Mr Igor S. Simić,
kapetan I klase, dipl. inž.
VP 4522 Batajnica
Dr Aleksa J. Zejak,
docent, dipl. inž.
Institut IMTEL, Novi Beograd

KOMPRESIVNI PRIJEMNIK U SISTEMIMA ZA ELEKTRONSKI RAT

UDC: 623.61:621.396.62

Rezime:

Kompresivni ili mikrosken prijemnik u kratkom vremenskom intervalu skenira široki frekvencijski opseg, detektuje frekvencijske komponente signala u njemu i omogućava njihovo dalje procesiranje. Zbog te osobine ovaj tip prijemnika nalazi široku primenu u sistemima za elektronski rat. U ovom članku prikazan je princip rada kompresivnog prijemnika, njegove osnovne karakteristike, ograničenja i primene u različitim vojnim elektronskim sistemima.

Ključne reči: kompresivni prijemnik, elektronski rat, čirp transformacija, Furijeova transformacija, čirp signal, čirp filter, Doplerov procesor.

COMPRESSIVE RECEIVER IN ELECTRONIC WARFARE SYSTEMS

Summary:

Microscan or compressive receiver scans a wide frequency range in a short time interval, detecting the signal components frequency with high resolution and enables its subsequent processing. This property of the receiver makes it extensively applied in electronic warfare systems. In this paper we presented a compressive receiver operation principle, main characteristics, limits and usage in different military electronic systems.

Key words: compressive receiver, electronic warfare, chirp transform, Fourier transform, chirp signal, chirp filter, Doppler processor.

Uvod

Brzo pretraživanje radio-frekvencijskog spektra, detekcija, identifikacija i eksploatacija signala koji se u njemu nalaze imaju izuzetno široku primenu u savremenim sistemima za elektronski rat.¹ Jedan od postupaka za analizu spektra je primena kompresivnih prijemnika. *Kompresivni* (compressive) ili *mikrosken* (microscan) prijemnik u kratkom vremenskom intervalu skenira široki fre-

kvencijski opseg, detektuje frekvencijske komponente signala u njemu i omogućava njihovo dalje procesiranje. Signal na izlazu kompresivnog prijemnika sačinjen je od niza vremenski razdvojenih impulsa. Merenjem vremenske pozicije impulsa određuje se trenutna frekvencija komponenti ulaznog signala, odnosno kompresivni prijemnik obavlja Furijeovu transformaciju ulaznog signala u realnom vremenu.

Pored toga, kompresivni prijemnik je našao širu primenu i u sklopovima za obradu radarskih signala, analizatorima

¹ Engleski: Electronic Warfare – EW.

spektra, presretanju signala sa frekvencijskim skakanjem, sklopovima za određivanje pravca izvora zračenja, i sl.

Kompresivni prijemnik

Kompresivni prijemnik ili, kako se još u literaturi naziva, mikrosken (microscan) prijemnik, jeste sklop za analognu Furijeovu transformaciju ulaznog signala. Prvi put je razmatran u [1]. Naziv *mikrosken* odnosi se na funkciju prijemnika koji omogućava monitorisanje širokog frekvencijskog opsega (reda nekoliko GHz) u delu mikrosekunde. Pošto je u osnovi principa rada ovog tipa prijemnika kompresija impulsa, kao i da bi se napravila terminološka razlika između kompresionog filtera u radaru i mikrosken prijemnika često se koristi naziv *kompresivni* prijemnik.

Kompresivni prijemnik je, u suštini, širokopojasni prijemnik koji, merenjem vremenske pozicije impulsa na izlazu, određuje trenutne frekvencije komponenti ulaznog signala.

U velikom broju radova [2,3] pokazano je da se Furijeova transformacija može prikazati u formi konvolucije. Množenjem ulaznog signala sa čirp signalom, zatim konvolucijom sa čirpom dobija se Frenelova transformacija. Množenjem ove transformacije sa čirpom dobija se Furijeova transformacija signala. Furijeova transformacija dobijena na taj način zove se i čirp transformacija.²

Kompleksna ovojnica linearnog čirpa data je izrazom:

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} e^{j\pi k t^2} \text{ za } |t| < \frac{T}{2}, \quad (1)$$

² Pošto se kompresija impulsa vrši primenom signala čirpa i čirp prilagođenog filtera, ovakav sistem je u [1] nazvan analizator spektra sa čirp transformacijom.

gde je k strmina promene trenutne frekvencije.

