

Analiza propagacije radio signala u unutarnjem prostoru specifičnih značajki

Vučina, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:897392>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**ANALIZA PROPAGACIJE RADIO SIGNALA U
UNUTARNJEM PROSTORU SPECIFIČNIH
ZNAČAJKI**

Diplomski rad

Ivan Vučina

Osijek, 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Ivan Vučina
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Komunikacije i
Mat. br. pristupnika, god.	D-1488, 07.10.2022.
JMBAG:	0165083710
Mentor:	prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Vanja Mandrić
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje
Član Povjerenstva 2:	prof. dr. sc. Slavko Rupčić
Naslov diplomskog rada:	Analiza propagacije radio signala u unutarnjem prostoru specifičnih značajki
Znanstvena grana diplomskog rada:	Radiokomunikacije (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U radu je potrebno obraditi mehanizme prostiranja radio vala u zatvorenom prostoru te objasniti primjenu metode praćenja zrake za proračun jakosti polja u takvom prostoru. U odabranom programskom paketu treba napraviti proračun raspodjele polja u zatvorenom prostoru arhitektonskih i mikroklimatskih karakteristika vinskog podruma. Analizirati raspodjelu polja za različite frekvencije, za prazan prostor, kao i za prostor ispunjen objektima različitih dimenzija i načinjenih od materijala različitih elektrodinamičkih svojstava. Rezultate dobivene simulacijom
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	23.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Dobar (3)
Datum obrane diplomskog rada:	15.10.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Vrlo dobar (4)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Vrlo dobar (4)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	22.10.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 22.10.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Ivan Vučina
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Komunikacije i informatika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1488, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza propagacije radio signala u unutarnjem prostoru specifičnih značajki**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

Sadržaj

1. UVOD.....	3
1.1 Zadatak diplomskog rada.....	4
2. RELEVANTNA ZNANSTVENA ISTRAŽIVANJA PROPAGACIJE RADIJSKOG SIGNALA U PROSTORU ZNAČAJKI VINSKOG PODRUMA	5
3. PROSTIRANJE (PROPAGACIJA) RADIO VALA.....	10
3.1 Mehanizmi prostiranja EMV-a.....	11
3.1.1 Propagacija EMV-a u slobodnom prostoru.....	12
3.1.2 Refleksija i refrakcija	14
3.1.3 Difrakcija	16
3.1.4 Disperzija	17
3.2 Metode proračuna jakosti polja za veće prostore.....	18
3.2.1 Metoda praćenja zrake	20
3.2.2 Vanjski utjecaji.....	21
4. MJERENJA I SIMULACIJE PROPAGACIJE VALA U ZATVORENOM UNUTARNJEM PROSTORU	23
4.1 Mjerni instrumenti, karakteristike podruma i uvjeti mjerenja	23
4.2 Rezultati mjerenja u podrumu fakulteta.....	26
4.3 Mjerenja u vinskom podrumu u Kamencu.....	36
4.4 Rezultati simulacije.....	41
5. ZAKLJUČAK.....	53
6. LITERATURA.....	54
SAŽETAK.....	55
ABSTRACT.....	56
ŽIVOTOPIS.....	57
PRILOZI.....	58

1. UVOD

Razvojem i primjenom senzorskih mreža i umjetne inteligencije u upravljanju proizvodnim procesima, pojavila su se i rješenja za kontrolu i upravljanje procesima proizvodnje vina. Važan dio takvih sustava je komunikacijska mreža koja omogućava povezivanje senzora sa centralnim uređajem koji prikuplja i obrađuje podatke, te donosi odluke na temelju tih podataka. Pri tome su bežične mreže često najbolje rješenje jer omogućavaju prilagodljivu geometriju mrežnih elemenata bez kablova koji mogu ometati kretanje kroz podrum. S obzirom da se proizvodnja vina odvija u zatvorenim prostorima specifičnih arhitektonskih i klimatskih karakteristika, ne postoje empirijski modeli propagacije radio vala koji su razvijeni baš za takve prostore, a nema ni puno istraživanja o primjenjivosti postojećih modela (npr. za tunele) za proračune gušenja elektromagnetskog vala u podrumima. Kako bi se dobio bolji uvid u promjene jakosti električnog polja u podrumima, u okviru ovog diplomskog rada provedena su mjerenja jakosti polja na 860 MHz i 2400 MHz u podrumu s karakteristikama vinskog podruma i to u uvjetima postojanja direktne vidljivosti odašiljačke i prijemne antene (eng. *Line Of Sight- LOS*), te u uvjetima kad ne postoji ta vidljivost (eng. *Non-Line Of Sight- NLOS*). Nadalje, provedene su simulacije u MATLAB programskom paketu primjenom tehnike praćenja zrake (eng. *ray tracing*) s različitim modelima propagacije (s refleksijom i difrakcijom). Propagacija signala pojam je koji se koristi za opisivanje smjera putanje radiovalova od njihovog izvora. Mehanizmi koji utječu na taj smjer putanje i snagu vala na mjestu prijema su: refleksija, ogib (difrakcija), refrakcija, apsorpcija, disperzija i interferencija. Propagacija također ovisi i o samoj vrsti i jakosti izvora, odnosno odašiljača i prijemne antene, te o frekvenciji. Uz sve navedeno treba uzeti u obzir tip unutarnjeg prostora i materijal od kojeg su napravljeni zidovi i postojeći objekti te geometrija podruma u kojem se odvija propagacija. Rezultati simulacija su uspoređeni s rezultatima dobivenim mjerenjima kako bi se utvrdilo koji simulacijski model daje rezultate najbliže izmjerenima. Tako validirani simulacijski model se može koristiti za proračune gušenja signala u uvjetima koji nisu u stvarnosti ostvarivi (kao npr. dodavanje vinskih bačvi i analiza gušenja kod različitog broja, rasporeda i/ili veličina tih bačvi).

U drugom poglavlju je opisano kako se elektromagnetski val širi unutarnjim prostorom. Definirani su mehanizmi koji utječu na širenje vala kao i utjecaj okoline. Treće poglavlje referencira relevantne znanstvene radove koji se bave propagacijom vala u uvjetima sličnim

vinskim podrumima. U četvrtom i posljednjem poglavlju opisan je način provođenja mjerenja i simulacije jakosti električnog polja. Rezultati mjerenja i simulacija su uspoređeni te je utvrđen simulacijski model koji daje rezultate najbliže onim izmjerenima, a u zadnjem poglavlju su dani zaključci.

1.1 Zadatak diplomskog rada

U radu je potrebno obraditi mehanizme prostiranja radio vala u zatvorenom prostoru te objasniti primjenu metode praćenja zrake za proračun jakosti polja u takvom prostoru. U odabranom programskom paketu treba napraviti proračun raspodjele polja u zatvorenom prostoru arhitektonskih i mikroklimatskih karakteristika vinskog podruma. Analizirati raspodjelu polja za različite frekvencije, za prazan prostor, kao i za prostor ispunjen objektima različitih dimenzija i načinjenih od materijala različitih elektrodinamičkih svojstava. Rezultate dobivene simulacijom usporediti s izmjerenim rezultatima.

2. RELEVANTNA ZNANSTVENA ISTRAŽIVANJA PROPAGACIJE RADIJSKOG SIGNALA U PROSTORU ZNAČAJKI VINSKOG PODRUMA

Prema obavljenim istraživanjima veliki naglasak se stavlja na važnost razumijevanja karakteristika propagacije elektromagnetskih valova. Velika je razlika u propagaciji radijskog signala na otvorenom prostoru i u zatvorenom. Obzirom da je tema ovog diplomskog rada propagacija u zatvorenom prostoru čije su značajke jednake ili slične značajkama vinskih podruma, u ovom je poglavlju dan pregled znanstvenih istraživanja koja se bave sličnom tematikom. Najpoznatija ovakva istraživanja i eksperimentalna mjerenja vršena su u tunelima, te su predloženi empirijski modeli koji opisuju propagaciju u tunelima i nazivaju se tunelski modeli. Tunelski modeli među sobom također imaju određene razlike, a one su uvjetovane mnogim karakteristikama zatvorenog prostora koje utječu na samo širenje elektromagnetskih valova.

U [4] su predstavljena mjerenja provedena u podrumu sličnom vinskim podrumima te su rezultati mjerenja uspoređeni s empirijskim modelima. Mjerenja su provedena na dvije različite frekvencije – 860 MHz i 2.4 GHz. Koristile su se navedene frekvencije zbog podudaranja s frekvencijskim opsegom WiFi-ja, LoRa-e i NB-IoT-a. Predstavljani su rezultati mjerenja u uvjetima direktne vidljivosti odašiljačke i prijemne antene (LOS) i u uvjetima kada nije bilo direktne vidljivosti (NLOS) jer je prijemna postavljena u drugoj prostoriji. U LOS uvjetima najznačajniji utjecaj na razinu signala imala je refleksija od zaobljenog stropa i zidova, te udaljenost samih antena, dok je u NLOS uvjetima najveći utjecaj imala difrakcija na zidu između dvije prostorije. Iz rezultata se vidi da se snaga električnog polja smanjuje udaljavanjem antena u slučaju obje frekvencije (860 MHz i 2.4 GHz), isprva u skladu s modelom prostiranja u slobodnom prostoru, a zatim sporije u skladu s valovodnim efektom koji stvara podrumsku prostoriju svojim oblikom. Promjena jakosti polja u NLOS uvjetima odgovara može se modelirati primjenom modela difrakcije na oštrom rubu. Uz te mehanizme signala također na snagu električnog polja utječu i sami zidovi podruma, visina i vrsta antena itd. Izmjerene vrijednosti jakosti polja bile su veće za signal niže frekvencije što je u skladu s teorijskim modelima. Iako su se rezultati dobiveni teorijskim modelima generalno dobro slagali s izmjerenim, na nekim su mjestima odstupanja veća od 10 dB što ukazuje na veliki utjecaj lokalnih značajnih prostora koje empirijski modeli ne mogu obuhvatiti.

U [3] glavni fokus je na dizajnu, operaciji i optimizaciji bežičnih komunikacijskih sustava u podzemnim željeznicama. Zbog malog broja radova koji se bave propagacijskim gubicima i „*shadow fadinga*“ u tunelima, posebno na višim frekvencijama, u ovom su istraživanju provedena brojna mjerenja na 1,8 i 5,8 GHz te su modelirane te dvije značajke propagacije. Shadow fading jest pojava fluktuacije jakosti električnog polja, a propagacijski gubici odnose se na gubitak snage zbog udaljenosti. *Shadow fading* gubici mogu se prikazati kao standardne Gaussove distribucije, dok se gubici propagacije mogu pokazati modelima rasta gušenja signala s n-tom potencijom udaljenosti od odašiljača. Koriste se TX antene s frekvencijama od 1,8 i 5,8 GHz, a postavljene su u unutarnjem dijelu tunela na visini 4,65 m. Prijemne RX antene postavljene su na vlaku, koji se kreće tim tunelom, na visini 4,20 m. Visina i širina tunela su 5,45 m i 5,38 m. Nakon mjerenja ukupni gubici su određeni formulom:

$$L(d) = P_t + G - P_r(d) - L_{system} \quad (2 - 1)$$

Gdje su P_t i P_r snage odašiljačke i prijemne antene, G predstavlja ukupni dobitak, a L_{system} gubitke u sustavu. Gubici uzrokovani shadow fadingom i gubicima propagacije određeni su formulom:

$$L(d) = A(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2 - 2)$$

Gdje je A vrijednost gubitka na udaljenosti d_0 , n eksponent gubitka puta i oba parametra ovise o udaljenostima prijemnih i odašiljačkih antena. Uz to formula ima i parametar X_σ koji prezentira komponentu *shadow fadinga*. Iz provedenih mjerenja dobiveni su iznosi tih parametara. Kod frekvencije 1,8 GHz eksponent gubitka puta n iznosi 2,83 dok kod frekvencije 5,8 GHz iznosi 2,55. Kod shadow fadinga dolazi do malo veće razlike u iznosu komponenata, kod frekvencije 1,8 GHz X_σ je 1,58 dB, a kod frekvencije 5,8 GHz iznosi 2,58 dB što pokazuje da objekti u prostoru imaju veći utjecaju, odnosno stvaraju veće smetnje propagaciji elektromagnetskog vala prilikom širenja signala viših frekvencija. Kod većih dimenzija tunela (visina, širina) obje komponente imale su manje iznose i utjecaj na propagaciju vala. U usporedbi s gubicima slobodnog prostora kod signala frekvencije 5,8 GHz vide se veće fluktuacije kao i u prethodnom istraživanju [4] kod više frekvencije.

U ovom istraživanju, [3], također je ispitana korelacija baznih postaja unutar tunela. Prijemne antene postavljene su na početku i kraju vlaka, a također su postavljene i bazne antene, 2 na početku tunela (2 različite frekvencije) i 2 na kraju tunela. Tako postavljanje odašiljačkih antena omogućava ispitivanje utjecaja 2 bazne stanice na prijemnika koji se kreće kroz tunel i

korelaciju između poslanih signala različitih frekvencija. Ispituje se i dolazi li do interferencije dupleksa (komunikacije u 2 smjera: silazna veza DL od bazne prema mobilnoj stanici, te uzlazna veza UL od mobilne prema baznoj stanici). Iz rezultata istraživanja da se zaključiti da nema prevelike korelacije odnosno interferencije signala poslanih od dviju baznih stanica. Manje značajnih razlika u kvaliteti signala ima ovisno na kojem dijelu vlaka se prima signala i u kojem smjeru se vlak kreće, te se koeficijent korelacija u svim slučajevima kreće uglavnom vrijednosti 0,1.

U [2] je istražen utjecaj difrakcije na pravokutnim skretanjima odnosno raskrižjima u urbanim i suburbanim područjima. Ovakva ulična okruženja vrlo su česta i predstavljaju osnovu strukture prometa u naseljenom području. Stoga ja važno znati što se u takvim okruženjima događa prilikom propagacije elektromagnetskog vala i glavnih fizikalnih utjecaja u takvom okruženju, a to su difrakcija i refleksija. Koriste se 2 metode prilikom mjerenja: metoda zbroja kompleksnih snaga (PS) i metoda zbroja pojedinačnih snaga zraka (SP). Prva metoda zbroja kompleksnih zraka – PS, koristi se kod nižih frekvencija, a razlog tomu je poništavanje među uparenim zrakama kod odašiljačke antene na nižim frekvencijama. Kod viših frekvencija koristi se druga metoda – SP, a razlog je što bolje predviđa propagaciju nakon refleksije ili difrakcije na većim frekvencijama. Kod njih dolazi do nasumičnog raspoređivanja faze zraka nakon raspršenja vala od objekta s nepravilnom površinom i to se puno više primijeti kod viših frekvencija zbog manje valne duljine vala. Rezultati u [2] su pokazali da SP metoda bolje opisuje niže frekvencije (900 MHz), dok PS bolje opisuje više frekvencije (2 GHz). Kombiniranjem teorije zraka s uključenim višestrukim refleksijama i uniformne teorije difrakcije dobiveni su rezultati koji se dobro poklapaju s izmjerenim vrijednostima.

U [1, 5, 8] istražuje se propagacija u ravnim i zakrivljenim tunelima i „break point“ – prijelomna točka koja označava udaljenost od odašiljača nakon koje je brzina porasta gušenja s udaljenošću veća od brzine porasta gušenja kod propagacije u slobodnom prostoru. Gubici se po pravilu povećavaju udaljavanjem od odašiljačke antene, no zbog određenih utjecaja okoline i karakteristika samog vala, ne moraju se podudarati i u pravilu se ne podudaraju s gubicima slobodnog prostora.

Dvije glavne metode koje se koriste za pronalazak točke prijeloma su metoda praćenja zrake i metoda modalne analize. Metoda praćenja zraka detaljno je opisana u poglavlju 2.2 u [10], a metoda modalne analize zasniva se na razgradnji propagacije vala u različite modove.

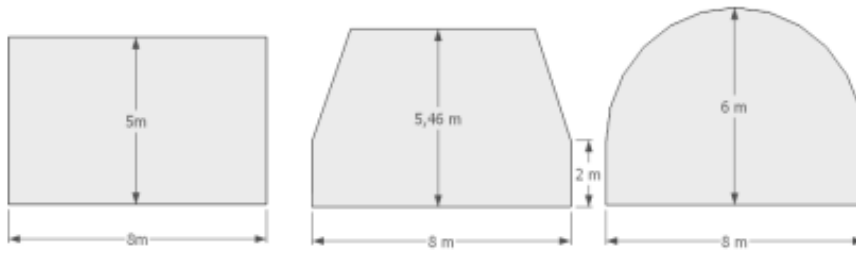
Istraživanje [1] je izvršeno u ravnoj podzemnoj željeznici – zatvorenom prostoru, bez zavoja. Iz analiza mjerenja dobije se sljedeća formula za određivanje prijelomne točke:

$$bp = \frac{w^2}{\lambda} \quad (2 - 3)$$

Gdje je w širina tunela, a λ valna duljina vala. Ova formula vrijedi za tunele pravokutnog oblika (vrh tunela može biti zaobljen ili ravan). Kod modalne analize koristi se pristup dielektričnog vođenja vala i sam tunel se modelira kao dielektrični valovod. Zaključak je da prijelomna točka ovisi o frekvenciji i udaljenosti od izvora. Iz rezultata primjena obje metode može se zaključiti da ni jedna nije u potpunosti točna. Metoda praćenja zraka dobar je za procjenjivanje točke prijeloma unutar L-pojasu (1-2 GHz) frekvencijskog raspona, a loš za procjenjivanje onih u C-pojasu(4-8 GHz) rasponu. Također je veliki naglasak na tipu odašiljačke antene koja se koristi, jer i o njoj uvelike ovisi iznos odnosno pozicija točke prijeloma. Modalna analiza je dosta sporija metoda od metode praćenja zraka jer zahtjeva razgradnju EMV-a i njegovu analizu.

U znanstvenom radu [8] dolazi se do istih zaključaka. Osim ravnog tunela kao u [1], u ovom se istraživanju proučava utjecaj zakrivljenosti tunela na propagaciju vala. Zakrivljenost tunela imat će značajan utjecaj na valovodni efekt (na kojem se zasniva metoda modalne analize), jer zakrivljenost blokira direktnu zraku od odašiljačke prema prijemnoj anteni. Rezultati pokazuju da se prigušenje, kod tunela sa zavojem, povećava 3 do 6 puta nakon točke prijeloma u odnosu na ono kod ravnog tunela. Takvi rezultati se dobijaju zbog većih fizikalnih utjecaja kao i novih NLOS uvjeta propagacije EMV-a.

Znanstveni rad [5] primjenjuje metodu praćenja zraka uz teselaciju. Fokusira se na zaobljeni tip tunela. Značajna varijacija jakosti polja može se primjetiti ovisno o duljinama ploča teselacije i njihovog broja u simulaciji. Broj ploča i duljina zbog različitih utjecaja okruženja, konfiguracija i različitih frekvencija nikad se ne može postaviti na „optimalan“, jer ovisi o prevelikom broju faktora i pravi veliku razliku. Međutim metoda zadovoljava i poklapa se u određenoj mjeri s rezultatima mjerenja tako se može prezentirati kao dobra metoda za prikaz zaobljenih tunela. Za duljinu ploča treba se ispuniti uvjet $d \gg \lambda$, gdje je d duljina ploče, a λ valna duljina vala. Kako bi se najbliže prikazali rezultati ali i zadovoljio uvjet za niske frekvencije, uzima se jednostavniji uvjet $d > 2 \lambda$.

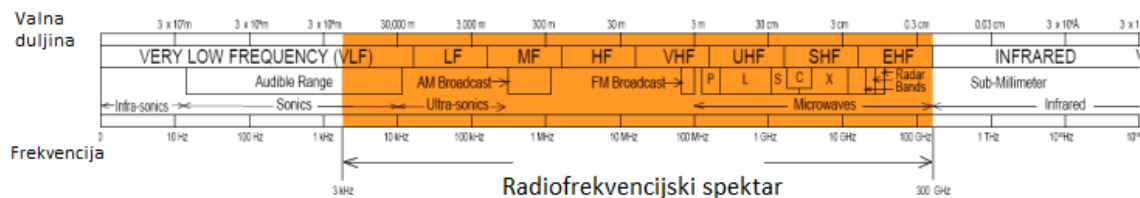


Slika 2.1 Geometrija tunela na kojima se provodi simulacija [5]

Simulacija je pokazala efekt fokusiranja zraka u tunelu sa zaobljenim stropom, pri čemu je efekt bio veći na nižim frekvencijama. Mjerenja su provedena na 2,4 i 5,8 GHz pri čemu je odašiljač bio je postavljen na udaljenostima 3,2 m i 1,9m od bočnog zida, a prijemnik na 2,4 m od tog istog zida . Mjerenje je provedeno uzduž tunela od 1 do 500 m od odašiljača, s korakom 0,0125 m. Pokazano je da odstupanje rezultata simulacije od rezultata mjerenja ovise o duljini ploča teselacije. Tako se najbliži rezultati simulacije rezultatima mjerenja na 2,4 GHz dobiju kada se za veličinu teselacije odnosno duljinu ploča uzme duljina 32λ .

