XL KONFERENCIJA ZA ETRAN, BUDVA, 4 - 7. JUNA 1996.

RAZDEŠENI FILTERI U RADARIMA I SONARIMA SA FREKVENCIJSKIM SKAKANJEM

Igor S. Simić, VJ VP-4522 Batajnica
Aleksa J. Zejak, IMTEL - Institut za mikrotalasnu tehniku i elektroniku, Beograd

Sadržaj: *Analizirana je mogućnost potiskivanja bočnih snopova, tj. sopstvenog klatera, kod modernih radarskih i sonarskih sistema sa unutarimpulsnim frekvencijskim skakanjem. Algoritam za projektovanje Doplerovski optimizovanih razdešenih filtera za fazno kodirane signale adaptiran je sa ciljem da se uobliči funkcija neodređenosti sekvenci za frekvencijsko skakanje na bazi Kostasovih polja. Postignuti su zanimljivi rezultati.*

I. UVOD

Kodiranje signala unutar predajnog impulsa često se koristi u radarima, sonarima i komunikacionim sistemima sa ciljem da raširi frekvencijski opseg signala. Međutim dinamički opseg kompresora radarskog impulsa ograničen je za bliske ciljeve zbog postojanja bočnih snopova na osi daljine. Problem potiskivanja bočnih snopova javlja se od samih početaka radara sa kompresijom impulsa.

U [1] je prikazan detaljan pregled metoda potiskivanja bočnih snopova. Dostupna literatura obrađuje potiskivanje sopstvenog klatera, tj. bočnih snopova, signala sa unutarimpulsnom faznom modulacijom u radarima, sonarima i komunikacijama sa proširenim spektrom. U ovom radu će biti ispitana mogućnost potiskivanja bočnih snopova radarskih ili sonarskih signala sa unutarimpulsnim frekvencijskim skakanjem (engleski: Frequency Hopping - FH).

Rad je organizovan na sledeći način. U narednoj sekciji predstavljene su sekvence tipične za radare i sonare sa frekvencijskim skakanjem i analizirane osobine njihove funkcije neodređenosti. U sekciji 3 opisali smo algoritam za projektovanje doplerovski optimizovanih razdešenih filtera, za signale sa unutarimpulsnom faznom modulacijom. U sekciji 4 predložili smo proceduru za potiskivanje bočnih snopova autokorelacione funkcije i funkcije neodređenosti za radarske i sonarske signale sa unutarimpulsnim frekvencijskim skakanjem. U sekciji 5 predstavljeni su preliminarni rezultati, a u sekciji 6 dali smo zaključak i predloge za dalja istraživanja.

II. SEKVENCE ZA FREKVENCIJSKO SKAKANJE

Koherentni radarski i sonarski sistemi se koriste za određivanje brzine i rastojanja do cilja. Zbog toga se sekvenca frekvencija može izabrati tako da optimizuje merenje daljine i brzine. Tipična situacija je ona kada se želi napraviti sekvenca različitih frekvencija u uzastopnim vremenskim intervalima. Ako se reflektovani signal pomeri u frekvenciji i vremenu zbog kretanja cilja, samo će pomak originalne sekvence čiji vremenski i frekvencijski pomak odgovaraju daljini i brzini cilja, imati maksimalnu korelaciju sa primljenim signalom. Drugim rečima, poželjno je da autokorelaciona funkcija neodređenosti ima samo jedan pik na celoj površini tj. "usamljeni šiljak" ("thumb tack").

