

# Komparativna analiza 5G propagacionih modela na 26 GHz

Jelena Mladenović, Nataša Nešković, Aleksandar Nešković, Đurađ Budimir

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

jelenam@etf.rs, [natasha@etf.rs](mailto:natasha@etf.rs), [an@etf.rs](mailto:an@etf.rs), [d.budimir@wmin.ac.uk](mailto:d.budimir@wmin.ac.uk)

*Sažetak* — U ovom radu predstavljeni su rezultati poređenja tri empirijska propagaciona modela i modela kreiranog od strane autora koji se zasniva na MLP (*multilayer perceptron*) neuralnoj mreži. Razmatrani su sledeći empirijski modeli: CI (*close-in free-space reference distance model*) model, CIF (*CI model with a frequency-weighted path loss exponent*) model i ABG (*alpha-beta-gamma*) model. Procena tačnosti rezultata predikcije pomenutih modela izvršena je u odnosu na rezultate eksperimentalnih merenja za LOS (*Line of Sight*) scenario za rastojanje od 1,5 m u *indoor office* okruženju. Analizirani modeli su namenjeni za predikciju propagacionog slabljenja u 5G mobilnim mrežama za frekvencijski opseg od 24,25 GHz do 27,5 GHz. Simulacije su pokazale da najbolje rezultate obezbeđuje kreirani MLP model sa MSE od 0,2739 dB.

*Ključne reči*-5G mobilne mreže; 5G propagacioni modeli; milimetarski opseg; neuralne mreže;

## I. UVOD

Da bi se izašlo u susret zahtevima koji se postavljaju pred nove generacije mobilnih mreža, kao što su 5G i novije, neophodno je uvođenje novih tehnoloških rešenja. Korisnički servisi poput video prenosa, virtuelne realnosti, telemedicine i mnogi drugi zahtevaju velike protoke podataka. Predikcije su takve da će multimedijalni servisi u budućnosti biti dominantniji u odnosu na govorne servise, što može dovesti do zasićenja resursa postojećih mobilnih mreža [1]. Inovativne tehnologije, poput MIMO sistema i alokacije spektra u višim frekvencijskim opsezima, neki su od načina da se prevaziđu postojeća ograničenja u ostvarivanju velikih protoka. Prethodne generacije mobilnih mreža implementirane su u frekvencijskim opsezima ispod 6 GHz. Rad na nižim frekvencijama predstavlja jednostavnije i trenutno isplativije rešenje zbog izazova koje rad na visokim frekvencijama, tzv. milimetarskim opsezima, nosi sa sobom, a koji se između ostalog odnose na manji domet, izraženije slabljenje usled interakcije sa preprekama, uticaj vremenskih prilika na slabljenje i dr. [1]. Rad u milimetarskim opsezima predstavlja rešenje za pomenuta ograničenja jer obezbeđuje velike protoke, rad sa antenama značajno manjih dimenzija, a shodno tome omogućava i primenu *massive* MIMO sistema.

Propagacioni kanal predstavlja medijum za prenos signala između predajnika i prijemnika i u značajnoj meri određuje kako će se bežični sistem ponašati i kakve će biti njegove performanse [2]. Kako su performanse 5G sistema ograničene propagacionim kanalom u kom sistem funkcioniše, neophodno je njegovo dobro poznavanje. Jedan od ključnih faktora kod analize propagacionog kanala je propagaciono slabljenje, na koje mogu uticati radna frekvencija, rastojanje, vremenske prilike, okruženje i mnogi drugi faktori. Iz navedenih razloga definišu se različiti propagacioni modeli za različite mreže i scenarije. Tako primena novih frekvencijskih opsega u 5G mobilnim mrežama zahteva i nove propagacione modele.

