

Dr Desimir Vučić,  
dipl. inž.  
Vojnotehnički institut,  
Beograd

## PRIMENA SAVREMENIH METODA IZVIĐANJA SIGNALA SA FREKVENCIJSKIM SKAKANJEM ZA FORMIRANJE ELEKTRONSKE SLIKE BOJIŠTA

UDC: 623.62 : 355.535.2

### Rezime:

Sve veća zastupljenost savremenih tehnika digitalnih komunikacija koje primenjuju signale sa malom verovatnoćom presretanja, kao što su signali sa frekvencijskim skakanjem, nameće razvoj novih metoda i algoritama za njihovo izviđanje radi formiranja elektronske slike bojišta. U ovom radu razmatraju se principi i dostignuća u razvoju novih metoda u detekciji, karakterizaciji, identifikaciji i eksploataciji ovih sofisticiranih komunikacionih signala u kontekstu elektronskog rata.

*Cljučne reči:* elektronski rat, izviđanje komunikacionih signala, signali sa frekvencijskim skakanjem, analiza signala, elektronska slika bojišta.

---

### ADVANCED METHODS FOR FREQUENCY HOPPING SIGNAL RECONNAISSANCE FOR THE PURPOSE OF CONSTRUCTING ELECTRONIC ORDER OF BATTLE

#### Summary:

The extensive use of modern low probability-of-intercept digital communication signals, such as frequency hopping signals, requires development of new theory and algorithms for their reconnaissance for the purpose of constructing an electronic order of battle. This paper presents some principles and advances in signal processing and analysis technology for the signal interception, characterization, identification and exploitation in the context of electronic warfare.

*Key words:* electronic warfare, communication signal reconnaissance, frequency hopping signals, signal analysis, electronic order of battle.

---

### Uvod

Uspešno savremeno ratovanje podrazumeva efikasno sakupljanje, analizu i distribuciju informacija sa bojišta u realnom vremenu, a onemogućavanje istog protivniku, čime se stiče informaciona superiornost a time i značajna prednost u odlučivanju i komandno-kontrolnom (C2 – Command and Control) procesu. Superiornost informacija transformisana u odgovarajuće znanje, i u kombinaciji sa odgovarajućom organizacijom, obukom,

iskustvom i C2 mehanizmom, rezultira u superiornost odlučivanja u savremenom ratovanju [1]. Isto tako, korišćenjem integriranih informacija senzorskih mreža, savremena precizna oružja značajno multipliciraju svoju moć. Većina ovih informacija, posebno na taktičkom nivou, prenosi se komunikacionim signalima koji su raspoloživi u elektromagnetnom spektru. Dakle, dominacija u elektromagnetnom spektru je ključni zahtev savremenih vojnih operacija. Elektronski rat (EW – Electronic Warfare) je oblik korišćenja

elektromagnetnog spektra radi nadgledanja aktivnosti protivnika i prikupljanja relevantnih informacija (npr. identifikacija i lokacija izvora elektromagnetnog zračenja) potrebnih za korektnu procenu pretnje i rekonstrukciju aktivnosti i namera protivnika, obmanjivanje, ometanje ili neutralisanje senzora i C2 procesa, i zaštitu sopstvenog korišćenja elektromagnetnog spektra.

Komunikacioni EW bavi se izvorima komunikacionih signala, a nekomunikacioni EW (drugi deo EW) je u kontekstu elektronskih senzorskih sistema, posebno radara. Za komunikacioni EW, za razliku od nekomunikacionog EW, presretanje i analiza signala su mnogo važniji od karakteristika predajnika. Predmet elektronskog rata su radio-komunikacije, pošto je žične komunikacije vrlo teško presretati i ometati. Na strategijskom nivou obično se EW označava sa SIGINT (Signal Intelligence) sa komponentama COMINT (Communications Intelligence) i ELINT (Electronic Intelligence), koje odgovaraju komunikacionom i nekomunikacionom EW na taktičkom nivou, respektivno. Za COMINT se često koristi i naziv radio-izviđanje (radio reconnaissance). I strategijski i taktički EW zasnivaju se na istim principima i predstavljaju delove istog EW. Na taktičkom nivou pretežno je komunikacioni EW što je i predmet ovog rada.

Dominantno mesto u prikupljanju relevantnih informacija za potrebe informacionog rata (IW – Information Warfare) zauzimaju mere elektronske podrške (ESM – Electronic Support Measures), kao deo komunikacionog EW, koje uključuju pretraživanje radio-spektra, presretanje, lociranje (goniometrisanje), analizu i

identifikaciju izvora radio-signala radi eksploatacije tih informacija i formiranja elektronske slike bojišta (EOB – Electronic Order of Battle). EOB sadrži informacije o prirodi i razmeštaju izvora radio-signala protivnika, uključujući tipove uređaja, frekvencije, vrstu rada (modulaciona tehnika), lokaciju i druge relevantne podatke. ESM operacije su taktički orijentisane i ograničene u vremenu i prostoru, pa pretežno strategijski orijentisani COMINT, koji započinje aktivnosti u miru i zahteva više vremena za detaljnu analizu i procenu parametra signala, obezbeđuje početne podatke i osnovu za ESM. Ne postoji stroga granica između COMINT-a i ESM. Isto tako, ESM obezbeđuje podatke za elektronske protivmere (ESM – Electronic Countermeasures), kao drugi deo EW, kojima se obmanjuju (elektronic deception), ometaju (jamming) ili neutrališu protivnički komunikacioni uređaji i C2 proces. Postoje i elektronske protiv-protivmere (ECCM – Electronic Counter-Countermeasures) kojima se štite sopstveni komunikacioni uređaji od protivničkog, a i sopstvenog ESM.

