

**ANALIZA EFEKTA ZAMRAČENJA U ČIRP RADARIMA
POMOĆU FUNKCIJE NEODREĐENOSTI**

Aleksa J. Zejak, Institut IMTEL, B. Lenjina 165B, 11070 N. Beograd
Bojan M. Zrnić, Vojnotehnička akademija VJ, Beograd, e-mail: bojan@icvsvj.cvsvj.ac.yu

Sadržaj- U radu je izvršena analiza i dato teorijsko objašnjenje uticaja efekta zamračenja na odziv kompresionog filtera u radarima sa čirp signalom.

1. UVOD

Dometa 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 vršne snage predajnika P .

S druge strane, jednoznačnost u merenju daljine kod impulsnih radara direktno je određena periodom ponavljanja impulsa T , prema formuli:

$$D_1 = \frac{c \cdot T_1}{2}$$

gde D_1 označava jednoznačni dometa radara, a c je brzina svetlosti. Očigledno je da se smanjenjem perioda ponavljanja impulsa smanjuje i jednoznačni dometa radara.

Odnos između trajanja radarskog impulsa T i perioda ponavljanja impulsa T_1 naziva se faktor popune (duty factor). Kod projektovanja radara velikog dometa često se bira talasni oblik radarskog signala sa velikim faktorom popune (preko 25 %), tj. koristi se radarski impuls velike dužine da bi se, pri ograničenoj vršnoj snazi, emitovala potrebna energija za projektovani dometa. Da bi se sačuvala karakteristike radara u pogledu rezolucije po daljini koristi se unutarimpulsna fazna ili frekvenzijska modulacija, kojom se spektar predajnog signala širi i omogućava kompresija impulsa na prijem.

Neželjena posledica proširenja predajnog impulsa jeste i širenje tzv. slepe zone D_2 (blind zones). Naime, na daljinama cilja manjim od D_2 , gde je

$$D_2 = \frac{c \cdot T}{2} \tag{1}$$

javlja se delimično zamračenje njegovog odjeka, jer je predajnik uključen a prijemnik isključen. Ovo područje se označava kao prva zona zamračenja (eclipsing zone). U radu [1] ukazano je i na postojanje i druge zone zamračenja koja se nalazi iza nominalnog instrumentalnog dometa, a koja je povezana sa trenutkom emitovanja sedećeg predajnog impulsa, tj. nastaje zamračenje ciljeva čiji se odjek od prethodno poslatog impulsa vraća u trenutku emitovanja novog impulsa.

U radu će biti analizirani efekti koji nastaju u odzivu prilagođenog (kompresionog) filtera za slučaj kada se cilj nalazi unutar neke od zona zamračenja, pri čemu će

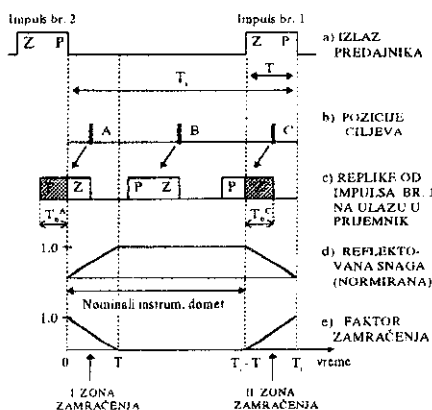
biti korišćena metodologija poznata iz analize rada kompresionog prijemnika [2].

Analiza je motivisana rezultatima prezentiranim u radu [1] gde su uočeni određeni efekti koji se pojavljuju u odzivu kompresionog filtera za slučaj cilja koji se nalazi u zamračenju zoni, ali nisu data preciznija teoretska objašnjenja tih efekata, a koja su neophodna za potpuno razumevanje problema. Osnovna motivacija za rad na ovom problemu data je izvorno u [1], a odnosi se na mogućnost detekcije ciljeva koji se nalaze unutar slepe zone (prva zona zamračenja), kao i na mogućnost povećanja nominalnog instrumentalnog dometa na neku daljinu unutar druge zone zamračenja.

