

Izdvajanje obeležja na bazi spektrograma za klasifikaciju radarskih ciljeva

1. Đorđe Damjanović

Katedra za računarsko i softversko
inženjerstvo

Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet
Tehničkih Nauka

Čačak, Republika Srbija

djordje.damjanovic@ftn.kg.ac.rs

<https://orcid.org/0000-0002-1796-7707>

2. Mihailo Tomić

Codebehind

Beograd, Republika Srbija

mihailo.tomic@codebehind.rs

<https://orcid.org/0009-0003-0581-8776>

3. Sava Stanišić

Bloxico

Beograd, Republika Srbija

sava.stanistic@vs.rs

<https://orcid.org/0009-0002-3118-0537>

Abstract—U ovom radu analizirani su metodi za izdvajanje obeležja radarskih ciljeva (vozila, osobe, grupe) zasnovanih na teksturi spektrograma. Korišćeni su parametri: entropija, moment trećeg reda raspodele energije i usmerenost spektrograma. Istraživanje je pokazalo da izbor parametara za izračunavanje spektrograma (vrsta prozora, dužina prozora, preklapanje i broj tačaka Furijeove transformacije) značajno utiče na separabilnost klasa. Najbolji rezultati separabilnosti ostvareni su za pravougaoni prozor dužine 512 odmeraka. Obeležja zasnovana na teksturi spektrograma pokazala su potencijal za automatsku klasifikaciju sa tačnošću većom od 90%.

Ključne reči—obeležja, radarski cilj, spektrogram, entropija, prozorska funkcija

I. UVOD

Radari sa audio izlazom koriste se za detekciju i klasifikaciju ciljeva kroz analizu mikro-Doplerovih signatura [1]. Glavni izazov je izdvajanje informativnih obeležja iz spektrograma, koji kombinuje vremensku i frekvencijsku analizu. Prethodni radovi [1–4] fokusirali su se na mikro-Doplerove efekte, dok ovaj rad proširuje metodologiju kroz teksturalnu analizu spektrograma. Cilj je ispitati uticaj parametara spektrograma na separabilnost klasa i predložiti optimalne postavke.

Glavne funkcije izviđačkih radara uključuju otkrivanje i klasifikaciju pokretnih objekata. Kod standardnih izviđačkih radara proces detekcije je u potpunosti automatizovan. Ono što treba naglasiti i što je specifično je da analiza prilikom izdvajanja obeležja, pa i sama klasifikacija i dalje oslonjena na stručnosti operatera [5–6].

U cilju izdvajanja obeležja koja će dati najbolje rezultate budućih klasifikacija, izbor parametara za izračunavanje spektrograma se pokazalo kao ključni faktor. Izdvojena obeležja su zasnovana na teksturi spektrograma: entropiji, momentu trećeg reda raspodele energije i usmerenosti spektrograma. U ovom radu je upotrebljeno nekoliko prozorskih funkcija, gde su se predstavile njihove uporedne analize ali se i analiziralo preklapanje prozora kao i na broju tačaka u izračunavanju Furijeove transformacije prilikom određivanja spektrograma. Korišćena je baza podataka sa izviđačkog radara IR-2, a za

obrađu podataka koristio se programski paket MATLAB™. U ovom radu će biti prikazani samo određeni rezultati celokupne obrade.

II. METODOLOGIJA

A. Baza podataka

Prilikom prikupljanja podataka sa izviđačkog radara IR-2 [7] cilj je detektovan i praćen automatski. Rastojanje između radara i cilja bilo je između 100 m i 500 m, te je postojala optička vidljivost ciljeva. Radarski ciljevi su se kretali asfaltnim putem širine 4 m na pravcu direktnog osmatranja radara. Kretanje ciljeva je bilo u potpunosti kontrolisano.

