

Aleksa Zejak  
 Vojnotehnički institut  
 Katanićeva 15, Beograd  
 Ervin Zentner  
 Elektrotehnički Fakultet  
 Unska 3, Zagreb

## KOMPARATIVNA ANALIZA DOPPLEROVE OSJETLJIVOSTI FAZNIH SEKVENCI ZA KOMPRESIJU RADARSKOG IMPULSA

### THE DOPPLER SENSITIVITY COMPARATIVE ANALYSIS OF PHASE SEQUENCES FOR RADAR PULSE COMPRESSION

**SAŽETAK:** U radu je dat pregled faznokodiranih signala sa težištem na komparativnoj analizi Dopplerovih svojstava tih signala. Predmet istraživanja je efekt Dopplerovog pomaka frekvencije primljenog signala na glavni snop i bočne snopove komprimovanog signala.

**ABSTRACT:** This paper reviews properties of the phase coded waveforms, with focuses on the comparative analysis of the Doppler characteristics of these waveforms. The subject of the investigation is the effect of the received signal Doppler shift on the mainlobe and the sidelobes of the compressed coded signal.

#### 1. UVOD

Radari sa složenim radarskim signalom ili radari sa kompresijom impulsa predstavljaju najmodernije radarske sisteme sa stanovišta procesiranja signala.

Veoma široki frekventni spektar se kod radara postiže primjenom unutar impulsne modulacije. Kao klasičan postupak koristi se linearna frekventna modulacija (LFM). Kod najmodernijih radara ovog tipa najčešće se koristi digitalna ugaona modulacija pri čemu je modulišuci signal neka od pseudoslučajnih binarnih ili polifaznih sekvenci.

Radari su u svojoj osnovi namijenjeni za otkrivanje i praćenje (bržih ili sporijih) pokretnih ciljeva. Od praktičnog je interesa projektovanje takvog složenog signala koji će pored ostalih svojstava biti i što nezavisniji od Dopplerovog pomaka frekvencije koji nastaje reflektovanjem poslatog signala od pokretnog cilja. To je posebno značajno kod vojnih primjena. Drugim riječima, potrebna je takva sekvenca koja obezbjeđuje minimalnu degradaciju radarskog sistema uslijed Dopplerovog pomaka frekvencije.

S takvim ciljem je u ovom radu izvršena komparativna analiza pseudoslučajnih sekvenci za kompresiju radarskih impulsa sa stanovišta osjetljivosti na Dopplerov pomak frekvencije.

Da bi se provela analiza Dopplerovih svojstava složenog radarskog signala projektovan je softverski model koji omogućava svestranu i efikasnu analizu signala po više kriterija. Jezgro programske podrške čine baterije generatora sekvenci i signala, koje sadrže dvadesetak tipova sekvenci, a broj sekvenci koje se mogu generisati je praktično neograničen. Baterije generatora su otvorenog tipa, tako da se mogu dopunjavati novim tipovima sekvenci.

#### 2. ANALIZA OSJETLJIVOSTI SEKVENCI NA DOPPLEROV POMAK FREKVENCije

Analiza Dopplerove osjetljivosti zasniva se na analizi funkcije neodređenosti ispitivanog signala. Za ocjenu izobličavanja odziva prilagođenog filtera za Dopplerov pomak  $F_D$  bitna je maksimalna vrijednost bočnih snopova koji, mogu maskirati bliske i

slabe ciljeve. Bočne snopove ćemo prikazati u relativnom odnosu prema glavnom snopu. Da bismo mogli provesti komparativnu analizu različitih signala razmatraćemo kodove istih i približno istih dužina.

**DEFINICIJE:**

*Širokim Dopplerovim opsegom* naziva se opseg Dopplerovih frekvencija čija poluširina  $F_D$  nije manja od rastojanja po frekvenciji između susjednih harmonika spektra, tj.:

$$2F_D \geq \frac{1}{NT_i} \quad (1)$$

gdje je  $T_i$  trajanje subimpulsa a  $N$  broj subimpulsa.