Jedan od prvih talasnih oblika koji se i danas najčešće koriste za kompresiju impulsa jeste linearno frekvenzijski modulisan signal ili čirp signal. U ovom radu razmatraće se efekat zamračenja u radarskom sistemu koji koristi čirp signal, a osnovni alat za analizu biće radarska funkcija neodređenosti čirp signala.

2. EFEKAT ZAMRAČENJA

U impulsnim radarima, odjek od cilja može biti delimično ili potpuno zamračen u zavisnosti od relativnog vremena njegovog dolaska (u odnosu na predajni impuls). Zamračenje se definiše kao situacija kada je stigao odjek od cilja (replika), a predajnik je uključen i prijemnik je isključen [3]. Na slici 1 prikazana je efekat zamračenja signala replike. Prednji i zadnji dio predajnog i prijemnog impulsa označeni su sa P i Z, respektivno.



Slika 1. Efekat zamračenja

Ciljevi A i C su delimično zamračeni, dok je cilj B nezamračen. Cilj A se nalazi u prvoj zoni zamračenja (odgovara "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 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 u [1] sledećim izrazom:

$$F = \frac{T_e}{T} \quad (2)$$

gde je T_e trajanje zamračenog dela odjeka. Promena faktora zamračenja unutar impulsnog perioda data je na slici 1.e, dok je promena reflektovane snage data na slici 1.d.

3. FUNKCIJA NEODREĐENOSTI ČIRP SIGNALA

Kompleksna ovojnica linearnog čirp signala data je izrazom:

$$\mu(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \cdot e^{j\pi k t^2} \quad \text{za } |t| < \frac{T}{2}. \quad (3)$$

gde T predstavlja vreme trajanja signala, a k je konstanta koja određuje strminu čirp signala i određena je sa

$$|k| = \frac{B}{T}, \quad (4)$$

gde je B frekvijski opseg signala.

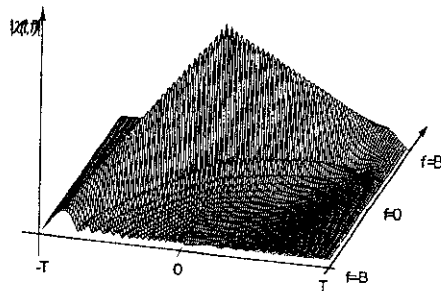
Svojstva radarskog signala u zavisnosti od brzine cilja (Doplerov pomak frekvencije) i od daljine cilja (vremensko kašnjenje), opisuju se funkcijom neodređenosti. Radarska funkcija neodređenosti je kompleksna ovojnica odziva kompresivnog filtra na čiji se ulaz dovodi frekvijski pomeren i vremenski zakašnjen signal replike i definisana je sa

$$\chi(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(t) \mu^*(t - \tau) \cdot e^{j2\pi f t} dt. \quad (5)$$

Za većinu razmatranja važan je moduo ovojnice funkcije neodređenosti $|\chi(t, f)|$, koja je za linearni čirp signal data sledećim izrazom [4]:

$$|\chi(\tau, f_d)| = \left| \frac{\sin \left[\pi T (f_d + k\tau) \left(1 - \frac{|\tau|}{T} \right) \right]}{\pi T (f_d + k\tau)} \right| \quad \text{za } |\tau| \leq T. \quad (6)$$

Na osnovu prethodnog izraza, na slici 2 je u vremensko-frekvijskoj ravni prikazana funkcija neodređenosti linearnog čirpa.

