

# Pregled mikroćelijskih modela predikcije nivoa električnog polja

Vladimir Slavković, Aleksandar Nešković, Nataša Nešković

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Beograd, Republika Srbija

vslavkovic@etf.rs, neshko@etf.rs, natasha@etf.rs

**Sažetak**—U ovom radu izvršen je pregled modela predikcije nivoa električnog polja za mikroćelijsko okruženje. Pored osnovnih, opisani su i neki najčešće korišćeni empirijski i deterministički modeli, kao i u poslednje vreme veoma popularni modeli bazirani na primeni *machine learning* algoritama. Rad daje pregled trenutnih dostignuća u oblasti modelovanja radio propagacije i predstavlja dobru osnovu za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

**Ključne reči**—deterministički modeli; empirijski modeli; *machine learning*; mikroćelija; radio propagacija; ray-tracing.

## I. UVOD

Brz razvoj i veliki zahtevi korisnika sa kojima se suočavaju savremeni bežični komunikacioni sistemi doveli su do suštinskog značaja upotrebe mikroćelije. Uvođenje koncepta mikroćelije omogućilo je efikasnije korišćenje frekvencijskog spektra, jeftiniju infrastrukturu i veći kapacitet mobilnih sistema. Mikroćelijski sistemi se karakterišu malom predajnom snagom (od 10mW do 1W), relativno malom zonom pokrivanja (od 200m do 1km) i nisko postavljenim antenama baznih stanica (obično u nivou ulične rasvete u urbanim okruženjima). Zona mikroćelije je dosta manja od zone makroćelije i na njen oblik dosta utiču građevine prisutne u neposrednom okruženju.

Modeli predikcije igraju važnu ulogu pri određivanju optimalnih lokacija i zona pokrivanja baznih stanica. Predikcija nivoa električnog polja u mikroćeliji je veoma kompleksan i težak zadatak. Razvijen je veliki broj različitih modela predikcije za mikroćelijsko okruženje [1]-[27]. Postojeći modeli se grubo mogu podeliti na empirijske (bazirane na empirijskim podacima dobijenih merenjem), determinističke (koji slede pojedine mehanizme propagacije), i modele zasnovane na primeni savremenih *machine learning* algoritama.

Empirijski modeli [1]-[5], implicitno uzimaju u razmatranje uticaje kompletnog okruženja. Problem koji ispoljavaju empirijski modeli odnosi se na njihovu tačnost. Tačnost empirijskih modela zavisi ne samo od tačnosti merenja, već i od sličnosti između okruženja koje se analizira i okruženja gde su sprovedena merenja. Sa druge strane, računaska efikasnost ovih modela je zadovoljavajuća.

Deterministički modeli [6]-[25] se baziraju na principima fizičke propagacije signala, pa se stoga mogu primeniti na različita okruženja bez uticaja na tačnost predikcije. Osnovni

problem determinističkih modela predstavlja njihova računaska efikasnost. Pored toga, implementacija ovih modela često zahteva velike baze podataka, koje je ponekad veoma teško ili čak nemoguće generisati.

Osnovne nedostatke navedenih modela moguće je prevazići razvojem modela predikcije korišćenjem savremenih *machine learning* algoritama, kao što su veštačke neuralne mreže (*Artificial Neural Network* - ANN) i SVM (*Support Vector Machine*) algoritam [26], [27].

U ovom radu izvršen je pregled osnovnih i najčešće korišćenih empirijskih, determinističkih i *machine learning* modela predikcije nivoa električnog polja u mikroćelijskom okruženju. Rad daje pregled trenutnih dostignuća u oblasti modelovanja radio propagacije i predstavlja dobru osnovu za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

## II. EMPIRIJSKI MODELI

Empirijski modeli su prevashodno namenjeni makroćelijskom okruženju, koje je po pitanja radio propagacije dosta jednostavnije od mikroćelijskog okruženja. Kada je reč o mikroćelijskom okruženju empirijski modeli pokazuju dobre performanse pri predikciji u LoS (*Line-of-Sight*) uslovima propagacije [1]-[3]. Empirijski modeli za NLoS (*Non-LoS*) predstavljeni su u [4] i [5].

### A. LoS modeli

Model predstavljen u [1] uvodi pojam tzv. *breakpoint* tačke i u odnosu na nju definiše dve krive sa različitim indeksima opadanja nivoa snage signala. Veoma popularni modeli za predikciju u LoS uslovima jesu *two-ray* modeli [2], koji pri proračunu snage prijemnog signala uzimaju u obzir direktan zrak i zrak reflektovan od zemlje. Jednačina za proračun snage prijemnog signala prvenstveno je predstavljena u [2]. Kako bi se u proračun uzeo u obzir uticaj 'niskih' prepreka na radio propagaciju, u [3] je predložena modifikovana formula za proračun prijemne snage:

$$P_r = P(r)P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{r_1} \exp(-jkr_1) + \Gamma(\alpha) \frac{1}{r_{2m}} \exp(-jkr_{2m}) \right|^2 \quad (1)$$

gde  $P_r$  predstavlja prijemnu snagu,  $P_t$  snagu predajnika,  $P(r)$  verovatnoću vidljivosti predajnika i prijemnika ( $r$  - rastojanje do predajnika),  $r_1$  direktno rastojanje između predajnika i

prijemnika,  $r_{2m}$  modifikovano rastojanje koje prelazi reflektovani zrak kada se uzme u obzir postojanje saobraćaja i drugih 'niskih' prepreka [3],  $k$  talasni broj, a  $\Gamma(\alpha)$  predstavlja koeficijent refleksije koji zavisi od upadnog ugla  $\alpha$  i polarizacije talasa [2].

