

Pregled determinističkih 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 radu je izvršen pregled determinističkih modela predikcije nivoa električnog polja. Predočene su njihove prednosti kao i nedostaci. Među velikim brojem determinističkih modela razvijenih u proteklih nekoliko godina, posebno su se izdvojili modeli zasnovani na primeni *ray-tracing* i FDTD (*Finite Difference Time Domain*) metoda. U radu je posebna pažnja posvećena hibridnom modelu koji, u cilju postizanja kompromisa između tačnosti i računске efikasnosti, kombinuje *ray-tracing* i FDTD metode. Rad daje uvid u trenutna dostignuća i ukazuje na smerove budućeg razvoja u ovoj oblasti.

Ključne riječi—deterministički modeli; FDTD; hibridni modeli; parflow algoritam; radio propagacija; *ray-tracing*.

I. UVOD

Cilj svakog mobilnog operatora jeste da izgradi veliki i pouzdan sistem koji krajnjem korisniku nudi usluge visokog kvaliteta. Pri dizajnu kvalitetnog mobilnog sistema neophodno je implementirati propagacione modele čija je osnovna uloga modelovanje bežičnog radio kanala.

Propagacioni modeli mogu biti klasifikovani u četiri grupe: 1) deterministički; 2) statistički; 3) hibridni modeli i 4) modeli zasnovani na primeni *machine learning* algoritama (kao što su neuralne mreže i *Support Vector Machine* algoritmi).

Deterministički modeli [1]-[12] su bazirani na principima fizičke propagacije signala, pa se stoga mogu primeniti na različita okruženja bez uticaja na tačnost predikcije. Osnovni problem determinističkih modela predstavlja njihova računska efikasnost. U poslednjih nekoliko godina razvijen je veliki broj tehnika u cilju podizanja računске efikasnosti ovih modela. Predstavnik ove grupe predstavljaju modeli bazirani na implementaciji: 1) *ray-tracing* algoritma; 2) FDTD (*Finite Difference Time Domain*) metoda i 3) modeli koji kombinuju *ray-tracing* i FDTD metode. Statistički ili empirijski modeli zasnovani su na rezultatima eksperimentalnih merenja koji se sprovode prilikom razvoja modela [13], [14]. Problem koji ispoljavaju statistički modeli odnosi se na njihovu tačnost. Koristeći prednosti, a ujedno i otklanjajući nedostatke statističkih i determinističkih modela, hibridni modeli teže postizanju kompromisa između tačnosti i računске efikasnosti. U poslednjih nekoliko godina razvijeni su i modeli zasnovani na primeni neuralnih mreža i SVM algoritama koji takođe imaju za cilj postizanje kompromisa između tačnosti i računске efikasnosti [15], [16].

U ovom radu izvršen je pregled determinističkih modela predikcije nivoa električnog polja. Porast performansi i

računске efikasnosti današnjih računara omogućio je u dobroj meri implementaciju *ray-tracing* i FDTD modela čak i u slučaju kompleksnih radio okruženja. Posebna pažnja posvećena je hibridnom modelu koji kombinuje ova dva metoda.

II. RAY-TRACING MODELI

Ray-tracing (RT) modeli su zasnovani na primeni GO (*Geometrical Optics*) teorije. Kako bi se modelovalo emitovanje energije sa mesta predajnika u okviru ovih modela uvodi se pojam beskonačno uskog zraka (*ray*). Nakon generisanja zraka potrebno je uspostaviti njegovu dalju putanju do tačke prijema. 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 [2], [3]. Poređenjem rezultata merenja i rezultata *ray-tracing* simulacije u okviru [4] analizirana je i potvrđena važnost obračuna mehanizma rasejanja u slučaju urbanog okruženja.

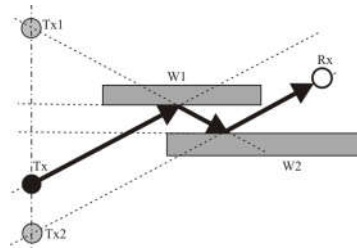
Najvažniji korak pri razvoju *ray-tracing* modela jeste određivanje trajektorije zraka od predajnika do prijemnika, što predstavlja veoma težak i kompleksan zadatak. Osnovni algoritmi određivanja trajektorije zraka su *image* metod, SBR (*Shooting and Bouncing Ray*) metod i hibridni metod koji kombinuje prethodna dva.

