

Uticaj efekta blizine na tačnost modelovanja žičanih antena korišćenjem tanko-žičane aproksimacije

Ilija Kuzman
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
Srbija
ki220230d@student.etf.bg.ac.rs

Branko Kolundžija
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
Srbija
kol@etf.rs

Abstract—Osnovna metoda za numeričku analizu tankih žičanih antena je metoda momenata primenjena na integralnu jednačinu električnog polja, uz korišćenje tanko-žičane aproksimacije koja ne uzima u obzir efekat blizine. Uticaj ove aproksimacije na tačnost analize ispitan je poređenjem rezultata preciznog žičanog i pločastog modela za dve antene (polutalasni dipol i Yagi antena). Iz rezultata vidimo da zanemarivanje efekta blizine može u ekstremnim slučajevima dovesti i do greške admitanse veće od 50% i greške dobitka veće od 10%. Posebno, u slučaju kada je rastojanje između žica veće od $\lambda/10$, efekat blizine praktično ne utiče na tačnost ako je prečnik žice manji od $\lambda/50$.

Ključne reči—tanke žičane antene, metoda momenata, tanko-žičana aproksimacija, efekat blizine

I. UVOD

Prve antene koje su osmišljene, napravljene i upotrebljene, počev od električki kratke kapacitivno opterećene antene (Hercov dipol) iz 1887. godine, pripadaju klasi tankih žičanih antena. (Uopšte, tanke žičane antene su načinjene od metalnih žica čiji je prečnik mnogo manji kako od njihove dužine tako i od talasne dužine.) Od tada pa sve do današnjih dana predlažu se novi tipovi tankih žičanih antena i širi se opseg njihovih primena [1].

Iako su principi rada tankih žičanih antena dobro poznati, samo za nekoliko njih se ulazna impedansa i dijagram zračenja mogu izraziti u analitičkom obliku. Za sve ostale se do tih podataka mora doći bilo merenjem bilo numeričkom analizom.

Osnovna metoda za efikasnu numeričku analizu tankih žičanih antena je metoda momenata primenjena na jednačinu električnog polja, uz korišćenje takozvane tanko-žičane aproksimacije [2]. Osnovni zadatak ovakve analize je da se odredi raspodela struja po površi metalnih žica. Uopšte, ovakve struje imaju aksijalnu i cirkularnu komponentu koje zavise od aksijalne i cirkularne koordinate. Ukoliko želimo da sa velikom tačnošću odredimo obe komponente struje potrebno je koristiti tzv. pločasti model za površ metalnih žica. Posebno, u slučaju tanko-žičane aproksimacije zanemaruje se cirkularna komponenta struja, kao i zavisnost aksijalne komponente od cirkularne koordinate, čime se za više od reda veličine smanjuje broj nepoznatih koeficijenata u odnosu na pločasti model, i još uvek u najvećem broju slučajeva dobija dovoljno tačan rezultat.

Jedno od ograničenja tanko-žičane aproksimacije je da ne uzima u obzir efekat blizine žica, koji treba imati u vidu kada se

na ovaj način modeluje, jer ovako nastale greške nisu uvek zanemarljive.

Cilj ovog rada je da ispita uticaj efekta blizine na tačnost modelovanja žičanih antena korišćenjem tanko-žičane aproksimacije, pri čemu se za analizu koristi softverski paket WIPL-D [3]. U II poglavlju rečeno je nešto više o tanko-žičanoj aproksimaciji. U III poglavlju su opisani pločasti i žičani modeli polutalasnog dipola korišćeni u ovom radu i komentarisani su njihovi rezultati. U IV poglavlju su opisani pločasti i žičani modeli Yagi antene korišćeni u ovom radu i komentarisani su njihovi rezultati. U V poglavlju kvantifikovali smo i uporedili greške žičanog modela polutalasnog dipola i žičanog modela Yagi antene u odnosu na pločaste modele istih. Na kraju su zaključci sumirani u VI poglavlju.

II. TANKO-ŽIČANA APROKSIMACIJA

Tanko-žičana aproksimacija je moćan alat koji u kombinaciji sa tzv. redukovanim jezgrom (integralne jednačine) značajno umanjuje kompleksnost elektromagnetske analize žičanih modela.

Žice su krivolinijska cilindrična tela sa poprečnim preseccima istih ili različitih poluprečnika. Žicu smatramo tankom ako je njen poluprečnik istovremeno mnogo manji od talasne dužine, dužine žice i poluprečnika njene krivine.

U opštem slučaju vektor gustine površinske struje na površi žice ima dve komponente, aksijalnu i cirkularnu, od kojih obe zavise od dve, aksijalne i cirkularne, koordinate. U slučaju tanke žice cirkularna komponenta je zanemarljivo mala u odnosu na aksijalnu komponentu, a aksijalna komponenta skoro pa i ne zavisi od cirkularne koordinate.