Razmena informacija između senzora, komandnih elemenata i borbenih sistema obezbeđuje se komunikacionim signalima u odgovarajućim komunikacionim mrežama. Takve komunikacione mreže u taktičkom bojištu moraju biti fleksibilne, robustne, raspoložive u realnom vremenu, pouzdane, sa višestrukim pristupom, zaštićene od neovlašćenog pristupa i otporne na EW mere. Rezultat takvih zahteva su komunikacije primenom tehnika prenosa sa malom verovatnoćom presretanja (LPI – Low Probability-of-Intercept), kao što su tehnike prenosa u proširenom spektru (SS – Spread-

-Spectrum) i odgovarajuće LPI mreže [2]. Na primer, kod SS signala sa frekvencijskim skakanjem (FH – Frequency Hopping) mala verovatnoća presretanja postiže se korišćenjem velikog broja kanala na kojima se prenosi informacija, a posebno primenom PN (Pseudo-Noise) sekvence za izbor frekvencija kanala. Odgovarajuća komunikaciona mreža sa višestrukim pristupom sa kodnom raspodelom frekvencija skakanja (FH-CDMA – Frequency Hop Code Division Multiple Access) koristi ortogonalne sekvence za izbor frekvencija skakanja.

Snažan razvoj i primena tehnologije softverskog radija neminovno će otvoriti nove mogućnosti, ali i teškoće u EW. JTRS (Joint Tactical Radio System), kao najambiciozniji projekat taktičkog softverskog radija, rezultiraće u familiju softverskih radija na univerzalnoj platformi koja obezbeđuje rad u radio-frekvencijskom (RF) opsegu od 2 MHz do 2 GHz, reprogramiranje različitih modulacionih tehnika, brzina prenosa, širina kanala, kodiranja i kriptozastite, različitih mrežnih protokola i različitih servisa uključujući govor, video i podatke. Tehnologija softverskog radija će, dakle, konvergirati u jedinstveni radio-uređaj u različitim podsistemima taktičkog komunikacionog sistema, i na taj način omogućiti funkcionisanje jedinstvene taktičke komunikacione mreže. Fleksibilnost softverskog radija smanjiće cenu i značajno povećati zastupljenost LPI i LPSE (Low Probability-of-Signal Exploitation) tehnika prenosa, kao što su FH i druge SS tehnike, u taktičkim komunikacionim sistemima. Softverska promena modulacionih tehnika, brzine prenosa, širine kanala i drugih parametara radio-signala, stvara

velike probleme klasičnim ESM i ECM sistemima zbog njihove neadekvatne fleksibilnosti. Međutim, primena softverskog radija u samim ESM prijemnicama značajno povećava njihovu fleksibilnost i potencijalno obezbeđuje znatno poboljšanje performansi izviđanja radio-signala, uključujući pretraživanje, presretanje i goniometrisanje (DF – Direction Finding) FH signala i drugih kratkotrajnih (burst) i brzo promenljivih signala.

Presretanje, lociranje, analiza, karakterizacija i identifikacija LPI radio-signala u složenom RF okruženju, u funkciji formiranja EOB, zahteva primenu novih naprednih tehnika obrade i analize signala, među kojima značajno mesto zauzimaju vremensko-frekvencijska i prostorna analiza signala, primena talasne transformacije (WT – Wavelet Transform) i tehnike obrade ciklostacionarnih signala.

### **Napredne tehnike obrade i analize signala**

Furijeova transformacija (FT – Fourier Transform) i njena digitalna implementacija, brza Furijeova transformacija (FFT – Fast Fourier Transform), su u osnovi većine naprednih tehnika obrade i analize signala. Dekompozicijom signala na frekvencijske komponente, FT daje integralni spektralni sadržaj u opservacionom vremenskom prozoru, i ne dozvoljava praćenje njegove vremenske promene, što predstavlja osnovno ograničenje u analizi nestacionarnih komunikacionih signala. Primenom kratkotrajne FT (STFT – Short-Time Fourier Transform), kontinualnim ponavljanjem FT na malim vre-

menskim intervalima, dobija se tzv. „spektrogram“ koji delimično rešava ovaj problem vremenske nezavisnosti. STFT signala  $x(t)$  u trenutku  $t'$  i vremenskom prozoru  $w(t)$  može se predstaviti u obliku:

$$STFT(t', f) = \int_t \left[ x(t) \cdot w^*(t-t') \right] \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

