

D. Poljak*

IZLOŽENOST LJUDI ZRAČENJU ANTENSKIH SUSTAVA BAZNIH POSTAJA – DOZIMETRIJA UPADNOG POLJA

UDK 621.396.67:613.648.2

PRIMLJENO: 2.5.2011.

PRIHVAĆENO: 6.2.2012.

SAŽETAK: U radu je iznesena teorijska i eksperimentalna dozimetrija upadnog polja GSM i UMTS baznih postaja što se tiče izloženosti ljudi zračenju ovih sustava. Provedeni su proračuni i mjerenja zračenog polja GSM i UMTS baznih postaja za scenarij najgoreg slučaja izloženosti. Uvidom u izračunate i izmjerene vrijednosti električnog polja u okolini baznih postaja daje se zaključiti kako jakosti polja na mjestima gdje se očekuje boravak ljudi ne prelaze referentne granične vrijednosti za izloženost kako opće, tako i profesionalne populacije propisane međunarodnim i hrvatskim smjernicama.

Ključne riječi: antenski sustavi baznih postaja, dozimetrija upadnog polja, referentne granične razine, opća i profesionalna populacija

UVOD

Rapidan porast mobilnih komunikacija uzrok je kontinuiranog povećanja broja raznih odašiljačkih uređaja, posebno radiobaznih stanica, a pitanje potencijalnog utjecaja na zdravlje ljudi ne jenjava (*Habash, 2002., Poljak, 2011., 2010.*).

Dok su s jedne strane procesi akvizicije podataka i računalni resursi nužni aspekti kvalitete usluge kod bežičnih komunikacijskih sustava, intenzitet i oblik transmitirane elektromagnetske energije važne su za istraživanje bioloških učinaka polja koje generiraju takvi sustavi (*Poljak, 2003., 2006.*).

Vrijedi napomenuti da se procjena razine elektromagnetskih polja koje u prostor zrače

antenski sustavi baznih postaja provodi za slučaj najgoreg mogućeg scenarija.

Bazna postaja predstavlja svojevrсни ekvivalent radiostanici, a opslužuje područje koje se naziva ćelijom (eng. cell). Naziv ćelijska bazna postaja odnosi se na odgovarajuću antensku strukturu i pripadnu elektroničku opremu. Signal se putem kabela prenosi do antena, a zatim emitira u obliku elektromagnetske energije u slobodni prostor koji okružuje ćelijsku baznu postaju.

Pravilni šesterokut predstavlja optimalni oblik ćelije s obzirom na relativno ujednačenu udaljenost rubova od središta te potpunu pokrivenost područja signalom.

Kada korisnik uspostavi vezu, mobilna stanica komunicira s najbližom baznom postajom koja poziv prosljeđuje do centrale, a zatim i do drugog uređaja ili fiksne mreže. Gibanjem korisnika od ćelije do ćelije sustav automatski predaje poziv sljedećoj baznoj postaji (eng. hand over).

* Dr. sc. Dragan Poljak, red. prof. (dpoljak@fesb.hr), Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu, R. Boškovića bb, 21000 Split.

Razina međusobne interferencije kod ćelija koje se koriste istim frekvencijskim pojasom tzv. CCI (co-channel interference) može se smanjiti upotrebom vrlo usmjerenih antena, što se pak nepovoljno reflektira na ukupni kapacitet sustava.

Povećanje kapaciteta može se realizirati tehnikom dijeljenja zagušene ćelije na manje ćelije. Tako se makroćelije dijele na mikroćelije, a mikroćelije na pikoćelijske strukture.

Izloženost ljudi neionizirajućem zračenju predmet je brojnih istraživanja multidisciplinarnog karaktera. Svojevrsan pregled dosadašnjih spoznaja na ovom području dostupan je primjerice u radovima autora (*Poljak, 2011., 2010.*), dok je cjelovita problematika izloženosti ljudi neionizirajućem zračenju koja obuhvaća biološke učinke, mjere zaštite, elektromagnetsko-toplinsku dozimetriju te odgovarajuću legislativu izložena primjerice u radovima autora (*Poljak, 2003., 2006.*).

U ovome radu razmatra se procjena zračenog polja radiobaznih stanica primjenom postupaka teorijske i eksperimentalne dozimetrije upadnog polja. Proračun polja proveden je primjenom analitičkih relacija koje slijede iz metoda geometrijske optike (*Poljak, 2003., 2006.*). U radu je dano nekoliko ilustrativnih primjera proračuna i mjerenja zračenog polja radiobaznih stanica. Dobiveni rezultati uspoređeni su s graničnim vrijednostima propisanim domaćom i međunarodnom legislativom (*ICNIRP, 1998., IEEE Recommended..., 1992., Poljak i sur., 2002.*).

BIOLOŠKI UČINCI I NAČELA ZAŠTITE OD NEIONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Biološkim učincima neionizirajućeg zračenja smatraju se bilo kakve detektabilne fiziološke promjene u tijelu čovjeka. Eventualne štetne posljedice za zdravlje mogu nastupiti ako se prekorače granice koje je ljudsko tijelo u stanju kompenzirati vlastitim regulacijskim mehanizmima. Štetni učinci za ljudsko zdravlje nerijetko su akumulirajućeg karaktera, a usko su povezani s duljinom izloženosti zračenju kao i dozi ozračenosti. Više detalja o biološkim učincima neioni-

zirajućeg zračenja moguće je pronaći u velikom broju publikacija (*ICNIRP, 1998., IEEE Recommended..., 1992., Poljak i sur., 2002.*), kao i u Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja i Pravilniku o ograničenjima jakosti elektromagnetskih polja za radijsku opremu i telekomunikacijsku terminalnu opremu.

Osnovni biološki učinci zbog međudjelovanja elektromagnetskog polja i biološkog sustava s obzirom na frekvencijsko područje i odgovarajuće dozimetrijske veličine prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Međudjelovanje elektromagnetskih polja i ljudskog tijela

Table 1. Interaction of electromagnetic fields and the human body

Frekvencijsko područje	Biomehanizam	Dozimetrijska veličina
Polja niskih frekvencija (3-100 kHz)	Neuromišićne stimulacije	Gustoća struje u pobuđenom tkivu J [A/m ²]
Radiovalovi (100 kHz –3 GHz)	Zagrijavanje tkiva	Specifična razina apsorpcije SAR [W/kg]
Mikrovalno zračenje (3-300 GHz)	Površinsko zagrijavanje	Gustoća snage S [W/m ²]

Radi smanjenja rizika od eventualnih štetnih učinaka elektromagnetskog zračenja propisana su ograničenja regulirana nacionalnom i međunarodnom legislativom kojom su definirane granične vrijednosti karakterističnih parametara elektromagnetskog polja kojima ljudi mogu biti izloženi.

