

Primena vremensko-frekvencijskih metoda kod analize spektra u kognitivnom radiju

Nenad Stojanović, Milenko Andrić, Dimitrije Bujaković, Boban Bondžulić i Vladimir Ristić

Apstrakt—U radu je izvršena analiza primene tri metode vremensko-frekvencijske analize signala za potrebe analize spektra kod kognitivnog radija. Analiza je sprovedena modelovanim i realnim signalima za aditivni beli Gausov šum različitog odnosa signal/šum. Performanse metoda su analizirane kroz promene odnosa signal/šum i praga detekcije, određivanjem verovatnoće lažnog alarma, verovatnoće propuštene detekcije i verovatnoće ispravne detekcije. Pokazano je da se metode vremensko-frekvencijske analize signala mogu efikasno koristiti za potrebe analize spektra uz odgovarajuću optimizaciju parametara.

Gljučne reči—Frekvencijsko skakanje, kognitivni radio, vremensko-frekvencijska analiza spektra.

I. UVOD

EKSPONENCIJALNI rast broja bežičnih uređaja i sistema prenosa, kao i zahtevi korisnika za većim brzinama prenosa i boljem kvalitetu usluge, uticali su na sve izraženije probleme kod dodele spektra i uopšte pristupu radio spektru. Jedno od rešenja predstavlja kognitivna radio tehnologija, čiji je cilj da poveća spektralnu efikasnost koristeći delove spektra koje ne koristi primarni korisnik za prenos signala sekundarnih korisnika [1]. Sekundarni korisnici određenog spektralnog opsega ni u kom slučaju ne smeju ometati primarne korisnike. U tom cilju, ovako koncipiran pristup radio spektru, odnosno upravljanju spektrom (eng. *Spectrum Management*) se sastoji iz četiri koraka [2]:

- analiza spektra (eng. *Spectrum Sensing*),
- donošenje odluka (eng. *Spectrum Decision*),
- deljenje spektra (eng. *Spectrum Sharing*) i
- mobilnost spektra (eng. *Spectrum Mobility*).

Kognitivni radio se može definisati kao unapređeni softverski definisani radio, sa ostvarenom sposobnosti učenja i

Nenad Stojanović – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Veljka Lukića Kurjaka 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: nivzv@hotmail.com).

Milenko Andrić – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Veljka Lukića Kurjaka 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: andricsmilenko@gmail.com).

Dimitrije Bujaković – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Veljka Lukića Kurjaka 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: dimitrijebujakovic@gmail.com).

Boban Bondžulić – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Veljka Lukića Kurjaka 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: bondzulici@yahoo.com).

Vladimir Ristić – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Veljka Lukića Kurjaka 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: vladarist@gmail.com).

zaključivanja, odnosno kognitivnost [3]. Jednu od definicija dao je i američki FCC (*Federal Communication Commission*) po kojem kognitivni radio predstavlja bežični uređaj koji dinamički detektuje neiskorišćene delove spektra i koristi ih tako da ni na koji način ne ometa primarne korisnike u tom opsegu [4].

Najvažnija funkcija kognitivnog radija je analiza spektra, pri čemu je osnovni izazov analize spektra detekcija signala male snage sa malom verovatnoćom propuštene detekcije u uslovima niskog odnosa signal/šum (eng. *Signal to Noise Ratio*, SNR). Postoji više različitih klasifikacija tehnika za analizu spektra [5, 6, 7]. Jedna od najčešće korišćenih je podela na: tehnike analize spektra za detekciju primarnih predajnika, tehnike analize spektra za detekciju primarnih prijemnika i tehnike analize spektra zasnovane na temperaturi interferencije.

Vremensko-frekvencijske metode analize signala se koriste za analizu spektra kognitivnog radija [8]. U [9] je izvršena analiza spektra kada je primarni signal digitalna televizija, odnosno OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) signal. Autori u [10] predlažu modifikaciju vremensko-frekvencijskih metoda za analizu spektra u prisustvu OFDM signala. U [11] su autori pored OFDM signala, razmatrali i signal sa frekvencijskim skakanjem. Analiza spektra radio sistema TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*) je predložena u [12]. Karakteristika svih navedenih radova je korišćenje modelovanih signala za analizu spektra kognitivnog radija.