Upotreba *deep learning*-a za modelovanje propagacionog slabljenja je već godinama tema istraživanja koja ima široku zastupljenost u literaturi, neki od primera su predstavljeni u referenci [3]. Predikcija propagacionog slabljenja se može posmatrati kao problem regresije i rešavati primenom neuralnih mreža. Propagacioni model zasnovan na neuralnim mrežama koji je predstavljen u ovom radu omogućuje pronalaženje zavisnosti propagacionog slabljenja od frekvencije i udaljenosti između predajnika i prijemnika. Za njegovo kreiranje korišćena je MLP (*multilayer perceptron*) neuralna mreža sa dva skrivena sloja sa tri neurona u prvom i sedam neurona drugom sloju.

U radu je izvršena komparativna analiza kreiranog modela zasnovanog na MLP neuralnoj mreži i tri 5G empirijska propagaciona modela koji se mogu koristiti za analizu u milimetarskim opsezima. Razmatrani empirijski modeli su: ABG (*alpha-beta-gamma*) model, CI (*close-in free-space reference distance path loss*) model i CIF (*CI model with a frequency-weighted path loss exponent*) model [1], [4]-[7]. Upotreba svakog od ova tri modela proučavana je u okviru 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) tela za standardizaciju [5]. Cilj istraživanja predstavljenog u ovom radu je poređenje pomenutih propagacionih modela sa rezultatima merenja u cilju određivanja modela koji za zadati scenario daje najbolje performanse. Scenario razmatran u ovom radu predstavlja *indoor office* okruženje u kome je analizirano propagaciono slabljenje između predajnika i prijemnika na rastojanju od 1,5 m za frekvencijski opseg od 24,25 GHz do 27,5 GHz, u LOS uslovima.

Rad je organizovan na sledeći način. U sekciji II dat je skraćeni opis korišćenih modela. U sekciji III predstavljeni su rezultati sprovedenih simulacija i izvršeno poređenje sa rezultatima merenja, dok su u sekciji IV izvedeni zaključci sprovedenog istraživanja.

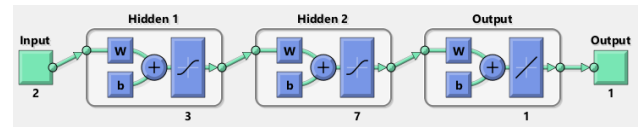
## II. 5G PROPAGACIONI MODELI

Propagaciono slabljenje predstavlja smanjenje nivoa snage signala koje nastaje kao posledica propagacije signala kroz radio kanal. Prilikom propagacije signala, pored slabljenja koje nastaje kao posledica rastojanja između predajnika i prijemnika, javlja se i slabljenje usled interakcije signala sa preprekama u kanalu. Stoga su neophodni propagacioni modeli koji u obzir uzimaju uticaj okruženja na propagaciju signala. Tradicionalna podela propagacionih modela je na empirijske i determinističke. Deterministički modeli se zasnivaju na zakonima fizike, karakteriše ih veća tačnost, ali su numerički neefikasni i zahtevaju opsežne baze podataka koje nije moguće uvek obezbediti. Empirijski modeli implicitno uzimaju u obzir uticaj okruženja jer se zasnivaju na opsežnim merenjima koja se sprovode u različitim okruženjima i na različitim frekvencijskim opsezima [8]. Jednostavniji su za implementaciju, ali su manje tačni od determinističkih. Empirijski modeli koji su analizirani u ovom radu omogućuju predikciju propagacionog slabljenja za više relevantnih frekvencijskih opsega i određene scenarije [5]. Pored navedenih tradicionalnih, sve su češći propagacioni modeli koji se zasnivaju na tehnikama mašinskog učenja i veštačke inteligencije. Uspešnost pomenutih tehnika u modelovanju propagacionog slabljenja je posledica njihove mogućnosti da efikasno aproksimiraju proizvoljnu funkciju koja se ne može eksplicitno opisati formulom i zavisna je od više ulaznih parametara, što odgovara problemu predikcije propagacionog slabljenja [3].

