

## **TEHNIKE ZA EFIKASNO KORIŠĆENJE SPEKTRA U KOGNITIVNOM RADIJU: PRIKAZ NEKIH REZULTATA ISTRAŽIVANJA**

Predrag Ivaniš<sup>1</sup>, Miljko Ericić<sup>1</sup>, Srđan Brkić<sup>2</sup> i Miloš Janjić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrotehnički fakultet u Beogradu

<sup>2</sup>Inovacioni centar Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu

**Sadržaj:** *U radu će biti dat osvrt na tehnologiju kognitivnog radija kao jedno od rešenja za povećanje efikasnosti korišćenja elektromagnetskog spektra. Biće dat prikaz osnovnih principa i tehnika spectrum sensinga u kognitivnom radiju. Zatim će biti ukratko izložen inovativni koncept združenog prostorno-vremenskog spectrum sensinga u višekorisničkom nekooperativnom scenariju signala na bazi metoda za direktnu lokalizaciju. U radu će zatim biti izložen koncept jednog tehnološkog demonstratora kognitivnog radija. Biće opisana i neka od do sada realizovanih tehničkih rešenja i to FPGA dizajn i implementacija metode za direktnu lokalizaciju, sekundarni link na bazi OFDM tehnike prenosa i korišćenja USRP platforme, rešenje za automatizovano merenje zauzetosti radio-frekvencijskog spektra.*

**Ključne reči:** *Kognitivni radio, spectrum sensing, direktna lokalizacija, merenje zauzetosti radio-frekvencijskog spektra.*

### **1. Uvod**

Usled ubrzanog razvoja bežičnih telekomunikacionih sistema, pojave novih servisa i potrebe za prenosom brojnih multimedijalnih sadržaja, postaje sve izraženija potreba za efikasnim korišćenjem dostupnog radio-frekvencijskog spektra. Iako je većina atraktivnijih frekvencijskih opsega već dodeljena na korišćenje licenciranim korisnicima, opsežna merenja su pokazala da je aktivnost ovih korisnika značajna samo u određenim opsezima dok je veći deo radio-frekvencijskog spektra veoma slabo iskorišćen.

Kognitivni radio (*cognitive radio* – CR) predstavlja tehnologiju koja, usled promenjenog načina pristupa spektru, omogućava bolje iskorišćenje spektra. U ovom konceptu je sekundarnim korisnicima dozvoljeno da koriste delove spektra koji su prethodno dodeljeni na korišćenje licenciranim (primarnim) korisnicima, pod uslovom da komunikacija na primarnom linku ne bude kompromitovana. Da bi se ovo ostvarilo, sekundarni link mora da ima kognitivna svojstva, tj. mora da ima sposobnost učenja iz okruženja i adaptivnog rekonfigurisanja parametara linka u realnom vremenu [1].

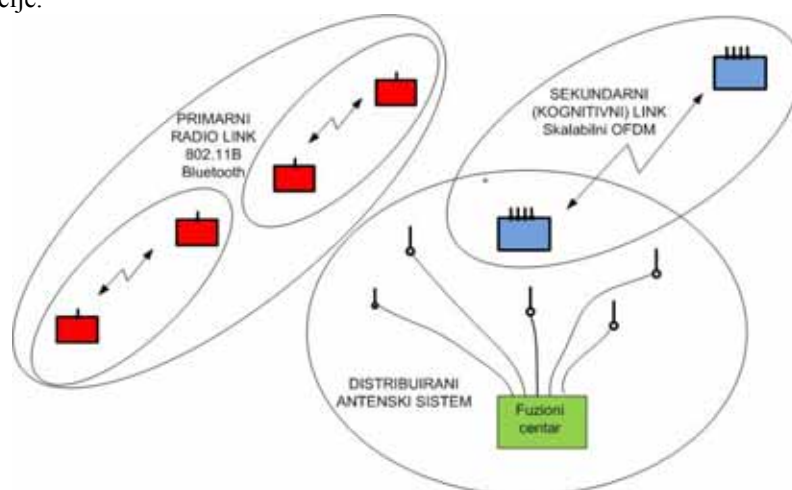
Iako se kognitivni sistemi mogu bazirati na različitim konceptima, najčešći

pristup podrazumeva da sekundarni korisnik pristupa spektru u trenucima kada u datom opsegu ne postoji aktivan signal primarnog korisnika. Ovaj koncept se naziva i oportunističkim a u literaturi se za njega često koristi i termin *interweave* [2].