Slična analiza spektra vrši se tokom elektronskog rata u cilju prikupljanja informacija, ali bez potrebe za iskorišćenjem spektralnih šupljina. Kod ovakvih sistema neke od osnovnih funkcija su detekcija izvora zračenja, klasifikacija i identifikacija emitera, određivanje lokacije emitera i njegovo praćenje. Sve ove funkcije potrebno je obavljati u veoma kompleksnom okruženju u realnom vremenu.

U ovom radu su analizirane metode vremensko-frekvencijske analize signala za potrebe analize spektra kognitivnog radija. Razmatran je signal sa frekvencijskim skakanjem koji se često koristi u vojnim radio sistemima. Frekvencijsko skakanje predstavlja tehniku prenosa koja se zasniva na skokovitoj promeni frekvencije nosioca u širem opsegu nego što je to neophodno [13]. Za potrebe analize razvijen je simulacioni model, a takođe su korišćeni i snimljeni realni signali iz baze signala [14].

Ostatak rada je organizovan na sledeći način. U drugom delu rada ukratko su opisane korišćene metode za vremensko-frekvencijsku analizu signala. U trećem delu rada opisana je

metodologija analize spektra. Analiza modelovanih signala sa frekvencijskim skakanjem je data u četvrtom poglavlju, dok je u petom izvršena analiza realnih, akviziranih signala sa frekvencijskim skakanjem. U poslednjem odeljku dati su najvažniji zaključci i budući pravci istraživanja.

II. METODE VREMENSKO-FREKVENCIJSKE ANALIZE SIGNALA

Najčešće korišćena vremensko-frekvencijska predstava signala je spektrogram. Spektrogram predstavlja energetska verziju vremenski zavisne Furijeove transformacije (eng. *Short-time Fourier Transform*, STFT). STFT je definisana kao [15]:

$$STFT(n, k) = \sum_{m=-N/2}^{N/2} w(m)x(n+m)e^{-j(2\pi/N)mk}, \quad (1)$$

gde su $x(n+m)$ signal koji se analizira, $w(m)$ prozorska funkcija, dok je broj tačaka za izračunavanje Furijeove transformacije $N+1$. Spektrogram je definisan kao:

$$SPEC(n, k) = |STFT(n, k)|^2. \quad (2)$$

Vremenska i frekvencijska rezolucija određene su dužinom prozorske funkcije. Smanjenjem dužine prozora dobija se bolja vremenska rezolucija čime se negativno utiče na frekvencijsku rezoluciju. Povećanjem dužine prozora, smanjuje se vremenska rezolucija, ali se poboljšava predstava signala u frekvencijskom domenu. Prozori se međusobno mogu preklapati ili ne. Povećanjem preklapanja prozora poboljšava se vremenska rezolucija [16].

Vignerova vremensko-frekvencijska distribucija (eng. *Wigner Distribution*) je razvijena kao optimalna za predstavu jednokomponentnih linearno frekvencijski modulisanih signala u vremensko-frekvencijskom domenu. Pri analizi višekomponentnih signala, pojavljuju se komponente koje se ne nalaze u originalnom signalu, što predstavlja jedan od nedostataka ove transformacije. Kompleksnost izračunavanja ove distribucije je veoma velika, što je još jedan nedostatak. Pseudo Vigner-Vilova vremensko-frekvencijska distribucija signala (eng. *Pseudo Wigner-Ville Distribution*, PWV) predstavlja Vignerovu raspodelu analitičkog signala i može se predstaviti primenom STFT kao [17]:

$$WD(n, k) = \sum_{i=-N/2}^{N/2} STFT(n, k+i)STFT^*(n, k-i) = |STFT(n, k)|^2 + 2\text{Re}\left\{\sum_{i=1}^{N/2} STFT(n, k+i)STFT^*(n, k-i)\right\}, \quad (3)$$

gde je sa * označena konjugovano kompleksna vrednost. Poređenjem (2) i (3) uočava se da kod Vignerove raspodele postoji dodatni član koji povećava broj računskih operacija i time povećava složenost ovog algoritma u odnosu na spektrogram.

U cilju postizanja kompromisa između Vignerove raspodele i spektrograma, uz iskorišćenje prednosti koje daje Vignerova

raspodela u smislu predstave signala i smanjenja računarske složenosti što je karakteristika spektrograma, predložen je S-metod, koji se definiše kao [18]:

$$SM_L(n, k) = \sum_{i=-L}^L STFT(n, k+i)STFT^*(n, k-i), \quad (4)$$

gde je L frekvencijska dužina prozora. Za slučaj kada je $L=0$, S-metod predstavlja spektrogram, dok je za slučaj kada je $L=N/2$, S-metod zapravo pseudo Vignerova raspodela [17].

