

Projektovanje doplerovski optimizovanih radarskih kompresionih filtara primenom modifikovanog RLS algoritma

Mr Bojan Zrnić, dipl.inž.¹⁾
Dr Aleksa Zejak, dipl.inž.²⁾

U radu je data primena modifikovanog rekurzivnog algoritma najmanjih kvadrata pri projektovanju radarskih kompresionih filtara koji su optimizovani po Doplerovom pomaku frekvencije.

Ključne reči: Doplerov pomak, bočni snopovi, radarski kompresioni filtar, modifikovani RLS algoritam.

Uvod

RADARI sa proširenim spektrom, u kojima se kodovane signala obavlja primenom digitalnih binarnih ili polifaznih sekvenci, predstavljaju tipičan primer modernih radarskih sistema s aspekta obrade signala.

U komunikacijama sa proširenim spektrom, prilagođeni filtar se definiše kao linearni filtar koji maksimizuje odnos signal/šum na svom izlazu, za dati oblik odaslanog signala. Primena prilagođenog filtra kao detekcionog filtra u prijemniku radarskog sistema je praćena pojavom bočnih snopova na izlazu filtra. Ova pojava se naziva i sopstveni klater, jer maskira slabije odraze od bliskih ciljeva i izaziva lažne alarme kao i pravi klater.

Jedan od pristupa kojim se smanjuje nivo bočnih snopova je i direktna kontrola bočnih snopova projektovanjem razdešenih radarskih filtara. Razdešeni filtri se obično projektuju da minimizuju maksimalne bočne snopove (minimizacija neodređenosti) prema minimaksnom kriterijumu ili da minimizuju srednjekvadratne bočne snopove (minimizacija snage sopstvenog klatera) prema kriterijumu najmanje kvadratne greške. U radarima i sonarima, i prilagođeni i razdešeni filtri se nazivaju kompresioni filtri.

Kod projektovanja radarskih kompresionih filtara postoji težnja da se, pored ostalih karakteristika, obezbedi i nezavisnost nivoa bočnih snopova od Doplerovog pomaka frekvencije, koji nastaje reflektovanjem poslatog signala od pokretnog cilja. Ovo je posebno značajno kod vojnih radara koji su, u najvećem broju slučajeva, namenjeni za otkrivanje i praćenje pokretnih ciljeva. Potreban je, znači, takav kompresioni filtar koji obezbeđuje minimalnu degradaciju radarskog sistema usled Doplerovog pomaka frekvencije.

Pokazana je mogućnost primene modifikovanog rekurzivnog algoritma najmanjih kvadrata (Recursive Least Square, RLS) pri projektovanju radarskih kompresionih filtara koji su optimizovani po Doplerovom pomaku frekvencije. Predloženi algoritam daje rezultate konkurentne najboljim do sada publikovanim rezultatima koji rešavaju ovaj problem, a koji se dobijaju primenom doplerovski optimizova-

nog iterativnog ponderisanog algoritma najmanjih kvadrata (Doppler optimized Iterative Reweighted Least Square, DIRLS), pri čemu je novi pristup numerički manje zahtevan.

Funkcija neodređenosti

Za ispitivanje ponašanja pojedinih sekvenci za kompresiju radarskog impulsa na izlazu kompresionog filtra, važnu ulogu ima dvodimenzionalna korelaciona funkcija ili funkcija neodređenosti (eng. ambiguity function). Na osnovu Vudvordove (Woodword) funkcije neodređenosti može se oceniti da li je neki talasni oblik dobar za kompresiju impulsa, da li se razdešenim filtrom postiže bolja rezolucija po daljini i po brzini i kakva je osetljivost bočnih snopova na Doplerov pomak frekvencije.

