

PROPAGACIJSKI MODEL HARMONIČKOG RADARA ZA DETEKCIJU NELINEARNIH KONTAKATA IMPROVIZIRANIH EKSPLOZIVNIH NAPRAVA

PROPAGATION MODEL OF HARMONIC RADAR FOR DETECTION THE NONLINEAR CONTACTS OF THE IMPROVISED EXPLOSIVE DEVICES

Milan Bajić

*Znastveno vijeće HCR Centar za testiranje, razvoj i obuku d.o.o., Zagreb
Scientific Council HCR Center for testing, development and training Ltd., Zagreb*

Sažetak

U radu se analizira problem detekcije improviziranih eksplozivnih naprava (IEN) pomoću harmoničkog radara, na temelju podataka iz eksperimentalnog istraživanja. Primjenjen je propagacijski model prostorne distribucije jakosti električnog polja harmoničkog radara i IEN iznad površine ravnog i električki glatkog tla. Razmatra se linearna polarizacija, za ručno izviđanje, za domete detekcije do 20 – 30 m, procjenjuju se gubici pokrivanja prostora detekcijom. Harmonički radar prima valove koje generiraju nelinearni elektronički elementi ili kontakti oksidiranih metalnih površina IEN. Domet detekcije harmoničkim radarom je ograničen nelinearnošću elemenata IEN čija pseudo nelinearna radarska površina σ_2 ovisi o površinskoj gustoći snage [W/m^2] na meti, pojavom zasićenja, oscilirajućom umjesto monotono opadajućom distribucijom jakosti električkog polja elektromagnetskih valova. Za harmoničke radare je izbor teorijskih modela meta ograničen na primjenu u slobodnom prostoru, dominiraju eksperimentalno izvedeni modeli za ograničen skup meta. Vojne i sigurnosne potrebe i zahtjevi za harmoničkim radarima su dobro definirane ali od 2014. g. su se pojavile i u sve većem su porastu potrebe humanitarnog protuminskog djelovanja.

Ključne riječi: *improvizirana eksplozivna naprava, harmonički radar, nelinearna radarska površina, nemonotona distribucija E polja, gubitak detekcije*

Abstract

This paper, based on the experimental research data, analyses the improvised explosive devices (IED) detection by harmonic radar. The propagation model was applied to spatial distribution of electric field strength of harmonic radar and IED above the flat and electrically smooth ground surface. The linear vertical polarisation for manual survey for distances up to 20–30 m is considered; the loss of spatial coverage by detection is estimated. The harmonic radar receives waves generated by nonlinear electronic components or by junctions of oxidized surfaces of different metals in IED. The detection range of harmonic radar is limited by nonlinearity of IED elements whose pseudo nonlinear radar cross section σ_2 depends on power density [W/m^2] on a target, by saturation, by oscillatory instead of monotonic decay distribution of electric field strength of electromagnetic waves. The availability of theoretic models for harmonic radar is limited to the use in free space; experimentally derived models for limited selection of targets are dominating. The needs and requirements for harmonic radars are well defined for military and security domains, but since 2014 they have been in ever growing demand for the humanitarian countermine action as well.

Keywords: *improvised explosive device, harmonic radar, nonlinear radar cross section, nonmonotonic E distribution, loss of detection*

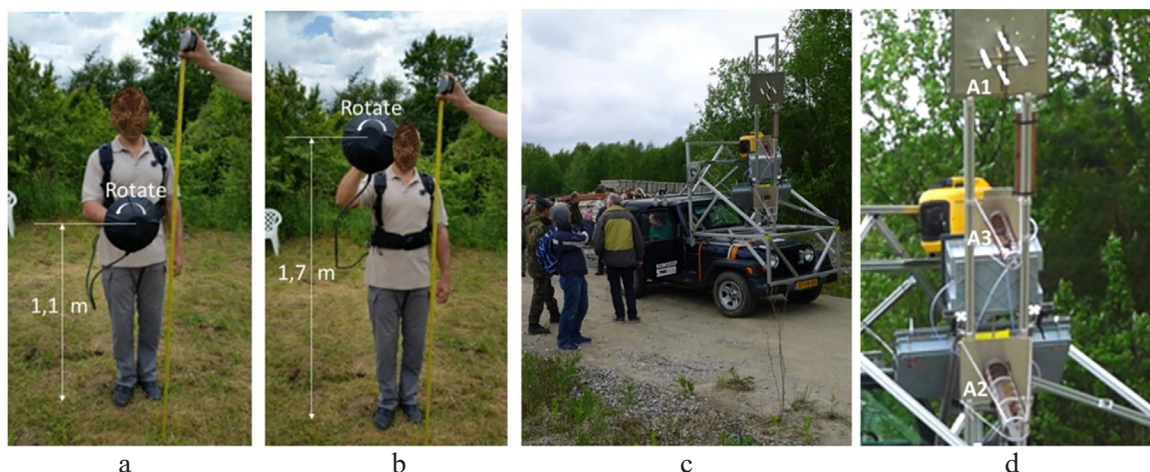
1. Uvod

1. Introduction

U radu se analizira problem detekcije improviziranih eksplozivnih naprava (IEN) pomoću harmoničkog radara, na temelju podataka iz provedenog eksperimentalnog istraživanja [1], [2]. Uobičajen naziv za ovu vrstu radara je detektor nelinearnih spojeva (Nonlinear junction detector – NLJD). Harmonički radar zrači elektromagnetske valove na frekvenciji f , a nelinearnosti radarske mete generiraju elektromagnetske valove na drugom $f_2 = 2f$ ili na trećem $f_3 = 3f$ harmoniku. Za razliku od dobro poznatih i rasprostranjenih konvencionalnih linearnih radara, kod kojih se koriste elektromagnetski valovi raspršeni i/ili reflektirani od pasivne mete, kod harmoničkih radara se primaju valovi koje generiraju nelinearni elektronički elementi ili kontakti oksidiranih metalnih površina mete (ova vrsta nije obuhvaćena u radu). Maksimalna daljina na kojoj se meta otkriva (domet) kod linearnih radara se može bez principijelnih ograničenja povećavati povećanjem snage P radarskog odašiljača i dobitka G radarske antene. Suprotno tome je domet harmoničkog radara ograničen a) nelinearnošću elemenata mete čija se pseudo nelinearna radarska površina σ mijenja s površinskom gustoćom snage $[W/m^2]$ na meti,

