

## RF lokalizacija

---

*Cilj rada je određivanje lokacije predajnika ispitivanjem karakteristika radio talasa koji stižu do prijemnika. Aparatura se sastoji od predajne antene emisione frekvencije 433 MHz i 3-5 prijemnih antena. Merene su srednje vrednosti napona indukovanih na antenama usled električnog polja predajnika. Uočena je linearna zavisnost snage prijemnika od kvadrata napona, čime su ova merenja mogla biti obrađena svim metodama vezanim za snagu. Merenja su vršena na provodnom metalnom stolu, usled čega je, prema teoremi likova, dolazilo do superpozicije talasa emitovanih od strane predajnika i njegovog lika sa druge strane stola. Upoređena su četiri metoda: trilateracija, metoda opadajućeg gradijenta, Gaus-Njutnova metoda (GNA) i Levenberg-Markvarov (LM) algoritam. Svi oni su, osim trilateracije, optimizacioni algoritmi, i cilj im je da minimizuju funkciju greške, predstavljenu kao modul razlike vektora izmerenih napona. Analizom rezultata simulacije sistema, utvrđen je uticaj provodnog stola, kao i visina antena kada je opadanje snage u toku udaljavanja najmanje. Analizirana je prosečna greška u slučajevima sa 3, 4 i 5 antena. Utvrđeno je da se pri svim korišćenim algoritmima greška smanjuje povećanjem broja antena. U slučaju LM algoritma i tri antene prosečna greška iznosila je 15 cm, a sa 5 antena – 6 cm. Poređenjem algoritama, zaključuje se da je LM algoritam najbolji, dok se trilateracijom (greška 8 cm) dobijaju bolji rezultati nego sa GNA ili opadajućim gradijentom (11 cm i 14 cm, respektivno).*

## Uvod

RF komunikacija (radio-frequency communication) je proces prenosa radio talasa između predajnika i neke vrste prijemnika (taga, analognog indikatora jačine primljenog signala ili druge antene). Frekvencija u takvoj komunikaciji je veća od 20 kHz. U okviru ovih vrednosti izdvajaju se posebni frekvencijski pojasevi, a za komunikaciju se najčešće koriste UH frekvencije (ultra visoke frekvencije – 300 MHz – 3 GHz).

Lokalizacija je postupak određivanja pozicije objekta u prostoru analizom podataka sa senzora. Radio lokalizacija podrazumeva korišćenje radio talasa i ispitivanje njihovih karakteristika. Postoji više metoda koje se za ovo koriste, poput korišćenja razlike u jačini primljenog signala i jačini originalnog signala (RSSI – Received Signal Strength Indicator), ispitivanja vremena stizanja signala (TOA – Time of Arrival), a u slučaju više senzora analizira se i razlika u vremenima signala (TDOA – Time Difference Of Arrival). U slučaju usmerenih antena, može se koristiti i ugao stizanja (AOA – Angle Of Arrival).

Osnovna komponenta u radio komunikaciji je antena. Kod radio prijemnika je prijemna antena, čija je osnovna funkcija da prima energiju elektromagnetskog talasa koji je emitovan od strane predajnika i predaje prijemniku. Kada se antena pobudi spoljašnjim električnim poljem, u njoj se indukuje struja i ona postaje svojevrsni generator za ostatak prijemnika, koji se sastoji od izvora elektromotorne sile i impedanse. Ukoliko se impedansa prijemnika (koji se posmatra kao

---

*Marija Nedeljković (2001), Ratina, Kraljevo, učenica 3. razreda Gimnazije Kraljevo*

*Aleksa Stefanović (2000), Pirot, učenik 4. razreda Gimnazije Pirot*

### MENTORI:

*Danilo Đokić, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu*

*Miloš Novaković, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu*

pasivan dipol) fiktivno zameni generatorom, analizom struja dolazi se do zaključka da je ta impedansa jednaka ulaznoj impedansi antene, kada ona radi kao emisiona, a elektromotorna sila generatora je jednaka proizvodu ulazne impedanse antene i struje kratko spojene antene, kada je ona pobuđena spoljašnjim poljem.

Ako ulaznu impedansu emisione antene obeležimo sa  $Z_1$ , a napon na njenim priključcima sa  $U$ , onda je struja na njenim priključcima:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}$$

Polje  $E$ , definisano u udaljenoj tački, opisano je karakterističnom funkcijom zračenja svedenom na struju na priključcima emisione antene. Vektor funkcije je kolinearan sa vektorom električnog polja koje antena zrači u pravcu te tačke. Pod dejstvom polja  $E$ , u Hercovom dipolu, koji je postavljen normalno na ort pravca ose dipola ( $r$ ), indukuje se elektromotorna sila. Hercov dipol se sastoji od pravog tankog provodnika male dužine ( $l \ll \lambda$ ) na čijem su krajevima provodne kugle ili diskovi, prečnika mnogo većeg od debljine provodnika.