3. PROSTIRANJE (PROPAGACIJA) RADIO VALA

Radio valovi su vrsta elektromagnetskog zračenja najnižih frekvencija i najduže valne duljine u elektromagnetskom spektru. Frekvencije radiovalova se kreću od 3 kHz do 300 GHz, a njihove valne duljine od 30 km do 1 mm.



Slika 3.1 Spektar radio frekvencije [9]

Ovaj spektar dalje se može podijeliti na područja ovisno o njihovim frekvencijskim rasponima. Na primjer u UHF (eng. *Ultra High Frequency*), područje ultra visoke frekvencije spadaju valovi čija je frekvencija od 300 MHz do 3 GHz. [9]

Radio valovi nastaju pomoću odašiljača koji je spojen na antenu. Nastaju zračenjem nakon ubrzanja nabijenih čestica. Umjetna „proizvodnja“ radio valova prvi put se kontrolirano događa krajem 1800.-ih od strane Heinricha Hertza koji u praksi provodi matematičke teorije J.C. Maxwella. Maxwell je tada kombinirao prethodna istraživanja o električnim i magnetskim silama. Tako su nastale Maxwellove jednadžbe koje su osnova elektromagnetizma, a pokazuju povezanost električnog i magnetskog polja u prostoru i vremenu, kako slijedi:

1. Gaussov zakon – divergencija električnog polja jednaka je gustoći električnog naboja ρ :

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3 - 1)$$

2. Gaussov zakon magnetizma – divergencija magnetskog polja jednaka je nuli ili nema magnetskog toka koji ulazi ili izlazi iz nekog volumena:

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (3 - 2)$$

3. Faradayev zakon indukcije (Maxwell-Faradayeva jednadžba) – rotacija električnog polja jednaka je negativnoj brzini promjene magnetskog polja, odnosno promjena magnetskog polja inducira električno polje:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3 - 3)$$

4. Amperov zakon – rotacija magnetskog polja je proporcionalna gustoći električne struje J i brzini promjene električnog polja u vremenu:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3 - 4)$$

Maxwell je zaključio da se električno polje koje je promjenjivo u vremenu ponaša kao struja, odnosno da će vrijediti zakoni koji vrijede za konduktivne struje – posljedica: promjenjivo električno polje stvara magnetsko polje (za koje vrijedi Ampereov zakon). S obzirom da vremenski promjenjivo magnetsko polje stvara vremenski promjenjiv tok, prema Faradayevom zakonu to će stvoriti električno polje. Ako se ova dva mehanizma podupiru (a kod sinusne pobude hoće) nastaju uvjeti za generiranje EMV. Maxwell je ovime ujedinio teorije elektriciteta, magnetizma i optike, te omogućio prve pothvate u komunikaciji temeljenoj na elektromagnetskom zračenju.

3.1 Mehanizmi prostiranja EMV-a

EMV se od odašiljačke antene širi radijalno, pri čemu je intenzitet zračenja različit za različite smjerove zračenja, ovisno o dijagramu zračenja antene. Do mjesta prijema val može stići različitim putanjama, što ovisi o okruženju u kojem se širi. Ako između odašiljačke i prijemne antene nema prepreka, val se širi u slobodnom prostoru. Međutim, češći je slučaj da na prostiranje EMV-a utječu objekti poput zgrada, ljudi, vozila i slično, što modeliranje i postavljanje odašiljačkih antena u praksi čini izazovnim za projektanta i izvođače radova. Kod interakcije EMV s objektima na koje nailazi pri prostiranju djeluju fizikalni mehanizmi koji mijenjaju putanju vala, prigušuju ga ili ga potpuno blokiraju, a to su: refleksija, difrakcija, refrakcija, disperzija, apsorpcija i interferencija.

3.1.1 Propagacija EMV-a u slobodnom prostoru

Osnovni i najjednostavniji je mehanizam širenja EMV-a slobodnim prostorom. Opisuje širenje vala od odašiljačke do prijemne antene bez prepreka. U idealnom slučaju val se širi jednako, te ne dolazi do fizikalnih utjecaja. Jedini gubici su gubici slobodnog prostora koji se računaju formulom:

$$L_{fs} = 32,45 + 20 \log d(\text{km}) + 20 \log f(\text{MHz}) - G_1(\text{dB}) - G_2(\text{dB}) \quad (3 - 5)$$

gdje je d udaljenost odašiljačke i prijemne antene, f frekvencija, a G_1 i G_2 su dobici na odašiljačkoj i prijemnoj anteni.

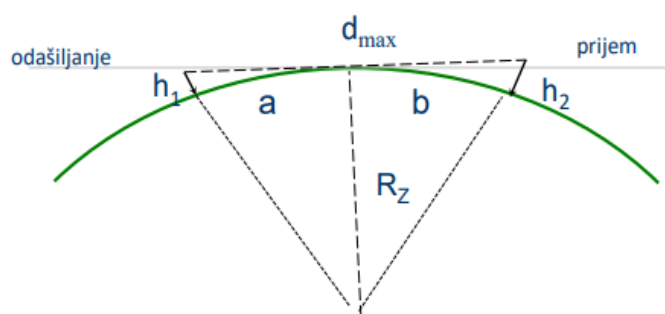
Postoje dva uvjeta koja su potrebna kako bi se ostvarilo prostiranje vala u slobodnom prostoru. To su radiooptička vidljivost odašiljačke i prijemne antene i slobodna 1. Fresnelova zona.

1. Radiooptička vidljivost

Uvjet se odnosi na zakrivljenost Zemlje i njen utjecaj na prijem signala, a opisan je sljedećom formulom:

$$d \leq \sqrt{2R_z} \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (3 - 6)$$

gdje je d udaljenost među antenama, R_z polumjer Zemlje (6500 km), h_1 je visina odašiljačke antene, a h_2 prijemne (slika 3.2) . Ako je (3-6) zadovoljeno, postojat će optička vidljivost između dvije antene.



Slika 3.2 Optička vidljivost

Zbog promjene indeksa refrakcije s visinom EMV se neće širiti pravocrtno nego će se ogibati, tako da efektivna vidljivost između dviju antena može biti veća od optičke vidljivosti pa se govori o radiooptičkoj vidljivosti. Za uvjete propagacije u zatvorenim prostorima na malim

udaljenostima i malim visinama kakve se razmatraju u ovom radu, može se smatrati da radiooptička vidljivost predstavlja direktnu liniju vidljivosti (eng. *Line of sight*) između prijemne i odašiljačke antene. Za valne duljine manje od 25 cm, odnosno valove viših frekvencija bitno je imati radiooptičku vidljivost zbog prevelikog zagušenja polja. Takvi valovi podložniji su gušenjima zbog raznih prepreka i utjecaja okoline.

2. Slobodna 1. Fresnelova zona

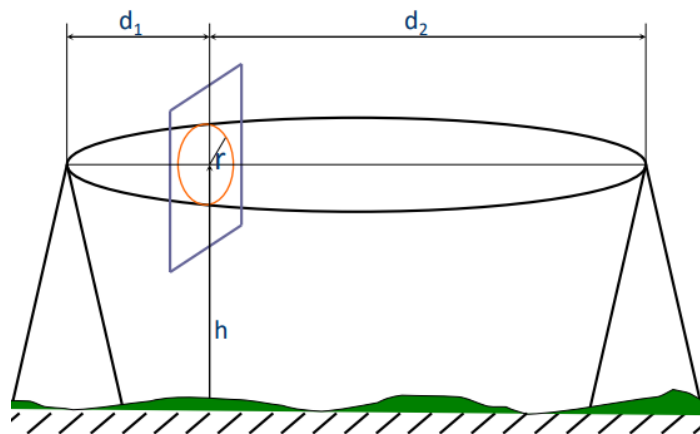
Prva Fresnelova zona obuhvaća prostor unutar kojeg se putanje dijelova radio vala ne razlikuju za više od $\lambda/2$ u odnosu na direktnu zraku. Ova zona je slobodna ako vrijedi:

$$\frac{h}{r} > 0,6 \quad (3 - 7)$$

gdje je h visina prepreke, a r je polumjer 1. Fresnelove zone (slika 3.3). Veličina r je definirana kao:

$$r \sim 548 \times \sqrt{\frac{d_{1km} \times d_{2km}}{f_{MHz}(d_{1km} + d_{2km})}} \quad (3 - 8)$$

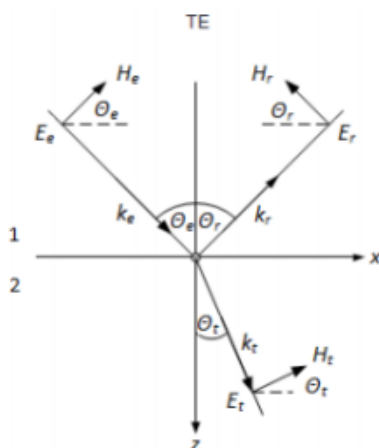
U (3 - 8) d_1 je oznaka udaljenosti odašiljačke antene i prepreke, d_2 udaljenost prepreke i prijemne antene, a f je frekvencija u megahercima.



Slika 3. 3 Prikaz 1. Fresnelove zone

3.1.2 Refleksija i refrakcija

Refleksija se stvara na graničnom području dva medija s različitim elektrodinamičkim svojstvima. Dio vala se reflektira pod određenim kutom, a drugi dio prolazi u drugo sredstvo. Kut pod kojim se zraka reflektira nazvan je kut refleksije, a jednak je upadnom kutu vala i okomice na površinu od koju val upada, (slika 3.4).



Slika 3.4 Refleksija EMV-a [10]

Refrakcija je pojava koja se također javlja kod upada vala na granicu dva medija. Povezana je sa refleksijom. Dok se dio zrake kod refleksija odbija od površinu, refrakcija se odnosi na onaj dio vala koji uspijeva proći u drugi medij. Kod refrakcije dolazi do promjene smjera EMV-a zbog promjene elektrodinamičkih svojstava medija. Na slici 3.4 može se vidjeti kako dolazi do refleksije i refrakcije upadne zrake E_e , refleksijom se dobije zraka E_r , a refrakcijom E_t . Ova 2 mehanizma važna su za propagaciju vala u zatvorenim prostorima. U takvim okruženjima jakost polja na prijemnoj anteni ovisi o prolazu vala kroz zidove odnosno dielektrični sloj i o njegovoj refleksiji unutar prostora. Dielektrični materijal karakteriziran je dielektričnom konstantom $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ gdje je ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma i iznosi $8,854 \times 10^{12}$ Farad/m, a ϵ_r relativna dielektrična konstanta materijala. Uz dielektričnu konstantu materijal je opisan i vodljivošću σ_e . Spajajući te 2 karakteristike dobija se kompleksna dielektrična konstanta:

$$\delta = \epsilon_0 \delta_r = \epsilon - j \frac{\sigma_e}{2\pi f_c} \quad (3 - 9)$$

gdje je f_c frekvencija vala, a j imaginarna jedinica.

Kod refleksije elektromagnetskog vala postoje 2 slučaja. Prvi slučaj se događa kada je komponenta magnetskog polja paralelna granici između dielektrika (transverzalni magnetski val – TM) i drugi slučaj gdje je komponenta električnog polja paralelna granici između dielektrika (transverzalni električni val – TE). Koeficijenti prijenosa računaju se postavljanjem upadnog, reflektiranog i prenesenog ravnog vala. Iz ovoga se dobija Snellov zakon koji govori da je kut upada jednak kutu refleksije:

$$\theta_e = \theta_r \quad (3 - 10)$$

kao što je i prikazano na slici 3.4. Kut refraktirane zrake vala odnosno onaj pod kojim zraka upada u drugi dielektrik dan je:

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_e} = \frac{\sqrt{\delta_1}}{\sqrt{\delta_2}} \quad (3 - 11)$$

, δ_1 i δ_2 predstavljaju kompleksne dielektrične konstante dvaju dielektrika. Koeficijenti refleksije i prijenosa računaju se različito ovisno radi li se o TM i TE valu. Za TM val vrijedi ti koeficijenti se računaju prema idućim formulama:

$$\rho_{TM} = \frac{\sqrt{\delta_2} \cos \theta_e - \sqrt{\delta_1} \cos \theta_t}{\sqrt{\delta_2} \cos \theta_e + \sqrt{\delta_1} \cos \theta_t} \quad (3 - 12)$$

$$T_{TM} = \frac{2\sqrt{\delta_2} \cos \theta_e}{\sqrt{\delta_2} \cos \theta_e + \sqrt{\delta_1} \cos \theta_t} \quad (3 - 13)$$

, a za TE val se računaju:

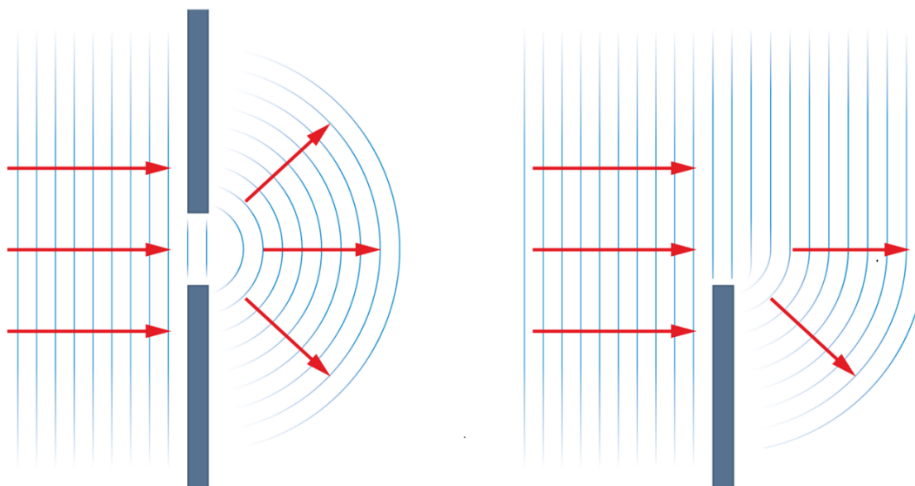
$$\rho_{TE} = \frac{\sqrt{\delta_1} \cos \theta_e - \sqrt{\delta_2} \cos \theta_t}{\sqrt{\delta_2} \cos \theta_e + \sqrt{\delta_1} \cos \theta_t} \quad (3 - 14)$$

$$T_{TE} = \frac{2\sqrt{\delta_1} \cos \theta_e}{\sqrt{\delta_1} \cos \theta_e + \sqrt{\delta_2} \cos \theta_t} \quad (3 - 15)$$

gdje su $\rho_{TM} = E_r/E_e$ i $T_{TM} = E_t/E_e$, a isto vrijedi i za ρ_{TE} i T_{TE} . [10]

3.1.3 Difrakcija

Difrakcija ili ogib se javlja na rubovima prepreka i time omogućuje širenje vala i prijem iza prepreke. Zrake vala su u tom slučaju prigušene i dolazi do gubitaka, a to ovisi o veličini i obliku prepreke te valnoj duljini vala.



Slika 3.2 Difrakcija EMV-a, [10]

Na slici 3.2 može se vidjeti utjecaj vala oko samo prepreke, njegov lom i interferencija s drugim komponentama vala.[10]

Difrakcija je pojava u kojoj se val savija oko prepreka ili kroz otvore i nastavlja se širiti u svim smjerovima nakon prepreke. Difrakcija može nastati zbog nekog objekta tj. prepreke na putu, ali se može pojaviti i kod zidova nakon kojih dolazi do ogiba vala. Kut difrakcije prikazan je formulom:

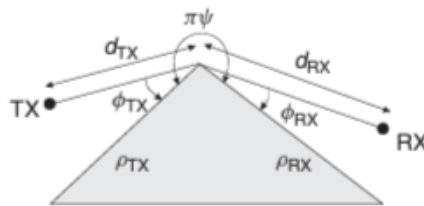
$$\theta = \arctan\left(\frac{h_s - h_{TX}}{d_{TX}}\right) + \arctan\left(\frac{h_s - h_{RX}}{d_{RX}}\right) \quad (3 - 16)$$

Gdje je h_s visina prepreke zbog koje dolazi do difrakcije, h_{TX} je visina odašiljačke, h_{sRX} visina prijemne antene, d_{TX} predstavlja udaljenost mjesta difrakcije od odašiljačke antene, a d_{RX} od prijemne.

Za jednostavan model difrakcije na oštrm rubu, slika 3.3, u dalekom polju, jakost polja nakon difrakcije definirano je formulom:

$$E_{dif} = ED(\varphi_{TX}, \varphi_{RX})A(d_{TX}, d_{RX}) \exp(-jk_0 d_{RX}) \quad (3 - 17)$$

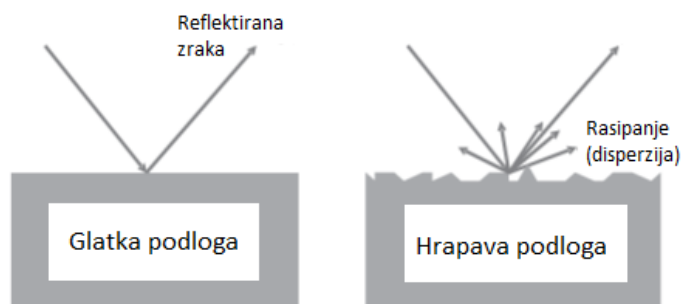
Gdje su D koeficijent difrakcije, A geometrijski faktor prepreke i $\exp(-jk_0 d_{RX})$ je faktor faze. Jakost polja iza prepreke ovisi o udaljenosti antena i kutu difrakcije.[10]



Slika 3.3 Geometrija "klinaste" difrakcije

3.1.4 Disperzija

Disperzija nastaje kad u isto vrijeme dođe do pojave refrakcija, difrakcije i refleksije, a obično se javlja na hrapavim površinama objekata i predstavlja raspršenje zraka EMV-a.



Slika 3.4 Disperzija EMV-a [10]

Disperziju dodatno opisuje Kirchhoffovo pravilo. Pojednostavljuje disperziju tako što pretpostavlja da različite nepravilnosti na površini ne utječu jedne na drugu. Iako zanemaruje određene nepravilnosti podloge val i dalje ima svoje gubitke. Slabljenje jakosti polja prema tom pravilu opisano je idućom formulom:

$$\rho_{rough} = \rho_{smooth} \exp[-2(k_0 \sigma_h \sin \psi)^2] \quad (3 - 18)$$

gdje je σ_h standardna devijacija distribucije visine, k_0 broj valova $2\pi/\lambda$, ψ kut između vektora zrake i podloge.[10]

3.2 Metode proračuna jakosti polja za veće prostore

Za modeliranje, simulaciju i projektiranje bežičnih sustava potrebni su modeli kanala. U takvim modelima koriste se prethodno navedene zakonitosti kako bi se matematički opisale pojave prilikom propagacije vala, te se oni parametriziraju i pretvaraju u generičke modele za simulacije. Modeli moraju biti pogodni za određene lokacije sličnih geografskih i morfoloških specifikacija, uz to moraju biti robusni na pogreške geografskih baza podataka. Za takve modele koriste se iduće metode modeliranja:

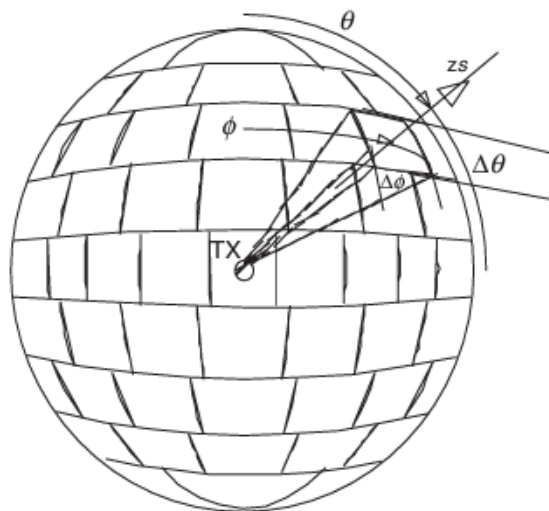
- Pohranjeni impulsni odziv kanala – u simulacijama se koriste izmjereni realni impulsni odzivi kanala. Prednost je da oni predstavljaju realno stanje kanala i mogu se ponovno koristiti (pohranjuju se), ali specifični su za lokaciju na kojoj su izmjereni i često ne predstavljaju neko tipično okruženje.
- Deterministički modeli kanala – koriste geografske i morfološke podatke i baza podataka te ih koriste za proračune primjenom Maxwellovih jednažbi. Kao i kod primjene izmjerenih impulsnih odziva, rješenja su specifična za određeno područje, a sami proračuni su izuzetno složeni. Na točnost proračuna utječu pojednostavljenja koja su nužna da bi se uopće proveli te nepreciznosti podataka o terenu. Prednost nad metodom pohranjenog impulsnog odziva je da nisu potrebna mjerenja koja mogu biti vrlo zahtjevna.
- Stohastički modeli kanala – modeliraju funkciju gustoće vjerojatnosti impulsnog odziva kanala (predviđaju odziv). Nisu namjenjeni za proračun jakosti polja na nekom određenom mjestu, već za procjenu raspodjele jakosti polja na većem području.