A. Image metod

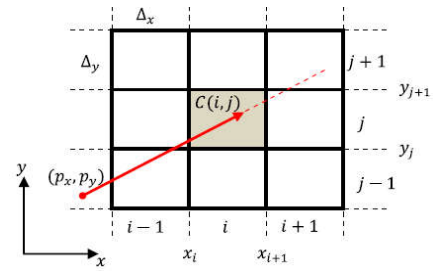
Ovaj metod generiše slike (*image*) izvora za sve ravni koje ga okružuju (videti Sl. 1). Pomoću ovog metoda jednostavno se određuju trajektorije zraka nakon refleksije. Dobijene slike izvora potom predstavljaju sekundarne izvore za naknadne refleksije koje slede, itd. Međutim, u slučaju urbanog okruženja gde postoji veliki broj ravni refleksija, *image* metod postaje neefikasan [1]. Za kompleksnija okruženja efikasnije rešenje predstavlja SBR metod.

B. 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: *ray-launching*, *ray-tracing* i *ray reception* [1]. *Ray-launching* podrazumeva kreiranje i lansiranje zraka sa mesta predajnika u okolinu. Nadalje je potrebno odrediti da li zrak prilikom



Slika 1. Image metod - osnovni princip.



Slika 2. Ilustracija metode uniformnog deljenja prostora [1].

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 [1]. Poslednji korak uključuje test da li zrak dolazi na mesto prijema i obračun udela snage koji taj zrak doprinosi u prijemnom signalu.

C. Hibridni metod

Iako je SBR metod jednostavniji za implementaciju, *image* metod preciznije određuje trajektoriju zraka. Kako bi se iskombinovala prednosti SBR (računska efikasnost) i *image* (preciznija trajektorija) metode, u [5] je razvijen hibridni RT 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.

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. Implementacija *ray-tracing* modela u slučaju uniformnog deljenja prostora prikazana je u [6]. 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 [1]. Na Sl. 2 prikazan je 2D primer procedure deljenja prostora. 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.

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 [7] 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 [8].

Implementacija na GPU - Značajno povećanje računске efikasnosti *beam-tracing* modela radio propagacije u urbanom okruženju zasnovanog na primeni GPU (*Graphical Processing Unit*) jedinice pokazano je u [9]. OptiX, programabilni *ray-tracing* metod opšte namene koji je dizajniran za NVIDIA GPU jedinicu veoma je efikasan u pronalaženju validnih propagacionih putanja [10].

III. FDTD MODEL

Značajan porast performansi računara u poslednjih nekoliko godina omogućio je implementaciju FDTD metoda pri razvoju propagacionih modela u kompleksnim radio okruženjima. FDTD metod omogućava numeričko rešenje *Maxwell*-ovih jednačina [17] na diskretnoj *space-time* mreži (prostor i vreme izdeljeni na konačne elemente). Prekretnica koja je omogućila primenu FDTD metoda u razvoju propagacionih modela predstavlja mogućnost njegove paralelne realizacije na današnjim multiprocesorskim računarima [11]. Dodatno, sve veće interesovanje vlada za implementaciju FDTD metoda na GPU (*Graphical Processor Unit*) [18].

Ukoliko je rezolucija *space-time* mreže velika, odnosno ukoliko je ćelija mreže dovoljno mala, moguće je ispravno modelovati sve prepreke unutar okruženja, čak i one sitne, što rezultuje zavidnom tačnošću modela. S druge strane, ovo može prouzrokovati visoke zahteve po pitanju memorijskih resursa, a ujedno dovesti u pitanje računsku efikasnost modela. Međutim, ovaj problem moguće je preduprediti sprovođenjem FDTD modela na nižoj frekvenciji od one stvarne, što zapravo omogućava definisanje rezolucije niže od zahtevane. U tom slučaju neophodno je izvršiti kalibraciju električnih parametara materijala objekata *indoor* okruženja.

Iako implementacija FDTD metoda u vremenskom domenu obezbeđuje *wideband* simulacije, konvergencija takvog modela je dosta spora. Pristup koji omogućava značajno bržu konvergenciju FDTD metoda predstavlja njegova implementacija u frekvencijskom domenu. Gorce je u [12] razvio MR-FDPF (*MultiResolution Frequency-Domain ParFlow*) metod, koji predstavlja efikasno rešenje FDTD problema u frekvencijskom domenu u slučaju *indoor* okruženja.

