

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Projektni rad

**Usporedba prstenastih rezonatora za mjerenje dielektričnih
parametara materijala**

Rijeka, rujan 2020.

Igor Virag

Sadržaj

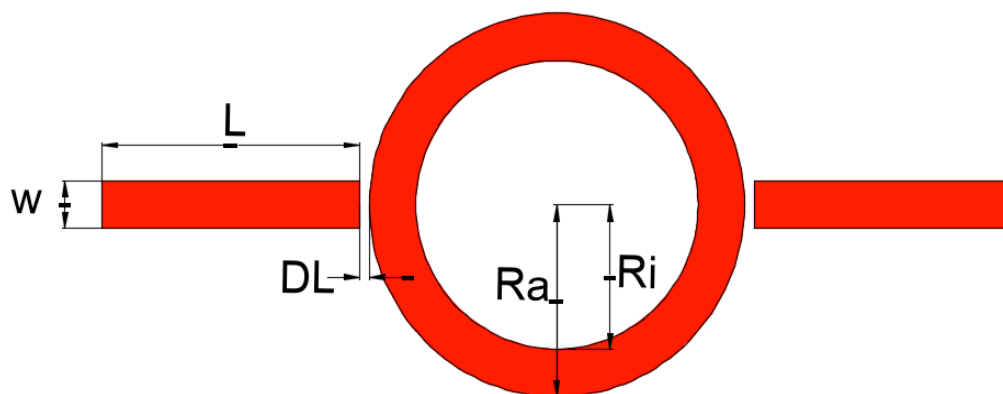
1.	UVOD.....	1
2.	ALGORITMI ZA IZRAČUN GEOMETRIJE REZONATNOG PRSTENA	2
2.1.	Algoritmi za računanje rezonantnog prstena	2
2.1.1.	Metoda računanja širine prijenosne linije na substratu	2
2.1.2.	Metoda računanja efektivne permitivnosti.....	3
2.1.3.	Metoda računanja vodeće valne duljine	3
2.1.4.	Metoda računanja srednje vrijednosti radijusa rezonantnog prstena.....	4
2.1.5.	Metoda računanja radijusa vanjskog i unutarnjeg kruga rezonantnog prstena	4
2.1.6.	Metoda računanja duljine prijenosne linije	4
2.1.7.	Metoda računanja razmaka elektromagnetske sprege.....	5
2.2.	Algoritmi za računanje dvostrukog rezonantnog prstena	5
2.3.	Alternativna formula za izračunavanje širine prijenosne linije.....	6
3.	SIMULACIJE	7
3.1.	Simuliranje prstenastog rezonatora za frekvenciju 2.45 GHz.....	7
3.2.	Simuliranje prstenastog rezonatora za frekvenciju 915 MHz.....	9
3.3.	Simuliranje prstenastog rezonatora za frekvenciju 868 MHz.....	10
3.4.	Simuliranje dvostrukog prstenastog rezonatora za frekvenciju 2.45 GHz.....	12
3.5.	Simuliranje dvostrukog prstenastog rezonatora za frekvenciju 915 MHz.....	14
3.6.	Simuliranje dvostrukog prstenastog rezonatora za frekvenciju 868 MHz.....	16
3.7.	Usporedba S21 parametara prstenastih rezonatora	17
4.	Q FAKTOR.....	19
4.1.	Q faktor jednostrukog prstenastog rezonatora 2.45GHz	20
4.2.	Q faktor jednostrukog prstenastog rezonatora 915 MHz	21
4.3.	Q faktor jednostrukog prstenastog rezonatora 868 MHz	23
4.4.	Q faktor dvostrukog prstenastog rezonatora 2.45 GHz.....	24
4.5.	Q faktor dvostrukog prstenastog rezonatora 915 MHz.....	25
4.6.	Q faktor dvostrukog prstenastog rezonatora 868 MHz.....	27
4.7.	Q faktor svih simuliranih rezonantnih prstena	29
5.	DIZAJNIRANJE PCB PLOČICE	31
5.1.	Dizajn PCB-a za prstenasti rezonator 2.45GHz	31
5.2.	Dizajn PCB-a za prstenasti rezonator 915 MHz	32
5.3.	Dizajn PCB-a za prstenasti rezonator 868 MHz	33
5.4.	Dizajn PCB-a za dvostruki prstenasti rezonator 2.45 GHz	34

5.5.	Dizajn PCB-a za dvostruki prstenasti rezonator 915 MHz	35
5.6.	Dizajn PCB-a za dvostruki prstenasti rezonator 868 MHz	36
5.7.	Narudžba PCB-a	37

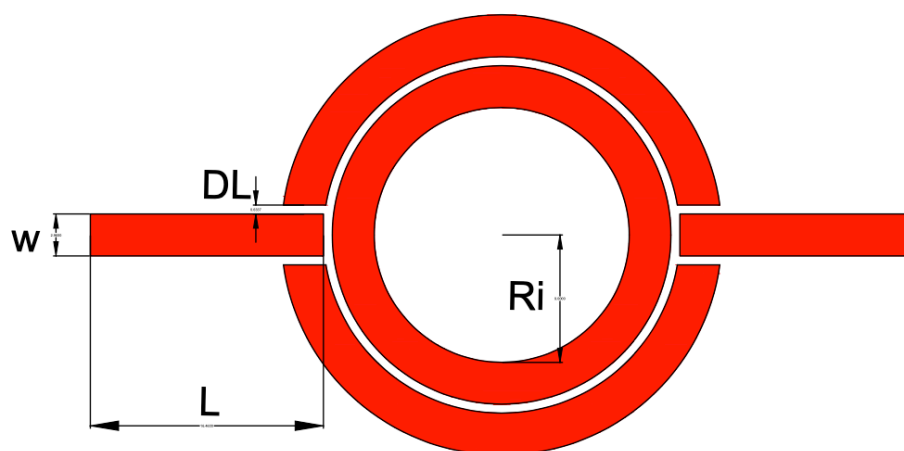
1. UVOD

Prstenasti rezonator koristi se u svrhu određivanja kompleksne permitivnosti željenog materijala. Sama građa sastoji se od prijenosne liije i prstena na substratu. Prijenosne linije i rezonantni prsten su dizajnirani na način da njihova širina na substratu odgovara prilagođenju impedancije od $50\ \Omega$.

Između rezonantnog prstena i prijenosne linije nalazi se mali razmak elektromagnetske sprege. Kako bi se generirala rezonancija prstena, razmak elektromagnetske sprege i prijenosna linija generiraju odgovarajući kapacitet C i induktivitet L . Razmak elektromagnetske sprege tipično iznosi od 0.1 do 1 puta širine prijenosne linije (eng. Microstrip). Na slici 1.1. grafički je prikazan prstenasti rezonator, a na slici 1.2. grafički je prikazan dvostruki prstenasti rezonator.



Slika 1.1 Prstenasti rezonator s pripadajućim geometrijskim oznakama



Slika 1.2 Dvostruki prstenasti rezonator s pripadajućim geometrijskim oznakama

2. ALGORITMI ZA IZRAČUN GEOMETRIJE REZONANTNOG PRSTENA

U ovom poglavlju opisane su formule koje su korištene za izračun rezonantnog prstena (eng. Ring resonator) i dvostrukog rezonantnog prstena (eng. Double ring resonator).

