

Predikcija efikasnosti radio-ometanja primenom algoritma veštačke inteligencije

Ognjen Pejčić
Vojna akademija
Beograd, Srbija
ognjenpejic02@gmail.com
0009-0007-0788-2076

Nemanja Šepa
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Srbija
nemanjasepa@yahoo.com
0009-0008-4958-738X

Boban Sazdić-Jotić
Vojnotehnički institut
Beograd, Srbija
boban.sazdic.jotic@vs.rs
0000-0001-7239-174X

Apstrakt - Savremeni sistemi za elektronsko ratovanje često se suočavaju sa potrebom pouzdanog određivanja položaja elemenata za radio-izviđanje i radio-ometanje. U ovom radu prikazano je simulaciono okruženje koje omogućava početnu procenu efikasnosti radio-ometanja uz analizu odnosa jačine ometačkog i korisnog signala u dvodimenzionalnom prostoru. Prvo su razmatrane mogućnosti radio-komunikacije od interesa za sistem elektronskog ratovanja gde se definišu parametri koji obuhvataju koordinate, snagu i dobitak antena. Nakon toga se vrši procena efikasnosti radio-ometanja kada se koristi jedna ili više stanica radio-ometača. Konačno, razmatrane su dve metode za predikciju položaja stanice radio-ometača, i to klasična iterativna metoda i napredna metoda veštačke inteligencije. Pokazano je da je moguće izvršiti početnu procenu mogućnosti radio-komunikacije, efikasnosti radio-ometanja, da je koncept upotrebe više slabijih radio-ometača efikasniji od upotrebe samo jednog radio-ometača i da predložene metode za predikciju položaja stanica radio-ometača dovode do identičnih optimalnih rešenja.

Ključne reči – radio-izviđanje, radio-komunikacija, radio-ometanje, veštačka inteligencija, učenje uslovljavanjem.

I. UVOD

Savremene potrebe za kontrolom radio-komunikacija (RK) u elektronskom ratovanju (*Electronic Warfare, EW*) zahtevaju jasnu procenu efikasnosti radio-ometanja (ROm) i promišljeno raspoređivanje stanica radio-ometača (StROm). Jedna od ključnih metrika koja je uvedena u [1,2] jeste odnos jačine radio-ometačkog i korisnog signala (*Jamming-to-Signal Ratio, JSR*), čija vrednost ukazuje na to da li StROm uspeva da onemogući RK u kojoj učestvuju jedan predajnik i prijemnik (tačka-tačka RK). Međutim, potrebno je istaći da je bitan i drugi uslov koji se odnosi na pronalaženje optimalnog položaja jednog ili više StROm, kako bi se postigao željeni nivo *JSR* uz istovremeno izbegavanje nepotrebnog trošenja efektivne izračene energije (*Effective Radiated Power, ERP*) i smanjenje verovatnoće otkrivanja od strane neprijatelja [3–5].

U ovom radu, zasnovanom na idealizovanoj ravanskoj geometriji (2D prostor), predstavljeno je simulaciono okruženje koje omogućava proračun tačka-tačka RK koja je od interesa za procenu efekata ROm. Parametri koji određuju RK od interesa unosi korisnik te je moguće menjati položaj predajnika i prijemnika, snagu predaje, dobitak antena i slično. Ovo je osnova za sledeći korak u simulaciji koji se odnosi na definisanje parametara jedne ili više StROm koje učestvuju u

procesu ROm prethodno definisane RK. Na taj način, može se pokazati da su ispravne sledeće hipoteze: korišćenje usmerenih antena direktno utiče na povećanje efikasnosti ROm i angažovanje više slabijih StROm je efikasnije u odnosu na jedan StROm velike snage. Predloženo simulaciono okruženje omogućava da se ispituju date hipoteze te da se uporede efekti ROm kada se koriste neusmerene i usmerene antene na StROm što doprinosi realističnijem sagledavanju funkcionisanja jednog sistema za *EW*. Kroz simulaciono okruženje je dokazana i tvrdnja da je upotreba više StROm sa manjim snagama efikasnije rešenje sistema za *EW* pošto se na taj način postižu dva efekta: mogućnost prikrivanja i kontinualnosti ROm istovremeno.

Bitno je naglasiti da se kroz simulaciju takođe može odrediti optimalni položaj jedne StROm u postupku koji obuhvata klasičan (iterativni) metod pretraživanja celog prostora i pristup učenja uslovljavanjem (*Reinforcement Learning, RL*). Pristup učenja sa uslovljavanjem je vrsta algoritma veštačke inteligencije gde agent automatski „spoznaje” pozicije StROm sa najboljim učinkom ROm. Ovakav simulacioni model, iako pojednostavljen, pruža dobru polaznu osnovu za razumevanje ponašanja svih elemenata u procesu ROm, planiranje u realnijim i složenijim okruženjima i moguću implementaciju predloženog *RL* modela u složenije simulacione modele. Prvi pristup predikcije efikasnog položaja StROm koristi klasičan metod iscrpnog (iterativnog) pretraživanja prostora u MatLab okruženju. Na gusto raspoređenoj mreži tačaka izračunava se *JSR* i upoređuje sa zadatim pragom za efektivno ometanje *JSR_{eff}*. Na ovaj način se jasno identifikuju regioni u kojima ROm onemogućava normalnu RK između predajnika i prijemnika. Drugi pristup predikcije efikasnog položaja StROm koristi model učenja uslovljavanjem u Python okruženju. Agent koristi metodu optimizacije udaljenosti (*Proximal Policy Optimization, PPO*) pronalazi optimalne lokacije za raspoređivanje StROm u simulacionom okruženju. Nagrada agentu definiše se tako da favorizuje položaje sa optimalnim *JSR*, čime se osigurava efikasno ROm. Tako se identifikuju najbolji položaji u velikim ili kompleksnim oblastima, uz istovremenu optimizaciju snage radio-ometačkog signala kako bi se izbeglo otkrivanje njegovog položaja.