Pretpostavke da je cirkularna komponenta zanemarljivo mala i da aksijalna komponenta ne zavisi od cirkularne koordinate zovemo tanko-žičanom aproksimacijom.

Redukovano jezgro integralne jednačine se dobija tako što se struja po površi žice zamenjuje linijskom strujom istog ukupnog intenziteta duž njene ose, ili duž njene generatriše. Na taj način se dvostuki integrali polja svode na jednostruke, a četvorostuki integrali matrične jednačine dobijene metodom momenata se svode na dvostruke.

III. ŽIČANI I PLOČASTI MODELI POLUTALASNOG DIPOLA

U radu su korišćeni polutalasni dipoli, čiji su krakovi dužine 73,3 mm, a poluprečnik, a , u svakom modelu uzima celobrojne

vrednosti od 1 mm do 15 mm. Svi rezultati su traženi u 15 tačaka u opsegu učestanosti [840, 980] MHz. Zona napajanja je modelovana konusnim žicama visine jednake odgovarajućem poluprečniku.

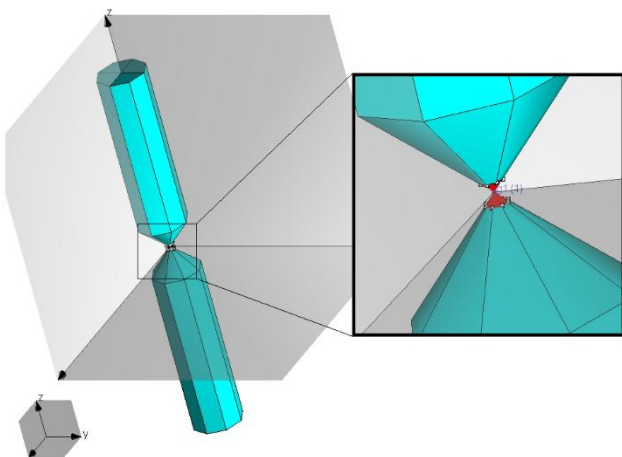
Korišćena su dva različita modela, pločasti i žičani, pri tome rezultate pločastih modela smatramo za tačnije jer uzimaju u obzir efekte koje žičani modeli ne uzimaju. Svaki model je napravljen simetrično u odnosu na Oxy -ravan pa će se objašnjenje modelovanja odnositi samo za gornji ($z > 0$) poluprostor.

U pločastom modelu jedan krak je napravljen kao Body of Revolution (8 rotacija), sa gornje strane zatvoren ravnom kružnom pločom (8 segmenata), a sa donje strane povezan na konusnu žicu visine jednake desetini odgovarajućeg poluprečnika. Red polinomske aproksimacije strujnog razvoja dobili smo povećavanjem osnovnog podešavanja za 2 (na primer, osnovno podešavanje za ploču na omotaču cilindra je duž duže stranice 2 a duž kraće 1, pa smo ovim postupkom dobili redom 3 i 4). Napajanje je tačkasti generator postavljen na spoju dve žice u koordinatnom početku. Pločasti model za poluprečnik $a = 10$ mm se može videti na Sl.1.

U žičanom modelu jedan krak je modelovan trima žicama, dvema konusnima i jednom cilindričnom. Prva konusna žica modeluje zonu napajanja, ona je visine jednake odgovarajućem poluprečniku. Na nju se nadovezuje cilindrična žica, na koju se potom nadovezuje treća konusna žica visine jednake stotini odgovarajućeg poluprečnika. Poslednja žica modeluje zonu kraja. Red polinomske aproksimacije strujnog razvoja je na konusnim žicama 3 a na cilindričnoj žici 4. Napajanje je tačkasti generator postavljen na spoju dva kraka (u koordinatnom početku). Žičani model za poluprečnik $a = 10$ mm se može videti na Sl.2.