Amplituda signala sa audio izlaza izviđačkog radara je u opsegu ± 1 V. Audio izlaz radarskog senzora povezan je sa mikrofonskim ulazom zvučne kartice računara, te je sačuvan na računar u digitalizovanom formatu, sa frekvencijom odabiranja $f_s = 4$ kHz. Napravljena je baza realnih Doplerovih signala u više različitih slučajeva. Trajanje snimaka je 4 s. Tokom procesa formiranja baze, prikupljeni su podaci o različitim klasama ciljeva:

1. klater (ukupno 18 sekvenci),
2. osoba koja puzi (ukupno 5 sekvenci),
3. osoba koja hoda (ukupno 99 sekvenci),
4. osoba koja trči (ukupno 71 sekvenca),
5. grupa osoba koje hodaju (ukupno 124 sekvence),
6. grupa osoba koje trče (ukupno 50 sekvenci),
7. putničko vozilo (ukupno 24 sekvence)
8. putničko vozilo (ukupno 24 sekvence)
9. kamion (ukupno 49 sekvenci).

U svakom trenutku se u zoni osmatranja radara nalazi samo jedan cilj, a kretanje radarskih ciljeva je bilo od i ka radaru. Detaljan opis baze radarskih signala dat je u [7].

U ovom radu analizirane su klase radarskih signala koji potiču od osobe koja hoda, osobe koja trči, grupe osoba koje hodaju, grupe osoba koje trče i vozila (putničko i kamion).

Ovo je prostor za navođenje sponzora i/ili finansiranja. Ukoliko nema sponzora i/ili finansiranja obrišite ovaj 'text box'. (sponsors)

B. Vremensko-frekvencijska analiza

Vremenski zavisna Furijeova transformacija (Short-Time Fourier Transform – STFT) je ključna metoda za analizu signala čiji se frekvencijski sadržaj menja tokom vremena. Za signal $x(n)$, STFT je definisana [3] kao:

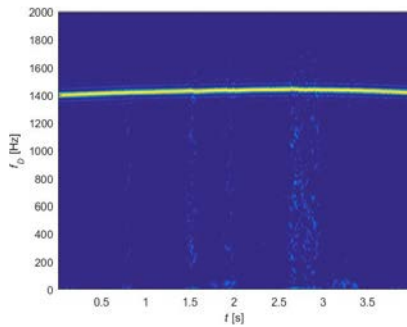
$$F(n, k) = \sum_{i=-N/2}^{N/2} w(i) x(n+i) e^{-j\frac{2\pi}{N}ik} \quad (1)$$

gde su $w(i)$ prozorska funkcija, N broj tačaka za Furijeovu transformaciju, n vremenski odmerak, a k frekvencijski uzorak. Spektrogram se dobija kao kvadrat modula STFT [3]:

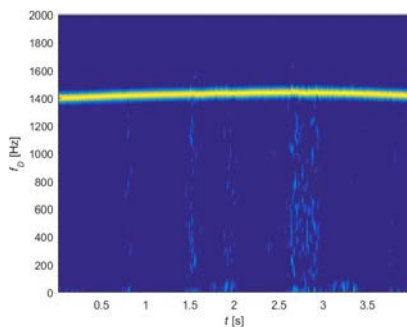
$$S(n, k) = |F(n, k)|^2 \quad (2)$$

III. UTICAJ VRSTE PROZORSKE FUNKCIJE NA IZGLED SPEKTROGRAMA

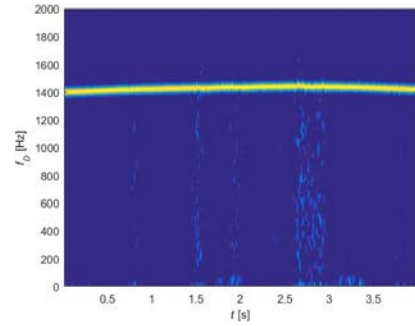
U okviru ove analize razmatrani su različiti oblici prozorske funkcije: pravougaona, Blekmanova funkcija, Hanova funkcija i Kajzerova funkcija parametra $\beta=2\pi$. Dužina prozorske funkcije je $L=128$ odmeraka, a preklapanje susednih prozora je 50%, dok je broj tačaka u kojima se računa Furijeova transformacija $N_{FFT}=1024$. Na slikama 1-4 prikazani su spektrogrami realnog radarskog signala koji potiče od vozila za različite oblike prozorskih funkcija korišćenih za računanje spektrograma.