Jasno je da ovaj način rada uključuje potrebu detekcije prisustva signala primarnog korisnika na datoj učestanosti i na lokaciji od interesa. Ova tehnika se naziva osluškivanje spektra (*spectrum sensing*). Postoji veći broj metoda koje se mogu koristiti u ovom cilju – najjednostavnija za realizaciju je tehnika energetske detekcije, ali se nešto bolji rezultati mogu postići detekcijom pomoću prilagođenog filtra ili ciklostacionarnom detekcijom [3]. *Spectrum sensing* se obavlja periodično i u trenutku kada se pojavi signal primarnog korisnika, sekundarni link rekonfiguriše parametre tako da se komunikacija nastavlja u opsegu učestanosti koji je u tom trenutku slobodan.

Slobodni frekvencijski opsezi ili spektralne šupljine (*spectrum holes*) dinamički menjaju svoj položaj u radio-frekvencijskom spektru tokom vremena, pa efikasna tehnika osluškivanja spektra treba da omogući detekciju prisustva signala primarnih korisnika u širokom opsegu učestanosti u realnom vremenu. Sa druge strane, položaj spektralnih šupljina u prostoru se takođe dinamički menja tokom vremena, a osim toga prisustvo većeg broja primarnih korisnika nije moguće detektovati pomoću samo jedne antene. Sve ovo *spectrum sensing* čini ozbiljnim tehničkim problemom.

U ovom radu predložen je metod združenog prostorno-vremenskog *spectrum sensinga* pomoću distribuiranog antenskog niza, kao što je prikazano na slici 1. U drugom delu rada opisana je tehnika direktne lokalizacije koja omogućava da se združenom obradom širokopojasnih signala koji potiču sa pojedinih antena izvrši istovremeno osluškivanje spektra i određivanje lokacije primarnih korisnika. Softverska i hardverska realizacija ovog algoritma opisana je u trećem i četvrtom delu rada, a potom je opisana i razvijena aplikacija za automatizovani monitoring radio-frekvencijskog spektra. Kako se informacije o položajima spektralnih šupljina koriste za adaptaciju parametara sekundarnog linka, u šestom delu rada opisan je jedan mogući način njegove realizacije.



Slika 1. Blok šema sistema

## 2. Širokopolasni *spectrum sensing*

Prethodno opisane tehnike *spectrum sensinga* se zasnivaju na procesiranju u vremensko-frekvencijskom domenu radio signala koji se primaju jednim CR (ili nezavisno sa više CR u kolaborativnim tehnikama *spectrum sensinga*) Ove tehnike se u scenariju jednokorisničkog scenarija signala i to je jedan od važnih razloga zbog kojih nisu pogodne za primenu u širokopolasnom *spectrum sensingu*. Najveći izazov u oblasti *spectrum sensinga* je širokopolasni *spectrum sensing* višekorisničkog nekooperativnog scenarija signala [4] u kojem ne postoje apriorne informacije o broju, lokacijama i parametrima aktivnih radio signala u spektralnom opsegu od interesa. U *spectrum sensingu* jednokorisničkog scenarija signala pod detekcijom se podrazumeva donošenje odluke da li je signal prisutan (aktivan) ili ne. U širokopolasnom *spectrum sensingu* višekorisničkog scenarija signala, pod detekcijom se podrazumeva određivanje, ne samo da li je signal aktivan ili ne, već koliko je signala aktivno. Ovaj proces je ekstremno komplikovan ukoliko se signali više primarnih korisnika delimično ili potpuno preklapaju vremenski i spektralno. U takvom scenariju signala, metode za detekciju koje se primenjuju u jednokorisničkom scenariju signala su neefikasne. Nadalje, u procesu širokopolasnog *spectrum sensinga* višekorisničkog scenarija signala potrebno je da se u procesu detekcije odrede spektralne širine aktivnih signala i njihove frekvencije nosioca. Ovaj problem u literaturi je poznat kao problem *segmentacije spektra* ili kao problem *identifikacije informacionih kanala*. Ovaj problem je u tehničkom smislu nemoguće rešiti na bazi *spectrum sensinga* u vremensko-frekvencijskom domenu. Rešenje za problem segmentacije spektra odnosno identifikacije informacionih kanala u višekorisničkom nekooperativnom scenariju signala je moguće jedino na bazi *spectrum sensinga* u prostorno-vremenskom domenu što podrazumeva prijem signala na više prostornih lokacija koje se ostvaruje sa više CR nodova ili zasebnom senzorskom mrežom kao u evropskom FP7 projektu SENDORA Prvi iskorak ka prostorno-vremenskom *spectrum sensingu* predstavljaju tehnike kolaborativnog prostorno-vremenskog *spectrum sensinga*. Ove tehnike su razrađivane uglavnom za jednokorisnički signal scenario sa idejom da se kroz kolaborativnost CR nodova poboljšaju performanse detekcije u uslovima višestrukog prostiranja a ne u cilju rešenja problema identifikacije informacionih kanala. U novije vreme predmet istraživanja su metode za širokopolasni prostorno-vremenski *spectrum sensing* koje se zasnivaju na dvokoračnim tehnikama za lokalizaciju. U ovoj vrsti prostorno-vremenskog *spectrum sensinga* se u prvom koraku estimiraju zasebno na svakom CR nodu lokalizacioni parametri poput RSS, DOA ili TDOA, a zatim se ti parametri šalju u fuzioni centar i na osnovu njih se u fuzionom centru u okviru drugog koraka procenjuju lokacije predajnika. Pri tome, u procesu proračuna lokacije pojavljuje se *problem asocijacije* pod kojim se podrazumeva uparivanje i procena lokacije korišćenjem lokalizacionih parametara koji su vezani za isti predajnik.