Ispitujući antene i menjajući im uloge prijemnika i predajnika, prema teoremi reciprociteta dolazimo do zaključka da struje kratkog spoja kod prvog (dipol radi kao prijemna antena u kratkom spoju) i drugog slučaja (dipol radi kao emisiona antena, pod dejstvom istog napona  $U$ , a ispitivana antena radi kao prijemna antena u kratkom spoju) moraju biti jednake. Ova relacija dobijena je pomoću Hercovog dipola, međutim u izrazu nema veličine koja bi dobijeni izraz vezivala za dipol, tako da polje  $E$  može poticati od bilo koje antene. U skalarnom obliku relacija glasi:

$$E = \frac{\lambda}{\pi} E F(\theta) \cos \psi$$

gde je  $F(\theta)$  karakteristična funkcija zračenja koja zavisi od nagiba antene u odnosu na ekvatorijalnu ravan (i ne zavisi od azimuta  $\varphi$  samo za manji broj antena – onih koje imaju osu simetrije, npr. dipol),  $\psi$  predstavlja ugao između vektora primljenog polja i vektora polja koje bi antena zračila u pravcu  $\hat{n}(\theta)$  kada bi radila kao emisiona.

Srednja snaga koju uzima prijemnik predstavljena je formulom:

$$P_p = R_p \frac{E^2}{|Z_p + Z_a|^2}$$

gde  $R_p$  predstavlja otpornost prijemnika.

Kada su ulazne impedanse antene ( $Z_a$ ) i prijemnika ( $Z_p$ ) konjugovane, snaga u prijemniku ima maksimalnu vrednost:

$$P_{p \max} = \frac{E^2}{4R_a}$$

odnosno:

$$P_{p \max} = R_p \frac{\lambda^2 F^2(\theta) \cos^2(\psi)}{4\pi^2 R_a} E^2$$

Pošto je pravac prostiranja signala normalan na ose prijemne i predajne antene (čije se ekvatorijalne ravni podudaraju), karakteristične funkcije zračenja obe antene jednake su jedinici, a vektor emitovanog polja je paralelan osi prijemnog dipola (Surutka 2006). Ako se pretpostavi da je prijemnik prilagođen na prijemnu antenu, onda je snaga koju dobija prijemnik jednaka:

$$P_p = \frac{\lambda^2 E^2}{4\pi^2 R_a}$$

Odnos između prenesene i primljene snage opisan je Frisovom jednačinom prostiranja:

$$P_p = \frac{P_r G_r G_p \lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

gde je:  $P_p$  – primljena snaga signala,  $P_r$  – poslata snaga signala,  $G_p$  i  $G_r$  – pojačanja antena,  $\lambda$  – talasna dužina,  $d$  – udaljenost između antena.

Ako primenimo logaritam na obe strane jednačine dobija se zavisnost snage od udaljenosti između prijemnika i predajnika:

$$P_p = P_{p0} - \beta \log d$$

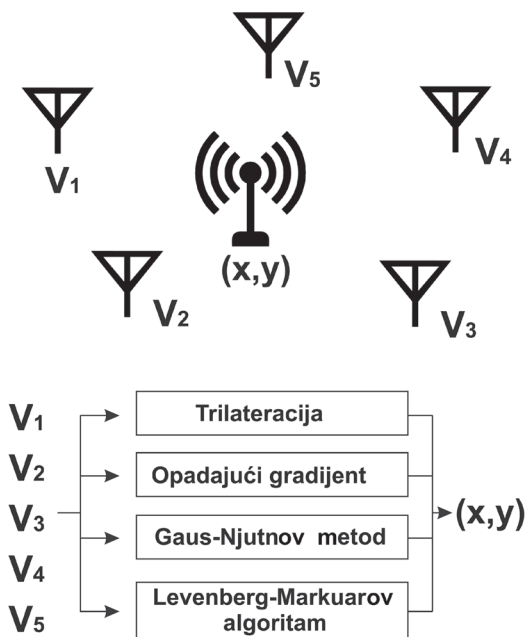
$P_{p0}$  predstavlja referentnu snagu na nekoj određenoj udaljenosti, a  $\beta$  predstavlja parametar gubitaka sredine (path-loss). Sa porastom rastojanja, uočava se da snaga logaritamski opada. Pošto je snaga direktno proporcionalna kvadratu napona na anteni, moguće je vršiti sve analize vezane za snagu korišćenjem kvadrata napona na prijemnoj anteni.