2.1. Algoritmi za računanje rezonantnog prstena

Izračun geometrije rezonantnog prstena najviše ovisi o tri glavna faktora:

- Relativna permitivnost substrata
- Frekvencija rezonancije
- Debljina substrata

Vrijednosti prethodno spomenutih faktora omogućuju izračun ostalih parametara koji su bitni za dizajn prstenastog rezonatora.

2.1.1. Metoda računanja širine prijenosne linije na substratu

Kako bi izračunali širinu prijenosne linije (eng. Microstrip line) na substratu potrebno je koristiti formule (2.1), (2.2) i (2.3) [1].

$$A = \frac{Z_0}{60} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \cdot \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r}\right) \quad (2.1)$$

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} < 2 \quad (2.2)$$

$$W = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \cdot d \quad (2.3)$$

gdje je:

A –faktor koji mora u iznosu biti manji od 2.079,

ϵ_r – relativna permitivnost substrata (FR4 približno 4.6),

Z_0 – impedancija prilagođenja (tipično 50 Ω)

W – širina mikrostrip linije

d – debljina substrata

2.1.2. Metoda računanja efektivne permitivnosti

Koristeći rezultate iz formula (2.2) i (2.3), sada je moguće izračunati efektivnu permitivnost koristeći formulu (2.4) [1].

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{d}{w}}} \quad (2.4)$$

gdje je:

ε_{eff} – efektivna permitivnost,

ε_r – relativna permitivnost substrata (FR4 približno 4.6),

w – širina mikrostrip linije,

d – debljina substrata.

2.1.3. Metoda računanja vodeće valne duljine

Koristeći rezultate iz formule (2.4), sada je moguće izračunati vodeću valnu duljinu koristeći formulu (2.5) [1].

$$\lambda_g = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}} f} \quad (2.5)$$

gdje je:

λ_g – vodeća valna duljina,

ε_{eff} – efektivna permitivnost,

f – frekvencija rezonancije,

c – brzina svjetla.

2.1.4. Metoda računanja srednje vrijednosti radijusa rezonantnog prstena

Koristeći rezultat iz formule (2.5), sada je moguće izračunati srednju vrijednost radijusa rezonantnog prstena. Srednja vrijednost radijusa izražena je formulom (2.6) [1].

$$R_{sr} = \frac{n \cdot \lambda_g}{2 \cdot \pi} \quad (2.6)$$

gdje je:

λ_g – vodeća valna duljina,

R_{sr} – srednja vrijednost radijusa rezonantnog kruga,

n – red rezonancije (1,2,3...).

2.1.5. Metoda računanja radijusa vanjskog i unutarnjeg kruga rezonantnog prstena

Koristeći rezultat iz formule (2.6), sada je moguće dobiti radijus vanjskog i unutarnjeg kruga rezonantnog prstena [1].

$$R_i = R - \frac{w}{2} \quad (2.7)$$

$$R_a = R + \frac{w}{2} \quad (2.8)$$

gdje je:

R_i – radijus unutarnje kružnice koja tvori rezonantni prsten,

R_a – radijus vanjske kružnice koja tvori rezonantni prsten,

w – širina mikrostrip linije.

2.1.6. Metoda računanja duljine prijenosne linije

Koristeći rezultat iz formule (2.5), moguće je izračunati duljinu mikrostrip linije. Duljina mikrostrip linije izražena je sljedećom formulom [1].

$$L = \frac{\lambda_g}{4} \quad (2.9)$$

gdje je:

L – duljina mikrostrip linije,

λ_g – vodeća valna duljina.

2.1.7. Metoda računanja razmaka elektromagnetske sprege

Koristeći rezultate formula (2.3) i (2.4) moguće je izračunati razmak između mikrostrip linije i rezonantnog prstena koristeći formulu (2.10) [1].

$$\Delta L = 0.421 \cdot d \cdot \left(\frac{\varepsilon_{eff} + 0.3}{\varepsilon_{eff} - 0.258} \right) \cdot \left(\frac{\frac{w}{d} + 0.262}{\frac{w}{d} + 0.818} \right) \quad (2.10)$$

gdje je:

ΔL – razmak između mikrostrip linije i rezonantnog prstena,

ε_{eff} – efektivna permitivnost,

w – širina mikrostrip linije,

d – debljina substrata.

2.2. Algoritmi za računanje dvostrukog rezonantnog prstena

Kako bi se izračunala geometrija dvostrukog rezonantnog prstena potrebno je već navedenim formulama u potpoglavlju 2.1. dodati sljedeće formule:

$$R_{sr2} = R_a + \Delta L + \frac{w}{2} \quad (2.11)$$

$$R_{i2} = R_{sr2} - \frac{w}{2} \quad (2.12)$$

$$R_{a2} = R_{sr2} + \frac{w}{2} \quad (2.13)$$

gdje je:

R_{sr2} – srednja vrijednost radijusa drugog rezonantnog prstena,
 R_{i2} – radijus unutarnje kružnice koja tvori drugi rezonantni prsten,
 R_{a2} – radijus vanjske kružnice koja tvori drugi rezonantni prsten,
 w – širina mikrostrip linije,
 ΔL – razmak između mikrostrip linije i rezonantnog prstena.

2.3. Alternativna formula za izračunavanje širine prijenosne linije

Alternativno formuli (2.3), može se koristiti formula (2.14). Formula (2.14) koristi debljinu bakra koji je laminiran na substratu. Formula (2.14) preuzeta je iz literature [2]

$$W = \frac{7.48 \cdot h}{e^{\left(\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1.41}}{87}\right)}} - 1.25 \cdot t \quad (2.13)$$

gdje je:

W – širina mikrostrip linije,
 h – debljina substrata,
 t – debljina bakra mikrostrip linije,
 Z_0 – impedancija prilagođenja,
 ϵ_r – relativna permitivnost substrata (FR4 približno 4.6).

3. SIMULACIJE

Kako bi potvrdili točnost algoritama opisanih u potpoglavljima 2.1. i 2.2., potrebno je napraviti simulaciju. U ovom slučaju odabran je programski paket Altair FEKO, koji ima mogućnost simuliranja elektromagnetskog polja kojeg generiraju razni geometrijski oblici. U simulacijskom okruženju FEKO, simulirano je 6 geometrijskih oblika prstenastih rezonatora od kojih su tri jednostruki prstenasti rezonator dimenzionirani za frekvencije 2.45GHz, 868MHz i 915MHz a ostala tri dvostruki prstenasti rezonator dimenzionirani za frekvencije 2.45GHz, 868MHz i 915MHz.

3.1. Simuliranje prstenastog rezonatora za frekvenciju 2.45 GHz

Prije samog simuliranja, potrebno je izračunati geometrijske veličine rezonantnog prstena. Izračunate geometrijske veličine te potrebne vrijednosti da bi ih se izračunalo mogu se vidjeti u tablici 3.1 a sami rezultati terminala Python koda mogu se vidjeti na slici 3.1.