### A. Model zasnovan na neuralnim mrežama

U cilju kreiranja propagacionog modela zasnovanog na MLP neuralnoj mreži korišćeni su rezultati merenja u frekvencijskom opsegu od 24,5 do 27,5 GHz za rastojanja od 0,05 m, 0,1 m, 0,3 m i 1,05 m. Za formiranje modela je korišćen skup od 3204 trening primera. Jedan trening primer čine ulazni podaci i odgovarajuće tačne vrednosti, odnosno, targeti. Za dati model, ulazni podaci su frekvencija i rastojanje, a target vrednost propagacionog slabljenja izražena u dB. Korišćena je arhitektura sa dva skrivena sloja sa tri neurona u prvom i sedam neurona u drugom sloju. U skrivenim slojevima funkcija aktivacije je hiperbolički tangens, a u izlaznom sloju funkcija aktivacije je linearna funkcija. Prikaz korišćene arhitekture je dat na Sl. 1.

Skup koji je korišćen za obučavanje neuralne mreže razmatra samo mali broj različitih rastojanja. Kako je najveće rastojanje koje je razmatrano u procesu obučavanja mreže 1.05 m, neuralna mreža je vršila ekstrapolaciju da bi odredila predikciju za 1,5 m. Verovatnoća dobijanja kvalitetnije predikcije bi bila veća da je u procesu obučavanja mreže korišćen širi skup podataka koji uključuje rastojanja veća od onog za koji je vršena predikcija.



Slika 1. Prikaz arhitekture neuralne mreže korišćene za kreiranje propagacionog modela

### B. CI model

CI (*Close-in free space reference distance*) model je propagacioni model koji vrši predikciju propagacionog slabljenja u zavisnosti od frekvencije i rastojanja. Propagaciono slabljenje dato je jednačinom (1) [5]:

$$PL^{CI}(f, d) = FSPL(f, d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}^{CI}$$

$$= 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{c} * 10^9 \right) + 20 \log_{10} \left( \frac{f}{GHz} \right) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}^{CI},$$

$$d \geq d_0, d_0 = 1m \text{ i } c = 3 * 10^8 \frac{m}{s} \quad (1)$$

gde  $d$  predstavlja rastojanje između predajnika i prijemnika izraženo u metrima, a  $f$  radnu frekvenciju izraženu u GHz. CI model sadrži FSPL (*free space path loss*) član koji predstavlja propagaciono slabljenje u slobodnom prostoru i proračunat je za referentno rastojanje između predajnika i prijemnika, tzv. *close-in distance*,  $d_0 = 1m$ . U okviru modela koji se koriste na nižim frekvencijama, za *close-in* referentno rastojanje biraju se vrednosti od 100 m ili 1000 m. Razlog za takav izbor referentnog rastojanja na ovim frekvencijama su veća visina antenskih stubova i okruženje bez prepreka u bližoj okolini, kao i veće rastojanje između baznih stanica, do nekoliko km [5]. Za 5G modele se biraju manja referentna rastojanja jer je pokrivanje na višim frekvencijama manje, a zbog malog obima čelije veće su šanse da bazna stanica bude postavljena bliže prepreci [5]. Zavisnost CI modela od frekvencije sadržana je u okviru FSPL člana za rastojanje od 1 m. Zavisnost CI modela za rastojanja između predajnika i prijemnika koja su veća od referentnog rastojanja je sadržana u okviru člana:

$$10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2)$$

gde  $n$  predstavlja PLE (*path loss exponent*) koji ukazuje na zavisnost promene vrednosti propagacionog slabljenja od rastojanja [7]. Uticaj fluktuacija propagacionog slabljenja usled dugotrajnog *fading*-a predstavljen je Gausovom slučajnom promenljivom,  $X_{\sigma}^{CI}$ , koja ima srednju vrednost nula i standardnu devijaciju  $\sigma$  izraženu u dB.