Impulsni odziv filtera jednak je čirp signalu sa strminom k suprotnog predznaka. Tada konvolucija

$$S(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{j\pi k (t-\tau)^2} dt, \quad (2)$$

predstavlja Frenelovu transformaciju ulaznog signala $r(t)$ pomnoženog sa čirp signalom

$$s(t) = r(t) \cdot e^{j\pi k t^2}. \quad (3)$$

Filter koji obavlja konvoluciju ulaznog signala pomnoženog sa čirpom često se naziva *konvolver* ili *čirp filter*, a zbog efekta koji dovodi do kompresije ulaznog signala u uski ulazni impuls koristi se i izraz *kompresioni filter*. Ako se izlaz filtera još jednom pomnoži sa čirp signalom

$$R(\tau) = S(\tau) \cdot e^{j\pi k \tau^2}, \quad (4)$$

dobija se Furijeova transformacija ulaznog signala $r(t)$,

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) \cdot e^{-j(2\pi k \tau)t} dt. \quad (5)$$

Prethodne relacije pokazuju da se spektralna analiza ulaznog signala može ostvariti pomoću čirp transformacije. To znači da se čirp transformacija³ može smatrati algoritmom za realizaciju Furijeove transformacije u realnom vremenu.

Tipovi kompresivnih prijemnika

U odnosu na redosled operacija postoje dva osnovna tipa (konfiguracije) kompresivnog prijemnika. Prva se ozna-

³ Važno je napomenuti da algoritam kojim se Furijeova transformacija realizuje, „čirp transformacija“, vrši obradu kontinualnih signala. U nekim radovima razmatra se „čirp – z“ transformacija koja podrazumeva obradu odabiraka signala. Čirp transformacija ne uključuje odabiranje pa je treba razlikovati od „čirp – z“ transformacije.

čava sa M-C-M (Multiply-Convolve-Multiply), i prikazana je na slici 1.

Zamenom operacija konvolucije i množenja mogu se izvesti slične relacije za konfiguraciju kompresivnog prijemnika C-M-C (Convolve-Multiply-Convolve). Na slici 2 prikazana je C-M-C konfiguracija kompresivnog prijemnika.

Sl. 1 – Struktura kompresivnog prijemnika M-C-M tipa

Sl. 2 – Struktura kompresivnog prijemnika C-M-C tipa

Sl. 3 – Varijante M-C-M tipa kompresivnog prijemnika

Frenelova transformacija (2) omogućava da se detektuju frekvencijske komponente signala i da se izmeri njihova frekvencija, što je za najveći broj primena dovoljno. Drugim rečima, kompresivni prijemnik moguće je realizovati sa jednim množačem, konvolverom (M-C) i detektorom ovojnice.

Detekcijom ovojnice gubi se informacija o trenutnoj fazi signala. To znači da je drugo množenje potrebno izvršiti kako bi se zadržala informacija o trenutnoj fazi signala (slika 3). U nekim primenama kompresivnog prijemnika, gde je ova informacija važna, konfiguracija M-C-M i C-M-C koristi se u celini.

Glavni značaj algoritma za čirp transformaciju je u tome što se operacija konvolucije može efikasno izvršiti pomoću SAW (Surface Acoustic Wave) analognog transversalnog (čirp) filtera. Prvobitno projektovane za upotrebu u radarskim sistemima sa kompresijom impulsa, ove komponente su danas komercijalno dostupne, što dozvoljava njihovu široku upotrebu u realizaciji Furijeovih signal procesora. Jedna od mogućih realizacija SAW čirp transformacije, kada su realni i imaginarni deo kompleksnog ulaznog signala odvojeni kanali u osnovnom opsegu, prikazana je na slici 4.

U izrazima od (2) do (5) nije uzeto u obzir da je čirp signal koji se dovodi na prvi množač konačnog trajanja. Impulsni odziv konvolvera konačnog je trajanja koje se, u opštem slučaju, razlikuje od trajanja čirp signala. To je zanemareno kako bi se pokazala suština kompresivnog prijemnika i obrade signala (Furijeova transformacija) koju on obavlja.

Da bi se sagledala sva ograničenja koja ovakav tip procesora realno ima, moraju se razmatrati uticaji vremenskih „prozora“ na odziv kompresionog filtera.

