

Izdvajanje obeležja za klasifikaciju radarskih signala korišćenjem uvijene DFT

Dimitrije Bujaković, Milenko Andrić, Boban Bondžulić, Davorin Mikluc i Slobodan Simić

Apstrakt—U ovom istraživanju je analizirano izdvajanje obeležja za klasifikaciju modelovanih signala osobe koja hoda sa audio izlaza izviđačkih radara na osnovu modifikovanog spektrograma. Modifikovani spektrogram je računat na osnovu uvijene diskretne Furijeove transformacije, dok je za izdvajanje obeležja ovako dobijenog spektrograma korišćena obrada njegovih binova primenom tehnika digitalne obrade slike. U radu je analizirana mogućnost izdvajanja obeležja u zavisnosti od odnosa signal-šum. Dobijeni rezultati pokazuju da je primenom uvijene diskretne Furijeove transformacije moguće izdvojiti obeležja za klasifikaciju signala sa izlaza izviđačkih radara pri manjim odnosima signal-šum u odnosu na korišćenje diskretne Furijeove transformacije.

Cljučne reči—izviđački radar; klasifikacija; uvijena DFT; modifikovani spektrogram.

I. UVOD

KOMPLEKSNOST pojava na bojištu nameće upotrebu senzora koji rade u različitim delovima elektromagnetnog spektra (radari, televizijske i termovizijske kamere, akustički senzori i dr.), kao i fuziju informacija prikupljenih različitim sensorima. Upotreba svakog od ovih senzora ima svojih prednosti, ali i nedostataka. Prednost upotrebe radarskih senzora u odnosu na optoelektronske ogleda se u povećanoj daljini detekcije kao i mogućnosti rada u složenim meteorološkim uslovima (noć, magla, kiša i sl.). Sa druge strane, nedostaci radarskih senzora se ogledaju u manjoj rezoluciji u odnosu na optoelektronske senzore, kao i aktivnom zračenju energije, koje može biti izvidano i ometano. Ključni zadaci koji se postavljaju pred upotrebu radara za izvidanje ciljeva na zemljištu su detekcija i klasifikacija ciljeva. U tipičnim radarskim sistemima, proces detekcije radarskih signala je u potpunosti automatizovan, dok se klasifikacija radarskih ciljeva i njihovog ponašanja obavlja na osnovu iskustva operatera, [1]. Jedna od najčešćih

Dimitrije Bujaković – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Generala Pavla Jurišića Šturma 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: dimitrije.bujakovic@va.mod.gov.rs).

Milenko Andrić – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Generala Pavla Jurišića Šturma 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: andricsmilenko@gmail.com).

Boban Bondžulić – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Generala Pavla Jurišića Šturma 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: bondzulici@yahoo.com).

Davorin Mikluc – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Generala Pavla Jurišića Šturma 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: miklucd@yahoo.com).

Slobodan Simić – Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Generala Pavla Jurišića Šturma 33, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: simasimic01@gmail.com).

realizacija radara za izvidanje ciljeva na zemljištu je impulsno-Doplerov radar usled svoje relativno lake konstrukcije. Klasifikacija ciljeva ovih radara je zasnovana na analizi jedinstvene mikro-Doplerove signature kretanja radarskih ciljeva, [2].

Za obradu signala sa izlaza izviđačkih radara često se koriste tehnike koje se upotrebljavaju u obradi zvučnih signala. U [1] je predložena klasifikacija radarskih signala sa izlaza izviđačkih radara korišćenjem estimacije GMM (Greeedy Gaussian Mixture), pri čemu su kao ulazna obeležja u klasifikator korišćeni kepralni koeficijenti i parametri autoregresivnog modela realnih radarskih signala. Autori su u [3] predložili korišćenje koeficijenata linearne predikcije signala, kepralnih i mel-kepralnih koeficijenata za klasifikaciju signala sa izlaza izviđačkih radara. Ekspertski sistem za prepoznavanje radarskih ciljeva je predložen u [4]. U ovom istraživanju kao ulaz u ekspertski sistem korišćeni su parametri autoregresivnih modela realnih radarskih signala, dok je red ovih parametara izabran na osnovu [5].

Signali sa izlaza izviđačkih radara su vremenski nestacionarni, pa se za njihovu obradu često koriste metode vremensko-frekvencijske analize signala, [6]. S-metod je korišćen za praćenje centralne Doplerove frekvencije u [7], dok je u [8] predložen višeproorski S-metod za obradu signala sa audio izlaza izviđačkih radara. Praćenje centralne Doplerove frekvencije korišćenjem čestičnih filtera i modifikovane B-transformacije dato je u [9]. Sa druge strane, u [10] je pokazano da primena spektrograma u obradi višekomponentnih signala obezbeđuje veću koncentraciju energije u odnosu na korišćenje S-metoda.

