

UTICAJ KLATERA I TERMALNOG ŠUMA NA ODZIV ČIRP KOMPRESIONOG RADARSKOG FILTERA

Bojan M. Zrnić, *Vojna akademija, Odsek logistike, Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd*
Aleksa J. Zejak, *Institut IMTEL, Bul. M. Pupina 165-B, 11070 N. Beograd*
Milenko Andrić, *Vojna akademija, Odsek logistike, Ratka Resanovića 1, 11000 Beograd*

Sadržaj – U radu je izvršena analiza uticaja klatera i termalnog šuma na odziv čirp kompresionog radarskog filtera. Posmatran je nivo bočnih snopova daljine odziva filtera u zavisnosti od odnosa signal/klater odnosno signal/šum na njegovom ulazu.

1. UVOD

Prijem radarskih signala se uvek obavlja u prisustvu različitih vrsta šumova. Inherentno su prisutni termalni šumovi radarskog prijemnika koji su po prirodi širokopojasni (spektar im je znatno širi od propusnog opsega prijemnika) i najčešće se modeluju kao Gausovi beli šumovi nultog očekivanja i zadate varijanse. Šumovi nastali usled neželjenih refleksija od okolnih objekata, koji nisu predmet radarskog osmatranja, nazivaju se klateri. Za razliku od termalnih, ovi šumovi su uskopojasni, sa širinom spektra znatno manjom od propusnog opsega prijemnika, pa se zato nazivaju i obojeni šumovi. Oni spadaju u klasu korelisanih šumova, jer im je vreme korelacije duže od periode ponavljanja impulsa. I termalni šum i klater su šumovi aditivnog karaktera [1].

Klatter i termalni šum svojim prisustvom u realnom radarskom signalu mogu da maskiraju korisne ciljeve i na taj način da otežaju njihovu detekciju. Jak nivo klatera može ograničiti domet radara, bilo zasićenjem prijemnika, bilo maskiranjem korisnog signala, ako se nađe u istoj ili susednim rezolucionim ćelijama. Takođe, klaterski odjeci mogu da izazovu lažne alarme u procesu detekcije cilja.

Prilikom dizajna talasnog oblika radarskog signala dolazi se do protivrečnog zahteva da signal istovremeno ima što širi spektar (radi postizanja što bolje rezolucije po daljini) i da što duže traje (da bismo postigli što veću energiju za datu vršnu snagu tj. da bismo povećali domet). Kompromis između ovih zahteva može se ostvariti uvođenjem kompresije radarskog impulsa. U osnovi kompresije impulsa jeste postupak unutarimpulsne modulacije (kodovanja) signala nosioca čime se širi spektar radarskog signala. Tehniku kompresije impulsa, međutim, prati jedna neželjena pojava koja umanjuje njene efekte - to su bočni snopovi po osi daljine na izlazu prilagođenog filtera. Ova pojava je neželjena zbog toga što može da maskira odjeke od slabijih ciljeva i da izazove lažne alarme kao što to čini klatter.

Zbog toga se projektuju filteri koji istovremeno vrše kompresiju i potiskivanje bočnih snopova kodovanog radarskog signala. Takav filter zamenjuje prilagođeni (matched filter) i naziva se razdešeni filter (mismatched filter). U literaturi se ova dva filtera označavaju i izrazom kompresioni filteri.

Tehnika linearog čirpa ili linearne frekvencijske modulacije (LFM) signala je jedna od prvih koje su primenjene za kompresiju radarskog signala [2]. Naime,