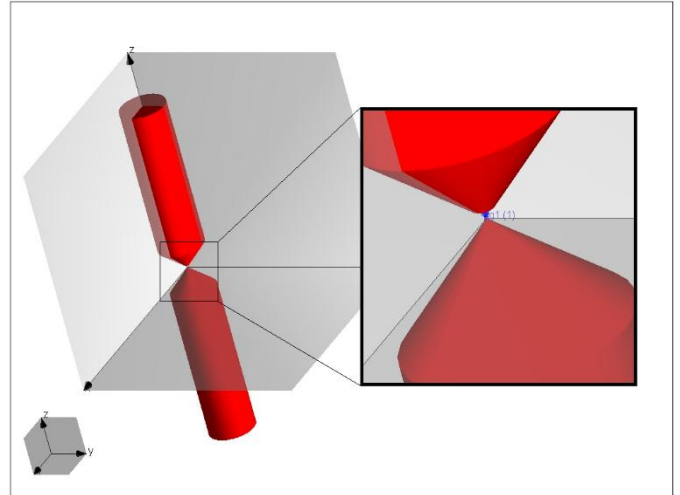
Zbog korišćenja tanko-žičane aproksimacije očekujemo da će se za male poluprečnike žica rezultati pločastih i žičanih modela dobro poklapati, dok za velike poluprečnike očekujemo određena odstupanja. Od interesa su nam bili y -parametri i dobitak u pozitivnom pravcu x -ose.

Na Sl.3 i Sl.4 su preklapljeni rezultati y -parametara pločastih i žičanih modela za, redom, $a = 1.5$ mm i $a = 15$ mm. Na Sl.5 i Sl.6 su preklapljeni rezultati dobitka pločastih i žičanih modela za, redom, $a = 1.5$ mm i $a = 15$ mm.

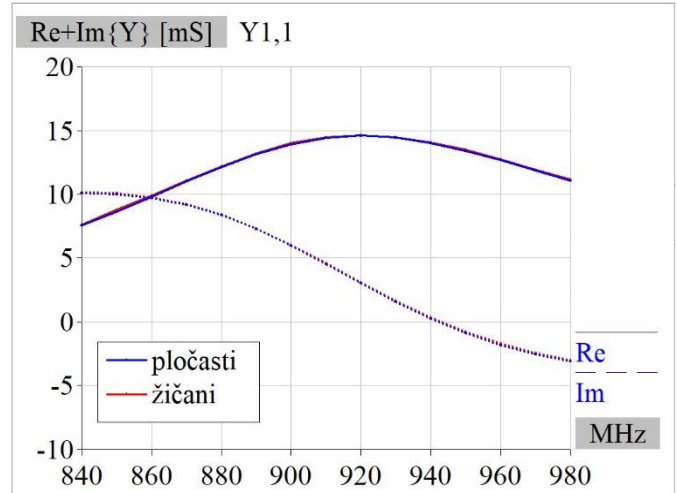


Sl.1 Pločasti model polutalasnog dipola za poluprečnik $a = 10$ mm.

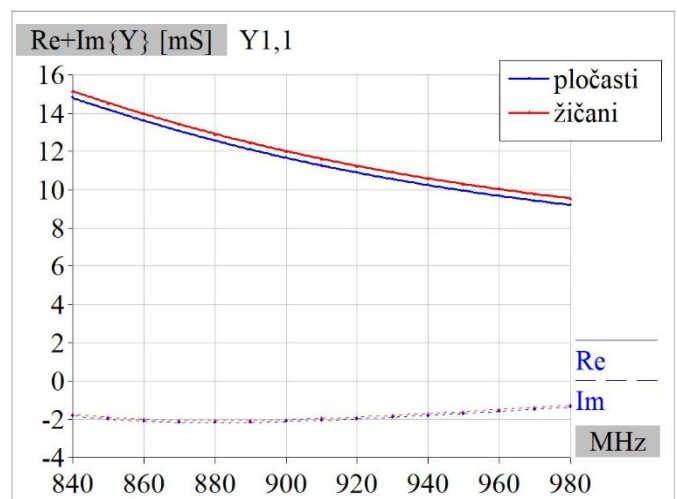
Kao što smo i očekivali vidimo da se rezultati modela sa $a = 1.5$ mm bolje slažu nego rezultati modela sa $a = 15$ mm.



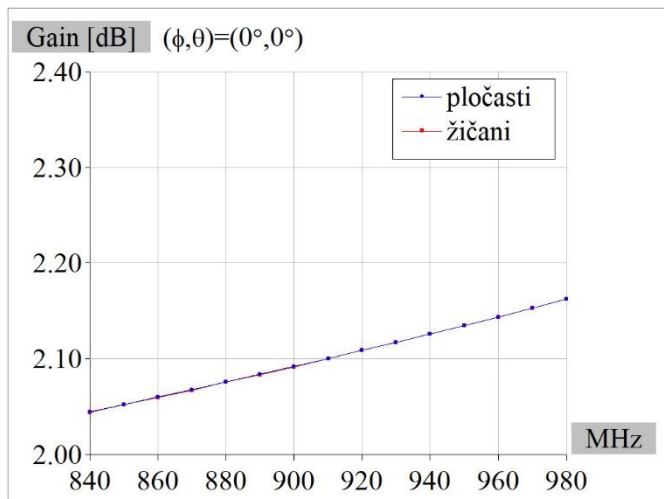
Sl.2 Žičani model polutalasnog dipola za poluprečnik $a = 10$ mm.