III. ANALIZA SPEKTRA KORIŠĆENJEM VREMENSKO-FREKVENCIJSKIH METODA

U ovom istraživanju predložena je analiza spektra kognitivnog radija. Analiza spektra izvršena je na osnovu dve hipoteze:

$$\begin{aligned} H_0: y[n] &= z[n], n=1, \dots, N \\ H_1: y[n] &= x[n] + z[n], n=1, \dots, N \end{aligned}, \quad (5)$$

gde je $y[n]$ signal čiji se spektar analizira, $x[n]$ je signal primarnog korisnika, dok je $z[n]$ aditivni beli Gausov šum. Hipoteza H_0 je tačna kada u analiziranom spektru nema prisustva signala primarnog korisnika, dok je hipoteza H_1 tačna kada postoji primarni signal.

Analiza spektra se sprovodi kroz sledeće korake:

1. realizacija vremensko-frekvencijske analize spektra korišćenjem neke od opisanih metoda (spektrogram, S-metod za $L=2$ i pseudo Vigner-Vilova raspodela),
2. poređenje amplituda spektralnih komponenti sa pragom detekcije u svakom vremenskom binu i
3. donošenje odluke da li postoji primarni signal u određenom vremenskom intervalu i ako postoji koji deo spektra zauzima.

Analiza efikasnosti rada kognitivnog radija realizovana je kroz verovatnoće ispravne detekcije (P_d), lažnog alarma (P_{fa}) i propuštene detekcije (P_{miss}). Određivanje da li je signal primarnog korisnika ispravno detektovan vršeno je po vremenskim binovima, koji su određeni brojem odbiraka korišćenim za izračunavanje spektra nekom od opisanih vremensko-frekvencijskih metoda. Analiza je sprovedena za slučaj kada se u radio spektru javlja emisija samo jednog primarnog korisnika.

Određivanje definisanih verovatnoća vršeno je po vremenskim binovima prema sledećem:

- ukoliko je detektovan signal u frekvencijskom opsegu u kojem je i emitovan, izvršena je uspešna detekcija,
- ukoliko nije detektovan signal kada nije ni bilo emisije, izvršena je uspešna detekcija,
- ukoliko je detektovan signal u nekom frekvencijskom opsegu u kome primarni korisnik nije vršio emisiju, došlo je do pojave lažnog alarma,
- ukoliko primarni signal nije detektovan u opsegu u kome je postajala emisija došlo je do propuštene detekcije,

- ukoliko je detektovano više signala, od kojih je jedan signal primarnog korisnika, izvršena je uspešna detekcija,
- ukoliko je detektovano više signala, ali nijedan od njih nije u opsegu gde je emitovan primarni signal, došlo je do propuštene detekcije,
- ukoliko je detektovano više signala, a primarni korisnik nije vršio emisiju, došlo je do pojave lažnog alarma,

Testiranja su vršena Monte-Karlo simulacijama, pri čemu je zbog slučajnog procesa u kanalu izazvanog aditivnim belim Gausovim šumom, postupak ponavljan 100 puta, nakon čega je vršeno usrednjavanje rezultata. Izabran broj ponavljanja testova je u skladu sa [11]. Analizirani su spektri modelovanog signala i spektri realnog signala sa sporim frekventijskim skakanjem primenom spektrograma, S-metoda za $L=2$ i pseudo Vigner-Vilove distribucije.

