

Automatizacija određivanja nivoa EM polja radio-difuznih predajnika na osnovu ITU-R P.1546 metode za visine h_1 manje od 10 m

Miloš Radojković, Zlatica Marinković, *Senior Member, IEEE*

Apstrakt—U ovom radu predložen je metod za određivanje nivoa EM polja iz preporuke ITU R-1546 za očekivani nivo elektromagnetnog polja koji potiče od radiodifuznih predajnika i visine h_1 manje od 10 metara. Predloženi metod je baziran na primeni veštačkih neuronskih mreža i omogućava efikasno određivanje nivoa polja za frekvencije do 4000MHz i visine h_1 manje od 10 metara. Tačnost metoda prikazana je na primerima krivih koje se odnose na frekvencije i vrednosti h_1 koji nisu korišćene u procesu obučavanja neuronske mreže.

Ključne reči—ITU-R P.1546, nivo elektromagnetnog polja, radio-difuzni predajnik, veštačke neuronske mreže.

I. UVOD

Radiodifuzne komunikacije su komunikacije tipa tačka-oblast i njihova primena je veoma česta (radio i televizijski predajnici, bazne stanice mobilnih sistema i sl.). Jedan od nezaobilaznih koraka prilikom projektovanja radiodifuznog sistema jeste određivanje zone pokrivanja. Zona pokrivanja predstavlja oblast u kojoj je nivo elektromagnetnog (EM) polja veći od vrednosti definisane zahtevima razmatranog sistema i određen je daljinom od predajnika na kojoj je nivo EM polja veći od zadate vrednosti.

Zona pokrivanja je određena u nekoliko pravaca – azimuta (obično 36 pravaca sa korakom od po 10° ili 120 pravaca sa korakom od po 3° , što zavisi od jačine predajnika). Postoje različite metode za određivanje zone pokrivanja. Najčešće se koristi statistički metod definisan u preporuci ITU-R P.1546 [1]. Preporuka ITU-R P.1546 daje postupak određivanja nivoa polja za zemaljske radio-difuzne servise u frekvencijskom opsegu od 30 MHz do 4000 MHz. Preporuka se bazira na empirijskim krivama (dostupnih i tabelarno) za zavisnost očekivanog nivoa polja od rastojanja za različite vrednosti parametra koji opisuje karakteristike terena. Imajući u vidu da je preporuka data za fiksne vrednosti frekvencija, visine h_1 i daljine d , ukoliko je potrebno izvršiti proračun EM polja za vrednosti koje nisu date u preporuci ITU-R P.1546 potrebno je izvršiti veliki broj interpolacija.

U ovom radu je predložen je metod za očitavanje krivih za očekivani nivo EM polja baziran na veštačkim neuronskim mrežama. Veštačke neuronske mreže su izabrane zahvaljujući njihovim odličnim interpolacionim sposobnostima, zbog čega su i široko primenjene u oblasti mikrotalasa [2]-[11]. Neuronske mreže su već primenjivane

za očitavanje krivih za očekivani nivo polja po pomenutoj preporuci i ranijim verzijama [2]-[6], a u ovom radu se po prvi put neuronske mreže primenjuju za očitavanje vrednosti nivoa EM polja za visine h_1 manje od 10 metara.

U Sekciji II najpre je kratko opisan postupak određivanja nivoa polja na osnovu preporuke ITU-R P-1546. Predloženi model za očitavanje krivih za vrednosti h_1 manje od 10 metara objašnjen je u Sekciji III. Dobijeni rezultati primenom razvijenog modela prikazani su u Sekciji IV. Izvedeni zaključci dati su u Sekciji V.

II. PREPORUKA ITU-R P-1546

Preporuka ITU-R P.1546 se zasniva na familiji krivih koje su date kao očekivane vrednosti intenziteta polja u dB μ V/m na visini 10m iznad tla (usvojena prosečna visina prijemne antene za radio-difuzni prijemnik), za signal emitovan predajnikom snage 1 kW izračen pomoću polutalasnog dipola (dobitak 0 dBd), u funkciji rastojanja.

