
Zračenje antene pametnog telefona

Velimir Labinac¹, Ivan Pribanić², Marko Jusup³, Tarzan Legović⁴, Nives Klobučar⁵

¹*Odjel za fiziku, Sveučilište u Rijeci*

²*Prva sušačka hrvatska gimnazija, Rijeka*

³*Center of Mathematics for Social Creativity, Hokkaido University, Japan*

⁴*Institut "Ruđer Bošković", Zagreb*

⁵*Projekt-H d.o.o., Rijeka*

Sažetak. Izračun elektromagnetskog polja stvorenog zračenjem antene konačnih dimenzija općenito je težak zadatak, najčešće rješiv samo numeričkim metodama. Pomoću formule za retardirani vektorski potencijal, nizom aproksimacija dobivaju se izrazi za električno i magnetsko polje, Poyntingov vektor, raspodjelu snage zračenja po kutovima te ukupnu snagu koju zrači antena. Razmotrili smo polje zračenja nekoliko tipova antena za koje su poznata analitička rješenja te ih usporedili s poljem antena u pametnim telefonima. Teorija elektromagnetskog polja zračenja je matematički i pojmovno zahtjevnija za srednjoškolce i studente. Vjerujemo da se ovakvim pristupom koji uključuje primjenu teorije elektromagnetskog polja na zračenje antene najpopularnijeg uređaja današnjice, pametnog telefona, može olakšati usvajanje spomenutih sadržaja i dodatno potaknuti interes za praćenje važnih informacija, na primjer, onih o mogućoj štetnosti zračenja iz pametnih telefona.

Ključne riječi: retardirani potencijali, polje zračenja antene, raspodjela snage zračenja, dipolna antena, antena pametnog telefona.

UVOD

Antena je vodič koji se koristi za primanje i odašiljanje radio-valova. Radio-valovi su elektromagnetski valovi s frekvencijama od reda veličine 10^4 Hz do 10^{12} Hz. Elektromagnetski valovi su "sastavljeni" od titrajućeg električnog polja te titrajućeg magnetskog polja koji su, promatramo li dovoljno daleko od izvora polja, međusobno okomiti te okomiti na smjer širenja vala. Kada elektromagnetski val naiđe na vodič, primjerice radio-valovi radijske postaje naiđu na antenu prijavnika, elektromagnetska polja pobuđuju elektrone antene na titranje. Ti se titraji zatim prenose na membrane zvučnika čijim titranjem nastaje zvuk. Slično tome, ako je antena spojena na izvor izmjeničnog napona, tada izvor stvara promjenjivo električno i magnetsko polje u anteni. Tada antena zrači elektromagnetske valove.

Antene su dio ljudske svakodnevice više od stoljeća, dok su mobilni uređaji s nama tek nekoliko posljednjih desetljeća. Prije 90-ih godina 20. stoljeća, svi mobilni uređaji imali su vanjske antene koje su bile izvedene poput zavojnice, šibe¹ ili kombinacija šibe i zavojnice. Prvi mobitel s unutarnjom antenom bio je danski "Hagenuk Globalhandy" iz 1996., a godinu dana kasnije, tada vodeća Nokia počinje prodavati svoj poznati model 8810 koji je odmah postao popularan i otvorio vrata novoj generaciji mobitela s unutarnjim antenama [1]. S time dolaze i novi izazovi: antene su sada puno bliže tkivima korisnika, što dovodi do povećanja snage apsorbiranog zračenja po kilogramu (SAR^2). Stoga se javila potreba za novim tipom antena, koje će biti čim dalje od korisnika, a unutar uređaja. Danas se u pametnim telefonima najčešće koriste

¹ engl. whip.

² SAR – specific absorption rate, specifična apsorpcija, energija koju jedinična masa ljudskog tkiva apsorbira po jednoj sekundi (mjerna jedinica: $W \cdot kg^{-1}$).

