

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Davorin Mikulić i Evita Šopp

**Konstrukcija tekstilne antene za
senzorske sustave u blizini ljudskog tijela**

Zagreb, 2021.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za komunikacijske i svemirske tehnologije (bivši Zavod za radiokomunikacije) na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu pod vodstvom prof. dr. sc. Zvonimira Šipuša i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2020./2021.

POPIS KRATICA

3D 3 Dimensional

AF Array Factor

CNC Computerized Numerical Control

IoT Internet of Things

ISM Industrial, Scientific and Medical

LWA Leaky Wave Antenna

PEC Perfect Electric Conductor

RFID Radio-frequency identification

SAR Specific Absorption Rate

TE Transverse Electric

TEM Transverse Electromagnetic

TM Transverse Magnetic

VNA Vector Network Analyzer

Wi-Fi Wireless Fidelity

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Pravokutni valovod	2
2.1. Dizajn tekstilnog valovoda	3
2.2. Mjerenja gubitaka valovoda	5
3. Valovodna antena s prorezima	9
3.1. Impedancija i admitancija proreza	10
3.2. Dizajn tekstilne valovodne antene s prorezima	14
3.3. Dizajn aluminijske valovodne antene s prorezima	20
3.4. Mjerni postav	25
3.5. Izrada aluminijske valovodne antene s prorezima	27
3.6. Izrada tekstilne valovodne antene s prorezima	33
3.7. Gubitci tekstilne antene	39
4. Simulacija zračenja valovodne tekstilne antene u blizini ljudskog tijela	42
5. Poboljšanja i daljnja istraživanja	49
6. Zaključak	51
Zahvale	52
Literatura	53
Popis slika	55
Popis tablica	58

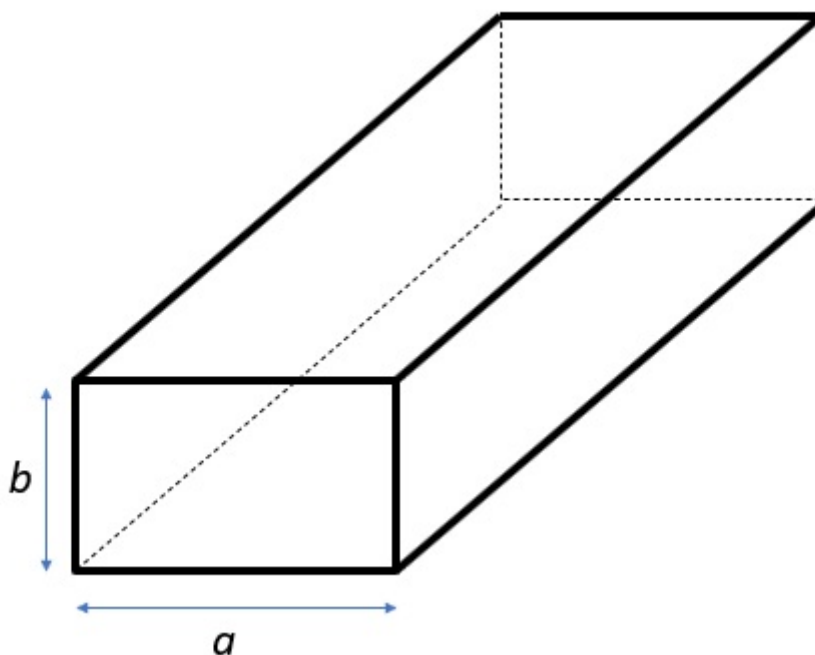
1. Uvod

U zadnjih nekoliko godina vidljiv je povećan interes znanstvene zajednice za izradu fleksibilnih tekstilnih antena koje je moguće nositi u svrhu integracije komunikacijskog ili biomedicinskog senzorskog sustava u odjeću. Primjene tako izrađene antene nalaze se u područjima medicine, industrije, vojne tehnologije, sporta i rekreacije. Osnovni zahtjevi koji se postavljaju za takvu antenu jesu: fleksibilnost, kompaktnost, otpornost na mehaničke udarce i struganja, mogućnost pranja odjeće bez oštećivanja antene te na kraju estetski izgled i cijena [1]. Osim osiguravanja trajnosti tkanine treba osigurati i trajnost električnog kontakta te on također treba biti otporan na mehanička naprezanja [2], a pritom i osigurati dobro prilagođenje antene. Pomoću nosivih i integriranih tekstilnih antena moguće je povezati senzore koji nadziru zdravlje ili napredak pri vježbanju s IoT tehnologijom (eng. Internet of Things) ili RFID (eng. Radio-frequency Identification) sustavima [3]. Također, nosive tekstilne ili patch antene mogu se koristiti za stalni nadzor pacijenata tijekom postavljanja dijagonze ili nadgledanja stanja pacijenta nakon operacijskog zahvata [4]. Ideja je smjestiti antenu na remen ili tregere napravljene od nekog materijala poput traperu kako bi se elektromagnetskom energijom hranio neki senzorski sustav unutar ljudskog tijela ili pak neki senzor komunicirao s pristupnom točkom (eng. Access Point) u prostoriji. Takve nosive integrirane antene, namijenjene za ugradnju u ili na odjeću, stvaraju pametnu odjeću (eng. Smart Clothes) [5].

Pravokutni valovod elektromagnetska je struktura dobro znanih prednosti i karakteristika od koje je moguće lako napraviti antenski niz sa solidnim dobitkom i malim unesenim gubitcima. Fokus ovoga rada jest izrada tekstilne valovodne antene s prorezima čije će karakteristike biti uspoređene s antenom istih dimenzija napravljene od aluminijske te razmatranje utjecaja zračenja obje antene na ljudsko tijelo. Prije izrade antena bit će potrebno odrediti gubitke tekstilnog valovoda i usporediti ih sa standardnim metalnim valovodom kako bi se pokazala opravdanost izrade antene u takvoj tehnologiji.

2. Pravokutni valovod

Pravokutni valovod predstavlja šuplju cijev pravokutnog oblika vrlo dobro vodljivih stijenki između kojih su sačuvana električna i magnetska polja tako da se energija ne gubi zračenjem. U stvarnosti se zbog stalnog protoka struja po stijenkama valovoda dio energije pretvara u toplinu, ali valovod i dalje predstavlja elektromagnetsku strukturu koja ima najmanje gubitke prilikom vođenja energije. Skica pravokutnog valovoda prikazana je na slici 2.1. Valovode bi bilo poželjno izrađivati i na nižim frekvencijama te ih koristiti u distribuciji električne energije, ali na tako niskim frekvencijama, zbog uvjeta da duljina stranice presjeka valovoda mora biti barem pola valne duljine, bili bi preveliki i ekonomski potpuno neisplativi za izgradnju [6]. Rješenja Maxwellovih valnih jednačbi za geometriju pravokutnog valovoda daju da unutar valovoda mogu postojati samo TE (eng. transverse electric) i TM (eng. transverse magnetic) modovi, što pokazuje da se val unutar valovoda širi refleksijom od stijenaka, a kako rubni uvjet mora biti zadovoljen, TEM (eng. transverse electromagnetic) mod unutar valovoda ne može postojati. Svakom određenom modu odgovara određena



Slika 2.1: Skica pravokutnog valovoda

distribucija elektromagnetskog polja, koja zadovoljava Maxwellove valne jednažbe te svaki mod ima određenu frekvenciju (tzv. zaporna frekvencija) ispod koje se elektromagnetska energija neće voditi, već će postojati samo evanescentna polja [7]. Tako se za valovod s dimenzijama otvora a i b definira zaporna frekvencija za TE_{mn} mod kao:

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\varepsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}. \quad (2.1)$$

Propagacijska konstanta β tada iznosi:

$$\beta = \omega\sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}. \quad (2.2)$$

Gušenje u valovodu opisuje se prigušnom konstantom α , a longitudinalna valna duljina dana je sa:

$$\lambda_v = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}. \quad (2.3)$$

Fazna i grupna brzina dane su redom sa:

$$v_f = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}, \quad (2.4)$$

$$v_g = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}. \quad (2.5)$$

Konačno, impedancija za TE mod dana je sa:

$$Z_{TE} = \frac{\omega\mu}{\beta}. \quad (2.6)$$

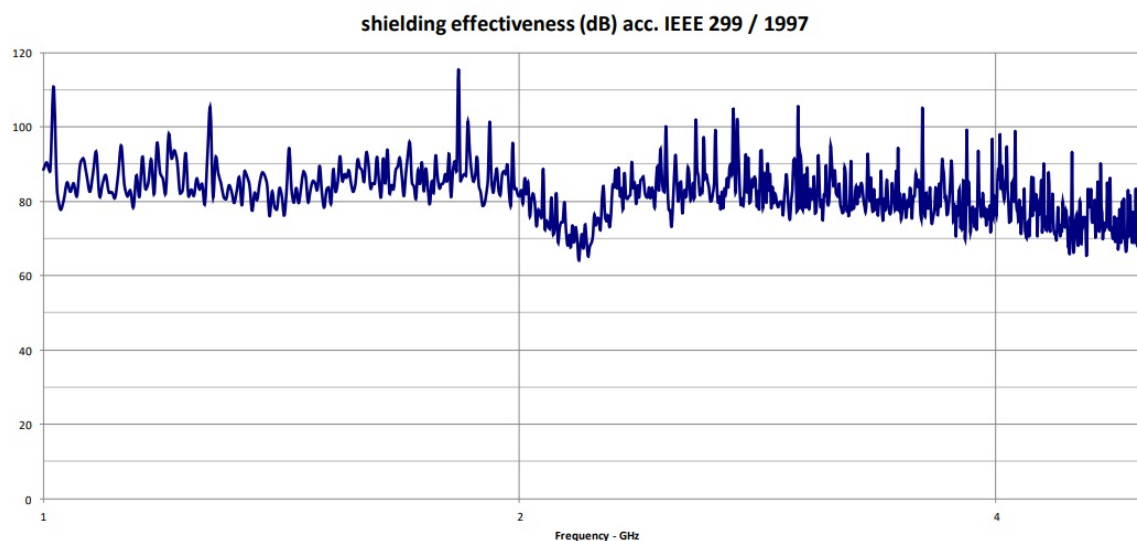
Ovim formulama sveden je složeni koncept valovoda na jednostavniji koncept prijenosne linije.

2.1. Dizajn tekstilnog valovoda

Tekstilni valovod izrađen je namotavanjem vodljive tkanine oko pravokutnog komada stiropora te su rubovi tkanine spojeni vodljivom ljepljivom trakom. Krajevi valovoda umetnuti su u WG14 prirubnicu kako bi valovod kasnije mogao biti spojen na analizator mreža. Sve pukotine prema prirubnici također su oblijepljene vodljivom trakom kako bi se smanjilo curenje energije. Konačne dimenzije izrađenog valovoda iznose $a = 35$ mm, $b = 16$ mm te duljina valovoda $d = 966$ mm. To daje frekvencije rada ovog valovoda 5.85 GHz - 8.2 GHz u kojem će rasponu biti mjereni gubitci. Tehničke specifikacije tkanine Shieldex®Nora Dell No.: 1401101S80 korištene za izradu tekstilnog valovoda dane su tablicom 2.1 i slikom 2.2. Izrađeni tekstilni valovod prikazan je na slici 2.3. Slikom 2.4 prikazan je kvalitetan čvrsti valovod dimenzija $a = 58$ mm i $b = 29$ mm kojem će biti mjereni gubitci u području 3.3 GHz - 4.9 GHz i uspoređeni s tekstilnim.

Tablica 2.1: Specifikacije vodljive tkanine

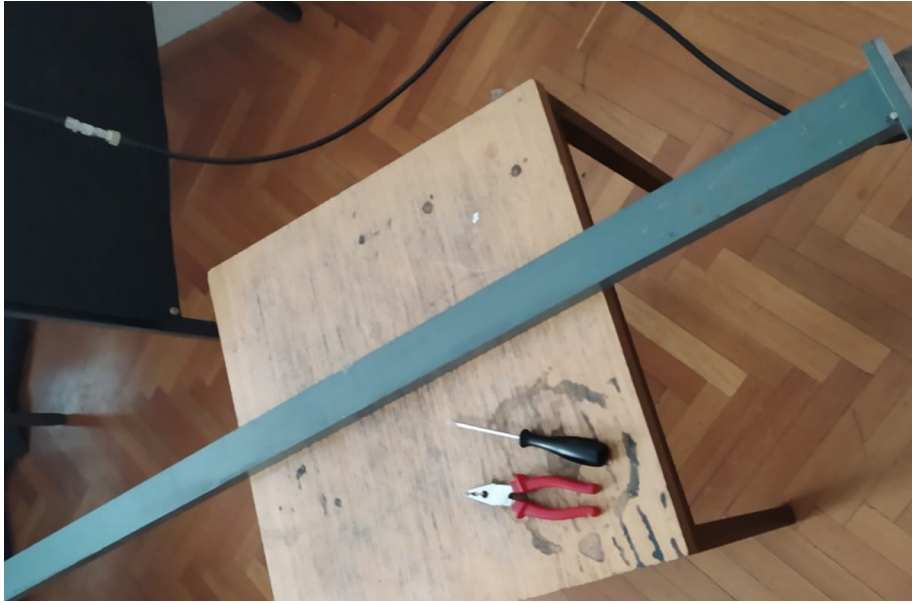
Description	Ni/Cu/Ag plated polyamide fabric (RS or PW)
Surface resistivity	Average $0.009 \Omega/\square$
Shielding effectiveness	Average up to 95 dB from 300 MHz to 10 GHz
Temperature Range	-30 °C to 90 °C
Storage / Handling	According to our care and handling instructions
Total Thickness	$0.125 \text{ mm} \pm 15 \%$
Weight	$100 \text{ g/m}^2 \pm 15 \%$
Roll Width	$132 \text{ cm} \pm 4 \text{ cm}$
Roll Length	Average 200 m



Slika 2.2: Efikasnost oklapanja vodljive tkanine



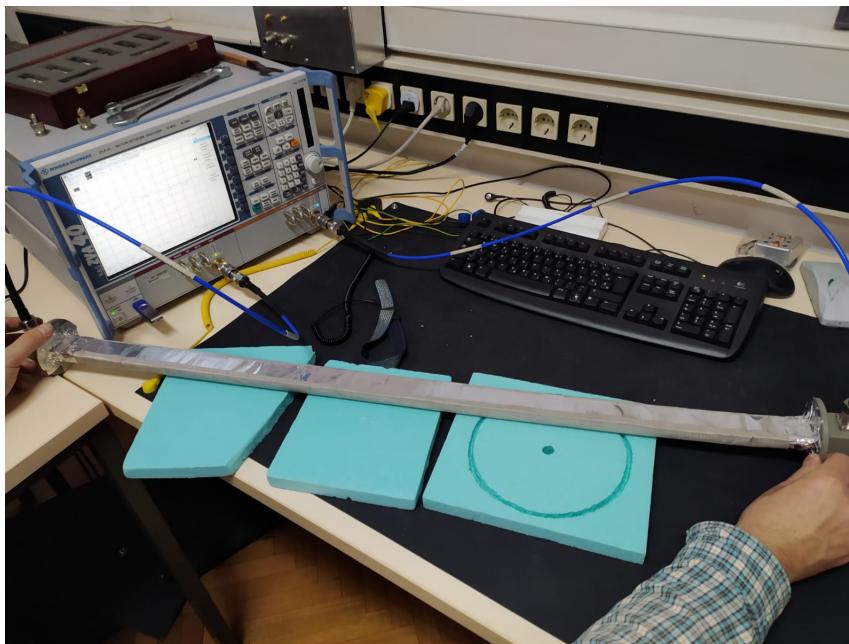
Slika 2.3: Tekstilni valovod



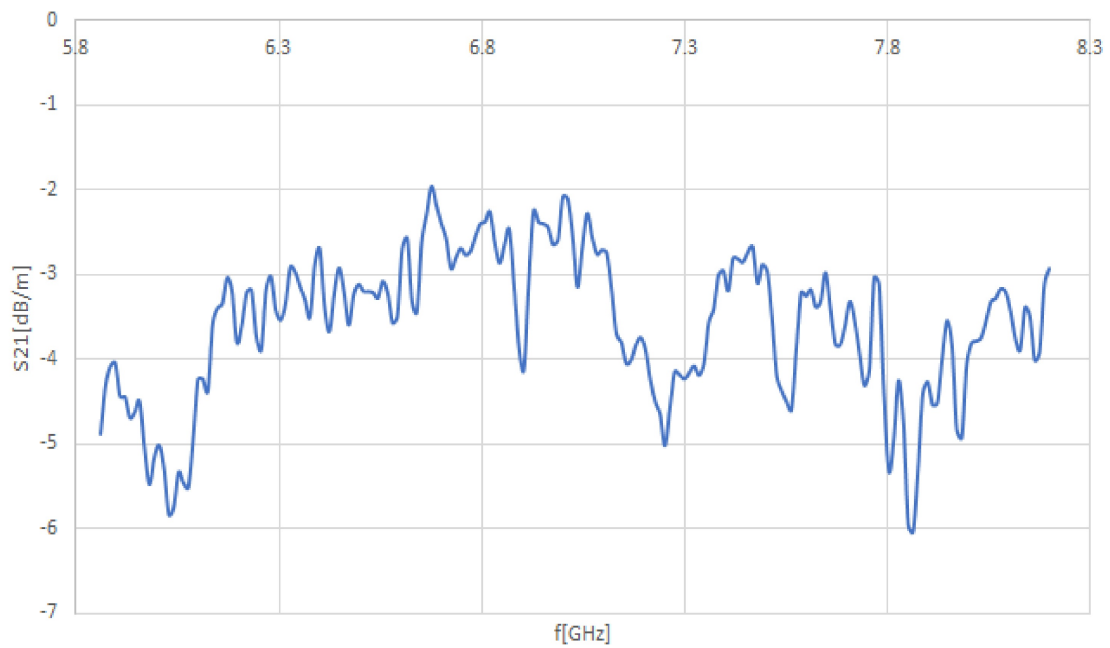
Slika 2.4: Kvalitetan čvrsti valovod

2.2. Mjerenja gubitaka valovoda

Prije spajanja valovoda na analizator mreža obavljena je kalibracija instrumenta metodom tri poznata tereta (otvoreni kraj, kratki spoj i prilagođeni teret) koja uzima u obzir gubitke i refleksije u spojnim kablovima i konektorima kao i fazna kašnjenja. Nakon spajanja mjereni su parametri S_{11} i S_{21} , dakle odnos reflektirane i incidentne snage na ulazu te odnos snaga na izlazu i ulazu. Postupak mjerenja pokazan je slikom 2.5.

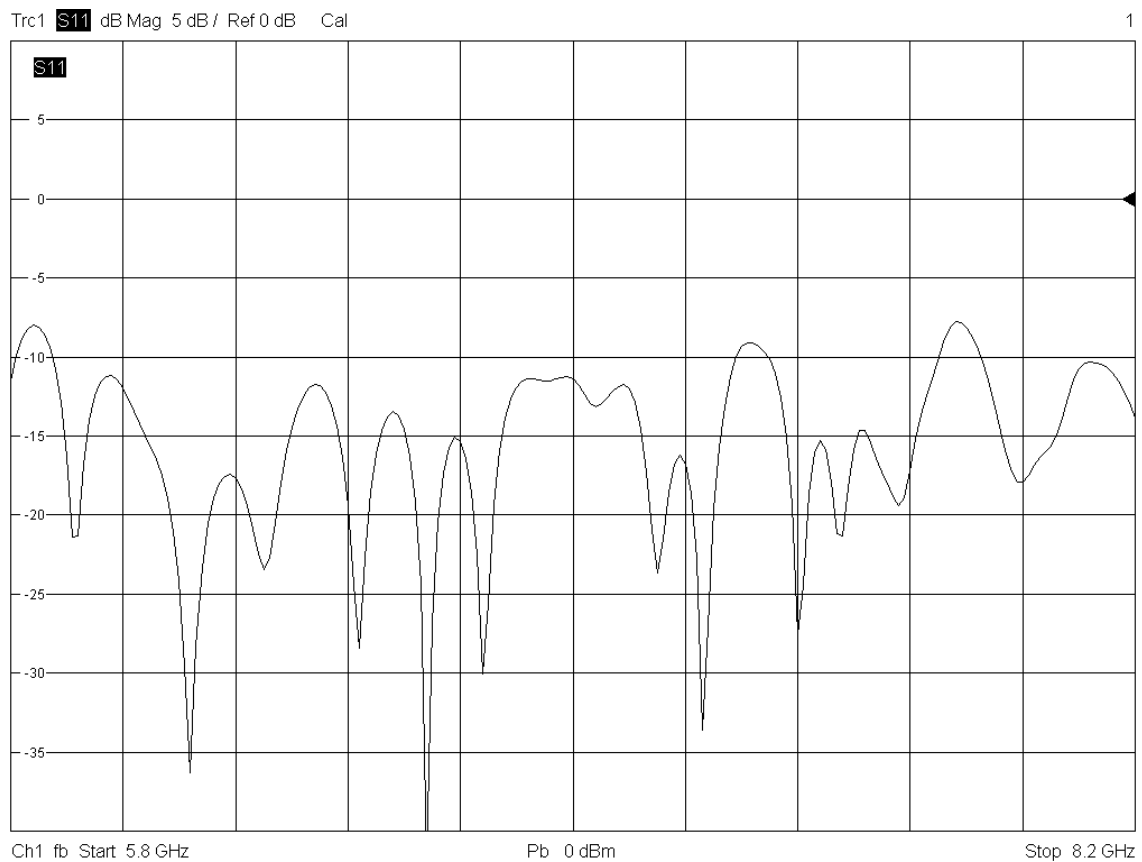


Slika 2.5: Mjerenje gubitaka



Slika 2.6: S_{21} parametar tekstilnog valovoda

Slikom 2.6 dan je S_{21} parametar tekstilnog valovoda.



Slika 2.7: S_{11} parametar tekstilnog valovoda

Slikom 2.7 dan je S_{11} parametar tekstilnog valovoda i kako se radi o simetričnoj mreži

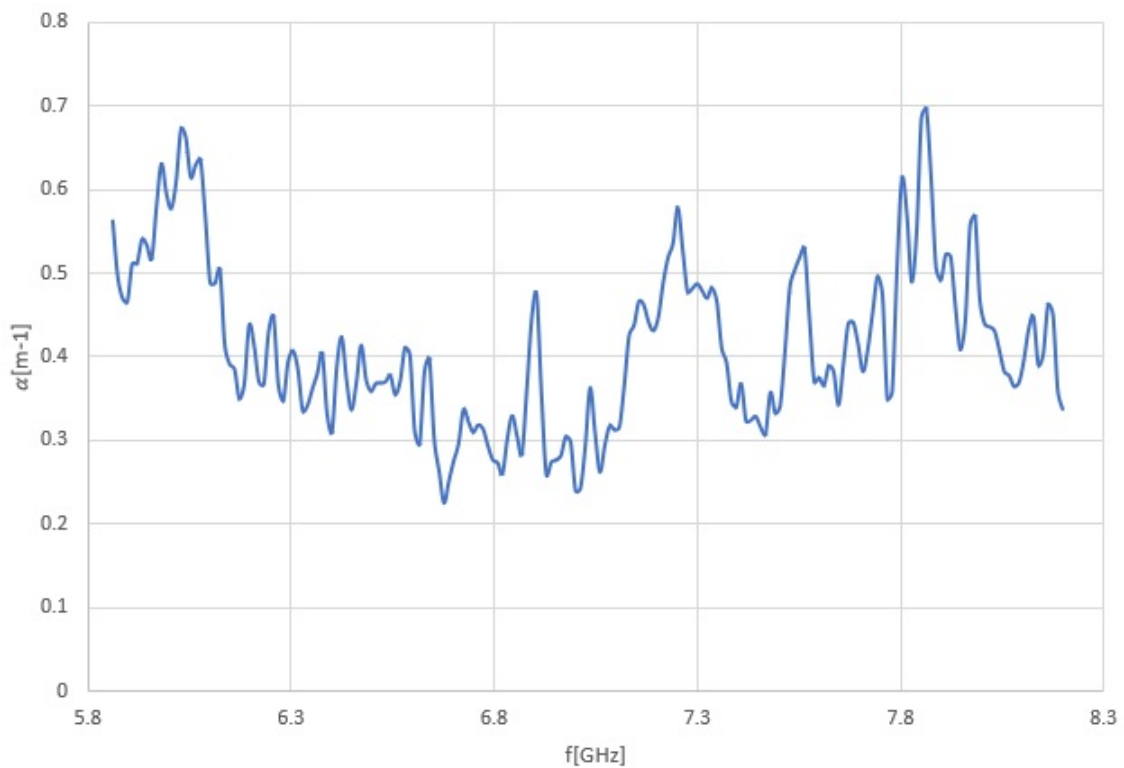
te kako je on na većini frekventijskog područja ispod -10 dB, tekstilni valovod smatramo prilagođenim i na ulazu i na izlazu. Kako vrijedi jednadžba:

$$P_{izl} = P_{ul}e^{-2\alpha d}, \quad (2.7)$$

pri čemu je je P_{izl} snaga na izlazu valovoda, a P_{ul} snaga na ulazu valovoda te α prigušna konstanta i d duljina valovoda, slijedi izraz:

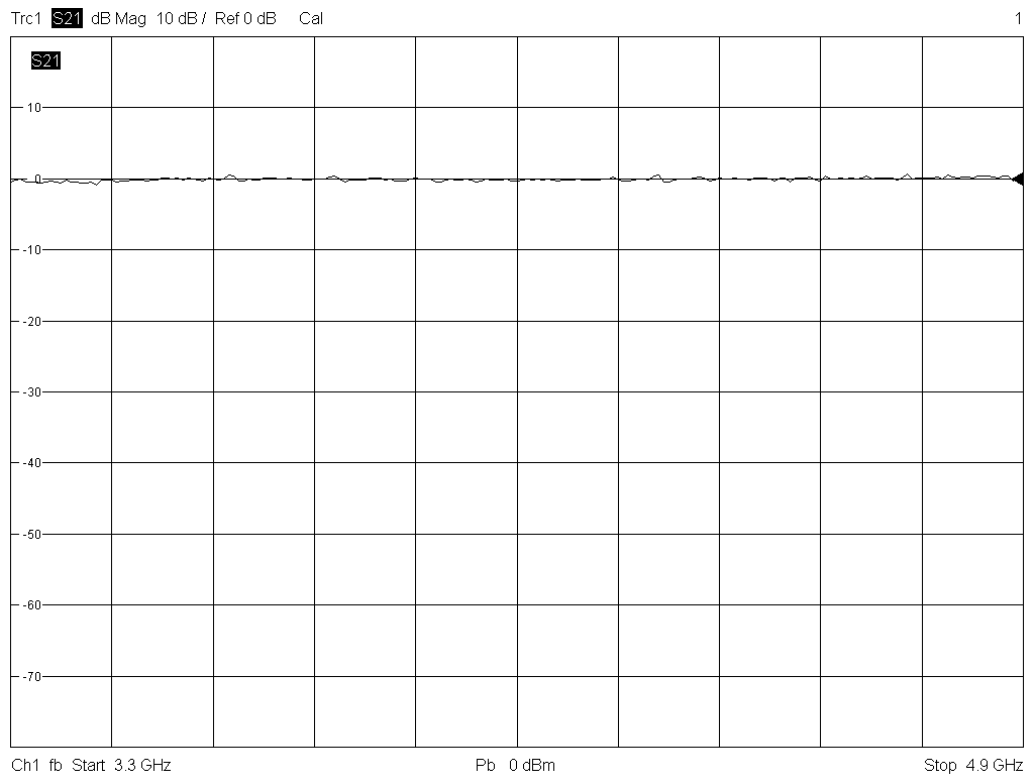
$$\alpha = \frac{-S_{21}}{20d \log e} \quad (2.8)$$

u kojem se S_{21} uvrštava u dB. Prema gornjoj relaciji računa se parametar α prikazan na slici 2.8.