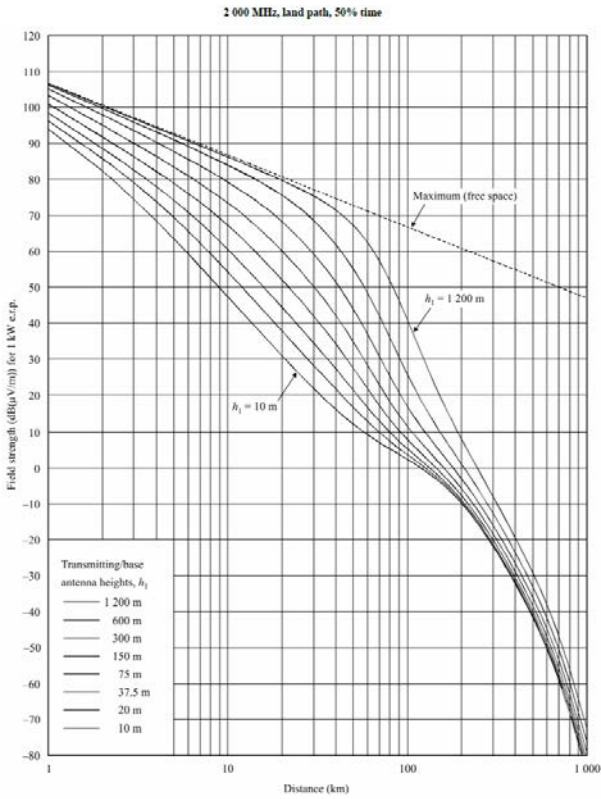
Krive su date posebno za kopno i posebno za more, a u preporuci je opisan i način proračuna u slučaju kombinovanog terena. Za oba tipa sredine date su krive očekivanog intenziteta polja za frekvencije 100 MHz, 600 MHz i 2000 MHz i to za 50%, 10% i 1% vremena i za 50% lokacija u oblasti površine 500 \times 500 m². Kao primer na Sl. 1 prikazane su krive za očekivani intenzitet polja na frekvenciji 2000 MHz za kopno. Parametar na krivama je vrednost EM polja u dB μ V/m za visine h_1 u rasponu od 10 do 1200 m (diskretne vrednosti 10 m, 20 m, 37.5 m, 75 m, 150 m, 300 m, 600 m i 1200 m) i daljine d do 1000 km. Parametar h_1 je za rastojanja od predajnika veća od 15 km jednak efektivnoj visini terena h_{eff} (visinska razlika između visine centra antene u odnosu na nivo mora i srednje nadmorske visine na rastojanju od 3 km do 15 km od predajnika). Za rastojanja d manja od 15 km, parametar h_1 predstavlja visinsku razliku između visine centra antene u odnosu na nivo mora i srednje nadmorske visine na rastojanju od $0.2d$ do d od predajnika. U slučaju da je poznata samo efektivna visina antene, a ne i detaljne informacije o terenu, za rastojanja do 3 km parametar h_1 je jednak visini antene iznad tla h_a . Za rastojanja veća od 3km za određivanje visine h_1 koristi se sledeći izraz:

$$h_1 = h_a + \frac{(h_{eff} - h_a)(d - 3)}{12} \quad (1)$$

Imajući u vidu da su krive date za diskretne vrednosti h_1 , prilikom proračuna neophodno je vršiti interpolaciju za konkretnu vrednost h_1 na sledeći način:

Miloš Radojković – Energoprojekt Entel, Bulevar Mihajla Pupina 12, Beograd 11070, Srbija (e-mail: milosradojkovic89@gmail.com).

Zlatica Marinković - Elektronski fakultet u Nišu, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: zlatica.marinkovic@elfak.ni.ac.rs).



Sl. 1. Krive za očekivani intenzitet polja na 2000 MHz za kopno po preporuci ITU-R P-1456.

$$E_o = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \frac{\log(h_1 / h_{inf})}{\log(h_{sup} / h_{inf})} \quad (2)$$

gde je: E_{inf} nivo polja za zadato rastojanje očitano sa krive koja se odnosi na prvu manju tabelarnu vrednost visine h_1 , h_{inf} , a E_{sup} nivo polja za zadato rastojanje očitano sa krive koja se odnosi na prvu veću tabelarnu vrednost visine h_1 , h_{sup} .