PIFA³, a rjeđe se implementiraju PMA⁴ i zavojnice koje su korištene u starijim modelima mobitela. Neki uređaji koriste jednu antenu za primanje i odašiljanje elektromagnetskih valova, dok drugi koriste nekoliko antena. Prilikom ugradnje antene u uređaje, osim dizajna uređaja koji diktira položaj antene u uređaju i njezinu veličinu, postoje i mnogi praktični čimbenici koje valja razmotriti: širina frekventijskog opsega (bandwidth), učinkovitost, SAR veličinu i rezonantne frekvencije. Ti čimbenici diktiraju gdje će na uređaju antena biti smještena (najčešće na donjoj polovici uređaja jer tkiva čovjeka atenuiraju elektromagnetsko zračenje pa se povećava SAR vrijednost, a ljudsko tkivo utječe i na promjenu frekventijskog opsega) te koje će biti njezine dimenzije kako bi se ostvarila potrebna jačina primljenog signala te pojas frekvencija koje antena može primiti. Maksimalne dimenzije antena u mobilima su 30 mm do 50 mm. Smanjenje dimenzija antena postiže se postavljanjem "uzemljenja", vodljive površine koja djeluje na antenu poput zrcala i udvostručuje njezinu duljinu. Antene koje su tako izvedene nazivaju se monopolnim antenama.

Vjerujemo da su navedene činjenice o pametnim telefonima zanimljive srednjoškolicima i studentima te ih mogu motivirati za učenje osnovnih rezultata iz teorije elektromagnetskog zračenja koje ćemo izložiti u sljedećem poglavlju. Nakon "teorije" ukratko ćemo opisati i usporediti nekoliko tipova antena.

TEORIJA ELEKTOMAGNETSKOG ZRAČENJA

Pretpostavimo da su u anteni pametnog telefona gustoća naboja i gustoća struje poznati. Tada elektromagnetsko polje možemo izračunati pomoću retardiranog vektorskog potencijala [2, 3]

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_P \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t_r)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3 r' \quad (1)$$

koji je rješenje nehomogene valne jednadžbe za $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t)$

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad (2)$$

Jednadžba (2) dobiva se iz Maxwellovih jednadžbi [2, 3]. Laplaceov operator u kartezijevim koordinatama definiran je relacijom

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3)$$

Ukratko ćemo pojasniti veličine koje se javljaju izrazima (1) i (2) te valjanost i značaj rješenja (1). Konstanta μ_0 je permeabilnost vakuuma. Vektor $\mathbf{J}(\mathbf{r}', t_r)$ je gustoća struje koja ovisi o vektoru položaja \mathbf{r}' , a integriramo po području P po kojem protječe struja (crtane varijable). Vrijeme t_r naziva se retardiranim vremenom: vrijednosti potencijala \mathbf{A} u trenutku t posljedica su vrijednosti struje \mathbf{J} u nekom ranijem trenutku t_r . Naime, informacije o vrijednostima potencijala šire se konačnom brzinom svjetlosti c i ne možemo ih trenutno doznati. Ako je udaljenost točke promatranja \mathbf{r} i točke \mathbf{r}' u kojoj se događa promjena struje jednaka $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$, retardirano vrijeme je $t_r = t - R/c$.

³ PIFA – planar inverted F-antenna; planarna invertirana F-antena, engl.

⁴ PMA – planar monopole antenna, planarna monopolna antena, engl.

Izraz (1) izvodi se uz pretpostavku da su izvori, naboji i struje, izolirani. Drugim riječima, pretpostavljamo da ne postoje dodatni izvori oko antene pametnog telefona koji utječu na one u anteni. Ipak, mnogo veći problem jest doznati koliki su stvarne raspodjele naboja i struja izolirane antene jer se, osim u veoma jednostavnim slučajevima koje ćemo razmotriti, izvori moraju izračunati numerički iz složenog sustava jednadžbi [2].