*Uskim Dopplerovim opsegom*, pak, naziva se [1] onaj opseg Dopplerovih frekvencija koji ispunjava slijedeći uslov:

$$2F_D < \frac{1}{NT_i} \quad (2)$$

U našoj analizi značajan je uski Dopplerov opseg budući da nas zanima "ponašanje" signala za realne ciljeve. Dopplerovu frekvenciju dobijamo prema:

$$f_d = \frac{2v_r}{c} f_0 \quad (3)$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti,  $f_0$  frekvencija nosioca a  $v_r$  radijalna brzina cilja.

Za maksimalnu Dopplerovu frekvenciju ćemo uzeti prema (2):

$$f_{dmax} = \frac{1}{2NT_i} \quad (4)$$

Svođenje Dopplerovog opsega na ove dimenzije je opravdano iz praktičnih razloga zbog ocjene osobina talasnih oblika signala u onom Dopplerovom opsegu koji je od interesa. Naime, možemo očekivati da se neke klase signala (pogodne za primjenu) u tom uskom Dopplerovom opsegu ponašaju zadovoljavajuće, a da u širem opsegu imaju loša svojstva.

Kod prikaza funkcije neodređenosti po Dopplerovoj osi, Dopplerovu frekvenciju ćemo normirati širinom opsega kodiranog signala:

$$\frac{f_{dmax}}{B_i} = f_{dmax} \cdot T_i \quad (5)$$

gdje je  $T_i$  širina subimpulsa.

Kod većine autora koji su analizirali Dopplerovu osjetljivost sekvenci, kao karakterističan presjek po Dopplerovoj osi uzeto je 0.005. Ovakav Dopplerov pomak odgovara karakterističnim očekivanim brzinama ciljeva. Budući da se u komparativnoj analizi nameće potreba da se poređenje ponašanja različitih sekvenci provodi za isti presjek po Dopplerovoj osi odabran je presjek 0.005 i zbog verifikacije i poređenja sa rezultatima do kojih su došli drugi autori za neke konkretne sekvence [4], [5].

S druge strane, referentna vrijednost odnosa *maksimalni bočni snop/ glavni snop* od -13 dB je uzeta radi poređenja sa odnosom *maksimalni bočni snop/ glavni snop* kod *linearne FM* [8, 9], koja se često uzima kao orijentir kod analize različitih oblika kompresije radarskog signala.

### 3. REZULTATI ANALIZE

U radu je provedena analiza Dopplerove osjetljivosti različitih klasa sekvenci za kompresiju radarskog impulsa.

Idealna sekvenca za kompresiju impulsa bi bila ona koja bi obezbijedila maksimalan odnos signal/šum i minimalan odnos *maksimalni bočni snop/ glavni snop* bez obzira na Dopplerov pomak frekvencije. Jasno je da dobijanje idealnog signala po svim kriterijima nije moguće i zbog osnovnog fizikalnog zakona o održanju energije. Ta činjenica je u našem slučaju izražena kroz konstantnu zapreminu ispod površine funkcije neodređenosti. Time se projektovanje talasnog oblika svodi na preraspodjelu zapremine ispod funkcije neodređenosti prema nekom od postavljenih kriterija.

Očigledan primjer su one sekvence koje idealno eliminišu bočne snopove za nulti Dopplerov pomak. Iz provedenih analiza komplementarnih i Huffmanovih sekvenci vidljivo je kako bočni snopovi naglo rastu za  $F_d > 0$ .

U tabeli 1 je dat sumarni pregled odnosa *maksimalni bočni snop/ glavni snop* za  $F_d=0$  i  $F_d=0.005$ . Takođe je dat pregled Dopplerovih pomaka za koje analizirane sekvence dostižu odnos *maksimalni bočni snop/ glavni snop* od -13 dB. Ova vrijednost je uzeta kao referentna zbog poređenja sa linearnim chirpom. U prilogu su dati grafički prikazi rezultata analize Dopplerove osjetljivosti za neke od sekvenci navedenih u tabeli.