Za određivanje nivoa polja na proizvoljnom rastojanju d , (u opsegu od 1km do 1000km) koristi se sledeći izraz

$$E_o = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \frac{\log(d / d_{inf})}{\log(d_{sup} / d_{inf})} \quad (3)$$

gde je E_{inf} očitana vrednost polja za d_{inf} , prvu tabuliranu vrednost rastojanja manju od d , E_{sup} očitana vrednost polja za d_{sup} , prvu tabuliranu vrednost rastojanja veću od d .

Dalje, ukoliko se frekvencija za koju se vrši proračun ne poklapa sa jednom od vrednosti 100 MHz, 600 MHz i 2000 MHz, potrebno je izvršiti interpolaciju:

$$E_o = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \frac{\log(f / f_{inf})}{\log(f_{sup} / f_{inf})} \quad (4)$$

gde su: f_{inf} prva tabulirana vrednost frekvencije manje od f (100 MHz ako je $f < 600$ MHz, u ostalim slučajevima 600 MHz), f_{sup} prva tabulirana vrednost frekvencije veće od f (600 MHz ako je $f < 600$ MHz, u ostalim slučajevima 2000 MHz), E_{inf} očitana vrednost polja za f_{inf} i E_{sup} očitana vrednost polja za f_{sup} .

Kao što se može primetiti sa Sl.1, minimalna vrednost h_1 za koje su date vrednosti EM polja je 10 m. Vrednosti EM polja za visine između 0 m i 10 m nisu tabulirane i jednačina (2) se ne može koristiti za proračun nivoa EM polja. Za proračun nivoa EM polja za vrednosti h_1 u opsegu od 0 do 10 m koristi se sledeći izraz:

$$E[dB\mu V/m] = E_{zero} + 0.1h_1(E_{10} - E_{zero}) \quad (5)$$

gde su:

$$E_{zero}[dB\mu V/m] = E_{10} + 0.5(C_{1020} + C_{h1neg10}), \quad (5a)$$

$$C_{1020}[dB] = E_{10} + E_{20} \text{ dB} \quad (5b)$$

$C_{h1neg10}$ je korekcija C_{h1} u dB izračunata koršćenjem sledećeg izraza:

$$C_{h1} = 6.03 - J(v) \text{ dB} \quad (6)$$

gde je

$$J(v) = \left[6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \right], v > -0.7806 \quad (6a)$$

$$v = K_v \Theta_{eff}^2 \quad (6b)$$

$$\Theta_{eff}^2 = \arctan(-h_1 / 9000) \quad (6c)$$

a K_v konstanta koja ima sledeće vrednosti:

$$K_v = 1.35 \text{ za } 100 \text{ MHz,}$$

$$K_v = 3.31 \text{ za } 600 \text{ MHz,}$$

$$K_v = 6.00 \text{ za } 2000 \text{ MHz.}$$

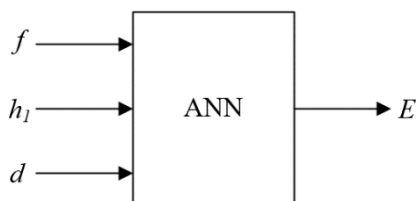
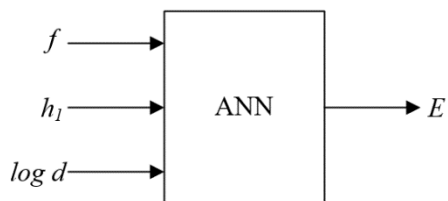
$E_{10} + E_{20}$ je jačina polja u $dB\mu V/m$ izračunata prema jednačini (2) za traženu daljinu d i visine $h_1 = 10$ m i $h_2 = 20$ m.

Preporuka ITU-R P.1546 se može koristiti za sisteme koji rade u opsegu od 30 MHz do 4000 MHz i gde visina h_1 ne prelazi 3000 m.

