

CFAR DETEKCIJA JEDNE KLASSE TRANZIJENTNIH AKUSTIČKIH SIGNALA

Miljko Erić, Vojnotehnički institut, Katanićeva 15, Beograd

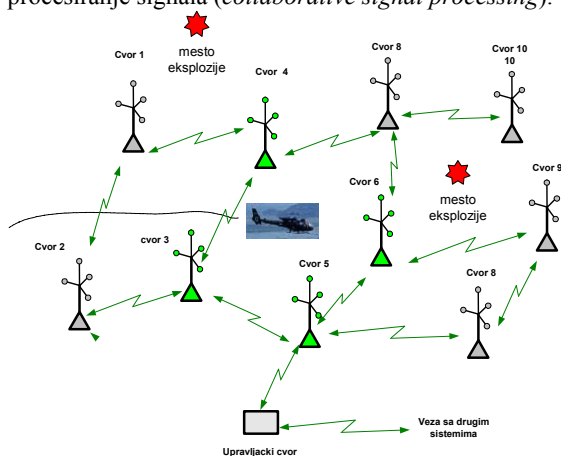
Abstract: U ovom radu prikazani su eksperimentalno dobijeni rezultati primene dve varijante CFAR detektora pri detekciji jedne klase akustičkih tranzijentnih signala tipa pucanj/eksplozija koji se generišu pri upotrebi artiljerijskih oruđa u realnim uslovima.

1. UVOD

Tranzijentni akustički signali se generišu pri upotrebi oruđa različitih kalibara i namene, eksplozijama mina i projektila, havarijama industrijskih postrojenja, različitim prirodnim fenomenima i slično. U ovom radu problem detekcije tranzijentnih akustičkih signala se razmatra u kontekstu distribuiranih senzorskih sistema.

U novije vreme vrše se intezivna teorijska i praktična istraživanja u oblasti distribuiranih senzorskih sistema [1]. Radi se o sistemima koji se sastoje od velikog broja senzorskih čvorova koji se obično napajaju baterijski. Na čvorove se vezuje jedan ili više istih ili različitih senzora. Svaki od čvorova sadrži akvizicione, memorijske, signal procesorske i komunikacione resurse. Čvorovi najčeće uvezuju u senzorsku mrežu ADHOC tipa u kojoj su protokoli komuniciranja realizovan tako da optimiziraju potrošnju energije na čvorovima.

Na svakom od čvorova vrši se akvizicija signala sa senzora, detekcija pobude, klasifikacija i identifikacija (prepoznavanje) pobude, određivanje lokacije pobude (lokalizacija) i praćenje jednog ili više izvora pobude. Navedeni procesi, a pogotovu procesi lokalizacije i praćenja izvora pobude, zahtevaju intezivnu komunikaciju između senzorskih čvorova i primenu distribuiranih algoritama za procesiranje signala (*collaborative signal processing*).



Sl.1. Primer hipotetičkog distribuiranog senzorskog sistema za nadgledanje bojišta (battlefield surveillance) tipa ADHOC senzorske mreže

Predmet istraživačkog projekta u okviru kojih je nastao ovaj rad je distribuirani senzorski sistem koji treba da omogućiti detekciju, lociranje (lokalizaciju), klasifikaciju i

identifikaciju akustičkih izvora koji generišu tranzijentne odnosno impulsne akustičke signale tipa pucanj/eksplozija. Sistem se sastoji od minimalno 6 senzorskih čvorova. Sistem treba da detektuje akustičke signale u uslovima kada se više tranzijentnih signala preklapaju vremenski i spektralno (*Multiple incident signal scenario*) što odgovara situaciji gde se na mestu prijema superponiraju signali različitih izvora ili kada se superponiraju replike signala istog izvora u uslovima višestrukog prostiranja. Optimalno rešenje za detekciju u ovim uslovima su detektori formulisani u prostorno-vremensko-frekvencijskom domenu. Iz toga proističe potreba za korišćenjem mikrofonskog niza na svakom od čvorova. Kontinualna detekcija na bazi detektora u prostorno-vremensko-frekvencijskom domenu zahteva žestoku signal procesorske i memorijske resurse na senzorskom čvoru što ugrožava autonomiju napajanja čvora. Proces detekcije na bazi detektora u prostorno-vremensko-frekvencijskom domenu dodatno komplikuje činjenica da su akustički signali širokopojasni u prostorno-frekvencijskom domenu što zahteva processing u prostorno-frekvencijskom domenu.