Neka je čirp signal prvog množača trajanja T_M , a impulsni odziv konvolvera trajanja T_C . Ako je strmina čirpa k , tada je opseg promene trenutne frekvencije čirpa:

$$B_M = kT_M, \quad (6)$$

a propusni opseg konvolvera:

$$B_C = kT_C. \quad (7)$$

Opšti oblik konvolucije prozorskih funkcija čirpa i čirp filtera zavisi od relativnog trajanja T_M i T_C , pa se mogu razlikovati sledeće strukture kompresivnog prijemnika:

- ako je $T_C > T_M$, M-C-M struktura se obeležava sa M(s)-C(l)-M (u inostranoj literaturi koristi se naziv „long collover“),

- za $T_M > T_C$, M-C-M struktura obeležava se sa M(l)-C(s)-M („long multiplier“),

- granični slučaj jeste kada je $T_M = T_C$.

Grafička interpretacija konvolucije ovojnice čirp signala i impulsnog odziva

čirp filtera, za sva tri slučaja, prikazana je na slici 5.

Budući da vremenska pozicija impulsa na izlazu kompresivnog prijemnika zavisi od frekvencije na ulazu, može se zaključiti da je ovojnica frekvencijskog odziva kompresivnog prijemnika istog oblika kao i ovojnica vremenskog odziva konvolvera (slika 5 b i c).

Oblik pojedinačnog impulsa na izlazu konvolvera takođe zavisi od ovojnice čirpa i čirp filtera. Ako se pretpostavi da se čirp signal, dat izrazom (1), može dobiti kada se pomnoži čirp signal definisan na beskonačnom vremenskom intervalu sa prozorskom funkcijom

$\text{rect} \left\{ \frac{t - T_M/2}{T_M} \right\}$ konačnog trajanja $|t| < T_M \leq T_C$, a impulsni odziv čirp filtera, dat izrazom

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{T_C}} e^{-j\pi k t^2}, \quad (8)$$

pomnoži sa prozorskom funkcijom

$\text{rect} \left\{ \frac{t - T_C/2}{T_C} \right\}$ trajanja $|t| < T_C$, tada je

odziv čirp filtera:

Sl. 5 – Grafička interpretacija konvolucije ovojnice čirp signala i impulsnog odziva čirp filtera:
a) ovojnice čirp signala i impulsnog odziva čirp filtera
b) ovojnice vremenskog odziva kompresivnog prijemnika
c) ovojnice frekvencijskog odziva kompresivnog prijemnika

$$S(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) \cdot \text{rect} \left\{ \frac{t - T_M/2}{T_M} \right\} \cdot e^{j\pi k t^2} \cdot \text{rect} \left\{ \frac{\tau - t + T_C/2}{T_C} \right\} \cdot e^{-j\pi k (\tau - t)^2} dt. \quad (9)$$

Neka je ulazni signal

$$r(t) = e^{j2\pi f t}, \quad (10)$$

gde je f frekvencija prostoperiodičnog ulaznog signala. Ako se razmatra odziv čirp filtera kod M(s)-C(l)-M strukture prijemnika u intervalu $0 \leq \tau \leq T_C - T_M$ amplituda izlaznog signala biće:

$$S(\tau) = e^{-j\pi k \tau^2} \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect} \left\{ \frac{t - T_M}{T_M} \right\} \cdot e^{j2\pi (f + k\tau)t} dt. \quad (11)$$

To znači da pojedinačni impuls na izlazu kompresivnog prijemnika M(s)-C(l)-M strukture ima oblik Furijeove transformacije ovojnice čirpa prvog mno-

žača. Za pravougaonu prozorsku funkciju $\text{rect}(t)$, Furijeova transformacija ima oblik $\sin(x)/x$ sa nivoom maksimalnih bočnih snopova -13.46 dB. Dinamički opseg prijemnika ograničen je nivoom bočnih snopova, pa se pri rešavanju tog problema primenjuju različiti metodi za njihovo potiskivanje [4].

Kod M(s)-C(l)-M strukture prijemnika širina frekvencijskog opsega B_R ograničena je razlikom između propusnog opsega čirp filtera B_C i širinom opsega promene trenutne frekvencije čirpa B_M ,

$$B_R \leq B_C - B_M. \quad (12)$$

Van tog opsega dolazi do efekata izobličenja odziva kompresivnog prijemnika.