unutarimpulsna frekvencijska modulacija, koja za datu širinu impulsa T ostvaruje širinu spektra veću od $B=1/T$ ($TB>1$), prvi put je realizovana linearnom promenom frekvencije unutar impulsa. Odziv kompresionog filtera prilagođenog na čirp signal ima oblik funkcije $\sin(x)/x$ sa nivoom maksimalnih bočnih snopova od -13.26 dB što je za radarske primene neprihvatljivo visok nivo. U radu [3] dat je novi pristup u projektovanju kompresionog filtera kod radara koji koriste čirp modulaciju signala nosioca. Pristup se zasniva na primeni minimaksno modifikovanog rekurzivnog algoritma najmanjih kvadrata. Algoritam je nazvan MM RLS (Minimax Modified Recursive Least Square). Primenom MM RLS algoritma dobija se čirp kompresioni filter sa nižim nivoom bočnih snopova i boljom rezolucijom po daljini u odnosu na prethodna rešenja koja su se zasnivala na primeni prozorskih funkcija kojima se amplitudno ponderiše impulsni odziv čirp prilagođenog filtera.

U ovom radu je analiziran uticaj klatera i termalnog šuma na nivo maksimalnih bočnih snopova odziva čirp kompresionog radarskog filtera, dok je analiza uticaja klatera na odziv radarskog kompresionog filtera za fazno modulisanu radarske signale data u radu [4].

2. KARAKTERISTIKE ČIRP SIGNALA

U kompleksnoj notaciji, linearni čirp signal sa pravougaonom ovojnicom u vremenskoj domeni dat je izrazom

$$s(t) = e^{j2\pi(f_0 t + \frac{B}{2T} t^2)} \quad \text{za } |t| < \frac{T}{2}, \quad (1)$$

gde je B širina spektra signala, T trajanje signala a f_0 je frekvencija signala nosioca.

Normalizovana kompleksna ovojnica linearnog čirp signala prikazana je izrazom

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

Trenutna frekvencija $f_i(t)$ kompleksne ovojnice $\mu(t)$ data je izrazom

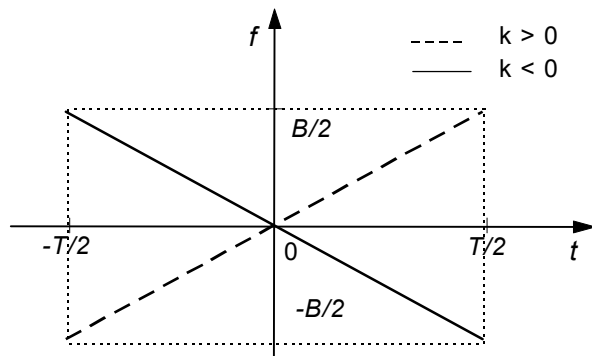
$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = kt, \quad (3)$$

gde je k konstanta koja određuje strminu promene trenutne frekvencije linearnog čirpa. Ako se trenutna frekvencija

menja u opsegu B za vreme trajanja signala T, kao što je prikazano na slici 1, apsolutna vrednost k data je izrazom:

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

Znak konstante k određuje pravac promene (porast ili pad) trenutne frekvencije.



Sl. 1. Promena trenutne frekvencije linearnog čirpa

3. MODELI KLATERA

Model klatera treba da što bolje opisuje realni klaterski slučajni proces na ulazu u radarski prijemnik, da bi se što tačnije odredio uticaj klatera na sistemske karakteristike radara. Baza podataka o klateru u konkretnom slučaju obično ne omogućava postizanje cilja zbog koga se vrši modelovanje, pa se ono svodi na kompromis između tačne reprezentacije i pogodnosti za rad sa analitičkom formom modela.

Važna osobina klatera, po kojoj se razlikuje od termičkog šuma, jeste njegova visoka korelisanost od jednog radarskog impulsa do drugog (termalni šum prijemnika je nekorelisan). Ova osobina se reflektuje na spektralnu gustinu snage klatera, odnosno njoj odgovarajuću autokorelacionu funkciju. Najprostiji model klatera se zasniva na *Gausovoj funkciji gustine raspodele*, a dobra osobina tog modela jeste da se slučajni klaterski proces može potpuno opisati njegovom srednjom vrednošću i kovarijacionom funkcijom. Ovim modelom se mogu adekvatno opisati klaterski odjeci od prostorno kontinualno distribuiranih reflektora među kojima nema dominantnog reflektora (klater od oblaka, kiše, pasivnih dipola, klater od morske površine pri osmatranju radarom sa niskom rezolucijom ili sa radarom visoke rezolucije pri upadnim uglovima većim od 5° , kao i klater od površine zemlje pri velikim upadnim uglovima) [5].

