

# Loksodromska antena sa opsegom preko 500 MHz

---

**Gubo, Dominik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:001332>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-25**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij elektrotehnike**

**Loksodromska antena sa opsegom preko 500 MHz**

**Završni rad**

**Dominik Gubo**

**Osijek, 2021.**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SIMULACIJSKI PAKET HFSS .....</b>	<b>2</b>
<b>3. ANTENE I PARAMETRI ANTENA .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1. Parametri antene.....</b>	<b>4</b>
<b>3.2. Loksodromska antena.....</b>	<b>8</b>
<b>3.3. Modeli loksodromske antene.....</b>	<b>9</b>
<b>4. PROCES SIMULACIJE ANTENE .....</b>	<b>12</b>
<b>5. SIMULACIJE MODELA BEZ JEZGRE .....</b>	<b>17</b>
<b>5.1 Simulacije antena promjera 6 cm .....</b>	<b>17</b>
<b>5.2 Simulacije antena promjera 10 cm .....</b>	<b>29</b>
<b>6. USPOREDBA SIMULACIJA MODELA SA JEZGROM.....</b>	<b>40</b>
<b>6.1. Rezultati simulacije.....</b>	<b>42</b>
<b>6.2. Simulacija loksodromske antene promjera 10 cm sa jezgrom.....</b>	<b>51</b>
<b>7. USPOREDBA LOKSODROMSKE I HELIKOIDALNE ANTENE .....</b>	<b>53</b>
<b>8. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>57</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>57</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>60</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>62</b>
<b>PRILOG: Rezultati i modeli simulacija .....</b>	<b>63</b>

## 1. UVOD

U ovom završnom radu provest će se simulacija loksodromske antene za frekvencijsko područje od 1 do 3 GHz uz širinu opsega preko 500 MHz. Korištenjem simulacijskog paketa HFSS, provest će se simulacija parametara šest različitih modela loksodromske antene koji se razlikuju po broju namota, radijusu sfere i kutu loksodroma. Također, testirat će se utjecaj različitih materijala jezgre na dobivene parametre. Uz navedeno, ukratko će se usporediti parametri loksodromske antene s helikoidalnom koja je sličnog geometrijskog oblika. Simulirani parametri antene su: dijagram zračenja, koeficijent refleksije  $S_{11}$ , VSWR, dobitak te ulazna impedancija antene. Zaključak sadrži ključna zapažanja te krajnju misao vezanu uz rad u programu, dobivene rezultate i loksodromsku antenu. Na kraju ovog rada nalazi se literatura s popisom korištenih izvora i sažetak u kojem je sumiran završni rad.

## 2. SIMULACIJSKI PAKET HFSS

HFSS (kratica za engl. *high-frequency structure simulator*) široko je korišten program tvrtke *Ansys* namijenjen za proračune i optimizaciju zračenja i prijenosnog ponašanja VF elektromagnetskih polja. Industrijski je standard za simulacije ovakvog tipa iz razloga što ima visoku razinu automatizacije i garantiranu točnost. Dotična svojstva ga razlikuju od ostalih elektromagnetskih simulatora kojima je pak potreban manualan korisnički pristup te veći broj izvršenih mjerenja da bi se utvrdilo da su generirana “geometrijska mreža” i dobiveni rezultati prikladni i točni [1].

Korištene verzije simulacijskog paketa prilikom izrade ovog rada su ANSYS HFSS 15.0 te ANSYS Electromagnetics Suite 17.2.

### 3. ANTENE I PARAMETRI ANTENA

Antena je električna naprava koja stvara električni signal u elektromagnetski val te ga odašilje, a s druge strane prijemna antena prima elektromagnetski val i pretvara ga nazad u električni signal.

Prilikom promjene magnetskog polja u vremenu (prema Faradejevom zakonu - tablica 1.1.), dolazi do stvaranja električnog polja. Vrijedi i obratno; promjenjivo električno polje stvara magnetsko polje (gdje vrijedi Amperov zakon - tablica 1.2.). Konstantnim mijenjanjem električnog i magnetskog polja dolazi do stvaranja elektromagnetskog vala koji se širi radijalno od antene. Azimutna komponenta (označena s  $\varphi$ ) predstavlja magnetsko polje, dok polarna komponenta (označena s  $\Theta$ ) predstavlja električno polje.

Tablica 3.1. Faradejev zakon

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (3.1.)$$

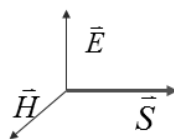
Tablica 3.2. Amperov zakon

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (3.2.)$$

Ključno je shvatiti navedene komponente zbog principa rada antene te kako ona zrači, a zračenje se može opisati preko Poyntingovog vektora. Zračena snaga koju će zračiti antena računa se preko Poyntingovog vektora koji predstavlja površinsku gustoću snage koja se širi u smjeru vektora okomitog na vektore električnog i magnetskog polja (Tablica 1.3.). Električno i magnetsko polje su u fazi. Radijalna komponenta ima Poyntingov vektor.

Tablica 3.3. Smjer Poyntingovog vektora

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3.3.)$$



Sl. 3.1. Smjer Poyntingovog vektora

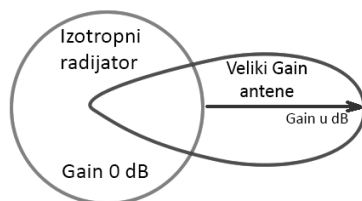
### 3.1. Parametri antene

Prilikom projektiranja radiokomunikacijskih sustava koriste se parametri antena koji definiraju svojstva, a time i primjenu antene [2]. Najviše se pažnje obraća na sljedeće parametre:

- Dijagram zračenja
- Impedancija antene
- Usmjerenost
- Dobitak
- Efektivna površina
- Efektivna duljina
- S parametri ( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ )
- VSWR
- Polarizacija antene
- Temperatura šuma

U ovom radu provest će se simulacije dobitka, ulazne impedancije, dijagrama zračenja, omjera stojnog vala, odnosno VSWR i koeficijenta refleksije  $S_{11}$ . S obzirom da su navedeni parametri često u uporabi, treba obrazložiti njihovu funkciju.

Dobitak (engl. *gain*) je broj koji opisuje koliko puta ukupna zračena snaga izotropnog radijatora treba biti veća od ukupne privedene snage promatrane antene da bi izotropni radijator na određenoj udaljenosti postigao jednaku gustoću snage koju ima promatrana antena u smjeru maksimalnog zračenja [3] (Sl. 1.2.).



Sl. 3.2. Vizualni prikaz dobitka

Tablica 3.4. Dobitak antene

$$G = \eta \cdot D \quad (3.4.)$$

Impedancija antene jednoprilaza predstavljena je omjerom napona i struje na jednoprilazu, gdje ohmovu komponentu predstavlja otpor zračenja ( $R_z$ ) i otpor gubitaka ( $R_d$ ), a reaktivnu komponentu ( $X_A$ ) koja će ovisiti o indukcijskom polju. S obzirom da govorimo o impedanciji, treba uzeti u obzir da se iznos impedancije mijenja s promjenom frekvencije, što može stvoriti problem jer impedancija linije na koju se antena spaja znatno često se sporije mijenja od impedancije antene. Takav problem naziva se impedantno prilagođenje antene i on se rješava prilagođavanjem frekvencijskog opsega antene tako da odnos stojnih valova bude zadovoljavajući (obično oko 2).

Tablica 3.5. Impedancija antene

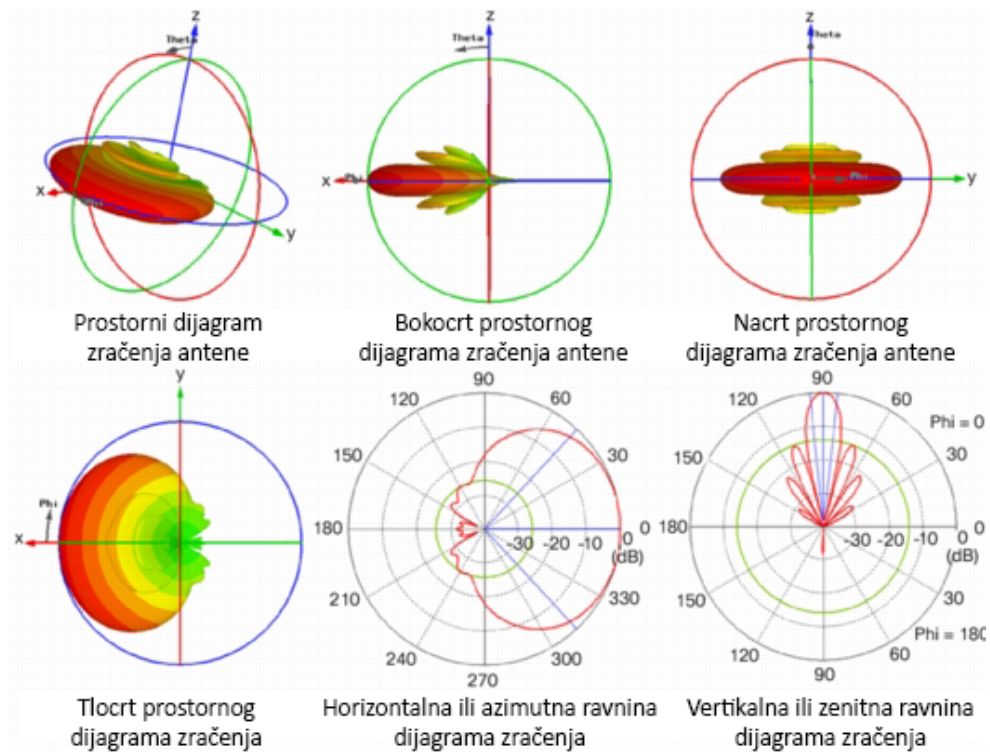
$$Z_A = R_A + jX_A = R_z + R_d + jX_A \quad (3.5.)$$

Dijagram zračenja prikazuje površinsko širenje gustoće snage antene u dvije ravnine - vertikalnoj i horizontalnoj. U praksi se najčešće koristi prikaz u dvije ravnine zbog definiranja pojedinih parametara dijagrama, no moguće ga je prikazati i u 3D odnosno u prostoru jer se radi o zračenju gustoće snage na prostoru kugle, a takav dijagram zračenja nazivamo prostorni dijagram zračenja [4] (Sl. 2.3.).

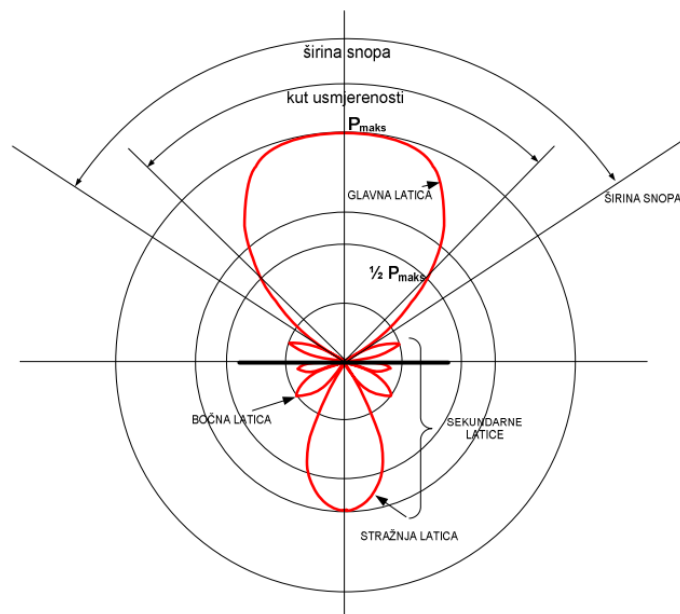
Takav dijagram definiran je karakterističnim veličinama (Sl. 2.4.):

- smjer maksimalnog zračenja ( $\vartheta_0, \varphi_0$ ) - vrijednost kuta pri kojem se nalazi glavna latica
- kut usmjerenosti ( $\vartheta_D, \varphi_D$ ) - kut koji se nalazi u okolini glavne latice unutar kojeg gustoća zračene snage neće pasti ispod polovice snage koja se zrači u smjeru maksimalnog zračenja
- širina snopa ( $\vartheta_n, \varphi_n$ ) - kut definiran tangentama na glavnu laticu povučenim iz ishodišta odnosno nultočkama
- faktor potiskivanja sekundarnih latica ( $s$ ) - omjer jakosti polja u smjeru glavne latice, odnosno maksimalnog zračenja te onog polja u smjeru maksimuma najveće sekundarne latice





Sl. 3.3. Različiti načini prikaza dijagrama zračenja



Sl. 3.4. Karakteristične veličine dijagrama zračenja

VSWR (engl. *voltage standing wave ratio*) je parametar koji kazuje koliko se učinkovito prenosi snaga s izvora napajanja, kroz prijenosnu liniju, sve do antene. U idealnom sustavu prenese se 100% energije, ali to bi bio slučaj gdje su sve frekvencije točno podudarane (impedancije antene, prijenosne linije i antene) što rezultira nepromijenjenim naponom. S druge strane, u realnom sustavu ta neusklađenost uzrokuje da se dio snage reflektira prema izvoru. Takve refleksije uzrokuju mijenjanje vrijednosti napona u različitim vremenima duž prijenosne linije. VSWR mjeri upravo te varijacije napona stoga on je omjer maksimalne vrijednosti napona bilo gdje na prijenosnoj linije i minimalne vrijednosti napona. Unutar idealnog sustava vrijednost VSWR-a je 1.0 (ili 1:1) jer ne dolazi do nikakvih varijacija. U većini konfiguracija antena, smatra se da VSWR vrijednosti do 2.0 su zadovoljavajuće [5].

Tablica 3.6. Proračun VSWR vrijednosti

$$r = VSWR = \frac{|U|_{\max}}{|U|_{\min}} \geq 1 \quad (3.6.)$$

Koeficijent refleksije  $S_{11}$  prikazuje koliko se snage dovedene s izvora do antene reflektira nazad do samog izvora, odnosno koliko će dovedene snage primiti antena. Antene s vrijednošću parametara  $S_{11} < -10$  dB zadovoljavaju uvjet te se postavlja pitanje kako dodatno smanjiti taj parametar da bude što manji u vrijednosti tj. da reflektirana snaga bude što manja. Odmah je vidljiva poveznica između faktora  $S_{11}$  i VSWR-a, iz razloga što se ustvari opisuje ista veličina, ali na drugačiji način. Naime, za prijenos snage, faktor  $S_{11}$  je prigodniji jer prikazuje koliko se snage reflektira do izvoradok za VSWR postoji problem prilagođenja impedancije antene. Važno je napomenuti da je VSWR funkcija  $S_{11}$  koeficijenta refleksije, stoga je moguće izračunati  $S_{11}$  i preko te veze (tablica - 2.8.).

Tablica 3.7. Brojčana veza između VSWR-a i  $S_{11}$

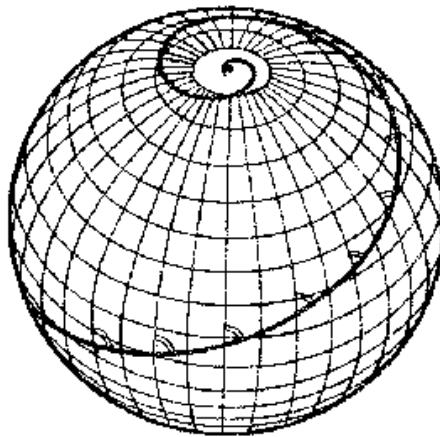
$$VSWR = 2 \approx S_{11} = -10dB \quad (3.7.)$$

Tablica 3.8. Izračun  $S_{11}$  preko VSWR-a

$$S_{11} = \Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (3.8.)$$

### 3.2. Loksodromska antena

Loksodromska antena je antena čiji namot je spirala koja opisuje sferu pod konstantnim kutom loksodroma [6]. Vrlo je slična svojstvima helikoidalne antene, izuzev geometrije: jezgra oko koje se mota namot standardne helikoidalne antene je cilindar, za razliku od loksodromske gdje je jezgra sfera. Ovakav tip antene nije široko korišten iz razloga što je još u testnim fazama te nikako nije zamjena za ostale helikoidalne antene. Međutim, posjeduje specifične i obećavajuće karakteristike koje vrijedi detaljnije istražiti [7]. Da bi se opisala struktura ovakve antene, dovoljno je navesti opseg spirale (ili promjer kugle) te broj namota kojima ćemo opisati sferu. Ima dva rada načina - normalni i aksijalni. Ključno je napomenuti da se u ovom radu podloga odnosno reflektor neće upotrijebiti.



Sl. 3.5. Loksodrom



Sl. 3.6. Izvedba loksodromske antene sa podlogom ( $D=6\text{cm}$ ,  $N=4\text{cm}$ )

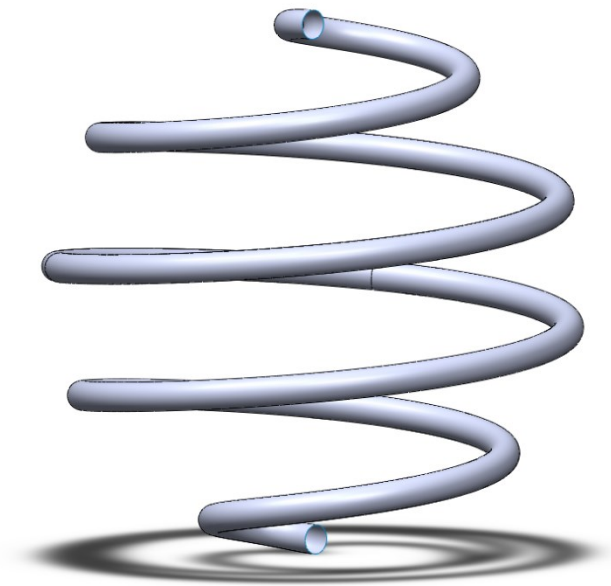
### 3.3. Modeli loksodromske antene

Unatoč mogućnosti modeliranja unutar simulacijskog paketa HFSS, program nije namijenjen složenom modeliranju koje je potrebno za stvaranje ovakvog oblika antene. S obzirom da HFSS ima mogućnost ubacivanja vanjskih 3D modela u program, korišten je program za 3D modeliranje tvrtke Dassault Systèmes - SolidWorks. Svi korišteni 3D modeli u ovom radu su .IGS formata zbog jednostavnije geometrijske strukturne mreže koja utječe na točnost i brzinu simulacije. Ovim postupkom primjetno će se smanjiti vrijeme simulacije, a promjena točnosti biti će zanemariva.

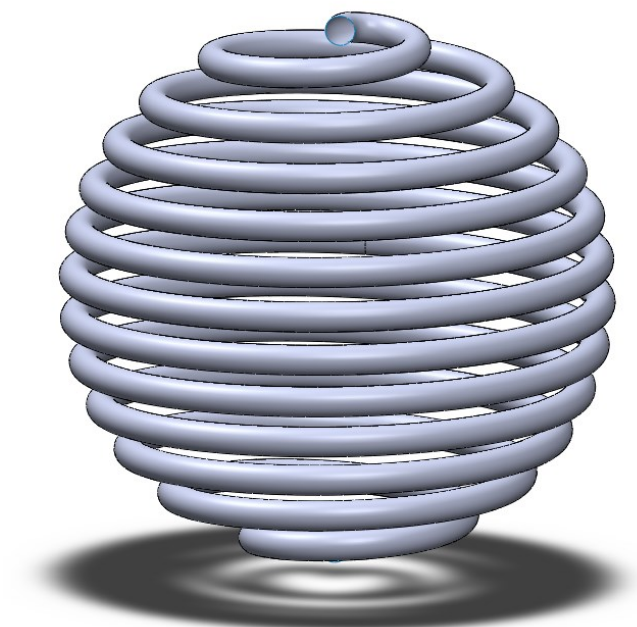
U ovom završnom radu vršit će se simulacija zadanih parametara na šest različito konstruiranih modela loksodromske antene. S naumom da promotrimo kako pojedini konstrukcijski parametri utječu na parametre antene, odabrana su dva različita promjera sfere - 6cm i 10cm u kombinaciji s četiri, osam i dvanaest namota (gdje je to moguće). Povećavanjem broja namota loksodromska antena sve više poprima oblik sfere (Sl. 3.7, Sl. 3.8.).

Korišteni modeli loksodromske antene u ovom radu (gdje D predstavlja promjer, N broj namota i  $\vartheta$  kut loksodroma):

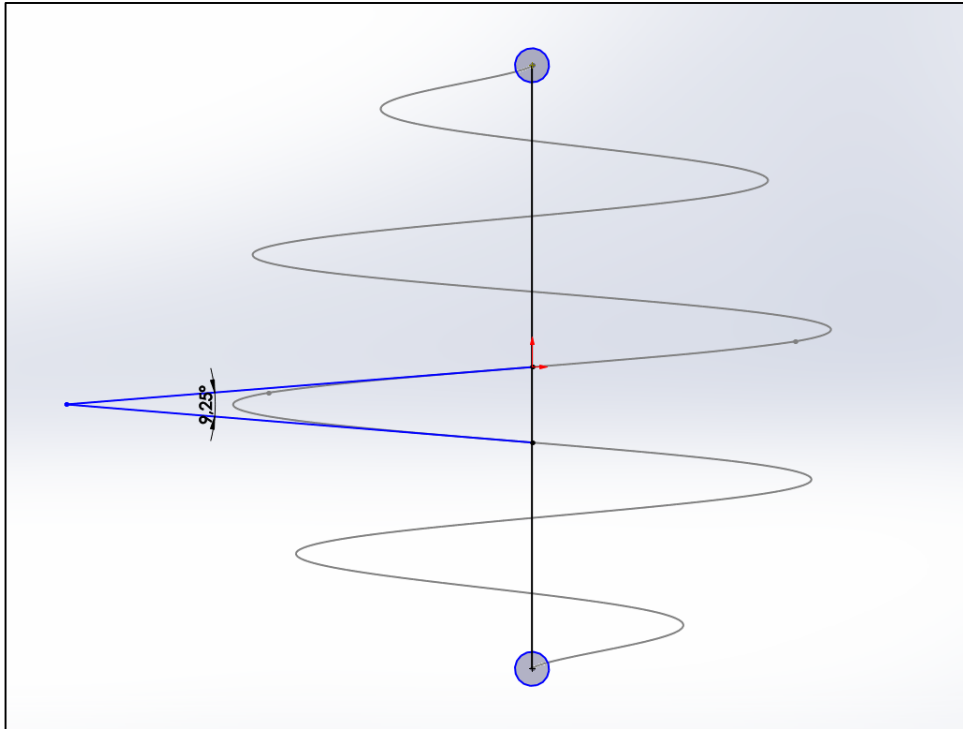
- D= 6cm, N=4,  $\vartheta =9.25^\circ$
- D= 6cm, N=8,  $\vartheta =4.6^\circ$
- D= 6cm, N=12,  $\vartheta =2.28^\circ$
- D= 10cm, N=4,  $\vartheta =9.21^\circ$
- D= 10cm, N=8,  $\vartheta =4.54^\circ$
- D= 10cm, N=10,  $\vartheta =3.62^\circ$



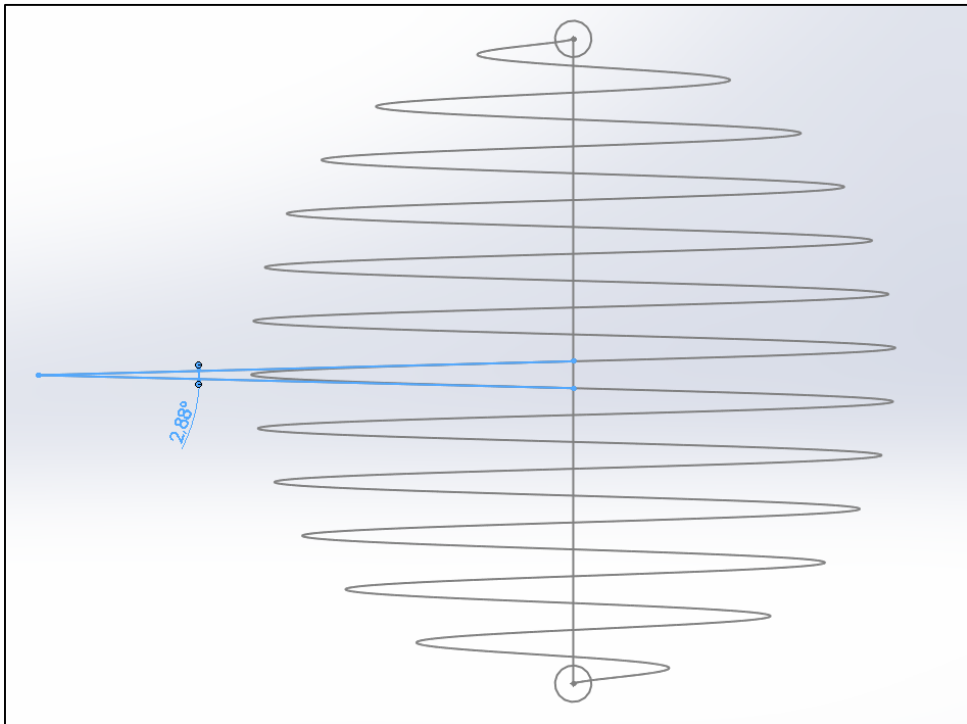
Sl. 3.7. Model loksodromske antene ( $D=6\text{cm}$ ,  $N=4$ )



Sl. 3.8. Model loksodromske antene ( $D=6\text{cm}$ ,  $N=12$ )



Sl. 3.9. Kut loksodroma antene  $\mathfrak{H}$  za ( $D=6\text{cm}$ ,  $N=4$ )



Sl. 3.10. Kut loksodroma antene  $\mathfrak{H}$  ( $D=6\text{cm}$ ,  $N=16$ )

## 4. PROCES SIMULACIJE ANTENE

Da bi bilo moguće simulirati antenu, prvo je potrebno postaviti model antene te zadati sve početne uvjete kako bi simulacija bila uspješna. Korišteni materijal antene biti će PEC (engl. *perfect electrical conductor*) koji je najčešće korišten materijal u ovakvom tipu simulacije. Osim PEC-a, bakar je također valjan odabir. Odabir materijala utjecat će na vrijednosti kao što su relativna permativnost, relativna permabilnost, električna provodnost i sl. (Sl. 4.1., Sl. 4.2.), dok će “granica zračenja” biti definirana vakumom.

