

## Čas 8: Modelovanje miktotrakastih struktura.

Za mikrotrakaste strukture osnovno elektromagnetsko modelovanje ne daje uvek zadovoljavajuće tačne rezultate. Kako bi se poboljšala tačnost i preciznost elektromagnetske analize moraju se primeniti tehnike kao što su *edging* i *imaging*, i to ne samo u slučaju mikrotrakastih struktura, već i u slučaju elektromagnetskih problema slične klase.

### Osnovno modelovanje mikrotrakastih struktura (modelovanje povratnog provodnika, „mase“, beskonačnom električno savršeno provodnom ravni – PEC-om)

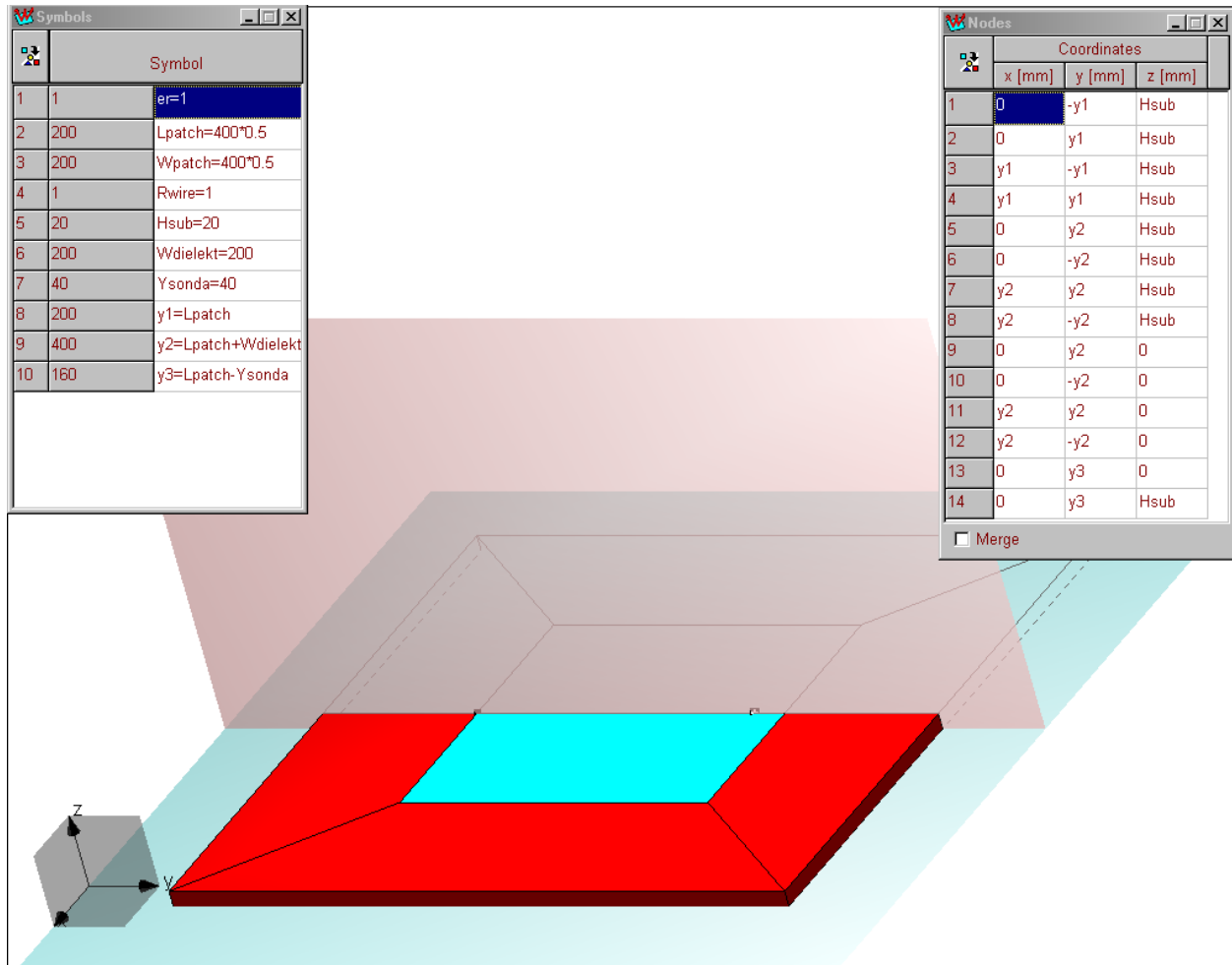
WIPL-D koristeći metod momenata nije u stanju da modeluje dielektrične strukture beskonačno velikih dimenzija. Dielektrik je modelovan kao domen konačnih dimenzija. Najjednostavniji model povratnog provodnika, „mase“, je PEC ravan sa jedne strane dielektrika. Najjednostavniji model vrućih provodnika je beskonačno tanka metalna traka sa druge strane dielektrika.

Vrlo često ovakav model ne daje zadovoljavajuće tačne rezultate. Tačnost rešenja se može poboljšati povećanjem reda polinoma aproksimacije struja, što za posledicu ima povećanje broja nepoznatih i produženje vremena izvršavanja simulacije. Ovaj način povećanja tačnosti rešenja smatra se neefikasnim.

Prilikom ispitivanja konvergencije i tačnosti rešenja elektromagnetske analize kompozitnih struktura (struktura sačinjenih od metala i dielektrika), može se poći od struktura istih geometrijskih dimenzija sačinjenih isključivo od metala. Pokazuje se da su rezultati elektromagnetske analize struktura sačinjenih isključivo od metala relativno stabilni i tačni, i da se mogu koristiti kao referentni. Ako su kod kompozitnih struktura električni parametri dielektričnih domena jednaki električnim parametrima vakuma, rezultati elektromagnetske analize bi trebalo da se dosta dobro poklapaju sa rezultatima analize modela sačinjenog isključivo od metala.

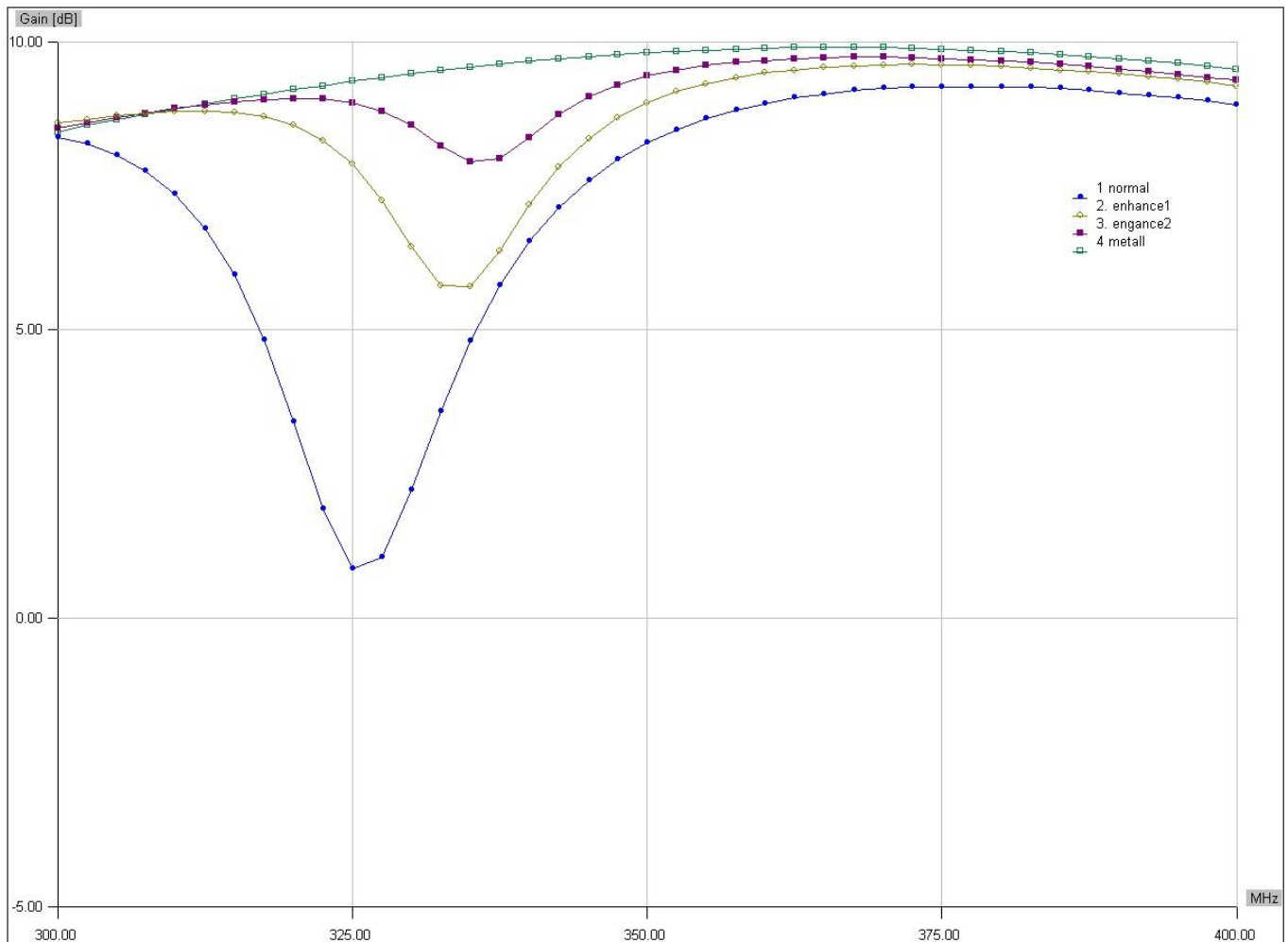
**P01.** Modelovati mikrotrakastu antenu u opsegu učestanosti od 0,3GHz do 0,4GHz na 41 uniformno raspodeljenoj učestanosti. Dužina mikrotrakaste antene je  $L_{\text{patch}} = 400\text{mm}$ . Širina mikrotrakaste antene je  $W_{\text{patch}} = 400\text{mm}$ . Poluprečnik žice za napajanje (sonde) je  $R_{\text{wire}} = 1\text{mm}$ . Debljina supstrata je  $H_{\text{sub}} = 20\text{mm}$ . Dielektrik (supstrat) ima iste električne osobine kao vakuum. Širina pojasa dielektrika oko mikrotrakaste antene je  $W_{\text{dielek}} = 200\text{mm}$ . Sonda za napajanje postavljena je u ravni simetrije (ravan simetrije preseca mikrotrakastu antenu po širini) na rastojanju  $Y_{\text{sonda}} = 40\text{mm}$  od kraja mikrotrakaste antene, upravno na povratni vod i mikrotrakastu antenu. U cilju skraćivanja vremena izvršavanja simulacije, gde god je to moguće, koristiti ravni simetrije/antisimetrije.