Vremensko-frekvencijska analiza signala, primenom STFT, ostavlja problem zavisnosti vremensko-frekvencijske raspodele energije signala od veličine i oblika vremenskog prozora  $w(t)$ , što stvara značajne teškoće u interpretaciji rezultata analize signala. STFT ne prevazilazi ograničenje integralnog spektralnog sadržaja u vremenskom prozoru i zbog toga ne rešava problem tzv. „marginalnih energija“. Problem raspodele spektralnih komponenta u pojedinačnim vremenskim trenucima zahtevao bi proizvoljno mali prozor i u vremenu i u frekvenciji. Međutim, na osnovu principa neodređenosti ovaj zahtev za istovremenom dobrom vremenskom i frekvencijskom rezolucijom je kontradiktoran.

#### *Vremensko-frekvencijska raspodela*

Traženje rešenja za problem „marginalnih energija“ i poboljšanje vremenske i frekvencijske rezolucije kod STFT je rezultiralo u razvoj drugih združenih vremensko-frekvencijskih funkcija koje tačnije opisuju vremensko-frekvencijsku raspodelu (TFD – Time-Frequency Distribution) energije. Većina TFD se može predstaviti Furijeovom transformacijom ponderisane funkcije neodređenosti (AF – Ambiguity Function), tj.

$$TFD(t, f) = \iint_{F \tau} AF(\tau, F) \cdot K(\tau, F) \cdot e^{-j2\pi(\tau f + Ft)} d\tau dF$$

gde je  $AF(\tau, F)$  funkcija neodređenosti signala  $x(t)$ :

$$AF(\tau, F) = \int_t x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{j2\pi Ft} dt$$

Ako je jezgro transformacije  $K(\tau, F) = 1$  dobija se klasična Vigner-Vajlova raspodela (WVD – Wigner-Ville Distribution):

$$WVD(t, f) = \int_{\tau} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

WVD ima poboljšanu vremensko-frekvencijsku rezoluciju. Međutim WVD je nelinearna kvadratična raspodela i generiše međusignalnu interferenciju kada se analiziraju superponirani (višestruki) signali.

Različitim izborom jezgra transformacije dobijaju se druge vremensko-frekvencijske raspodele, sa različitim obeležjima i ponašanjem u primeni. Izbor najbolje raspodele zavisi od prirode signala koji se analizira, računarskih i memorijskih ograničenja, i zahteva ekspertsko znanje korisnika.

#### *Talasna transformacija*

Talasna transformacija (WT – Wavelet Transform) vrlo je interesantna u analizi nestacionarnih signala. Za razliku od STFT, WT koristi vremenske prozore različitog trajanja, i to kraće na višim frekvencijama a duže na nižim frekvencija-

ma. Na taj način efikasnije se raspodeljuje princip neodređenosti obezbeđujući višerezolucionu analizu sa dobrom vremenskom i lošom frekvencijskom rezolucijom na višim frekvencijama, a suprotno na nižim frekvencijama. Za razliku od WVD i drugih nelinearnih raspodela, WT je linearna i ne generiše međusignalnu interferenciju. Umesto ortogonalne baze prostoperiodičnih funkcija (sin, cos), WT koristi tzv. talasiće (wavelets) koji obično čine ortogonalnu bazu. Kontinualna WT (CWT – Continuous Wavelet Transform) definiše se kao:

$$CWT(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_t x(t) \cdot \psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right) dt$$

gde je  $\psi(t)$  osnovni talasić (mother wavelet), a  $s$  faktor skale.

Ostali talasići su ekspanovane ( $s < 1$ ) ili komprimovane ( $s > 1$ ) i pomerene verzije osnovnog talasića. Ako se za osnovni talasić uzme modulirani prozor  $w(t)$ , tj.  $\psi(t) = w(t) \cdot \exp(-j2\pi f_0 t)$ , veza WT sa STFT je očigledna. Parametar frekvencije  $f$  odgovara recipročnoj vrednosti parametra skale  $s$ , tj.  $f = f_0/s$ . Unutar određenih ograničenja, osnovni talasići se mogu birati proizvoljno, pa se u analizi klasa signala od interesa, kao što su FH signali, mogu njima prilagoditi i sa „zoom“ osobinom WT analize detektovati njihove frekvencijske tranzicije.

#### *Ciklostacionarna analiza signala*

Tehnike obrade ciklostacionarnih (CS) signala (CSP – Cyclostationary Signal Processing) koriste inherentne periodičnosti signala i imaju značajne prednosti u detekciji, identifikaciji i proceni pa-

rametara CS signala u odnosu na klasične stacionarne metode. Periodičnosti se ispoljavaju kroz korelaciju razdvojenih spektralnih komponenata kao spektralna redundansa. Frekvencija razdvajanja  $\alpha$  je tzv. ciklična frekvencija. Korišćenje ove spektralne redundanse znatno poboljšava performanse analize i obrade signala.