Slika 2.8: Prigušna konstanta α tekstilnog valovoda

Slikom 2.9 prikazan je S_{21} parametar kvalitetnog čvrstog valovoda po kojem se vidi da valovod praktički nema gubitaka pa se može uzeti $\alpha \approx 0$.

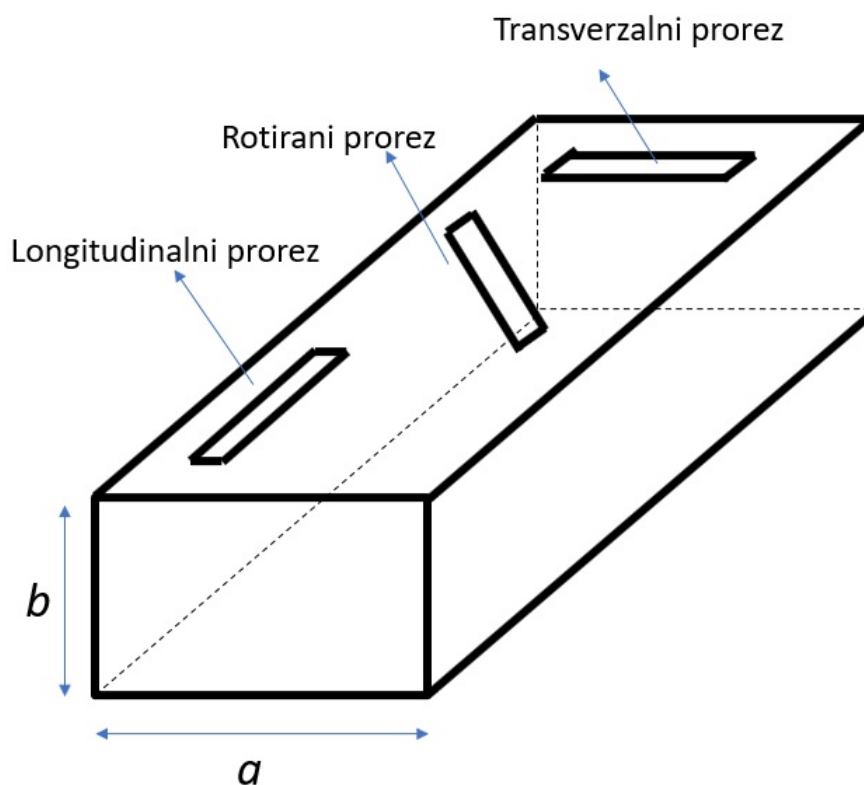


Slika 2.9: S_{21} parametar kvalitetnog čvrstog valovoda

Iz slika 2.6 – 2.8 vidljivo je kako bi tekstilnu antenu bilo najbolje projektirati u pojasu oko 6 GHz zbog najmanjih gubitaka. S obzirom da je površinski otpor korištene vodljive tkanine samo $0.009\Omega/\square$, bitno je naglasiti da su gubici ponajprije nastali zbog nesavršenosti geometrije tekstilnog valovoda, što se pažljivijom i spretnijom izradom može popraviti. Mali površinski otpor tkanine minimizira električne gubitke i povećava efikasnost, a time i dobitak antene koja će biti projektirana [8]. Antena će također biti dosta kraća od 1 m pa gubici neće toliko doći do izražaja.

3. Valovodna antena s prorezima

U današnje doba koristi se niz antena koji se služe otvorom kao izvorom zračenja. Otvor tada najčešće ima oblik kružnice ili pravokutnika, a u takav tip izvora zračenja ubrajaju se otvoreni valovod, lijevak-antena te antena s prorezima koja je predmet dizajna. Za takvu antenu bit će zanimljiv otvor pravokutnog oblika, ne dulji od pola valne duljine, kojemu je širina puno manja od duljine. Smatra se da je jakost polja po površini otvora sinusoidalna te da su sve točke istofazne. Kako je prorez redovito male efektivne površine, vrlo često se slažu antenski nizovi na valovodu sačinjeni od puno manjih proreza kako bi se ostvario željeni dijagram zračenja i dobitak. Da bi prorez zračio, treba voditi računa da presijeca površinske struje na unutrašnjoj stijenci valovoda. Tada će, ovisno o položaju, prorez zračiti manje ili više [9]. S obzirom na položaj razlikujemo longitudinalni, transverzalni i zarotirani prorez koji su prikazani slikom 3.1.

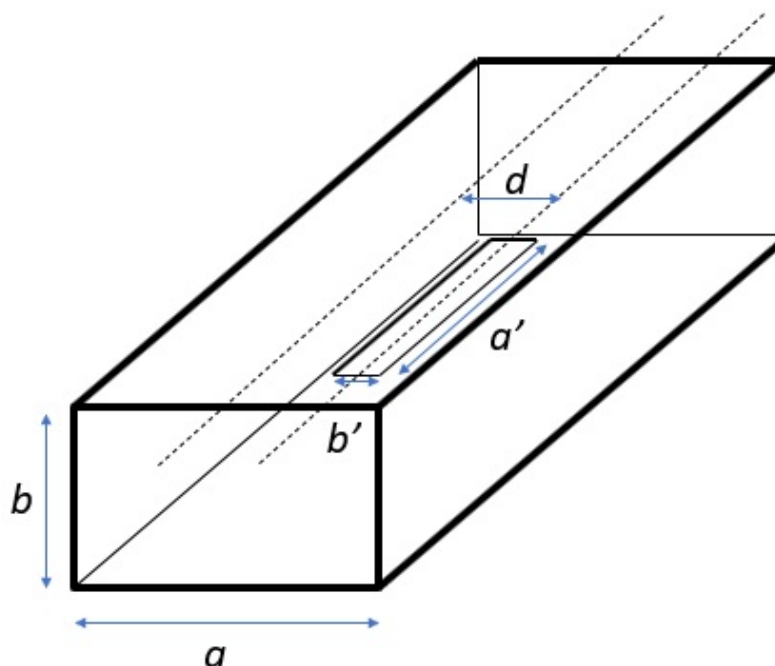


Slika 3.1: Prorezi na valovodu

Rotirani prorezi na bočnoj stranici, kao i longitudinalni prorezi na čeonj stranici, inače se koriste u brodskim radar-antenama [9]. U nastavku rada bit će obrađena problematika impedancije prorez-antene te dan dizajn valovodne prorez-antene s tri proreza od aluminijskog vodljivog tekstila.

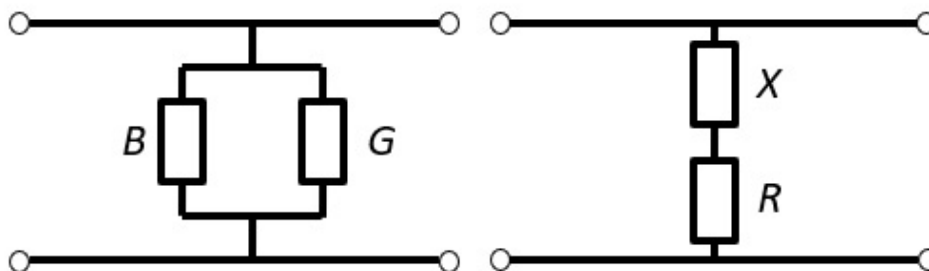
3.1. Impedancija i admitancija proreza

Kao prvi korak u dizajnu željene antene razmatrala se impedancija longitudinalnog proreza na beskonačno tankom valovodu dimenzija sa slike 3.2.



Slika 3.2: Longitudinalni prorez na valovodu

Prema [10], [11] izvedeni su nešto složeniji izrazi pomoću kojih je moguće odrediti ovisnosti impedancije (i admitancije) proreza o duljini proreza, za nadomjesne sheme proreza prikazane slikom 3.3.



Slika 3.3: Nadomjesna shema admitancije i impedancije za longitudinalni prorez

Tako će vrijediti jednažbe:

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{R}{Z_0} + j \frac{X}{Z_0} \quad (3.1)$$

$$\frac{Y}{Y_0} = \frac{G}{Y_0} + j \frac{B}{Y_0} \quad (3.2)$$

U gornjim jednažbama realni dio impedancije zapravo predstavlja izračenu snagu, a imaginarni uskladištenu. Slijede izrazi [10], [11]:

$$\frac{R}{Z_0} = \frac{8\pi a^3 b}{3\lambda^3 \lambda_g} \frac{\left[1 - \left(\frac{2a'}{\lambda_g}\right)^2\right]^2 \left[1 - 0.374 \left(\frac{a'}{\lambda}\right)^2 + 0.130 \left(\frac{a'}{\lambda}\right)^4\right]}{\sin^2\left(\frac{\pi d}{a}\right) \cos^2\left(\frac{\pi a'}{\lambda_g}\right)} \quad (3.3)$$

$$\frac{X}{Z_0} = \frac{B_c}{Y_0} V_{sh}^2 \quad (3.4)$$

$$\frac{G}{Y_0} = \frac{\frac{R}{Z_0}}{\left(\frac{R}{Z_0}\right)^2 + \left(\frac{X}{Z_0}\right)^2} \quad (3.5)$$

$$\frac{B}{Y_0} = \frac{-\frac{X}{Z_0}}{\left(\frac{R}{Z_0}\right)^2 + \left(\frac{X}{Z_0}\right)^2} \quad (3.6)$$

Pri tome je:

$$V_{sh} = \left(\frac{2a}{\lambda_g}\right) \left[\frac{\cos \frac{\pi a'}{2a} \left[1 - \left(\frac{2a'}{\lambda_g}\right)^2\right]}{\cos \frac{\pi a'}{\lambda_g} \left[1 - \left(\frac{a'}{a}\right)^2\right]} \right] \csc \frac{\pi d}{a} \quad (3.7)$$

$$\frac{B_c}{Y_0} = \frac{1}{2} \frac{B_t}{Y_0} + \frac{1}{n_j^2} \frac{B_{rj}}{Y_0} + \frac{2b}{\lambda g} \left[\ln 2 + \frac{\pi b'}{6b} + \frac{3}{2} \left(\frac{b}{\lambda_g}\right)^2 \right] \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{B_t}{Y_0} = \frac{4b}{\lambda_g} & \left[\ln \csc \frac{\pi b'}{2b} + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{\lambda_g}\right)^2 \cos^4\left(\frac{\pi b'}{2b}\right) \right] \\ & - \frac{4b}{\lambda_g} \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_{g3}}\right)^2 \left[\frac{\cos \frac{3\pi a'}{2a}}{\cos \frac{\pi a'}{2a}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{a'}{a}\right)^2}{1 - 9 \left(\frac{a'}{a}\right)^2} \right]^2 \\ & \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi b'}{2\lambda_{g3}}\right)^2 \right] \ln \left(\frac{4 \lambda_{g3}}{\pi \gamma b'}\right) \quad (3.9) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{n_j^2} = \frac{ab}{a'b'} \left[\frac{\pi}{4} \frac{1 - \left(\frac{a'}{a}\right)^2}{\cos\left(\frac{\pi a'}{2a}\right)} \right]^2 \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{B_{rj}}{Y_0} = \frac{2b\lambda_g}{\lambda^2} & \left\{ \left(\frac{\kappa'}{k}\right)^2 \left[C + \frac{3}{2} - \ln \frac{\gamma |\kappa'| b'}{2} \right] + \frac{\sin ka'}{ka'} \right. \\ & \left. + \left[1 + \left(\frac{\lambda}{2a'}\right)^2 \right] (S_-) - \frac{2b'}{3a'} \left(\frac{\lambda}{2a'}\right)^2 \right\} \quad (3.11) \end{aligned}$$

U kojima su:

$$\kappa' = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a'}\right)^2}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.12)$$

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \quad (3.13)$$

$$\frac{Y'_0}{Y_0} = \frac{\kappa'}{k} \quad (3.14)$$

$$\gamma = 1.781 \quad (3.15)$$

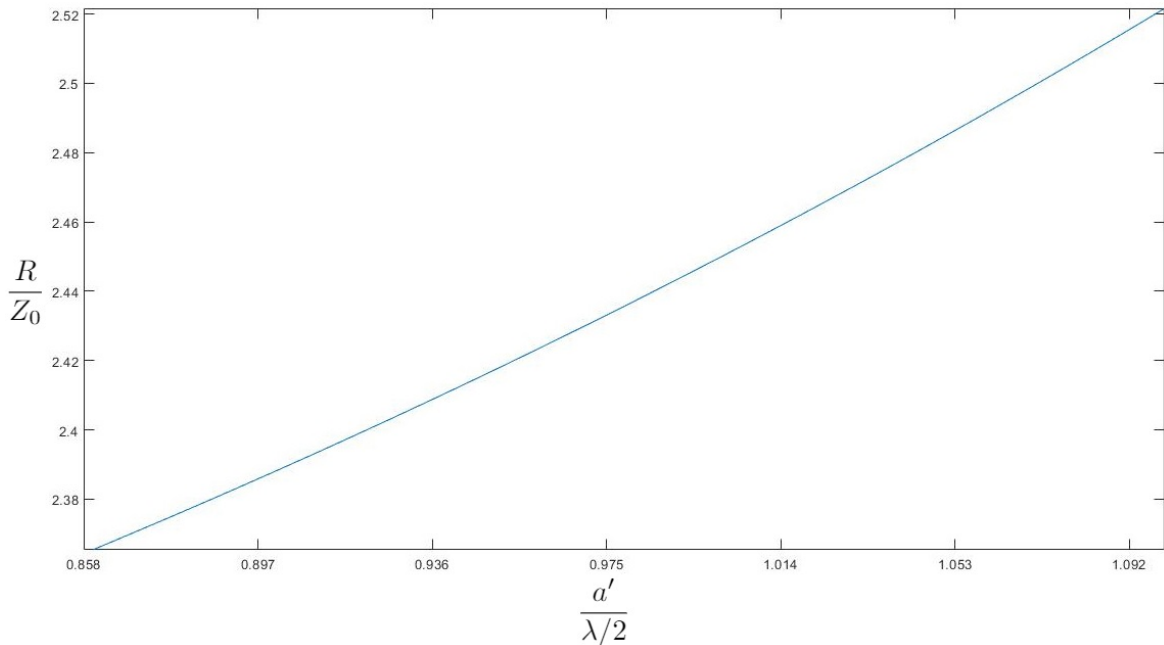
$$\lambda_{g3} = \left| \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{3\lambda}{2a}\right)^2}} \right| \quad (3.16)$$

$$C = \frac{Ci(ka' + \pi) + Ci|ka' - \pi|}{2} \quad (3.17)$$

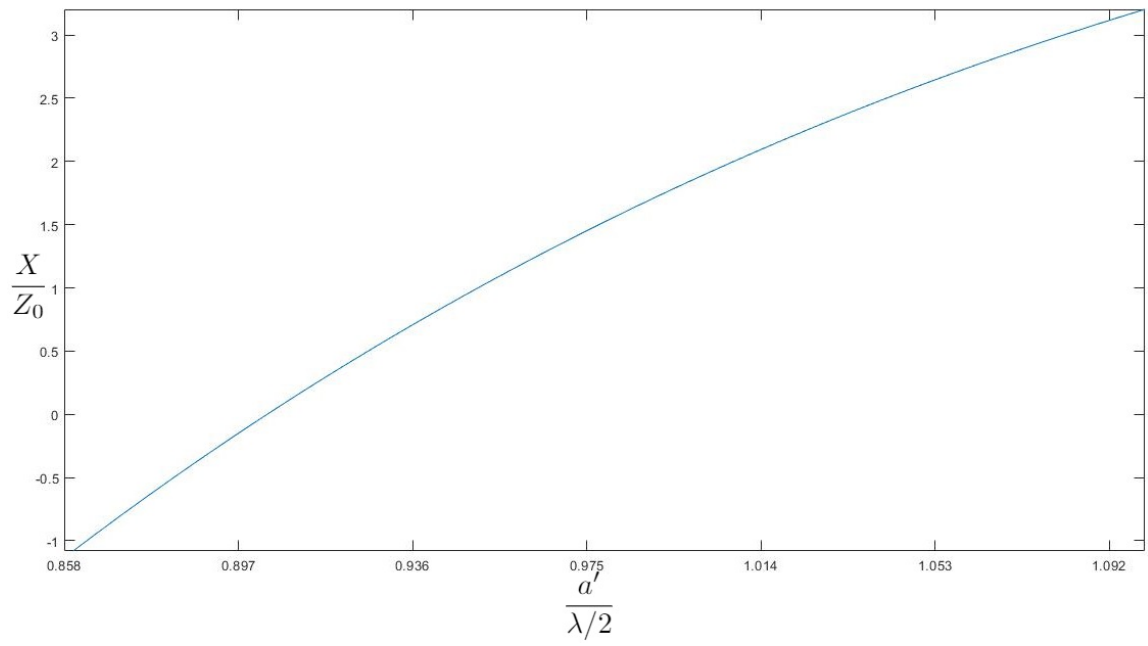
$$S_- = \frac{Si(ka' + \pi) - Si(ka' - \pi)}{2\pi} \quad (3.18)$$

$$Si(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt, \quad Ci(x) = \int_{\infty}^x \frac{\cos t}{t} dt \quad (3.19)$$

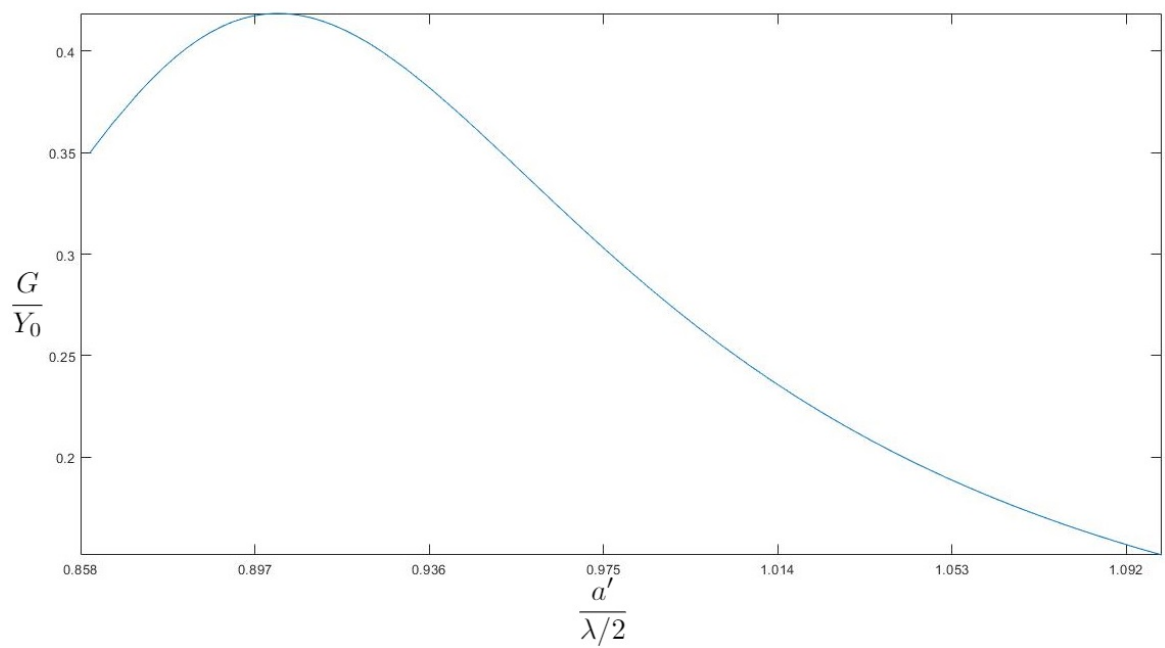
Za beskonačno tanki valovod dimenzija $a = 34.8488$ mm i $b = 15.7988$ mm (WG14 standard) te dimenzija proreza $b' = 6$ mm i $d = 5.8666$ mm na frekvenciji 5.85 GHz prema gornjim izrazima, dobivena je ovisnost impedancije (admitancije) o parametrima proreza na slikama 3.4, 3.5, 3.6 i 3.7. Pri tome je za izračun korišten programski paket MATLAB.



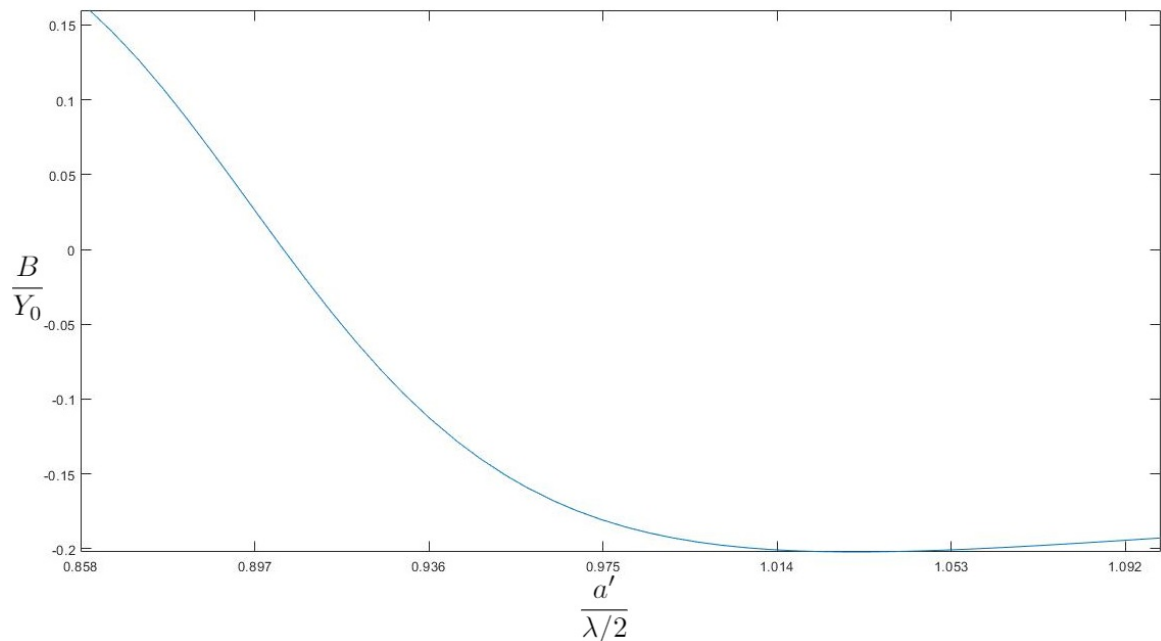
Slika 3.4: Otpor nadomjesne sheme longitudinalnog proreza



Slika 3.5: Reaktancija nadomjesne sheme longitudinalnog proreza



Slika 3.6: Vodljivost nadomjesne sheme longitudinalnog proreza



Slika 3.7: Susceptancija nadomjesne sheme longitudinalnog proreza

Iz slika 3.4–3.7 vidljivo je kako je za duljine proreza malo ispod $\frac{\lambda}{2}$ postignuta rezonancija pa će optimizacije pri dizajniranju antena biti provedene oko pola valne duljine kako bi se postigli željeni parametri antene.