Najšire prihvaćene međunarodne sigurnosne smjernice izdala su međunarodna udruženja *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)*; (1998.) i *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*; (1992.). ICNIRP i IEEE propisuju granične vrijednosti iznad kojih ljudi ne bi smjeli biti izloženi.

Granice propisane pravilnikom IEEE prihvaćene su u SAD-u, kao i u još nekoliko zemalja, dok je većina zemalja zapadne Europe prihvatila norme propisane ICNIRP smjernicama.

Međunarodnim normama i preporukama prema ICNIRP-u propisane su granične vrijednosti karakterističnih parametara elektromagnetskog polja u dvije kategorije:

- *temeljna ograničenja* – veličine međudjelovanja elektromagnetske energije s biološkim tkivom, izražene kao *gustoća apsorbirane snage SAR* [W/kg] i *gustoća inducirane struje J* [A/m²] i *gustoća inducirane snage S* [W/m²]
- *referentne razine* – veličine koje opisuju upadno (incidentno) elektromagnetsko polje – *jakost električnog polja E* [V/m], *jakost magnetskog polja H* [A/m] i *gustoća snage elektromagnetskog vala S* [W/m²].

Zaštita ljudi od elektromagnetskog zračenja u prvom redu podrazumijeva zadovoljavanje *temeljnih ograničenja*. Proračuni i mjerenja veličina kojima su definirana osnovna ograničenja (*SAR, J*) čine postupke tzv. *dozimetrije unutar-njeg polja*.

Alternativa se, pak, svodi na proračune i mjerenja parametara polja kojima su definirane *referentne razine*. U ovom slučaju radi se o postupcima *dozimetrije upadnog polja*, tj. o proračunima i mjerenjima jakosti električnog (*E*) i magnetskog (*H*) polja te gustoće snage (*S*). U praksi se, zbog

lakše izvodivosti, procjena štetnosti gotovo isključivo svodi na zadovoljavanje referentnih razina.

Hrvatske smjernice za zaštitu od elektromagnetskih polja

U Republici Hrvatskoj danas postoje dva pravilnika za zaštitu od neionizirajućeg zračenja: *Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja* koji je prema *Zakonu o zaštiti od neionizirajućeg zračenja donijelo Ministarstvo zdravstva* Republike Hrvatske u prosincu 2003. godine, te *Pravilnik o ograničenjima jakosti elektromagnetskih polja za radijsku opremu i telekomunikacijsku terminalnu opremu* koji je na temelju Zakona o telekomunikacijama u prosincu 2004. godine donijelo *Ministarstvo mora, turizma, prometa i razvitka*.

Vrijedi istaknuti da su granice izloženosti u oba pravilnika dosta oštrije (nekoliko puta niže) nego u većini međunarodnih normi.

Ograničenja specifične apsorbirane snage uprosječna po cijelom tijelu, lokalizirane specifične apsorbirane snage u glavi i trupu te lokalizirane specifične apsorbirane snage u udovima za profesionalnu i opću populaciju prema *Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja* prikazana su u tablicama 2 i 3.

Tablica 2. Temeljna ograničenja za profesionalnu populaciju

Table 2. Basic restrictions for professional population

Frekvencija f	Specifična apsorbirana snaga uprosječna po cijelom tijelu <i>SAR</i> (W/kg)	Specifična apsorbirana snaga lokalizirana u glavi i trupu <i>SAR</i> (W/kg)	Specifična apsorbirana snaga lokalizirana u ekstremitetima <i>SAR</i> (W/kg)
10 MHz–10 GHz	0,4	10	20

Tablica 3. Temeljna ograničenja za opću populaciju

Table 3. Basic restriction for general public population

Frekvencija f	Specifična apsorbirana snaga uprosječna po cijelom tijelu <i>SAR</i> (W/kg)	Specifična apsorbirana snaga lokalizirana u glavi i trupu <i>SAR</i> (W/kg)	Specifična apsorbirana snaga lokalizirana u ekstremitetima <i>SAR</i> (W/kg)
10 MHz–10 GHz	0,08	2	4

Referentne granične razine električnog i magnetskog polja, gustoće magnetskog toka i gustoće snage ekvivalentnog ravnog vala za izloženost profesionalne i opće populacije prikazane su u tablicama 4 i 5.

minantni biološki učinci su toplinskog karaktera, odnosno svode se na zagrijavanje tkiva. Pri tome je ključna zadaća teorijske dozimetrije određivanje odgovarajuće raspodjele apsorbirane elektromagnetske energije unutar ljudskog tijela.

Tablica 4. Granične razine električnog i magnetskog polja, gustoće magnetskog toka i gustoće snage za profesionalnu populaciju

Table 4. Referent levels for occupational exposure to electric fields, magnetic fields, magnetic flux density and power density

Frekvencija f	Jakost električnog polja E (V/m)	Jakost magnetskog polja H (A/m)	Gustoća magnetskog toka B (μ T)	Gustoća snage (ekvivalentnog ravnog vala) S_{ekv} (W/m ²)
400–2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$

Tablica 5. Granične razine električnog i magnetskog polja, gustoće magnetskog toka i gustoće snage za opću populaciju

Table 5. Referent levels for general public exposure to electric fields, magnetic fields, magnetic flux density and power density

Frekvencija f	Jakost električnog polja E (V/m)	Jakost magnetskog polja H (A/m)	Gustoća magnetskog toka B (μ T)	Gustoća snage (ekvivalentnog ravnog vala) S_{ekv} (W/m ²)
400–2000 MHz	$0,55 f^{1/2}$	$0,00148 f^{1/2}$	$0,00184 f^{1/2}$	$f/1250$

Referentne granične razine dane su za efektivne vrijednosti jakosti nesmetanog polja i gustoće magnetskog toka, a vrijede za jednoliku izloženost cijelog ljudskog tijela elektromagnetskim poljima.

la. Kako je već istaknuto, alternativa se svodi na proračun ili mjerenja vanjskog polja primjenom postupaka dozimetrije upadnog polja. U nastavku će biti izneseni temeljni koncepti dozimetrije unutarnjeg i upadnog polja.

DOZIMetriJA ELEKTROMAGNETSKOG POLJA NA VISOKIM FREKVENCIJAMA

Zračenje antena baznih postaja je kontinuirano, ali relativno niskog intenziteta, a pri tome je ozračeno čitavo tijelo. Vrijedi istaknuti da je ovom zračenju izložen veliki dio populacije. U slučaju mobilnog telefona izvor radiozračenja postavljen je tik uz glavu korisnika, pa je primljena doza zračenja viša no u prethodnom slučaju. S druge strane, izloženost ovom zračenju nije kontinuirana.