U realnim primerima se u najvećem broju slučajeva, sve tri veličine (parametar h_1 , rastojanje i frekvencija) razlikuju od tabuliranih vrednosti, pa je potrebno vršiti višestruke interpolacije, posebno ako je visina h_1 manja od 10 metara. U sledećoj sekciji je predložen efikasan metod zasnovan na primeni veštačkih neuronskih mreža koji omogućava određivanje EM polja za zadatu daljinu i vrednosti h_1 u opsegu $0 \leq h_1 \leq 10$ m.

III. PREDLOŽENI METOD

U ovom radu predložena su dva metoda za određivanje nivoa EM polja za visine h_1 manje od 10 metara primenom veštačkih neuronskih mreža. Na Sl. 2 prikazan je neuronski model kojim se na osnovu frekvencije f , visine h_1 i daljine d određuje nivo polja, odnosno koji modeluje zavisnost $E=f(f, h_1, d)$. Kako je na krivama za očekivani nivo polja u preporuci ITU-R P.1546 rastojanje prikazano na logaritamskoj skali razmatran je i model prikazan na Sl. 3, koji kao ulaze ima frekvenciju f , visinu h_1 i daljinu u d predstavljenu u logaritamskom formatu i nivo polja kao izlaz $E=f(f, h_1, \log d)$.

Sl. 2. Neuronski model za određivanje nivoa EM polja $E=f(f, h_1, d)$ Sl. 3. Neuronski model za određivanje nivoa EM polja sa $\log d$ na ulazu $E=f(f, h_1, \log d)$

Modeli predstavljaju višeslojne neuronske mreže, koje se sastoje od osnovnih jedinica, neurona, grupisanih u slojeve (ulazni sloj, jedan ili više skrivenih slojeva i izlazni sloj). Broj ulaznih neurona je određen brojem ulaznih parametara, u konkretnom slučaju tri, a broj izlaznih neurona odgovara broju izlaznih parametara, u konkretnom slučaju jedan. Broj neurona u skrivenim slojevima nije moguće unapred odrediti, već se taj broj određuje u postupku učenja mreže. Neuronska mreža uči zavisnost između ulazno-izlaznih parametara primenom optimizacionih procedura, kojima se vrši optimizacija parametara mreže (težine veza između neurona i pragovi aktivacionih funkcija neurona), sa ciljem da odziv mreže bude što je moguće bliži željenoj zavisnosti između ulazno-izlaznih parametara.

Uspješno obučena mreža sposobna je da da korektan odziv ne samo za kombinacije ulaznih veličina koje su korišćene tokom procesa učenja mreže, već i za bilo koje vrednosti ulaznih veličina koje nisu korišćene tokom učenja ali su u opsegu veličina u kome su i trening vrednosti. Treba napomenuti da je model razvijen za ceo skup frekvencija na koje se može primeniti preporuka ITU-R P.1546, tj. frekvencije u opsegu od 30 MHz od 4000MHz.

IV. REZULTATI

Podaci za obučavanje neuronskih mreža prikazanih na Sl.2 i Sl.3 se odnose na 40 različitih frekvencija u opsegu od 100 MHz do 4000 MHz i korakom frekvencije od 100 MHz. U cilju provere da li broj i distribucija trening uzoraka u pogledu izabranih vrednosti h_1 utiče bitno na tačnost mreže razmatrana su dva dva skupa podataka koji se odnose na $h_1=\{1, 3, 5, 7, 9 \text{ i } 10\}$ m (trening skup 1) i $h_1=\{1, 3, 6, 9, 10\}$ m (trening skup 2). Svi podaci potrebni za obučavanje i testiranje mreže generisani su korišćenjem izraza (3), (4), (5-5b) i (6-6c). Tokom razvoja modela, veći broj mreža sa jednim ulaznim slojem, dva skrivena sloja i jednim izlaznim slojem je obučeno i testirano. U skrivenom sloju, korišćen je različit broj neurona kako bi se pronašao model sa što boljom tačnošću.

