

Procjena vrijednosti parametra SAR od DECT i WiFi tehnologije u *indoor* okruženju

Darko S. Šuka

Elektrotehnički fakultet
Istočno Sarajevo, Republika Srpska, BiH
darko.suka@etf.unssa.rs.ba

Mirjana I. Simić, Predrag V. Pejović

Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
mira@etf.rs, peja@etf.rs

Sadržaj — Tema ovog rada je procjena vrijednosti parametra SAR dobijenih mjerenjem jačine električnog polja koje potiče od DECT (1880-190 MHz) i WiFi (2400-2500 MHz) tehnologije u *indoor* okruženju. U radu je opisan teorijski model za evaluaciju SAR parametra u ljudskom tijelu na bazi FDTD metode (metode konačnih razlika), te su upotrebom programabilne mjerne opreme izvršena mjerenja jačine električnog polja u *indoor* okruženju na tri odabrane mjerne lokacije. Izmjereni nivoi električnog polja su iskorišteni za numeričku predikciju SAR. Procijenjene vrijednosti SAR su uporedjene sa graničnim vrijednostima koje propisuju IEEE, ICNIRP i CENELEC.

Ključne riječi — SAR; FDTD metod; Dozimetar; RF zračenje;

I. UVOD

Povećana upotreba sistema bežičnih komunikacija širom svijeta usljed tehnološkog napretka, te pada cijena bežičnih uređaja, kao i pada cijena telekomunikacionih usluga, poslednjih godina je pokrenula veliku društvenu i naučnu zabrinutost u vezi potencijalnih štetnih efekata po zdravlje ljudi zbog povećanog izlaganja elektromagnetskom (EM) zračenju, koje takve tehnologije svakodnevno stvaraju. Danas, većina domaćinstava pristupa internetu putem bežičnih Wi-Fi uređaja (modema) koji rade u mikrotalasnom frekventnom opsegu 2400-2500 MHz. Daleko je veća upotreba bežičnih kućnih telefona (DECT) u frekventnom opsegu 1880-1900 MHz, a nerijetko se komunikacije ostvaruju i putem WiMax tehnologija [1], [2]. U cilju podrške upotrebi ovakvih tehnologija sve većem broj korisnika, bežične Wi-Fi bazne stanice se instaliraju skoro svuda: u kafićima, javnim ustanovama, sredstvima gradskog saobraćaja, parkovima, itd. Stoga se nameće pitanje apsorpcije EM zračenja u biološkim tkivima korisnika. Mjera kojom se kvantifikuje EM energija apsorbovana u tkivima ljudskog tijela naziva se SAR (*Specific Absorption Rate*) vrijednost. Vrijednost SAR zavisi od vrste tkiva i jačine EM talasa kojima je tkivo izloženo. U ovom radu je predstavljen teorijski model FDTD (*Finite Difference Time Domain*) algoritma za kvantifikaciju SAR vrijednosti u biološkim tkivima usljed izloženosti ljudskog tijela nejonizujućem EM zračenju, na osnovu poznate vrijednosti incidentnog električnog polja. FDTD metod je metod konačnih razlika i pripada grupi diferencijalno-numeričkih tehnika u vremenskom domenu koje se mogu koristiti za procjenu interakcije između modela ljudskog tijela i EM talasa [3]. Usljed nedostatka odgovarajućih resursa (softvera za simulaciju), u radu je dat samo teorijski model navedenog

metoda za evaluaciju, te su izvršena mjerenja jačine el. polja upotrebom programabilne mjerne opreme. Procijenjene vrijednosti su upoređene sa sigurnosnim standardima relevantnih svjetskih organizacija kao što su: Međunarodna organizacija za zaštitu od nejonizujućih zračenja ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*), IEEE (*Institute of Electrical and Electrotechnic Engineers*) i CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) [4]-[6]. Da bi se izbjegli neželjeni efekti po zdravlje ljudi, ove organizacije su usvojile smjernice za izloženost zračenju, kako profesionalnog osoblja, tako i opšte populacije. Prema preporuci FCC (*Federal Communications Commission*) [7], nivo SAR za opštu populaciju iznosi 1,6 W/kg u 1 gramu tkiva i 2 W/kg u bilo kojih 10 grama tkiva. U Tabeli I su dati nivoi izloženosti u pogledu jačine el. polja i gustine snage EM talasa prema ICNIRP, IEEE i CENELEC standardu. Osim toga, vrijednosti osnovnih ograničenja SAR po preporuci ICNIRP, data su u Tabeli II.