S obzirom da se kod izloženosti poljima baznih postaja radi o visokim frekvencijama, do-

Gustoća apsorbirane snage

Izlaganje čovjeka poljima visokih frekvencija, pa tako i GSM zračenju baznih postaja, kvantificira se *specifičnom gustoćom apsorbirane snage*, odnosno *stupnjem specifične apsorpcije* elektromagnetske energije (*Specific Absorption Rate - SAR*). SAR se definira kao vremenska promjena prirasta energije dW kojeg apsorbira element mase dm sadržan u elementu volumena dV gustoće mase ρ :

$$SAR = \frac{d}{dt} \frac{dW}{dm} = \frac{d}{dt} \frac{dW}{\rho dV} \quad [1]$$

i izražava se u vatima po kilogramu tkiva [W/kg].

Nadalje, SAR predstavlja mjeru lokalnog zagrijavanja tkiva te se određuje iz relacije:

$$SAR = C \frac{dT}{dt} \quad [2]$$

gdje je dT [°C] diferencijalno mali porast temperature u infinitezimalnom vremenskom intervalu dt [s], dok je C [J/kg°C] specifični toplinski kapacitet tkiva.

S druge strane, s aspekta gustoće toplinskih izvora SAR se definira preko relacije:

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad [3]$$

gdje je σ [S/m] vodljivost tkiva, E [V/m] efektivna (srednja kvadratna) vrijednost električnog polja koje se inducira u tkivu, a ρ [kg/m³] gustoća mase.

SAR se određuje postupcima teorijske i eksperimentalne dozimetrije, odnosno proračunom ili mjerenjem.

Metode mjerenja SAR-a uključuju eksperimente na životinjama i fantomima - modelima ljudskog tijela načinjenim od sintetičkog materijala čija električna svojstva odgovaraju ljudskom tkivu.

Više detalja o dozimetriji upadnog polja na visokim frekvencijama moguće je pronaći u raznim publikacijama (*Poljak, 2011., 2010., 2003., ICNIRP, 1998., Poljak i sur., 2003., 2004., Poljak, 2007.*)

Dozimetrija upadnog polja radiobaznih stanica

Procjena potencijalnog utjecaja na zdravlje ljudi zbog izloženosti zračenom polju baznih postaja određuje se proračunom ili mjerenjima zračenog polja i gustoće snage, te usporedbom dobivenih rezultata s referentnim razinama.

Proračuni navedenih veličina provode se primjenom jednostavnih *analitičkih relacija* ili primjenom numeričkih metoda i složenijih *simulacija* na računalu.

Antenski sustavi baznih postaja

Teorijska dozimetrija izračenog elektromagnetskog polja antenskog sustava baznih postaja obuhvaća proračun gustoće snage, te jakost električnog i magnetskog polja u zoni bliskog i daljinskog polja. Proračuni navedenih veličina temelje se na postupcima propisanim u normama referiranim u Pravilniku o ograničenjima jakosti elektromagnetskih polja za radijsku opremu i telekomunikacijsku terminalnu opremu.

Sa stajališta teorijske dozimetrije upadnog polja razmatra se antenski sustav baznih postaja. Obično se po jednoj ćeliji upotrebljavaju tri usmjerene antene velikog pojačanja. Antene se postavljaju visoko, na krovovima zgrada ili samostojećim tornjevima (slika 1) kako bi se izbjegle fizičke prepreke poput brda ili visokih zgrada i osigurala široka pokrivenost područja, odnosno smanjilo područje radiosjene.

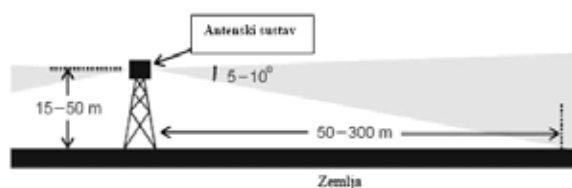


Slika 1. Bazna postaja montirana na samostojećem stupu

Figure 1. Base station mounted on a free-standing tower

Pojačanje usmjerenih antena iznosi između 10 i 20 dBi, što znači da je emitirana snaga iz-

među 10 i 100 puta veća u željenom smjeru u odnosu na izotropni radijator - idealizirani izvor zračenja koji zrači jednako u svim smjerovima. Tako, primjerice, zračenje iza usmjerene antene može biti 300 puta manje nego ono u glavnom snopu. Zračenje antenskog sustava bazne postaje prikazano je na slici 2.



Slika 2. Zračenje bazne postaje

Figure 2. Radiation of a base station

Uz horizontalnu, zračenje antena ima i vertikalnu usmjerenost, s vrlo uskim dijagramom zračenja, u pravilu blago nagnutim prema dolje, bilo mehanički ili elektronički.

Efektivna izotropna zračena snaga

Općenito, zračena snaga baznih postaja ovisi o broju kanala po baznoj postaji, broju privremeno uspostavljenih veza, te kvaliteti i sadržaju prenesene informacije.

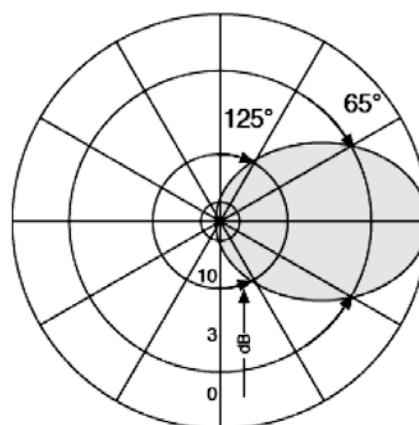
Snaga odašiljača pojedine bazne postaje dimenzionira se na razinu koja omogućava uporabu mobilne postaje unutar područja pokrivanja. Pri tome se ne dopušta izlazak signala izvan planiranog područja pokrivanja.

U svrhu pokrivanja cjelovitog područja usluge i ostvarivanja kapaciteta za dovoljno slobodnih kanala, odnosno za svakog korisnika unutar ćelije, potreban je signal odgovarajuće snage. Porast pretplatnika uvjetuje instaliranje sve većeg broja baznih postaja koje su neminovno sve bliže jedna drugoj. S druge strane ove bazne postaje rade s nižom razinom snage da bi se spriječilo neželjeno međudjelovanje između susjednih baznih postaja. Budući da svaka bazna postaja ima ograničen kapacitet, u *urbanim područjima*, gdje je veći broj korisnika, a time i zahtjev za većim kapacitetom, nužan je veći broj baznih postaja, pa su ćelije manje. Smanjivanjem veličine ćelije smanjuje se i udaljenost između baznih i mobilnih postaja. S obzirom da su telefonski uređaji

konstruirani tako da uvijek odašilju najniže moguće snage, bazne postaje unutar manje ćelije zrače nižu gustoću snage i polje od onih koje su unutar većih ćelija.