U [11-14] su korišćena obeležja za klasifikaciju signala sa izlaza izviđačkih radara izdvojena na osnovu spektrograma. Koristeći vremenski zavisnu Furijeovu transformaciju (Short Time Fourier Transform – STFT) i chirplet transformaciju, autori su u [11] predložili metod za estimaciju pokreta ljudi korišćenjem radarskih merenja. Kao ulaz u fazi sistem, u [12] korišćeni su centralna Doplerova učestanost i širina spektra oko nje. Projekcije spektrograma na vremensku i frekvencijsku osu korišćene su za klasifikaciju radarskih signala u [13]. U [14] za izdvajanje širine spektra oko centralne Doplerove učestanosti korišćene su metode za segmentaciju slike pri čemu je prag određen na osnovu histograma nivoa sivog.

Zajedničko za sve prethodno pomenute metode je korišćenje spektrograma za izdvajanje obeležja signala sa audio izlaza izviđačkih radara. Za računanje spektrograma koristi se diskretna Furijeova transformacija (Discrete Fourier Transform – DFT) pri čemu su tačke računanja ekvidistantno

raspoređene na jediničnom krugu. U [15] predložena je neuniformna diskretna Furijeova transformacija, dok je u [16] razmatran specijalan slučaj ove transformacije – uvijena diskretna Furijeova transformacija (warped discrete Fourier transform – WDFT). Prednosti korišćenja WDFT u odnosu na standardnu DFT pri obradi višetonskih signala i njihovoj klasifikaciji prikazane su u [17]. Problem estimacije frekvencije korišćenjem WDFT razmatran je u [18]. U ovom istraživanju je pokazano da se kompleksni parametar uvijanja frekvencije može upotrebiti za estimaciju frekvencije signala koji sadrži jednu, kao i više sinusoida. Korišćenje uvijene diskretne Furijeove transformacije za obradu signala sa izlaza izviđačkih radara predstavljeno je u [19].

Korišćenje uvijene diskretne Furijeove transformacije za izdvajanje obeležja modelovanih radarskih signala koji potiču od osobe koja hoda je predstavljeno u ovom radu. Za izdvajanje obeležja radarskih signala korišćena je metoda za segmentaciju slike na osnovu histograma nivoa sivog koju je predložio Kapur, [20]. Nakon morfoloških operacija erozije i dilatacije, izvršeno je izdvajanje centralne Doplerove frekvencije i širine spektra oko nje. U radu su poredeni rezultati izdvajanja obeležja radarskog eho signala koji potiče od osobe koja hoda u zavisnosti od odnosa signal-šum. Dobijeni rezultati pokazuju da primena WDFT za računanje spektrograma obezbeđuje izdvajanje obeležja pri manjem odnosu signal-šum (Signal-to-noise ratio – SNR) u poređenju sa spektrogramom računatim korišćenjem DFT.

Rad je organizovan po sledećem: u delu II dat je prikaz računanja spektrograma korišćenjem uvijene diskretne Furijeove transformacije. Deo III je posvećen izdvajanju obeležja modelovanih radarskih signala korišćenjem spektrograma računatog na osnovu uvijene diskretne Furijeove transformacije, dok su u delu IV prikazani rezultati izdvajanja obeležja korišćenjem spektrograma računatog korišćenjem DFT i spektrograma računatog korišćenjem WDFT. Nakon ovoga, dat je zaključak, kao i smer daljih istraživanja.

II. SPEKTROGRAM RAČUNAT KORIŠĆENJEM UVIJENE DISKRETNE FURIJEOVE TRANSFORMACIJE

U obradi signala sa izlaza izviđačkih radara često se koriste tehnike vremensko-frekvencijske transformacije ovih signala usled njihove vremenske nestacionarnosti. Jedna od tehnika koja se često koristi je spektrogram, $S[n,k]$, koji je definisan kao, [19]:

$$S[n,k] = |X_{DFT}[n,k]|^2, \quad (1)$$

gde je $X_{DFT}[n,k]$ vremenski zavisna diskretna Furijeova transformacija signala definisana kao:

$$X_{DFT}[n,k] = \sum_{r=-\infty}^{+\infty} x[r]w[r-n]e^{-j2\pi rk/N}, k = 0,1,\dots,N-1, \quad (2)$$

pri čemu je n indeks diskretnog vremena, k je indeks diskretne

frekvencije, $x[n]$ je analizirani signal, N je broj tačaka korišćen za računanje diskretne Furijeove transformacije i $w[n]$ je prozorska funkcija.

U [19] je predloženo korišćenje spektrograma za čije računanje je korišćena uvijena diskretna Furijeova transformacija. Ovaj spektrogram je definisan kao:

$$S_{WDFT}[n,k] = |X_{WDFT}[n,k]|^2, \quad (3)$$

gde je $X_{WDFT}[n,k]$ vremenski zavisna uvijena diskretna Furijeova transformacija signala (Short Time Warped Discrete Fourier Transform – STWDFT) definisana kao

$$X_{WDFT}[n,k] = \sum_{r=-\infty}^{+\infty} x[r]w[r-n]z_k^{-r}, k = 0,1,\dots,N-1, \quad (4)$$

pri čemu su z_k položaji tačaka na jediničnom krugu u kojima se računa DFT nakon transformacije učestanosti.