Autokorelaciona funkcija neodređenosti definisana je [1] na sledeći način:

$$\chi(T_R, f_D) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t - T_R) \exp(j2\pi f_D t) dt \right| \quad (1)$$

gde su: $s(t)$ - kompleksna ovojnica signala, T_R - vreme odjeka, f_D - Doplerov pomak frekvencije, a $(.)^*$ - kompleksna konjugacija. Ona opisuje odziv banke prilagođenih filtara na ulazni signal $s(t)$ na koji je banka prilagođena. Ako na ulaz banke filtara ne dolazi signal $s(t)$ već neki drugi signal $u(t)$, izlaz filtra se može opisati kroskorelacionom funkcijom neodređenosti definisanom sa:

$$\chi(T_R, f_D) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t) s^*(t - T_R) \exp(j2\pi f_D t) dt \right| \quad (2)$$

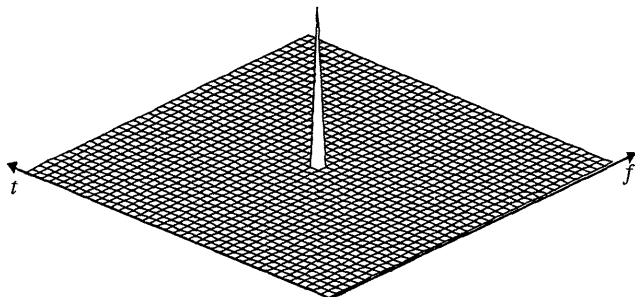
U [2] pokazano je važno svojstvo funkcije neodređenosti, a to je konstantnost zapremine, tj.:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\chi(T_R, f_D)|^2 dt df = 1 \quad (3)$$

¹⁾ Vojnotehnička akademija VJ, 11000 Beograd, Ratka Resanovića bb

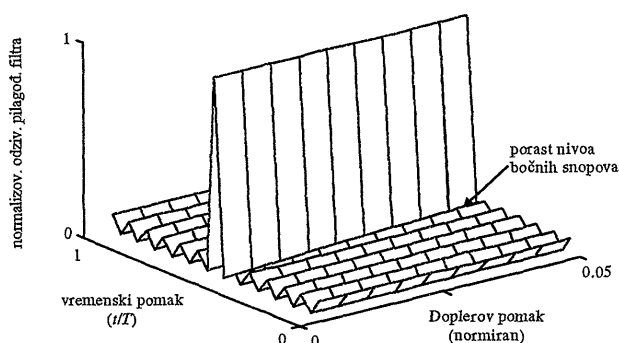
²⁾ Institut IMTEL, 11070 Novi Beograd, Bulevar Lenjina 165b

iz čega sledi da bočni snopovi ne mogu biti potpuno potisnuti na celom vremensko-frekvencijskom području. Idealni oblik funkcije neodređenosti bio bi impuls lociran na $t=f=0$, tzv. usamljeni šiljak kao što je dato na sl.1, [3].