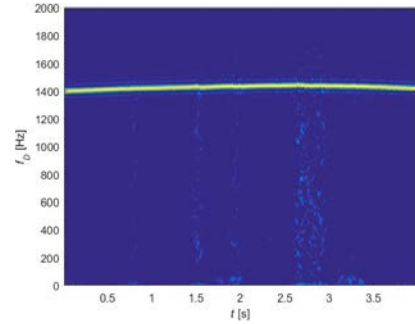
Sl. 1 Spektrogram realnog radarskog signala koji potiče od vozila računatog pravougaonom prozorskom funkcijom



Sl. 2 Spektrogram realnog radarskog signala koji potiče od vozila računatog Blekmanovom prozorskom funkcijom



Sl. 2 Spektrogram realnog radarskog signala koji potiče od vozila računatog Hanovom prozorskom funkcijom



Sl. 2 Spektrogram realnog radarskog signala koji potiče od vozila računatog Kajzerovom prozorskom funkcijom

Analizom ovih slika može se primetiti da je najveća koncentracija energije oko centralne Doplerove učestanosti za analizirani realni radarski signal ostvarena u slučaju korišćenja Kajzerovog prozora parametra $\beta=2\pi$ (Sl. 4) i pravougaonog prozora (Sl. 1), dok je nešto veće rasipanje energije oko centralne Doplerove učestanosti primetno u slučaju korišćenja Blekmanove (Sl. 2) i Hanove (Sl. 3) prozorske funkcije.

IV. PROCES IZDVAJANJA OBELEŽJA

A. Pred-obrađivanje spektrograma

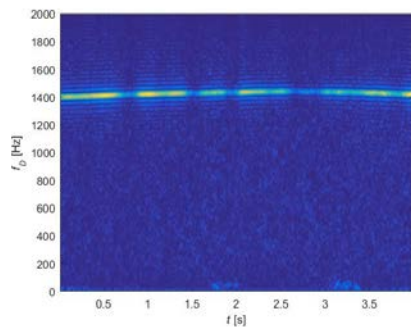
Pred-obrađivanje spektrograma [2] ima ključnu ulogu u poboljšanju kvaliteta podataka za ekstrakciju obeležja. Postupak se sastoji od dva koraka:

Prvi korak jeste računanje ukupne energije po frekvencijama:

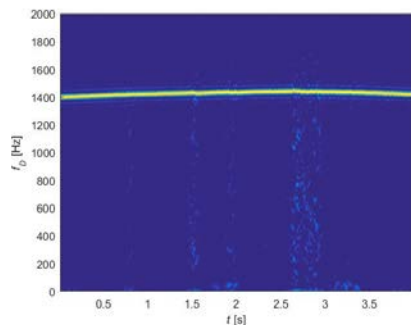
$$E(k) = \sum_n |S(n, k)| \quad (3)$$

gde $S(n, k)$ predstavlja spektrogram. Ovaj korak omogućava identifikaciju dominantnih frekvencijskih komponenti.

U drugom koraku se izdvaja deo frekvencija za koje je vrednost energija veća od srednje vrednosti frekvencija M . Na ovaj način, broj operacija koji se koristi za računanje obeležja se značajno smanjuje. Na slikama 5 i 6 prikazani su spektrogrami signala sa audio izlaza izviđačkog radara koji potiče od vozila pre i nakon pred-obrađivanja. Za računanje spektrograma korišćen je pravougaoni prozor dužine $L=128$ odmeraka, pri čemu je preklapanje susednih prozora 50% i broj tačaka u kojima se računa Furijeova transformacija je $N_{FFT} = 1024$.