Select Definition

Materials | Material Filters

Search Parameters  
Search by Name  
pec copper  
Search

Search Criteria  
by Name (selected) | by Property  
Relative Permittivity

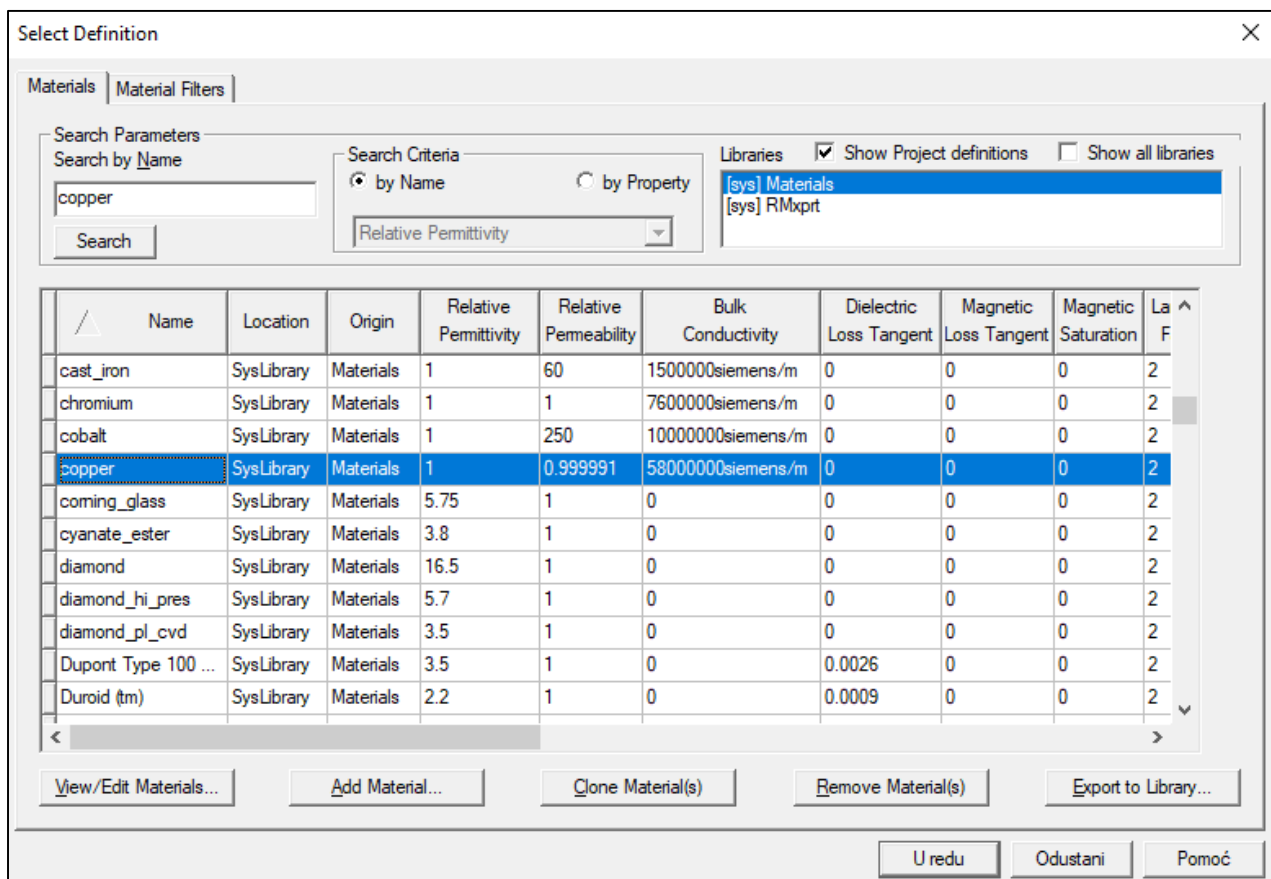
Libraries  Show Project definitions  Show all libraries  
[sys] Materials  
[sys] RMxprt

Name	Location	Origin	Relative Permittivity	Relative Permeability	Bulk Conductivity	Dielectric Loss Tangent	Magnetic Loss Tangent	Magnetic Saturation	Lang Fac
pec	Project	Materials	1	1	1e+030siemens/m	0	0	0	2
pec	SysLibrary	Materials	1	1	1e+030siemens/m	0	0	0	2
perfect conductor	SysLibrary	Materials	1	1	1e+030siemens/m	0	0	0	2
platinum	SysLibrary	Materials	1	1	9300000siemens/m	0	0	0	2
plexiglass	SysLibrary	Materials	3.4	1	0	0.001	0	0	2
PMLGroup1_X_1	Project		(0.45454545...)	(0.454545...)	0	(-1, 1, 1)	(-1, 1, 1)	0	2
PMLGroup1_XYZ_1	Project		(1.1, 1.1, 1...)	(1.1, 1.1, ...)	0	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	0	2
PMLGroup1_XZ_1	Project		(1, 0.01, 1)	(1, 0.01, ...)	0	(0, 242, 0)	(0, 242, 0)	0	2
PMLGroup1_Y_1	Project		(1.1, 0.4545...)	(1.1, 0.45...)	0	(1, -1, 1)	(1, -1, 1)	0	2
PMLGroup1_YZ_1	Project		(0.01, 1, 1)	(0.01, 1, ...)	0	(242, 0, 0)	(242, 0, 0)	0	2
PMLGroup1_Z_1	Project		(1.1, 1.1, 0...)	(1.1, 1.1, ...)	0	(1, 1, -1)	(1, 1, -1)	0	2

View/Edit Materials... Add Material... Clone Material(s) Remove Material(s) Export to Library...

U redu Odustani Pomoć

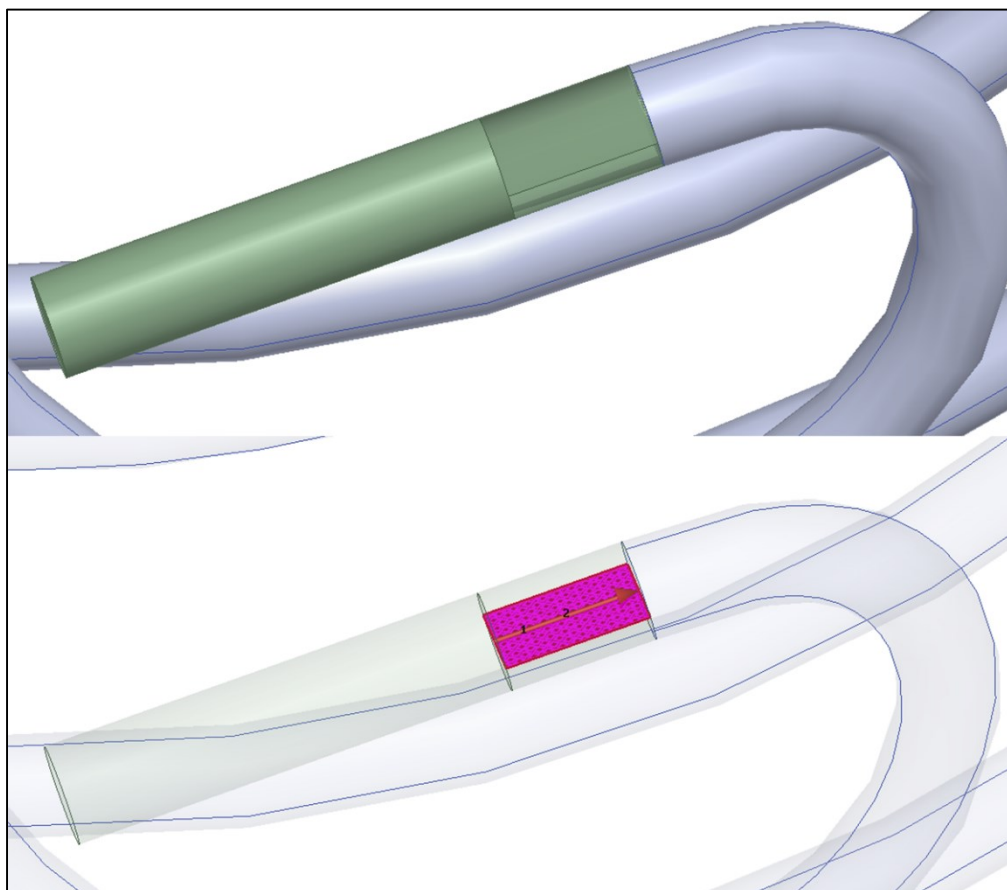
Sl. 4.1. Vrijednosti PEC-a unutar programa



Sl. 4.2. Vrijednosti bakra unutar programa

Nakon definiranja materijala zadajemo pobudu antene. Prilikom simulacija najčešće vrste pobuda koje se odabiru su *Wave port* ili *Lumped port*, gdje je svaka specifična po svojoj primjeni. U slučaju gdje je frekvencija dovoljno niska ili pobuda je primjenjena na relativno malu površinu, moguće je aproksimirati val kao napon ili struju (uz dobru pretvorbu zadanih vrijednosti) i to se omogućuje unutar programa s *Lumped port* pobudom. Ovakva vrsta pobude se također koristi kada je model unutar ili izvan granice zračenja, što ne vrijedi za *Wave port* koji se koristi samo kada je materijal izvan granica zračenja. Svi modeli ovog rada nalaze se unutar granice zračenja, stoga je *Lumped port* odabran. Zbog veće točnosti gdje god je moguće odabrati *Wave port* način pobude, on se odabire (npr. kod mikro-trakastih antena). Odabirom *Lumped porta* pobuda se mora definirati integracijskom linijom (Sl. 4.3.).



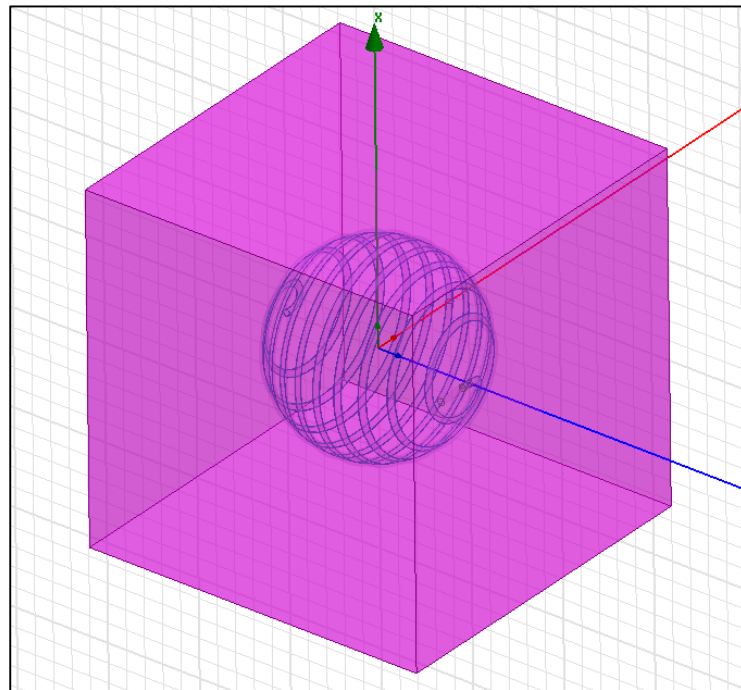


Sl. 4.3. Određivanje integracijske linije pobude

Prilikom određivanja pobude moguće je promijeniti realni i imaginarni dio priključka. Unutar programa automatski je zadano da realni dio iznosi  $50 \Omega$ , a reaktivni  $0 \Omega$ . Spomenute vrijednosti definirat će dobiveni graf ulazne impedancije.

Osim konfiguracije samoga modela, potrebno je stvoriti granične uvjete zračenja (ili apsorpiranja). Takvi uvjeti stvaraju umjetne granice u računalnoj domeni koji aproksimiraju stvarne uvjete. Dodatna primjena za umjetne granice je simuliranje kretnje valovajer o njima će ovisiti parametri poput refleksija vala u zadanom prostoru. Moguće je manualno stvoriti *Radiation box*, no u novijim verzijama HFSS-a postoji naredba *Create open region* s kojom program automatski generira takav prostor ovisno o zadanoj radnoj frekvenciji. Općenito, da se takav prostor manualno kreira treba paziti na geometrijski oblik takvog prostora koji treba odgovarati obliku antene, a u

većini slučajeva uporaba geometrijskog tijela kocke daje točne i precizne rezultate. Promatrana antena treba biti u središtu prostora zračenja, a sa svake strane udaljenost od antene treba biti jednaka i iznositi  $\lambda/4$  (Sl. 4.4.). “Iz ovih grafova može se zaključiti da s povećanjem kutije zračenja dolazi manje zračenje snage. U priručniku HFSS -a tvrdi se da bi kutija za zračenje trebala biti veća od jedne četvrtine valna duljina, što znači da strane kutije trebaju biti četvrtina valne duljine ili dalje od objekata u središtu. Ova tvrdnja se poklapa s dobivenim rezultatima. [8]” Odabire se

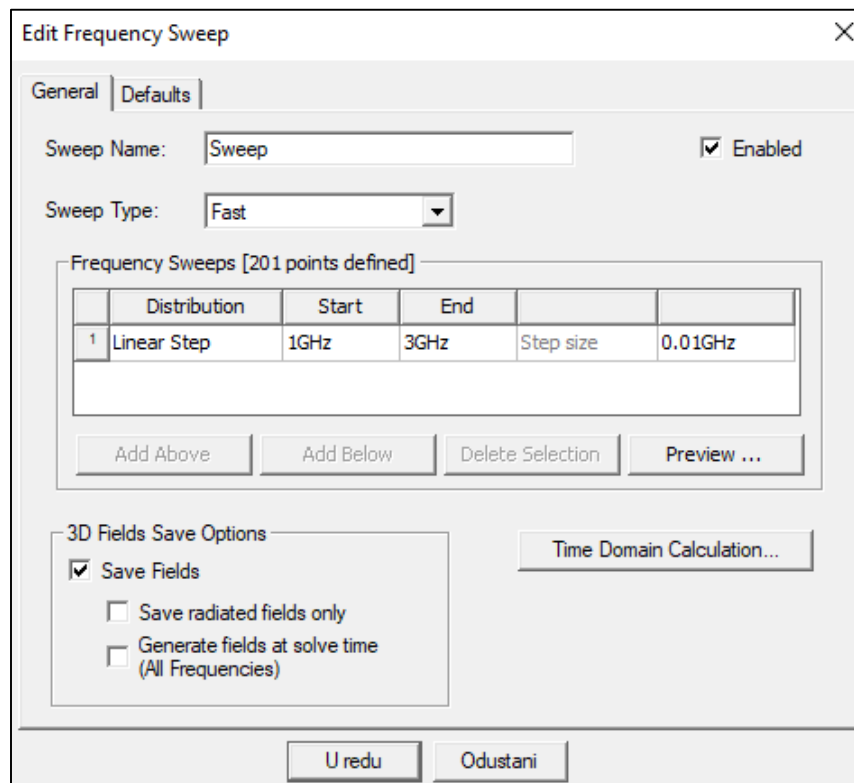


Sl. 4.4. Generiran “Radiation box”

vakum kao medij prostora.

Na kraju potrebno je stvoriti uvjete simulacije, u programu pronalazimo ovu opciju pod *Analysis - Add solution setup*. Ovaj dio konfiguracije je iznimno bitan iz razloga što dobrim postavkama možemo uvelike smanjiti vrijeme simulacije, dobiti preciznije i točnije rezultate te izbjeći moguće česte greške. Konkretno, konfiguracija za postavljanje rješenja simulacije služi nam kako bi definirali *Solution frequency* te za optimizaciju simulacije ovisno o *meshu*, tj. o geometrijskoj mreži. *Solution frequency* je frekvencija koja se koristi za vrijeme prve simulacije. Ona nije idealna frekvencija, već preko nje u rezultatima možemo dobiti prikaz rezultata oko te frekvencije. Radi dobivanja najpreciznijih rezultata simulacije, poželjno je pokrenuti opet simulaciju s drugačijom

vrijednošću frekvencije koja će biti jednaka najefikasnijem frekvencijskom radnom području iz prve simulacije (od korištenih parametara u ovom radu - najlakše se može vidjeti preko  $S_{11}$  i VSWR grafova). Odabir *Solution frequency-a* ovisit će o postupku obrade podataka odnosno *Sweep type*. Ako je korišten *Sweep type - Fast*, frekvencija će se gledati kao aritmetička sredina početne i krajnje vrijednosti frekvencijskog područja. Kod *Sweep type – Interpolating*, gleda se krajnja vrijednost frekvencijskog područja. U ovom radu najčešći način obrade podataka je *Sweep type - Fast*. Uzimajući u obzir spomenuto, *Solution frequency* u ovom radu iznosi 2 GHz. Ovakav



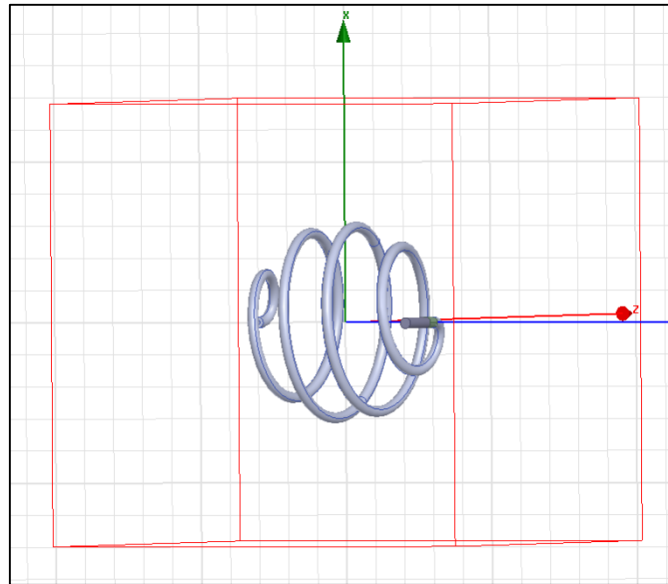
Sl. 4.5. Postavke za definiranje načina obrade i koraka uzorkovanja podataka te frekvencijskog područja

način obrade podataka je korišten povodom što uvelike smanjuje vrijeme simulacije te koristi manje računalnih resursa za simulaciju što za osrednje kompleksne modele može biti u desetcima GB radne memorije. Za najpreciznija mjerenja koristi se *Sweep type - Discrete* [9]. Prije simulacije potrebno je provjeriti spremnost pokretanja analize konfiguriranog modela s opcijom *Validate* te njenom uspješnom validacijom, pokreće se analiza opcijom *Analyze All*. Uspješnim završetkom simulaciju odabiru se i generiraju parametri pod *Results* sa zasebnim postavkama prikaza rezultata.

## 5. SIMULACIJE MODELA BEZ JEZGRE

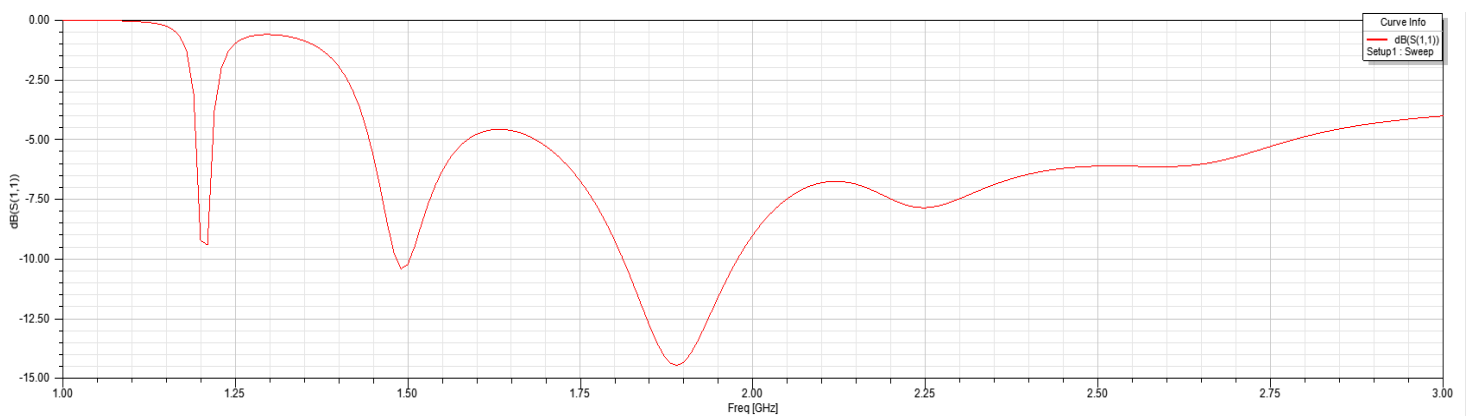
### 5.1 Simulacije antena promjera 6 cm

Simulacija antene modela  $D=6\text{cm}$ ,  $N=4$ ,  $\vartheta=9.25^\circ$ :

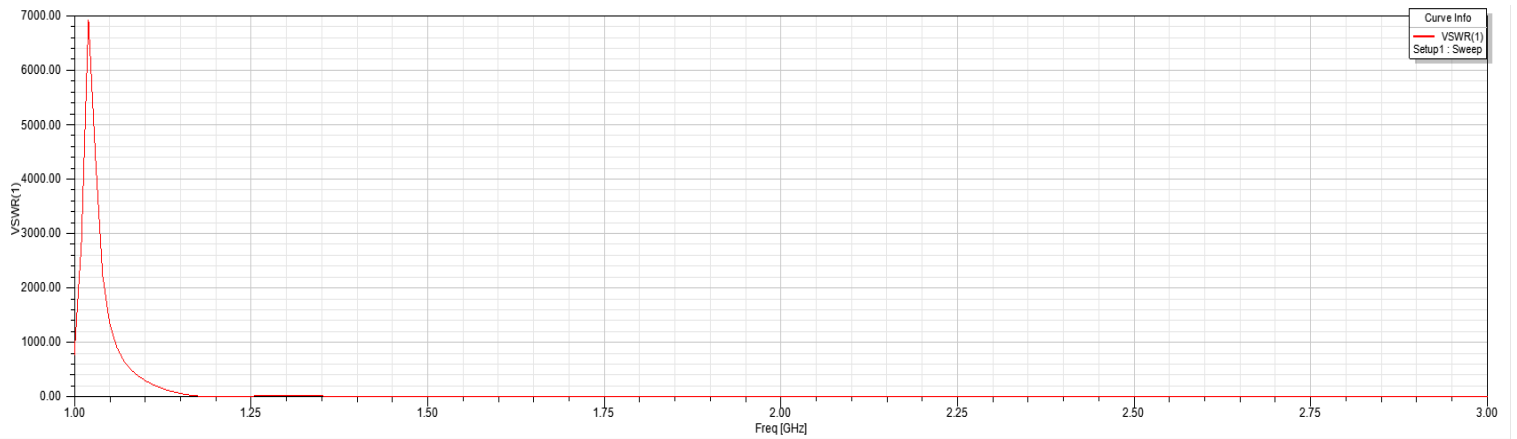


Sl. 5.1. Model antene  $D=6\text{cm}$ ,  $N=4$ ,  $\vartheta=9.25^\circ$

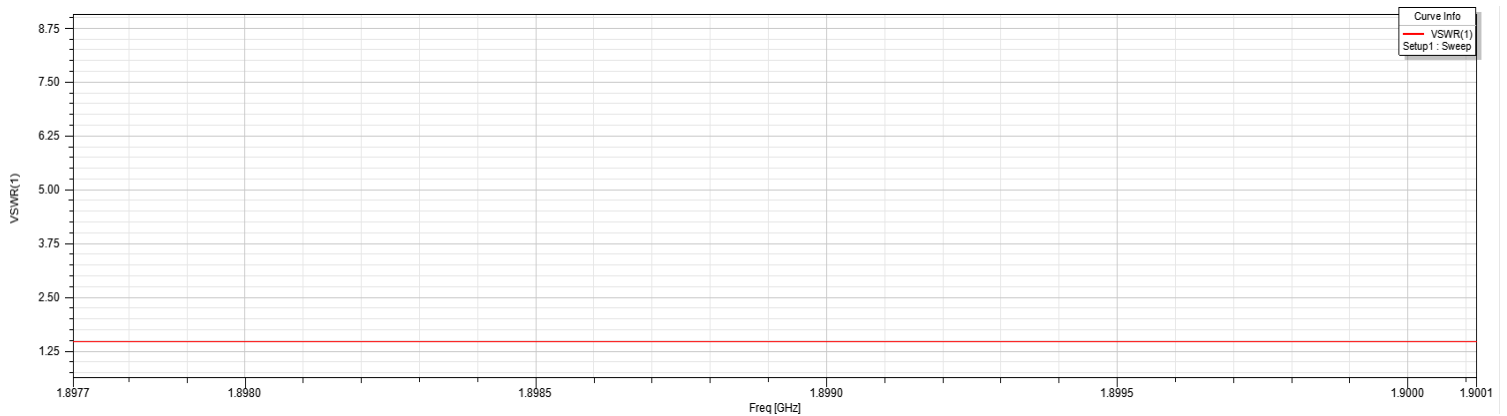
Iz dobivenih rezultata simulacije, preko  $S_{11}$  i VSWR parametara (Sl. 5.2., Sl. 5.3.), vidljivo je da antena ima dva moguća područja rada; 1.45 GHz i 1.87 GHz. Od ta dva moguća područja rada prikladnije je ono na 1.85 GHz iz razloga što se postiže niža vrijednost  $S_{11}$  parametra, -14.5 dB.