Proučavanje efikasnosti ROm i optimizacije položaja StROm predmet je brojnih istraživanja u oblasti *EW* sistema.

Analizirani su različiti faktori koji utiču na uspešnost ometanja, pri čemu je autor u [6] predložio metodološki pristup za procenu borbenih situacija i uticaja ROm na RK. Autori u [1,2,7] su pak predstavili analitičke modele za izračunavanje dometa ROm, proračun potrebne snage signala i procenu efikasnosti u različitim propagacionim uslovima, što omogućava preciznu simulaciju i optimizaciju sistema *EW*. Dodatno, autori u [8] su predstavili procenu efikasnosti ROm RK, te su predstavili opšti opis modela *EW* sistema sa matematičkim modelom koji je zasnovan na teoriji masovnog opsluživanja. Ipak, rešavanje datog problema je bazirano na numeričkom primeru a ne na simulaciji što je predmet ovog rada.

S druge strane korišćenje učenja sa uslovljavanjem je našlo raznovrsne primene u funkcionalnim, pre svega vojnim sistemima. Autori u [9] su koristeći učenje sa uslovljavanjem, tačnije PPO agenta, realizovali planiranje misija dronova koji se angažuju za izviđačke letove. Autori u [10] su predstavili inteligentno ROm avionskih radara pomoću RL agenta, tačnije korišćenjem dubokog determinističkog gradijenta politike (*Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG*). Osim toga, u istraživanju koje je predstavljeno u [11], autori su sličan problem lokalizacije StROm rešili korišćenjem rekurentnih neuralnih meža (*Recurrent Neural Network, RNN*) i konvolucionalnih neuralnih mreža (*Convolutional Neural Network, CNN*).

Konačno, pokazano je u ovom radu da predloženo simulaciono okruženje omogućava simulaciju RK tačka-tačka i preciznu predikciju položaja radio-izviđačkih elemenata, tj. lokacije odakle je moguće izviđati RK od interesa. Takođe, efikasno se mogu odrediti položaji StROm za realizaciju ROm, čime se bolje razume funkcionisanje *EW* sistema. Prikazano je i da su bolji rezultati korišćenjem distribuiranog ROm i korišćenjem usmerenih antena. Osim toga, rezultati simulacije pokazuju da su rezultati modela učenja uslovljavanjem i iterativni metod uporedivi u predikciji optimalnog položaja StROm. Obe metode daju približno jednake rezultate, što potvrđuje njihovu upotrebljivost u planiranju i analizi *EW* sistema, pružajući pouzdan alat za raspodelu StROm i njihovu primenu u elektronskoj zaštiti, bezbednosti i kontroli radio-komunikacionih kanala.

Istraživanje je organizovano na sledeći način: u drugom poglavlju opisana je metodologija proračuna RK ROm, kao i opis razvijenih metoda za predikciju optimalne lokacije StROm, treće poglavlje prikazuje rezultate simulacija i diskusiju dobijenih rezultata a četvrtom poglavlju dat je zaključak sa osvrtom na mogućnosti unapređenja simulacionog okruženja i pravce budućih istraživanja.

II. METODOLOGIJA

A. Proračun radio-komunikacije

Radio-komunikacija od interesa zavisi od snage emitovanog signala sa predajnika, osetljivosti prijemnika, parametara antena koje se koriste i propagacionih uslova. Osnovni parametar u ovom proračunu je jačina primljenog signala S , koja se određuje na osnovu snage emitovanog signala i gubitaka u propagaciji. Ako je snaga primljenog signala ispod praga osetljivosti prijemnika $P_{r,os}$, RK neće biti moguća.

a) Model RK između predajnika i prijemnika

Udaljenost između predajnika i prijemnika direktno utiče na slabljenje signala usled prostiranja kroz prostor. Pretpostavljajući slobodno prostiranje signala u idealnim uslovima, jačina primljenog signala S može se izračunati pomoću Friisove jednačine (aproksimativni oblik):

$$S = P_t + G_t - L - 20\log_{10}(f) - 20\log_{10}(d) + G_r \quad (1)$$

gde je P_t snaga emitovanog signala izražena u dBm, G_t dobitak antene predajnika izražen u dBi, G_r dobitak antene prijemnika izražen u dBi, f frekvencija signala izražena u MHz, d udaljenost između predajnika i prijemnika u km i referentno slabljenje L koje iznosi 32.45 dB. Ovaj aproksimativni model proračuna RK koji je predstavljen u [1] omogućava procenu snage primljenog signala u funkciji udaljenosti i frekvencije.

