

DETERMINISTIČKO MODELOVANJE RADIO KANALA ZA 6G OKRUŽENJA

Milica Đorđević¹, Nenad Jevtić²

¹Austrian Institute of Technology, milica.djordjevic@ait.ac.at

²Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, n.jevtic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Istraživanje i razvoj bežičnih sistema šeste generacije zahteva precizno i realistično modelovanje radio kanala. U urbanim sredinama, planirani prelazak na više frekvencijske opsege donosi nove izazove, jer propagacija signala postaje izrazito zavisna od geometrije i elektromagnetnih svojstava površina. Standardni statistički modeli često nisu dovoljni da precizno obuhvate efekte višestrukih putanja, refleksija, difrakcija i difuznog rasejanja, što otežava realističnu procenu performansi. U ovom radu prikazana je primena softvera Sionna za determinističko modelovanje radio kanala zasnovano na metodologiji praćenja zraka (ray tracing). Analizirani su ključni propagacioni mehanizmi na primeru jednog tipičnog urbanog okruženja. Simulacioni rezultati omogućavaju izdvajanje standardnih metrika fizičkog sloja i pokazuju da determinističko modelovanje daje jasnu i lokacijski specifičnu sliku ponašanja radio kanala u urbanoj sceni. Ovakav pristup može poslužiti za povezivanje teorijskih modela i praktičnih istraživanja, sa potencijalom za proširenje na dinamičke scenarije i eksperimentalnu validaciju u okviru 6G istraživanja.*

Ključne reči: *determinističko modelovanje, praćenje zraka, 6G radio kanal, urbano okruženje, Sionna*

1. Uvod

Kvalitet bežičnih komunikacionih sistema u velikoj meri zavisi od karakteristika okruženja u kojem se signal prostire. Precizan opis uslova prostiranja elektromagnetnih talasa je značajan za pouzdanost sistema, planiranje i optimizaciju bežičnih mreža, kao i za primenu u industriji i standardizaciji novih tehnologija. Modelovanje radio kanala predstavlja osnovni korak u istraživanju, razvoju i evaluaciji savremenih bežičnih komunikacionih tehnologija.

Razvoj modela radio kanala je povezan sa evolucijom generacija mobilnih komunikacionih sistema. U ranim fazama, kada su sistemi prve i druge generacije bili namenjeni prenosu govora, fokus istraživanja bio je na pokrivenosti i jačini signala. Kasnije, sa pojavom širokopojasnih sistema i povećanjem zahteva za brzinom prenosa, pažnja je usmerena na pojave višestrukih putanja (*multipath*) i vremensku disperziju signala. Tokom četvrte i pete generacije mobilnih sistema, uvedeni su geometrijski-stohastički modeli (*Geometry-Stochastic Channel Model, GSCM*) koji kombinuju

statističku prirodu višestrukih komponenti sa prostornom strukturom okruženja, obezbeđujući ravnotežu između tačnosti i složenosti. Ipak, sa prelaskom na više frekvencijske opsege, propagacija elektromagnetnih talasa postaje izuzetno osetljiva na fizičku strukturu i elektromagnetne karakteristike okruženja. Za razvoj šeste generacije mobilnih sistema, modeli zasnovani na statističkim aproksimacijama često nisu dovoljni da prikažu stvarne prostorne odnose između predajnika, prijemnika i okruženja. Zbog toga je potreban fizički utemeljen pristup koji omogućava detaljnu analizu interakcija signala u trodimenzionalnom prostoru. U tom kontekstu, determinističko modelovanje zasnovano na metodama praćenja zraka (*ray tracing*) postaje ključni alat za istraživanje i razumevanje radio kanala u budućim 6G (*Sixt Generation*) mrežama.

U ovom radu istražuje se primena Sionna *open-source* softvera za determinističko modelovanje radio kanala pomoću metoda praćenja zraka. Analiza je sprovedena na trodimenzionalnom modelu ulice Vojvode Stepe u Beogradu, kako bi se prikazali osnovni mehanizmi prostiranja elektromagnetnih talasa i procenile mogućnosti realističnog modelovanja u urbanim uslovima.

