Mr Igor S. Simić,
kapetan I klase, dipl. inž.
VP 4522 Batajnica
Radoje Marković,
potpukovnik, dipl. inž.
VP 1121 Beograd

PRIJEMNICI ZA ELEKTRONSKI RAT

UDC: 623.615:621.396.62

Rezime:

Izbor tipa prijemnika za elektronski rat zavisi prevashodno od njegove funkcije u sistemu. U radu je prikazana podela prijemnika za elektronski rat prema strukturi. Date su osnovne karakteristike i principi rada prijemnika sa merenjem trenutne frekvencije, prijemnika sa Bragovom ćelijom, kristalnog, superheterodinskog, softverskog, kanalskog i kompresivnog prijemnika. Osnovni parametri ovih tipova prijemnika su upoređeni.

Ključne reči: elektronski rat, kristalni prijemnik, prijemnik sa merenjem trenutne frekvencije, prijemnik sa Bragovom ćelijom, superheterodinski prijemnik, kanalski prijemnik, softverski prijemnik, kompresivni prijemnik.

ELECTRONIC WARFARE RECEIVERS

Summary:

Receiver selection, first of all, depends on its function in electronic warfare systems. In this paper electronic warfare receivers classification is explained based on their structures. Main receiver properties and functional descriptions are given for instantaneous frequency measurement receiver, Brag-cell, crystal, Superheterodyne, software, channelized and compressive receivers. The performances of these receivers are compared.

Key words: electronic warfare, crystal receiver, instantaneous frequency measurement receiver, Brag-cell receiver, superheterodyne receiver, channelized receiver, software receiver, compressive receiver.

Uvod

Kontrola i nadgledanje elektromagnetnog spektra ima veliki značaj u savremenim vojnim dejstvima. Otkrivanje izvora zračenja, određivanje njegove lokacije u prostoru i merenje parametara takvog izvora prevashodni su ciljevi koje sistemi za elektronski rat (EW — Electronic Warfare) treba da ostvare. Jedna od osnovnih komponenti takvog sistema jeste prijemnik. Prijemnik kao »alat« za obradu RF signala mora da zadovolji široki opseg mogućih aplikacija, od relativno jedno-

stavnih funkcija, kao što je detekcija elektromagnetskog zračenja, do kompleksnih presretačkih funkcija koje obavljaju prijemnici za pretraživanje, detekciju, identifikaciju, lokaciju i eksploataciju signala protivnika [1]. Prijemnik, takođe, treba da zadovolji protivrečne zahteve kao što su širok ulazni frekvencijski opseg i velika osetljivost.

Prema strukturi, EW prijemnici se mogu podeliti na [2, 3, 4]:

— kristalne video (direktne) prijemnike,

- prijemnike sa merenjem trenutne frekvencije,
- prijemnike sa Bragovom ćelijom,
- superheterodinske,
- kanalske,
- softverske,
- kompresivne (mikrosken).

Izbor najpogodnijeg tipa prijemnika zavisi od njegove primene u EW sistemu.

Kristalni video prijemnik

Kristalni¹ video ili direktni prijemnik je, u odnosu na ostale tipove EW prijemnika, najjednostavniji. To je prvi mikrotalasni prijemnik koji pokriva veoma širok frekvencijski opseg, ali ne može da izmeri frekvenciju ulaznog signala. Kristalnim prijemnikom može se samo detektovati energija signala u ulaznom opsegu prijemnika. Kako je ulazni radio-frekvencijski (RF) opseg kristalnog prijemnika širok, osetljivost mu je relativno mala. Budući da prijemnik ne može razdvojiti ulazne signale po frekvenciji, ne može ni detektovati istovremeno prisustvo više signala. Proces detekcije ne zadržava informaciju o fazi signala, što smanjuje mogućnost identifikacije izvora zračenja. Ovaj tip prijemnika je, zbog izuzetno malih dimenzija, jednostavnosti i niske cene, pogodan za masovnu upotrebu u EW aplikacijama.

Osnovna komponenta kristalnog video prijemnika, čija je blok-šema prikazana na slici 1, jeste kristalni detektor. Izlaz antene dovodi se direktno na detektor, a sa njegovog izlaza signal dolazi na video pojačavač.