### B. Zhang NLoS model

Zhang i Moayeri su u okviru [4] predstavili dve veoma jednostavne formule za proračun snage prijemnog signala u bočnoj i paralelnoj ulici tipičnog mikročelijskog okruženja (predajna i prijemna antena se nalaze ispod nivoa krova okolnih građevina). Osnovna ideja modela leži u zameni primarnog predajnika BS sekundarnim predajnikom BS', koji se nalazi na raskrsnici koja je najbliža prijemniku, i u direktnoj je optičkoj vidljivosti za prijemnikom (videti Sl. 1). Pri tome sekundarni predajnik emituje istu energiju u bočnu, odnosno paralelnu ulicu, kao i primarni predajnik. Primenom ovog modela moguće je na efikasan način izvršiti predikciju bez potrebe za korišćenjem parametara kao što je električna permitivnost zidova građevina i drugih prepreka u okruženju.

Ukoliko je  $P_t$  snaga predajnika, a  $r_s$  rastojanje prijemnika od pozicije sekundarnog predajnika BS', snaga prijemnog signala  $P_r$  u bočnoj ulici postaje:

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot \frac{2xW}{4\pi r_s^2} \quad (2)$$

ukoliko je  $r_s$  manje od *break distance* definisane sa:

$$d = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (3)$$

pri čemu  $\lambda$  predstavlja talasnu dužinu radio signala,  $r$  rastojanje predajnika od pozicije BS' (videti Sl. 1),  $x$  normalno rastojanje predajnika od ivice ulice,  $W$  širinu bočne ulice, dok  $h_t$  i  $h_r$  predstavljaju visine predajne i prijemne antene, respektivno. Ukoliko je  $r_s > d$  potrebno je u jednačini (3) izvršiti sledeću korekciju:

$$\frac{1}{r_s^2} \rightarrow \left( \frac{d\pi}{r_s} \right)^2 \cdot \frac{1}{r_s^2} \quad (4)$$

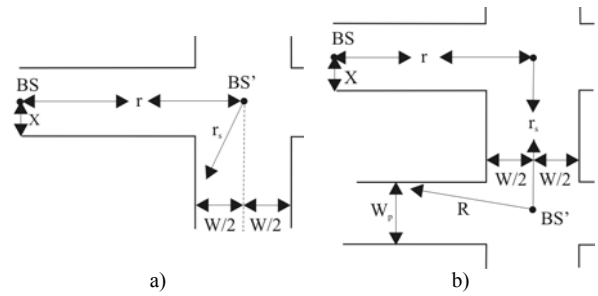
Ukoliko se prijemnik nalazi u paralelnoj ulici, snagu signala na mestu prijema model dešiniše na sledeći način [4]:

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot \frac{2xW}{4\pi r_s^2} \cdot \frac{W \cdot W_p}{4\pi R^2} \quad (5)$$

ukoliko je  $R < d$ , pri čemu  $W_p$  predstavlja širinu paralelne ulice, dok  $R$  predstavlja rastojanje između sekundarnog predajnika BS' i prijemnika. Za slučaj kada je  $R \geq d$  u relaciji (5) potrebno je uneti izmenu:

$$\frac{1}{R^2} \rightarrow \left( \frac{d\pi}{R} \right)^2 \cdot \frac{1}{R^2} \quad (6)$$

Model ostavlja mogućnost dodavanja *gain/loss* faktora  $F$  (između -10 dB do 10dB) u relacijama (2) i (5), kako bi se kompenzovao efekat *multipath* propagacije koji je prilikom određivanja snage sekundarnog izvora bio zanemaren [4].



Slika 1. Definisane parametara Zhang NLoS modela u slučaju prijemnika u a) bočnoj ulici i b) paralelnoj ulici [4].

Razvijeni model pokazuje veoma dobre performanse, koje čak nadmašuju performanse *ray-tracing* modela kojeg je u [6] predložio Tan.

### C. Sun NLoS model

Sun, Tan i Teh su u okviru [5] predstavili analitički model predikcije propagacionog slabljenja u urbanom mikročelijskom okruženju. Model uzima u obzir višestruke refleksije o zidove, kao i difrakcije na uglovima ulica, ali zanemaruje refleksiju od zemlje (2D model). Kada je reč o mehanizmu refleksije model uključuje samo propagacionu putanja sa najmanjim brojem refleksija (dominantna putanja), dok je gubitak usled refleksije modelovan konstantnim koeficijentom za sve refleksione ravni  $R_0$ . Efekat rasejanja je zanemaren.