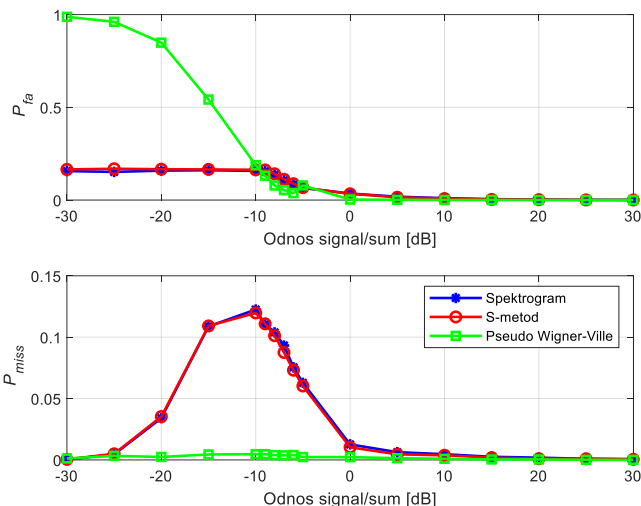
IV. ANALIZA SPEKTRA MODELOVANOG SIGNALA

Za potrebe analize razvijen je simulacioni model radio sistema prenosa sa frekventijskim skakanjem koji predstavlja signal primarnog korisnika. Modelovani sistem koristi opseg od 30-80 MHz sa sporim frekventijskim skakanjem, tako da se tokom jednog skoka prenosi 50 informacionih simbola. Korišćen je BFSK (*Binary Frequency Shift Keying*) modulacioni postupak. Generisani signal je trajanja nešto više od dve sekunde. Snaga aditivnog belog Gausovog šuma menjana je promenom njegove varijanse.

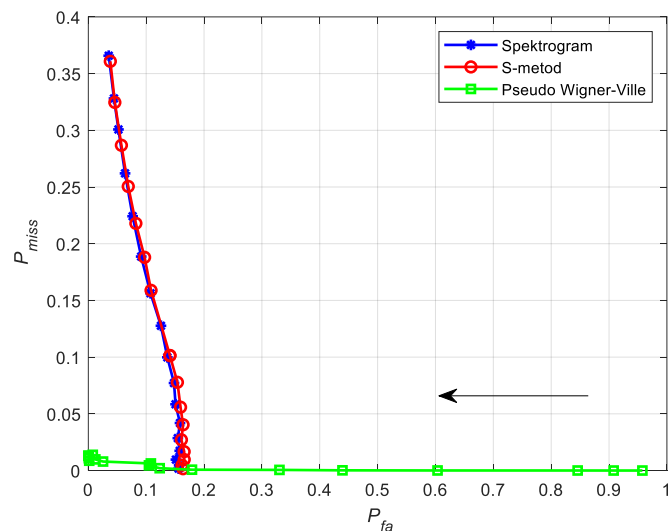
Na Sl. 1 prikazane su verovatnoće lažnog alarma i propuštene detekcije u odnosu na SNR za tri analizirane metode vremensko-frekventijske analize signala (spektrogram, S-metod za $L=2$ i pseudo Vigner-Vilova distribucija). Tokom analize, korišćeno je 128 odbiraka ($N=128$) za potrebe analize spektra sa preklapanjem 50%. Hamingov (*Hamming*) prozor je korišćen. Prag detekcije je postavljen na 50% maksimalne vrednosti snage simuliranog signala primarnog korisnika.

Analizom Sl. 1 se može uočiti da za pozitivne vrednosti SNR gotovo da nema slučajeva propuštene detekcije i lažnog alarma. Smanjenjem SNR, dolazi do porasta verovatnoća lažnog alarma i propuštene detekcije u intervalu od -10 do 0 dB. Kod verovatnoća propuštene detekcije, spektrogram i S-metod imaju rast, a nakon toga, za još niže vrednosti SNR, ponovo pad i vraćanje na vrednosti približno jednake nuli. Kod PWV takođe postoji ovaj rast verovatnoće propuštene detekcije, ali je on zanemarljiv u odnosu na vrednosti dobijene korišćenjem druge dve metode. Pad ovih vrednosti se javlja zbog povećane snage šuma pa je detekcija signala češća, te stoga raste verovatnoća ispravne detekcije. Korišćenjem spektrograma i S-metoda, verovatnoće lažnog alarma za vrednosti SNR niže od -10 dB daju konstantnu vrednost, od oko 0.2. Verovatnoća lažnog alarma kod PWV raste postepeno dok ne dostigne vrednost približno jedinici. Kod PWV, zbog velike rezolucije detektovan je veliki broj spektralnih komponenti šuma, kao i međukomponenti signala primarnog korisnika, pa je verovatnoća lažnog alarma veća nego što je to slučaj kod druge dve metode.

Kako je u otežanim uslovima rada teško svesti verovatnoće lažnog alarma i propuštene detekcije na nulu, sa stanovišta realizacije kognitivnog radija povoljnije je obezbediti veću verovatnoću lažnog alarma u odnosu na verovatnoću propuštene detekcije. Smanjivanjem verovatnoće propuštene detekcije mogućnost ometanja primarnog korisnika svodi se na minimum.



Sl. 1. Verovatnoća lažnog alarma i verovatnoća propuštene detekcije u zavisnosti od odnosa signal/šum kod simuliranog primarnog signala.