Fokus projekta finansiranog od strane ministarstva za prosvetu i nauku jr teorijsko fundiranje, razvoj i praktična verifikacija **novog inovativnog koncepta združenog širokopolasnog prostorno-vremenskog *spectrum sensinga* višekorisničkog nekooperativnog scenarija signala** koji se zasniva na metodama za jednokoračnu direktnu lokalizaciju i primeni distribuiranih antenskih sistema. Predložena tehnika omogućava direktnu jednokoračnu lokalizaciju primarnih korisnika u širokopolasnom nekooperativnom višekorisničkom scenariju signala. Pod pojmom *višekorisnički scenario signala* podrazumeva se višekorisničko okruženje primarnih i

sekundarnih korisnika koji se takmiče za korišćenje istog frekvencijskog opsega. Termin *nekooperativni* znači da kognitivna radio mreža ne raspolaže sa apriornim informacijama o primarnim i sekundarnim korisnicima i do tih informacija se dolazi *spectrum sensingom* na bazi analize prijemnog višekorisničkog signala.

U predloženom inovativnom konceptu signali sa više antena se šalju u fuzioni centar u kome se lokalizacija realizuje u jednom koraku koji združenom procenom nepoznatih parametara signala primarnih korisnika na bazi prostorno-vremenskog procesiranja primljenog multidimenzionalnog signala. Primenom predložene metode združenog prostorno-vremenskog *spectrum sensinga* procesi detekcije i procene parametara signala se izvršavaju združeno a problem asocijacije, koji je specifičan za dvokoračne tehnike, u predloženoj tehnici kao takav ne postoji.

Predloženo inovativno rešenje za združeni prostorno-vremenski *spectrum sensing* zasniva se na originalnoj modifikaciji MUSIC algoritma [5] razvijenoj kao metod za direktnu lokalizaciju u UWB sistemima. Modifikacija se zasniva na proceni *steered* kovarijacione matrice koja je lokaciono zavisna. Čabrić i Erić predložili su u [6] inovativni metod za združeni prostorno-vremenski *spectrum sensing* koji koristi distribuirani antenski sistem i koji se zasniva na metodama za direktnu lokalizaciju. Koncept združenog prostorno-vremenskog *spectrum sensinga* zahteva perfektnu vremensku i frekvencijsku sinhronizaciju prijemnih kanala. Teorijski on se zasniva na *array* procesingu sfernih talasa. združeni prostorno-vremenski *spectrum sensing* aktuelizuju problem prostorno-vremenskih modela kanala i nameću potrebu za istraživanjem u toj oblasti. Postojeći modeli kanala razvijeni za potrebe modeliranja komunikacija tačka-tačka su najčešće nepogodni za primenu pri modeliranju propagacije signala u prostorno-vremenskom domenu.

### **3. Simulator širokopojasnog združenog prostorno-vremenskog spectrum sensing-a na bazi direktne lokalizacije**

Polazeći od predložene metode i koncepta združenog prostorno-vremenskog *spectrum sensinga* razvijen je *Simulator širokopojasnog združenog prostorno-vremenskog spectrum sensinga nekoperativnog višekorisničkog scenarija signala u kognitivnom radiju koji se zasniva na direktnoj lokalizaciji*. Simulator je razvijen u MATLAB-u sa interaktivnim, objektno-orijentisanim grafičkim korisničkim interfejsom, sa implementiranim funkcijama korisničkih prozora, softverski definisanim padajućim menijima čije značenje je prikazano na sl. 2. [7].