Kostas (John P. Costas) je u [2] razvio postupak za generisanje polja od NxN elemenata sa najviše jednom međusobnom koicidencijom diskretnih frekvencija skakanja. Nekoliko tehnika za konstrukciju Kostasovih sekvenci su predstavljene u radovima [3,4]. U ovom radu, Volšova (L.R.Welch) teorema korišćena je za konstrukciju Kostasovih polja dužine $N=p-1$, gde je p prost broj. Ovaj jednostavan metod dat je teoremom: *Neka je α primitivni element u $GF(p)$ gde je p prost broj. Tada za svako $i=1,2,...,(p-1)$ elementi na pozicijama $(i,j)=(i,\alpha^i)$ čine Kostasovo polje.*

Radarski signal čini jedna od frekvencija iz skupa dostupnih $\{f_1, f_2, ..., f_N\}$, a koja se emituje u vremenskim intervalima $\{t_1, t_2, ..., t_N\}$. Neka je sekvenca uređenih celih brojeva predstavljena sa $\{d_n\} = \{d_1, d_2, ..., d_N\}$. Radarski impuls je podeljen na N vremenskih intervala trajanja T_i. Unutar svakog vremenskog intervala nalazi se talasni oblik signala sa frekvencijom

$$f_n = \frac{d_n}{T_i} \cdot \tag{1}$$

Funkcija neodređenosti korišćena je za ispitivanje ponašanja bočnih snopova, i definisana je sa

$$\chi(\tau, f_d) = \frac{1}{NT_i} \int_{-\infty}^{\infty} \mu^*(t)\,\mu(t-\tau)\,e^{j2\pi f_d \tau}\,dt\,, \tag{2}$$

gde je f_d Doplerov pomak, a $\mu(t)$ niz impulsa predstavljen sa

$$\mu(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t - nT), \tag{3}$$

gde je

$$s_n = \begin{cases} e^{j2\pi f_n t}, & 0 \le t < T \\ 0, & za\ ostale\ t. \end{cases} \tag{4}$$

Pretpostavili smo da je zbog uskopojasnosti Doplerov pomak jednak za sve frekvencije podimpulsa.

III. DOPLEROVSKI OPTIMIZOVAN IRLS ALGORITAM

Optimizaciona procedura za razdešeni filter u zadatom Doplerovom opsegu može se definisati kao procedura formiranja pogodnog oblika funkcije neodređenosti. Za razliku od standardnih filtera, gde je predmet optimizacije oblikovanje autokorelacione funkcije, kod ovog tipa filtera predmet optimizacije je funkcija neodređenosti ili, preciznije, njen deo.

Ako pretpostavimo da je s_f vektor kolona koji opisuje sekvencu signala za pojedinačni Doplerov pomak frekvencije f, tada

$$S_f = \left[S_{1,f} \cdot S_{i,f} \cdot S_{N,f}\right]^T;$$
$$s_{i,f} = s_{i,f} = e^{\left(j2\pi f_i/N\right)}; \quad i = 1, 2, \ldots, N, \tag{5}$$

gde je N dužina sekvence i $[\cdot]^T$ oznaka transponovanja matrice. Relacija (5) daje generalizaciju sekvence signala. Na sličan način, odziv filtra može se opisati kao

$$\psi_f = \left(\psi_{1,f}, \ldots, \psi_{i,f}, \ldots, \psi_{(N+M-1),f}\right)^T, \tag{6}$$

gde je ψ_f odziv prilagođenog filtera za pojedinačni Doplerov pomak frekvencije i M dužina filtera.

Ako je matrica formirana na taj način da su njeni redovi odziv filtera kao u (5),

$$\Psi_\Phi = \left(\psi_{f_1}, \ldots, \psi_{f_i}, \ldots, \psi_{f_P}\right)^T,$$
$$f_i \in \phi, \; i = 1, 2, \ldots, P \tag{7}$$

gde je P broj pojedinačnih Doplerovih pomaka, tada Ψ_ϕ predstavlja odsečak diskretne funkcije neodređenosti. Željena funkcija neodređenosti odgovara odzivu filtera,

$$\Delta_\Phi = \left(d_{f_1}, \ldots, d_{f_i}, \ldots, d_{f_P}\right)^T, \tag{8}$$

gde je d_{f_i} željeni odziv filtera za pojedinačni Doplerov pomak frekvencije.