Generalno posmatrano, osetljivost ovog tipa prijemnika zavisi od karakteristika kristalnog detektora i fak-

tora šuma video pojačavača. Uobičajeni postupak za povećanje osetljivosti

Sl. 1 — Blok-šema kristalnog video prijemnika

jeste poboljšanje karakteristika kristalnog detektora i smanjenje faktora šuma video pojačavača. Efikasniji način za povećanje osetljivosti je dodavanje RF pojačavača na ulazu prijemnika, kao što je na slici 1 označeno isprekidanom linijom.

Kako je prijemnik malih dimenzija, često se ugrađuje neposredno uz antenu. Video izlaz prijemnika vodi se na jednostavne sklopove za određivanje parametara signala i time se zadržavaju male dimenzije i niska cena. Treba imati u vidu da su samo ograničena unapređenja pogodna za ovaj tip prijemnika. Ako se zahtevaju veće mogućnosti, racionalnije rešenje je izbor nekog drugog tipa prijemnika.

Prijemnik sa merenjem trenutne frekvencije

Karakteristike prijemnika sa merenjem trenutne frekvencije (Instantaneous Frequency Measurement, IFM) čine ga potencijalno pogodnim za EW primene. Ovaj tip prijemnika ima široki RF opseg i veliku verovatnoću presretanja. Prijemnik može sa velikom tačnošću da meri frekvenciju kratkih impulsa. Faktori koji utiču na pogodnost primene u EW aplikacijama su veoma jednostavna struktura i kompaktnost.

Glavni nedostatak IFM prijemnika jeste nemogućnost određivanja frekvencije kada više različitih signala istovremeno dolazi na ulaz prijemnika.

¹ Ključni deo prijemnika je detektor sa kristalnom diodom. Zbog toga je ovaj tip prijemnika dobio naziv »kristalni«.

Drugim rečima, ako ulazni signal čini više frekvencijskih komponenti, maksimum koji se postiže IFM prijemnikom jeste tačno izmerena vrednost frekvencije jednog od signala. Međutim, često se dobijaju pogrešne vrednosti koje nemaju veze ni sa jednom od frekvencija ulaznih signala.

Postoji nekoliko mogućih načina da se unapredi detekcija signala koji sadrže više frekvencijskih komponenti [2, 3, 4]. Jedan od načina da se umanjiti taj glavni nedostatak IFM prijemnika, a da se zadrži jednostavnost detektora, jeste podela RF opsega na podopsege sa pojasnim filterima.

IFM prijemnik, kao što je prikazano na slici 2, sastoji se od sledećih komponenti: delitelja snage, linije za kašnjenje, faznog diskriminatora, kon-

Sl. 2 — Blok-šema prijemnika sa merenjem trenutne frekvencije

vertora faze u frekvenciji i ulaznog pojačavača sa limiterima.

Princip rada IFM prijemnika zasniva se na merenju razlike u fazi koja je nastala zbog kašnjenja signala različite frekvencije na liniji za kašnjenje. Na osnovu fazne razlike, koja je frekvencijski zavisna od konstantnog vremenskog kašnjenja, određuje se frekvencija ulaznog signala (slika 3). Relativni fazni ugao između zakasnelog i nezakasnelog signala je:

$$\Theta = \omega \tau. \quad (1)$$

Na osnovu poznatog kašnjenja τ i izmerene fazne razlike Θ , frekvencija ulaznog signala ω određuje se iz prethodnog izraza. Fazni ugao Θ kod IFM prijemnika određuje se iz relacija:

$$E = A \sin \Theta$$

$$F = A \cos \Theta \quad (2)$$

gde je:

E i F — izmereni naponi,

A — amplituda ulaznog signala.