A. ParFlow algoritam

PF (*Partial Flows*) pristup, predstavljen u [19], zasniva se na dekompoziciji vektora električnog polja na četiri *outward* toka \vec{f}_i , gde $i \in \{E, W, S, N\}$ označava smer toka, i na jedan stacionarni tok \vec{f}_0 . *Outward* tokovi (sa strelicom na desno)

određenog piksela istovremeno predstavljaju *inward* (sa strelicom na levo) tokove njemu susjednog piksela. Matematički zapis PF pristupa definisan je u [12]:

$$\vec{F}(r,t) = \Sigma(r) \cdot \vec{F}(r,t-dt) + \vec{S}(r,t) \quad (1)$$

$$\vec{F}(r,t) = P(r) \cdot \vec{F}(r,t) \quad (2)$$

gde je dt vremenska rezolucija, $\vec{S}(r,t)$ predstavlja izvorni tok na poziciji r , $\Sigma(r)$ je lokalna *scattering* matrica, a $P(r)$ predstavlja lokalnu matricu permutacije, i pri tom:

$$\begin{aligned} \vec{F}(r,t) &= \begin{pmatrix} \vec{f}_E \\ \vec{f}_W \\ \vec{f}_S \\ \vec{f}_N \\ \vec{f}_0 \end{pmatrix}^T \\ \vec{F}(r,t) &= \begin{pmatrix} \vec{f}_E \\ \vec{f}_W \\ \vec{f}_S \\ \vec{f}_N \\ \vec{f}_0 \end{pmatrix}^T \end{aligned} \quad (3)$$

Kombinovanjem (1) i (2) vremenski oblik PF pristupa postaje :

$$\vec{F}(r,t) = \Omega(r) \cdot \vec{F}(r,t-dt) + \vec{S}(r,t) \quad (4)$$

gde je $\Omega(r)$ lokalnu matricu propagacije i predstavlja proizvod matrica $P(r)$ i $\Sigma(r)$.

B. FDPF algoritam

Kako bi se smanjilo proračunsko opterećenje PF pristup je implementiran u frekvencijskom domenu (FDPF) što se jednostavno postiže primenom *Fourier*-ove transformacije na jednačinu (4):

$$\vec{F}(r,\nu) = \Omega(\nu) \cdot e^{-j2\pi\nu dt} \cdot \vec{F}(\nu) + \vec{S}(\nu) \quad (5)$$

Jednačina (5) prerasta u inverzni linearni problem ukoliko se razmatra samo jedna frekvencija, a to potpuno odgovara problemu predikcije nivoa električnog polja. Važna posledica formulacije PF metoda u frekvencijskom domenu jeste da se lokalni *inner* tokovi mogu eliminisati pri daljem proračunu. Ukoliko se relacija (1) zapiše u sledećem obliku:

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_e(r) \\ \vec{F}(r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma_{ee}(r) & \Sigma_{ei}(r) \\ \Sigma_{ie}(r) & \Sigma_{ii}(r) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{F}_e(r) \\ \vec{F}(r) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \vec{S}_e(r) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

pri čemu je *scattering* matrica podeljena na četiri bloka koji uključuju ili *inner* (i) ili *exchange* (e) tokove, dok su *outward*, *inward* i *inner* tokovi definisani na sledeći način [12]:

$$\begin{aligned} \vec{F}_e(r) &= \begin{pmatrix} \vec{f}_E(r) & \vec{f}_W(r) & \vec{f}_S(r) & \vec{f}_N(r) \end{pmatrix} \\ \vec{F}(r) &= \begin{pmatrix} \vec{f}_E(r) & \vec{f}_W(r) & \vec{f}_S(r) & \vec{f}_N(r) \end{pmatrix} \text{ i } \vec{F}(r) = \vec{f}_0(r). \end{aligned} \quad (7)$$

Eliminisanjem *inner* toka $\vec{F}(r)$ dolazi iz (6) dobija se:

$$\vec{F}_e(r) = \Sigma_e(r) \cdot \vec{F}_e(r) + \vec{S}_e(r) \quad (8)$$

pri čemu je:

$$\Sigma_e(r) = \Sigma_{ee}(r) + \Sigma_{ei}(r) \cdot (I_d - \Sigma_{ii}(r))^{-1} \cdot \Sigma_{ie}(r) \quad (9)$$