Iz izraza (11) može se videti da širina glavnog snopa odziva zavisi od širine prozorske funkcije, tj. trajanja čirp signala, što znači da je rezolucija kompresivnog prijemnika određena trajanjem čirp signala. Širina spektra izlaznog signala za

M(s)-C(l)-M strukturu jednaka je širini opsega promene trenutne frekvencije čirpa, tako da je rezolucija prijemnika

$$\Delta f = \frac{k}{B_M} = \frac{1}{T_M} . \quad (13)$$

Maksimalni broj impulsa koji se mogu detektovati u vremenu trajanja jednog čirpa je

$$N = \frac{B_R}{\Delta f} . \quad (14)$$

Kada se razmatra M(l)-C(s)-M struktura kompresivnog prijemnika mora se uzeti u obzir da je širina spektra signala na izlazu ograničena širinom propusnog opsega konvolvera B_C , a ne širinom B_M , pa je rezolucija

$$\Delta f = \frac{k}{B_C} = \frac{1}{T_C} . \quad (15)$$

Pojedinačni impuls na izlazu kompresivnog prijemnika M(l)-C(s)-M strukture ima oblik Furijeove transformacije ovojnice impulsnog odziva konvolvera.

Širina frekvencijskog opsega prijemnika B_R ograničena je razlikom

$$B_R \leq B_M - B_C . \quad (16)$$

U opštem slučaju može se reći da je frekvencijski opseg kompresivnog prijemnika

$$B_R \leq |B_C - B_M| . \quad (17)$$

Zamenom operacija množenja i konvolucije u M-C-M konfiguraciji dobijaju se osnovni izrazi koji opisuju kompresivni prijemnik C-M-C (slika 2) konfiguracije. Ulazni signal sada dolazi na konvolver, zatim se množi sa čirp signalom i potom propušta kroz drugi konvolver. Strmina k množača jednaka je strmini impulsnog odziva konvolvera (čirp filtera), samo ima suprotan predznak. Dualizam operacija konvolucije i množenja u vremenskom i frekvencijskom domenu omogućava da se prethodne relacije koriste u analizi funkcionisanja C-M-C konfiguracije. Na slici 6 naznačen je dualizam M-C-M i C-M-C konfiguracije kompresivnog prijemnika.

U hardverskom smislu C-M-C konfiguracija ima prednosti kada se sa datim konvolverima zahteva optimalan frekvencijski opseg kompresivnog prijemnika. Za zadate parametre kompresivnog prijemnika, C-M-C konfiguracija omogućava upotrebu komponenti sa manjim TB proizvodom, što se odražava na smanje-

nje unešenog slabljenja (insertion loss), bolji odnos signal–šum, odnosno veći dinamički opseg prijemnika.

Za razliku od M-C-M konfiguracije, gde su za određivanje spektra snage dovoljne dve komponente M-C, C-M-C konfiguracija zahteva sve tri komponente, bez obzira na funkciju procesora, što je, u suštini, njen glavni nedostatak.

Primena kompresivnog prijemnika u otkrivanju signala protivnika

Osnovna primena kompresivnog prijemnika jeste u sistemima za elektronsko izviđanje. Naime, prijemnik omogućava monitorisanje širokog frekvencijskog op-

Primena kompresivnog prijemnika u određivanju pravca izvora zračenja

Jedna od potencijalnih aplikacija čirp Furijeove transformacije jeste oblast antenskih nizova i određivanje pravca izvora zračenja. Naime, metod određivanja dolaznog ugla elektromagnetskog talasa (AOA – angle of arrival ili DOA – direction of arrival), koji se zasniva na analizi talasnog fronta, mnoguće je realizovati primenom sklopa prikazanog na slici 8 [2].

Linearni antenski niz pretvara prostorni elektromagnetski talas u RF signal koji se translira u osnovni opseg, a zatim ga sprema u analogne memorije. N para-

sega u delu mikrosekunde. Ova osobina veoma je poželjna u izviđačkim prijemnicima, jer omogućava veliku verovatnoću presretanja i detekcije komunikacionih i radarskih signala protivnika [3]. U ovoj primeni kompresivni prijemnik najčešće se realizuje u M(1)-C(s) konfiguraciji što je prikazano na slici 7 [6,7].

Ilelno spremljenih odbiraka serijski se čita iz memorije N puta većom brzinom i dovodi na čirp Furijeov transformator. Kompresivni prijemnik, kao implementacija čirp transformacije, pogodan je za primenu u ovom sklopu zbog potrebe da se Furijeova transformacija obavlja velikom brzinom.

Ako se pretpostavi da su antene A_n na slici 8 izotropne sa jednakim rastojanjem između susednih elemenata L , tada je signal koji se indikuje u i -toj anteni oblika:

$$u_i = U \sin [\sin (\theta) (2\pi i L \lambda^{-1})] = U \sin [\sin (\theta) s], \quad (18)$$

gde je U amplituda talasa koji dolazi pod uglom θ , a λ njegova talasna dužina. Furijeovom transformacijom izraza (18) po prostornim odbircima signala $s = 2\pi i L \lambda^{-1}$ izračunava se sinus ugla dolaznog elektromagnetskog talasa.