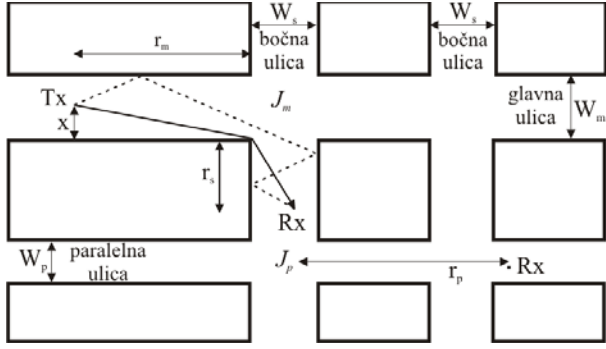
Geometrija tipičnog mikročelijskog urbanog modela za koji je razvijen model predstavljena je na Sl. 2. Širine glavne (u kojoj se nalazi predajnik  $T_x$ ), bočne i paralelne ulice iznose  $W_m$ ,  $W_s$  i  $W_p$ , respektivno. Predajnik se nalazi na udaljenosti  $x$  od zida ivice ulice i na rastojanju  $r_m$  od raskrsnice  $J_m$  između glavne i bočne ulice. U slučaju prijemnika  $R_x$  u bočnoj ulici model definiše rastojanje  $r_s$  od prijemnika do raskrsnice  $J_m$ . U slučaju prijemnika  $R_x$  u paralelnoj ulici model definiše rastojanje  $r_p$  od prijemnika do raskrsnice  $J_p$  između bočne i paralelne ulice.

Prilikom određivanja analitičke formule za propagaciono slabljenje u bočnoj ulici autori su iskoristili opservacije prezentovane u [6]. Naime, u slučaju kada se ili predajnik ili prijemnik nalaze u blizini raskrsnice  $J_m$  moguće je zanemariti difraktovanu komponentu (videti Sl. 2). Analitička formula za proračun propagacionog slabljenja u bočnoj ulici predstavljena je u [5]:

$$PL = 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{\lambda}{4r_{m,s} r_{s,m}^2} + \left( \frac{\lambda}{4\pi(r_m + r_s)} \right)^2 10^{\frac{L_w N_{min}}{10}}, r_{m,s} < r_{s,m} \right] \quad (7)$$

gde je  $L_w = 20 \log R_0$ ,  $N_{min}$  predstavlja minimalan broj refleksija [5], dok uslovna nejednakost podrazumeva sledeće:

$$\begin{aligned} r_{m,s} &= r_m, r_{s,m} = r_s \text{ ukoliko je } r_m < r_s \\ r_{m,s} &= r_s, r_{s,m} = r_m \text{ ukoliko je } r_m > r_s \end{aligned} \quad (8)$$



Slika 2. Definisane parametara Sun NLoS modela [5].

Analitička formula za propagaciono slabljenje u paralelnoj ulici sastoji se iz četiri člana, pri čemu svaki odgovara pojedinom tipu propagacione putanje od predajnika do prijemnika: 1) višestruke refleksije duž glavne, bočne i paralelne ulice, 2) dvostruka difrakcija na raskrsnicama  $J_m$  i  $J_p$ , 3) višestruke refleksije duž glavne i bočne ulice pa difrakcija na raskrsnici  $J_p$ , i 4) difrakcija na raskrsnici  $J_m$  pa višestruke refleksije duž paralelne ulice [5]:

$$PL = 10 \log \left( 10^{\frac{PL_R}{10}} + 10^{\frac{PL_{DD}}{10}} + 10^{\frac{PL_{DR}}{10}} + 10^{\frac{PL_{RD}}{10}} \right) \quad (9)$$

gde je:

$$PL_R = 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left( \frac{1}{r_s + r_m + r_p} \right)^2 \right] + L_W N_{min} \quad (10)$$

$$PL_{DD} = 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{r_s \lambda^2}{16 r_{m,s} r_{s,m} r_{s,p} r_{p,s}^2} \right] \quad (11)$$

$r_{m,s} < r_{s,m}, r_{s,p} < r_{p,s}$

$$PL_{RD} = 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{\lambda r_s^2}{4 (r_s + r_m)^2 r_{s,p} r_{p,s}^2} \right] + L_W N_{min} \quad (12)$$

$r_{s,p} < r_{p,s}$

$$PL_{DR} = 10 \log \left[ \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{\lambda}{4 r_{m,s+p} (r_{s+p,m})^2} \right] + L_W N \quad (13)$$

$r_{m,s+p} < r_{s+p,m}$

pri čemu je  $r_{s+p} = r_s + r_p$ ,  $N_{min}$  predstavlja minimalan broj refleksija duž glavne, bočne i paralelne ulice, dok  $N$  predstavlja broj refleksija unutar paralelne ulice [5].