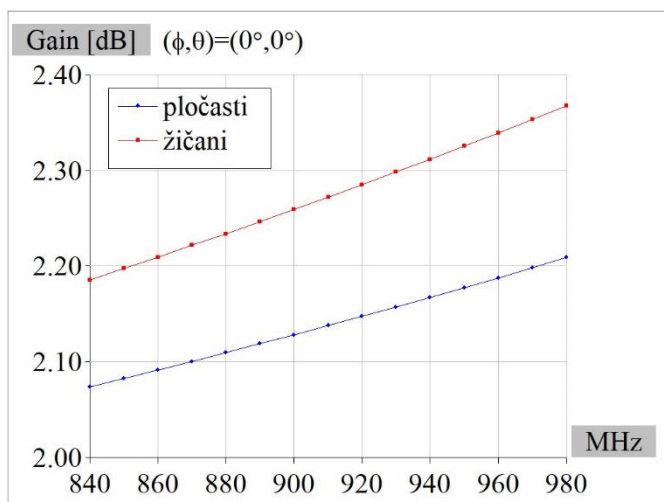
Sl.3 Admitansa pločastog i žičanog modela za $a = 1.5$ mm.



Sl.4 Admitansa pločastog i žičanog modela za $a = 15$ mm.

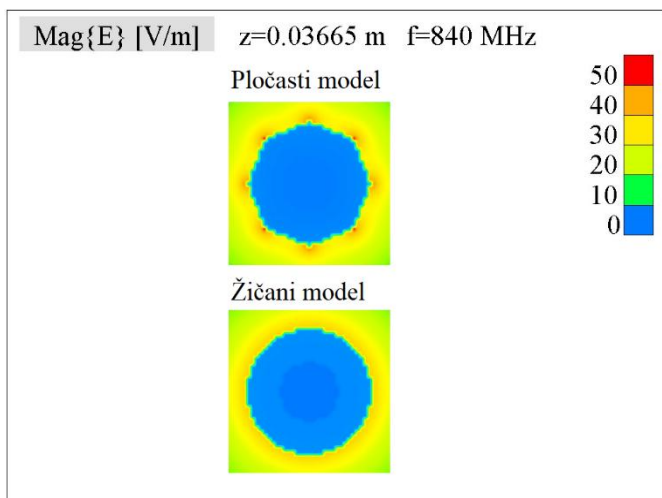


Sl.5 Dobitak pločastog i žičanog modela za $a = 1.5$ mm.



Sl.6 Dobitak pločastog i žičanog modela za $a = 15$ mm.

Zbog upoređivanja sa Yagi antenom izračunali smo električno polje u poprečnom preseku na polovini kraka (u ravni $z = 36.65$ mm). Za pločasti i žičani model za $a = 10$ mm intenzitet električnog polja u toj ravni se može videti na Sl.7.



Sl.7 Intenzitet električnog polja u poprečnom preseku pločastog i žičanog modela za $a = 10$ mm.

IV. ŽIČANI I PLOČASTI MODELI YAGI ANTENE

U radu su korišćene Yagi antene sa tri direktora i jednim reflektorom. Fider (napojni element) je postavljen u koordinatni početak duž z-ose i isti je kao polutalasni dipol iz prethodnog poglavlja. Direktori su postavljeni duž pozitivnog dela x-ose, u tačkama $x = 43$ mm, $x = 86$ mm i $x = 129$ mm. Dužine tih direktora su redom 133 mm, 133 mm i 129 mm. Reflektor je postavljen u tački $x = -63$ mm, i njegova dužina je 158 mm. Fider, direktori i reflektor imaju jednake poluprečnike, a , koji uzimaju celobrojne vrednosti od 1 mm do 15 mm. Svi rezultati su traženi u opsegu učestalosti [840,980]MHz.