Primena kompresivnog prijemnika za određivanje brzine cilja

Obrada koherentnih radarskih signala, radi određivanja daljine i brzine cilja,

ograničena je složenošću i cenom realizacije banke Doplerovih filtera. Fizička banka filtera često se izbegava i formira u vidu Furijeovog procesora (FFT, čirp transformacija). U ovom poglavlju biće prikazana primena čirp transformacije u radarima sa Doplerovim procesorom. Jedan od metoda [5] za izdvajanje brzine ciljeva prikazan je na slici 9.

Koherentni video signal upisuje se u serijsku memoriju, a zatim se paralelno prebacuje u memoriju za rezoluciju po daljini. Paralelnu memoriju čini P lokacija u koje se smešta P radarskih impulsa, dok se memorija za serijski upis sastoji od R lokacija za čuvanje R rezolucionih ćelija po daljini (slika 11). Kada je PR rezolucionih ćelija zapisano u memoriju, signal se serijski iščitava iz memorije za rezoluciju po daljini i određuje se čirp Furijeova transformacija. Na taj način se za svaku ćeliju po daljini izdvajaju fre-

Sl. 9 – Primena kompresivnog prijemnika u Doplerovom procesoru signala

Sl. 10 – Uticaj Doplerovog pomaka na signal impulsnog radara

kvencije koje odgovaraju brzinama ciljeva u njoj.

Sušтина prethodno opisanog procesora signala jeste u načinu na koji Doplerov pomak utiče na signal impulsnog radara. Ako se predajni signal koherentnog impulsnog radara shvati kao niz isečaka trajanja T_i periodičnog kontinualnog signala, a isecci signala uzimaju u intervalima T_{PRI} , tada će Doplerov pomak amplitudski modulisati niz prijemnih impulsa (slika 10b). Kada je u rezolucio-
noj ćeliji po daljini prisutan samo jedan cilj, tada uzastopni impulsi reflektovani od njega čine odbirke periodičnog signala frekvencije f_D , gde je $f_D = 2v/c$ Doplerov pomak nastao zbog kretanja cilja radijalnom brzinom v .

Na slici 10 prikazan je način na koji Doplerov pomak utiče na prijemni signal impulsnog radara u svakoj rezolucio-
noj ćeliji. Prijemni impulsi se „razvrstavaju“ u memoriju po rezolucionim ćelijama kao što je prikazano na slici 11.

Sl. 11 – Način zapisa signala u memoriju kod Doplerovog procesora

U ovoj primeni kompresivni prijemnik koristi se kao analizator spektra. Ako se u istoj rezolucio-
noj ćeliji po daljini nalaze dva cilja različitih brzina, primenom Doplerovog procesora moguće ih je razdvojiti.

Zaključak

Princip analize spektra primenom čirp transformacije, ostvaren pomoću kompresivnog prijemnika, u vojnim elektronskim sistemima nalazi raznovrsne primene. Zbog velike verovatnoće presretanja, koja se njegovom primenom postiže, najčešće se koristi u prijemnicima za elektronski rat. Određivanje pravca izvora zračenja metodom analize talasnog fronta takođe je jedna od aplikacija kompresivnog prijemnika. Primenom čirp transformacije poboljšava se i detekcija pokretnih ciljeva impulsnim radarom.

Literatura:

- [1] Klauder, J. R.: The Theory and Design of Chirp Radars, The Bell System Technical Journal, 39, 1960, pp. 745–808.
- [2] Jack, M. A., Grant, P. M., Collins, J. H.: The Theory, Design, and Applications of Surface Acoustic Fourier-Transform Processors, Proc. of the IEEE, Vol. 68, No. 4, April 1980, pp. 450–468.
- [3] Schleher, D. C.: Introduction to Electronic Warfare, Artech House, 1986.
- [4] Simić, I. S.: Kompresivni prijemnici sa optimizovanom vremensko-frekvencijskom karakteristikom, doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, jul 1998.
- [5] Roberts, J. B. G., Eames, R., McCaughan, D. V., Simons, R. F.: A Processor for Pulse-Doppler Radar, IEEE Journal of solid-state circuits, Vol. SC-11, No. 1, February 1976, pp. 100–104.
- [6] Breuer, K. D., Levy J. S., Paczkowski, H. C.: The Compressive Receiver: A Versatile Tool for EW Systems, Microwave Journal, October 1989, pp. 81–98.
- [7] Schmid, H. F.: Microscan receivers boost intercept probability, Defense Electronics, October 1986, pp. 205–214.