b) pojavom zasićenja ako površinska gustoća snage na meti premaši granični iznos koji je ovisan o nelinearnom elementu, c) prostornom oscilirajućom distribucijom jakosti polja elektromagnetskih valova umjesto monotonog opadanja s udaljenošću od izvora. Za analizu radarskih meta i propagaciju kod linearnih radara postoje razvijeni teorijski u praksi verificirani vrlo pouzdani modeli. Za harmoničke radare je izbor teorijskih modela meta ograničen na primjenu u slobodnom prostoru, dominiraju eksperimentalno izvedeni modeli za ograničen skup meta. Osim posljedica nelinearnosti (mete, domet) kod primjene harmoničkih radara za detekciju IEN na zemlji, dominira pojava interferencije direktnih i od tla reflektiranih valova što ima za posljedicu oscilirajuću, nemonotonu distribuciju jakosti električnog polja E $[V/m]$.

Potrebe za istraživanje uporabe harmoničkog radara iznad površine tla pratile su porast terorističkih aktivnosti s uporabom IEN i zasjeda. U nesimetričnim sukobima su djelovanju IEN bile pretežito izložene vojne i sigurnosne snage. Mada se problem djelovanja protiv IED i zasjeda pratio i ranije [3], [4], [5], [6], od 2014. godine je započela serija aktivnosti Europske obrambene agencije EDA, NATO Science for Peace programa i drugih za istraživanje i razvoj tehnologija otkrivanja IED [7], [8], [9],



Slika 1: a), b) Ručno izviđanje uključuje pretraživanje u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini, nakon otkrivanja signala od IEN rotiranjem antene se prilagođuje polarizacija, [1], [2]. c) Harmonički radar u razvoju za detekciju IEN s vozila, d) antene, NATO, [7].

Figure 1: a), b) Manual survey includes search in the vertical and horizontal plane, after signal detection of IED, rotation of antenna matches the polarization, [1], [2]. c) Harmonic radar in development for IED detection from ground vehicle, b) antennas, NATO, [7].

[10], [11]. U okviru tih aktivnosti se nalaze i harmonički radari. Zbog sigurnosne osjetljivosti tematike, ograničen je pristup informacijama, skupovima, pa se moraju koristiti i podatci ili informacije s Interneta. O primjeni harmoničkog radara ima malo podataka, najnoviji vojni primjer iz Sirije demonstrira ručno izviđanje harmoničkim radarom [12]. Uz dobro definirane vojne potrebe, nove potrebe za detekciju IEN dolaze iz civilnog sektora, najviše iz domene humanitarnog razminiranja, gdje se uz mine i neeksplozirana ubojna sredstva javlja potreba otkrivanja i uklanjanja IED [13], [14], [15]. Harmonički radari koriste najčešće jednu ili dvije odašiljačke frekvencije, kružnu polarizaciju za ručno izviđanje, te zračenje linearne horizontalne ili vertikalne polarizacije, lijeve ili desne kružne polarizacije a prijem kružnom polarizacijom. Polazeći od navedene situacije, u radu se na temelju eksperimentalnih podataka o šest odabranih primjera naprava iz [1], kakve se koriste za aktiviranje IEN, analizira problem ručnog izviđanja IEN s ciljem da se izvede primjenjiv model i predstave utjecaji par glavnih čimbenika. U radu se primjenjuje propagacijski model prostorne distribucije jakosti električnog polja harmoničkog radara i IEN iznad površine ravnog i električki glatkog tla, za linearnu polarizaciju, za ručno izviđanje, za domete do 20 – 30 m, procjenjuju se gubitci pokrivanja prostora detekcijom.

2. Rezultati istraživanja

2. Results of research

Primarna svrha istraživanja u radu je doprinijeti razvoju uporabe harmoničkog radara za detekciju IEN u vrlo opasnim okolnostima a sekundarna je eventualni prilog istraživanju i razvoju tehnike harmoničkog radara. Zbog niza ključnih ograničenja koja su karakteristična za harmonički radar i nelinearne mete, u nastavku se polazi od empiričkih podataka prikupljenih u [1] i analiziraju se kritični aspekti za inačice izviđanja IEN uz ograničenje na linearnu polarizaciju i koeficijent refleksije $r = -1$. O korištenim metama (naprave kakve se koriste za aktiviranje IEN) u [1] su dobiveni podatci o dometu detekcije za svih šest vrsta meta (na visinama $H_2 = 0$ m i 1,2 m).

Za tri odabrane mete dobiveni su podatci o utjecaju orijentacije mete na domet detekcije pri čemu su varirane dvije visine radara ($H_1 = 1,1$ m i 1,7 m), tri visine meta ($H_2 = 0$ m, 0,5 m, 1,2 m).