Simulator omogućava generisanje višekorisničkog scenarija signala pri čemu signali mogu da se delimično ili potpuno preklapaju vremenski i spektralno. Što se tiče modulacija i modulacionih tehnika do sada su u simulatoru integrisane sledeće opcije QAM, OFDM, UWB sequence, frequency hopping, Direct Sequence, mFSK, mPSK, MSK, mASK, DPSK, SOFDM, ScOFDM.

Realizovani simulator predstavlja otvorenu softversku platformu koja omogućava integraciju novih razvijenih algoritama kao i analizu i upoređenje njihovih performansi sa performansama prethodno implementiranih algoritama. Simulator je skalabilan jer omogućava simulaciju signal scenarija kako u prostorno malom okruženju (poput okruženja u zatvorenom prostoru) tako u prostorno velikom okruženju (poput otvorenog prostora).



Slika 2. Grafički korisnički interfejs (Graphical User Interface - GUI) simulatora

Simulator omogućava generisanje željenog višekorisničkog signal scenarija sa mogućnošću izbora parametara višekorisničkog scenarija signala kao što su: broj aktivnih signala primarnih korisnika, primenjene modulacije odnosno modulacione tehnike, odnosi signal-šum, izbor propagacionih modela, odnosno modela kanala (efekti *log normal shadowing*-a kao i *scatering* od tačkastih reflektora su uključeni u trenutnu verziju simulatora), kao i izbor parametara širokopojasnog *spectrum sensing* kao što su: broja antena i njihov prostorni raspored (geometrija) u okviru distribuiranog antenskog sistema, širina frekvencijskog podopsega u kome se vrši *spectrum sensing*, trajanje vremenskog intervala u kome se vrši *spectrum sensing*, itd.

Ograničenja simulatora su vezana jedino za memorijske resurse i procesorsku snagu PC računara. Implementacija algoritma za združeni prostorno-vremenski *spectrum sensing* je računarski zahtevna ukoliko se lokalizaciona funkcija računa za veliki broj hipotetičkih lokacija u prostornom sektoru od interesa. Za scenario sa 6 antena u distribuiranom antenskom sistemu, vremenski interval u kome se vrši *spectrum sensing* od 128 uzoraka signala i 150 x 150 tačaka u x0y ravni (Cijeli implementaciju algoritma potrebno je oko 60 sekundi. Simulator dakle ne omogućava *real-time* simulaciju. To je ključni razlog zbog čega je izvršena implementacija metode za direktnu lokalizaciju (kao najkritičniji deo predložene metode *spectrum sensing* sa aspekta rada u realnom vremenu) na FPGA (ML605 sa VIRTEX 6) platformi sa idejom da simulator preraste u krovnu aplikaciju tehnološkog demonstratora pri čemu je FPGA platforma upravljiva iz krovne aplikacije.

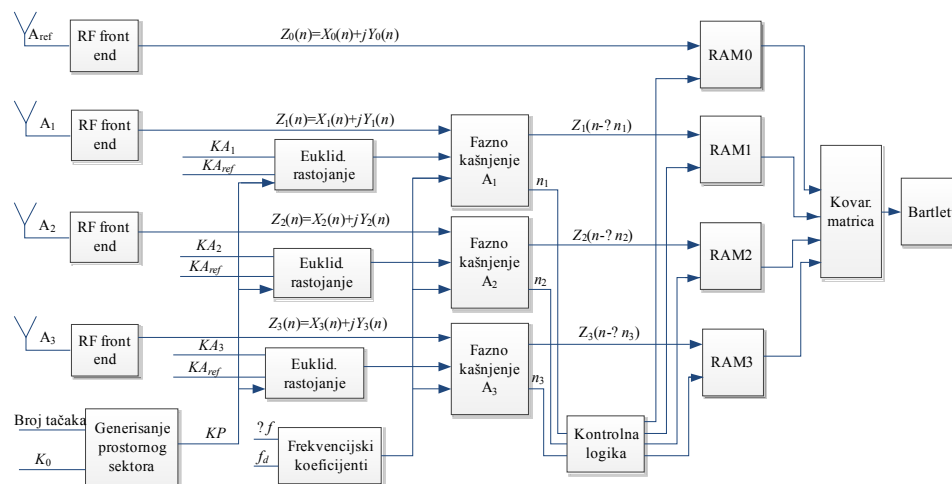
Spectrogram of the signal samples in interval used for SS