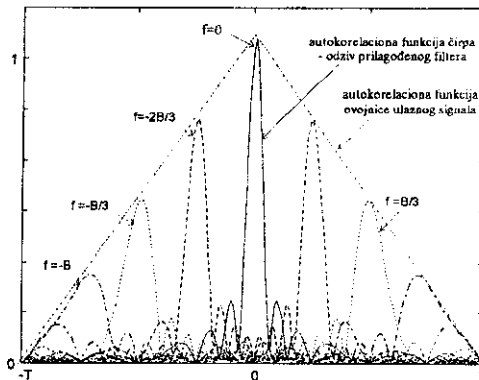


Slika 2. Funkcija neodređenosti linearnog čirpa

Kao što se vidi sa slike 2, funkciju neodređenosti linearnog čirpa karakterišu sledeća svojstva [4]:

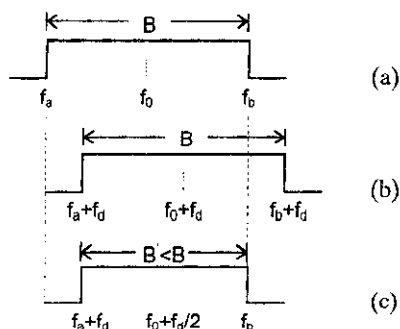
1. vremenski pomak centralnog pika
2. opadanje amplitude centralnog pika
3. povećanje širine centralnog pika

Vremenski pomak centralnog pika je karakterističan za sve tipove čirpa. Ako se na ulaz kompresionog filtra dovede frekvijski pomeren čirp signal, na izlazu se dobija vremenski pomeren impuls odziva, što je prikazano na slici 3. Ova osobina je nepovoljna za radarske primene jer unosi neodređenost u merenju daljine i brzine.



Slika 3. Odziv prilagođenog filtra za ulazne signale sa različitim frekvijskim pomacima. Pomak frekvencije normalizovan je širinom propusnog opsega prilagođenog filtra - B.

Opadanje amplitude centralnog pika je drugo važno svojstvo funkcije neodređenosti. Naime, izlazi kompresionog filtra za različite frekvijske pomake ulaznog signala ograničeni su trougaonom funkcijom. Ova funkcija je autokorelacija pravougaone ovojnice signala na ulazu u prilagođeni filter. Pad amplitude je izazvan prisustvom člana $1 - |\tau|/T$ u izrazu (6). Relativno kašnjenje τ skraćuje efektivno trajanje signala od T na $T - |\tau|$ proporcionalno smanjujući izlaznu amplitudu. Smanjenje amplitude centralnog pika utiče na smanjenje odnosa signal/šum, što rezultira smanjenjem dometa.



Slika 4. Izlazni spektar signala modifikovan propusnim opsegom kompresionog filtera

- propusni opseg kompresionog filtera,
- frekvencijski pomereni spektar ulaznog signala (pomeren za f_d),
- rezultujući spektar na izlazu kompresionog filtera (pomeren za $f_d/2$).

Povećanje širine centralnog pika nastaje kao rezultat ograničenja spektra koje svojim propusnim opsegom unosi prilagođeni filter, što je prikazano na slici 4. Širenje centralnog pika znači smanjenje rezolucije po daljini.

4. UTICAJ EFEKTA ZAMRAČENJA NA ODZIV RADARSKOG KOMPRESIONOG FILTERA

Kompresioni filter se može predstaviti u formi transverzalnog filtra čiji su težinski koeficijenti kompleksno-konjugovane vrednosti odbiraka predajnog signala. Dužina filtra jednaka je dužini predajnog signala T . Kada nema zamračenja reflektovani signal na ulazu u filter ima istu dužinu trajanja kao i predajni signal.

U slučaju kada postoji zamračenje odjeka od cilja, koji se nalazi u prvoj zoni zamračenja, trajanja T_e^I , dolazi do efektivnog skraćivanja dužine trajanja reflektovanog signala na ulazu u kompresioni filter, tako da njegova dužina iznosi $T_f = T - T_e^I$. Ekvivalentno, ako je odjek od cilja koji se nalazi u drugoj zoni zamračenja zamračen za vreme T_e^II , njegova dužina na ulazu u kompresioni filter biće $T_f = T - T_e^II$.

Efekat zamračenja ima uticaj i na frekvencijski sadržaj reflektovanog signala. Skraćivanje trajanja reflektovanog impulsa usled zamračenja manifestuje se suženjem frekvencijskog opsega signala replike. Naime, ako je početna frekvencija predajnog čirp signala f_1 a krajnja f_2 , onda će početna frekvencija reflektovanog signala od cilja iz prve zone zamračenja biti $f_1 + f_e^I$ a krajnja f_2 (zamračen prednji dio impulsa). Početna frekvencija reflektovanog signala od cilja iz druge zone

zamračenja biće f_1 a krajnja $f_2 + f_e^II$ (zamračen zadnji dio impulsa).