Konačno, lokalni FDPF metod sada opisuje sledeća relacija:

$$\vec{F}_e(r) = \Omega_e(r) \cdot \vec{F}_e(r) + \vec{S}_e(r) \quad (10)$$

Relacija (10) dovodi do linearnog inverznog PF problema:

$$(I_d - \underline{\Omega}_e) \cdot \vec{F}_e = \vec{S}_e \quad (11)$$

gde je $\underline{\Omega}_e$ propagaciona matrica. Dosta efikasno rešenje kompleksnog inverznog problema (10) predstavljeno je u [12]:

$$\vec{F}_e = \sum_{k=0}^{\infty} (\underline{\Omega}_e)^k \cdot \vec{S}_e = \vec{S}_e + \underline{\Omega}_e \cdot \vec{S}_e + (\underline{\Omega}_e)^2 \cdot \vec{S}_e + \dots \quad (12)$$

C. MR-FDPF algoritam

Gorce je u [12] predstavio MR-FDPF algoritam koji efikasno rešava FDPF sistem definisan relacijom (11). MR-FDPF algoritam deli čitavo okruženje na MR-čvorove. MR-čvor predstavlja pravougaoni skup piksela pri čemu je svakoj strani čvora dodeljen vektor toka (videti Sl. 3). Tokovi između dva piksela istog MR-čvora predstavljaju *inner* tokove čvora. Tokovi koji spajaju interni piksel čvora i neki eksterni piksel predstavljaju *exchange* tokove (*outward* ili *inward* u zavisnosti od pravca usmerenja).

Neka je posmatrano okruženje podeljeno na MR-čvorove fiksne veličine. Nadalje su ovi čvori označeni sa b_k^l , gde k predstavlja broj čvorova na nivou l . Objedinjavanjem lokalnih jednačina za sve piksela MR-čvora b_k^l generiše se *scattering* jednačina MR-čvora::

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_e(k) \\ \vec{F}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma_{ee}(k) & \Sigma_{ei}(k) \\ \Sigma_{ie}(k) & \Sigma_{ii}(k) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{F}_e(k) \\ \vec{F}(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \vec{S}_{0,e}^l(k) \\ \vec{S}_{0,i}^l(k) \end{pmatrix} \quad (13)$$

gde radi jednostavnosti k predstavlja čvor b_k , $\vec{F}(k)$ predstavlja vektor *inner* toka koji uključuje sve *inner* tokove odgovarajućeg MR-čvora, dok $\vec{S}_{0,e}^l$ i $\vec{S}_{0,i}^l$ predstavljaju projekcije izvora (0)-nivoa na (l)-nivo. Eliminisanjem $\vec{F}(k)$ iz relacije (17) dolazi se do *scattering* jednačine MR-čvora:

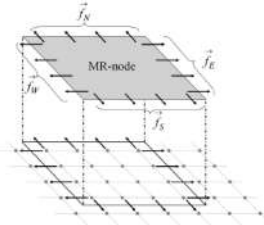
$$\vec{F}_e(k) = \Sigma_e(k) \cdot \vec{F}_e(k) + \vec{S}_e(k) \quad (14)$$

pri čemu je:

$$\Sigma_e(k) = \Sigma_{ee}(k) + \Sigma_{ei}(k) \cdot (I_d - \Sigma_{ii}(k))^{-1} \cdot \Sigma_{ie}(k) \quad (15)$$

$$\vec{S}_e(k) = \vec{S}_{0,e}^l(k) + \Sigma_{ei}(k) \cdot (I_d - \Sigma_{ii}(k))^{-1} \cdot \vec{S}_{0,i}^l(k) \quad (16)$$

Ukoliko su *scattering* matrice (l)-nivoa poznate predikciju je moguće sprovesti primenom rekurzivnog algoritma predstavljenog u [12].



Slika 3. Definicija MR-čvora i njegovih tokova.

Problem koji u ovom trenutku izrasta jeste izbor odgovarajuće veličine MR-čvora. Ukoliko je MR-čvor isuviše veliki, broj čvorova se mali, ali je druge strane *scattering* matrica MR-čvora se velika. MR-FDPF metod rešava ovaj problem primenom rekurzivnog algoritma koji podrazumeva spajanje manjih čvorova u veće. Dva susedna *child* (l)-čvora b_i^l i b_j^l se spajaju i time kreiraju *father* ($l+1$)-čvor b_k^{l+1} .