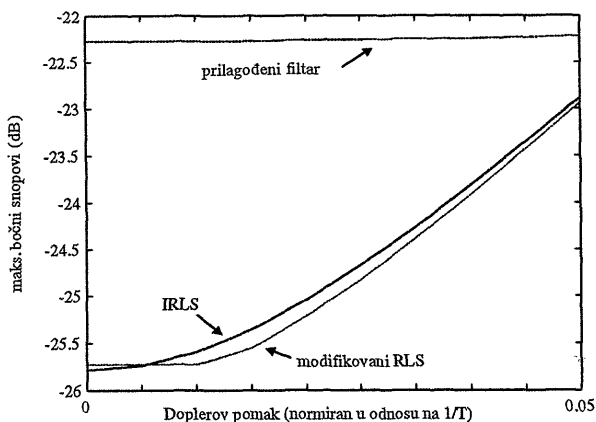


Slika 1. Idealni oblik funkcije neodređenosti

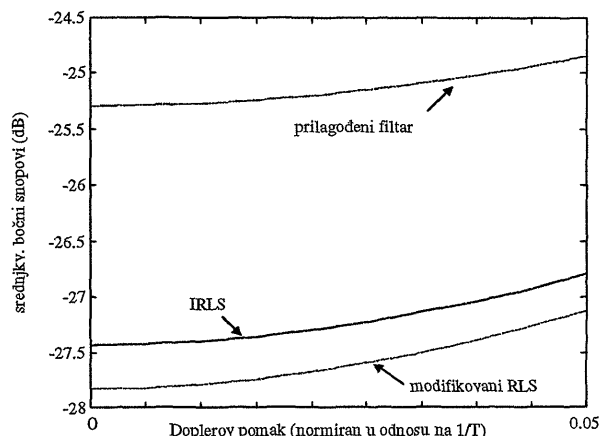
U [4] ispitivana je Doplerova osetljivost tipičnih radarskih sekvenci i pokazano je da većina sekvenci koje imaju niske bočne snopove autokorelacione funkcije za nulti Doplerov pomak postaju veoma osetljive već za male brzine cilja, tj. za male Doplerove pomake. Pokazano je takođe i da razdešeni filtri zadržavaju niske bočne snopove samo za male Doplerove pomake, a za veće Doplerove pomake bočni snopovi mogu postati i viši nego kod prilagođenog filtra. Uticaj Doplerovog pomaka na nivoe bočnih snopova, kao i odsečak funkcije neodređenosti fazno modulisanog radarskog signala, za slučaj Barkerove sekvence dužine 13, dat je na slikama 2,3 i 4.



Slika 2. Odsečak funkcije neodređenosti prilagođenog filtra za Barkerovu sekvencu dužine 13



Slika 3. Maksimalni bočni snopovi zavisno od Doplerovog pomaka kompresionih filtara projektovanih za nulti Doplerov pomak, Barkerova sekvencu dužine 13



Slika 4. Srednjekvadratni bočni snopovi zavisno od Doplerovog pomaka kompresionih filtara projektovanih za nulti Doplerov pomak, Barkerova sekvencu dužine 13

Većina do sada objavljenih radova bavi se analizom Doplerove osetljivosti kompresionih filtara [1,5,6] da bi se odabrao filter koji je najmanje osetljiv na Doplerov pomak frekvencije. S druge strane, [7,8] data je metodologija za projektovanje kompresionih filtara čija se dobra svojstva za nulti Doplerov pomak ne bi kvarila usled većih Doplerovih pomaka, tj. data je optimizaciona metoda potiskivanja bočnih snopova u definisanom Doplerovom opsegu. Algoritam po kojem se vrši optimizacija je nazvan doplerovski optimizovani iterativni ponderisani algoritam najmanjih kvadrata (DIRLS).

Osnovna formulacija DIRLS algoritma [8] data je sa:

$$\hat{x}_k = (\mathbf{S}_f^T \mathbf{R}_{k-1} \mathbf{S}_f)^{-1} \mathbf{S}_f^T \mathbf{R}_{k-1} \delta \quad (4)$$

gde su: \mathbf{S}_f^T - matrica signala koja sadrži informaciju o Doplerovom pomaku primljenog signala, \mathbf{R}_{k-1} - težinska matrica koja se podešava iterativno, δ - vektor željenog izlaza sa jediničnim centralnim snopom za svaki Doplerov presek, a \hat{x}_k - vektor procenjenih koeficijenata razdešenog filtra.

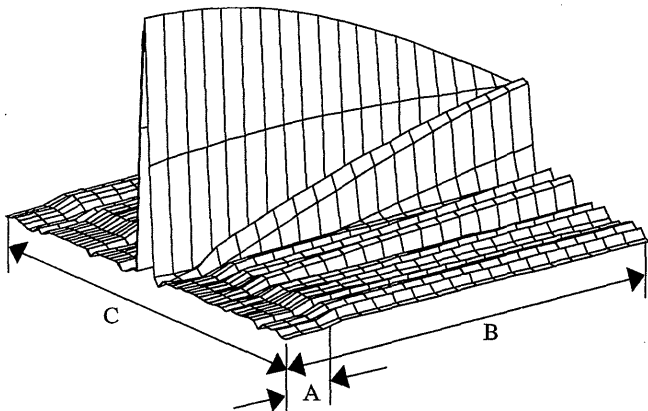
Ovaj pristup je pokazao dobre rezultate u smislu dobijanja razdešenih filtara koji su, u opsegu unutar koga je vršena optimizacija, skoro neosetljivi na Doplerov pomak. Osnovni problem ovog pristupa je velika numerička složenost algoritma u slučaju kada se vrši optimizacija nad velikim brojem Doplerovih preseka (preseka funkcije neodređenosti po osi frekvencije), jer tada matrica signala \mathbf{S}_f^T postaje vrlo velikih dimenzija, pa je izračunavanje "pseudoinverzije" numerički vrlo zahtevno.