Ovi modeli često se kombiniraju kako bi se dobili što točnije raspodjele snage prijemnog signala na nekom određenom području.

U determinističkom načinu modeliranja radijski kanal se razmatra kao deterministički kanal. Ovakav pristup omogućuje određivanje jakosti polja u svim točkama i vremenima, ali se moraju uzeti u obzir mnogi faktori koji utječu na propagaciju. U zatvorenom prostoru, kakav je od interesa za ovaj diplomski rad, bitno je odrediti oblik i strukturu prostora, geometriju i elektrodinamička svojstva zidova i namještaja odnosno predmeta unutar prostorije. Za takav način obrade potrebno je velik broj podataka prostora i rubnih uvjeta koji utječu na proračun, a vrijeme potrebno da računalo obradi sve navedeno je obično izuzetno veliko.

Najtočnije rješenje se dobije primjenom Maxwellovih jednažbi nekom od metoda poput metode momenata (MoM), metodom konačnih elemenata (*Finite Element Method* – FEM) ili metodom konačnih razlika u vremenskoj domeni (*Finite Difference Time Domain* - FDTD). Međutim, za veće prostore primjena ovih metoda obično predstavlja previše složen i zahtjevan računalni zadatak. Zbog toga se u tim slučajevima češće koristi aproksimacija koja se naziva visokofrekvencijskom aproksimacijom ili aproksimacijom zrakama. U takvoj se aproksimaciji EMV modelira kao zrake koje u prostiranju podliježu pravilima geometrijske optike (Snellov zakon za refleksiju i refrakciju), a za točniju aproksimaciju uključuju se difrakcija i disperzija. Najčešće korištene aproksimacijske metode propagacije EMV su metoda lansiranja zrake (eng. *ray-launching*) i metoda praćenja zrake (eng. *ray-tracing*).

Metoda lansiranja zrake „šalje“ zrake u svim smjerovima od odašiljačke antene (slika 3.5). Broj smjerova određuje složenost proračuna, ali i preciznost. Algoritam zatim prati propagaciju svake zrake i proračunava kakva će ona doći na prijemnu antenu ili ih odbacuje ako putem do prijemne antene izgube svoju snagu ispod unaprijed definiranog praga.

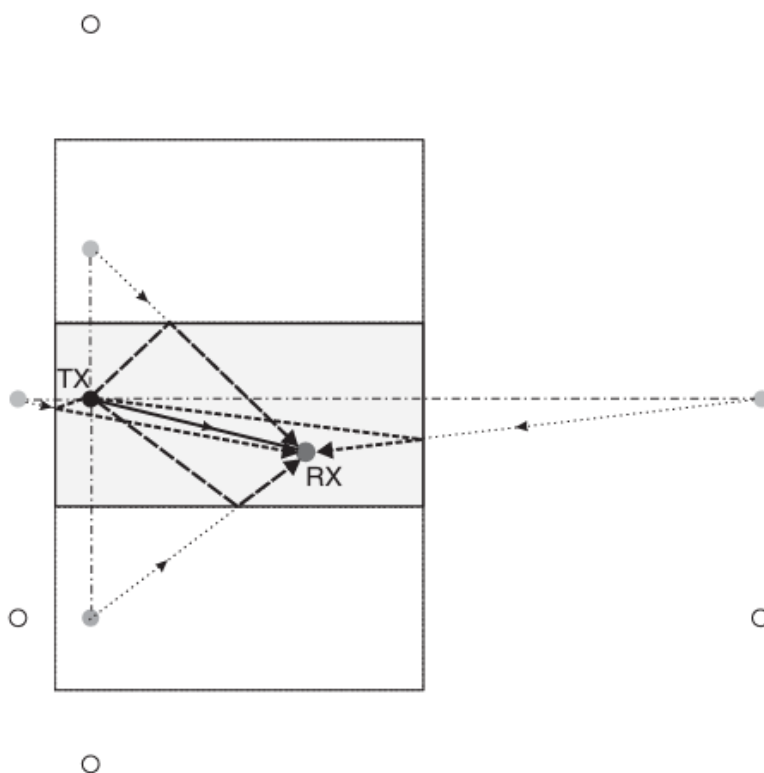


Slika 3.5 Prikaz mehanizma lansiranja zrake [10]

Problem ovakvog mehanizma jest velika udaljenost prijemne antene pa se efektivni kut zrake širi. U tom slučaju se jedna takva zraka dijeli na njih 2, a ta metoda se naziva *ray-splitting*. Time se prati veći broj zraka što je računalno zahtjevnije za obraditi, ali su konačni rezultati točniji.

3.2.1 Metoda praćenja zrake

Metoda praćenja zrake (eng. *ray tracing*) je metoda proračuna jakosti polja koji prati elektromagnetsku zraku od izvora do odredišta. Odvija se u 2 koraka. Prvo se utvrđuju sve zrake koje pristižu od odašiljačke na prijemnu antenu. Uzimaju se u obzir i reflektirane zrake s tim da se poštuje načelo refleksije (dio snage se izgubi jer u isto vrijeme dolazi do refrakcije), a mjesto na površini od koju se upadna zraka reflektira se u ovoj metodi prikazuje kao „virtualni“ izvor. Metoda stvaranja takvih virtualnih izvora se naziva načelo slike. U drugom se koraku računaju prigušenja do kojih dolazi prolaskom zraka slobodnim prostorom ili refleksijama.



Slika 3.6 Prikaz metode praćenja zrake s načelom slike [10]

Na slici 3.6 prikazana je metoda praćenja zrake s načelom slike gdje sivi krugovi prikazuju virtualni izvor s jednim odrazom, bijeli krugovi su virtualni izvori s dvostrukim refleksijama, točkaste linije prikazuju zrake od virtualnih izvora do prijemne antene (RX), isprekidane linije su stvarni odraz od komponente prostora, a puna linija je direktna zraka EMV-a bez refleksija. Za razliku od lansiranja zrake (eng. *ray-launchinga*), metoda praćenja zrake se bolje pokazala

na manjim i zatvorenim prostorima, dok na širim područjima točnije rezultate daje mehanizam lansiranja zrake. Oba mehanizma sama po sebi ne mogu dovoljno dobro pretpostaviti kako će se točno zrake EMV-a širiti u području, no te metode je moguće poboljšati. To se radi proučavanjem terena, njegovih karakteristika, prepreka, modeliranje prostora i pretpostavkama o mogućim smetnjama propagacije signala i takvi podaci se pohranjuju u bazu podataka. Takve baze podataka su uglavnom jako velike i vremenski zahtjevne za računalnu obradu pa se drugim načinima pokušava ubrzati taj proces, a da rezultati budu dovoljno zadovoljavajući. Jedan od tih načina je i provođenje metode praćenja zrake u 2D modelu, umjesto u 3D modelu koji bi točnije prikazao prostor. Slika 3.6 također prikazuje dvodimenzionalno praćenje zraka EMV-a, a tim načinom štedi se vrijeme i računalni resursi. Još jedna stavka koja računalnu obradu čini složenijom jest i sama faza vala, odnosno faze reflektiranih zraka. Kod reflektiranih zraka dolazi do promjene faze EMV-a i to može utjecati na ukupnu snagu vala zbog interferencije više zraka (moguće je smanjenje ili povećanje snage osnovne zrake EMV-a). Jedan od načina pojednostavljenja takvog problema da bi se uštedjeli resursi jest zanemarivanje, odnosno pretpostavka da sve zrake imaju jednoliko raspoređene faze. Ovo je još jedan oblik determinističko-stohastičkog pristupa.[10]

3.2.2 Vanjski utjecaji

Pod vanjske utjecaje koji izazivaju promjene na elektromagnetskom valu i njegovoj propagaciji spadaju uvjeti poput temperature, vlažnosti, vremenskim uvjetima, a unutar zatvorene prostoriju tu su i vodljivost materijala zidova, njihova elektrodinamička svojstva, razni objekti koji blokiraju direktnu liniju vidljivosti između prijemne i odašiljačke antene itd. Vodljivost zidova i drugih objekata naglašena je zatvorenim prostorima jer stvara efekt valovoda gdje se zid ponaša kao prepreka elektromagnetskom signalu da se širi van tog prostora. S obzirom na električnu vodljivost i ponašanje u električnom polju, materijali se mogu podijeliti na vodljive, poluvodljive i izolacijske. Materijali od kojih se izrađuju zidovi u pravilu su dobri izolatori, osim ako su ispunjeni željeznom armaturom ili je visoki postotak vlage u prostoriji pa je i materijal (cigla, žbuka) visoke vlažnosti što povećava njihovu električnu vodljivost.

U vinskim podrumima zidovi su obično izrađeni od cigle, ukopani su u potpunosti ili djelomično u zemlju te su velike debljine. Prozora najčešće uopće nema tako da se radio val prostire isključivo unutar podruma. U takvim uvjetima dolazi do refleksije i refrakcije vala od

površine zida, gdje se dio snage vala gubi, a drugi dio se reflektira i nastavlja propagaciju u prostoru. Nadalje, zid od cigle kakav je u prostoru u kojem je provedeno ovo istraživanje (više o tome u poglavlju 4.) jest hrapave površine. Zbog toga dolazi i do raspršenja vala uslijed kontakta sa zidom.

Toplinsko gibanje elektrona i titranje iona oko svojih ravnotežnih položaja u rešetki ubrzavaju se pri povišenju, a usporavaju pri sniženju temperature. Uslijed toga se pri povišenju temperature povećava (a pri sniženju temperature smanjuje) broj sudara između samih elektrona i između elektrona i iona rešetke u jedinici vremena, tj. smanjuje se (odnosno povećava) vrijeme i uslijed toga se, smanjuje (povećava) specifična vodljivost materijala. Za proizvodnju vina temperatura u podrumu se održava između 10°C i 20°C , ovisno o fazi proizvodnje (u fazi mošta temperatura je od 10°C do 15°C , a kod fermentacije i skladištenja od 15°C do 20°C). Nadalje, za proizvodnju vina potrebno je držati visoku vlažnost u podrumu (preko 60%) što povećava i vlagu u zidovima, a time i njihovu vodljivost. Na taj način materijal svojim elektrodinamičkim svojstvima utječe na propagaciju EMV-a u prostoru. To utječe na koeficijent refleksije te količinu apsorbirane i reflektirane energije radio vala koji upada na površinu zida.

4. MJERENJA I SIMULACIJE PROPAGACIJE VALA U ZATVORENOM UNUTARNJEM PROSTORU

Ovo poglavlje detaljno će opisati provedena mjerenja jakosti električnog polja u podrumu, način izvođenja, detalje o mjernim instrumentima i karakteristike okoline u kojoj su se mjerenja provodila. Nadalje bit će opisana i simulacije provedena u MATLAB-u, utjecaj promjene određenih parametara i usporedba rezultata dobivenih simulacijom i mjerenjem.

4.1 Mjerni instrumenti, karakteristike podruma i uvjeti mjerenja

Mjerenje jakosti električnog polja provedena su za generirani signal frekvencije 860 MHz i 2400 MHz, snage 15 dBm. Tokom tih mjerenja koristili su se sljedeći mjerni instrumenti: mikrovalni generator signala ANAPICO ASPIN20G, vertikalno usmjerena dipol antena PCD 8250 (Precision Conical Dipole) – odašiljačka antena, R&S TS-EMF prijenosni mjerni sustav koji se sastoji od spektralnog analizatora FSH8 i izotropne antene – prijemna antena, drveni tronožac koji drži antene. Uz navedene instrumente koristio se i RFEX softverski sustav kojim se upravlja parametrima spektralnog analizatora i prezentiraju rezultati. Slike 4.1 do 4.4 prikazuju navedene instrumente.[6]



Slika 4.1 Generator signala ANAPICO ASPIN20G



Slika 4.2 Odašiljačka antena PCD 8250



Slika 4.3 Prijemna izotropna antena R&S TS-EMF sustava



Slika 4.4 Spektralni analizator FSH8, R&S TS-EMF sustava

Mjerenja su odrađena u podrumu Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, (slika 4.5), koji ima arhitektonske i mikroklimatske značajke slične vinskim podrumima .

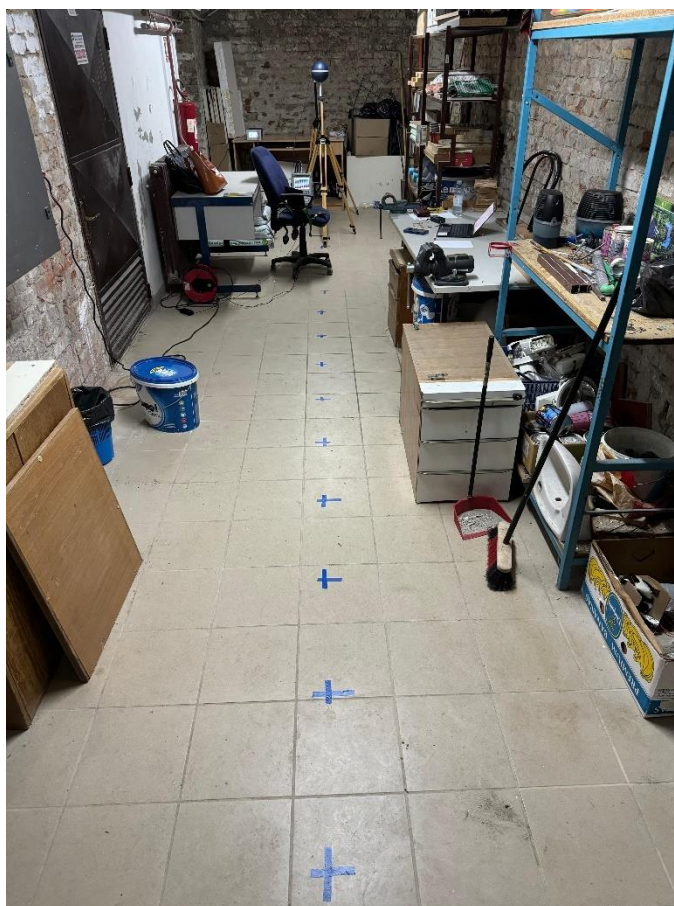


Slika 4.5 Podrum FERIT-a u kojem su provedena mjerenja

Iz priložene slike 4.5 vidi se tip zidova i stropa koji imaju utjecaj na propagaciju EMV-a. Zidovi su napravljeni od cigle (hrapave površine) što će imati velik utjecaj na refleksiju i difrakciju. Uz takav zid nalaze se razni objekti koji su u podrumu, stolovi, police, vatrogasni aparati itd. Također se vidi da je prostor odnosno strop podruma zaobljen, s najnižom visinom prostora od 2,10 m, a najvišom 2,60 m. Prosječna debljina zidova je 74 cm. Ono što se ne vidi su objekti uz zid s lijeve strane slike. S te strane na zidu se nalazi spremnik od inoxa i metalna vrata koji će se pokazati kao veliki reflektori vala. Na podu su označene točke mjerenja plavom trakom. U oba mjerenja mikroklimatski uvjeti unutar podruma bili su vrlo slični onima kojise održavaju u vinskim podrumima. U prvom mjerenju vlaga je iznosila 65,3 %, a temperatura 24,5 °C. Kod drugog mjerenja vlaga i temperatura bile su nešto manje, vlaga je iznosila 63,1 %, a temperatura 24,1 °C.

4.2 Rezultati mjerenja u podrumu fakulteta

Kao što je prethodno prikazano mjerenja su provedena u većem broju točaka u podrumu. Mjerenja su provedena za LOS uvjete u hodniku broj 1 gdje su odašiljačka i prijemna antena imale čistu liniju vidljivosti između njih. Tijekom mjerenja u hodniku 1 s određenim korakom pomicala je prijemna antena prema hodniku 2 u kojem su NLOS uvjeti propagacije. Odašiljačka antena na drvenom tronošću je postavljena 1 m od zida na sredini hodnika broj 1. Prijemna antena postavljena na sredinu hodnika 1 u početnu točku udaljenu 1 m od odašiljačke antene. Visine obje antene su 1,5 m. U prvom setu mjerenja visina antene se nije mijenjala, samo se prijemna antena pomicala po označenim plavim linijama na slici 4.5, 3 i 6 cm u lijevu stranu u odnosu na sredinu hodnika pa zatim isto toliko u desnu. To znači da je u svakoj točki (na određenoj udaljenosti od odašiljačke antene) odrađeno po 5 mjerenja. Prijemna antena udaljena je 1 m od odašiljačke, a nakon toga korak pomicanja prijemne antene je 0,5 m. Takav korak koristio se do udaljenosti 7,5 m u hodniku 1, zatim se tražilo križanje sa sredinom hodnika broj 2 i tu je korak bio 0,1 m do pozicije u 7,8 m. Ovo smanjenje koraka je napravljeno kako bi se s boljom rezolucijom izmjerilo polje u području u kojem je uz refleksiju očekivana i difrakcija. Na slici 4.6 prikazan je hodnik 1, te označene udaljenosti kojima se pomicala prijemna antena, a u tablici 4.1 dani su rezultate mjerenja u hodniku broj 1 za signal frekvencije 860 MHz.



Slika 4.6 Hodnik broj 1

Tablica 4.1 Rezultati mjerenja u hodniku 1 na 860 MHz

Mjerna točka	Udaljenost od Tx (m)	E1 (dB μ V/m)	E2 (dB μ V/m)	E3 (dB μ V/m)	E4 (dB μ V/m)	E5 (dB μ V/m)	Esr (dB μ V/m)
1.	1	116.64	116.74	116.75	117.71	118.61	117.29
2.	1.5	109.42	110.29	111.53	109.97	111.34	110.51
3.	2	111.58	112.79	113.37	111	111.48	112.044
4.	2.5	110.69	109.53	110.24	112.95	113.34	111.35
5.	3	107.25	106.28	108.13	109.09	109.32	108.014
6.	3.5	109.29	108.85	108.87	109.67	110.03	109.342
7.	4	106.66	106.68	105.41	106.62	107.23	106.52
8.	4.5	104.71	105.69	106.4	103.69	103.27	104.752
9.	5	109.37	108.97	109.1	109.78	107.88	109.02
10.	5.5	108.87	110.14	102.51	105.96	103.77	106.25

11.	6	100.64	99.04	100.83	110.28	107.23	103.604
12.	6.5	102.77	104.1	103.09	105.23	105.74	104.186
13.	7	106.49	100.51	98.26	106.89	104.65	103.36
14.	7.5	104.95	102.57	101.94	107.12	109.3	105.176
15.	7.6	104.48	104.22	104.3	105.6	106.29	104.978
16.	7.7	101.85	99.48	98.64	105.27	108.03	102.654
17.	7.8	104.6	106.1	107.86	104.89	105.95	105.88

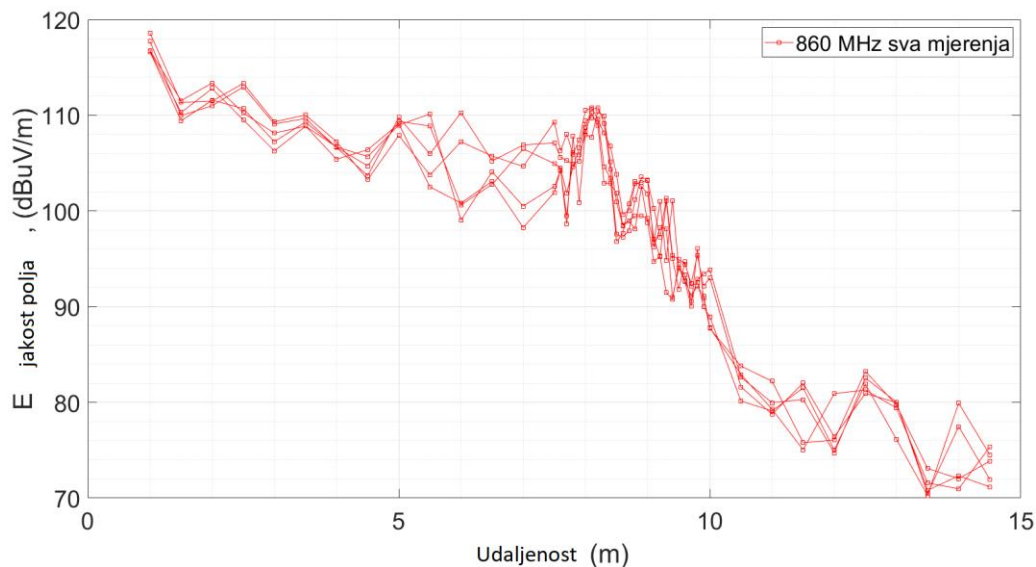
Tablica 4.1 prikazuje rezultate mjerenja u hodniku broj 1. Iz tablice 4.1 se vidi da se korak na poziciji 7,5 m smanjuje s 0,5 na 0,1 m. Mjerna točka označena je plavom trakom na slikama 4.5 i 4.6, a E označava jakost polja u dB μ V/m. E1 je jakost polja na poziciji na sredini hodnika, E2 i E3 su za pozicije 3 i 6 cm pomaknute vertikalno u lijevu stranu, a E4 i E5 na desnu. Esr predstavlja srednju vrijednost jakosti polja na pojedinoj mjernoj točki dobivene kao srednja vrijednost 5 mjerenja na istoj udaljenosti. Nakon hodnika 1 prijemna antena se pomicala vertikalno u odnosu na hodnik 1, u desnu stranu za korak 0,1 m. Na tim točkama također su provedena po 5 mjerenja za svaku točku, ali nije se prijemnu antenu pomicalo samo lijevo i desno kao na mjerenjima u hodniku 1. Ovaj put antena se pomicala za 3 cm naprijed (E2), nazad (E3), lijevo (E4) i desno (E5). Od udaljenosti 10 m od odašiljača, mjerenja su provedena na svakih 0,5 m do kraja hodnika 2. Rezultati su dani u Tablici 4.2.