- Izračunati usmerenost u pravcu maksimalnog zračenja u čitavom opsegu učestanosti.
- Prethodni model snimiti kao nove projekte, *p01\_enhance1* i *p01\_enhance2*, kod kojih su stepeni polinoma aproksimacije struje promenjeni sa *normal*, na *enhance1* i *enhance2* mod, respektivno. Zatim *p01\_enhance2* model prepraviti tako da ostanu samo metalne ploče, i snimiti ga kao novi projekat *p01\_enhance2\_metall*. Za sva četiri projekta uporedno prikazati usmerenost u pravcu glavnog zračenja u čitavom opsegu učestanosti. Prokomentarisati rezultate.



Slika 1(a).

Uporedni grafici za usmerenost u pravcu glavnog zračenja antene u čitavom opsegu učestanosti za projekte *p01\_normal*, *p01\_enhance1*, *p01\_enhance2* i *p01\_enhance2\_metall*, prikazani su na slici 1(b).



Slika 1(b).

Polazimo od pretpostavke da je model koji sadrži samo metalne ploče stabilan (projekat *p01\_enhance2\_metall*) i ova rešenja usvajamo za tačna (referentna).

Sa slike 1(b) vidimo da za stepen polinoma aproksimacije nepoznate struje u *normal* modu (plava linija), rezultati značajno odstupaju od tačnih. Povećanjem reda aproksimacije nepoznatih struja rešenja konvergiraju ka tačnom. Jasno je da je cena koja se plaća prilikom ovakvog pristupa značajno povećanje broja nepoznatih, što za posledicu ima duže vreme izvršavanja simulacije i veće zauzeće računarskih resursa.

Drugi način na koji je moguće povećati tačnost rezultata simulacije (barem za slučaj kada je rezultat simulacije daleko polje) je uključivanjem opcije za **POWER BALANCE**.

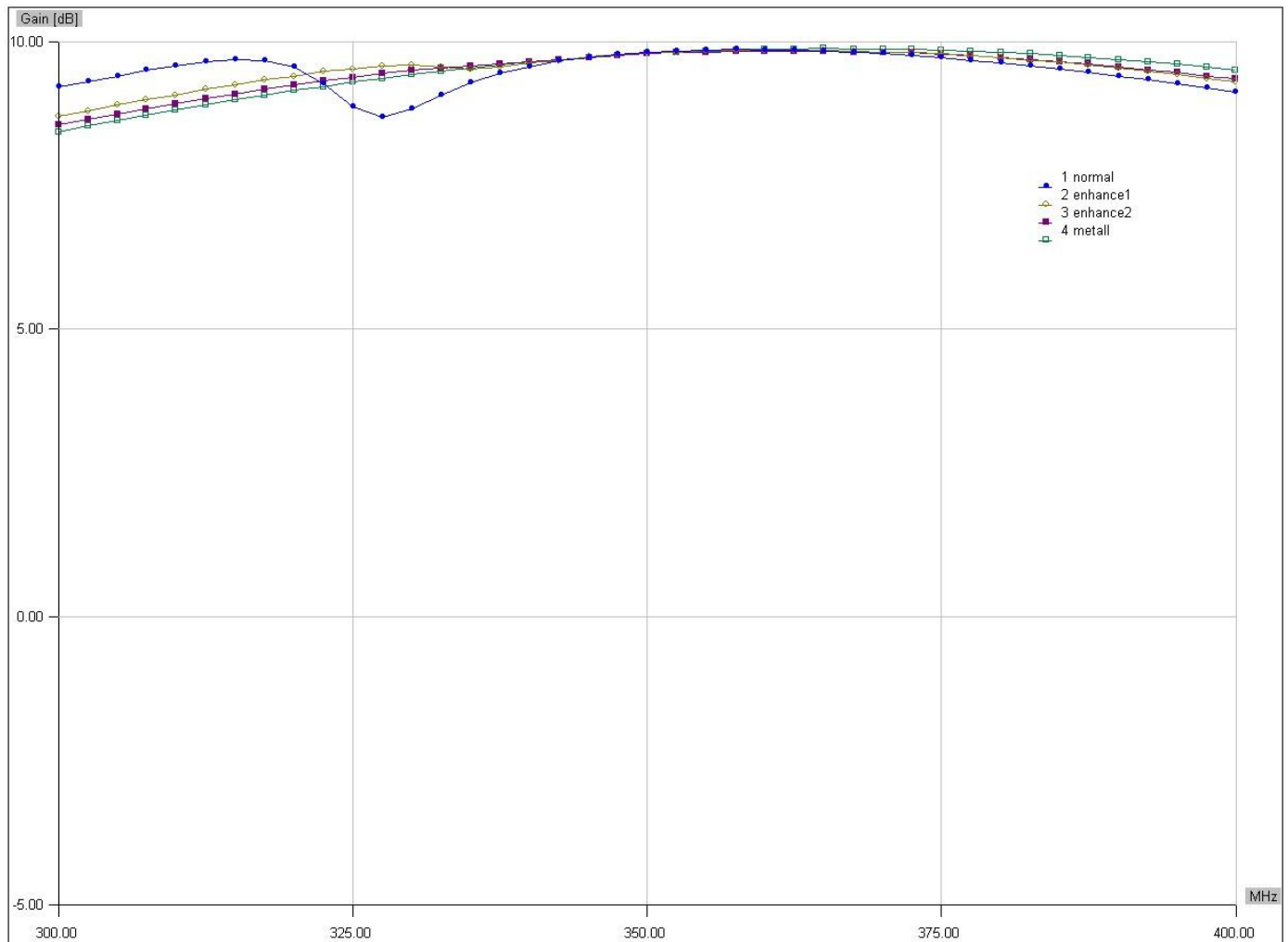
**P02.** Modelovati mikrotrakastu antenu u opsegu učestanosti od 0,3GHz do 0,4GHz na 41 uniformno raspodeljenoj učestanosti. Dužina mikrotrakaste antene je  $L_{\text{patch}} = 400\text{mm}$ . Širina mikrotrakaste antene je  $W_{\text{patch}} = 400\text{mm}$ . Poluprečnik žice za napajanje (sonde) je  $R_{\text{wire}} = 1\text{mm}$ . Debljina supstrata je  $H_{\text{sub}} = 20\text{mm}$ . Dielektrik (supstrat) ima iste električne osobine kao vakuum. Širina pojasa dielektrika oko mikrotrakaste antene je  $W_{\text{dielek}} = 200\text{mm}$ . Sonda za napajanje postavljena je u ravni simetrije (ravan simetrije preseca mikrotrakastu antenu po širini) na rastojanju  $Y_{\text{sonda}} = 40\text{mm}$  od kraja mikrotrakaste antene, upravno na povratni vod i mikrotrakastu antenu. U cilju skraćanja vremena izvršavanja simulacije, gde god je to moguće, koristiti ravni simetrije/antisimetrije.

- a.) Izračunati usmerenost u pravcu maksimalnog zračenja u čitavom opsegu učestanosti.
- b.) Prethodni model snimiti kao nove projekte, *p02\_enhance1* i *p02\_enhance2*, kod kojih su stepeni polinoma aproksimacije struje promenjeni sa *normal*, na *enhance1* i *enhance2* mod, respektivno. Zatim *p02\_enhance2* model prepraviti tako da ostanu samo metalne ploče, i snimiti ga kao novi projekat *p02\_enhance2\_metall*. Za sva četiri projekta uporedno prikazati usmerenost u pravcu glavnog zračenja u čitavom opsegu učestanosti. Prokomentarisati rezultate.

U cilju poboljšanja tačnosti rezultata simulacije (usmerenosti u pravcu maksimalnog zračenja) koristiti opciju za **POWER BALANCE**.

Opcija za **POWER BALANCE** uključuje se označavanjem polja *Gain correction* i *Y,Z,S correction* u odeljku *Radiation Pattern*.

Uporedni grafici za usmerenost u pravcu glavnog zračenja u čitavom opsegu učestanosti za projekte *p02\_normal*, *p02\_enhance1*, *p02\_enhance2* i *p02\_enhance2\_metall*, prikazani su na slici 2(a).