Projektovanje doplerovski optimizovanog filtra za potiskivanje sopstvenog klatera primenom modifikovanog RLS algoritma

U [9] pokazano je da se za projektovanje razdešenih filtara za potiskivanje bočnih snopova može uspešno primeniti modifikovani RLS algoritam. Kako je reč o vektorski orijentisanom algoritmu, cilj je bio da se izvrši generalizacija ovog pristupa na problem projektovanja doplerovski optimizovanih razdešenih filtara, uz očekivanje da će se dobiti slični rezultati ali numerički manje zahtevan algoritam od matricno orijentisanog DIRLS algoritma.

Namera da se optimizuje razdešeni filter na određenom Doplerovom opsegu se može definisati kao postupak obli-

kovanja odsečka funkcije neodređenosti (sl.5, [3]), za razliku od standardnih razdešenih filtera, gde je predmet oblikovanja (auto)korelaciona funkcija.



Slika 5. Oblikovanje odsečka funkcije neodređenosti: A- optimizovani segment funkcije neodređenosti, B- ukupni segment funkcije neodređenosti i C osa daljine

Modifikovani RLS algoritam za projektovanje radarskih kompresionih filtera je opisan detaljno u [9], a na ovom mestu se daje samo konačna forma algoritma:

Neka je $j=1,2, \dots, L$, i
neka je $k=1,2, \dots, N+M-1$

$$e_k = d_k - \hat{x}_{k-1}^H u_k \quad (5)$$

$$G_k = \begin{cases} \lambda^{-1} P_{k-1} u_k / (1 + \lambda^{-1} u_k^H P_{k-1} u_k), & |e_k| \geq Th_{j-1} \\ G_{k-1} & \text{za ostale } e_k \end{cases} \quad (6)$$

$$\hat{x}_k = \begin{cases} \hat{x}_{k-1} + G_k e_k & |e_k| \geq Th_{j-1} \\ \hat{x}_{k-1} & \text{za ostale } e_k \end{cases} \quad (7)$$

$$P_k = \begin{cases} \lambda^{-1} (P_{k-1} - G_k u_k^H P_{k-1}) & |e_k| \geq Th_{j-1} \\ P_{k-1} & \text{za ostale } e_k \end{cases} \quad (8)$$

$$err_k = |e_k| \quad (9)$$

$$\max_err_j = \max (err_j) \quad (10)$$

$$Th_j = \delta \max_err_j \quad (11)$$

gde su: λ - faktor zaboravljanja, u_k vektor ulaza dužine N , x_k - vektor procenjenih koeficijenata filtera dužine M , d_k - vektor željenog izlaza dužine $N+M-1$, err - vektor greške dužine $N+M-1$, $\max(\cdot)$ označava maksimalni element odgovarajućeg vektora, L - ukupan broj iteracija, $(\cdot)_-$ označava aktuelnu iteraciju, $(\cdot)_k$ - označava k -ti trenutak unutar jedne iteracije.

Da bi se modifikovani RLS algoritam primenio za projektovanje doplerovski optimizovanih razdešenih filtera, nije potrebno vršiti izmenu u samoj strukturi algoritma datog jednačinama (5-11), već je potrebno samo drugačije definisati vektor ulaza u .

U slučaju projektovanja razdešenog filtera za multi Doplerov pomak, vektorom ulaza u predstavljen je prolazak jednog fazno kodovanog radarskog impulsa kroz liniju za kašnjenje FIR filtra, što odgovara jednoj iteraciji algoritma. Vrednosti vektora u su vrednosti kompleksne obvojnice

primljenog signala i kada nema Doplerovog pomaka odgovaraju sekvenci kojom je modulisan signal. Ukupan broj iteracija (L) odgovara broju fazno kodovanih impulsa koji su upotrebljeni za dobijanje koeficijenata razdešenog filtera.

