

JOVAN ZATKALIK
ALEKSANDRA PRESKAR
Elektrotehnički fakultet, Beograd

RADNE KARAKTERISTIKE CFAR RADARSKOG PRIJEMNIKA U LOG-NORMAL
KLATERSKOM OKRUŽENJU

OPERATING CHARACTERISTICS OF THE CFAR RADAR RECEIVER IN LOG-NORMAL
CLUTTER ENVIRONMENT

SADRŽAJ- Da bi se očuvala konstantna verovatnoća lažnog alarma (CFAR) radarskog prijemnika u uslovima nestacionarnog klatera, neophodno je formirati adaptivni prag detekcije na bazi estimacije parametara klatera, ili primeniti neku neparametarsku proceduru detekcije. Klasično rešenje, bazirano na Rejljevoj statistici ne daje prihvatljive rezultate u uslovima realnijeg log-normal klatera, tako da se mora tražiti drugi pristup. Na osnovu modifikovanog metoda Goldsteina, koji je predložio korišćenje t-statistike uzoraka klatera iz n-rezolucioni ćelija, izračunate su radne karakteristike radarskog prijemnika u log-normal klaterskom okruženju, koristeći Monte Carlo metodu sa fitovanjem po metodi najmanjih kvadrata. Rezultati su dati u vidu grafika, pogodnih za praktičnu upotrebu.

ABSTRACT- In order to maintain constant false alarm rate (CFAR) in radar receiver operating in nonstationary clutter, some sort of adaptive threshold is needed, or apply a nonparametric procedure. The classical solution which assumes the Rayleigh statistics, is inadequate in the case of more realistic log-normal distribution, so another approach must be considered. Following the modified method of Goldstein, who proposed the use of t-statistics of the clutter samples from n-resolution cells, operating characteristics of the radar receiver in log-normal clutter is computed, using Monte Carlo method with least-square fitting. The results are presented in graphic form, suitable for practical purposes.

1. UVOD

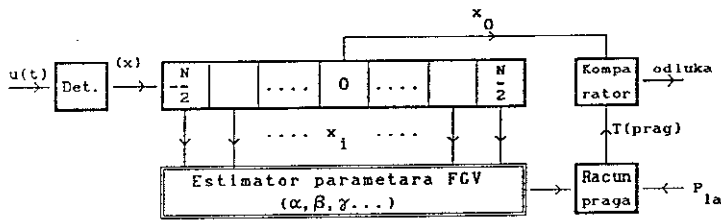
U radarskim uredajima sa automatskom detekcijom i ocenom parametara signala posredstvom digitalnih ekstraktora, jedan od osnovnih problema je održavanje konstantne verovatnoće lažnog alarma (P_{1a}) za koju je projektovan i optimiziran ekstraktor. Naime, u realnom radarskom okruženju, nivo klatera se menja u širokom dinamičkom opsegu od jedne do druge rezolucione ćelije, odnosno od jedne do druge grupe ćelija. Da bi se u tim uslovima očuvala konstantna P_{1a} , tj. realizovala CFAR (Constant False Alarm Rate) karakteristika detekcije, moguće je primeniti dva postupka:

-Na bazi usvojenog statističkog modela klatera, izvršiti estimaciju nepoznatih parametara raspodele, korišćenjem N uzoraka klatera iz N referentnih rezolucioni ćelija koje okružuju ćeliju posmatranja, tzv.

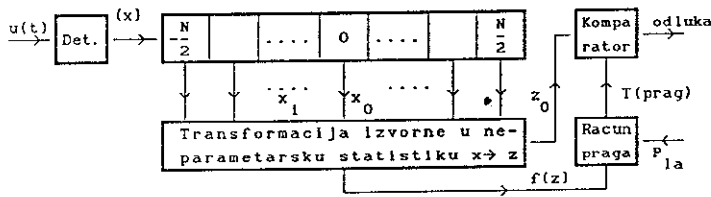
test ćeliju i sa tako estimiranim parametrima postaviti prag detekcije u test ćeliji za unapred datu P_{la} . Ovo se mora obavljati automatski, u realnom vremenu tokom pretraživanja i to za svaku rezolucionu ćeliju koja u datom trenutku predstavlja test ćeliju. Ovakva procedura detekcije spada u klasu detekcije sa adaptivnim, odnosno slučajnim pragom i bitno se razlikuje od klasične procedure sa fiksnim pragom, koja se primenjuje u slučaju apriori poznatih parametara raspodele.