3.2. Dizajn tekstilne valovodne antene s prorezima

Kreiran je model antenskog niza u programskom paketu CST Studio Suite 2021. Sam valovod napravljen je od beskonačno tankog PEC-a (eng. Perfect Electric Conductor) u koji su umetnuta tri pravokutna proreza širine $b' = 6$ mm te dimenzija valovoda $a = 34.8488$ mm i $b = 15.7988$ mm. Antena će imati samo jedan ulaz, a drugi kraj valovoda bit će zatvoren kratkim spojem. Kratki spoj će biti na razmaku od centra zadnjeg proreza od $\frac{3}{4}\lambda_v$ tako da reflektirani val konstruktivno interferira s incidentnim valovima na prorezu. Tada će taj razmak iznositi:

$$\frac{3}{4}\lambda_v = \frac{3}{4} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \approx 55 \text{ mm} \quad (3.20)$$

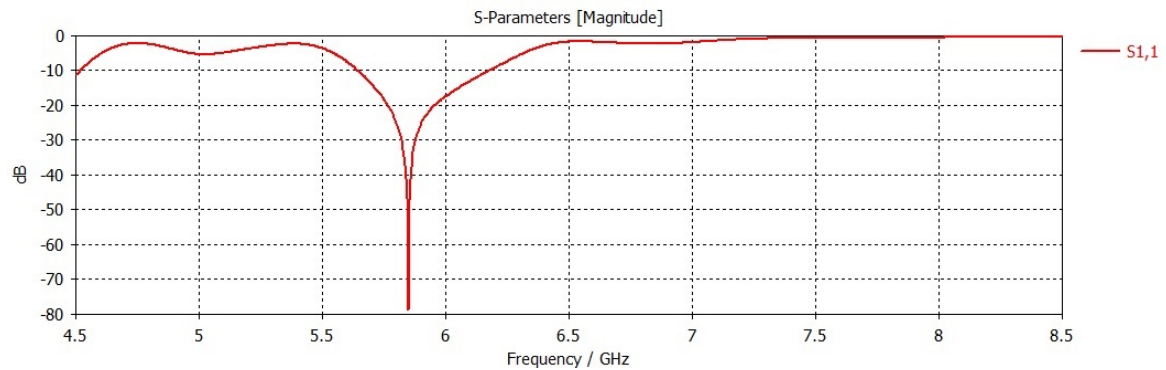
Na taj način od samo tri proreza dobiva se efektivno njih šest. Razmak između proreza iznositi će polovicu valne duljine u valovodu kako bi vektori električnih polja konstruktivno interferirali pa je razmak za prvi mod jednak:

$$\frac{1}{2}\lambda_v = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \approx 37 \text{ mm} \quad (3.21)$$

Kako se rezonancija proreza postiže za duljinu proreza oko 90% vrijednosti polovice valne duljine $\frac{\lambda}{2}$, početno je duljina proreza postavljena na:

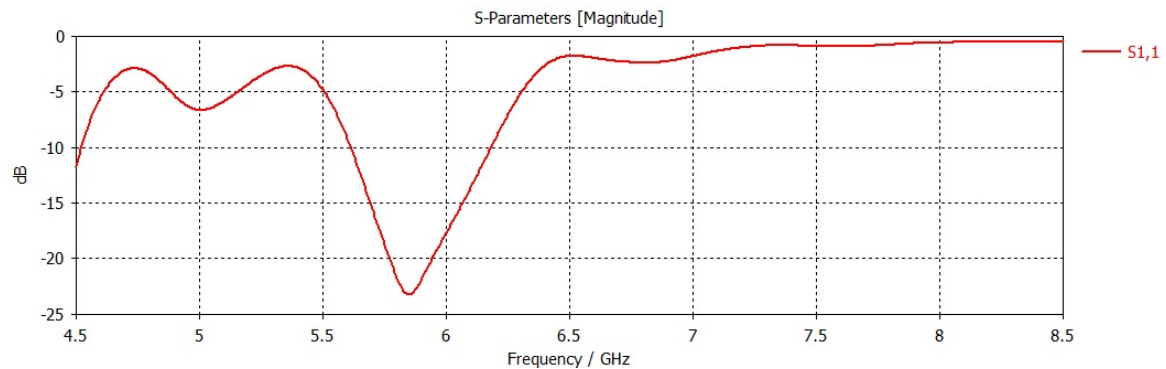
$$a' = 0.9 \cdot \frac{1}{2} \frac{c}{f} \approx 23 \text{ mm} \quad (3.22)$$

Pokrenuta je simulacija za maksimum prilagođenja antene na 5.85 GHz (minimalni S_{11}) te je dobiveno da su optimalne vrijednosti duljine proreza $a' = 23.51 \text{ mm}$ te pomaka od centra $d = 5.87 \text{ mm}$. Parametar S_{11} prikazan je slikom 3.8.

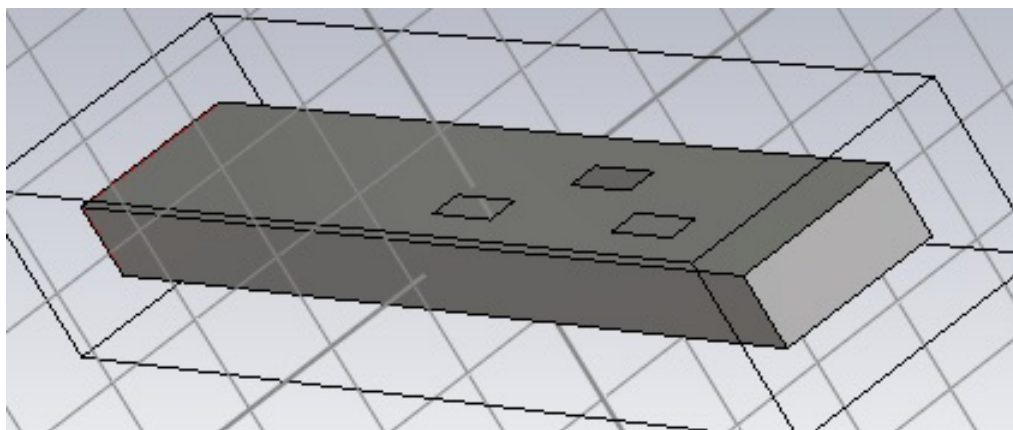


Slika 3.8: S_{11} parametar za optimiziranu tekstilnu antenu

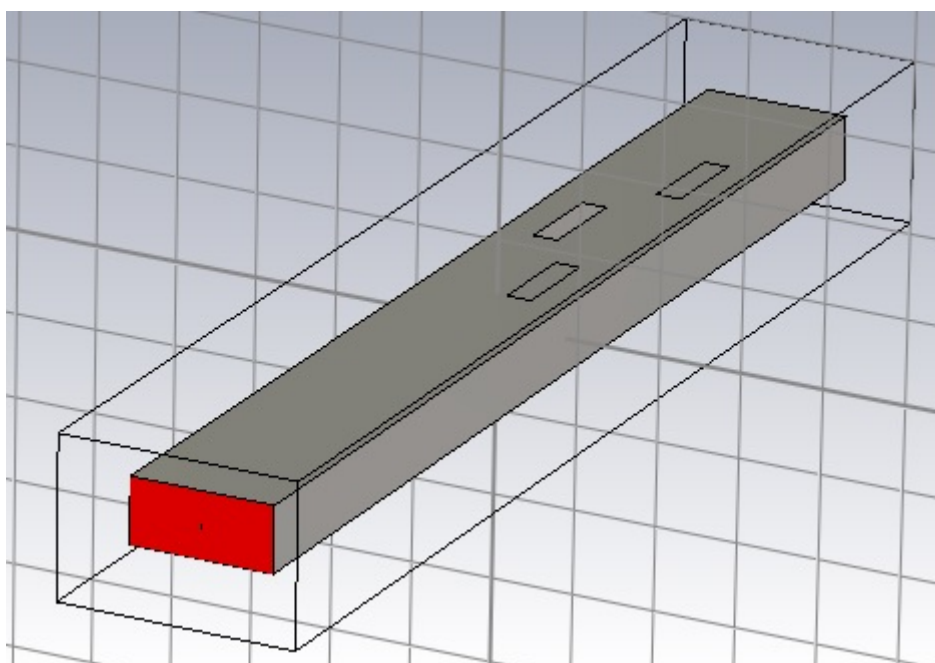
S obzirom da je ručno nemoguće tako precizno ugoditi navedene vrijednosti, dimenzije su zaokružene tako da je $a' = 24 \text{ mm}$ te $d = 6 \text{ mm}$. Tada je S_{11} parametar dan na slici 3.9 na kojoj se vidi da je antena i dalje dobro prilagođena.



Slika 3.9: Simulirani S_{11} parametar za tekstilnu antenu



Slika 3.10: Model tekstilne antene

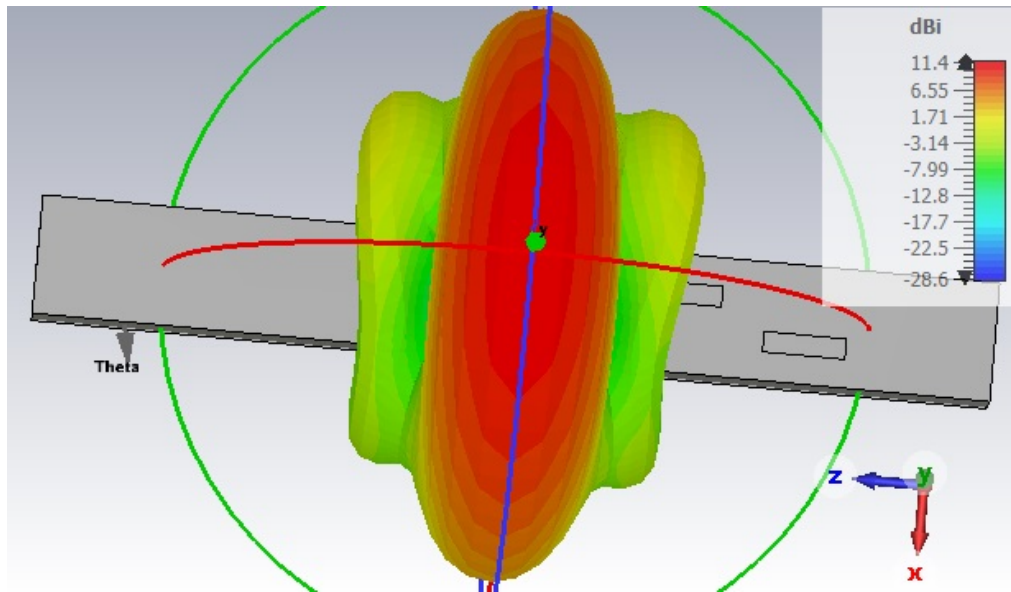


Slika 3.11: Model tekstilne antene

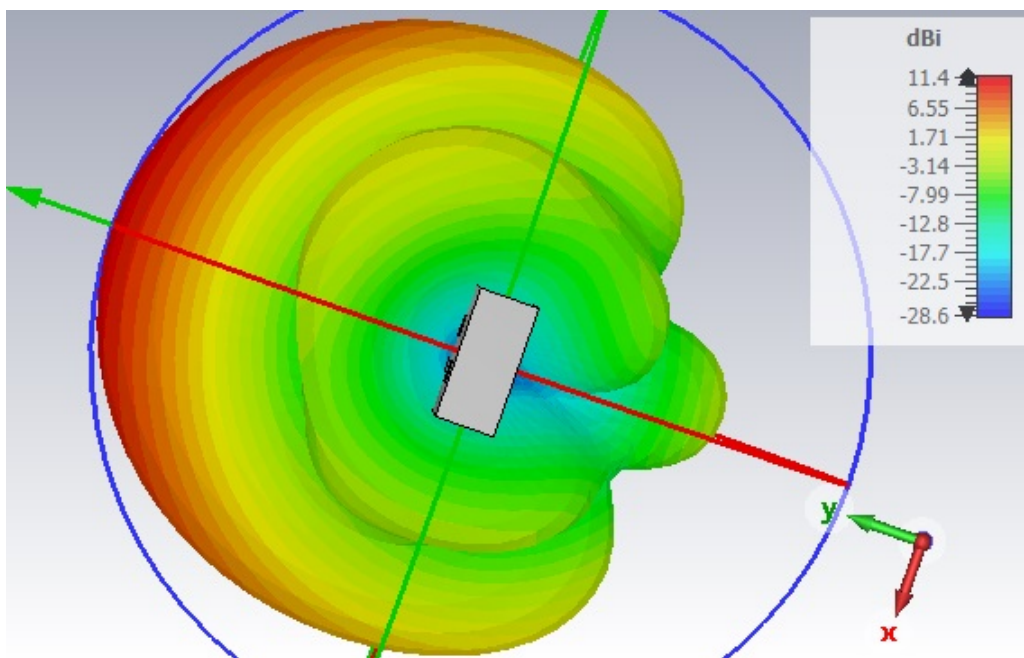
Slikama 3.10 i 3.11 prikazan je CST model tekstilne antene. Specifikacije simulirane tekstilne antene dane su tablicom 3.1. Trodimenzionalni (3D) dijagram zračenja dan je slikama 3.12 – 3.14. Slikom 3.15 i 3.16 dani su polarni dijagram zračenja i dijagram zračenja.

Tablica 3.1: Specifikacije simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz

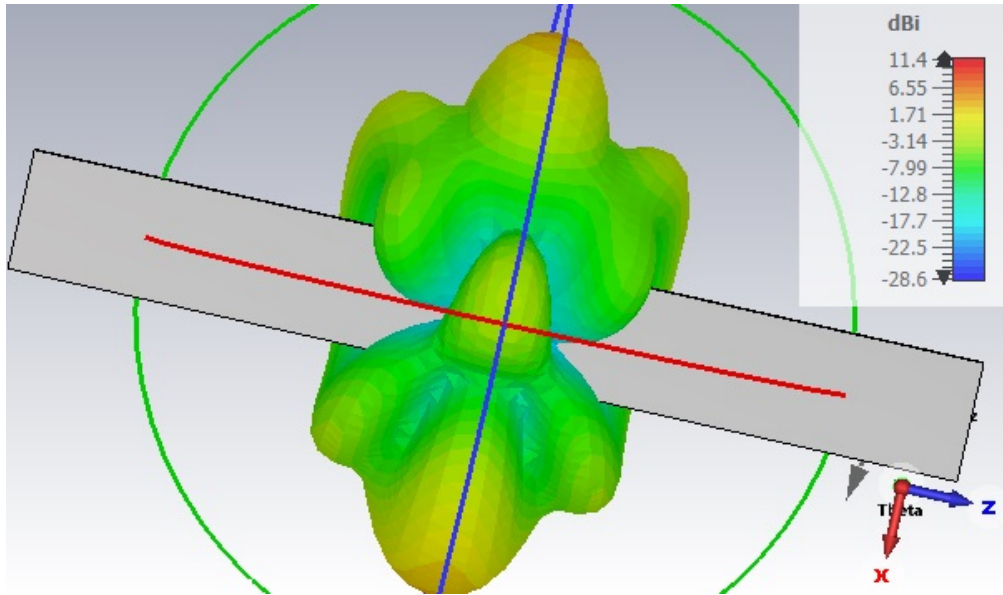
Usmjerenost	11.40 dBi
Dobitak	11.39 dBi
Učinkovitost	99.14%



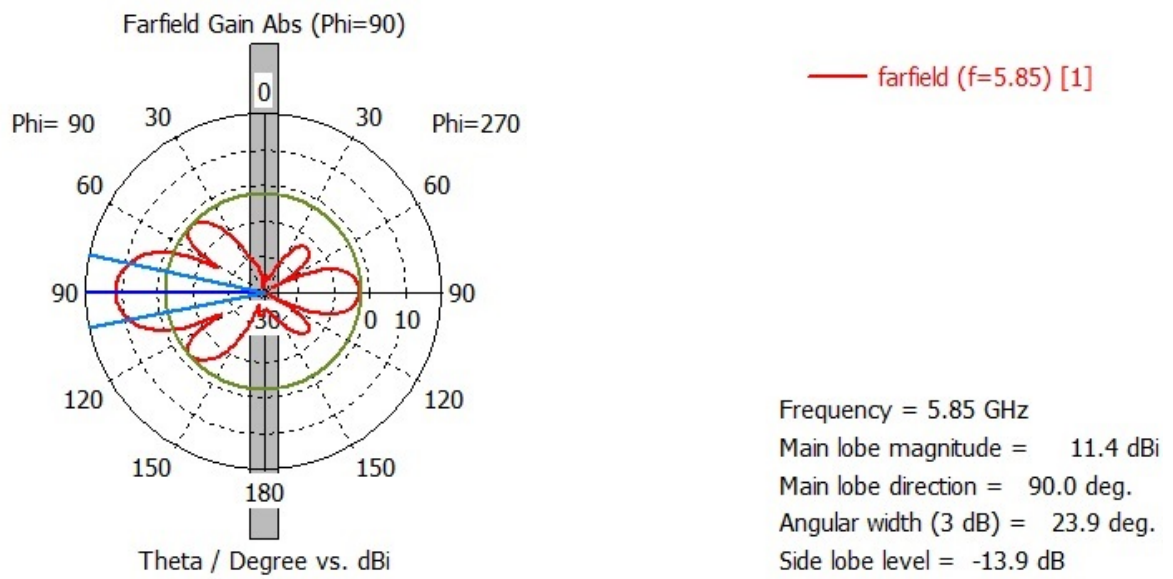
Slika 3.12: 3D dijagram usmjerenosti simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz



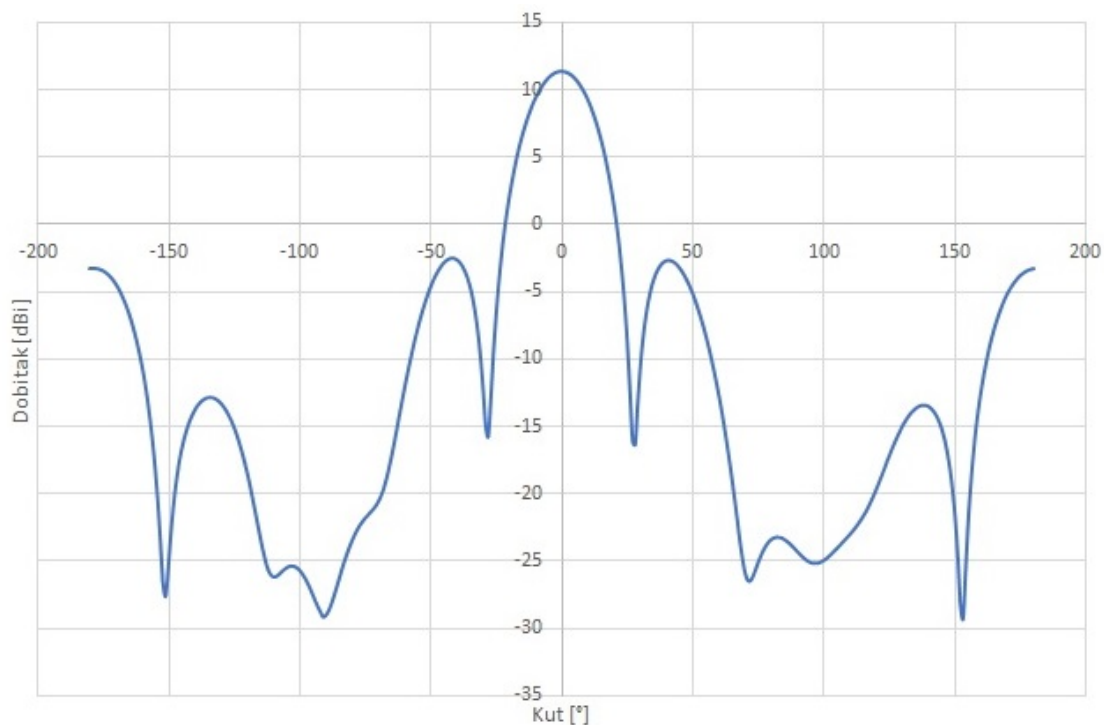
Slika 3.13: 3D dijagram usmjerenosti simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz



Slika 3.14: Stražnja strana 3D dijagrama usmjerenosti simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz



Slika 3.15: Polarni dijagram zračenja simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz



Slika 3.16: Dijagram zračenja simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz

Iz modela izoliranog proreza moguće je izračunati koliki bi postotak snage on izračio kao:

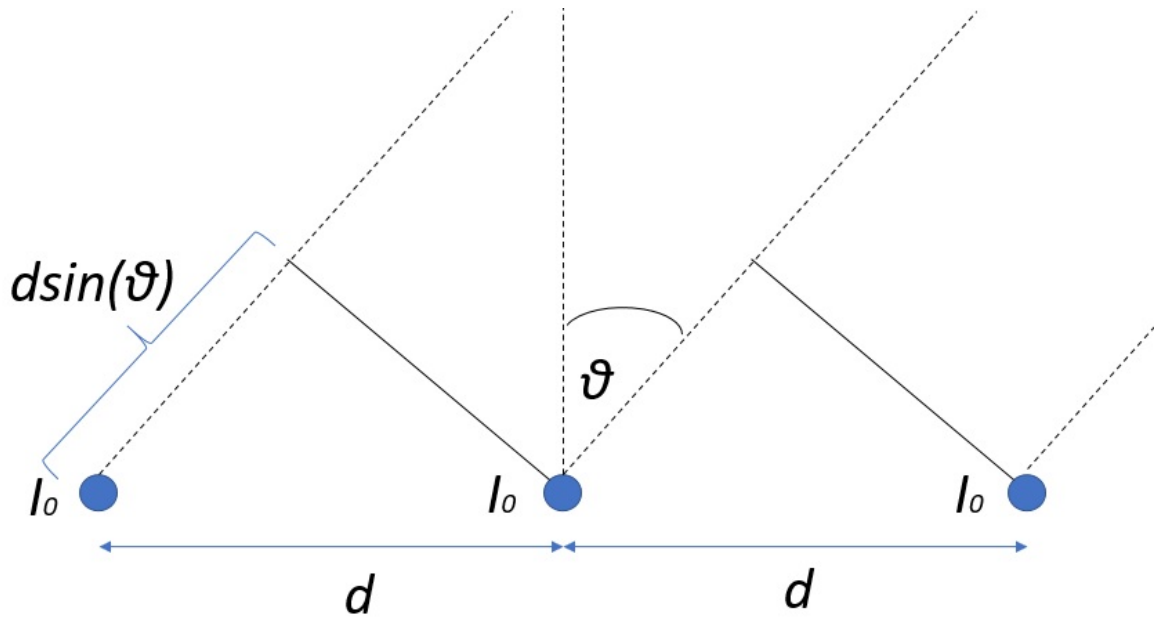
$$(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \cdot 100\% \quad (3.23)$$

Ako se uzme u obzir da svi prorezi nisu jednako pobuđeni i da se snaga gubi putem te da postoji refleksija od kratkog spoja dobiva se tablica 3.2.

Tablica 3.2: Postotne izračene snage po prorezima tekstilne antene

	Prvi prorez	Drugi prorez	Treći prorez
Incidentna izračena snaga	28.63%	20.43%	14.58%
Reflektirana izračena snaga	5.3%	7.43%	10.41%
Ukupna izračena snaga	33.93%	27.86%	24.99%

Vidi se da prorezi otprilike izrače jednako snage, a u proračun nije uzeta u obzir refleksija od proreza pa se zapravo još više snage izračio. S tim na umu, prilikom računanja faktora niza može se računati s istom pobudom na sva tri elementa.