Takođe blok matrica odgovara matrici signala,

$$S_\Phi = \left(S_{f_1}, \ldots, S_{f_i}, \ldots, S_{f_P}\right)^T, \tag{9}$$

gde je S_{f_i} matrica signala za pojedinačni Doplerov pomak frekvencije, N je dužina sekvence i M je dužina filtera $(M \geq N)$.

DIRLS algoritm može se opisati na sledeći način:

$$\hat{x}(n) = \left[S_\Phi^H(0) W_\Phi(n-1) S_\Phi\right]^{-1} S_\Phi^H(0) W_\Phi(n-1) \Delta_\Phi(n-1). \tag{10}$$

gde su $\hat{x}$ procenjeni koeficijenti filtera, nadindeks H označava hermitsku transformaciju.

U gornjem izrazu W (n) je blok matrica, sastavljena od dijagonalnih $R\ (n) = diag\ (r(n))$ matrica, gde je $r(n)$ težinski vektor. Funkcija prozora koja je uključena u maricu može se posmatrati kao korektivni faktor LS algoritma.

Treba zapaziti da DIRLS filter može veoma uspešno potisnuti maksimalne nivoe bočnih snopova.

IV. RAZDEŠENI FILTER ZA FREKVENCIJSKO SKAKANJE

U radarima i sonarima sa frekvencijskim skakanjem željeni oblik je idealni usamljeni šiljak. U svim radovima koji razmatraju ovaj problem rešenje je nađeno u izboru ili konstrukciji sekvenci koje imaju dobra svojstva funkcije neodređenosti. U ovoj sekciji adaptiraćemo algoritam opisan prethodno sa ciljem uobličavanja funkcije neodređenosti sekvenci za frekvencijsko skakanje.

Naime, naš interes je da proučimo problem razdešavanja, tj. pronalaženje para signal - koeficijenti filtera za koje je funkcija neodređenosti bliska idealnoj.

Razmotrimo sada koje su osnovne razlike između fazno kodiranog signala i signala sa frekvencijskim skakanjem u smislu adaptacije algoritma razdešavanja kompresionog filtera.

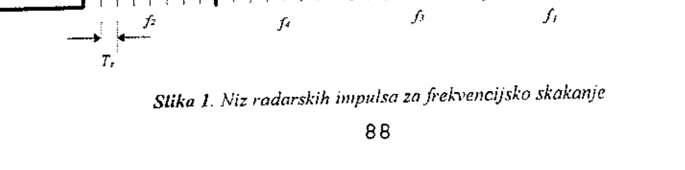
U prethodnoj sekciji pretpostavili smo da je s_f vektor kolona koji opisuje sekvencu signala za pojedinačni Doplerov pomak frekvencije f. Takođe smo podrazumevali da je jedan odbirak po podimpulsu dovoljan. Ako pređemo na frekvencijsko skakanje, minimalni broj odbiraka dat je sa Nikvistovim kriterijumom odabiranja, kao što je na slici 1 prikazano.

Izraz (5) treba modifikovati tako da bude:

$$s_{f,i} = e^{2\pi T_s (f_i + f) k}, \tag{11}$$

gde je $k = 0, 1, \ldots 2N-1$ i $T_s = \dfrac{T_i}{2N}$ period odabiranja. To iznosi 2N odbiraka po podimpulsu.

Iako su svi izrazi ostali nepromenjeni, posledice ove promene su znatne sa stanovišta potrebnih računarskih resursa. Dužine vektora i matrica su veće $2N^2$ puta, što u slučaju dužih sekvenci zahteva znatno više memorije i procesorskog vremena.



Slika 1. Niz radarskih impulsa za frekvencijsko skakanje

Postoji takođe i razlika u interpretaciji dobijenih rezultata. Kada je na ulazu razdešenog filtera fazna sekvenca, na izlazu je takođe fazna višenivoska sekvenca (sa neunifomnom ovojnicom). Dobijene vrednosti su koeficijenti razdešenog filtera relizovanog u kanoničkoj formi FIR filtera.