Na temelju podataka o dometima detekcije za ove tri mete izračunata je procjena pseudo nelinearne radarske površine σ_2 za drugi harmonik primjenom radarske jednadžbe koja vrijedi za prijem harmonika u slobodnom prostoru. U ovom koraku nije bilo moguće izmjeriti površinsku gustoće snage $[W/m^2]$ upadnih valova na mjestu mete. U procjeni σ_2 nije uključeno djelovanje interferencije direktnih i od površine tla reflektiranih valova što je međutim posebno analizirano.

2.1. Inačice izviđanja IEN

2.1. Versions of IED survey

Za harmonički radar do sada ne postoji razvijena i verificirana metodologija koja bi bila prilagođena inačicama izviđanja: a) ručno izviđanje s malih visina (slika 1a), (slika 1b), b) izviđanje s vozila u pokretu, s velikih visina (slika 1c), (slika 1d), c) izviđanje s malih visina s daljinski upravljano vozila, d) vertikalno izviđanje s bespilotnog zrakoplova. U radu smo fokusirani na ručno izviđanje, dobiveni rezultati se mogu primjeniti i na slučaj izviđanja s malih visina s daljinski upravljano vozila. O izviđanju s vozila i većih visine (slika 1c) nema podataka osim slike iz [7] iz koje procjenjujemo slijedeće: antena A1 bi mogla biti odašiljačka koja omogućava da se izabere zračenje linearne horizontalne ili vertikalne polarizacije, lijeve ili desne kružne polarizacije. Prijem se obavlja kružnom polarizacijom, antenom A2 se prima drugi a antenom A3 treći harmonik.

Može se očekivati da ovakvim režimom radar omogućava detekciju i nelinearnosti metalnih oksidiranih površina čime se proširuje mogućnost detekcije na mine, IEN, neeksplozirana ubojna sredstva koji nemaju elektroničke komponente. Uz polarizacijsku selektivnost, sustav bi mogao djelovati na dvije odašiljačke frekvencije čime se ostvaruje povećanje osjetljivosti preko 20 dBm.

Izviđanje harmoničkim radarom iz zraka s bezpilotnog zrakoplova je nasljednik izviđanja s helikoptera koje je bilo razvijano u SAD i bivšem SSSR s ciljem otkrivanja nelinearnosti oksidiranih metalnih površina oružja i mina bez elektroničkih ili električnih komponenata. U radu se ovaj vid izviđanja ne razmatra.

2.2. Jednadžba harmoničkog radara za nelinearne mete u slobodnom prostoru

2.2. Equation of harmonic radar for nonlinear targets in free space

Osnovna veza između parametara linearnog radara i mete opisuje se radarskom jednadžbom

$$P_r = PG^2\lambda^2\sigma/((4\pi)^3R^4) \quad (1)$$

u kojoj je P [W], zračena snaga radarskog odašiljača, P_r [W] primljena snaga na ulazu radarskog prijemnika, λ [m] je valna duljina radara, G je dobitak radarske primopredajne antene, R [m] je udaljenost između radara i mete, σ [m²] je efektivna radarska površina mete. Radarska jednadžba za n -ti harmonik harmoničkog radara preuzeta je iz [15], str. 67-69 i korištena je za nastavak analize,

$$P_m = [G_m\lambda_n^2(P_tG_t)^n\sigma_n]/[(4\pi)^{n+2}R^{2n+2}] \quad (2)$$

Za analizu su odabrani slijedeći podatci: radar zrači na valnoj duljini $\lambda_1 = 0,3538$ m, prima harmonike $n = 2, 3$ na valnim duljinama λ_n , $\lambda_2 = 0,1769$ m, $\lambda_3 = 0,1179$ m, zračena snaga radara je $P_t = 200$ W, primljena snaga na harmonicima je P_m [W], vlastita razina šuma radarskog prijemnika za harmonike je -125 dBm, dobitak odašiljačke antene radara je $G_t = 4$, dobitak prijemnih antena radara na harmonicima je G_m , $G_{r2} = 6,5$, $G_{r3} = 6,5$, udaljenost radara i mete je R [m]. Pseudo nelinearna radarska površina mete na valnoj duljini λ_n je $\sigma_n = \sigma_{spec} S_n$, gdje je σ_{spec} [m⁴/W] specifična harmonička radarska površina, S_n [W/m²] je površinska gustoća snage upadnih valova na metu. Treba istaknuti da σ_n nije konstantna značajka mete već je srazmjerna površinskoj gustoći snage na meti. U [1] su prikupljeni samo podatci za mete s elektroničkim i električkim nelinearnim elementima pa je analiza provedena samo za $n=2$, rezultati su prikazani u (tablica 1), (tablica 2).

2.3. Propagacijski model harmoničkog radara iznad ravne površine tla

2.3. Propagation model of harmonic radar above the flat ground surface

Za analizu prostorne distribucije električnih polja (slika 2) može se primjeniti opći model interferencije direktnog i reflektiranog vala prema [16], str. 136-138. Jakost električnog polja E na mjestu prijema je rezultat interferencije direktnog vala s jakosti električnog polja E_D i reflektiranog vala s jakosti polja E_r , $E = E_D + E_r$, gdje je

$$E_D = (60PG)^{1/2}(e^{-j\beta R}/R)F(R) \quad (3)$$

$\beta = 2\pi/\lambda$ je fazna konstanta, $F(R)$ je vrijednost dijagrama usmjerenosti u smjeru direktnog vala, u razmatranim slučajevima $F(R) \sim 1$,

$$E_r = r(60PG)^{1/2}((e^{-j\beta(R+R_2)})/(R_1+R_2))F(R_1) \quad (4)$$

r je koeficijent refleksije, $F(R_1)$ je vrijednost dijagrama usmjerenosti u smjeru upadnog vala prema tlu, $F(R_1) \sim 1$. Prema Rayleigh-ovom kriteriju ako su varijacije neravnina površine tla za n -ti harmonik $dh_n < \lambda n D / (8(H_1 + H_2))$ površina tla je elektomagnetski glatka za razmatranu λ_n . U primjerima iz [1], zadovoljeni su razmatrani uvjeti pa je opravdana aproksimacija (3) i (4). Za ručno izviđanje s harmoničkim radarom maksimalna horizontalna udaljenost D je do 30 m, a visine radara H_1 i mete H_2 su $H_1 \ll D$, $H_2 \ll D$, pa se može aproksimirati

