

Poboljšanje detekcije ciljeva u zamračenoj zoni kod chirp radara

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

Rad predstavlja novi pristup u teorijskoj analizi efekta zamračenja kod chirp radara zasnovan na karakteristikama funkcije neodređenosti chirp signala. Predložena je primena MM RLS algoritma kojim se projektuje chirp kompresioni filter s nižim nivoom bočnih snopova i boljom rezolucijom po daljini u odnosu na pristup zasnovan na primeni prozorskih funkcija. Na ovaj se način povećava mogućnost ispravne detekcije i efikasnije praćenje ciljeva koji se nalaze u zoni zamračenja.

Ključne reči: chirp signal, radarski kompresioni filter, efekat zamračenja, bočni snopovi, MM RLS algoritam.

Uvod

POZNATO je da domet radara pri optimalnoj obradi primljenog signala i datoj spektralnoj gustini snage šuma zavisi isključivo od ukupne energije signala, pri čemu je ukupna energija jednaka proizvodu trajanja radarskog impulsa T i srednje snage predajnika P_{sr} . Jednoznačnost u merenju daljine kod impulsnih radara direktno je određena periodom ponavljanja impulsa T_i prema formuli:

$$D_j = \frac{c \cdot T_i}{2} = \frac{c}{2 \cdot f_{PRF}} \quad (1)$$

gde D_j označava jednoznačni domet radara, $f_{PRF}=1/T_i$ je frekvencija ponavljanja impulsa (PRF, Pulse Repetition Frequency), a c je brzina svetlosti. Očigledno je da se povećanjem perioda ponavljanja impulsa (tj. smanjenjem f_{PRF}) povećava i jednoznačni domet radara.

Odnos između trajanja radarskog impulsa T i perioda ponavljanja impulsa T_i naziva se *faktor popune* (duty factor), tj.:

$$d_u = \frac{T}{T_i} = T \cdot f_{PRF} \quad (2)$$

Veza između srednje snage poslate od strane radara P_{sr} i vršne snage radarskog predajnika P_p data je kao:

$$P_{sr} = P_p \cdot d_u \quad (3)$$

Zbog toga se pri projektovanju radara velikog dometa često bira talasni oblik radarskog signala s velikim faktorom popune (preko 25 %, $d_u=0.25$), tj. koristi se radarski impuls velike dužine da bi se, pri ograničenoj vršnoj snazi, emitovale potrebna energija za projektovani domet. Da bi se sačuvala karakteristike radara u pogledu rezolucije po daljini, koristi se unutarimpulsna fazna ili frekvencijska modulacija, kojom se spektar predajnog signala širi i omogućava kompresija impulsa na prijemu.

Neželjena posledica proširenja predajnog impulsa jeste širenje tzv. *slepe zone* D_z (blind zone). Naime, na daljinama cilja manjim od D_z , gde je:

$$D_z = \frac{c \cdot T}{2} \quad (4)$$

delimično se zamračuje njegov odjek, jer je predajnik uključena a prijemnik isključen (odjeci od cilja nastali od impulsa koji se trenutno predaje pojavljuju se na ulazu u prijemnik koji je blokiran jer predaja još nije završena). Ovo područje se označava kao *prva zona zamračenja* (eclipsing zone). Može se pokazati da postoji i *druga zona zamračenja*, koja se nalazi iza nominalnog instrumentalnog dometa, a koja je povezana s trenutkom emitovanja sledećeg predajnog impulsa, tj. zamračuju se ciljevi čiji se odjek od prethodno poslanog impulsa vraća u trenutku emitovanja novog impulsa.

U osnovi postoje dva različita aspekta razmatranja efekta zamračenja.

Prvi aspekt se odnosi na problem zamračenja odjeka od cilja kod radara s velikim trajanjem predajnog impulsa (da bi se u uslovima ograničene vršne snage postigla potrebna energija za željeni domet). Ovde se postavljaju važna pitanja; da li je moguće smanjiti efektivnu širinu slepe zone (zone zamračenja) i da li je moguće povećati nominalni instrumentalni domet. Na osnovu pregledane relevantne literature, ovaj je aspekt problema vezan za detekciju cilja u zamračenoj zoni obrađen samo u jednom radu [1], objavljenom 1985. godine. Težište rada je upravo na analizi ovog aspekta problema zamračenja kao i na predlogu mogućih rešenja kojima se poboljšava detekcija i praćenje ciljeva u zamračenoj zoni za radare s velikim trajanjem predajnog impulsa.