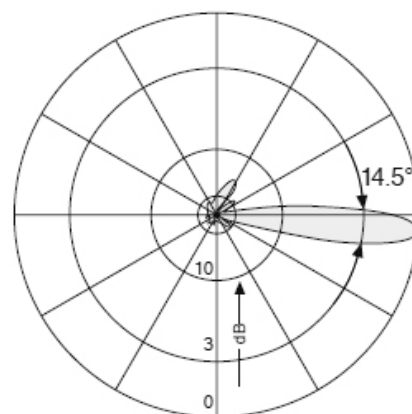
U *ruralnim područjima* snaga se dimenzionira tako da pokriva udaljena područja (10-30 km) s ograničenim brojem upotrijebljenih frekvenzijskih pojaseva dok se u *urbanim područjima* snaga raspodjeljuje na nekoliko korisničkih pojaseva unutar manjeg područja (500 m).

Najveći dio elektromagnetske energije sadržan je unutar glavnog snopa koji je vrlo širok u horizontalnoj, a relativno uzak u vertikalnoj ravnini te lagano mehanički ili elektronički nagnut prema zemlji, uz kut elevacije u rasponu od 5 do 10° (slike 3a i 3b).



Slika 3a. Horizontalni dijagram zračenja GSM antene

Figure 3a. Horizontal pattern of GSM antenna



Slika 3b. Vertikalni dijagram zračenja GSM antene

Figure 3b. Vertical pattern of GSM antenna

U podnožju nosača izloženost GSM zračenju je značajno manja nego u ravnini antena na sličnoj udaljenosti.

Elektromagnetska energija koju antenski sustav ćelijske bazne postaje zrači u okolni prostor usko je usmjerena u skladu s odgovarajućim dijagramom zračenja u vertikalnoj ravnini. Vremenski uprosječena gustoća snage ovakvog predajnog sustava opada s kvadratom udaljenosti, pa su u skladu s tim i razine elektromagnetskog polja u blizini podnožja objekta na kojem je antena montirana zanemarive u odnosu na iznose polja u neposrednoj blizini antenske strukture.

Razine izračenih polja uvelike ovise o vrsti antena, lokaciji i udaljenosti od bazne postaje. Bazne postaje najčešće se upotrebljavaju u sektorskom aranžmanu i stvaraju snop zračenja širok u horizontalnoj ravnini i veoma uzak u vertikalnoj ravnini (eng. *pie-shaped beam*).

Efektivna izotropna zračena snaga EIRP (eng. effective isotropic radiated power) je ključan parametar u analizi zračenja antenskog sustava bazne postaje.

Veličina EIRP može se izvesti iz relacije za gustoću snage izotropnog radijatora.

Za slučaj linearnih, homogenih i izotropnih sredina snaga koju antena odašilje u slobodni prostor, za slučaj harmonijski ovisnih veličina je dana izrazom (HRN EN 50383-2005):

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \oint_{\bar{A}} \vec{S}(\vec{r}, t) d\bar{A} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \oint_{\bar{A}} \left\{ \left[\vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}^*(\vec{r}) \right] + \left[\vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}^*(\vec{r}) \right] e^{j2\omega t} \right\} d\bar{A} \quad [4]$$

gdje je $d\bar{A}$ diferencijal zamišljene površine.

Prosječna gustoća snage je dana izrazom:

$$\vec{S}_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \vec{S}(\vec{r}, t) d(\omega t) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\vec{E} \times \vec{H}^* \right] \quad [5]$$

Faktor $\frac{1}{2}$ u izrazu [5] pojavljuje se jer su polja E i H izražena vršnim vrijednostima i treba ga izostaviti ako se razmatraju efektivne vrijednosti.

Ukupna srednja snaga je oblika:

$$P_{av} = \oint_S \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\vec{E} \times \vec{H}^* \right] d\bar{A} \quad [6]$$

i predstavlja totalnu izračenu snagu antene.

S obzirom da u daljinskom polju ravnog vala vrijedi jednostavan odnos amplituda električnog i magnetskog polja, primjenjuje se izraz:

$$Z_0 = \frac{E_\theta}{H_\phi} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad [7]$$

gdje je Z_0 impedancija slobodnog prostora koja približno iznosi 377Ω .

Gustoća snage ravnog vala može se pisati u obliku:

$$S_{av} = \left| \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\vec{E} \times \vec{H}^* \right] \right| = \frac{1}{2} Z_0 H_\phi^2 = \frac{1}{2} \frac{E_\theta^2}{Z_0} \quad [8]$$

Za slučaj točkastog izvora transmitirana snaga dobiva se integracijom gustoće snage po zamišljenoj sferi radijusa r :

$$P_t = \oint_S \vec{S} d\bar{A} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S \cdot \vec{e}_r r^2 \sin \theta d\theta d\phi \cdot \vec{e}_r = S \cdot 4\pi r^2 \quad [9]$$

Odnosno gustoća snage je tada:

$$S = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad [10]$$

gdje je P_t ulazna snaga antene, a r je udaljenost od točkastog izvora.

Za usmjerenu antenu, odgovarajuća gustoća snage definira se izrazom [5]:

$$S = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi r^2} \quad [11]$$

gdje G_t označava dobitak snage odašiljačke antene u odnosu na izotropni izvor, u smjeru maksimalnog zračenja glavnog snopa.

Efektivna izotropna zračena snaga (EIRP) tada se definira umnoškom:

$$EIRP = P_t \cdot G_t \quad [12]$$

Ako se uzme u obzir i atenuacija u sustavu, tada jednadžba [12] postaje:

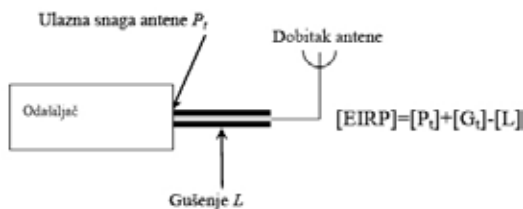
$$EIRP = \frac{P_t \cdot G_t}{L} \quad [13]$$

odnosno, u decibelskom zapisu slijedi:

$$EIRP [dBm] = P [dB] + G_t [dBi] - L [dB] \quad [14]$$

gdje L predstavlja omske gubitke.

Veličine iz relacije [14] prikazane su na slici 4 (ICNIRP, 1998.).



Slika 4. Osnovni elementi bežičnog komunikacijskog sustava

Figure 4. Basic elements of a wireless communication system

Blisko i daljinsko polje antene

Izbor odgovarajuće metode za proračun elektromagnetskog polja bazne postaje ovisi o raznim parametrima, a jedan od njih je i udaljenost točke promatranja od izvora zračenja. Ovisno o udaljenosti od antene točka promatranja nalazi se u području bliskog, odnosno daljinskog polja (Tablica 6).