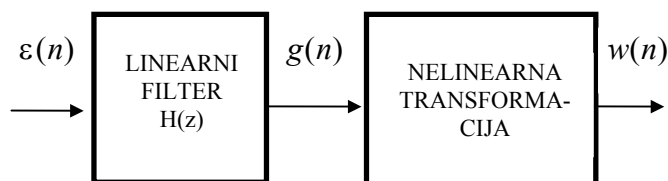
Međutim, postoje situacije kada modelovanje klatera Gausovom raspodelom nije adekvatno i tada se primenjuje neka druga funkcija gustine raspodele koja bolje aproksimira eksperimentalne podatke o klateru. Najčešće se koriste modeli zasnovani na log-normalnoj, Vejbulovoj (Weibull) i K-funkciji gustine raspodele. Svaka od tih distribucija teži da, na osnovu izmerenih podataka, što tačnije reprezentuje

efektivnu distribuciju radarske površine usrednjenog klatera u pojedinačnoj rezolucionoj ćeliji.

U praksi se pokazalo da Rejljeva (Rayleigh) statistika obično daje vrednosti manje od realnih, dok ih lognormalna statistika često precenjuje. Zato se za opisivanje klatera koristi model zasnovan na Vejbulovoj raspodeli, kod kojeg se odgovarajućim izborom parametara mogu dobiti i Rejljev model i model sa lognormalnom raspodelom.

4. RAČUNARSKO MODELOVANJE KLATERA

Simulacioni model pomoću koga se može generisati sekvenca koherentnog Vejbulovog klatera željene autokorelacione funkcije prikazan je u obliku blok šeme na slici 2.[2].



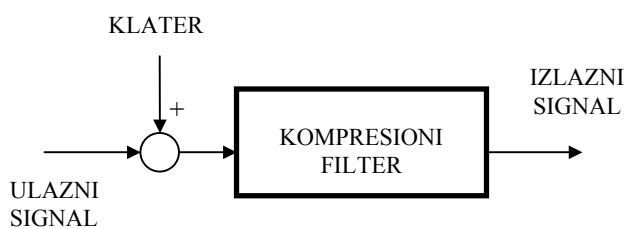
Sl. 2. Modelovanje koherentnog Vejbulovog klatera

Proces $\varepsilon(n)$ je koherentni Gausov beli šum nulte srednje vrednosti i varijanse σ_ε^2 . Linearni filter unosi odgovarajuću korelaciju između uzoraka ulazne sekvence i kao rezultat dobija se vremenski korelisanu Gausovu sekvenca $g(n)$. Linearni filter sa funkcijom prenosa $H(z)$ sa slike 1 realizovan je kao IIR filter. Tako generisana koherentna i korelisanu Gausovu sekvenca dovodi se na ulaz bloka za nelinearnu transformaciju. Nelinearna transformacija prevodi koherentnu korelisanu Gausovu sekvenca u koherentnu korelisanu Vejbulovu sekvenca koja predstavlja vremenske odbirke klatera [4].

Prvi korak u računarskom modelovanju jeste zadavanje parametra koji karakteriše strminu raspodele Vejbulove promenljive. Zatim se zadaje autokorelaciona sekvenca klatera ili se ona izračunava na osnovu zadate spektralne gustine snage.

5. UTICAJ VEJBULOVOG KLATERA NA ODZIV ČIRP KOMPRESIONOG FILTERA

Analizirana je osetljivost na klater čirp kompresionog filtera prema šemi na slici 2, pri čemu su posmatrani nivoi maksimalnih bočnih snopova za prilagođeni filter, razdešeni filter dobijen MM RLS algoritmom i razdešeni filter dobijen pomoću Hemingove prozorske funkcije. Napomenućemo da se posmatra osetljivost na klater filtera koji su projektovani pod pretpostavkom da na ulazu ne postoji dejstvo šuma/klatera.