#### 4. Hardverska realizacija širokopojasnog združenog prostorno-vremenskog *spectrum sensing*-a na bazi direktne lokalizacije

Koncept združenog prostorno-vremenskog širokopojasnog *spectrum sensing*-a na bazi direktne lokalizacije zahteva idealan koherentni višekanalni prijemni sistem – sistem u kome su kanali frekventijski i vremenski potpuno sinhronizovani. U praksi je veoma teško sinhronizovati rad višestrukih i autonomnih prijemnika postavljenih na različitim lokacijama, pa se predlaže centralizovana arhitektura u kojoj je samo antenski sistem prostorno distribuiran, dok se kompletna obrada primljenih signala obavlja u okviru jedinstvenog procesorskog bloka. Signali prikupljeni iz frekventijskog opsega koji se monitoruje, prosleđuju se optičkim vlaknom (eng. *RF over Fiber*; RFOF) ka procesorskoj platformi, gde se vrši njihova translacija u osnovni opseg, diskretizacija i obrada u digitalnom delu prijemnika. Predloženi algoritam moguće je implementirati korišćenjem FPGA (eng. *Field-Programmable Gate Array*) tehnologije, čiji paralelizam u vršenju operacija omogućava obavljanje *spectrum sensing*-a u roku od nekoliko milisekundi [8].

U ovom radu predstavljen je dizajn četveroantenskog *spectrum sensing* sistema realizovanog na FPGA čipu kompanije *Xilinx* sa oznakom *Virtex6-x6v1x240t*, pomoću koga je moguće istovremeno pretraživanje frekventijskog spektra širine 20 MHz. Kompletan dizajn realizovan je u prototipnom rešenju rada koji minimizira vreme obavljanja *spectrum sensing*-a. Izgled FPGA dizajna na RTL (eng. *Register Transfer Level*) nivou prikazan je na Slici 4.

Pretpostavljeno je da su signali prikupljeni na antenskom nizu (*RF front end*) *down*-konvertovani korišćenjem I-Q kvadratnog demodulatora, tako da se na ulazu u dizajn pojavljuju kompleksni odbirci signala u osnovnom opsegu. Znajući i koordinate antena u 3D koordinatnom sistemu označene sa  $KA_{ref}$ ,  $KA_1$ ,  $KA_2$  i  $KA_3$ , signale  $Z_1$ ,  $Z_2$  i  $Z_3$  moguće je sinhronizovati sa referentnim signalom  $Z_0$  pretpostavljajući i određenu prostornu lokaciju predajnika,  $KP$ . Na izlazu iz bloka za generisanje prostornog sektora sukcesivno se pojavljuju sve hipotetičke lokacije primarnog korisnika i za svaku od njih se formira dijagonalna *steering* matrica.

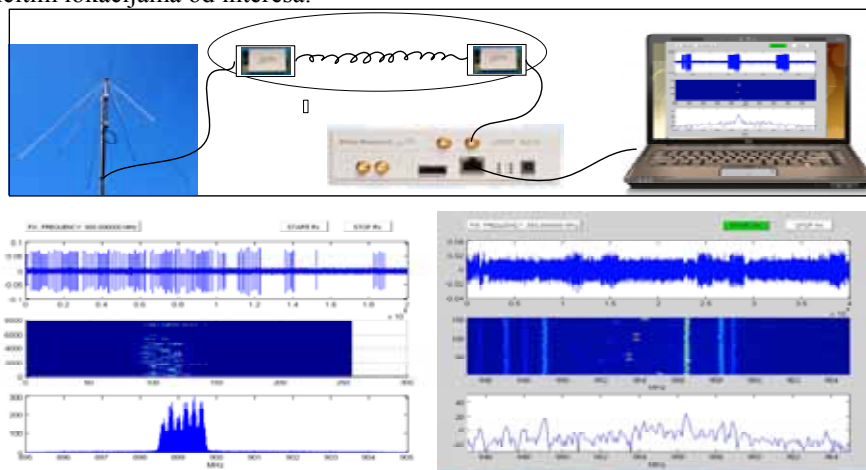


Slika. 4. Blok dijagram FPGA dizajna *spectrum sensing* algoritma.