II. SPECIFIČNA BRZINA APSORPCIJE (SAR)

Polja iz opsega radiofrekvencija koja prodiru u tijelo opadaju sa porastom frekvencije. U cilju razumijevanja efekata koje ovo prodiranje može da ima na ljudsko tijelo, potrebno je utvrditi veličinu polja u različitim dijelovima tijela koji su izloženi polju. Ovo zahtijeva poznavanje električnih svojstava različitih vrsta tkiva. Kada se odrede ova svojstva, moguće je proračunati vektore električnog i magnetskog polja E i H za svaki dio tijela koji je izložen određenoj vrsti izvora. SAR se definiše kao:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho_m} \quad [\text{W/kg}] \quad (1)$$

gdje je: σ - provodljivost tjelesnog tkiva, E - jačina el. polja u posmatranoj tački, ρ_m - gustina mase tkiva u toj tački. Pošto je vrijednost parametra SAR, tj. promjenu apsorbovane EM energije u jedinici vremena po jedinici mase, veoma teško i složeno mjeriti u biološkim tkivima, standardi dozvoljavaju upotrebu referentnih nivoa gustine snage (W/m^2) u slobodnom prostoru. IEEE standardi ustanovili su osnovna ograničenja za efektivne *rms* (*root mean square*) vrijednosti jačine električnog i magnetskog polja, E i H respektivno, tzv. maksimalnu dozvoljenu izloženost MPE (*Maximum Permissible Exposure*) i slično kao i ICNIRP standard definišu referentne granice za jačine električnog i magnetskog polja u slobodnom prostoru.

TABELA I.

GRANIČNE VRIJEDNOSTI ELEKTRIČNOG POLJA I GUSTINE SNAGE PREMA ICNIRP, IEEE I CENELEC STANDARDU

Standard	1800 MHz		2400 MHz	
	E (V/m)	S (W/m ²)	E (V/m)	S (W/m ²)
ICNIRP	58	9	61	10
IEEE	58	9	61	10
CENELEC	58	9	61,4	10

TABELA II.

VRIJEDNOSTI OSNOVNIH OGRANIČENJA SAR, ICNIRP

f	SAR cijelo tijelo (W/kg)	SAR glava i trup (W/kg)	SAR udovi (W/kg)	Gustina snage S (W/kg)
(9 – 100) kHz	–	–	–	–
(0,1 – 10) MHz	0,08	2	4	–
(0,01 – 10) GHz	0,08	2	4	–
(10 – 300) GHz	–	–	–	10

Zadovoljavanjem ovih ograničenja osigurano je poštovanje SAR vrijednosti. Dakle, umjesto kompleksnih SAR mjerenja, za usklađenost procjene, gore pomenuti standardi nam omogućavaju jednostavnije mjerenje jačine el. polja (*rms*). Kao što je spomenuto u uvodu, vrijednost SAR zavisi od nekoliko faktora [4], [8], [9]:

- parametara incidentnog (upadnog) polja, kao što je npr. frekvencija, intenzitet, polarizacija i konfiguracija izvor – objekat (da li se radi o bliskom ili dalekom polju),
- karakteristika izloženog tijela, kao što su veličina tijela, interna i eksterna geometrija, kao i dielektrična svojstva raznih tkiva,
- uticaja ostalih objekata koji se nalaze u polju u blizini izloženog tijela.

Kada je vektor E paralelan sa osom koja prolazi kroz centar ljudskog tijela i kada se to tijelo nalazi u dalekom polju, SAR za cijelo tijelo dostiže svoj maksimum. Količina apsorbirane energije zavisi od mnogo faktora, uključujući i veličinu tijela. Za čovjeka „prosječne veličine”, koji nije uzemljen, rezonantna apsorpciona frekvencija (frekvencija na kojoj se apsorbira najviše energije) je 70 MHz, dok ista može varirati kod osoba nestandardnih dimenzija, viših, nižih, djece i osoba koje sjede. Kod osoba koje su uzemljene vrijednost ove frekvencije je manja dva puta [1], [8]. S druge strane, kada imamo uslove izlaganja koji odgovaraju bliskom polju, onda treba napomenuti da se ove frekvencije, kao i uopšte procjena SAR potpuno razlikuje. U ovom slučaju, prilikom izlaganja može doći do velikih vrijednosti lokalnog SAR, a ta vrijednost, kao i vrijednost SAR za cijelo tijelo je jako zavisna od rastojanja čovjeka od izvora visokih frekvencija. Iz (1) vidi se da vrijednost SAR zavisi od provodnosti i gustine tkiva. S obzirom na to da se provodnost mijenja u različitim dijelovima tijela, postoji i zavisnost SAR od položaja tijela, što je i jedan od razloga zbog kojeg se SAR nekada računa za cijelo tijelo, a nekada za lokalne dijelove tijela (kao što su glava, vrat, trup i ekstremiteti). Gustina tkiva je poprilično konstantna duž tijela, tako da promjena SAR ne zavisi od njene vrijednosti. Postojanje drugih objekata u polju može da utiče na samo polje preko intenziteta, polarizacije i na taj način da promijeni vrijednosti za SAR. SAR se proračunava na osnovu eksperimentalnih podataka iz laboratorije ili određenim numeričkim metodama. To znači da prilikom provjere kompatibilnosti sa nekim graničnim nivoom iz standarda nisu česti slučajevi u kojima će se to provjeravati direktno iz vrijednosti SAR. Zbog toga su date tzv. referentne vrijednosti