Jedni od parametara koji mogu da opišu rad elektromagnetskog sistema su parametri rasipanja, takozvani S-parametri, koji predstavljaju odnos intenziteta primljenog i poslatog signala između više uređaja u sistemu, i izražavaju se u decibelima (dB). Generalno,  $S_{MN}$  parametar predstavlja razliku između intenziteta koji je primio uređaj M i onog koji je poslao uređaj N. Kada je  $S_{MN} = 0$  dB, znači da je sva snaga iz uređaja N prenetu u uređaj M. Svaki S-parametar je kompleksnog oblika, a kvadrat njegovog modula jed-

nak je linearnom pojačanju sistema, tj. odnosu primljene i poslate snage. U ovom istraživanju biće korišćen  $S_{21}$  parametar. Znajući pojačanje sistema i snagu predajnika, moguće je odrediti snagu na prijemniku.

## Cilj istraživanja

Cilj ovog istraživanja je poređenje različitih metoda za određivanje pozicije predajnika  $(x, y)$  u prostoru. Predajnik i svi prijemnici su ručno pravljeni antene (monopolna i dipolne). Koriste se četiri različite metode čija se efikasnost ispituje: triliteracija, opadajući gradijent, Gaus-Njutnov algoritam i Levenberg-Markvarov algoritam. Osim triliteracije, ostala tri algoritma su optimizacioni algoritmi, koji se koriste radi smanjenja greške prilikom konačnog određivanja pozicije. Određuje se karakteristika svake antene ponaosob, a pored konačne greške lokalizacije, posmatra se i uticaj variranja broja predajnih dipolnih antena (od 3 do 5) na ukupnu grešku (slika 1).



Slika 1. Postavka sistema se sastoji od radio predajnika i 3-5 prijemnika. Analizom napona na prijemnicima i korišćenjem 4 različita optimizaciona algoritma određuje se nepoznata pozicija predajnika. Za svaki algoritam se računa greška lokalizacije i upoređuje sa ostala 3.

Figure 1. System setup contains one radio transmitter and 3-5 receivers. By analysing voltage on the receivers and using 4 different optimization algorithms, the unknown position of the transmitter is calculated. Localization error is measured for each algorithm and is compared with the other 3.

## Metod

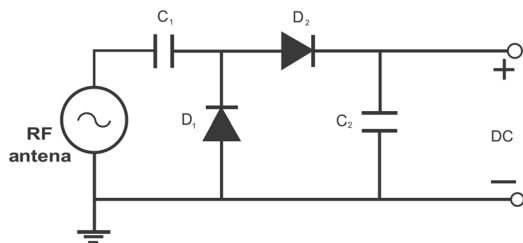
### Aparatura

Kao predajnik korišćen je modul FS1000A sa radnom frekvencijom od 433 MHz. Antena koja je korišćena jeste monopolna antena. Ona predstavlja polovinu dipolne antene i uvek je povezana na uzemljenje. Kada se nalazi na provodnoj ploči (PEC – Perfect Electric Conductor), teoremom lika se sa druge strane ploče stvara njen imaginarni lik što je ekvivalentno dipolu u prostoru bez provodne ploče.

Prijemnik predstavlja dipolna antena čiji se naizmenični signal obrađuje preko celotalnog ispravljača, koji negativnu komponentu napona invertuje u pozitivnu, kao što je prikazano na slici 2.

### Merenja

Okruženje koje se koristi za vršenje merenja jeste provodni metalni sto dimenzija  $200 \times 125$  centimetara. Na sto se postavlja od 3 do 5 antena raspoređenih kao na slici 3. Na stolu se nalaze tačke na svakih 2.5 cm po dužini i širini, ukupno oko 1800. Pri merenju je korišćena svaka druga



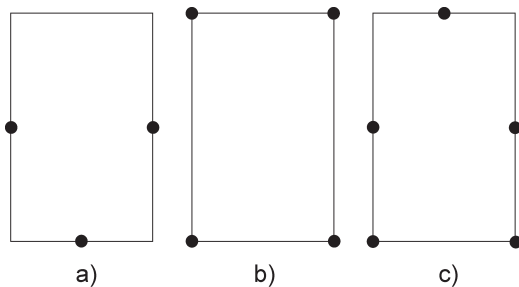
Slika 2. Šema prijemne antene i celotalasnog ispravljača

Figure 2. Schematic of receiving antenna and full-wave rectifier

tačka, tj. uzimane su one tačke čije su  $x$  i  $y$  koordinate (izražene u centimetrima), bile deljive sa 5. Takođe, nisu vršena merenja u tačkama koje se nalaze u radijusu od 10 cm u odnosu na jednu od antena, jer se tek na udaljenostima većim od te primećuje efekat antene. Merenje se vrši tako što se u svakoj tački u kojoj se nađe predajnik, sa osciloskopa očitava srednja vrednost napona na svakoj od prijemnih antena.