Tablica 3.1. Vrijednosti geometrije jednostrukog rezonantnog prstena 2.45GHz

D [m]	1.6e-3
Z_0 [Ω]	50
ϵ_r	4.6
f [Hz]	2.45e9
n	1
W [m]	2.96e-3
L [m]	16.5e-3
ΔL [m]	0.63e-3
R_i [m]	9e-3
R_a [m]	11.96e-3

```

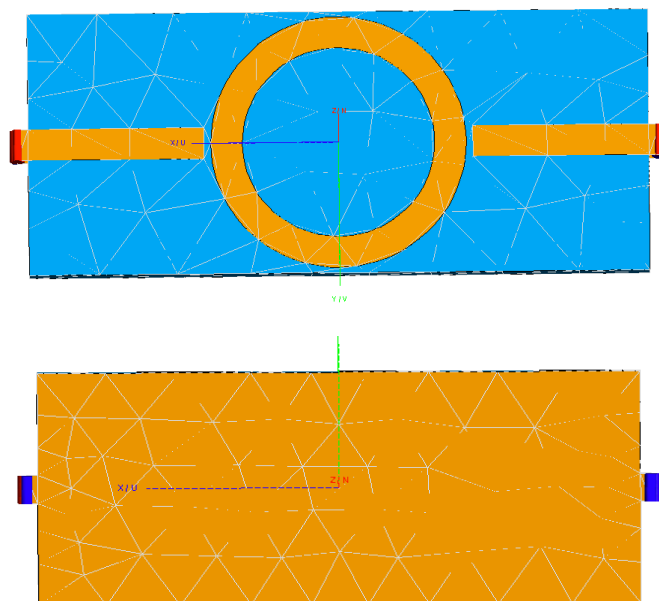
In [1]: runfile('/Users/igorvirag/Desktop/Relevantni clanci/Kalkulator_pravilna metoda.py', wdir='/Users/igorvirag/Desktop/Relevantni clanci')

Unesite debljinu substrata u [m]: 1.6e-3
Unesite željenu impedanciju prilagođenja u [ohm]: 50
Unesite realtivnu permitivnost substrata: 4.6
Unesite željenu frekvenciju u [Hz]: 2.45e9
Unesite red rezonancije: 1
=====
Relacija A iznosi: 1.557663
Širina mikrostrip linije iznosi: 0.002959 [m]
omjer širine linije i debljine substrata iznosi: 1.849087
Efektivna permitivnost iznosi: 3.457719 [saznaj]
Vodeća valna duljina iznosi: 0.065851 [m]
Radijus unutarnjeg kruga iznosi: 0.009001 [m]
Radijus vanjskog kruga iznosi: 0.01196 [m]
Duljina mikrostrip linije iznosi :0.016463 [m]
Razmak iznosi: 0.000627 [m]

```

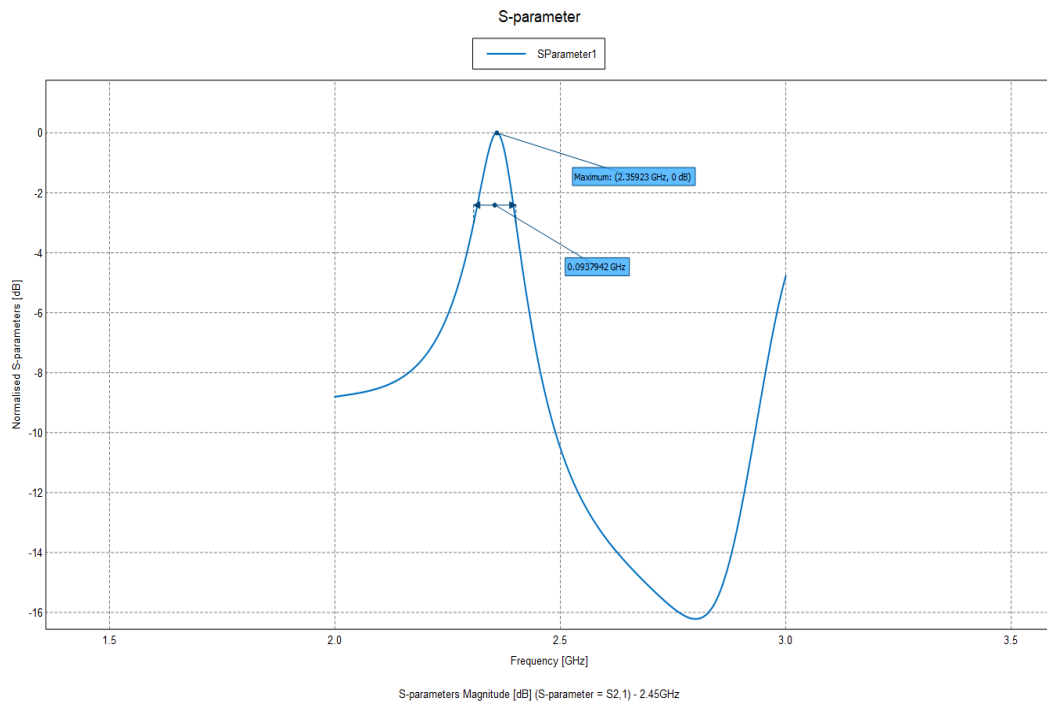
Slika 3.1.

Simulirana geometrija prstenastog rezonatora unutar FEKO programa nalazi se na slici 3.2.



Slika 3.2. Prikaz simulirane geometrije rezonantnog prstena za 2.45GHz

Izlaz iz simulacije su 500 točaka vrijednosti S_{21} parametra koji su mjereni na rasponu frekvencija od 1 GHz do 3 GHz u frekvencijskim razmacima od 2 MHz. Rezultat je grafički prikazan na slici 3.3.



Slika 3.3 krivulja S21 parametara za RR 2.45GHz

3.2. Simuliranje prstenastog rezonatora za frekvenciju 915 MHz

Prije samog simuliranja, potrebno je izračunati geometrijske veličine rezonantnog prstena. Izračunate geometrijske veličine te potrebne vrijednosti da bi ih se izračunalo mogu se vidjeti u tablici 3.2 a sami rezultati terminala Python koda mogu se vidjeti na slici 3.4.