b) Prag osetljivosti prijemnika

Svaki prijemnik ima prag osetljivosti $P_{r,os}$ koji predstavlja minimalnu jačinu signala potrebnu za uspešan prijem informacija. Ako je snaga primljenog signala S ispod praga osetljivosti $P_{r,os}$, prijemnik neće moći da detektuje signal, što znači da RK neće biti ostvarena. Ovaj uslov se može zapisati kao:

$$S \geq P_{r,os} \quad (2)$$

Na osnovu ove relacije, moguće je odrediti maksimalnu udaljenost na kojoj se RK može uspešno održati za poznatu vrednost osetljivosti prijemnika $P_{r,os}$.

c) Implementacija u simulacionom modelu

U MatLab i Python simulaciji, parametri predajnika (koordinate, snaga, dobitak antene) i prijemnika (koordinate, prag osetljivosti, dobitak antene) unose se ručno [12]. Nakon toga, računa se udaljenost između predajnika i prijemnika koristeći sledeću jednačinu koja važi za idealizovanu ravansku geometriju (2D prostor):

$$d = \sqrt{(x_{Tx} - x_{Rx})^2 + (y_{Tx} - y_{Rx})^2} \quad (3)$$

Nakon proračuna udaljenosti, izračunava se snaga primljenog signala S pomoću jednačine (1). Konačno, snaga primljenog signala S se upoređuje sa pragom osetljivosti $P_{r,os}$ kako bi se utvrdilo da li je komunikacija moguća. Ako je $S < P_{r,os}$, simulacija ispisuje poruku da RK nije moguća, dok u suprotnom potvrđuje da prijemnik uspešno detektuje signal i da je RK uspešna. Pored toga, generišu se grafički prikazi jačine primljenog signala S u prostoru, kao i prikaz zone u kojoj je RK uspešna.

B. Proračun radio-ometanja

Radio-ometanje RK ima ključnu ulogu u *EW* sistemima i zasniva se na generisanju ometačkog signala koji delimično ili potpuno onemogućava snaga primljenog signala S na strani prijemnika. Često se u slučaju ROm primljeni signal naziva korisni signal pošto se na strani prijema pojavljuje i ometački signal. Uspešnost ROm može se proceniti pomoću vrednosti *JSR*. Ukoliko je *JSR* veći od unapred definisanog praga efektivnog ometanja JSR_{eff} , prijemnik neće moći da detektuje

korisni signal. Matematički, JSR se definiše kao:

$$JSR = J - S \quad (4)$$

gde su J snaga ometačkog signala na prijemniku i S snaga korisnog signala na prijemniku, obe izražene u dBm. Na osnovu toga, ROm je uspešno ako važi sledeći uslov:

$$JSR \geq JSR_{eff} \quad (5)$$

Potrebno je napomenuti da prag efektivnog ROm JSR_{eff} varira od različitih uslova ali se u ovom radu nismo bavili ovom problematikom. S tim u vezi je prag efektivnog ROm JSR_{eff} se unosi ručno u predloženoj simulaciji.

a) Jedna stanica radio-ometača

U slučaju jedne StROm, snaga ometačkog signala J na prijemniku računa se slično kao snaga korisnog signala S , što je prikazano sledećom jednačinom:

$$J = P_j + G_j - L - 20\log_{10}(f) - 20\log_{10}(d) + G_r \quad (6)$$

gde je P_j snaga ometačkog signala izražena u dBm, G_j dobitak antene ometača izražen u dBi, G_r dobitak antene prijemnika izražen u dBi, f frekvencija signala izražena u MHz, d udaljenost između ometača i prijemnika u km i referentno slabljenje L koje iznosi 32.45 dB.

Nakon toga, računa se JSR i poredi sa JSR_{eff} . Simulacija koristi ovu formulu kako bi procenila da li je ROm uspešno ili ne. Ako je JSR manji od praga JSR_{eff} , ROm nije efikasno i prijemnik i dalje može detektovati korisni signal. U suprotnom, prijem korisnog signala je onemogućen. Simulacija takođe generiše grafički prikaz raspodele ometačkog signala J u 2D prostoru, kao i mapu odnosa JSR . Na vizuelnom prikazu mogu se identifikovati oblasti u kojima se ROm onemogućava prijem korisnog signala, i zaštitna zona koja označava područje u kojem RK ostaje stabilna uprkos prisustvu StROm. Zaštitna zona od ROm se definiše kao granična vrednost na kojoj je RK uvek moguća.

b) Više stanica radio-ometača

U prisustvu više StROm, potrebno je izvršiti sabiranje svih ometačkih signala J_i koji dolaze od različitih StROm. Snage ometačkih signala J_i su izražene u dBm, pa se njihovo sabiranje ne vrši prostim aritmetičkim zbirom, već se računa u lineranoj skali, koristeći sledeću jednačinu:

$$J_{sum} = 10\log_{10}\left(\sum_{i=1}^{N_j} 10^{\frac{J_i}{10}}\right) \quad (7)$$

gde su N_j broj ometača i J_i snaga ometačkog signala iz i -tog StROm na prijemniku. Nakon dobijanja ukupne snage ometačkog signala J_{sum} , pristupa se istom postupku kao u slučaju jedne StROm, tj. određuje se JSR i poredi sa pragom JSR_{eff} .