Kada se razdešava filter za ulaznu FH sekvencu, ulazni podaci su odbirci kompleksnog niza sinusoida različitih frekvencija. Izlazni podaci predstavljaju kompleksne koeficijente FIR filtera, ali sada je nemoguće direktno prepoznati frekvencijske skokove.

V. REZULTATI

U ovoj sekciji predstavili smo preliminarne rezultate istraživanja razdešavanja FH sekvenci za nulti Doplerov pomak i za male Doplerove pomake, koji su od interesa u radarskoj primeni. Zbog ograničene računarske snage, analizirali smo kratku sekvencu. Princip je isti i za proizvoljno dugačku sekvencu.

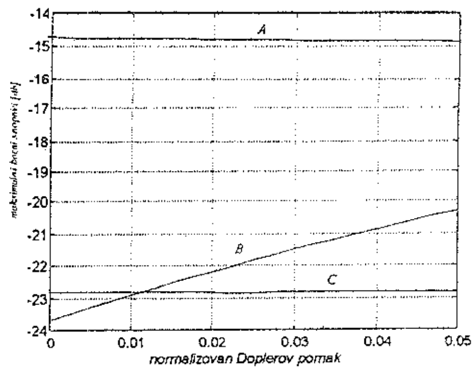
U analizi smo koristili Kostasovu sekvancu konstruisanu po Volšovoj metodi, gde su p=5, g=2, sa redosledom frekvencija:

$$d_n = \{2,\ 3,\ 4,\ 1\},\quad gde\ je\ \ n=1,2,3,4. \tag{12}$$

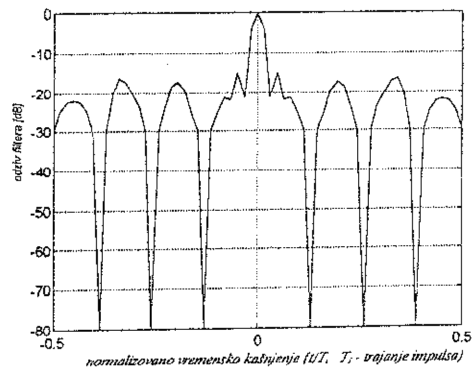
Koeficijenti prilagođenog filtera (MF), kao i koeficijenti razdešenog filtera IRLS i DIRLS algoritmom, dobijeni posle 500 iteracija, dati su u tabeli 1.