Model je pokazao dobre performanse prilikom primene na razna mikročelijska okruženja u Tokiju i Njujorku [5]. Rezultati ukazuju da se doprinos reflektovanih komponenti u ukupnom prijemnom signalu smanjuje kako se prijemnik udaljava od raskrsnice, dok nasuprot tome doprinos difrakcije postaje sve izraženiji. Model radi potpuno razumno - uže bočne ulice uzrokuju veći broj refleksija, pa samim tim i veće slabljenje, što se na osnovu rezultata merenja takođe uočava.

### III. DETERMINISTIČKI MODELI

Do sada je razvijen veliki broj determinističkih modela predikcije za mikročelijsko okruženje [6-25]. Osnovne predstavnike ove grupe modela predstavljaju modeli zasnovani na primeni *ray-tracing* algoritma. U poslednjih nekoliko godina stavljen je poseban akcenat na razvijanju tehnika koje imaju za cilj povećavanje računске efikanosti *ray-tracing* modela.

#### A. Osnovni koncept *ray-tracing* algoritma

*Ray-tracing* modeli su zasnovani na primeni GO (*Geometrical Optics*) teorije koja uvodi pojam beskonačno uskog zraka (*ray*), preko kojeg se može modelovati energija koju emituje izvor. Uvođenje *ray* koncepta omogućilo je jednostavnije razumevanje različitih mehanizama propagacije, a samim tim i modelovanje istih.

#### B. Modelovanje različitih mehanizama propagacije

Nakon generisanja zraka potrebno je uspostaviti njegovu dalju putanju, a sve sa ciljem određivanja da li zrak dolazi na mesto prijema, kao i koliku energiju sa sobom donosi. Prilikom propagacije zrak može naići na prepreku pri čemu može doći do njegove refleksije, difrakcije ili rasejanja.

GO teorija, pored potencijalne direktne putanje između predajnika i prijemnika, razmatra još jedino mehanizam refleksije. Mehanizam difrakcije je sa stanovišta modelovanja prilično komplikovaniji od refleksije. Kako bi se u svet modelovanja radio propagacije uključio i mehanizam difrakcije razvijena je GTD (*Geometrical Theory of Diffraction*) teorija [7], kao i UTD (*Uniform Theory of Diffraction*) [8]. U poslednjih nekoliko godina razvijene su metode za određivanje trajektorije difraktovanih zraka u slučaju difrakcije o višestruke ivice [9]. Ova oblast i dalje predstavlja aktuelnu temu u oblasti modelovanja radio propagacije. Analitičko rešenje za proračun koeficijentata trostruke difrakcije prikazano je u [10]. Istraživanja su pokazala da viši redovi (preko tri) difrakcije ne doprinose značajno poboljšanju preformansi modela [11].

Mnogi modeli predikcije zanemaruju mehanizam rasejanja. Međutim, poređenjem rezultata merenja i rezultata *ray-tracing* simulacije u okviru [12] analizirana je i potvrđena važnost obračuna mehanizma rasejanja u slučaju urbanog okruženja. Trenutna dostignuća u pogledu modelovanja mehanizma rasejanja u slučaju urbanog okruženja prezentovana su u [13].

#### C. Osnovni *ray-tracing* metodi: *image*, SBR i hibridni metod

Najvažniji korak pri razvoju *ray-tracing* modela jeste određivanje trajektorije zraka od predajnika do prijemnika. U slučaju mikročelijskog okruženja broj zraka koje treba uzeti u obzir može biti jako veliki: potencijalni direktni zrak, zruci koji do mesta prijemnika stižu nakon određenog broja refleksija ili difrakcija, ili nakon bilo koje kombinacije ovih mehanizama propagacije. Određivanje trajektorije propagacije zraka jeste veoma težak i kompleksan zadatak, pa otuda ova oblast predstavlja aktuelnu istraživačku temu još od početka 90-ih godina prošlog veka. Osnovni algoritmi određivanja trajektorije zraka su *image* metod, SBR (*Shooting and Bouncing Ray*) metod i hibridni metod koji kombinuje prethodna dva.

**Image metod** - Osnovni koncept *image* metoda prikazan je na Sl. 3. Ovaj metod generiše slike (*image*) izvora za sve ravni koje ga okružuju. Pomoću ovog metoda jednostavno se određuju trajektorije zraka nakon refleksije. Dobijene slike izvora potom predstavljaju sekundarne izvore za naknadne refleksije koje slede, itd. Na taj način moguće je odrediti trajektorije u slučaju višestrukog broja refleksija. Međutim, u slučaju urbanog okruženja gde postoji veliki broj ravni refleksija, *image* metod postaje neefikasan [11]. Za kompleksnija okruženja efikasnije rešenje predstavlja SBR metod.