Sl. 5 Spektrogram radarskog signala koji potiče od vozila pre pred-obrade



Sl. 6 Spektrogram radarskog signala koji potiče od vozila nakon pred-obrade

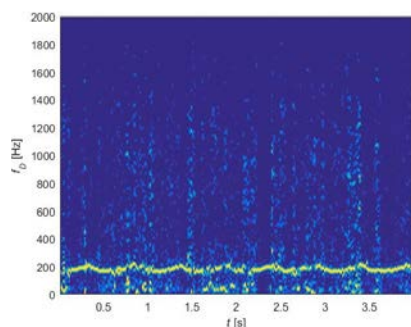
B. Entropija spektrograma

Entropija predstavlja jednu od mera koncentracije energije vremensko-frekvencijskih distribucija. Sa povećanjem energije, smanjuje se entropija i obratno, sa povećanjem entropije, koncentracija energije se smanjuje. Entropija spektrograma je definisana kao [8]:

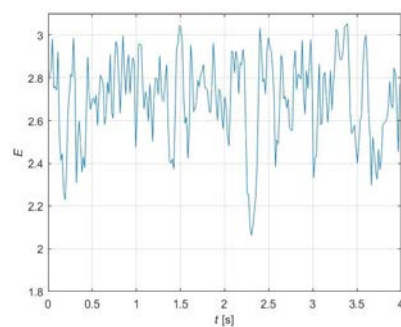
$$E = -\sum_n p(n) \log(p(n)) \quad (4)$$

gde je $p(n)$ normalizovana raspodela energije spektrograma.

Na Slici 7 prikazan je spektrogram realnog radarskog signala koji potiče od osobe koja hoda. Za računanje spektrograma korišćen je pravougaoni prozor dužine $L=128$ odmeraka, pri čemu je preklapanje susednih prozora 50% i broj tačaka u kojima se računa Furijeov transformacija je $N_{FFT} = 1024$. Promena entropije spektrograma signala koji potiče od osobe koja hoda u zavisnosti od vremena prikazana je na Slici 8. Entropija spektrograma signala koji potiče od osobe koja hoda iznosi $E=2.70$.



Sl. 7 Spektrogram realnog radarskog signala koji potiče od osobe koja hoda



Sl. 8 Promena entropije spektrograma signala koji potiče od osobe koja hoda u zavisnosti od vremena

C. Moment trećeg reda statističke raspodele energije spektrograma

Moment n -tog reda statističke raspodele energije spektrograma je definisan kao [9]:

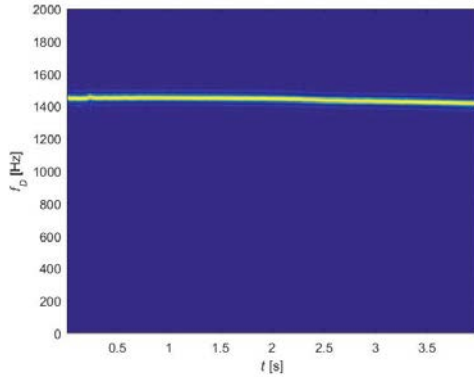
$$M_n = \sum_{i=1}^L (r_i - f_m)^n f(r_i) \quad (5)$$

pri čemu je r_i vrednost raspodele energije u svakom vremenskom binu, $f(r_i)$ raspodela energije u svakom vremenskom binu i f_m predstavlja srednju vrednost histograma.

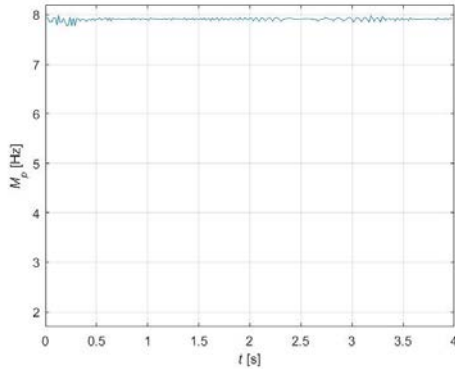
Moment prvog reda predstavlja srednju vrednost, dok je moment drugog reda varijansa spektrograma. Moment trećeg reda je mera asimetrije i predstavlja meru simetričnosti krive anvelope. Za vrednost momenta trećeg reda jednaku nuli, anvelopa je simetrična; za vrednosti momenta trećeg reda manje od nule, kriva anvelope je pomerena ulevo, dok je kriva anvelope raspodele energije pomerena udesno za vrednosti momenta trećeg reda veće od nule.