Sl. 3. Klater na ulazu radarskog kompresionog filtera

Za računarsko modelovanje klatera prema prethodnoj proceduri korištena je normirana autokorelaciona funkcija klatera dobijena na osnovu eksperimentalnih podataka [6], data analitički na sledeći način:

$$r(k) = \frac{2}{3} \left[1 + \frac{1}{2} \cos(4\pi k V_{0r}) \exp(-8\pi^2 k^2 \sigma_r^2) \right] \cdot \exp(-j2\pi k V_{0d} - 2\pi^2 k^2 \sigma_d^2 - \frac{k^2}{2T_0^2}), \quad (5)$$

gde su σ_d , σ_r , V_{0d} , V_{0r} i T_0 parametri modela. U analizi su korišćene sledeće vrednosti parametara [6]: $\sigma_d = 0.025$, $\sigma_r = 0.020$, $V_{0d} = -0.050$, $V_{0r} = 0.030$ i $T_0 = 24$.

Vrednost varijanse Wejbulovog klatera menjana je u opsegu od 10^{-4} do 10, što odgovara promeni odnosa signal/klater na ulazu od 40 do -10 dB. Veza između varijanse klatera na ulazu (var) i odnosa signal/klater na ulazu data je relacijom:

$$S / C_{dB} = 20 \log_{10}((var)^{-1/2}). \quad (6)$$

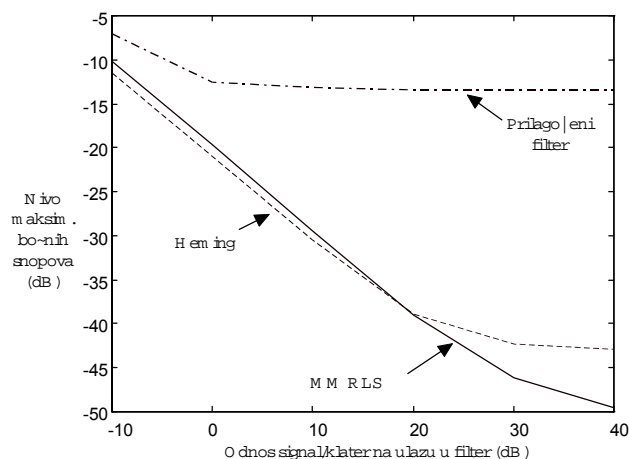
Izvršena je simulacija po Monte Karlo metodi sa 30 pojedinačnih realizacija klaterskog procesa (prema preporuci u radu [7]).

U svim simulacijama radarski impuls je modelovan kao čirp signal trajanja $T=10 \mu s$ i širine spektra $B=20$ MHz ($TB=200$).

Uticao klatera na nivo maksimalnih bočnih snopova može se posmatrati na dva načina, u zavisnosti od toga kako je u konkretnom slučaju realizovan algoritam detekcije.

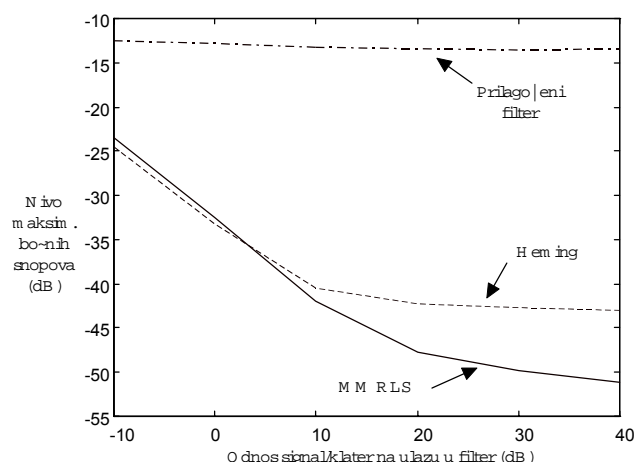
Prvi način odgovara detekciji na pojedinačnom impulsu, tačnije za svaku realizaciju klatera nađe se nivo maksimalnog bočnog snopa (MBS), zatim se saberu MBS-ovi, nađe se njihova srednja vrednost i prevede se u decibelski oblik. Rezultati ovakve analize dati su na slici 4.