Tablica 3.2. Vrijednosti geometrije jednostrukog rezonantnog prstena 915MHz

D [m]	1.6e-3
Z_0 [Ω]	50
ϵ_r	4.6
f [Hz]	915e6
n	1
W [m]	2.96e-3
L [m]	44.08e-3
ΔL [m]	0.63e-3
R_i [m]	26.58e-3
R_a [m]	29.54e-3

```

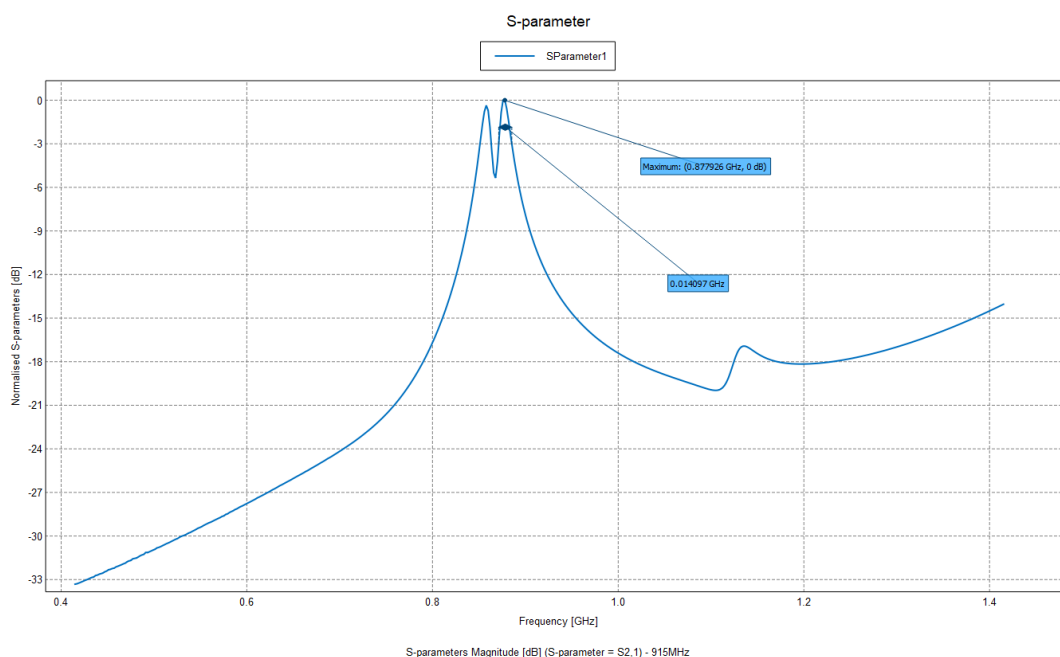
In [2]: runfile('/Users/igorvirag/Desktop/Relevantni clanci/Kalkulator_pravilna metoda.py', wdir='/Users/igorvirag/Desktop/Relevantni clanci')

Unesite debljinu substrata u [m]: 1.6e-3
Unesite željenu impedanciju prilagođenja u [ohm]: 50
Unesite realtivnu permitivnost substrata: 4.6
Unesite željenu frekvenciju u [Hz]: 915e6
Unesite red rezonancije: 1
=====
Relacija A iznosi: 1.557663
Širina mikrostrip linije iznosi: 0.002959 [m]
omjer širine linije i debljine substrata iznosi: 1.849087
Efektivna permitivnost iznosi: 3.457719 [saznaj]
Vodeća valna duljina iznosi: 0.176322 [m]
Radijus unutarnjeg kruga iznosi: 0.026583 [m]
Radijus vanjskog kruga iznosi: 0.029542 [m]
Duljina mikrostrip linije iznosi :0.04408 [m]
Razmak iznosi: 0.000627 [m]

```

Slika 3.4. Prikaz vrijednosti Python terminala za RR 915MHz

Izlaz iz simulacije su 500 točaka vrijednosti S_{21} parametra koji su mjereni na rasponu frekvencija od 415 MHz do 1415 MHz u frekvencijskim razmacima od 2 MHz. Rezultat je grafički prikazan na slici 3.5.



Slika 3.5 krivulja S_{21} parametara za RR 915 MHz

3.3. Simuliranje prstenastog rezonatora za frekvenciju 868 MHz

Prije samog simuliranja potrebno je izračunati geometrijske veličine rezonantnog prstena. Izračunate geometrijske veličine te potrebne vrijednosti da bi ih se izračunalo mogu se vidjeti u tablici 3.3 a sami rezultati terminala Python koda mogu se vidjeti na slici 3.6.

Tablica 3.3. Vrijednosti geometrije jednostrukog rezonantnog prstena 868 MHz

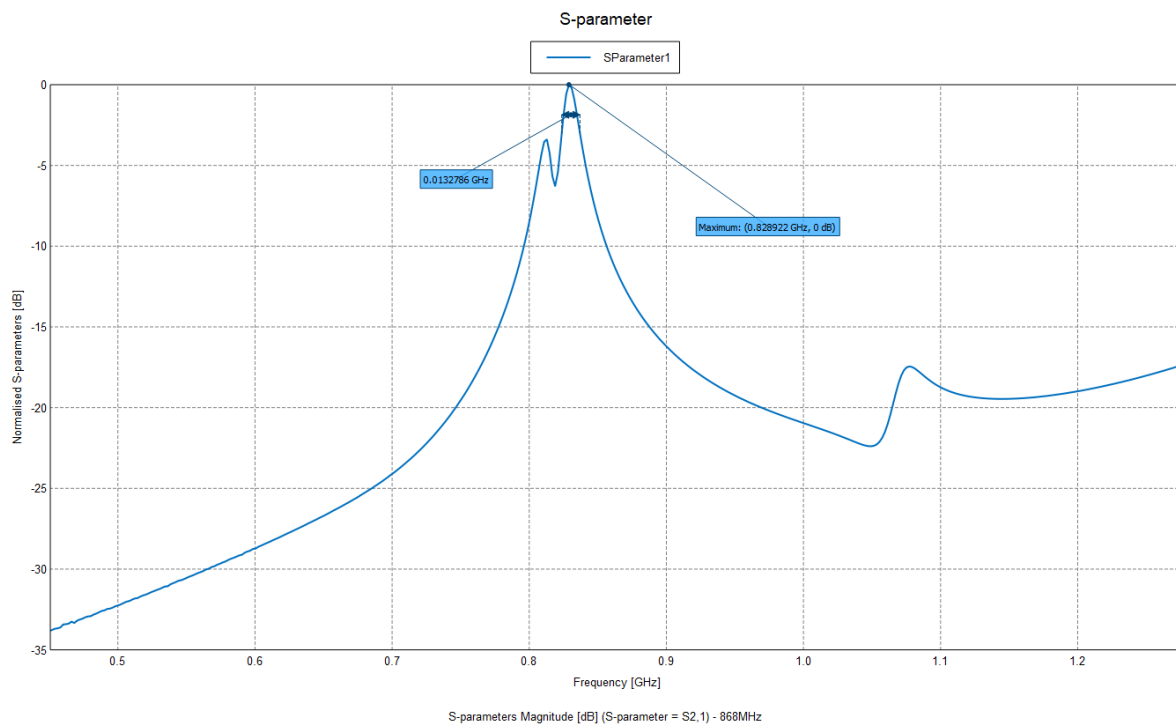
D [m]	1.6e-3
Z_0 [Ω]	50
ϵ_r	4.6
f [Hz]	868e6
n	1
W [m]	2.96e-3
L [m]	46.47e-3
ΔL [m]	0.63e-3
R_i [m]	28.10e-3
R_a [m]	31.06e-3

```
In [3]: runfile('/Users/igorvirag/Desktop/Relevantni clanci/Kalkulator_pravilna metoda.py', wdir='/Users/igorvirag/
Desktop/Relevantni clanci')

Unesite debljinu substrata u [m]: 1.6e-3
Unesite željenu impedanciju prilagođenja u [ohm]: 50
Unesite realtivnu permitivnost substrata: 4.6
Unesite željenu frekvenciju u [Hz]: 868e6
Unesite red rezonancije: 1
=====
Relacija A iznosi: 1.557663
Širina mikrostrip linije iznosi: 0.002959 [m]
omjer širine linije i debljine substrata iznosi: 1.849087
Efektivna permitivnost iznosi: 3.457719 [saznaj]
Vodeća valna duljina iznosi: 0.185869 [m]
Radijus unutarnjeg kruga iznosi: 0.028103 [m]
Radijus vanjskog kruga iznosi: 0.031061 [m]
Duljina mikrostrip linije iznosi :0.046467 [m]
Razmak iznosi: 0.000627 [m]
```

Slika 3.6. Prikaz vrijednosti Python terminala za RR 868 MHz

Izlaz iz simulacije su 500 točaka vrijednosti S_{21} parametra koji su mjereni na rasponu frekvencija od 368 MHz do 1368 MHz u frekvencijskim razmacima od 2 MHz. Rezultat je grafički prikazan na slici 3.7.