Na primeru realnog chirp radara velikog dometa, u radu [1] ukazano je na efekte koji nastaju u odzivu kompresionog filtra kada se cilj nalazi unutar neke od zona zamračenja, ali nisu preciznije objašnjeni uzroci koji izazivaju te

¹⁾ Vojna akademija, 11000 Beograd, Ratka Resanovića 1

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

efekte. U ovom radu su analizirani i objašnjeni ti efekti korištenjem osobina radarske funkcije neodređenosti chirp signala [2].

U [1] potiskivanje bočnih snopova odziva kompresionog filtra obavlja se amplitudskim ponderisanjem impulsnog odziva filtra pomoću Hemingove prozorske funkcije. Osnovni nedostatak ovog metoda jeste širenje glavnog snopa odziva filtra, što znači pogoršanje rezolucije. U radovima [3,7] dat je novi postupak za potiskivanje bočnih snopova chirp signala koji se zasniva na MM RLS algoritmu. Primenom MM RLS algoritma za projektovanje chirp kompresionog filtra dobija se bolje potiskivanje bočnih snopova i manja degradacija rezolucije po daljini, čime se poboljšava detekciona sposobnost radara.

Drugi aspekt se odnosi na problem zamračenja u radarima sa srednjom i velikom frekvencijom ponavljanja impulsa. Ovaj problem se najčešće javlja kod avionskih radara (airborne radar) kod kojih je jednoznačan domet mali i kod kojih postoji problem zamračenja odjeka na mnogo mesta po osi daljine zbog velike frekvencije ponavljanja predajnih impulsa (za koje vreme je blokiran prijem reflektovanih impulsa). Ovaj aspekt problema zamračenja je, za razliku od prethodnog, široko razmatran u literaturi, pre svega onaj koja se bavi avionskim radarima [4,5] i neće biti predmet ovog rada.

U ovom radu se predlažu rešenja za poboljšanje mogućnosti ekstrakcije informacije o cilju kada inherentno postoji zamračenje njegovog odjeka, a ne razmatraju se detaljnije mogućnosti svodenja zamračenja na što manju meru (kao što to različitim strategijama izbora PRF-a čine dizajneri talasnih oblika za avionske radare).

Efekat zamračenja

U impulsnim radarima, odjek od cilja može biti delimično ili potpuno zamračen zavisno od relativnog vremena njegovog dolaska (u odnosu na predajni impuls). Zamračenje se definiše kao situacija kada je stigao odjek od cilja (signal replike), a prijemnik je isključen jer je uključen predajnik [6]. Na sl.1 prikazan je efekat zamračenja signala replike. Prednji i zadnji deo predajnog i prijemnog impulsa označeni su sa P i Z .

vara "slepoj zoni") a zamračen je zbog toga što se prednji deo impulsa br.1 (dužine trajanja T_e^A) posle refleksije od njega, našao na ulazu prijemnika koji je isključen, jer još traje emitovanje zadnje ivice impulsa br.1. Cilj C se nalazi u drugoj zoni zamračenja a zamračen je zato što se zadnji deo impulsa br.1 (dužine trajanja T_e^C) posle refleksije od njega našao na ulazu u prijemnik koji je ponovo isključen jer je počela emisija impulsa br.2.

Faktor zamračenja definisan je sledećim izrazom:

$$E = \frac{T_e}{T} \quad (5)$$

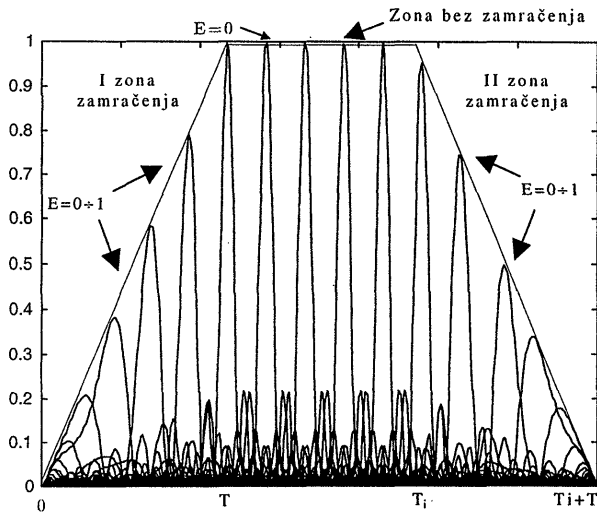
gde je T_e trajanje zamračenog dela odjeka. Odzivi filtera na odjeke iz prve i druge zone zamračenja, za istu vrednost faktora zamračenja E , simetrični su (slika u ogledalu). Promena faktora zamračenja unutar impulsnog perioda data je na sl.1e, dok je promena reflektovane snage data na sl.1d.

Uticao efekta zamračenja na odziv chirp kompresionog filtra

Kompresioni (prilagođeni i razdešeni) filter može da se predstavi u formi transverzalnog filtra čiji su težinski koeficijenti kompleksno-konjugovane vrednosti odbiraka predajnog signala, kada je reč o prilagođenom filteru, ili imaju neku drugu vrednost u skladu s kriterijumom optimalnosti u slučaju razdešenog filtra. Dužina filtra (broj težinskih koeficijenata) jednaka je dužini predajnog signala (broj odbiraka ulaznog signala prema usvojenom periodu odabiranja). Kada nema zamračenja reflektovani signal na ulazu u filter ima istu dužinu trajanja kao i predajni signal.

Kada postoji zamračenje odjeka od cilja koji se nalazi u prvoj zoni zamračenja, trajanja T_e^I , efektivno se skraćuje dužina reflektovanog signala na ulazu u kompresioni filter, tako da njegovo trajanje T_I iznosi $T_I = T - T_e^I$. Ekvivalentno, ako je odjek od cilja koji se nalazi u drugoj zoni zamračenja zamračen u trajanju T_e^{II} , njegova dužina na ulazu u kompresioni filter biće $T_{II} = T - T_e^{II}$.

Efekat zamračenja ima uticaj i na frekvencijski sadržaj reflektovanog signala. Skraćivanje trajanja reflektovanog impulsa usled zamračenja manifestuje se i suženjem frekvencijskog opsega signala replike. Naime, ako je početna frek-



Slika 2. Odstivi kompresivnog filtra za ulazne chirp signale sa različitim faktorom zamračenja

Uticaj efekta zamračenja na odziv kompresionog filtra po pojedinim zonama moguće je izraziti i u analitičkoj formi, ako se pođe od izraza za moduo radarske funkcije neodređenosti chirp signala:

$$|\chi(\tau, f_d)| = \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \frac{\left| \sin \left[\pi T (f_d + k\tau) \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \right] \right|}{\pi T (f_d + k\tau) \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right)} \quad \text{za } |\tau| \leq T \quad (8)$$

U prvoj zoni zamračenja odziv filtra je:

$$|\chi(\tau, 0)| = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \frac{\left| \sin \left[\pi T (k\tau) \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \right] \right|}{\pi T (k\tau) \left(1 - \frac{\tau}{T}\right)} \quad \text{za } 0 \leq \tau \leq T \quad (9)$$

u zoni bez zamračenja je:

$$|\chi(\tau, 0)| = \left| \frac{\sin [\pi T (k\tau)]}{\pi T (k\tau)} \right| \quad \text{za } T \leq \tau \leq T_i \quad (10)$$

dok je u drugoj zoni zamračenja:

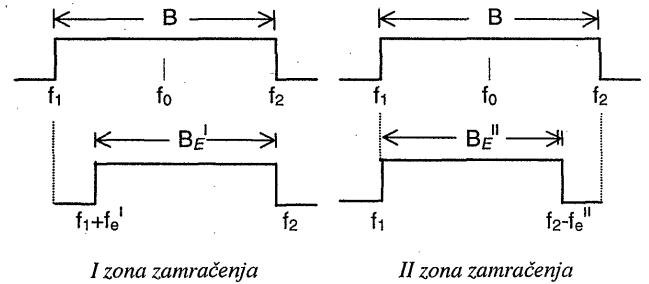
$$|\chi(\tau, 0)| = \left(1 - \frac{\tau - T_i}{T}\right) \frac{\left| \sin \left[\pi T (k\tau) \left(1 - \frac{\tau - T_i}{T}\right) \right] \right|}{\pi T (k\tau) \left(1 - \frac{\tau - T_i}{T}\right)} \quad (11)$$

za $T_i \leq \tau \leq T_i + T$

Prethodne relacije su izvedene pod pretpostavkom da signal replike nema Doplerov pomak frekvencije ($f_d=0$).