*Na osnovu provedenih analiza mogu se izvesti slijedeći zaključci:*

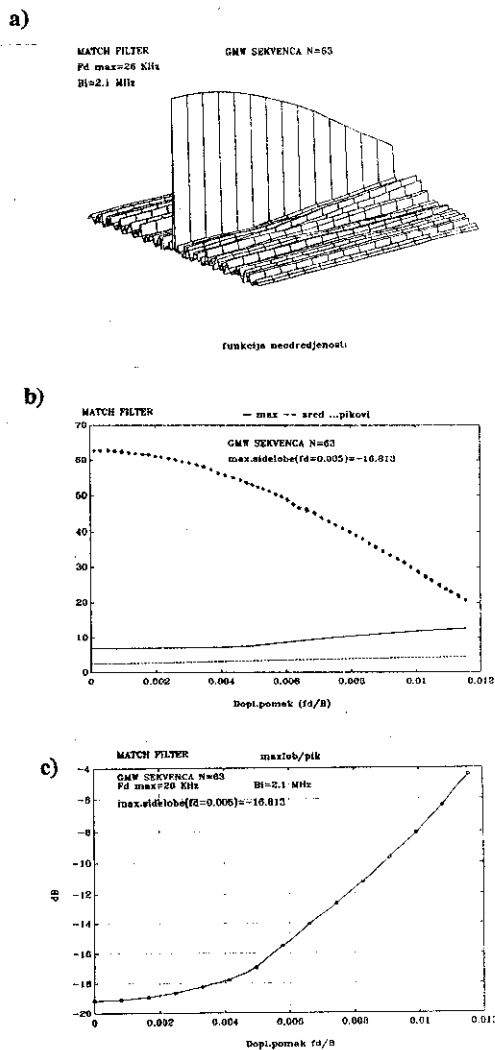
1. Za Dopplerov pomak frekvencije jednak nuli ili blizu nule najpovoljnije su sekvence iz *klase komplementarnih i subkomplementarnih* sekvenci. Ovi kodovi ostvaruju izvanredno veliko ili potpuno potiskivanje bočnih snopova za male Dopplerove pomake, ali su zato najosjetljiviji na Dopplerov pomak. Među ovim sekvencama posebnu pažnju zaslužuju Golayev komplementarni par i sekvence predstavljene komplementarnim skupom i Hadamardovom i grupnom matricom (redni broj 15, 16, 19. i 20. u tabeli 1). Ove sekvence za nulti Dopplerov pomak imaju potpuno potisnute bočne snopove, a -13 dB dostižu već za veoma mali Dopplerov pomak. To znači da će se za sve ciljeve koji unose značajniji Dopplerov pomak bočni snopovi ući u područje neregularnosti (slike 2. i 3.). Stoga ove sekvence nalaze primjenu prije svega kod geofizičkih i sličnih radara [10, 11].

2. Slična situacija je i sa Huffmanovim sekvencama [12], s tim da one imaju još lošiji odnos maksimalni bočni snop/ glavni snop za  $F_d > 0$ . Ako se u obzir uzme slaba energetska efikasnost i problem realizacije prijemnika za ovakve signale, tada ih možemo okarakterisati kao *veoma loše sa stanovišta Dopplerove osjetljivosti*.

3. *M-sekvence i njoj slične binarne sekvence pokazuju dobra Dopplerova svojstva za uski Dopplerov opseg. To naročito važi za GMW i šifarske M-sekvence.* Za nulti Dopplerov pomak ove sekvence imaju relativno visok nivo bočnih snopova, ali im je promjena po Dopplerovoj osi spora tako da za  $F_d=0.005$  imaju najbolji maksimalni bočni snop/ glavni snop : GMW sekvence -16.813 dB, a šifarske M-sekvence -16.5 dB. Pogodniji je izbor GMW sekvence zbog za 2 dB nižih bočnih snopova za nulti Dopplerov pomak.