Tablica 6. Blisko i daljinsko polje antene (r - udaljenost od antene, L - duljina antene, λ - valna duljina)

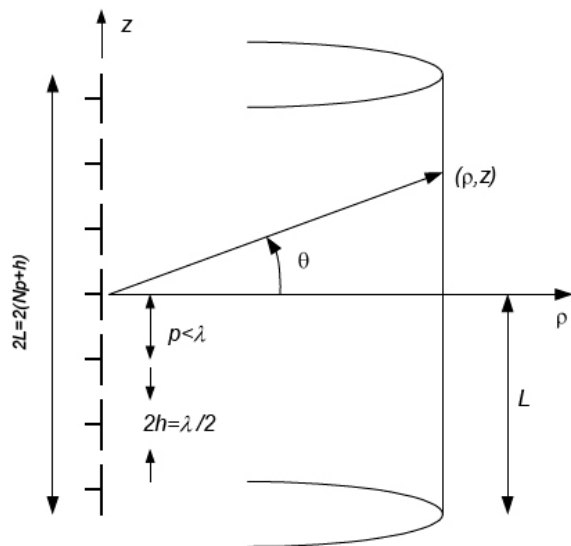
Table 6. The near and far field of an antenna (r - distance from an antenna, L - antenna length, λ - wavelength)

Blisko indukcijsko polje	Blisko radijacijsko polje	Daljinsko polje
$r \leq \frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{4} \leq r \leq \frac{2D^2}{\lambda}$	$r \leq \frac{2D^2}{\lambda}$

Područje bliskog polja obuhvaća *radijacijsko (Fresnelovo)* i *reaktivno (indukcijsko)* polje. U području indukcijskog polja najveći dio elektromagnetske energije ne zrači se u prostor već titra od izvora do točke promatranja. U radijacijskom području bliskog polja energija se propagira od antene, ali zračenje još nema karakteristike ravnog vala. *Zona daljinskog polja (Fraunhoferovo područje)* antene proteže se izvan područja radijacijskog bliskog polja. U ovom području širenje elektromagnetske energije može se aproksimirati ravnim valom.

Analiza u bliskom polju: proračun gustoće snage

Antene ćelijskih baznih postaja mogu se opisati osnim antenskim nizom dipol antena (slika 5).



Slika 5. Osnovni niz rezonantnih dipola

Slika 5. A colinear array of resonant dipoles

Ukupna snaga po jedinici površine cilindra koju izrači osni niz definirana je ovim izrazom:

$$P_{tot} = NP_{rad} = \oint_S \vec{S} \cdot d\vec{A} = \int_0^{2\pi} \int_{-L}^{+L} S \cdot \vec{e}_\rho \cdot \rho d\phi dz \cdot \vec{e}_\rho = S \cdot 2\pi\rho \cdot 2L \quad [15]$$

gdje je P_{rad} zračena snaga jedne dipol antene, N broj kanala, ρ predstavlja radijalnu udaljenost od antene, a $2L$ ukupnu duljinu antene.

Prosječna gustoća snage po jedinici površine cilindra je onda:

$$S = \frac{NP_{rad}}{2\pi\rho 2L} \quad [16]$$

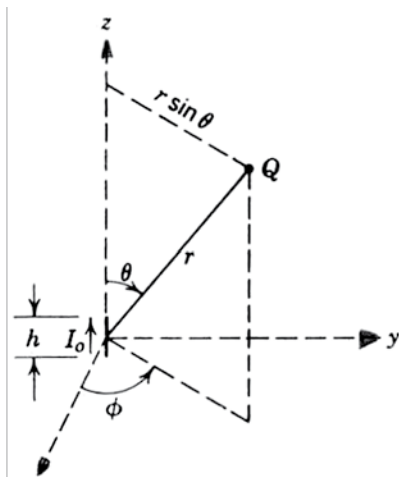
Uzimanjem u obzir sektorskog pokrivanja signalom u prvoj aproksimaciji prosječna gustoća snage može se izraziti ovom relacijom [14]:

$$S = \frac{NP_{rad}}{\pi\rho 2L} \frac{180}{\bar{\phi}} \quad [17]$$

gdje $2\bar{\phi}$ predstavlja širinu glavnog snopa.

Analiza u daljinskom polju: proračun gustoće snage i električnog polja

Ako se točka promatranja nalazi u zoni daljinskog polja, antenski sustav bazne postaje predstavlja točkasti izvor zračenja (Hertzov dipol) prikazan na slici 6.



Slika 6. Hertzov dipol

Figure 6. Hertz dipole

Za slučaj točkastog izvora koji zrači u svim smjerovima jednako (izotropni radijator) emitirana snaga može se jednostavno izraziti preko gustoće snage integracijom po sferi radijusa r :

$$P_t = \oint_S \bar{S} d\bar{A} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} S \cdot \bar{e}_\theta * r^2 \sin \theta d\theta d\phi \cdot \bar{e}_r = S \cdot 4\pi r^2 \quad [18]$$

Gustoća snage točkastog izvora izoliranog u slobodnom prostoru je tada:

$$S = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad [19]$$

Za slučaj usmjerene antene gustoća snage dobiva se množenjem s odgovarajućim dobitkom antene G:

$$S = \frac{P_t G}{4\pi r^2} \quad [20]$$

Uzimajući u obzir relaciju [8] za slučaj efektivnih vrijednosti razmatranih veličina:

$$\frac{E^2}{Z_0} = \frac{P_t G}{4\pi r^2} \quad [21]$$

jednostavno slijedi:

$$E = \frac{\sqrt{30 P_t G}}{r} \quad [22]$$

Ako se antenski sustav bazne postaje sastoji od N kanala, tada se, primjenom koncepta EIRP-a, može pisati:

$$S = \frac{N \cdot P_t G_t}{4\pi r^2} = \frac{N \cdot EIRP}{4\pi r^2} \quad [23]$$

odnosno efektivna vrijednost električnog polja je tada oblika:

$$E = \frac{\sqrt{30 N \cdot P_t G}}{r} = \frac{\sqrt{30 N \cdot EIRP}}{r} \quad [24]$$

Izraz [24] vrijedi ako je antenski sustav izoliran u slobodnom prostoru, te ako se točka promatranja nalazi u smjeru maksimuma zračenja glavnog snopa u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini.

Da bi se što preciznije izračunalo polje u danoj točki promatranja, potrebno je uzeti u obzir refleksiju elektromagnetskog vala od zemlje, te položaj točke promatranja u odnosu na dijagram zračenja dane antene.