Rad je organizovan na sledeći način: nakon uvodnog dela, u drugom poglavlju predstavljene su teorijske osnove modelovanja radio kanala, zatim sledi opis osnovnih mehanizama propagacije, dok je u četvrtom poglavlju prikazana simulaciona analiza i rezultati dobijeni korišćenjem Sionna softvera. Zaključna razmatranja koja proizilaze iz istraživanja i sprovedenih simulacija data su u petom poglavlju.

2. Determinističko modelovanja radio kanala

Bežični kanal predstavlja fizički medijum kroz koji se elektromagnetni talasi prostiru između predajnika i prijemnika. On obuhvata sve procese koji utiču na prenos signala kroz prostor i određuje osnovne performanse komunikacionog sistema. Brzina prenosa, pouzdanost veze, propusni opseg i otpornost na degradaciju umnogome zavise od karakteristika kanala i od uslova okruženja. Zbog promenljivosti fizičkih uslova, ponašanje bežičnog kanala ne može se opisati jednostavnim analitičkim izrazima [1]. Geometrija prostora, elektromagnetne osobine materijala, položaj objekata i radna frekvencija sistema istovremeno utiču na način prostiranja signala. Kanal se zbog toga smatra složenim i nelinearnim sistemom, čije karakteristike variraju u vremenu i prostoru. Modelovanje kanala omogućava detaljnu analizu procesa prostiranja elektromagnetnih talasa i formira se tako da verno predstavi fizičke karakteristike okruženja i način na koji one utiču na prenos signala. Na osnovu toga moguće je proceniti gubitke, kašnjenja i promene faze signala i analizirati performanse sistema u različitim scenarijima. Razvijeni modeli kanala koriste se u istraživanju, planiranju mreža i standardizaciji jer omogućavaju optimizaciju fizičkog sloja, izbor antenskih konfiguracija i predviđanje pokrivenosti i kapaciteta sistema.

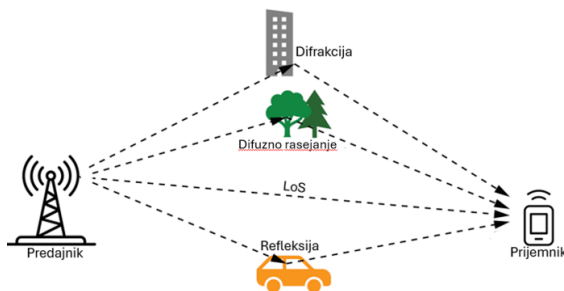
U zavisnosti od količine dostupnih informacija i nivoa fizičke tačnosti koji se želi postići, modeli bežičnih kanala najčešće se dele na statističke, geometrijski-stohastičke i determinističke [2]. Njihov izbor zavisi od cilja istraživanja i potrebnog balansa između realističnosti i računarske složenosti. Za razliku od statističkih i geometrijski-stohastičkih modela, koji se oslanjaju na verovatnoće raspodele, modeli koji se zasnivaju na fizičkim principima prostiranja elektromagnetnih talasa su deterministički. Ovaj pristup koristi zakone elektromagnetne teorije i tačne podatke o prostoru, čime se omogućava precizno računanje parametara kanala i postiže fizički veran prikaz propagacije signala. U osnovi determinističkih metoda nalaze se Maxwell-ove jednačine i granični uslovi koji opisuju interakciju talasa sa površinama i objektima u

prostoru. Zbog izuzetne računarske složenosti, u praksi se koriste njihove aproksimacije zasnovane na teoriji visokofrekventnog polja. U metodi praćenja zraka, talasni front se modeluje kao skup zraka koji se šire iz izvora i prate kroz interakcije sa površinama u sceni. Svaka interakcija može da rezultira refleksijom, difrakcijom ili rasejanjem signala, a doprinos svake putanje računa se prema Fresnel-ovim koeficijentima i geometrijskim odnosima između tačaka interakcije. Kombinovanjem doprinosa svih putanja dobija se ukupno elektromagnetno polje u tački prijema, koje omogućava analizu jačine signala, faze, kašnjenja i polarizacije.