Tablica 4.2 Rezultati mjerenja u hodniku 2 na 860 MHz

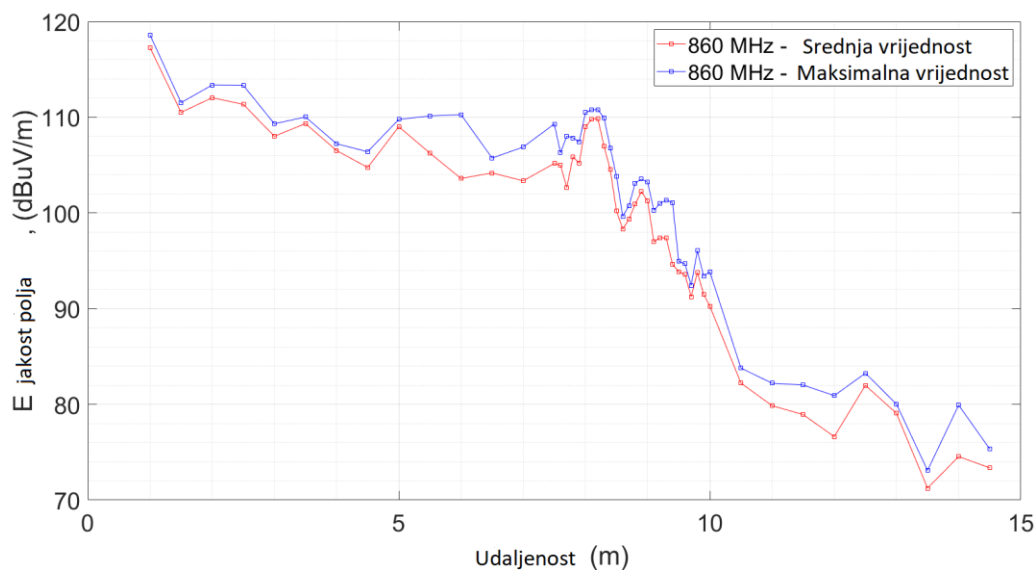
Mjerna točka	Udaljenost od Tx (m)	E1 (dB μ V/m)	E2 (dB μ V/m)	E3 (dB μ V/m)	E4 (dB μ V/m)	E5 (dB μ V/m)	Esr (dB μ V/m)
18.	7.9	106.55	105.88	100.9	105.22	107.42	105.194
19.	8	109.41	107.99	108.27	108.74	110.49	108.98
20.	8.1	109.76	107.7	110.23	110.62	110.78	109.818
21.	8.2	109.5	110.41	108.94	110.8	109.61	109.852
22.	8.3	108.14	109.92	102.92	109.16	104.64	106.956
23.	8.4	106.79	105.11	102.89	104.34	103.45	104.516
24.	8.5	103.8	100.94	101.84	97.59	96.82	100.198
25.	8.6	99.65	98.45	98.53	97.25	97.67	98.31

26.	8.7	100.04	98.95	98.98	97.94	100.76	99.334
27.	8.8	102.83	98.09	99.48	101.18	103.12	100.94
28.	8.9	103	102.56	99.49	103.54	102.56	102.23
29.	9	103.22	98.8	99.22	103.15	101.82	101.242
30.	9.1	96.21	94.69	96.72	100.28	97.08	96.996
31.	9.2	98.27	95.29	101	97.25	95.23	97.408
32.	9.3	98.13	101.04	94.85	101.35	91.49	97.372
33.	9.4	90.95	95.03	101.09	95.33	90.74	94.628
34.	9.5	94.03	91.82	94.05	94.94	94.43	93.854
35.	9.6	93.35	94.68	92.61	94.47	92.71	93.564
36.	9.7	90.55	92.12	90.03	92.44	91.13	91.254
37.	9.8	92.84	92.53	96.06	95.36	92.14	93.786
38.	9.9	93.4	89.98	90.89	92.15	91.11	91.506
39.	10	93.85	88.95	87.73	93	87.79	90.264
40.	10.5	82.64	80.14	83.79	81.61	82.92	82.22
41.	11	79.96	79.1	82.21	78.76	79.28	79.862
42.	11.5	80.3	81.51	75.78	82.02	75.04	78.93
43.	12	74.72	75.02	76.06	76.4	80.91	76.622
44.	12.5	82.55	81.91	83.25	80.93	81.29	81.986
45.	13	80.03	76.13	79.73	79.99	79.41	79.058
46.	13.5	70.46	70.26	73.09	70.81	71.58	71.24
47.	14	77.48	79.92	72.03	72.32	70.97	74.544
48.	14.5	71.96	74.52	73.85	71.17	75.33	73.366

Na slikama 4.7, 4.8 i tablici 4.2 vidi se postepeni pad jakosti električnog polja kako raste udaljenost prijemne antene od odašiljačke. Manje su varijacije kad se ta antena pomiče duž hodnika 1 po tim točkama i ovise najviše o refleksiji EMV-a. U tablici 4.2 trend postepenog pada se nastavlja do pozicije 9,5 m udaljenosti od Tx gdje je ulaz u hodnik 2. Tu se pad vrijednosti polja povećava zbog gubitka direktne vidljivosti između prijemne i odašiljačke antene, pa se može pretpostaviti da glavnina snage vala na prijemu dolazi od difrakcije.



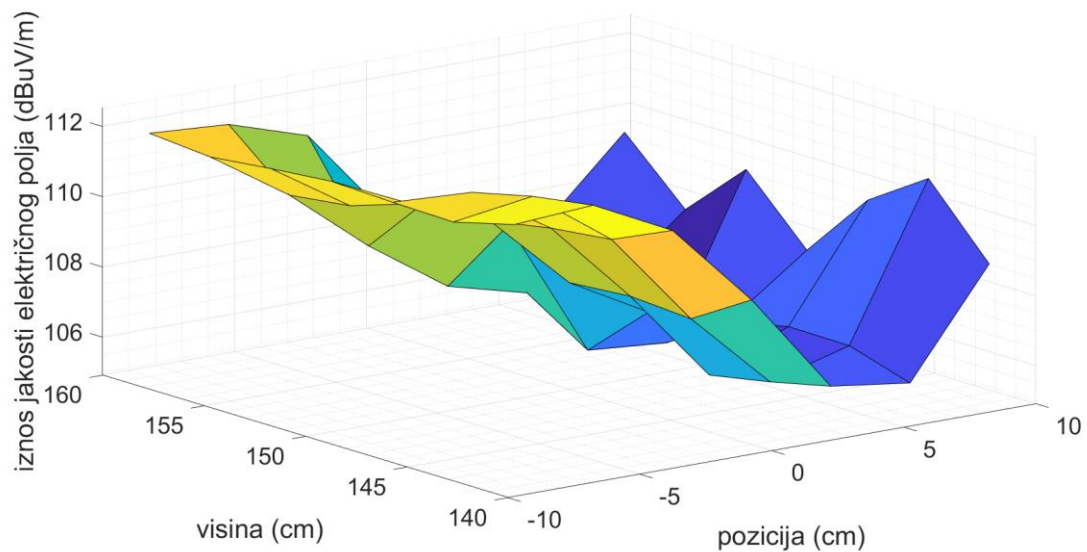
Slika 4.7 Prikaz svih mjerenja promjene jakosti polja E u ovisnosti o udaljenosti antena, 860 MHz



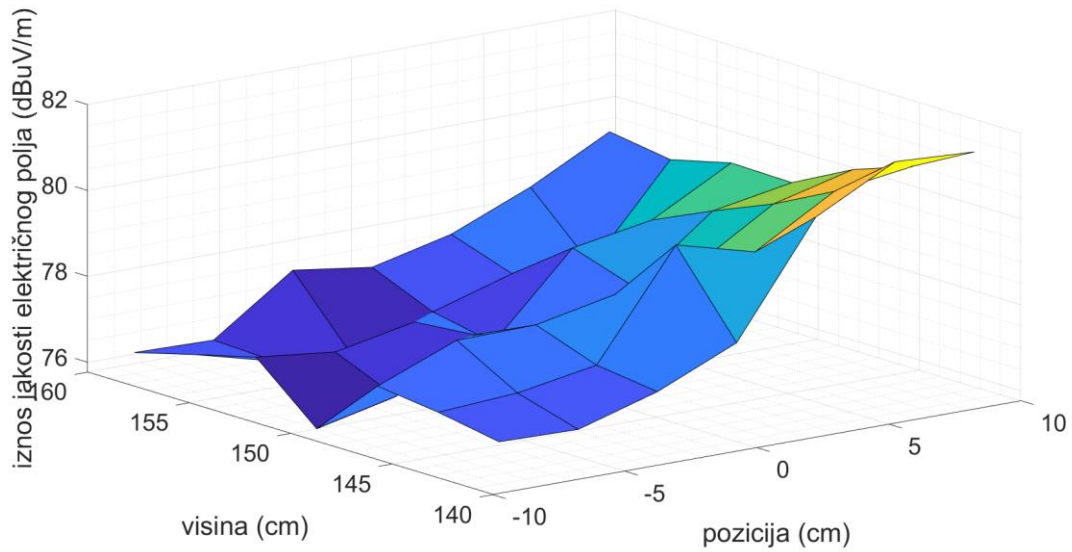
Slika 4.8 Prikaz srednjih i maksimalnih vrijednosti polja na svim mjerenim udaljenostima, 860 MHz

U drugom setu mjerenja su provedena na 49 točaka različitih visina i različitih pozicija lijevo i desno od sredine podruma kao bi se analizirala raspodjela polja u ravnini okomitoj na smjer dolaska direktne zrake. Prijemna antena postavljena je na 2 pozicije – 5,25 m od odašiljačke antene u hodniku 1 i 12,25 m od odašiljačke antene u hodniku broj 2. Prijemna antena je bila postavljena na visine 1,41, 1,44, 1,47, 1,5, 1,53, 1,56 i 1,59 m. Na obje pozicije prijemna antena

bila je pomaknuta za 3, 6 i 9 cm u desnu i lijevu stranu. Kod svake pozicije bilo je po 49 mjerenja. U ovi mjerenjima nije dolazilo do velikih odstupanja, razlika srednjih vrijednosti je bila oko 4 dB μ V/m na 5,25 m udaljenosti i 2 dB μ V/m na 12,25 m udaljenosti. Na udaljenosti 5,25 m srednja vrijednost svih mjerenja bila je 109,05 dB μ V/m, maksimalna 112,54 dB μ V/m, a standardna devijacija 2.33 dB. Na udaljenosti 12,25 m srednja vrijednost svih mjerenja bila je 78,02 dB μ V/m, maksimalna 81,63 dB μ V/m, a standardna devijacija 1.55 dB. Rezultati svih mjerenja prikazani su na slikama 4.9 i 4.10. Os pozicija označava lijevo-desno pomak, visina promjenu visine i vertikalna os iznos jakosti električnog polja dobivenog mjerenjem.

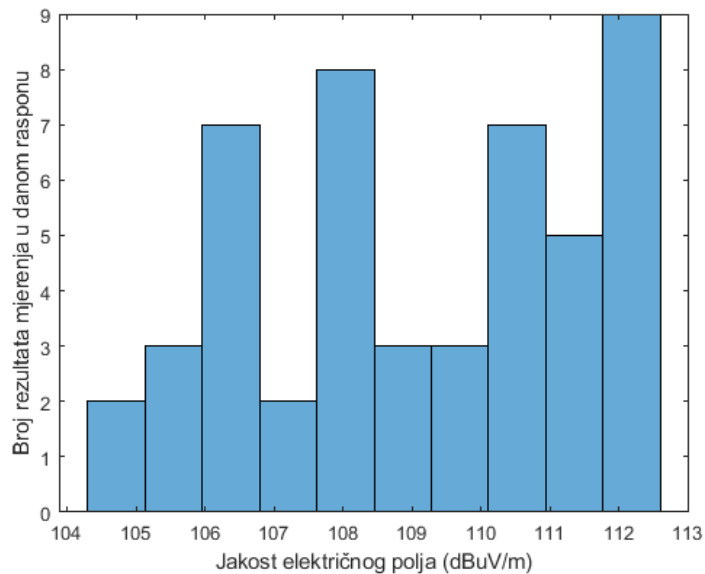


Slika 4.9 Prikaz jakosti polja na udaljenosti 5,25m s različitim visinama i pozicijama za 860 MHz

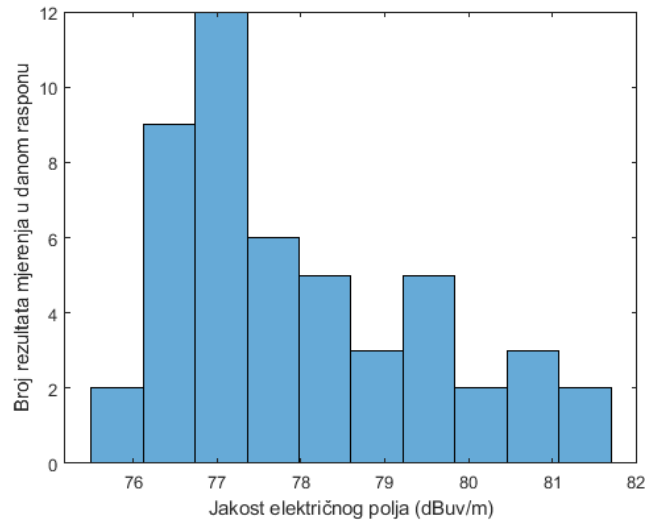


Slika 4.10 Prikaz jakosti polja na udaljenosti 12,25m s različitim visinama i pozicijama za 860 MHz

Kako bi se vidjela raspodjela izmjerenih vrijednosti jakosti polja napravljeni su histogrami rezultata za udaljenost 5,25 m i 12,5 m (slike 4.11 i 4.12). Histogram je vizualni prikaz raspodjele kvantitativnih podataka. Takav način vizualizacije podataka prikazuje broj izmjerenih rezultata koji spadaju u određeni razred vrijednosti.



Slika 4.11 Histogram srednjih izmjerenih vrijednosti na udaljenosti 5,25 m od Tx, f= 860 MHz



Slika 4.12 Histogram srednjih izmjerenih vrijednosti na udaljenosti 12,25 m od Tx, $f=860$ MHz

Treći set mjerenja proveden je na frekvenciji 2,4 GHz na isti način kao prvi set mjerenja. U tablici 4.3 i slikama 4.12 i 4.14 prikazani su rezultati mjerenja jakosti električnog polja u podrumu fakulteta na frekvenciji 2,4 GHz.

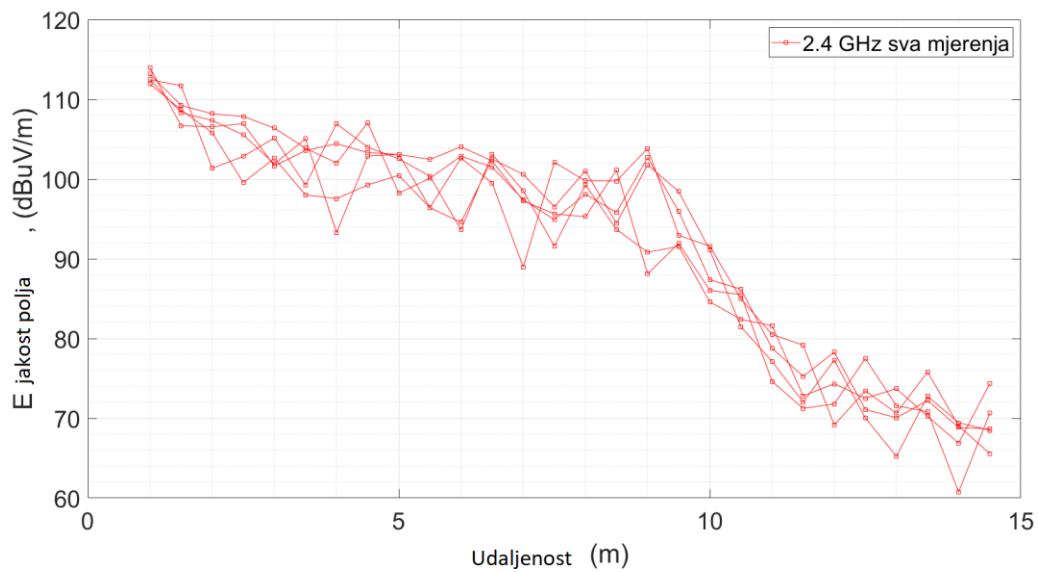
Tablica 4.3 Rezultati mjerenja na frekvenciji 2,4 GHz.

Mjerna točka	Udaljenost od Tx (m)	E1 (6 cm uljevo)	E2 (3 cm uljevo)	E3	E4 (3 cm udesno)	E5 (6 cm udesno)
1.	1	113.1503	113.9762	112.4681	111.9193	112.4858
2.	1.5	109.2338	106.6923	111.7074	108.689	108.3333
3.	2	108.1904	106.5538	101.345	105.8147	107.3575
4.	2.5	107.8555	106.947	102.8457	99.5486	105.5421
5.	3	106.3833	101.6438	105.1491	102.6116	101.902
6.	3.5	103.8739	103.5856	99.2586	98.0173	105.0428
7.	4	102.0115	104.4369	106.9338	97.5367	93.2924
8.	4.5	107.0668	103.3212	103.9911	99.2697	102.8847
9.	5	98.2281	103.0904	102.5338	100.4675	103.1047
10.	5.5	100.1031	102.4642	100.3537	96.4048	96.4302
11.	6	102.8723	104.0474	93.6337	94.5779	102.6262
12.	6.5	101.4934	102.274	103.1187	102.5094	99.5108
13.	7	97.4253	97.2756	98.5422	100.5909	88.9728

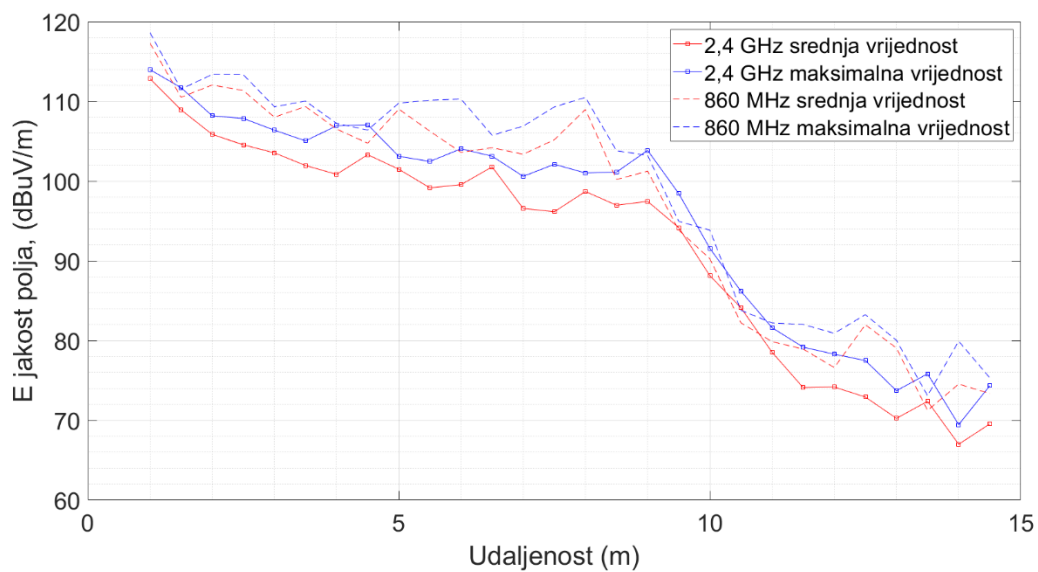
14.	7.5	94.9203	95.6297	91.5945	96.5328	102.1043
15.	8	98.0993	95.2784	99.2827	101.0179	99.7838
16.	8.5	95.8129	101.1301	93.6824	94.4577	99.7633
17.	9	102.6944	88.1119	90.8211	101.7918	103.8493
18.	9.5	95.9346	91.9402	91.5681	98.434	92.949
19.	10	87.3781	86.0523	84.5901	91.1121	91.5681
20.	10.5	86.1852	85.4959	82.4098	81.4667	84.9631
21.	11	78.794	74.6335	81.6138	77.1434	80.5166
22.	11.5	75.2619	71.2379	72.7998	72.0201	79.1737
23.	12	78.291	71.8025	74.3302	77.2863	69.1658
24.	12.5	71.1	77.4962	72.5061	70.0423	73.4474
25.	13	70.0739	71.5615	73.7139	65.2293	70.6465
26.	13.5	72.2347	70.8226	70.247	72.784	75.8261
27.	14	68.8388	60.7719	66.8873	69.4487	69.03
28.	14.5	68.6617	70.6301	74.3346	68.5033	65.5879

Također kao i na frekvenciji 860 MHz i u ovim mjerenjima vidljiv je sličan trend pada jakosti električnog polja kako se prijemna antena udaljava od odašiljačke. Na frekvenciji 2,4 GHz uočljiv je veći pad na pozicijama gdje se ulazi u hodnik broj 2, što je i očekivano zbog većeg utjecaja prepreke na val na višoj frekvenciji. Kod pozicije 21. i onih nakon nje prema tablici 4.3 vidi se veći pad jakosti polja jer signal ove frekvencije ima veće gubitke, te je manji utjecaj reflektiranih valova na ukupnu jakost polja.