Simulacija omogućava analizu različitih konfiguracija StROm i njihovih parametara za jednu RK od interesa. Moguće je na taj način testirati različite strategije ROm kroz promenu rasporeda (lokacije) StROm i menjanje snage ometačkih signala J i drugih parametara koji su deo ove simulacije.

C. Predikcija efikasne lokacije stanice radio-ometača

U ovom radu razvijene su dve metode za predikciju efikasne lokacije StROm, pri čemu se jedna zasniva na iterativnom pristupu, dok je druga utemeljena na modelu veštačke inteligencije. Obe metode omogućavaju pronalaženje optimalnog položaja StROm u definisanom prostoru, pri čemu se iterativna metoda oslanja na postepeno sužavanje zone pretrage, dok metoda zasnovana na veštačkoj inteligenciji koristi RL agenta za autonomno učenje optimalnih pozicija StROm u prostoru.

a) Iterativna metoda

Metoda se zasniva na postepenom sužavanju zone pretrage kroz više iteracija, pri čemu se u svakoj iteraciji generiše mreža kandidatskih tačaka za lokacije StROm na osnovu kojih se računaju vrednosti JSR i analiziraju. Postupak se može opisati algoritmom koji je prikazan na slici 1:

```

Ulaz:
- Tx, Rx: Pozicije predajnika i prijemnika
- Pt, Gt, Gr, Pj, Gj, f: Parametri predajnika, prijemnika i ometaca
- Pocetna zona pretrage definisana dvema tackama [(x1,y1), (x2,y2)]
- Broj iteracija: broj_iteracija
- Zeljeni nivo efikasnosti ometanja JSR_eff

Izlaz:
- Optimalna pozicija ometaca i odgovarajuca JSR vrednost

Podaci:
- inicijalizacija konstanti i promenljivih

1 Funkcija iterativna_pretraga(Tx, Rx, Pt, Gt, Gr, Pj, Gj, f, zona_pretrage, broj_iteracija)
2   Izracunaj rastojanje izmedju Tx i Rx
3   Izracunaj referentni signal (S_ref)
4   Postavi pocetne granice pretrage (x_min, x_max, y_min, y_max)
5   najbolji_JSJ = -inf
6   optimalna_tacka = prazno

7   za iteraciju = 1 do broj_iteracija radi
8     Kreiraj mrezu kandidatskih tacka unutar trenutne zone pretrage
9     za svaku kandidatsku tacku radi
10      Izracunaj rastojanje od kandidata do Rx
11      Ako je rastojanje < 1e-6 onda
12        rastojanje = 1e-6
13      Izracunaj JSR za kandidatsku tacku
14      Ako JSR zadovoljava uslov JSR >= JSR_eff onda
15        Zabelezi tacku kao validnog kandidata
16      krajAko
17    krajZa
18    Ako nema validnih kandidata onda
19      Prekini pretragu (nije pronadjena odgovarajuca tacka)
20    krajAko
21    Izaberi kandidata sa najmanjom razlikom JSR - JSR_eff
22    Azuriraj zonu pretrage oko izabranog kandidata
23    Ako velicina nove zone ispod minimalne velicine onda
24      Prekini pretragu (zona dostigla minimalnu velicinu)
25    krajAko
26  krajZa

27 Vрати optimalnu tacku i vrednost JSR

```

Slika 1. Algoritam iterativnog metoda

Simulacija u MatLab generiše grafički prikaz procesa pretrage optimalne lokacije StROm, koji uključuje:

- početnu zonu pretrage,
- kandidatske tačke u svakoj iteraciji,
- najbolje kandidatske tačke i
- konačnu optimalnu tačku.

Vizuelni prikaz omogućava uvid u način na koji algoritam postepeno konvergira ka optimalnom položaju StROm, analizirajući raspodelu ometačkog signala u prostoru.

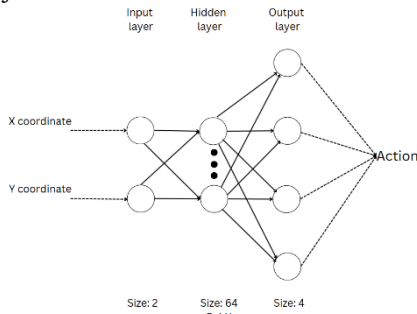
b) PPO agent

Implementacija PPO agenta u okviru razvijenog simulacionog okruženja omogućila je autonomnu predikciju optimalne lokacije StROm uz primenu učenja uslovljavanjem. Algoritam PPO odabran je zbog svoje stabilnosti i robusnosti prilikom rešavanja optimizacionih problema u neprekidnim i diskretnim prostorima stanja i akcija, što ga čini pogodnim za ovakve primene. Agent se u procesu učenja kreće unutar

predefinisane zone u dvodimenzionom prostoru, pri čemu je stanje definisano trenutnim koordinatama ometača, dok su akcije ograničene na pomeranje u četiri osnovna smera (gore, dole, levo, desno). Veličina koraka podešava se adaptivno u zavisnosti od epizode, čime se poboljšava stabilnost konvergencije ka optimalnoj lokaciji.