Da bi se utvrdilo kakav efekat na primljenu snagu ima provodni sto, bilo je neophodno simulirati takvo okruženje. S obzirom da je sto provodan, može se primeniti elektrostatička teorija likova, tako da umesto jedne predajne monopolne, postoji još jedna monopolna antena sa druge strane, čime se stvara utisak da je predajnik dipolna antena. U programu Wipl-D izvršena je simulacija rada dve dipolne antene sa konačnom provodnom ravni dimenzija  $200 \times 125$  cm. Analizom parametra  $S_{21}$  prijemne antene za različite udaljenosti dveju antena, može se utvrditi kako se ponaša intenzitet prijemne snage usled postojanja provodne ploče.

Za svaku antenu posebno su vršena merenja napona na različitim rastojanjima od predajnika (radi određivanja karakteristike antene), počevši od 10 cm pa do 210 cm, na svakih 2.5 cm. Za svaku antenu vršene su serije merenja napona u 7 tačaka na istoj udaljenosti (koja je varirala od 10 do 70 cm sa korakom od 10 cm) kako bi se utvrdilo da li prijemna antena sa istim intenzitetom prima signal iz svih pravaca.



Slika 3. Šema pozicija antena na stolu

Figure 3. Schematic of antenna positions on the table

## Metode lokalizacije

Nakon što su prikupljena sva merenja (u svakoj tački je merena vrednost napona za svaku antenu ponaosob), određivana je tačna pozicija predajnika. U ovom istraživanju upoređena su četiri različita metoda i njihove performanse: trilateracija, gradient descent (algoritam opadajućeg gradijenta), Gauss-Njutnova metoda i Levenberg-Markvarov algoritam. Svi metodi osim trilateracije su optimizacioni algoritmi, i njihov cilj je da minimizuju tzv. rezidualnu funkciju, odnosno funkciju greške.

U ovom slučaju funkcija greške predstavlja moduo razlike između izmerenog napona u definisanoj tački i referentnog napona. Referentni napon očitava se iz prethodno određenih karakteristika date antene. Drugačije zapisano:

$$f = |V(x, y) - V_{\text{ref}}(x, y)|^2$$

gde je  $V_{\text{ref}}(x, y)$  vrednost napona pri korišćenju karakteristika antena, a  $V(x, y)$  izmerena vrednost napona na svakoj anteni.

### Trilateracija

Svaka od karakteristika prijemnih antena može se aproksimirati opadajućom logaritamskom funkcijom oblika  $a - b \log d$ , gde je  $a$  referentni napon na udaljenosti 0.1 m,  $b$  „path-loss” parametar sredine za svaku antenu, a  $d$  udaljenost veća od 0.1 m (Wu 2012). Ovime se gube mogući skokovi i padovi u vrednostima koji prekidaju monotonost funkcije. Potom se za

svaku izmerenu vrednost napona izračunava aproksimativna udaljenost. Korišćenjem  $n$  antena dobija se sistem od  $n$  jednačina oblika:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2, i = 1, 2, \dots, n$$

gde su  $x_i$  i  $y_i$  koordinate antene koja se analizira, a  $x$  i  $y$  nepoznate koordinate predajnika. Oduzimanjem poslednje jednačine od svih ostalih i transformisanjem sistema u proizvod matrica oblika  $At = B$ , dobijaju se matrice:

$$A = [2(x_i - x_n) \quad 2(y_i - y_n)], i = 1, 2, \dots, n$$

dimenzija  $(n-1) \times 2$ ,

$$B = [x_i^2 - x_n^2 + y_i^2 - y_n^2 + d_i^2]$$

dimenzija  $(n-1) \times 1$ ,

$$t = [x \quad y]^T$$

Rešenje ovog sistema, metodom najmanjih kvadrata, je oblika:

$$t = (A^T A)^{-1} A^T B$$

Dobijena pozicija predajnika upoređuje se sa realnim koordinatama. Greška lokalizacije predstavljena je u vidu euklidskog rastojanja između te dve pozicije (Peneda *et al.* 2011)