U [12] pokazano da za *father* čvor važi sledeća *scattering* jednačina:

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_e(k) \\ \vec{F}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma_{ee}(k) & \Sigma_{ei}(k) \\ \Sigma_{ie}(k) & \Sigma_{ii}(k) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{F}_e(k) \\ \vec{F}(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \vec{S}_{l,e}^{l+1}(k) \\ \vec{S}_{l,i}^{l+1}(k) \end{pmatrix} \quad (17)$$

gde su $\vec{S}_{l,e}^{l+1}$ i $\vec{S}_{l,i}^{l+1}$ projekcije izvora (l)-nivoa na ($l+1$)-nivo. Prvi korak u sprovođenju MR-FDPF algoritma predstavlja generisanje binarnog stabla što zapravo podrazumeva podelu čitavog okruženja na MR-čvorove. Sukcesivnim spajanjem MR-čvorova, počevši od (0)-nivoa kao *child* čvora pa sve dok ne dostigne *head* čvor (L)-nivoa koji obuhvata čitavo okruženje, MR-FDPF algoritma efikasno koristi strukturu prethodno kreiranog binarnog stabla. Predikcija na čitavom okruženju odvija se u dve faze: 1) *bottom-up*, i 2) *top-down* faza.

Kroz *bottom-up* fazu rekurzivno se proračunavaju formulacije ($l+1$)-nivoa na osnovu formulacija (l)-nivoa. Kako se tokovi razmenjuju između oba *child* čvora, u stabilnom stanju za *inner* tok važi:

$$\vec{F}(k) = I(k) \cdot \vec{S}_0(k) \quad (18)$$

gde je:

$$I(k) = (I_d - \Sigma_{ii}(k))^{-1} \quad (19)$$

lokalna *inner* matrica i mora biti određena pre sprovođenja procesa predikcije za svaki potencijalni izvorni čvor. Nakon toga određuju se *outward* tokovi izvorišnog MR-čvora, čime se obezbeđuje ekvivalentni izvorni čvor:

$$\vec{S}_e(k) = \vec{S}_{0,e}(k) + U(k) \cdot \vec{F}(k) \quad (20)$$

gde je $U(k)$ lokalna *upward* matrica i ona preslikava *inner* tokove stabilnog stanja u *exchange* tokove:

$$U(k) = \Sigma_{ei}(k) \quad (21)$$

Bottom-up faza se završava kada se dostigne *head* čvor.

Top-down faza podrazumeva proračun *inner* tokova u svakom MR-čvoru na osnovu *inward* tokova. Ova faza počinje na (L)-nivou i završava se na (0)-nivou. Na početku *top-down* faze *inward* tokovi *head* čvora određeni su граниčnim uslovima. *Inner* tokovi svakog čvora proračunavaju se na osnovu vrednosti prethodno određenih *inward* tokova:

$$\vec{F}(k) = \begin{cases} I(k) \cdot D(k) \cdot \vec{F}_e(k) & k \text{ nije izvorišni čvor} \\ I(k) \cdot D(k) \cdot \vec{F}_e(k) + \vec{F}(k) & k \text{ je izvorišni čvor} \end{cases} \quad (22)$$

gde $D(k) = \Sigma_{ie}(k)$ je takozvana *downward* matrica:

$$D(k) = \Sigma_{ie}(k) \quad (23)$$

Algoritam je završen kada se dostigne nivo $l=1$ čime je PF linearni sistem (11) rešen. Srednju snagu signala posamtranog čvora moguće je jednostavno odrediti na osnovu proračunatih *inward* tokova:

$$P(i) = \frac{\|\vec{F}(i)\|^2}{2 \cdot (N_x + N_y)}, \quad (24)$$

gde su N_x and N_y broj piksela u posmatranom čvoru po jednoj, odnosno drugoj osi.