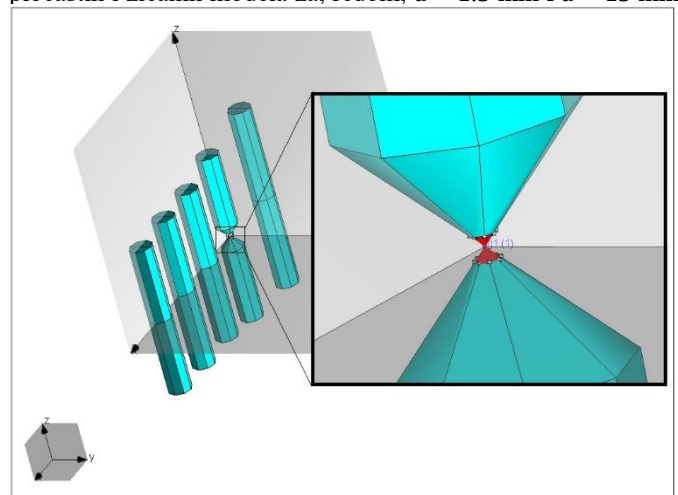
Korišćena su dva različita modela, pločasti i žičani, pri tome rezultate pločastih modela smatramo za tačnije jer uzimaju u obzir efekte koje žičani model ne uzima. Svaki model je napravljen simetrično u odnosu na Oxy-ravan, pa će se objašnjenje modelovanja odnositi samo na gornji ($z > 0$) poluprostor. Fider je modelovan isto kao što je modelovan polutalasni dipol u prethodnom poglavlju.

U pločastom modelu direktori i reflektori su napravljeni kao Bodies of Revolution (8 rotacija) i zatvoreni su kružnim ravnim pločama (8 segmenata). Red polinomske aproksimacije strujnog razvoja dobili smo povećavanjem osnovnog podešavanja za 2 (na primer, osnovno podešavanje za ploču na omotaču cilindra je duž duže stranice 2 a duž kraće 1, pa smo ovim postupkom dobili redom 3 i 4). Napajanje je tačkasti generator postavljen na fideru na isti način kao u prethodnom poglavlju. Pločasti model za poluprečnik $a = 10$ se može videti na Sl.8.

U žičanom modelu direktori i reflektor su napravljeni od žica. Od Oxy-ravni navise je cilindrična žica, a na njenom kraju je konusna žica visine jednake stotini odgovarajućeg poluprečnika. Ona modeluje zonu kraja. Red polinomske aproksimacije strujnog razvoja je na konusnim žicama 3 a na cilindričnim žicama 4. Napajanje je tačkasti generator postavljen na fideru na isti način kao u prethodnom poglavlju. Žičani model za poluprečnik $a = 10$ mm se može videti na Sl.9.

Kao i sa polutalasnim dipolom, očekujemo da se zbog tanko-žičane aproksimacije rezultati modela sa manjim poluprečnicima bolje slažu od onih sa većim poluprečnicima.

Na Sl.10 i Sl.11 su preklapljeni rezultati y-parametara pločastih i žičanih modela za, redom, $a = 1.5$ mm i $a = 15$ mm.

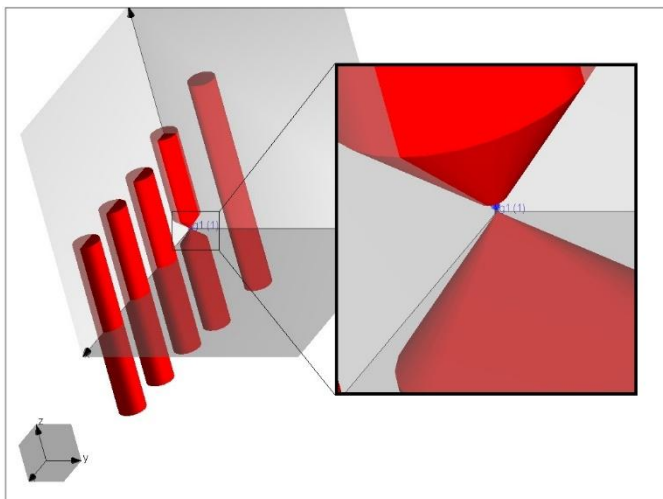


Sl.8 Pločasti model Yagi antene za poluprečnik $a = 10$ mm.

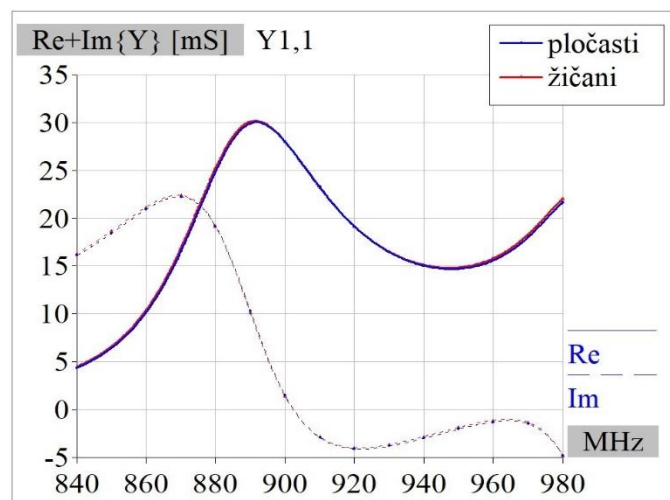
Na Sl.12. i Sl.13 su preklapljeni rezultati dobijta pločastih i žičanih modela za, redom, $a = 1.5$ mm i $a = 15$ mm.