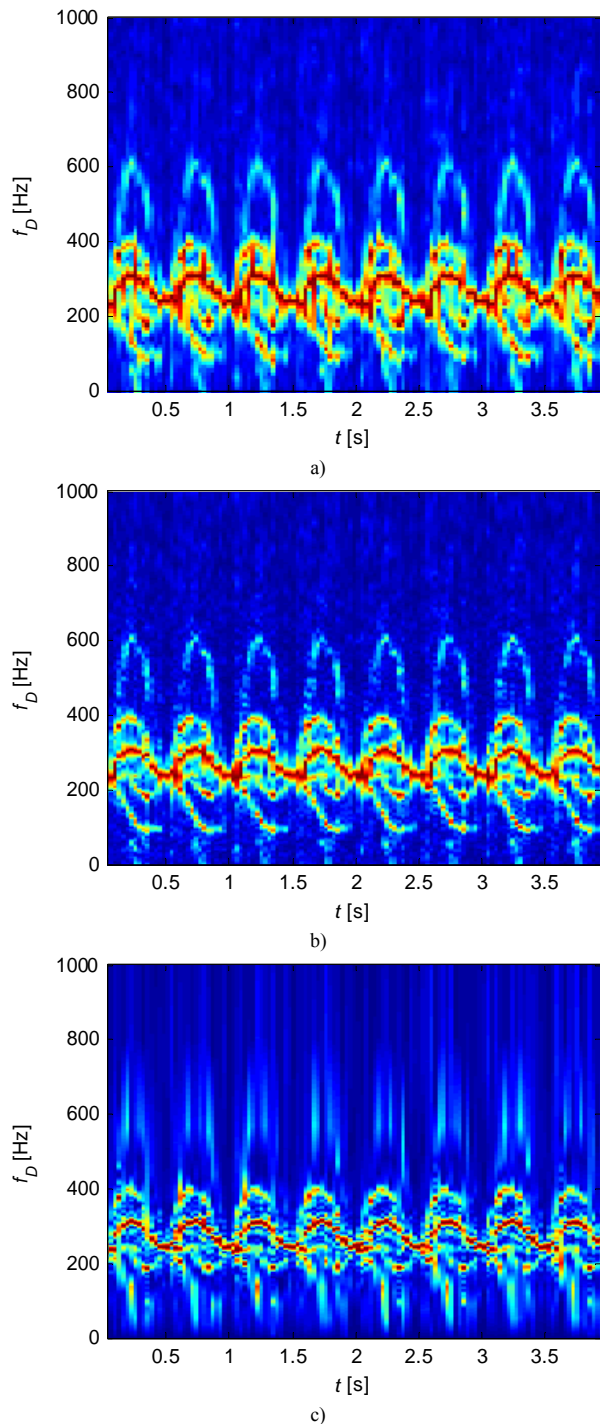
Položaji tačaka na jediničnom krugu u kojima se računa uvijena diskretna Furijeova transformacija određeni su na osnovu kompleksnog parametra $b = -b_m e^{-j\phi_b(n)}$, gde je:

$$\phi_b(n) = \frac{f(\arg \max_k |X_{DFT}(n,k)|)}{F_s} 2\pi \quad (5)$$

gde je $f(\arg \max_k |X_{DFT}(n,k)|)$ frekvencija koja odgovara maksimalnoj vrednosti modula računate DFT $X_{DFT}(n,k)$ za $k=0,1,\dots,N/2-1$, dok je F_s frekvencija odabiranja signala.

Uvijena diskretna Furijeova transformacija ne obezbeđuje jedinstvenu rezoluciju po frekvenciji, te je ova rezolucija veća u delu opsega frekvencija od interesa. Novom podelom frekvencijske ose tako da nova frekvencijska rezolucija odgovara minimalnoj razlici uvijenih frekvencija, može se formirati nova predstava u vremensko-frekvencijskoj ravni, pri čemu su vrednosti ove nove predstave jednake vrednostima STWDFT na vrednostima uvijenih frekvencija, dok je za ostale vrednosti jednaka nuli. Nakon određivanja gornje anvelope modula STWDFT u svakom vremenskom binu određen je modifikovani spektrogram koji se koristi u ovom istraživanju.

U ovom radu analiziran je modelovani radarski signal koji potiče od osobe koja hoda. Frekvencija odabiranja ovih signala je $F_s=4$ kHz, dok je dužina signala $t=4$ s. Modelovanom signalu dodat je beli Gausov šum, sa različitim odnosom SNR. Model kretanja osobe je opisan u [21], dok je radarski signal modelovan na osnovu ovakvog kretanja kao u [2]. Osoba se kreće na udaljenost $R=450$ m ka radaru na njegovoj liniji osmatranja. Visina osobe je $h=1.8$ m, dok je brzina njenog kretanja $v=2.5$ m/s. Na Sl. 1 prikazani su modifikovani spektrogrami modelovanog signala osobe koja hoda sa dodatim belim Gausovim šumom i računati korišćenjem WDFT za različite vrednosti kompleksnog parametra b_m .