Tranzijentni signali traju kratko u odnosu na ukupno trajanje opservacionog vremenskog intervala i nepoznat je trenutak njihovog pojavljivanja. Iz navedenih razloga ideja je da se process detekcije tranzijentnih signala u ovakvom distribuiranom senzorskom sistemu vrši u dve faze. U prvoj fazi vrši se detkcija signala primenom nekog od energetskih detektora čija implementacija u realnom vremenu ne zahteva žestoke signal procesorske resurse. To znači da se process višekanalne akvizicije signala sa svih mikrofona i energetske detekcije korišćenjem signala sa jednog mikrofona odvija kontinualno. Kada se na bazi energetskog detektora detektuje tranzijentna pobuda, tada se angažuju snažniji procesorski resursi na čvoru (koji se do tog trenutka u režimu minimalne potrošnje energije), i vrši se detekcija primenom detektora u prostorno-frekvencijskom domenu u okviru koje se detektuje broj superponiranih tranzijentnih signala na osnovu čega se vrše dalji procesi prostornog filtriranja, merenja parametara i lokalizacije za svaki od detektovanih tranzijentnih signala.

Energetski detector treba da obezbedi što pouzdaniju detekciju tranzijentne pobude sa što manjom verovatnoćom lažnog alarma i što manjom verovatnoćom propuštanja detekcije u uslovima nestacionarnosti ambijentalnog šuma.

U ovom radu prikazani preliminarni rezultati primene dve varijante energetskog detektora sa konstantnom verovatnoćom lažnog alarma (Constant False Larm Rate – CFAR) za detekciju realnih signala tipa pucanj/eksplozija. U prvoj varijanti, CFAR detektor je primenjujen na ukupnu energiju signala (misli se na energiju signala u ukupnom frekvencijskom opsegu u kome se akvizira akustički signal) a u drugoj CFAR detektor se sukcesivno primenjuje na energiju procenjenu po pojedinim frekvencijskim podopsezima.

Teorija CFAR detekcije je dobro razrađena u do sada objavljenim radovima, pogotovu u oblasti radarske tehnike gde se CFAR detekcija često koristi. Ovaj rad nema za cilj da se bavi teorijskim aspektima CDFAR detekcije, već je prevashodan interes da se sagleda kakve rezultate će dati ova vrsta detektora pri detekciji tranzijentnih akustičkih signala tipa pucanj/eksplozija koji se generišu pri korišćenju artiljerijskih oruđa u realnim uslovima upotrebe. Takođe, potrebno je odgovoriti na pitanja u kom delu frekvencijskog opsega su detektibilni tranzijentni akustički signali na bazi CFAR detektora, na koji način izbor parametara CFAR detektora utiče na performance detekcije, da li se sa istim parametrima detektora mogu dobiti praktično zadovoljavajući rezultati detekcije u istim uslovima ambijentalnog šuma i za tranzijentne signale različitih akustičkih izvora (npr. pucanj i eksplozija)

1. ENERGETSKA CFAR DETEKCIJA

Energetska detekcija zasniva se na uporedjenju energije akustičkog signala sa pragom pri čemu se energija procenjuje unutar klizećeg vremenskog prozora zadate dužine.

Energetska detekcija sa fiksnim pragom nije pogodna za praktičnu primenu u uslovima nestacionarnosti kako ambijentalnog akustičkog šuma tako i željenog akustičkog signala jer dovodi do pojave lažnog alarma koji je posledica nestacionarnosti. Iz navedenih razloga u praksi se najčeće koriste energetske detekcije sa konstantnom verovatnoćom lažnog alarma (Constant False Alarm Rate), u daljem tekstu CFAR detekcije.