-Određenim transformacijama izvorne raspodele formirati takvu ststistiku uzoraka, koja neće zavisiti od parametara izvorne raspodele, tako da se može primeniti procedura sa fiksnim pragom detekcije. Ovakva procedura spada u klasu neparametarskih procedura.

Generalni algoritmi obe procedure simbolično su pretstavljjeni na sl. 1a i 1b.



a. Estimacija parametara



b. Transformacija ststistike

Sl.1. Algoritmi rada CFAR procesora

Klasična CFAR procedura, implementirana u većini postojećih radara, bazira na usvojenom modelu klatera koji se podčinjava Gausovoj, odnosno iz nje izvedenoj Rejlijevoj jednoparametarskoj statistici. Parametar podložan estimaciji je standardno odstupanje σ izvorne Gausove raspodele, tako da je:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

gde je $\hat{\sigma}$ estimirana vrednost σ , a x_i su uzorci klatera iz N referentnih ćelija. Prag detekcije T u test ćeliji je srazmeran sa $\hat{\sigma}$, tj.: $T=k\hat{\sigma}$, gde je k zavisno od usvojene P_{1a} i glasi (lit.1):

$$k = \sqrt{N \left(P_{1a}^{-\frac{1}{N}} - 1 \right)} \quad (2)$$

Pošto je $\hat{\sigma}$ slučajna veličina, to je i T slučajna veličina, tako da se verovatnoća detekcije P_d mora definisati kao srednja vrednost \bar{P}_d , tj.:

$$\bar{P}_d = \int_0^{\infty} P_d(T, q) w(T) dT \quad (3)$$

gde je $w(T)$ funkcija gustine verovatnoće (FGV) slučajne veličine T , dok je $P_d(T, q)$ verovatnoća detekcije za slučaj fiksnog praga T i odnosa signal/šum q . Na pr., u slučaju usamljenog eho signala od nefluktuirajućeg cilja, $P_d(T, q)$ predstavlja poznatu Q funkciju Marcuma. Ovaj proračun prvi je obavio Finn i dr. (lit 1.), a zatim i drugi autori, tako da se može smatrati da je proračun radnih karakteristika prijemnika sa CFAR procesorom u uslovima Rejlijevog klatera, uspešno rešen.

To se, međutim, ne može reći za CFAR procesor u uslovima mnogo realnije log-normal statistike klatera, za koji ima znatno manje podataka u literaturi. Cilj ovog rada je da se daju neki novi kvantitativni rezultati u analizi radnih karakteristika radarskog prijemnika sa CFAR procesorom u log-normal klaterskom okruženju.

2. ANALIZA CFAR PROCESORA U USLOVIMA LOG-NORMAL KLATERA

Na bazi velikog broja eksperimentalnih podataka (lit.3) utvrđeno je da log-normal statistika klatera bolje opisuje realno radarsko okruženje nego Rejlijeva statistika, koja se dugi niz godina isključivo koristila za analizu karakteristika detekcije radara. S tim u vezi pojavio se i problem nalaženja i odgovarajuće CFAR procedure, jer se ispostavilo da klasičan Rejlijev procesor nema CFAR karakteristike u log-normal klateru (lit.2). Jedan od problema je u tome, što je log-normal raspodela, za razliku od Rejlijeve, dvoparametraska. Naime, ona glasi:

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln x - \ln \mu)^2} \quad (4)$$

gde je x refleksivnost klatera, a σ i μ su parametri raspodele, koje po prvoj od navedenih CFAR procedura, treba estimirati na bazi N uzoraka klatera. Ovo dovodi do znatnih komplikacija kako u proračunu karakteristika, tako i u implementaciji odgovarajućeg algoritma rada CFAR procesora. Goldstein (lit.2), međutim, predlaže drugi postupak, koji se sastoji u formiranju "t-statistike" prethodno transformisanih uzoraka, koja dovodi do FGV koja ne zavisi od parametara izvorne raspodele. Naime, nakon transformacije: $z = \ln x$, dobija se na osnovu (4):

$$w(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(z - \ln \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

što znači, da slučajna veličina z ima Gausovu raspodelu sa varijansom σ^2 i srednjom vrednošću $\ln \mu$. Sada se može formirati klasična t-statistika, koja glasi:

$$t = \frac{z_0 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(z_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_j \right)^2}} \quad (6)$$

gde je z_0 vrednost promenljive z u test ćeliji, a z_i su uzorci promenljive z u N referentnih ćelija koje okružuju test ćeliju. Slučajna veličina t ima, kao što je poznato, Studentovu FGV, koja se izmdu ostalog karakteriše i time, što ne zavisi od parametara σ i $\ln \mu$, već isključivo od broja N referentnih ćelija. Ona glasi:

$$w(t) = \frac{\Gamma(\frac{k+1}{2})}{\sqrt{\pi k} \Gamma(\frac{k}{2})} \left(1 - \frac{t^2}{k} \right)^{-\frac{k+1}{2}} \quad (7)$$

gde je $\Gamma(x)$ gama funkcija, a $k=N-1$ broj stepena slobode.