Sl. 1. Modifikovani spektrogram modelovanog radarskog signala koji potiče od osobe koja hoda računat uvijenom diskretnom Furijeovom transformacijom za: a) $b_m=0.25$, b) $b_m=0.75$ i c) $b_m=0.99$.

Analizom Sl. 1 može se primetiti da se radarski signal koji potiče od osobe koja hoda sastoji od više komponenti. Na osnovu modela kretanja osobe koja hoda, [21], razmatrano je sedamnaest delova ljudskog tela koji učestvuju u kretanju (torzo, vrat, glava, leva i desna nadlaktica, leva i desna podlaktica, leva i desna šaka, levi i desni kuk, leva i desna

butina, leva i desna podkolenica, levo i desno stopalo). Najveći doprinos ukupnom radarskom signalu potiče od kretanja torza, usled njegove najveće radarske refleksne površine, dok komponente signala koje potiču od kretanja stopala imaju najveće promene frekvencija. Analizom spektrograma računatog korišćenjem WDFT, može se uočiti da sa povećanjem modula kompleksnog parametra b_m , dolazi do koncentracije energije oko centralne Doplerove učestanosti. Sa druge strane, na osnovu Sl. 1c) može se primetiti da za velike vrednosti ovog parametra, dolazi do potiskivanja komponenti signala koje potiču od kretanja ruku i nogu, dok se najbolje može uočiti komponenta signala koja potiče od kretanja torza.

III. IZDVAJANJE OBELEŽJA RADARSKIH SIGNALA

Centralna Doplerova frekvencija i širina spektra oko nje su korišćeni za klasifikaciju radarskih eho signala u [12]. Sa druge strane, u [14] je pokazano da projekcija spektrograma na frekvencijsku osu u slučaju kada radarski cilj menja svoju brzinu dovodi do povećanja širine oko centralne Doplerove učestanosti. Na osnovu ovoga, u ovom radu je za izdvajanje širine oko centralne Doplerove učestanosti sprovedena sledeća procedura:

1. normalizacija spektrograma prema maksimalnoj vrednosti u svakom vremenskom binu,
2. segmentacija (binarizacija) spektrograma primenom praga određenog prema Kapurovoj metodi [20],
3. primena morfoloških operacija dilatacije i erozije na binarnu sliku i određivanje regiona maksimalne površine i
4. određivanje donje i gornje granične frekvencije u svakom vremenskom binu (njihova razlika predstavlja širinu spektra i -tog vremenskog bina).

Centralna Doplerova frekvencija predstavlja srednju vrednost frekvencija kojima odgovara maksimalna vrednost jednog bina spektrograma računatog korišćenjem WDFT:

$$F_{CD} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f \left(\arg \max_k |X_{WDFT}(i, k)| \right) \quad (6)$$

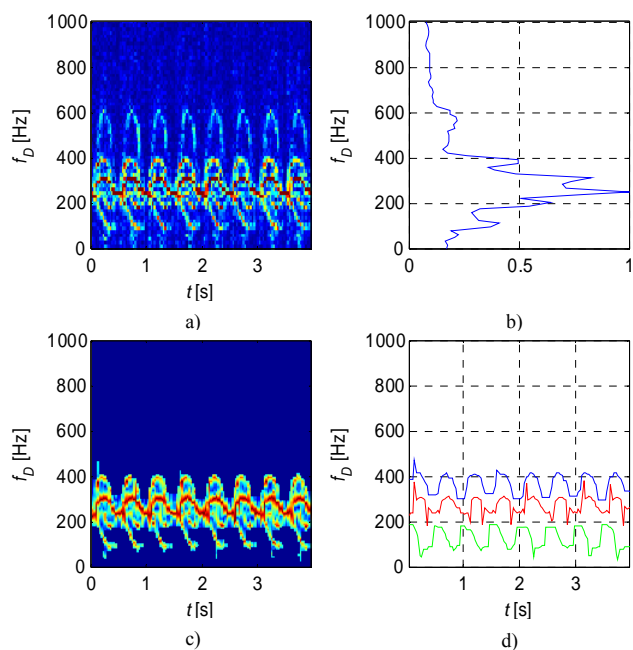
gde M predstavlja broj vremenskih binova.

Srednja vrednost dobijenih širina predstavlja širinu spektra (W) oko centralne Doplerove frekvencije je:

$$W = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (F_{up}(i) - F_{dn}(i)) \quad (7)$$

gde M predstavlja broj vremenskih binova, $F_{up}(i)$ i $F_{dn}(i)$ predstavljaju gornju i donju graničnu frekvenciju i -tog vremenskog bina.

Na Sl. 2 prikazani su rezultati obrade spektrograma računatog uvijenom diskretnom Furijeovom transformacijom modelovanog radarskog eho signala koji potiče od osobe koja hoda. Na osnovu Sl. 2d) može se primetiti da gornja i donja granična frekvencija prate centralnu Doplerovu frekvenciju, dok je širina spektra oko centralne Doplerove učestanosti vremenski promenljiva.