### Opadajući gradijent (Gradient Descent)

Opadajući gradijent je algoritam optimizacije prvog reda za pronalaženje lokalnog minimuma funkcije izvršavanjem više koraka proporcionalnih negativnoj vrednosti gradijenta u datoj tački. Algoritam počinje sa određenom tačkom, tj. zdatom vrednošću  $x$  i  $y$  koordinate. Kao rezultat dobija se niz od  $n$  elemenata koji konvergira ka lokalnom minimumu (koji se traži). Prilikom svake iteracije računa se već spomenuta rezidualna funkcija  $f$ , i ispituje da li je manja od prethodne izračunate. Formule po kojoj se menjaju  $x$  i  $y$  koordinata između dve iteracije su:

$$x_{i+1} = x_i - \alpha \frac{\partial f}{\partial x}$$

$$y_{i+1} = y_i - \alpha \frac{\partial f}{\partial y}$$

gde je  $\alpha$  stepen učenja (learning rate) koji iznosi 0.1. Parcijalni izvodi se računaju numerički promenom  $x$  ili  $y$  za minimalni korak od 0.5 cm. Algoritam će menjati koordinate sve dok funk-

cija greške ne počne ponovo da raste nakon svake naredne iteracije. Prednost ovog algoritma je što, za ovakve vrednosti stepena učenja, može da napravi velike korake u promeni koordinata, pa se tako može više približiti traženim koordinatama (Ruder 2016).

### Gaus-Njutnov algoritam

Gaus-Njutnov algoritam (GNA) je modifikacija Njutnovog algoritma za određivanje minimuma funkcije preko minimizacije sume kvadrata funkcije. Za ovaj algoritam koristi se jakobijan čiji su elementi parcijalni izvodi greške euklidskog rastojanja  $r(x, y)$  između poznate i određene pozicije, po svakoj promenljivoj:

$$J(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial x} & \frac{\partial r}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Gradijent funkcije greške može se zapisati kao:

$$\nabla f(x, y) = r(x, y) \nabla r(x, y) = J(x, y)^T r(x, y)$$

dok je matrica drugih izvoda hesijan oblika:

$$\nabla^2 f(x, y) = J(x, y) J(x, y)^T + r(x, y) \nabla^2 r(x, y)$$

Ako se (radi dobijanja linearne konvergencije elemenata ka lokalnom minimumu) iskoristi aproksimacija da je  $\nabla^2 f \approx J^T J$ , može se napisati da je za određeni vektor  $p$ :

$$J^T J p = -J^T r$$

Formula za promenu koordinata je slična kao u slučaju opadajućeg gradijenta:

$$(x, y)_{i+1} = (x, y)_i - \alpha p$$

U slučaju ovog algoritma početna pretpostavka mora biti prilično dobra (greška u velikoj meri zavisi od nje), što znači da u slučaju kada se za svaku lokalizaciju kreće od iste tačke, za većinu tačaka algoritam neće ni pronaći globalni minimum (Gratton *et al.* 2007).

### Levenberg-Markvarov algoritam

Levenberg-Markvarov (Levenberg-Marquardt) algoritam (LMA) se takođe koristi za pronalaženje globalnog minimuma. On interpolira između Gaus-Njutnovog algoritma i opadajućeg gradijenta. Tačnije, između dve poznate vrednosti ovih metoda, određuje se nova,

tako da ona ne odstupa od datih za više od neke željene granice. LMA je moćniji od GNA, što znači da u mnogim slučajevima pronalazi rešenje čak i ako se krene prilično daleko od pravog minimuma. Takođe, on ima tendenciju da bude malo sporiji od GNA.

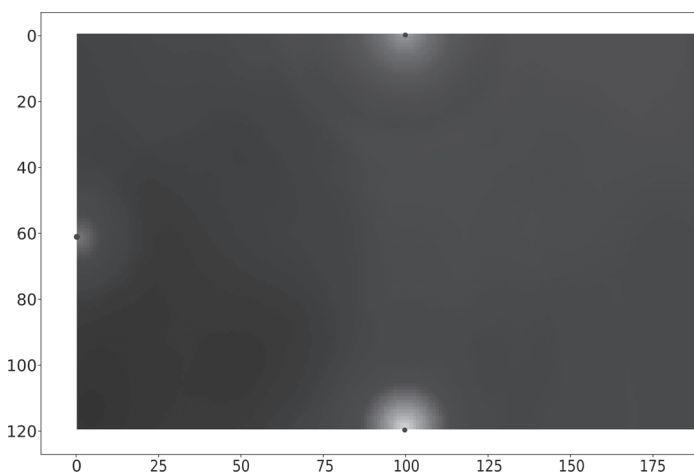
I ovaj algoritam počinje nasumičnim izborom vrednosti koordinata  $x$  i  $y$ . U svakom narednom koraku koordinate se menjaju za neke vrednosti  $\delta x$  i  $\delta y$ , zajedno zapisane pomoću matrice  $\delta$ . U konkretnom slučaju ta promena iznosi 1 mm. Vrednosti ove matrice menjaju se po uslovu:

$$(J^T J + \lambda I) \delta = J^T r$$

gde je  $I$  jedinična matrica, a  $\lambda$  Levenberg-Markvarov (LM) parametar, čija vrednost određuje da li će algoritam da se ponaša kao opadajući gradijent ili GNA.