Sl. 5.2.  $S_{11}$  za  $D=6\text{cm}$ ,  $N=4$

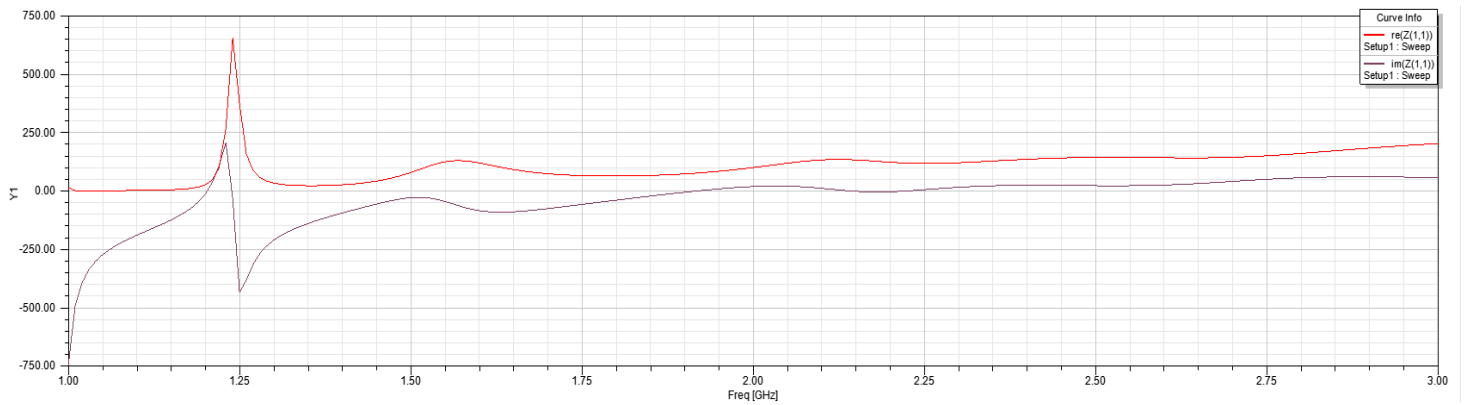


Sl. 5.3. VSWR za D= 6cm, N=4



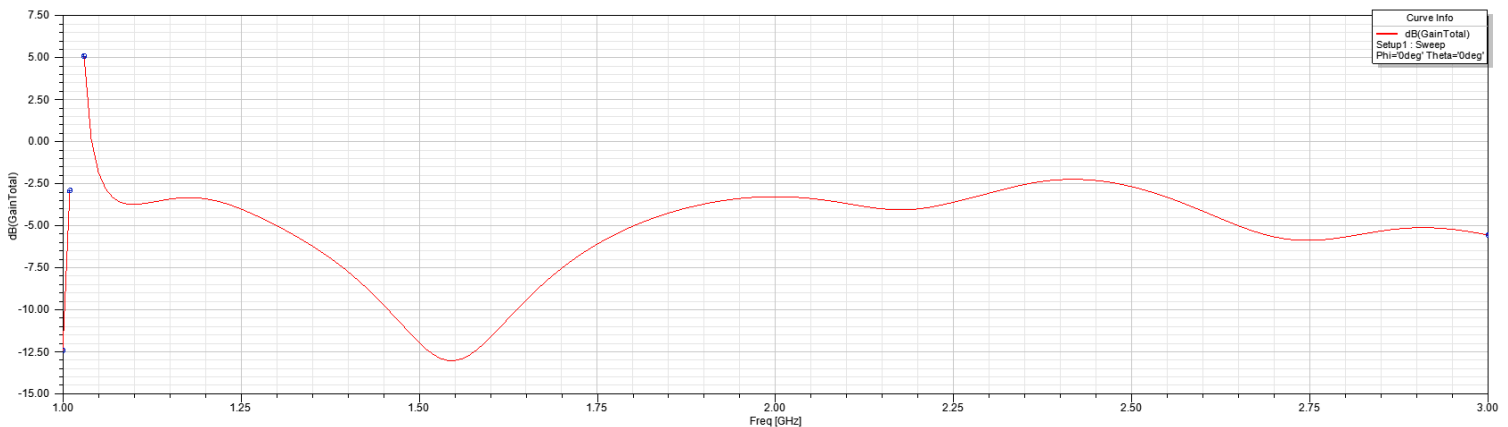
Sl. 5.4. Približeni VSWR za D= 6cm, N=4

Ključno je uočiti povezanost promatranih parametara. Preko ulazne impedancije također je moguće odrediti područje rada. Promatra se frekventijsko područje u kojem je imaginarni dio impedancije antene približno ili jednako nuli, dok realni dio treba težiti  $50 \Omega$ . Realni dio ne mora nužno biti  $50 \Omega$  već to je standard koji se koristi pri modeliranju antena. Prilikom zadavanja pobude u izvornim postavkama programa vrijednost parametra iznosi  $50 \Omega$ , no moguće je promijeniti tu vrijednost. Ako uzmemo područje rada na frekvenciji od 1.85 GHz, vrijednost imaginarnog dijela iznosi  $-21.68 \Omega$  dok realni dio iznosi  $66.44 \Omega$  (Sl. 5.5.).



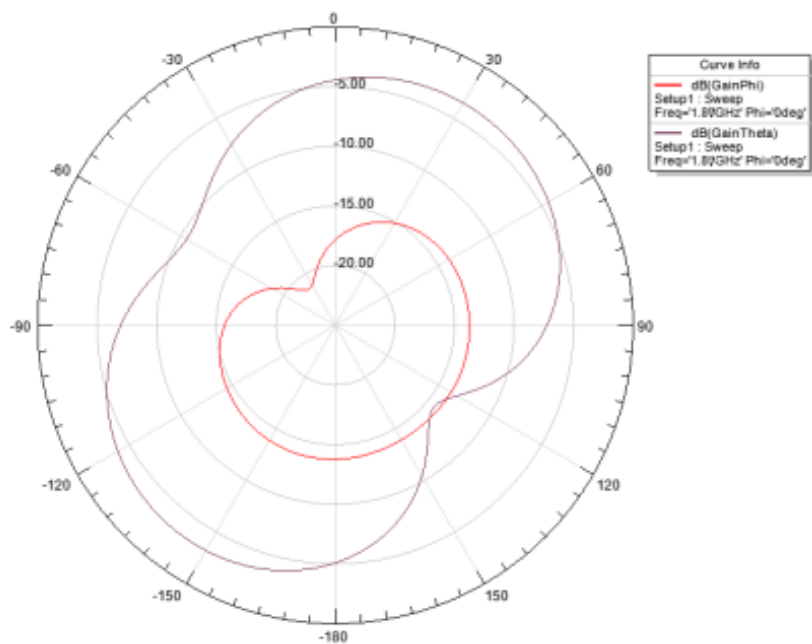
Sl. 5.5. Ulazna impedancija za D= 6cm, N=4

Na radnim područjima ove antene dobivene su negativne vrijednosti dobitka (Sl. 5.6.). Negativan dobitak nije uobičajan, on se u normalnoj primjeni može povezati sa neusklađenim i neefikasnim antenama. Moguće je da je takav dobitak uzrokovan geometrijskim oblikom antene, iakotakav dobitak može biti i ispravan ovisno o primjeni antene (npr. neke antene za mobitel) [10]. Shodno tome treba usporediti ostale vrijednosti dobitaka za druge modele loksodromske antene.



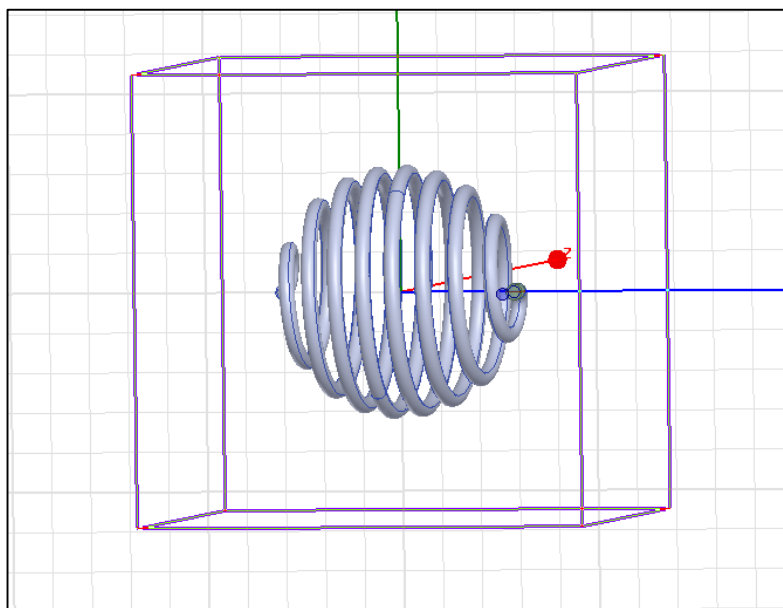
Sl. 5.6. Dobitak za D= 6cm, N=4

Na dobivenom grafu (Sl. 5.7.) dijagram zračenja simuliran je ovisno o dobitku na frekvenciji od 1.87 GHz. Prikazan je dijagram zračenja ovisno o vrijednosti dobitka kuteva  $\varphi$  i  $\vartheta$  zasebno.



Sl. 5.7. Dijagram zračenja za dobitak  $D=6\text{cm}$ ,  $N=4$  na  $f=1.87\text{ GHz}$

Simulacija antene modela  $D=6\text{cm}$ ,  $N=8$ ,  $\vartheta = 4.6^\circ$ :

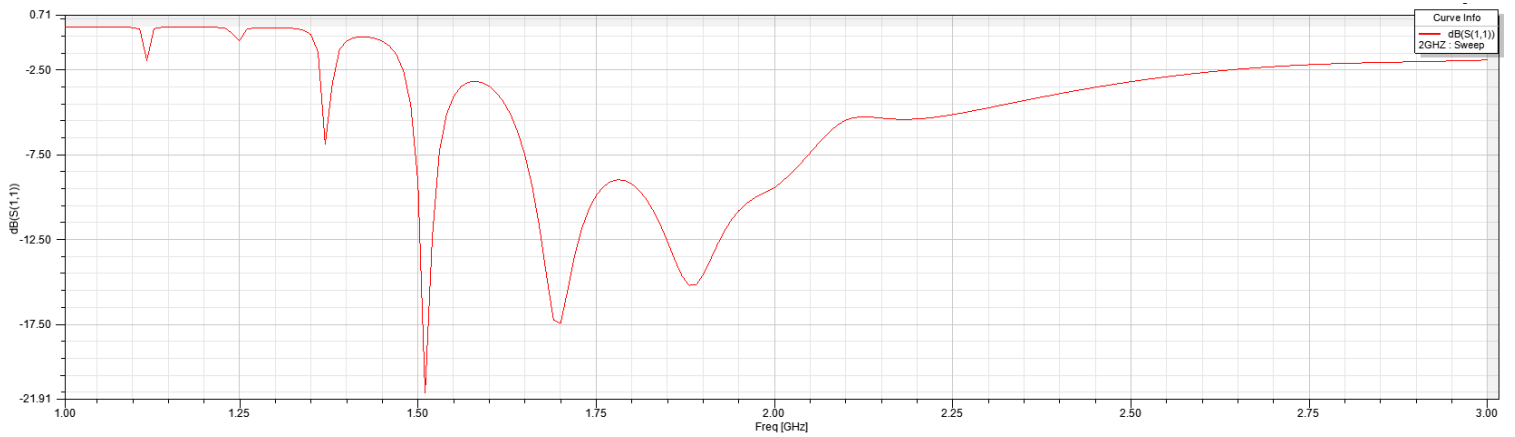


Sl. 5.8. Model antene  $D= 6\text{cm}$ ,  $N=8$ ,  $\vartheta = 4.6^\circ$

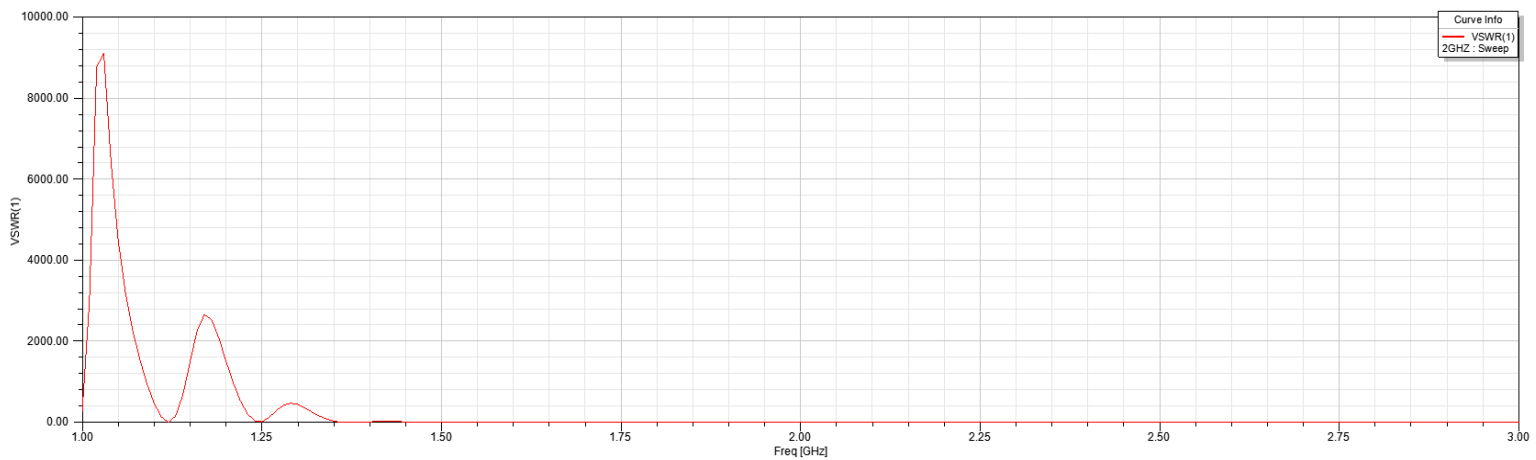
Usporedbi s prijašnjim modelom antene, ovdje na grafu (Sl. 5.9.) veći broj namota rezultirao je većim brojem područja rada antene. Tri su moguća područja rada: 1.51 GHz, 1.7 GHz i 1.88 GHz. Parametri  $S_{11}$  i VSWR u svojem minimumu manjeg su iznosa nego u prošlom modelu (Tablica 5.1.).

Tablica 5.1. Vrijednosti  $S_{11}$  i VSWR u području rada antene

Područje rada:	1.51 GHz	1.7 GHz	1.88 GHz
Vrijednost $S_{11}$	-21.54 dB	-17.39 dB	-15.19 dB
Vrijednost VSWR-a	1.23	1.3	1.42



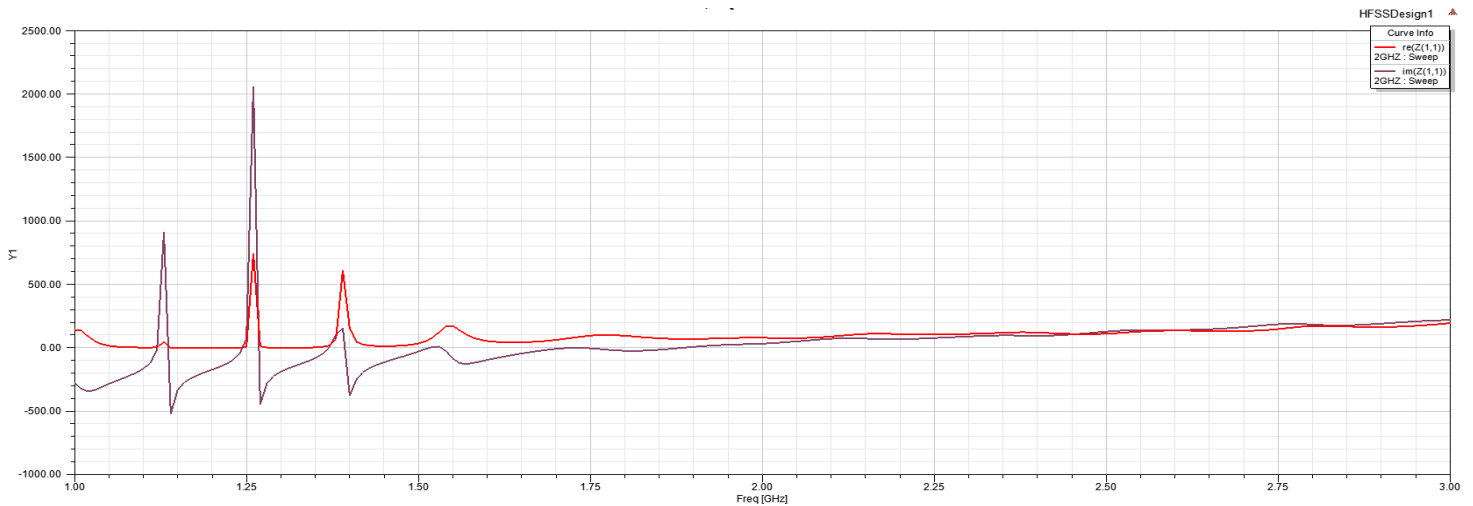
Sl. 5.9.  $S_{11}$  za  $D=6$  cm,  $N=8$



Sl. 5.10. VSWR za  $D=6$  cm,  $N=8$

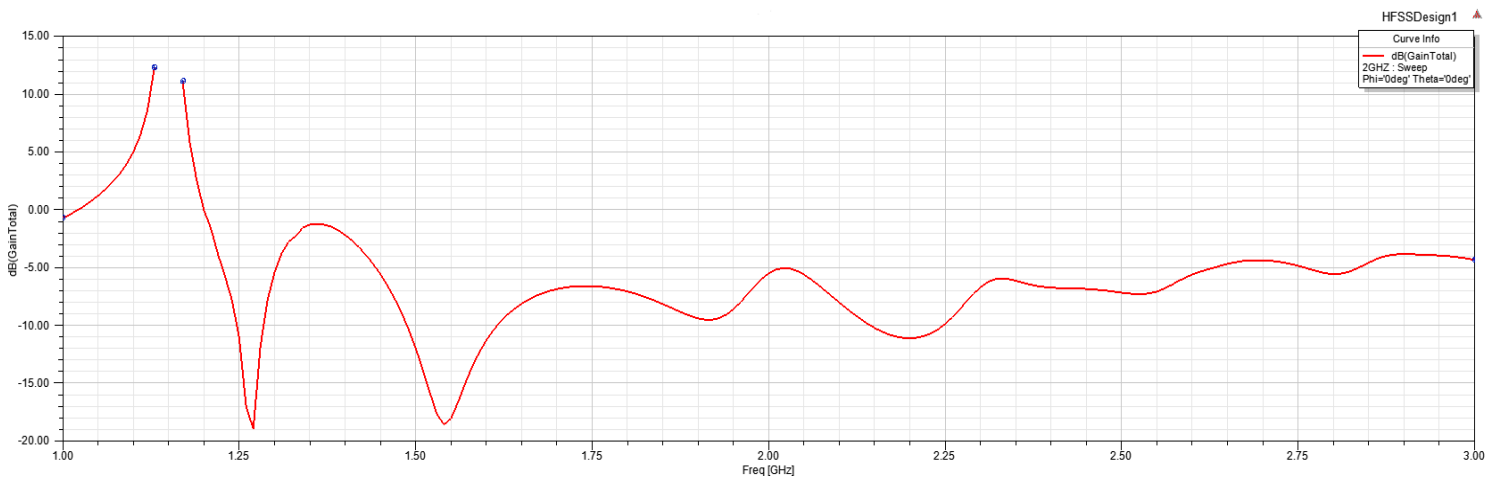


Realni dio impedancije u najefikasnijem području (1.51 GHz) iznosi  $58 \Omega$ , a imaginarni  $-8.46 \Omega$ . Prema obliku prethodni graf za impedanciju liči slično izuzev što ima više generiranih impulsnih oblika, dok su vrijednosti impedancije vrhova slične (Sl. 5.11.).



Sl. 5.11. Ulazna impedancija za  $D=6$  cm,  $N=8$

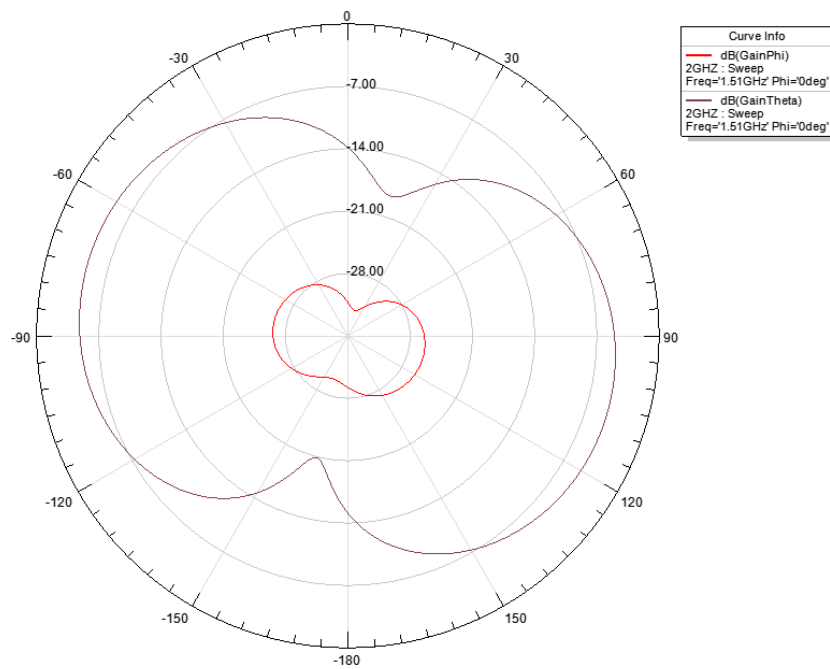
Dobivene vrijednosti dobitka su još niže nego za prethodni model (Sl. 5.12.). Najniže vrijednosti su oko radnog područja (1.51 GHz) - 18.55 dB te na frekvenciji od 1.27 GHz iznosi -19 dB.



Sl. 5.12. Dobitak za  $D=6$  cm,  $N=8$

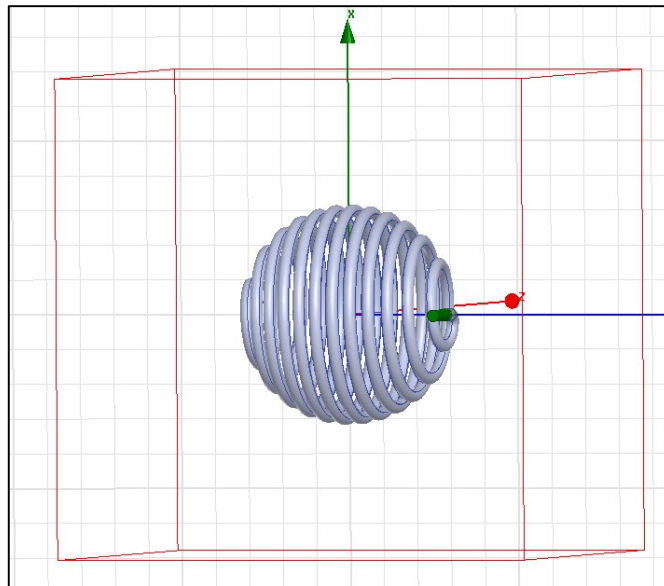


Prema samom obliku dijagram zračenja (Sl. 5.13.), sličan je što ima smisla s obzirom na model antene. Ostale su dvije glavne latice u oba režima rada, no promjenio se smjer maksimalnog zračenja. U horizontalnom režimu rada ( $\varphi$ ) ipak se vidi posljedica dobivenih manjih vrijednosti *gaina*.



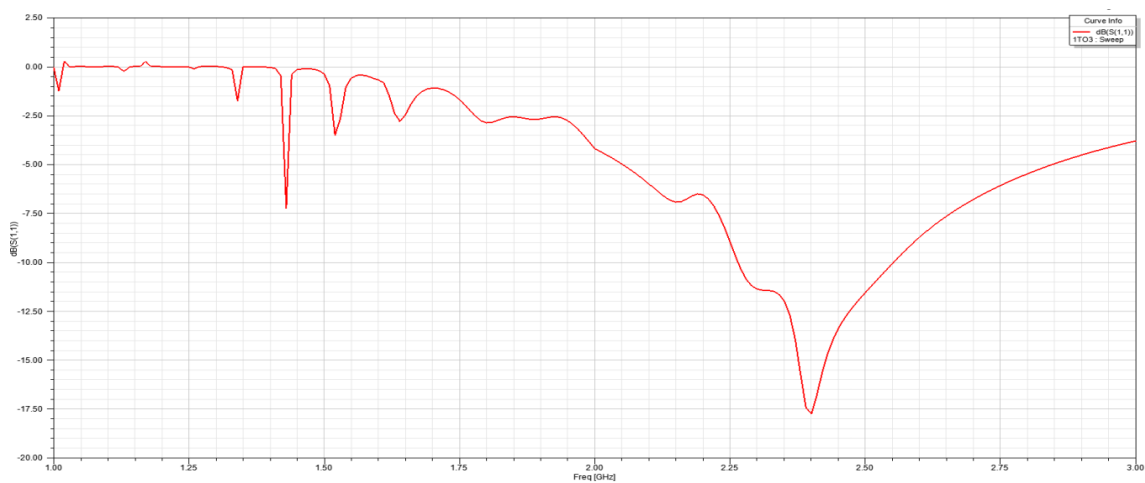
Sl. 5.13. Dijagram zračenja za dobitak  $D=6\text{cm}$ ,  $N=8$  na  $f=1.51\text{ GHz}$

Simulacija antene modela  $D=6\text{cm}$ ,  $N=12$ ,  $\vartheta = 2.88^\circ$ :

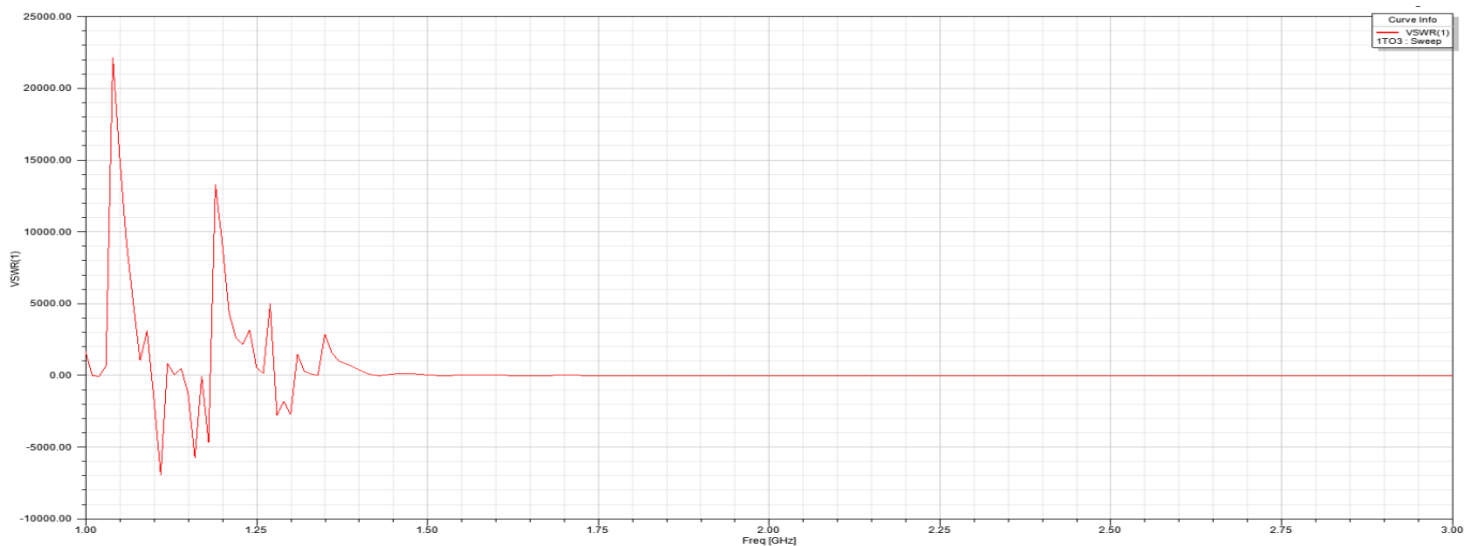


Sl. 5.14. Model antene  $D=6\text{cm}$ ,  $N=12$ ,  $\vartheta = 2.28^\circ$

Model loksodromske antene s dvanaest namotaja ima jedno radno područje na 2.4 GHz, što se razlikuje s prijašnjim modelima gdje je prvi model imao tri, a drugi dva radna područja. Vrijednost  $S_{11}$  u radnom području iznosi -17.55 dB, što je ipak efikasnije nego u prvom modelu, ali zauzvrat ima samo jedno radno područje (Sl. 5.15).