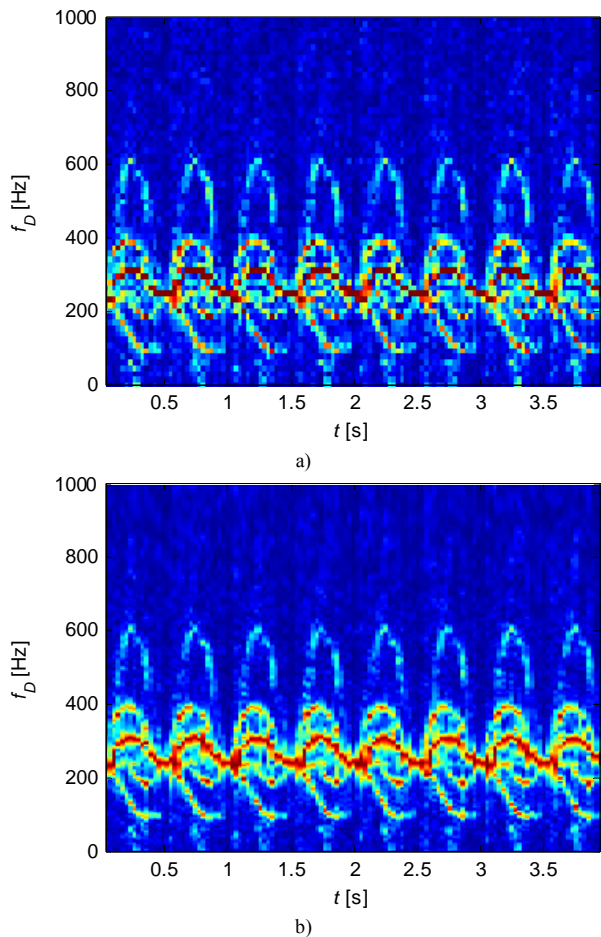
Sl. 2. Modelovani radarski signal koji potiče od osobe koja hoda a) normalizovani modifikovani spektrogram za $b_m=0.5$, b) projekcija modifikovanog spektrograma na frekvencijsku osu, c) normalizovani spektrogram nakon primene praga određenog metodom Kapura, d) gornja granična frekvencija, donja granična frekvencija i centralna Doplerova frekvencija analiziranog signala.

IV. REZULTATI

Za poređenje izdvojenih obeležja na osnovu spektrograma modelovanog radarskog signala koji potiče od osobe koja hoda računatog korišćenjem DFT, odnosno WDFT sprovedena su dva eksperimenta.

U prvom eksperimentu razmatran je modelovani signal osobe koja hoda trajanja $t=4$ s, pri čemu je modelovanom signalu dodat Gausov beli šum tako da je $SNR=0$ dB. Na Sl. 3 prikazani su spektrogrami ovog signala računati korišćenjem DFT, odnosno WDFT za moduo kompleksnog parametra uvijanja $b_m=0.75$.

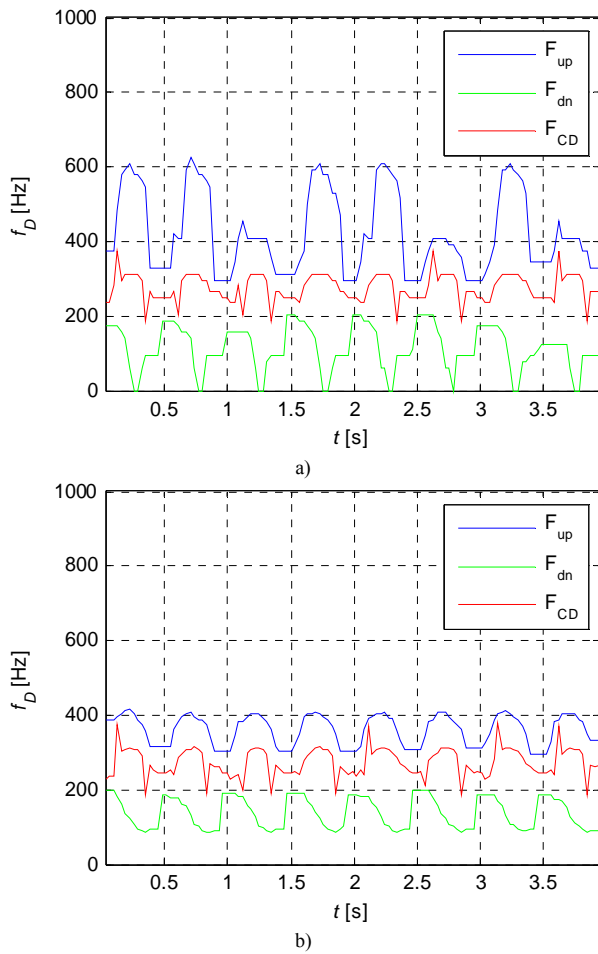
Analizom Sl. 3a) može se primetiti da se u spektrogramu modelovanog radarskog signala osobe koja hoda kome je dodat beli Gausov šum tako da je $SNR=0$ dB, mogu primetiti komponente ovog signala koji potiču od kretanja stopala. Pored ovoga, maksimalne vrednosti spektrograma u svakom vremenskom binu odgovaraju komponenti modelovanog radarskog signala koja potiče od kretanja torza, kao i komponente signala koje potiču od kretanja ruku i nogu. Sa druge strane, na osnovu Sl. 3b) takođe se primećuje da maksimalna vrednost modifikovanog spektrograma u svakom vremenskom binu odgovara kretanju torza, ali su u odnosu na spektrogram računat korišćenjem DFT, komponente signala koje potiču od kretanju ruku istaknute, dok su komponente signala koje potiču od kretanja stopala potisnute. Ovaj rezultat se mogao očekivati obzirom da se uvijanjem frekvencija postiže bolja koncentracija tačaka u kojima se računa DFT oko centralne Doplerove učestanosti.