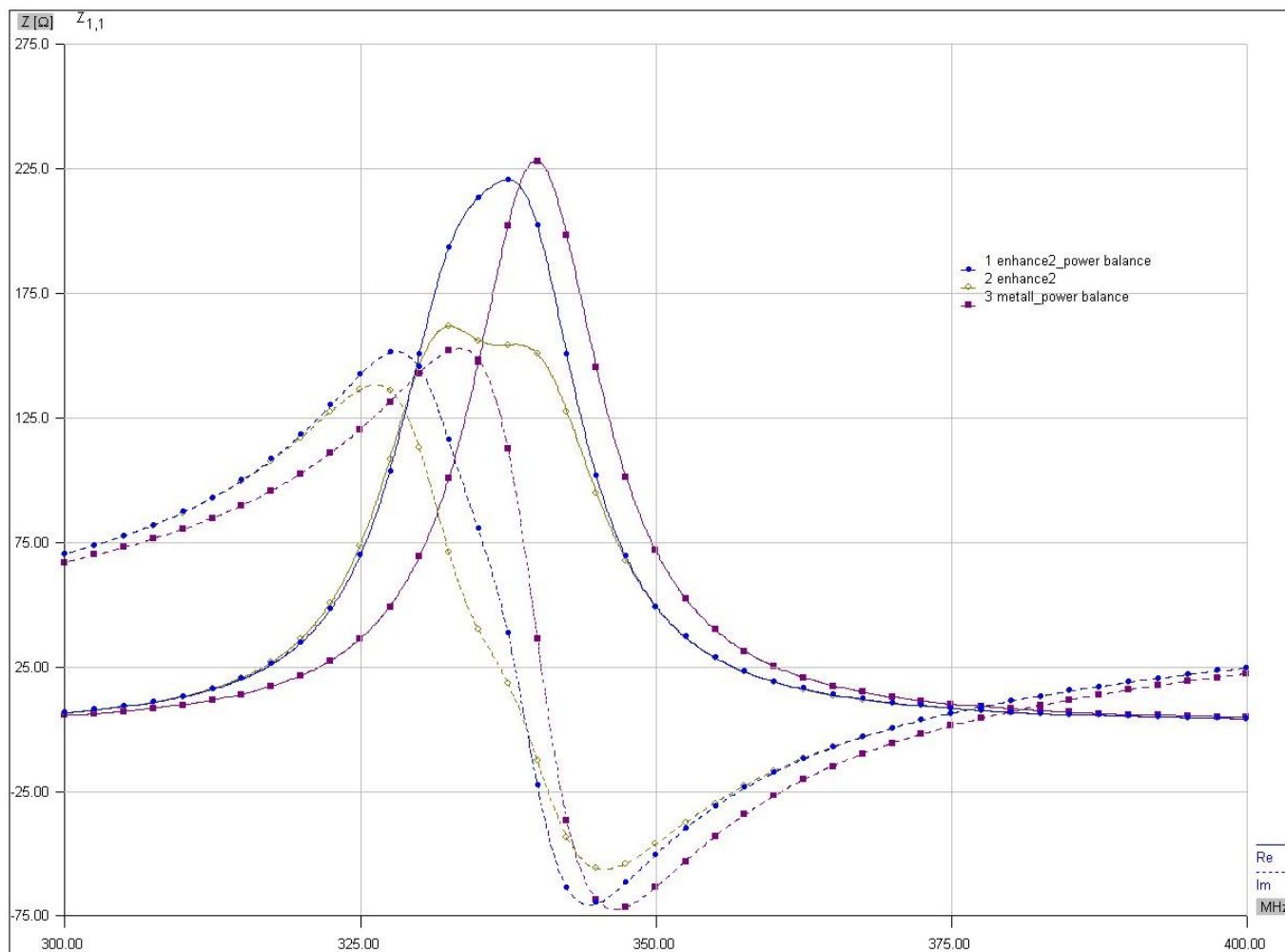
Slika 2(a).

Sa slike 2(a) vidi se da su rešenja dobijena korišćenjem opcije za *power balance* znatno tačnija u poređenju sa rešenjima sa istim stepenima aproksimacije struja (slika 1(b)) kada se opcija za *power balance* ne koristi.

Nakon proračuna nepoznate raspodele površinskih struja, u slučaju kada se uključi opcija za *power balance*, rešenja se koriguju kako bi se zadovoljio zakon o održanju rada i energije. Do „curenja“ energije dolazi usled nedovoljno tačne aproksimacije nepoznate raspodele struja. Generalno govoreći, sa povećanjem stepena polinoma aproksimacije nepoznatih struja, rešenja relativno sporo konvergiraju ka tačnom, dok se broj poznatih veoma brzo povećava.

### Da li je dovoljno samo koristiti opciju za *power balance*?

Na slici 2(b) prikazan je uporedni grafik za realni i imaginarni deo ulazne impedanse mikrotrakaste antene. Uporedni grafik prikazan je za slučaj kada je stepen polinoma aproksimacije nepoznate struje u *enhance2* modu za slučajeve kada se koristi (*p02\_enhance2* projekat) i kada se ne koristi (*p01\_enhance2* projekat) opcija za *power balance*, kao i za slučaj čisto metalne strukture (*p02\_enhance2\_metall* projekat) kada se koristi opcija za *power balance*.



Slika 2(b).

Sa slike 2(b) vidi se da bez korišćenja opcije za *power balance* (*p01\_enhance2* projekat) rezultati za ulaznu impedansu znatno odstupaju od onih koje smo proglasili za tačne (samo metalna struktura, *p02\_enhance2\_metall* projekat). Vidi se da realni deo ulazne impedanse ima nagli pad, što se može pripisati gubitku energije (curenju energije iz sistema) na učestanosti od oko 0,338GHz. Jasno je da aproksimacija struje *enhance2* tipa bez *power balance* opcije (*p01\_enhance2* projekat) nije dovoljna za postizanje vrlo tačnih rešenja. Može se zaključiti da će rešenja dosta sporo konvergirati sa povećanjem reda stepena aproksimacije struje, dok će se broj nepoznatih jako brzo povećavati.

Uključivanjem opcije za *power balance* rešenja postaju tačnija, ali se još uvek znatno razlikuju od rešenja dobijenih za model sačinjen isključivo od metala.

Kao sledeći korak u cilju poboljšanja tačnosti rezultata elektromagnetske simulacije koristi se opcija za *edging*.

### **Edge:**

*Edge* je manipulacija koja omogućava automatsku prostornu segmentaciju (*meshing*) duž ivica na spoju ploča. Koristi se kada je ivični efekat kritičan parametar za tačnost elektromagnetske analize.

Ivični efekat nastaje duž ivica metalnih provodnika i duž ivica koje predstavljaju spoj različitih dielektričnih ploča. *Edge meshing* (manipulacija) se izvodi umetanjem dodatnih uskih metalnih i/ili dielektričnih traka duž kritičnih ivica. Na korisniku ostaje da odluči koje su ivice kritične (ivice spoja određenih domena). Dobar primer za korišćenje *edge* manipulacije je mikrotrakasta struktura gde ivični efekat igra značajnu ulogu u tačnosti elektromagnetske simulacije. (*Na ovom predmetu koristićemo samo **Auto mod edge**-inga.*)

U **auto** modu *edge*-inga potrebno je definisati dve maksimalne *edge* širine:

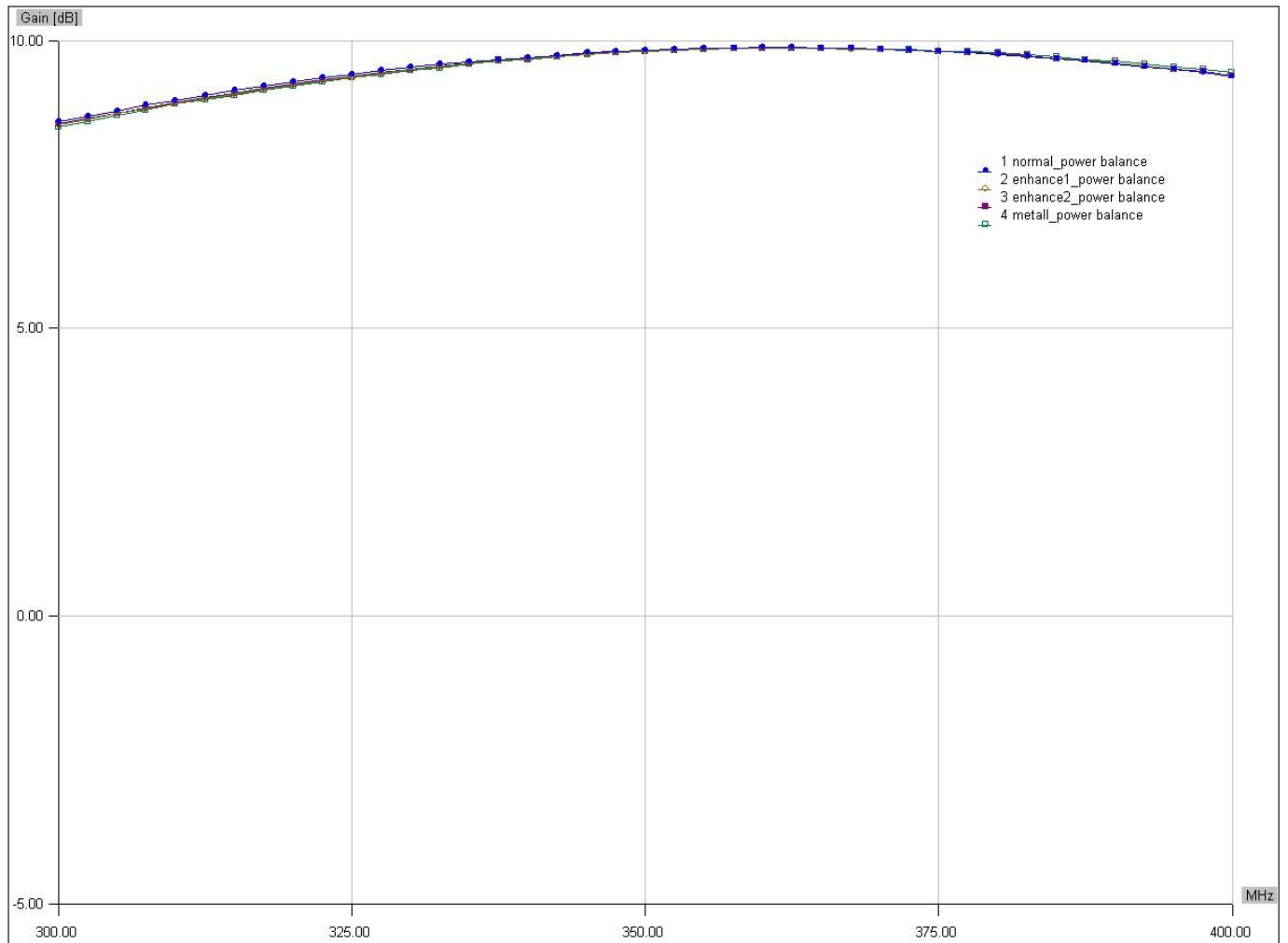
1. **Maximum Edge Width [m]** - Definiše maksimalnu širinu trake kojom će biti izveden *edge* u metrima (ili bilo kojoj drugoj jedinici dužine). Ako se ovom širinom prekorači maksimalno dozvoljena širina diktirana samom geometrijom ploče nad kojom se izvršava *edging*, prilikom prostorne segmentacije koristi se sledeći kriterijum.
2. **Maximum Edge Width [%]** - Definiše maksimalnu širinu trake kojom će biti izveden *edge* izraženu kroz procenat maksimalne dimenzije ploče nad kojom se izvodi *edging*. Preporučena vrednost je između 10% i 25%. Kod dugačkih ploča preporučuje se 65%.