Većina komunikacionih signala ima CS osobine, koje su najčešće rezultat modulacije i kodovanja. Svi modulirani signali su ciklostacionarni. Njihove ciklične frekvencije, zavisno od tipa modulacije, pridružuju se nosećoj frekvenciji, simolskoj brzini, brzini čipa (chip rate), brzini skakanja (hop rate) i drugim periodičnostima. Spektralno-korelaciona funkcija (CSF – Spectral-Correlation Function) vrlo je važna CS osobina drugog reda. CSF se dobija korelacijom spektralnih komponenata na frekvencijama  $f + \alpha/2$  i  $f - \alpha/2$ :

$$CSF(\alpha, f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{T \cdot \Delta t} \int_{\Delta t} X_T \left( t, f + \frac{\alpha}{2} \right) \cdot X_T^* \left( t, f - \frac{\alpha}{2} \right) dt$$

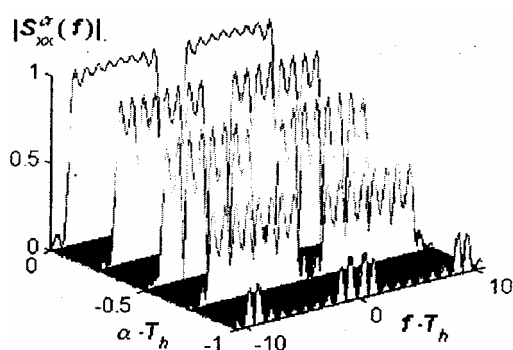
gde  $X_T(t, f)$  predstavlja FT signala  $x(t)$  na vremenskom intervalu  $T$ , odnosno STFT.

Kod CSF analize  $\Delta f/\Delta \alpha \gg 1$ , tj. rezolucija  $\Delta \alpha$  po cikličnoj frekvenciji  $\alpha$  znatno je bolja od rezolucije  $\Delta f$  po spektralnoj frekvenciji  $f$ , što značajno povećava tačnost procene parametara signala. Stacionarni šum ne ispoljava ciklična obeležja. Moguće je izdvajanje željenog signala koji je vremenski i frekvencijski preklapljen sa drugim neželjenim signalima, interferencijom i šumom. Zanimljiv uticaj šuma i veća ciklična rezolucija povećavaju

pouzdanost i tačnost procene parametara signala. Dakle, CSF pristupom u presretanju signala prevazilaze se najkomplikovaniji problemi adaptacije na nepoznati i promenljivi nivo šuma i interferencije. Isto tako, karakteristični oblici CSF u bifrekvencijskoj ravni  $(f, \alpha)$  koriste se za identifikaciju tipa modulacije signala.

Ilustracija CSF analize FH signala data je na slici 1. Prikazan je CSF modul,  $|S_{xx}^{\alpha}(f)|$ , ortogonalnog nekoherentnog FH/BFSK signala, sa normalizovanim skupom informacionih frekvencijskih pomeraja  $\{f_n T_h\} = \{-1/2, 1/2\}$  i pseudoslučajnih pomeraja frekvencijskih skokova  $\{r_n T_h\} = \{-3, -1, +1, +3\}$ . Uočava se da FH signali ispoljavaju ciklostacionarnost samo u osnovnom opsegu na cikličnim frekvencijama koje odgovaraju periodi ponavljanja PN sekvence skakanja, što predstavlja značajnu identifikacionu karakteristiku i bitan parametar za prijem ovih signala [3].

Posebno su značajne prednosti CSF pristupa u detekciji LPI signala. U klasičnoj radiometarskoj detekciji signala energija se detektuje bez obzira da li postoji ili ne postoji signal, tj. radiometar (energetski detektor) razdvaja energiju smese signal+šum od energije šuma. S druge



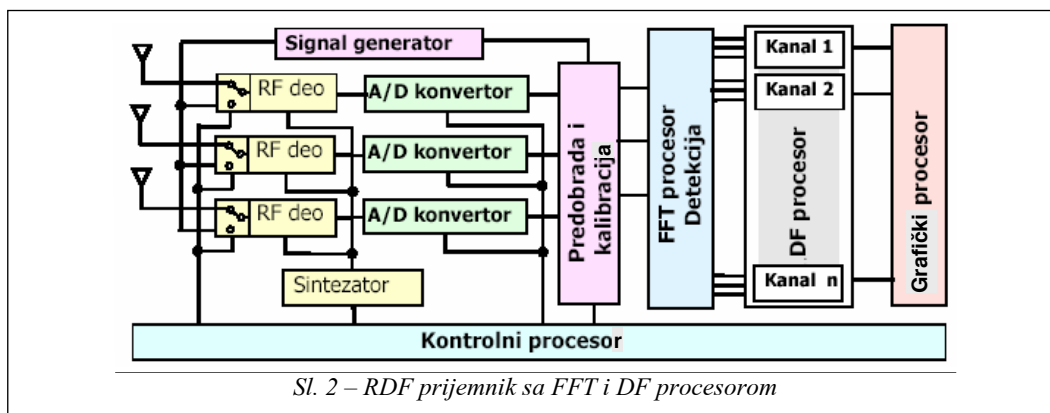
Sl. 1 – Ciklični spektar FH signala

strane, ciklični detektor regeneriše spektralnu komponentu za  $\alpha \neq 0$  samo ako je signal prisutan i sa zanemarljivim uticajem šuma [4, 5].