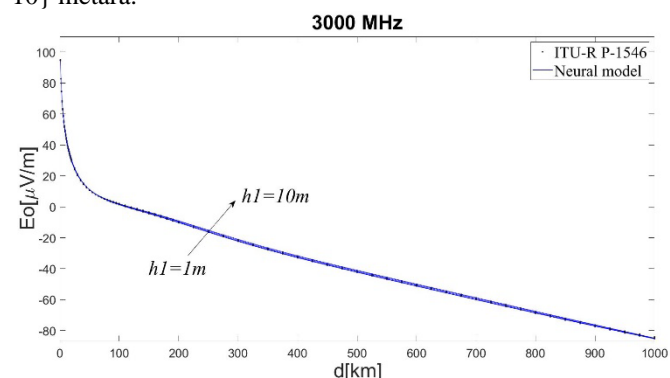
U ovom slučaju korišćene su neuronske mreže kod kojih skriveni neuroni imaju sigmoidnu transfer funkciju, a izlazni neuroni linearnu transfer funkciju. Ulazni neuroni imaju bafersku funkciju, pa je njihova funkcija jedinična linearna funkcija. Za obučavanje mreža primenjen je *Levenberg-*

Maquardt algoritam [2]. Tačnost odziva mreže testirana je poređenjem odziva mreže i referentnih vrednosti. Takođe, vođeno je računa da ne dođe do preučavanja mreže van referentnih tačaka, tj. da mreža ima dobru generalizaciju. Generalizacija se može proveravati testiranjem mreže za ulazne vrednosti koje nisu korišćene u toku učenja. Kako je u cilju što boljeg učenja mreže iskorišćen ceo skup referentnih podataka iz preporuke, provera da li je došlo do preučavanja vršena je vizuelno, tj. proverom odziva mreže kada su ulazne veličine menjane sa korakom koji je manji od koraka promene referentnih vrednosti kao i proračunom srednje greške (ATE - *Average Test Error*), maksimalne greške (WTE - *Worst Case Error*) i korelacionog koeficijenta r . Mreža je obučena i generisana u programskom paketu Matlab.

Nakon testiranja razvijenih modela, izabrani su najbolji modeli za oba predložena modela u slučaju obučavanja sa dva izabrana trening skupa. Za testiranje generalizacije korišćen je test skup koji se odnosi na vrednosti koje nisu korišćenje tokom obuke, a odnosi se na vrednosti frekvencije i visine koje su u opsegu veličina kao i vrednosti korišćene tokom obučavanja ($f=150\text{MHz}$, $h_1=2\text{m}$; $f=450\text{MHz}$, $h_1=4\text{m}$; $f=850\text{MHz}$, $h_1=6\text{m}$; $f=1450\text{MHz}$, $h_1=8\text{m}$; $f=1850\text{MHz}$, $h_1=2\text{m}$; $f=2350\text{MHz}$, $h_1=4\text{m}$; $f=3350\text{MHz}$, $h_1=6\text{m}$; $f=3850\text{MHz}$, $h_1=8\text{m}$).

Rezultati testiranja najboljih modela prikazani su u Tabeli I. Može se uočiti da su srednje greške u svim razmatranim slučajevima manje od 0.15%, dok je maksimalna greška manja od 1.5%. Korelacioni koeficijent je veoma blizu jedinici, što takođe potvrđuje visoku tačnost modelovanja.

Kao najbolji model za određivanje rastojanja za zadati nivo EM polja izabrana je mreža prikazana na Sl. 3 - $E=f(f, h_1, \log d)$, sa dva skrivena sloja (10 neurona u prvom sloju i 12 neurona u drugom sloju) i za koju su korišćeni podaci za obučavanje koji se odnose na visine $\{1, 3, 5, 7, 9, 10\}$ metara.