Slika 4.13 prikazuju promjenu jakosti električnog polja s promjenom pozicije prijemne antene za svih pet pozicija na određenoj udaljenosti od odašiljačke antene za 2,4 GHz. Na slici 4.14 prikazane su srednje i maksimalne izmjerene vrijednosti na određenoj udaljenosti prijemne antene od odašiljačke za 860 MHz i 2,4 GHz. Može se vidjeti da maksimalne i srednje vrijednosti jakosti polja izmjerene na 2,4 GHz su za većinu točaka oko 4-5 dB manje od onih na frekvenciji 860 MHz, ali da je isti trend pad jakosti polja sa udaljenosti na obje frekvencije.



Slika 4.13 Prikaz svih mjerenja promjene jakosti polja E u ovisnosti o udaljenosti antena, 2,4 GHz



Slika 4.14 Prikaz srednjih i maksimalnih vrijednosti polja na svim mjerenim udaljenostima na 2,4 GHz i usporedba s rezultatima na 860 MHz

4.3 Mjerenja u vinskom podrumu u Kamencu

Uz mjerenja provedena u podrumu fakulteta, napravljena su i ona u podrumu vinarije Horvat. Vinarija Horvat smještena je u Baranji, u selu Kamenac. Za razliku od podruma fakulteta, u podrumu vinarije je bio prisutan veći broj bačvi od inoxa.



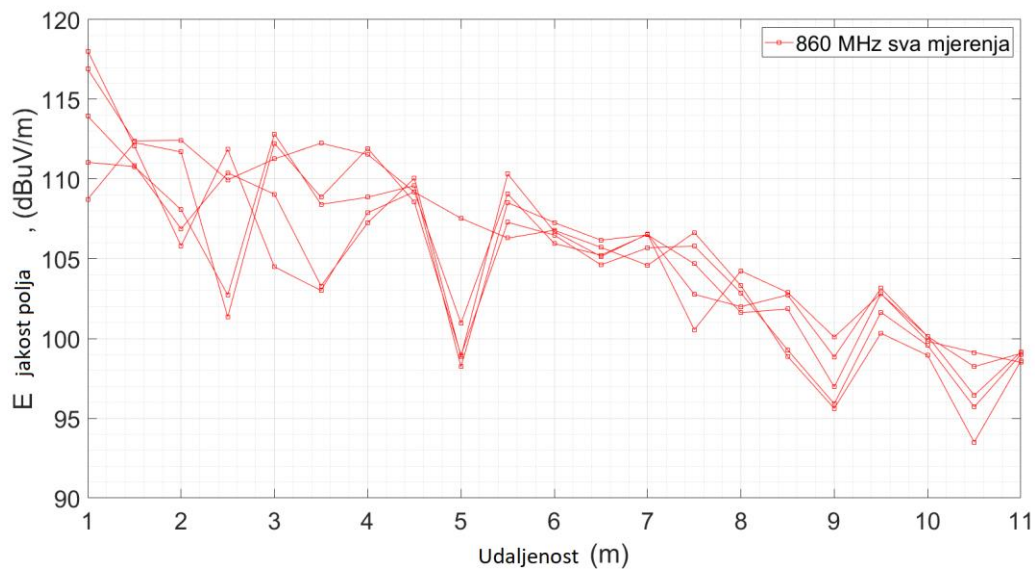
Slika 4.15 Vinarija Horvat, Kamenac

Dimenzije podruma slične su onime na fakultetu. U podrumu vinarije, kako je prikazano i na slici, postoji samo jedan hodnik (nema vertikalnog kao kod podruma fakulteta). Izmjerena vlažnost prije mjerenja iznosila je 78,3%, dok je temperatura u podrumu bila 18,7 °C. U vinariji su provedena mjerenja na frekvencijama 860 MHz i 2,4 GHz. U pokusu uzeto je 21 točka s korakom 0,5 m na kojima su se odradila mjerenja jakosti električnog polja, na svakoj točki u

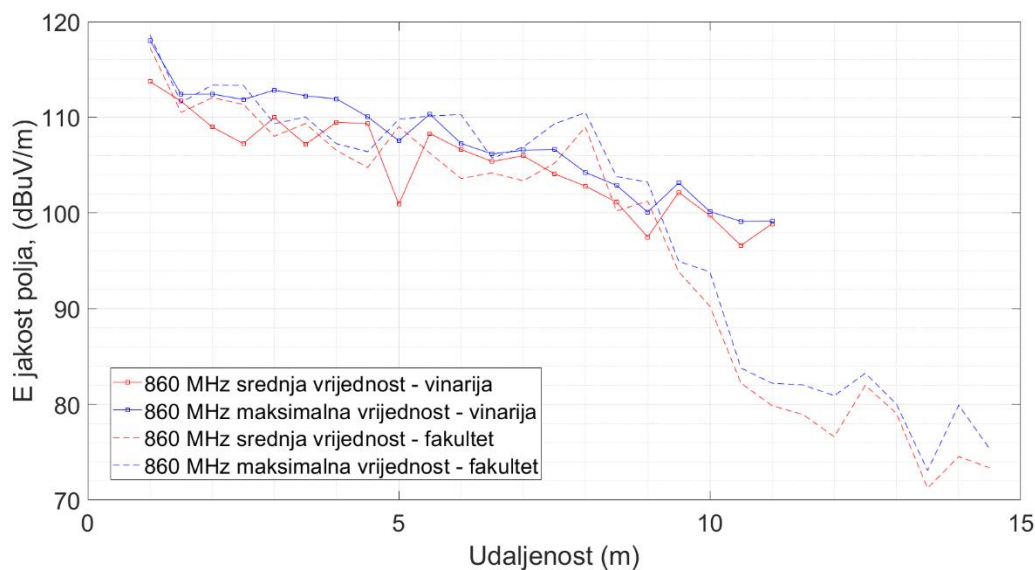
vertikalnom smjeru prijemna antena je pomaknuta 3 cm i 6 cm na lijevu i desnu stranu od središnje pozicije što znači da je na svakoj od 11 točaka odrađeno po 5 mjerenja. Početna udaljenost od odašiljačke antene Tx bila je 1 m. Obje antene postavljene su na visinu 1,5 m kao i u mjerenjima odrađenima u podrumu fakulteta. U tablici 4.4 i slici 4.16 prikazani su rezultati mjerenja na 860 MHz u podrumu vinarije Horvat, a na slici 4.17 maksimalne i srednje vrijednosti izmjerene na 860 MHz u podrumu fakulteta i vinariji Horvat.

Tablica 4.4 Rezultati mjerenja s frekvencijom 860 MHz u vinariji

Mjerna točka	Udaljenost od Tx (m)	E1 (6 cm uljevo)	E2 (3 cm uljevo)	E3	E4 (3 cm udesno)	E5 (6 cm udesno)
1.	1	116.89	108.74	111.05	113.94	118.03
2.	1.5	112.39	112.29	110.78	110.86	112.06
3.	2	112.43	111.7	108.08	106.88	105.81
4.	2.5	109.95	101.36	102.73	110.39	111.86
5.	3	111.26	112.24	112.83	109.05	104.5
6.	3.5	112.25	108.86	108.41	103.3	103.01
7.	4	111.54	111.92	108.86	107.26	107.89
8.	4.5	109.19	108.56	109.59	110.05	109.21
9.	5	107.54	98.95	98.23	98.86	100.96
10.	5.5	106.3	107.29	108.52	110.32	109.07
11.	6	106.79	106.49	107.27	106.7	105.96
12.	6.5	105.72	104.62	106.17	105.15	105.23
13.	7	104.59	105.69	106.5	106.55	106.53
14.	7.5	106.65	105.8	104.69	102.77	100.55
15.	8	103.31	102.85	101.62	102	104.24
16.	8.5	98.88	99.29	101.86	102.73	102.89
17.	9	95.62	95.91	96.97	98.85	100.09
18.	9.5	100.33	101.65	102.8	103.15	102.82
19.	10	98.95	99.57	100.15	100.14	99.83
20.	10.5	93.5	95.71	96.44	98.24	99.13
21.	11	98.6	99	99.16	99.07	98.51



Slika 4.16 Prikaz rezultata svih mjerenja u vinariji, 860 MHz



Slika 4.17 Prikaz rezultata srednjih i maksimalnih vrijednosti mjerenja u vinariji na 860 MHz i usporedba s rezultatima izmjerenim u podrumu fakulteta na 860 MHz

Prema rezultatima navedenim u tablici 4.4 i slikama 4.16 i 4.17 primjeti se da rezultati nemaju toliki raspon kao rezultati onih mjerenja u podrumu fakulteta, odnosno razlika maksimalnih i minimalnih vrijednosti su manje. Ipak kod mjerenja u podrumu vinarije dolazi do većih fluktacija rezultata na različitim vertikalnim pozicijama (3 i 6 cm uljevo ili udesno), što ukazuje na to da bačve od inoxa imaju utjecaj na refleksiju i difrakciju vala u prostoru. U podrumu vinarije istaknutiji je efekt valovoda (manja razlika rezultata), odnosno manje je rasipanje

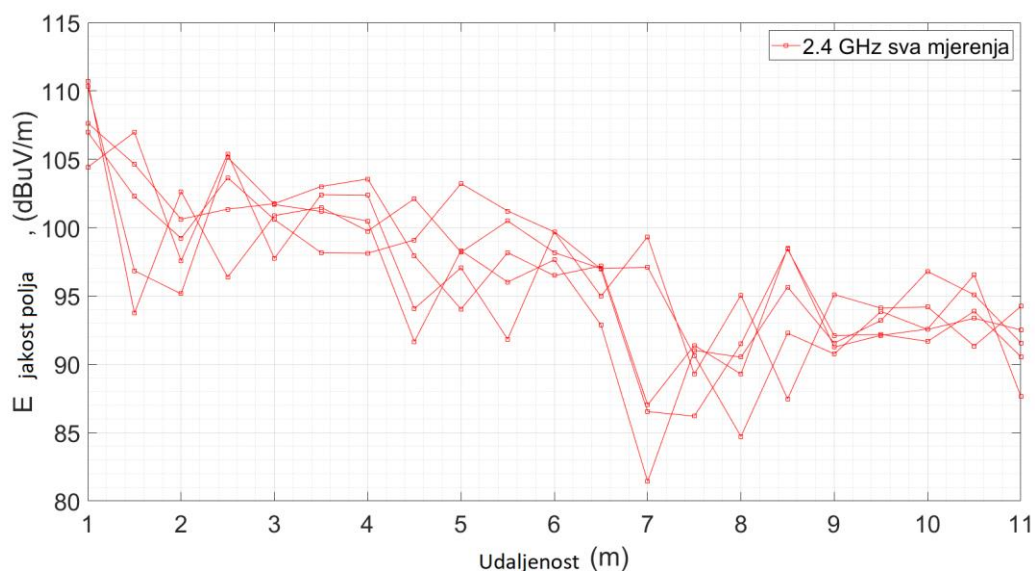
jakosti električnog polja u prostoru. Slika 4.17 prikazuje usporedbu rezultata mjerenih u vinariji i onih izmjerenih u podrumu fakulteta. Primjetan je sličan iznos polja na istim udaljenostima prijemne antene od odašiljačke. Međutim do većeg pada vrijednosti jakosti polja dolazi u mjerenjima provedenim u podrumu fakulteta jer na okvirnoj udaljenosti 10 m prijemna antena je već u hodniku broj 2 i nema radiooptičku vidljivost s odašiljačem pa dolazi do većih gubitaka.

Nakon mjerenja na 860 MHz, u podrumu vinairje Horvat odrađena su i mjerenja na frekvenciji 2,4 GHz. Kao što je i teoretski opisano manji iznosi jakosti električnog polja dobijaju se za val na višoj frekvenciji. Razlog tome je manja valna duljina elektromagnetskog vala, samim time objekti u podrumu imaju veći utjecaj na propagaciju vala. Rezultati mjerenja dani su u tablici 4. 5 te na slikama 4.18 i 4.19.

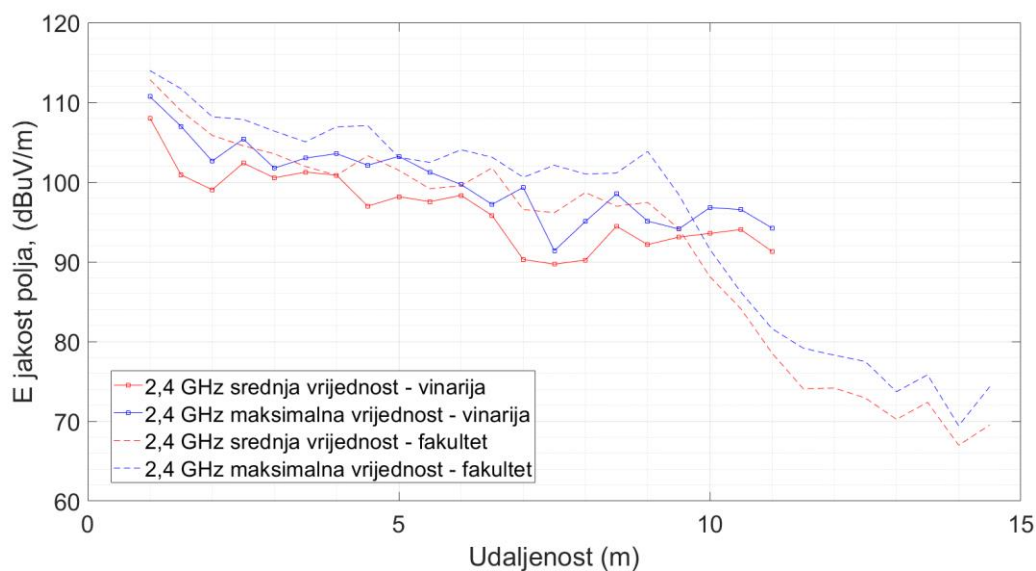
Tablica 4.5 Rezultati mjerenja s frekvencijom 2.4 GHz u vinariji

Mjerna točka	Udaljenost od Tx (m)	E1 (6 cm uljevo)	E2 (3 cm uljevo)	E3	E4 (3 cm udesno)	E5 (6 cm udesno)
1.	1	110.32	104.43	107.65	110.71	106.99
2.	1.5	96.85	106.98	104.64	93.74	102.28
3.	2	95.16	97.57	100.62	102.64	99.22
4.	2.5	105.13	105.4	101.35	96.38	103.65
5.	3	101.69	97.75	101.75	100.88	100.59
6.	3.5	101.18	102.41	103.01	101.49	98.17
7.	4	100.47	102.38	103.56	99.75	98.13
8.	4.5	91.66	94.07	97.95	102.11	99.1
9.	5	98.32	97.06	94.04	98.2	103.22
10.	5.5	96.02	91.84	98.17	100.49	101.22
11.	6	97.64	99.7	96.49	98.18	99.68
12.	6.5	92.88	96.97	97.2	97	94.98
13.	7	81.43	86.54	87.03	97.11	99.33
14.	7.5	91.02	86.21	91.39	90.64	89.28
15.	8	90.52	91.49	89.29	84.72	95.06
16.	8.5	95.66	98.42	98.51	92.28	87.46
17.	9	91.56	92.1	91.26	90.76	95.11

18.	9.5	93.2	92.19	92.12	93.87	94.11
19.	10	96.8	91.68	92.58	92.55	94.2
20.	10.5	95.09	93.88	96.55	93.37	91.34
21.	11	91.57	90.56	87.65	92.52	94.24



Slika 4.18 Prikaz rezultata svih mjerenja u vinariji, 2.4 GHz

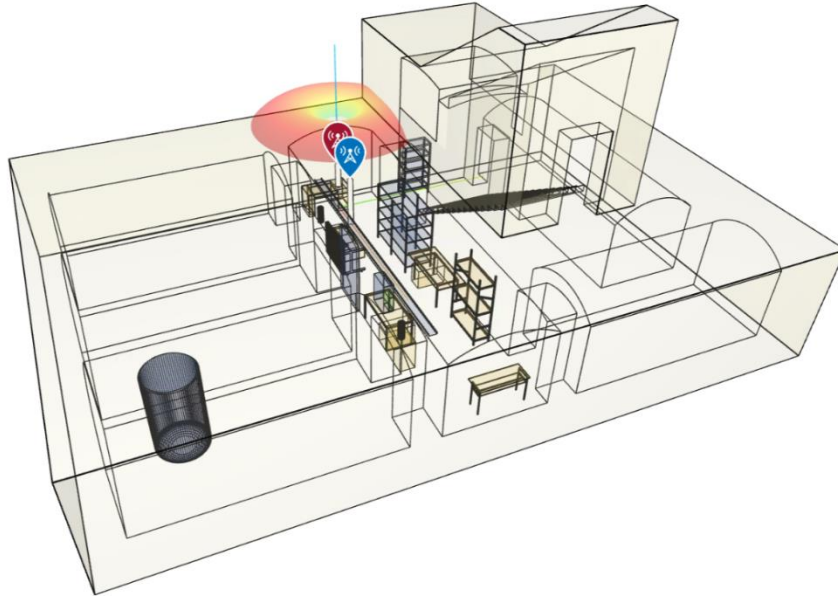


Slika 4.19 Prikaz rezultata srednjih i maksimalnih vrijednosti mjerenja u vinariji na 2.4 GHz i usporedba s rezultatima izmjerenim u podrumu fakulteta na istoj frekvenciji

Iz priloženih slika primjete se niže vrijednosti jakosti polja izmjerenih u vinariji. Uzrok tomu je veći broj prepreka i drugačiji materijali i dimenzije. Kao i kod frekvencije 860 MHz rezultati izmjereni u podrumu fakulteta više opadaju na poziciji 10m pa nadalje zbog ulaska u hodnik 2. Uspoređujući rezultate mjerene samo u vinariji na 2,4 GHz i 860 MHz primjeti se veća varijacija u rezultatima i općenito niži iznosi jakosti električnog polja kod više frekvencije. To je i očekivano zbog manje valne duljine takvog vala i veće osjetljivosti na prepreke i mehanizme koji utječu na samu propagaciju vala.

4.4 Rezultati simulacije

Proračuni jakosti električnog polja važni su kod projektiranja sustava te u analizi određenih značajki propagacije radio vala kada mjerenja nisu moguća ili zahtjevaju previše resursa. Da bi rezultati simulacije bili korisni, mora se primijeniti odgovarajuća metoda (kako je opisano u 2. poglavlju), a potrebno je i dovoljno podataka u okruženju u kojem se val propagira kako bi se što bolje simulirali realni uvjeti. U ovom je radu proračun jakosti električnog polja napravljen u programu MATLAB, verziji 2023b, pomoću metode praćenja zrake. Napravljena je simulacija propagacije vala u podrumu fakulteta, tako da je korišten 3D model podruma (slika 4.20). Na napravljen model u kodu postavljaju se parametri kao i kod fizičkih mjerenja, a to su udaljenost prijemne i odašiljačke antene, visine antena, korak kretanja prijemne antene i njena pozicija. Rezultati dobiveni simulacijom uspoređeni su s izmjerenim vrijednostima s ciljem utvrđivanja parametara metode koji daju rezultate simulacije najbliže mjerenjima.