Energetska CFAR detekcija zasniva se na ideji da se prag detekcije adaptivno menja tako da bude u funkciji srednje vrednosti i varijanse ambijentalnog šuma. Ukoliko šum ima Gausovu raspodelu amplituda u zadatom opservacionom intervalu, tada se prag može adaptivno izabrati tako da se obezbedi konstantna verovatnoća lažnog alarma.

2.1. Energetska CFAR detekcija na osnovu ukupne energije signala

Ova varijanta energetske CFAR detekcije zasniva se na upoređenju ukupne izmerene energije signala u zadatom vremenskom intervalu i zadatom frekvencijskom opsegu sa zadatim pragom. Ukoliko je izmerena energija signala iznad praga smatra se da je signal detektovan, u protivnom signal nije detektovan. Proces energetske CFAR detekcije vrši se kroz dve faze i to fazu inicijalizacije i fazu detekcije. U fazi inicijalizacije pretpostavlja se da postoji samo šum. Počevši od trenutka t_0 vrši se inicijalna procena srednje vrednosti $\mu(0)$ i standardne devijacije $\sigma(0)$ energije šuma. U fazi detekcije pri svakom n -tom odmerku signala vrši se upoređenje izmerene energije signala $y(n)$ sa funkcijom praga $T(n)$. Uz pretpostavku da je šum Gausov, prag $T(n)$ se određuje na sledeći način: $T(n) = \mu(n) + C\sigma(n)$. Izborom vrednosti konstante C se obezbeđuje konstantna verovatnoća lažnog alarma P_{FA} (Constant False Alarm Ratio-CFAR) koja se može izraziti na sledeći način:

$$P_{FA} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_C^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) du \quad (1)$$

Odluka o tome da li je signal detektovan ili ne donosi se na osnovu sledećeg jednostavnog pravila odlučivanja:

$$\gamma(n) = \begin{cases} 1 & y(n) > T(n) \\ 0 & y(n) < T(n) \end{cases} \quad (2)$$

Signal je detektovan u n -tom trenutku vremena ukoliko je $\gamma(n) = 1$ a nije detektovan ukoliko je $\gamma(n) = 0$. Ukoliko je $\gamma(n) = 1$ tada vrednost praga u n -tom trenutku vremena ostaje nepromenjena odnosno $T(n) = T(n-1)$, uprotivnom, vrednost praga se ažurira prema sledećem:

$$\begin{aligned} \mu(n) &= (1-\alpha)\mu(n-1) + \alpha y(n) \\ \sigma^2(n) &= (1-\alpha)\sigma^2(n-1) + \alpha[y(n) - \mu(n)]^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$T(n) = \mu(n-1) + C\sigma(n)$$

gde α predstavlja faktor pamćenja, koji poprima vrednost između 0 i 1 i aproksimativno predstavlja inverznu vrednost perioda usrednjavanja pri proceni srednje vrednosti $\mu(n)$ i standardne devijacije $\sigma(n)$ energije signala.

2.1. Energetska CFAR detekcija na osnovu energije signala u frekvencijskim podopsezima

U literaturi ova varijanta CFAR detektora je poznata pod nazivom *sub-band energy based CFAR (SE CFAR) detector* [2]. Ideja ove varijante CFAR detektora stasoj se u pretpostavci da ambijentalni šum i tranzijentni akustički signal nemaju iste statističke i spektralne karakteristike u čitavom akviziranom frekvencijskom opsegu i na pretpostavci da se u pojedinim frekvencijskim opsezima mogu dobiti bolji rezultati CFAR detekcije nego primenom CFAR detekcije na osnovu ukupne energije signala merenom u ukupnom akviziranom frekvencijskom opsegu. Postoje široke mogućnosti optimizacije broja, spektralnih širina, i rastojanja frekvencijskih podopsega. U radu je korišćena banka FIR filtera iste širine propusnog opsega na osnovu koje je realizovana varijanta spektrograma koja se zasniva na korišćenju banke filtera. CFAR detector je primenjen na energiju signala na izlazu svakog od filtera. Implementacija banke FIR filtera predstavlja i početni korak procesa određivanja smera dolaska signala na pazi prostorno-frekvencijske analize primenom MUSIC algoritma i procesa prostorno frekvencijske filtracije/selekcije tranzijentnih signala iz zadatih smerova dolaska.