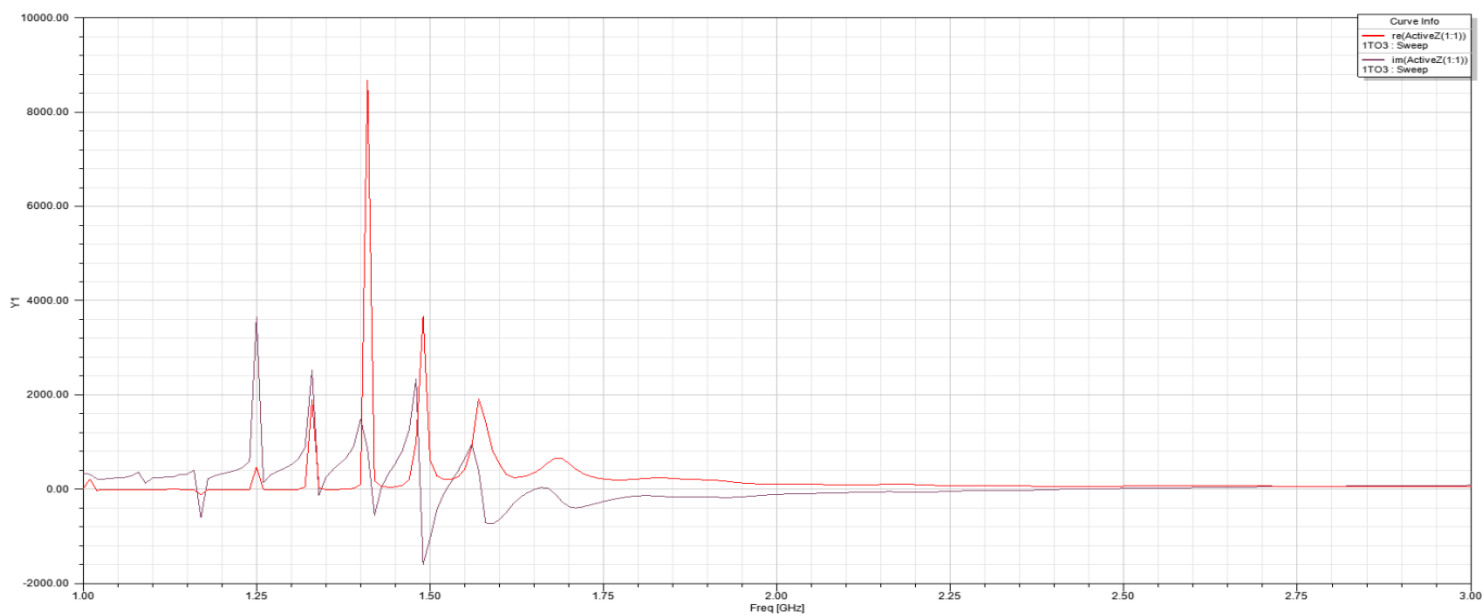


Sl. 5.15.  $S_{11}$  za  $D=6\text{cm}$ ,  $N=12$



Sl. 5.16. VSWR za D=6cm, N=12

Oblik ulazne impedancije postaje sve složeniji s većim brojem namota. Na frekvenciji od 1.38 GHz gdje vrijednost  $S_{11}$  iznosi -7.23 dB, vidljivo je da imaginarni dio zadovoljava uvjet, no realni dio je preko granice uvjeta. Mijenjanjem te optimizacijom modela loksodromske antene i boljim definiranjem radnih uvjeta, moguće je dovesti tu frekvenciju u radno područje s obzirom da su navedene vrijednosti blizu uvjeta.

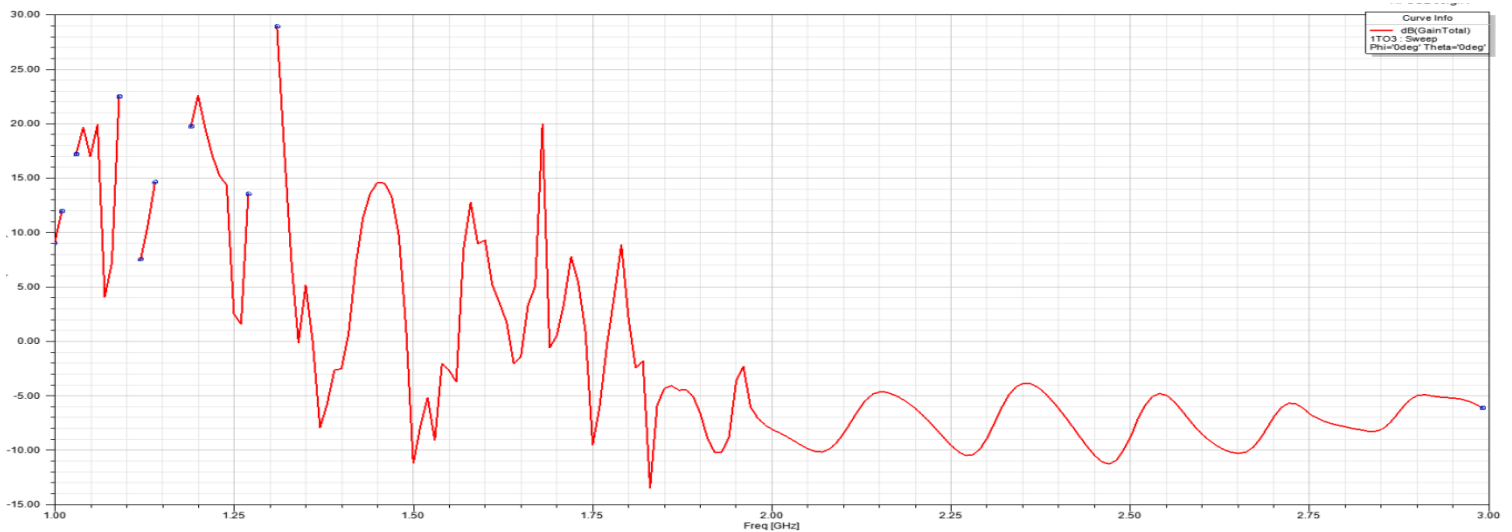


Sl. 5.17. Ulazna impedancija za D=6cm, N=12

Dobivene vrijednosti dobitka se najviše razlikuju usporedbi s ostalim modelima istog promjera (Sl. 5.18.). Impulsi (skokovi) na grafu su znatno češći i špicastiji. Može se primijetiti da ima više prekida na grafu i da su na tim mjestima dobivene pozitivne vrijednosti dobitka. Brojčane vrijednosti dobitaka pojedinih lokalnih ekstrema zapisane su u Tablici 5.2.

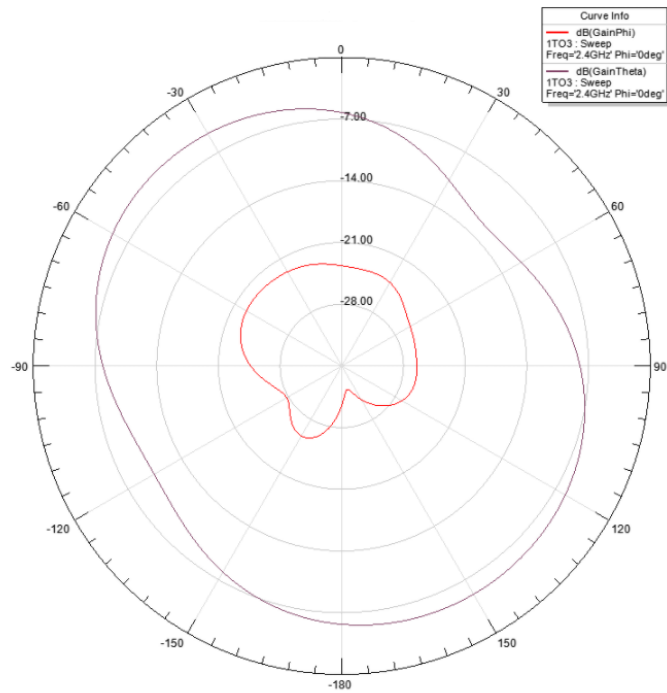
Tablica 5.2. Vrijednosti dobitka za D=6, N=12

Frekvencija (GHz)	1.07	1.27	1.32	1.5	1.68	1.75	1.83	2.47
Dobitak (dB)	4	1.5	-8	-11.2	20	-9.6	-13.5	-11.3



Sl. 5.18. Dobitak za D=6cm, N=12

Za dijagram zračenja posljedicom samog dobitka promijenio se i oblik dijagrama (Sl. 5.19.). U horizontalnom režimu rada nisu više dvije glavne latice, nego jedna gdje su prijašnje glavne postale sporedne.

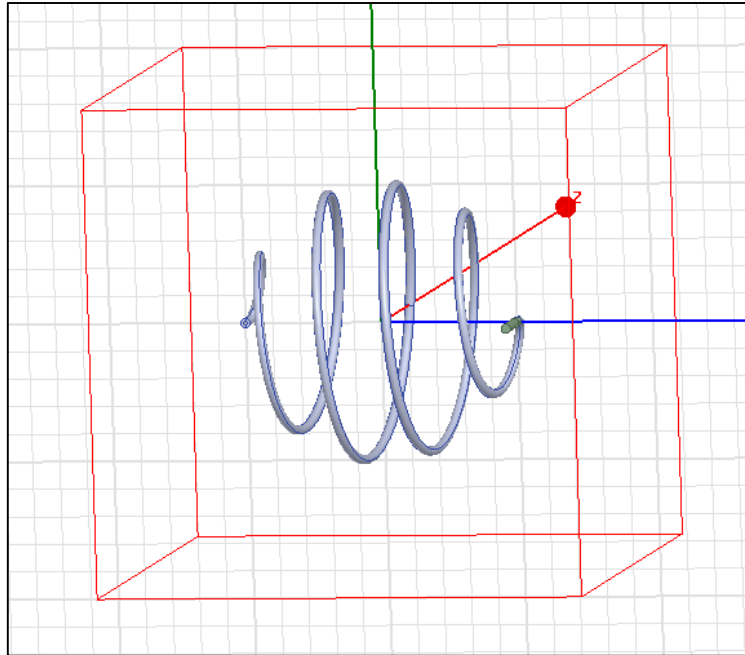


Sl. 5.19. Dijagram zračenja za dobitak  $D=6\text{cm}$ ,  $N=12$  na  $f=2.4\text{ GHz}$

Nakon analize pojedinih rezultata za svaku antenu promjera 6 cm, moguće je zaključiti da model antene s osam namota je najefikasniji. Iz promatranog uzorka od tri antene vidljivo je da broj namota mora biti u pojedinim granicama za najbolje rezultate. Nadalje, trebalo bi provesti istraživanje s većim brojem uzoraka različitih namota (ili različitim kutevima loksodroma) da bi se došlo do preciznijeg zaključka.

## 5.2 Simulacije antena promjera 10 cm

Simulacija antene modela D=10cm, N=4,  $\vartheta = 4.6^\circ$ :



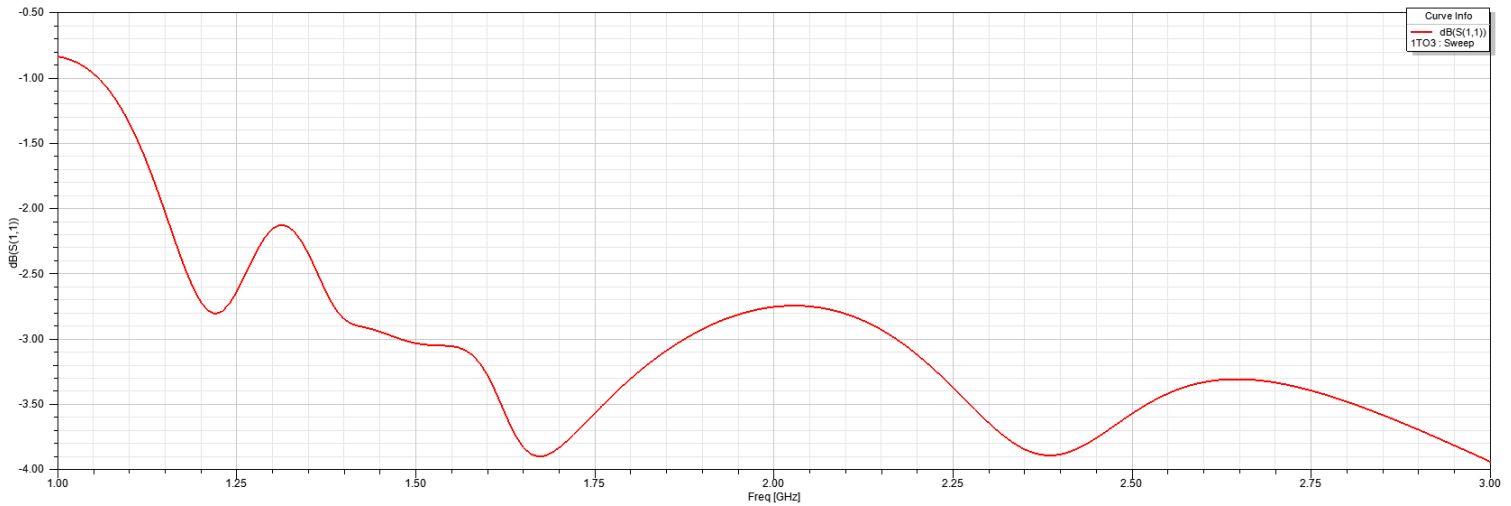
Sl. 5.20. Model antene D=10cm, N=4,  $\vartheta = 9.21^\circ$

Prema  $S_{11}$  i VSWR vrijednostima (Sl. 5.21., Sl. 5.22.), uočljivo je da ova antena nema ni jedno radno područje, odnosno sva snaga reflektira se nazad u izvor. Najniža vrijednost  $S_{11}$  je -3.9 dB na frekvencijama od 1.675 i 2.38 GHz. Prema ovome vidljivo je da ova antena nije namijenjena za rad na frekvencijskom području od 1 do 3 GHz. S obzirom na to da prema relaciji 5.3. vrijedi da povećanjem frekvencije smanjuje se duljina vala, onda također vrijedi da antene koje rade na manjim frekvencijama su i duže [11]. Uzevši u obzir da smo povećali promjer za 4 cm, nije neobično da su dobivene niže vrijednosti. Stoga, valja zaključiti da model ove antene ima radno područje za frekvencije manje od 1 GHz, a budući da to ne spada u temu ovog rada, takvo ispitivanje se neće provesti.

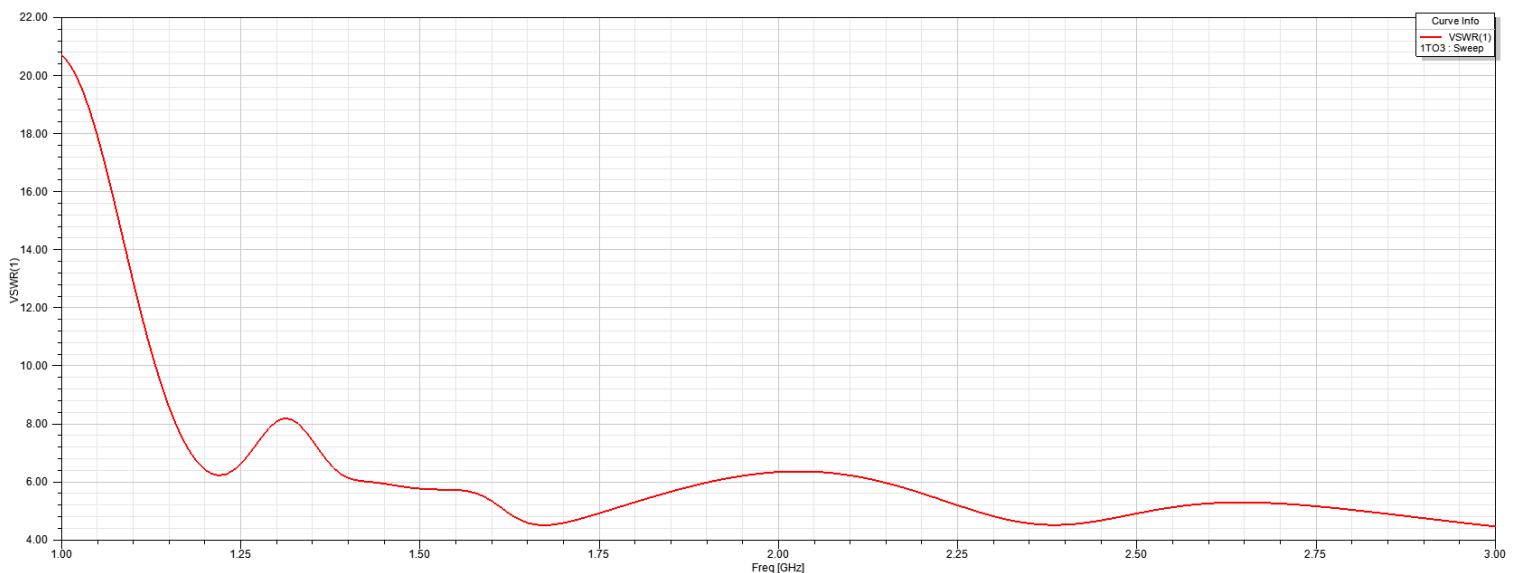
Tablica 5.3. Valna duljina

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (5.3.)$$



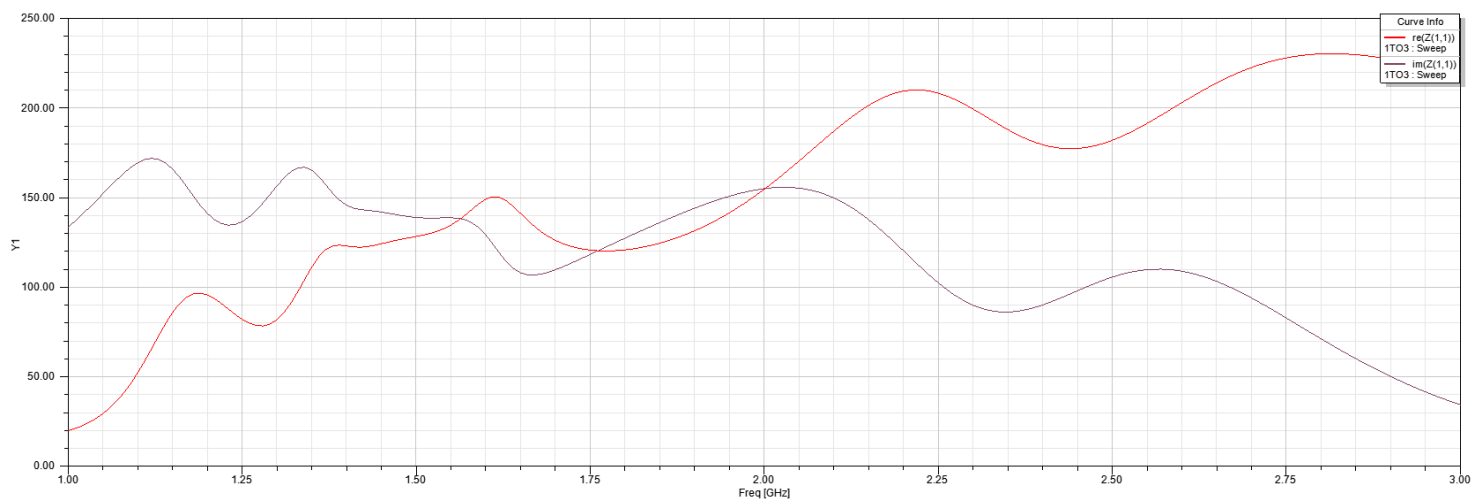


Sl. 5.21.  $S_{11}$  za  $D=10$  cm,  $N=4$



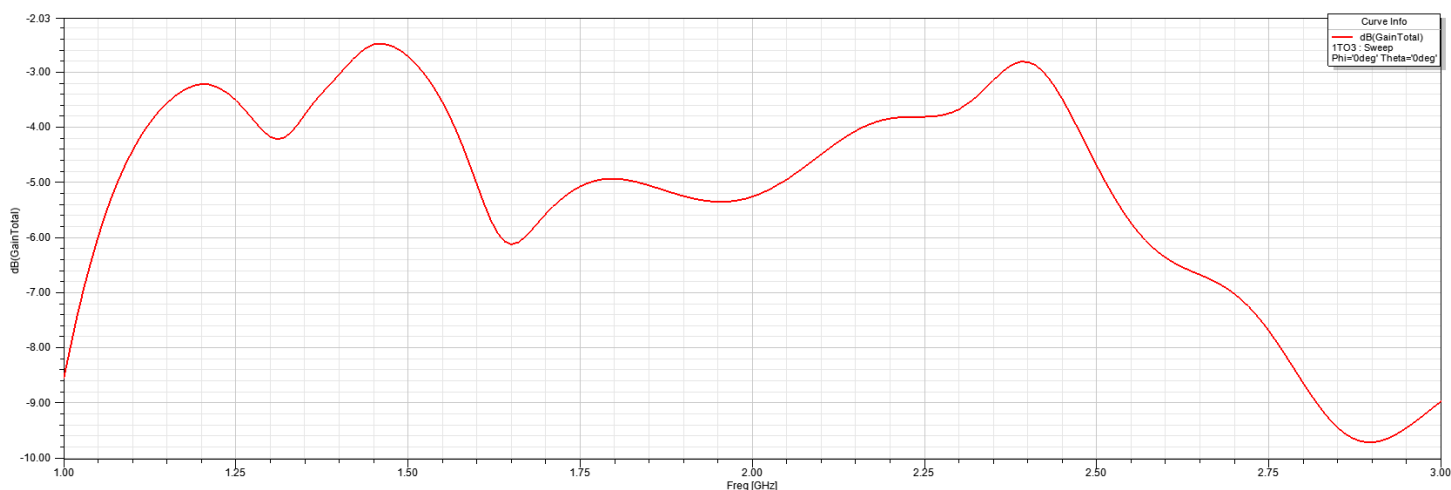
Sl. 5.22. VSWR za  $D=10$  cm,  $N=4$

Graf ulazne impedancije neviđene vrijednosti; od samog početka grafa vrijednosti su iznimno velike. Odmah je uočljivo da su vrijednosti imaginarnog dijela impedancije daleko veće nego što bi trebale biti te nije moguće ostvariti rezonanciju. Prilikom rezonancije imaginarni dio impedancije se poništava te ostaje samo realni dio pri kojem vrijednost jakosti struje je maksimalna, odnosno na priključnici antene vrijednost stojnog vala je najveća [12]. Iz ovog grafa vidljivo je da ne postoji rezonantna frekvencije te posljedično vrijednosti VSWR-a ne zadovoljavaju uvjet. Međutim, postoje antene koje ne moraju nužno raditi na rezonantnoj frekvenciji [13].



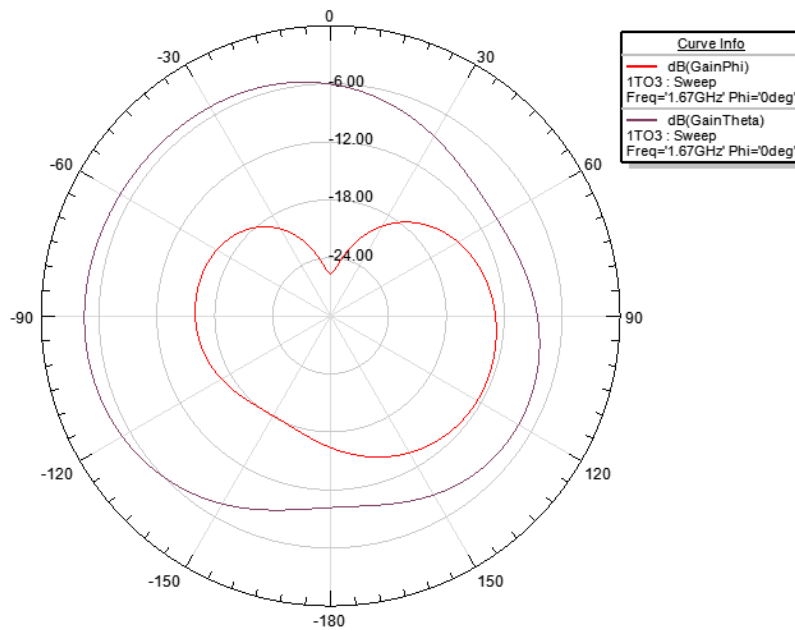
Sl. 5.23. Ulazna impedancija za D=10 cm, N=4

Vrijednosti dobitka su uglavnom veće nego u modelu s promjerom od 6 cm. Najniža vrijednost dobitka javlja se na frekvenciji od 2.88 GHz i iznosi -9.7 dB. Na području gdje je vrijednost  $S_{11}$  i VSWR-a najbolja za ovu antenu (raspon 1.675 i 2.38 GHz), dobitak iznosi -6 dB i -2.8 dB tim redom.



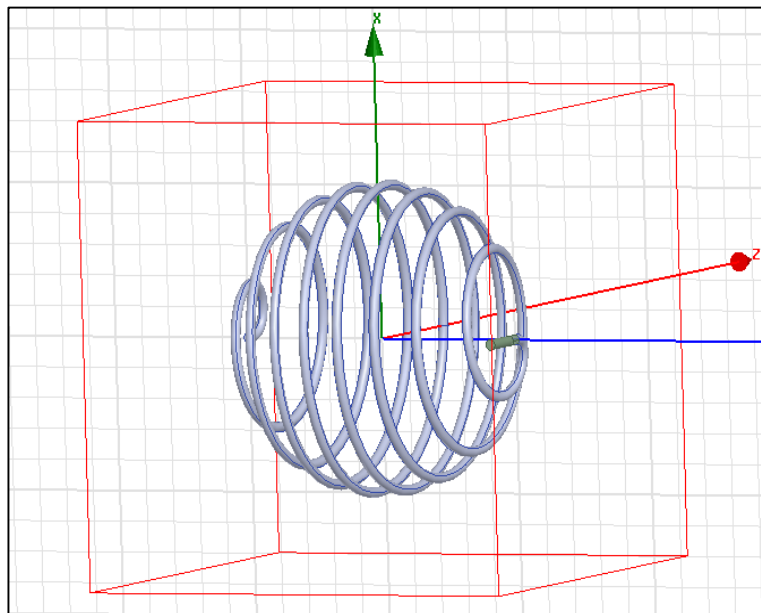
Sl. 5.24. Dobitak za D=10 cm, N=4

Na dijagramu zračenja vidljivo je da u oba režima rada u smjeru maksimalnog zračenja ima samo jedna glavna latica, u usporedbi s modelima promjera 6 cm gdje su u gotovo svim slučajevima dijagrami zračenja sadržavali su po dvije glavne latice.