Uočava se da pri odnosu signal/klater (S/C) manjem od 20 dB na ulazu filtera razlika u nivou između MM RLS i Hemingovog čirp filtera praktično nestaje. Takođe se vidi da klater više utiče na MM RLS filter



Sl. 4. Nivo MBS odziva čirp kompresionih filtera u zavisnosti od klatera, metoda usrednjav.pojedinačnih MBS

Drugi način odgovara detekciji na paketu impulsa, tačnije sabiraju se odzivi od svake pojedinačne realizacije klatera, zatim se odredi MBL takvog kumulativnog odziva i prevede se u decibelski oblik. Rezultati analize po ovoj metodi dati su na slici 5.



Sl. 5. Nivo MBS odziva kompresionih filtera u zavisnosti od klatera, metoda usrednjavanja pojedinačnih realizacija

Uočava se da granična vrednost odnosa S/C pri kojoj razlika između nivoa maksimalnih bočnih snopova MM RLS i Hemingovog čirp filtera praktično ne postoji ovde iznosi 10 dB. Slike 4 i 5 potvrđuju da je detekcija na paketu impulsa manje osetljiva na pojavu klatera na ulazu (nivo MBS je u proseku niži za oko 10 dB za vrednosti $S/C=10$ i -10).

6. UTICAJ TERMALNOG ŠUMA NA ODZIV ČIRP KOMPRESIONOG FILTERA

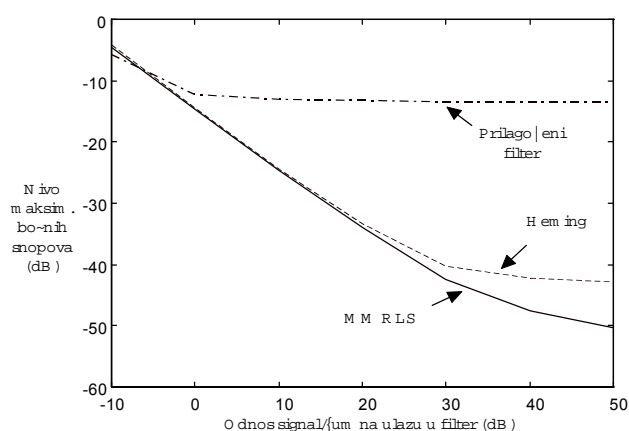
Kako je termalni šum aditivnog karaktera, njegov uticaj je takođe simuliran prema šemi na slici 2. Šum je modelovan kao Gausovski beli slučajni proces nultog očekivanja i promenljive varijanse (opseg od 10^{-5} do 10) što odgovara promeni odnosa signal/šum (S/N) na ulazu od -50 do 10 dB.

Uticaj termalnog šuma je posmatran na isti način kao i uticaj klatera. Prema metodi detekcije na jednom impulsu (usrednjavanje pojedinačnih MBS) dobijeni su rezultati na

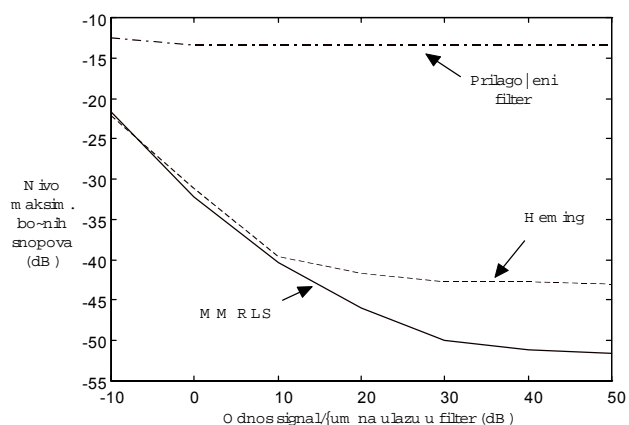
slici 6. Rezultati nastali prema metodi detekcije na paketu impulsa prikazani su na slici 7.