Slika 3.7 krivulja S21 parametara za RR 868 MHz

3.4. Simuliranje dvostrukog prstenastog rezonatora za frekvenciju 2.45 GHz

Prije samog simuliranja, potrebno je izračunati geometrijske veličine dvostrukog rezonantnog prstena. Izračunate geometrijske veličine te potrebne vrijednosti da bi ih se izračunalo mogu se vidjeti u tablici 3.4 a sami rezultati terminala Python koda mogu se vidjeti na slici 3.8.

Tablica 3.4. Vrijednosti geometrije dvostrukog rezonantnog prstena 2.45GHz

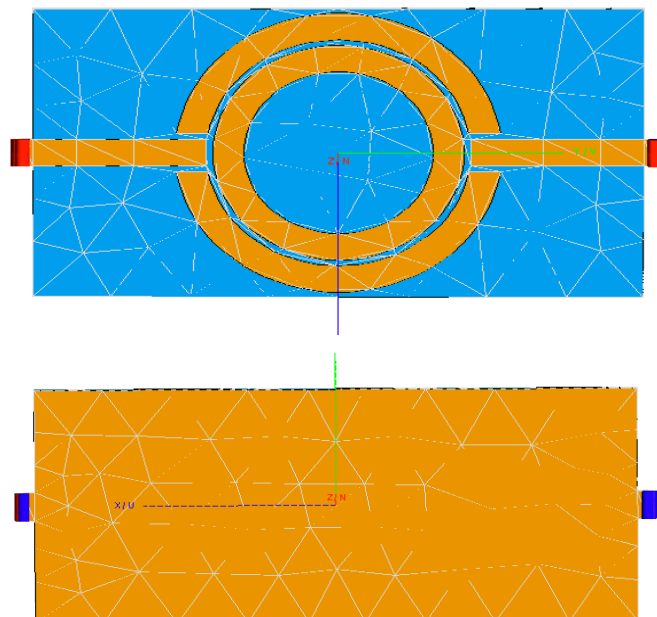
D [m]	1.6e-3
Z_0 [Ω]	50
ϵ_r	4.6
f [Hz]	2.45e9
n	1
W [m]	2.96e-3
L [m]	16.5e-3
ΔL [m]	0.63e-3
R_i [m]	9e-3
R_a [m]	11.96e-3
R_{i2} [m]	12.59e-3

R_{a2} [m]	15.55e-3
--------------	----------

```
In [0]: runfile('/Users/igorvirag/Desktop/Relevantni clanci/DRR_Kalkulator_pravilna_metoda.py', wdir='/Users/igorvirag/Desktop/Relevantni clanci')
Unesite debljinu substrata u [m]: 1.6e-3
Unesite željenu impedanciju prilagođenja u [ohm]: 50
Unesite realtivnu permitivnost substrata: 4.6
Unesite željenu frekvenciju u [Hz]: 2.45e9
Unesite red rezonancije: 1
=====
Relacija A iznosi: 1.557663
Širina mikrostrip linije iznosi: 0.002959 [m]
omjer širine linije i debljine substrata iznosi: 1.849087
Efektivna permitivnost iznosi: 3.457719 [saznaj]
Vodeća valna duljina iznosi: 0.065851 [m]
Radijus unutarnjeg kruga iznosi: 0.009001 [m]
Radijus vanjskog kruga iznosi: 0.01196 [m]
Duljina mikrostrip linije iznosi :0.016463 [m]
Razmak iznosi: 0.000627 [m]
Radijus drugog unutarnjeg kruga iznosi: 0.012587 [m]
Radijus drugog vanjskog kruga iznosi: 0.015546 [m]
```

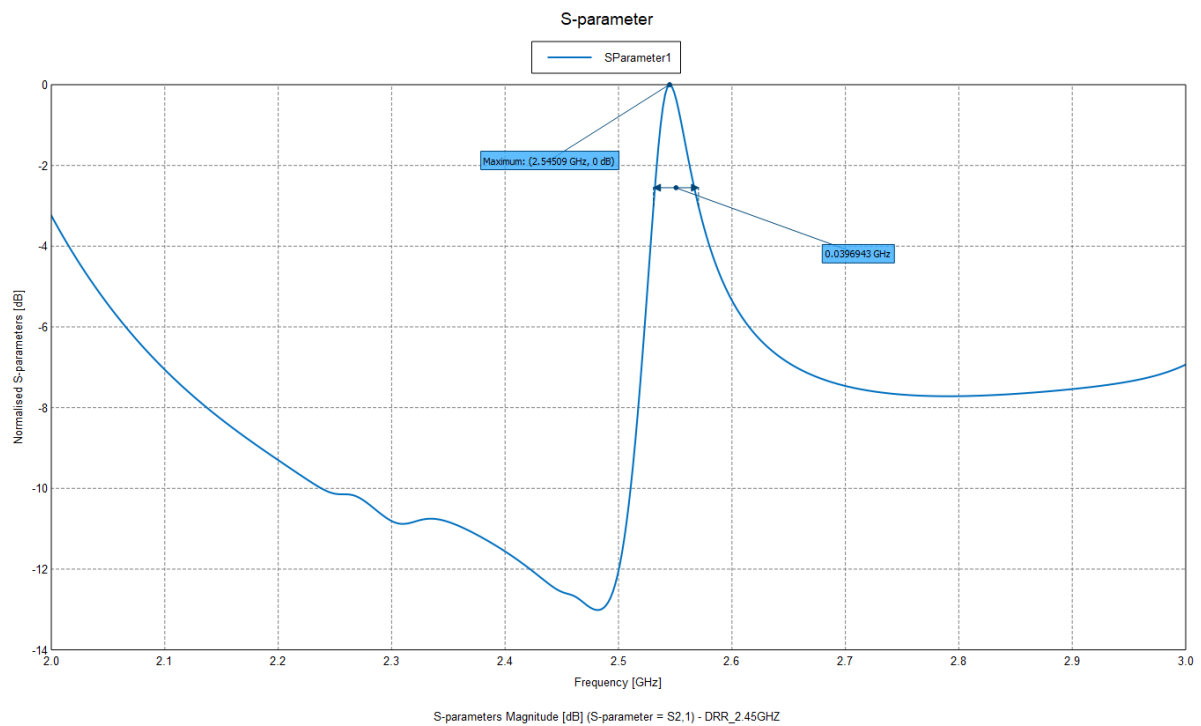
Slika 3.8 Prikaz vrijednosti Python terminala za DRR 2.45 GHz

Simulirana geometrija dvostrukog prstenastog rezonatora unutar FEKO programa nalazi se na slici 3.9.