Elektromagnetsko polje zračenja

Pretpostavimo li da gustoća naboja i gustoća struja imaju harmoničku ovisnost o vremenu⁵, $\rho(\mathbf{r}, t) = \rho(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$ i $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$, retardirani vektorski potencijal (1) postaje $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$ gdje je

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_p \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} d^3 r' \quad (4)$$

Električno polje $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ i jakost magnetskog polja $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ izvan raspodjele struja možemo izračunati iz relacija

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{iZ_0}{k} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (5)$$

U izrazu za električno polje u (5) javlja se $Z_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$ impedancija vakuuma, gdje je ϵ_0 permitivnost vakuuma i valni broj $k = \omega/c$. Pri tome je rotacija vektorskog polja u kartezijevim koordinatama, na primjer, polja \mathbf{A} jednaka

$$\nabla \times \mathbf{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \mathbf{e}_x + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \mathbf{e}_y + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \mathbf{e}_z \quad (6)$$

Za izračun polja \mathbf{H} , a zatim i polja \mathbf{E} potrebno je najprije izračunati potencijal \mathbf{A} pomoću (4). U teoriji elektromagnetskog zračenja, postoje 3 područja u kojima računamo vektorski potencijal (vidi sliku 1). Ako je d karakteristična dimenzija izvora, λ valna duljina, $\lambda = 2\pi/k$ i r udaljenost na kojoj promatramo potencijal \mathbf{A} , razlikujemo: blisku ili statičku zonu u kojoj je $d \ll r \ll \lambda$, srednju ili induksijsku zonu za koju vrijedi $d \ll r \sim \lambda$ te daleku ili zonu zračenja u kojoj je $d \ll \lambda \ll r$.

Za pametni telefon je $d \approx 10$ cm, a frekvencija elektromagnetskog zračenja antene je reda veličine 1 GHz kojoj odgovara valna duljina $\lambda \approx 30$ cm. Zona zračenja odgovara otprilike udaljenosti $r \geq 1$ m.

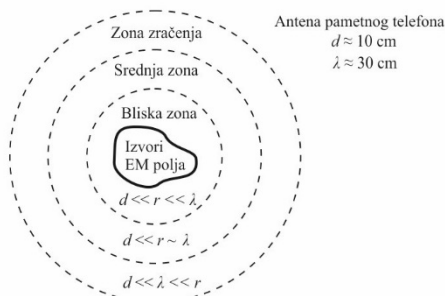
Područje u kojem želimo naći vektorski potencijal \mathbf{A} te polja \mathbf{E} i \mathbf{H} je zona zračenja. Može se pokazati da je u zoni zračenja vektorski potencijal (4) aproksimativno jednak [2]

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r} \int_p \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{-ike_r \cdot \mathbf{r}'} d^3 r' \quad (7)$$

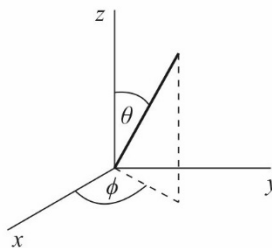
gdje je \mathbf{e}_r jedinični vektor u smjeru vektora položaja točke promatranja \mathbf{r} . Polja \mathbf{E} i \mathbf{H} koja možemo izračunati iz (5) su, kao i potencijal \mathbf{A} , obrnuto razmjerni udaljenosti $|\mathbf{r}| = r$. Navedena

⁵ U elektrodinamici se uobičajeno računa s kompleksnim veličinama, no da dobijemo stvarnu fizičku veličinu, uvijek moramo uzeti realni ili imaginarni dio kompleksne veličine koju smo izračunali.

ovisnost je, ustvari, definicija dijela elektromagnetskog polja koje nazivamo zračenjem i koje je dominantno u zoni zračenja.



Slika 1 Područja u kojima se uobičajeno razmatra elektromagnetsko polje u teoriji zračenja.



Slika 2 Definicija kutova (θ , ϕ).

Veoma često se čuje da ljudi govore o tome kako neki električni uređaj zrači, na primjer, pametni telefon, kućanski aparat, dalekovod, ... Možemo govoriti o "zračenju" u širem, kolokvijalnom smislu te riječi. Međutim, za fizičara pojam zračenja odnosi se samo onaj dio elektromagnetskog polja koji je jako daleko od izvora, u zoni zračenja i koji se, na izvjestan način, "odvojio" od izvora zračenja, naboja i struja. Prislonimo li pametni telefon na uho, elektromagnetsko polje u tkivu glave nije zračenje, već elektromagnetsko polje u bliskoj ili, možda, srednjoj zoni.