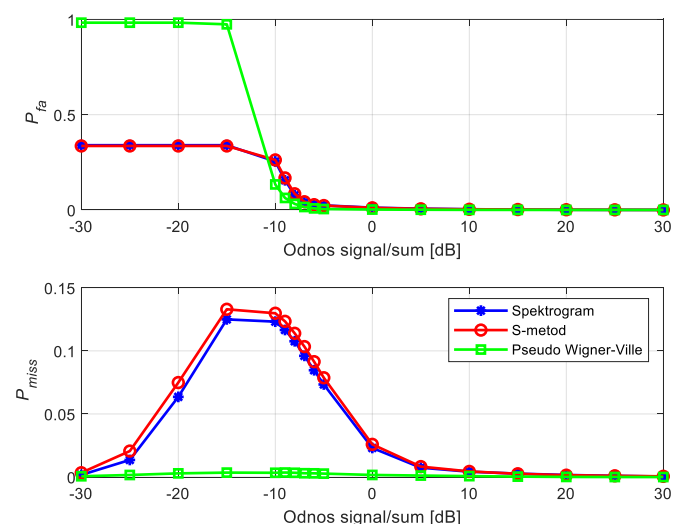
Sl. 2. Odnos verovatnoće propuštene detekcije i verovatnoće lažnog alarma za različite vrednosti praga detekcije kod simuliranog primarnog signala.

Na Sl. 2 prikazan je odnos verovatnoće propuštene detekcije u odnosu na verovatnoću lažnog alarma za sve tri analizirane metode vremensko-frekventijske analize signala. Krive na Sl. 2 dobijene su za konstantnu vrednost SNR od -8 dB i dužinu prozora od 128 odbiraka, sa preklapanjem 50%. Promenom praga detekcije od 10% do 90% maksimalne vrednosti snage primarnog signala menjaju se odnosi verovatnoće lažnog alarma i verovatnoće propuštene detekcije. Vrednost SNR od -8 dB je uzeta jer se u tom

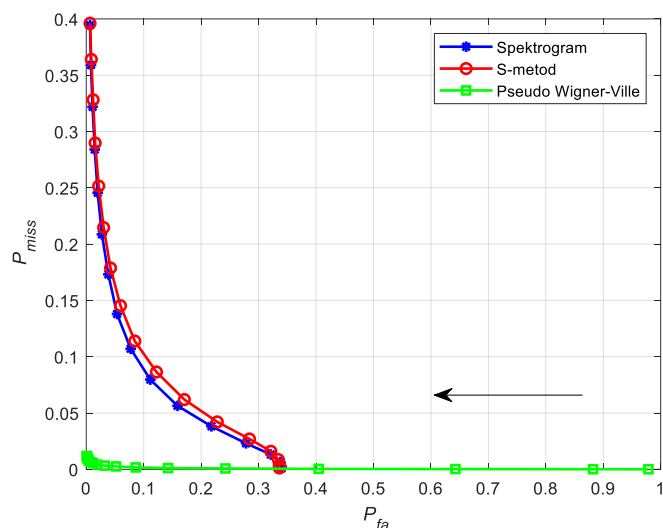
intervalu vrednosti SNR narušava primarni signal dovoljno da se može testirati efikasnost metoda pri radu u otežanim uslovima. Za niske vrednosti praga detekcije, povećava se verovatnoća lažnog alarma, a smanjuje verovatnoća propuštene detekcije i obrnuto. Spektrogram i S-metod su pokazali približno slične rezultate, dok je primenom PWV ostvarena mala verovatnoća propuštene detekcije za različite vrednosti praga detekcije. Ipak, iako PWV ima malo propuštenih detekcija, veliki broj detekcija lažnog alarma onemogućava korišćenje spektra od strane sekundarnih korisnika. Strelica na slici pokazuje smer povećanja praga detekcije.

V. ANALIZA SPEKTRA REALNOG SIGNALA

Testiranje mogućnosti primene vremensko-frekvencijskih metoda analize signala u kognitivnom radiju izvršeno je na realnim signalima iz dostupne baze prikupljenih telekomunikacionih signala [14]. Navedena baza je, prema saznanjima autora, jedina dostupna baza telekomunikacionih signala u razmatranom opsegu učestanosti, a da je pogodna za vremensko-frekvencijsku analizu signala, s obzirom da je primarna namena korišćene baze klasifikacija različitih modulacionih postupaka i tehnika prenosa. Signali su prikupljeni pomoću analizatora spektra koji je bio kablom direktno povezan sa radio uređajem kao generatorom signala, čime je pojava šuma prilikom snimanja signala bila smanjena u najvećoj mogućoj meri. U bazi signala postoji nekoliko različitih tipova moduliranih signala, a za potrebe analize u ovom radu korišćeni su samo signali sa frekvencijskim skakanjem. Snimljeni signali su trajanja nešto dužeg od dve sekunde. Radio uređaj je podešen tako da koristi opseg od 30 do 80 MHz za potrebe prenosa frekvencijskim skakanjem. Uređaj koristi 8-CPFSK (*Continuous Phase FSK*) modulaciju. U skladu sa brzinom promene frekvencije nosioca, uređaj podržava samo sporo frekvencijsko skakanje.