Slika 3.9 Simulacija dvostrukog rezonantnog prstena

Izlaz iz simulacije su 500 točaka vrijednosti S_{21} parametra koji su mjereni na rasponu frekvencija od 1 GHz do 3 GHz u frekvencijskim razmacima od 2 MHz. Rezultat je grafički prikazan na slici 3.10.



Slika 3.10 krivulja S21 parametara za DRR 2.45 GHz

3.5. Simuliranje dvostrukog prstenastog rezonatora za frekvenciju 915 MHz

Prije samog simuliranja, potrebno je izračunati geometrijske veličine dvostrukog rezonantnog prstena. Izračunate geometrijske veličine te potrebne vrijednosti da bi ih se izračunalo mogu se vidjeti u tablici 3.5 a sami rezultati terminala Python koda mogu se vidjeti na slici 3.11.

Tablica 3.5. Vrijednosti geometrije dvostrukog rezonantnog prstena 915MHz

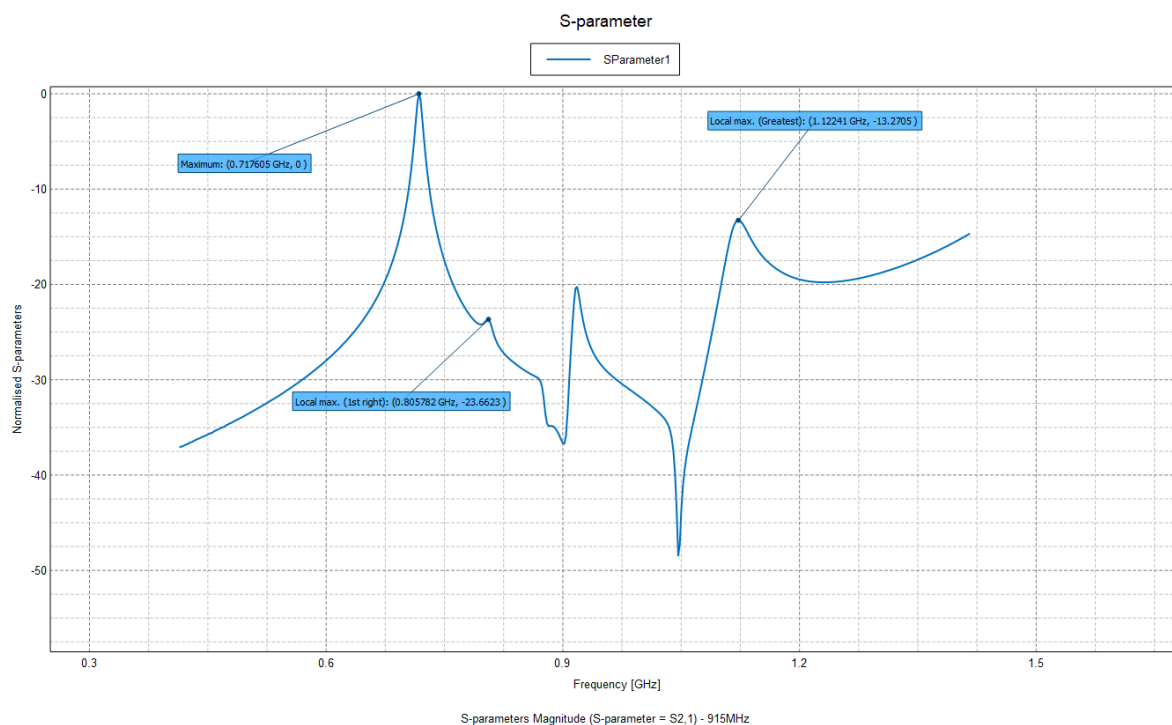
D [m]	1.6e-3
$Z_0 [\Omega]$	50
ϵ_r	4.6
f [Hz]	915e6
n	1
W [m]	2.96e-3
L [m]	44.08e-3
ΔL [m]	0.63e-3
R_i [m]	26.58-3
R_a [m]	29.54-3

R_{i2} [m]	30.17e-3
R_{a2} [m]	33.13e-3

```
In [9]: runfile('/Users/igorvirag/Desktop/Relevantni clanci/DRR_Kalkulator_pravilna_metoda.py', wdir='/Users/
igorvirag/Desktop/Relevantni clanci')
Unesite debljinu substrata u [m]: 1.6e-3
Unesite željenu impedanciju prilagođenja u [ohm]: 50
Unesite realtivnu permitivnost substrata: 4.6
Unesite željenu frekvenciju u [Hz]: 915e6
Unesite red rezonancije: 1
=====
Relacija A iznosi: 1.557663
širina mikrostrip linije iznosi: 0.002959 [m]
omjer širine linije i debljine substrata iznosi: 1.849887
Efektivna permitivnost iznosi: 3.457719 [saznaj]
Vodeća valna duljina iznosi: 0.176322 [m]
Radijus unutarnjeg kruga iznosi: 0.026583 [m]
Radijus vanjskog kruga iznosi: 0.029542 [m]
Duljina mikrostrip linije iznosi: 0.04408 [m]
Razmak iznosi: 0.000627 [m]
Radijus drugog unutarnjeg kruga iznosi: 0.030169 [m]
Radijus drugog vanjskog kruga iznosi: 0.033128 [m]
```

Slika 3.11 Prikaz vrijednosti Python terminala za DRR 915 MHz

Izlaz iz simulacije su 500 točaka vrijednosti S_{21} parametra koji su mjereni na rasponu frekvencija od 415 MHz do 1415 MHz u frekvencijskim razmacima od 2MHz. Rezultat je grafički prikazan na slici 3.12.



Slika 3.12 krivulja S_{21} parametara za DRR 915 MHz

3.6. Simuliranje dvostrukog prstenastog rezonatora za frekvenciju 868 MHz

Prije samog simuliranja, potrebno je izračunati geometrijske veličine rezonantnog prstena. Izračunate geometrijske veličine te potrebne vrijednosti da bi ih se izračunalo mogu se vidjeti u tablici 3.6 a sami rezultati terminala Python koda mogu se vidjeti na slici 3.13.