Za ovaj parametar postavljaju se dve granične vrednosti  $\lambda_{up}$  i  $\lambda_{down}$ , koje određuju karakteristiku algoritma. Pre svake iteracije promene koordinata računa se funkcija greške  $f$ . Ukoliko je ona manja od prethodno izračunate vrednosti funkcije, doći će do promene koordinata i do smanjenja parametra  $\lambda$ , tako što  $\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_{down}}$ . Time

se algoritmu govori da je na pravom putu, i da smanjenjem parametra može preciznije da odredi poziciju. Ukoliko je funkcija veća od prethodne, ne menjaju se koordinate, već se  $\lambda$  množi sa  $\lambda_{up}$ . Ovime će se u narednoj iteraciji gledati šira okolina i naći nova moguća lokacija za globalni minimum (Ranganathan 2004).



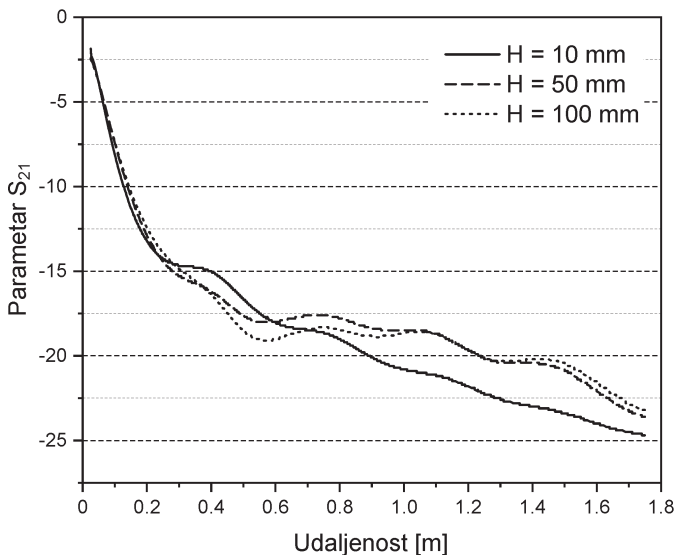
Slika 4. Topologija mreže, vrednosti greške lokalizacije predajnika u svim tačkama prostora za tri prijemne antene (slika 3a), kada je predajnik na sredini stola

Figure 4. Topology of the network, emitter localization error values in all points in place with three receivers (Figure 3a), and emitter placed in the center of the table

Na slici 4 prikazana je topologija cele mreže, tačnije vrednost greške lokalizacije predajnika u svim tačkama prostora za tri prijemne antene, kada je predajnik na sredini stola. Tamniji regioni predstavljaju oblasti manje greške lokalizacije, dok svetliji predstavljaju veće greške. Na slici se može primetiti da postoji više odvojenih sektora u kojima se nalaze njihovi lokalni minimumi (tamnije oblasti). Zbog ovoga optimizacioni algoritmi mogu biti manje efikasni, jer dosta zavisi od početne postavke. Kako je cilj da svaki algoritam počinje sa istom postavkom, pretpostavlja se da će LM algoritam raditi najbolje, jer mu parametar  $\lambda$  omogućava da izađe iz tzv. „pogrešnog” sektora, i preko nešto veće vrednosti ovog parametra promeni sektor istraživanja. Opadajući gradijent bi trebalo da radi bolje od GNA, zato što se GNA dosta oslanja na početnu postavku. Što se trilateracije tiče, njena efikasnost će dosta zavistiti od monotonosti karakteristika antene, ali se očekuje da aproksimacija opadajućom logaritamskom funkcijom može unaprediti rezultate.

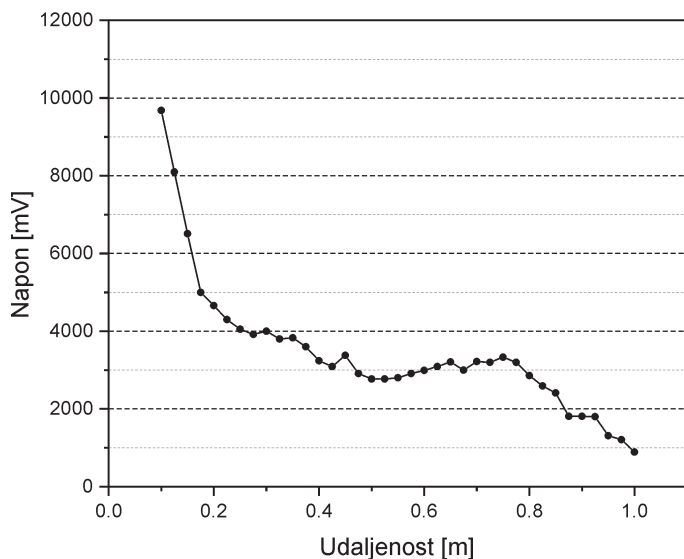
## Rezultati i diskusija

Putem simulacije analizirana je vrednost  $S_{21}$  parametra pri menjanju udaljenosti između antena, kako bi se primetio uticaj provodnog stola, kao i uticaj visine antena u odnosu na podlogu. Na grafiku sa slike 5 prikazani su rezultati za slučajeve  $H = 10$  mm (puna linija),  $H = 50$  mm (isprekidana linija) i  $H = 100$  mm