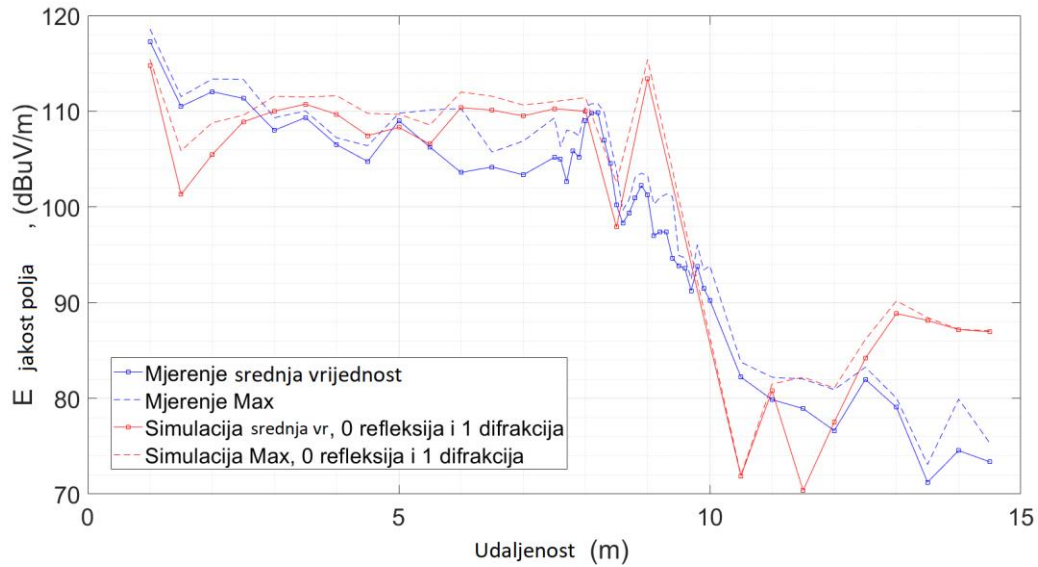


Slika 4.20 Model podruma fakulteta i antena

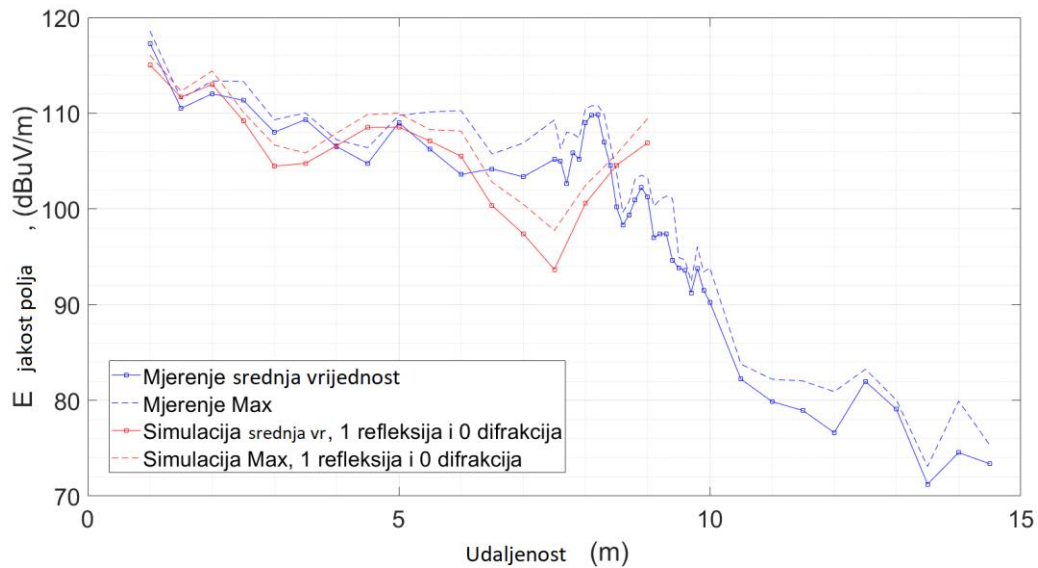
Na slici 4.20 crvenom oznakom prikazana je odašiljačka antena i plavom oznakom za metar udaljena od nje (početna pozicija obje) prijemna antena. Prijemna antena se nadalje premješta po hodniku 1 prema gledatelju, zatim u vertikalni hodnik – na desnu stranu. U oba slučaja, horizontalnom i vertikalnom hodniku, prijemna antena se pomicala lijevo i desno za 3 i 6 cm. U simulaciji su se mijenjali određeni parametri metode praćenja zrake da se vidi koji se rezultati najviše podudaraju s onim izmjerenima. U parametrima metode praćenja zrake mijenjao se maksimalan broj refleksija i maksimalan broj difrakcija koje program uzima u obzir kod proračuna. Izračena snaga odašiljačke antene bila je stalno postavljena na 0,008 W. Simulacije

s postavljenim brojem difrakcija jednakim 0 daju vrijednosti jakosti polja jednake nula u području s NLOS uvjetima pa ti rezultati nisu ni prikazani na slikama u prilogu 1.

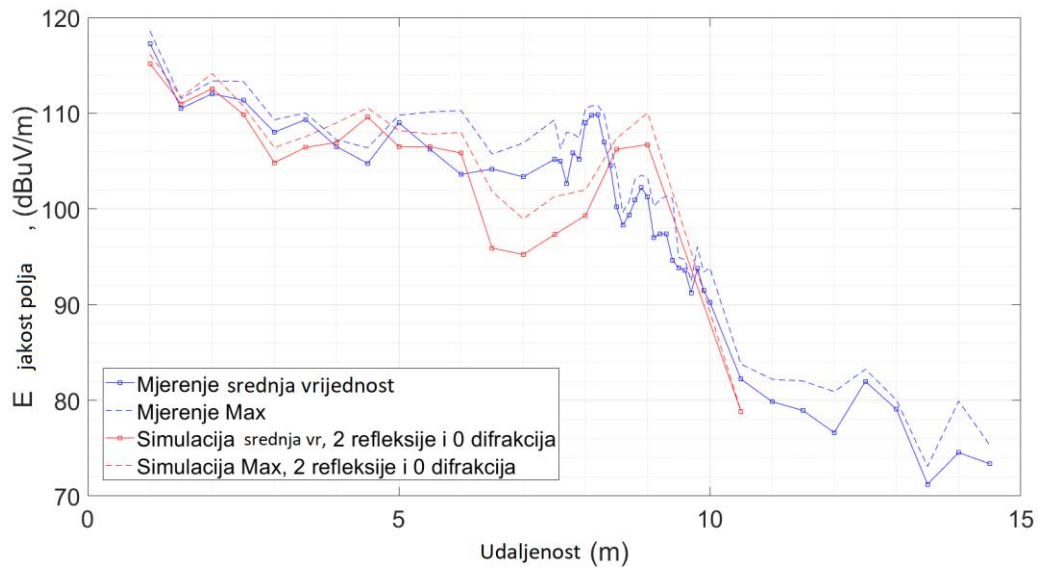
Slike 4.21 do 4.25 prikazuju usporedbu mjerenih vrijednosti i simulacija provedenih u podrumu fakulteta.



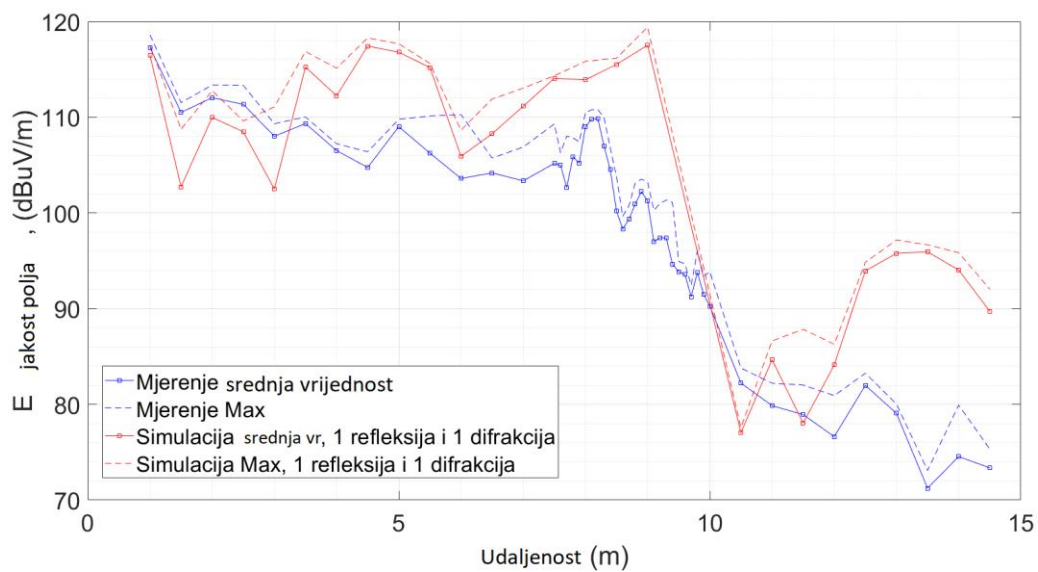
Slika 4.21 Prikaz rezultata simulacije na 860 MHz (0 refleksija i 1 difrakcija) i usporedba s mjerenjima



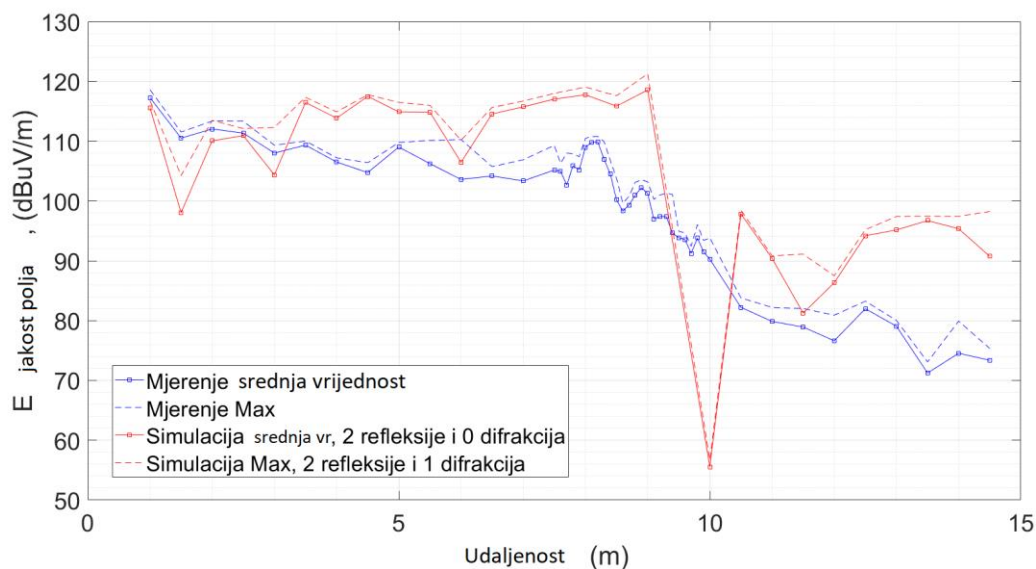
Slika 4.22 Prikaz rezultata simulacije na 860 MHz (1 refleksija i 0 difrakcija) i usporedba s mjerenjima



Slika 4.23 Prikaz rezultata simulacije na 860 MHz (2 refleksije i 0 difrakcija) i usporedba s mjerenjima



Slika 4.24 Prikaz rezultata simulacije na 860 MHz (1 refleksija i 1 difrakcija) i usporedba s mjerenjima



Slika 4.25 Prikaz rezultata simulacije na 860 MHz (2 refleksije i 1 difrakcija) i usporedba s mjerenjima

Usporedba rezultata dobivenih simulacijom i onih dobivenih mjerenjima napravljena je na temelju sljedeće tri mjere: sume razlika ovih rezultata (SR), sume njihovih apsolutnih razlika (SAR), te srednjim kvadratnim odstupanjem rezultata mjerenja i simulacija (RK). Usporedba je napravljena na srednjim i maksimalnim vrijednostima za pojedinu mjernu točku.

Sljedeće formule korištene su za proračun SR, SAR i RK.

1. Srednja razlika:

$$SR = \frac{1}{M} \sum_i (A_{MJi} - A_{SIMi}) \quad (4-1)$$

Gdje A_{MJ} predstavlja maksimalnu (ili srednju) vrijednost izmjerenih rezultata na mjernoj točki i , a A_{SIM} predstavlja maksimalnu (ili srednju) vrijednost rezultata dobivenih simulacijom na toj mjernoj točki. M je ukupan broj mjernih točaka.

2. Srednja apsolutna razlika:

$$SAR = \frac{1}{M} \sum_i |A_{MJi} - A_{SIMi}| \quad (4-2)$$

3. Srednje kvadratno odstupanje:

$$RK = \frac{1}{M} \sum_i (A_{Mji} - A_{SIMi})^2 \quad (4 - 3)$$

Ove usporedbe provedene su za rezultate svih simulacije (s različitim brojem postavljenih refleksija i difrakcija) i mjerenja. Rezultati ovih usporedbi prikazani su u tablici 4.6. Svaki red predstavlja rezultate usporedbe za različite parametre simulacije, gdje R predstavlja maksimalni broj refleksija, a D maksimalni broj difrakcija postavljen u programu za primjenu metode praćenja zrake.

Tablica 4.6 Usporedba rezultata mjerenja i simulacija s korakom 0,5 m na temelju srednje razlike, srednje apsolutne razlike i razlike kvadrata, 860 MHz

Parametri simulacije	SR		SAR		RK	
	maks.	srednje	maks.	srednje	maks.	srednje
R=1, D=0	1.828	1.402	3.522	3.615	20.794	21.670
R=2, D=0	1.812	1.618	3.729	3.875	19.982	23.795
R=1, D=1	-6.83	-6.813	8.062	8.744	98.280	113.377
R=2, D=1	-7.274	-7.268	10.798	11.334	181.9711	186.542
R=0, D=1	-2.030	-2.349	4.540	5.628	38.488	52.930

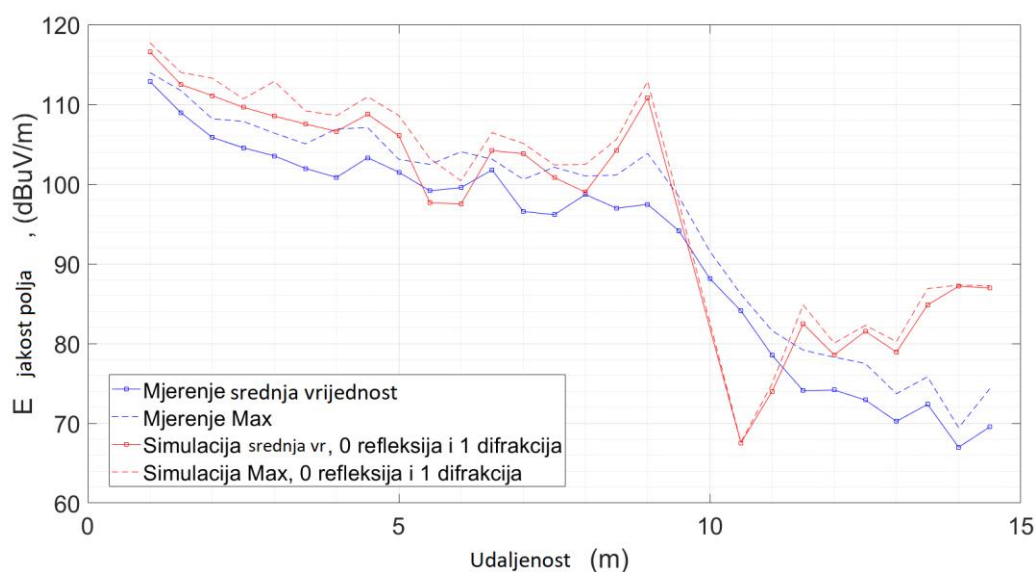
Kod koraka razmaka 0,1 m na nekim pozicijama u području NLOS uvjeta) rezultati simulacije su jednaki 0, tj. $-\infty$ iskazano u $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, pri čemu simulacija daje taj rezultat u slučaju kad je broj difrakcija nula do mjerne točke. Takvi rezultati dobiveni su kod simulacije sa 1 refleksijom i 1 difrakcijom i kod simulacije s 2 refleksije i 0 difrakcija. Tablice u Prilogu 2 prikazuju rezultate svih mjerenja, a tablica 4.7 prikazuje usporedbu rezultata mjerenja i simulacija s korakom 0,1 m na temelju srednje razlike, srednje apsolutne razlike i srednje kvadratne razlike. Zbog gore navedenih razloga ovdje nisu prikazani rezultati usporedbe za simulacije s R=1 i D=1, te s R=2 i D=0.

Tablica 4.7 Usporedba rezultata mjerenja i simulacija s korakom 0,1 m na temelju srednje razlike, srednje apsolutne razlike i razlike kvadrata

Parametri simulacije	SR		SAR		RK	
	maks.	srednje	maks.	maks.	srednje	maks.
R=1, D=0	13.641	12.769	13.642	12.769	196.285	177.273
R=2, D=1	8.891	10.925	8.891	10.9259	91.361	132.989
R=0, D=1	19.719	17.530	19.719	17.530	401.329	320.496

Usporedbom rezultata mjerenja i simulacije na 860 MHz može se zaključiti da su u LOS uvjetima simulacije s R=1 i D=0, te s R=2 i D=0 imale rezultate najbliže onim izmjerenim u hodniku 2, s NLOS uvjetima rezultate najbliže izmjerenima imala je simulacija s R=2 i D=1.

Uz prethodno prikazane simulacije na frekvenciji 860 MHz, obrađene su i simulacije s 2,4 GHz u modelu podruma fakulteta. Te simulacije mjerenja obrađene su s korakom 0,5 m i sa različitim brojem refleksija i difrakcija kao i one simulacije s frekvencijom 860 MHz. Na slici 4.26 prikazani su rezultati simulacije za R=0 i D=1 i rezultati mjerenja za frekvenciju 2,4 GHz.



Slika 4.26 Rezultati mjerenja i simulacije na 0,5 m sa 0 refleksija i 1 difrakcijom, 2,4 GHz

Uspoređujući rezultate simulacije s frekvencijom 860 MHz i ovom s 2,4 GHz vidljiv je sličan trend rasta i pada jakosti polja u istim pozicijama. Na pozicijama udaljenosti oko 10 m obje simulacije daju rezultate jakosti polja -inf, a nakon toga u pravilu jakost opet raste kod obje frekvencije. Također je i kod ovih simulacija s frekvencijom 2,4 GHz proveden izračun srednje

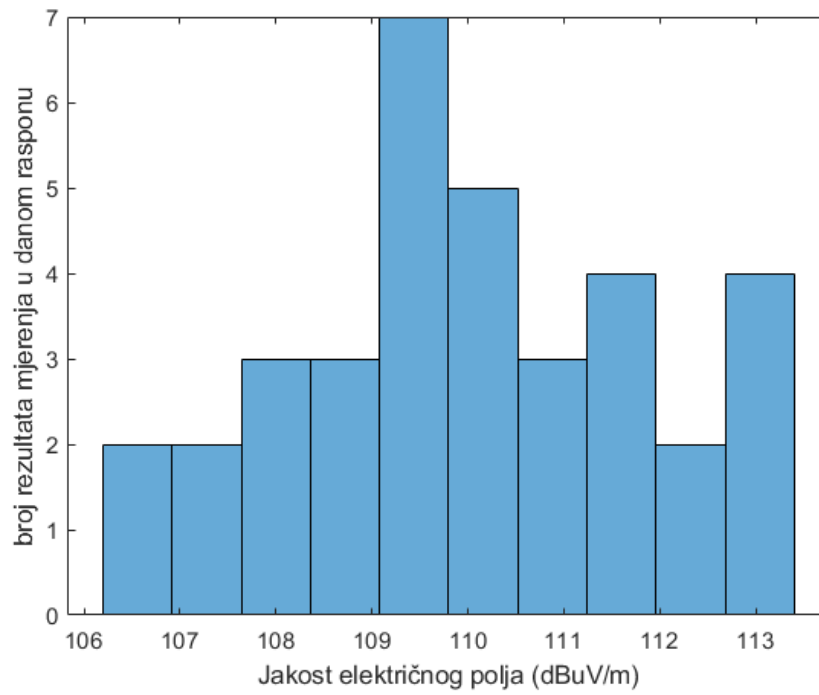
razlike, srednje apsolutne razlike i razlike kvadrata maksimalnih i srednjih vrijednosti dobivenih simulacijom i mjerenjem. Rezultati su dani u tablici 4.12.

Tablica 4.8 Usporedba rezultata mjerenja i simulacija s korakom 0,5 m na temelju srednje razlike, srednje apsolutne razlike i razlike kvadrata, 2,4 GHz

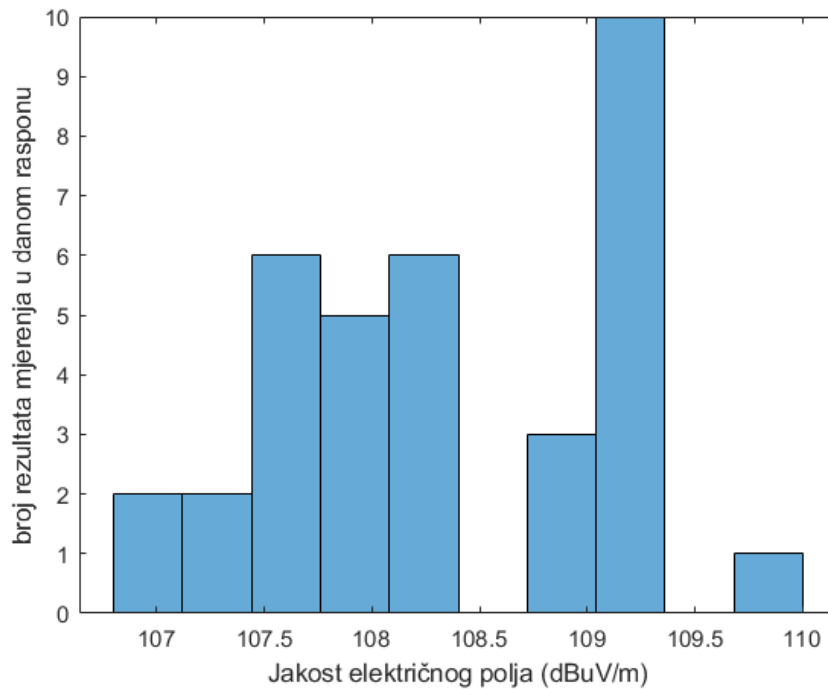
Parametri simulacije	SR		SAR		RK	
	Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave
R=1, D=0	-3.507	-5.180	3.507422	5.179666	12.30201	26.82894
R=2, D=0	-4.371	-5.755	4.370781	5.755138	19.10373	33.12161
R=1, D=1	-8.742	-9.839	8.741734	9.838622	76.41791	96.79848
R=2, D=1	-4.041	-4.984	4.041224	4.984075	16.33149	24.841
R=0, D=1	-8.036	-8.559	8.036264	8.559422	64.58153	73.26371

Iz usporedbe ovih rezultata vidljivo je da su rezultati provedenih mjerenja na frekvenciji 2,4 GHz najbliži rezultatima simulacija R=1 i D=0 za maksimalne vrijednosti, a s R=2 i D=1 za srednje vrijednosti. Tek nešto veća odstupanja dobivena su za simulaciju s R=2 i D=0, međutim za dosta pozicija je rezultat simulacije bio -inf, pa ovaj set parametara nije primjeren za provedbu simulacija u danim uvjetima.