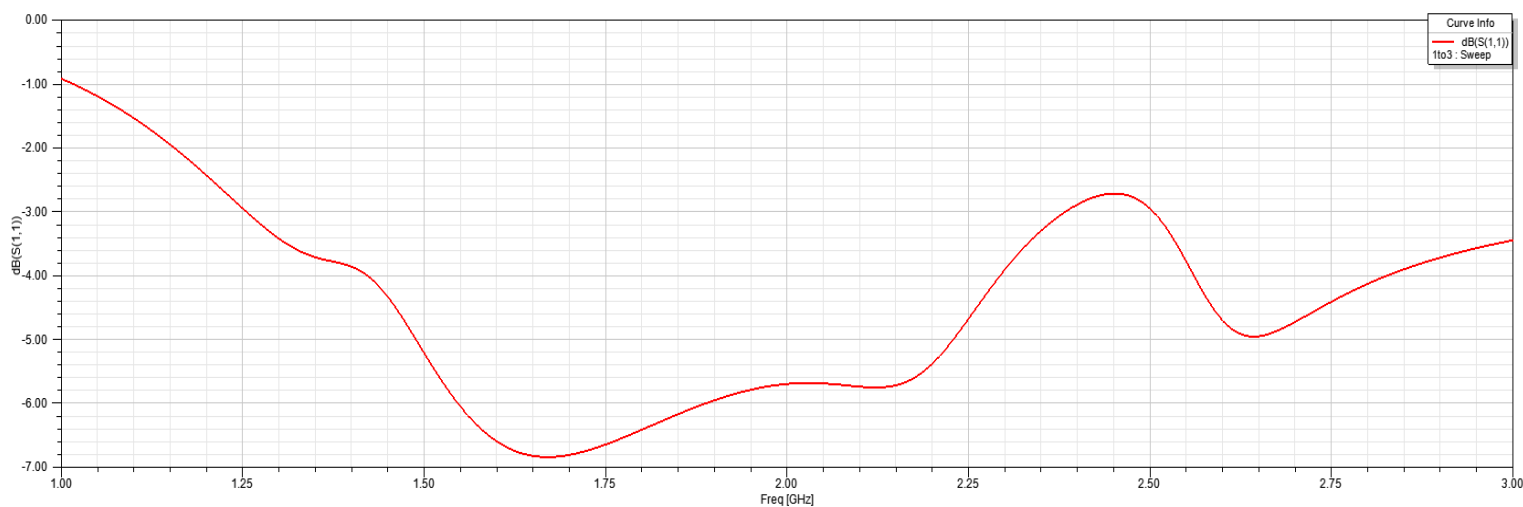
Sl. 5.25. Dijagram zračenja za dobitak  $D=10\text{cm}$ ,  $N=4$  na  $f=1.67\text{ GHz}$

Simulacija antene modela  $D=10$  cm,  $N=8$ ,  $\vartheta = 4.54^\circ$ :

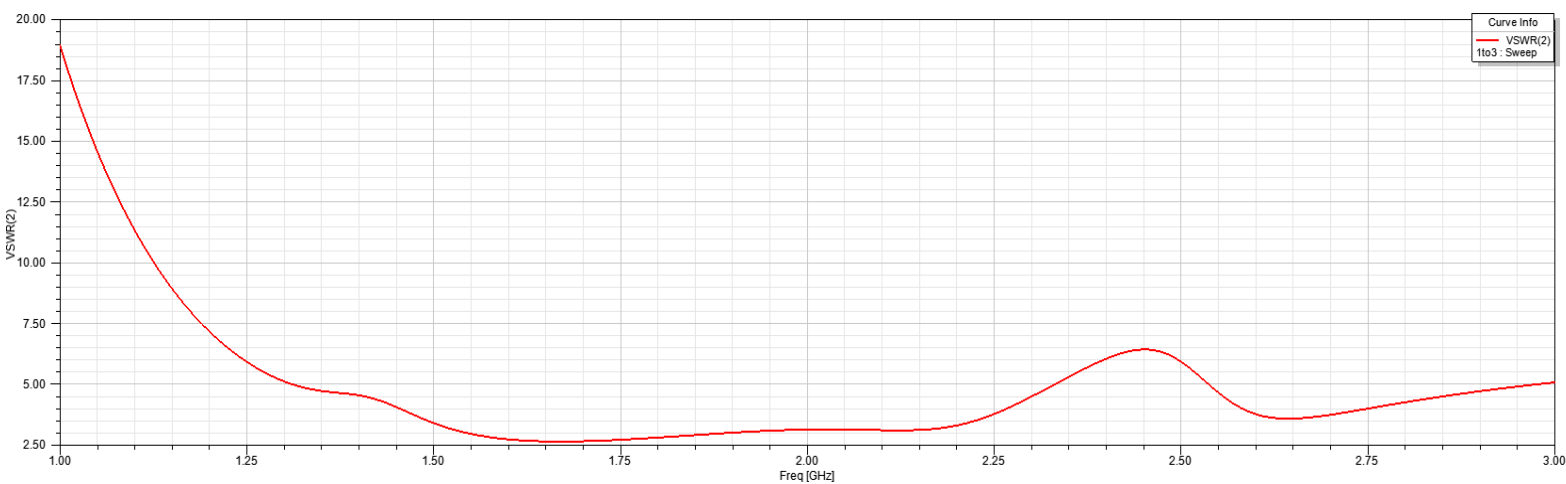


Sl. 5.26. Model antene  $D= 10$  cm,  $N=8$ ,  $\vartheta =4.54^\circ$

Na ovom modelu također dolazi do problema s frekvencijskim područjem rada, no ipak su manje vrijednosti  $S_{11}$  i VSWR parametra (Sl. 5.27, Sl. 5.28.). Na grafu najniža vrijednost  $S_{11}$  parametra iznosi  $-6.82$  dB, a VSWR 2.7 na frekvenciji 1.67 GHz.

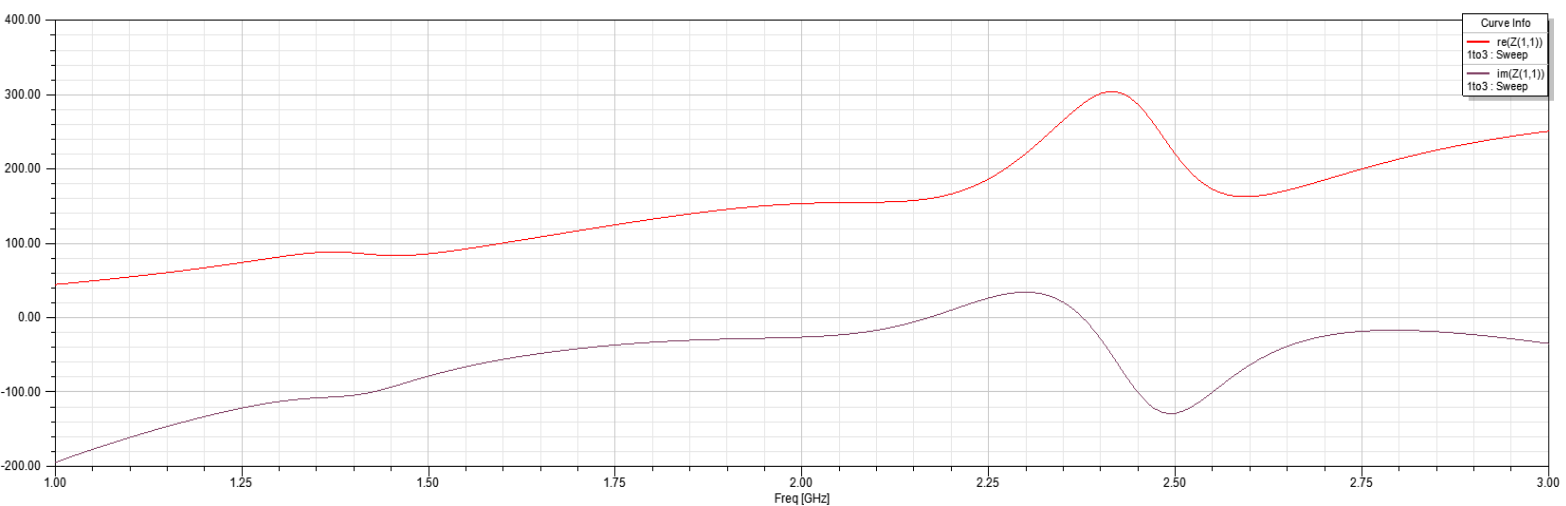


Sl. 5.27.  $S_{11}$  za  $D=10$  cm,  $N=8$



Sl. 5.28. VSWR za D=10 cm, N=8

Lako je uočljivo da nema usklađenosti impedancije, zbog znatnih vrijednosnih razlika između realnog i imaginarnog dijela impedancije na grafu (Sl. 5.29.). Ulazna impedancija na području gdje su  $S_{11}$  i VSWR optimalni (1.67 GHz) iznosi za realni dio  $87 \Omega$ , a imaginarni dio  $-44 \Omega$ .

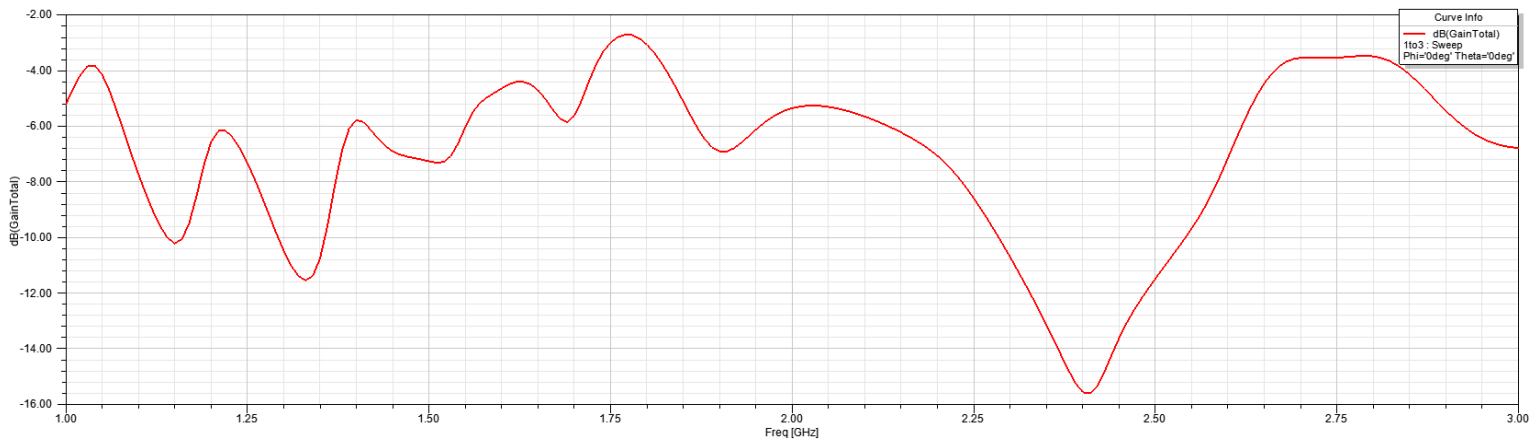


Sl. 5.29. Ulazna impedancija za D=10 cm, N=8

Najniža vrijednost dobitka za model antene s osam namota iznosi  $-15.6$  dB na frekvenciji 2.41 GHz. Iz dobivenih grafova (Sl. 5., Sl. 5.30.) vidljivo je da najmanja vrijednost dobitka modela

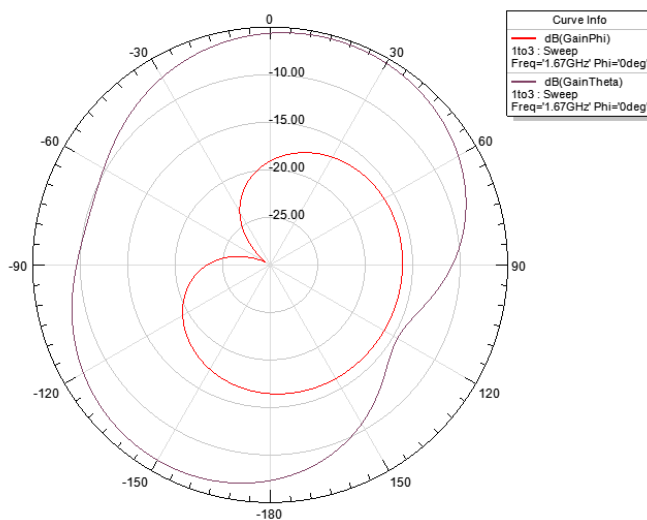
antene promjera 10 cm s osam namota je manja od modela antene s četiri namota, što je također slučaj kod modela loksodromske antene promjera 6 cm s istim brojem namota. Posljedično, isti je slučaj s  $S_{11}$  i VSWR vrijednostima, gdje su efikasnije antene s osam namota.

Dijagram zračenja nalik je na dijagram zračenja antene s promjerom od 6 cm i četiri namota, gdje



Sl. 5.30. Dobitak za  $D=10$  cm,  $N=8$

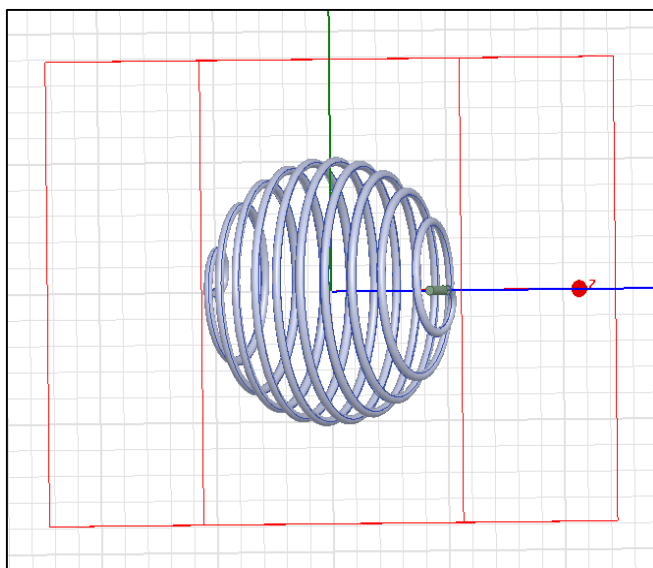
su oblik latica i kutevi maksimalnog zračenja približni.



Sl. 5.31. Dijagram zračenja za dobitak  $D=10$ cm,  $N=8$  na  $f=1.67$  GHz

Simulacija antene modela  $D=10$  cm,  $N=10$ ,  $\vartheta = 3.62^\circ$ :

S obzirom da simulacija modela loksodromske antene s dvanaest namota ishodi greškom (nedovoljno *RAM-a* za obavljanje simulacije), umjesto toga analiziran je model s deset namota.

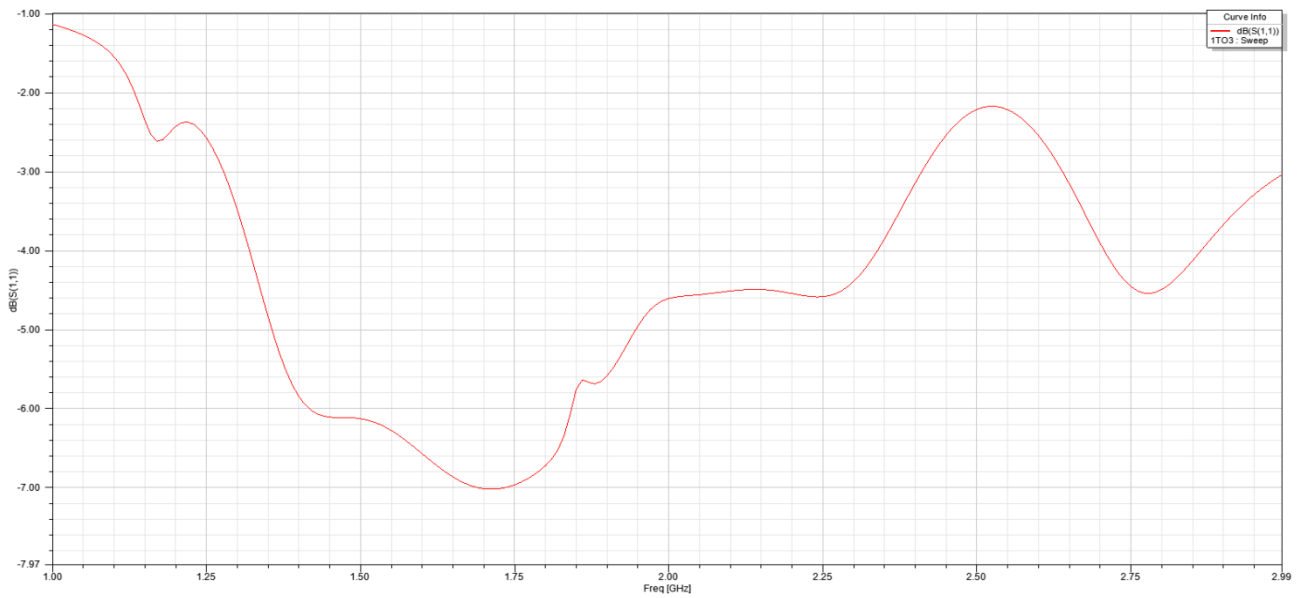


Sl. 5.32. Model antene  $D=10$ cm,  $N=10$ ,  $\vartheta = 3.62^\circ$

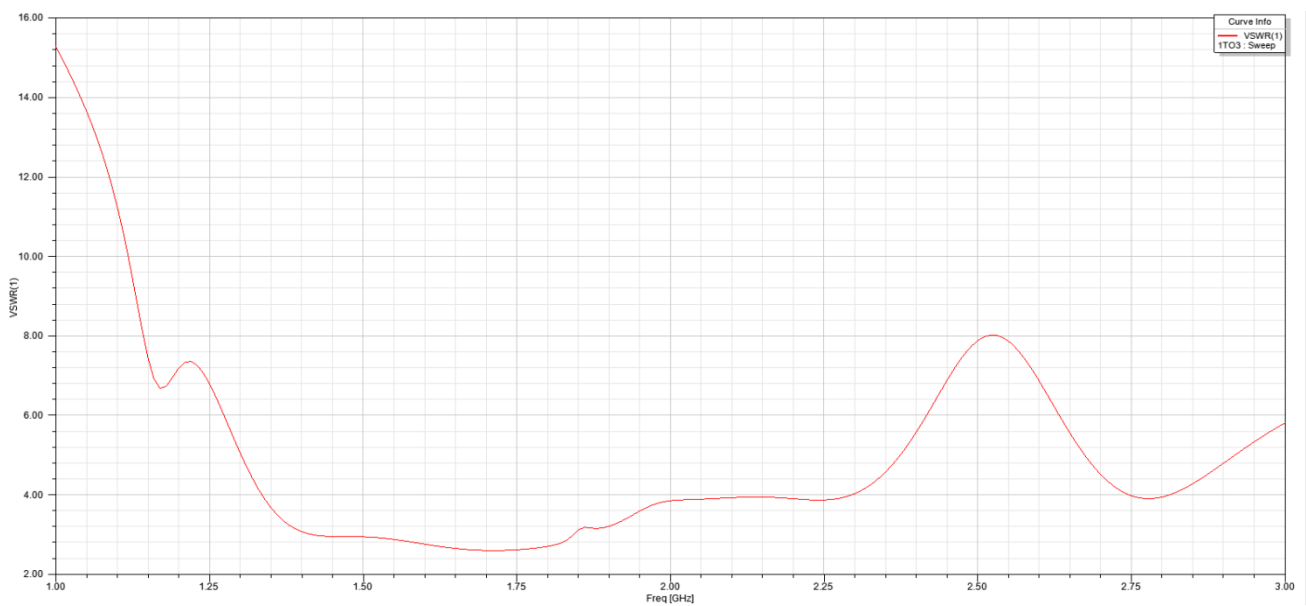
$S_{11}$  i VSWR vrijednosti u točki najniže vrijednosti manje su nego za prošli model te na frekvenciji 1.72 GHz iznose -7.02 dB i 2.6 (Sl. 5.33., Sl. 5.34.). Iz grafova za  $S_{11}$  i VSWR vrijednosti loksodromske antene promjera 10 cm, moguće je zaključiti da iznosi frekvencija gdje se javljaju najniže vrijednosti  $S_{11}$  i VSWR su približne. U tablici 5.3. upisane su frekvencije na kojima se javljaju najniže vrijednosti  $S_{11}$  i VSWR parametra za modele loksodromske antene promjera 10 cm.

Tablica 5.3. Ovisnost iznosa frekvencije o  $S_{11}$  i VSWR parametrima

Model antene:	$D=10$ cm, $N=4$	$D=10$ cm, $N=8$	$D=10$ cm, $N=10$
Vrijednost $S_{11}$ (dB):	-3.9	-6.82	-7.02
Vrijednost VSWR:	4.27	2.7	2.6
Vrijednost frekvencije (GHz):	1.675, 2.38	1.67	1.71



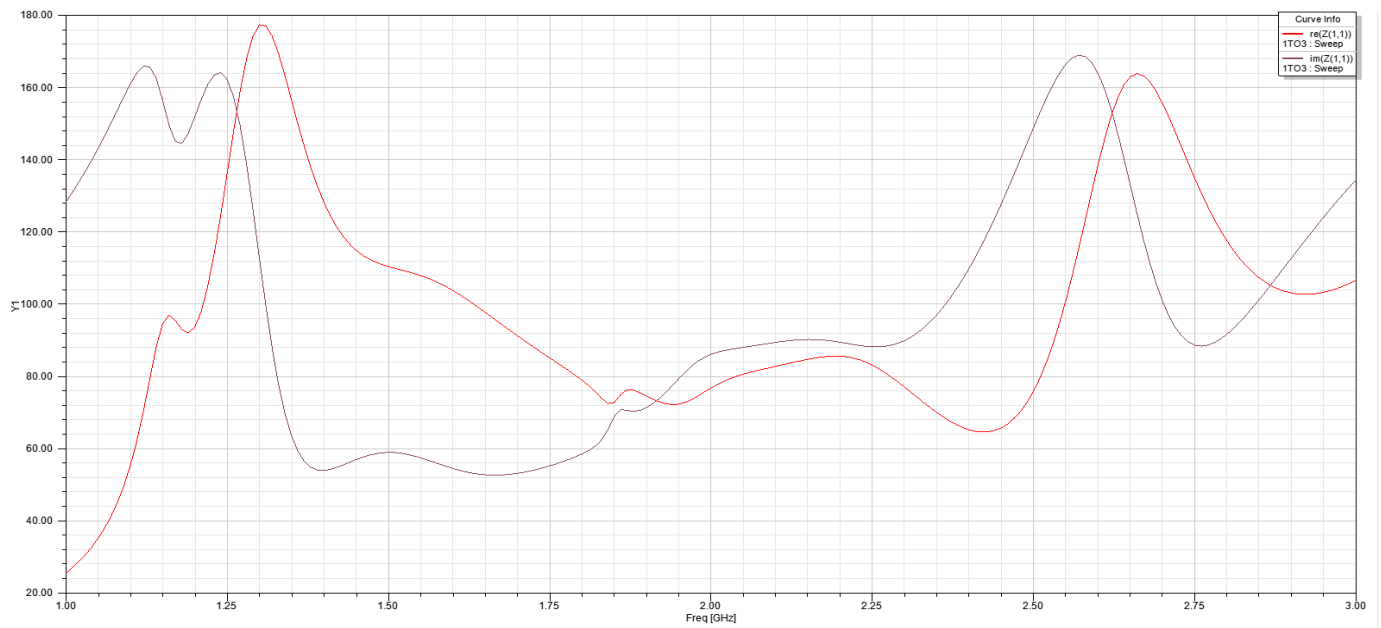
Sl. 5.33.  $S_{11}$  za  $D=10\text{cm}$ ,  $N=10$



Sl. 5.34. VSWR za  $D=10\text{cm}$ ,  $N=10$

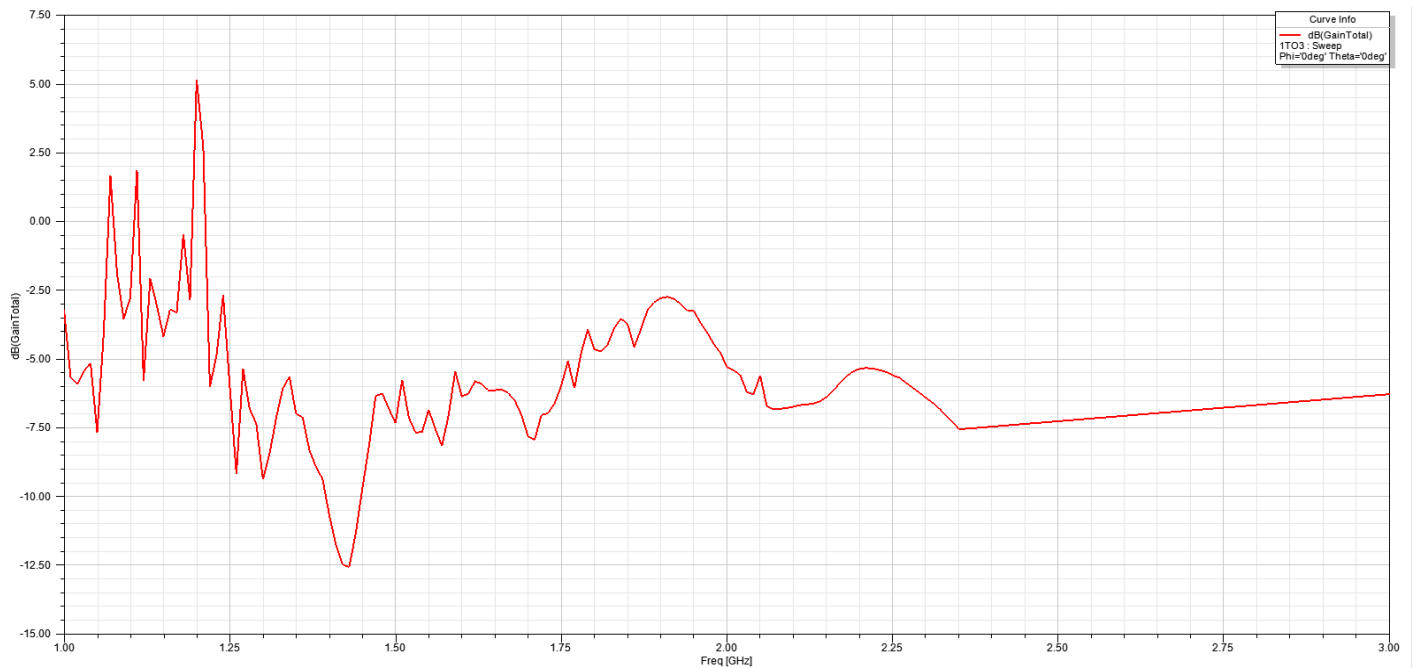
Ulazna impedancija ne zadovoljava uvjet podudaranosti kao i kod ostalih loksodromskih antena ovog promjera (Sl. 5.35.).