Slika 5. Zavisnost vrednosti parametra  $S_{21}$  od udaljenosti za tri različite visine antene

Figure 5. Graph representing dependence of the  $S_{21}$  parameter value from the distance for three different antenna heights



Slika 6. Zavisnost napona na prijemnoj anteni od udaljenosti između prijemne antene i predajnika za visinu antene 10 mm

Figure 6. Graph representing the dependence of voltage on the receiving antenna from the distance from the transmitter for a 10 mm antenna height

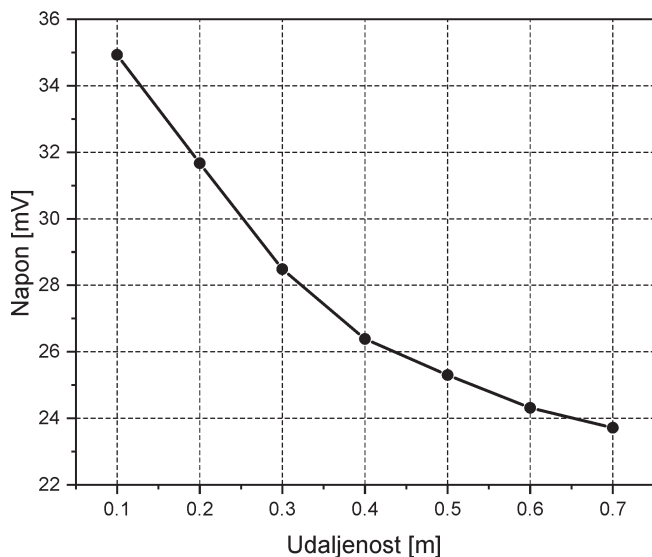
(tačkasta linija), gde je  $H$  visina donjeg kraja antene u odnosu na podlogu.

Za sve tri funkcije su karakteristični lokalni minimumi pri udaljenostima 0.32, 0.64, 0.96 i 1.28 metara koje predstavljaju redom 1, 2, 3 i 4 polovine talasne dužine emitovanog talasa. Primećuje se da je u slučaju  $H = 10$  mm opadanje najpravnomernije, i rezultati su nakon 0.96 m manji u odnosu na ostale slučajeve (zbog čega su sva merenja vršena pri ovoj visini). Oscilacije među nivoima lokalnih maksimuma i minimuma

su najizraženije u slučaju  $H = 100$  mm, dok je signal pri  $H = 50$  mm najstabilniji i sa najmanjim oscilacijama.

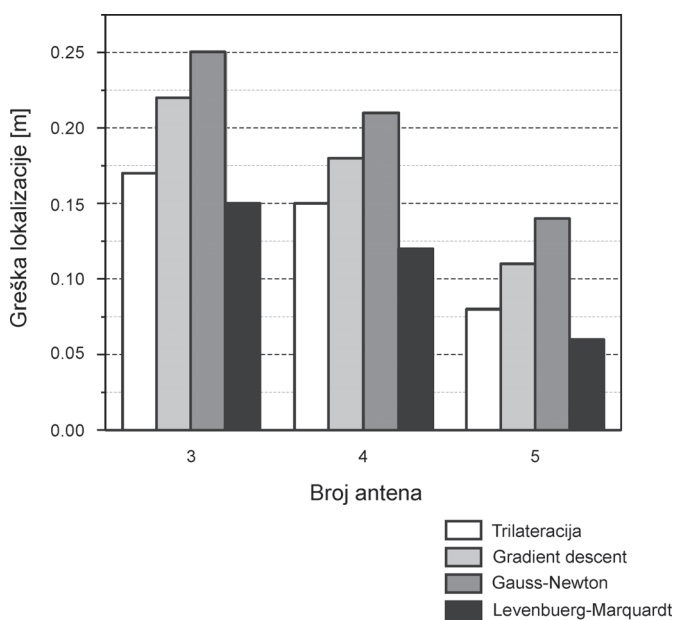
Na slici 6 prikazana je zavisnost napona na prijemnoj anteni od rastojanja između antena pri visini  $H = 10$  mm. Primećuje se da trend opadanja postoji i da se, kao i u simulaciji, pojavljuju lokalni minimumi na relativno bliskim rastojanjima.