Veza između dužine zamračenja i odgovarajućeg suženja frekvencijskog opsega data je relacijama:

$$\text{I zona zamračenja: } f_e^I = k T_e^I \quad (7)$$

$$\text{II zona zamračenja: } f_e^II = k T_e^II \quad (8)$$

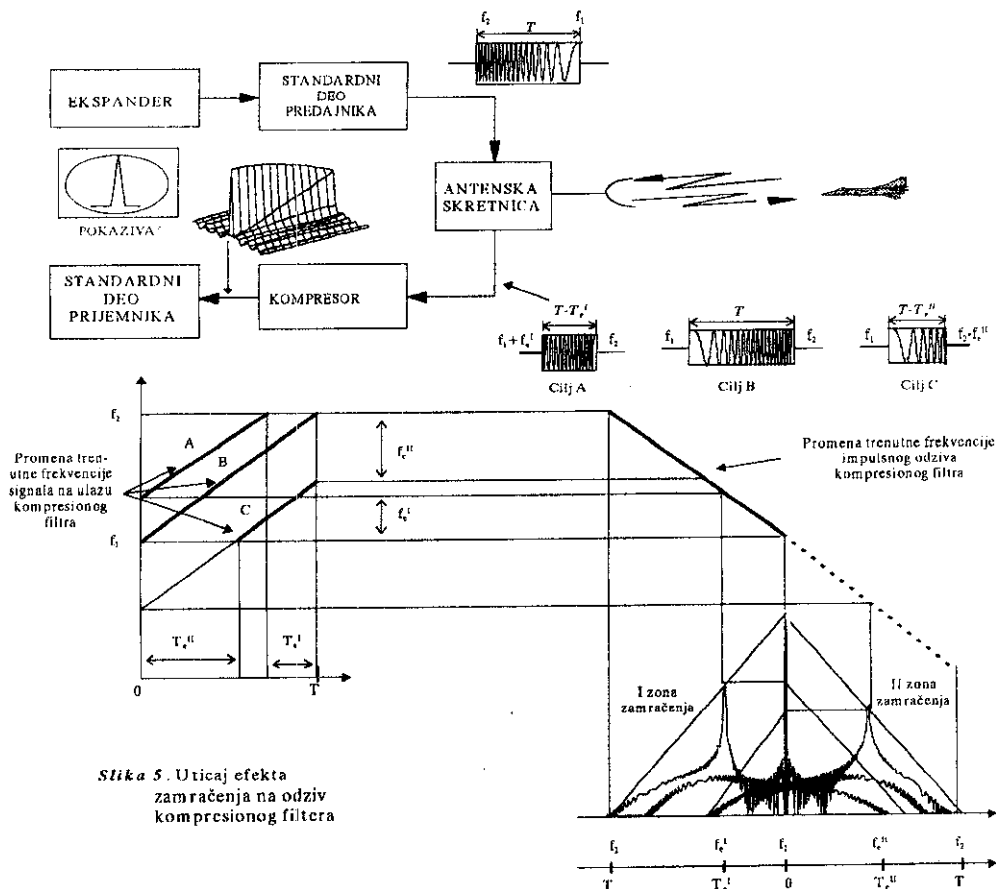
Imajući u vidu gore iznesene stavove, moguće je uticaj efekta zamračenja na odziv radarskog kompresionog filtera može potpuno objasniti preko karakteristika funkcije neodređenosti čirp signala. Logično je očekivati da će usled promene frekvencijskog spektra i vremena trajanja reflektovanog signala izazvanog efektom zamračenja doći do sličnih promena u odzivu kompresionog filtera koje su prisutni i kod funkcije neodređenosti čirp signala.