U slučaju projektovanja razdešenog filtera, optimizovanog po Doplerovom pomaku frekvencije, vektorom ulaza u predstavlja se prolazak grupe od n fazno kodiranih impulsa kroz liniju za kašnjenje FIR filtra, pri čemu prvi impuls u paketu ima nulti Doplerov pomak, tj. $F_D=0$, drugi impuls ima Doplerov pomak $F_D=B_D/n$, a poslednji impuls ima Doplerov pomak $F_D=B_D$, pri čemu B_D označava izabrani Doplerov opseg unutar koga se vrši optimizacija, a n broj preseka unutar izabranog Doplerovog opsega B_D . Ukupan broj iteracija odgovara ukupnom broju paketa od po n impulsa, koji se koriste u procesu dobijanja koeficijenata doplerovski optimizovanog razdešenog filtera željenih karakteristika. Potrebno je i redefinisati izgled vektora željenog izlaza, da bi se obezbedilo da za svaki impuls iz paketa željeni izlaz bude jedinični centralni snop i nulti bočni snopovi.

Da bi se uporedili rezultati, izabrana je ista širina Doplerovog opsega B_D kao i u radu [7]. Odabrani Doplerov opseg je:

$$B_D = 0.05 * f_D \quad (12)$$

gde je f_D rastojanje između susednih harmonika spektra komprimovanog signala i naziva se granica između uskog i širokog Doplerovog opsega, a jednaka je:

$$f_D = \frac{1}{NT_i} = \frac{1}{T} \quad (13)$$

gde su: N -broj subimpulsa, T_i - širina subimpulsa, odnosno $T=NT_i$ - širina radarskog impulsa.

Za slučaj hipotetičkog radara, koji bi imao frekvenciju nosioca 5 GHz i širinu impulsa $T=NT_i=10 \mu s$, Doplerov opseg B_D (koji je odabran) odgovarao bi maksimalnoj radijalnoj brzini cilja od oko 150 m/s.

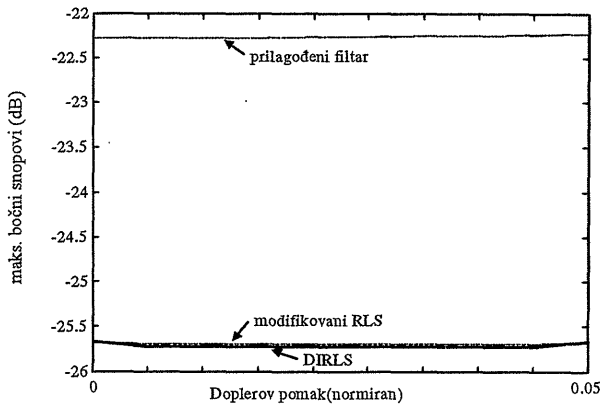
Rezultati projektovanja doplerovski optimizovanih razdešenih filtera

Dati su rezultati primene modifikovanog RLS algoritma na projektovanje doplerovski optimizovanog razdešenog filtera za potiskivanje sopstvenog klatera fazno modulisanog radarskog signala za neke tipične realne i kompleksne kodne sekvence.

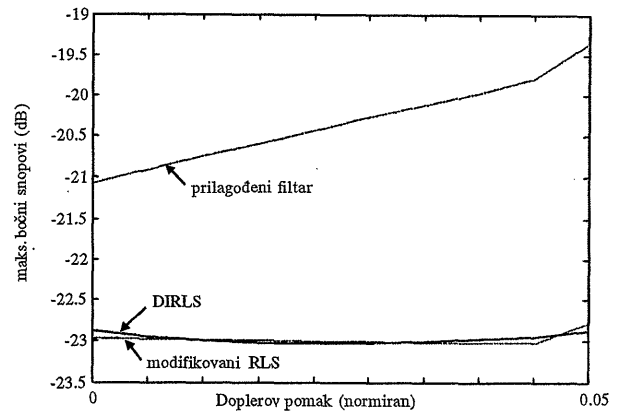
Barkerova sekvenca dužine 13

Projektovan je transversalni filter za potiskivanje sopstvenog klatera fazno modulisanog radarskog signala Barkerovom sekvencom dužine 13, koji je optimizovan za izabrani Doplerov pomak B_D , prema (12). Dužina filtera M jednaka je dužini sekvence N . Inicijalne vrednosti su bile: $TH_0=0$, $\delta=0.995$, $\lambda=1$, $\hat{x}(0)=\mathbf{0}$ i $P_0=100*\mathbf{I}$, gde je \mathbf{I} jedinična dijagonalna matrica dimenzija (M,M) . Optimizacija je izvršena na 10 Doplerovih preseka.