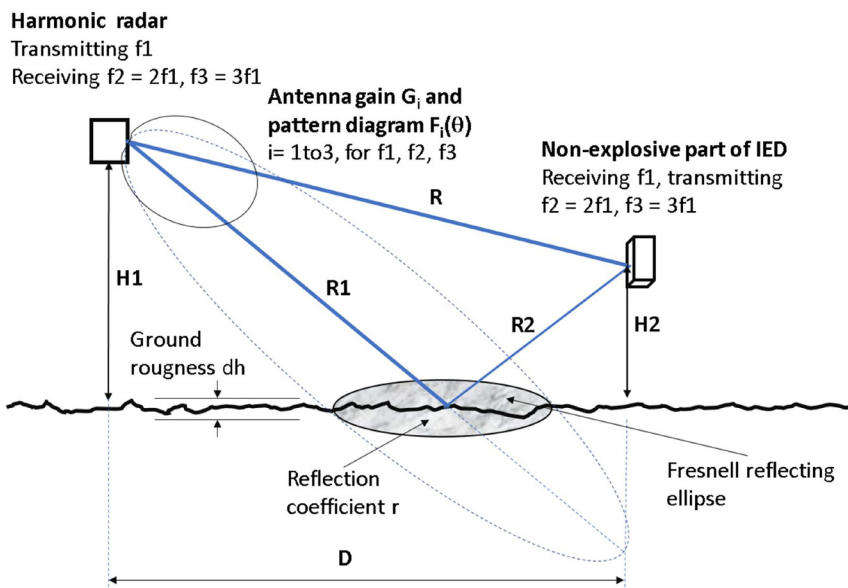
$$R = (D^2 + (H_1 - H_2)^2)^{1/2} \sim D + (H_1 - H_2)^2 / 2D, \\ R_1 + R_2 = (D^2 + (H_1 + H_2)^2)^{1/2} \sim D + (H_1 + H_2)^2 / 2D \\ \text{pa je razlika daljina } R_1 + R_2 - R \sim 2H_1H_2/D. \\ \text{Uz } F(R) \sim 1, F(R_1) \sim 1, F(R_2) \sim 1 \text{ slijedi}$$

$$E = E_D + E_r = E_D(1 + re^{-j\beta 2H_1H_2/D}) \quad (5)$$

Za površine koje se razmatraju koeficijent refleksije je $r \sim -1$, što rezultira relacijom

$$E = 2jE_D e^{-j\beta H_1H_2/D} \sin(\beta H_1H_2/D) \quad (6)$$

Na primjeru (slika 3) prikazana je normirana distribucija $|E/(jE_D e^{-j\beta H_1H_2/D})| = |\sin(\beta H_1H_2/D)|$ za $n = 2$. Uz pretpostavku da je $F(R_2) \sim 1$ i primjeni se (6) za drugi i treći harmonik, dobije se model prostorne normirane distribucije. Apsolutne vrijednosti normiranih polja u nastavku označavamo s E_1 (direktni val), E_2 (drugi harmonik) i E_3 (treći harmonik).



Slika 2: Propagacijski model harmoničkog radara i IEN iznad površine ravnog i električki glatkog tla, za linearnu polarizaciju.

Figure 2: The propagation model of the harmonic radar and IED above the flat ground plane and electrically smooth surface, for linear polarization.

Budući da su u [1] istraživane samo mete koje sadrže elektroničke nelinearne komponente, u nastavku se razmatraju samo E1 i E2.

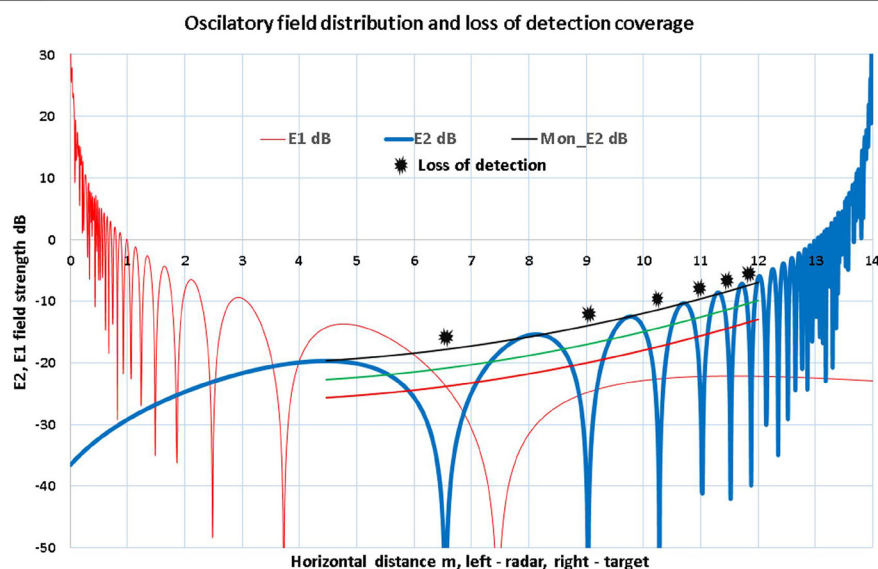
U primjeru (slika 3) radar se nalazi na lijevoj strani (0 m), na visini $H1 = 1,1$ m, meta na desnoj strani na udaljenosti 14m od radara na visini $H2 = 1,2$ m. Meta je mobitel Nokia 1616 sa elektroničkim prekidačem, (slika 5c), (slika 4b). Zbog minimuma jakosti polja u područjima označenih simbolom Loss of detection, dolazi do prekida detekcije mete.