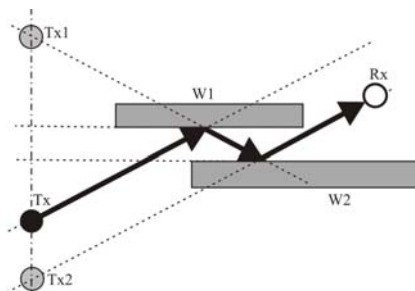
**SBR metod** - Osnovni koncept SBR metoda krije se u praćenju svakog pojedinačnog zraka, kako bi se ustanovilo da li posmatrani zrak dolazi do prijemnika. Metod se sastoji iz tri faze: 'lansiranje' zraka (*ray-launching*), praćenje zraka (*ray-tracing*) i prijem zraka (*ray reception*) [11]. *Ray-launching* podrazumeva kreiranje i lansiranje zraka sa mesta predajnika u okolinu. Prilikom toga zraci su uniformno raspoređeni i nose istu količinu energije. Nadalje je potrebno odrediti da li zrak prilikom propagacije nailazi na prepreku. Ukoliko zrak nailazi na prepreku potrebno je proračunati reflektovan ili difraktovan zrak. Prilikom implementacije osnovnog *ray-tracing* modela čak 90% vremena odlazi na sprovođenje testa o interakciji zraka i prepreke [11]. Poslednji korak uključuje test da li zrak dolazi na mesto prijema i obračun udela snage koji taj zrak doprinosi u prijemnom signalu.

**Hibridni metod** - Iako je SBR metod jednostavniji za implementaciju, *image* metod preciznije određuje trajektoriju zraka. Kako bi se iskombinovale prednosti SBR (računska efikasnost) i *image* (preciznija trajektorija) metode, u [6] je razvijen hibridni metod. Hibridni metod prvo implementira SBR metod kako bi odredio validne trajektorije zraka koje stižu do prijemnika. Nakon toga primenom *image* metoda vrši se korekcija i precizno određivanje ovih trajektorija. Imajući na umu da je broj zraka koji stižu na mesto prijema daleko manji od broja lansiranih zrakova, jasno je da se primenom ovakve metode značajno dobija na računskoj efikasnosti.

#### D. Napredni *ray-tracing* modeli

U tekstu koji sledi opisani su neki od osnovnih algoritama efikasnije implementacije *ray-tracing* modela, koji su razvijeni u poslednjih nekoliko godina.

**Deljenje prostora** - Ovaj metod podrazumeva deljenje propagacionog okruženja na male ćelije. Za svaku ćeliju se definišu njoj susedne ćelije. Prilikom prorogacije zraka sledeća ćelija u koju ulazi zrak može se jednostavno odrediti na osnovu liste suseda ćelije u kojoj se zrak trenutno nalazi.



Slika 3. *Image* metod - osnovni princip.

Implementacija *ray-tracing* modela u slučaju uniformnog deljenja prostora prikazana je u [14]. Za svaki objekat definišu se ćelije kojima taj objekat pripada, kao što se i za svaku ćeliju definišu objekti koji njoj pripadaju. Najvažniji korak pri implementaciji ove metode jeste određivanje sledeće ćelije na putu propagacije zraka, i on se zapravo svodi na proste matematičke operacije sabiranja i poređenja [11]. Za svaku ćeliju sprovodi se testiranje da li zrak dolazi u kontakt sa objektima koji se nalaze samo u toj ćeliji. Imajući u vidu da je broj objekata u jednoj ćeliji značajno manji od ukupnog broja objekata u okruženju postaje jasno da ovakva metoda prilično povećava računsku efikasnost modela. Međutim, efikasnost metoda uniformne podele prostora značajno se degradira u slučaju okruženja sa neuniformno raspoređenim objektima. Podela prostora na trouglove [15] je takođe jedan od metoda koji doprinosi povećanju efikasnosti *ray-tracing* modela.

**Dvodimenzionalna aproksimacija** - U cilju povećanja računске efikasnosti *ray-tracing* modela često se 3D okruženje projektuje u odgovarajući 2D scenario, nad kojim se potom sprovodi sam model. U okviru [16] Rizk je razvio 2D model za mikroćelijsko okruženje čiji rezultati pokazuju visok nivo podudarnosti sa merenjima. Jedan potpuno drugačiji 2D koncept, VPL (*Vertical Plane Launch*) model, razvijen je u [17]. VPL model pokazuje veoma dobre rezultate predikcije u slučaju kada je prosečna visina građevina u okruženju približno identična visini predajnika [18].

**Implementacija na GPU** - U poslednjih nekoliko godina veliki broj istraživanja posvećen je primeni GPU (*Graphical Processing Unit*) jedinice u cilju povećanja računске efikasnosti mnogih aplikacija. GPU jedinica je našla svoju primenu i u *ray-tracing* modelovanju radio kanala. Značajno povećanje računске efikasnosti *beam-tracing* modela radio propagacije u urbanom okruženju zasnovanog na primeni GPU jedinice pokazano je u [19]. OptiX, programabilni *ray-tracing* metod opšte namene koji je dizajniran za NVIDIA GPU jedinicu, može se iskoristiti za povećavanje performansi *ray-tracing* algoritma [20], i veoma je efikasan u pronalaženju validnih propagacionih putanja od predajnika do prijemnika.