Treba napomenuti, da se transformacija: $z = \ln x$ može automatski obaviti uvođenjem prijemnika sa logaritmaskom dinamičkom karakteristikom, što je inače normalan slučaj kod radarskih prijemnika u uslovima jakih klatera.

Sada se može primeniti standardan Nojman-Pirsonov postupak u računu radnih karakteristika. Naime, potreban prag detekcije T za slučajnu

veličinu t , dobija se rešavanjem izraza (8) po T :

$$P_{1a} = \int_T^{\infty} w(t) dt \quad (8)$$

gde je $w(t)$ dat jednačinom (7), pod uslovom da z_0 sadrži samo klater (koristan signal osustvuje). Verovatnoća P_d je sada:

$$P_d = \int_T^{\infty} w_1(t) dt \quad (9)$$

gde je $w_1(t)$ FGV veličine t pod uslovom da z_0 sadrži smešu signal klater. Izračunavanje radnih karakteristika prijemnika ovakvom klasičnom procedurom nailazi na velike teškoće jer se mora primeniti četverostruka numerička integracija. U literaturi (lit.2) su stoga predloženi neki aproksimativni postupci, ali koji važe isključivo za velike odnose signal/klater. Rezultati, koji bi važili za manje odnose signal/klater, što je češći slučaj u radarskoj praksi, nisu uočeni u dostupnoj literaturi. U ovom radu daje se postupak analize CFAR procesora pri proizvoljnom odnosu signal/klater, čime se otklanjaju ograničenja navedenih aproksimativnih metoda.

Predloženi postupak delimično bazira na Goldstein-ovoj ideji. Naime, navedena t -statistika koristi se samo u prvom koraku analize, tj. za ustanovljenje veze između željene P_{1a} i potrebnog praga detekcije, a zatim se formira poseban postupak za analizu radnih karakteristika prijemnika. Osnovu postupka čini prelaz sa t -promenljive, čija je fizička interpretacija nejasna, na konkretnu promenljivu koja predstavlja napon u test ćeliji. Ova veličina može biti bilo smeša signal/klater, pri čemu se ona pokorava Log-Rajsovom zakonu, bilo čist klater sa izvornom Log-normal raspodelom, odnosno sa Gausovom, transformisanom raspodelom. U procesu detekcije treba ustanoviti koja je od ovih raspodela prisutna, koristeći Nojman-Pirsonov kriterijum. Naime, postavlja se hipoteza o prisustvu korisnog signala u ćeliji posmatranja, a zatim se ispravnost te hipoteze testira ispitivanjem na prag T . Na osnovu klasične teorije detekcije, može se pokazati (lit.3), da optimalni detektor u navedenim uslovima obavlja sledeću operaciju:

$$\ln z_0 \geq \sigma T + \ln \mu \quad (10)$$

gde je z_0 napon na ulazu komparatora, a T prag detekcije. Pošto su nam σ i $\ln(\mu)$ nepoznati, to možemo sada na klasičan način, koji važi za CA CFAR procesor (sa Gausovom statistikom), da vršimo estimaciju standardnog odstupanja σ i srednje vrednosti $\ln(\mu)$ Gausove raspodele. Prave, a nama

nepoznate vrednosti σ i $\ln(\mu)$, zamenićemo estimiranim vrednostima $\hat{\sigma}$ i $\hat{\ln}(\mu)$:

$$m = (\hat{\ln}\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i) \quad , \quad \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - m)^2} \quad (11)$$