Za procjenu širine prostora na kojoj dolazi do gubitka, procijenjena je spojnica maksimuma koja prikazuje kako bi izgledalo monotono opadanje s porastom daljine od IEN prema radarskom prijemu Mon_E2 prema (7), (crna crta), ispod

koje su označene linije -3 dB (zeleno) i -6 dB (crveno),

$$\text{MonE2} = -20,2259 - 0,5963x + 0,1417x^2 \quad (7)$$

gdje su x iznosi daljina kod kojih je ostvaren lokalni maksimum E2. U razmatranom slučaju na rasponu daljina od 4 m do 12 m gubici detekcije prema Mod_E2 na -3 dB iznose 45,56 % a na -6 dB iznose 28,04 %. Ovi gubici mogućnosti detekcije su indikator porasta opasnosti za operatora ručnog harmoničkog radara, što se dodatno razmatra na primjeru (slika 4) u kojem se ista vrsta IEN nalazi na 13 m i na 20 m od radara. Za udaljeniju metu jakost polja se monotono mijenja a za bližu metu javljaju se duboki minimumi jakosti polja što dovodi do gubitka detekcije (simbol Loss of detection).



Slika 3: Primjer prostorne oscilatorne nemonotone distribucije jakosti električnih polja: E1 na frekvenciji f radarskog odašiljača, E2 na frekvenciji drugog harmonika f_2 kojega zrače elektronički i električki nelinearni elementi IEN.

Figure 3: Example of the spatial oscillatory non-monotonic distribution of the electrical field strength: E1 on frequency f of radar transmitter, E2 on frequency of the second harmonic f_2 , radiated by electrical and electronic nonlinear elements of IED.

2.4. Istraživane naprave kakve se koriste za aktiviranje IEN (mete)

2.4. *Researched devices such as used for IED activation (targets)*

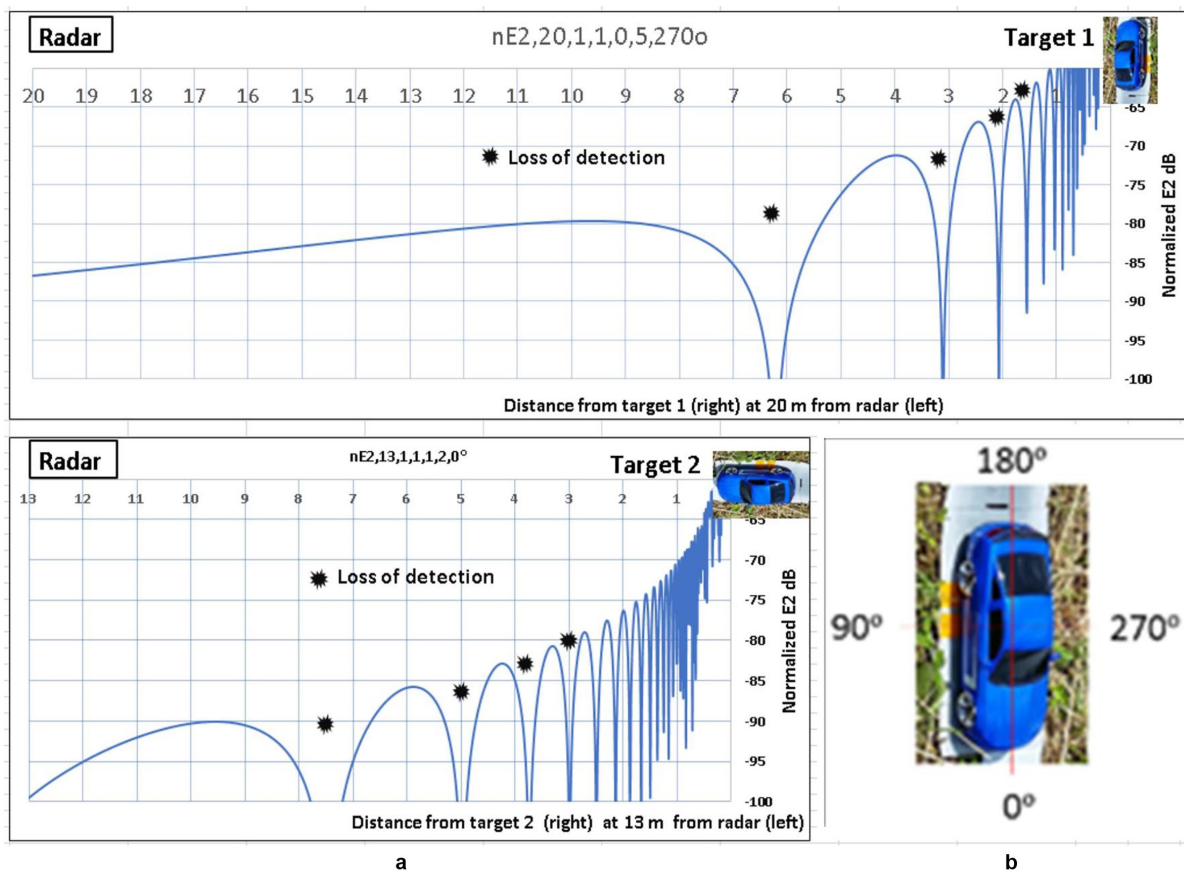
U [1] su prikupljeni podatci za mete s elektroničkim i električkim nelinearnim elementima pa je analiza provedena samo za drugi harmonik, $n=2$. Pseudo nelinearna radarska površina mete $\sigma_n = \sigma_{spec} S_n$ nije konstantna, već se mijenja srazmjerno površinskoj gustoći snage na meti S_n [W/m^2], gdje je σ_{spec} [m^4/W] specifična harmonička radarska površina mete. Budući da ne postoje javno dostupni podatci S_n , σ_{spec} o napravama kakve se koriste za aktiviranje IED, u nastavku u 2.4 (tablica 1) su prikazani podatci iz eksperimentalnog istraživanja [1] za domet detekcije D za razmatrane mete i geometrije mjerenja (H1, H2), za suho i za vlažno tlo.