U prvim verzijama IFM prijemnika E i F naponi su dovođeni na X i Y otklonske pločice osciloskopa. Poluprečnik elipse, dobijene na osciloskopu, predstavljao je amplitudu signala, dok je ugao iskošenosti ose elipse predstavljao fazni ugao, pošto je:

$$\Theta = \arctan \frac{E}{F} = \omega \tau. \quad (3)$$

Delitelj snage deli ulazni signal na dva dela. Linija za kašnjenje formira

vremensko kašnjenje potrebno za detekciju faze. Fazni diskriminator formira odgovarajuće fazne pomake (2) na osnovu kojih se, pomoću izraza (1) i (3), računa frekvencija signala na ulazu. Informacija o amplitudi najčešće je eliminisana limiterkim pojačavačem.

Prijemnik sa Bragovom ćelijom

Akustičko-optički procesori signala obavljaju spektralnu analizu primenom fenomena poznatih u fizici:

— delovanje RF signala na pojedine vrste kristala (piezoelektrični) pretvara elektromagnetski talas u zvučni;

Sl. 3 — Princip rada IFM prijemnika — blok-šema

— na prostiranje svetlosti kroz kristal može se uticati zvučnim talasom.

Drugim rečima, zvučni talas dobijen stimulacijom piezoelektričnog kristala RF signalom utiče na indeks prelamanja upadnog laserskog snopa (koherentna, monohromatska svetlost). Zakretanje snopa laserskog zraka proporcionalno je odnosu talasnih dužina svetlosti i zvuka. Ugao zakretanja snopa, nastalog pod uticajem zvučnog talasa, poznat je pod nazivom Bragov ugao i dat je izrazom:

$$\Theta = 2 \arcsin \left(\frac{\lambda f}{2v_s} \right), \quad (4)$$

gde je:

λ — talasna dužina svetlosti u slobodnom prostoru,

f — frekvencija ulaznog signala,
 v_s — brzina prostiranja zvuka.

Posle prolaska kroz kristal, svetlost se detektuje na fotoosetljivom polju i elektronski očitava, kao što je prikazano na slici 4. Prijemnik sa Bragovom ćelijom u svojoj osnovi, koristi akustičko-optički procesor da bi odredio frekvencijske komponente ulaznog signala (slika 5).

Izlaz iz fotodetektora proporcionalan je trenutnoj frekvenciji. Sistem ima mogućnost da istovremeno detektuje više signala. Osnovni problem je sporo očitavanje frekvencije. Osetljivost i rezolucija prvenstveno su ograničeni tehnologijom izrade fotodetektorskih polja. Postojećom tehnologijom postiže se rezolucija od 1 MHz na frekvencijskom opsegu reda 1 GHz.

Sl. 4 — Princip rada Bragovog procesora

Sl. 5 — Prijemnik sa Bragovom ćelijom — blok-šema

Superheterodinski prijemnik

Jedan od efikasnijih načina za unapređenje osjetljivosti prijemnika jeste dodavanje pojačavača ispred detektora. Međutim, RF pojačavači nisu uvek dostupni na radnim frekvencijama

ma prijemnika. Superheterodinski (SH) prijemnik² poboljšava osjetljivost dodavanjem pojačavača i uskopojašnjog filtera na nižim frekvencijama.

² Tvorcem superheterodinskog prijemnika smatra se Edwin H. Armstrong.

Da bi to bilo moguće, ulazni RF signal linearno se translira (konvertuje) na niže frekvencije na kojima se pojačavači i uskopojasni filteri lakše realizuju. Pošto je transformacija linearna, sve informacije se zadržavaju u ulaznom signalu. Uvođenjem pojačavača osetljivost više nije limitirana pojačanjem, već dominantan uticaj na nju ima šum. Istovremenim dodavanjem filtera ograničava se frekventijski opseg šuma i znatno unapređuje ukupna osetljivost prijemnika.

Superheterodinski prijemnik koristi se zbog svoje velike osetljivosti i selektivnosti, u komunikacijama. Skoro svi komercijalni komunikacioni i radarski prijemnici su superheterodinskog tipa. U EW aplikacijama SH prijemnici se koriste za precizno merenje parametara ulaznog, već otkrivenog signala. Kako je, zbog uskog frekventijskog opsega, relativno jednostavno prilagoditi faze između dva identična SH prijemnika, oni se obično koriste za merenje ugla dolaženja ulaznog signala.