Funkcija nagrade formulisana je tako da agent prima najveću nagradu kada se približi ciljanom odnosu ometačkog i korisnog signala JSR , dok se odstupanje od te vrednosti penalizuje eksponencijalnom funkcijom. Time je osigurano da agent favorizuje pozicije sa optimalnim nivoom JSR , pri čemu se uzima u obzir potreba za minimizacijom snage ometačkog signala J kako bi se smanjila mogućnost detekcije StROM. Ovakav pristup, zasnovan na balansu između efikasnosti ROM i energetske štednje, već je prepoznat kao efektivan u savremenim istraživanjima koja se bave primenom RL algoritama u oblasti EW sistema i optimizacije rasporeda StROM [13].

Arhitektura neuronske mreže PPO agenta je prikazana na slici 2 i uključuje ulazni sloj sa dva neurona (koordinate StROM), skriveni sloj sa 64 neurona aktiviranih $ReLU$ funkcijom i izlazni sloj koji generiše verovatnoće za izbor sledeće akcije.



Slika 2. Arhitektura neuronske mreže PPO agenta.

Za optimizaciju težina mreže korišćen je *Adam* optimizator sa stopom učenja od 0.001, što je u skladu sa dobrim praksama u oblasti RL za probleme sa malim prostornim dimenzijama. Prednost ovakvog pristupa ogleda se u adaptivnosti agenta na promene u okruženju i mogućnosti donošenja odluka u realnom vremenu, bez potrebe za ponovnim pokretanjem iscrpnog pretraživanja prilikom svake promene parametara ili uslova u prostoru, što je od presudnog značaja u elektronskom ratovanju.

Rezultati treniranja PPO agenta pokazuju da nakon 50 epizoda dolazi do stabilne konvergencije ka optimalnim lokacijama StROM, sa JSR vrednostima u okviru zadanog praga. Vizuelna analiza trajektorija agenta otkriva da model uspešno izbegava neefikasne oblasti, fokusirajući se na pozicije koje omogućavaju optimalan odnos ometačkog i korisnog signala. Ove osobine PPO modela dodatno potvrđuju nalaze savremenih istraživanja koja ističu da RL modeli mogu nadmašiti tradicionalne algoritme pretraživanja u situacijama sa velikim pretraživačkim prostorima ili dinamički promenljivim uslovima [4].

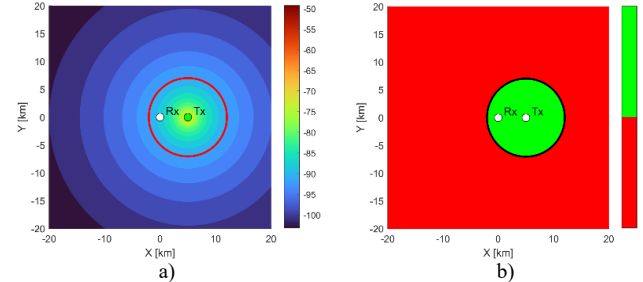
III. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom delu rada predstavljeni su rezultati simulacija u MatLab i Python sprovedenih za analizu RK, efikasnost ROM i

predikciju optimalne lokacije StROM. Prikazani rezultati omogućavaju uvid u efekte različitih scenarija, uključujući uticaj tipa antene, snage ometača i raspored StROM na uspešnost ometanja.

A. Proračun radio-komunikacije

Simulacija prikazuje raspodelu snage primljenog signala S u prostoru, omogućavajući analizu dometa predajnika d i određivanje oblasti u kojima je komunikacija moguća. Na osnovu izračunatih vrednosti S , određuje se granica ispod koje signal ne može biti detektovan, što odgovara pragu osetljivosti prijemnika. Primer jedne situacije dat je na slici 3.



Slika 3. Prikaz distribucije jačine signala S .