Slika 3.17: Shema antenskog niza

Iz slike 3.17, kojom je prikazana shema antenskog niza proreza u valovodu, može se računati:

$$I_0 + I_0 e^{-j\beta d \sin \theta} + I_0 e^{+j\beta d \sin \theta} = I_0 (1 + e^{-j\beta d \sin \theta} + e^{+j\beta d \sin \theta}) = I_0 [1 + 2 \cos(\beta d \sin \theta)] \quad (3.24)$$

Tada je faktor antenskog niza dan sa:

$$AF = 1 + 2 \cos(\beta d \sin \theta), \quad (3.25)$$

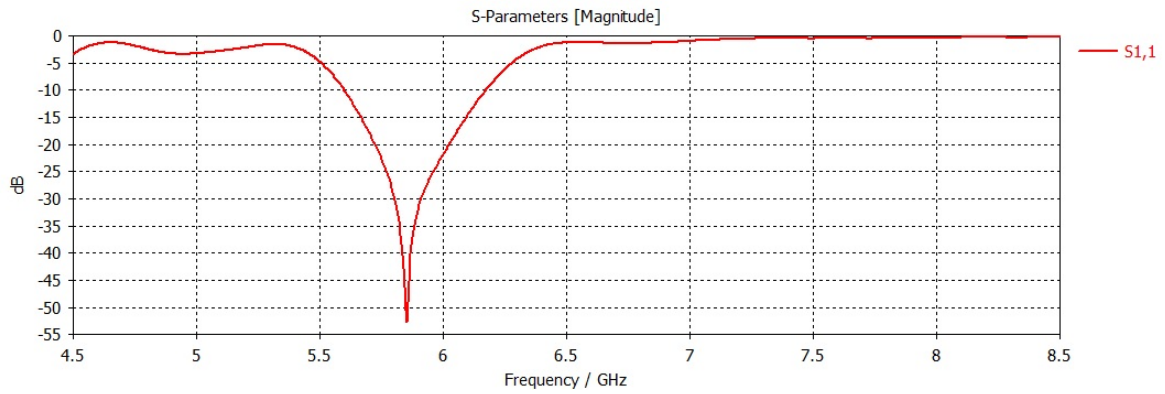
odnosno za razmak između proreza 37 mm i propagacijsku konstantu u slobodnom prostoru $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = 122.52 \text{ m}^{-1}$ na 5.85 GHz:

$$AF = 1 + 2 \cos(4.533 \sin \theta). \quad (3.26)$$

3.3. Dizajn aluminijske valovodne antene s prorezima

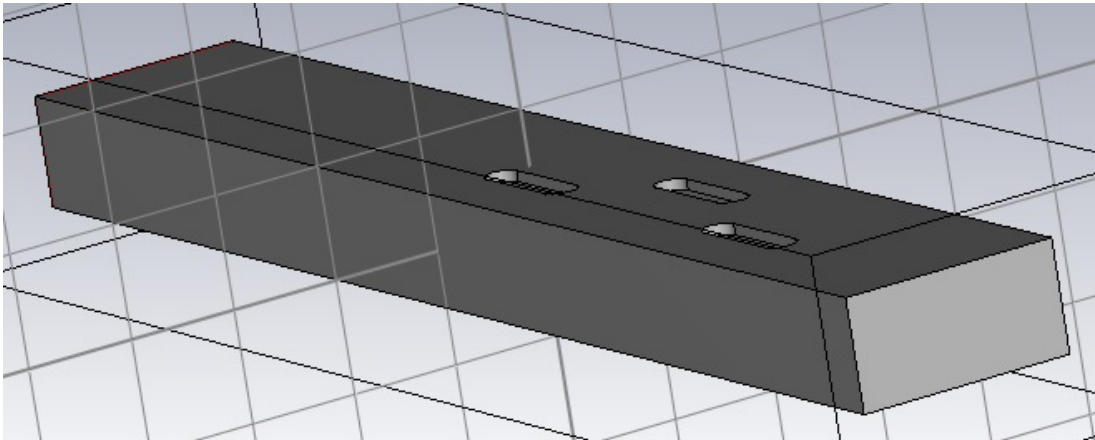
Kao referentnu antenu, s kojom će izvedena tekstilna antena biti uspoređena, bit će izrađena antena od punog aluminija. Za izradu spomenute antene bit će korišten aluminijski profil unutarnjih dimenzija $a = 36 \text{ mm}$ i $b = 16 \text{ mm}$ te debljine stijenke 2 mm. Profil će biti prilagođen na WG14 standard te dizajnirana antena za centralnu frekvenciju 5.85 GHz. Kako će biti izrađena upotrebom CNC stroja, neće biti potrebno zaokruživati simulirane vrijednosti jer će ih biti moguće ugoditi pa su time očekivani nešto bolji parametri ove antene. Zbog lakoće izrade antene na CNC stroju, prorezi će imati polukružni umjesto ravni završetak. Zbog istih razloga kao i u prethodnom potpoglavlju razmaci između proreza postavljeni su na $\frac{\lambda_v}{2}$ u valovodu (36.5296 mm) te razmak između zadnjeg proreza i kratkog spoja na $\frac{3}{4} \lambda_v$

(54.7944 mm). Širina proreza postavljena je na $b' = 3$ mm. Očekivana duljina proreza je oko $\frac{\lambda}{2}$. Prilikom postupka optimizacije u CST Studio Suiteu dobiva se duljina proreza $a' = 26.37$ mm i udaljenost od centra $d = 6.12$ mm. U nastavku je na slici 3.18 prikazan simulirani S_{11} parametar.

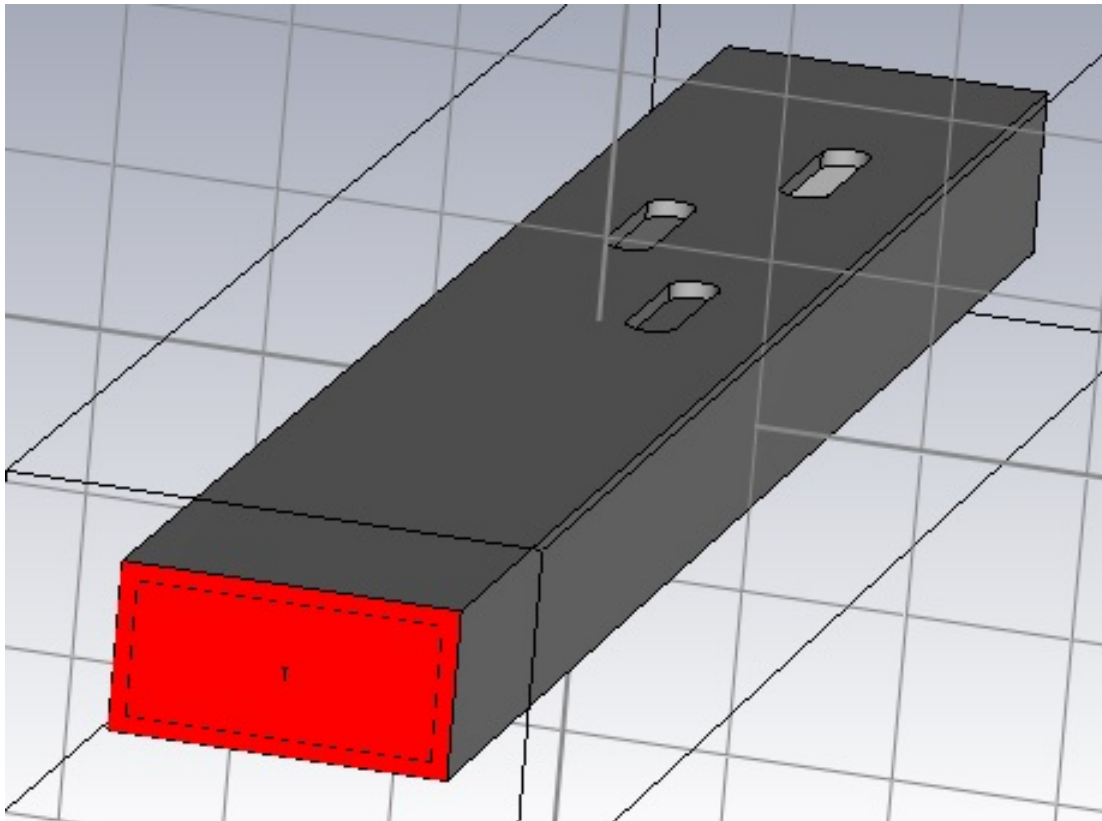


Slika 3.18: Simulirani S_{11} parametar za aluminijsku antenu

Vidljivo je da je na željenom pojasu S_{11} parametar ispod -10 dB pa se antena smatra dobro prilagođenom. Na slikama 3.19 i 3.20 prikazan je CST model aluminijske antene.



Slika 3.19: Model aluminijske antene

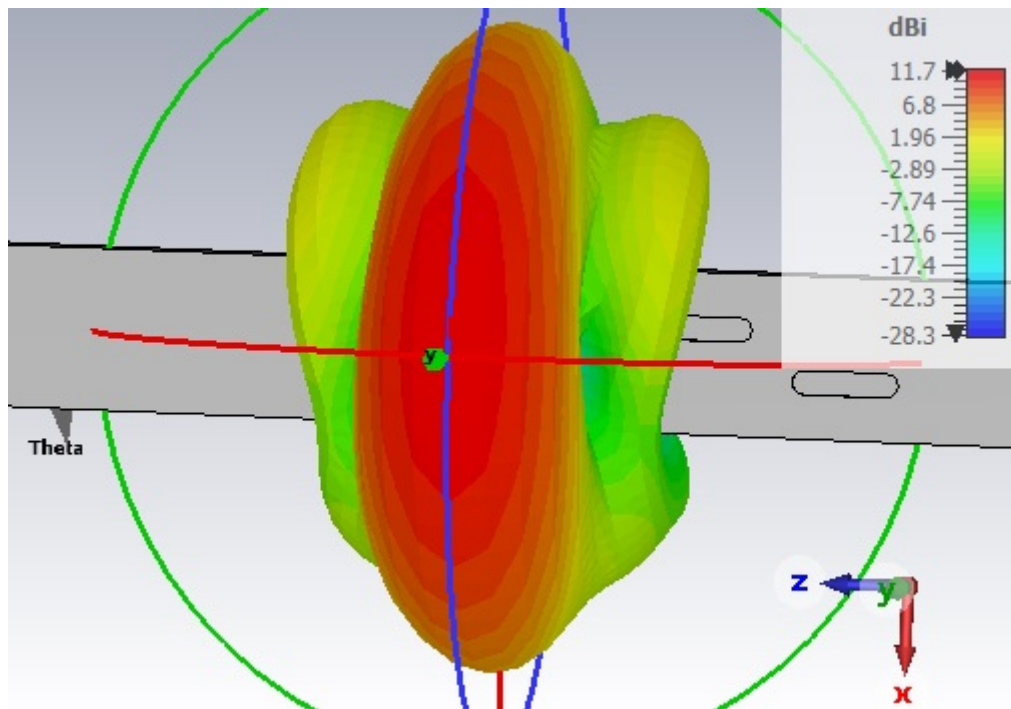


Slika 3.20: Model aluminijske antene

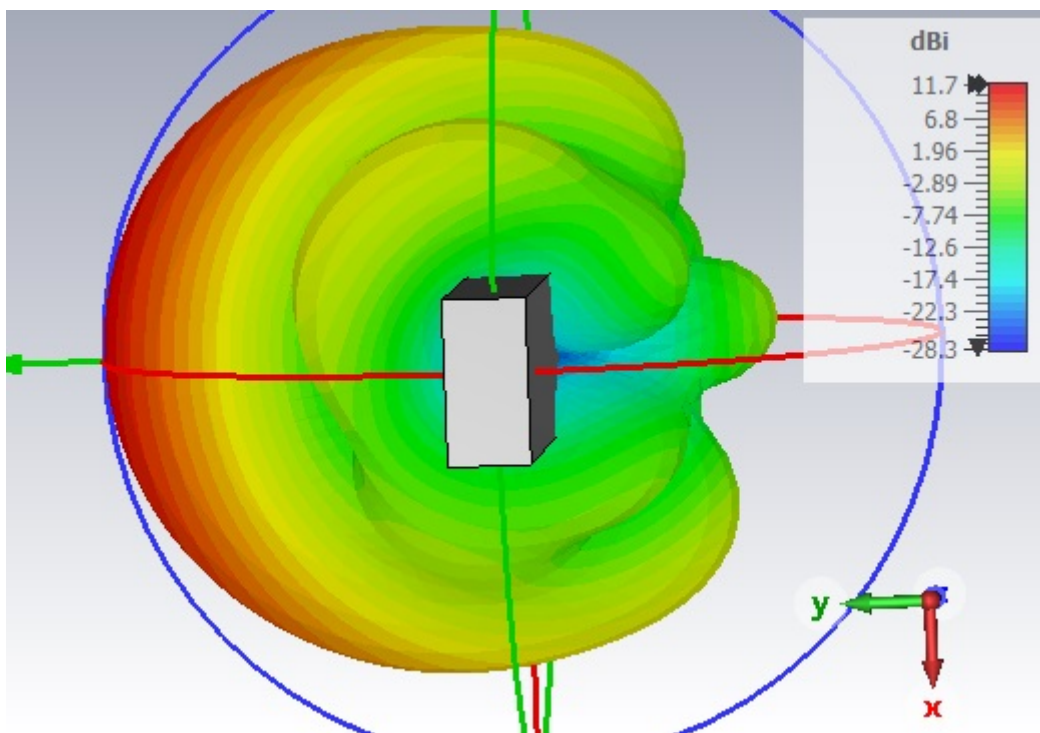
Specifikacije simulirane aluminijske antene dane su tablicom 3.3 u nastavku. Slikama 3.21 – 3.23 dan je 3D dijagram zračenja aluminijske antene. Slikama 3.24 i 3.25 dani su polarni dijagram zračenja i dijagram zračenja aluminijske antene.

Tablica 3.3: Specifikacije simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz

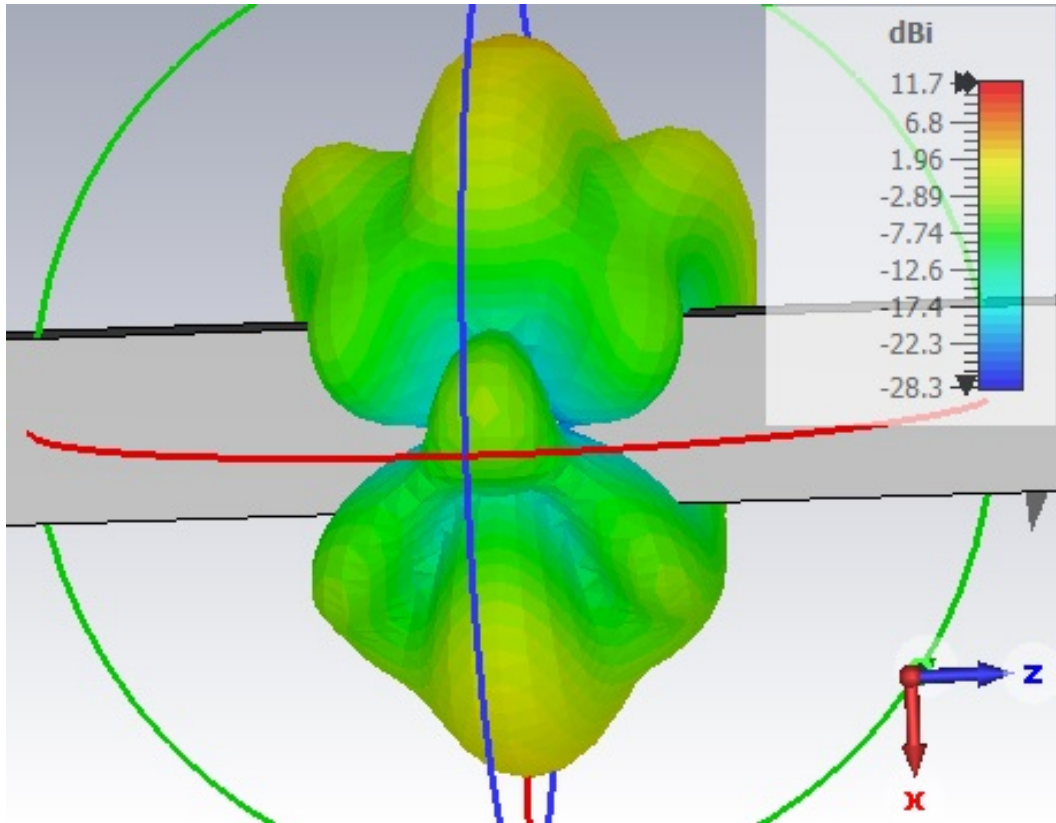
Usmjerenost	11.65 dBi
Dobitak	11.60 dBi
Učinkovitost	98.9%



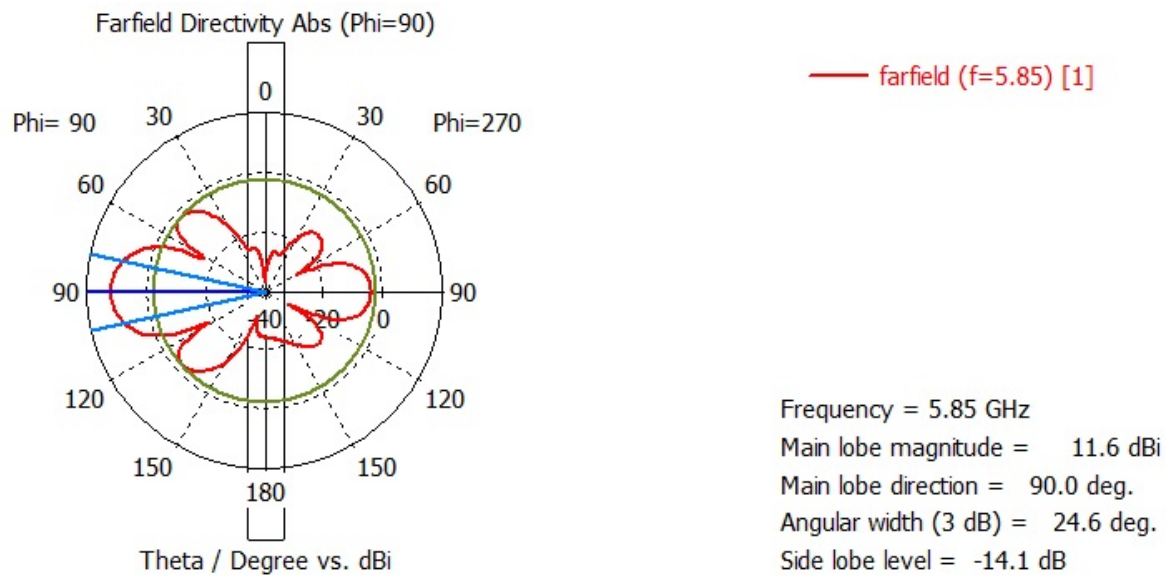
Slika 3.21: 3D dijagram usmjerenosti simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz



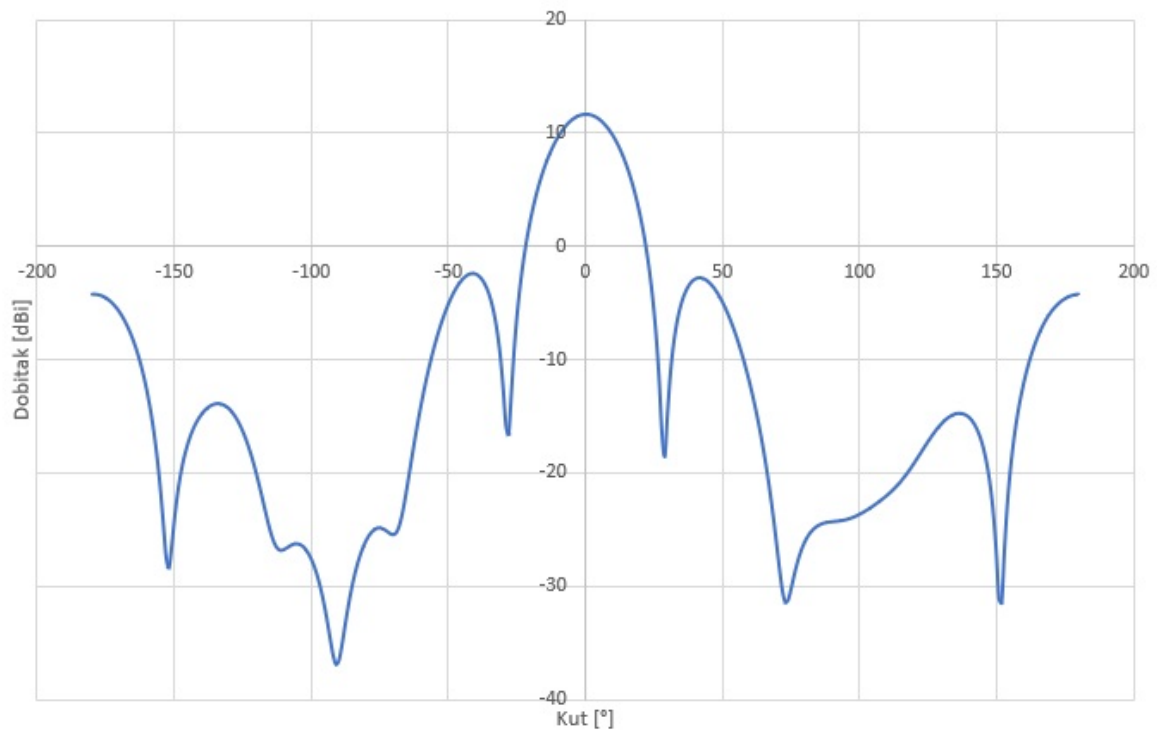
Slika 3.22: 3D dijagram usmjerenosti simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz



Slika 3.23: Stražnja strana 3D dijagrama usmjerenosti simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz



Slika 3.24: Polarni dijagram zračenja simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz



Slika 3.25: Dijagram zračenja simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz

Kao i u dizajnu tekstilne antene moguće je izračunati izračenu snagu po svakom prorezu.

Tablica 3.4: Postotne izračene snage po prorezima aluminijske antene

	Prvi prorez	Drugi prorez	Treći prorez
Incidentna izračena snaga	24.88%	18.69%	14.04%
Reflektirana izračena snaga	5.95%	7.92%	10.55%
Ukupna izračena snaga	30.83%	26.61%	24.59%

Iz tablice 3.4 vidljivo je kako su izračene snage po prorezu otprilike jednake pa se opet pretpostavlja ista pobuda na sva tri elementa niza. Iz toga slijedi da je faktor antenskog niza kao i kod tekstilne antene:

$$AF = 1 + 2 \cos(4.533 \sin \theta) \quad (3.27)$$

3.4. Mjerni postav

Analizatorom mreža mjeren je S_{11} parametar obiju antena te je analizator mreža prethodno kalibriran s tri poznata tereta (otvoreni kraj, kratki spoj i prilagođeni teret). Dobitak i dijagram zračenja mjeren je u bezječnoj komori uz pomoć mjerne antene i rotatora. Obje

antene spojene su na analizator mreža i analizator mreža kalibiran je Calibration Through metodom pa se iz S_{21} parametra i podatka o dobitku mjerne antene može izračunati dobitak druge antene. Dijagram zračenja mjeri se snimanjem polja mjernom antenom koja stoji na mjestu, dok se druga okreće pomoću rotatora uz rezoluciju 1° . Korištena mjerna antena je Quad Ridged Broadband Horn Antenna QRH20. Njene specifikacije dane su sljedećom tablicom 3.5.

Tablica 3.5: Specifikacije mjerne antene

Frequency range	1.7 GHz - 20 GHz
RF connector	$2 \times \text{SMA}_{female}$
Nominal impedance	50Ω
VSWR max.	< 2
Gain	6.0 - 15.5 dB
Antenna factor	28.0 - 42.5 dB/m
Port isolation	$> 35 \text{ dB}$
Cross polarisation	$> 28 \text{ dB}$
Max. RF input power	20 W CW / 40 W Peak
Width \times height \times depth	$101 \times 101 \times 132 \text{ mm}$
Weight	258 g
Mounting	adapter with $\frac{1}{4}$ inch inner thread
Rated temperature range	$0^\circ\text{C} - +50^\circ\text{C}$
Stored temperature range	$-20^\circ\text{C} - +70^\circ\text{C}$

Dobitak mjerne antene dan je sljedećom ovisnošću iz koje je vidljivo da je njen dobitak G_2 na 5.85 GHz 11.2 dB. Tada je iz Friisove formule:

$$G_1 = \frac{P_2}{P_1} \frac{1}{G_2} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (3.28)$$

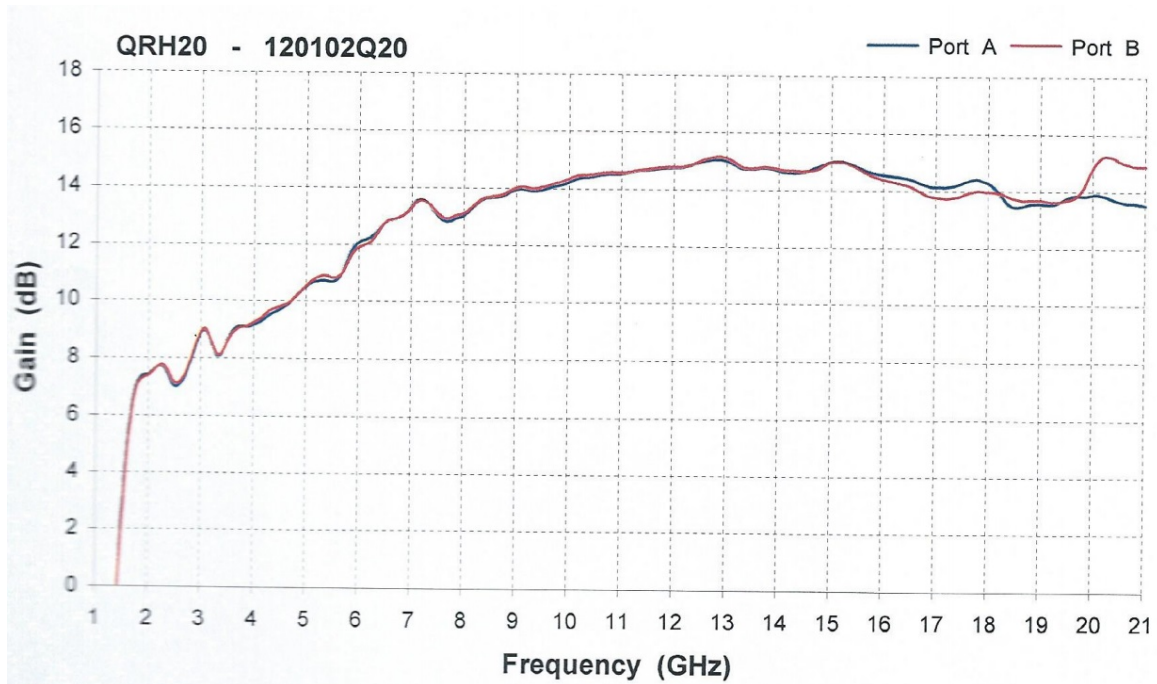
Odnosno u dB:

$$G_1[\text{dB}] = S_{21}[\text{dB}] - G_2[\text{dB}] + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (3.29)$$

Ukoliko antena nije najbolje prilagođena, uzimamo u obzir gubitke zbog refleksije pa dobitak postaje:

$$G_1[\text{dB}] = S_{21}[\text{dB}] - G_2[\text{dB}] - 10 \log(1 - |S_{11}|^2) + 20 \log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \quad (3.30)$$

Na slici 3.26 prikazan je dobitak mjerne antene.



Slika 3.26: Dobitak mjerne antene

3.5. Izrada aluminijske valovodne antene s prorezima

Izrađena aluminijska antena s prorezima prikazana je slikama 3.27 i 3.28 u nastavku.