U [1] upravo se ukazuje na efekat smanjenja amplitude i povećanje širine glavnog snopa odziva filtra na replike iz zamračene zone, ali se u samom radu ne daje precizno obja-

opseg kompresionog filtra B (sl.3). Rezultujući spektar na izlazu kompresionog filtra se smanjuje sa B na B_E^I ili B_E^{II} što izaziva proširenje centralnog snopa odziva filtra.



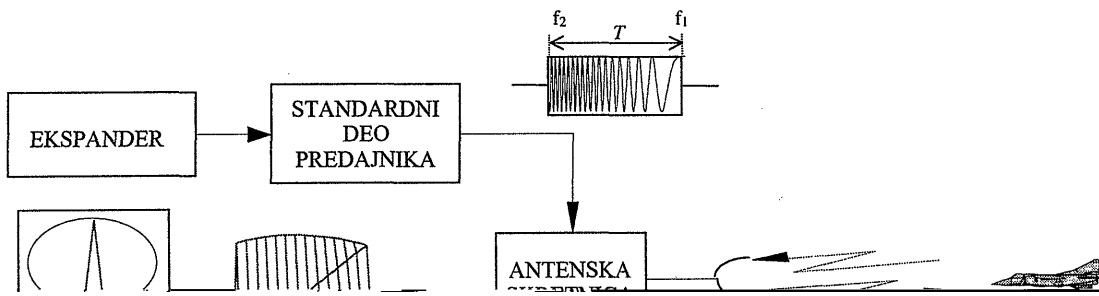
Slika 3. Spektri kompresionog filtra i signala replike iz zamračene zone

Na sl.4 prikazan je princip rada chirp kompresionog filtra. Treba uočiti da su izlazi kompresionog filtra, kada nema zamračenja cilja (replike od ciljeva tipa B), za različite frekvencijske pomake chirp signala na ulazu, ograničeni trougaonom funkcijom, koja predstavlja kroskorelaciju pravougaone ovojnice reflektovanog chirp signala i impulsnog odziva kompresionog filtra, pri čemu su dužina filtra i dužina reflektovanog signala jednake. Ukoliko postoji zamračenje (replike od ciljeva tipa A i C), u odzivu kompresionog filtra su uočljivi efekti gubitka amplitude glavnog snopa i porast bočnih snopova što prouzrokuje smanjenje verovatnoće ispravne detekcije, kao i povećanje širine glavnog snopa što prouzrokuje gubitak rezolucije po daljini.

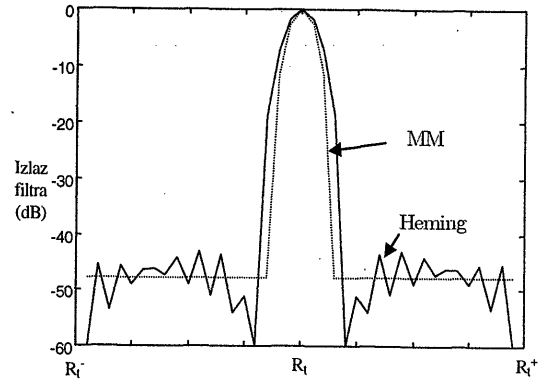
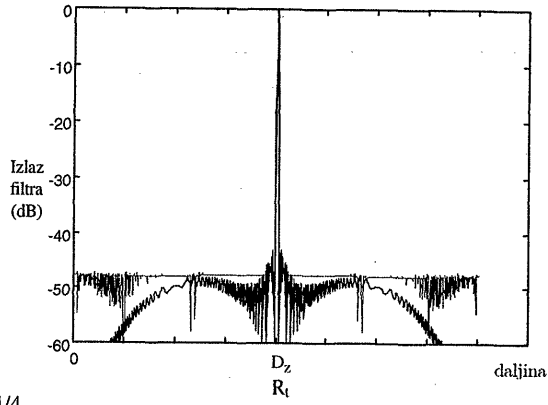
Treba istaći da će u realnoj situaciji signal replike imati pomak frekvencije izazvan Doplerovim efektom čime će se unositi neodređenost u merenju daljine. Zbog pojednostavljenja, u ovoj analizi je zanemaren uticaj tog faktora.