### C. CIF model

CIF (*CI model with a frequency-weighted path loss exponent*) propagacioni model predstavlja proširenje CI

modela, jer dodatno u obzir uzima i precizniju frekvencijsku zavisnost, pored one koja je već sadržana u okviru FSPL člana za referentno rastojanje. Propagaciono slabljenje dato je jednačinom (3) [5]:

$$\begin{aligned}
 PL^{CIF}(f, d) &= FSPL(f, d_0) \\
 &+ 10n \left( 1 + b \left( \frac{f - f_0}{f_0} \right) \right) \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}^{CIF} \\
 &= 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{c} * 10^9 \right) + 20 \log_{10} \left( \frac{f}{GHz} \right) \\
 &+ 10n \left( 1 + b \left( \frac{f - f_0}{f_0} \right) \right) \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}^{CIF},
 \end{aligned}$$

$$d \geq d_0, d_0 = 1m \text{ i } c = 3 * 10^8 \frac{m}{s} \quad (3)$$

Parametar  $n$ , kao i u okviru CI modela, ukazuje na porast propagacionog slabljenja sa povećanjem rastojanja. Parametar  $b$  ukazuje na uticaj frekvencije na propagaciono slabljenje, a  $f_0$  je referentna frekvencija dobijena na osnovu formule (4) [5]:

$$f_0 = \frac{\sum_{k=1}^K f_k N_k}{\sum_{k=1}^K N_k} \quad (4)$$

gde  $K$  predstavlja broj frekvencija, a  $N_k$  broj uzoraka vrednosti propagacionog slabljenja za  $k$ -tu frekvenciju,  $f_k$ . Uticaj fluktuacija propagacionog slabljenja usled dugotrajnog *fading*-a predstavljen je Gausovom slučajnom promenljivom,  $X_{\sigma}^{CIF}$ , koja ima srednju vrednost nula i standardnu devijaciju  $\sigma$  u dB. CIF model postaje isti kao i CI model za slučaj kada je  $f = f_0$ , odnosno, kada se razmatra samo jedna frekvencija i kada ne postoji zavisnost od učestanosti, odnosno, kada je  $b = 0$ .

#### D. ABG model

ABG (*alpha-beta-gama*) je propagacioni model koji prilikom određivanja propagacionog slabljenja uzima u obzir uticaj rastojanja i frekvencije. Propagaciono slabljenje dato je jednačinom (5) [3]:

$$\begin{aligned}
 PL^{ABG}(f, d) &= 10\alpha \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \beta + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{f}{GHz} \right) \\
 &+ X_{\sigma}^{ABG}, \\
 d &\geq d_0, d_0 = 1m
 \end{aligned} \quad (5)$$

Parametar  $\alpha$  definiše zavisnost propagacionog slabljenja od rastojanja, odnosno, povećanja propagacionog slabljenja sa porastom udaljenosti između predajnika i prijemnika,  $d$ , izražene u metrima. Parametar  $\gamma$  definiše zavisnost propagacionog slabljenja od frekvencije,  $f$ , izražene u GHz, dok je parametar  $\beta$  nezavisni član izražen u dB. Uticaj fluktuacija propagacionog slabljenja usled dugotrajnog

*fading*-a je predstavljen Gausovom slučajnom promenljivom,  $X_{\sigma}^{ABG}$ , koja ima srednju vrednost nula i standardnu devijaciju  $\sigma$  izraženu u dB.

Da bi se omogućilo poređenje izabranih propagacionih modela sa rezultatima merenja, usvojen je eksperimentalni scenario koji predstavlja *indoor office* okruženje u kome je razmatrano propagaciono slabljenje između predajnika i prijemnika na rastojanju od 1,5 m za frekvencijski opseg od 24,25 GHz do 27,5 GHz, u LOS uslovima. Imajući u vidu eksperimentalni scenario, u Tabeli I predstavljene su vrednosti karakterističnih parametara, koje su korišćene u sprovedenim simulacijama, za sva tri empirijska modela, za LOS scenario [4].