Savremene implementacije determinističkih metoda koriste trodimenzionalne modele okruženja u formatu digitalnih mapa i objekata, kao što su OpenStreetMap, CityGML ili podaci dobijeni iz LiDAR-a. Razvoj GPU (*Graphics Processing Unit*) akceleracije i biblioteka kao što su CUDA, OptiX i Dr.Jit, omogućio je primenu metoda praćenja zraka i u složenim urbanim i industrijskim scenama koje obuhvataju veliki broj reflektujućih površina. Deterministički modeli omogućavaju detaljnu analizu pojedinačnih mehanizama propagacije, kao i prostornu vizualizaciju elektromagnetnog polja, što ih čini neophodnim alatom u savremenim istraživanjima radio sistema. Kombinovanjem ovih metoda sa tačnim podacima o materijalima i objektima, moguće je verno modelovati kompleksne scenarije i različita okruženja, što doprinosi efikasnijoj optimizaciji budućih bežičnih mreža.

3. Propagacija signala

Propagacija elektromagnetnih talasa u bežičnim komunikacionim sistemima odvija se u složenom i promenljivom okruženju. Signal se ne prostire isključivo pravolinijski od predajnika do prijemnika, već nailazi na različite prepreke, reflektujuće i difuzne površine, kao i na objekte koji menjaju pravac, fazu i intenzitet talasa. Kombinovano dejstvo ovih mehanizama dovodi do formiranja višestrukih propagacionih putanja, čije karakteristike direktno utiču na kašnjenje, jačinu i pouzdanost signala u prijemniku. Četiri osnovna mehanizma prostiranja elektromagnetnih talasa su direktna putanja (*Line-of-Sight*, LoS), refleksija, difrakcija i rasejanje [3] (slika 1).



Slika 1. Osnovni mehanizmi prostiranja elektromagnetnih talasa

Direktna putanja javlja se kada između predajnika i prijemnika ne postoji prepreka i kada je prostor između njih slobodan u okviru prve Fresnel-ove zone. U tom slučaju energija se širi kroz slobodan prostor i može se aproksimirati modelom slobodnog prostiranja, gde je jačina signala obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti između antena.

Refleksija nastaje kada elektromagnetni talas naiđe na površinu čije su dimenzije znatno veće od talasne dužine. Deo energije talasa se tada odbija nazad u prostor, a ugao refleksije jednak je uglu upada. Intenzitet reflektovanog talasa zavisi od frekvencije, polarizacije i kompleksne permitivnosti materijala. Na nižim frekvencijama refleksija predstavlja jedan od dominantnih mehanizama prostiranja, dok na višim frekvencijama postaje osetljivija na mikrostrukturu površine i hrapavost materijala.

Do difrakcije dolazi kada talas naiđe na ivicu ili prepreku iza koje ne bi trebalo da se prostire prema zakonima geometrijske optike. Zbog talasne prirode elektromagnetnog polja, deo energije se savija oko ivica i dopire do područja bez direktne vidljivosti. Difrakcija omogućava održavanje veze i u uslovima delimične okluzije, ali uz značajan pad jačine signala. Efekat difrakcije zavisi od talasne dužine i dimenzija prepreke i postaje sve slabiji pri prelasku na više frekvencije, gde prepreke efikasnije blokiraju signal.

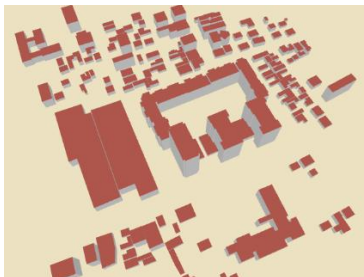
Rasejanje se javlja kada dimenzije objekata ili površina postanu uporedive sa talasnom dužinom, čime dolazi do odstupanja od idealne refleksije i pojave dodatnih komponenti talasa. U takvim uslovima energija se ne reflektuje u jednom dominantnom pravcu, već se raspodeljuje u više smerova. Rasejanje postaje izraženo u prisustvu neravnih i nepravilnih površina, vegetacije, grubih fasada, metalnih konstrukcija, staklenih površina i drugih elemenata. Intenzitet rasejanja zavisi od hrapavosti površine, električnih osobina materijala i ugla pod kojim talas pada na površinu. Iako pojedinačno slab, zbirni doprinos difuzno rasejanih komponenti može značajno uticati na ukupno polje i prostornu konzistentnost signala.