Pored već pomenutih, u literaturi se može sresti još veliki broj različitih metoda koji povećavaju efikasnost *ray-tracing* modela. U [21] predstavljen je pojednostavljeni algoritam za otkrivanje trajektorije zraka do mesta prijema, koji za to koristi tzv. *point-to-point ray-launching* algoritam i kreira *visibility* graf. U [22] uvođenjem tzv. *illumination* zona smanjuje se broj *image* izvora koje treba uzeti u obzir, čime se značajno povećava efikasnost *ray-tracing* modela. Uvođenjem pojma *active part* u okviru [23] predstavljen je još jedan metod poboljšanja performansi modela a da se pritom ne narušavaju rezultati predikcije. Ovaj metod zasnovan je na uprošćavanju ulazne baze podataka na taj način što se iz baze izostavljaju oni objekti koji ne utiču značajno na samu propagaciju radio signala.

Treba napomenuti da precizno modelovanje propagacionog okruženja igra veoma važnu ulogu pri razvoju *ray-tracing* modela. Uticaj preciznosti ulazne baze podataka na rezultate predikcije *ray-tracing* modela za mikroćelijsko urbano okruženje analiziran je u [24]. U [25] pokazano je da greška do 1m u poziciji građevina nema uticaja na rezultate predikcije.



U godinama koje slede očekuje se dalji razvoj *ray-tracing* modela predikcije. Prvo, u poslednjih nekoliko godina došlo je do naglog razvoja javno dostupnih aplikacija kao što su npr. *Google Earth* i *Google Maps*. Upravo posredstvom ovih aplikacija moguće je generisati ulazne baze podataka za modelovanje radio propagacije. Nema sumnje da će ovakve baze podataka s vremenom dobijati na rezoluciji i nivou detalja koji uključuju. Drugo, *ray-tracing* simulacije će biti inteligentne u pogledu određivanja nivoa detalja okruženja koje treba koristiti u zavisnosti od razmatranog okruženja. Treće, upotrebom savremenih hardverskih i softverskih rešenja biće dodatno podignute računске performanse modela [11].

#### IV. MACHINE LEARNING MODELI PREDIKCIJE

U cilju postizanja kompromisa između dva oprečna zahteva koji se pred modele postavljaju, a to su tačnost i računska efikasnost, razvijeni su modeli predikcije za mikroćelijsko okruženje bazirani na primeni *machine learning* algoritama. Model baziran na neuralnim mrežama razvijen je u [26], dok je u [27] razvijen model zasnovan na primeni SVM algoritma.

##### A. ANN model

ANN mreže ispoljavaju veoma dobre performanse prilikom rešavanja nelinearnih problema na skupu podataka u kojima je prisutan šum. Takav problem u postpunosti odgovara problemu predikcije nivoa električnog polja. Veoma važna osobina ANN mreža predstavlja unutrašnji paralelizam, koji omogućava brzo pronalaženje rešenja. Proces treniranja ANN mreže može trajati nekoliko sati, ali sama predikcija nivoa električnog polja je dosta brza i traje nekoliko minuta. Model predstavljen u [26] baziran je na primeni ANN mreže u formi višenivovskog perceptrona (*multilayer perceptron*).

##### B. SVM model

SVM model predstavljen u [27] bazira se na primeni SVM algoritma u otkrivanju zavisnosti koja postoji među ulaznim skupom podataka. Pri razvoju SVM modela izvršena je analiza primene četiri različite kernel funkcije: linearna, polinomska, rbf (*radial basis function*) i erbf (*exponential rbf*) kernel funkcija.

##### C. Razvoj ANN i SVM modela

U cilju razvoja i verifikacije ANN i SVM modela, sprovedena su merenja nivoa električnog polja za različite lokacije predajnika u gradu Beogradu. Modeli su realizovani u frekvencijskom opsegu od 900MHz. Rezultati merenja ukazuju na veoma veliki dinamički opseg nivoa električnog polja (preko 80 dB).

Implementacija ANN i SVM modela zahteva bazu podataka dobijenu na osnovu 2D plana mikroćelije, pri čemu je okruženje klasifikovano u pet kategorija. Najjednostavniji način da se izvrši klasifikacija jeste da se napravi kolor slika okruženja na osnovu fotografije iz vazduha. Definisano je pet različitih kategorija okruženja: građevina, glavna ulica, široka bočna ulica, uska bočna ulica, i paralelna ulica ili dvorište. ANN i SVM modeli imaju 12 ulaznih parametara i jedan izlaz (normalizovani nivo električnog polja). Svi ulazni parametri određuju se automatski na osnovu baze podataka 2D plana