**P03.** Modelovati mikrotrakastu antenu u opsegu učestanosti od 0,3GHz do 0,4GHz na 41 uniformno raspodeljenoj učestanosti. Dužina mikrotrakaste antene je  $L_{\text{patch}} = 400\text{mm}$ . Širina mikrotrakaste antene je  $W_{\text{patch}} = 400\text{mm}$ . Poluprečnik žice za napajanje (sonde) je  $R_{\text{wire}} = 1\text{mm}$ . Debljina supstrata je  $H_{\text{sub}} = 20\text{mm}$ . Dielektrik (supstrat) ima iste električne osobine kao vakuum. Širina pojasa dielektrika oko mikrotrakaste antene je  $W_{\text{dielek}} = 200\text{mm}$ . Sonda za napajanje postavljena je u ravni simetrije (ravan simetrije preseca mikrotrakastu antenu po širini) na rastojanju  $Y_{\text{sonda}} = 40\text{mm}$  od kraja mikrotrakaste antene, upravno na povratni vod i mikrotrakastu antenu. U cilju skraćivanja vremena izvršavanja simulacije, gde god je to moguće, koristiti ravni simetrije/antisimetrije.

- a.) Izračunati usmerenost u pravcu maksimalnog zračenja u čitavom opsegu učestanosti.
- b.) Prethodni model snimiti kao nove projekte, *p03\_enhance1* i *p03\_enhance2*, kod kojih su stepeni polinoma aproksimacije struje promenjeni sa *normal*, na *enhance1* i *enhance2* mod, respektivno. Zatim *p03\_enhance2* model prepraviti tako da ostanu samo metalne ploče, i snimiti ga kao novi projekat *p03\_enhance2\_metal*. Za sva četiri projekta uporedno prikazati usmerenost u pravcu glavnog zračenja u čitavom opsegu učestanosti. Prokomentarisati rezultate.
- c.) Za sva četiri projekta uporedno prikazati realni i imaginarni deo ulazne impedanse u čitavom opsegu učestanosti. Prokomentarisati rezultate.

U cilju poboljšanja tačnosti rezultata simulacije (usmerenosti u pravcu maksimalnog zračenja i ulazne impedanse) koristiti opciju za **POWER BALANCE** i opciju za **EDGING**. Za maksimalnu širinu *edge* oblasti koristiti  $W_{\text{edge}} = 5\text{mm}$  (25%).

Uporedni grafici za usmerenost u pravcu glavnog zračenja u čitavom opsegu učestanosti za projekte p03\_normal, p03\_enhance1, p03\_enhance2 i p03\_enhance2\_metall sa uključenom opcijom za **POWER BALANCE** i **EDGING**, prikazani su na slici 3(a).

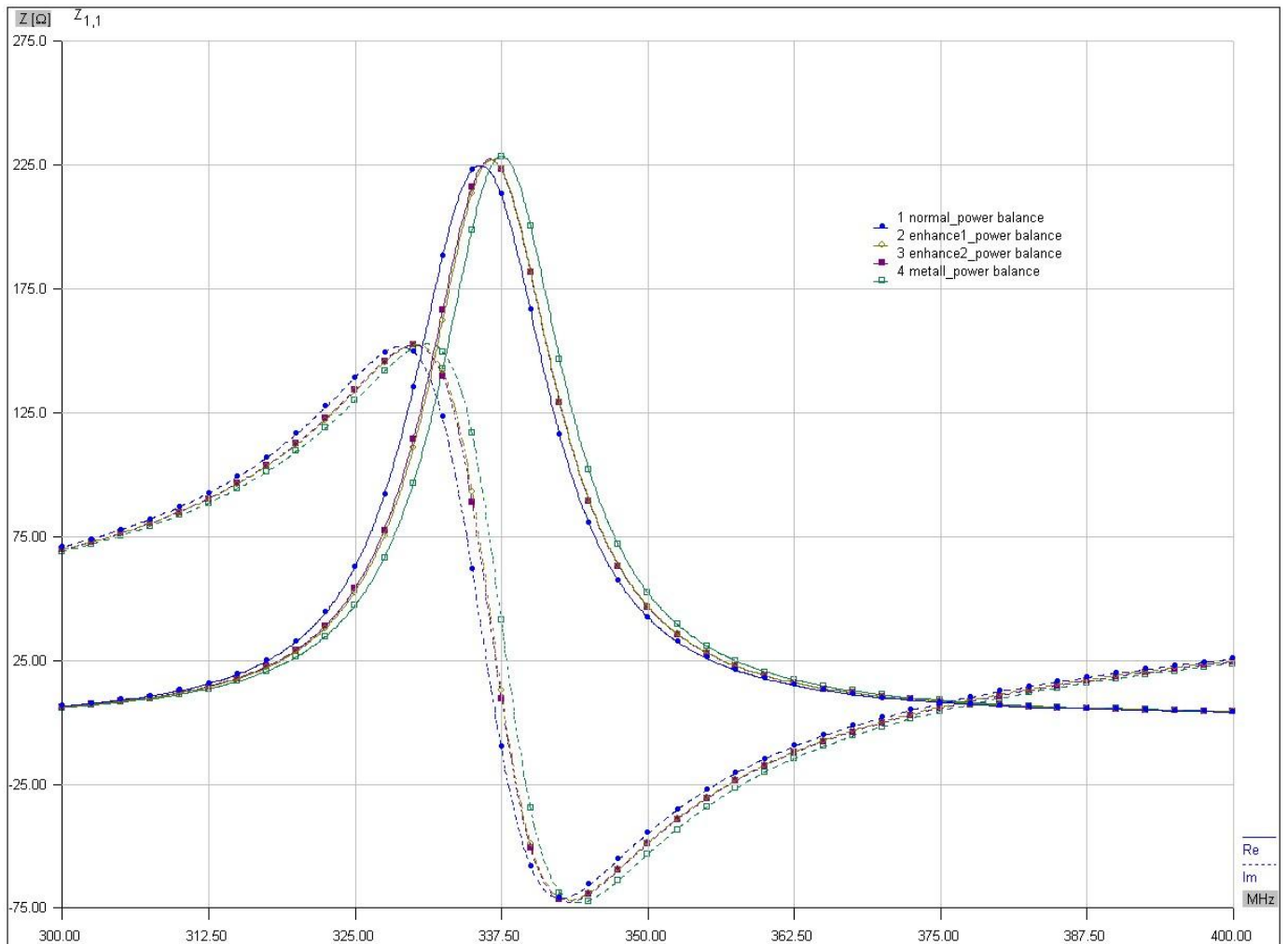


Slika 3(a).

Sa slike 3(a) se vidi da se vrlo tačna rešenja dobijaju već za *normal* mod stepena polinoma aproksimacije nepoznatih struja.



Na slici 3(b) prikazan je uporedni grafik za realni i imaginarni deo ulazne impedanse mikrotrakaste antene. Uporedni grafik prikazan je za slučaj kada je stepen polinoma aproksimacije nepoznate struje u *normal* modu (*p03\_normal* projekat), *enhance1* modu (*p03\_enhance1* projekat), *enhance2* modu (*p03\_enhance2* projekat), kao i za slučaj čisto metalne strukture (*p03\_enhance2\_metall* projekat). U svim projektima koristi se opcija za *power balance* i *edging*.



Slika 3(b).

Sa slike 3(b) vidi se da je u slučaju korišćenja *edging*-a i *power balance*-a inženjerski dovoljno koristiti *enhance1* mod za stepen polinoma aproksimacije nepoznate struje.

**Ovaj zaključak koristićemo i u narednim primerima.**

**P04.** Modelovati mikrotrakastu (*patch*) antenu na centralnoj učestanosti  $f_0 = 10\text{GHz}$ . Relativna permitivnost supstrata je  $\epsilon_r = 4,4$ . Debljina supstrata je  $H_{\text{sub}} = 0,6\text{mm}$ . Dužina mikrotrakaste antene je

$L_{\text{patch}} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}$ , gde  $\lambda_0$  predstavlja talasnu dužinu u vakuumu. Širina mikrotrakaste antene je

$W_{\text{patch}} = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}$ . Poluprečnik žice za napajanje (sonde) je  $R_{\text{wire}} = 0,001 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}$ . Širina pojasa dielektrika oko

mikrotrakaste antene je  $W_{\text{dielek}} = \frac{\lambda_0}{8\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}$ .

Sonda za napajanje postavljena je u ravni simetrije (ravan simetrije preseca mikrotrakastu antenu po širini)

na rastojanju  $Y_{\text{sonda}} = \frac{\lambda_0}{20\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}}$  od kraja mikrotrakaste antene, upravno na povratni vod i mikrotrakastu

antenu.

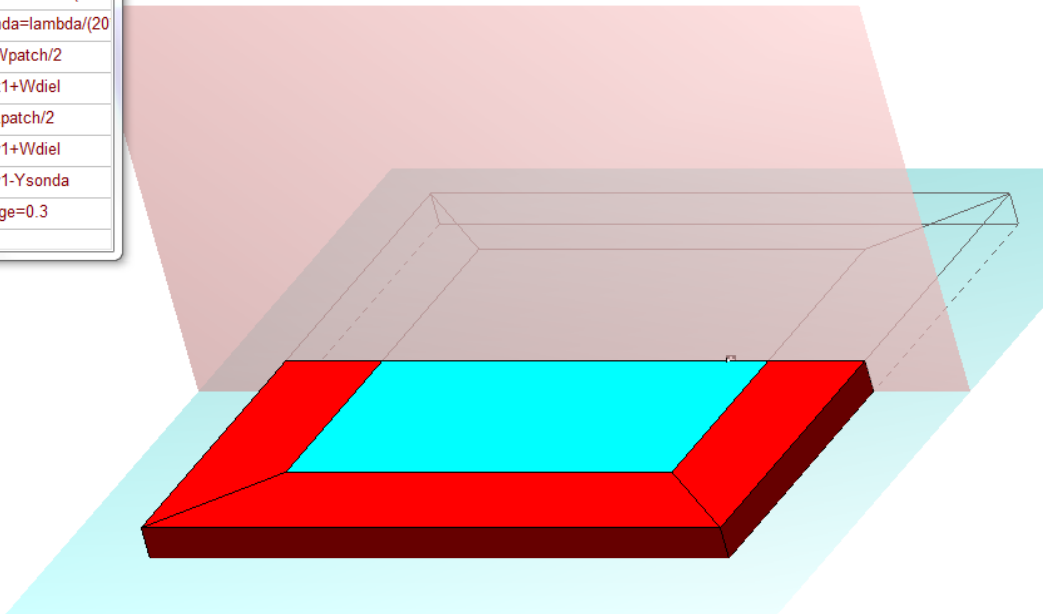
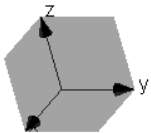
**Napomena:** Pošto dielektrik nije homogen, za efektivnu brojnu vrednost permitivnosti koristiti  $\epsilon_{\text{reff}} = 4$ .