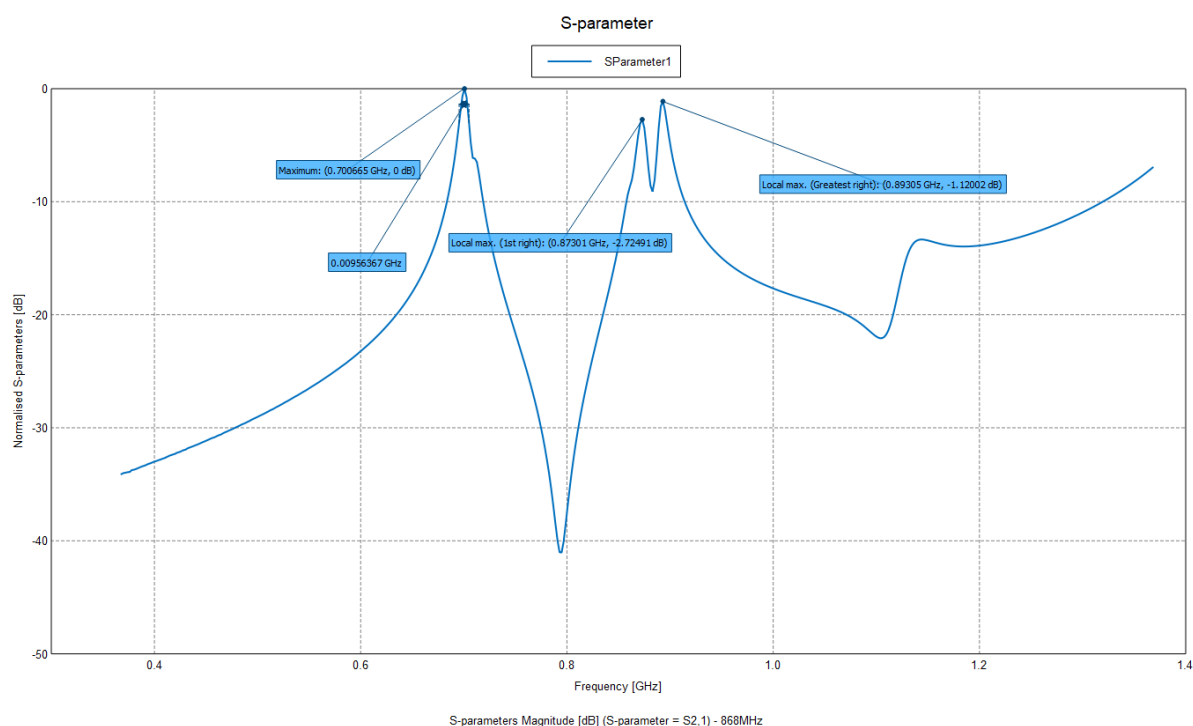
Tablica 3.6. Vrijednosti geometrije dvostrukog rezonantnog prstena 868 MHz

D [m]	1.6e-3
$Z_0 [\Omega]$	50
ϵ_r	4.6
f [Hz]	868e6
n	1
W [m]	2.96e-3
L [m]	46.47e-3
ΔL [m]	0.63e-3
R_i [m]	28.10e-3
R_a [m]	31.06e-3
R_{i2} [m]	31.67e-3
R_{a2} [m]	34.65e-3

```
In [10]: runfile('/Users/igorvirag/Desktop/Relevantni clanci/DRR_Kalkulator_pravilna_metoda.py', wdir='/Users/
igorvirag/Desktop/Relevantni clanci')
Unesite debljinu substrata u [m]: 1.6e-3
Unesite željenu impedanciju prilagođenja u [ohm]: 50
Unesite realtivnu permitivnost substrata: 4.6
Unesite željenu frekvenciju u [Hz]: 868e6
Unesite red rezonancije: 1
=====
Relacija A iznosi: 1.557663
širina mikrostrip linije iznosi: 0.002959 [m]
omjer širine linije i debljine substrata iznosi: 1.849087
Efektivna permitivnost iznosi: 3.457719 [saznaj]
Vodeća valna duljina iznosi: 0.185869 [m]
Radijus unutarnjeg kruga iznosi: 0.028103 [m]
Radijus vanjskog kruga iznosi: 0.031061 [m]
Duljina mikrostrip linije iznosi :0.046467 [m]
Razmak iznosi: 0.000627 [m]
Radijus drugog unutarnjeg kruga iznosi: 0.031688 [m]
Radijus drugog vanjskog kruga iznosi: 0.034647 [m]
```

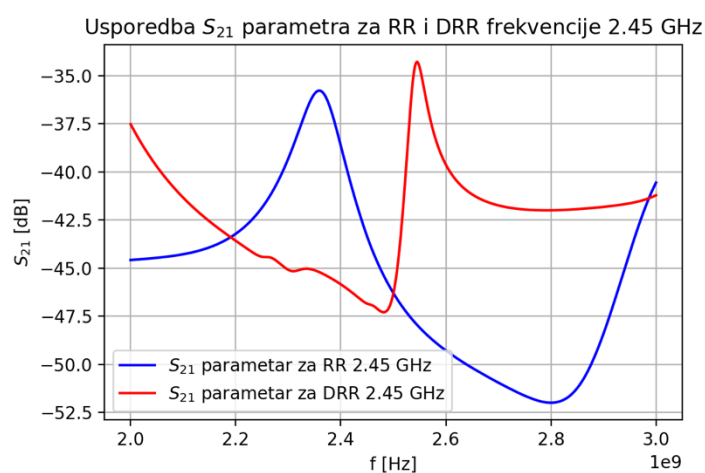
Slika 3.13. Prikaz vrijednosti Python terminala za DRR 868 MHz

Izlaz iz simulacije su 500 točaka vrijednosti S_{21} parametra koji su mjereni na rasponu frekvencija od 368 MHz do 1368 MHz u frekvencijskim razmacima od 2MHz. Rezultat je grafički prikazan na slici 3.14.

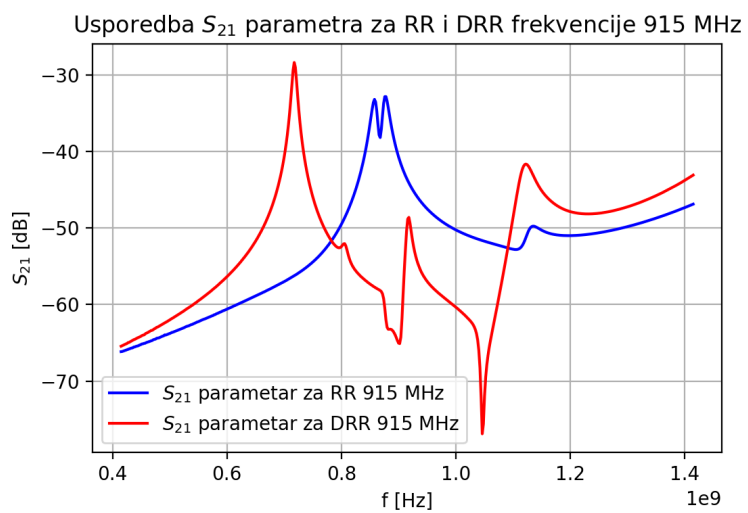


Slika 3.14 krivulja S_{21} parametara za DRR 868 MHz

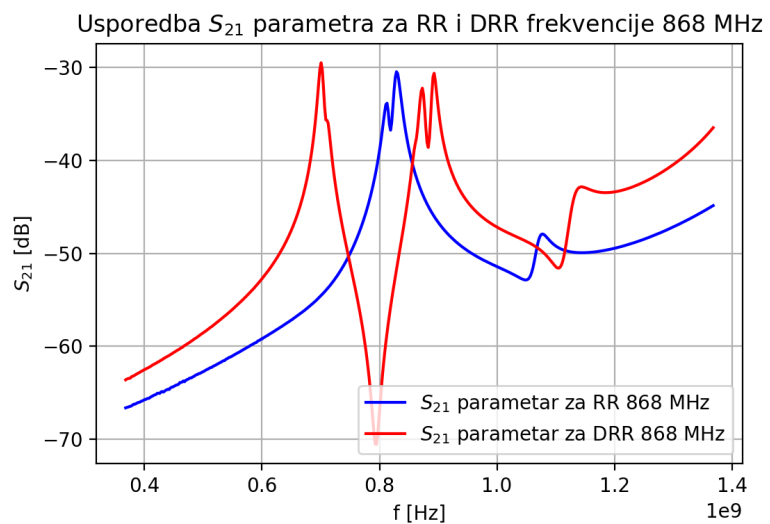
3.7.Usporedba S_{21} parametara prstenastih rezonatora