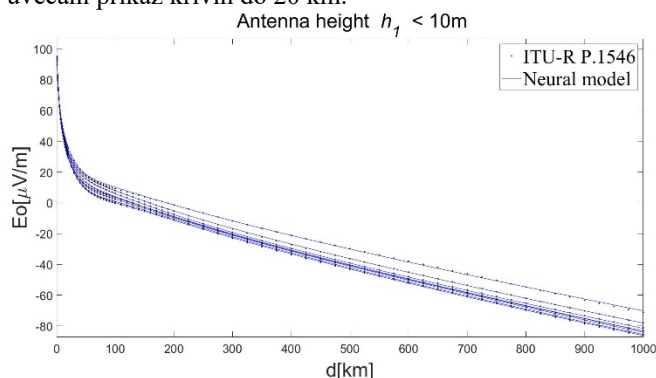
Sl. 4. Poređenje vrednosti EM polja generisanih pomoću razvijenog neuronskog modela i referentnih vrednosti iz preporuke ITU-R P1546.

Na Sl. 4 se može videti tačnost modela. Prikazane su krive za nivo polja generisane pomoću neuronske mreže (linije) za parametar visine $h_1=\{1, 3, 5, 7, 9, 10\}$ metara i referentne vrednosti određene preporukom (prikazane simbolima).

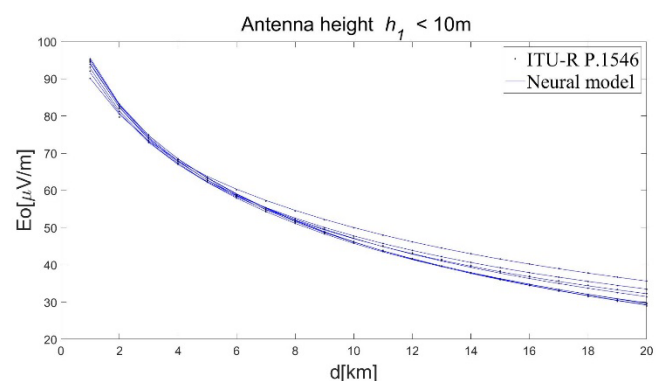
Može se uočiti da odziv mreže tj. vrednosti generisane pomoću neuronskog modela veoma dobro prate referentne vrednosti što potvrđuje da je postignuta zadovoljavajuća tačnost modelovanja.

Kao dodatna ilustracija tačnosti modela $E=f(f, h_1, \log d)$, na Sl. 5 prikazane su krive koje se odnose na test skup. Sa

Sl.5 se može primetiti da su vrednosti generisane pomoću neuronskog modela veoma blizu referentnim vrednostima prema preporuci ITU-R P1546. Kako bi se bolje prikazali rezultati krive za daljine do 20 km, na Sl. 6 se može videti uvećani prikaz krivih do 20 km.



Sl. 5. Poređenje vrednosti EM polja generisanih pomoću razvijenog neuronskog modela i referentnih vrednosti iz preporuke ITU-R P1546 za vrednosti koje nisu korišćene u obučavanju mreže



Sl. 6. Poređenje vrednosti EM polja generisanih pomoću razvijenog neuronskog modela i referentnih vrednosti iz preporuke ITU-R P1546 za vrednosti koje nisu korišćene u obučavanju mreže (daljina do 20 km)

TABELA I
TEST STATISTIKA ZA TRENING I TEST SKUP

	ATE[%]	WCE [%]	r
$E=f(f, h_1, d)$; trening skup 1 $h_1=\{1,3,5,7,9,10\}$ m			
treninig skup 1	0.10	1.47	0.999979
test skup	0.10	0.79	0.99998
$E=f(f, h_1, d)$; trening skup 2 $h_1=\{1,3,6,9,10\}$ m			
treninig skup 2	0.10	1.03	0.99998
test skup	0.11	0.89	0.999976
$E=f(f, h_1, \log d)$; trening skup 1 $h_1=\{1,3,5,7,9,10\}$ m			
treninig skup 1	0.11	1.39	0.999978
test skup	0.11	0.55	0.999981
$E=f(f, h_1, \log d)$; trening skup 2 $h_1=\{1,3,6,9,10\}$ m			
treninig skup 2	0.11	0.94	0.999982
test skup	0.14	0.65	0.999971

V. ZAKLJUČAK

Kao što se može videti u Sekciji II, ukoliko se određuje nivo EM polja za vrednosti parametara h_1 , f i d , potrebno je izvršiti veliki broj interpolacija. Predloženi metod baziran na neuronskoj mreži omogućava automatizaciju procesa interpolacija i trenutnog izračunavanja EM polja nalaženjem odziva neuronske mreže. Kako se svaka neuronska mreža može opisati pomoću skupa jednačina baziranih na linearnim

i eksponencijalnim funkcijama, izračunavanje EM polja pomoću razvijene neuronske mreže nije kompleksno, a može se vršiti u bilo kom programskom okruženju.