MF	IRLS	DIRLS
1.0000	0.4331 - 0.0560i	0.4166 - 0.0951i
0.0000 - 1.0000i	0.1606 + 0.4364i	0.2319 + 0.2787i
-1.0000 - 0.0000i	-0.3970 + 0.1732i	-0.0327 + 0.0727i
0.0000 + 1.0000i	-0.2048 - 0.2580i	0.1436 - 0.0402i
1.0000 + 0.0000i	0.3364 - 0.4264i	0.2929 - 0.1001i
0.0000 - 1.0000i	0.3476 + 0.0639i	0.1723 - 0.0154i
-1.0000 - 0.0000i	0.0141 - 0.0614i	0.1764 - 0.2442i
0.0000 + 1.0000i	0.6590 + 0.1653i	0.8344 + 0.1892i
1.0000	-0.0635 + 0.9980i	0.1113 + 0.9938i
-1.0000 - 0.0000i	-0.8740 - 0.1765i	-0.7273 - 0.1191i
1.0000 + 0.0000i	0.1874 - 0.4024i	0.2772 - 0.5160i
-1.0000 - 0.0000i	-0.0593 - 0.0077i	0.2634 - 0.0925i
1.0000 + 0.0000i	0.0752 - 0.3420i	0.2325 - 0.1664i
-1.0000 - 0.0000i	0.4406 - 0.1682i	0.3108 - 0.1548i
1.0000 + 0.0000i	0.4347 + 0.5249i	0.4978 + 0.1952i
-1.0000 - 0.0000i	-0.5599 + 0.2903i	-0.1677 + 0.1207i
1.0000	0.0110 - 0.5012i	0.2394 - 0.3675i
-0.7071 - 0.7071i	0.2364 - 0.0216i	0.3563 - 0.0018i
0.0000 + 1.0000i	-0.1958 - 0.0042i	0.0362 - 0.0049i
0.7071 - 0.7071i	0.3163 - 0.4736i	0.4254 - 0.3721i
-1.0000 - 0.0000i	0.3244 + 0.0001i	0.3246 + 0.0966i
0.7071 + 0.7071i	0.2436 + 0.1424i	0.2471 - 0.0220i
0.0000 - 1.0000i	0.0074 + 0.2442i	0.3295 + 0.1347i
-0.7071 + 0.7071i	-0.5942 + 0.0212i	-0.4424 + 0.2780i
1.0000	-0.1739 - 0.8044i	-0.2802 - 0.7784i
0.7071 - 0.7071i	0.5187 - 0.6410i	0.5591 - 0.6846i
0.0000 - 1.0000i	0.2936 - 0.231[illegible]i	0.2338 - 0.1754i
-0.7071 - 0.7071i	0.2233 - 0.2876i	0.1464 - 0.3823i
-1.0000 - 0.0000i	0.1889 + 0.0141i	0.2763 - 0.1056i
-0.7071 + 0.7071i	0.2310 + 0.1932i	0.2190 + 0.1088i
0.0000 + 1.0000i	0.1893 + 0.5068i	0.2946 + 0.3493i
0.7071 + 0.7071i	-0.1064 + 0.3638i	0.0405 + 0.3475i

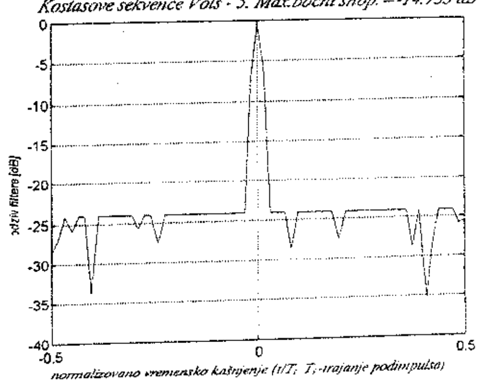
Tabela 1. MF, IRLS i DIRLS koeficijenti filtra



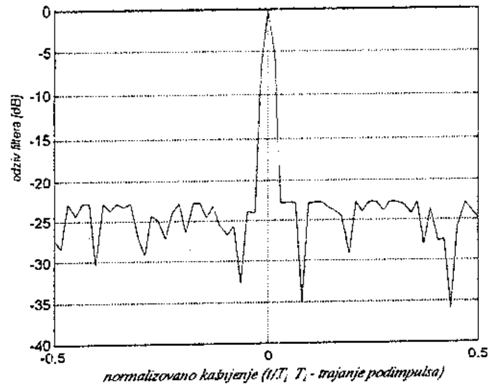
Slika 2. Maksimalni bočni snopovi kao funkcija Doplerovog pomaka; uporedne karakteristike za A - prilagođeni (MF), B - IRLS i C - DIRLS filter za Kostasovu sekvencu Volš - 5. Doplerov pomak je normalizovan f_dT_i gde je T_i dužina podimpulsa.Bočni snopovi su normalizovani sa 10log(sidelobes/mainlob).