Matrica se generira i kombinovanjem prostorno-zavisnog dela elemenata matrice formiranog na izlazu iz blokova *Euklid. rastojanje* i delova elemenata koji zavisi od frekvencijskog opsega signala primarnog korisnika (blok *Frekvencijski koeficijenti*). Sinhronizacija se obavlja u spektralnom domenu, pa su u okviru blokova *Fazna ka njenje*  $A_i$  ( $i=1,2,3$ ) realizovani *FFT* (eng. *Fast Fourier Transform*) i *IFFT* (eng. *Inverse Fast Fourier Transform*) blokovi u  $N$  ta aka, gde je  $N$  broj odbiraka prikupljenih na svakoj od antena u toku opservacionog intervala. Trigonometrijske sinusne i kosinusne funkcije implementirane su korišćenjem *cordic* algoritma. Prostorno-zavisna kovarijaciona matrica realizovana je uz maksimalan nivo paralelizma, tako da je vreme potrebno za njeno formiranje minimalno. *Bartlett*-ova kriterijumska funkcija se rauna podrazumevaju i jedini *steering* vektor, tako da je njena implementacija trivijalna i sastoji se u sumiranju svih elemenata kovarijacione matrice.

## 5. Aplikacija za monitoring i analizu zauzetosti RF spektra

U literaturi se može naći veći broj studija u kojima je prezentirani rezultati monitoringa i izložena analiza kao i predloženi različiti statistički modeli zauzetosti RF spektra koji se zasnivaju na merenjima. Za potrebe merenja zauzetosti RF spektra u okviru projekta realizovan je relativno jeftin merni komplet, sl. 5a, koji se sastoji od širokopojasne *discon* antene za frekvencijski opseg 25-3000 MHz, USRP N210 platforme i laptop računara. Antena je povezana sa USRP platformom korišćenjem optičkog kabla (analogni *RF over Fiber* - RFOF) posredstvom elektrooptičkih pretvarača OZ 450. Razvijena je u MATLAB-u aplikacija sa grafičkim korisničkim interfejsom koja upravlja radom USRP platforme i u kojoj se vrši prikaz rezultata pretraživanja spektra. Korišćena USRP platforma pokriva frekvencijski opseg od 50-2200 MHz, a širina trenutnog frekvencijskog opsega koji se digitalizuje u *basebandu* je programabilna i njena maksimalna vrednost je 20 MHz. Na slici 5b i 5c prikazani su rezultati monitoringa RF spektra u frekvencijskom opsegu 895-905 MHz odnosno 945-965 MHz respektivno. U planu je dalji razvoj aplikacije kao i realizacija merenja zauzetosti RF spektra na različitim lokacijama od interesa.



Slika 5. a) Merni komplet za analizu zauzetosti RF spektra, b) monitoring spektra u opsegu 945-965 MHz i b) opsegu 895-905 MHz, merenja obavljena na ETF 11.05.2013.

## 6. Realizacija sekundarnog linka

Sekundarni link je realizovan korišćenjem *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) platformi. USRP obezbeđuje digitalne *baseband* i IF sekcije, što omogućava razne namene da funkcioniše kao softverski radio širokog opsega frekvencija. Za komunikaciju sa USRP platformama korišćen je Matlab *toolbox*. Razumljive odbirke OFDM signala u osnovnom opsegu na USRP, gde se generiše signal sa frekvencijom nosioca i irinom opsega definisanim preko faktora interpolacije. Signal se zatim šalje preko antene do prijemnog USRP, gde se obavljaju reverzne operacije. Parametri prenosa koji su korišćeni su: 400 MHz frekvencija nosioca, irina opsega od 1 MHz, OFDM sa 1024 podnosioca.

U implementaciji se polako od OFDM simulatora u osnovnom opsegu koji koristi samo polovinu podnosilaca za prenos podataka, dok su u drugoj polovini konjugovani podnosioci [9]. Implementirana je *pass-band* komunikacija gde se koriste svi podnosioci za prenos korisnih podataka, poboljšana je vremenska sinhronizacija, procena i kompenzacija frekvencijskog pomeraja, procena kanala i ekvalizacija, QAM modulacija. Takođe je omogućena kognitivnost menjanjem frekvencije nosioca. Demodulacija frejmova obavlja se odmah po njihovom dolasku na prijemnik i vrši se prikaz odgovarajućeg dela slike na ekranu.