Kao što smo i očekivali vidimo da se rezultati modela sa $a = 1.5$ mm bolje slažu nego rezultati modela sa $a = 15$ mm.

Primećujemo mnogo veću razliku pločastog i žičanog modela nego što smo videli kod polutalasnog dipola. U narednom poglavlju ćemo kvantifikovati te razlike u zavisnosti od poluprečnika.



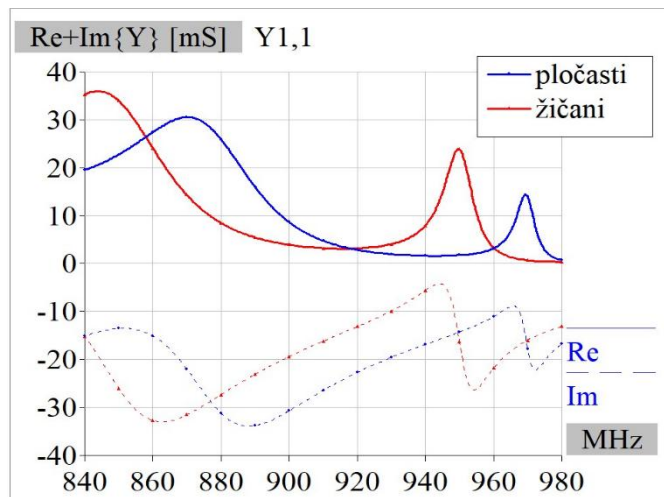
Sl.9 Žičani model Yagi antene za poluprečnik $a = 10$ mm.



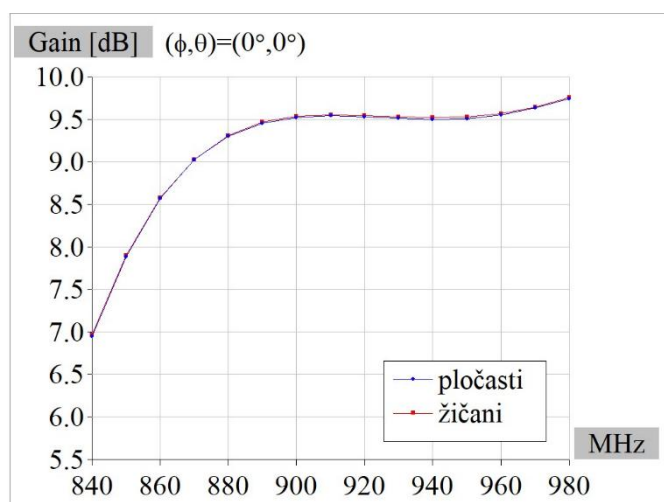
Sl.10 Admitansa pločastog i žičanog modela za $a = 1.5$ mm.

Izračunali smo električno polje u poprečnom preseku na polovini kraka fidera (u ravni $z = 36.65$ mm). Na Sl.14 može se videti intenzitet električnog polja u toj ravni za pločasti i žičani model za $a = 10$ mm.

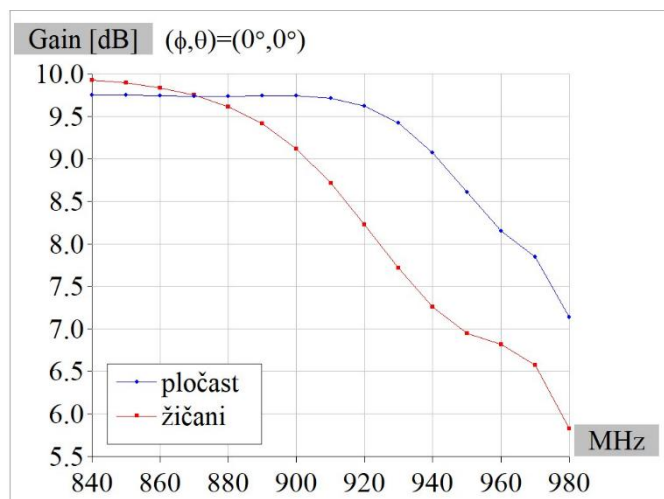
U žičanom modelu vidimo postojanje električnog polja unutar žica, što je posledica zanemarivanja efekta blizine. Ovo je jedan od primera unosa greške pri izračunavanju rezultata od interesa.