Prikazani metod određivanja EM polja može biti korišćen kao efikasan alat za određivanje zone pokrivanja predajnika korišćenjem statističke metode definisane preporukom ITU-R P.1546. Cilj budućih istraživanja je da se razvije neuronski model za inverzno očitavanje krivih za visine h_1 manje od 10 m.

ZAHVALNICA

Istraživanja prikazana u ovom radu podržana su od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja.

LITERATURA

- [1] P.1546-5: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz, ITU, 08/2019.
- [2] M.Radojković, Z. Marinković, A. Atanasković, "Inverzno očitavanje ITU-R P,1546 krivih za nivo EM polja radio-difuznih predajnika" 62. konferencija ETRAN, Palić, Jun. 2018.
- [3] M.Radojković, O. Pronić-Rančić, Z. Marinković, "Inverse Reading of ITU-R P.1546 Propagation Curves for the Broadcast Transmitter EM Field Level" iCEST 2020, pp. 220-223, 10-12 Sep. 2020.
- [4] Q. J. Zhang and K. C. Gupta, *Neural Networks for RF and Microwave Design*. Boston, MA: Artech House, 2000.
- [5] C. Christodoulou and M. Gerogiopoulos, *Applications of Neural Networks in Electromagnetics*, Artech House, Inc. Norwood, MA, USA, 2000.
- [6] Z. Stanković, N. Vasić, "Neural Approach in Modeling of the Propagation Curves from Recommendation ITU-R P.370-7", XLVII Konferencija za ETRAN, Herceg Novi, , pp.269-272, 8-13 jun 2003.
- [7] J. E. Rayas-Sanchez, "EM-based optimization of microwave circuits using artificial neural networks: The state-of-the-art," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 52, no. 1, pp. 420-435, Jan. 2004.
- [8] B. Milovanović, Z. Stanković, M. Ostojić, M. Miličić, "Predikcija nivoa elektromagnetnog polja korišćenjem neuronskog modela zasnovanog na ITU-R P.1546 preporuci", 51. konferencija ETRAN 2007, Herceg Novi - Igalo, Crna Gora, pp. MT1.3.1-4, 4-8. jun 2007.
- [9] H. Kabir, L. Zhang, M. Yu, P. Aaen, J. Wood, and Q. J. Zhang "Smart modelling of microwave devices", *IEEE Microw. Mag.*, vol. 11, pp.105-108, May 2010.
- [10] Z. Marinković, V. Marković, A. Caddemi, "Artificial Neural Networks in Small-Signal and Noise Modelling of Microwave Transistors," Chapter 6 in *Artificial Neural Networks*. Edited by Seoyun J. Kwon, Nova Science Publishers Inc., pp. 219-236, 2011.
- [11] Z. Marinković, T. Kim, V. Marković, M. Miličić, O. Pronić-Rančić, L. Vietzoreck, "Artificial Neural network based design of RF MEMS capacitive shunt switches", *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 31 no. 7, pp. 756-764, July 2016.

ABSTRACT

In this paper a method for determination of EM field level, according to ITU-R P.1546 recommendation for EM field level originated from broadcast transmitters with height h_1 less than 10 meters is proposed. Proposed method is based on the applications of artificial neural networks and enables efficient determination EM field level for frequencies up to 4000 MHz and height h_1 less than 10 meters. Accuracy of the method is illustrated by an example of curves related to several frequencies and h_1 not used for the training of neural network.

Automatization of calculation the EM field strength according to the ITU-R P.1546 method for height parameter h_1 smaller than 10 meters

Miloš Radojković, Zlatica Marinković