2.5. Utjecaj orijentacije mete na domet detekcije D i na pseudo nelinearnu radarsku površinu σ_2 odabranih meta

2.5. *Influence of targets' orientation on detection range D and on pseudo nonlinear radar cross section σ_2 for selected targets*

Analizirane mete su pokazale značajne varijacije dometa D ako se mijenja njihova orijentacija (slika 5b) prema radaru. Odabrane su tri vrste meta, za tri kombinacije visina H2 i četiri

orijentacije: 0° , 90° , 180° , 270° . Primjenom radarske jednadžbe nelinearnog radara (2) za slobodni prostor izračunate su procjene σ_2 za svaki razmatrani slučaj. Podatci o izmjerenom dometu D i procijenjenim iznosima σ_2 prikazani su u (tablica 2).



Slika 4: Povećanje opasnosti za operatora. Iste vrste IEN na dvije različite daljine od radara a) 20 m, 13 m, b) orijentacija mete. Horizontalne osi prikazuju udaljenost od IEN prema radaru.

Figure 4: The increase of threat for operator. The same type IED on two different distances from radar a) 20 m, 13 m, b) target's orientation. Horizontal axis shows distance from IED to radar.

| Targets | Ground | H2 = 1.2 m | H2 = 0 m | Figure |
|----------------------------------|--------|-----------------|---------------|--------|
| Toy Car | dry | 11.5 m - 18.5 m | 11 m - 14 m | 5a |
| IR sensor | dry | 20 m - 30 m | 11 m - 23.5m | 5b |
| NOKIA1616+El.s. | dry | 14 m - 22m | 12.5 m - 17 m | 5c |
| Meteo station | wet | 12 m -13.5 m | 9 m | 5d |
| Remote Control | wet | 18.3 m - 20 m | 16.5 m - 17 m | 5e |
| Nokia5130c | wet | 10.5m - 11m | 7 m | 5f |
| Mortar shell 120mm | dry | - | 2-3 m | 9g |
| $\lambda/2$ dipole, balun, diode | dry | 70 m | 23,5 m | |
| $\lambda/2$ dipole, diode | dry | 76 m | 21 m | |

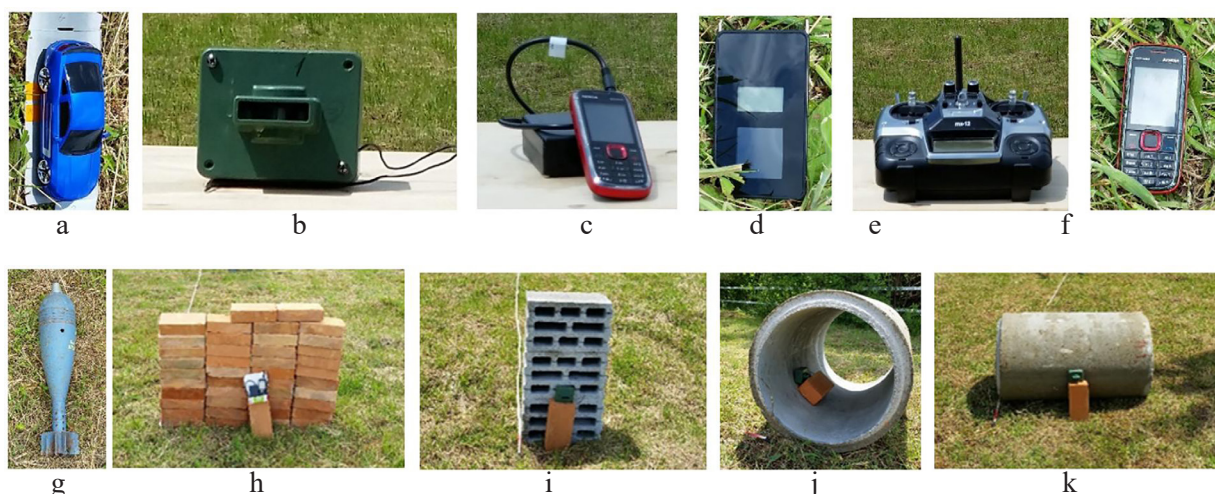
Tablica 1: Dometi detekcije komponenata IEN. Površina tla suha, vlažna, [1].

Table 1: Detection distances for components of IED. Ground surface: dry, wet, [1].