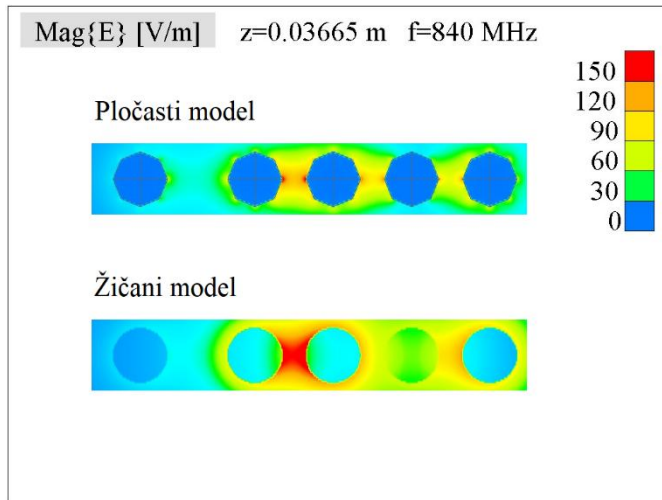
Sl.11 Admitanse pločastog i žičanog modela za $a = 15$ mm.



Sl.12 Dobitak pločastog i žičanog modela za $a = 1.5$ mm.



Sl.13 Dobitak pločastog i žičanog modela za $a = 15$ mm.



Sl.14 Intenzitet električnog polja u poprečnom preseku pločastog i žičanog modela za $a = 10$ mm.

V. POREĐENJE TAČNOSTI MODELOVANJA U RADNOM OPSEGU

U prethodnom poglavlju videli smo da je razlika između rezultata pločastih i žičanih modela za veće poluprečnike veća za Yagi antenu nego za polutalasni dipol. U ovom poglavlju ćemo te greške kvantifikovati, korišćenjem korena iz relativne srednje kvadratne greške, i videti otprilike do koje granice žičani model daje dovoljno dobre rezultate.

Koren iz relativne srednje kvadratne greške admitanse definišemo kao

$$E_{rms_admitansa} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{15} |Y_{wn} - Y_{pn}|^2}{\sum_{n=1}^{15} |Y_{pn}|^2}}, \quad (1)$$

gde je n brojač od 1 do 15, Y_{wn} je y -parametar žičanog modela na n -toj frekvenciji iz radnog opsega, a Y_{pn} je y -parametar pločastog modela na n -toj frekvenciji.

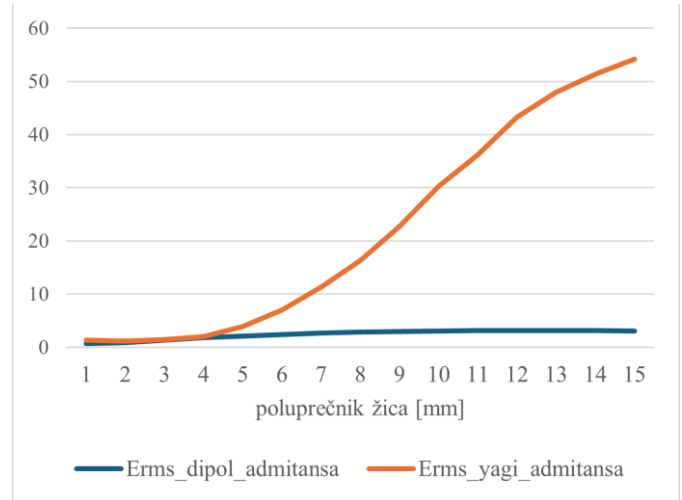
Formulom (1) dobijamo koren iz relativne greške žičanog modela u odnosu na pločasti za jednu vrednost poluprečnika. Radeći to za svaki poluprečnik dobijamo zavisnost te greške od poluprečnika prikazanu na Sl.15.

Koren iz relativne srednje kvadratne greške dobitka izračunavamo kao

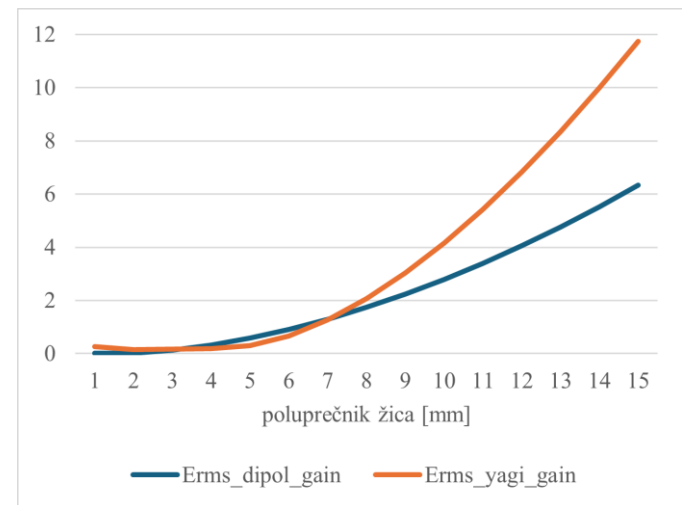
$$E_{rms_gain} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{15} |G_{wn} - G_{pn}|^2}{\sum_{n=1}^{15} |G_{pn}|^2}}, \quad (2)$$

gde je n brojač od 1 do 15, G_{wn} je dobitak u pozitivnom pravcu x -ose žičanog modela na n -toj frekvenciji iz radnog opsega, a G_{pn} je dobitak u pozitivnom pravcu x ose pločastog modela na n -toj frekvenciji.