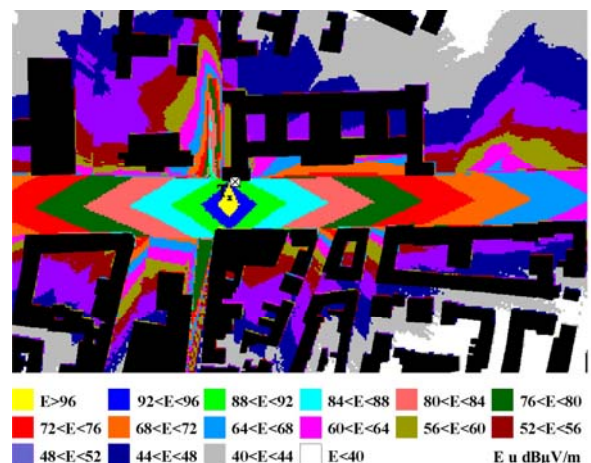
okruženja: normalizovano rastojanje između predajnika i prijemnika; procenat zastupljenosti svih pet kategorija okruženja (građevina, glavna ulica, široka bočna ulica, uska bočna ulica i paralelna ulica ili dvorište) na direktnoj putanji Tx-Rx; normalizovani broj građevina, širokih i uskih bočnih ulica na direktnoj putanji Tx-Rx; normalizovano rastojanje između prijemnika i glavne ulice; relativni težinski faktor koji opisuje tip okruženja u blizini prijemnika; normalizovani ugao između pravca glavne ulice i pravca direktne Tx-Rx linije. Određivanje parametara ANN i SVM modela je dosta jednostavan proces. Nikakva statistička analiza nije neophodna. Treniranje ANN mreže i SVM algoritma sprovodi se nad skupom rezultata merenja. Proces treniranja može biti računski zahtevan, ali njega je potrebno spovesti samo jednom. Sa druge strane, nakon sprovedenog procesa treniranja predikcija nivoa električnog polja za tipično mikroćelijsko okruženje je dosta brza i traje nekoliko minuta.

##### D. Analiza performansi ANN i SVM modela

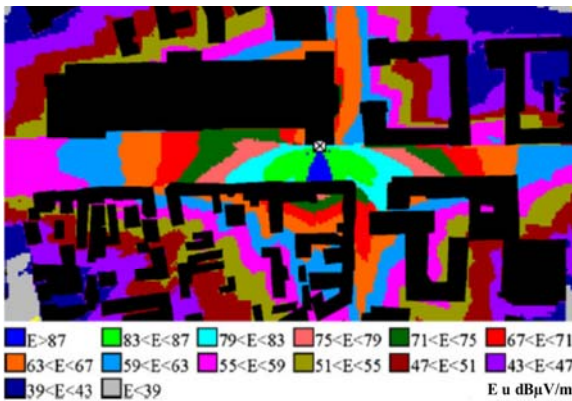
Na Sl. 4 i Sl. 5 prikazani su rezultati predikcije nivoa električnog polja primenom razvijenih ANN i SVM modela, respektivno. Razvijeni ANN i SVM modeli za mikroćelijsko okruženje pokazuju dobre performanse koje se mogu porediti sa performansama popularnih *ray-tracing* modela. Rezultati predikcije pokazuju da ANN i SVM modeli automatski, čak bez znanja autora, uzimaju u obzir pojedine efekte urbanizacije (npr. uticaj vegetacije), što doprinosi većoj tačnosti ovih modela u odnosu na postojeće empirijske modele. ANN i SVM modeli pokazuju dobre performanse i kada se primene na novo okruženje, koje nije bilo obuhvaćeno mernom kampanjom.

#### V. ZAKLJUČAK

U cilju kvalitetnog dizajniranja i implementacije mikroćelijskih mobilnih sistema neophodni su tačni, pouzdani i efikasni modeli predikcije radio propagacije. Razvijen je veliki broj mikroćelijskih modela predikcije. Međutim, jedan opšti model koji je moguće primeniti za različite tipove mikroćelijskih okruženja i dalje nije pronađen. U ovom radu izvršen je pregled empirijskih, determinističkih, i *machine learning* modela predikcije za mikroćelijsko okruženje. Svaki od ovih modela ima svoje prednosti, ali i neodstatke.



Slika 4. Primer rezultat ANN modela predikcije.



Slika 5. Primer rezultat SVM modela perdikcije.

U cilju razvoja kvalitetnog modela potrebna su dalja istraživanja kako bi se unapredila tačnost i povećala računska efikasnost postojećih modela. Ovaj rad daje pregled trenutnih dostignuća u oblasti modelovanja radio propagacije i predstavlja dobru osnovu za dalja istraživanja u ovoj oblasti. Svakako da će dalja tehnološka dostignuća, nova napredna softverska i hardverska rešenja, značajno uticati na pravac koji će modelovanje radio kanala slediti.