koje su izražene nekim veličinama koje se lako mogu izmjeriti (npr. vektori E i H), a koje odgovaraju određenim vrijednostima SAR. Inače, SAR pored toga što se nalazi u standardima kao granična vrijednost, takođe se daje kao aproksimacija količine apsorbirane energije koja potiče od nekog uređaja u vidu podatka za taj uređaj, kao što je to slučaj npr. sa mobilnim telefonima. U odnosu na apsorpciju energije u tijelu, EM polja se mogu podijeliti u četiri opsega [4], [8], [9]:

- frekvencije od približno 100 kHz do vrijednosti malo manje od 20 MHz, na kojima apsorpcija u trupu opada brzo sa opadanjem frekvencije, a značajna apsorpcija može da se pojavi u vratu i nogama,
- frekvencije u opsegu od 20 MHz do 300 MHz, na kojima relativno visoke apsorpcije mogu da se pojave u cijelom tijelu, a ukoliko su dostignute rezonantne frekvencije mogu biti još veće,
- frekvencije u opsegu od 300 MHz do nekoliko GHz, kod kojih imamo lokalnu i neuniformnu apsorpciju i
- frekvencije preko 10 GHz, kod kojih se apsorpcija energije dešava primarno na površini tijela.

Koncept SAR ima smisla samo u opsegu od 100 kHz do 10 GHz, jer je u tom području dubina penetracije veća od 1 cm [4], [8], [9]. Gustina indukovane struje je važan parametar na frekvencijama ispod 100 kHz, dok se na frekvencijama iznad 6 GHz energija apsorbira površinski, pa je važna gustina upadne snage. Postoji opsežna literatura o procjeni srednje vrijednosti SAR za cijelo tijelo i prostornoj raspodjeli SAR za različite modele životinja, pa čak i za model čovjeka. Neke ranije procjene bazirale su se na prostim sfernim ili elipsoidnim modelima, npr. Durnijev [10]. Međutim, u novijim istraživanjima koriste se numeričke simulacije anatomski korektnijih modela odraslog čovjeka. SAR je ključni koncept u planiranju i analizi eksperimenata, kako onih *in vivo*, tako i *in vitro* i služi kao osnova savremenim stan-dardima za zaštitu od EM zračenja. Pri tom treba istaći da podjednaku važnost imaju i prosječna vrijednost SAR za cijelo tijelo, kao i lokalni maksimumi prostorno usrednjene vrijednosti za SAR [11].

III. BIOLOŠKI EFEKTI ELEKTROMAGNETSKIH POLJA

Još od uvođenja mobilnih telefona sredinom 1980-ih, bilo je poznato da izlaganje EM poljima može biti štetno zbog djelovanja EM energije na zagrijavanje biološkog tkiva

(termički efekti) [12]. Oštećenje tkiva može doći usljed nesposobnosti tijela da se nosi sa toplotom koja se stvara tokom izlaganja EM zračenjima [1]. Pod određenim uslovima, izloženost EM zračenju sa nivoom gustine snage od približno 10 mW/cm^2 ili većom može dovesti do mjerljive količine toplote u biološkom tkivu [13]. Međutim, naše razumijevanje bioloških efekata izloženosti EM zračenju i dalje se razvija, posebno za mobilne komunikacione uređaje. Sve veći značaj se pridaje i netermičkim efektima. Ovi efekti se manifestuju nadražajem mišićnih i nervnih ćelija (povećana razdražljivost i umor) [4]-[7], [12].



Slika 1. Uniformni incidentni ravanski talas

IV. RASPODJELA EM POLJA U BIOLOŠKIM TKIVIMA I PRORAČUN SAR VRIJEDNOSTI

Tokom poslednjih godina, učinjeni su naponi da se precizno predvidi prostiranje EM polja, kako u otvorenom prostoru, tako i u biološkim tkivima, zbog povećane upotrebe bežičnih uređaja. FDTD je metoda modelovanja prostiranja EM talasa unutar bioloških tkiva koja numerički rješava Maksvelove jednačine i najčešće se koristi za procjenu jačine EM polja u ljudskom tkivu [14]. Prostornu raspodjelu el. polja i odgovarajuću SAR vrijednost unutar ljudskog tijela, pored FDTD metode, moguće je procijeniti i merenjem [9], [15].