Formulom (2) dobijamo koren iz relativne greške žičanog modela u odnosu na pločasti model za jednu vrednost poluprečnika. Radeći to za svaki poluprečnik dobijamo zavisnost te greške od poluprečnika prikazanu na Sl.16.



Sl.15 Zavisnost korena relativne kvadratne greške admitanse polutalasnog dipola i Yagi antene od poluprečnika žica.



Sl.16 Zavisnost korena relativne kvadratne greške dobitka polutalasnog dipola i Yagi antene u zavisnosti od poluprečnika žica.

Iz rezultata vidimo da zanemarivanje efekta blizine može u ekstremnim slučajevima dovesti i do greške admitanse veće od 50% i greške dobitka veće od 10%. Kada se tanko-žičana aproksimacija može uspešno koristiti za dobijanje rezultata velike tačnosti navedeno je u sledećem poglavlju.

Treba znati da razlike između žičanih i pločastih modela u ovom radu nisu samo u tanko-žičanoj aproksimaciji već i u geometriji. Žice u pločastom modelu u poprečnom preseku imaju oblik pravilnog osmougla dok u žičanom modelu imaju oblik kruga. Ta razlika takođe raste sa porastom poluprečnika žica.

VI. ZAKLJUČAK

Korišćenje tanko-žičane aproksimacije dovodi do zanemarivanja efekta blizine. Prilikom modelovanja žičanih struktura mora se paziti da je to zanemarivanje istinski opravdano. Rezultati dobijeni u ovom radu ukazuju da se tanko-žičana aproksimacija može uspešno koristiti za dobijanje rezultata velike tačnosti pod sledećim uslovima:

1) Ako ne postoji efekat blizine (usamljeni polutalasni dipol) admitansa se računa sa greškom: a) manjom od 3% za sve

prečnike žice manje od $2a = \lambda/10$ i b) manjom od 1% za sve prečnike žice manje od $2a = \lambda/50$.

2) Ako ne postoji efekat blizine (usamljeni polutalasni dipol) dobitak se računa sa greškom: a) manjom od 6% za sve prečnike žice manje od $2a = \lambda/10$ i b) manjom od 1% za sve prečnike žice manje od $2a = \lambda/25$.

3) Ako je izražen efekat blizine (Yagi antena), pri čemu je rastojanje između žica veće od $d = \lambda/10$, admitansa se računa sa greškom: a) manjom od 3% za sve prečnike žice manje od $2a = \lambda/30$, i b) manjom od 1% za sve prečnike žice manje od $2a = \lambda/50$.

4) Ako je izražen efekat blizine (Yagi antena), pri čemu je rastojanje između žica veće od $d = \lambda/10$, dobitak se računa sa greškom: a) manjom od 3% za sve prečnike žice manje od $2a = 3\lambda/50$, i b) manjom od 1% za sve prečnike žice manje od $2a = \lambda/25$.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] M. Drgović, "Antene i Prostiranje Radiotalasa," Akademska misao, Beograd, 2008.
- [2] B. M. Kolundžija and A. Djordjević, "Electromagnetic modeling of composite metallic and dielectric structures," Artech House, Boston, 2002.
- [3] WIPL-D software suite (WIPL-D Pro v20), WIPL-D d.o.o, Belgrade, Serbia, 2024.

ABSTRACT

Basic method for numerical analysis of thin-wire antennas is method of moments applied to electric field integral equation based on thin-wire approximation, which does not take into account the proximity effect. Influence of this approximation onto analysis accuracy is examined by comparing the results of precise wire and plate models of two antenna types (half-wavelength dipole and Yagi antenna). It is seen from the results that neglecting the proximity effect can in extreme cases lead to the error greater than 50% for admittance, and greater than 10% for the gain. In particular, in the case when distance between wires is greater than $\lambda/10$, the proximity effect practically does not influence on the accuracy if the wire diameter is smaller than $\lambda/50$.

The Influence of the Proximity Effect on the Accuracy of Modeling of Wire Antennas Based on Thin-Wire Approximation

Ilija Kuzman and Branko Kolundžija