Kombinacija ovih efekata dovodi do veoma složenog prostiranja elektromagnetnih talasa, tako da se na mestu prijema dobija signal koji predstavlja superpoziciju višestrukih komponenti različitih amplituda, faza i kašnjenja. Njihova interferencija izaziva konstruktivne i destruktivne efekte koji uzrokuju brze fluktuacije jačine signala i vremensku disperziju. Ovakvo ponašanje kanala ima presudan uticaj na kvalitet veze i efikasnost prenosa informacija, zbog čega je precizno razumevanje ovih procesa ključno za realistično modelovanje radio kanala. U savremenim istraživanjima sve veću primenu nalaze deterministički pristupi zasnovani na metodi praćenja zraka. Time se ostvaruje fizički tačno praćenje signala i analiza doprinosa reflektovanih, difraktovanih i rasejanih komponenti u realnim trodimenzionalnim scenama. Ovi principi čine osnovu simulacione analize prikazane u narednom poglavlju, gde se koristi kombinovana primena alata Sionna, Mitsuba i Dr.Jit za modelovanje prostiranja signala u trodimenzionalnom okruženju.

4. Simulaciona analiza radio kanala za 6G okruženja

Simulaciona analiza determinističkog modelovanja radio kanala omogućava detaljno razumevanje prostiranja elektromagnetnih talasa u realnim urbanim scenarijima, relevantnim za istraživanje 6G sistema. U okviru ove studije korišćen je trodimenzionalni model dela ulice Vojvode Stepe, koji je prikazan na slici 2. Ovaj model omogućava vizuelnu i kvantitativnu analizu osnovnih propagacionih mehanizama. Eksperimenti su sprovedeni u okruženju Sionna softvera, koji omogućava simulacije prostiranja elektromagnetnih talasa pomoću metoda praćenja zraka [4]. Za efikasnu evaluaciju funkcija na GPU-u i procesiranje velikog broja uzoraka, Sionna koristi biblioteku Dr.Jit, koja obezbeđuje JIT (*Just-In-Time*) kompilaciju numeričkih operacija i njihovu optimizovanu paralelizaciju, čime se značajno ubrzava izvođenje simulacija. Sionna je direktno integrisana sa Mitsuba 3 okvirom, koji je zadužen za geometrijsku

reprezentaciju i optički model scena, odnosno za fizički veran opis propagacije signala. Geometrija scena je kreirana u programu Blender, koji omogućava precizno definisanje struktura, dimenzija i materijala, a zatim se izvozi u Mitsuba format koji Sionna koristi tokom simulacije.

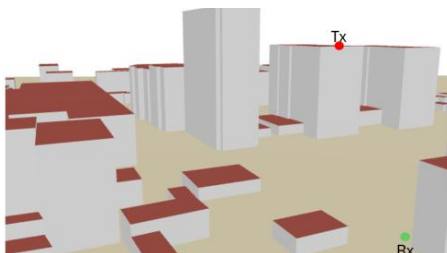


Slika 2. Trodimenzionalni model ulice Vojvode Stepe u Beogradu

U okviru sprovedenih simulacija analiziran je uticaj frekvencije i položaja prijemnika na distribuciju energije i karakteristike radio kanala u urbanom okruženju. Kako bi se prikazale razlike u prostiranju signala i identifikovali dominantni mehanizmi propagacije, ova analiza obuhvata scenarije sa i bez linije optičke vidljivosti, za dva frekvencijska opsega - 5 GHz i 24 GHz. Dobijeni rezultati omogućavaju bolje razumevanje prostorne zavisnosti i interakcije elektromagnetnih talasa sa okruženjem, što predstavlja osnovu za preciznije modelovanje i optimizaciju 6G sistema. Izvorni kôd i rezultati izvršenih simulacija dostupni su na platformi Google Colab [5].

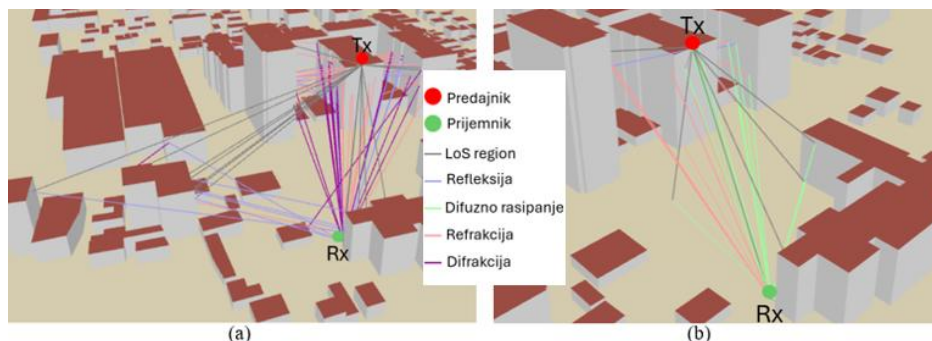
4.1. Analiza scenarija sa optičkom vidljivošću