Na slici 7 prikazane su srednje vrednosti izmerenog napona u 7 različitih tačaka na istoj



Slika 7. Zavisnost srednje vrednosti izmerenog napona na prijemnoj anteni od udaljenosti od predajnika

Figure 7. Graph representing the dependence of average voltage on the receiving antenna from the distance from the transmitter



Slika 8. Grafik zavisnosti greške lokalizacije od broja antena i korišćenog algoritma

Figure 8. Graph representing the dependence of localization error from the number of antennas and the used algorithm

udaljenosti od predajnika. Usrednjavanjem vrednosti za svaku tačku, primećeno je da odstupanje u procentima iznosi od 0.65 do 1.55, što merenje čini preciznim. Trend logaritamskog opadanja se održava.

Što se tiče performansi algoritama, analizirana je prosečna greška lokalizacije za sve algoritme na uzorku od 900 tačaka po celom stolu. Analizirani su slučajevi sa 3, 4 i 5 antena koje su

raspoređene kao na slici 3. Na slici 8 prikazan je grafik zavisnosti vrednosti greške lokalizacije od korišćenog algoritma i broja antena. Primećuje se da se greška smanjuje kako se povećava broj antena. Takođe, pokazuje se da je LM algoritam najbolji, kao i da je aproksimacija krive karakteristika antene ispravan korak jer se trilateracijom dobijaju bolji rezultati nego pomoću GNA ili opadajućim gradijentom.



# Zaključak

Ručno rađene antene u vidu polutalasnih dipola koje su korišćene u ovom radu, sudeći po najboljem rezultatu (greška lokalizacije 6 cm), pokazale su se kao prilično pouzdan senzor.

Analizom dobijenih rezultata zaključeno je da Levenberg-Markvarov optimizacioni algoritam daje najbolje rezultate (najmanja greška lokalizacije), da sa povećanjem broja antena lokalizacija postaje preciznija, i da se aproksimacijom krive kod trilateracije dobijaju znatno bolji rezultati. Problem koji se javljao pri radu na projektu bilo je zasićenje u koje su operacioni pojačavači konstantno ulazili. Njihovom primenom pokušali smo da postignemo veću rezoluciju izmerenih napona, radi preciznije lokalizacije (smanjenja greške). Zbog veoma malih vrednosti izlaznog napona, stalno je dolazilo do zasićenja, pa je umesto njih korišćeno pojačanje na samim osciloskopima.

## Literatura

- Gratton S., Lawless A. S., Nichols N. K. 2007. Approximate Gauss-Newton methods for nonlinear least squares problems. *SIAM Journal on Optimization*, **18** (1):106.
- Peneda L., Azenha A., Carvalhno A. 2011. Indoors localization using Mmobile communications radio signal strength. U *Advanced trends in wireless communications. Indoors localization using mobile communications radio signal strength* (ur. M. Khatib). Intech, str. 265-280.
- Ranganathan A. 2004. The Levenberg-Marquardt Algorithm. <http://www.ananth.in/docs/lmtut.pdf>
- Ruder S. 2016. An overview of gradient descent optimization algorithms. <https://ruder.io/optimizing-gradient-descent/>
- Surutka J. V. 2006. *Elektromagnetika*. Beograd: Akademska misao
- Wu J. 2012. Three-dimensional indoor RFID localization system. University of Nebraska-Lincoln: Industrial and Management Systems Engineering – Dissertations and Student Research, 36.

---

Marija Nedeljković and Aleksa Stefanović

## RF Localization

The goal of this project is finding the unknown position of a transmitter in space by analysing radio wave characteristics at the receiver side. The aparature consisted of one transmitter with an emission frequency of 433 MHz and 3-5 receiving antennas. The average values of voltage induced by the electromagnetic field of the transmitter were measured. The linear dependence of the receiver power from voltage squared was noted, which gave us the possibility to use all the methods that analyse power characteristics. Measures were performed on a conducting metal table due to which, by the method of image charges, there was a superposition of emitted waves from the original transmitter and its image. In this paper, 4 different methods were compared: Trilateration, Gradient Descent, Gauss-Newton method (GNA) and Levenberg-Marquardt (LM) algorithm. All methods except trilateration are optimization algorithms and their goal is to minimize the residual function, represented by a module of difference of the measured voltage vectors. By analyzing the results gained by the simulation of the whole system, the influence of the conducted table has been determined, as well as the height of the antennas at which power losses were minimal. The average error for all algorithms in cases with 3, 4 and 5 antennas was analyzed. The error was found to decrease as the number of antennas increases. The average error using three antennas and the LM algorithm was 15 cm, while with 5 antennas it was 6 cm. When comparing algorithms it was concluded that the LM algorithm was the best, and that trilateration (error 8cm) produced better results than GNA or the Gradient Descent method (11 cm and 14 cm, respectively).