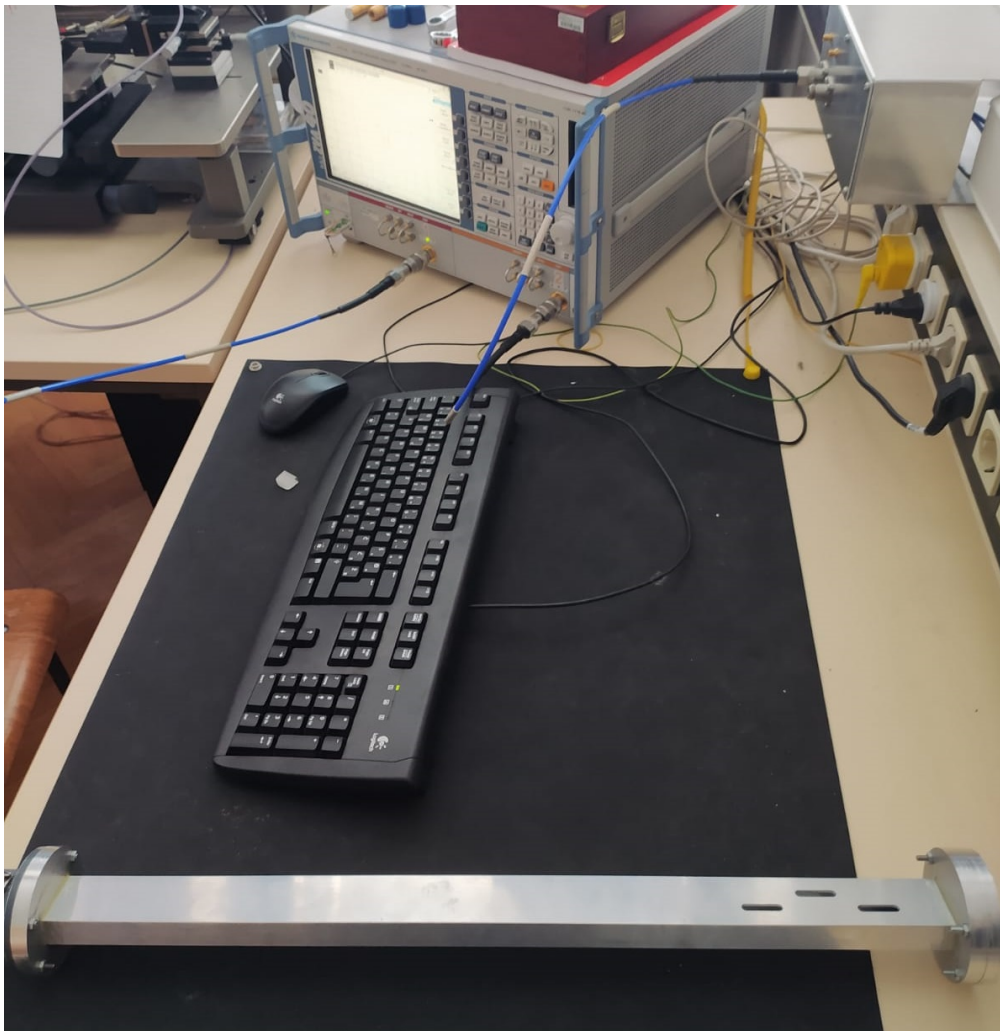


Slika 3.27: Aluminijska valovodna antena s prorezima

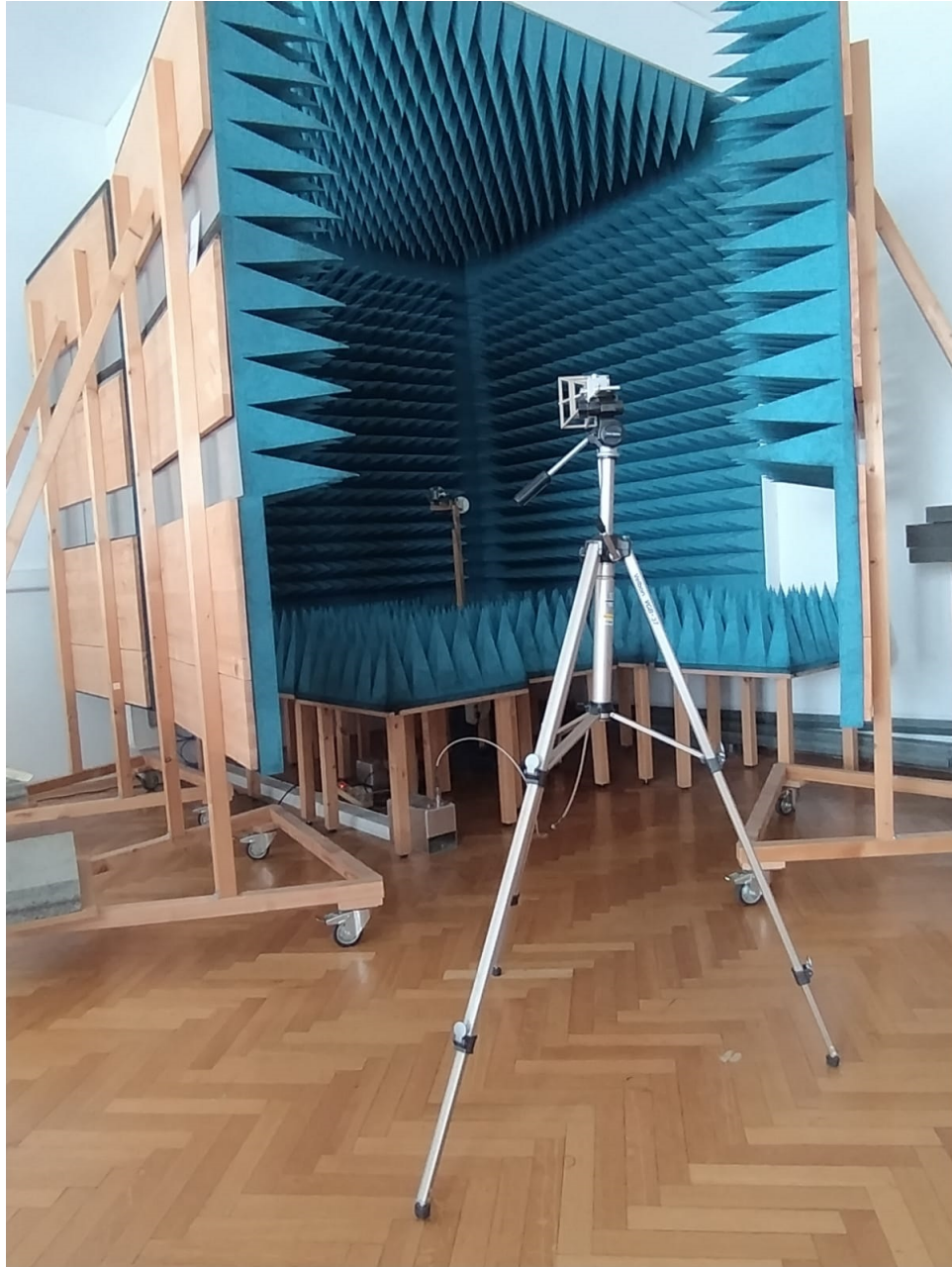


Slika 3.28: Aluminijska valovodna antena s prorezima

Mjerenje S_{11} parametara prikazano je slikom 3.29, a mjerenje dijagrama zračenja i dobitka slikom 3.30.

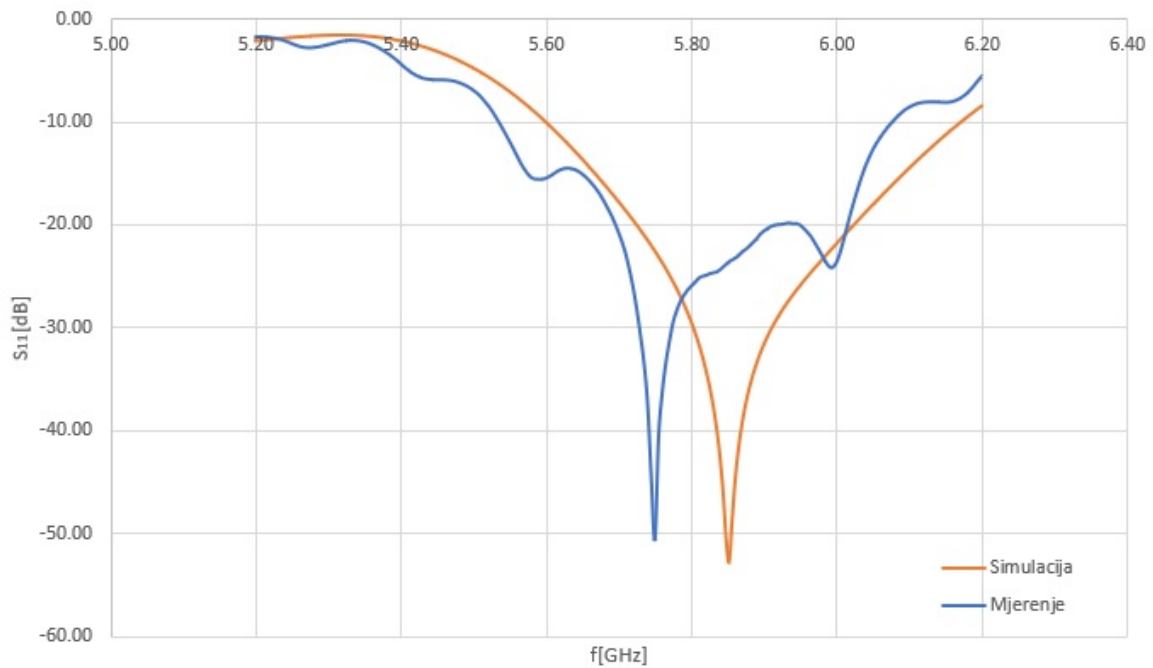


Slika 3.29: Mjerenje S_{11} parametara aluminijske antene



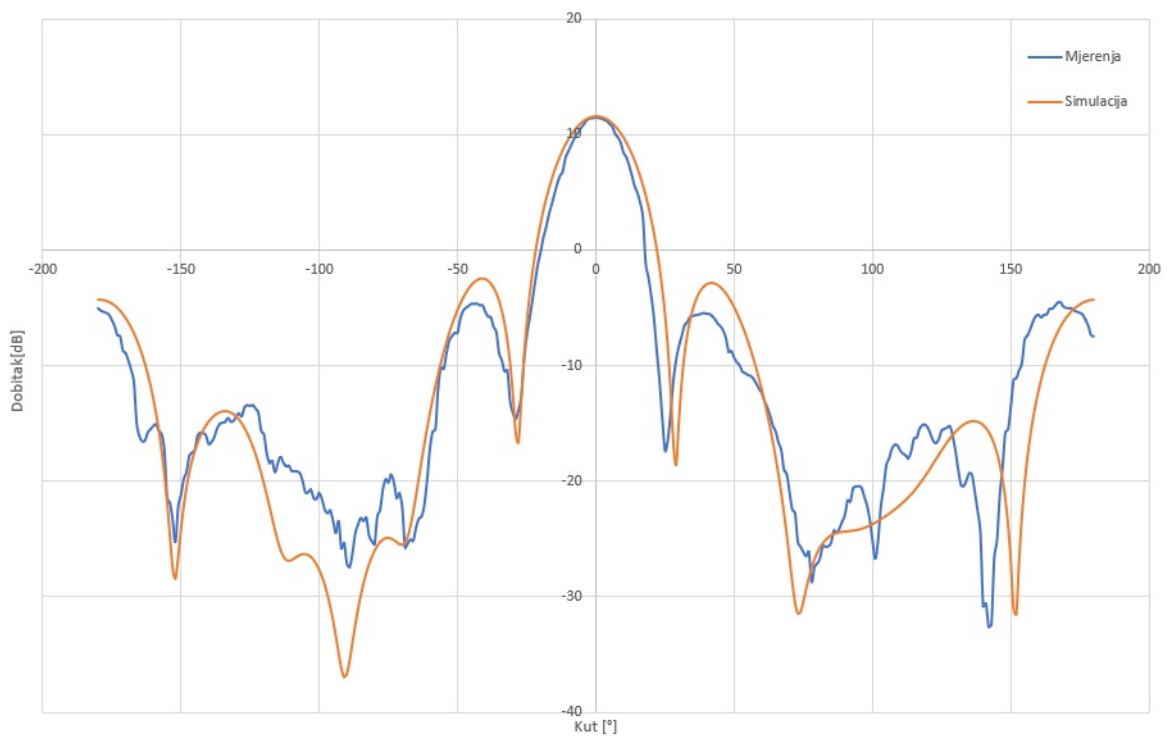
Slika 3.30: Mjerenje dobitka i dijagrama zračenja aluminijske antene

Na 5.85 GHz parametar S_{21} iznosi -33 dB, a mjerna antena bila je udaljena od druge antene za $R = 248$ cm. Tada dobitak aluminijske antene na 5.85 GHz iznosi 11.47 dB. Uspoređujući to sa simuliranom vrijednošću 11.60 dB, vidljivo je da je dobitak odstupa manje od 1 dB. S_{11} parametar i dijagrami zračenja dani su sljedećim slikama.

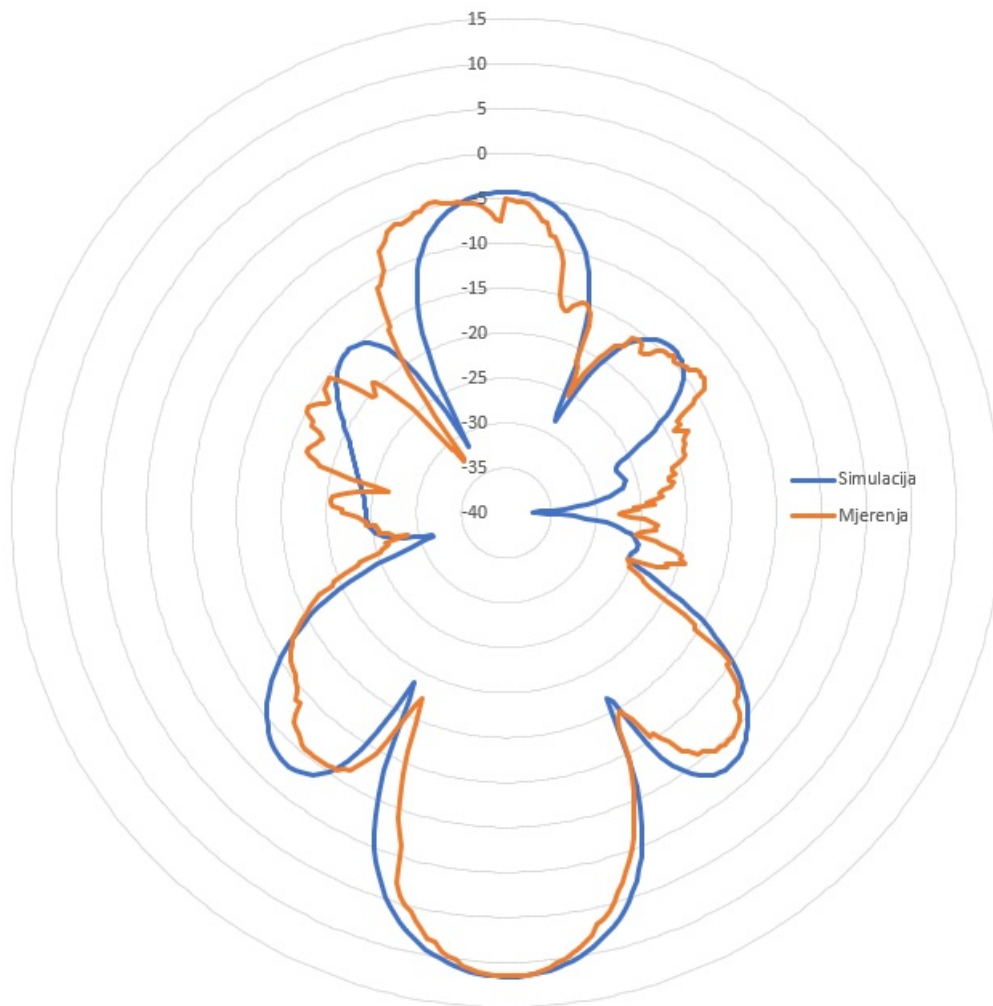


Slika 3.31: S_{11} parametar aluminijske antene

Na slici 3.31 vidljiv je blagi pomak od stotinjak MHz s obzirom na rezultate proračuna, ali s obzirom da je u cijelom području od interesa S_{11} parametar prilično ispod -10 dB (izvršna prilagodba), frekvencijski pomak nije značajan efekt. Slikom 3.32 dan je dijagram zračenja aluminijske antene, a slikom 3.33 polarni dijagram zračenja iste antene.

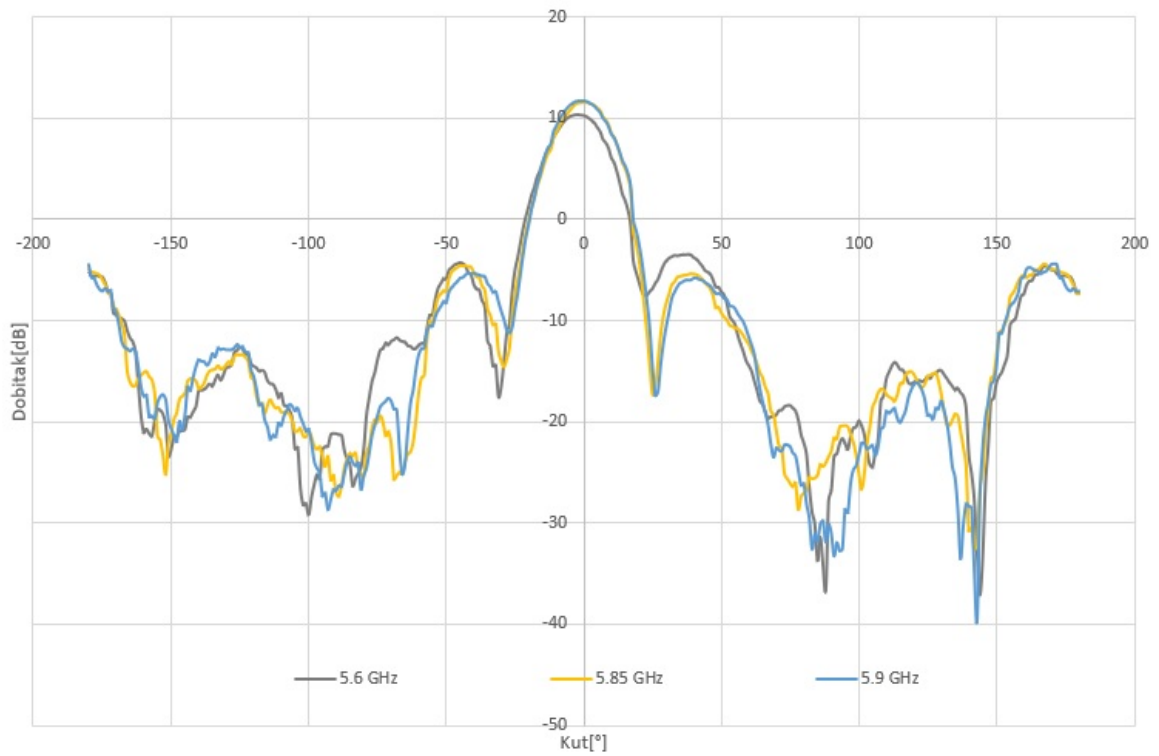


Slika 3.32: Dijagram zračenja aluminijske antene na 5.85 GHz

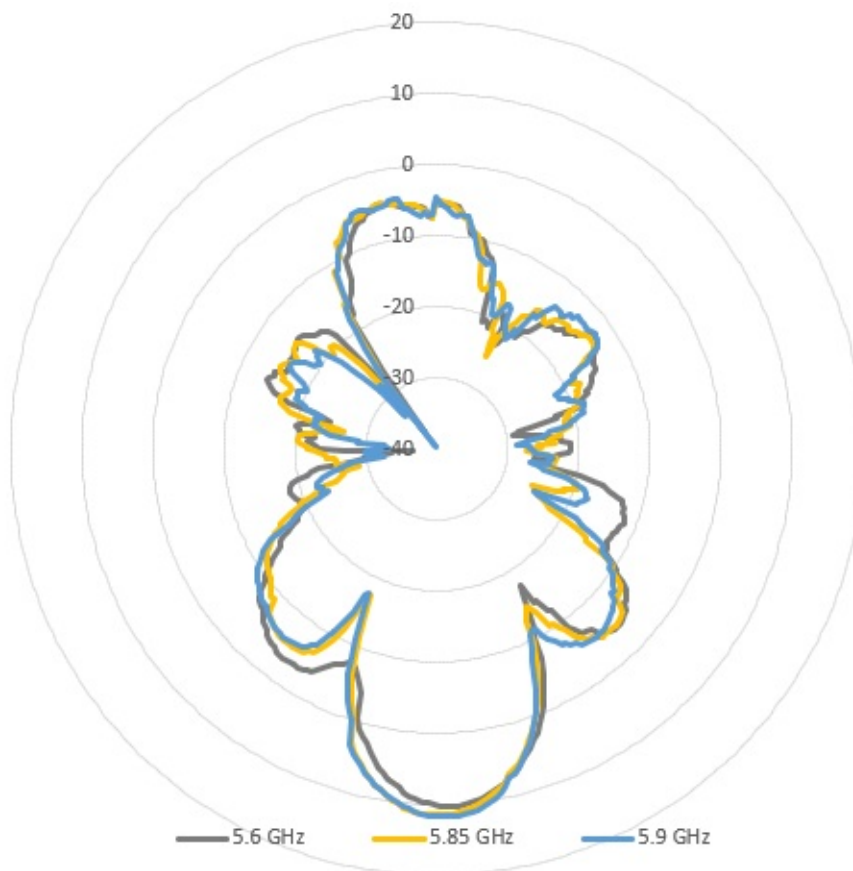


Slika 3.33: Polarni dijagram zračenja aluminijske antene na 5.85 GHz - [dB]

Iz rezultata na slikama 3.34 i 3.35 zaključivo je da valovodna aluminijska antena s prorezima vrlo stabilno zrači na pojasu frekvencija 5.6 GHz - 6 GHz što je vrlo pogodno zbog ISM (eng. Industrial, Scientific and Medical) pojasa frekvencija i rada WiFi-a u tom pojasu. Također je vidljivo kako se mjerenja slažu sa simulacijama i predviđanjima napravljenima pri dizajniranju.



Slika 3.34: Dijagram zračenja aluminijske antene u pojasu frekvencija



Slika 3.35: Polarni dijagram zračenja aluminijske antene u pojasu frekvencija - [dB]

3.6. Izrada tekstilne valovodne antene s prorezima

U prvom koraku izrađen je valovod od vodljivog tekstila koji je imao značajne nedostatke i gubitke energije. Tkanina od koje je valovod izrađen imala je vrlo nizak površinski otpor pa je većina gubitaka pripisana nesavršenoj geometriji valovoda i prevelikom odstupanju od oblika kvadra. Valovod nije imao dobar oblik primarno zbog toga što vodljiva traka korištena za spajanje rubova tkanine nije dobro prijanjala za tkaninu i konstantno se odljepljivala te su nastajale pukotine iz kojih je curila energija. Zbog nemogućnosti dobrog povezivanja krajeva tkanine, tkanina nije bila dobro zategnuta oko stiropora pa se oblik kvadra lagano pretvarao u valjkasti oblik. Osim samog oblika valovoda, spoj prema ulazu u valovod za standard WG14 nije bio najbolji. On je također bio pun pukotina jer korištena vodljiva traka nije dobro prijanjala za tkaninu, a trebalo je iskoristiti dosta vodljive trake kako bi se svaka pukotinica i prijelaz pokrio. Također je bilo nespretno lijepiti po spoju koji je bio pod pravim kutem jer je mali dio vodljive trake uvijek bio u zraku i posljedično nije držao najbolje. Korištenje vodljive trake na spoju prema ulazu u valovod također je onemogućilo lagano izvlačenje valovoda iz ulaza i lagano prespajanje jer je sve bilo obljepljeno komadićima vodljive trake. Na kraju, osim tehničkih problema, valovod nije nikako bio vizualno privlačan. Svi navedeni problemi zahtijevali su rješavanje, a time i pametnije načine za izradu valovoda korištenog za izradu antene. Tako su krajevi odrezanog kraja tkanine presavinuti i na njima je napravljen šav kako bi se spriječilo daljnje "rascvjetavanje" tkanine. Tkanina je jako nategnuta oko stiropora i spoj je ostvaren šivanjem jakog i gustog šava na pozadinskoj strani valovoda. Jedan kraj valovoda zatvoren je komadom vodljive tkanine i također čvrsto i gusto prišiven na stijenke. Prorezi su napravljeni rezanjem i presavijanjem tkanine na odgovarajućem mjestu. Na presavinuti dio tada je prišiven šav kako se i prorez ne bi "rascvao". Konačno, tekstilna antena umeće se u prirubnicu korištenu i za pričvršćivanje aluminijske antene na ulaz valovoda te se u prazan prostor umeću po dva komada lima s gornje i donje strane te po jedan komad lima s bočnih strana kako bi se ostvario kontakt i spriječilo curenje energije. Kako vodljiva traka dobro prijanja za lim, omotana je oko dijelova pločica lima koji su virili iz prirubnice. To je omogućilo fiksiranje limova na mjestu, mogućnost izvlačenja antene iz prirubnice te konačno i vizualno prihvatljiviji izgled. Cjelovita izrada tekstilne valovodne antene prikazana je slikama 3.36 – 3.39.