Sl. 3. Spektrogram radarskog eho signala osobe koja hoda sa dodatim belim Gausovim šumom $SNR=0$ dB računat: a) diskretnom Furijeovom transformacijom, b) uvijenom diskretnom Furijeovom transformacijom za $b_m=0.75$.

Na Sl. 4 prikazani su rezultati izdvajanja centralne Doplerove frekvencije i širine spektra oko nje radarskog signala korišćenog u prvom eksperimentu. Analiza je sprovedena na osnovu izdvajanja obeležja spektrograma računatog korišćenjem DFT, odnosno WDFT. Analizom Sl. 4a) na kojoj su prikazana centralna Doplerova, gornja i donja granična frekvencija izdvojeni na osnovu obrade spektrograma računatog korišćenjem DFT, može se primetiti da su kao gornja i donja granična učestanost određene komponente signala koje potiču od kretanja stopala. Sa druge strane, na osnovu Sl. 4b) uočava se da su kao gornja i donja granična učestanost određene komponente signala koje potiču od kretanja ruku. Ovaj rezultat se mogao očekivati obzirom da su tačke u kojima se računa WDFT nalaze u okolini centralne Doplerove učestanosti.

U drugom eksperimentu razmatran je modelovani signal osobe koja hoda trajanja $t=4$ s, pri čemu je modelovanom signalu dodat Gausov beli šum tako da je $SNR=-6$ dB. Na Sl. 5 prikazani su spektrogrami računati korišćenjem DFT, odnosno WDFT ovog signala.

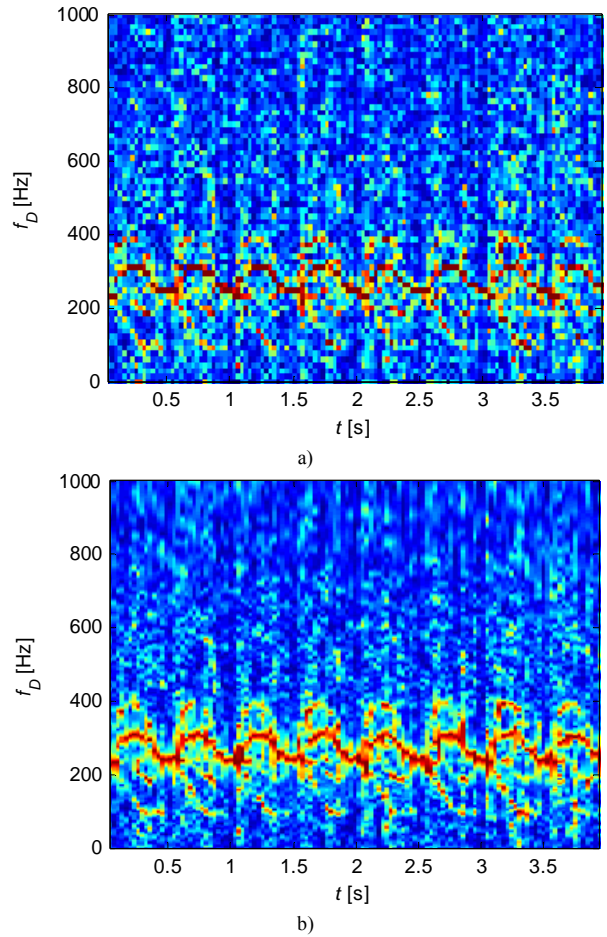


Sl. 4. Izdvojena obeležja modelovanog radarskog eho signala osobe koja hoda sa dodatim belim Gausovim šumom $SNR=0$ dB na osnovu spektrograma računatog: a) diskretnom Furijeovom transformacijom, b) uvijenom diskretnom Furijeovom transformacijom za $b_m=0.75$.

Na osnovu Sl. 5a) uočava se da se na osnovu spektrograma modelovanog radarskog signala koji potiče od osobe koja hoda računatog korišćenjem DFT može primetiti samo komponenta signala koja potiče od torza, dok se komponente signala koje potiču od kretanja ruku i nogu ne mogu primetiti. Sa druge strane, primenom spektrograma računatog korišćenjem WDFT (Sl. 5b), može se primetiti da pored komponente signala koja potiče od torza postoje i komponente signala koje potiču od kretanja ruku. Rezultati izdvajanja centralne Doplerove frekvencije i širine spektra oko nje za modelovani radarski signal korišćen u drugom eksperimentu prikazani su na Sl. 6.