### Digitalne metode detekcije signala

Uvođenje digitalnih širokopoljnih prijemnika u savremene izviđačke sisteme i veliki napredak u računarskoj tehnici omogućili su realizaciju boljeg pristupa u detekciji komunikacionih signala, a posebno FH signala, primenom FFT metoda. Ovakav pristup rezultirao je u tzv. radio-goniometarski (RDF – Radio Direction Finding) prijemnik, gde se integriše širokopoljna detekcija i DF. Struktura RDF prijemnika prikazana je na slici 2.

Trenutni međufrekvencijski (MF) opseg širokopoljnih prijemnika znatno je veći od opsega jednog FH impulsa. Detekcija FH signala se u ovom slučaju svodi na detekciju kratkotrajnih signala u digitalnom širokopoljnom signalu sa MF izlaza prijemnika. Digitalnom obradom se širokopoljni digitalni signal deli u  $N$  susednih kanala koji pokrivaju ceo širokopoljni MF opseg prijemnika. Pošto se brzina odabiranja po pojedinim kanalima redukuje na  $fs/N$  ( $fs$  – frekvencija odabiranja), računarski zahtevi u obradi jednog signala se znatno ublažuju, a i SNR (signal-to-noise ratio) unutar tog kanala se poboljšava za  $10 \cdot \log N$  dB. Razdvajanje na kanale vrši se primenom tzv. FFT kanalizatora i polifaznih FFT kanalizatora, što je najbolji izbor za digitalnu realizaciju detekcije FH signala u realnom vremenu. FFT kanalizatori čuvaju fazne informacije, koje se koriste za DF svakog detektovanog signala.



Metode digitalne detekcije signala zastupaju se na FFT, polifaznim filtrima i metodi periodograma, uključujući različite varijante primene prozora i frekvencijskog izgladivanja (frequency smoothing) [5]. U praktičnim tehnikama detekcije koristi se prag detekcije radi određivanja da li neki pik u spektru potiče od signala ili šuma.

Najbolje performanse detekcije postižu se kada se opservacioni prozor poklapa sa intervalom frekvencijskog skoka ( $T_n$ ), što je slučaj kod metode periodograma i prilagođenog frekvencijski ispeglanog FFT (MFS-FFT – Matched frequency smoothed FFT). Bolje potiskivanje bočnih listova postiže se povećanjem broja FFT tačaka, korišćenjem prozora i polifaznih filtera. U tom smislu, najbolja je primenom polifaznih filtera, a i povećanje broja FFT tačaka daje dobre rezultate. Primena prozora pogoršava performanse detekcije. MFS-FFT metod je najsporiji pošto uključuje u račun najveći broj kanala. Najmanje vreme obrade je kod jednokanalne FFT detekcije, a zatim kod metoda periodograma. Primena prozora neznatno povećava vreme obrade [5]. Izbor najboljeg metoda FH detekcije može se integralno razmatrati kroz mogućnost drugih primena. Tako metod jednokanalne FFT detekcije i polifaznih filtera predstavljaju širo-

kopojasne kanalizatore čiji se izlazi mogu koristiti u demodulaciji signala i nadgledanju radio-spektra.

Sama detekcija FH signala ne nosi dovoljnu radio-izviđačku informaciju. Posebno je interesantna procena parametara (širina frekvencijskog opsega, smer dolaska (azimut), vremenski početak i trajanje FH impulsa) FH signala, što treba da omogući njihovo praćenje po frekvenciji i vremenu. U tom smislu, MFS-FFT metod ima vrlo dobru frekvencijsku rezoluciju, a međurezultati se mogu koristiti za tačnu procenu širine frekvencijskog opsega i diskriminaciju između frekvencijski bliskih signala.

Primena u radio-izviđanju postavlja nove zahteve i usmerava istraživanja na dalji razvoj digitalnih metoda detekcije FH signala sa još boljim performansama, kao što su novi oblici TFD, WT i ciklične metode detekcije.

#### *Goniometrisanje signala*

Značaj određivanja lokacije izvora signala (predajnika), odnosno goniometrisanja (DF – Direction Finding), raste sa povećanjem primene LPI signala i mobilnosti komunikacionih uređaja. Goniometrisanjem se spektralne komponente

te u RF spektru pridružuju nekom predajniku i tako prikupljaju podaci o rasporedu snaga i aktivnosti protivnika.

Snažan razvoj digitalne obrade signala (DSP – Digital Signal Processing) i njena DF primena omogućili su implementaciju interferometrijskih i super rezolucionijskih DF metoda. Intenzivna istraživanja i snažan impuls u razvoju novih DF metoda nametnula je sve veća primena frekvencijski agilnih signala, kao što su FH signali. Ovo je rezultiralo u novom pristupu u goniometrijsanju poznatom kao širokopoljarno presretanje/DF koje se zasniva na integraciji širokopoljarnog presretanja (detekcije) primenom FFT i DF procesa [6, 7].