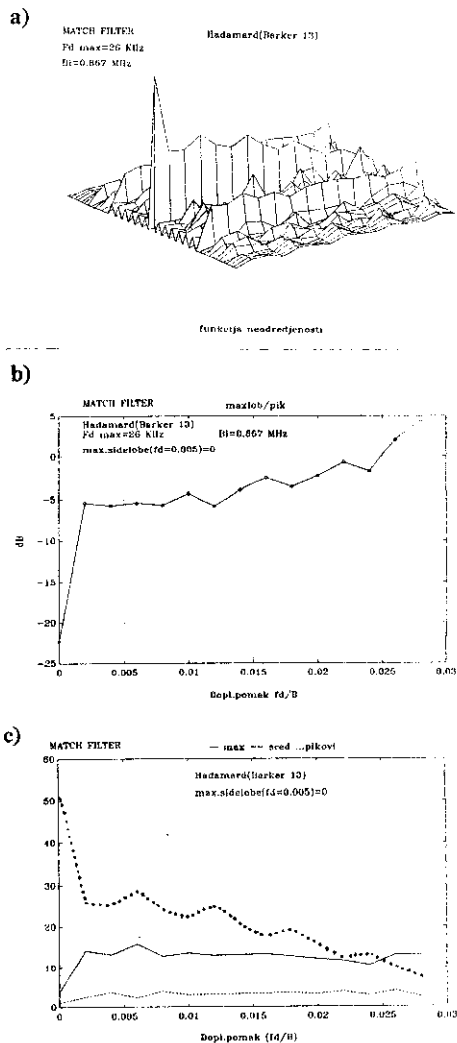
4. *Barkerove i kombinovane Barkerove sekvence*

Dopplerova osjetljivost Barkerovih sekvenci je slična kao kod ostalih binarnih sekvenci. Poznato je da ne postoje Barkerove sekvence dužine veće od 13 tako da su čest predmet analize kombinovane Barkerove sekvence. Kod ovih sekvenci se postiže povoljan prosječni srednjekvadratni nivo bočnih snopova ali uz visoke maksimalne bočne snopove koje diktira kraća od sastavnih sekvenci. Tako kombinovane Barkerove sekvence  $5 \times 13$  i  $7 \times 5$  imaju nivo maksimalnih bočnih snopova -14 dB. Potiskivanje bočnih snopova može se postići primjenom razdešenih filtera, na primjer inverznog i prozoriranog inverznog filtra [13]. Rezultati analize Dopplerove osjetljivosti ovakvih filtera prikazani su na slici 5. Uz značajno potiskivanje bočnih snopova (-4.5 dB u odnosu na prilagođeni filter), ovako razdešeni filter u uskom Dopplerovom opsegu do  $F_d < 0.002$  zadržava taj povoljan odnos a već za  $F_d > 0.005$  je nivo bočnih snopova značajno veći. Međutim, treba imati u vidu i gubitak u odnosu *signal/šum*, koji u prikazanom primjeru iznosi 1.57 dB.



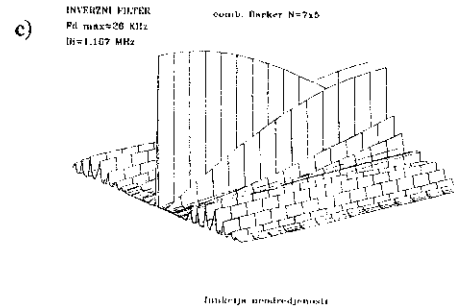
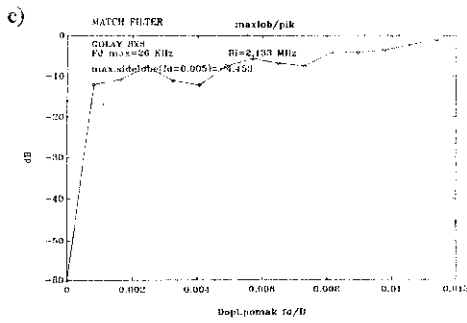
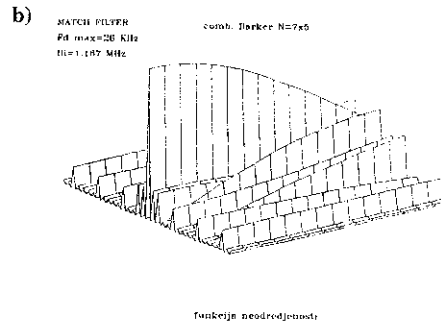
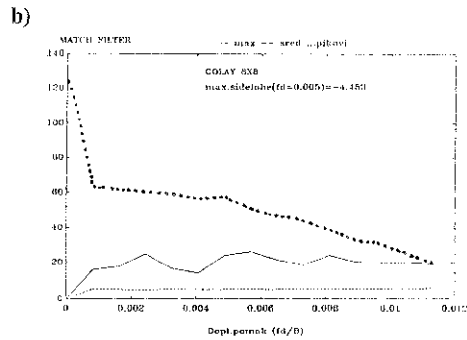
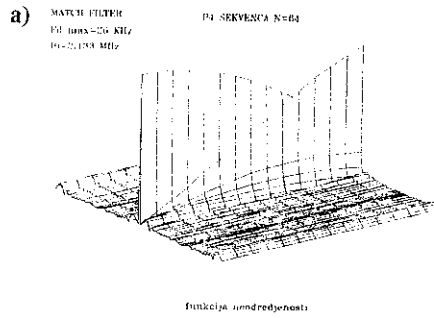
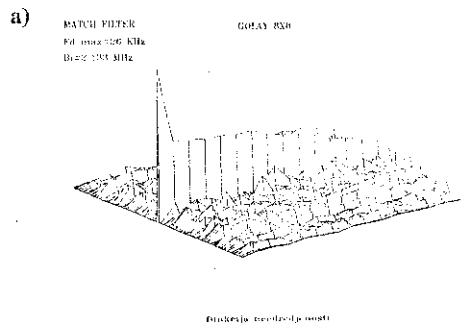
Slika 1. GMW sekvenca:

- a) funkcija neodredenosti,
- b) centralni pikovi, maksimalni bočni lobovi i srednja vrijednost bočnih lobova,
- c) normirani maksimalni bočni lobovi u zavisnosti od Dopplerovog pomaka.



Slika 2. Hadamardov subkomplementarni skup sa polaznom sekvencom Barker 13:

- a) funkcija neodredenosti,
- b) centralni pikovi, maksimalni bočni lobovi i srednja vrijednost bočnih lobova,
- c) normirani maksimalni bočni lobovi u zavisnosti od Dopplerovog pomaka.



Slika 3. Grupna komplementarna matrica sa polaznom m-sekvencom dužine 7.

- a) funkcija neodredenosti,
- b) centralni pikovi, maksimalni bočni lobovi i srednja vrijednost bočnih lobova,
- c) normirani maksimalni bočni lobovi u zavisnosti od Dopplerovog pomaka.

Slika 4. Funkcija neodredenosti:

- a) P4 sekvence,
- b) kombinovane Barkerove sekvence 7x5,
- c) inverznog razdešenog filtra za kombinovanu Barkerovu sekvencu 7x5.

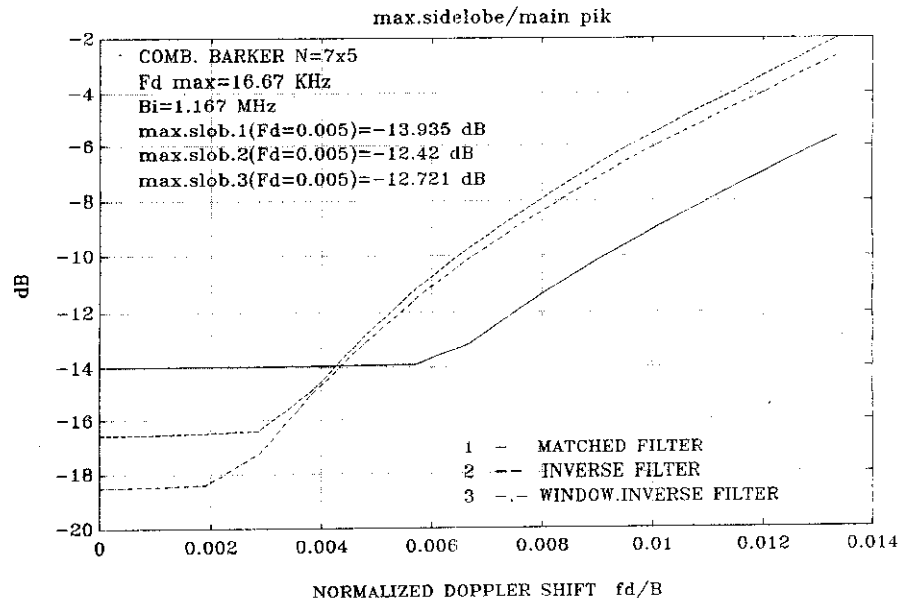
Možemo zaključiti da ovako razdešeni filter sa stanovišta Dopplerove osjetljivosti ima prednost u odnosu na prilagođeni filter samo za relativno male Dopplerove pomake i to uz gubitak SNR. Analiza Dopplerove osjetljivosti razdešenih filtera sugerira neophodnost optimizacije metoda potiskivanja bočnih snopova po kriterijumu minimalne Dopplerove osjetljivosti.