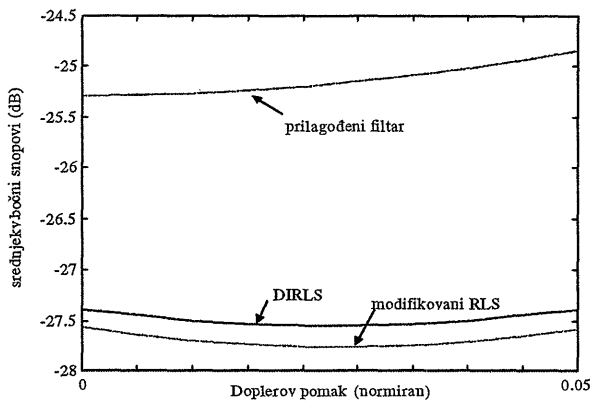
Na slikama 6 i 7 prikazani su nivoi bočnih snopova, zavise od Doplerovog pomaka, prilagođenog filtera i razdešenih filtera dobijenih modifikovanim RLS algoritmom i DIRLS algoritmom, a na sl.8 gubitak odnosa signal/šum zavise od Doplerovog pomaka.



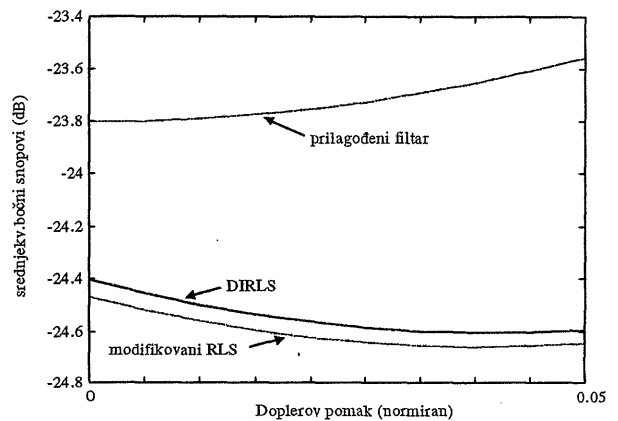
Slika 6. Maksimalni bočni snopovi zavisno od Doplerovog pomaka, Barker 13



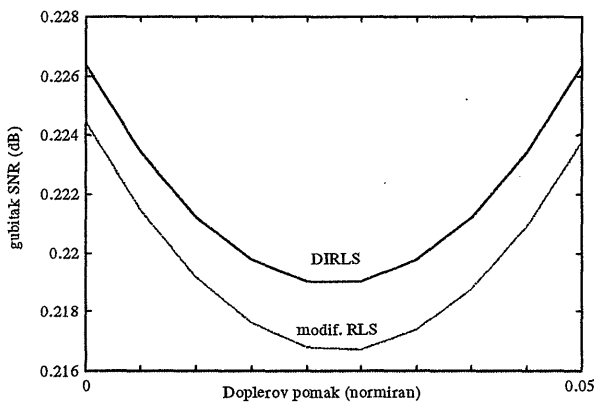
Slika 9. Maksimalni bočni snopovi zavisno od Doplerovog pomaka, P1 sekvenca