Sl. 3. Verovatnoća lažnog alarma i verovatnoća propuštene detekcije u zavisnosti od odnosa signal/šum kod realnog primarnog signala.



Sl. 4. Odnos verovatnoće propuštene detekcije i verovatnoće lažnog alarma za različite vrednosti praga detekcije kod realnog primarnog signala.

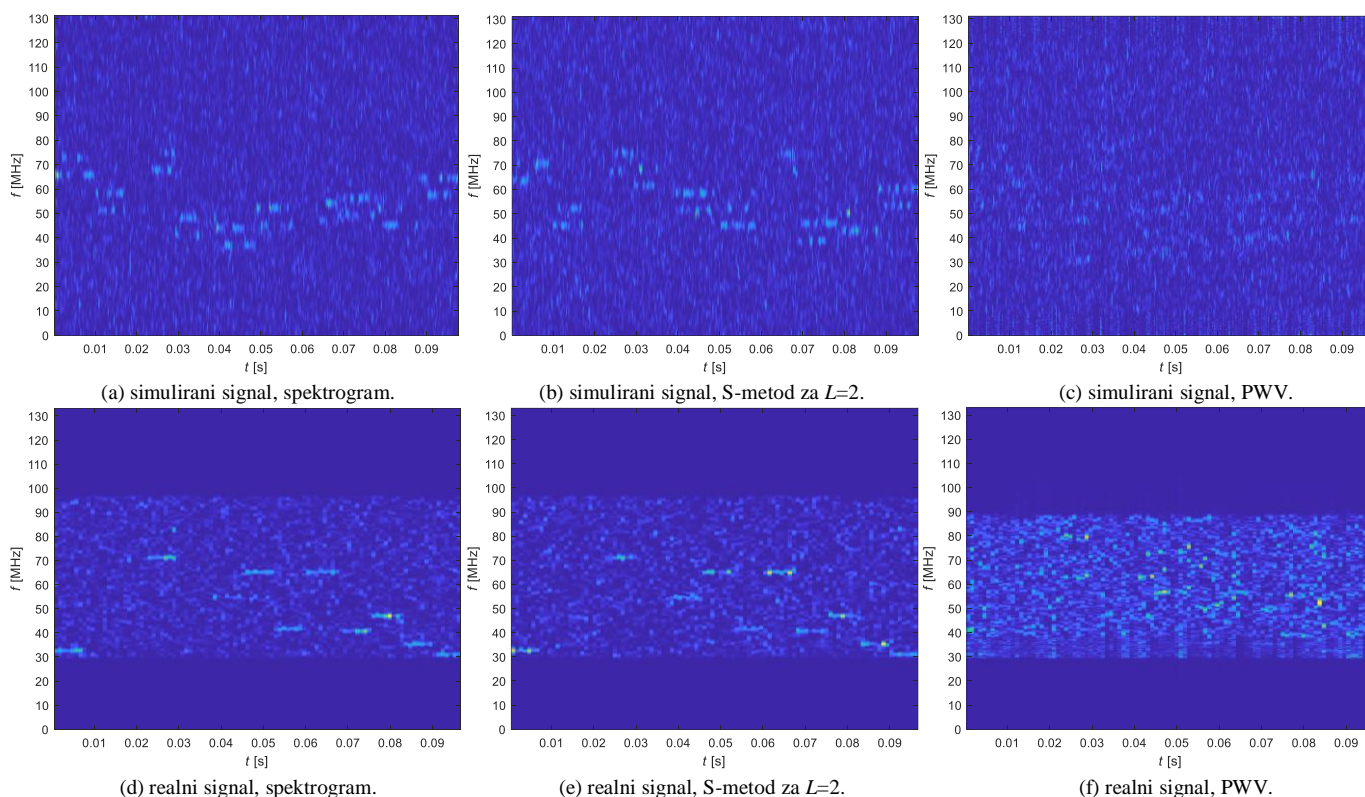
Na Sl. 3 su prikazane verovatnoće lažnog alarma i propuštene detekcije u zavisnosti od SNR, gde su korišćeni isti parametri za vremensko-frekvencijske metode kao i kod modelovanih signala. Dobijeni rezultati su veoma slični u odnosu na slučaj analize modelovanih signala prikazanih na Sl. 1. Dobijene vrednosti za verovatnoću propuštene detekcije su gotovo identične u slučaju modelovanih i realnih signala. Kod verovatnoće pojave lažnog alarma, korišćenjem PWV, za više vrednosti SNR u odnosu na modelovani signal, dostiže se verovatnoća bliska jedinici. Spektrogram i S-metod za niske vrednosti SNR dostižu vrednosti verovatnoće lažnog alarma oko 0.4, što je nešto više nego kod modelovanog signala. Na ovu razliku utiče i šum koji se javio tokom snimanja signala.