Goniometrijsanjem se procenjuje smer dolaska (DOA – Direction of Arrival) signala od nekog predajnika. Za određivanje DOA signala obično je dovoljno određivanje azimuta. Određivanje elevacije je od interesa za emitere sa letećih platformi i u slučaju kratkotalasnih (KT) signala koji se odbijaju od jonosfere.

DF metoda korelativne interferometrije [8] nalazi značajnu primenu u goniometrijsanju kratkotrajnih signala i, posebno, FH signala. Razlog je, pre svega, u kratkoći vremena potrebnog za procenu DOA signala, što omogućuje implementaciju u realnom vremenu. Fazna razlika između signala elemenata antenskih nizova može se lako meriti pomoću kompleksne kroskorelacije između samo po jednog odbirka tih kompleksnih signala.

Snažan razvoj i dostignuća u DSP tehnologiji omogućili su da metode obrade signala antenskih nizova dođu i praktično do izražaja. Sada se mogu izvršiti i

vrlo složene matematičke operacije i numerički proračuni za vrlo kratko vreme, što omogućuje da se ove metode primene za rešavanje složenog problema goniometrijsanja više radio-emisija koje se preklapaju i vremenski i spektralno. Spektralne metode obrade signala senzorskih nizova mogu se klasifikovati u „beamforming“ metode i tzv. metode potprostora (subspace).

Osnovna ideja „beamforming“ metode sastoji se u menjanju usmerenosti antenskog niza i merenju nivoa izlaznog signala. Pravac usmerenosti pri kome se dobija maksimalni nivo signala odgovara DOA proceni.

„Subspace-based“ metode zasnivaju se na strukturi sopstvenih vrednosti i vektora (eigenstructure) kovariacione matrice, i među ovim metodama je najpoznatija tzv. MUSIC (Multiple Signal Classification) metoda. MUSIC algoritam je izvorno razvijen kao algoritam za procenu smera dolaska signala, a zatim je korišćen i za rešavanje drugih problema spektralne analize i identifikacije signala.

Metode obrade ciklostacionarnih signala (CSP) pružaju značajne dodatne mogućnosti. Korišćenje CS osobina pri obradi antenskih signala omogućuje „favorizovanje“ željenog signala i njegovo znatno lakše razdvajanje od neželjenih signala, interferencije i šuma. Procena korelacione matrice, koja se koristi u klasičnim algoritmima DOA procene na bazi potprostora signala i/ili potprostora šuma, zamenjuje se cikličnom korelacionom matricom [4]. Na ovaj način doprinos daju samo signali sa istom cikličnom frekvenci-



jom, a eliminiše se stacionarni aditivni šum i sve interferencije sa različitim cikličnim frekvencijama. Dakle, korišćenjem CS osobina značajno se povećava SNR i poboljšava detektibilnost signala, a razdvajanje signala sa različitim cikličnim frekvencijama povećava broj detektibilnih signala. Ciklične DF metode su superiorne u odnosu na klasične metode, posebno u slučaju kada ukupni broj signala premašuje broj senzora. Superiornost cikličnih DF algoritama postoji i u slučaju kada su karakteristike šuma nepoznate, ili kada signali sa različitim cikličnim frekvencijama imaju bliske uglove dolaska (DOA). Međutim, ima i otvorenih problema kao što su implementacija i testiranje algoritama na realnim signalima i razvoj boljih metoda za širokopojasne signale [4, 5].

### **Tehničko rešenje izviđanja signala sa frekvencijskim skakanjem**

Sistem za izviđanje (presretanje/DF) FH signala u VVF/UVF opsegu zasniva se na prijemu signala antenskim nizom i njihovoj višeprocorskoj digitalnoj obradi (DSP) u cilju presretanja, DF i procene identifikacionih parametara FH signala.

Osnovni elementi ovog sistema su [5]:

- VVF/UVF DF antenski niz (minimalno 3 antenska elementa) sa dobrom osetljivošću;
- višekanalni (minimalno trokanalni) analogni tjuner ili prijemnik za VVF/UVF opseg, velike brzine pretraži-

vanja i sa širokopojasnim MF izlazom (npr. 10 MHz);

- A/D konvertori, za digitalizaciju širokopojasnog MF signala (npr. trenutni MF opseg od 10 MHz), sa odgovarajućom brzinom odabiranja (npr. 25,6 MHz za MF opseg od 10 MHz) i sa dobrom rezolucijom (npr. 14 bita);

- digitalna predobrada signala, gde se vrši digitalna konverzija u osnovni opseg (DDC – Digital down conversion), filtriranje željenog podopsega i decimacija koja obezbeđuje redukciju podataka zbog obrade u realnom vremenu;

- DPS jedinica za obradu signala sa minimalno tri paralelna merna kanala. Sadrži više (npr. 16) digitalnih procesora signala namenjenih za FFT analizu, detekciju, digitalno filtriranje, DF i procenu identifikacionih parametara FH signala.