Povratni vod mikrotrakaste antene modelovan je PEC-om. U cilju skraćanja vremena izvršavanja simulacije, gde god je to moguće, koristiti ravni simetrije/antisimetrije.

- Prikazati parametar  $s_{11}[\text{dB}]$  u opsegu učestanosti od 8GHz do 12GHz u 41 tački i usmerenost u pravcu maksimalnog zračenja.
- Izvršiti optimizaciju parametra  $Y_{\text{sonda}}$  i  $L_{\text{patch}}$  kako bi se ostvarilo što bolje prilagođenje antene na centralnoj učestanosti. Uporedno prikazati parametara  $s_{11}[\text{dB}]$  i usmerenost u pravcu maksimalnog zračenja za slučaj pre i nakon optimizacije. Prokomentarisati rezultate.

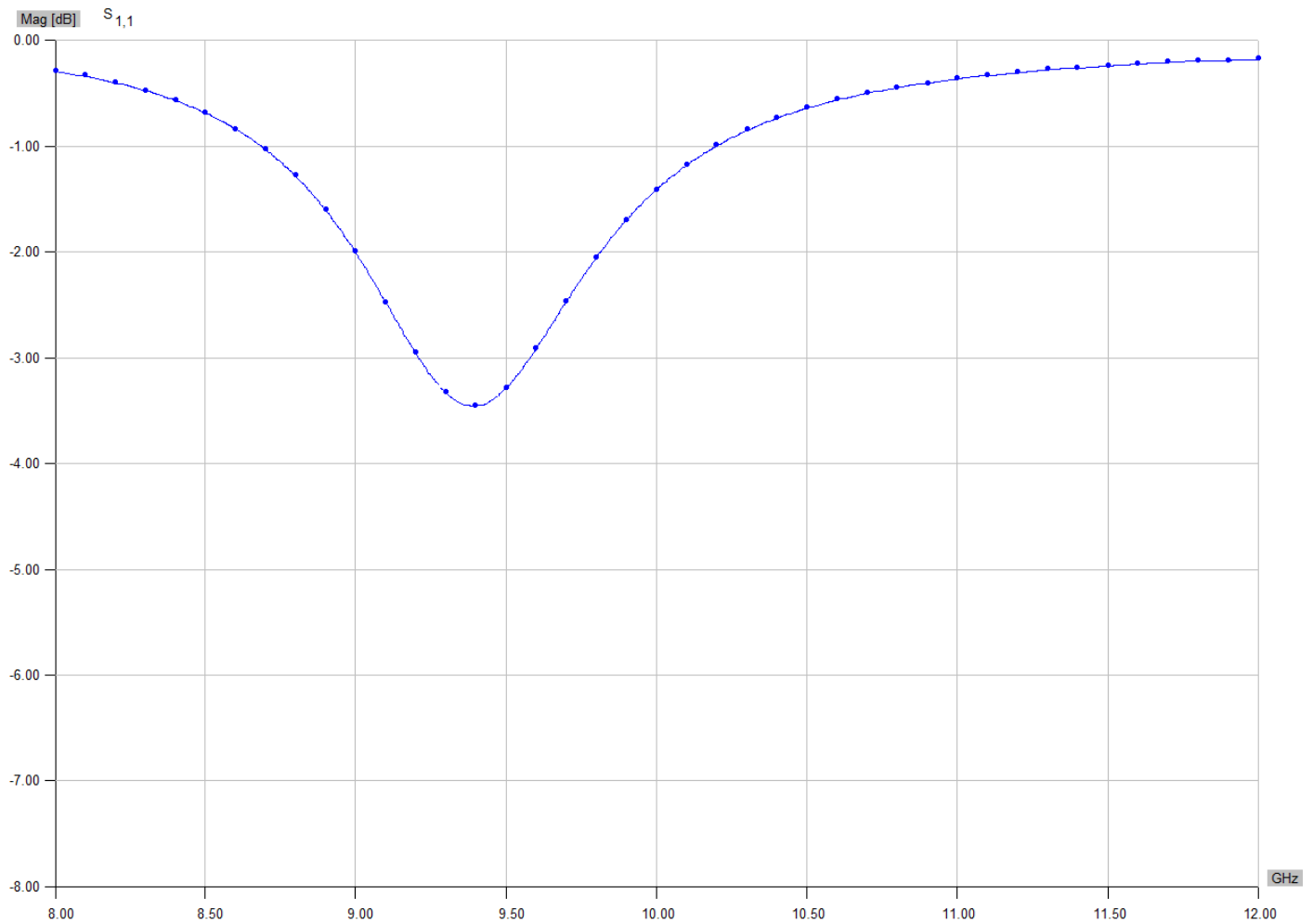
U cilju poboljšanja tačnosti rezultata simulacije (parametra  $s_{11}[\text{dB}]$  i usmerenosti u pravcu maksimalnog zračenja) koristiti *enhance1* mod stepena aproksimacije struje, opciju za **POWER BALANCE** i opciju za **EDGING**. Za maksimalnu širinu *edge* oblasti koristiti  $W_{\text{edge}} = 0,3\text{mm}$  (25%).

		Symbol
1	10	$f_0=10$
2	30	$\lambda=300/f_0$
3	4.4	$\epsilon_r=4.4$
4	0.6	$H_{sub}=0.6$
5	4	$\epsilon_{reff}=4$
6	7.5	$L_{patch}=\lambda/(2*\epsilon_{reff})$
7	7.5	$W_{patch}=\lambda/(2*\epsilon_{reff})$
8	0.015	$R_{wire}=0.001*\lambda$
9	1.875	$W_{diel}=\lambda/(8*\epsilon_{reff})$
10	0.75	$Y_{sonda}=\lambda/(20*\epsilon_{reff})$
11	3.75	$x_1=W_{patch}/2$
12	5.625	$x_2=x_1+W_{diel}$
13	3.75	$y_1=L_{patch}/2$
14	5.625	$y_2=y_1+W_{diel}$
15	3	$y_3=y_1-Y_{sonda}$
16	0.3	$Wedge=0.3$



Slika 4(a).

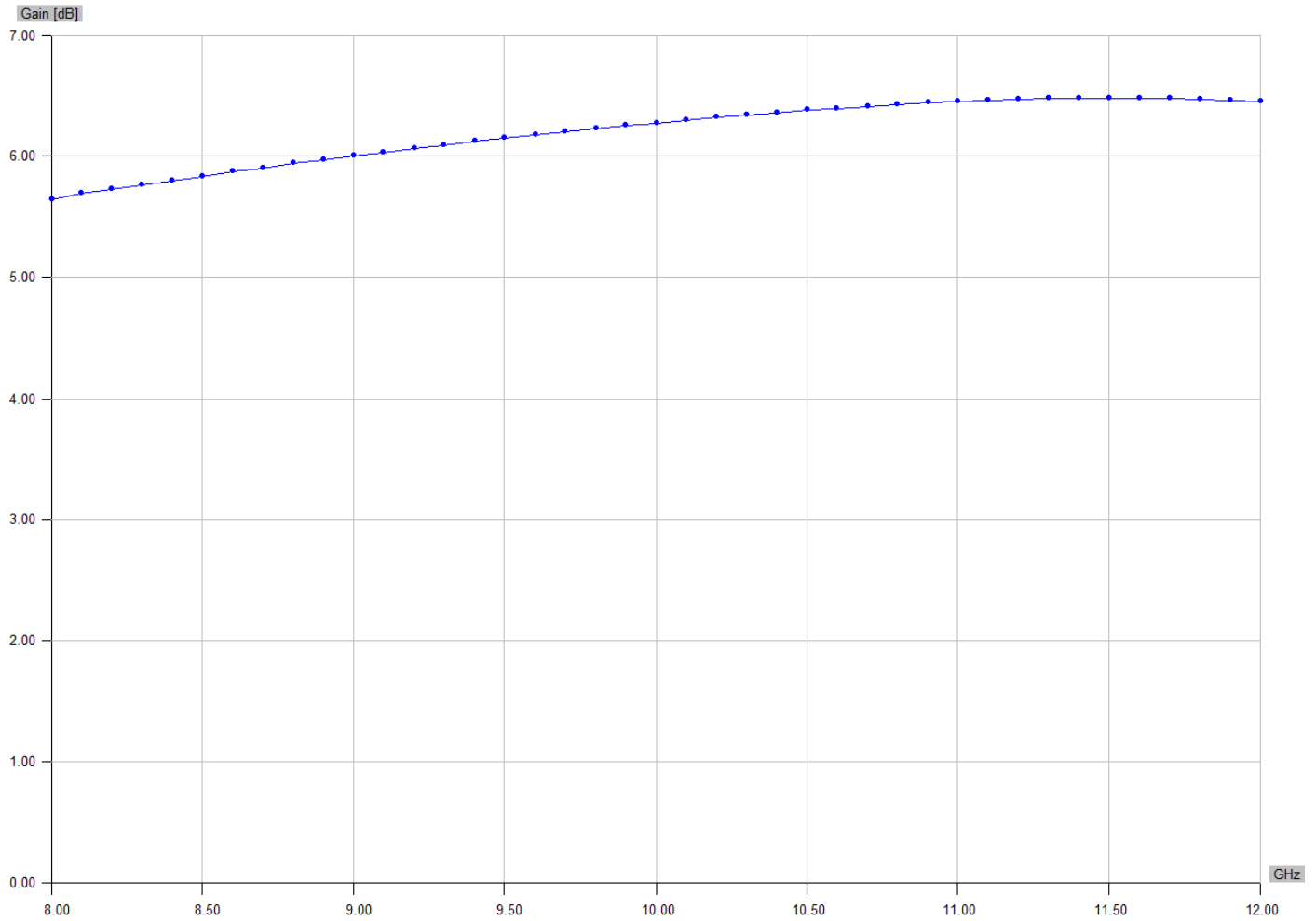
Parametar  $s_{11}$  [dB], pre procesa optimizacije, prikazan je na slici 4(b).