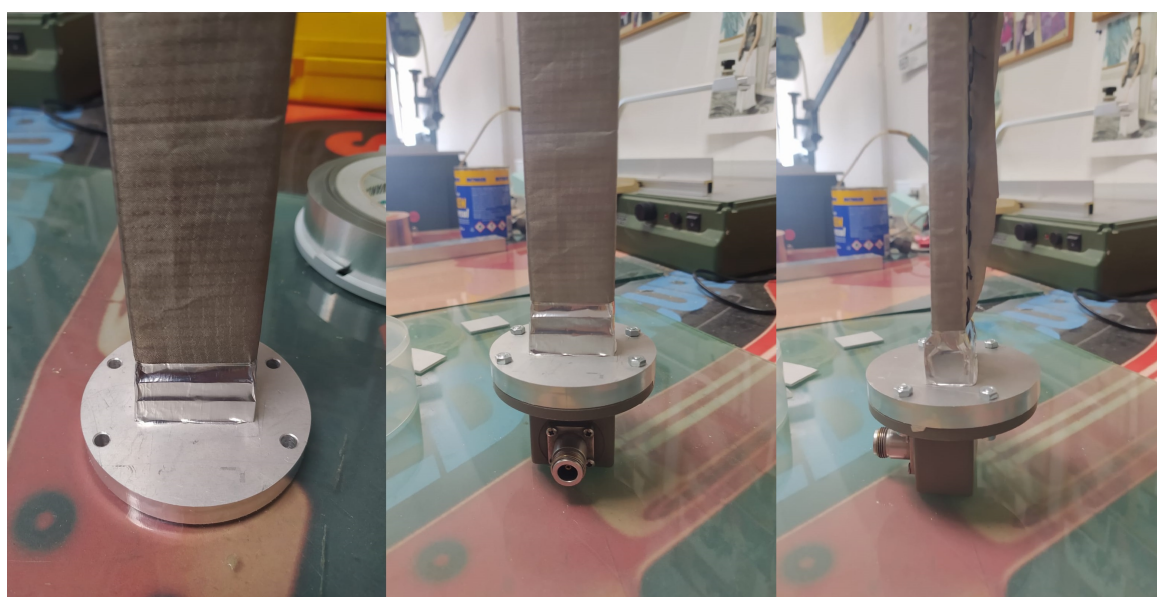
Slika 3.36: Tekstilna valovodna antena s prorezima



Slika 3.37: Tekstilna valovodna antena s prorezima



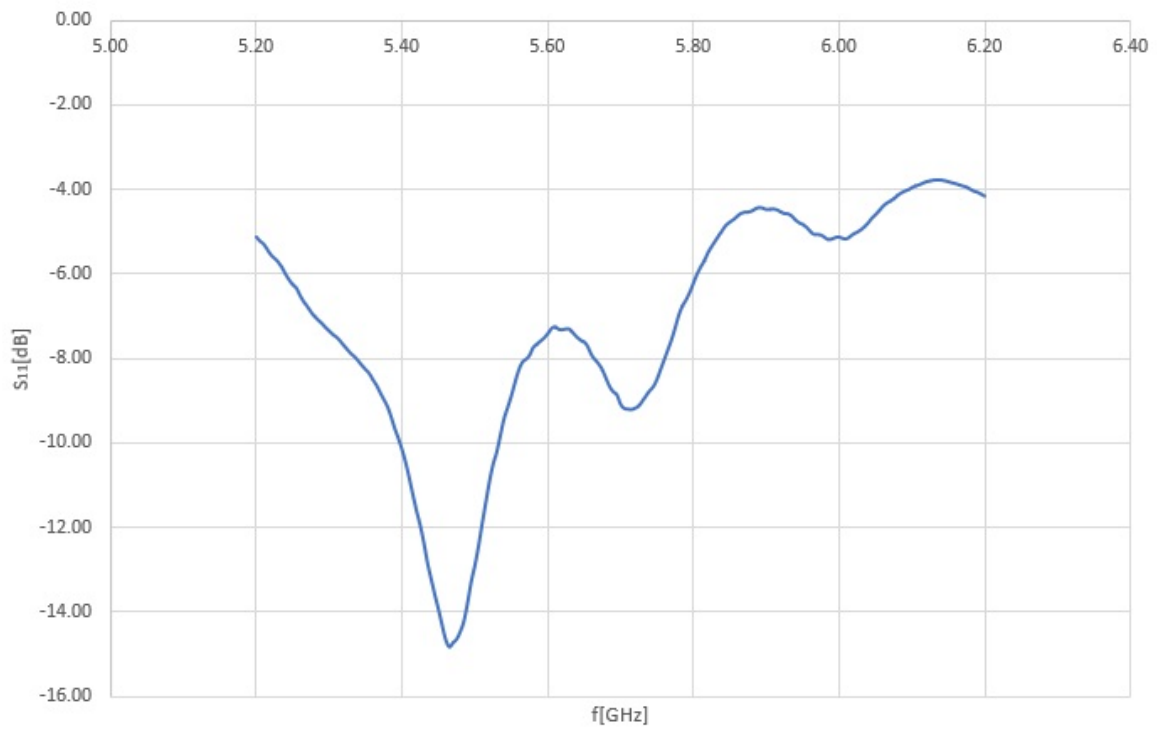
Slika 3.38: Tekstilna valovodna antena s prorezima



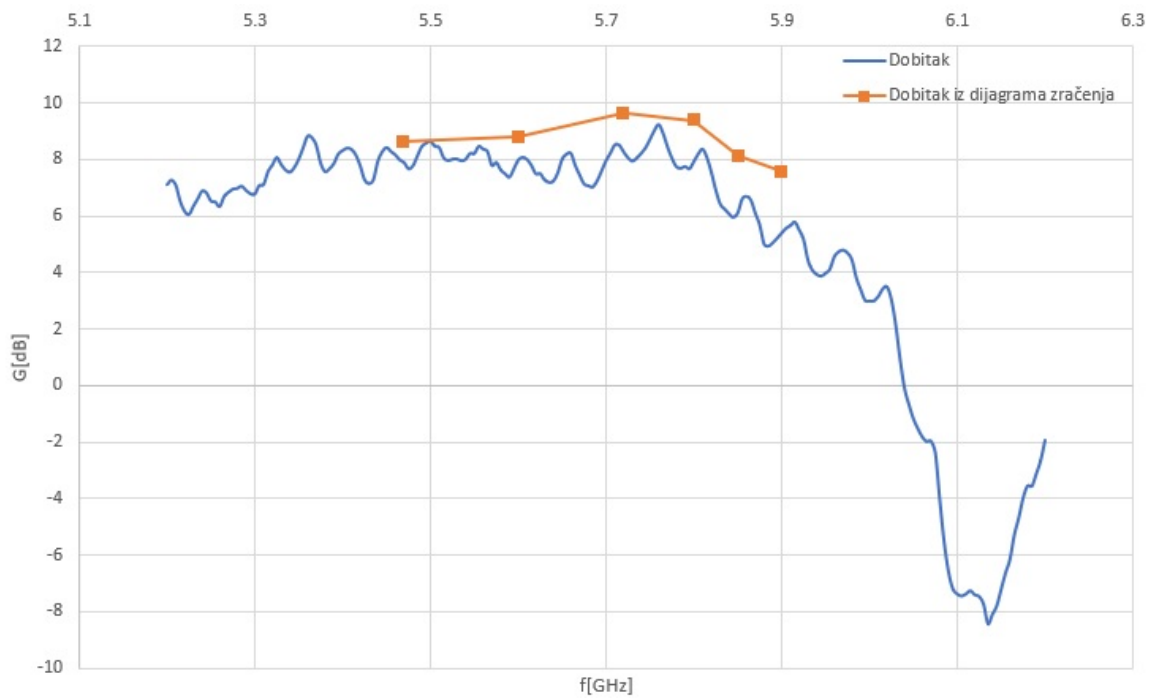
Slika 3.39: Tekstilna valovodna antena s prorezima

Mjerenja S parametara, dobitka i dijagrama zračenja provedena su kao i za aluminijsku antenu. Mjerna antena bila je na udaljenosti $R = 229$ cm od tekstilne antene. S_{11} parametar tekstilne antene dan je slikom 3.40. Na navedenoj slici vidljivo je da je antena vrlo dobro prilagođena na pojasu oko 5.4 – 5.55 GHz te djelomično dobro na pojasu 5.65 – 5.75 GHz. Ovisnost dobitka tekstilne antene o frekvenciji dana je slikom 3.41. Istom slikom pokazan je maksimalni dobitak antene određen iz dijagrama zračenja. Vidljivo je kako je dobitak stabilan u pojasu 5.3 – 5.8 GHz. Iz podataka mjerenja dijagrama zračenja dobiva se veći maksimalni dobitak od dobitka mjerenog u nasuprotnom položaju (plava krivulja) na slici

3.41. Treba uočiti da je smjer maksimuma dijagrama zračenja frekventijski ovisan jer je faza pobude prorez-antene ovisna o faznoj brzini u valovodu. Drugim riječima, za promjenu u frekvenciji mijenja se razmak u valnim duljinama između proreza. Maksimalni dobitak tada iznosi 9.63 dB te je manji 1.76 dB od maksimalnog dobitka u simulaciji, što je s obzirom na gubitke izmjerene u tekstilnom valovodu posve očekivano. Taj dobitak nastupa na frekvenciji 5.72 GHz pri kojoj također nastupa drugi minimum S_{11} parametra.

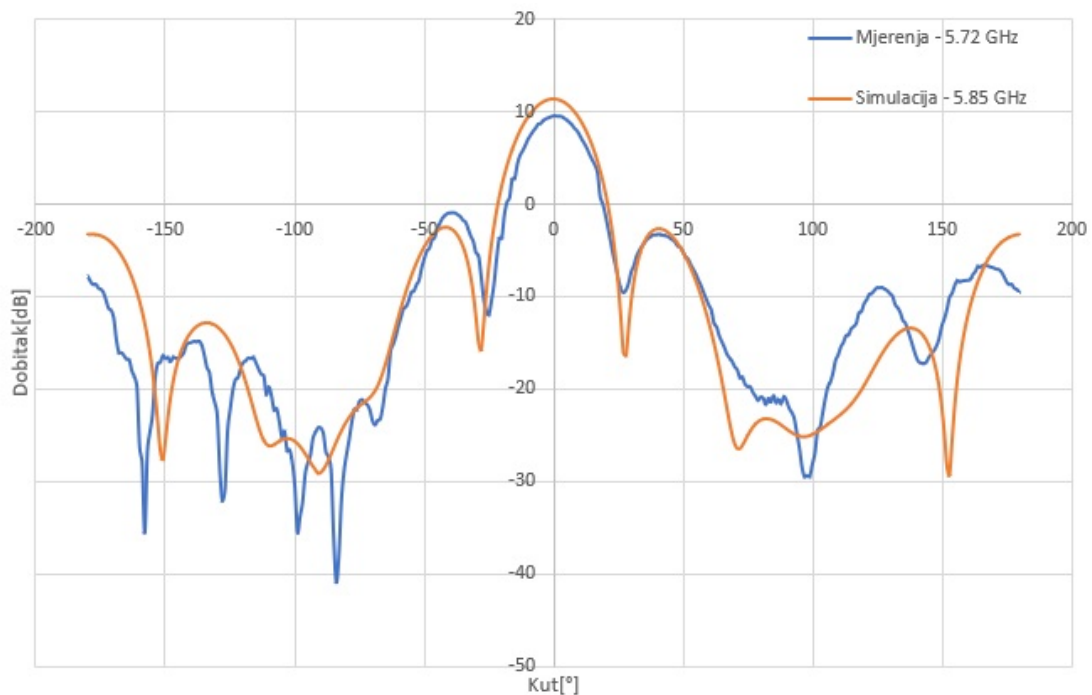


Slika 3.40: S_{11} parametar tekstilne antene

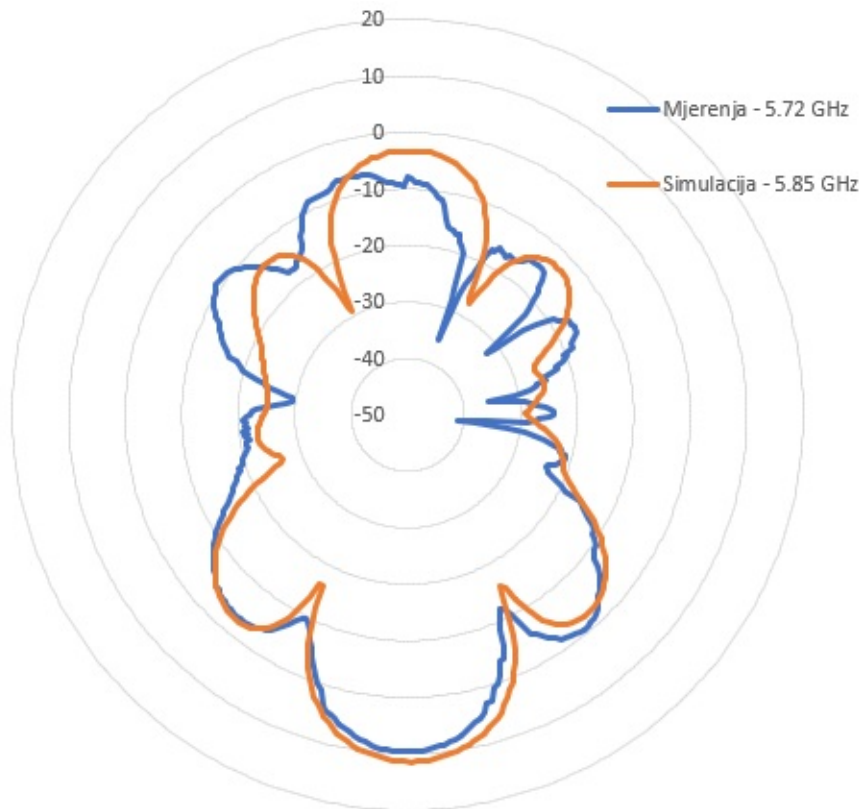


Slika 3.41: Dobitak tekstilne antene

Na slikama 3.42 i 3.43 dani su dijagrami zračenja tekstilne antene na 5.72 GHz uspoređeni s dijagramima zračenja simulirane antene na 5.85 GHz. Drugim riječima, željena faza između proreza antene ostvarena je na nešto nižoj frekvenciji nego u proračunu. To je ujedno posljedica toga da stiropor ipak ima permitivnost nešto veću od slobodnog prostora.

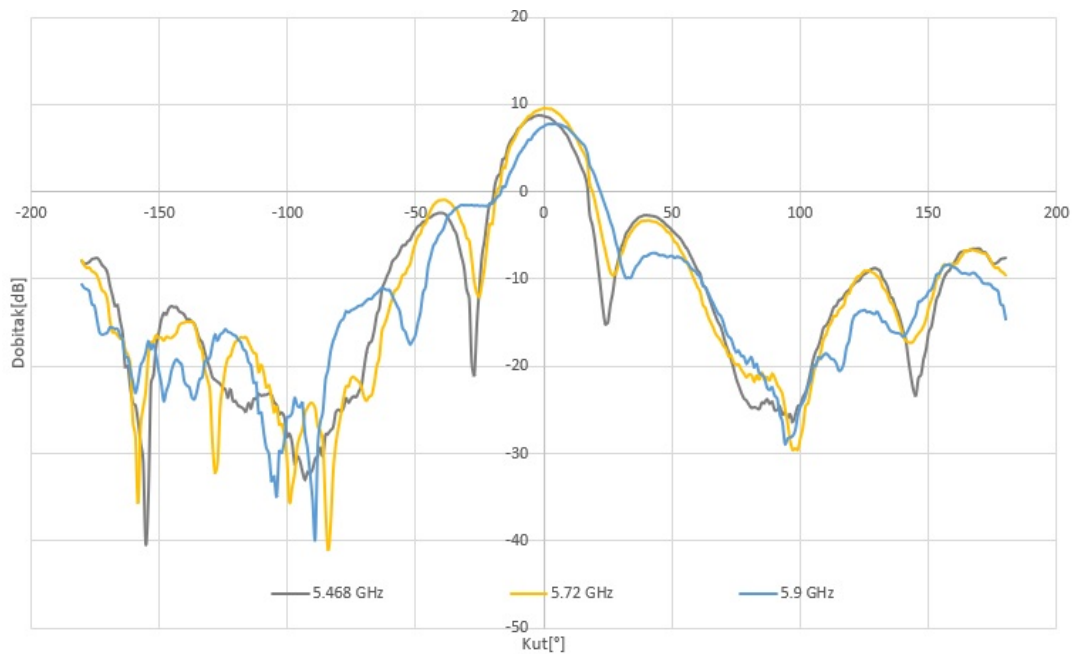


Slika 3.42: Dijagram zračenja tekstilne antene

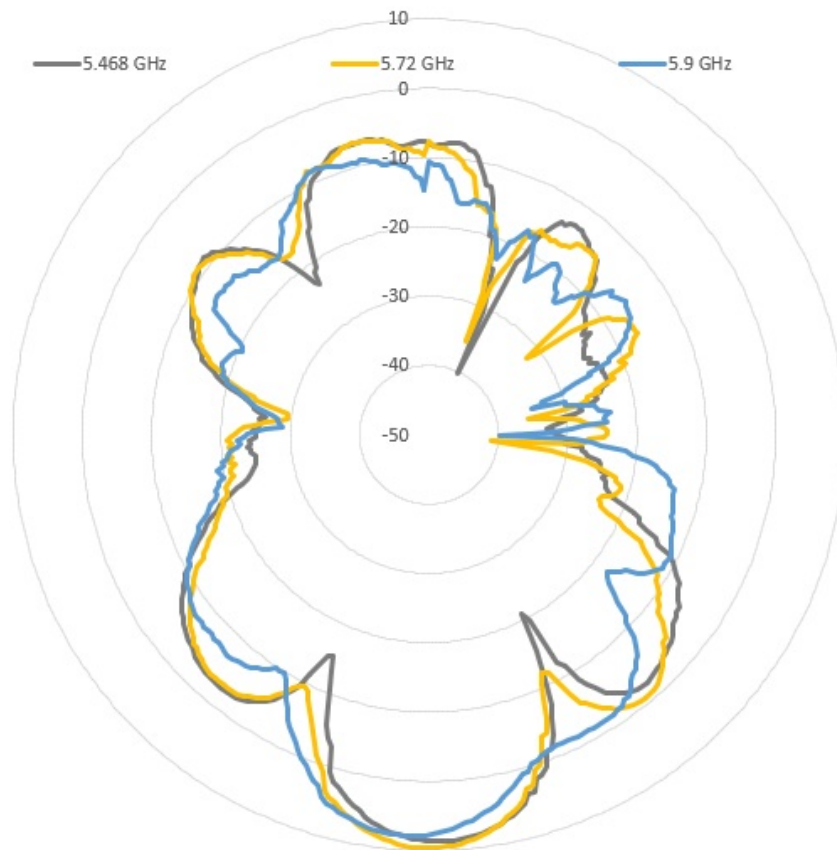


Slika 3.43: Polarni dijagram zračenja tekstilne antene - [dB]

Na slikama 3.44 i 3.45 dani su dijagrami zračenja antene u pojasu frekvencija.



Slika 3.44: Dijagram zračenja tekstilne antene u pojasu frekvencija

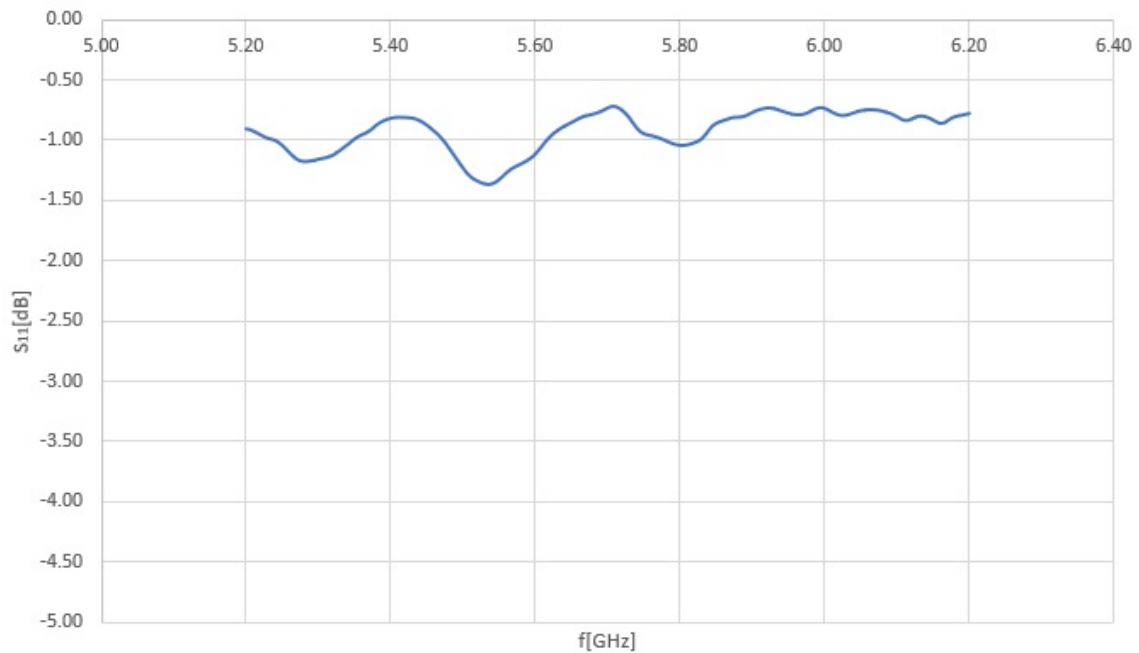


Slika 3.45: Polarni dijagram zračenja tekstilne antene u pojasu frekvencija - [dB]

Iz rezultata je vidljivo kako tekstilna antena ima zadovoljavajuće i stabilno pojačanje u ISM pojasu. Mjerenja su pokazala da antena prati simulirane oblike dijagrama zračenja, ali je maksimalni dobitak niži za 1.76 dB zbog gubitaka u tekstilnom valovodu.

3.7. Gubitci tekstilne antene

Za određivanje gubitaka tekstilne antene potrebno je onemogućiti da ona zrači te joj mjeriti parametar S_{11} . Tada će parametar S_{11} iznositi 0 dB ako nema gubitaka, odnosno sva snaga koja je ušla reflektirat će se nazad u VNA (eng. Vector Network Analyzer). Sprječavanje zračenja ostvareno je zamotavanjem tekstilne antene aluminijskom folijom, čime je efektivno ostvaren kratki spoj. S_{11} parametar tada je dan slikom 3.46.

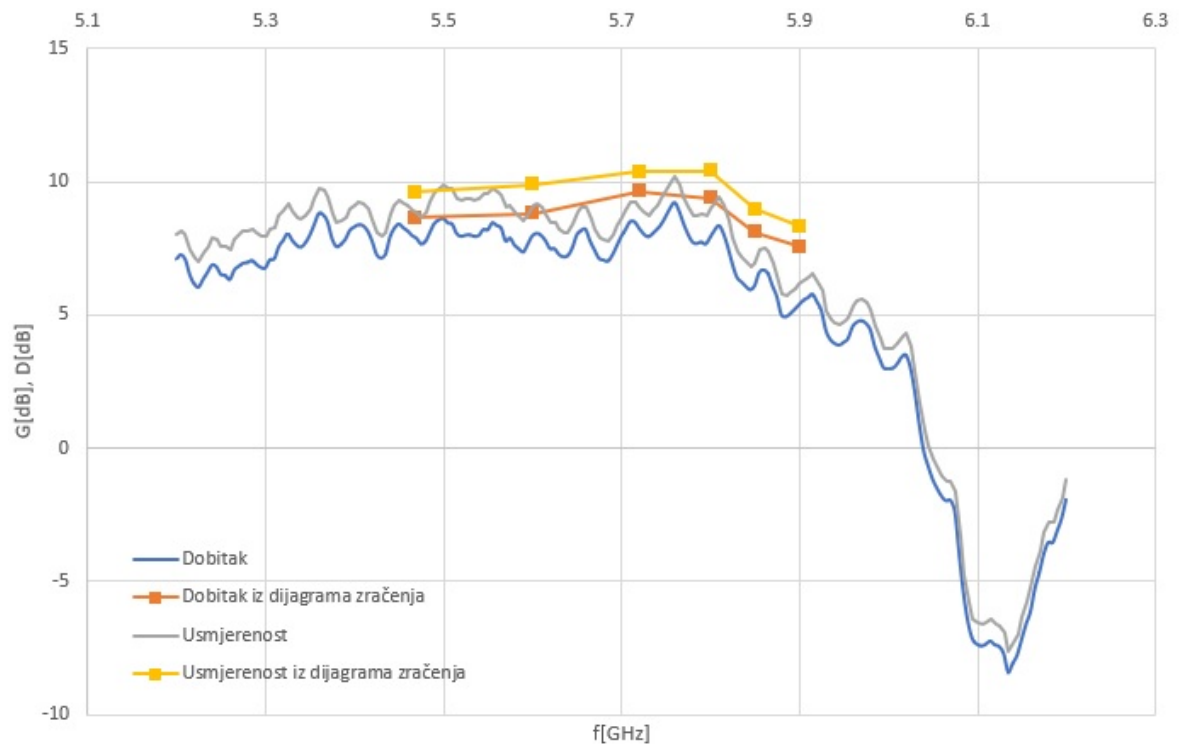


Slika 3.46: S_{11} parametar tekstilne antene koja ne zrači

Vidljivo je kako gubitci antene iznose oko 1 dB. Kako vrijedi:

$$G[\text{dB}] = D[\text{dB}] - L[\text{dB}], \quad (3.31)$$

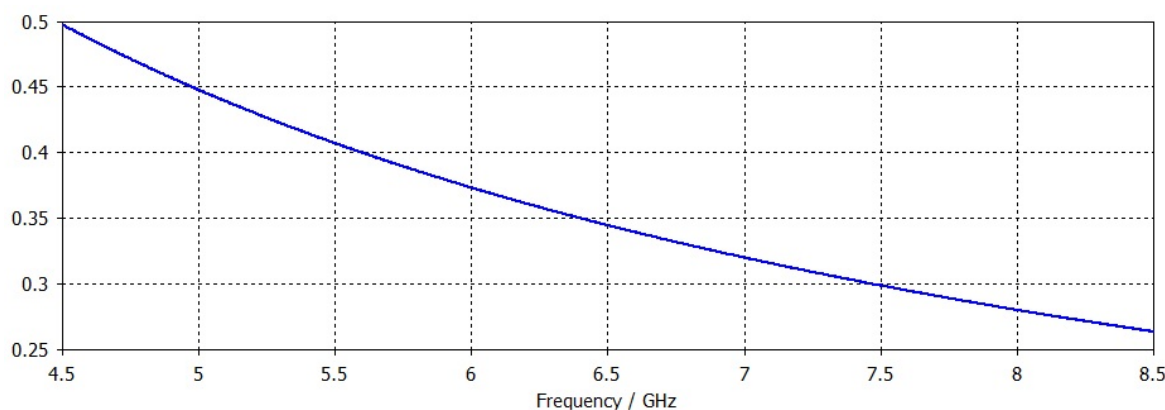
pri čemu su L gubitci antene, može se izračunati usmjerenost antene D . Tada je usmjerenost antene u smjeru u kojem smo mjerili dobitak u pojasu frekvencija i usmjerenost antene u položaju u kojem je davala nešto veći dobitak (položaj iz mjerenja dijagrama zračenja) dan slikom 3.47. Tako je vidljivo da je maksimalna usmjerenost tekstilne antene unutar samo 1 dB od simulirane maksimalne usmjerenosti. Gubitci su nastali zbog neprilagođenja antene na ulazu te gubitkom energije duljinom antene kroz spoj gdje se spajaju rubovi tkanine. U idućoj inačici antene to se može popraviti korištenjem šivaćeg stroja koji će moći jače stisnuti tkaninu te pozicioniranjem tog spoja na centar stranice valovoda jer će se tada efektivno stvoriti prorez po sredini valovoda koji će minimalno zračiti jer ne presijeca površinske strujnice.