Primjenom geometrijske optike iznos totalnog daljinskog polja može se izraziti superpozicijom direktnog i reflektiranog vala (Poljak, 2003., 2006.):

$$\bar{E}^{tot} = \bar{E}^{inc} + \bar{E}^{ref} \quad [25]$$

Razmatrajući scenarij najgoreg slučaja, tj. pretpostavljajući da su upadno i reflektirano polje u fazi, vektorska jednadžba [25] prelazi u algebarsku:

$$E^{tot} = E^{inc} + E^{ref} \quad [26]$$

pri čemu je upadno i reflektirano polje definirano izrazima (Poljak, 2003., 2006.):

$$E^{inc} = \frac{E_0(\phi, \vartheta)}{r} e^{jkr} \quad [27]$$

$$E^{ref} = \Gamma_R(\phi', \vartheta') \frac{E_0(\phi', \vartheta')}{r'} e^{jkr'} \quad [28]$$

gdje je Γ_R odgovarajući koeficijent refleksije, a E_0 amplituda polja upadnog vala definirana relacijom (Poljak, 2003., 2006.):

$$E_0(\phi, \vartheta) = \sqrt{30NP_{rad}G} = \sqrt{30N \cdot EIRP} \quad [29]$$

a G predstavlja dobitak antene.

Ako se pretpostavi da je zemlja idealno vodljiva, relacija [24] postaje:

$$E = 2 \frac{\sqrt{30N \cdot EIRP}}{r} \quad [30]$$

pri čemu faktor 2 implicira totalnu refleksiju od zemlje.

Dakle, u scenariju najgoreg mogućeg slučaja u smislu izlaganja čovjeka zračenju, totalno polje zbog refleksije može poprimiti dvostruku vrijednost upadnog polja.

S druge strane, ako je poznat dijagram zračenja antene, u proračun se može uključiti i relativni dobitak koji proizlazi iz dijagrama zračenja dane antene.

Na taj način, jednadžba [23] poprima oblik:

$$S = \frac{N \cdot EIRP}{4\pi r^2} F^2(\phi, \theta) \quad [31]$$

pa je onda odgovarajuće električno polje definirano izrazom:

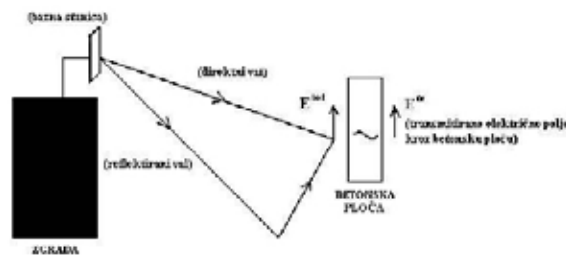
$$E = \frac{\sqrt{30N \cdot EIRP}}{r} F(\phi, \theta) \quad [32]$$

gdje $F(\phi, \theta)$ predstavlja tzv. relativni, odnosno numerički dobitak.

Na temelju aproksimacije ravnog vala, magnetsko polje u daljinskoj zoni antenskog sustava bazne postaje može se izraziti preko električnog polja u skladu s relacijom [7].

Prisutnost reflektirajućih i raspršnih površina, poput zidova zgrada, može značajno utjecati na razine polja. Nadalje, gustoća snage je niža unutar zgrada nego izvan zgrada jer u prvom slučaju prolazi kroz zid. Primjerice, faktor atenuacije stakla, drva ili cementa kreće se između 10 i 100 dB.

Komponente direktnog, reflektiranog i transmitiranog vala prikazane su na slici 7.



Slika 7. Upadno, reflektirano i transmitirano polje

Figure 7. Incident, reflected and transmitted field

Razina izračenog polja, osim o parametrima antenskog sustava, ovisi dakle o udaljenosti od antene, kutevima u odnosu na glavni snop, te o fenomenima refleksije i transmisije. Općenito je na površini zemlje signal relativno niži u blizini antenskog tornja.

PRIMJERI PRORAČUNA I MJERENJA

U ovom odjeljku dani su neki ilustrativni primjeri proračuna i mjerenja zračenog polja radio-baznih stanica.

Primjeri proračuna

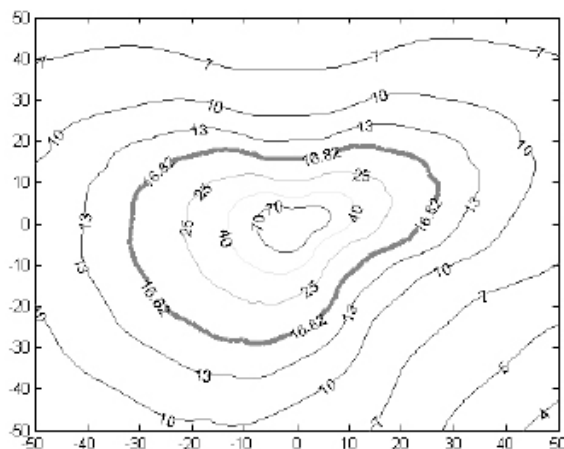
Razmatra se GSM izvor zračenja u obliku antenskog sustava bazne postaje montirane na samostojeći stup visine 46 metara od tla. Primjeri se odnose na GSM i UMTS frekvencijsko područje. Osnovni tehnički podaci zračećeg sustava dani su u Tablici 7.

Tablica 7. Parametri antenskog sustava GSM bazne postaje - primjer br. 1**Table 7. Parameters of the GSM base station antenna system – example No 1**

Frekvencija odašiljanja:	GSM silazni pojas (935 – 960 MHz)
Broj smjerova zračenja	3
Smjerovi glavnih latica zračenja	sektor A: 65°; sektor B: 200°; sektor C: 290°
Elevacije glavnih latica zračenja u odnosu na horizont:	sektor A: -3°; sektor B: 3°; sektor C: 2°
Tipovi antena	sektor A: Celwave AP907016, 2 antene; sektor B: Celwave AP907016, 2 antene; sektor C: Celwave AP907016, 2 antene
Broj kanala	sektor A: 2; sektor B: 2; sektor C: 2
Najveća dopuštena EIRP po kanalu:	sektor A: 59.5 dBm; B: 59.5 dBm; C: 59.5 dBm

Najmanja udaljenost od izvora zračenja na kojoj borave ljudi je cca 600 m. Područje 1 pokriva kut azimuta od 150° do 200° te kut elevacije u odnosu na smjer horizonta od -7° do -8° gledano od izvora. Ukupno polje kojem pridonose svi sektori na udaljenosti od 600 m je iznosa $E=0.4606$ V/m, što je znatno niže od referentne granične razine koja na GSM frekvenciji za opću populaciju iznosi $E_{lim}=16.82$ V/m prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja.