Raspodjela snage zračenja po kutovima

Važna veličina za teoriju zračenja je Poyntingov vektor. Definiran je relacijom

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \tag{8}$$

uz interpretaciju da predstavlja energiju elektromagnetskog polja po jediničnom vremenu i po jediničnoj plohi koja je okomita na smjer širenja energije. Ako se radi o polju zračenja, \mathbf{S} je obrnuto razmjeran kvadratu udaljenosti r^2 . Pomoću Poyntingova vektora definiramo kutnu raspodjelu snage zračenja

$$\frac{dP}{d\Omega} = r^2 \langle \mathbf{S} \cdot \mathbf{e}_r \rangle \tag{9}$$

Zagrade $\langle \dots \rangle$ u (9) označavaju da se radi o vremenskom prosjeku veličine $\mathbf{S} \cdot \mathbf{e}_r$. Veličina $dP/d\Omega$ ovisi samo o kutovima (θ , ϕ) prikazanim na slici 2. Ukupna snaga zračenja raspodjele naboja i struja glasi

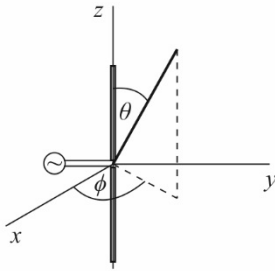
$$P = \int \frac{dP}{d\Omega} d\Omega = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi d\theta \sin \theta \frac{dP}{d\Omega} \tag{10}$$

ANTENE PAMETNOG TELEFONA

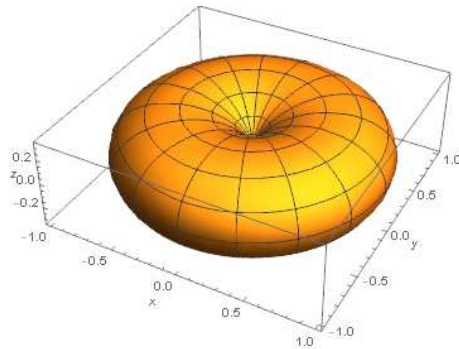
Razmotrit ćemo поблиže dvije jednostavne antene, monopolnu antenu i dipolnu antenu za koje postoje analitička rješenja za elektromagnetsko polje i kutnu raspodjelu snage zračenja. U oba slučaja pretpostavit ćemo da je struja ima harmoničku ovisnost o vremenu, $I = I_0 e^{-i\omega t}$. Opisat ćemo, zatim, PMA i PIFA koje se često pojavljuju u pametnim telefonima.

Dipolna antena

Središnje napajana dipolna antena prikazana je na slici 3. Sastoji se od dva ravna i tanka vodiča duljine $l/2$ postavljena na isti pravac, međusobno odvojena i spojena na napajanje.



Slika 3 Središnje napajana dipolna antena. Vodiči su duljine $l/2$.



Slika 4 Kutna raspodjela snage zračenja za poluvalnu dipolnu antenu.

Kutna raspodjela snage zračenja za ovaj sustav glasi [2]:

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{Z_0 I_0^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right) - \cos\left(\frac{kl}{2}\right)}{\sin\theta} \right]^2 \quad (11)$$

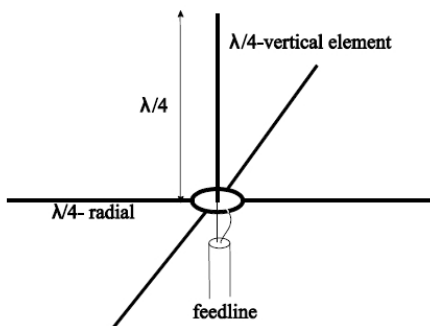
Posebni slučajevi formule (11) su primjena na poluvalnu dipolnu antenu za koju je $kl = \pi$ i punovalnu dipolnu antenu za koju vrijedi $kl = 2\pi$. Na primjer, za kutnu raspodjelu snage zračenja poluvalne antene i snagu zračenja dobivamo [4]