Moment trećeg reda predstavlja meru promene intenziteta spektrograma, odnosno sa porastom varijacija amplituda ovih intenziteta, moment trećeg reda ima manje vrednosti, i obratno [10]. Kako je centralna Doplerova frekvencija radarskog signala koji potiče od osobe koja hoda relativno mala, dodatne modulacije primljenog radarskog signala usled pokretanja ekstremiteta utiču na izrazitu promenu intenziteta spektrograma. Sa druge strane, centralna Doplerova frekvencija radarskog signala koji potiče od vozila je viša, a samo vozilo se ponaša kao kompaktan cilj, te nema velikih promena intenziteta spektrograma. Na osnovu ovoga, može se zaključiti da su momenti trećeg reda statističke raspodele spektrograma radarskog signala koji potiče od vozila nešto veći od momenata trećeg reda spektrograma radarskog signala koji potiče od osobe koja hoda.

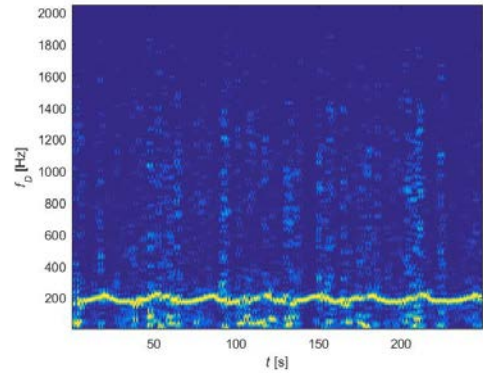
Na Slici 9 prikazan je spektrogram radarskog signala koji potiče od vozila. Za računanje spektrograma korišćen je pravougaoni prozor dužine $L=128$ odmeraka, pri čemu je preklapanje susednih prozora 50% i broj tačaka u kojima se računa Furijeov transformacija je $N_{FFT} = 1024$. Na Slici 10 prikazana je promena momenta trećeg reda spektrograma signala koji potiče od osobe koja hoda u zavisnosti od vremena. Na osnovu Slike 10 može se zaključiti da postoje male varijacije momenta trećeg reda statističke raspodele energije spektrograma radarskog signala. Srednja vrednost ovog momenta je $M=7.9$.



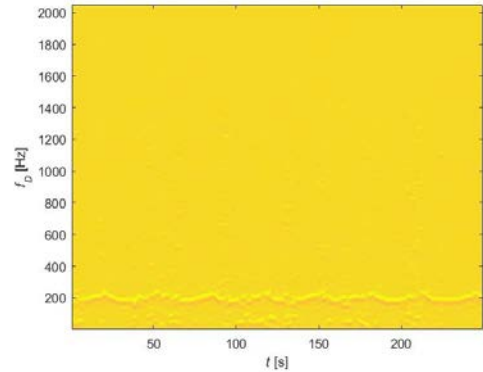
Sl. 9 Spektrogram realnog radarskog signala koji potiče od vozila



Sl. 10 Promena momenta trećeg reda spektrograma signala koji potiče od vozila u zavisnosti od vremena



Sl. 11 Filtrirani spektrogram realnog radarskog signala koji potiče od osobe koja hoda horizontalnim prostornim filtrom H



Sl. 12 Filtrirani spektrogram realnog radarskog signala koji potiče od osobe koja hoda vertikalnim prostornim filtrom V

D. Usmerenost

Usmerenost spektrograma je važno svojstvo spektrograma koje opisuje pravac koncentracije teksture spektrograma. Ovo svojstvo se dobija na osnovu usmerenosti gradijenta spektrograma. U prvom koraku određuje se filtrirana slika spektrograma dobijena nakon prolaska kroz horizontalni H i vertikalni V pravac [10-11]. Ovi pravci su definisani kao:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Amplituda vektora gradijenta $|\nabla G|$ definisana je kao:

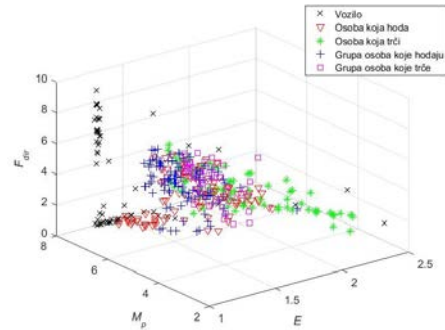
$$|\nabla G| = |\nabla H + \nabla V|/2 \quad (7)$$

pri čemu je ∇H gradijent spektrograma filtriranog horizontalnim filtrom i ∇V je gradijent spektrograma filtriranog vertikalnim filtrom.