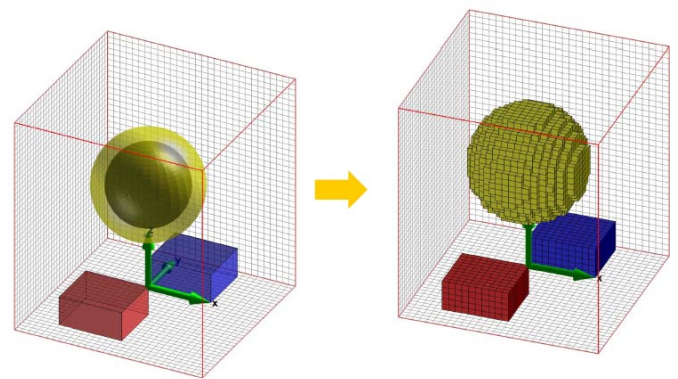
A. Raspodjela EM polja unutar ljudskog tijela

Intenzitet el. polja u različitim tačkama bioloških tkiva može se odrediti primenom FDTD metode. U nastavku je opisan teorijski model navedene metode. Naime, FDTD se zasniva na šemi konačnih razlika (*Yee* model) koje se primjenjuju na Maksvelove jednačine u vremenskom domenu. To je eksplicitna procedura koja simulira prostiranje i interakciju EM talasa u određenom dijelu prostora [16]. U ovoj metodi, Maksvelove diferencijalne jednačine u vremenskom domenu se rješavaju kada se incidentni uniformni sinusoidalni ravanski EM talas prostire kroz tijelo (Sl. 1). Maksvelove diferencijalne jednačine u vremenskom domenu u izotropnoj sredini glase:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2)$$

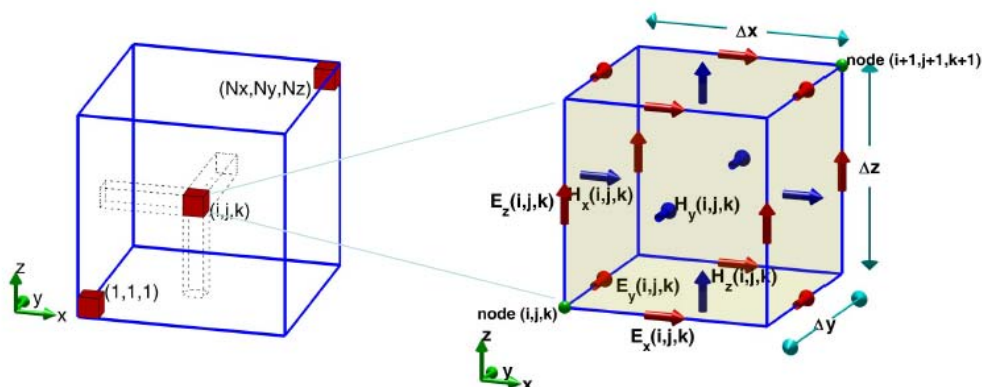
$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3)$$

pri čemu je E vektor jačine električnog polja u (V/m), H je vektor jačine magnetskog polja (A/m), ϵ i μ su, respektivno, električna permitivnost (F/m) i magnetska permeabilnost (H/m), a σ je električna provodljivost tkiva (S/m). Tijelo koje je predmet istraživanja, po FDTD metodi je podijeljeno u veliki broj malih ćelija, pri čemu je svaka od njih veličine zapremine $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ (inkrementi prostora) u vremenskom intervalu Δt (inkrement vremena), Sl. 2.



Slika 2. *Yee* ćelija

Yee postavlja komponente vektora polja E i H (Sl. 3) na polovinu elementarnih koraka koji čine *Yee* ćeliju [14]. Koristeći MKS mjerni sistem, te pod pretpostavkom da su dielektrični parametri ϵ, μ i σ vremenski nezavisni (konstanti u vremenu), jednačine (2) i (3) su ekvivalentne sljedećem sistemu skalarnih jednačina u Dekartovom koordinatnom sistemu (x, y, z):



Slika 3. Komponente vektora E i H u *Yee* modelu

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (4a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (4b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (4c)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (4d)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (4e)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (4f)$$

pri čemu su E_x, E_y, E_z i H_x, H_y, H_z komponente vektora polja E i H , respektivno. Prostiranje incidentnog električnog polja (E^i) kroz ljudsko tijelo električnih osobina σ, μ i ε opisano je jednačinama (4a) do (4f) koje se rješavaju korišćenjem FDTD metode konverzijom šest parcijalnih diferencijalnih jednačina u šest eksplicitnih aproksimacija konačnih razlika u kojima se mogu dobiti E_x, E_y, E_z i H_x, H_y, H_z komponente. Da bi se postigli tačni rezultati, rastojanje između zapremina δ u simulaciji konačnih razlika mora biti manje od talasne dužine, obično manje od $\lambda/10$. Kada je veličina koraka (rastojanja) δ ista u svim pravcima ($\delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$), uslov stabilnosti je tada [17]: $\Delta t \leq \delta / \sqrt{nc_0}$, pri čemu je n broj prostornih dimenzija u posmatranoj zapremini i $c_0 = 3 \times 10^8$ m/s brzina svjetlosti u slobodnom prostoru.