Podaci koji se prenose pripadaju crno-belom slici sa 256 nivoa sivog, kao u [9]. Svaki piksel slike daje 8 bita informacije. Ovi podaci se zatim konvertuju u simbole, čija je dužina određena izborom MPSK modulacije. Ovi simboli se pakuju u frejmove, nakon čega se nad pojedinačnim frejmovima vrši modulacija, tokom koje se vrši i diferencijalno kodiranje MPSK simbola. Pre napuštanja predajnika, modulirani frejmovi u vremenskom domenu su kaskadno poređani, zajedno sa zahtevnim intervalima između njih, kao i sa identičnim *header*-om i *trailer*-om smetenim na početku, odnosno, kraju niza podataka, koji se sastoje od sinusoida na određenoj učestanosti.

Proces vremenske sinhronizacije prepoznaje prisustvo signala na ulazu u prijemnik. Korišćen je metod baziran na autokorelaciji dva klizna prozora dužine  $N$  [10]

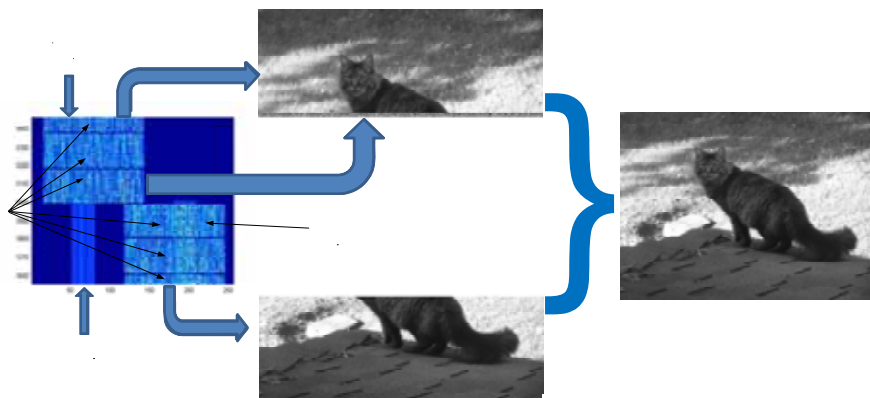
$$a_n = \sum_{k=0}^{N-1} r_{n-k} r_{n-k}^* = \sum_{k=0}^{N-1} |r_{n-k}|^2, \quad b_n = \sum_{k=0}^{N-1} r_{n+k} r_{n+k}^* = \sum_{k=0}^{N-1} |r_{n+k}|^2. \quad (1)$$

Parametar  $m_n = a_n / b_n$  dostiže maksimum kada autokorelacija  $a_n$  meri energiju signala sa sumom, a  $b_n$  energiju sumu, gde je  $r$  odbirak signala. U tački maksimuma,  $m_n$  ima vrednost  $\max(m_n) = SNR + 1$ , tako da prag može biti postavljen na osnovu očekivanog odnosa signal/sum (signal-to-noise ratio – SNR).

Nekoliko predefinisanih OFDM simbola ubačeno je na početku svakog frejma kako bi se procenila funkcija prenosa kanala. Signal u frekvencijskom domenu na prijemu, se može predstaviti kao proizvod signala na predaji u frekvencijskom domenu i funkcije prenosa kanala. Na početku svakog frejma, za svaki predefinisani simbol razrađena se funkcija prenosa kanala. Funkcija za ekvalizaciju je jednaka inverznoj usrednjenoj funkciji prenosa za sve predefinisane simbole u datom frejmu. Ekvalizacija



kanala se sprovodi množenjem ove funkcije sa svakim korisnim OFDM simbolom u datom frejmu u frekvencijskom domenu.



Slika 6. Ilustracija prenosa na sekundarnom linku, prenos statične slike.

Signal u vremenskom domenu se interpolira sa faktorom 2, a imajući na umu da se frekvencija odabiranja signala na predaploznoj menja, jedna opsega signala je smanjena dva puta. Spektar signala se demodulira u 1/2 opseg u takav signal se šalje. Za vreme slanja frejma sa predefinisanim učitani brojem, uvodi se interferencija u vidu tri sinusna signala u donjem podopsegu originalnog opsega, kako bi se simulirala pojava signala primarnog korisnika. Da bi se izbegla interferencija sa primarnim korisnikom, spektar signala se translira u gornji podopseg, u kom se šalje preostali deo signala. Prenos frejma za vreme njegovog emitovanja je detektovan signal primarnog korisnika se ponavlja nakon menjanja podopsega. Prijemnik prima signal u celom originalnom opsegu signala. Na prijemu je poznato u kom podopsegu se dati deo signala prenosi, kao i broj frejma koji se emituje u trenutku pojave primarnog korisnika.