Na slikama 11 i 12 prikazani su spektrogrami realnog radarskog signala koji potiču od osobe koja hoda nakon filtracije horizontalnim H i vertikalnim V prostornim filtrom. Za računanje spektrograma korišćen je pravougaoni prozor dužine $L=128$ odmeraka, pri čemu je preklapanje susednih prozora 50% i broj tačaka u kojima se računa Furijeova transformacija je $N_{FFT} = 1024$.

E. Analiza izdvojenih obeležja na osnovu teksture spektrograma različitih klasa radarskih ciljeva

U ovom delu rada analizirana su obeležja [12-13] zasnovana na teksturi spektrograma (entropija E , moment trećeg reda M_p i usmerenost spektrograma F_{dir}) koji potiču od različitih klasa radarskih ciljeva: vozilo, osoba koja hoda, osoba koja trči, grupa osoba koje hodaju i grupa osoba koje trče. Na Slici 13 prikazana su obeležja izdvojena iz baze realnih radarskih signala. Spektrogrami su računati korišćenjem pravougaonog prozora, dužine $L=128$ odmeraka, sa preklapanjem susednih prozora 50% pri čemu je broj tačaka za računanje Furijeove transformacije $N_{FFT}=1024$.



Sl. 13 Obeležja zasnovana na teksturi spektrograma različitih klasa radarskih ciljeva

Analizom Slike 13 može se uočiti relativno kompaktno grupisanje obeležja računatih na osnovu spektrograma signala koji potiču od vozila. Ova obeležja karakterišu pre svega velike vrednosti momenta trećeg reda i male vrednosti entropije. Obeležja izdvojena na osnovu spektrograma realnih radarskih signala koje potiču od osobe koja hoda karakterišu male vrednosti entropije i usmerenosti, a velike vrednosti momenta trećeg reda, dok obeležja izdvojena na osnovu spektrograma signala koji potiču od osoba koje trče imaju nešto veće vrednosti entropije i usmerenosti, ali niže vrednosti momenta trećeg reda. Više vrednosti usmerenosti i entropije, a niže vrednosti momenta trećeg reda su karakteristične za obeležja koja su izdvojena iz spektrograma radarskih signala koji potiču od grupe osoba koje hodaju, a nešto više vrednosti entropije i usmerenosti spektrograma se mogu primetiti za obeležja koja su računata na osnovu spektrograma realnog radarskog signala koji potiče od grupe osoba koje trče. U odnosu na separabilnost različitih klasa, može se primetiti da su obeležja koja potiču od vozila dobro separabilna u odnosu na ostale klase, ali je separabilnost obeležja koja potiču iz ostalih klasa radarskih ciljeva (osoba hoda, osoba trči, grupa osoba hoda i grupa osoba trči) značajno manja.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirana je separabilnost obeležja izdvojenih korišćenjem tekture spektrograma (entropija spektrograma, moment trećeg reda raspodele energije spektrogram u svakom vremenskom binu i usmerenost spektrograma) realnih radarskih signala sa audio izlaza izviđačkog radara. Analizirana su dva slučaja: kada je razmatrano pet klasa radarskih ciljeva i kada su razmatrane dve klase radarskih ciljeva. Izdvojena obeležja su analizirana kroz četiri analize u zavisnosti od parametara računanja spektrograma: vrsta prozora, dužina prozora, preklapanje susednih prozora i broj tačaka u kojima se računa Furijeova transformacija.