U ovom delu je analiziran referentni slučaj koji služi za procenu osnovnih karakteristika radio kanala. Predajnik i prijemnik postavljeni su tako da postoji direktna linija vidljivosti (LoS), bez fizičkih prepreka između antena, kao što je prikazano na slici 3. Ovakva konfiguracija omogućava sagledavanje dominantnog doprinosa direktne putanje i reflektovanih komponenti u primljenom signalu. Simulacije su sprovedene u okruženju Sionna na frekvencijama od 5 GHz i 24 GHz, uz maksimalnu dubinu praćenja od pet refleksija. Analizirani su najvažniji procesi prostiranja elektromagnetnih talasa u urbanom okruženju, uključujući mehanizme direktnog prostiranja (LoS), refleksije, difrakcije, difuznog rasejanja i refrakcije. Korišćeni model materijala zasnovan je na ITU-R preporukama, dok su parametri antena i širine snopa definisani u skladu sa standardom 3GPP TR 38.901.



Slika 3. LoS scenario

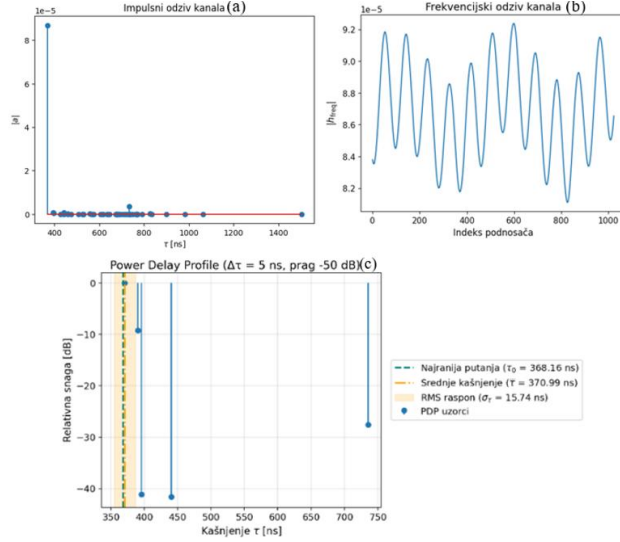
Uporedni prikaz prostiranja radio talasa u urbanom okruženju, dobijen pri istim parametrima simulacije, dat je za dve frekvencije - 5 GHz (slika 4a) i 24 GHz (slika 4b).



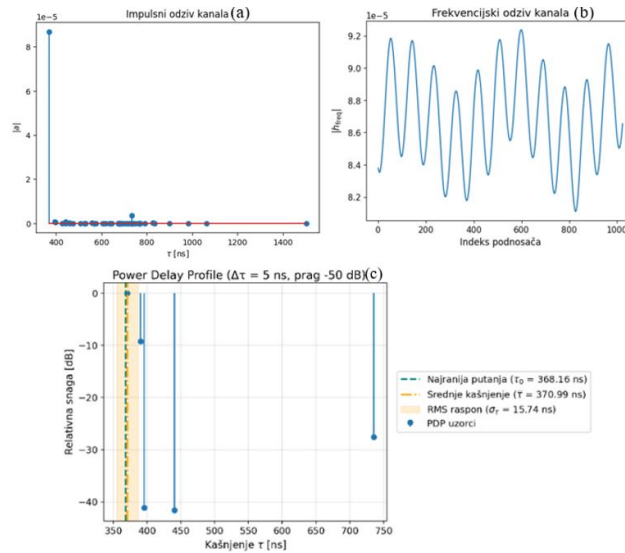
Slika 4. LoS - praćenje zraka 5 GHz (a) i 24 GHz (b)