Slika 3.47: Usmjerenost tekstilne antene

4. Simulacija zračenja valovodne tekstilne antene u blizini ljudskog tijela

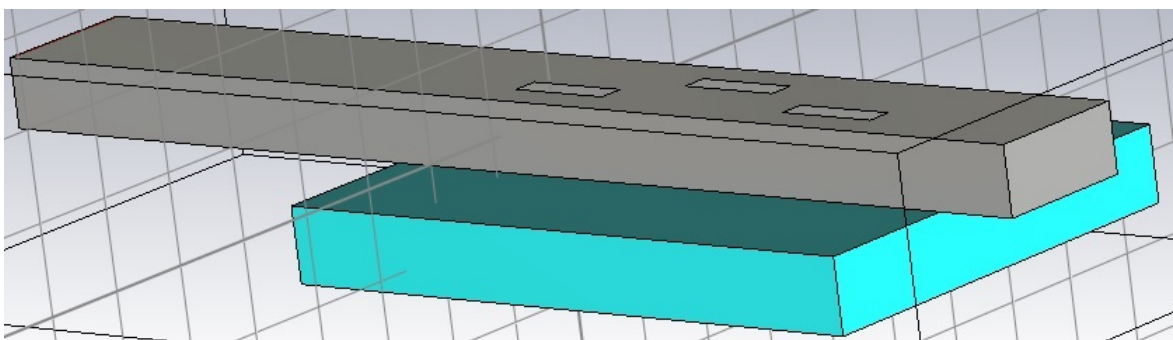
Zbog elektromagnetskog karaktera ljudskog tijela, odnosno vodljivog tkiva koje će uvesti velike gubitke, antenu koja dobro zrači u ljudsko tkivo teško je izraditi [12]. Planarne antene, kao i žičane antene, doživjet će promjenu u efektivnoj valnoj duljini, a time i promjenu u rezonantnoj frekvenciji ovisno o udaljenosti od ljudskog tijela. Antene koje su dizajnirane s uzemljenom ravninom ili reflektorom doživjet će osjetno manji utjecaj ljudskog tijela na njihovu rezonantnu frekvenciju te impedanciju [13]. Kako je izrađena tekstilna antena namijenjena za komunikaciju s nekom pristupnom točkom ili IoT tehnologijom u prostoriji, odnosno za komunikaciju sa senzorom unutar ljudskog tijela, treba razmotriti kakva će ona svojstva imati u slučaju kada je tkivo sa suprotne strane proreza (slučaj komunikacije s pristupnom točkom) te u slučaju kada je tkivo sa strane gdje su i prorezi (slučaj komunikacije sa senzorom unutar tijela). Prije simulacije takvih slučajeva treba modelirati materijal koji će predstavljati ljudsko tkivo. Prema [14] dana je tablica 4.1 koja opisuje vrijednosti relativne permitivnosti ϵ_r i vodljivosti σ po različitim frekvencijskim pojasevima koja opisuje materijal koji efektivno zamjenjuje ljudsko tkivo (tzv. IEEE model ljudskog tijela). Za gustoću tkiva uzima se $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Kako izrađena tekstilna antena radi u ISM pojasu od 5 GHz, uzete su vrijednosti $\epsilon_r = 48.2$ i $\sigma = 6.00 \text{ S/m}$. Vidljivo je da su i gubitci na pojasu 5 GHz najveći zbog najveće vodljivosti. Tada je tangens kuta gubitaka δ dan sa slikom 4.1.



Slika 4.1: Tangens kuta gubitaka $\tan \delta$ za ljudsko tijelo

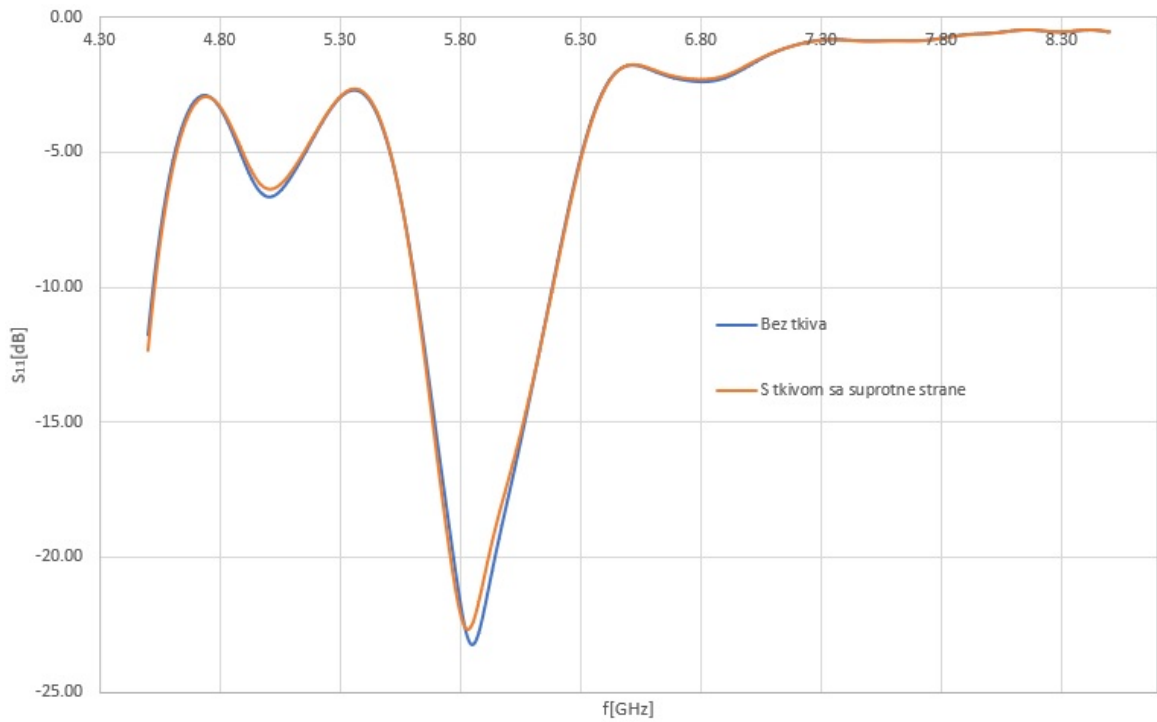
Tablica 4.1: IEEE model ljudskoj tijela - vrijednosti relativne permitivnosti ϵ_r i vodljivosti σ ovisno o frekvenciji

Frekvencija [MHz]	ϵ_r	σ [S/m]
150	61.9	0.80
300	58.2	0.92
450	56.7	0.94
835	55.2	0.97
900	55.0	1.05
915	55.0	1.06
1450	54.0	1.30
1610	53.8	1.40
1800 – 2000	53.3	1.52
2450	52.7	1.95
3000	52.0	2.73
5800	48.2	6.00

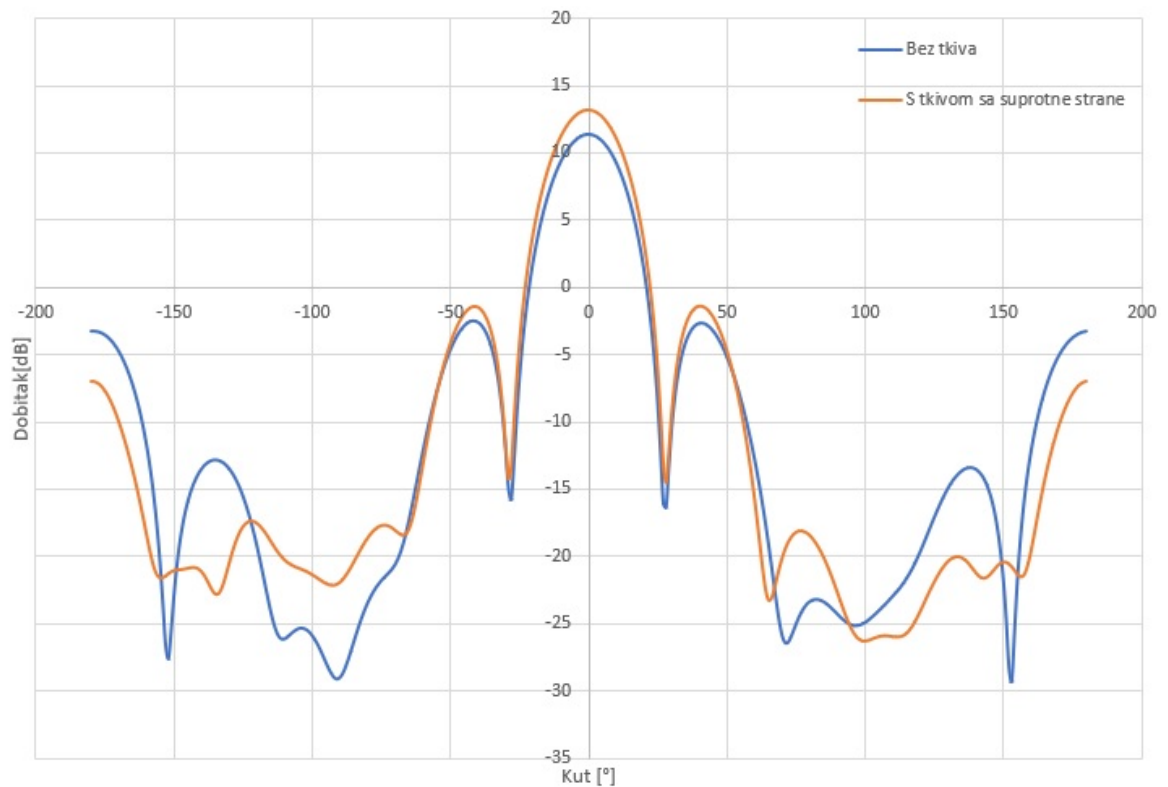


Slika 4.2: CST model tkiva sa suprotne strane proreza

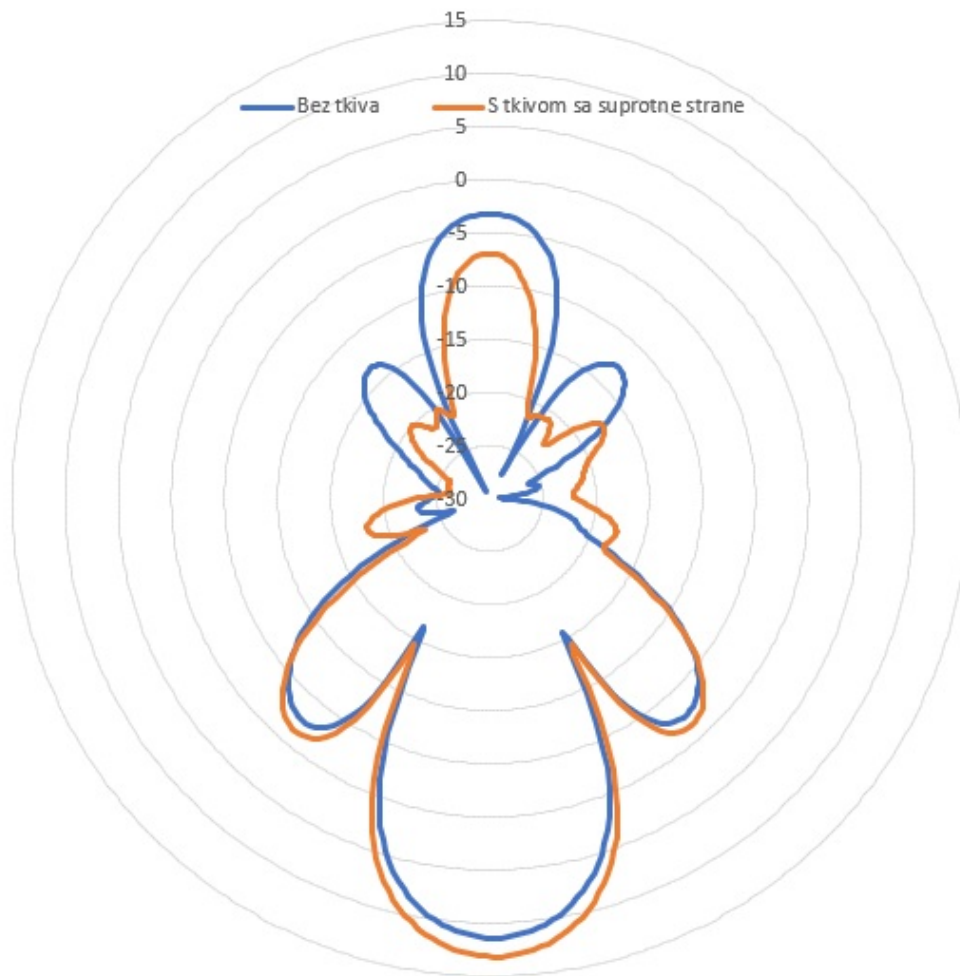
CST model za slučaj kada se tkivo nalazi sa suprotne strane proreza prikazan je slikom 4.2. Na slici 4.3 prikazan je S_{11} parametar u slučaju tkiva na suprotnoj strani proreza te na slikama 4.4 i 4.5 dijagram i polarni dijagram zračenja za takav slučaj.



Slika 4.3: S_{11} parametar tekstilne antene s tkivom sa suprotne strane proreza

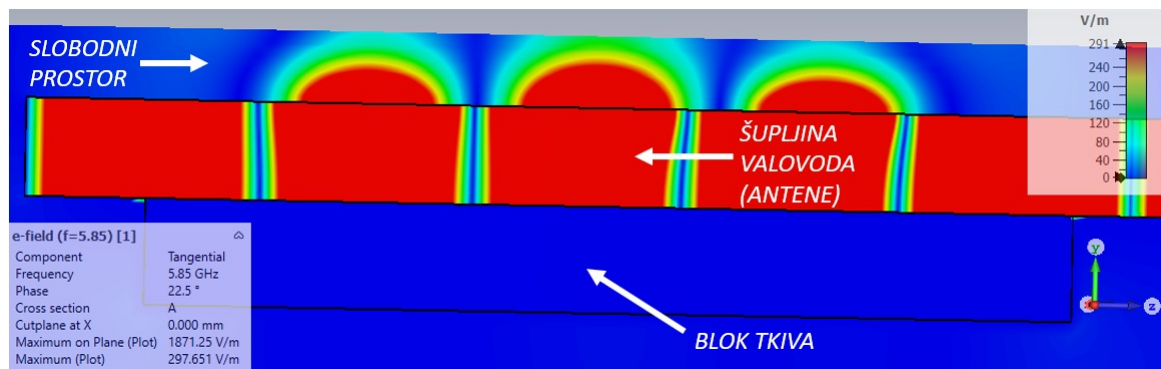


Slika 4.4: Dijagram zračenja tekstilne antene s tkivom sa suprotne strane proreza

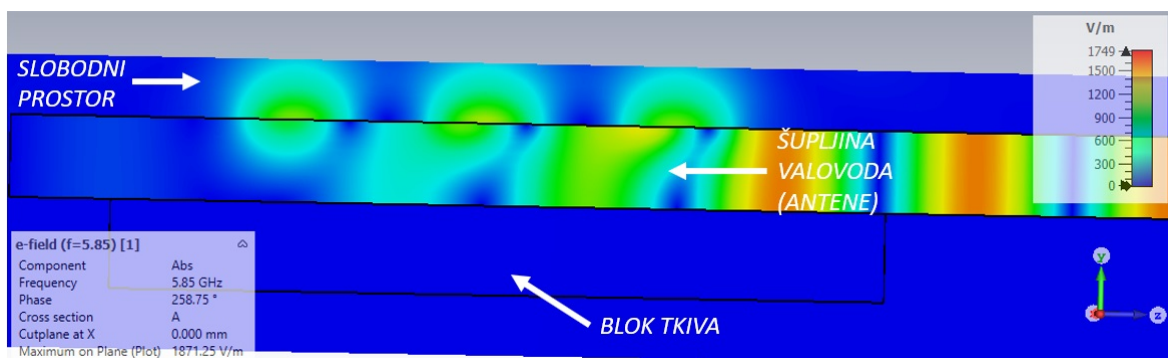


Slika 4.5: Polarni dijagram zračenja tekstilne antene s tkivom sa suprotne strane preseza - [dB]

Iz slika 4.3 – 4.5 vidljivo je da antena nesmetano zrači unatoč prisutnosti tkiva te da ima gotovo ista svojstva kao i kada tog tkiva nema, što je bio i cilj. S_{11} parametri na slici 4.3 praktički su indentični te je antena i dalje dobro prilagođena. S obzirom da je tkivo vodljivo, ono u pozadini antene djeluje kao reflektor i iz slika 4.4 i 4.5 vidljivo je kako antena dobije još 1.8 dB dobitka te sada u smjeru maksimalnog zračenja ima dobitak od 13.2 dB, čime su joj zapravo poboljšana svojstva. Ipak, potrebno je provjeriti prodire li elektromagnetski val u tkivo kako bi antena bila sigurna za upotrebu. Raspodjela tangencijalne komponentne električnog i ukupnog električnog polja u ravnini koja prolazi kroz osi valovoda i tkiva dana je slikama 4.6 i 4.7. Iz slika 4.6 i 4.7 vidljivo je kako polja unutar tkiva uopće nema i antena ne zrači neželjeno u tkivo, već samo u slobodni prostor. Tada se takva antena može koristiti za odašiljanje podataka prikupljenih iz senzora na ljudskom tijelu prema pristupnoj točki.

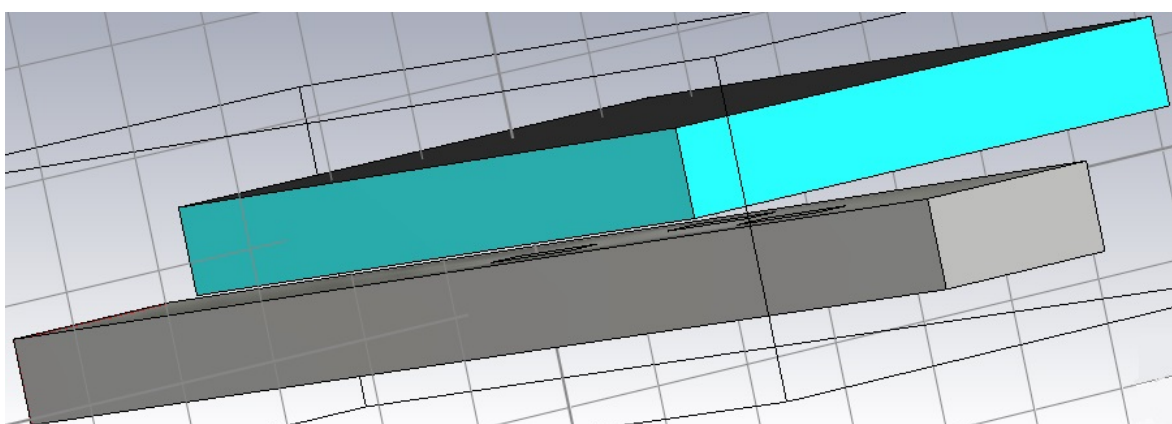


Slika 4.6: Raspodjela tangencijalne komponente električnog polja u ravnini kroz osi valovoda i tkiva



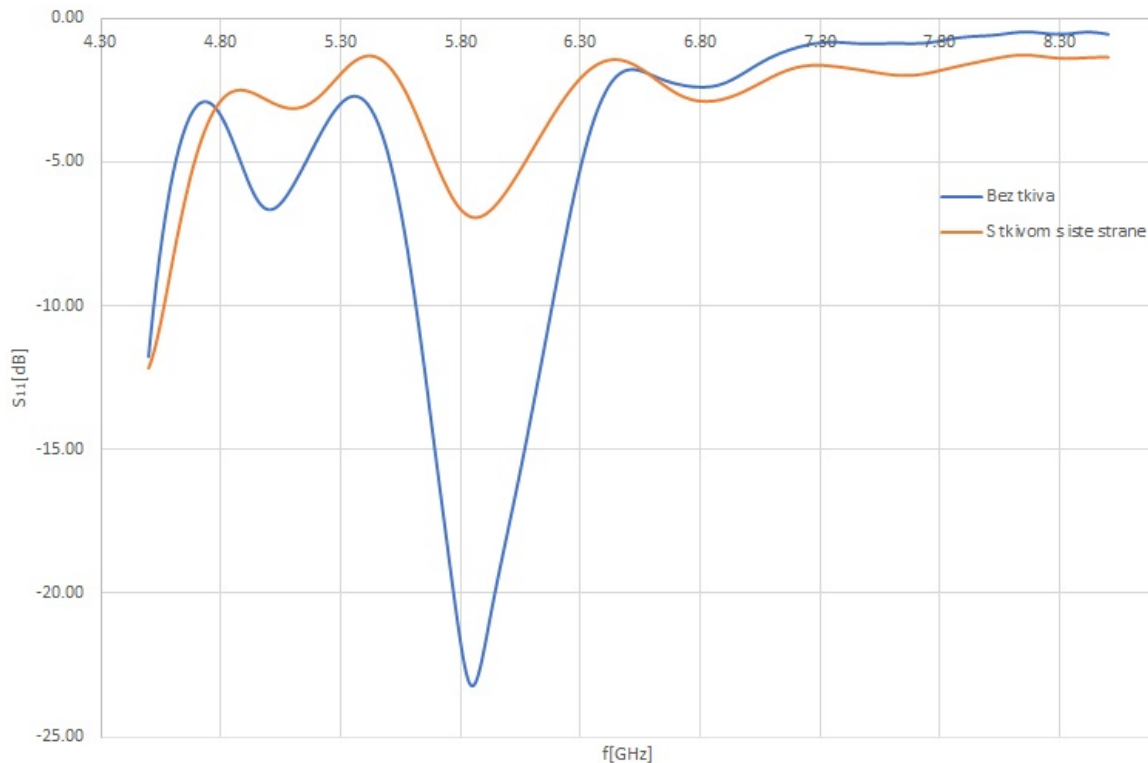
Slika 4.7: Raspodjela ukupnog električnog polja u ravnini kroz osi valovoda i tkiva

Slučaj kada se tkivo nalazi sa strane proreza nešto je složeniji i zahtijeva nešto drugačiji pristup. U realnosti antena ne bi bila skroz priljubljena uz tijelo, već bi postojao sloj odjeće između tkiva i antene. To se može modelirati umetanjem zračnog prostora debljine 5 mm između antene i tkiva. Takav model prikazan je slikom 4.8.