Poboljšanje odziva chirp filtra na replike iz zamračene zone

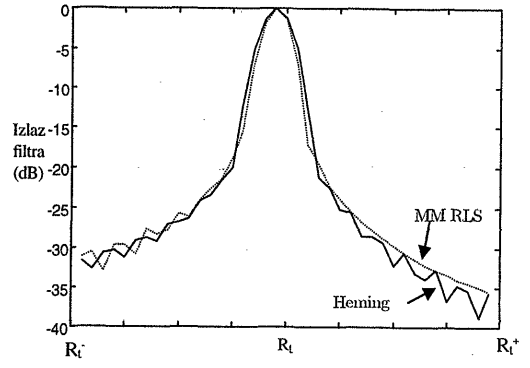
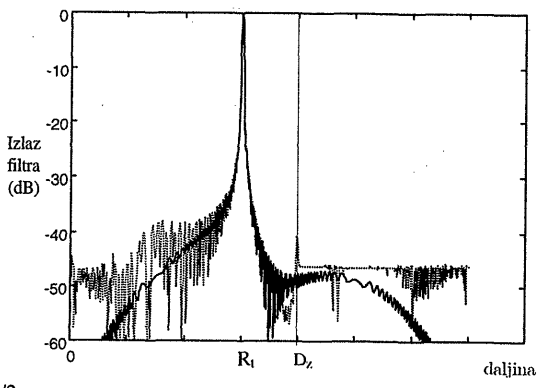
Kada radar procesira signal replike od nekoliko ciljeva, bočni snopovi nastali od cilja s većom refleksnom površinom ili od velikog klaterskog odraza mogu da maskiraju glavni snop cilja s manjom refleksnom površinom. Uticaj efekta zamračenja na nivo bočnih snopova analiziran je u izvornom radu [1] i zaključeno je da u zamračenoj zoni dolazi do dodatnog porasta bočnih snopova u odnosu na nivo bočnih snopova u nezamračenoj zoni, a dominantni su efekti opadanja amplitude i širenja glavnog snopa. Za potiskivanje bočnih snopova korišćena je Hemingova prozorska funkcija. Kao što je pokazano u [7], primenom metode potiskivanja bočnih snopova zasnovane na korišćenju prozorskih funkcija, širi se glavni snop odziva kompresionog filtra što izaziva pogoršanje rezolucije po daljini. Primenom Hemingove prozorske funkcije bočni snopovi se, u slučaju kada nema zamračenja, potiskuju na nivo od -42.8 dB, a glavni snop se širi na dvostruku vrednost širine glavnog snopa prilagođenog filtra, što znači dvostruko pogoršanje rezolucije po daljini. Ako se posmatra širina glavnog snopa na



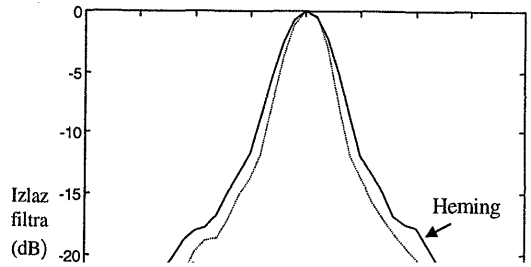
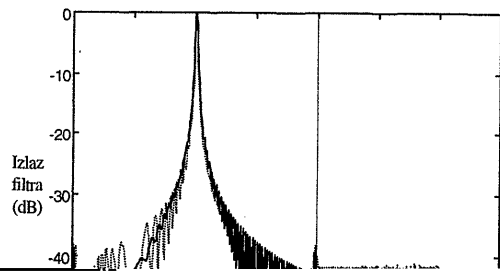
a) $E=0$