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{Z_0 I_0^2}{8\pi^2} \frac{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin^2\theta}, \quad P \approx \frac{3Z_0 I_0^2}{64} \quad (12)$$

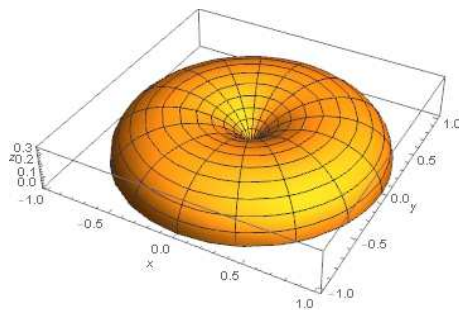
Kutna raspodjela snage zračenja (12) prikazana je na slici 4. Veličina $dP/d\Omega$ u jedinicama $Z_0 I_0^2 / 8\pi^2$ nacrtana je kao graf funkcije u polarnim koordinatama $r = r(\theta)$, gdje je r udaljenost od ishodišta. Dakle, ako mjerimo na udaljenostima r za koje je $l < \lambda \ll r$, dipolna antena najviše zrači blizu $z = 0$ ravnine, odnosno, za $\theta \approx \pi/2$.

Monopolna antena

Četvrtvalna monopolna antena (whip antena) prikazana je na slici 5. Sastoji se od ravnog i tankog vodiča duljine l i vodljive uzemljene ravnine koja služi kao zrcalo ili reflektor elektromagnetskih valova. Vodič napajamo harmoničkom strujom na jednom kraju. Za valnu duljinu zračenja $\lambda = 2\pi c/\omega$ i duljinu vodiča približno vrijedi $l \approx \lambda/4$. Kutna raspodjela snage zračenja prikazana na slici 6, identična je raspodjeli poluvalne dipolne antene u području $z > 0$, a jednaka je nuli u području $z < 0$. Ako bi monopolna antena u pametnom telefonu bila postavljena tako da je glava osobe s pametnim telefonom u području $z < 0$, tkivo ne bi bilo izloženo zračenju.



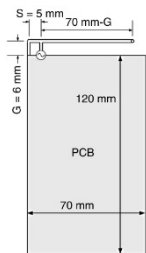
Slika 5 Četvrtvalna monopolna antena. Uzemljena vodljiva ravnina zamijenjena je s 4 vodiča [4].



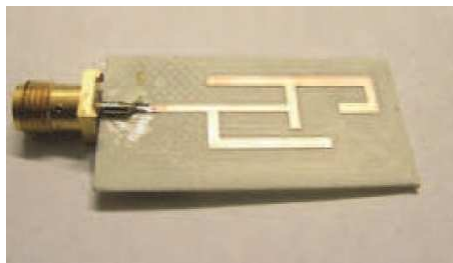
Slika 6 Kutna raspodjela snage zračenja za četvrtvalnu monopolnu antenu.

PMA i PIFA

Planarna monopolna antena (PMA) ili invertirana F-antena (IFA) je, ustvari, monopolna antena u kojoj je vodič okomit na vodljivu uzemljenu ravninu zamijenjen uskom vodljivom vrpcom tako da cijela antena leži u jednoj ravnini (vidi sliku 7). Vodljiva vrpca koja zrači može imati različite oblike (vidi sliku 8), ovisno o primjenama antene.



Slika 7 Pojednostavljeni prikaz PMA [5].

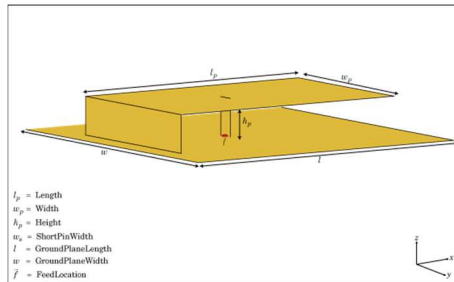


Slika 8 Jedan od prototipova PMA.