Može se uočiti da razlika između nivoa MBS razdešenih filtera prema metodi detekcije na jednom impulsu nestaje pri odnosu S/N od 30 dB, dok se prema metodi detekcije na paketu impulsa to dešava pri odnosu S/N od 10 dB.

I ovde je, slično kao i kod klatera, nivo MBL dobijen kumulativnom detekcijom znatno niži nego prilikom detekcije na pojedinačnom impulsu. Naime, u uslovima veće snage (varijanse) šuma/klatera dešava se da ne postoji samo jedan već nekoliko korelacionih pikova različitog nivoa na različitim pozicijama, pa je zbog toga detekcija na jednom impulsu nepouzdana. Usrednjavanjem ovakvih pojedinačnih realizacija dolazi do izražaja osnovni korelacioni pik (glavni snop odziva) zato što on u svakoj realizaciji ostaje na istom mestu, dok ostali korelacioni pikovi fluktuiraju.



Sl.6. Nivo MBS odziva kompresionog filtera u zavisnosti od termalnog šuma, metoda usrednjavanja pojedinačnih MBS



Sl. 7. Nivo MBS odziva kompresionog filtera u zavisnosti od termalnog šuma, metoda usrednjav. pojedinačnih realizacija

7. ZAKLJUČAK

Klater i termalni šum su šumovi aditivnog karaktera, a međusobno se razlikuju prema širini spektra i korelacionim svojstvima. Uticaj ovih šumova na nivo bočnih snopova čirp kompresionih filtera je različit, u zavisnosti od primenjenog metoda detekcije. Potvrđeno je da detekcija na paketu impulsa ima veću robusnost u odnosu na detekciju na pojedinačnom impulsu i utvrđeni su granični odnosi signal/klater i signal/šum pri kojima se izjednačava nivo maksimalnih bočnih snopova čirp kompresionog filtera dobijenog MM RLS algoritmom i čirp kompresionog filtera dobijenog primenom Hemingove prozorske funkcije.

LITERATURA

- [1] J. Zatkalik, "Radiolokacija I deo", Nauka, Beograd, 1995.
- [2] C.E. Cook, M. Bernfeld, "Radars Signals-An Introduction To Theory And Applications", Academic Press, New York, 1967.
- [3] B. Zrnić, "Poboljšanje detekcije ciljeva u zamračenoj zoni kod radara sa kompresijom impulsa", Doktorska disertacija, Vojnotehnička akademija, Beograd, 2001.
- [4] M. Andrić, B. Zrnić, A. Zejak, "Uticaj Vejbulovog klatera na karakteristike radarskih kompresionih filtera", Zbornik radova TELFOR 2000, Beograd, 2000.
- [5] D.C. Schleher, "MTI and Pulsed Doppler Radar", Artech House, Norwood, 1991.
- [6] W. Hawkes, S. Haykin, "Modelling of clutter for coherent pulsed radar", *IEEE Trans. IT*, Vol-21, 1975, 703-707.
- [7] R.L. Fante, "Central Limit Theorem: Use with Caution", *IEEE Trans. Aerosp. and El. Sys.*, vol. AES-37, pp.739-740, april 2001.

Abstract - In this paper the analysis of the impact the clutter and thermal noise on the chirp radar compression filter response is performed. The range sidelobe level versus signal/clutter and signal/noise ratio is established.

THE IMPACT OF CLUTTER AND THERMAL NOISE ON THE CHIRP COMPRESSION FILTER RESPONSE

Bojan Zrnić, Aleksa Zejak, Milenko Andrić