Na slici 8 prikazana je raspodjela električnog polja u okolini antenskog sustava radiobazne stanice za najgori mogući slučaj (točke koje se nalaze unutar vertikalnog glavnog snopa). Vidljivo je da već na udaljenostima većim od 30 m od antenskog sustava iznosi električnog polja padaju ispod referentne granične razine od $E_{lim}=16.82$ V/m.

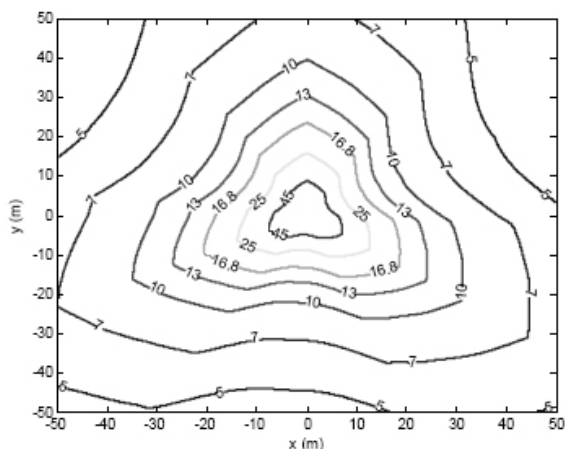
*Slika 8. Raspodjela električnog polja u u okolini antenskog sustava – primjer br. 1**Figure 8. Electric field distribution in the vicinity of the antenna system – example No 1*

Sljedeći primjer odnosi se na antenski sustav radiobazne stanice montiran na krov zgrade na visini od 17 m iznad zemlje. Tehnička specifikacija promatrane GSM antene dana je u Tablici 8.

Tablica 8. Parametri antenskog sustava GSM bazne postaje - primjer br. 2**Table 8. Parameters of the GSM base station antenna system – example No 2**

Frekvencija odašiljanja	GSM silazni pojas (935 – 960 MHz)
Broj smjerova zračenja	3
Smjerovi glavnih latica zračenja	sektor A: 5°; sektor B: 125°; sektor C: 245°
Elevacije glavnih latica zračenja u odnosu na horizont	sektor A: 0°; sektor B: 2°; sektor C: 2°
Tipovi antena	sektor A: Kathrein 742264, 4 antene; sektor B: Kathrein 742264, 4 antene; sektor C: Kathrein 742264, 4 antene
Broj kanala	sektor A: 4; sektor B: 4; sektor C: 4
Najveća dopuštena EIRP po kanalu	sektor A: 54 dBm; B: 54 dBm; C: 54 dBm

Na slici 9 prikazana je raspodjela zračenog polja u okolini antenskog sustava za najgori mogući slučaj. Na udaljenosti od oko 20 metara od antene električno polje pada ispod referentne granične razine od 16,82 V/m.



Slika 9. Raspodjela električnog polja u okolini antenskog sustava - primjer br. 2

Figure 9. Electric field distribution in the vicinity of the antenna system - example No 2

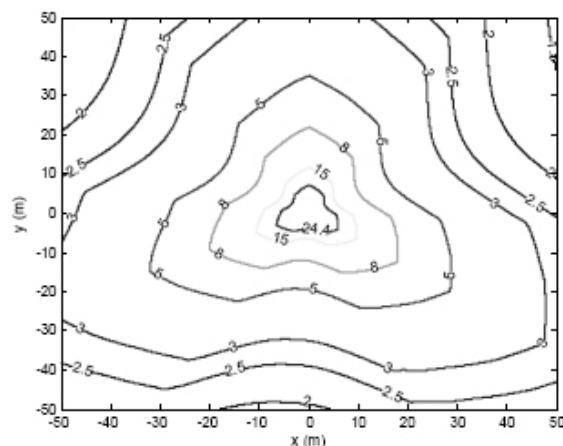
Posljednji primjer odnosi se na zračenje radiobazne stanice na UMTS frekvencijskom području. Tehnička specifikacija promatrane UMTS antene dana je u Tablici 9.

Tablica 9. Parametri antenskog sustava UMTS bazne postaje – primjer br. 3

Table 9. Parameters of the UMTS base station antenna system – example No 3

Frekvencija odašiljanja	UMTS silazni pojas (2110 – 2170 MHz)
Broj smjerova zračenja	3
Smjerovi glavnih latica zračenja	sektor A: 5°; sektor B: 125°; sektor C: 245°
Elevacije glavnih latica zračenja u odnosu na horizont	sektor A: 0°; sektor B: 2°; sektor C: 2°
Tipovi antena	sektor A: Kathrein 742264, 1 antena; sektor B: Kathrein 742264, 1 antena; sektor C: Kathrein 742264, 1 antena
Broj kanala:	Sektor A: 4; sektor B: 4; sektor C: 4
Najveća dopuštena EIRP po kanalu	sektor A: 54 dBm; B: 54 dBm; C: 54 dBm

Na slici 10 prikazana je raspodjela zračenog polja u okolini UMTS antenskog sustava za najgori mogući slučaj (u prostoru radijusa 50 m u okolini antene u visini glavnog snopa). Vidljivo je kako električno polje UMTS bazne postaje opada ispod granične vrijednosti od 24.4V/m (Pravilnik o ograničenjima jakosti elektromagnetskih polja za radijsku opremu i telekomunikacijsku terminalnu opremu) već na udaljenostima manjim od 10 metara od antene.



Slika 10. Raspodjela električnog polja u okolini UMTS antenskog sustava - primjer br. 3

Figure 10. Electric field distribution in the vicinity of the UMTS antenna system - example No 3

Izračunate vrijednosti polja u visini antenskog sustava unutar glavnog snopa predstavljaju scenarij najgoreg slučaja izloženosti zračenju radiobaznih stanica. U praksi, antene baznih postaja postavljaju se na krovove najviših zgrada ili samostojeće tornjeve, te nije realno za očekivati da će ljudi boraviti u razini glavnog snopa.

Treba istaknuti kako se u sklopu ovog proračuna ne uzima u obzir gušenje zbog prolaska polja kroz armirani beton (~10dB). Ako bi se i ta vrijednost uzela u obzir, iznosi električnog polja baznih postaja na promatranim visinama bili bi još niži.

Primjeri mjerenja

Razmatrani izvor zračenja je GSM bazna postaja montirana na vrhu zgrade, na visini od 17 m iznad zemlje (slika 11). Tehnički podaci antenskog sustava dani su u Tablici 10.