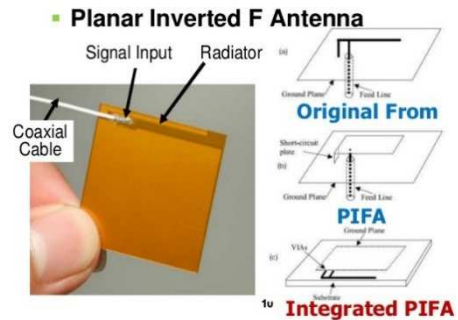
Model planarne invertirane F-antene (PIFA) prikazan je na slici 9. Umjesto vodljive vrpce, ova antena ima dodatak u obliku pravokutnika koji zrači. Vodljivi pravokutnik je paralelan uzemljenoj ravnini. PIFA je, u većini slučajeva, najbolji izbor za antenu pametnog telefona (vidi sliku 10).

PMA imaju nešto veću SAR vrijednost od PIFA, a PIFA imaju nešto manji opseg frekvencija koje mogu primati te manju učinkovitost od PMA antena. Uz to, PMA antene zahtijevaju nešto dulje uređaje od PIFA antena.

Interesantna je činjenica da mnogi mobiteli koriste antenu (tj. neki njezin dio) kao estetski element. Tako poznati iPhone modeli 4 i 5 koriste kromirani metalni obrub kao antenu. Estetika donosi i nedostatke i prednosti: krom ima vodljivost za red veličine manju od bakra ili aluminija, što smanjuje učinkovitost antene, ali se time povećava pojas frekvencija koje antena prima. Osim toga, blizina ruke ili glave korisnika umanjuje učinkovitost antene, ali, također, povećava frekvencijski pojas koji uređaj može primiti.



Slika 9 Pojednostavljeni prikaz PIFA. Crvena točkica označava gdje je napajanje spojeno na vodič [6].



Slika 10 PIFA kakve susrećemo u pametnim telefonima [7].

Slike bliskih elektromagnetskih polja i polja zračenja PIFA, kao i detaljan opis utjecaja polja na ljudsko tkivo, mogu se naći u zanimljivom magistarskom radu [8].

ZAKLJUČAK

Jedan od načina kako se fizika lakše uči je i primjena fizikalnih načela na uređaje koje koristimo u svakodnevnicu. Možemo šaljivo reći da su pametni telefoni postali dio ljudskog tijela (iako nismo daleko od istine!) i sigurno zaslužuju veliku pažnju. Mišljenja smo da povezanost učenika i studenata s pametnim telefonima treba svakako iskoristiti u svrhu učenja novih znanja. Elektromagnetsko zračenje je zahtjevna nastavna jedinica za učenike i studente, kao i profesore, stoga je referiranje na zračenje antene pametnog telefona tijekom obrade teme, dobar primjer kako "nezanimljiva i teška" fizika može postati zanimljiva i lakša za učenje. Usporedbom nekoliko tipova antena iz pametnog telefona, pokušali smo "teške" jednadžbe i integrale iz teorije elektromagnetskog zračenja učiniti pristupačnijim i lakšim za učenje.

LITERATURA

1. N C. Rowell i E. Y. Lam, *Mobile-Phone Antenna Design*, IEEE Antennas and Propagation Magazine, **54** (2), 14-34 (2012).
2. J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3. izdanje, Wiley, New York, 1998.
3. D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 4. izdanje, Prentice-Hall, New Jersey, 2012.
4. N. I. Khan, A. Azim i S. Islam, *Radiation Characteristics of a Quarter-Wave Monopole Antenna above Virtual Ground*, Science, Journal of Clean Energy Technologies, **2** (4), 339-342 (2014).
5. Z. Zhang, *Antenna design for mobile devices*, Wiley, New York, 2011.
6. Antenna-Theory.com, Cell Phone Antenna Design
URL: <http://www.antenna-theory.com/antennas/main.php> (1. 2. 2017).
7. Slideshare, URL <https://www.slideshare.net/YongHeuiCho/antennas-for-cellphones> (1. 2. 2017).
8. V. Filomena, M. Vieira, *Effect of electromagnetic fields induced by mobile devices in the human brain*, University of Porto Open Repository
URL: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/102558/2/179907.pdf> (1. 4. 2017)