TABELA I. VREDNOSTI PARAMETARA CI, CIF I ABG MODELA ZA LOS SCENARIO

CI	$n = 1,269, \sigma = 1,75 \text{ dB}$
CIF	$n = 1,434, \sigma = 1,41 \text{ dB}, b = 0,093$
ABG	$\alpha = 1,829, \beta = 27,22 \text{ dB}, \gamma = 2,153, \sigma = 1,32 \text{ dB}$

### III. REZULTATI

U ovoj sekciji predstavljeni su rezultati poređenja predikcije kreiranog modela zasnovanog na MLP neuralnoj mreži i tri pomenuta 5G empirijska modela, CI, CIF i ABG, sa rezultatima merenja koja su sprovedena na frekvencijskom opsegu od 24,25 GHz do 27,5 GHz u *indoor office* okruženju na rastojanju od 1,5 m. Iako su autorima na raspolaganju bili dostupni rezultati merenja i za rastojanja manja od jednog metra, ona nisu razmatrana prilikom poređenja jer pomenuti empirijski propagacioni modeli važe samo za rastojanja veća od 1m. Merenja su sprovedena u okviru *Wireless Communications Research* laboratorije Univerziteta *Westminster* u Londonu, UK. Specifikacija horn antene koja je korišćena za potrebe merenja je predstavljena u referenci [9]. Specifikacija linka data je u Tabeli II.

TABELA II. SPECIFIKACIJA LINKA

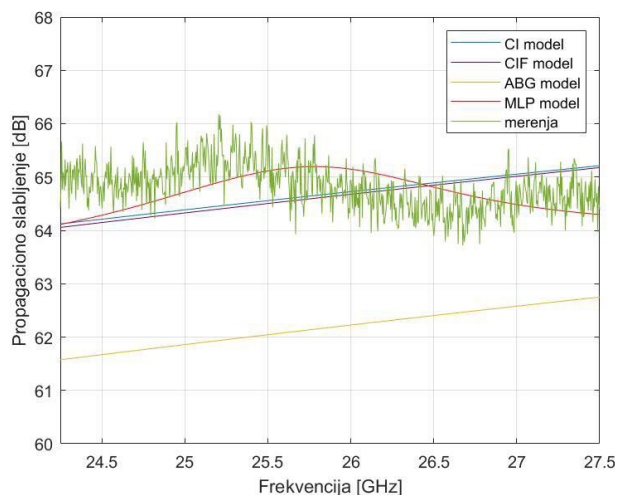
Parametri	Vrednosti
Predajna snaga	0 dBm
Dobitak predajne i prijemne antene	20 dBi
Visina predajnika	20 cm
Visina prijemnika	20 cm
Rastojanje	1,5 m
Okruženje	<i>Indoor office</i>
n258 opseg	24,25 GHz – 27,5 GHz

Na Sl. 2 predstavljeni su rezultati simulacija dobijeni za sva tri 5G empirijska modela i za kreirani model koji se

zasniva na MLP neuralnoj mreži. Pored rezultata simulacija, predstavljene su i vrednosti propagacionog slabljenja dobijenog na osnovu merenja. Procena tačnosti razmatranih modela izvršena je na osnovu vrednosti statističkih parametara. Vrednosti statističkih parametara koje su analizirane su: STD (standardna devijacija greške, eng. *standard deviation*), MSE (srednja kvadratna greška, eng. *mean squared error*) i MEAN (srednja vrednost greške, eng. *mean*). Dobijene vrednosti predstavljene su u Tabeli III.