Slika 11. Antenski sustav GSM bazne postaje na vrhu zgrade

Figure 11. Antenna system of GSM base station mounted on a roof top

Tablica 10. Parametri antenskog sustava GSM bazne postaje - primjer br. 4

Table 10. Parameters of the GSM base station antenna system - example No 4

Frekvencija odašiljanja	GSM silazni pojas (935 – 960 MHz)
Broj smjerova zračenja	3
Smjerovi glavnih latica zračenja	sektor A: 0°; sektor B: 120°; sektor C: 230°
Elevacije glavnih latica zračenja u odnosu na horizont	sektor A: 0°; sektor B: 0°; sektor C: 3°;
Tipovi antena	sektor A: CelwaveAPXV 906514, 2 antene sektor B: CelwaveAPXV 906514, 2 antene sektor C: CelwaveAPXV 906514, 2 antene
Broj kanala	sektor A: 3; sektor B: 3; sektor C: 3
Najveća dopuštena EIRP po kanalu	sektor A: 58 dBm; B: 58 dBm; C: 58 dBm

Mjernim dipolom i analizatorom spektra provedena su selektivna mjerenja na frekvencijama pojedinih BCCH kanala, te su iz očitane snage određene jakosti električnog polja na odgovarajućim BCCH kanalima. Ukupni izmjereni iznos polja koje generiraju sva tri sektora je $E = 2.33$ V/m.

Drugi primjer odnosi se na GSM baznu postaju montiranu na krovu zgrade na visini od tla 48 m. Tehnički podaci antenskog sustava dani su u Tablici 11.



Slika 12. Pogled na dva sektora antenskog sustava bazne postaje

Figure 12. A view to the 2 sectors of base station antenna system

Tablica 11. Parametri antenskog sustava GSM bazne postaje - primjer br. 5

Table 11. Parameters of the GSM base station antenna system – example No 5

Frekvencija odašiljanja	GSM silazni pojas (935 – 960 MHz)
Broj smjerova zračenja	3
Smjerovi glavnih latica zračenja	sektor A: 30°; sektor B: 150°; sektor C: 270°
Elevacije glavnih latica zračenja u odnosu na horizont	sektor A: 0°; sektor B: 0°; sektor C: 3°;
Tipovi antena	sektor A: CelwaveAPXV 906514, 2 antene sektor B: CelwaveAPXV 906514, 2 antene sektor C: CelwaveAPXV 906514, 2 antene
Broj kanala	Sektor A: 4; sektor B: 4; sektor C: 3
Najveća dopuštena EIRP po kanalu:	sektor A: 59.8 dBm; B: 59.8 dBm; C: 59.8 dBm

Izmjerena vrijednost polja u stanu ispod antene na 15. katu na približnoj udaljenosti od 8

metara od izvora zračenja je $E = 0.23$ V/m. Oba izmjerena izvora električnog polja značajno su ispod referentne granične razine.

ZAKLJUČNE NAPOMENE

U ovome radu opisani su postupci teorijske i eksperimentalne dozimetrije upadnog polja radiobaznih stanica. Proračun polja proveden je primjenom analitičkih relacija proizašlih iz metoda geometrijske optike. Mjerenja polja provedena su standardnim metodama selektivnog mjerenja daljinskog polja na visokim frekvencijama primjenom kalibriranih dipola i analizatora spektra. U radu su obrađeni ilustrativni primjeri zračenja antenskih sustava baznih postaja koje rade u GSM, odnosno UMTS frekvencijskom području.

Analiza rezultata proračuna i mjerenja ukazuje kako dobivene jakosti polja na mjestima gdje se očekuje boravak ljudi ne prelaze referentne granične vrijednosti za izloženost opće i profesionalne populacije propisane relevantnom međunarodnom i hrvatskom legislativom.

Na temelju iznesene dozimetrije upadnog polja moguće je napraviti i idući korak u analizi izloženosti ljudi poljima baznih postaja u smislu rigorozne dozimetrije unutarnjeg polja koja uključuje izradu realističnih elektromagnetskih modela ljudskog tijela.

LITERATURA

Habash, R.W.Y.: *Electromagnetic Fields and Radiation: Human Bioeffects and Safety*, Marcel Dekker, New York, 2002.

HRN EN 50383:2005 - Osnovna norma za proračun i mjerenje jakosti elektromagnetskih polja i gustoće apsorbirane snage koja se odnosi na izloženost ljudi radijskim baznim postajama i nepokretnim krajnjim postajama u

bežičnim telekomunikacijskim sustavima (110 MHz - 40 GHz); (EN 50383:2002)

IEEE Recommended Practice for Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields-RF and Microwave, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1992.

International Commission on Non-Ionizing radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, 74, 1998., 4, 494-522.

Poljak, D.: Electromagnetic Fields: Environmental Exposure U: *Encyclopedia of Environmental Health/Nriagu*, Jerome (ur.), Burlington: Elsevier, 2011., str. 259-268.

Poljak, D.: Izloženost ljudi neionizirajućim elektromagnetskim poljima od ekstremno niskih do mikrovalnih frekvencija, *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 61, 2010., 1, 25-44.

Poljak, D.: *Human Exposure to Electromagnetic Fields*, WIT Press, Southampton-Boston, 2003.

Poljak, D.: *Izloženost ljudi neionizacijskom zračenju*, KIGEN, Zagreb, 2006.

Poljak, D., Šarolić, A., Roje, V.: Human interaction with the electromagnetic field radiated from a cellular base station antennas, *EMC EUROPE 2002 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Volume II / D'Amore, M. (ur.)*, Milan: AEI, 2002., 965-968.

Poljak, D., Yoong, T.C., Kovač, N.: The Assessment of Human Exposure to Low Frequency and High Frequency Electromagnetic Fields Using the Boundary Element Analysis, *Eng. Analysis with Boundary Elements*, 27, 2003., 10, 999-1007.

Poljak, D., Peratta, A., Brebbia, C. A.: The Boundary Element Electromagnetic-Thermal Analysis of Human Exposure to Base Station Antennas Radiation, *Eng. Analysis with Boundary Elements*, 28, 2004., 7.

Poljak, D.: *Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Compatibility*, Wiley, New York, 2007.

Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja, N.N., br. 204/03.

Pravilnik o ograničenjima jakosti elektromagnetskih polja za radijsku opremu i telekomunikacijsku terminalnu opremu, N.N., br. 60/04.

HUMAN EXPOSURE TO THE RADIATION OF BASE STATION ANTENNA SYSTEMS – INCIDENT FIELD DOSIMETRY

SUMMARY: The paper deals with the theoretical and experimental incident field dosimetry for GSM and UMTS base station antennas regarding human exposure to these systems. Calculation and measurement of the field radiated by GSM and UMTS base stations is carried out for the worst case scenario of exposure. Analysing the calculated and measured electric field measures in the vicinity of base stations one concludes that field levels at the areas where humans are expected to live do not exceed referent levels for both general public and occupational exposure proposed by international and national guidelines, respectively.

Key words: *base station antenna system, incident field dosimetry, referent levels, general public and occupational population*

*Subject review
Received: 2011-05-02
Accepted: 2012-02-06*