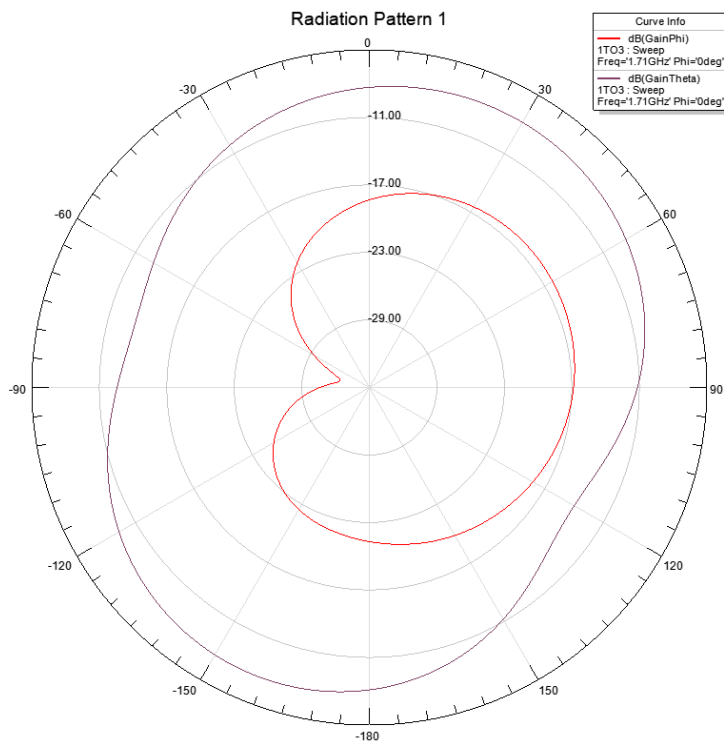
Sl. 5.35. Ulazna impedancija za D=10cm, N=10

Najniža vrijednost dobitka antene s deset namota pojavljuje se na frekvenciji od 1.43 GHz te iznosi -12.51 dB. Moguće je primjetiti iz grafova dobitka za antene s deset i dvanaest namota (Sl. 5.18, Sl. 5.36) da oblik iznosa dobitka postaje kaotičniji proporcionalno s povećanjem broja namota.



Sl. 5.36. Dobitak za D=10cm, N=10

Dijagram zračenja sličnog je oblika kao za prijašnji model s osam namota osim za drugačije vrijednosti dobitaka.



Sl. 5.37. Dijagram zračenja za dobitak  $D=10\text{cm}$ ,  $N=10$  na  $f=1.71\text{ GHz}$

## 6. USPOREDBA SIMULACIJA MODELA SA JEZGROM

U ovom segmentu ukratko će se usporediti utjecaj dielektrične jezgre na dobivene parametre loksodromske antene. Materijali koji će se koristiti za dielektričnu jezgre su:

- *FR4\_epoxy*
- *Rogers RO3003*
- *PVC plastic*

Svi korišteni materijali preuzeti su iz biblioteke programa pod tim točnim nazivima. U tablici su dane vrijednosti određenih parametara korištenih materijala (Tablica 6.1.).

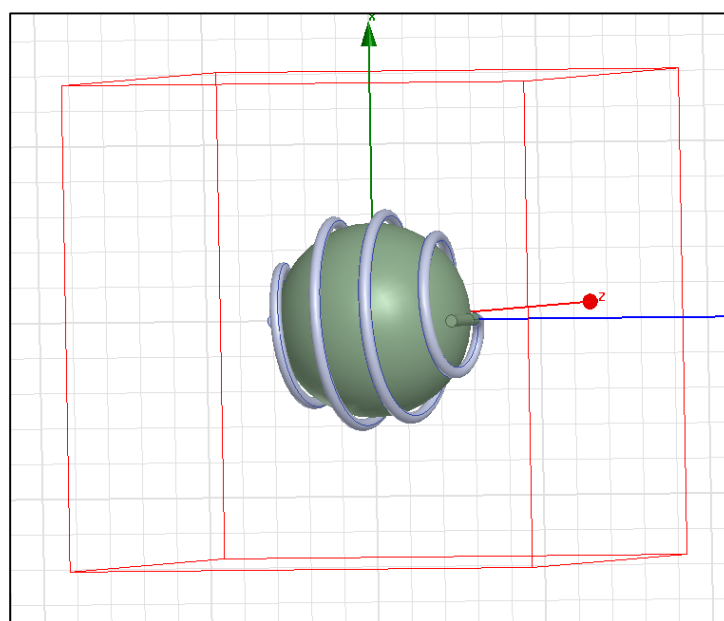
*FR4\_epoxy* je stakleno ojačani materijal u više slojeva na bazi smole. Koristi se kao električni izolator, uz to ima dobra mehanička svojstva te je otporan na plamen. Poznat je po zadržavanju svojih svojstava u suhim i vlažnim uvjetima. Najčešća uporaba mu je prilikom izrade PCB pločica, nadalje koristi se u relejima, sklopkama, transformatorima i antenama [14].

*Rogers RO3003* je PTF (politetrafluoreten) materijal popunjen keramikom, često upotrebljavan u mikrovalnim i RF sustavima. Ima dobru električnu i mehaničku stabilnost po pristupačnoj cijeni. Koristi se u GPS antenama, pojačalima, automobilskim radarima i sl. [15].

*PVC plastic* je širok pojam plastike s obzirom na daljnju raspodjelu PVC-a. S obzirom na to da nije poznato konkretno o kojoj raspodjeli PVC-a se radi, preuzeti će se zadane vrijednosti materijala iz HFSS biblioteke.

Tablica 6.1. Svojstva korištenih materijala

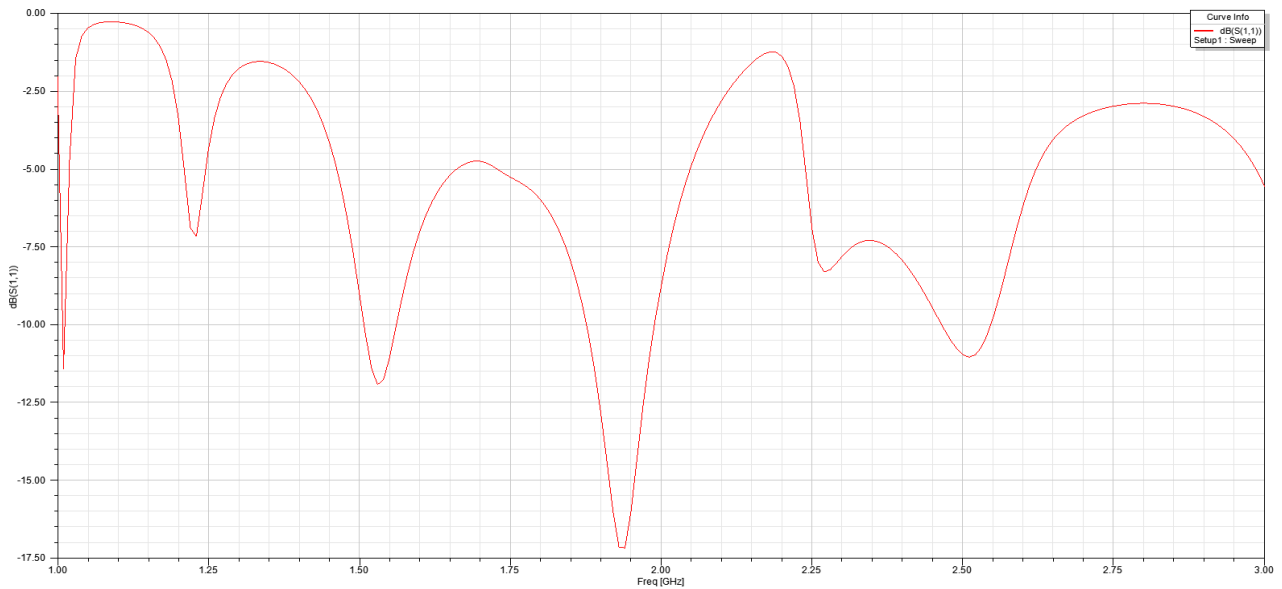
Materijal	Relativna permitivnost	Relativna permabilnost	Dielektrični gubitak tangensa	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Lande G faktor	<i>Bulk conductivity</i> (S/m)
<i>FR4_epoxy</i>	4.4	1	0.02	1900	2	0
<i>Rogers RO3003</i>	3	1	0.0013	0	2	0
<i>PVC plastic</i>	2.7	1	0.007	0	2	0



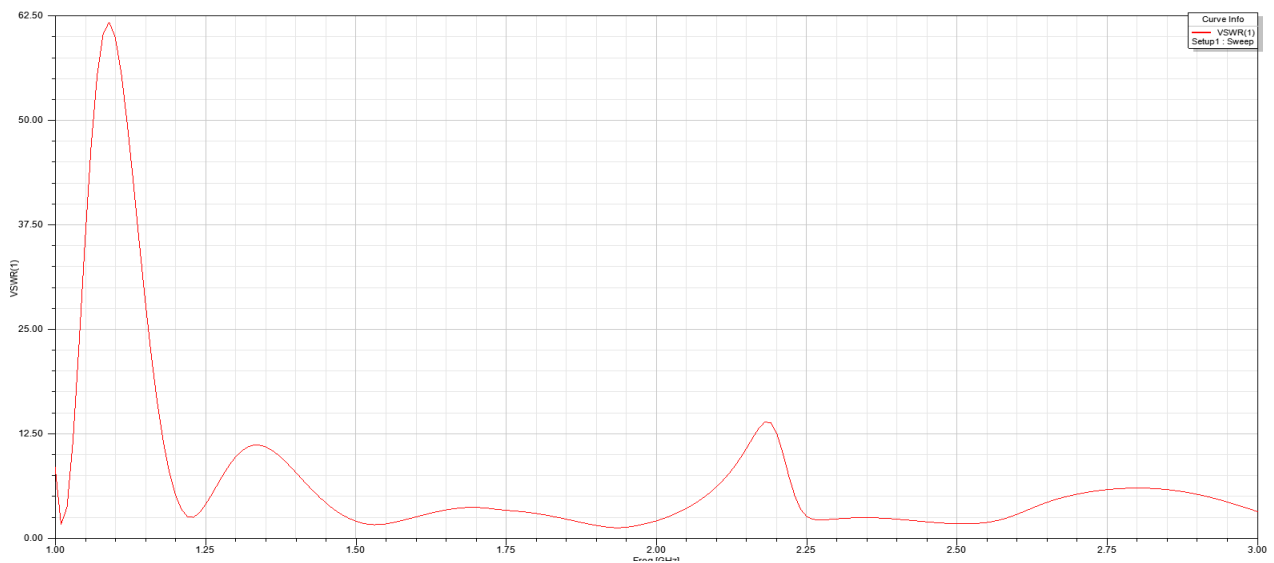
Sl. 6.1. Korišteni model s dielektričnom jezgrom, D=6cm, N=4

## 6.1. Rezultati simulacije

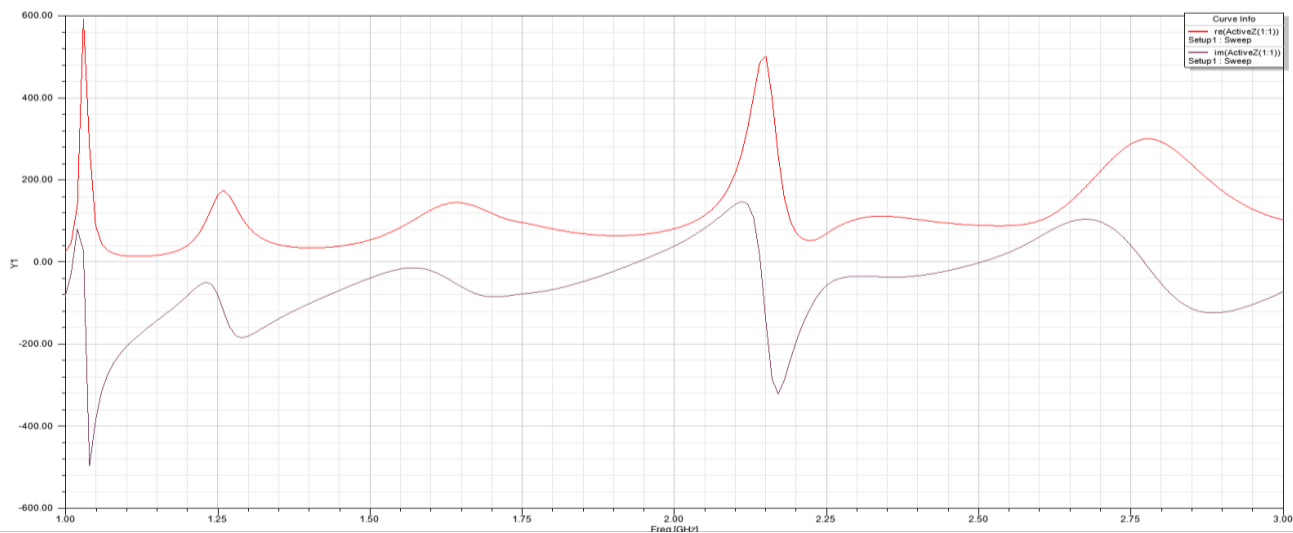
Rezultati za jezgru materijala *FR4\_epoxy*:



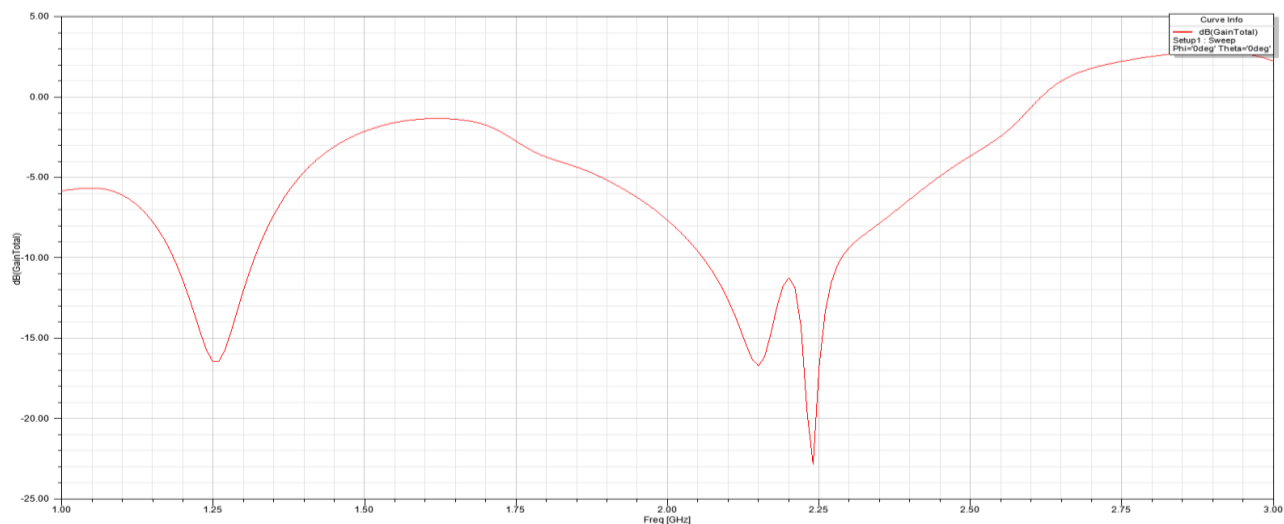
Sl. 6.2.  $S_{11}$  za *FR4\_epoxy* (D=6 cm, N=4)



Sl. 6.3. VSWR za *FR4\_epoxy* (D=6 cm, N=4)



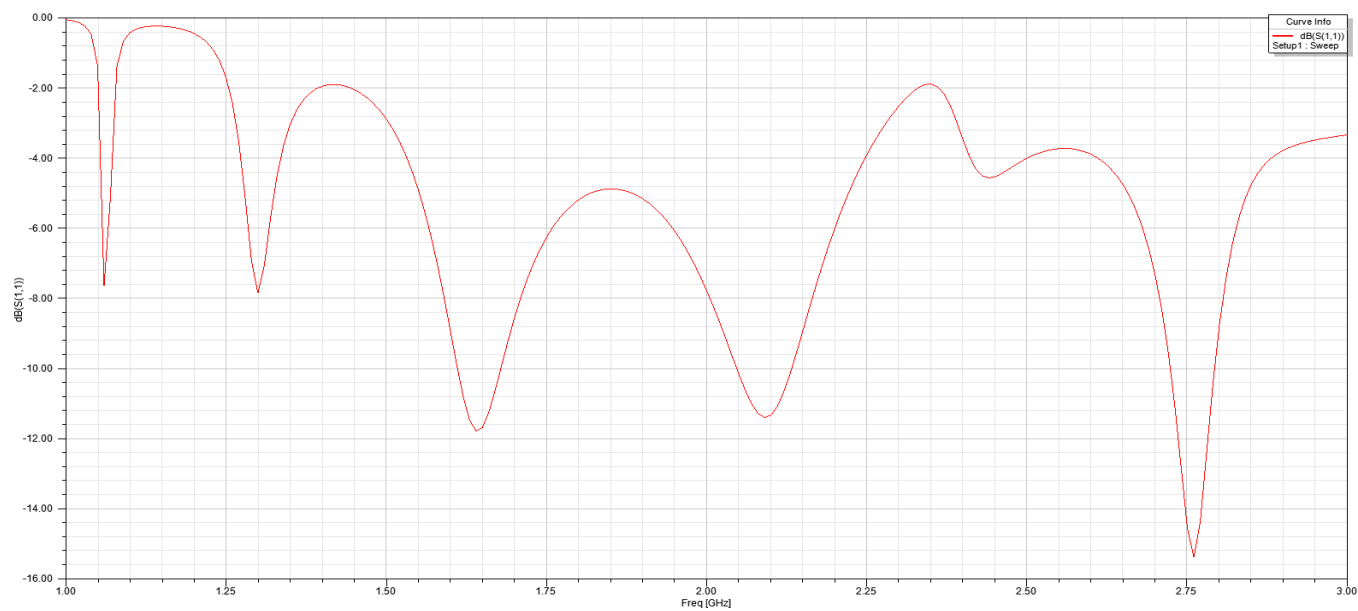
Sl. 6.4. Ulazna impedancija za *FR4\_epoxy* (D=6 cm, N=4)



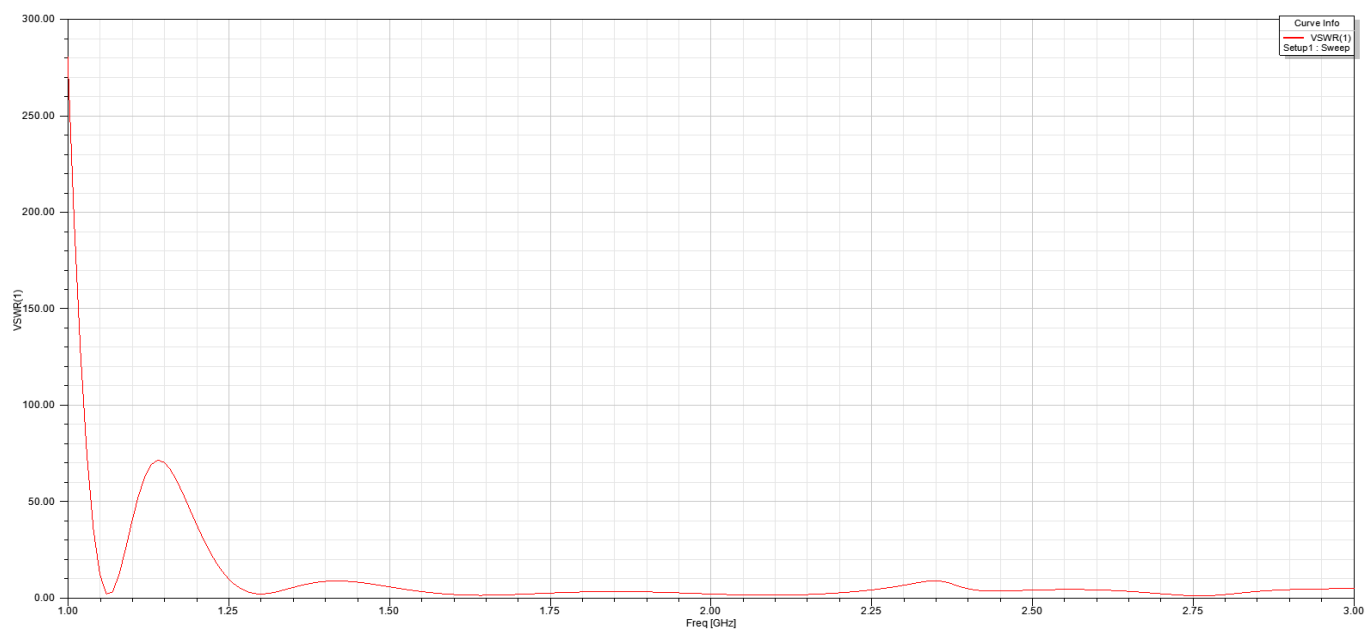
Sl. 6.5. Dobitak za *FR4\_epoxy* (D=6 cm, N=4)

Prema  $S_{11}$  i VSWR grafovima (Sl. 6.2, Sl. 6.3.) vidljivo je da antena s jezgrom materijala *FR4\_epoxy* ima četiri radna područja, što je više u usporedbi s prvobitnim modelom bez dielektrične jezgre koji ima dva radna područja. Moguće je primjetiti da  $S_{11}$  i VSWR vrijednosti su efikasnije u modelu sa dielektričnom jezgrom gdje najniža vrijednost  $S_{11}$  parametra iznosi -17.2 dB, a bez jezgre -14.5 dB na frekvenciji od 1.87 GHz. Također, dodavanjem jezgre materijala *FR4\_epoxy* dolazi do boljeg poklapanja impedancije i nižih vrijednosti dobitka (Sl. 6.4., Sl. 6.5.).