B. Proračun SAR vrijednosti

U zoni dalekog polja izloženost opšte populacije EM zračenju može se smatrati kao izloženost ravanskim EM talasima. Na frekvencijama 1800 MHz, te 2400 MHz, ove vrijednosti približno iznose: ($\sigma = 1,35$ S/m, $\varepsilon_r = 45,21$) i ($\sigma = 1,5$ S/m, $\varepsilon_r = 44,67$), u skladu sa srednjom vrijednosti, računatom za cijelo tijelo prema [18]. Relativna magnetska permeabilnost ljudskog tijela, prema [19], približno iznosi $\mu_r = 0,99$, dok je prosječna gustina ljudskog tijela, prema [20], 1062 kg/m^3 . Imajući u obzir gore navedene činjenice, SAR se može izračunati u funkciji incidentnog električnog ili magnetskog polja koristeći (1):

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} \cdot \frac{\mu\omega}{\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2}} (1 + \gamma_r)^2 |H|^2 \quad (5)$$

$$\gamma_r = \frac{2|\sqrt{\varepsilon'}|}{\sqrt{\varepsilon'} + \sqrt{\varepsilon_0}} - 1, \quad \varepsilon' = \varepsilon + j\frac{\sigma}{\omega}, \quad H = \frac{E}{Z_0} \quad (6)$$

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} \cdot \frac{\mu\omega}{\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2}} (1 + \gamma_r)^2 \frac{|E|^2}{Z_0^2} \quad (7)$$

pri čemu su: γ_r – odgovarajući koeficijent refleksije, ε' – kompleksna permitivnost sredine, H i E – efektivne (*rms*) vrijednosti magnetskog i električnog polja, respektivno.

V. EKSPERIMENTALNI PRISTUP

Precizno mjerenje jačine el. polja i gustine snage u složenom i dinamičnom okruženju je težak zadatak. To je uglavnom zbog refleksije, apsorpcije i interferencije EM talasa. Stoga, različita mjerenja mogu dovesti do veoma različitih rezultata zbog ovakvih uslova [6]. Mjerenja EM zračenja izvršena u ovom radu su samo jedan od segmenata iz oblasti mjerenja EM polja, u skladu sa [20]. Za mjerenje jačine el. polja (vršna vrijednost) korišćena je programabilna mjerna. Mjerenja su vršena 24 časa dnevno, 7 dana u sedmici.

A. Mjerne lokacije

Za merenje električnog polja i procjenu vrijednosti SAR parametra, prilikom odabira mjernih lokacija, u obzir je uzeto više faktora kao što su: funkcija mjesta, nivo gustine populacije, te postojanje i blizina manjeg ili većeg broja bežičnih stanica. Na taj način su izabrana tri mjerne lokacije i to dvije u popularnim tržnim centrima i jedna lokacija u privatnom stanu u centru grada, respektivno.

- Lokacija 1 – (N 43°49.440', E 018°21.723')
- Lokacija 2 – (N 43°49.264', E 018°21.511'),
- Lokacija 3 – (N 43°49.243', E 018°21.769')

B. Mjerna oprema

Za procjenu izlaganja stanovništva EM poljima u okviru ovog rada korišćen je dozimetar. Dozimetri su mjerni uređaji malih dimenzija koje pojedinac ili pojedinci mogu da nose sa sobom. Ovi uređaji se programiraju da uzimaju odbirke električnog i magnetskog polja u određenom periodu vremena. Po završetku mjerenja, podaci sa dozimetra se mogu prebaciti na računar i različitim statističkim procjenama i korelacijama analizirati izlaganje ljudskog tijela na različitim mjestima i od strane različitih EM izvora.