Spektar signala se translira nazad u osnovni opseg, i nepotrebne frekvencije se filtriraju. Zatim, vrši se decimacija čija spektra signala se povećava 2 puta. Budući da se demodulacija vrši i frejm po frejm, i da na ekranu postoji sinhronizovan prikaz spektra signala i primljenog dela slike, trenutak pojave primarnog korisnika može se lako uočiti, kao i transliranje spektra signala, odnosno ponovan prikaz piksela koji pripadaju frejmu prenošenom u trenutku pojave primarnog korisnika, kao što je prikazano na Slici 6. Na ovaj način sistem je dato osnovno kognitivno svojstvo.

## 6. Zaključci

U radu su prezentovani elementi tehničkih rešenja realizirani u okviru projekta Ministarstva prosvete i nauke. Napredne tehnike za efikasno korišćenje spektra u bežičnim sistemima. Prikazana rešenja omogućavaju realizaciju tehnološkog demonstratora kognitivnog radnja, koji koga sekundarni korisnici informaciju o zauzetosti spektra i aktivnostima primarnih korisnika dobijaju iz fuzionog centra u kome se obavlja združeni širokopojasni prostorno-vremenski *spectrum sensing*. Razvoj tehnološkog demonstratora i dalje traje. Predviđeno je da se u narednoj fazi na većem broju sekundarnih linkova implementiraju tehnike kojima bi se povećalo

iskorišćenje dodeljenog propusnog opsega. Takođe, biće nastavljene aktivnosti na unapređenju performansi senzorske mreže, kao najkompleksnijeg dela sistema koji se razvija.

### Literatura

- [1] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, vol. 23, no. 2, Feb. 2005, pp. 201-220.
- [2] A. Goldsmith, S. Jafar, I. Maric, S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information-theoretic perspective," *Proceedings IEEE*, vol. 97, no. 5, May 2009, pp. 894-914.
- [3] D. Cabric, *Cognitive radios: System design perspective*. Ph.D. Dissertation, Univ. of California, Berkeley, Fall 2007.
- [4] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, and Shantidev Mohanty, "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," *IEEE Communications Magazine*, April 2008, pp. 40-48
- [5] Eric, D. Vucic "Method for direct position estimation in UWB systems," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 11, May 2008.
- [6] Danijela Čabrić, Miljko Erić, "Spatio-Temporal Spectrum Sensing using Distributed Antenna Systems and Direct Localization Methods," in *Proc. of IEEE APS 2012 Conference*, Chicago July 2012. (invited paper)
- [7] M.Erić, D.Vučić "Method and simulator of joint spatio-temporal spectrum sensing of multiuser signal scenario using distributed antenna system and direct localization methods," technical solution, Faculty of Electrical Engineering, Belgrade, 2013.
- [8] S. Brkic, M. Eric, "FPGA implementation of joint spatio-temporal spectrum sensing algorithm based on direct localization method," in. *Proc. of TELSIKS 2013, 16-19 October 2013, Nis, vol. 1, pp. 301-304.*
- [9] D. M. Dramicanin, D. Rakic, S. Denic and V. Vlahovic, "FPGA-based Prototyping of IEEE 802.11a Baseband Processor," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol.1, No.3, pp. 125-136, November 2004.
- [10] P.G.Lin, "OFDM Simulation in MATLAB," California Politechnic State University, San Luis Obispo, June 2010.

**Abstract:** *In the paper we present the overview of the cognitive radio technology, as a possible solution for efficient usage of radio-frequency spectrum. Basic principles and techniques of spectrum sensing are presented. Further, we propose an innovative concept of jointly space-time spectrum sensing in multiuser non-cooperative scenario based on direct localization. Concept of a technology demonstrator will be presented and some technical solutions will be described - FPGA design and implementation of direct localization method, secondary link based on OFDM technique, and USRP platform, solution for automated measurement of radio-frequency spectrum usage.*

**Keywords:** *Cognitive radio, spectrum sensing, direct localization, measurement of radio-frequency spectrum usage.*

### TECHNIQUES FOR EFFICIENT SPECTRUM USAGE IN COGNITIVE RADIO SYSTEMS: OVERVIEW OF REASEARCH RESULTS

Predrag Ivaniš, Miljko Erić, Srđan Brkić i Miloš Janjić