Slika 3. Autokorelaciona funkcija za nulti Doplerov pomak Kostasove sekvence Volš - 5. Max.bočni snop. = -14.733 dB



Slika 4. Kroskorelaciona funkcija za nulti Doplerov pomak Kostasove sekvence Volš -5 i IRLS filtera. Max.bočni snop=-23.686 dB



Slika 5. Kroskorelaciona funkcija za nulti Doplerov pomak Kostasove sekvence Volš -5 i DIRLS koeficijenata. Max bočni snop=-22.813 dB

Za nulti Doplerov pomak, IRLS algoritam potiskuje bočne snopove za 23.686 dB što je u odnosu na nivo bočnih snopova prilagođenog filtera poboljšanje od 8.953 dB. Kao što se vidi na slici 2, potiskivanje bočnih snopova linearno opada za veće Doplerove pomake, i za vrednosti veće od 0.05 približava se nivou bočnih snopova prilagođenog filtera. To znači da je razdešeni IRLS filter za veće Doplerove pomake lošiji od prilagođenog filtera.

DIRLS algoritam je optimizovan za širi Doplerov opseg. Za taj opseg on ima konstano potiskivanje od 22.8 dB, mada manje od IRLS filtera na nultom Doplerovom pomaku (slika 2).

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu IRLS i DIRLS algoritmi su primenjeni za potiskivanje bočnih snopova radarskih ili sonarskih Kostasovih sekvenci za kompresiju impulsa sa unutarimpulsnim frekvencijskim skakanjem. Rezultati pokazuju da je moguće unaprediti dobra svojstva Kostasovih sekvenci u Doplerovom opsegu upotrebom razdešenog filtera sa koeficijentima izvedenim DIRLS algoritmom. U novijim radovima [6,7] predložene su sekvence na bazi kvadratnih kongruentnih kodova, zbog svojih dobrih svojstava autokorelacione i kroskorelacione funkcije neodređenosti, za upotrebu u radarima, sonarima i višekorisničkim sistemima sa frekvencijskim skakanjem. U daljim istraživanjima biće ispitane mogućnosti optimizacije prijemnih filtera i za ove klase FH sekvenci.

LITERATURA

[1] **Aleksa J. Zejak, Miroslav L. Dukić**: "Mismatched Filters in Spread Spectrum Communications Systems", Proceedings of The 3 rd IEEE Mediterranean Symposium on New Directions in Control and Automation, pp. 137-144, July 11-13. 1995. Limassol, CYPRUS.

[2] **John P. Costas** : "A study of a Class of Detection Waveforms Having Nearly Ideal Range-Doppler Ambiguity Properties", Proc.of The IEEE,VOL.72, No.8, august 1984.

[3] **Solomon W. Golomb, Herbert Taylor**: "Constructions and Properties of Costas Arrays", Proc.of The IEEE,VOL.72,No.9.september 1984.

[4] **Solomon W. Golomb, Herbert Taylor**: "Two-Dimensional Sinhronisation Patterns for Minimum Ambiguity", IEEE Tran. on information theory,Vol.28, No.4,july 1982.

[5] **Aleksa J. Zejak, Miroslav L. Dukić, Jovan A. Zatkalik**, "Doppler mismatched filters with periodical sequences in spread spectrum communication systems", IEEE ISSSTA '94 (International Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications), pp. 539-543, Oul, Finland, July 1994.

[6] **Jerome R. Bellegarda**: "Time-Frequency Properties of Six Classes of Congruential Frequency Hop Signals", Signal Processing V Theories and Applications, pp.2011-2014, 1990.

[7] **Jerome R. Bellegarda, Edward L. Titlebaum**: "Time-Frequency Hop Codes Based Upon Extended Quadratic Congruences", IEEE Teans.on AES Vol.24, No.6, pp.726-741, November 1981.

Abstract: *In this paper we have considered a possibility of sidelobe suppression, i.e. self clutter suppression, in modern radar and sonar systems, with intrapulse frequency hopping. We adapted the Doppler optimized IRLS algorithm, in order to shape ambiguity function of frequency hopping sequence based upon Costas arrays. We achieved interesting results.*

FREQUENCY HOPING MISMATCHED FILTER FOR SONAR AND RADAR APPLICATIONS

Igor S. Simić
Aleksa J. Zejak