#### LITERATURA

- [1] P. Harley, "Short distance attenuation measurements at 900 MHz and 1.8 GHz using low antenna heights for microcells," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 7, no. 1, pp. 5-11, Jan. 1989.
- [2] H. Xia, L. Bertoni, R. Maciel, A. Lindsay-Stewart, i R. Rowe, "Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communication," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 41, no. 10, pp. 1439-1447, Okt. 1993.
- [3] Y. Oda, K. Tsunekawa, i M. Hata, "Advanced LOS path-loss model in microcellular mobile communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 6, pp. 2121-2125, Nov. 2000.
- [4] W. Zhang i N. Moayeri, "Closed-form expressions for the prediction of microcellular mobile radio propagation in urban environments," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 5, pp. 952-956, Maj 2003.
- [5] Q. Sun, S.Y. Tan, i K. Teh, "Analytical formulae for path loss prediction in urban street grid microcellular environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 4, pp. 1251-1258, Jul 2005.
- [6] S.Y. Tan i H.S. Tan, "A microcellular communications propagation model based on the uniform theory of diffraction and multiple image theory," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 44, no. 10, pp. 1317-1326, Okt. 1996.
- [7] R. Luebbers, "Finite conductivity uniform GTD versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 32, no. 1, pp. 70-76, Jan. 1984.
- [8] R.G. Kouyoumjian i P.H. Pathak, "A uniform theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 11, pp. 1448-1461, Nov. 1974.
- [9] G. Carluccio i M. Albani, "An efficient ray tracing algorithm for multiple straight wedge diffraction," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 11, pp. 3534-3542, Nov. 2008.
- [10] G. Carluccio, F. Puggelli, i M. Albani, "A UTD triple diffraction coefficient for straight wedges in arbitrary configuration," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 12, pp. 5809-5817, Dec. 2012.
- [11] Z. Yun i M. Iskander, "Ray tracing for radio propagation modeling: Principles and applications," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1089-1100, 2015.
- [12] F. Fuschini i drugi, "Analysis of multipath propagation in urban environment through multidimensional measurements and advanced ray tracing simulation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 3, pp. 848-857, Mart 2008.
- [13] E.M. Vitucci, F. Mani, V. Degli-Esposti, i C. Oestges, "Polarimetric properties of diffuse scattering from building walls: Experimental parameterization of a ray-tracing model," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 6, pp. 2961-2969, Jun 2012.
- [14] Z. Yun, M. Iskander, i Z. Zhang, "Fast ray tracing procedure using space division with uniform rectangular grid," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 10, pp. 895-897, Maj 2000.
- [15] Z. Yun, Z. Zhang, i M. Iskander, "A ray-tracing method based on the triangular grid approach and application to propagation prediction in urban environments," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 50, no. 5, pp. 750-758, Maj 2002.
- [16] K. Rizk, J. Wagen, i F. Gardiol, "Two-dimensional ray-tracing modeling for propagation prediction in microcellular environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 508-518, Maj 1997.
- [17] G. Liang i H. Bertoni, "A new approach to 3-D ray tracing for propagation prediction in cities," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 46, no. 6, pp. 853-863, Jun 1998.
- [18] K. Rizk, R. Valenzuela, S. Fortune, D. Chizhik, i F. Gardiol, "Lateral, full-3D and vertical plane propagation in microcells and small cells," *Proc. 48th IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2, pp. 998-1003, Maj 1998.
- [19] A. Schmitz, T. Rick, T. Karolski, L. Kobbelt, i T. Kuhlen, "Beam tracing for multipath propagation in urban environments," *Proc. 3rd Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 2631-2635, Mart 2009.
- [20] R. Felbecker, L. Raschkowski, W. Keusgen, i M. Peter, "Electromagnetic wave propagation in the millimeter wave band using the NVIDIA OptiX GPU ray tracing engine," *Proc. 6th Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 488-492, Mart 2011.
- [21] F. Agelet, A. Formella, J. Rabanos, F. de Vicente, i F. Fontan, "Efficient ray-tracing acceleration techniques for radio propagation modeling," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 6, pp. 2089-2104, Nov. 2000.
- [22] G. Athanasiadou, A. Nix, i J. McGeehan, "A microcellular ray-tracing propagation model and evaluation of its narrow-band and wide-band predictions," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 322-335, Mart 2000.
- [23] V. Degli-Esposti, F. Fuschini, E. M. Vitucci, i G. Falciascecca, "Speedup techniques for ray tracing field prediction models," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 5, pp. 1469-1480, Maj 2009.
- [24] K. Rizk, J.F. Wagen, i F. Gardiol, "Influence of database accuracy on two-dimensional ray-tracing-based predictions in urban microcells," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 631-642, Mart 2000.
- [25] G. Athanasiadou i A. Nix, "Investigation into the sensitivity of the power predictions of a microcellular ray tracing propagation model," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 1140-1151, Jul 2000.
- [26] A. Nešković i N. Nešković, "Microcell electric field strength prediction model based upon artificial neural networks," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, Elsevier, vol. 64, pp. 733-738, Maj 2009.
- [27] V. Slavković, A. Nešković, i N. Nešković, "Microcell prediction model based on support vector machine algorithm," *Ann. Telecommun.*, Springer, vol. 69, no. 1, pp. 123-129, Feb. 2014.

#### ABSTRACT

A survey of various microcell prediction models is presented in this paper. The basic and most commonly used empirical and deterministic models, as well as recently developed models based on the application of machine learning algorithms, are described. This paper gives an overview of the current breakthrough in the field of radio propagation modeling and it presents good basis for further research in this area.

#### A SURVEY OF VARIOUS MICROCELL ELECTRIC FIELD STRENGTH PREDICTION MODELS

Vladimir Slavković, Aleksandar Nešković, Nataša Nešković