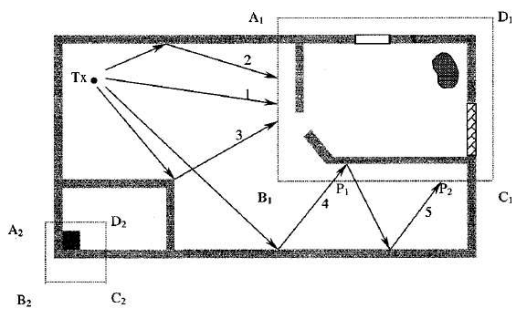
IV. HIBRIDNI RT-FDTD MODEL

Ray-tracing modeli predstavljaju obećavajuće rešenje pri modelovanju radio propagacije u slučaju *indoor* okruženja [20]. Međutim, tačnost *ray-tracing* modela značajno opada u slučaju kada su dimenzije prepreka uporedive sa talasnom dužinom na kojoj sistem radi ili ukoliko je tačka opservacije isuviše blizu tački diskontinuiteta usled čijeg prisustva dolazi do rasejanja talasa. Jedno od adekvatnih rešenja svakako predstavlja model zasnovan na kombinovanju *ray-tracing* i FDTD metoda [20]. Hibridni model koristi *ray-tracing* algoritam za delove prostorija u kojima nema prepreka, dok se za oblasti oko tačaka diskontinuiteta implementira FDTD metod. Efekti koje unose diskontinuiteti su uglavnom lokalne prirode, pa se FDTD metod primenjuje samo na udaljenostima od nekoliko talasnih dužina od tačke diskontinuiteta, čime se računaska kompleksnost modela zadržava u razumnim granicama.

A. Integracija FDTD metoda u okviru *ray-tracing* modela

Hibridni RT-FDTD model implementira već opisan *ray-shooting and bouncing* metod kojim se zraci emituju sa mesta predajnika, nakon čega se prati njihova propagacija nadalje. Sve što važi za tradicionalni *ray-tracing* metod važi i ovde.

Sledeći korak hibridnog modela predstavlja identifikovanje i izdvajanje oblasti na koje je potrebno primeniti FDTD metod (FDTD oblasti) kako bi se u potpunosti obračunali efekti refleksije, difrakcije i rasejanja. Na Sl. 4 prikazano je 2D okruženje sa predajnikom pozicioniran na poziciji T_x . FDTD oblast od interesa je uokvirena isprekidanom linijom $A_1B_1C_1D_1$. Četiri strane FDTD oblasti predstavljaju incidentne ravni odnosno interfejs između *ray-tracing* i FDTD metoda. Istovremeno je moguće definisati više FDTD oblasti ($A_2B_2C_2D_2$).



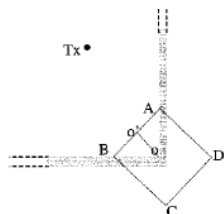
Slika 4. Indoor orkuženje sa označenim FDTD oblastima [20].

Za svaki zrak koji dopire do FDTD oblasti primenom *ray-tracing* metode određuje se pozicija intersekcije, usmerenje zraka i intenzitet električnog polja koji se potom koriste u okviru FDTD metoda kao izvor eksitacije pri modelovanju propagacije radio talasa unutar FDTD oblasti. U cilju primene FDTD metoda neophodno je odrediti vremensku raspodelu polja na incidentnim ravnima. Ukoliko k zraka doseže ćeliju na poziciji (i,j) , ukupno električno polje u njoj određuje vektorski zbir $\vec{E}_{i,j} = \sum_{n=1}^k \vec{E}_n$, gde \vec{E}_n predstavlja vektor električnog polja n -tog zraka koji dolazi do ćelije (i,j) . Pošto je poznata raspodela intenziteta električnog polja na incidentnim ravnima A_1B_1 , B_1C_1 , C_1D_1 i D_1A_1 , implementira se FDTD metod kako bi se odredila raspodela polja u FDTD oblasti $A_1B_1C_1D_1$ [20].

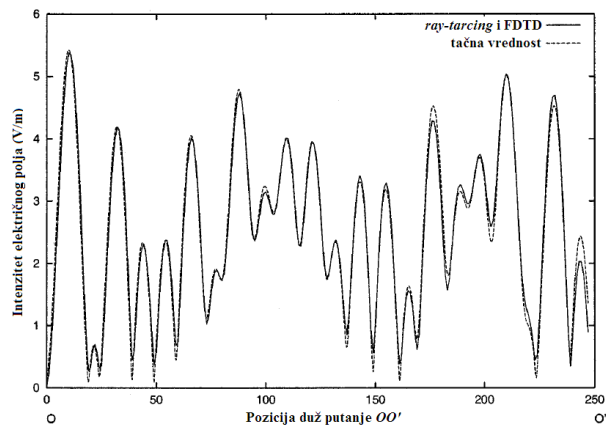
B. Rezultati predikcije hibridnog RT-FDTD modela