3. REZULTATI CFAR DETEKCIJE REALNIH TRANZIJENTNIH AKUSTIČKIH SIGNALA

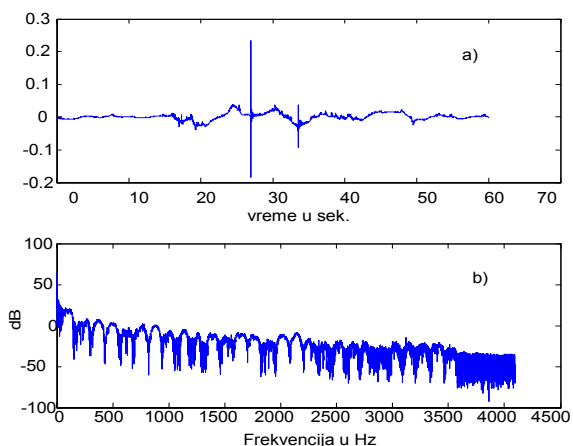
Snimanja akustičkih signala vršena su u više navrata na jednom od poligona Tehničkog Obitnog Centra u toku redovnih planskih ispitivanja artiljerijskih oruđa različitih kalibara i dometa, sl.1. Snimanja su obavljena korišćenjem raspoložive merno-akvizicione opreme proizviđača Brjuel Kjoer (PULSE sistem i infrazvučni mikrofoni MK 4193 čija je donja granična frekvencija 70 mHz) Mikrofoni su postavljeni u geometriju troelementnog kružnog mikrofonskog niza. Frekvencija odmeravanja signala je 8.192 kHz. Zapisivane su kontinualno simultano akvizirani uzorci signala sa tri mikrofona u sekvencama od po 1 minut. Na ovaj način je obezbeđeno da se u istom kontinualnom

vremenskom zapisu budu obuhvaćeni akustički signali koji se generišu i pri pucanju i pri eksploziji projektila. Udaljenost mesta snimanja od vatrenog položaja je iznosila oko 7.3 km, a od mesta eksplozije projektila od 1 do 4 km što je zavisilo od dometa artiljerijskog oruđa. Merenja su vršena u različitim klimatskim uslovima (spoljašnja temperatura je bila u opsegu od -5 do +15 °C.



Sl.1. Fotografije sa snimanja akustičkih signala artiljerijskih oruđa

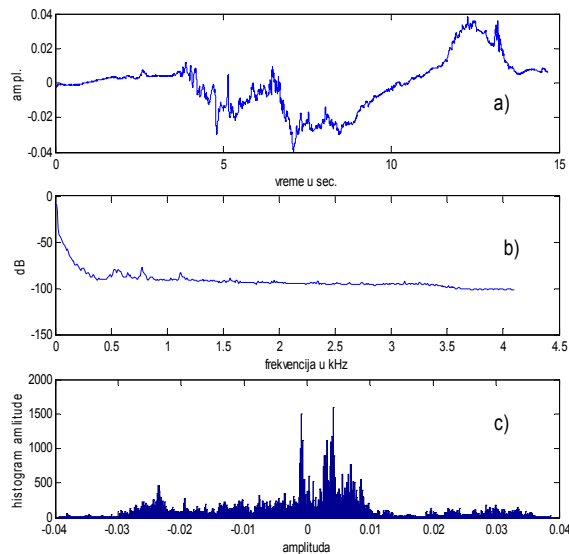
Na slici 2. a) prikazan je signal tipa pucanj/explozija a na sl. 2.b. amplitudski spektar signala pucanje/explozija. Uočava se da postoji periodičnost u amplitudskom spektru signala i da energija signala opada sa porastom frekvencije.



