- [18] A. Marțian, R. Crăciunescu, A. Vulpe, G. Suci, and O. Fratu, "Access to RF White Spaces in Romania: Present and Future", in *Wireless Personal Communications*, vol. 86, issue 3, pp. 693-702, April 2016.
- [19] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A Survey of Dynamic Spectrum Access," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 79-89, May 2007.
- [20] U. Challita, L. Dong, and W. Saad, "Proactive Resource Management for LTE in Unlicensed Spectrum: A Deep Learning Perspective," in *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Early Access, May 2018.
- [21] U. Herzog et al., "Quality of service provision and capacity expansion through extended-DSA for 5G", in *Trans. Emerg. Telecom. Tech.*, vol. 27, no. 9, pp. 1250-1261, September 2016.
- [22] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206-1232, 2015.
- [23] J. Mitola et al., "Accelerating 5G QoE via public-private spectrum sharing," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 77-85, May 2014.
- [24] S. K. Sharma, T. E. Bogale, L. B. Le, S. Chatzinotas, X. Wang and B. Ottersten, "Dynamic Spectrum Sharing in 5G Wireless Networks With Full-Duplex Technology: Recent Advances and

Research Challenges,” in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 1, pp. 674-707, Firstquarter 2018.

[25] T. Yucek and H. Arslan, “A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications,” IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, First Quarter 2009.

[26] H. Urkowitz, “Energy detection of unknown deterministic signals,” Proceedings of the IEEE, vol.55, no.4, pp. 523- 531, April 1967.

[27] M. López-Benítez and F. Casadevall, “Improved energy detection spectrum sensing for cognitive radio,” IET Communications, Special Issue on Cognitive Comm., vol. 6, no. 8, pp. 785-796, May 2012.

[28] M. J. A. Al Sammarraie, A. Marțian and C. Vlădeanu, “Adaptive IED Spectrum Sensing Algorithm for Different Duty Cycle Values,” in Proceedings of IEEE 12th International Conf. on Communications (COMM 2018), Bucharest, Romania, 14-16 June, 2018, pp. 51-54.

[29] D. R. Joshi, D. C. Popescu and O. A. Dobre, “Gradient-Based Threshold Adaptation for Energy Detector in Cognitive Radio Systems,” IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 1, pp. 19-21, January 2011.

[30] D. Treeumnuk and D. C. Popescu, “Enhanced Spectrum Utilization in Dynamic Cognitive Radios with Adaptive Sensing,” in IET Signal Processing, vol. 8, no. 4, pp. 339-346, June 2014.

[31] Y. Chen and H. S. Oh, “A Survey of Measurement-Based Spectrum Occupancy Modeling for Cognitive Radios,” in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 1, pp. 848-859, Firstquarter 2016.

[32] N. Wang, Y. Gao and X. Zhang, “Adaptive Spectrum Sensing Algorithm Under Different Primary User Utilizations,” IEEE Communications Letters, vol. 17, no. 9, pp. 1838-1841, September 2013.

[33] I. Sobron, P. S. R. Diniz, W. A. Martins and M. Velez, “Energy Detection Technique for Adaptive Spectrum Sensing,” IEEE Transactions on Communications, vol. 63, no. 3, pp. 617-627, March 2015.

[34] C. Vlădeanu, C. V. Năstase and A. Marțian, “Energy Detection Algorithm for Spectrum Sensing Using Three Consecutive Sensing Events,” IEEE Wireless Comm. Lett., vol. 5, pp. 284-287, June 2016.

[35] A. Marțian and 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), Timisoara, 27-28 Oct. 2016, pp. 111-115.

26.11.2018

Director de proiect

Ș.I. dr. ing. Alexandru MARȚIAN