U prvoj analizi analizirana je separabilnost obeležja izdvojenih na osnovu tekture spektrograma u odnosu na trinaest vrsta prozora. Za analiziranih pet klasa radarskih ciljeva najveća separabilnost obeležja je ostvarena za pravougaonu prozorsku funkciju, dok je za Kajzerov prozor parametra $\beta=3\pi$ ostvarena minimalna separabilnost izdvojenih obeležja. Za razmatrane dve klase radarskih ciljeva minimalna separabilnost je ostvarena u slučaju primene Gausove prozorske funkcije, dok korišćenje Tejlorovog prozora obezbeđuje maksimalnu separabilnost.

Predmet druge analize je separabilnost obeležja izdvojena na osnovu tekture spektrograma za različite dužine prozorske funkcije. U slučaju razmatranih pet klasa radarskih ciljeva najveća separabilnost je postignuta za dužinu prozorske funkcije od 512 odmeraka, dok je za dužinu prozorske funkcije od 32 odmeraka postignuta minimalna separabilnost razmatranih obeležja. U slučaju razmatrane dve klase radarskih ciljeva minimalna separabilnost i maksimalna separabilnost obeležja izdvojenih na osnovu tekture spektrograma je ostvarena za iste vrednosti dužine prozorskih funkcija, $L=32$ odmeraka, odnosno $L=512$ odmeraka.

Buduća istraživanja pre svega treba pokazu rezultate različitim prozorskim funkcijama kao i različitom dužinom prozora. Takođe fokus treba staviti i na drugim vrstama klasifikacije koja su detaljnije opisana u navedenoj literaturi.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, br. 451-03-136/2025-03/200132 u saradnji sa Univerzitetom u Kragujevcu – Fakultet tehničkih nauka u Čačku.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] V. Chen and H. Ling, „The Micro – Doppler Effect in Radar“, Artech House, MA: Boston, pp. 1–15, 2011.
- [2] X. Shi, F. Zhou, L. Liu, B. Zhao, Z. Zhang, „Textural feature extraction based on time frequency spectrograms of humans and vehicles“, IET Radar Sonar Navig., vol. 9, no. 9, 2015.
- [3] Y. Kim, Member, IEEE, and H. Ling, Fellow, IEEE, „Human Activity Classification Based on Micro-Doppler Signatures Using a Support Vector Machine“, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47, no. 5, May 2009.
- [4] A. Aygar, Doppler radar data processing and classification. Master thesis, Middle East Technical University, August 2008.
- [5] 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.
- [6] D. Bujaković, M. Andrić, D. Mikluc, and 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, 2016.
- [7] M. Andrić, B. Bondžulić, B. Zrnić, The database of radar echoes from various targets with spectral analysis, IEEE, 10th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering, pp. 187 – 190, Belgrade, Serbia, 23-25. September 2010.
- [8] M. Daković, Mjerenje koncentracije vremensko-frekvencijskih distribucija. Magistarska teza, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 2001.
- [9] M. H. Hayes, Statistical Digital Signal Processing and Modeling. New York, NY: John Wiley & Sons, 1996.
- [10] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing (3rd ed.). Pearson Education, 2010.
- [11] J. G. Daugman, „Two-dimensional spectral analysis of cortical receptive field profiles“, Vision Research, vol. 20, no. 10, 847-856, 1980.
- [12] S. Theodoridis, K. Koutroumbas, Pattern Recognition. 4th Edition, Academic Press, Elsevier, Burlington, MA, 2009.
- [13] K. Fukunaga, Introduction to statistical pattern recognition. 2nd edition, San Diego, CA, USA: Academic press, 1990.

ABSTRACT

This paper analyzes methods for extracting radar target features (vehicles, individuals, groups) based on spectrogram texture. The following parameters were used: entropy, third-order moment of energy distribution, and spectrogram directionality. The research demonstrated that the choice of parameters for spectrogram computation (window type, window length, overlap, and the number of points in the Fourier transform) significantly affects class separability. The best separability results were achieved using a rectangular window of 512 samples in length. Features based on spectrogram texture showed potential for automatic classification with an accuracy exceeding 90%.

Feature Extraction Based on Spectrograms for Radar Target Classification

Đorđe Damjanović, Mihailo Tomić, Sava Stanišić