Struktura SH prijemnika prikazana je blok-šemom na slici 6. Osnovne komponente prijemnika su: mešač, lo-

cije f_L . Ako je frekvencija ulaznog signala f_s mešač će je pomeriti na f_I , što predstavlja razliku frekvencija f_L i f_s :

$$f_I = f_L - f_s \quad (5)$$

Pojasnopropusni MF filter koji se nalazi iza mešača ima zadatak da propusti željeni signal, a da odstrani neželjene frekvencije koje su generisane u mešaču usled nelinearnosti i intermodulacionih izobličenja.

Međufrekvencijski pojačavač, koji se nalazi iza MF filtera, obezbeđuje najveći deo pojačanja u prijemniku, a osetljivost poboljšava samo do određene granice. Mešač na ulazu prijemnika degradira faktor šuma prijemnika, a time i njegovu osetljivost. Dalja poboljšanja postižu se smanjenjem gubitaka u mešaču i dodavanjem malošumnog RF pojačavača ispred mešača. Za razliku od kristalnog video prijemnika, gde je potreban širokopojasni RF pojačavač, kod SH prijemnika frekventijski opseg obično je uži, pa je moguće upotrebiti više podesivih uskopojasnih RF pojačavača.

Obrada signala u SH prijemniku, radi dobijanja informacija o signalu

Sl. 6 — Blok-šema superheterodinskog prijemnika

kalni oscilator (LO), međufrekvencijski filter (MF), MF pojačavač i video detektor.

Lokalni oscilator generiše kontinualan prostoperiodični signal frekven-

ili radi njegove demodulacije, počinje iza MF pojačavača. EW prijemnici najčešće imaju niz podsklopova koji, istovremeno ili po izboru, obrađuju MF signal.

Performanse SH prijemnika su odlične po svim parametrima. Jedino je verovatnoća presretanja relativno mala. Njihova najbolja osobina je da mogu izdvojiti željeni signal i daljom analizom odrediti njegove parametre. Zato je primena SH prijemnika za EW aplikacije ograničena na segmente koji ne zahtevaju veliku verovatnoću presretanja, ili se koriste zajedno sa nekim drugim tipovima širokopojasnih prijemnika.

Kanalski prijemnik

Osnovna ideja kanalskog prijemnika jeste da se RF opseg podeli na podopsege sa velikim brojem paralelnih uskopojasnih segmenata koji se istovremeno transliraju na zajedničku MF. Ulazni signal, u zavisnosti od njegove frekvencije, prolazi kroz odgovarajući filter. Dalja obrada obavlja se kao u SH prijemniku, čime je omogućeno da se zadrži dobra osetljivost, selektivnost, rezolucija i tačnost određivanja parametara signala. Nedostaci kanalskog prijemnika jesu relativna

složenost, visoka cena i velike dimenzije. Unapređenja u tehnologiji, naročito SAW filtera, doprinela su smanjenju dimenzija i cene.

Blok-šema na slici 7 prikazuje strukturu kanalskog prijemnika. Može se videti da je kanalski prijemnik, u stvari, skup fiksno podešenih superheterodinskih prijemnika. Ako se više kanala multipleksira i njihova obrada izvrši na jednom mestu, racionalnije se raspodeljuje procesorska snaga, pa je moguće smanjiti dimenzije i cenu.

Kanalski prijemnici omogućavaju precizno merenje svih parametara signala, kao i primenu tehnika adaptivnog procesiranja signala. Više različitih signala koji na ulaz prijemnika dolaze istovremeno, ali na različitim frekvencijama, paralelno se obrađuju u različitim granama, kao što je prikazano na slici 8. Verovatnoća presretanja je velika, zbog podele čitavog frekventijskog opsega prijemnika na više kanala.

U osnovi, postoje tri pristupa u realizaciji kanalskih prijemnika. Prvi

Sl. 7 — Blok-šema kanalnog prijemnika

podrazumeva podelu celokupnog frekvencijskog opsega prijemnika na podopsege, čija je širina jednaka konačnoj rezoluciji. Drugi način podrazumeva

tori, digitalni procesori signala (DSP), digitalni konvertori frekvencije (DDC) i mikroprocesori opšte namene. Ovako procesorski programabilno definisan

Sl. 8 — Princip rada kanalskog prijemnika

podelu frekvencijskog opsega na podopsege proizvoljne širine i treći način — obradu signala aktivira samo ako u podopsegu detektuje pojavu signala.