Slika 4. EME Spy 140, Satimo

TABELA III. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE EME SPY 140

Sonda	Tro-osna E-sonda 80 MHz – 6 GHz	
Osjetljivost	0.005 V/m (DECT, WiFi 2G)	
Dinamička osjetljivost	60 dB (do 5 V/m)	
Aksijalna izotoprija	min.	max.
DECT (1880 – 1900 MHz)	± 1.2 dB	± 0.8 dB
WiFi (2400 – 2500 MHz)	± 1.5 dB	± 0.8 dB

EME Spy 140 (Sl. 4) je lagani prenosivi izotropski dozimetar koji kontinuirano i selektivno mjeri nivo izloženosti ljudskog tijela EM polju u 14 različitih frekventnih opsega od 88 MHz do 5850 MHz. Uređaj ima mogućnost da razdvaja doprinose

signala različitih frekventnih opsega. Softver isporučen sa uređajem omogućuje obradu podataka i podešavanje različite konfiguracije dozimetra. U Tabeli III prikazane su osnovne tehničke karakteristike ovog uređaja. Više tehničkih informacija o pomenutom uređaju, kao i polarizacioni dijagrami sonde dostupni su u [21].

VI. REZULTATI PROCJENE SAR VRIJEDNOSTI

U ovom radu su predstavljene rezultati mjerenja jačine el. polja u *indoor* okruženju (Tabela IV). Procjena izloženosti se vršila u cilju provjere nivoa izloženosti EM zračenju, te poređenju istih sa odgovarajućim standardima. Na osnovu dobijenih rezultata, koristeći izraz (7), prikazane su i SAR vrijednosti (Tabela IV). Na ovaj način dozimetar se može pretvoriti u SAR metar. Ovim je moguće napraviti komparaciju rezultata mjerenja sa osnovnim ograničenjima datim u [4]-[7], [20]. U procesu mjerenja u *indoor* uslovima perioda uzorkovanja jačine el. polja iznosila je 10 sekundi. Da bi se potvrdila relevantnost mjerenja, izloženost različitim frekventnim opsezima je snimana 24 sata dnevno, 7 dana u sedmici, što je rezultovalo u broju hiljada mjernih uzoraka za svaku frekvenciju. Kod svih mjerenja je zabilježen približno isti broj mjernih uzoraka što je omogućilo poređenje ovih vrijednosti. Dobijeni rezultati predstavljaju vršne vrijednosti unutar posmatranog opsega. Rezultati pokazuju da su jačine el. polja, u trenutku mjerenja, bile daleko ispod ovih vrijednosti, što je u skladu sa [4]-[7], [20]. Na Sl. 5 i 6 prikazani su dijagrami

promjene jačine el. polja u vremenu za DECT opseg na lokaciji 2, te procenat jačine el. polja u vremenu. Na Sl. 7 i 8 prikazani su dijagram promjene jačine el. polja u vremenu za WiFi opseg na lokaciji 3, te procenat jačine el. polja u vremenu. Prikazani dijagrami odgovaraju maksimalnim nivoima izlaganja od odgovarajućih opsega na tim lokacijama. Prema tome, najveći procenat zračenja na lokaciji 2 potiče od DECT telefona sa maksimalnom zabilježenom vrijednošću el. polja od 1,929 V/m, što predstavlja 3,33% granične vrijednosti u odnosu na ICNIRP, dok na lokaciji 3 taj procenat čini Wi-Fi internet sa vrijednošću jačine el. polja od 1,57 V/m ili 2,57% granične vrijednosti u odnosu na ICNIRP za taj opseg.

VII. KOEFICIJENT UKUPNE IZLOŽENOSTI

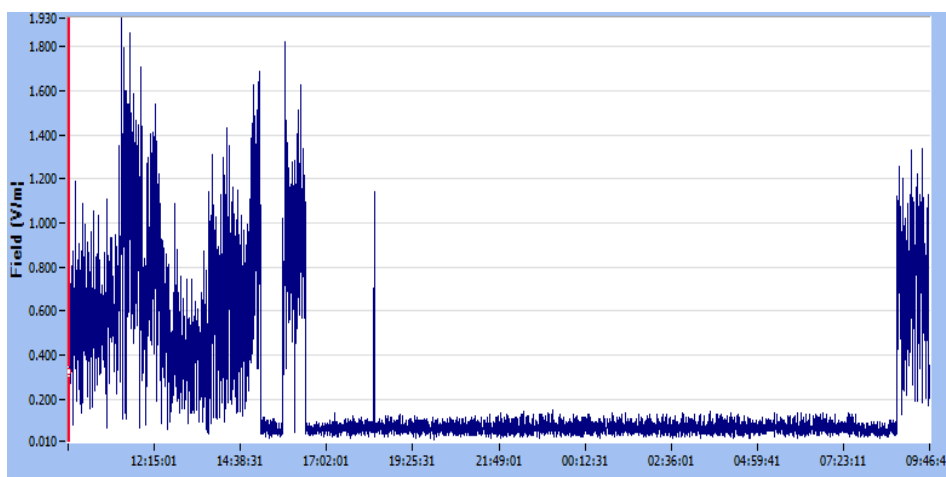
Za frekvencije iznad 100 kHz moraju biti ispunjeni određeni zahtjevi, kako ne bi došlo do prekoračenja dozvoljenih vrijednosti el. polja. Prema [20], koeficijent ukupne izloženosti za el. polja iz više izvora računamo prema relaciji:

$$\sum_{i>1MHz}^{300GHz} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (8)$$