U cilju analize performansi hibridnog RT-FDTD modela razmatran je 2D scenario prikazan na Sl. 5. Korišćenjem hibridnog RT-FDTD modela proračunata je vrednost intenziteta električnog polja duž linije OO' u uglu prostorije. Na Sl. 6 prikazane su prediktovana i tačna vrednost intenziteta električnog polja. Hibridni model predstavlja obećavajuće rešenje problema predikcije nivoa električnog polja u kompleksnim okruženjima.

Nakon toga izvršeno je poređenje performansi hibridnog RT-FDTD, FDTD i RT modela predikcije, pri čemu je razmatran scenario prikazan na Sl. 7. U okviru tabele I prikazane su vrednosti RMS (*Root-Mean-Square*) greške predikcije i CPU (*Central Processor Unit*) vreme potrebno da se sprovede hibridni RT-FDTD odnosno klasični RT model. FDTD model je služio kao referentni model za poređenje. Primenom hibridnog modela tačnost predikcije je porasla za 2 dB. Na Sl. 8 prikazani su rezultati predikcije tri opisana modela duž proizvoljno definisane putanje OO' . Visoka podudarnost rezultata hibridnog i FDTD modela još jednom potvrđuje opravdanost hibridnog modela.

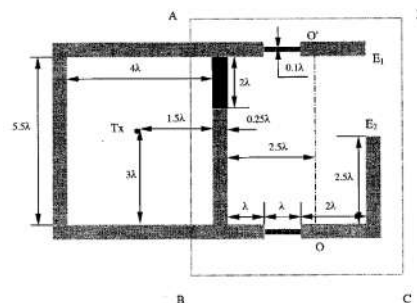


Slika 5. Razmatrani 2D scenario i putanja za koju je proračunata vrednost intenziteta električnog polja [20].



Slika 6. Komparacija rezultata predikcije hibridnog RT-FDTD modela i tačne vrednosti intenziteta električnog polja [25].

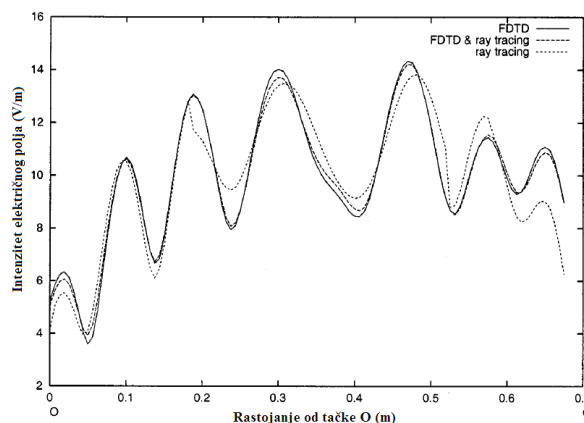
U [20] Wang je pokazao da hibridni RT-FDTD model, čak i slučaju manje rezolucije, postiže zavidne rezultate. Performanse klasičnog RT modela u značajnoj meri opadaju u slučaju niže rezolucije, naročito u delovima prostorije gde postoje objekti. Dakle, može se zaključiti da je hibridni RT-FDTD model robusnije rešenje problema predikcije nego li što je to RT model.



Slika 7. Razmatrano orkuženje. Desna prostorija predstavlja FDTD oblast [25].

TABELA I. POREĐENJE VREDNOSTI RMS GREŠKE I CPU VREMENA HIIBRIDNOG RT-FDTD I KLASIČNOG RT MODELA [25].

| | RT-FDTD model | RT model |
|-------------------|---------------|----------|
| RMSE (dB) | 2.21 | 4.24 |
| CPU vreme (mm:ss) | 1:32 | 2:31 |



Slika 8. Komparacija rezultata predikcije FDTD, hibridnog RT-FDTD i RT modela [25].

Dodatne analize predstavljene u [20] ukazuju da rezultati hibridnog RT-FDTD modela i RT modela postaju sve sličniji kako se tačka opservacije udaljava od tačke diskontinuiteta.