Sl. 4 ilustruje odnos verovatnoće propuštene detekcije u odnosu na verovatnoću lažnog alarma, za prozor dužine 128 odbiraka uz 50% preklapanja, SNR=-8 dB i za različite vrednosti praga detekcije u istom opsegu kao i kod modelovanih signala. Dobijene krive su veoma slične kao pri analizi modelovanih signala, uz neznatno više vrednosti verovatnoća lažnog alarma i propuštene detekcije u slučajevima primene spektrograma i S-metoda. Primenom PWV ostvarena je mala verovatnoća propuštene detekcije, čime će se postići neometan rad primarnog korisnika. I na ovoj slici strelica pokazuje smer povećanja praga detekcije.

Na Sl. 5 dat je uporedni prikaz vremensko-frekvencijskih distribucija realnih i simuliranih signala. Slike su prikazane za slučaj kada je SNR=-8 dB, prag detekcije postavljen na 50% amplitude primarnog signala, a broj odbiraka za analizu spektra je 128 uz polovinu odbiraka koji se preklapaju u sledećem intervalu analize. Na slikama je prikazan samo deo vremena signala, u trajanju od oko 100 ms, zbog preglednosti. Sa slika se jasnije uočavaju promene frekvencija nakon određenog vremena korišćenjem spektrograma i S-metode, bilo da su u pitanju modelovani ili realni signali, uprkos niskoj vrednosti SNR. Korišćenjem PWV, uprkos većoj rezoluciji, zbog pojave međuspektralnih komponenti, energija signala je rasuta i ne mogu se uočiti tačne frekvencije signala

tokom određenih vremenskih perioda. Iz tog razloga je češća pojava lažnih alarma kod PWV nego kod spektrograma i S-metode. Nešto kvalitetnija rezolucija za isti period prikaza signala dobijen je kod modelovanog signala zbog veće frekvencije odabiranja prilikom generisanja signala u odnosu

na frekvenciju odabiranja prilikom snimanja realnih signala. Kod modelovanih signala, uočavaju se dve noseće frekvencije u zavisnosti od poslatog simbola, u toku jednog skoka zbog korišćenja BFSK modulacije.



Sl. 5. Vremensko-frekvencijski prikaz simuliranog i realnog signala za SNR = -8 dB.

VI. ZAKLJUČAK

U radu je izvršena analiza mogućnosti upotrebe tri metode vremensko-frekvencijske analize signala kognitivnog radija prilikom analize spektra. Za potrebe analize, metode su testirane na modelovanom signalu i snimljenom realnom signalu frekvencijskog skakanja.

Utvrđeno je da dobre performanse za potrebe analize spektra kod kognitivnog radija pokazuje pseudo Vigner-Vil zbog veoma male verovatnoće propuštene detekcije. Ipak, zbog svoje računarske složenosti nije pogodan za implementaciju u sistemima koji za cilj imaju rad u realnom vremenu. Spektrogram je pokazao performanse koje bi bile zadovoljavajuće uz određenu optimizaciju pre svega u broju odbiraka korišćenih za analizu spektra, jer je moguće postići male verovatnoće propuštene detekcije uz male verovatnoće lažnog alarma, čime bi se pored efikasne analize spektra uspešno mogla odvijati i emisija kognitivnog radija. S-metod je metoda koja bi mogla biti dodatno istražena i testirana, radi optimalnog izbora parametra L u cilju dostizanja male verovatnoće propuštene detekcije i male verovatnoće lažnog alarma kod nepovoljnog odnosa signal/šum, čime bi se postigla visoka verovatnoća ispravne detekcije kao kod

pseudo Vigner-Vila i što niža računarska efikasnost kao kod spektrograma, što su i ciljevi daljeg istraživanja. Pokazano je da se adekvatnim modelovanjem može realizovati pogodno testno okruženje radi utvrđivanja performansi vremensko-frekvencijskih metoda analize signala.