Tablica 2: Utjecaj orijentacije mete na D i σ_2

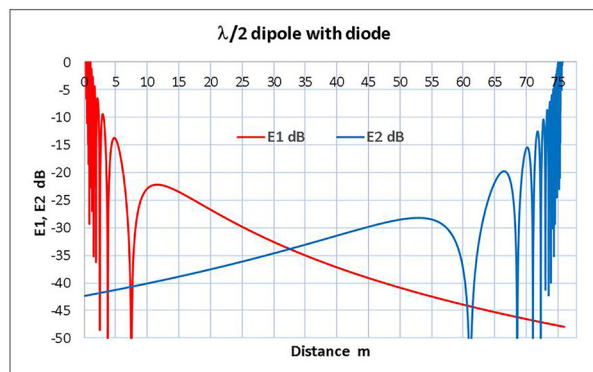
Table 2: Influence of target orientation on D and σ_2

| Target | Orientation H2 m | Range D, σ_2 | 0° | 90° | 180° | 270° | Difference |
|-----------------------------|------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|------------|
| Toy car | 1,2 | D | 13 | 11,5 | 15,5 | 13,5 | 4,0 |
| | | σ_2 | -70,34 | -73,53 | -65,76 | -69,36 | 7,77 |
| Infra Red sensor | 1,2 | D | 27,2 | 20 | 30 | 22 | 10,0 |
| | | σ_2 | -51,10 | -59,11 | -48,55 | -56,63 | 10,56 |
| NOKIA1616 & electric switch | 1,2 | D | 14 | 19,3 | 17 | 18,5 | 5,3 |
| | | σ_2 | -68,41 | -60,04 | -63,35 | -61,15 | 8,37 |
| Toy car | 0,5 | D | 17 | 18 | 16,5 | 20 | 3,5 |
| | | σ_2 | -63,35 | -61,86 | -64,13 | -59,11 | 5,02 |
| IR sensor | 0,5 | D | 25,5 | 21 | 28 | 23 | 7,0 |
| | | σ_2 | -52,78 | -57,84 | -50,35 | -55,47 | 7,49 |
| NOKIA1616 & electric switch | 0,5 | D | 16 | 19,3 | 22 | 20 | 6,0 |
| | | σ_2 | -64,93 | -60,04 | -56,63 | -59,11 | 8,30 |
| Toy Car | 0 | D | 11 | 14 | 13 | 12 | 3,0 |
| | | σ_2 | -74,69 | -68,41 | -70,34 | -72,43 | 6,28 |
| Infra Red sensor | 0 | D | 11 | 14 | 13 | 12 | 3,0 |
| | | σ_2 | -72,43 | -74,69 | -68,41 | -70,34 | 6,28 |
| NOKIA1616 & electric switch | 0 | D | 13,5 | 15 | 14 | 12,5 | 2,5 |
| | | σ_2 | -69,36 | -66,61 | -68,41 | -71,36 | 4,75 |



Slika 5: Mete korištene u istraživanju (tablica 1). Prepreke korištene u istraživanju: h) niz cigala, i) betonski blokovi, j), k) betonska cijev, [1].

Figure 5: Targets used in the research (table 1). Obstacles used in the research. h) set of bricks, i) concrete blocks, j), k) concrete tube, [1].



Slika 6: Poluvalni dipol s diodom osigurava monotona polja E2 od 53 m do radara.

Figure 6: The halfwave dipole with diode provides monotonic fields E2 from 53 m till the radar.

2.6. Umjeravanje

2.6. Calibration

Jedan od ključnih problema za pouzdanu kvantitativnu analizu procesa detekcije IEN na tlu nelinearnim radarom je nemogućnost umjeravanja (kalibracije) pseudo nelinearne radarske površine σ_2 osim u vrlo zahtjevnim laboratorijskim uvjetima (nužno je mjerenje površinske gustoće snage na mjestu IED u elektromagnetskoj neječnoj komori). Da bi se mogla ostvariti barem relativna usporedba u [1] je primjenjen tanki poluvalni dipol s mikrovalnom diodom (slika 6).

3. Diskusija

3. Discussion

Pseudo nelinearna radarska površina mete σ_n na valnoj duljini harmonika λ_n nije konstantna već je srazmjerna umnošku površinske gustoće snage S_2 [W/m²] radarskih valova na meti i specifične harmoničke radarske površine mete σ_{spec} [m⁴/W], [17]. Budući da nije bilo moguće mjerenje S_2 na meti podatci o σ_2 (tablica 2) imaju indikativnu vrijednost. U budućem radu mogao bi se koristiti dipol s diodom prema [19] za koji se navode podatci o specifičnoj harmoničkoj radarskoj površini σ_{spec} i optimalne dimenzije za potrebne iznose. Model gubitka prostora detekcije za ručno izviđanje je izveden uz nekoliko pretpostavki koje se ostvaruju na asfaltnim, betonskim cestama, putevima. Kod površina s većom elektromagnetskom hrapavosti treba uvesti raspršenje umjesto refleksije i prilagoditi modele koeficijenta refleksije.

4. Zaključak

4. Conclusion

Analiza ručnog otkrivanja nelinearnih uređaja (meta) kakvi se koriste za aktiviranje IEN, harmoničkim radarom na ravnoj elektromagnetski glatkoj površini potvrdila je temeljnu razliku u odnosu na konvencionalni linearni radar. Na temelju eksperimentalno prikupljenih podataka, za šest različitih meta analiziran je utjecaj orijentacije mete prema radaru na domet detekcije i na procjenu pseudo nelinearne radarske površine. Uveden je model za analizu prostorne distribucije jakosti električkog polja E elektromagnetskih valova koje zrače nelinearni elementi u meti. Pojava interferencije direktnih i reflektiranih valova uzrok je oscilatorne umjesto monotono opadajuće distribucije E polja, što kod ručnog izviđanja povećava opasnost za operatora radara.