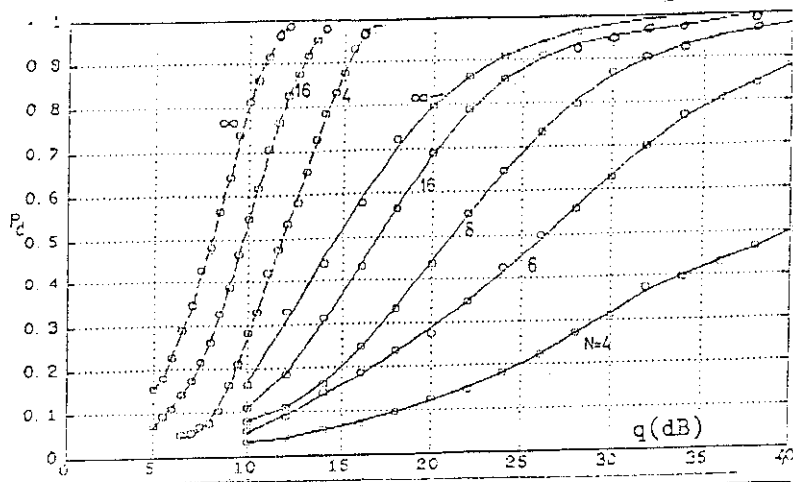
Zakon optimalnog detektora sada glasi:

$$\ln z_0 \geq \hat{\sigma}T + m \quad (12)$$

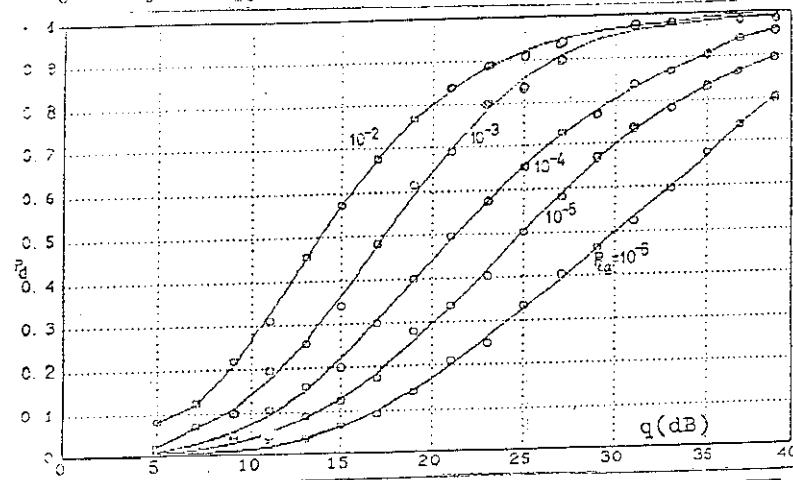
Kao što se može uočiti, predloženi postupak ustvari predstavlja kombinaciju estimacione i neparametarske CFAR procedure, o kojima je bilo reči u Uvodu

Na bazi ovakvog pristupa izrađen je računarski program MCCFLGN.M u jeziku MATLAB koji daje kompletno rešenje ovog problema. Naime, program daje verovatnoću detekcije P_d u zavisnosti od odnosa signal/klater za proizvoljan broj referentnih ćelija i zadatu P_{fa} . Program je interaktivnog tipa i relativno je jednostavan, pa se može implementirati na PC računaru sa operativnom memorijom od najmanje 640 kB i hard diskom. Za izračunavanje potrebnog praga detekcije u funkciji broja referentnih ćelija i zadate P_{fa} formiran je potprogram STD.M.