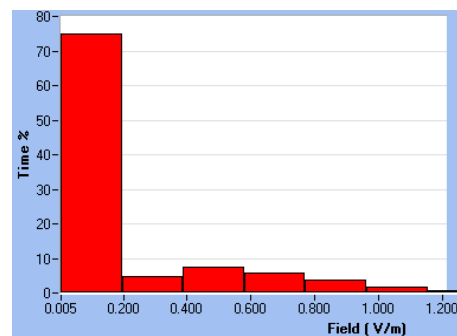
gdje su: E_i intenzitet električnog polja na frekvenciji i , $E_{L,i}$ referentni nivo električnog polja dat u Tabeli I u odnosu na ICNIRP standard. Relacija (8) je zadovoljena za sve vrijednosti date u Tabeli IV.

TABELA IV. REZULTATI MJERENJA ELEKTRIČNOG POLJA I PROCIJENJENA VRIJEDNOST SAR

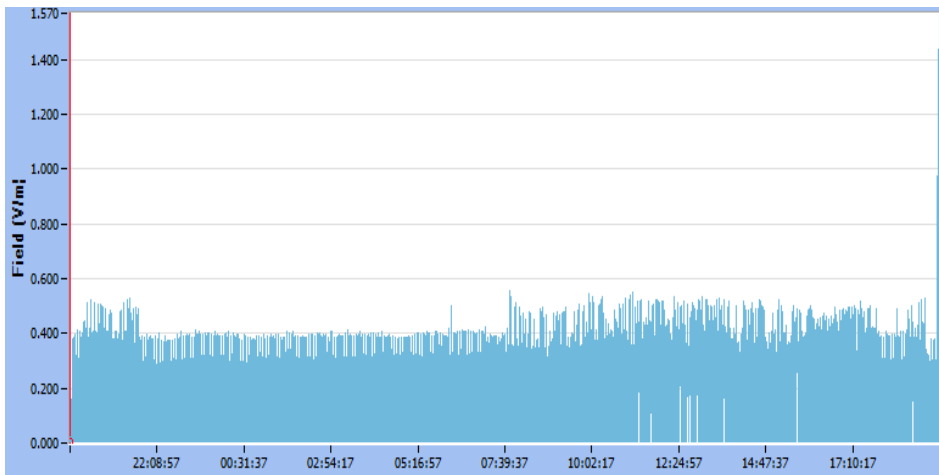
Redni broj	1	2		3		4		5		6		7			
		E (V/m)	SAR ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	E (V/m)	SAR ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	E (V/m)	SAR ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	E (V/m)	SAR ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	E (V/m)	SAR ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	E (V/m)	SAR ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)		
L1	DECT	0,160	1,065	0,166	1,146	0,169	1,188	0,145	0,875	0,130	0,703	0,162	1,09	0,209	1,817
	WiFi	0,085	0,340	0,093	0,407	0,126	0,747	0,041	0,079	0,029	0,039	0,042	0,083	0,182	1,559
L2	DECT	1,929	154,8	1,926	154,32	1,920	153,36	1,843	141,3	1,648	112,99	1,914	152,4	1,893	149,96
	WiFi	1,230	71,226	1,413	93,997	0,331	5,158	0,269	3,406	0,292	4,014	0,502	11,864	0,039	0,071
L3	DECT	0,091	0,345	0,078	0,253	0,097	0,392	0,085	0,300	0,090	0,337	0,097	0,392	0,098	0,399
	WiFi	1,564	115,16	1,562	114,86	1,515	108,05	1,570	116,1	1,552	113,4	1,454	99,54	1,538	111,35



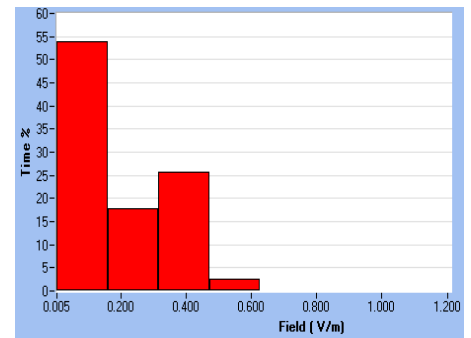
Slika 5. Dijagram promjene jačine el. polja, DECT opseg (1880-1900 MHz)



Slika 6. Procenat jačine el. polja u vremenu, DECT opseg (1880-1900 MHz)



Slika 7. Dijagram promjene jačine el. polja, Wi-Fi opseg (2400-2500 MHz)