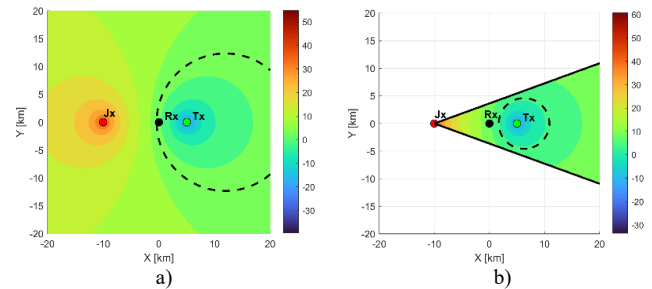
Dobijeni rezultati su ostvareni sa sledećim parametrima: prijemnik ($x=0, y=0, P_{r,os}=-90\text{dBm}, G_r=1\text{dBi}$) i predajnik ($x=5, y=0, P_t=10\text{dBm}, G_t=1\text{dBi}, f=450\text{MHz}$). Na osnovu prikazane raspodele signala S može se uočiti da snaga postepeno opada sa povećanjem udaljenosti d od predajnika, što je u skladu sa *Friisovim* modelom propagacije. Crvena kontura na slici 3a predstavlja prag osetljivosti prijemnika koji određuje granicu do koje je signal dovoljno jak za uspešan prijem. Dodatno se generiše slika 3b koja jasno prikazuje granicu između oblasti gde je komunikacija moguća i oblasti gde nije. Na slici 3b jasno je prikazano da se oblast u kojoj je prijemnik može ostvariti komunikacija (zelena zona). Sve tačke van ove zone (crvena zona) predstavljaju lokacije na kojima prijemnik ne bi mogao da detektuje signal.

B. Proracun radio-ometanja

Efikasnost ROM zavisi od broja StROM, njihovog rasporeda u prostoru, njihove snage, kao i tipa antene koje koriste. Cilj analize je da se ispita kako različiti faktori utiču na uspešnost ROM i da se uporede različite strategije rasporeda StROM.

a) Jedna stanica radio-ometača

Prvi scenario obuhvata analizu efekata ROM kada se koristi jedan StROM sa omnidirekcionom antenom (slika 4a), dok drugi scenario (slika 4b) obuhvata slučaj kada se koristi jedan StROM sa usmerenom antenom.



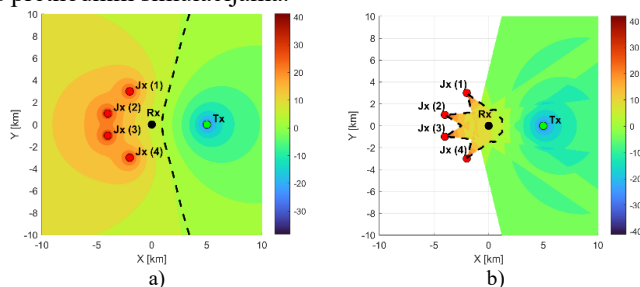
Slika 4. Prikaz mape odnosa JSR .

Dobijeni rezultati su ostvareni sa sledećim parametrima:

predajnik i prijemnik (isti parametri kao u primeru sa slike 3) i StROm ($x=-10, y=0, P_f=20\text{dBm}$) Na slici 4a korišćena je neusmerena antena sa dobitkom $G_f=1\text{dBi}$, dok je na slici 4b korišćena usmerena antena sa uglom glavnog snopa od 40° i dobitkom $G_f=7\text{dBi}$. Zona ograničena isprekidanim linijama predstavlja zaštitnu zonu od ROm, dok ostatak prostora predstavlja zonu uspešnog ometanja. Sa slike 4 se može uočiti da je, za istu snagu StROm, ROm efikasnije kada se koristi usmerena antena pošto je zaštitna zona pomerena prema prijemniku (isprekidana linija).

b) Više stanica radio-ometača

U ovom scenariju analiziramo situaciju u kojoj se koristi više StROm manje snage sa omnidirekcionim antenama (slika 5a) i situaciju sa više StROm manje snage sa usmerenim antenama (Slika 5b). Parametri prijemnika i predajnika isti kao u prethodnim simulacijama.



Slika 5. Prikaz mape odnosa JSR.

U slučaju korišćenja neusmerene antene StROm (slika 5a) korišćeni su sledeći parametri: $J_{x1}(x=-2, y=3)$, $J_{x2}(x=-4, y=1)$, $J_{x3}(x=-4, y=-1)$, $J_{x4}(x=-2, y=-3)$, $P_f=10\text{dBm}$ i $G_f=1\text{dBi}$. U slučaju korišćenja usmerenih antena StROm (slika 5b) korišćeni su sledeći parametri: pozicije StROm su isti kao prethodnom slučaju, $P_f=5\text{dBm}$, $G_f=7\text{dBi}$ i uglom glavnog snopa od 40° . Sa slike 4 možemo uočiti da je korišćenje više StROm efikasnije u odnosu na scenario kada se koristi samo jedna StROm. Osim toga, korišćenje usmerenih antena kao i u slučaju samo jedne StROm poboljšava efekte ROm.

C. Komparativna analiza ROm

U ovoj analizi upoređuju se različiti scenariji ROm kako bi se identifikovali ključni parametri koji utiču na intenzitet i domet ROm. U tabeli 1 je prikazana analiza poređenja rezultata koji su dobijeni prilikom ROm.