5. *Polifazne sekvence (Frankova, P1, P2, P3, P4)* za nulti Dopplerov pomak imaju voma niske bočne snopove, ali za Dopplerov pomak veći od nule imaju lošiju rezoluciju i tačnost po daljini. Rezultati navedeni u tabeli 1 odnose se na slučaj kada se uzme da je rezolucija po daljini tri puta lošija od rezolucije binarne sekvence odgovarajuće dužine (istog koeficijenta kompresije), odnosno:  $T_R = 3 \cdot 1/\tau_0$  gdje je  $\tau_0$  širina subimpulsa. To znači da se prvi, drugi i treći "režanj" funkcije neodređenosti uzimaju kao jedinstven, a već četvrti se tretira kao bočni snop. Uz ova ograničenja može se zaključiti da *polifazne sekvence imaju dobra Dopplerova svojstva uz lošiju rezoluciju i tačnost po daljini.*

6. Iz prethodnih tački se nameće zaključak da su sa stanovišta Dopplerove osjetljivosti najpovoljnije sekvence izvedene iz M-sekvenci (*GMW i šifarske M-sekvence*). U prilog njihovoj primjeni ide i jednostavnost realizacije prijemnika ovakvih sekvenci.

7. Moguće je analizirati *hibridni sistem* koji bi bio *dopplerovski "agilan"*. Takav sistem bi u zavisnosti od "scenarija" okruženja odabirao mod rada sa komplementarnim ili sa GMW / M - šifarskim sekvencama. Ovakva simbioza je realizibilna zbog toga što se u oba slučaja radi o binarnim sekvencama. Sistem bi u cjelini morao biti znatno sofisticiran, što podrazumijeva i adaptivne algoritme za generisanje i biranje sekvenci.

*Analiza ovakvih dopplerovski agilnih sistema biće predmet daljih istraživanja.*



Slika 5. Dopplerova osjetljivost prilagođenog, inverznog i prozoriranog inverznog filtra.

TABELA 1

| No  | analizirana sekvenca                              | lob/pik (dB)<br>za $Fd=0$ | lob/pik (dB)<br>za $Fd=0.005$ | $Fd$ za<br>lob/pik = -13<br>dB ( $10^\circ$ ) |
|-----|---|---------------------------|-------------------------------|---|
| 1.  | Uniformni niz N=65                                | -0.5                      | -0.32                         | *   |
| 2.  | Neuniformni niz N=49                              | -10.5                     | -9.94                         | *   |
| 3.  | M-sekvence N=63                                   | -18                       | -14.02                        | 6   |
| 4.  | GMW N=63  | -19                       | -16.81                        | 7   |
| 5.  | Barker 5x13<br>U N=65                             | -14                       | -8.673                        | 3.2   |
| 6.  | Šifarska M-sekv. N=63                             | -17                       | -16.5                         | 8   |
| 7.  | Jacobijeva N=35                                   | -13.5                     | *                             | 10  |
| 8.  | Legendreova N=19                                  | -11.5                     | *                             | *   |
| 9.  | Huffmanova N=128                                  | -35                       | +2                            | 1.8   |
| 10. | Frank N=64  | -27.5                     | -12.47                        | 4.5   |
| 11. | P1 N=64   | -22                       | -13.81                        | 5.8   |
| 12. | P2 N=64   | -22                       | -13.81                        | 5.8   |
| 13. | P3 N=64   | -24.35                    | -12.67                        | 4.8   |
| 14. | P4 N=64   | -24.35                    | -12.67                        | 4.8   |
| 15. | Golayev komplement. par<br>2x32 N=64              | $-\infty$                 | **                            | 0.05  |
| 16. | Komplementarni skup<br>4x16 N=64                  | $-\infty$                 | **                            | 0.035   |
| 17. | Subkomplementarni skup<br>(b7)<br>4x14 N=56       | -17                       | **                            | 0.014   |
| 18. | Hadamard subkomplementarni<br>skup (B7) 4x14 N=56 | -21                       | **                            | 0.001   |
| 19. | Hadamard matrica<br>8x8 N=64                      | $-\infty$                 | **                            | 0.02  |
| 20. | Grupna komplementarna<br>8x8 N=64                 | $-\infty$                 | **                            | 0.02  |

\* presjek je izvan domene,

\*\* područje neregularnosti (bočni snopovi su veći od centralnog snopu).