Slika 4(b).

Mikrotrakasta antena je uskopojasna. Ovo je jedan od njenih osnovnih nedostataka. Sa slike 4(b) vidimo da antena nije rezonantna na centralnoj učestanosti. Promenom dužine mikrotrakaste antene ( $L_{\text{patch}}$ ) dominantno se menja rezonantna učestanost strukture (učestanost na kojoj parametar  $s_{11}$  ima minimum). Promenom pozicije sonde dominantno se menja ulazna impedansa antene (minimalna vrednost parametra  $s_{11}$ ).

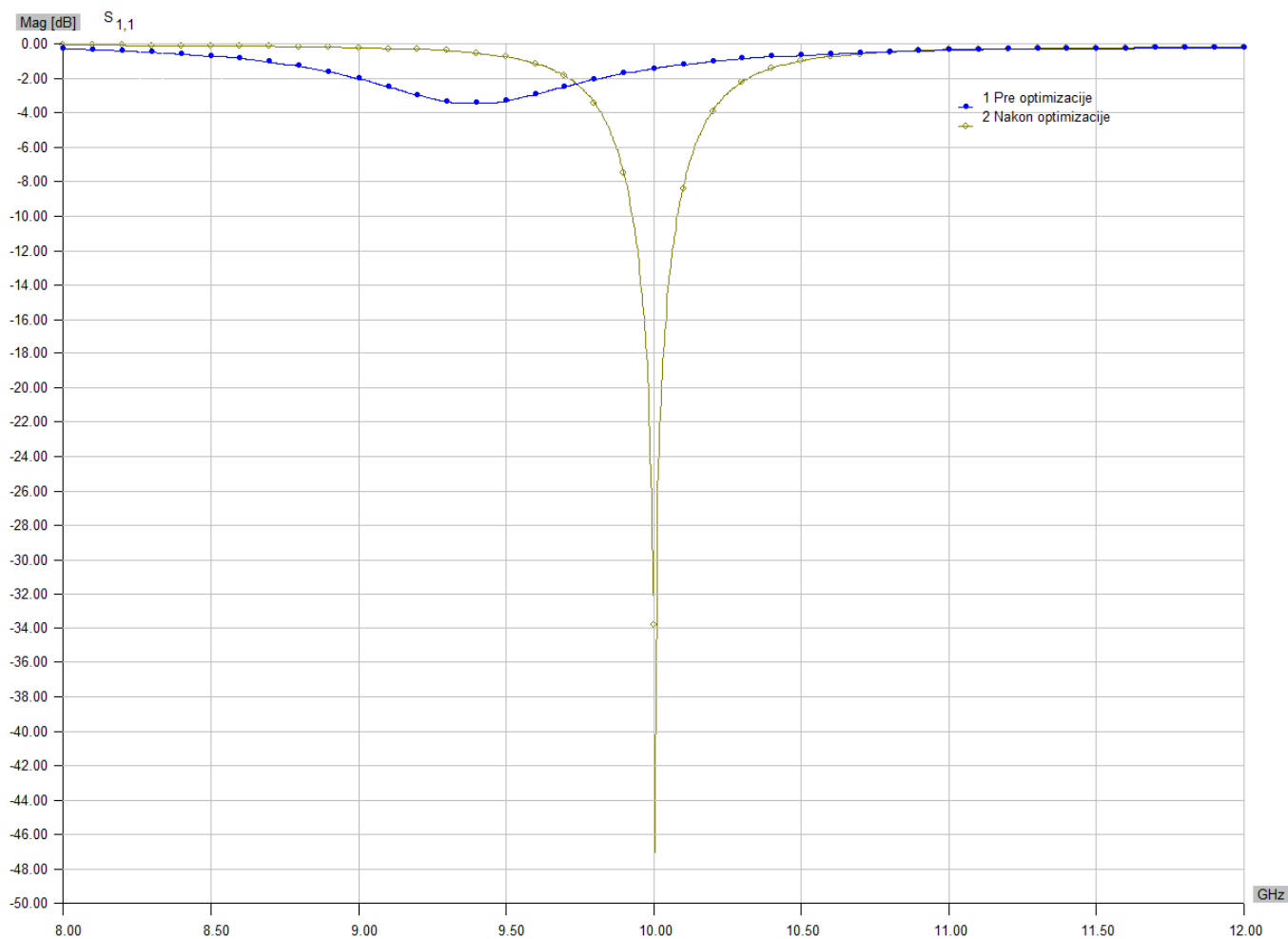
Na slici 4(c) prikazana je usmerenost mikrotrakaste antene u pravcu glavnog zračenja pre procesa optimizacije.



Slika 4(c).

Kako bi se ubrzao proces optimizacije parametara antene, manuelnom promenom parametara  $L_{\text{patch}}$  i  $Y_{\text{sonda}}$  možemo približno zadovoljiti traženi uslov.

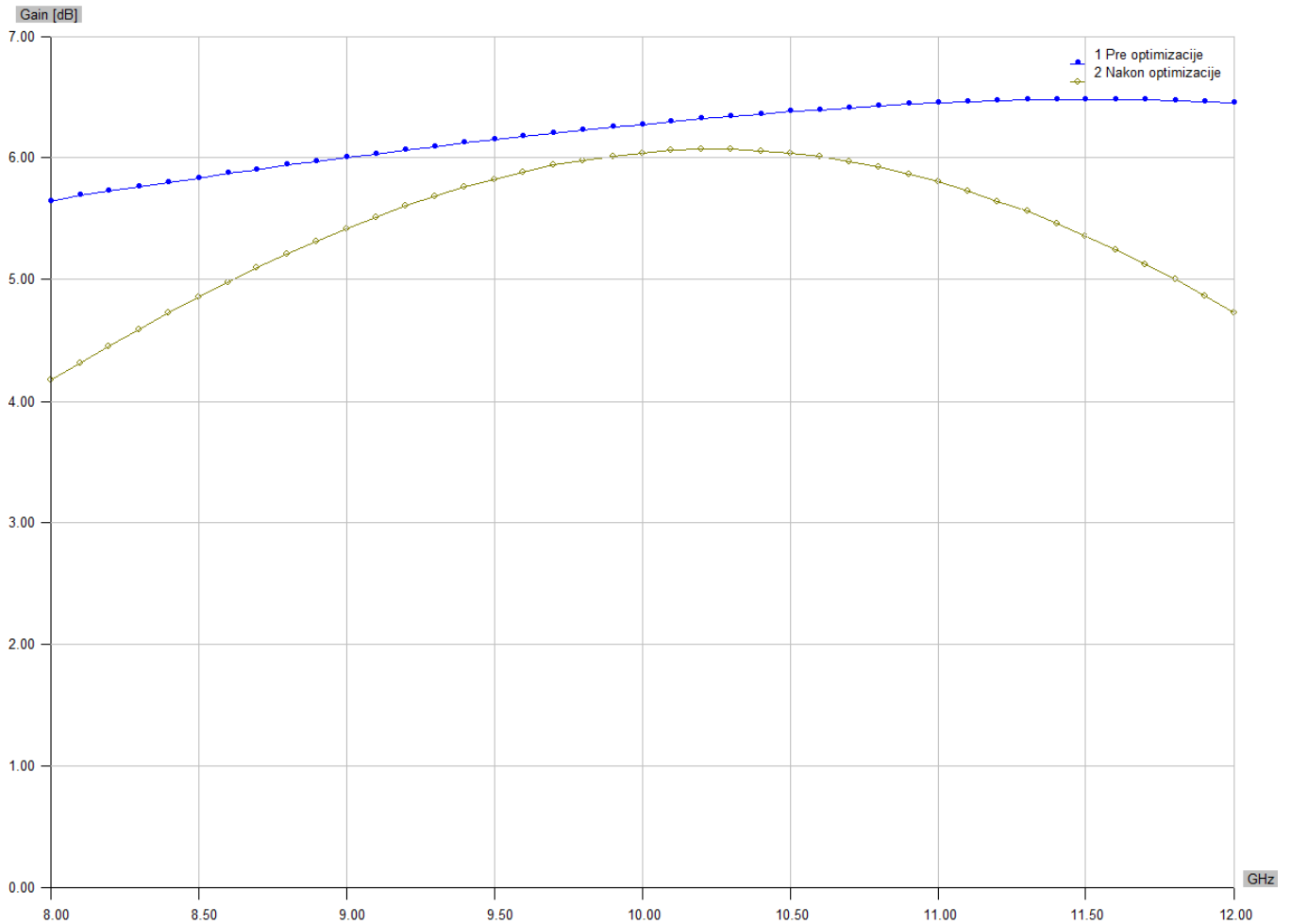
Nakon procesa optimizacije uporedni grafik za parametar  $s_{11}$  [dB] prikazan je na slici 4(d).



Slika 4(d).

Sa slike 4(d) vidi se da je ostvareno odlično prilagođenje na centralnoj učestanosti. Loša strana ovog rešenja je izuzetno uskopojasni karakter prilagođenja.

Na slici 4(e) prikazan je uporedni grafik za usmerenost u pravcu maksimalnog zračenja, za slučaj pre i nakon optimizacije.