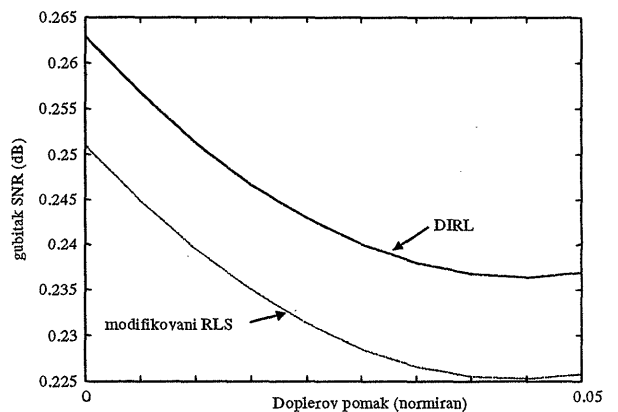
Slika 7. Srednjekvadratni bočni snopovi zavisno od Doplerovog pomaka, Barker 13



Slika 10. Srednjekvadratni bočni snopovi zavisno od Doplerovog pomaka, P1 sekvenca



Slika 8. Gubitak odnosa signal/šum zavisno od Doplerovog pomaka, Barker 13



Slika 11. Gubitak odnosa signal/šum zavisno od Doplerovog pomaka, P1 sekvenca

P1 sekvenca

Projektovan je transversalni filter za potiskivanje sops-
tvenog klatera fazno modulisanog radarskog signala P1 se-
kvencom dužine 16, za slučaj kada postoji Doplerov pomak
frekvencije primljenog signala. Dužina filtra, početni uslovi
kao i širina Doplerovog opsega i broj preseka su isti kao u
prethodnom slučaju.

Na slikama 9 i 10 prikazani su nivoi bočnih snopova, za-
visno od Doplerovog pomaka, prilagođenog filtra i razde-
šenih filtara dobijenih modifikovanim RLS algoritmom i
DIRLS algoritmom, a na sl.11 gubitak odnosa signal/šum
zavisno od Doplerovog pomaka.

Zaključak

Dobijeni rezultati ukazuju na konkurentnost predložene
metode u odnosu na DIRLS, jer se za relativno isti nivo
maksimalnih bočnih snopova dobija nešto niži nivo sred-
njekvadratne vrednosti bočnih snopova i nešto manji gu-
bitak odnosa signal/šum. Uočava se da je u oba slučaja nivo
maksimalnih bočnih snopova praktično neosetljiv na Do-
plerov pomak na izabranom intervalu optimizacije. Potreb-
no je naglasiti da manji numerički i memorijski zahtevi no-

pristupa, u odnosu na DIRLS, posebno dolaze do izražaja pri projektovanju ove klase razdešenih filtera.

Literatura

- [1] RIHACZEK, A. *Principles of High-Resolution Radar*. McGraw-Hill, New York, 1969.
- [2] PRICE, R., HOFSTETTER, E.M. Bounds on the Volume and Height Distributions of the ambiguity Function. *IEEE Trans. on Information Theory*, April 1965, vol.11, no.4, p.207-214.
- [3] SIMIĆ, I. *Kompresioni filteri za radare i sonare sa frekvencijskim skakanjem*. magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1996.
- [4] ZEJAK, A.J., ZENTNER, E. *Komparativna analiza Doplerove osjetljivosti faznih sekvenci za kompresiju radarskog impulsa*. 33. konferencija ETAN, IV sveska, Novi Sad, 1989, p.389-396.
- [5] WEATHERS, G., HOLLIDAY, E.M., BUIE, H.B. Offset as means of m-sequence periodic -correlation sidelobe cancellatio. *Proceedings of the IEEE*, July 1982, vol.70, no.7, p.772-774.
- [6] CHING TAI LIN. *The ambiguity function of random binary phase coded waveform*. Record of the IEEE 1985 International radar conference, Arlington, USA, May 1985.
- [7] ZEJAK, J.A. *Razdešeni filteri u radarima sa fazno kodovanim signalom optimizovani po Doplerovom pomaku frekvencija*. doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1994.
- [8] ZEJAK, J.A., ZENTNER, E., RAPAJIĆ, P.B. Doppler optimized mismatched filters. *Electronics letters*, 1991, vol.21, no.7, p.558-560.
- [9] ZRNIĆ, M.B. *Potiskivanje sopstvenog klatera u radarima sa kompresijom impulsa primenom metode najmanjih kvadrata*. magistarski rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1998.

Rad primljen: 15.7.1998.god.