Softverski prijemnik

Primenom novih tehnologija superheterodinski prijemnik je evoluirao u softverski prijemnik. Digitalna obrada signala i njena sve šira primena u komunikacijama dovela je do redefinisavanja arhitekture SH prijemnika. Osnova ove tehnologije jeste potpuna programabilnost svih sklopova prijemnika. Komponente kojima se to postiže su: analogno-digitalni (A/D) konver-

prijemnik deo je evolucije hardverskih digitalnih sklopova.

Blok-šema na slici 9 prikazuje osnovnu strukturu softverskog izviđačkog prijemnika. Dostupne tehnologije dozvoljavaju da se odabiranje obavlja frekvencijom 500 MHz, čime je ulazni RF opseg prijemnika ograničen na ~ 200 MHz. To znači da je za neke RF opsege (KT, VKT) moguće obezbediti A/D konverziju signala na »samoj anteni«, odnosno odmah iza antene. Ako se želi prijem na frekvencijama višim od 200 MHz potrebna je konverzija frekvencije signala analognim sklopovima. Iza širokopojasnih A/D konvertora sva obrada obavlja se primenom digitalnih procesora signala sa algoritima za digitalnu obradu signala.

Da bi se prevazišla trenutna tehnološka ograničenja i efikasnije iskoristila raspoloživa procesorska snaga u prijemnik se iza A/D konvertora dodaju sklopovi za digitalnu obradu MF signala. Jedan od tih sklopova jeste digitalni konvertor frekvencije (DDC —

Kompresivni prijemnik

Kompresivni prijemnik ili, kako se još u literaturi naziva, mikrosken (microscan) prijemnik jeste sklop za analognu Furijeovu transformaciju ulaznog signala. Naziv mikrosken poti-

Sl. 9 — Blok-šema softverskog izviđačkog prijemnika

Digital or Decimating Down Converter). Funkcionalno DDC zamenjuje banku MF filtera, glavni deo sintezatora frekvencije i translaciju frekvencije u drugom mešaču.

Softverski prijemnik se, slično SH prijemniku, koristi u komunikacijama zbog svoje velike osetljivosti i selektivnosti. Novi komercijalni komunikacioni i profesionalni radarski prijemnici realizuju se tehnologijom softverskog radija. U EW aplikacijama koriste se za precizno merenje parametara ulaznog, relativno uskopojasnog signala. Pogodni su za upotrebu i u višekanalnim i goniometarskim sistemima, zbog malih dimenzija i velike fleksibilnosti, kao i za izradu uređaja za praćenje komunikacionih sistema sa frekvencijskim skakanjem u KT i VKT opsegu.

če iz laboratorija Stanfordskog univerziteta i odnosi se na funkciju prijemnika koji omogućava monitorisanje širokog frekvencijskog opsega (reda nekoliko GHz) u delu mikrosekunde. Ova osobina veoma je poželjna u izviđačkim prijemnicima, jer omogućava veliku verovatnoću otkrivanja neprijateljeve komunikacije ili radara [4, 5, 6]. Pošto je u osnovi principa rada ovog tipa prijemnika kompresija impulsa, a i da bi se napravila terminološka razlika između kompresivnog filtera u radaru i mikrosken prijemnika koristi se naziv kompresivni prijemnik. Kompresivni prijemnik je u suštini širokopojasni prijemnik koji, merenjem vremenske pozicije impulsa na izlazu, određuje trenutne frekvencije komponenti ulaznog signala.

Furijeova transformacija se može prikazati u formi konvolucije. Množenjem ulaznog signala sa čirp³ signa-

bu u radarskim sistemima sa kompresijom impulsa, ove komponente su danas komercijalno dostupne, što dozvo-

Sl. 10 — Struktura kompresivnog prijemnika M-C-M konfiguracije

lom, zatim konvolucijom sa čirpom (Frenelova transformacija) i još jednim množenjem sa čirpom dobija se Furijeova transformacija signala, koja se, dobijena na taj način, zove i čirp transformacija [4, 5].