Slika 8. Procenat jačine el. polja u vremenu, Wi-Fi opseg (2400-2500 MHz)

VIII. ZAKLJUČAK

Izmjerene vrijednosti zračenja u ovom radu, koje stvaraju DECT i WiFi tehnologije, ukazuju da su parametri zračenja (jačina el. polja i SAR vrijednost) bili daleko ispod graničnih nivoa za izloženost datih od strane ICNIRP, IEEE i CENELEC. Međutim, kako se povećava potreba korisnika za upotrebom bežičnih komunikacionih uređaja, u budućnosti se očekuje povećanje EM emisija, te samim tim i SAR vrijednosti. Stoga je preporučljivo da se periodično sprovede SAR evaluacije i provjere prihvatljivosti SAR nivoa za opštu javnu bezbjednost.

LITERATURA

- [1] M. A. A. Karunarathna and I. J. Dayawana "Energy absorption by the human body from RF and microwave emissions in Sri Lanka", Sri Lankan Journal of Physics, Vol. 7 (2006), 35-47
- [2] Md. Rafiqul Islam, AHM Zahirul Alam, Hikma Shabani: "EM Radiation and Evaluation of Specific Absorption Rate (SAR) in Human Body Exposed to Wireless-Base Station Fields at IIUM Campus", Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering 2008., May 13-15, 2008 Kuala Lumpur, Malaysia
- [3] A. Taflove (1995). Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method. Norwood, MA: Artech House, 1995.
- [4] ICNIRP Guidelines (1998). "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", Health Phys., vol. 74.
- [5] ANSI C95.1 (1982). American National Standard safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 300 kHz to 100 GHz. IEEE
- [6] European Committee for El. Standardization www.cenelec.com
- [7] Federal Communications Commission www.fcc.gov
- [8] S. M. Mann, D. S. Addison, R. P. Blackwell, and M. Khalid, "Personal dosimetry of RF Radiation", Health Protection Agency (Mobile Telecommunications and Health Research Programme), Chilton, Didcot, Oxfordshire OX11 0RQ, Tech. Rep. ISBN 0 85951 568 0, 2005. [Online]. Available: <http://www.mthr.org.uk>
- [9] Darko Šuka, Petar Mededović, Mirjana Simić: "Procjena vrijednosti parametra SAR u blizini GSM/UMTS baznih stanica", The 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, pp. 668-673, ISSN 1847-3938, ISBN 978-953-233-078-6, 2014
- [10] C. H. Durney, H. Massoudi, and M. F. Iskander, Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook. US Air Force, 2002.
- [11] Balzano Q, Chou C-K, Cicchetti R, Faraone, Tay R Y-S.: „An Efficient RF Exposure System with Precise Whole-Body Average SAR Determination for in vivo Animal Studies at 900MHz“. Pp. Mag. Vol 4.
- [12] J. C. Lin (2003), Biological Bases of Current Guidelines for Human Exposure to Radio-Frequency Radiation, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol.45, No.3.
- [13] IEEE Std. C95.1-1999, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz, New York, 1999.
- [14] K. S. Yee (1996). Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, Vol. AP-14, No.3
- [15] Ericsson AB (2006). Radio waves and health: Mobile communications.
- [16] D. B. Davidson (2005). Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering. Cambridge CB2 2RU, UK.
- [17] W. Sui, "Time Domain Computer Analysis of Nonlinear Hybrid Systems," CRC Press, 2002.
- [18] C.A. Coget, and J. Fondu: "Design of an RF Dosimeter", Katholieke Universiteit Leuven, June 2008.
- [19] U. Knafli, H. Lehmann, and M. Riederer, Electromagnetic Field Measurements Using Personal Exposimeters, Bioelectromagnetics 29:160-162(2008)
- [20] Pravilo 37/2008 o ograničavanju emisija EM zračenja, Regulatorna agencija za komunikacije BiH
- [21] www.satimo.com

ABSTRACT

This paper gives the assessment about SAR parameter value obtained by measuring of electric field intensity which, in indoor environments, create DECT (1880-1900 MHz) and Wi-Fi (2400-2500 MHz) technology, respectively. The paper describes the theoretical model for SAR parameter estimation in human body based on the FDTD method and measurements of electric field strength in the indoor environment on three measurement locations which were conducted with the usage of programmable measuring equipment. The electric field measured values were used for the numerical prediction of SAR. The estimated values of SAR were compared with the reference values prescribed by IEEE, ICNIRP and CENELEC.

EVALUATION OF SAR PARAMETER VALUES FROM DECT AND WIFI TECHNOLOGY IN INDOOR ENVIRONMENT

Darko S. Šuka, Mirjana I. Simić, Predrag V. Pejović