U budućem radu planirana je implementacija predložene metode analize spektra na hardversku platformu softverski definisanog radija sa akcentom na optimalan izbor parametra L kod S-metode. Dalje unapređenje analize spektra je moguće tako što će se nakon detekcije vršiti analiza karakteristika detektovanog signala sa karakteristikama očekivanog signala u cilju klasifikacije.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je deo projekta VA-TT/3/20-22, podržanog od strane Ministarstva odbrane Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] G. Staple, K. Werbach, "The end of spectrum scarcity [spectrum allocation and utilization]," *IEEE Spectrum*, vol. 41, no. 3, pp. 48-52, 2004.

- [2] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 40-48, 2008.
- [3] J. Mitola and G. Q. Jr. Maquire, "Cognitive Radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, 1999.
- [4] FCC-03-322, "Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies," ET Docket, No. 03-108, December, 2003.
- [5] M. Jaiswal, A. K. Sharma, V. Singh, "A survey on spectrum sensing techniques for cognitive radio," *Conference on Advances in Communication and Control Systems 2013*, pp. 647-660. IEEE. 2013.
- [6] M. Subhedar, G. Birajdar, "Spectrum sensing technique in cognitive radio networks: A survey," *International Journal of Next-Generation Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 37-51, June 2011.
- [7] T. Yücek, H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.
- [8] B. Boashash, *Time-frequency signal analysis and processing*, Elsevier LTD, 2016.
- [9] W. Guibene, A. Hayar, "Joint time-frequency spectrum sensing for cognitive radio," In *International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)*, pp. 1-4. IEEE. 2010.
- [10] S. Monfared, A. Taherpour, T. Khatlab, "Time-frequency compressed spectrum sensing in cognitive radios," In *Global Communications Conference GLOBECOM 2013*, pp. 1088-1094. IEEE. 2013.
- [11] F. Javed, A. Mahmood, "The use of time frequency analysis for spectrum sensing in cognitive radios," In *4-th International Conference on Signal Processing and Communication Systems*, pp. 1-7. IEEE. 2010.
- [12] S. M. Hiremath, S. K. Patra, A. K. Mishra, "Hard-combined cooperative spectrum sensing using time-frequency method," In *5th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems*, Hyderabad, India, 13-16. December 2015.
- [13] D. Torrieri, *Principles of spread-spectrum communication systems*, Springer 2015.
- [14] J. Bajčetić, D. Mikluc, "Novel method in robust radio communication emission classification," *Proceedings of the 8th Small Systems Simulation Symposium 2020*, pp. 111-116. Niš, Serbia, February 12-14, 2020.
- [15] Lj. Stanković, M. Daković, T. Thayaparan, *Time-frequency signal analysis – with applications*, Artech House, 2013.
- [16] D. Bujaković, M. Andrić, B. Bondžulić, S. Mitrović, S. Simić, "Time-frequency distribution analyses of ku-band radar Doppler echo signals," *Frequenz*, vol. 69, no. 3-4, pp. 119-128, 2015.
- [17] T. Thayaparan, Lj. Stanković, I. Đurović, "Micro-Doppler-based target detection and feature extraction in indoor and outdoor environments," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 345, no. 6, pp. 700-722, 2008.
- [18] Lj. Stanković, "A measure of some time-frequency distributions concentration," *Signal Processing*, vol. 81, no. 3, pp. 621-631, 2001.

ABSTRACT

The paper analyzes the application of three time-frequency signal analysis methods for spectrum sensing in cognitive radio. The analysis was performed based on simulated and real signals for additive white Gaussian noise of different signal-to-noise ratios. The performance of the methods is analyzed through changes in the signal to noise ratio and the detection threshold, determining the probability of false alarm, the probability of missed detection and the probability of correct detection. It is shown that the methods of time-frequency signal analysis can be efficiently used for spectrum sensing with appropriate parameter optimization.

Spectrum Sensing in Cognitive Radio Using Time-Frequency Signal Analysis Tools

Nenad Stojanović, Milenko Andrić, Dimitrije Bujaković,
Boban Bondžulić, Vladimir Ristić