Tabela 1. Rezultati komparativne analize

Broj StROm	Tip antene	Dobitak antene [dBi]	Udaljenost J_x-R_x [km]	Snaga ometača [dBm]	JSR [dBm]
1	O	1	10	20	3.98
	D	5	10	18	5.98
	D	10	10	16	8.98
	D	15	10	14	11.98
2	O	1	10	20	6.99
	D	5	10	18	8.99
	D	10	10	16	11.99
	D	15	10	14	14.99
3	O	1	10	20	8.75
	D	5	10	18	10.75
	D	10	10	16	13.75
	D	15	10	14	16.75

Treba napomenuti da u tabeli 1 su sa oznakom „O“ dati

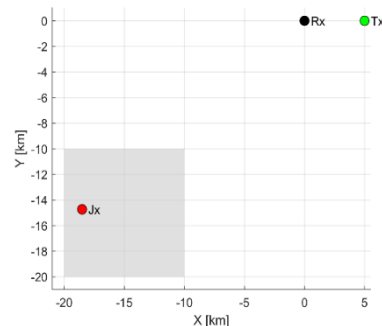
rezultati dobijeni korišćenjem omnidirekcionne (neusmerene) antene, dok su sa oznakom „D“ dati rezultati dobijeni korišćenjem usmerenih antena. Isto se može primetiti i ako se posmatra kolona pod nazivom Dobitak antene gde je za omnidirekcionu antenu korišćena jedinična vrednost za dobitak, a za usmerene antene su testirane tri vrednosti i to 5, 10 i 15 dBi. Dalje tabela 1 prikazuje da se efekti ROm povećavaju prilikom konstantne razdaljina između prijemnika i StROm, sa povećanjem dobitka usmerene antene. Ovaj efekat se javlja iako se snaga StROm smanjuje čime je dokazana početna tvrdnja o korišćenju usmerenih antena.

D. Predikcija efikasne lokacije stanice radio-ometača

Na početku simulacije se zadaju koordinate zone pretrage koja je u našem slučaju definisana tačkama $(-20, -20)$ i $(-10, -10)$. Na slikama gde se prikazuje izbor optimalne lokacije StROm ova zona je prikazana sivom bojom.

a) Iterativna metoda

Na slici 6 je prikazana konačno odabrana lokacija StROm putem iterativne metode.

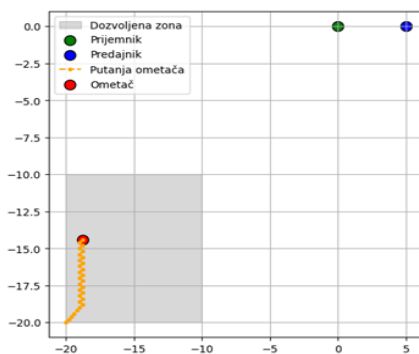


Slika 6. Odabir položaja StROm sa iterativnom metodom.

Optimalna lokacija je označena crvenom tačkom i obeležena sa J_x . Predloženom iterativnom metodu je potrebno samo tri iteracije da bi se došlo do optimalne lokacije. Nakon toga se postiže konvergencija ka optimalnom rešenju, što ukazuje na efikasnost predloženog pristupa i mogućnost brze identifikacije željene lokacije unutar zadate oblasti.

b) PPO agent

Rezultati sprovedene simulacije predikcije optimalne lokacije StROm ilustruju efikasnost primene PPO agenta pri čemu su dobijeni rezultati slični sa rezultatima dobijeni klasičnom iterativnom metodom pretraživanja. Na slici 7 je prikazana konačno odabrana lokacija StROm putem PPO agenta.



Slika 7. Odabir položaja StROm sa PPO agentom.

Kao i u slučaju iterativne metode, i u ovom scenariju postoji

predefinisana oblast gde se vrši pretraživanje radi odabira optimalne lokacije za StROm. Osim navedenog može se uočiti trajektorija PPO agenta, koja pokazuje postepeno približavanje optimalnoj lokaciji kroz interakciju sa simulacionim okruženjem. Takođe, konačna optimalna pozicija StROm označena je markerom, a simulacija u komandnom prozoru ispisuje vrednosti JSR koje potvrđuju ispunjenje uslova za efektivno ometanje.

Grafički prikaz dodatno ističe sposobnost PPO agenta da prilagođava kretanje u zavisnosti od povratnih informacija koje dobija iz okruženja. Trajektorije agenta pokazuju da model u početnim epizodama istražuje prostor šireg opsega, dok u kasnijim fazama usmerava kretanje ka područjima sa povoljnijim JSR vrednostima, što ukazuje na uspešno učenje optimalnih obrazaca ponašanja. Ovakav adaptivni pristup PPO agenata već je prepoznat kao značajan napredak u odnosu na statičke metode određivanja položaja ometača u sistemima elektronskog ratovanja, posebno u scenarijima sa nehomogenim propagacionim uslovima i nepravilnim geografskim konfiguracijama.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu, predstavljen je simulaciono okruženje u MatLab i Python koje vrši predikciju tri bitne stvari za svaki sistem za elektronsko ratovanje: proračun uspešnosti radio-komunikacije koja je od interesa, proračun mogućnosti i efikasnosti radio ometanja za optimizaciju radio-ometanja sa jednim ili sa više distribuiranih stanica radio ometača i konačno, proračun optimalne lokacije stanice radio ometača sa koje je radio ometanje najefikasnije. Istraživanje je obuhvatilo primenu iterativne metode, kao i algoritma veštačke inteligencije, radi određivanja optimalne lokacije stanica radio-ometaća. Dobijeni rezultati ukazuju da oba pristupa mogu doprineti poboljšanju tačnosti i efikasnosti EW sistema u zavisnosti od konkretnih uslova.