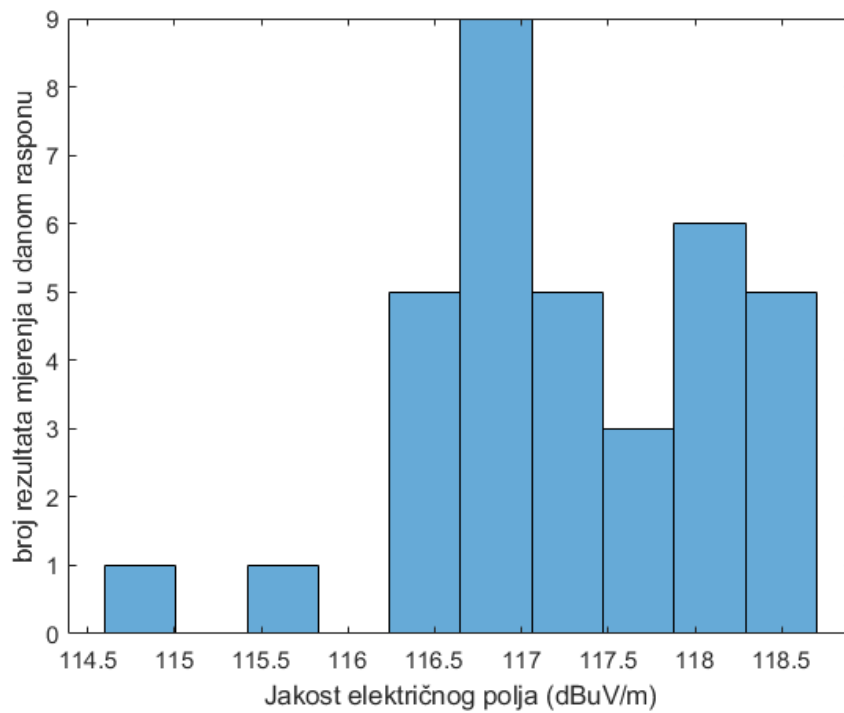
Treći set simulacija je obuhvatio proračune jakosti električnog polja na udaljenostima 5,25 m i 12,25 m od odašiljačke antene, na različitim visinama prijemne antene (141 cm, 144 cm, 147 cm, 150 cm, 153 cm, 156 cm i 159 cm) i različitim pozicijama (6 cm u lijevo i u desno s korakom 3 cm). Simulacija je napravljena za frekvenciju 860 MHz. Rezultati su dani u tablicama u Prilogu 3. Rezultati simulacije na udaljenosti 12,25 m od Tx s 0 difrakcija davali su rezultate -inf (broj difrakcija 0) stoga nisu prikazani tablično. Slike 4.27-4.34 prikazuju histograme rezultata simulacija za različiti broj difrakcija i refleksija. Iz navedenih histograma može se zaključiti kako su za udaljenost 5,25m rezultati simulacije najbliži izmjerenima za 0 refleksija i 1 difrakciju. Za udaljenost 12,25m niti jedna histogram rezultata simulacije nije sličan histogramu rezultata mjerenja, s tim da je prema rasponu vrijednosti (ali ne i prema izgledu histograma) najbliži histogram za 0 refleksija i 1 difrakciju kao i na 5,25 m.



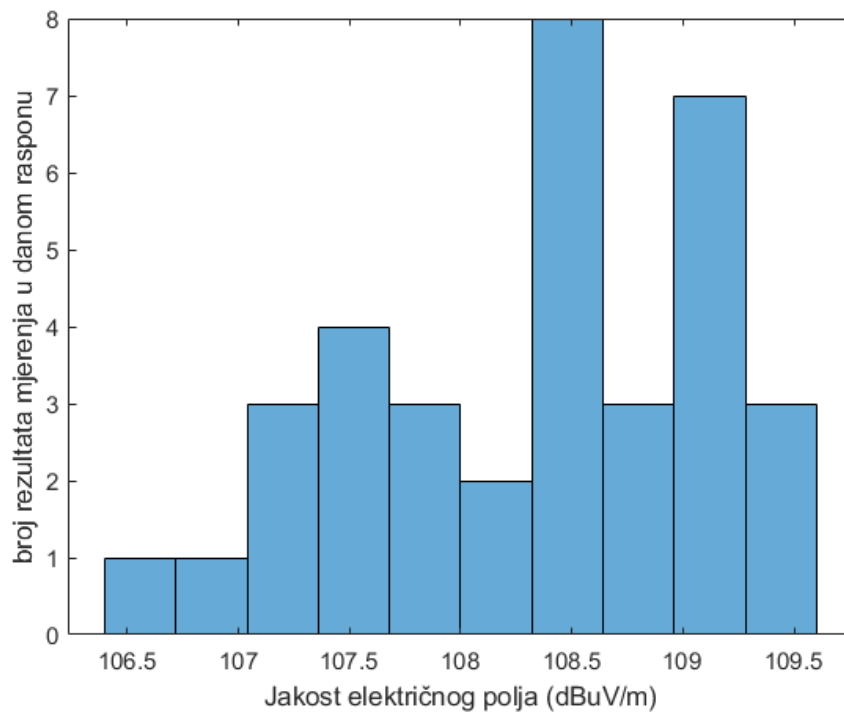
Slika 4.27 Histogram vrijednosti simulacije na udaljenosti 5,25m od Tx s 0 refleksija i 1 difrakcijom, 860 MHz



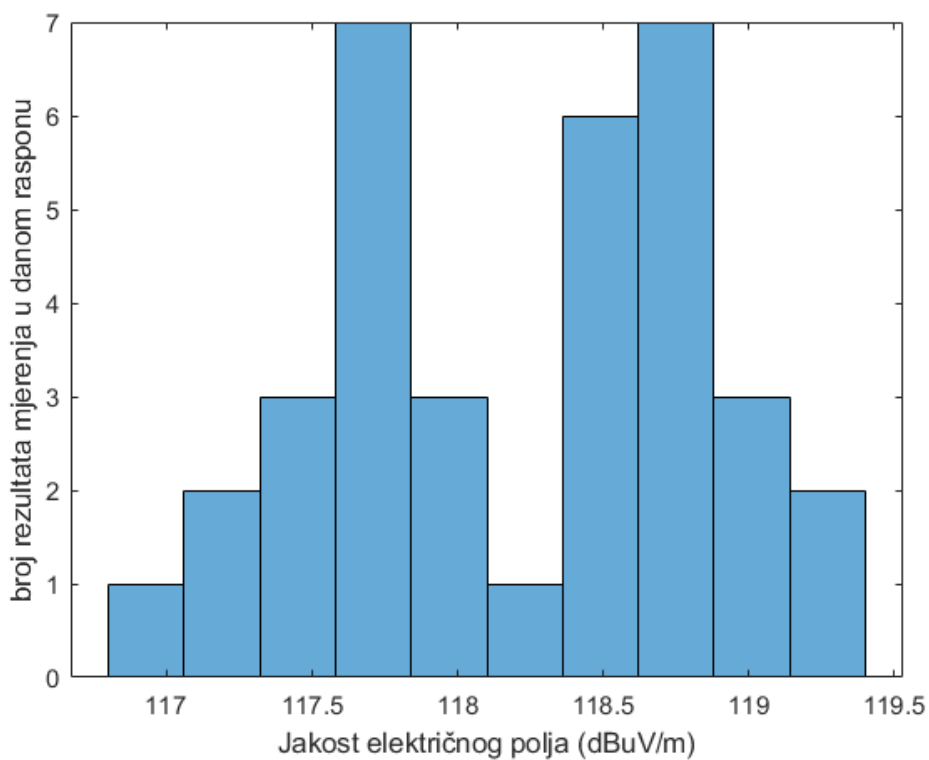
Slika 4.28 Histogram vrijednosti simulacije na udaljenosti 5,25m od Tx s 1 refleksijom i 0 difrakcija, 860 MHz



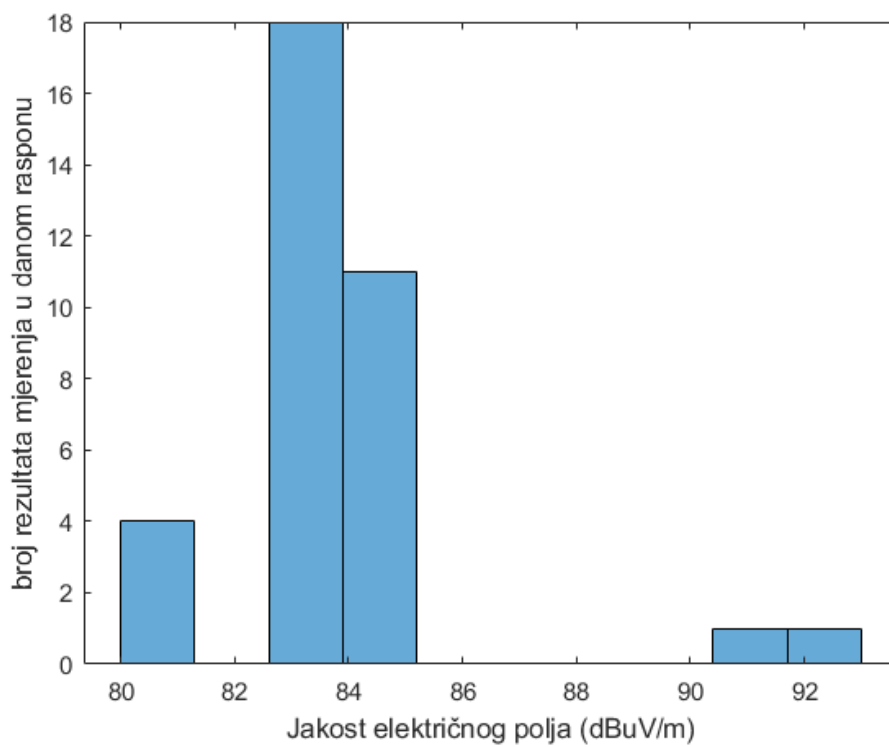
Slika 4.29 Histogram vrijednosti simulacije na udaljenosti 5,25m od Tx s 1 refleksijom i 1 difrakcijom, 860 MHz



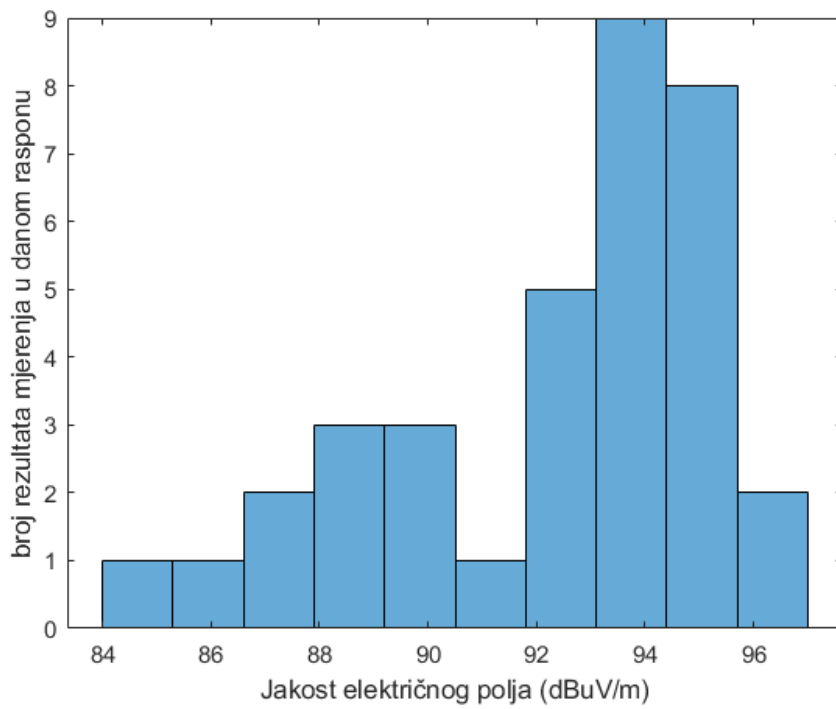
Slika 4.30 Histogram vrijednosti simulacije na udaljenosti 5,25m od Tx s 2 refleksije i 0 difrakcija, 860 MHz



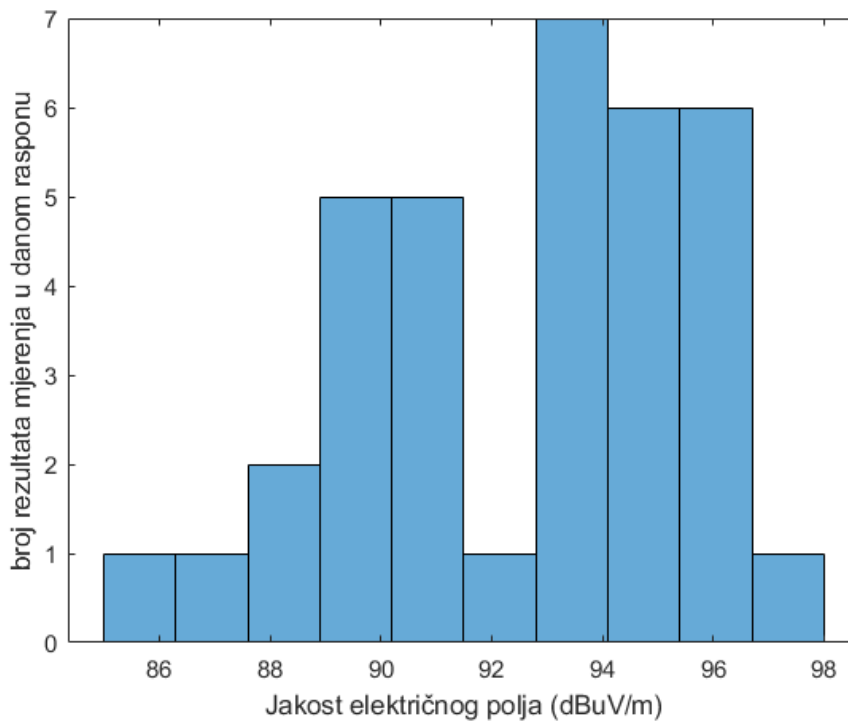
Slika 4.31 Histogram vrijednosti simulacije na udaljenosti 5,25m od Tx s 2 refleksije i 1 difrakcijom, 860 MHz



Slika 4.32 Histogram vrijednosti simulacije na udaljenosti 12,25m od Tx s 0 refleksija i 1 difrakcijom, 860 MHz



Slika 4.33 Histogram vrijednosti simulacije na udaljenosti 12,25m od Tx s 1 refleksijom i 1 difrakcijom, 860 MHz



Slika 4.34 Histogram vrijednosti simulacije na udaljenosti 12,25m od Tx s 2 refleksijE i 1 difrakcijom, 860 MHz

5. ZAKLJUČAK

Rezultati analize propagacije radiovalova ovise o specifičnim značajkama prostora unutar kojeg se provode mjerenja. U ovom diplomskom radu predstavljeni su rezultati mjerenja propagacije radiovalova unutar podruma primjenom MATLAB programa za simulaciju kao i provođenjem stvarnih fizičkih mjerenja. Specifične značajke koje odlikuju podrumne su posebna geometrija, debeli zidovi i visoka vlaga što značajno utječe na propagaciju valova. Propagacija valova unutar podruma može se modelirati kao u tunelima i podzemnim željezničkim stanicama, no dolazi do određenih odstupanja. Udaljenost prijelomne točke kraća je u podrumima te nakon prijelomne točke gubitci rastu brže nego kod propagacije u slobodnom prostoru. Uzrok tomu su brojni fizikalni uvjeti unutar takvog prostora od kojih se najviše ističu refleksija i difrakcija. Propagacija elektromagnetskog vala u velikoj mjeri se razlikuje od one propagacije u slobodnom prostoru.

Na temelju usporedbe rezultata mjerenja jakosti električnog polja u dva podruma slične geometrije uočeno je da gušenje EMV ima isti trend porasta s udaljenosti, iako se u drugom podrumu nalaze inox posude za vino. S druge strane, prisustvo ovih posuda doprinijelo je većem padu jakosti polja na nekim mjernim mjestima.

Osim mjerenja, provedene su i simulacije u MATLAB-u primjenom metode praćenja zrake. Za simulacije je mijenjan broj reflektiranih i difraktiranih zraka te su rezultati mjerenja u uspoređeni s rezultatima simulacije. Pokazalo se da je za LOS uvjete, za frekvenciju 860 MHz, rezultate najbliže izmjenjenim ima simulacija s 0 difrakcija i jednom ili dvije refleksije. Za NLOS uvjete simulacija s dvije refleksije i jednom difrakcijom je dala najbolje rezultate. Za frekvenciju 2,4 GHz simulacije s jednom refleksijom i nula difrakcija te s dvije refleksije i jednom difrakcijom su imale rezultate najbliže onim izmjenjenima. Iz navedenog se može zaključiti da je simulacija s dvije refleksije i jednom difrakcijom primjerena za NLOS uvjete, a za LOS uvjete se može primijeniti i simulacija samo s jednom refleksijom.

6. LITERATURA

- [1] J., Alonso, B., Izquierdo, J., Romeu, „Break Point Analysis and Modelling in Subway Tunnels“, u *2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, str. 3254–3258, Spain, 2009.
- [2] V., Erceg, A. J., Rustako, R. S., Roman, „Diffraction around corners and its effects on the microcell coverage area in urban and suburban environments at 900 MHz, 2 GHz, and 4 GHz“, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, izd. 3, sv. 43, str. 762–766, kol. 1994.
- [3] X., Zhang *i ostali*, „Measurements and Modeling of Large-Scale Channel Characteristics in Subway Tunnels at 1.8 and 5.8 GHz“, *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, izd. 3, sv. 22, str. 561–565, ožu. 2023.
- [4] S., Rimac-Drlje *i ostali*, „Propagation of Radio Waves in Wine Cellars“, u *2023 30th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, str. 1–5, Ohrid, North Macedonia, 2023.
- [5] E., Masson, P., Combeau, M., Berbineau, R., Vauzelle, Y., Pousset, „Radio Wave Propagation in Arched Cross Section Tunnels – Simulations and Measurements“, *JCM*, izd. 4, sv. 4, str. 276–283, svi. 2009.
- [6] „Rohde & Schwarz; R&S®TS-EMF Portable EMF Measurement System“, 2023.
- [7] A., Emslie, R., Lagace, P., Strong, „Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels“, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, izd. 2, sv. 23, str. 192–205, ožu. 1975.
- [8] S. K., Kalyankar, Y. H., Lee, Y. S., Meng, „Two-Slope Path Loss Model for Curved-Tunnel Environment With Concept of Break Point“, *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, izd. 12, sv. 22, str. 7850–7859, pros. 2021.
- [9] „What is Radio Spectrum? | US Department of Transportation“ [online]. Dostupno na: <https://www.transportation.gov/pnt/what-radio-spectrum>. [Pristupljeno: 13.10.2024.].
- [10] A. F., Molisch, *Wireless communications*, 2nd ed. Wiley : IEEE: Chichester, West Sussex, U.K, 2011.

SAŽETAK

U ovom radu opisani su mehanizmi propagacije elektromagnetskog vala s posebnim naglaskom na uvjete i čimbenike koji utječu na širenje valova u zatvorenim prostorima. Dan je pregled postojećih znanstvenih radova koji se bave propagacijom radio vala u podrumima i prostorima sličnim vinskih podrumima, kao što su tuneli. Praktični dio ovog rada sastoji se od mjerenja jakosti električnog polja u podrumu sličnih karakteristika vinskom podrumu, u prostorijama Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku te u vinskom podrumu u Kamencu. Mjerenja su provedena na različitim udaljenostima prijemne od odašiljačke antene, u uvjetima propagacije sa i bez direktne vidljivosti. Uz mjerenja odrađene su i simulacije u Matlab programskom okruženju, primjenom metode praćenja zrake. Simulacijama je napravljen proračun jakosti električnog polja u istim uvjetima u kojima je provedeno mjerenje (geometrija prostora, parametri odašiljačke i prijemne antene, položaji ispitivanih točaka), uz različit broj refleksija i difrakcija kako bi se utvrdio simulacijski model koji daje rezultate najbliže izmjerjenima.