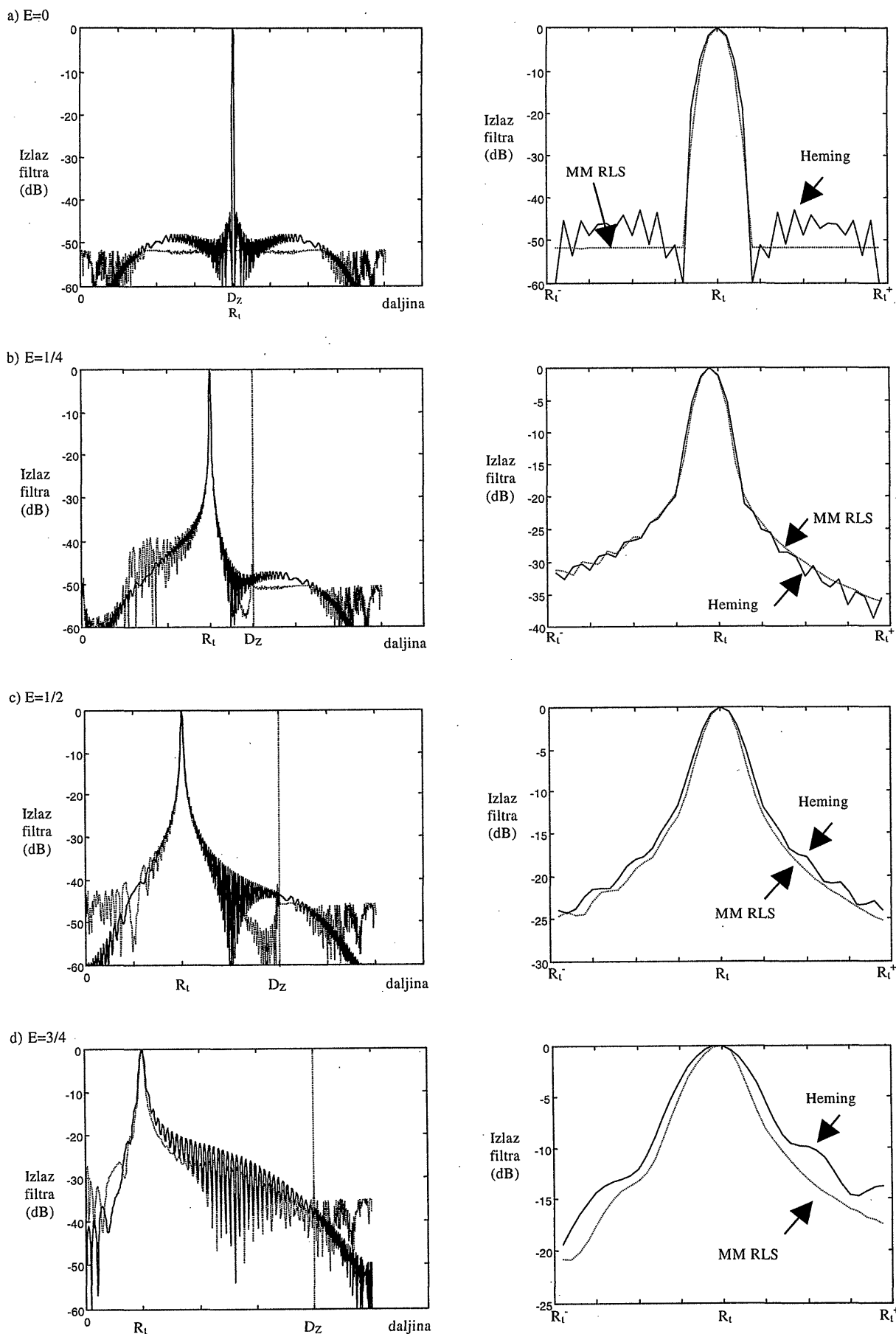


b) $E=1/4$



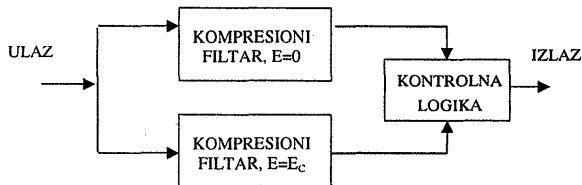
c) $E=1/2$





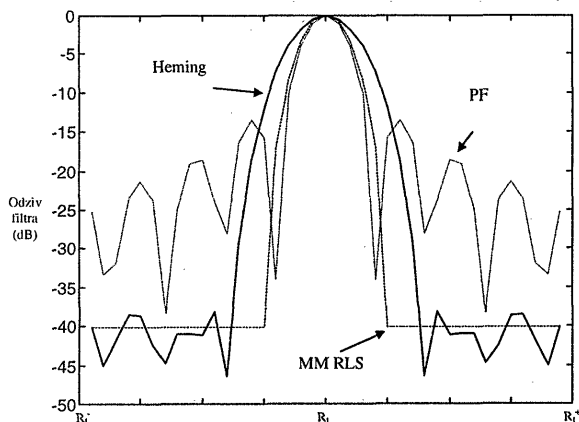
Slika 6. Odzivi kompresivnih filtera na signal replike sa faktorom zamračenja, $TB=200$: a) $E=0$, b) $E=1/4$, c) $E=1/2$ i d) $E=3/4$ (desna slika je zumirani deo oko glavnog snopa), rezolucija MM RLS filtra je dvostruko lošija od rezolucije PF

Naime, potrebno je za ciljeve na daljinama većim od D_c (određene sa $E_c = T_c/T$ izrazom $D_c = cT_c/2$) uzimati izlaz standardnog kompresionog filtra, a ispod te daljine relevantan bi bio izlaz kompresionog filtra prilagođenog na specificirani faktor zamračenja E_c (sl.7). Ovo bi omogućivala kontrolna logika koja bi obezbeđivala prebacivanje (switching) između izlaza dva filtra po unapred programiranom zakonu.

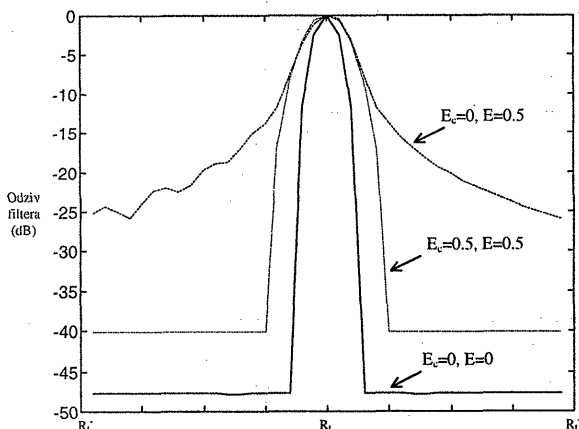


Slika 7. Struktura prijemnika sa dva kompresiona filtra podešena na različitu vrednost faktora zamračenja E

Primenom MM RLS algoritma za projektovanje dodatnog (paralelnog) kompresionog filtra podešenog na signal replike s faktorom zamračenja $E_c=0.5$, dobija se nivo bočnih snopova od oko -40 dB uz rezoluciju koja je nešto lošija od rezolucije prilagođenog filtra, dok se primenom Hemingove prozorske funkcije očekivano dobija dvostruko lošija rezolucija i viši nivo bočnih snopova (sl.8).



Slika 8. Odzivi prilagođenog, MM RLS i Hemingovog razdešenog paralelnog kompresionog filtra (projektovanih za slučaj $E=0.5$)



Slika 9. Poređenje odziva MM RLS razdešenih kompresionih filtra (projektovanih za slučajeve $E_c=0.5$ i $E_c=0$)

Opravdanost uvođenja paralelnog kompresionog filtra vidi se na sl.9 gde su dati odzivi kompresionih filtara dobijenih MM RLS algoritmom. Sa E_c označena je vrednost faktora zamračenja za koji je filter podešen, a sa E je označena vrednost faktora zamračenja signala replike na ulazu u filter. Filter podešen za $E_c=0.5$, kada procesira signal replike s faktorom zamračenja $E=0.5$, ima znatno niže bočne snopove nego kada to isto čini standardni filter koji je podešen za $E_c=0$.

Gubitak rezolucije ovog filtra u odnosu na standardni filter sa parametrima ($E_c=0$, $E=0$) prouzrokovan je smanjenjem originalnog trajanja signala replike sa T na $T_c=T/2$ i smanjenjem opsega signala replike sa B na $B_c=B/2$, odnosno smanjenjem proizvoda sa $TB=200$ na $T_cB_c=50$.