Analiza rezultata simulacija za 5 GHz i 24 GHz omogućava jasan uvid u uticaj frekvencije na prostiranje elektromagnetnih talasa u urbanom okruženju. Na nižoj frekvenciji od 5 GHz identifikovano je 55 aktivnih putanja, dok je na 24 GHz zabeleženo 21 putanja. Veći broj putanja na 5 GHz posledica je manjeg uticaja apsorpcije i izraženije difrakcije, što omogućava šire prostiranje signala i prisustvo indirektnih komponenti koje doprinose ukupnom prenosu energije. Niže frekvencije imaju izraženiju sposobnost zaobilaženja prepreka, čime se obezbeđuje stabilniji prijem i u složenim urbanim geometrijama. Impulsni odziv kanala na 5 GHz (slika 5a) pokazuje više izraženih komponenti koje odgovaraju različitim reflektovanim, difraktovanim i refraktovanim putanjama. Frekvencijski odziv (slika 5b) sadrži izražene oscilacije amplitude usled interferencije između brojnih reflektovanih komponenti. Vremenska disperzija signala je izraženija, što potvrđuje veći RMS (*Root Mean Square*) *delay spread* i prisustvo višestrukih komponenti. Na slici 5c prikazan je PDP (*Power Delay Profile*) koji pokazuje širu distribuciju snage. Ove karakteristike ukazuju na veći stepen frekvencijske selektivnosti i izraženije višestruko prostiranje u kanalu.

Pri prelasku na više frekvencijske opsege, priroda prostiranja elektromagnetnih talasa se značajno menja. Zbog kraće talasne dužine, signal postaje osetljiv na mikrostrukturu površina i detalje okruženja. Na frekvenciji od 24 GHz broj aktivnih putanja je manji, a energija se koncentriše u užem vremenskom i prostornom intervalu. Impulsni odziv (slika 6a) pokazuje direktne veze i nekoliko difuzno rasejanih komponenti. Difrakcija, koja je na nižim frekvencijama omogućavala održavanje veze i pri delimičnoj okluziji, u ovom opsegu postaje znatno slabija. Frekvencijski odziv (slika 6b) je glatkiji, što potvrđuje smanjenu frekvencijsku selektivnost kanala. PDP (slika 6c) ukazuje na manju vremensku disperziju (RMS *delay spread*) u odnosu na 5 GHz. Viša frekvencija dovodi do izraženije apsorpcije i veće osetljivosti na karakteristike površina, zbog čega kanal postaje više zavisn od geometrije i direktne vidljivosti između predajnika i prijemnika.



Slika 5. LoS 5 GHz - impulsni odziv kanala (a), frekvencijski odziv kanala (b) i PDP (c)



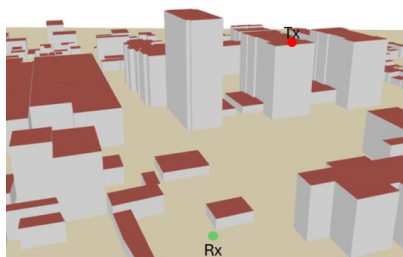
Slika 6. LoS 24 GHz - impulsni odziv kanala (a), frekvencijski odziv kanala (b) i PDP (c)

4.2. Analiza scenarija bez optičke vidljivosti

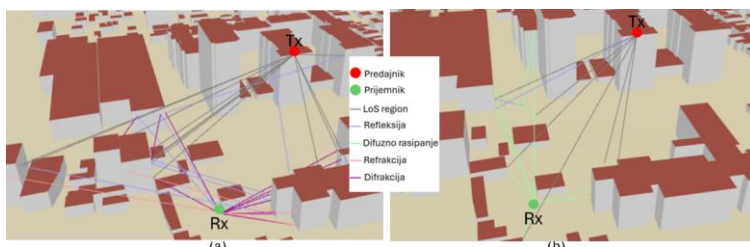
U ovom delu analiziran je scenario bez optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika (NLoS), koji je prikazan na slici 7.

Prijem signala u NLoS scenariju se ostvaruje isključivo putem višestrukih komponenti. Ovakva konfiguracija je karakteristična za urbana okruženja gde objekti, poput zgrada, potpuno zaklanjaju direktnu liniju između antena. Cilj analize je da se ispita kako odsustvo direktne putanje i promena frekvencije utiču na raspodelu energije i

vremenske karakteristike kanala. Analiza obuhvata dva frekventijska opsega, 5 GHz i 24 GHz. Na slici 8 prikazani su rezultati praćenja zraka za oba slučaja, koji jasno ilustruju promenu prostorne raspodele putanja i mehanizama prostiranja.