Na osnovu Sl. 6a) može se primetiti da gornja i donja granična učestanost nisu periodične, dok se vrednosti centralne Doplerove frekvencije značajno menjaju. Analizom Sl. 6b) može se primetiti periodičnost gornje granične učestanosti, ali donja granična učestanost nije periodična. Vrednosti centralne Doplerove frekvencije se značajno menjaju u susednim vremenskim binovima, ali su ove promene manje u odnosu na izdvojenu centralnu Doplerovu

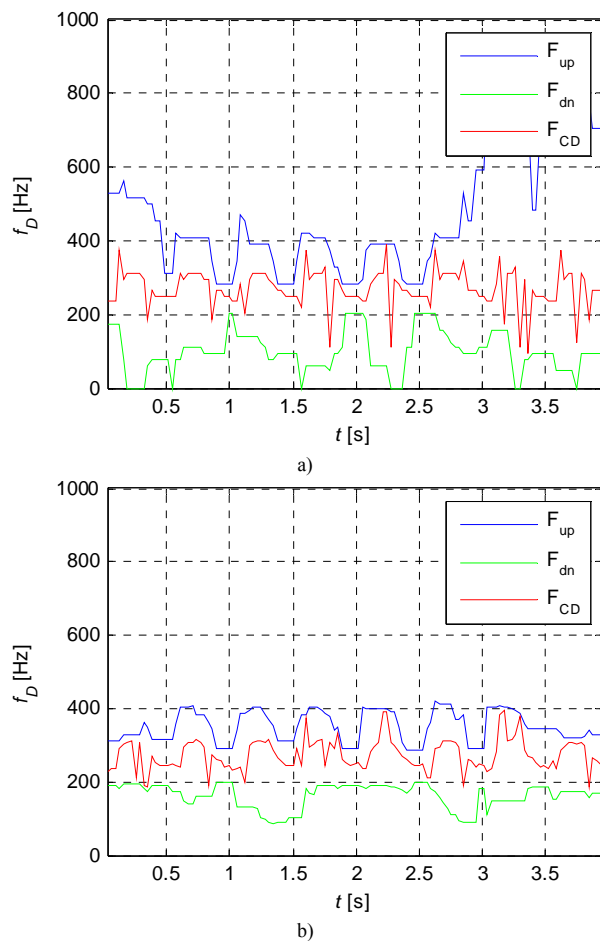
frekvenciju kada je korišćen spektrogram računat korišćenjem DFT. Na osnovu ovoga se može zaključiti da je izdvajanje centralne Doplerove frekvencije i širine spektra oko nje korišćenjem WDFT moguće pri manjim vrednostima SNR u odnosu na spektrogram računat korišćenjem DFT.



Sl. 5. Spektrogram radarskog eho signala osobe koja hoda sa dodatim belim Gausovim šumom $SNR=-6$ dB računat: a) diskretnom Furijeovom transformacijom, b) uvijenom diskretnom Furijeovom transformacijom za $b_m=0.75$.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je razmatran izbor obeležja za klasifikaciju modelovanih radarskih signala koji potiču od osobe koja hoda. Obeležja su izdvojena na osnovu obrade binova spektrograma primenom metoda za segmentaciju slike zasnovane na određivanju histograma nivoa sivog. U radu je izvršeno poređenje izdvajanja obeležja korišćenjem spektrograma računatog diskretnom Furijeovom transformacijom i uvijenom diskretnom Furijeovom transformacijom za modelovani radarski signal. Dobijeni rezultati pokazuju da je primenom WDFT moguće izdvojiti obeležja pri manjim odnosima signal-šum. U nastavku istraživanja razmatraće se izbor optimalnog modula parametra uvijanja, kao i analiza realnih radarskih signala.



Sl. 6. Izdvojena obeležja modelovanog radarskog eho signala osobe koja hoda sa dodatim belim Gausovim šumom $SNR=-6$ dB na osnovu spektrograma računatog: a) diskretnom Furijeovom transformacijom, b) uvijenom diskretnom Furijeovom transformacijom za $b_m=0.75$.