Sl.2. a) Signal pucanj/explozija, b) amplitudski spektar signala

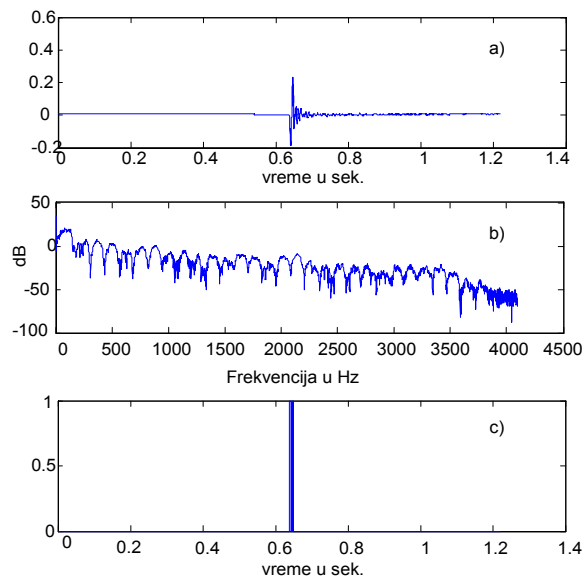
Na sl.3.a. prikazan je signal na sl. 3.b. spektralna gustina snage a na sl. 3.c. histogram amplituda signala ambijentalnog šuma. Sa slike 3.a. se uočava da je signal ambijentalnog šuma izrazito nestacionaran. Sa slike 3.b. se uočava da je energija signala ambijentalnog šuma

koncentrisana u frekencijskom opsegu do 300 Hz, a na slici 3.c se uočava da signal ambijentalnog šuma nema Gausovu raspodelu amplitude



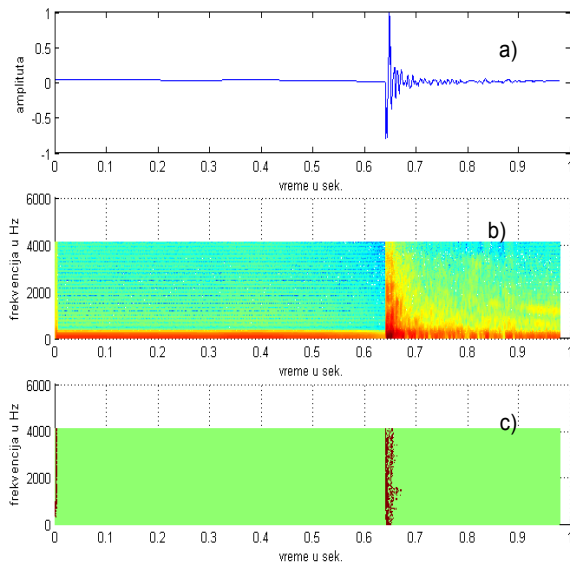
Sl.3. a) Signal amb. šuma b) Spektralna gustina snage signala ambijentalnog šuma c) Histogram amplitude signala ambijentalnog šuma

Na sl. 4.a. prikazan je signal pucnja, na sl. 4.b. amplitudski spektar signala pucnja a na slici 4.c. rezultat CFAR detekcije na bazi ukupne energije akustičkog signala pucnja.



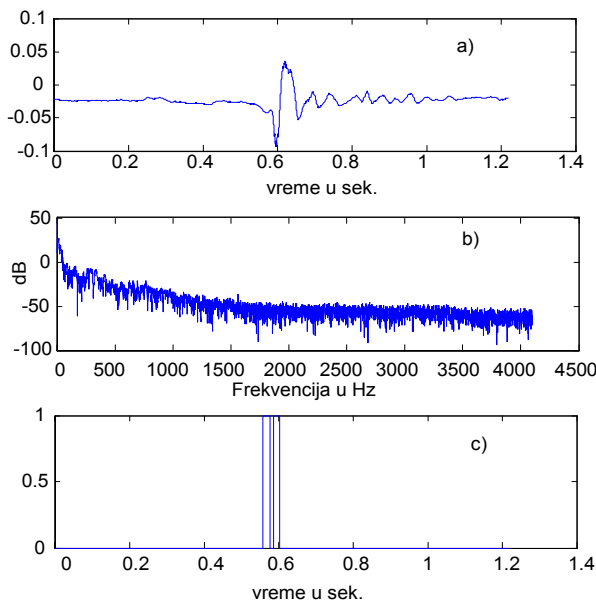
Sl.4. a) Signal pucnja b) amplitudski spektar signala pucnja c) Rezultat CFAR detekcije na bazi ukupne energije signala pucnja

Na sl. 5.a. prikazan je signal pucnja, na sl. 5.b. spektrogram signala pucnja dobijen pomoću banke filtera a na sl.5.c. rezultat CFAR detekcije dobijen na bazi energije signala na izlazu banke filtera.