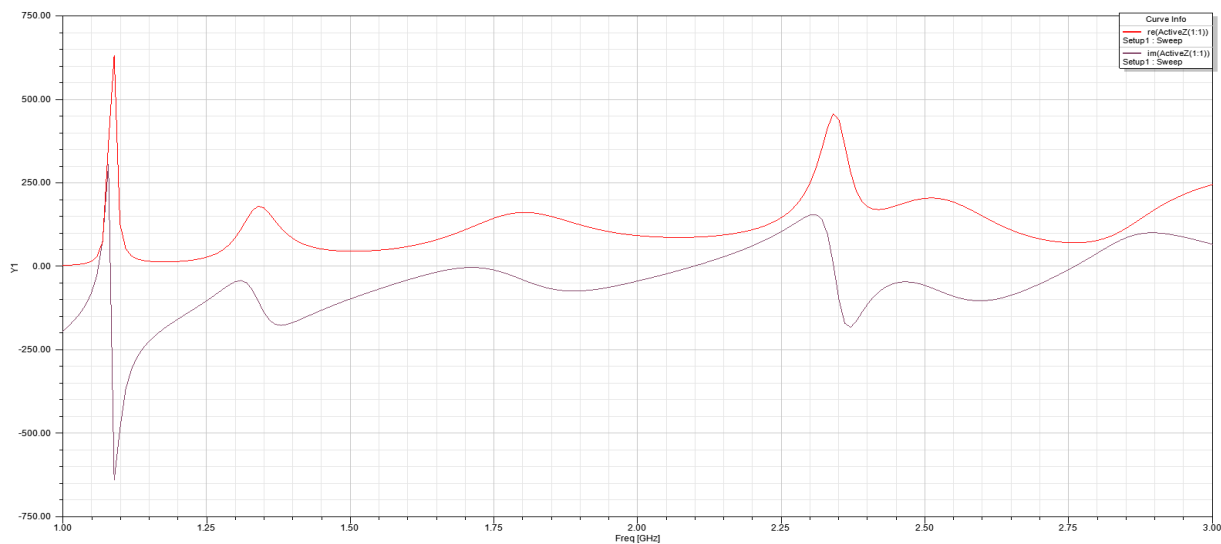
## Rezultati za jezgru materijala *Rogers RO3003*:



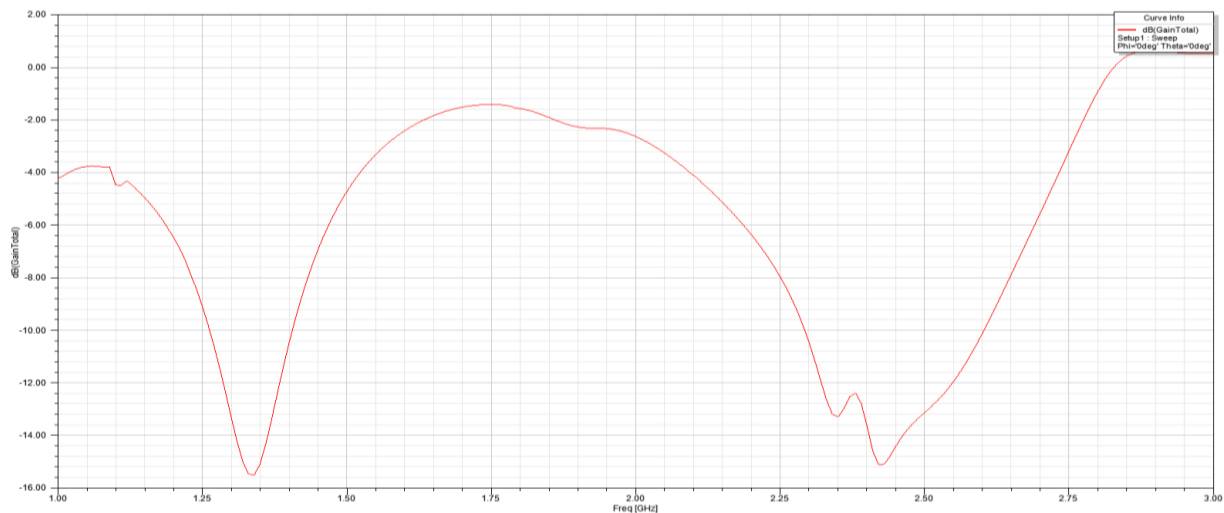
Sl. 6.6.  $S_{11}$  za *Rogers RO3003* (D=6 cm, N=4)



Sl. 6.7. VSWR za *Rogers RO3003* (D=6 cm, N=4)



Sl. 6.8. Ulazna impedancija za *Rogers RO3003* (D=6 cm, N=4)

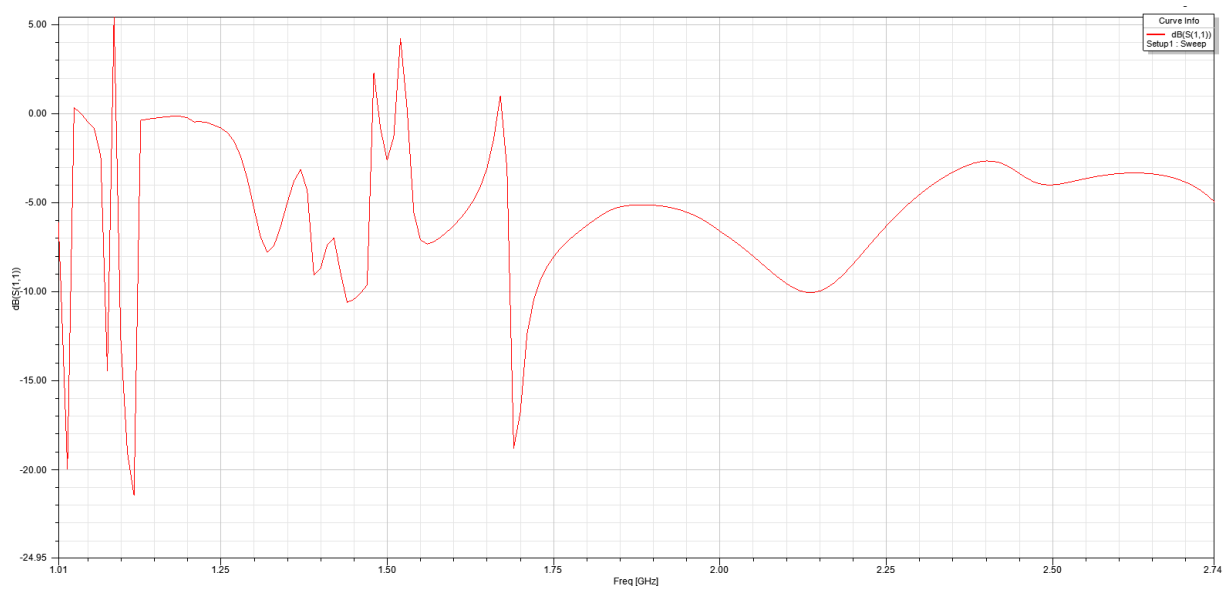


Sl. 6.9. Dobitak za *Rogers RO3003* (D=6 cm, N=4)

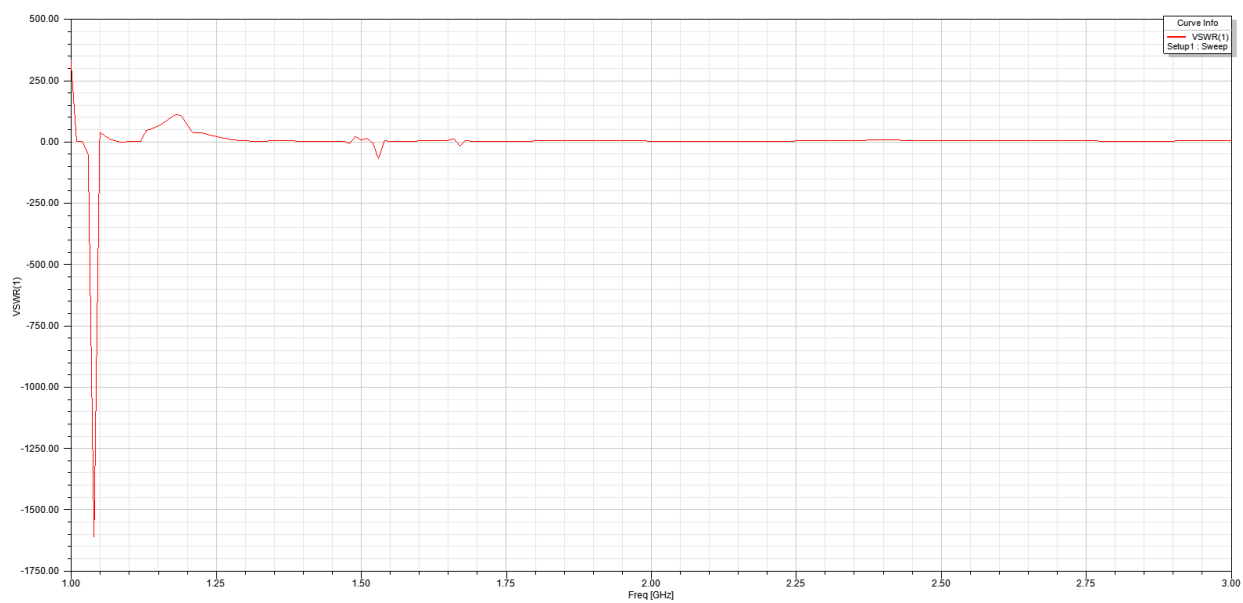
Uporabom *Rogers RO3003* materijala također su se poboljšali parametri loksodromske antene. Prema  $S_{11}$  i VSWR vidljiva su tri radna područja antene, no usporedbi s dobivenim rezultatima modela bez jezgre i materijala jezgre *FR4\_epoxy* - za *Rogers RO3003* najniža vrijednost  $S_{11}$  i VSWR se nalazi na frekvenciji od 2.77 GHz (Sl. 6.6., Sl. 6.7.). Vrijednost  $S_{11}$  na toj frekvenciji iznosi -15.4 dB, što je svakako bolja vrijednost za model bez jezgre, no lošija od modela jezgre materijala *FR4\_epoxy*. U oba rezultata za dobitak (modela s jezgrom) vidljivo je da su najniže vrijednosti dobitka dobivene pri sličnim vrijednostima frekvencija, što nije slučaj za model bez jezgre (Sl. 6.5., Sl. 6.9.). Stoga, moguće je zaključiti za loksodromsku antenu da jezgra definira frekvencijsko područje gdje će vrijednosti dobitka poprimiti najniže vrijednosti.



Rezultati za jezgru materijala *PVC plastic*:



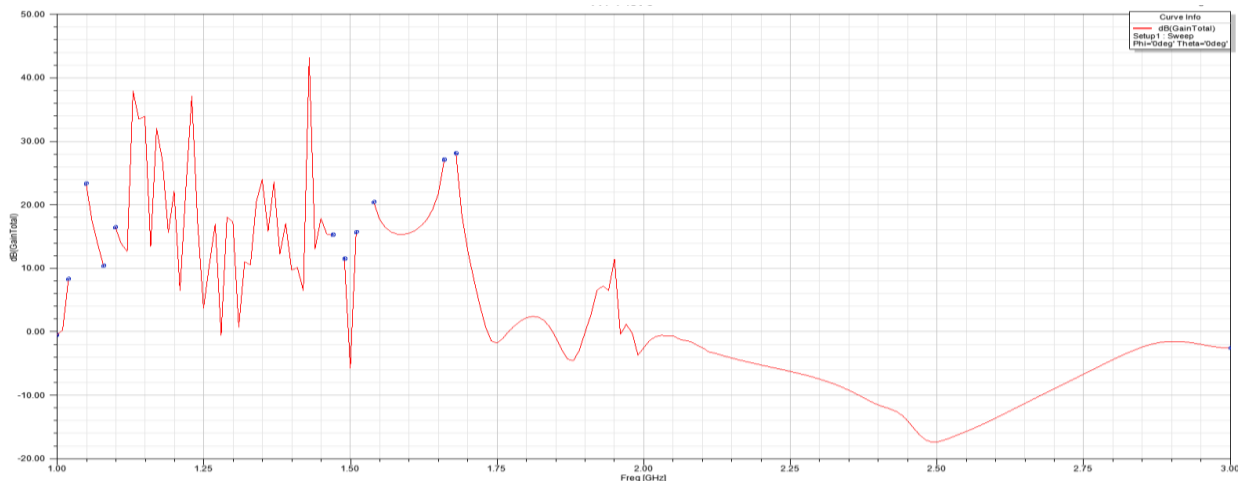
Sl. 6.10.  $S_{11}$  za *PVC plastic* (D=6 cm, N=4)



Sl. 6.11. VSWR za *PVC plastic* (D=6 cm, N=4)

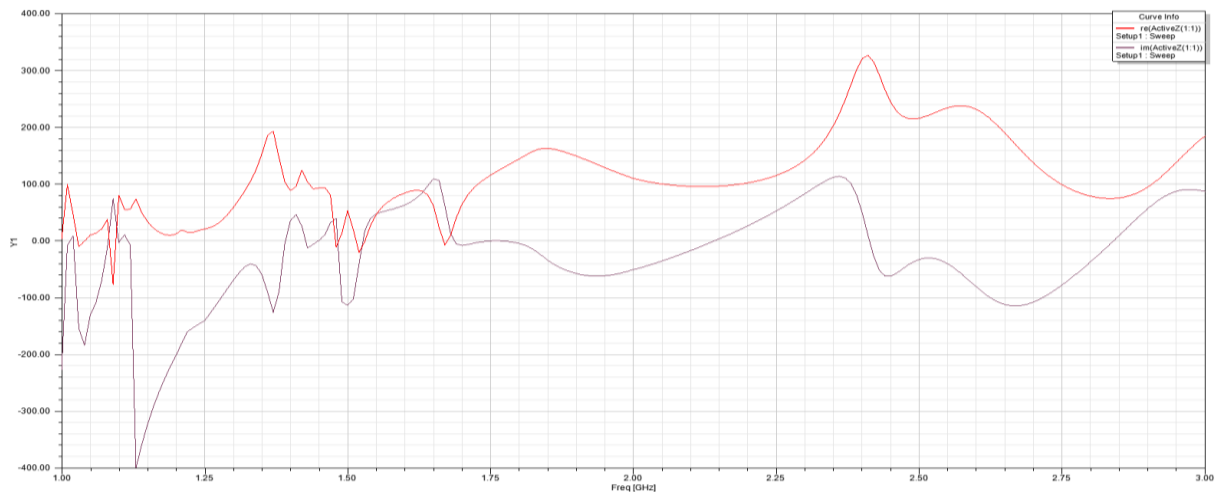
Usporedimo li ostale rezultate s *PVC plastic* materijalom za model promjera 6 cm i četiri namota, moguće je doći do zaključka da je on najefikasniji. Ovaj model jedini za skoro sva radna područja ima pozitivne vrijednosti dobitka. Na frekvenciji od 1.435 GHz, vrijednost dobitka iznosi 30 dB, stoga se to radno područje može koristiti za primjene gdje je potrebna tolika vrijednost dobitka. U Tablici 6.2. zapisane su  $S_{11}$  vrijednosti za pojedina područja, a u Tablici 6.3. zapisane su najniže vrijednosti  $S_{11}$  parametra za modele antena s jezgrom.

Tablica 6.2. Vrijednosti radnih područja antene s jezgrom materijala *PVC plastic*



Sl. 6.13. Dobitak za *PVC plastic* (D=6 cm, N=4)

Vrijednost $S_{11}$ (dB):	-20	-14.4	-21.45	-10.55	-18.7	-10.1
Vrijednost frekvencije (GHz):	1.03	1.08	1.12	1.435	1.68	2.13

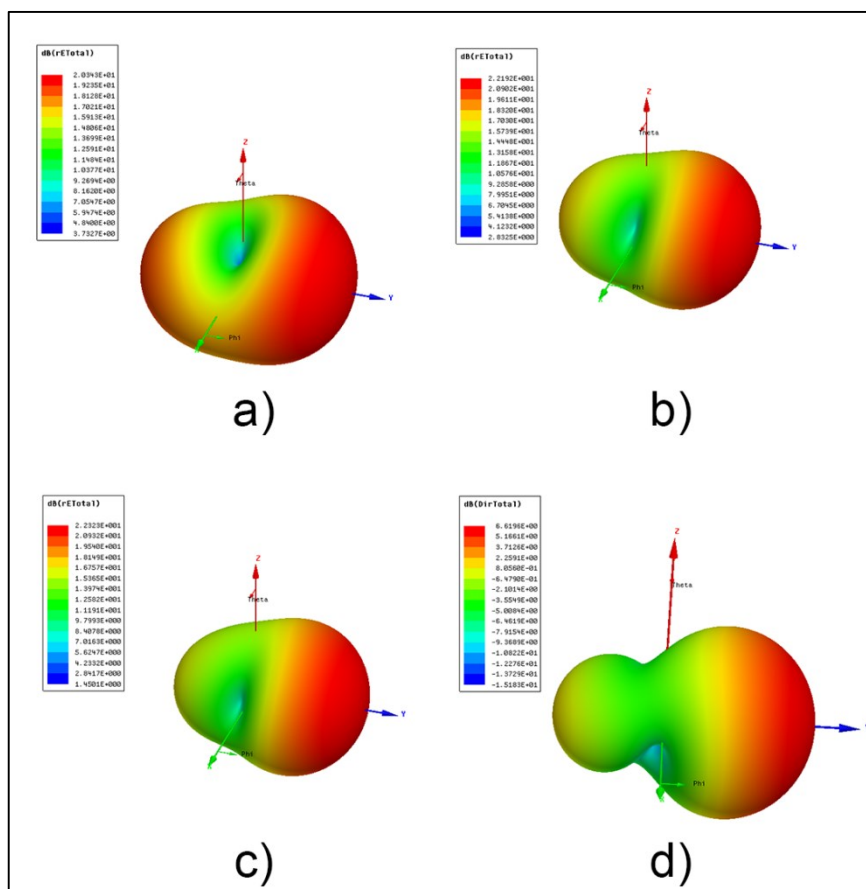


Sl. 6.12. Ulazna impedancija za *PVC plastic* (D=6 cm, N=4)

Tablica 6.3. Najoptimalnije vrijednosti  $S_{11}$  parametra ovisno o materijalu

Materijal:	Bez jezgre	<i>FR4_epoxy</i>	<i>Rogers</i>	<i>PVC plastic</i>
Vrijednost $S_{11}$ (dB):	-14.5	-17.2	-15.4	-21.45
Vrijednost frekvencije (GHz):	1.87	1.87	2.77	1.12

Na Sl. 6.14. dana je usporedba pojedinih modela antena dijagramom zračenja ovisno o jakosti električnog polja (ne dobitka kao do sada). Ovim dijagramom prikazan je smjer širenja i intenzitet elektromagnetskog polja neke točke u prostoru. Modeli su: a) *FR4\_epoxy*, b) *Rogers RO3003*, c) *PVC plastic*, d) bez jezgre (vakuum).



Sl. 6.14. 3D polarni dijagram zračenja jakosti polja za navedene modele

U Tablici 6.4. uspoređene su vrijednosti dobitka za frekvencije gdje se postiže najniža vrijednost  $S_{11}$  i VSWR parametara.

Tablica 6.4. Vrijednosti dobitka u radnim područjima

Bez dielektrične jezgre		
Vrijednost dobitka (dB):	-9.5	-2
Vrijednost frekvencije (GHz):	1.45	1.87

<i>FR4_epoxy</i>				
Vrijednost dobitka (dB):	-5.8	-1.9	-5	-3.5
Vrijednost frekvencije (GHz):	1.01	1.53	1.87	2.515

<i>Rogers RO3003</i>			
Vrijednost dobitka (dB):	-2.2	-6	-2.6
Vrijednost frekvencije (GHz):	1.63	2.68	2.77

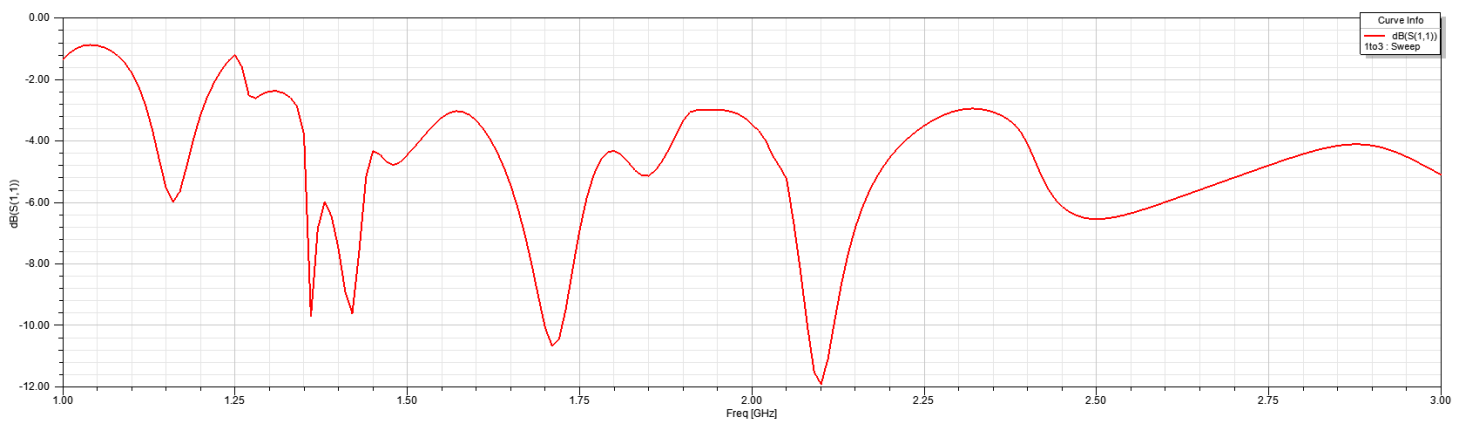
<i>PVC plastic</i>						
Vrijednost dobitka (dB):	8	10	13	30	24	-4
Vrijednost frekvencije (GHz):	1.03	1.08	1.12	1.435	1.68	2.13

## 6.2. Simulacija loksodromske antene promjera 10 cm sa jezgrom

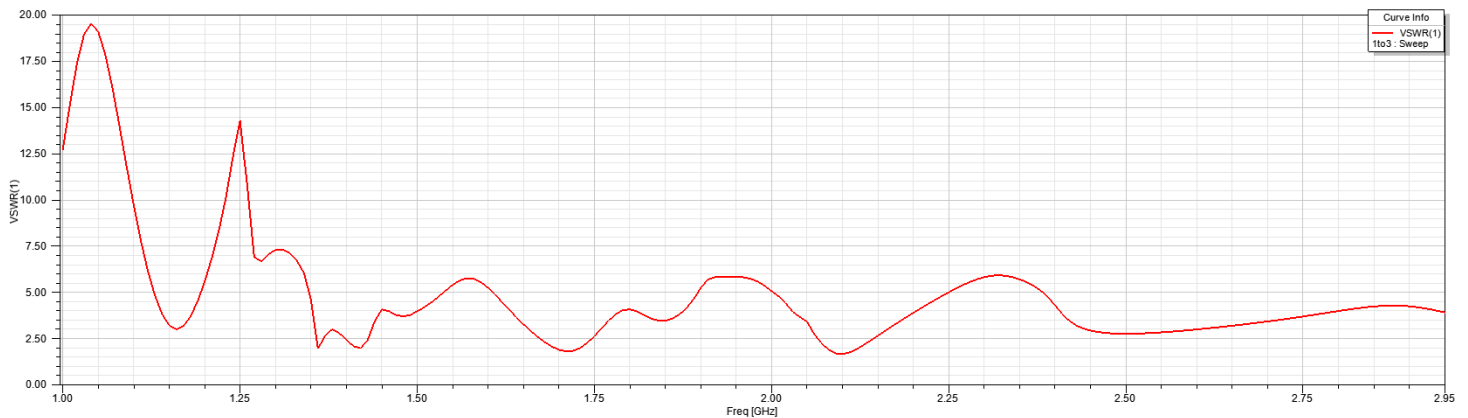
Niti jedna loksodromska antena promjera 10 cm u ovom radu nema validno radno područje. S obzirom na tu činjenicu, ukratko je ispitan utjecaj dielektrične jezgre materijala *FR4\_epoxy* na modelu loksodromske antene promjera 10 cm s osam namota.

Analizom takvog modela dobiveni su sljedeći rezultati;

Dolazi do znatnih poboljšanja vrijednosti  $S_{11}$  i VSWR-a te su moguća dva radna područja na frekvencijama od 1.71 i 2.1 GHz (Sl. 6.15., Sl. 6.16.). Na frekvenciji od 1.71 GHz vrijednosti  $S_{11}$  i VSWR-a iznose -10.6 dB i 1.8, dok na 2.1 GHz iznose -11.87 dB i 1.68.

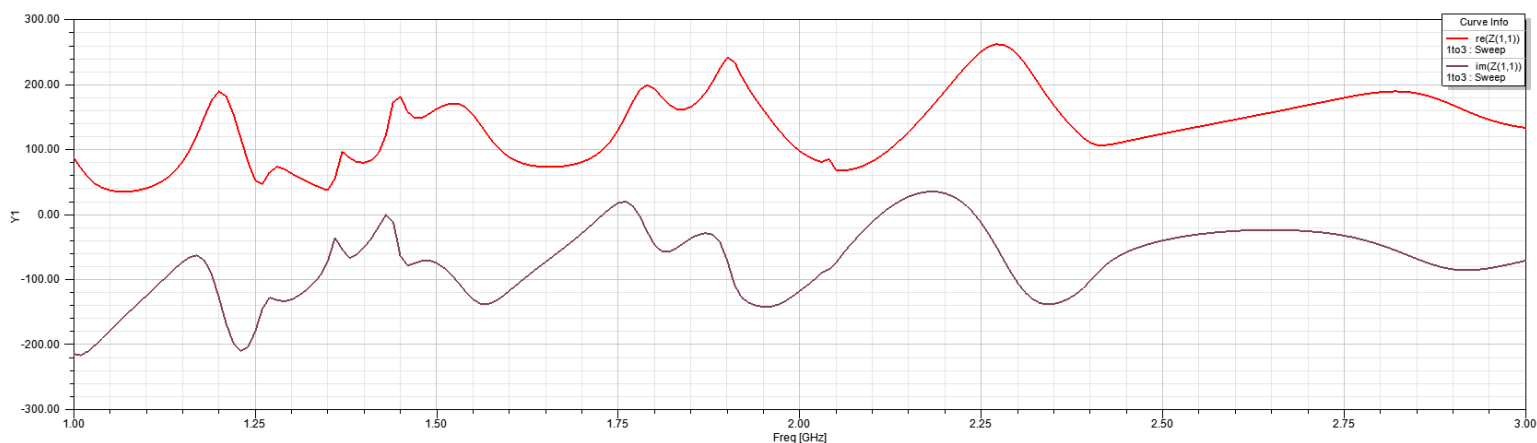


Sl. 6.15.  $S_{11}$  za *FR4\_epoxy* (D=10 cm, N=8)

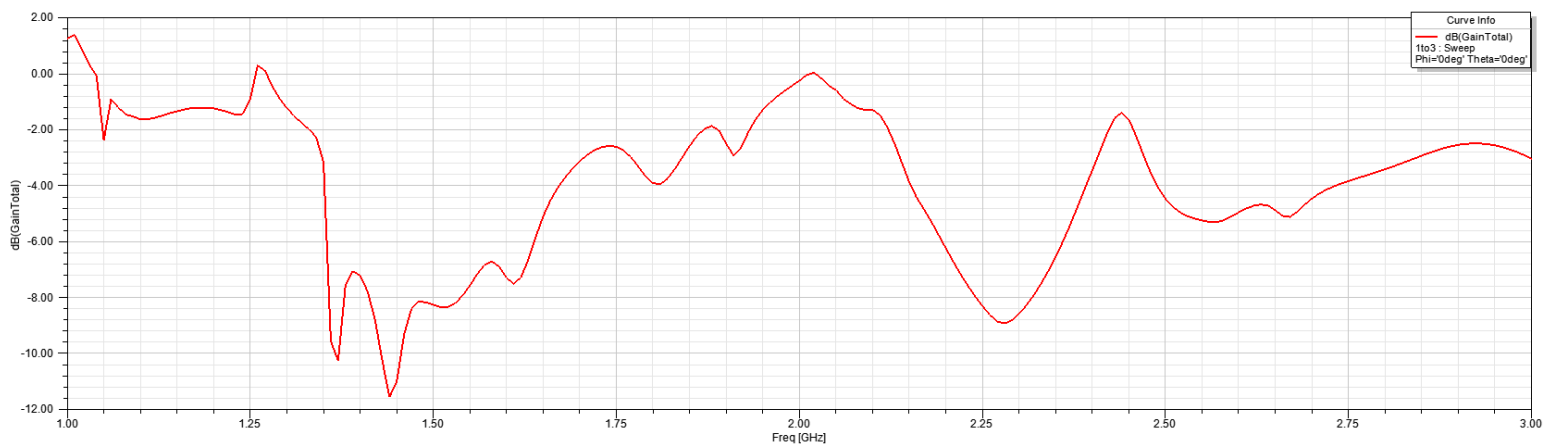


Sl. 6.16. VSWR za *FR4\_epoxy* (D=10 cm, N=8)

Na frekvenciji od 1.71 GHz sa Sl. 7.16. realni dio impedancije iznosi  $86.7 \Omega$ , a imaginarni  $-19.8 \Omega$ . Nije najprikladnije podudaranje impedancije što se vidi i po samom iznosu  $S_{11}$  i VSWR vrijednosti. Za područje frekvencije od 2.1 GHz realni dio iznosi  $84.5 \Omega$ , a imaginarni  $-15 \Omega$ . U oba slučaju su to bolje vrijednosti nego za model bez jezgre gdje je realni dio  $87 \Omega$ , a imaginarni dio  $-44 \Omega$ . Najniža vrijednost dobitka iznosi  $-11.55$  dB na frekvenciji od 1.435 GHz. Antene sa jezgrom promjera 6 cm su imali negativne ekstreme dobitka na intervalima od 1.25 do 1.5 GHz te od 2.25 do 2.5 GHz, što je također vidljivo i za ovu antenu. Uzevši to u obzir moguće je zaključiti da jezgra utječe na razmještaj dobitka po frekvencijskoj osi.