Ključne riječi: propagacija radio vala, mehanizmi propagacije, unutarnji zatvoreni prostor, mjerenje jakosti električnog polja, simulacija metodom praćenja zrake

ABSTRACT

Analysis of radio signal propagation in indoor spaces with specific characteristics

This paper describes the mechanisms of electromagnetic wave propagation, with a particular emphasis on the conditions and factors that affect wave propagation in enclosed spaces. An overview is provided of existing scientific studies that deal with radio wave propagation in basements and spaces similar to wine cellars, such as tunnels. The practical part of this work consists of measuring the electric field strength in a basement with characteristics similar to a wine cellar, in the basement of the Faculty of Electrical Engineering, Computer Science, and Information Technology in Osijek, as well as in a wine cellar in Kamenac. Measurements were taken at various distances between the receiving and transmitting antennas, under conditions of propagation both with and without direct line of sight. In addition to the measurements, simulations were performed in the Matlab software environment using the ray-tracing method. The simulations calculated the electric field strength under the same conditions as the measurements (geometry of the space, parameters of the transmitting and receiving antennas, positions of the test points), with varying numbers of reflections and diffractions, to determine the simulation model that yields results closest to the measured values.

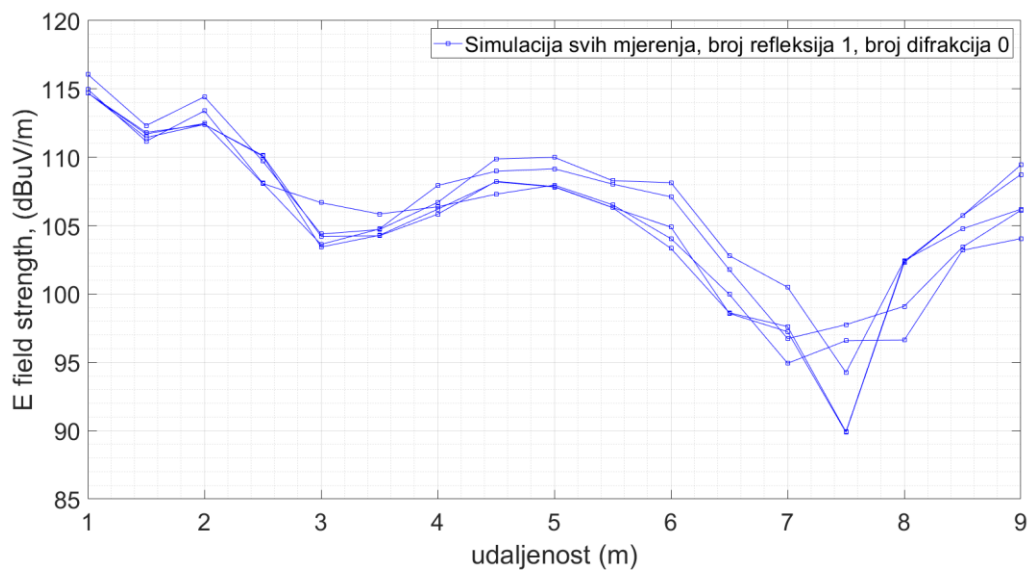
Keywords: radiowave propagation, propagation mechanisms, inside close space, measuring the strength of the electric field, ray tracing simulation

ŽIVOTOPIS

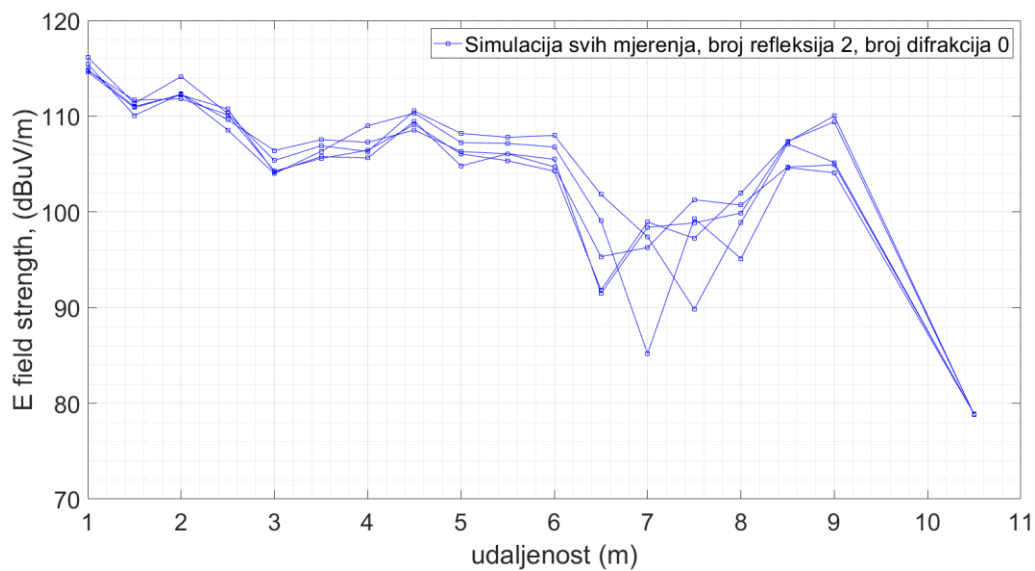
Ivan Vučina rođen je 1. studenog 2000. u Vinkovcima. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja u Privlaci – OŠ Stjepana Antolovića, upisuje Gimnaziju Matije Antuna Reljkovića u Vinkovcima. Opći gimnazijski program završava s vrlo dobrim uspjehom. 2019. godine upisuje Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnike i informacijskih tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Prijediplomski studij završava 2022. godine s temom završnog rada “Implementacija Arduino platforme pri eksperimentalnom određivanju viskoznosti fluida”, te iste godine upisuje Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnike, smjer Komunikacije i informatika, izborni blok Mrežne tehnologije. Stručnu praksu odradio je u Danieli Systec d.o.o. Aktivno koristi engleski jezik, te je napredni korisnik računalnih programa poput Visual Studia, MATLAB-a, MS Office-a, Siemens TIA-e i ostalih.

PRILOZI

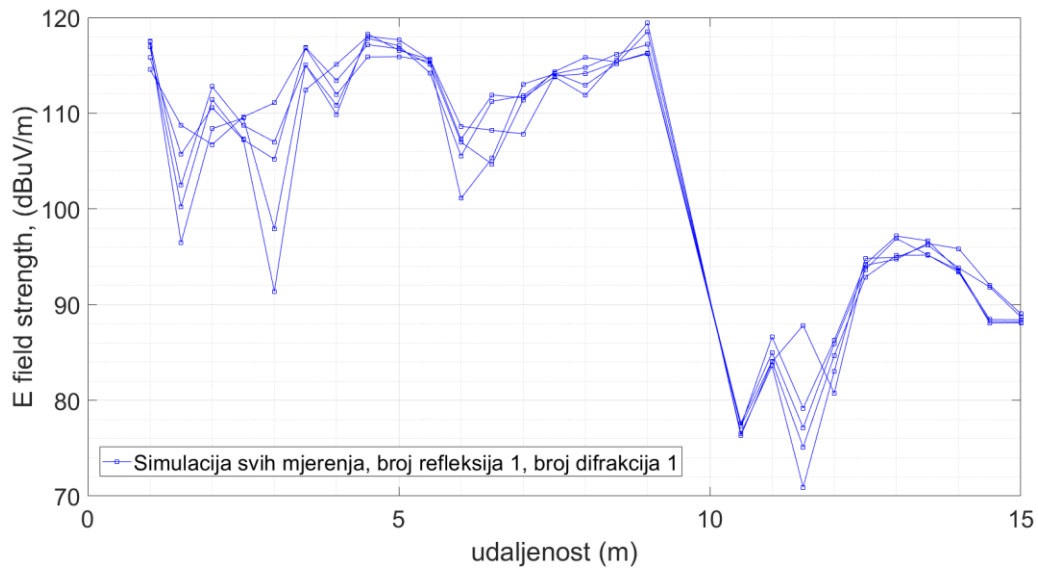
Prilog 1



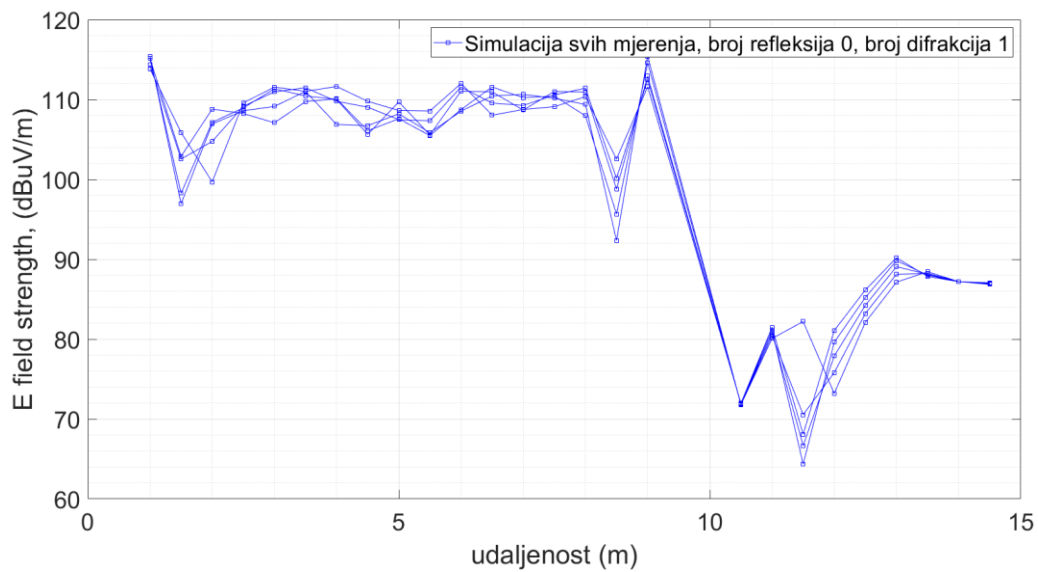
Slika P.1. 1 Rezultati simulacije za 1 refleksiju i 0 difrakcija na frekvenciji 860 MHz



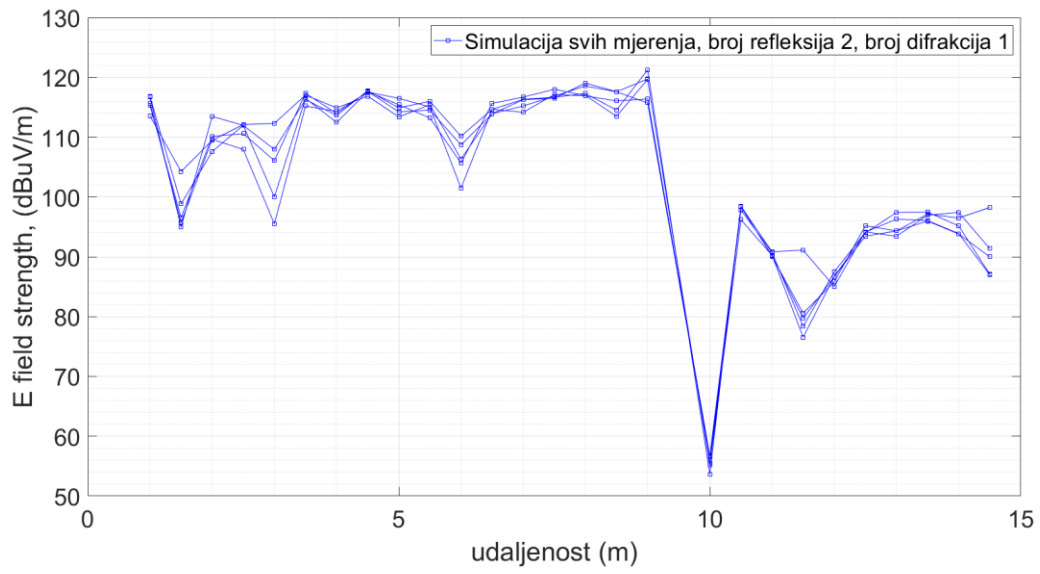
Slika P.1. 2 Rezultati simulacije za 2 refleksije i 0 difrakcija na frekvenciji 860 MHz



Slika P.1. 3 Rezultati simulacije za 1 refleksiju i 1 difrakciju na frekvenciji 860 MHz



Slika P.1. 4 Rezultati simulacije za 0 refleksija i 1 difrakciju na frekvenciji 860 MHz



Slika P.1. 5 Rezultati simulacije za 2 refleksije i 1 difrakciju na frekvenciji 860 MHz

Prilog 2

Tablica P.2. 1 Rezultati simulacije s korakom 0,1 m, s 1 refleksijom i 0 difrakcija

Udaljenosti od Tx (m)	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
7,5	95.84718	93.8389	93.5951	93.38303	93.54557
7,6	96.71716	93.30931	93.17761	93.11808	93.73794
7,7	96.51863	94.69622	94.54229	94.42407	94.30378
7,8	93.16442	90.56098	90.43283	90.34575	90.29352
7,9	94.93532	92.83996	92.74374	92.65567	92.64211
8	92.03106	91.83932	88.4451	88.24736	88.07993
8,1	93.56926	94.35523	92.27723	92.20556	92.18565
8,2	91.82101	92.87523	89.75444	89.91457	89.70894
8,3	91.98746	90.56998	90.40951	90.31746	90.31127
8,4	92.03148	91.79763	91.55602	91.34432	91.17941
8,5	89.03954	88.70857	88.42096	88.21386	88.10529
8,6	92.83117	92.60437	92.39683	92.22048	92.08957
8,7	88.66076	88.22769	87.81608	87.44756	87.15661
8,8	92.63402	92.40185	92.19606	92.03311	91.94534
8,9	90.29587	89.93764	89.60913	89.27584	88.97747

Tablica P.2. 2 Rezultati simulacije s korakom 0,1 m, s 0 refleksija i 1 difrakcijom

Udaljenosti od Tx (m)	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
7,5	87.11019	87.09505	87.09834	87.11748	87.15039
7,6	87.01459	87.02056	87.04145	87.07535	87.12075
7,7	86.94386	86.96635	87.00115	87.04688	87.10122
7,8	86.89218	86.92778	86.97378	87.02916	87.0781
7,9	86.85527	86.90149	86.95667	87.01008	87.06134
8	86.83	86.88496	86.94258	86.99378	87.04973
8,1	86.81404	86.87562	86.92675	86.9824	87.04242

8,2	86.8056	86.86027	86.91561	86.97512	87.03877
8,3	86.79433	86.84938	86.90838	86.97132	87.03831
8,4	86.78371	86.84222	86.90447	86.97056	87.04071
8,5	86.77664	86.83823	86.90346	86.97253	87.04372
8,6	86.77259	86.837	86.90504	86.977	87.05105
8,7	86.77117	86.83823	86.909	86.9819	87.06054
8,8	86.7721	86.84173	86.9152	86.99083	87.06179

Tablica P.2. 3 Rezultati simulacije s korakom 0,1 m, s 2 refleksije i 1 difrakcijom

Udaljenosti od Tx (m)	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
7,5	97.27616	94.96785	93.67352	93.67973	95.33099
7,6	98.57762	99.21731	95.57068	95.61415	95.29228
7,7	93.38728	96.28505	90.9149	91.09667	91.12648
7,8	97.22619	98.14604	94.35604	94.05204	94.1009
7,9	91.37202	98.24121	90.00276	86.99687	87.10246
8	95.66957	98.8785	95.58608	93.03347	92.89366
8,1	93.06269	95.20417	96.79798	89.32146	89.06587
8,2	94.8343	92.41422	98.22018	90.85634	91.87478
8,3	95.20921	93.25081	99.35073	91.48513	91.97355
8,4	94.30616	90.04302	97.36219	88.89932	90.48286
8,5	95.74596	94.75084	100.2199	93.15747	93.66452
8,6	91.45913	88.84208	95.98324	86.22666	87.97969
8,7	95.40118	94.04062	98.21387	92.72616	94.40971
8,8	88.97054	89.61753	96.3384	90.23412	87.50861

Prilog 3

Tablica P.3. 1 Rezultati simulacije na udaljenosti 5,25 m od Tx s 0 refleksija i 1 difrakcijom

Visina	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
141	106.5029	106.914	108.3579	108.1145	109.8937
144	107.1495	107.3181	108.7682	108.564	109.19
147	108.3198	109.1323	109.3907	110.2737	109.4489
150	108.7147	109.6782	110.1096	111.4144	110.3445
153	109.241	110.623	110.017	111.9981	112.793
156	111.1995	111.6568	112.5167	113.2806	111.3794
159	113.2121	113.3167	111.6765	110.7932	109.4019

Tablica P.3. 2 Rezultati simulacije na udaljenosti 5,25 m od Tx s 1 refleksijom i 1 difrakcijom

Visina	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
141	117.1908	117.5436	118.3649	118.4416	118.3585
144	116.6537	116.6221	117.6675	117.0325	116.8451
147	118.0274	118.1052	117.9428	116.7241	116.4693
150	117.9726	118.6939	118.6679	116.4693	116.9213
153	117.0201	118.1931	116.7022	116.507	116.9228
156	117.0166	118.1236	117.4033	117.5771	115.6156
159	116.5708	117.4061	117.3097	117.3442	114.8264

Tablica P.3. 3 Rezultati simulacije na udaljenosti 5,25 m od Tx s 2 refleksije i 0 difrakcija

Visina	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
141	109.535	109.1346	108.9769	108.5914	107.6131

144	109.4684	109.0112	109.5421	109.2447	108.1005
147	108.6045	108.3699	109.1394	108.8149	107.5535
150	107.2288	106.793	109.1856	107.8452	106.5866
153	108.3755	107.8313	108.9736	108.5014	107.2431
156	108.1271	107.5409	108.8886	108.3731	107.2802
159	108.5039	107.9633	108.8203	108.4815	107.6584

Tablica P.3. 4 Rezultati simulacije na udaljenosti 5,25 m od Tx s 2 refleksije i 1 difrakcijom

Visina	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
141	116.8136	117.606	117.7728	118.0525	119.2283
144	117.244	117.3474	118.0908	117.6305	118.5574
147	118.3701	118.8598	118.6473	117.5834	118.874
150	117.773	118.614	118.9543	117.0771	118.7471
153	117.8178	118.9676	117.5455	117.7564	118.7114
156	118.182	119.3469	118.3678	118.8802	117.975
159	118.4376	118.8734	118.3756	118.7742	117.5197

Tablica P.3. 5 Rezultati simulacije na udaljenosti 5,25 m od Tx s 1 refleksijom i 0 difrakcija

Visina	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
141	108.3152	108.3418	109.2299	109.0772	107.8262
144	108.224	108.2509	109.2925	109.1339	107.732
147	108.0925	108.1201	109.2871	109.1188	107.5833
150	107.9401	107.9685	109.9317	109.0534	107.4006
153	107.8086	107.8382	109.175	108.9764	107.2227
156	107.7045	107.7352	109.1178	108.9011	107.066
159	107.6464	107.6781	109.0817	108.8475	106.9549

Tablica P.3. 6 Rezultati simulacije na udaljenosti 12,25 m od Tx s 0 refleksija i 1 difrakcijom

Visina	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
141	80.44087	80.63706	80.8278	91.33694	81.19366
144	83.16478	83.46852	83.76525	84.05613	84.34226
147	83.16471	83.46845	83.76519	84.05607	92.57962
150	83.16469	83.46843	83.76517	84.05605	84.34217
153	83.16471	83.46845	83.76519	84.05607	84.34219
156	83.16478	83.46852	83.76526	84.05614	84.34226
159	83.1649	83.46863	83.76537	84.05625	84.34237

Tablica P.3. 7 Rezultati simulacije na udaljenosti 12,25 m od Tx s 1 refleksijom i 1 difrakcijom

Visina	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
141	86.15985	87.61656	87.97187	93.70381	84.91613
144	88.25878	89.43837	89.70491	89.03714	87.37481
147	90.36458	91.37674	92.96767	92.57427	96.08783
150	92.53387	93.3593	93.65093	93.29138	92.69767
153	92.27832	93.11804	94.40413	94.21697	93.68967
156	95.41377	95.29906	94.68081	94.38686	93.49495
159	94.51383	95.20573	95.4792	96.05893	95.28042

Tablica P.3. 8 Rezultati simulacije na udaljenosti 12,25 m od Tx s 2 refleksije i 1 difrakcijom

Visina	6 cm lijevo	3 cm lijevo	Srednja pozicija	3 cm desno	6 cm desno
141	85.84567	88.30912	89.39988	95.01516	87.39695
144	88.81692	90.30021	90.83658	90.9677	89.28858
147	89.83107	91.2808	93.07057	93.50243	96.27732
150	90.01083	92.31017	93.35669	93.66764	92.95082
153	89.21039	91.49584	93.91562	94.4514	93.18182

156	94.91218	95.41244	95.37074	95.62198	94.3261
159	95.04252	95.64877	95.98454	97.06026	96.38481