Zaključak

U impulsnim radarima koji imaju zajedničku prijemnu i predajnu antenu odjek od cilja može biti delimično ili potpuno zamračen, što zavisi od relativnog vremena njegovog dolaska (u odnosu na predajni impuls). Zamračenje se definiše kao trenutak kada je stigao odjek od cilja (signal replike), a prijemnik je isključen jer je predajnik uključen.

U ovom radu je dat novi pristup u teorijskoj analizi efekta zamračenja kod chirp radara zasnovan na karakteristikama funkcije neodređenosti radarskog signala. Ovaj pristup omogućava korektnu interpretaciju pojava koje se uočavaju u odzivu chirp kompresionog filtra kada signal replike dolazi iz zone zamračenja.

Primenom MM RLS algoritma projektuje se chirp kompresioni filter s nižim nivoom bočnih snopova i boljom rezolucijom po daljini u odnosu na dosadašnja rešenja koja se zasnivaju na primeni prozorskih funkcija. Na ovaj način se povećava mogućnost ispravne detekcije i efikasnijeg praćenja ciljeva koji se nalaze u zoni zamračenja. U suštini, stvar se mogućnost da se smanji efektivna širina slepe zone, tj. da se smanji minimalna daljina otkrivanja i praćenja cilja. Bočni snopovi odziva filtara na replike iz zone zamračenja se mogu dodatno potisnuti ako se koristi predložena konfiguracija prijemnika s dva paralelna kompresiona filtra podešena na različitu vrednost faktora zamračenja čijim radom upravlja kontrolna logika.

Literatura

- [1] BILLAM,E.R. Eclipsing effects with high-duty-factor waveforms in long-range radar. *IEE Proceedings*, December 1985, vol.132, no.7, pp.598-603.
- [2] COOK,C.E., BERNFELD,M. *Radars Signals-An Introduction To Theory And Applications*. Academic Press, New York,1967.
- [3] ZRNIĆ,B.M., ZEJAK,A.J. Potiskivanje bočnih snopova odziva čirp kompresionog filtra. *Naučnotehnički pregled*, 2001, vol LI, no.5, pp.46-53.
- [4] MORRIS,G.V. *Airborne pulsed Doppler Radar*. Artech House, Norwood, 1988.
- [5] SCHLEHER,D.C. *MTI and Pulsed Doppler Radar*. Artech House, Norwood, 1991.
- [6] HOVANESSIAN,S.A. *Radar System Design and Analysis*. Artech House, Dedham, 1984.
- [7] ZRNIĆ,B.M. *Poboljšanje detekcije ciljeva u zamračenoj zoni kod radara sa kompresijom impulsa*. Doktorska disertacija, Vojnotehnička akademija VJ, Beograd, 2001.

Rad primljen: 30.5.2002.god.

Increasing target detection of the chirp radars in the eclipsing zone

This work presents a new approach in the theoretical analysis and interpretation of the eclipse effects. The impact of the eclipsing effect on the radar compression filter response can be explained through the chirp radar ambiguity function. When the MM RLS algorithm for the chirp compression filter design was applied, low sidelobe level and better range resolution were obtained with respect to the solution based on the windowing function. In this manner, the possibility of the true target detection and the target tracking efficiency in the eclipsing zone are increased.

Key words: chirp, radar compression filter, eclipsing effect, range sidelobe, MM RLS algorithm.

Amélioration de la détection des cibles dans la zone aveugle chez les radars chirp

Une façon nouvelle d'aborder l'analyse théorique de l'effet de l'eclipse chez le radar chirp est fondée sur les caractéristiques de la fonction d'ambiguïté du signal chirp. On propose l'application de l'algorithme MM RLS pour la conception du filtre de compression chirp—ainsi on obtient un niveau des lobes latéraux plus bas et une meilleure résolution de portée par rapport à l'approche basée sur les fonctions de fenêtrage. Par conséquent, la possibilité de détection correcte augmente aussi bien que l'efficacité de la poursuite des cibles dans la zone d'eclipse.

Mots-clés: signal chirp, filtre radar de compression, effet d'eclipse, lobes latéraux, algorithme MM RLS.