Analogni tjuneri (RF conditioning unit) i A/D konvertori treba da obezbede potpuno koherentne sve ulazne signale da bi se sačuvali njihovi fazni odnosi potrebni za DF proračune. Širokopojasni tjuneri (ili prijemnici) transliraju deo spektra iz VVF/UVF opsega u MF opseg pogodan za A/D konverziju. Osnovno ograničenje za realizaciju izviđanja FH signala u realnom vremenu predstavlja širina MF opsega i brzina odgovarajućih digitalnih MF podataka. Na primer, za MF opseg širine od 10 MHz, brzinu odabiranja od 25,6 MSPS (miliona odbiraka/s), A/D konverziju sa 14 bita i minimalno tri kanala za DF aplikaciju, zahteva brzinu digitalnih podataka veću od 130 Mbytes/s. Obrada u realnom vremenu zahteva da se u procesu predobrade vrši digitalna konverzija u osnovni opseg (DDC), filtriranje željenog podopsega i

decimacija koja obezbeđuje redukciju podataka. Obično se funkcije A/D konverzije i DDC integrišu u okviru tzv. akvizicionih ploča.

DSP jedinica vrši u osnovnom opsegu kanalizaciju širokopolasnog FH signala i detekciju FH impulsa, (primenom FFT), DF procenu i proračun izviđačkih parametara. Različite mogućnosti sistema za izvidanje FH signala, što podrazumeva promenu DF metode, brzine odabiranja, broja antena, itd., zahtevaju formiranje rekonfigurabilne arhitekture za obradu signala [9]. Postoje dve savremene rekonfigurabilne arhitekture za obradu signala i to: a) FPGA (Field Programmable Gate Array) i b) procesori, uključujući DSP.

Oba ova pristupa imaju prednosti i mane. Interesantno je da su većina FPGA prednosti komplementarne sa manama procesora i obrnuto. Dakle, najbolje rešenje je u kombinovanju ovih elemenata uzimajući u obzir prednosti i jednog i drugog pristupa. Na primer, MF predobrada, koja uključuje DDC, digitalno filtriranje, decimaciju i neke funkcije poređenja sa pragom, pogodna je za FPGA implementaciju. Obradu u osnovnom opsegu, koja podrazumeva FFT analizu, detekciju, DF procenu i procenu identifikacionih parametara, pogodno je realizovati pomoću DSP. Obrada u osnovnom opsegu u realnom vremenu zahteva više više-procesorskih DSP ploča. Na primer, četiri DSP ploče Quatro 67 sa po četiri „floating-point“ signal procesora TMS320C6701, obezbeđuju procesorsku snagu od 25,6 G instrukcija/s, i to je jedna od najsnažnijih komercijalno raspoloživih arhitektura dovoljna za izvidanje FH signala srednje brzine skakanja (do 500 skokova/s). Implemen-

tacija metoda za izvidanje FH signala u realnom vremenu zahteva i vrlo brzi protok kompleksnih podataka između A/D konvertora i DSP, kao i između samih DSP.

Korelativna interferometrija je DF metoda koja se nameće pri izvidanju FH signala.

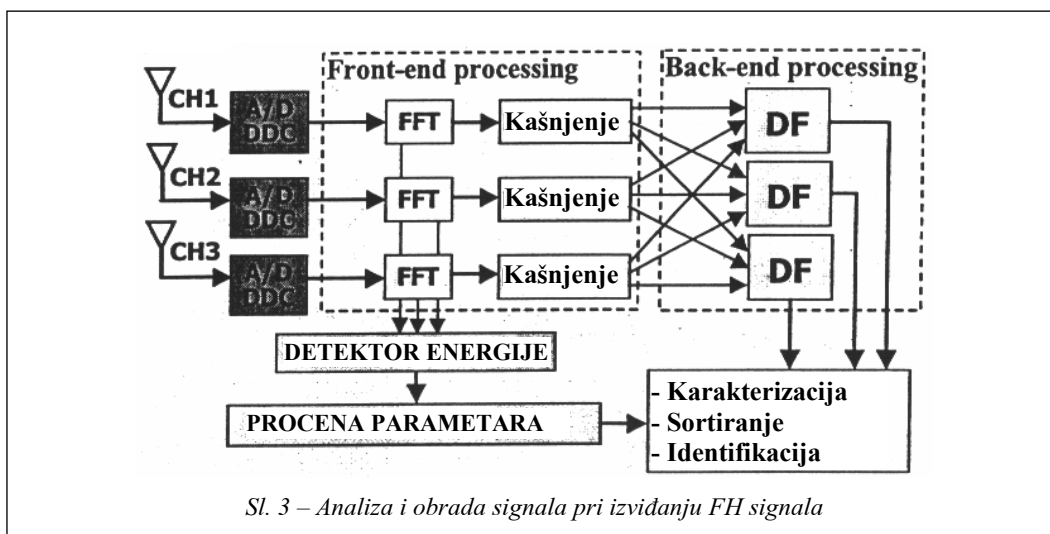
Ova metoda, u odnosu na druge klasične metode, ima sledeće osnovne prednosti: brza DF procena; velika tačnost procene i pri „multipath“ interferenciji, velika osetljivost i fleksibilnost u odnosu na geometriju antena; kalibracijom se mogu redukovati DF greške izazvane platformom.