V. ZAKLJUČAK

Jedan od osnovnih činilaca pri dizajnu i razvoju današnjih mobilnih sistema predstavljaju propagacioni modeli koji imaju ulogu da, na što verodostojniji način, modeluju propagaciju radio signala kroz bežični kanal. Razvijen je veliki broj različitih propagacionih modela do sada. Svi oni se generalno mogu klasifikovati u četiri grupe: 1) deterministički; 2) statistički; 3) hibridni modeli i 4) modeli zasnovani na primeni *machine learning* algoritama (kao što su neuralne mreže i *Support Vector Machine* algoritmi).

U ovom radu izvršen je pregled determinističkih modela predikcije nivoa električnog polja. Od interesa su pre svega modeli zasnovani na primeni *ray-tracing* i FDTD (*Finitte Diference Time Domain*) metoda. Posebna pažnja posvećena je hibridnim modelima koji, u cilju postizanja kompromisa između tačnosti i računске efikasnosti, kombinuje *ray-tracing* i FDTD metode. Hibridni RT-FDTD model omogućava povećanu tačnost modela, a ujedno zadržava kompleksnost modela u razumnim granicama s obzirom da se FDTD model primenjuje samo na malom delu prostora. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je hibridni RT-FDTD model robusnije rešenje problema predikcije nego li što je to RT model.

LITERATURA

- [1] Z. Yun i M. Iskander, "Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications," IEEE Access, vol. 3, pp. 1089-1100, 2015.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] A. Valcarce, G. De La Roche, L. Nagy, J.F. Wagen i J.M. Gorce, "A new trend in propagation prediction," IEEE Veh. Technol. Mag., pp. 73-81, Jun 2011.
- [12] J.M. Gorce, K. Jaffres-Runser i G. De La Roche, "Deterministic approach for fast simulations of indoor radion wave propagation," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 55, no. 3, Mart 2007.
- [13] JB. Andersen, TS. Rappaport i S.Yoshida S, "Propagation measurements and models for wireless communications channels," IEEE Commun. Mag., vol. 33, no.1, pp. 42-49, 1995.
- [14] M. Barbiroli, C. Carciofi, G. Falciasecca, M. Frullone, P. Grazioso I A. Varini, "A new statistical approach for urban environment propagation modeling," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 51, no. 5, pp. 1234-1241, 2002.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] A. Taflove i S.C. Hagness, Computational Electrodynamics: The Finitte-Difference Time-Domain Method, Norwood, Artech House, 2005.
- [18] P. Sypek, A. Dziekonski i Mrozowski, "How to render FDTD computations more effective using a graphics accelerator," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 3, pp. 1324-1327, 2009.
- [19] B. Choprad, P. Luthi i J. Wagen, "A lattice Boltzmann method for wave propagation in urban microcells," Proc. Inst. Elect. Eng. - Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 144, pp. 251-255, 1997.
- [20] Y. Wang, S. Safavi-Naeini i S. Chaudhuri, "A hybrid technique based on combining ray tracing and FDTD methods for site-specific modeling of indoor radio wave propagation," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 48, no.5, pp. 743-754, Maj 2000.
- [21] S.T. Chu, W.P. Huang i S.K. Chaudhuri, "Simulation and analysis of waveguide based optical integrated circuits," Computer Physics Commun., vol. 68, no. 1-3, pp. 451-484, Nov. 1991.
- [22] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finitte-difference approximation fo the time-domain electromagnetic field equation," IEEE Trans. Electromagn. Comput., Col. EMC-23, pp. 377-382, 1981.

ABSTRACT

Survey of deterministic electric field strength prediction models is presented in this paper. Advantages and disadvantages of these models are described. Among a great number of different deterministic models developed so far, models based on ray-tracing and FDTD algorithm are of great importance. The increase of computational performance and efficiency of modern computer has enabled implementation of ray-tracing and FDTD models even in a case of complex indoor radio environments. In this paper special attention was dedicated to hybrid RT-FDTD model which combines ray-tracing and FDTD methods in order to achieve compromise between computational efficiency and accuracy of the model. Paper gives insight into current achievement, indicates future steps in radio channel modeling and provides a good basis for further research in this scientific area.

SURVEY OF DETERMINISTIC ELECTRIC FIELD STRENGTH PREDICTION MODEL

Vladimir Slavkovic, Aleksandar Neskovic, Natasa Neskovic