Sl. 6.17. Ulazna impedancija za *FR4 epoxy* (D=10 cm, N=8)

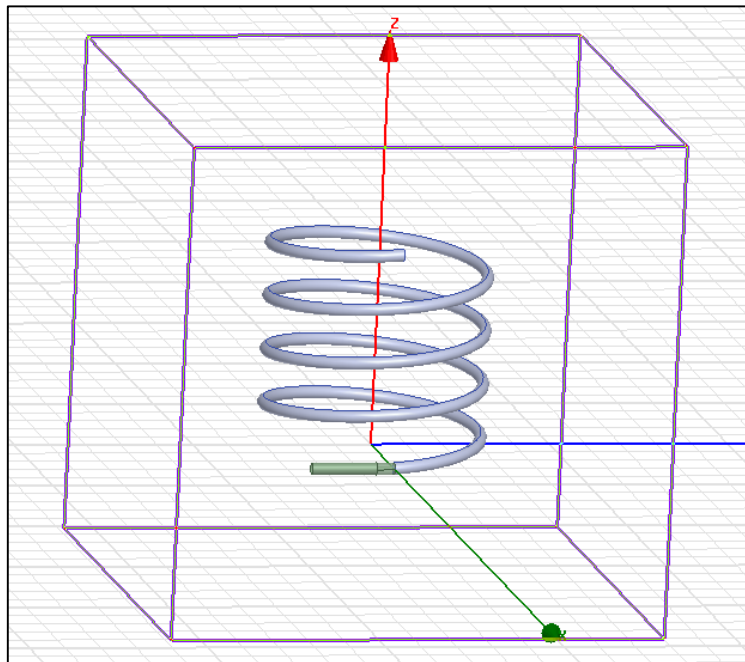


Sl. 6.18. Dobitak za *FR4 epoxy* (D=10 cm, N=8)

## 7. USPOREDBA LOKSODROMSKE I HELIKOIDALNE ANTENE

Glavna razlika između loksodromske i helikoidalne (cilindrične) antene je ta što helikoidalna antena zrači u smjeru snopa koji je kružno polariziran duž os, dok snop kod loksodromske antene je eliptično polariziran. Helikoidalna antena iz tog razloga ima skoro pa konstantne vrijednosti za svoje parametre duž šireg frekvencijskog opsega, dok kod loksodromske antene to nije slučaj. Razlika u geometrijskom obliku rezultira to, no snop ipak rijetko može biti i kružno polariziran. Zbog te činjenice moguće je reći da su loksodromska i helikoidalna antena slične.

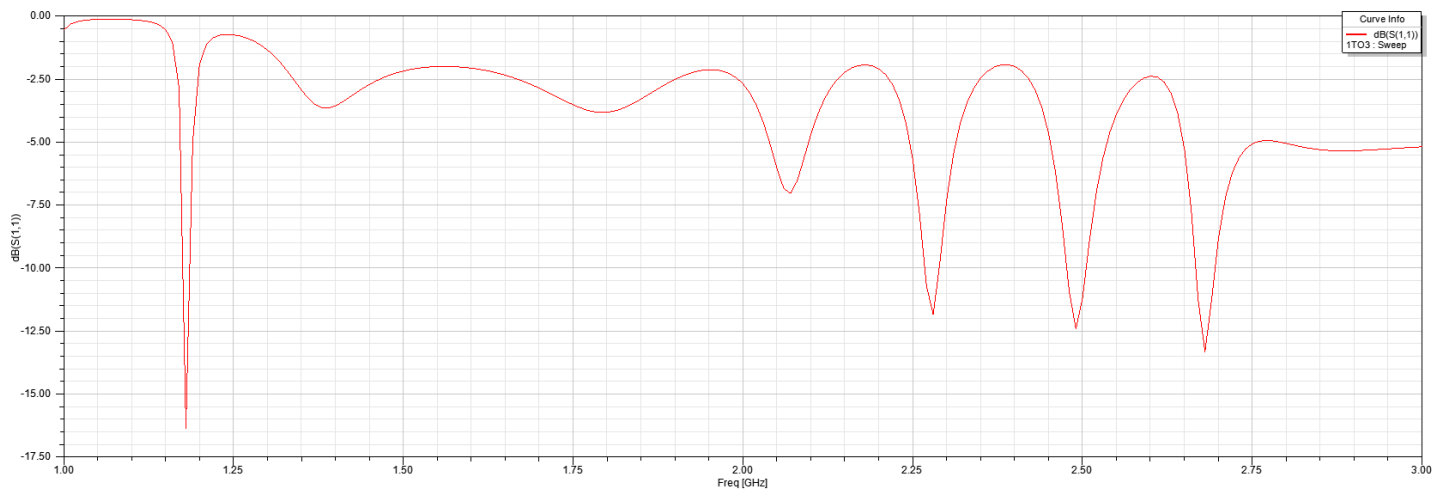
Simulacija helikoidalne antene modela  $D=6\text{ cm}$ ,  $N=4$ :



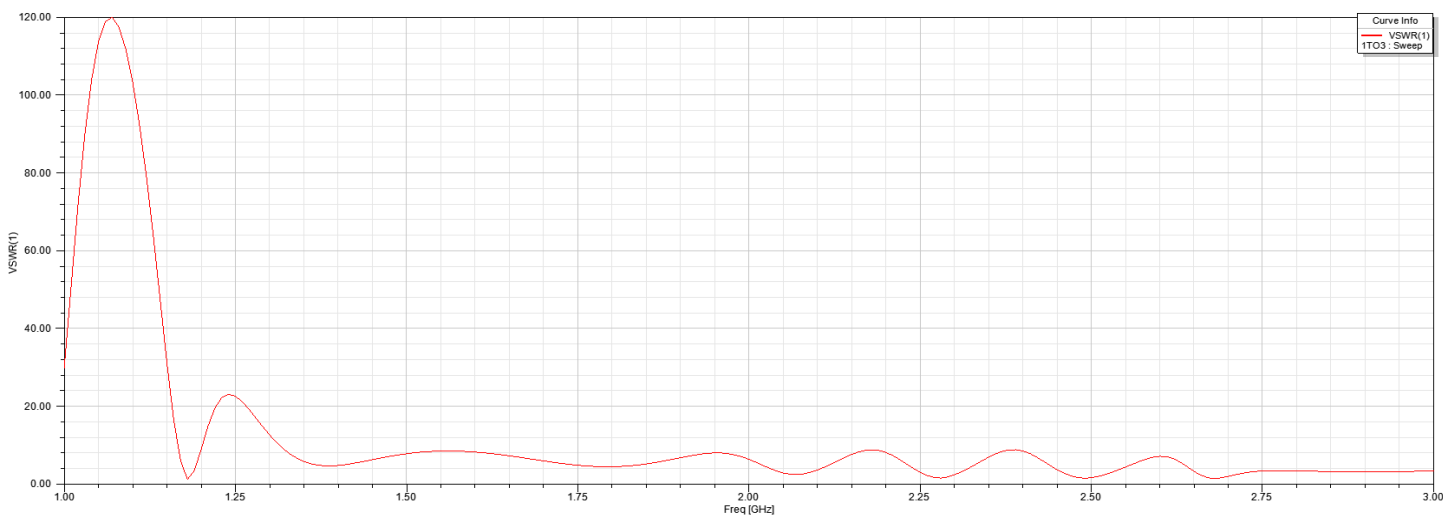
Sl. 7.1. Korišteni model helikoidalne antene,  $D=6\text{cm}$ ,  $N=4$

Usporedbi sa loksodromskom antenom istog promjera i broja namota, helikoidalna se pokazala optimalnija što je i očekivano. Prema  $S_{11}$  i VSWR vrijednostima (Sl. 7.2, Sl. 7.3.) vidljivo je da su moguća četiri radna područja, gdje je antena najefikasnija na frekvencijskom području od 1.18 GHz s iznosima za  $S_{11}$ : -16.33 dB i VSWR: 1.359. Loksodromska antena istih geometrijskih značajki ima vrijednost  $S_{11}$  iznosa -14.5 dB, te VSWR iznosa 1.29.





Sl. 7.2.  $S_{11}$  za helikoidalnu antenu ( $D=6$  cm,  $N=4$ )



Sl. 7.3 VSWR za helikoidalnu antenu ( $D=6$  cm,  $N=4$ )

Vrijednost dobitka usporedbi s loksodromskom antenom je pozitivnog iznosa (Sl. 7.4.). U Tablici 7.1. zapisane su vrijednosti dobitka za radna područja helikoidalne, a u Tablici 7.2. loksodromske antene. Radno područje od 1.18 GHz je najbolje za uporabu uzevši u obzir da su vrijednosti  $S_{11}$  i VSWR najniže, a dobitak najviši usporedbi s ostalim radnim područjima.

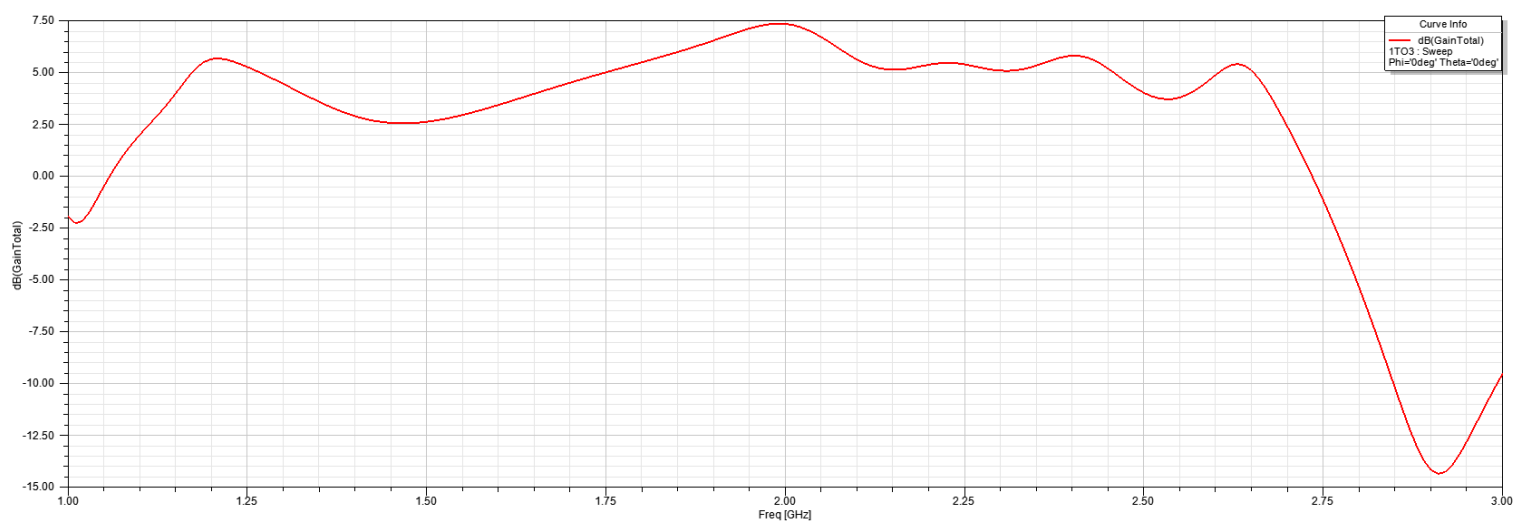
Tablica 7.1. Vrijednosti dobitka u radnim područjima helikoidalne antene

Vrijednost dobitka (dB):	5.75	5.17	4.2	3
Vrijednost frekvencije (GHz):	1.18	2.28	2.495	2.68

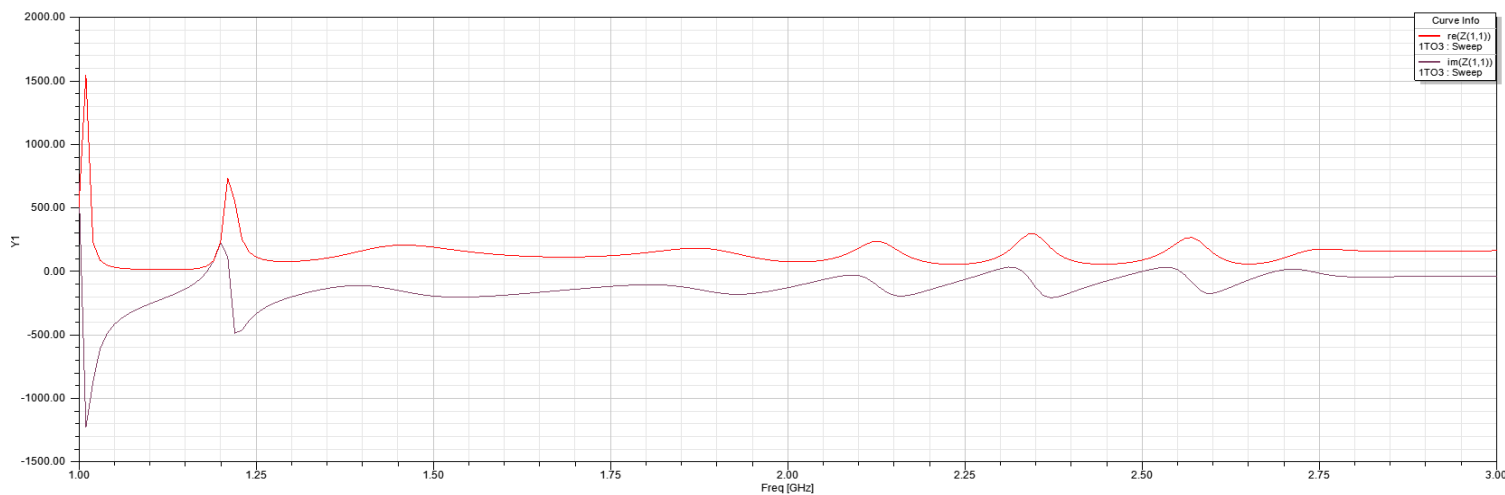
Tablica 7.2. Vrijednosti dobitka u radnim područjima loksodromske antene

Vrijednost dobitka (dB):	-9.5	-2
Vrijednost frekvencije (GHz):	1.45	1.87

Na frekvenciji od 1.18 GHz realni dio iznosi  $40 \Omega$ , a imaginarni dio impedancije  $-10 \Omega$ . Ostvarena je bolja podudarnostt impedancije nego za loksodromsku antenu istih geometrijskih parametara (realni dio:  $66.44 \Omega$ , imaginarni dio:  $-21.68 \Omega$ ).

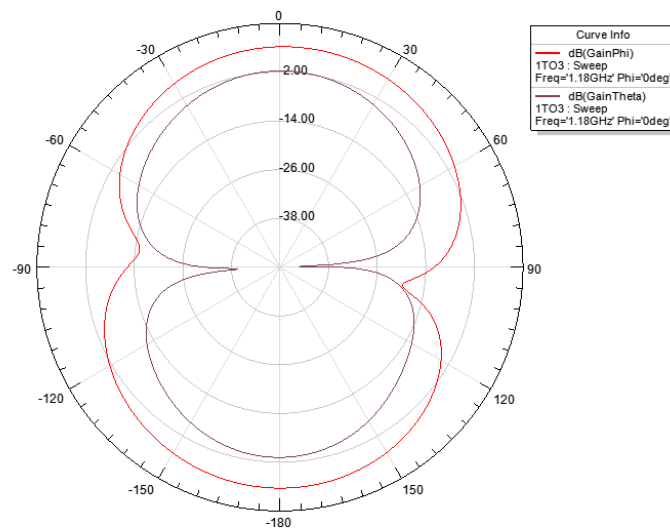


Sl. 7.4 Dobitak za helikoidalnu antenu (D=6 cm, N=4)

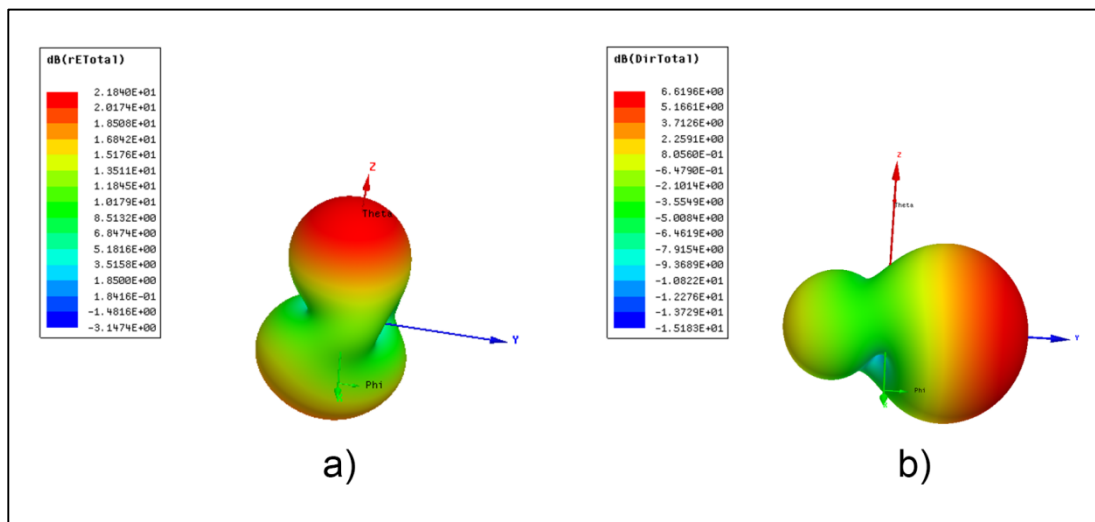


Sl. 7.5 Ulazna impedancija za helikoidalnu antenu (D=6 cm, N=4)

Dobiven dijagram zračenja ovisno o dobitku znatno drugačije izgleda zbog pozitivno dobivenih vrijednosti dobitka (Sl. 7.6.). Nadalje, prikazana je usporedba 3D dijagrama zračenja ovisno o jakosti električnog polja a) helikoidalne i b) loksodromske antene, istih promjera i broja namota (Sl. 7.7). Vidljivo je da je zračenje u prostoru gotovo jednakog oblika za navedene antene osim što se razlikuju po intenzitetu.



Sl. 7.6. Dijagram zračenja za dobitak  $D=10\text{cm}$ ,  $N=10$  na  $f=1.18\text{ GHz}$  ( $D=6\text{ cm}$ ,  $N=4$ )



Sl. 7.7. 3D polarni dijagram zračenja jakosti polja za navedene modele

## 8. ZAKLJUČAK

Ovim završnim radom analizirana su svojstva loksodromske antene te ovisnost geometrijskog oblika na njene parametre. U svrhu stjecanja boljeg stajališta napravljena je kratka usporedba loksodromske i helikoidalne antene istih geometrijskih značajki. Na temelju dobivenih rezultata iz uzorka šest različitih loksodromskih antena (bez dielektrične jezgre) vidljivo je da zasebno broj namota nema znatan utjecaj na vrijednosti parametara antene, već je bitan i promjer antene. Uzimanjem samo broja namota u obzir, najbolje rezultate su ostvarile antene s osam namota. Antene promjera 6 cm su ostvarile bolje vrijednosti nego one antene promjera 10 cm, što osim te činjenice upućuje na važnost i kompleksnost konstruiranja antena. Uporabom modela loksodromske antene s četiri namota i promjerom 6 cm, utvrđeno je da bolja svojstva imaju loksodromske antene koje sadržavaju dielektričnu sferu. Neovisno o materijalu sfere, svi modeli koji sadržavaju dielektričnu sferu imaju efikasnije  $S_{11}$  i VSWR vrijednosti parametara nego modeli bez dielektrične sfere, uz navedeno povećao se broj radnih područja antene. Dobitak antene varira ovisno o korištenom materijalu, gdje model s jezgrom materijala *PVC plastic* ima jedini pozitivne vrijednosti dobitka. Iz uzorka četiri modela s različitim materijalima (bez jezgre - vakum, *FR4 epoxy*, *Rogers RO3003*, *PVC plastic*), materijal *PVC plastic* pokazao se kao najbolje rješenje, gdje usporedbi s ostatkom antena iz uzorka postiže: najefikasnije  $S_{11}$  i VSWR vrijednosti, najveći broj radnih područja i pozitivan dobitak za skoro sva radna područja. Korišteni model helikoidalne antene ima slične iznose  $S_{11}$  i VSWR vrijednosti kao loksodromska antena istih geometrijskih značajki, izuzev što helikoidalna antena ima više mogućih radnih područja. Prema polarnom dijagramu zračenja jakosti polja vidljivo je da je oblik zračenja helikoidalne i loksodromske antene sličan. S obzirom na to da je uzorak ispitivanja loksodromske i helikoidalne antene samo jedan model, valjalo bi proširiti uzorak da bi se došlo do konkretnijih vrijednosti i zaključaka.

Za daljnje istraživanje svojstava loksodromske antene valjalo bi proširiti uzorak antena s različitim brojem namota i veličina te ovisno o veličini korigirati i frekventijsko područje u kojem se ispituju antene. Također za modele loksodromske antene s dielektričnom jezgrom u svrhu daljnje optimizacije ispitati različite dielektrične materijale koje se koriste u praksi poput npr. papira.

## LITERATURA

- [1] „Ansys HFSS | 3D High Frequency Simulation Software”, <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> (pristupljeno kol. 15. 2021.)
- [2] S. Rimac Drlje, „Antene 1. dio”, Materijali s predavanja iz kolegija Komunikacijski sustavi, FERIT Osijek, 2021.
- [3] „Understanding Antenna Gain, Beamwidth, And Directivity”, <https://www.ahsystems.com/articles/Understanding-antenna-gain-beamwidth-directivity.php> (pristupljeno srp. 10. 2021.)
- [4] „Some Common Antenna Radiation Patterns”, <http://www.raymaps.com/index.php/some-common-antenna-radiation-patterns/> (pristupljeno srp. 10. 2021.)
- [5] „What is meant by the VSWR of an antenna?”, <https://www.mobilemark.com/about/faq/what-is-meant-by-the-vswr-of-an-antenna/> (pristupljeno srp. 10. 2021.)
- [6] „Loxodrome - Encyclopedia of Mathematics”, <https://encyclopediaofmath.org/wiki/Loxodrome> (pristupljeno srp. 10. 2021.)
- [7] J. Cristopher Cardoso, A. Safaai-Jazi - „The Spherical Helical Antenna”, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, str. 88-91., ruj. 1992.
- [8] G. Ruchti, Senior thesis - „Ansoft HFSS and Optimetrics Projects”, University of Maryland, str. 2-19., kol. 2020.
- [9] „Tip 1: Which Sweep to Use?”, [http://www.emtalk.com/tip\\_1.htm](http://www.emtalk.com/tip_1.htm) (pristupljeno srp. 5. 2021.)
- [10] „Negative gain antenna”, <https://www.edaboard.com/threads/negative-gain-antenna.352541/> (pristupljeno kol. 28. 2021.)

- [11] „Wavelengths, Frequencies, And Antennas”, <https://science.jrank.org/pages/5659/Radio-Wavelengths-frequencies-antennas.html> (pristupljeno ruj. 2. 2021.)
- [12] A. Mahamdi, S. Benkouda, S. Aris, T. A. Denidni - „Resonant Frequency and Bandwidth of Superconducting Microstrip Antenna Fed through a Slot Cut into the Ground Plane”, *Electronics* 2021, str. 3., sij. 2021.
- [13] „Types of Long-wire Antennas”, <https://www.mobilemark.com/about/faq/what-is-meant-by-the-vswr-of-an-antenna/> (pristupljeno ruj. 10. 2021.)
- [14] „Glass Epoxy (G10, FR4) Characteristics”, <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/glass-epoxy/> (pristupljeno ruj. 2. 2021.)
- [15] „RO3003™ Laminates”, <https://rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro3000-series-laminates/ro3003-laminates> (pristupljeno ruj. 2. 2021.)

## SAŽETAK

Ovaj rad bavi se simulacijom različitih modela loksodromske antene za frekvencijsko područje od 1 do 3 GHz unutar programskog paketa HFSS, u svrhu istraživanja svojstava ove vrste antene. Unutar simulacije promatrali su se: dijagram zračenja, koeficijent refleksije  $S_{11}$ , VSWR, dobitak te ulazna impedancija antene. Simulacije su prvo provedene na šest različitih modela bez jezgre, gdje su antene manjeg promjera na zadanom frekvencijskom području pokazale bolje rezultate nego one većeg promjera. Nakon toga ispitan je utjecaj dielektrične jezgre na parametre antene, gdje se pokazalo da sve ispitane antene s jezgrom imaju bolje vrijednosti parametara nego one bez jezgre. Utvrđeno je da se s pravim odabirom materijala jezgre mogu dodatno optimizirati parametri antene. Ukratko je ispitana razlika između loksodromske i helikoidalne antene, gdje su prikazane sličnosti antena.

### Ključne riječi

loksodromska antena, dijagram zračenja, ulazna impedancija, dobitak,  $S_{11}$ , VSWR, dielektrična jezgra, helikoidalna antena, frekvencijsko područje, HFSS

## **ABSTRACT**

This paper deals with the simulation of different models of a loxodromic antenna for the frequency range from 1 to 3 GHz within the HFSS software package, in order to investigate the properties of this type of antenna. Within the simulation, the following were observed: radiation pattern, reflection coefficient  $S_{11}$ , VSWR, gain and antenna input impedance. The simulations were first performed on six different coreless models, where smaller diameter antennas in a given frequency range showed better results than larger diameter ones. After that, the influence of the dielectric core on the antenna parameters was examined, where it was shown that all tested antennas with a core have better parameter values than those without a core. It has been found that with the right choice of core material, the antenna parameters can be further optimized. The difference between a loxodromic and a helical antenna was briefly examined, where the similarities of the antennas are shown.

## **Keywords**

loxodromic antenna, radiation pattern, input impedance, gain,  $S_{11}$ , VSWR, dielectric core, helical antenna, frequency range, HFSS



## **ŽIVOTOPIS**

Dominik Gubo rođen je 18.12.1999. godine u Osijeku. Osnovnu školu pohađao je u Osnovnoj školi Augusta Šenoae u Osijeku. Nakon završene osnovne škole upisao je Strojarsku tehničku školu Osijek. Iste godine kada je završio i srednju školu - 2018., maturirao je te je upisao preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Na drugoj godini fakulteta opredijelio se na smjer komunikacije i informatika. Paralelno uz čitavo školovanje trenira boks u kojem se natječe i ostvaruje vrhunske rezultate.

## **PRILOG: Rezultati simulacija i modeli**

Korišteni rezultati i modeli simulacija nalaze se na CD-u koji je priložen uz ovaj rad.