Najbolji kompromis između maksimalnih performansi visokorezolucionih DF metoda i prihvatljive DF složenosti pri goniometrisanju FH signala, predstavlja korelativna interferometrija. Inače, kritični zahtevi za izbor tehničkih rešenja sistema za izvidanje FH signala posledica su sledećih parametara:

- brzine skakanja FH signala, odnosno vremena zadržavanja na kanalu;
- frekvencijskog opsega FH emisije, odnosno broja kanala;
- preklapanja između frekvencijskog opsega pretraživanja i opsega skakanja;
- trajanja FH emisije;
- verovatnoće presretanja FH impulsa.

Rezultati izvidanja FH signala prikazuju se u pogodnom alfa-numeričkom i grafičkom obliku, čuvaju u bazi podataka „host“ PC računara i obezbeđuje se njihovo slanje kroz Ethernet LAN brzinom od 100 Mbit/s i TCI/IP protokolom za dalju off-line obradu.

U okviru DSP prvo se izvršava FFT (front-end processing) radi analize spektralnog sadržaja širokopolasnog signala, njegovog razbijanja na uskopojasne kana-



le i detekcije FH signala od interesa (SOI – Signals of Interest). Zatim se nad detektovanim SOI frekvencijama, sa svih paralelnih prijemnih kanala, vrši intenzivna „floating-point“ obrada (back-end processing) radi DF procene i procene identifikacionih parametara. DF obrada zahteva prosleđivanje spektralnih rezultata (FFT analiza) sa svih kanala do svih procesorskih elemenata u „back-end processing“ delu, kao što je prikazano na slici 3.

### Zaključak

Procenjuje se da se izviđanjem komunikacionih radio-signala prikuplja većina (60–80%) taktičkih informacija. Dominacija u elektromagnetnom spektru i formiranje potpune i precizne elektronske slike bojišta presudno određuju ishod većine savremenih vojnih operacija [1]. Snažan razvoj i primena tehnologije softverskog radija otvara nove mogućnosti, ali i teškoće u elektronskom ratu (EW). Znatno će se povećati zastupljenost LPI i LPSE tehnika prenosa u taktičkim komu-

nikacionim sistemima. Softverski proizvoljni izbor sofisticiranih modulacionih tehnika, brzine prenosa, širine kanala i drugih parametara radio-signala i složeno RF okruženje, zahtevaju razvoj i primenu novih naprednih tehnika obrade i analize signala u procesu njihovog presretanja, lociranja, analize, karakterizacije i identifikacije. Izbor raspoloživih složenih metoda obrade i analize signala u radio-izviđanju, njihova adaptacija i razvoj novih metoda, kao i interpretacija dobijenih rezultata, zavisi od prirode izviđanih signala i zahteva ekspertske znanje korisnika. Neminovna razmena važnih informacija u komandno-kontrolnom procesu i između senzora i savremenih preciznih oružja, primenom digitalnih komunikacionih sistema na bazi sve prisutnije tehnologije softverskog radija, znatno povećava ulogu EW na takvom „digitalizovanom“ bojištu. Praćenje i pariranje ovakvom trendu zahteva znatno i stalno ulaganje u EW opremu, znanje i obuku kadra, srazmerno ulaganjima na polju komunikacionih i informacionih taktičkih sistema.

*Literatura:*

- [1] Frater, M.; Rayan M.: Communications electronic warfare and the digitised battlefield, Land Warfare Studies Centre, Working Paper No.116, 2001., (51 str.).
- [2] Miles R.; Prescott G.: Detectability models for multiple access lowprobability-of-intercept networks, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 36, No. 3, July 2000, pp. 848–858.
- [3] Vučić, D.; Vučić, N.: Ciklična spektralna analiza signala sa frekvencijskim skakanjem, Konferencija ETRAN (podneto), 2004.
- [4] Vučić, D.: Ciklična spektralna analiza signala, Zadužbina Andrejević, Beograd, 2001., (131 str.).
- [5] Vučić, D.: Metode i tehnička rešenja za izvidanje signala sa frekvencijskim skakanjem, VTI, Beograd, 2004., (84 str.).
- [6] Demmel, F.; Unsel, U.: Digital broadband search direction finders R&S DDF<sup>®</sup>0×A: Unrivalled performance and compact design, News from Rohde&Schwarz, Number 179 (2003/III).
- [7] Demmel, F.; Unsel, U.: Digital hf/vhf/uhf monitoring direction finders R&S DDF<sup>®</sup>0×E: complex radio scenarios monitored at a glance, News from Rohde&Schwarz, Number 180 (2003/IV).
- [8] Rohde&Schwarz, (2000/2001) Introduction into theory of direction finding, Catalog: Radiomonitoring and radiolocation, 2000/2001.
- [9] Haji, K., Brown, B.: A reconfigurable computing platform for detection finding of frequency hopping signals, Southwest Research Institute, San Antonio.