Dalja istraživanja usmerena su na proširivanje simulacionog okruženja na 3D prostor uz upotrebu podataka iz geografsko informacionih sistema gde bi se u obzir uzelo razmatranje reljefa, vegetacije i drugih činilaca koji utiču na propagaciju radio talasa. Osim navedenog, naredna faza u istraživanju je implementacija ITU R-REC-P.1546-6-201908 metode gde bi se unapredila predikcija radio talasa na različitim frekvencijskim opsezima. Uvođenjem ove metode mogu se značajno unaprediti početne procene upotrebe sistema za elektronsko ratovanje kroz procenu efikasnosti i pouzdanosti sistema, otvarajući nove mogućnosti za primenu u složenim operativnim scenarijima.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacije Republike Srbije, Ugovor broj 451-03-137/2025-03/200325 i deo je projekta broj VA/TT/1/25-27, koji je podržan od strane Ministarstva odbrane Republike Srbije.

LITERATURA

1. Adamy David L. *EW 101: A First Course in Electronic Warfare*; Artech House: Norwood, 2001; ISBN 1-58053-169-5.

2. Adamy, D.L. *EW 102 A Second Course in Electronic Warfare*; Artech House: Norwood, 2004; ISBN 1-58053-686-7.
3. Vakin, S.A.; Shustov, L.N.; Dunwell, R.H. *Fundamentals of Electronic Warfare*; Norwood, 2021; ISBN 1-58053-052-4.
4. Neri Filippo *Introduction to Electronic Defense Systems Third Edition Introduction to Electronic Defense Systems*; Third.; Artech House: Norwood, 2018; ISBN 978-1-63081-534-9.
5. Terzić, M. Some Aspects of Electronic Warfare in the Fight against Terrorism. In *Global War on Terrorism - Revisited*; IntechOpen, 2023.
6. Šepec Vladimir V. *Metoda efikasne procene borbene situacije*; Beograd, 2015; ISBN 978-86-918769-0-6.
7. Adamy, D.L. *EW 103 Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare*; Artech House: Norwood, 2009; ISBN 978-1-59693-387-3.
8. Devetak, S.; Terzić, M. Procena efikasnosti elektronskog ometanja radio komunikacionih sistema primenom teorije masovnog opsluživanja.; Tara, September 2012.
9. Zhao, X.; Yang, R.; Zhang, Y.; Yan, M.; Yue, L. Deep Reinforcement Learning for Intelligent Dual-UAV Reconnaissance Mission Planning. *Electronics (Basel)* **2022**, *11*, 2031, doi:10.3390/electronics11132031.
10. Cheng, Y.; Yuan, Y.; Xu, H.; Yi, W. Deep Reinforcement Learning-Based Jamming Against Multiple Frequency Agile Radars. *Proceedings of the IEEE Radar Conference* **2024**, doi:10.1109/RADARCONF2458775.2024.10548932.
11. Ioannou, I.; Savva, M.; Raspopoulos, M.; Christophorou, C.; Vassiliou, V. Revolutionising IoT Network Security By Assessing ML Localisation Techniques Against Jamming Attacks. *2024 22nd Mediterranean Communication and Computer Networking Conference, MedComNet* **2024**, doi:10.1109/MEDCOMNET62012.2024.10578201.
12. Dávila, C.; Hopkins, G.; Showman, G. *Radar and EW Modeling in MATLAB and Simulink*; Artech House: Norwood, 2024; ISBN 978-1-63081-906-4.
13. Mowla, N.I.; Tran, N.H.; Doh, I.; Chae, K. AFRL: Adaptive Federated Reinforcement Learning for Intelligent Jamming Defense in FANET. *Journal of Communications and Networks* **2020**, *22*, 244–258, doi:10.1109/JCN.2020.000015.

ABSTRACT

Modern electronic warfare systems frequently encounter the challenge of accurately determining the locations of elements essential for radio reconnaissance and jamming. This paper introduces a simulation designed to facilitate an initial assessment of the effectiveness of radio jamming by analyzing the ratio of jamming signal strength to useful signal strength within a two-dimensional space. The radio communication capabilities relevant to the electronic warfare system are initially explored, defining key parameters, including coordinates, transmission power, and antenna gain. Following this, the efficiency of radio jamming is evaluated when employing one or more jammers. Lastly, the paper examines two approaches for predicting the position of a radio jamming station: a classic iterative method and a simple artificial intelligence method. Research has demonstrated that conducting an initial assessment of radio communication possibilities and the effectiveness of radio jamming is feasible. Additionally, it has been found that employing multiple weaker jammers proves to be more effective than relying on a single jammer. Furthermore, the proposed methods for predicting the locations of jammers yield identical optimal solutions.

Prediction of radio jamming efficiency using an artificial intelligence algorithm

Ognjen Pejčić, Nemanja Šepa, Boban Sazdić-Jotić