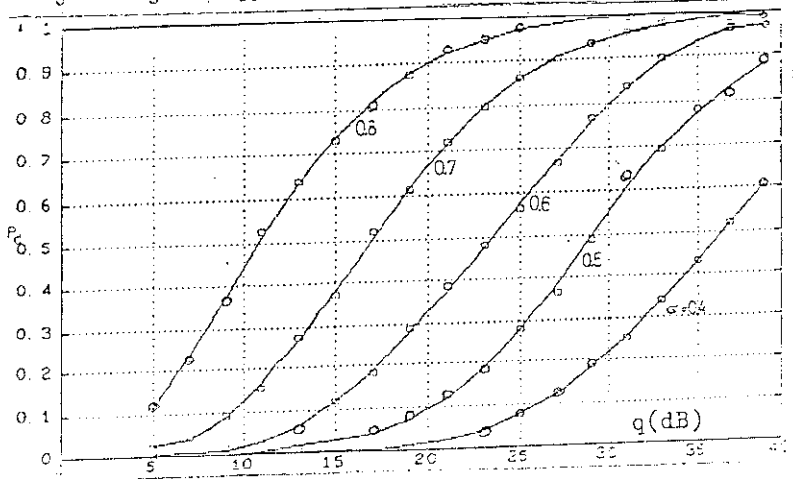
U računu radnih karakteristika CFAR prjemnika korišćena je Monte Carlo metoda. U okviru rada formirani su potprogrami za generisanje sledećih slučajnih brojeva: log-normal (za klater u referentnim ćelijama), log-Rajsovi (za smešu signal/klater u test ćeliji) i Rejljevi (za fluktuirajući cilj tipa SWERLING-1). Rezultati za niz diskretnih vrednosti odnosa signal/klater, fitovani su metodom najmanjih kvadrata sa polinomom šestog stepena. Reprezentativni rezultati ove analize predstavljeni su na sl. 2, 3 i 4. Na sl. 2 data je zavisnost verovatnoće detekcije P_d od odnosa signal/klater q , sa brojem referentnih ćelija N kao parametrom i sa vrednošću $P_{fa} = 10^{-3}$. Uočava se veliki uticaj broja referentnih ćelija na karakteristike detekcije, posebno za manje vrednosti N . Kriva obeležena sa ω , predstavlja u suštini slučaj detekcije sa determinisanim pragom, što je teorijski ekvivalentno uzimanju beskonačno mnogo referentnih ćelija. Sa slike se istovremeno mogu odrediti i tzv. "gubici CFAR procesora", koji predstavljaju razliku u dB odnosa signal/klater: $q_N - q_\omega$ za dato P_d . Na pr., za $P_d = 0.8$ i $N = 16$, $q_\omega = 20$ dB, dok je $q_N = 22.5$ dB, pa su gubici 2.5 dB. Za $N = 8$ ovi gubici su 7.5 dB, a za $N = 6$ oni iznose čitavih 16 dB, iz čega se vidi značaj broja ćelija N . Na slici su radi uporedenja date isprekidanom linijom karakteristike detekcije klasičnog CA CFAR procesora za Rejljev klater, za $N = 4, 16$ i ω . Uočava se da su Rejljevi klateri daleko "poželjniji" kao radarsko okruženje. Za račun CA CFAR karakteristika, razvijen je program CACF.M.



S1.2
 $P_d = f(q, N)$



S1.3
 $P_d = f(q, P_{1s})$



S1.4
 $P_d = f(q, \sigma)$

Na sl.3 data je zavisnost karakteristika detekcije od usvojene vrednosti P_{la} i to za $P_{la}=10^{-2}$, 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} i 10^{-6} . Uočava se porast potrebnog odnosa signal/klater sa smanjivanjem vrednosti zadate verovatnoće lažnog alarma, što je i logično. Za ovu familiju krivih uzeta je tipična vrednost parametra σ log-normal raspodele od $\sigma=0.6$.

Slika 4 daje zavisnost karakteristika detekcije od parametra σ log-normal raspodele klatera, pri čemu su kao reprezentativne vrednosti uzete: $\sigma=0.4$, 0.5 , 0.6 , 0.7 i 0.8 . Familje krivih odnose se na vrednost verovatnoće lažnog alarma od $P_{la} = 10^{-3}$.

3. ZAKLJUČAK

U radu je dat postupak analize radnih karakteristika radarskog prijemnika koji koristi CFAR procesor prilagođen radu u uslovima log-normal klatera. Metoda analize bazira na modifikovanoj metodi Goldsteina (lit.2) u kojoj se koristi t-statistika uzoraka iz N referentnih ćelija koje okružuju test ćeliju. Za razliku od aproksimativnih metoda koje predlaže Goldstein i koje važe isključivo za velike odnose signal/klater, metoda prikazana u ovom radu daje rezultate koji važe za proizvoljne odnose signal/klater. U numeričkim izračunavanjima radnih karakteristika primenjena je Monte Carlo metoda, usled izuzetne složenosti direktnog računanja, koje zahteva četvorostruku numeričku integraciju. Razvijeni su računarski programi za ovu analizu, a reprezentativni rezultati za neke tipične vrednosti pojedinih parametara, prikazani su grafički na sl.2,3 i 4.

Upoređenje ovih rezultata sa rezultatima koji važe za Rejlijevu statistiku klatera, može se zaključiti da su uslovi rada rada u log-normal klateru daleko teži, što se ispoljava u znatnom povećanju potrebnog odnosa signal/klater za iste verovatnoće detekcije i lažnog alarma i za isti broj referentnih ćelija.

4. LITERATURA

1. H.M. FINN and R.S. JOHNSON: "Adaptive Detection Mode with Threshold Control as a Function of Sampled Clutter Level Estimates", RCA Review, Vol.29, No.3, September 1968.
2. G.B. GOLDSTEIN: "False Alarm Regulation in Weibul Clutter", IEEE Trans. on AES, Vol. AES-9, No.1, January 1973.
3. D.C. SCHLEHER: "Automatic Detection and Radar Data Processing", Artech