Sl. 5. a) Signal pucnja b) Spectrogram signala pucnja dobijen pomoću banke filtera c) Rezultat CFAR detekcije na bazi energije signala na izlazu banke filtera

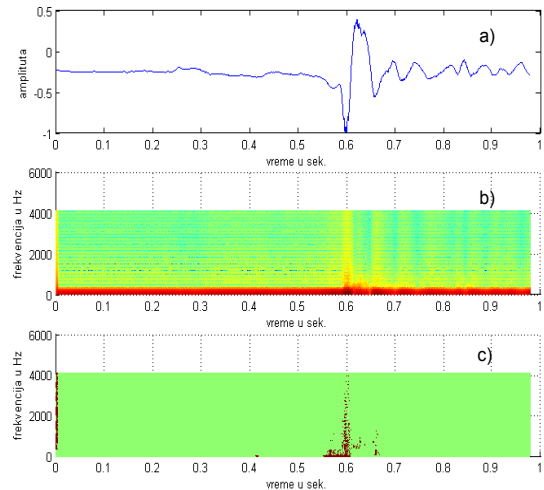
Na sl. 6.a. prikazan je signal pucnja, na sl. 6.b. amplitudski spektar signala pucnja a na slici 6.c. rezultat CFAR detekcije na bazi ukupne energije akustičkog signala pucnja.



Sl.6. a) Signal pucnja b) amplitudski spektar signala pucnja c) Rezultat CFAR detekcije na bazi ukupne energije signala pucnja

Na sl. 7.a. prikazan je signal eksplozije na sl. 7.b. spektrogram signala eksplozije dobijen pomoću banke filtera a na sl.7.c. rezultat CFAR detekcije signala eksplozije dobijen na bazi energije signala na izlazu banke filtera.

U svim slučajevima postavljeni su isti parametric CFAR detektora : $\alpha = 0.0001$, $C = 6.5$.



Sl. 7 a) Signal eksplozije b) Spectrogram signala eksplozije dobijen pomoću banke filtera c) Rezultat CFAR detekcije na bazi energije signala na izlazu banke filtera

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih preliminarnih rezultata kao i na osnovu rezultata primene CFAR detektora na veliki broj signala tipa pucanj/eksplozija orudja različitih kalibara, koji zbog obima rada nisu mogli da budu prezentirani u ovom radu, može se zaključiti sledeće:

a) Za isti tip orudja signali pucnja u najvećem broju slučajeva traju kraće od signala eksplozije, imaju širi spektar od signala eksplozije i detektibilni su na bazi CFAR detektora u frekvijskom opsegu do 4 kHz. CFAR detector na bazi ukupne energije signala daje praktično sasvim prihvatljive rezultate pri detekciji signala pucnja. Periodičnost u spektru signala pucnja posledica je periodičnosti koja je sadržana u strukturi tranzijentnog signala pucnja i predstavlja identifikaciono obeležje za određene klase orudja.

b) Signali eksplozije imaju duže trajanje od signala pucnja istog orudja i njihova energija je koncentrisana o oblasti niskih frekvencija. Ovi signali su varijabilniji u pogledu vremenskih i spektralnih karakteristika od signala pucnja i komplikovaniji su za detekciju. CFAR detector na bazi ukupne energije ima tendenciju da u slučaju ovih signala detektuje više sukcesivnih pikova. Ukoliko se detekcija oba tipa signala vrši sa istim CFAR detektorom, što je cilj, tada parametri detektora treba da budu optimizovani za detekciju signala eksplozije.

5. LITERATURA

[1] I.F.Akyildiz et al. "A survey on Sensor Networks", IEEE Communication Magazine, August 2002. pp.102-114
 [2] X. Sheng "Collaborative Energy Based Source Localization and Tracking in Wireless Sensor Network System" Preliminary Report, July 17, 2003

Abstract: Some experimental results of CFAR detection of a class of transient acoustic signals are presented in this paper.

CFAR Detection of a class of transient acoustic signals
 Miljko Erić