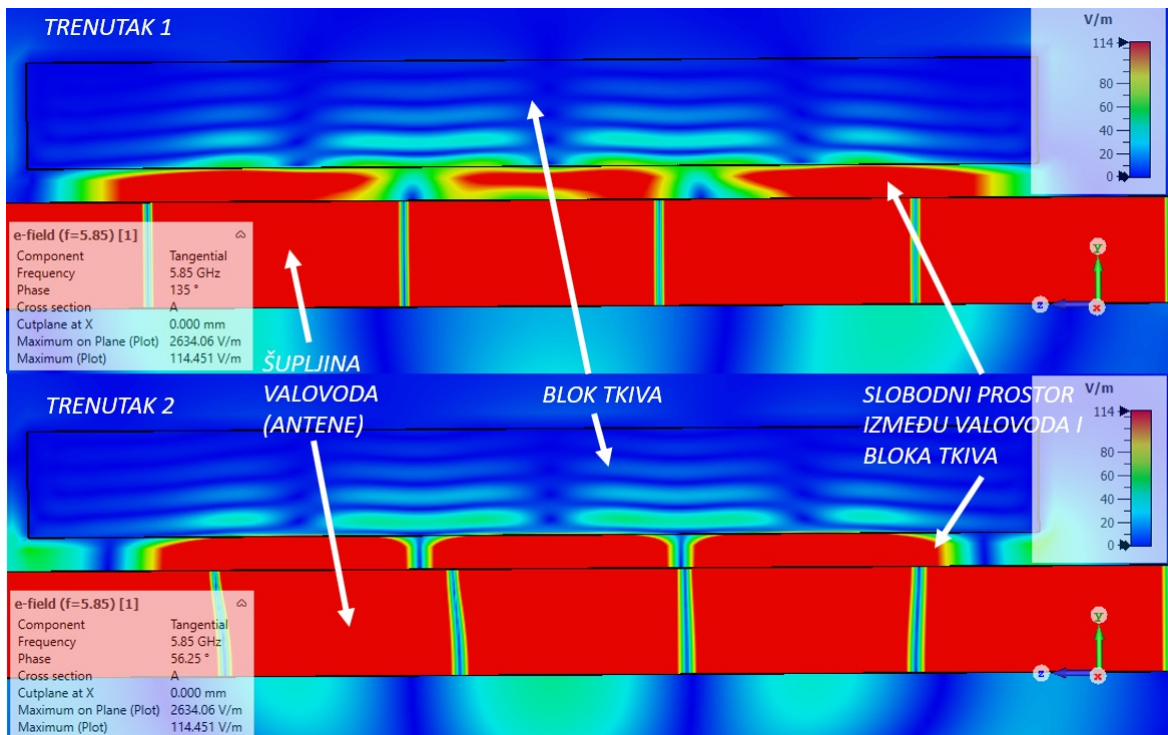
Slika 4.8: CST model tkiva s iste strane proreza

S_{11} parametar za takav slučaj dan slikom 4.9. Vidljivo je kako antena više nije dobro prilagođena i velik dio energije se reflektira. Promjena S_{11} parametra znači da se i ulazna impedancija antene značajno promjenila.

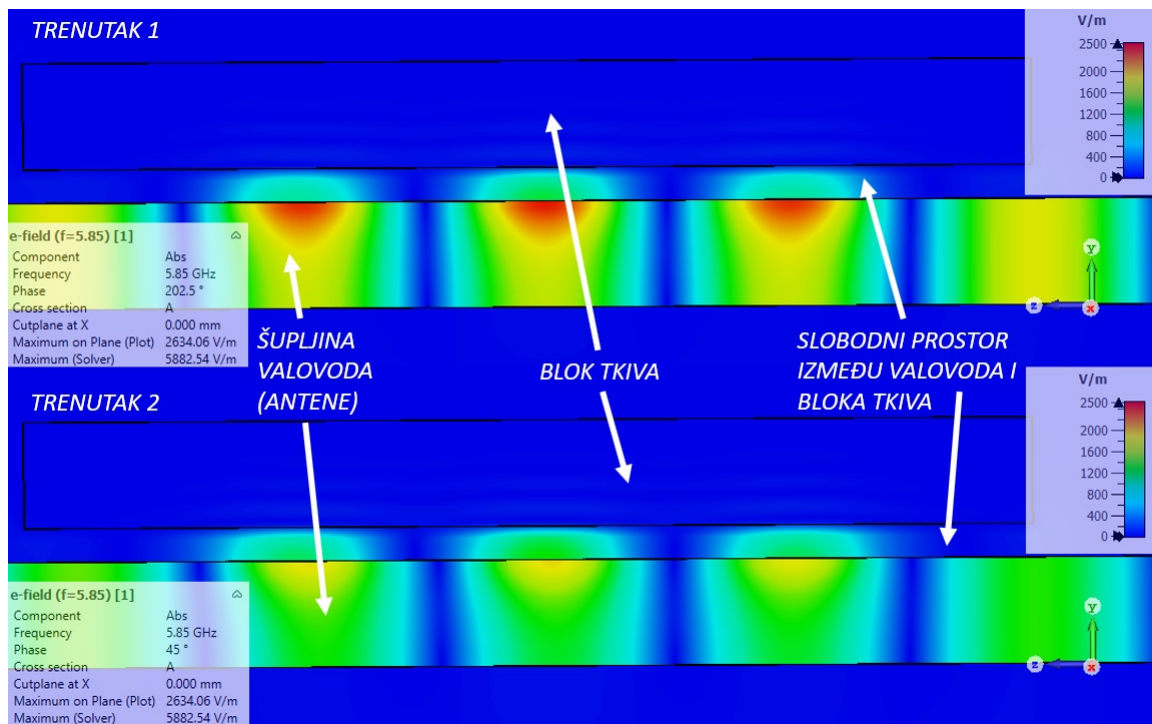


Slika 4.9: S_{11} parametar tekstilne antene s tkivom s iste strane proreza

Prilikom korištenja ove antene kao sredstvo zračenja energije u tijelo zanimljiva je raspodjela polja oko antene, a ne dijagram zračenja i daleko polje antene jer se tkivo nalazi u neposrednoj blizini antene i antena šalje energiju na blisku udaljenost. Tada je raspodjela tangencijalne komponentne električnog polja i ukupnog električnog polja u ravnini koja prolazi kroz osi valovoda i tkiva dana slikama 4.10 i 4.11. Na tim slikama vidljivo je da vrlo mali dio polja uopće prodire u tkivo i vrlo brzo se prigušuje s obzirom da je debljina sloja tkiva svega 5 mm. Daleko najveći dio energije zbog refleksije od sloja tkiva ostaje u prostoru između antene i tkiva, a samo manji dio prodire u tkivo. Iz slike 4.10 je također vidljivo da značajnija razina polja postoji iza antene, što pokazuje da antena zrači u neželjenom smjeru i postoji gubitak energije. Ovo sve pokazuje da izrađena tekstilna antena ne bi bila pretjerano dobro sredstvo komunikacije prema implantiranom senzoru unutar ljudskog tijela ili dobar izvor zračenja protiv tumora. Izrađena antena neće biti dobar izvor zračenja u tijelo jer je ona u svojoj suštini antena s curećim valom (LWA, eng. Leaky Wave Antenna), čiji val nailazi na prevelik kontrast između permitivnosti na prijelazu antena - tkivo i doživljava veliku refleksiju. Prilikom dizajniranja antena koje zrače u ljudsko tijelo potrebno je uzimati u obzir prisustvo ljudskog tijela, što predstavlja izazov u procesu dizajna i nužnu prilagodbu strukture antene. Antenu za takvu primjenu moguće je dizajnirati na način da se valovod ispuni dielektrikom slične permitivnosti onoj realnog dijela permitivnosti ljudskog tijela.



Slika 4.10: Raspodjela tangencijalne komponente električnog polja u ravnini kroz osi valovoda i tkiva

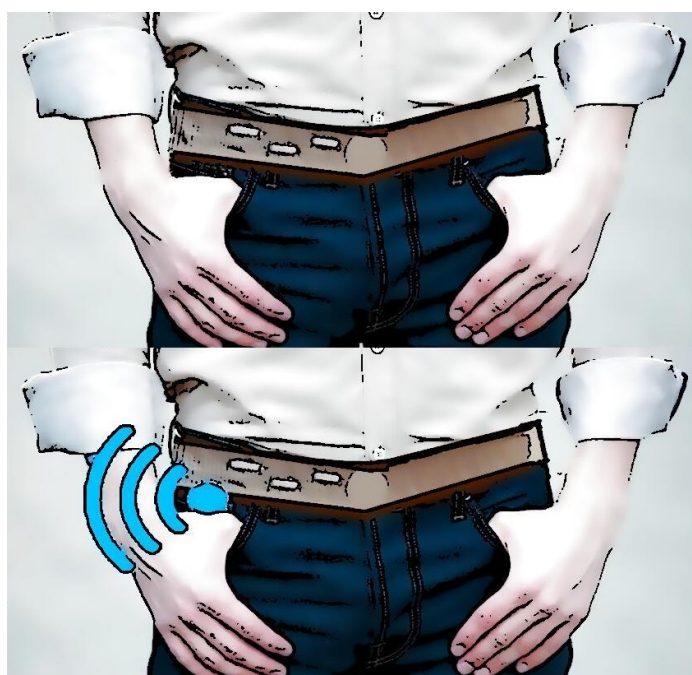


Slika 4.11: Raspodjela ukupnog električnog polja u ravnini kroz osi valovoda i tkiva

Dakle, simulacije su pokazale da bi se izrađena antena ponašala puno bolje kao sredstvo komunikacije senzora na tijelu s pristupnom točkom u prostoru nego kao sredstvo zračenja energije u tijelo.

5. Poboljšanja i daljnja istraživanja

Specifikacije tekstilne valovodne antene moguće je poboljšati korištenjem vodljivih niti za spajanje tkanine umjesto običnog konca te korištenjem šivaćeg stroja koji će moći šiti uz rub valovoda. Osim toga, moguće je koristiti tvrđu vrstu stiropora koji će tekstilnom valovodu dati pravilniji oblik i napraviti ga manje podložnim deformacijama. U svrhu smanjivanja refleksije na ulazu u antenu potrebno je osmisliti što bolji način spajanja antene i prirubnice, odnosno ulaza u antenu, kako bi se smanjila refleksija na ulazu i kako bi se smanjilo curenje energije. Kako je antena napravljena od vodljivog tekstila, vrlo je lagana i pogodna za ugradnju u neki odjevni predmet poput remena i bilo bi ju lagano cijelo vrijeme nositi uz tijelo kako bi očitane podatke sa senzora na tijelu slala prema pristupnoj točki ili nekom drugom IoT sustavu. Mogući izgled takvog finalnog proizvoda prikazan je slikom 5.1. Stoga je u sljedećim koracima potrebno izraditi tekstilnu antenu ispunjenu spužvastim materijalom pogodnijim za ugradnju na remen ili odjeću te pritom ne dopustiti deformaciju antene i značajno narušavanje njenih karakteristika. Za zračenje antene u tijelo potrebno je promijeniti dizajn i ispuniti antenu dielektrikom slične permitivnosti kao one od tijela.



Slika 5.1: Tekstilna antena u upotrebi

Ipak, prije ugradnje antene na tijelo čovjeka treba izmjeriti njen utjecaj na organizam. Kako antena zrači u ISM pojasu 5 GHz, treba razmotriti specifičnu apsorbiranu snagu tkiva na koje je prislonjena antena. Specifična apsorbirana snaga (eng. Specific Absorption Rate) definira se kao [15]:

$$SAR \left[\frac{W}{kg} \right] = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (5.1)$$

, pri čemu je W energija, V volumen, t vrijeme, m masa, a ρ gustoća tkiva. Alternativno SAR možemo računati kao [16]:

$$SAR = \frac{\sigma E_t^2}{\rho} \quad (5.2)$$

, gdje je E_t efektivna vrijednost električnog polja, a σ vodljivost tkiva. Tako je moguće, uz korištenje dipol antene i komada životinjskog tkiva poznate električne vodljivosti (npr. mesa za prehranu) koje je prislonjeno na tekstilnu antenu, mjeriti razinu električnog polja s druge strane tkiva i unutar tkiva. Pri tome treba imati na umu da je takvo tkivo izgubilo dio krvi pa su mu se promijenila elektromagnetska svojstva. Bilo bi moguće ubrizgati vodu u takvo tkivo kako bi ona glumila krv i obnovila stara elektromagnetska svojstva. U današnje se doba kao alternativa pravog tkiva koriste eksperimentalni fantomi koji mogu biti tekućine (šećerne i alkoholne otopine), gelovi (polietilenski prah, glicerol), polukrutine (agar, silikonska guma) ili krutine (keramika) [17],[18]. Iz dobivenih rezultata moguće je zaključiti zrači li antena na način da obavlja željenu zadaću, a pritom ne šteti organizmu i ne prelazi dozvoljene razine elektromagnetskih polja za čovjeka. Mjerenje SAR -a kod antenskih nizova, kao što je ovaj obrađivan u ovome radu, predstavlja poveliku poteškoću zato što mjerena vrijednost električnog polja jako ovisi o relativnim fazama svakog elementa antenskog niza pa je potrebno razviti specijalne tehnike mjerenja istog [16]. Zbog činjenice da su elementi antenskog niza u ovome radu razmaknuti za pola valne duljine u valovodu, postojat će konstantno zbrajanje u fazi električnog polja pa će se problem nešto pojednostaviti. Osim utjecaja na živi organizam valja promotriti izdržljivost antene na mehaničke podražaje koji se očekuju prilikom nošenja, a to uključuje trenje, rastezanje, savijanje i pranje te utjecaj različitih vremenskih uvjeta.

6. Zaključak

Posljednih godina postoji iznimna potražnja za integracijom senzorskih i komunikacijskih sustava u ili u blizinu ljudskog tijela pa je potrebno razmatrati nove elektromagnetske strukture koje će omogućiti ispunjavanje takvih zadaća. Primjene takvih sustava nalaze se u medicini, vojnoj i spasilačkoj tehnici, svemirskim istraživanjima, ali i u drugim područjima. Osim integracije u odjeću valovodne antene vrlo su pogodne za integraciju u urbani krajo-lik pa ih je zbog toga vrlo lako ugraditi u zidove, podove ili ograde te ih učiniti vizualno neprimjetnim [19].

U radu je razmatrana izrada tekstilnog valovoda kojem su izmjereni gubitci i uspoređeni s gubiticima aluminijskog valovoda. Nakon mjerenja gubitaka objašnjena je teorijska podloga za izradu aluminijske i tekstilne valovodne antene s prorezima te su izrađene simulacije za obje u programskom paketu CST Studio Suite. Nakon obavljenih simulacija obje su antene i izrađene te su mjereni njihovi parametri. Mjerenja su pokazala visoko slaganje s očekivanjima i simulacijama. Iako je aluminijska antena pokazala veći stupanj slaganja sa simulacijom, tekstilna antena daje iznimno ohrabrujuće rezultate jer od simulacije odstupa razumnih 1.76 dB od kojih oko 1 dB iznose gubitci, kojima su prvenstveno izvor gubitci uslijed neprilagođenja. Osnovne prednosti tekstilnih antena jesu iznimno mala masa te njena mogućnost ugradnje u odjevni predmet i integracija u blizinu ljudskog tijela. Unatoč nešto manjem dobitku, tekstilna, kao i aluminijska antena, vrlo dobro prati predviđeni dijagram zračenja. Simulacija tekstilne antene u blizini tkiva pokazala je da bi izrađena tekstilna antena izvrsno radila kao odašiljačka antena s tijela prema pristupnoj točki ili IoT sustavu, a za rad kao odašiljačka antena prema implantiranom senzoru u tijelu treba izraditi drugačiji dizajn. Zbog blizine djelovanja ljudskog tijela i razmatrane antene u sljedećim koracima potrebno je i izmjeriti njen elektromagnetski utjecaj na živi organizam te napraviti dizajn antene koja će moći zračiti u tijelo uz poštivanje svih zdravstvenih normi. Osim elektromagnetskog karaktera antene u blizini tijela treba ispitati njenu izdržljivost na mehaničke podražaje i vremenske uvjete te izraditi savitljiviji prototip pogodniji za ugradnju na odjeću.

ZAHVALE

Iskreno hvala prof. dr. sc. Zvonimiru Šipušu na dragocjenim savjetima i pomoći tijekom izrade ovoga rada te ukazanoj prilici da radimo na ovom projektu.

Puno hvala prof. dr. sc. Davoru Bonefačiću na ustupljanju materijala potrebnih za izradu tekstilne antene.

Također, puno hvala dr. sc. Mihi Klaiću i timu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu na izradi aluminijske antene i pripadajuće prirubnice.

Na kraju, hvala gosp. Damiru Petričeviću na pomoći tijekom sastavljanja mjernog postava.

LITERATURA

- [1] Branimir Ivšić. *Tekstilne antene za komunikacijske sustave na ljudskom tijelu*. Doktorska dizertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2013.
- [2] Rita Paradiso and Laura Caldani. *Knitted Electronic Textiles: From the Design to the Integration Process*. Wearable Sensors (Second Edition), 2021.
- [3] Nurul Huda Abd Rahman i Yoshihide Yamada i Muhammad Shakir Amin Nordin. *Analysis on the Effects of the Human Body on the Performance of Electro-Textile Antennas for Wearable Monitoring and Tracking Application*. Materials, 2019.
- [4] Emil Jovanov i Aleksandar Milenkovic i Chris Otto i Piet C de Groen. *A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation volume 2, Article number: 6, 2005.
- [5] Pekka Salonen i Yahya Rahmat-Sami i Heli Hurme i Markku Kivikosk. *Dual-Band Wearable Textile Antenna*. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 1, 2004.
- [6] Zlatko Smrkić. *Mikrovalna elektronika*. Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [7] Juraj Bartolić. *Mikrovalna elektronika*. Graphis, Zagreb, 2008.
- [8] Rita Salvado i Caroline Loss i Ricardo Gonçalves i Pedro Pinho. *Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey*. Sensors, 2012.
- [9] Ervin Zentner. *Antene i radiosustavi*. Graphis, Zagreb, 2001.
- [10] Arthur A. Oliner. *The Impedance Properties of Narrow Radiating Slots in the Broad Face of Rectangular Waveguide. Part I - Theory*. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1957.
- [11] Arthur A. Oliner. *The Impedance Properties of Narrow Radiating Slots in the Broad Face of Rectangular Waveguide. Part II - Comparison with Measurement*. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1957.

- [12] Nikolay Atanasov i Gabriela Atanasova i Blagovest Atanasov. *Wearable Textile Antennas with High Body-Antenna Isolation: Design, Fabrication, and Characterization Aspects*. IntechOpen, 2020.
- [13] Jaime G. Santas i Akram Alomainy i Yang Hao. *Textile Antennas for On-Body Communications: Techniques and Properties*. Conference: Antennas and Propagation, 2007.
- [14] David L. Means i Kwok W. Chan. *Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields*. Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology, 2001.
- [15] Davor Bonefačić. *Osnove bežičnih sustava*. Predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2021.
- [16] Dinh Thanh Le i Soichi Watanabe. *Analyzing Practical Issues in SAR Measurements of Multiple-Antenna Transmitting Devices*. 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2018.
- [17] Koichi Ito i Chia-Heisn Lin i Ho-Yu Lin. *Evaluation of Wearable and Implantable Antennas with Human Phantoms*. Handbook of Antenna Technologies, 2016.
- [18] Koichi Ito. *Human Body Phantoms for Evaluation of Wearable and Implantable Antennas*. Department of Medical System Engineering, Chiba University, 2007.
- [19] Olivier Caytan i Sam Lemey i Sam Agneessens i sur. *Half-Mode Substrate-Integrated-Waveguide Cavity-Backed Slot Antenna on Cork Substrate*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, 2016.

POPIS SLIKA

2.1. Skica pravokutnog valovoda	2
2.2. Efikasnost oklapanja vodljive tkanine	4
2.3. Tekstilni valovod	4
2.4. Kvalitetan čvrsti valovod	5
2.5. Mjerenje gubitaka	5
2.6. S_{21} parametar tekstilnog valovoda	6
2.7. S_{11} parametar tekstilnog valovoda	6
2.8. Prigušna konstanta α tekstilnog valovoda	7
2.9. S_{21} parametar kvalitetnog čvrstog valovoda	8
3.1. Prorezi na valovodu	9
3.2. Longitudinalni prorez na valovodu	10
3.3. Nadomjesna shema admitancije i impedancije za longitudinalni prorez . . .	10
3.4. Otpor nadomjesne sheme longitudinalnog proreza	12
3.5. Reaktancija nadomjesne sheme longitudinalnog proreza	13
3.6. Vodljivost nadomjesne sheme longitudinalnog proreza	13
3.7. Susceptancija nadomjesne sheme longitudinalnog proreza	14
3.8. S_{11} parametar za optimiziranu tekstilnu antenu	15
3.9. Simulirani S_{11} parametar za tekstilnu antenu	15
3.10. Model tekstilne antene	16
3.11. Model tekstilne antene	16
3.12. 3D dijagram usmjerenosti simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz	17
3.13. 3D dijagram usmjerenosti simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz	17
3.14. Stražnja strana 3D dijagrama usmjerenosti simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz	18
3.15. Polarni dijagram zračenja simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz	18
3.16. Dijagram zračenja simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz	19
3.17. Shema antenskog niza	20
3.18. Simulirani S_{11} parametar za aluminijsku antenu	21
3.19. Model aluminijske antene	21

3.20. Model aluminijske antene	22
3.21. 3D dijagram usmjerenosti simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz . . .	23
3.22. 3D dijagram usmjerenosti simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz . . .	23
3.23. Stražnja strana 3D dijagrama usmjerenosti simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz	24
3.24. Polarni dijagram zračenja simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz . . .	24
3.25. Dijagram zračenja simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz	25
3.26. Dobitak mjerne antene	27
3.27. Aluminijska valovodna antena s prorezima	27
3.28. Aluminijska valovodna antena s prorezima	28
3.29. Mjerenje S_{11} parametara aluminijske antene	28
3.30. Mjerenje dobitka i dijagrama zračenja aluminijske antene	29
3.31. S_{11} parametar aluminijske antene	30
3.32. Dijagram zračenja aluminijske antene na 5.85 GHz	30
3.33. Polarni dijagram zračenja aluminijske antene na 5.85 GHz - [dB]	31
3.34. Dijagram zračenja aluminijske antene u pojasu frekvencija	32
3.35. Polarni dijagram zračenja aluminijske antene u pojasu frekvencija - [dB] . .	32
3.36. Tekstilna valovodna antena s prorezima	34
3.37. Tekstilna valovodna antena s prorezima	34
3.38. Tekstilna valovodna antena s prorezima	35
3.39. Tekstilna valovodna antena s prorezima	35
3.40. S_{11} parametar tekstilne antene	36
3.41. Dobitak tekstilne antene	37
3.42. Dijagram zračenja tekstilne antene	37
3.43. Polarni dijagram zračenja tekstilne antene - [dB]	38
3.44. Dijagram zračenja tekstilne antene u pojasu frekvencija	38
3.45. Polarni dijagram zračenja tekstilne antene u pojasu frekvencija - [dB]	39
3.46. S_{11} parametar tekstilne antene koja ne zrači	40
3.47. Usmjerenost tekstilne antene	41
4.1. Tangens kuta gubitaka $\tan \delta$ za ljudsko tijelo	42
4.2. CST model tkiva sa suprotne strane proreza	43
4.3. S_{11} parametar tekstilne antene s tkivom sa suprotne strane proreza	44
4.4. Dijagram zračenja tekstilne antene s tkivom sa suprotne strane proreza . . .	44
4.5. Polarni dijagram zračenja tekstilne antene s tkivom sa suprotne strane pro- reza - [dB]	45
4.6. Raspodjela tangencijalne komponente električnog polja u ravnini kroz osi valovoda i tkiva	46

4.7. Raspodjela ukupnog električnog polja u ravnini kroz osi valovoda i tkiva . .	46
4.8. CST model tkiva s iste strane proreza	46
4.9. S_{11} parametar tekstilne antene s tkivom s iste strane proreza	47
4.10. Raspodjela tangencijalne komponente električnog polja u ravnini kroz osi valovoda i tkiva	48
4.11. Raspodjela ukupnog električnog polja u ravnini kroz osi valovoda i tkiva . .	48
5.1. Tekstilna antena u upotrebi	49

POPIS TABLICA

2.1. Specifikacije vodljive tkanine	4
3.1. Specifikacije simulirane tekstilne antene na 5.85 GHz	16
3.2. Postotne izračene snage po prorezima tekstilne antene	19
3.3. Specifikacije simulirane aluminijske antene na 5.85 GHz	22
3.4. Postotne izračene snage po prorezima aluminijske antene	25
3.5. Specifikacije mjerne antene	26
4.1. IEEE model ljudskoj tijela - vrijednosti relativne permitivnosti ϵ_r i vodljivosti σ ovisno o frekvenciji	43

Konstrukcija tekstilne antene za senzorske sustave u blizini ljudskog tijela

Davorin Mikulić i Evita Šopp

Sažetak

Ovim radom pokazana je izrada tekstilnog valovoda i analizirani su njegovi gubitci. Dotaknuta je problematika nejednolike pobude pojedinih prorez-antena unutar valovoda kao i pripadajuća teorija vezana za izradu valovodnih antena. U programskom alatu CST Studio Suite dizajnirane su dvije valovodne antene s prorezima, jedna od aluminijske, druga od vodljivog tekstila te su im uspoređena svojstva. Obje antene su fizički izrađene te su njihova svojstva izmjerena i uspoređena. Na kraju je napravljena simulacija koja predviđa ponašanje tekstilne antene u blizini ljudskog tijela te su predložena moguća poboljšanja antene.

Ključne riječi: valovodna antena, prorez, aluminij, vodljivi tekstil, ljudsko tijelo

Construction of Textile Antenna for Sensor Systems near the Human Body

Davorin Mikulić and Evita Šopp

Summary

The goals of this paper were to produce a sufficient textile waveguide and measure its losses. After obtaining the right waveguide, it was essential to show proper theory for producing slotted waveguide antenna arrays and discuss the problem of non-uniform excitation of antenna slots within the waveguide antenna array. There were two antennas designed using the CST Studio Suite, one from aluminum and one from conductive textile. Both antennas were experimentally realised and its characteristics have been both measured and compared. At the end of the paper a simulation that predicts textile antenna behavior near the human body is shown and some improvements to the antenna are proposed.

Keywords: waveguide antenna, slot, aluminium, conductive textile, human body