Slika 7. NLoS scenario



Slika 8. NLoS - praćenje zraka 5 GHz (a) i 24 GHz (b)

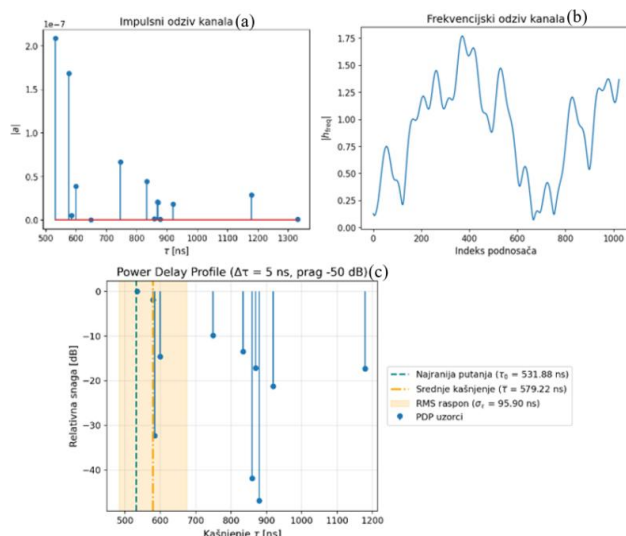
Simulacije su sprovedene u istim uslovima kao u prethodnom primeru (LoS), uz korišćenje istog trodimenzionalnog modela scene i identičnih parametara. Aktivirani su isti mehanizmi prostiranja (LoS, refleksija, difrakcija, difuzno rasejanje i refrakcija), dok je maksimalna dubina praćenja zadržana na pet zraka. U ovom slučaju, međutim, direktna komponenta nije prisutna, pa ukupna energija zavisi od intenziteta i broja indirektnih putanja.

Na frekvenciji od 5 GHz registrovano je 14 aktivnih putanja, što ukazuje na izraženu *multipath* strukturu kanala. Impulsni odziv (slika 9a) i PDP (slika 9c) potvrđuju prisustvo brojnih reflektovanih i difraktovanih komponenti, sa velikim vrednostima za *RMS delay spread*. Frekventijski odziv (slika 9b) pokazuje nelinearne oscilacije koje potiču od interferencije više prostorno odvojenih putanja. Na ovoj frekvenciji difrakcija i refleksija dominiraju, dok je doprinos difuznog rasejanja ograničen, jer veće talasne dužine omogućavaju prostiranje i preko grubih objekata.

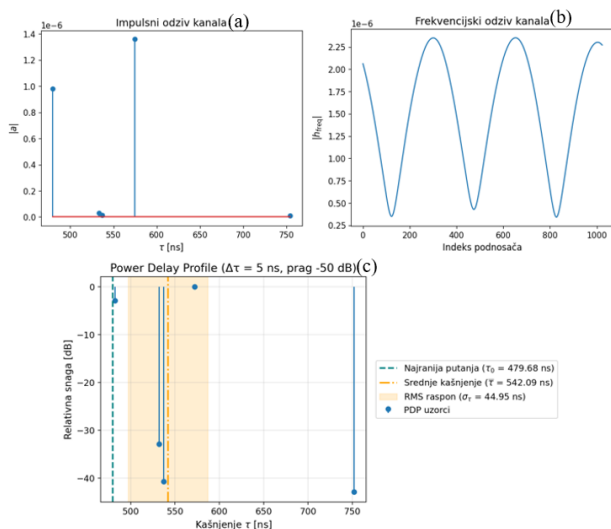
Na frekvenciji od 24 GHz, broj efektivnih putanja se smanjuje na 5, a difrakcija i refleksija više ne mogu u potpunosti da kompenzuju gubitak direktne vidljivosti. Impulsni odziv (slika 10a) pokazuje nekoliko dominantnih impulsa u užem vremenskom intervalu, dok *Power Delay Profile* (slika 10c) prikazuje manje vrednosti za *RMS delay spread* u odnosu na 5 GHz. Frekventijski odziv (slika 10b) ima pravilniju periodičnu strukturu, što ukazuje na ograničen broj koherentnih putanja. U ovim uslovima difuzno rasejanje postaje sve značajniji mehanizam, jer i najmanje nepravilnosti na površinama mogu doprineti dodatnim, iako slabijim, komponentama prostiranja.