TABELA III. VREDNOSTI STATISTIČKIH PARAMETARA ZA POREĐENE MODELE

	STD [dB]	MEAN [dB]	MSE [dB]
MLP	0,5144	0,0982	0,2739
CI	0,6476	- 0,1428	0,4392
CIF	0,6544	- 0,1934	0,4651
ABG	0,6675	- 2,6472	7,4522



Slika 2. Uporedni prikaz rezultata predikcije i merenja u LOS uslovima za rastojanje između predajnika i prijemnika od 1.5m

#### IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitivane su performanse tri empirijska 5G propagaciona modela i kreiranog modela koji se zasniva na MLP neuralnoj mreži. Procena performansi razmatranih modela je izvršena na osnovu rezultata eksperimentalnih merenja koja su sprovedena u *indoor office* okruženju na rastojanju od 1,5 m za frekventijski opseg od 24,25 GHz do 27,5 GHz. Rezultati sprovedenih simulacija pokazuju da se najbolji rezultati dobijaju za kreirani MLP model sa MSE od 0,2739 dB. CI i CIF modeli ostvaruju približno istu tačnost, sa MSE od 0,4392 dB i 0,4651 dB, respektivno, dok ABG model

daje značajno lošiju predikciju sa MSE od 7,4522 dB. Predlozi za buduća unapređenja podrazumevaju rad sa podacima dobijenim merenjima za dodatne frekventijske opsege i rastojanja, kao i primenu složenijih arhitektura neuralnih mreža za potrebe kreiranja propagacionog modela.

#### LITERATURA

- [1] F. Qamar et. al, "Channel characterization of 28 and 38 GHz MM-wave frequency band spectrum for the future 5G network," 2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development (SCORED), Wilayah Persekutuan Putrajaya, Malaysia, 2017, pp. 291-296.
- [2] Andreas F. Molisch, "Wireless communications", Second edition, Wiley, 2011, Online ISBN: 9781119992806
- [3] J. Mladenović, A. Nešković and N. Nešković, "An overview of propagation models based on deep learning techniques," International Journal of Electrical Engineering and Computing, Vol. 6, No. 1 (2022): IJEEC, pp. 8-25.
- [4] L. Rubio, et. al., "Millimeter-wave channel measurements and path loss characterization in a typical indoor office environment," Electronics. 12. 844, 2023.
- [5] S. Sun et al., "Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5G wireless communications," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 5, pp. 2843-2860, May 2016.
- [6] S. Sun, T. S. Rappaport, M. Shafi, P. Tang, J. Zhang and P. J. Smith, "Propagation models and performance evaluation for 5G millimeter-wave bands," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 9, pp. 8422-8439, Sept. 2018.
- [7] S. Sun et al., "Propagation path loss models for 5G urban micro- and macro-cellular scenarios," 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, China, 2016, pp. 1-6.
- [8] L. Wu, D. He, B. Ai, J. Wang, H. Qi, K. Guan, Z. Zhong, "Artificial neural network based path loss prediction for wireless communication network," in IEEE Access, vol. 8, pp. 199523-199538, 2020.
- [9] Flann Microwave, Standard Gain Horn, Model 21240 -20, 8 April 2020.

#### ABSTRACT

This paper presents the results of a comparison of three empirical propagation models and a model created by the author based on a MLP (multilayer perceptron) neural network. The following empirical models were considered: CI (close-in free-space reference distance model) model, CIF (CI model with a frequency-weighted path loss exponent) model and ABG (alpha-beta-gamma) model. The evaluation of the accuracy of the prediction results was performed in relation to the results of experimental measurements for the LOS (Line of Sight) scenario for a distance of 1.5 m in an indoor office environment. The analyzed models are intended for the prediction of propagation attenuation in 5G mobile networks for the frequency range from 24.25 GHz to 27.5 GHz. The simulations showed that the best results are provided by the created MLP model with an MSE of 0.2739 dB.

#### INVESTIGATION AND COMPARISON OF 5G PROPAGATION PATH LOSS MODELS AT 26 GHz

Jelena Mladenovic, Natasa Neskovic, Aleksandar Neskovic, Djuradj Budimir