## 4. ZAKLJUČAK

Iz provedene analize Dopplerove osjetljivosti različitih klasa sekvenci za kompresiju radarskog impulsa se nameće zaključak da su sa stanovišta Dopplerove osjetljivosti najpovoljnije sekvence izvedene iz M-sekvenci (*GMW* i *šifarske M-sekvence*). U prilog njihovoj primjeni ide i jednostavnost realizacije prijemnika ovakvih sekvenci. Sekvence iz klase komplementarnih i subkomplementarnih sekvenci koje za multi Dopplerov pomak imaju potpuno potisnute bočne snopove praktično su neprimjenjive u svim slučajevima kada postoji značajniji Dopplerov frekvencije.

## LITERATURA:

- [1] V.P.Inatov, V.I.Kornievskij, V.D.Platonov, I.M.Samojlov, "Granicy bokovyh lepestkov periodiceskogo diskretnogo signala v širokoy dopplerovskoj Izv. Vuz-ov, Radiotekhnika i elektronika, No. 2, pp. 228-235, 1984.
- [2] V.P.Inatov, V.I.Kornievskij, V.D.Platonov, I.M.Samojlov, "Niznie granicy urovnja bokovyh lepestkov vzaimnoj funkcii neopredelenosti pary periodiceskij diskretnih signal - fil'tr v uzkoj dopplerovskoj poloze", Izv. Vuz-ov, Radiotekhnika i elektronika, No. 10, pp. 1962-1969, 1985.
- [3] A. Zejak, "Jedan pristup projektovanju i analizi osobina prilagodjenih filtera", 30. ETAN u pomorstvu, pp. 461-464, Zadar, 1988.
- [4] J.M. Howell, "Effects of Doppler mismatch on combined Barker codes", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., correspondence, Vol. AES-6, pp. 847-851, nov. 1970.
- [5] D. Selber, "Performance of a pseudorandom binary phase code with errors and Doppler - shifted CW", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-17, No. 6, pp. 787-794, 1981.
- [6] R. Sivaswamy, "Self-cluter cancellation and ambiguity properties of subcomplementary sequences", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-18, No. 2, pp. 163-180, mar. 1982.
- [7] F.F. Kretschmer and B.L. Lewis, "Doppler properties of polyphase coded pulse compression waveforms", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-19, No. 4, pp. 521-531, july 1983.
- [8] J.A. Jonston, "Analysis of the pulse compression of Doppler shifted nonlinear frequency modulated signals", Electronics Letters, Vol. 20, No. 25/26, pp. 1054-1055, dec. 1984.
- [9] J.A. Jonston and A.C. Fairhead, "Waveform design and Doppler sensitivity analysis for FM chirp pulses", IEE proceedings, vol. 133, Pt. F, No. 2, pp. 163-175, april 1986.
- [10] C.A.Gonzales, R.F.Woodman, "Pulse compression techniques with application to HF probing of the mesosphere", Radio Science, Volume 19, No. 3, pp. 871-877, 1984.
- [11] G.Schmidt, R.Ruster, P.Czechowsky, "Complementary code and Digital Filtering for detection of weak VHF radar signals from the mesosphere", IEEE Trans. on Geoscience Electronics, Vol. GE-17, No. 4, pp. 154-161, 1979.
- [12] F.F.Kretschmer, F.C.Lin, "Huffman-coded pulse compression waveforms", NRL report 8894, Naval Research Laboratory, Washington, 1895.
- [13] P.Rapajić, A.Zejak, "Potiskivanje bočnih lobova kod radara sa digitalno fazno modulisanim signalom, primjenom inverznog razdešenog filtra sa prozoriranim impulsnim odzivom", XXXIII ETAN (u ovoj svesci zbornika radova), Novi Sad, 1989.