Zbog redosleda operacija, ova konfiguracija kompresivnog prijemnika označava se sa M-C-M (Multiply-Convolve-Multiply), a prikazana je na slici 10.

Zamenom operacija konvolucije i množenja može se dobiti konfiguracija kompresivnog prijemnika C-M-C (Convolve-Multiply-Convolve). U praksi se najčešće koristi M-C-M tip kompresivnog prijemnika.

Glavni značaj algoritma za čirp transformaciju je u tome što se operacija konvolucije može efikasno izvršiti pomoću SAW (Surface Acoustic Wave) analognog transverzalnog (čirp) filtera. Prvobitno projektovane za upotre-

ljava njihovu široku upotrebu u realizaciji kompresivnog prijemnika.

Jedna od značajnih prednosti kompresivnog prijemnika u odnosu na ostale tipove jesu male dimenzije i mogućnost određivanja frekvencije više istovremeno prisutnih signala. Za razliku od kanalskog prijemnika, izlaz kompresivnog prijemnika predstavlja serija impulsa kojima se sukcesivno određuje frekvencija.

Čirp transformacijom ulaznog signala kompresivnim prijemnikom zadržava se informacija o fazi dolaznog signala, tako da se dodavanjem još jedne M-C-M grane prijemniku dodaje i mogućnost merenja dolaznog ugla, tj. određivanja pravca izvora zračenja.

Zaključak

Izbor prijemnika zavisi, prevashodno, od njegove funkcije u sistemu za elektronski rat. Karakteristike prijemnika koje određuju njegovu primenu su: dimenzije, cena, osetljivost, rezolucija, tačnost određivanja frekvencije i

³ Zbog svoje pravougaone ovojnice i linear-
no promenljive trenutne frekvencije, linearni FM
signal proizvodi zvučni efekat sličan cvrkutanju
ptica, pa je i dobio naziv »čirp« (engl. chirp —
cvrkutanje).

verovatnoća presretanja signala (POI — probability of intercept).

Sve performanse prijemnika mogu biti unapređene, što utiče na njegovu kompleksnost i cenu. Za svaki sistem može se postići kompromis između

cene prijemnika i zahtevane funkcije. Generalno, pažljiva analiza mora pokazati da li sistem može izvršiti željenu funkciju u zahtevanom okruženju. U tabeli je prikazan pregled performansi različitih tipova prijemnika, koje su ocenjene od 1 do 5.

Pregled performansi izviđačkih (presretačkih) prijemnika

Tip prijemnika	Kanalski	Kompresivni	Brag	IFM	Kristalni	Superheterod. i softverski
Osetljivost	5	5	4	2	3	5
POI	5	5	5	5	4	2
Rezolucija	5	4	5	1	1	5
Tačnost	5	3	2	4	2	5
Dinamički opseg	5	3	2	3	2	5
MF opseg	5	5	4	5	5	2
Mogućnost otkrivanja istovremenih signala	5	5	4	2	2	3
Cena	1	3	4	3	5	2—3
Složenost	velika	velika	srednja	srednja	mala	srednja

Literatura:

- [1] Stephens, J. P.: Advances in Signal Processing Technology for Electronic Warfare, IEEE AES Systems Magazine, November 1996, pp. 31—38.
- [2] Tsui, J. B. Y.: Microwave receivers with electronic warfare applications, Krieger publishing company, 1992 (reprint orig. edition 1986).
- [3] Wiley, R. G.: Electronic intelligence: the analysis of radar signals, Artech House, 1985.
- [4] Schleher, D. C.: Introduction to Electronic Warfare, Artech House, 1986.
- [5] Daniels, W. D.: Churchman M., Kyle R., Skudera W.: Compressive receiver technology, Microwave Journal, April 1986, pp. 175—185.
- [6] Schmid, H. F.: Microscan receivers boost intercept probability, Defense Electronics, October 1986, pp. 205—214.