Rezultati simulacije odziva kompresionog filtera za slučaj kada postoji zamračenje cilja koji su dati u radu [1] upravo ukazuju na efekat smanjenja amplitude i povećanje širine glavnog pika, ali se u samom radu ne daje eksplicitno teorijsko objašnjenje uzroka nastanka ovih efekata, odnosno ne dovode se u vezu ovi efekti sa karakteristikama funkcije neodređenosti čirp signala.

Efekat zamračenja se u suštini manifestuje kao efektivno skraćivanje trajanja reflektovanog signala, što izaziva smanjenje amplitude centralnog snopa odziva filtra (delovanje člana $1 - \tau/T$ u izrazu za funkciju neodređenosti). Proširenje centralnog snopa nastaje kao posledica ograničenja spektra koje svojim smanjenim propusnim opsegom unosi signal replike.

Na slici 5 prikazan je uticaj efekta zamračenja na odziv kompresionog filtera. Može se uočiti da su izlazi kompresionog filtera kada nema zamračenja cilja, za različite frekvencijske pomake čirp signala na ulazu, ograničeni trougaonom funkcijom, koja predstavlja kroskorelaciju pravougaone ovojnice reflektovanog čirp signala i impulsnog odziva kompresionog filtera pri čemu su dužina filtra i dužina reflektovanog signala jednake. Ukoliko postoji zamračenje (skraćuje se trajanje reflektovanog signala), izlazi kompresionog filtera, za različite frekvencijske pomake čirp signala na ulazu, biće ograničeni trapeznom funkcijom koja se upisuje unutar osnovne trougaone funkcije.

Na osnovu izgleda trenutne frekvencije signala na ulazu kompresionog filtra (Sl. 5), može se zaključiti da se efekat zamračenja manifestuje i na način koji odgovara postojanju fiktivnog Doplerovog pomaka frekvencije reflektovanog signala. Potrebno je istaći da će u realnoj situaciji postojati i stvarni pomak frekvencije reflektovanog signala izazvan Doplerovim efektom usled stvarnog kretanja cilja. Zbog pojednostavljenja, u ovoj analizi je zanemaren ovaj efekat.



Slika 5. Uticaj efekta zamračenja na odziv kompresionog filtra

5. ZAKLJUČAK

Pojava delimičnog ili potpunog zamračenja reflektovanog radarskog signala odnosi se na situaciju kada je reflektovani signal stigao na ulaz prijemnika koji je isključen, jer je u tom trenutku uključen predajnik. Efekat zamračenja u radarima sa čirp signalom izaziva određene pojave u odzivu radarskog kompresionog filtra, koje se mogu objasniti karakteristikama funkcije neodređenosti čirp signala, što je i učinjeno u ovom radu.

U daljim istraživanjima, razmatraće se problem potiskivanja bočnih snopova u odzivu kompresionog filtra u slučaju zamračenja, sa ciljem povećanja dinamičkog opsega u zamračevoj zoni. Rezultati ovih istraživanja treba da daju precizniji odgovor na pitanja da li se efektivna širina slepe zone može smatrati manjom od klasično definisane, kao i za koliko se može povećati instrumentalni domet rada (na vrednost unutar druge zone zamračenja).

LITERATURA

1. E.R.Billam, "Eclipsing effects with high-duty-factor waveforms in long-range radar", IEE Proceedings, Vol.132, No.7, pp.598-603, Dec. 1985
2. I. Simić, B. Zejak, "Funkcija neodređenosti kompresionog prijemnika", Zbornik radova ETRAN '98, sveska 2, str. 63-66
3. S.A.Hovanesian, "Radar system design and analysis", Artech House, Dedham, 1984
4. A.W. Rihaczek, "Principles of High-Resolution Radar", McGraw-Hill, New York, 1969

Abstract- In this paper analysis of chirp compression filters responses in case of eclipsing of target returns is performed. Basic tool for analysis was radar's ambiguity function.

ANALYSIS OF ECLIPSING EFFECT IN CHIRP RADAR BY AMBIGUITY FUNCTION

Aleksa Zejak, Bojan Zrnčić