5. Zahvale

5. Acknowledgment

Autor zahvaljuje svim članovima tima [1] a posebno Tamari Ivelja, Siniši Lackoviću, Tajminu Tadiću kao i Otu Jungwirthu i Tomislavu Vondračeku. Tehničko veleučilište Zagreb je podržalo pripremu mjerenja, HCR Centar za testiranje, razvoj i obuku d.o.o. je pripremio uvjete za testiranje u Cerovcu [1].

6. REFERENCE

6. REFERENCES

- [1] Oto Jungwirth, Tomislav V.B. Vondraček, Tamara Ivelja, Sanja Vakula, Milan Bajić (2016). Report on testing of detectors NR-900EK3M EAGLE, NR-2000 and NR-12C, Report HCR Center for testing, development and training, Ltd., Sortina 1d, 10000 Zagreb, Croatia, , May 2016.
- [2] Milan Bajić (2017). Testing of the detectors for non-explosive components of the IED, the nonlinear junction and the control line-wire. Presentation at 3rd C-IED Technology Workshop, Synergistic technologies to defeat improvised threat, counter Improvised Explosive Devices Centre of Excellence, Madrid 24-26 October 2017, 17 slides.

- [3] NATO (2006). Nonlinear Junction Detector, 2006 NATO Counter-IED Advanced Research Demonstration/Conference Report, pp. 13, 54-58.
- [4] В. В. Штейншлейгер (1984). Нелинейное рассеяние радиоволн металлическими объектами, Успехи физических наук, 1984 г. Январь, Том 142, вып. 1, 131-145.
- [5] Н.С. Вернигоров (1998). Принцип обнаружения объектов нелинейным локатором, Защита информации. "Конфидент", № 4, 1998 год, стр. 65-70.
- [6] Renald Ilyushenko, 2006. The use of Nonlinear Junction Detector for Detecting of I.E.D., abstract, 2006 NATO COUNTER-IED ADVANCED RESEARCH DEMONSTRATION/CONFERENCE REPORT, Panel 4, p. 109.
- [7] SCI-256 RTG (2014). SCI-256 Task Group Investigates Nonlinear Junction Detection for Counter-IED Applications, 12-16 May, 2014. <https://www.cso.nato.int/mobile/page.asp?ID=2242>
- [8] Kevin Hong (2014). Evaluation of the Russian 'Eagle' Nonlinear Junction Detector, HPM Program Manager Weapons System Division DSTO, Australia, April-July 2007, unclassified. Accessed 02/06/2016, http://www.stt-group.co/wp-content/uploads/2014/10/nr900ek_eagle_english.pdf
- [9] EDA (2015). Counter-IED_20150601, description of project. <https://www.eda.europa.eu/what-we-do/activities/activities-search/counter-ied>
- [10] Marek Kalbarczyk (2016). EDA IED DETECTION (IEDDET) PROGRAMME, presentation, www.irsd.be/website/images/images/Activites/Colloques/presentation/2016-05-17/05-Mr-Marek-KALBARCZYK.pdf
- [11] (Mass 2017) Ryan Maass (2017). EDA launches program to improve IED detection <https://www.google.hr/search?q=EDA+lanches+program+to+improve+IED+detection+-+UPI.com&oq=EDA+lanches+program+to+improve+IED+detection+-+UPI.com&aqs=chrome..69i57j69i60l2.4135j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- [12] Max Grishin (2017). 1 - "Uran-6" remotely controlled robotic system, 4 - INVU-3M "Korshun" nonlinear junction locator. 09:42 - 15. 03.2017. <https://twitter.com/GrishinMax/status/842053391576649729>
- [13] Craig McNally, Hans Risser (2017). Humanitarian Mine Action and IEDs, Journal of Conventional Weapons Destruction, Issue 23.1, ISSN 2469-7605, Nov. 27, 2017, pp. 30-34.
- [14] Robert Keeley (2017). Quality Management and Standards for Humanitarian Improvised Explosive Device (HIED) Response Activities, Journal of Conventional Weapons Destruction, Issue 23.1, ISSN 2469-7605, Nov. 27, 2017, pp. 9-13.
- [15] Kyle A. Gallagher (2015). Harmonic radar: theory and applications to nonlinear target detection, tracking, imaging and classification, PhD Dissertation, The Pennsylvania State University the Graduate School College of Engineering, December 2015.
- [16] Joško Budin (1975). Razširjanje radijskih valov, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, str. 135-139 (na slovenskom).
- [17] Kyle A. Gallagher, Ram M. Narayanan, Gregory J. Mazzaro, Anthony F. Martone, Kelly D. Sherbondy (2017). Static and Moving Target Imaging Using Harmonic Radar, Electronics 2017, 6, 30; doi:10.3390/electronics6020030, www.mdpi.com/journal/electronics
- [18] Guy Rhodes (2017). Improvised Explosive Devices and the International Mine Action Standards, Journal of Conventional Weapons Destruction, Issue 23.1, ISSN 2469-7605, Nov. 27, 2017, pp. 4-8.
- [19] Davide Dardari (2015). Detection and accurate localization of harmonic chipless tags, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, (2015), 2015:77, doi 10.1186/S13634-015-0261-7.

AUTOR · AUTHOR

Milan Bajić – nepromijenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design, Vol. 4, No. 3, 2016.

Korespondencija

milan.bajic1@gmail.com