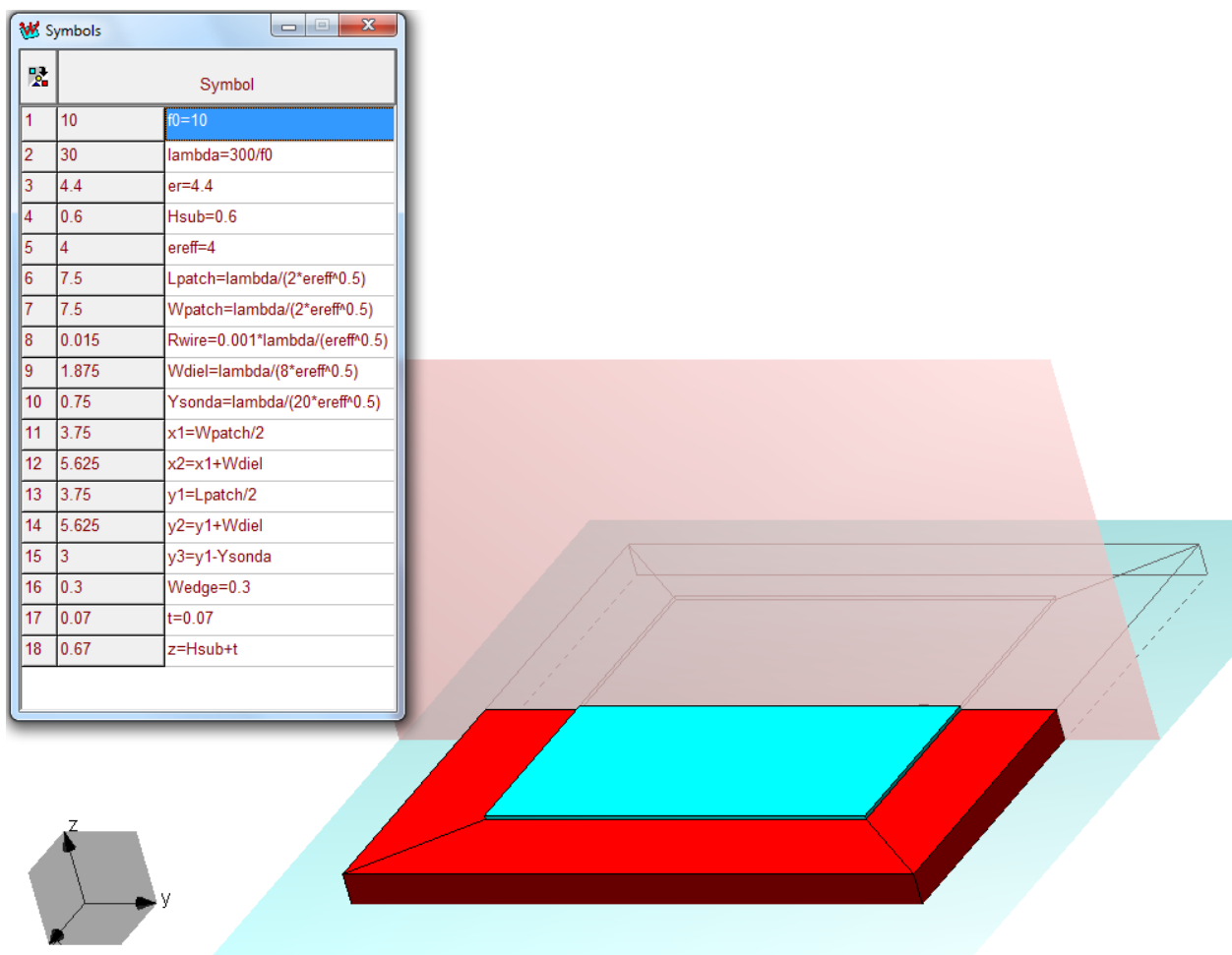
Slika 4(e).

**P05.** Ponoviti prethodni primer. Umesto beskonačno tanke metalizacije (beskonačno tanke trake vrućeg provodnika mikrotrakaste antene) koristiti metalizaciju konačne debljine  $t = 70\mu\text{m}$ .

Povratni vod mikrotrakaste antene modelovan je PEC-om. U cilju skraćenja vremena izvršavanja simulacije, gde god je to moguće, koristiti ravni simetrije/antisimetrije.

c.) Prikazati parametar  $s_{11}$  [dB] u opsegu učestanosti od 8GHz do 12GHz u 41 tački i usmerenost u pravcu maksimalnog zračenja za slučaj beskonačno tanke i konačno tanke metalizacije.

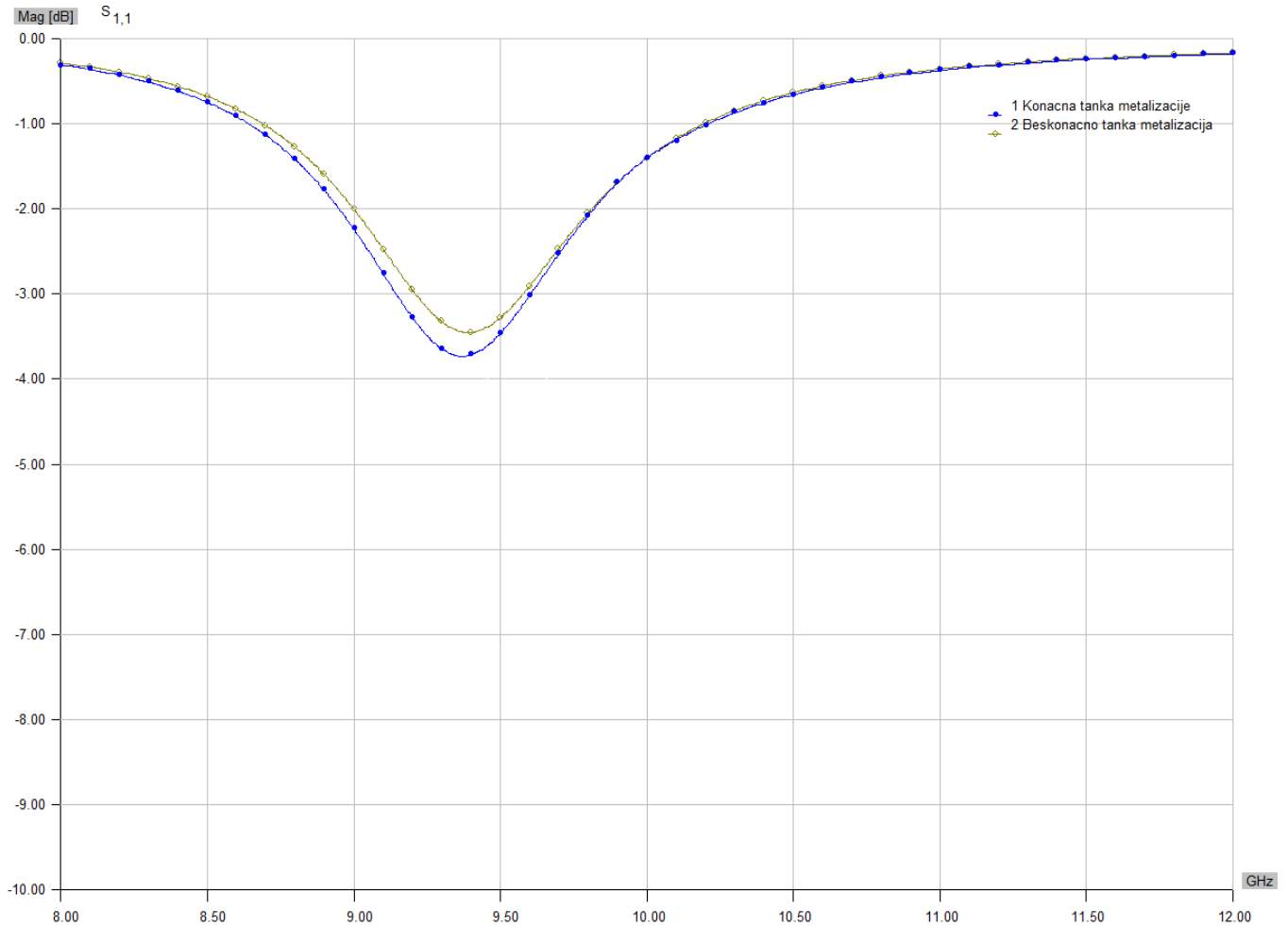
d.) Izvršiti optimizaciju parametra  $Y_{\text{sonda}}$  i  $L_{\text{patch}}$  kako bi se ostvarilo što bolje prilagođenje antene na centralnoj učestanosti. Uporedno prikazati parametara  $s_{11}$  [dB] i usmerenost u pravcu maksimalnog zračenja nakon optimizacije za slučaj beskonačno tanke i konačno tanke metalizacije. Prokomentarisati rezultate.



Slika 5(a).