Ovi rezultati ukazuju da sa porastom frekvencije deterministički modeli moraju uključiti detaljnije elektromagnetne karakteristike materijala i difuzno rasejanje kako bi

precizno opisali prenos energije. U suprotnom, izostavljanje ovih efekata može dovesti do potcenjivanja ukupnog prijemnog nivoa signala i pogrešne procene pouzdanosti veze.



Slika 9. NLoS 5 GHz - impulsni odziv kanala (a), frekvencijski odziv kanala (b) i PDP (c)



Slika 10. NLoS 24 GHz - impulsni odziv kanala (a), frekvencijski odziv kanala (b) i PDP (c)

5. Zaključak

Sprovedena simulaciona analiza pokazuje mogućnosti determinističkog modelovanja radio kanala pomoću Sionna biblioteke, zasnovane na fizički utemeljenim mehanizmima prostiranja. U okviru rada prikazani su propagacioni mehanizmi signala,

uključujući LoS, refleksiju, difrakciju, refrakciju i difuzno rasejanje, kao i njihovu zavisnost od frekvencije i geometrije urbanog okruženja. Uporedna analiza rezultata za frekvencijske opsege od 5 GHz i 24 GHz pokazala je razliku u ponašanju kanala. Na nižim frekvencijama uočava se veći broj aktivnih putanja, izraženiji *multipath* efekti i šira vremenska disperzija snage. Na višim frekvencijama broj efektivnih putanja se smanjuje, a prenos energije se koncentriše u užem prostorno-vremenskom intervalu. Rezultati simulacija pokazuju da povećanje frekvencije ne utiče samo na broj aktivnih putanja, već i na način na koji se energija prostire kroz urbano okruženje. Povećanje frekvencije dovodi do smanjenja vrednosti za *RMS delay spread*, jače zavisnosti od linije vidljivosti i veće osetljivosti na elektromagnetne i geometrijske karakteristike okruženja. Opisana metodologija za istraživanje prostorno-vremenskih karakteristika radio kanala na bazi Sionna softverskog okruženja predstavlja efikasan alat koji se može direktno primeniti u analizi budućih 6G scenarija.

Literatura

- [1] H. Jiang and G. Gui, *Channel Modeling in 5G Wireless Communication*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-32869-6.
- [2] R. H. Ai Bo, *Wireless Channel Measurement and Modeling in Mobile Communication Scenario*. CRC Press, 2024. doi: 10.1201/9781032669793.
- [3] Sana Salous, *Radio Propagation Measurement and Channel Modelling*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. doi: 10.1002/9781118502280.
- [4] F. A. Aoudia, J. Hoydis, M. Nimier-David, S. Cammerer, and A. Keller, "Sionna RT: Technical Report" 2025. doi: 10.48550/arXiv.2504.21719.
- [5] M. Đorđević, "Simulaciona analiza radio kanala za 6G okruženja" [Online]. Available: https://colab.research.google.com/drive/1Pw2H7m88DJaH0KLYaNmtWMQEBGHb3shl#scrollTo=AJ_gNuMwPQ3j

Abstract: *The research and development of sixth-generation (6G) wireless systems require precise and realistic radio channel modeling. In urban environments, the planned transition to higher frequency bands introduces new challenges, as signal propagation becomes highly dependent on the geometry and electromagnetic properties of surrounding surfaces. Conventional statistical models are often insufficient to accurately capture the effects of multipath propagation, reflection, diffraction, and diffuse scattering, which complicates realistic performance assessment. This paper presents the application of the Sionna software for deterministic radio channel modeling based on ray tracing methodology. Key propagation mechanisms are analyzed through a representative urban environment. Simulation results enable the extraction of standard physical-layer metrics and demonstrate that deterministic modeling provides a clear and location-specific representation of radio channel behavior within an urban scene. Such an approach can bridge theoretical models and practical research, with potential extensions toward dynamic scenarios and experimental validation within 6G studies.*

Keywords: *deterministic modeling, ray tracing, 6G radio channel, urban environment, Sionna*

DETERMINISTIC RADIO CHANNEL MODELING FOR 6G ENVIRONMENTS

Milica Đorđević, Nenad Jevtić