LITERATURA

- [1] I. Bilik, J. Tabrikian, A. Cohen, "GMM-Based Target Classification for Ground Surveillance Doppler Radar," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 267–278, Jan. 2006.
- [2] V. Chen, *The Micro-Doppler Effect in Radar*, Boston, MA, USA: Artech House, 2011.
- [3] D. Yessad, A. Amrouche, M. Debyeche M. Djeddou, "Micro-Doppler Classification for Ground Surveillance Radar Using Speech Recognition Tools," Proc. of 16th Iberoamerican Congress on Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision and Applications – CIARP 2011, Pucon, Chile, pp. 280–287, 15-18. November 2011.
- [4] D. Bujaković, Ž. Đurović, M. Andrić, B. Bondžulić, S. Simić, "Expert System Based on Hidden Markov Models for Recognition of Radar Targets," Proc. 24th Telecommunication Forum – TELFOR, Belgrade, Serbia, pp. 451–458, 22-23. November 2016.
- [5] D. Bujaković, M. Andrić, D. Mikluc, B. Bondžulić, "Parameter Order Selection of Autoregressive Model for Classification of Ground Surveillance Radar Targets," *Scientific Technical Review*, vol. 66, no. 2, pp. 3–9, Jul., 2016.
- [6] V. Chen, H. Ling, *Time-Frequency for Radar Imaging and Signal Analysis*, Boston, MA, USA: Artech House, 2002.
- [7] T. Thayaparan, Lj. Stanković, I. Đurović, "Micro-Doppler Based target Detection and Feature extraction in Indoor and Outdoor Environments," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 345, no. 6, pp. 700–722, Sep. 2008.

- [8] I. Orović, S. Stanković, T. Thayaparan, Lj. Stanković, "Multiwindow S-method for Instantaneous Frequency Estimation and its Application in Radar Signal Analysis," *IET Signal Processing*, vol. 4, no. 4, pp. 363–370, Aug. 2010.
- [9] D. Mikluc, D. Bujaković, M. Andrić, S. Simić, "Estimation and Extraction of Radar Signal Features Using Modified B Distribution and Particle Filters," *Frequenz*, vol. 70, no. 9–10, pp. 417–427, Sep. 2016.
- [10] D. Bujaković, M. Andrić, B. Bondžulić, S. Mitrović, S. Simić, "Time-Frequency Distributions Analyses of Ku-band Radar Doppler Echo Signals," *Frequenz*, vol. 69, no. 3–4, pp. 119–128, Mar. 2015.
- [11] T. Thayaparan, S. Abrol, E. Riseborough, Lj. Stanković, D. Lamothe, and G. Duff, "Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 1, no. 4, pp. 289–299, Aug. 2007.
- [12] M. Andrić, Ž. Đurović, B. Zrnić, "Ground Surveillance Radar Target Classification based on Fuzzy Logic Approach," Proc. IEEE International Conference on Computer as a Tool – EUROCON 2005, Belgrade, Serbia, pp. 1390–1392, 21–24. November 2005.
- [13] P. Molchanov, J. Asstola, K. Egiazarian, A. Totsky, "Classification of Ground Moving Radar Targets using Joint Time-Frequency Analysis," Proc. IEEE Radar Conference, Atlanta, Georgia, USA, pp. 1–6, 7–11. May 2012.
- [14] T. Šević, M. Andrić, B. Bondžulić, D. Bujaković, D. Ivković, "Izdvajanje obeležja radarskih ciljeva obradom spektrograma," Proc. 22. internacionalna naučno-stručna konferencija Informacione tehnologije 2017, Žabljak, Crna Gora, pp. 233–237, 27. februar–4. mart 2017.
- [15] S. Bagchi, S. Mitra, *Nonuniform Discrete Fourier Transform and its Signal Processing Applications*, Norwell, MA, USA: Kluwer, 1999.
- [16] A. Makur, S. Mitra, "Warped Discrete-Fourier Transform: Theory and Applications," *IEEE Trans. on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 48, no. 9, Sep. 2001.
- [17] O. Kwon, F. Taylor, "Multi-tone detection using the warped discrete Fourier transform," 51st Midwest Symposium on Circuits and Systems, Knoxville, TN, USA, pp. 281–284, 10–13. August 2008.
- [18] F. Franz, S. Mitra, G. Doblinger, "Frequency estimation using warped discrete Fourier transform," *Signal Processing*, vol. 83, no. 9, pp. 1661–1671, Aug. 2008.
- [19] D. Bujaković, M. Andrić, D. Mikluc, B. Bondžulić, "Analysis of Human Radar Echo Signal Using Warped Discrete Fourier Transform," Proc. New Trends in Signal Processing, Demanovska Dolina, Slovakia, pp. 1–6, 12-14. October 2016.
- [20] J.N. Kapur, P.K. Sahoo, A.K.C. Wong, "A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 29, no. 3, pp. 273–285, Mar. 1985.
- [21] R. Boulc'h, N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann, "A Global Human Walking Model with Real-Time Kinematic Personification," *The Visual Computer*, vol. 6, no. 6, pp. 344–358, Nov. 1990.

ABSTRACT

In this research it is examined feature extraction for classification of the simulated ground surveillance radar audio output signal that originates from walking person based on modified spectrogram. Modified spectrogram is calculated using wrapped discrete Fourier transform, while for feature extraction it was used processing of its bins using methods of digital image processing. In this paper it is analyzed feature extraction dependence from signal-to-noise ratio. Conducted results shows that using wrapped discrete Fourier transform can extract features for ground surveillance radar signal classification with smaller signal-to-noise ratio regarding to the usage of the discrete Fourier transform

Feature Extraction for Classification of Radar Signals Using Warped DFT

Dimitrije Bujaković, Milenko Andrić, Boban Bondžulić, Davorin Mikluc and Slobodan Simić