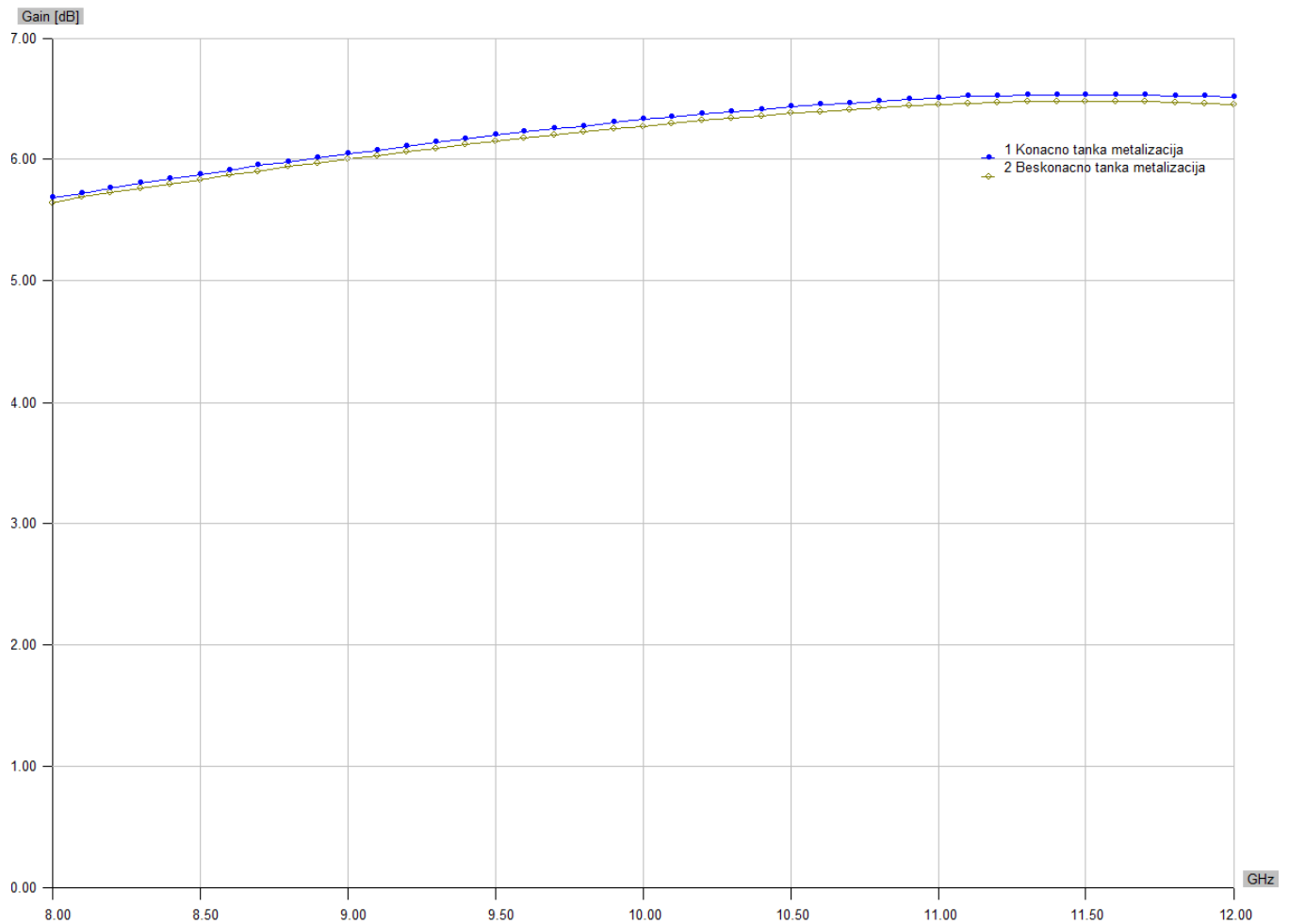


Uporedni grafik za parametar  $s_{11}$  [dB] za slučaj konačno tanke i beskonačno tanke metalizacije, pre procesa optimizacije, prikazan je na slici 5(b).



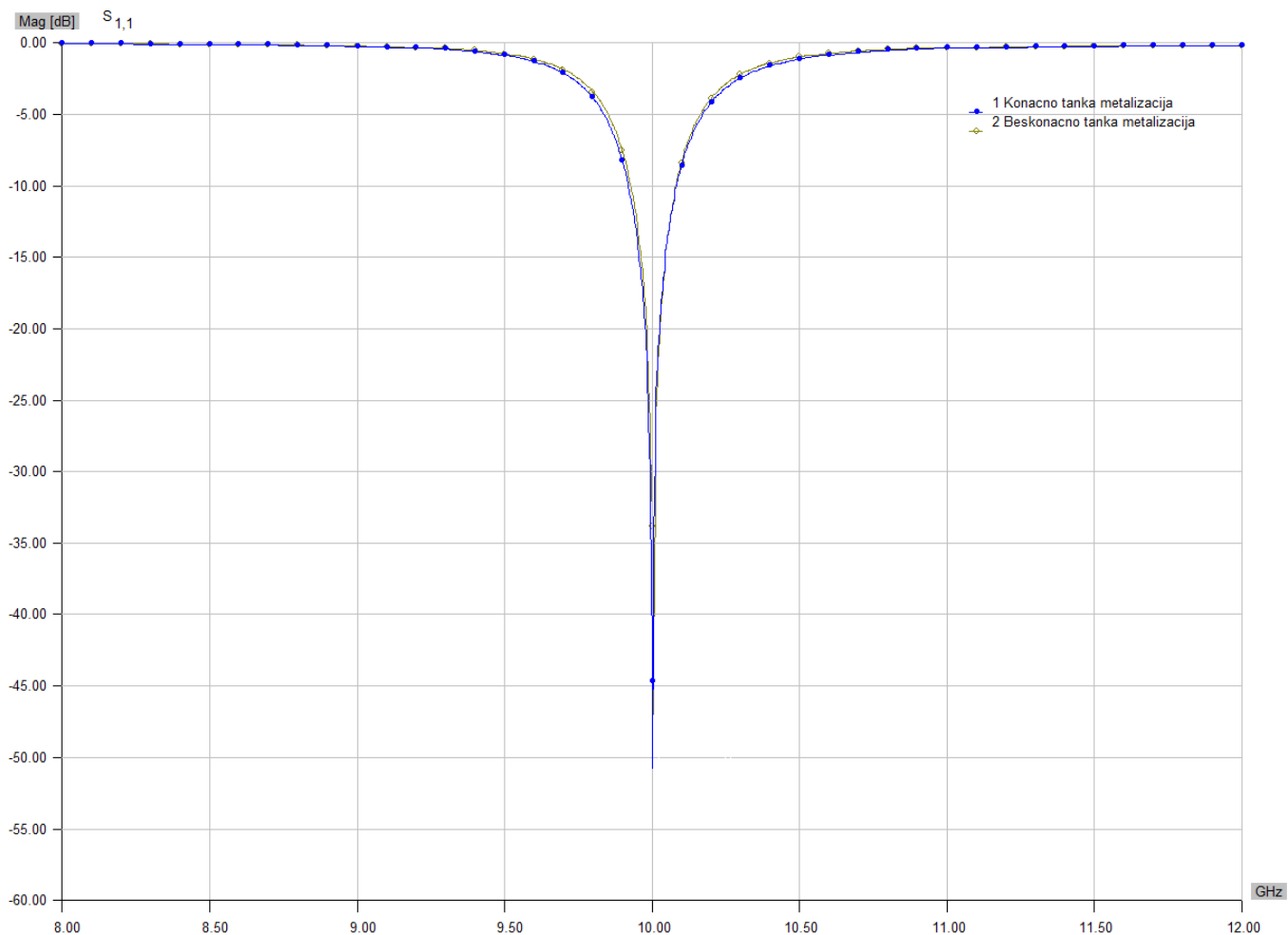
Slika 5(b).

Uporedni grafik usmerenosti u pravcu maksimalnog zračenja za slučaj konačno tanke i beskonačno tanke metalizacije, pre procesa optimizacije, prikazan je na slici 5(c).



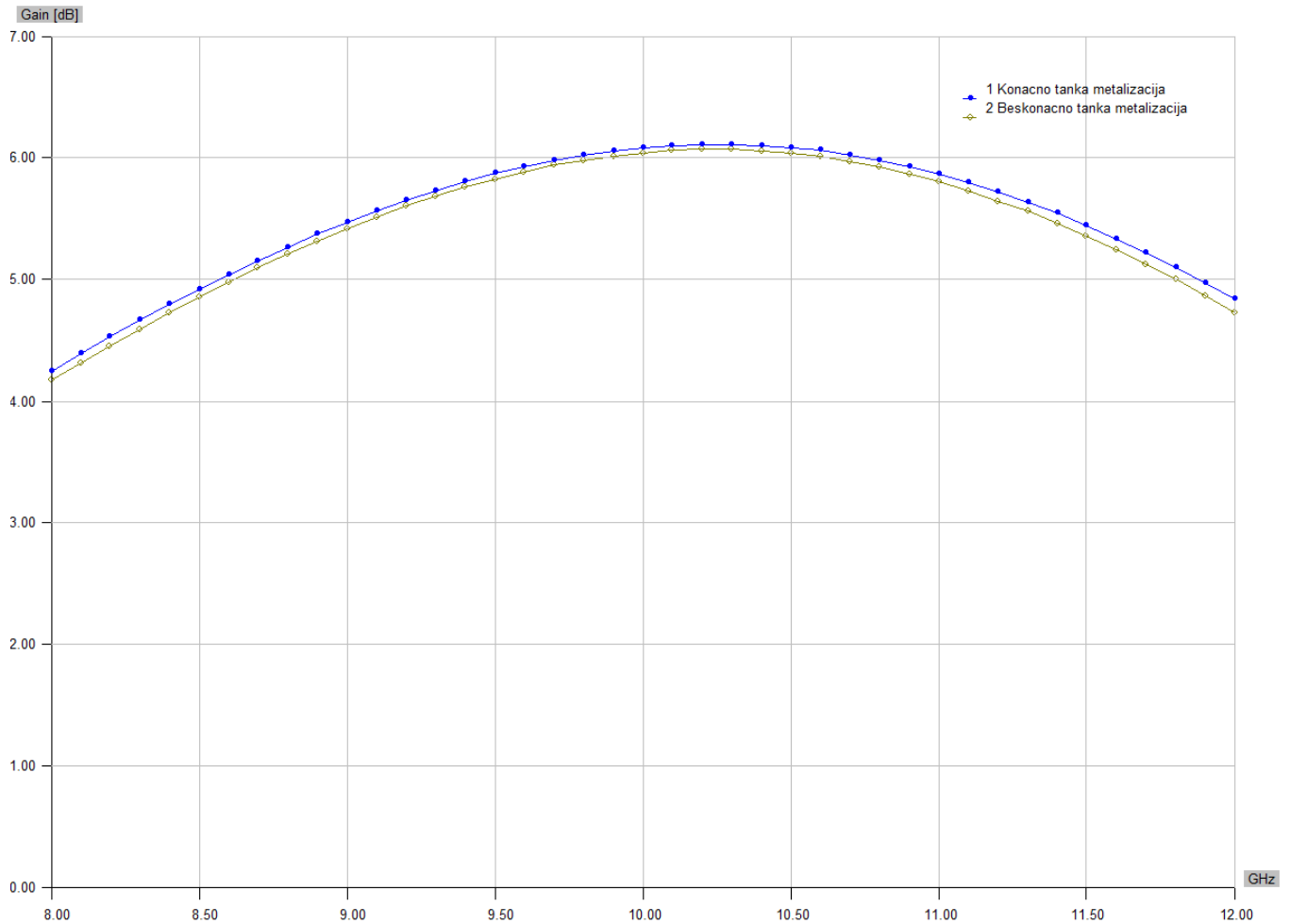
Slika 5(c).

Uporedni grafik za parametar  $s_{11}$  [dB] za slučaj konačno tanke i beskonačno tanke metalizacije, nakon procesa optimizacije, prikazan je na slici 5(d).



Slika 5(d).

Uporedni grafik usmerenosti u pravcu maksimalnog zračenja za slučaj konačno tanke i beskonačno tanke metalizacije, nakon procesa optimizacije, prikazan je na slici 5(e).



Slika 5(e).