Slika 3.15 Usporedba S_{21} parametara za RR i DRR frekvencije 2.45 GHz



Slika 3.16 Usporedba S_{21} parametara za RR i DRR frekvencije 915 MHz



Slika 3.17 Usporedba S_{21} parametara za RR i DRR frekvencije 868 MHz

4. Q FAKTOR

Kako bi se uspješno izvršila analiza Q faktora odnosno faktora dobrote $S2I$ parametara jednostrukih i dvostrukih rezonantnih prstena, potrebno je dizajnirati program koji će bez obzira na oblik rezonantne krivulje točno izvršiti mjerenje frekvencijske širine u točkama koje odgovaraju maksimalnoj vrijednosti $S2I$ parametra umanjenoj za 3 dB.

U kodu, definicija faktora Q i definicija tangensa gubitaka realizirane su prema formulama (4.1) i (4.2) [3]

$$Q = \frac{f_0}{f_{r-3dB} - f_{l-3dB}} \quad (4.1)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{Q} \quad (4.2)$$

gdje je:

Q – faktor kvalitete,

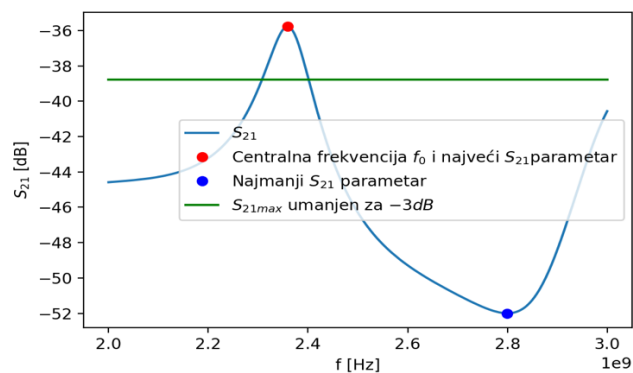
$\tan \delta$ – tangens gubitaka,

f_{r-3dB} – desna granična frekvencija na -3dB,

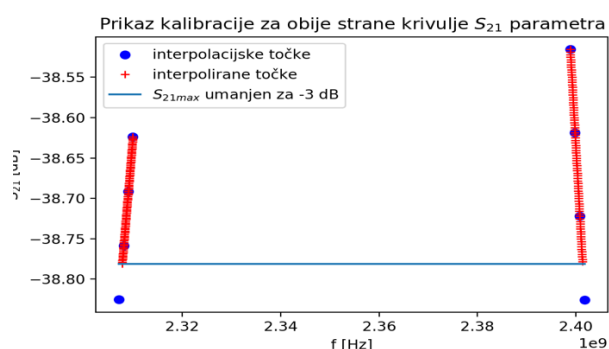
f_{l-3dB} – lijeva granična frekvencija na -3dB.

4.1.Q faktor jednostrukog prstenastog rezonatora 2.45GHz

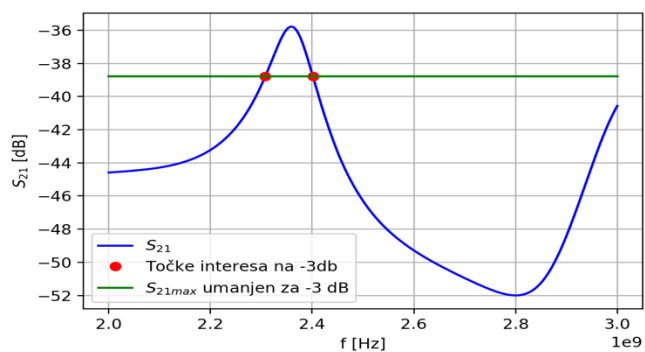
Korištenjem programa za analizu Q faktora S_{21} parametara dobiveni su rezultati prikazani na slikama 4.1, 4.2 i 4.3:



Slika 4.1. S_{21} parametar za RR frekvencije 2.45GHz



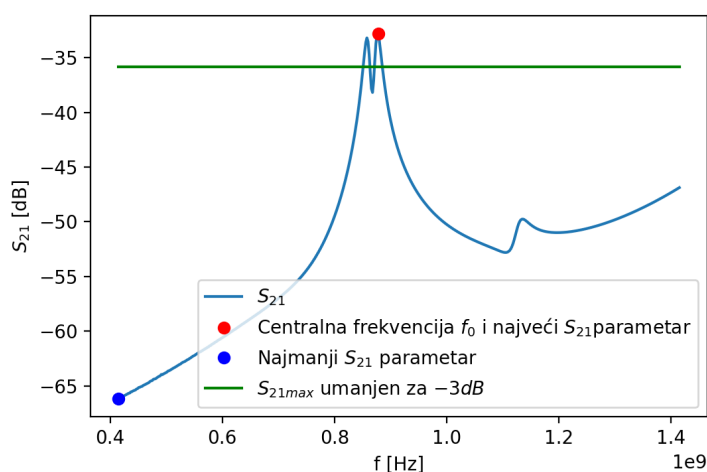
Slika 4.2 Traženje točaka i njihova kalibracija na -3dB od S_{max}



Slika 4.3 Pronađene točke interesa na -3dB od S_{max}

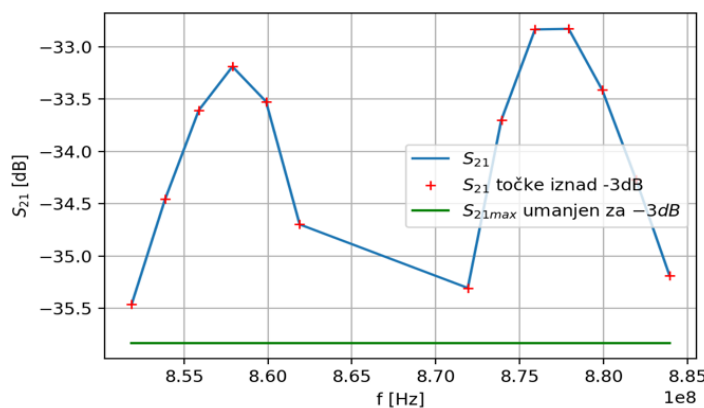
4.2.Q faktor jednostrukog prstenastog rezonatora 915 MHz

Korištenjem programa za analizu Q faktora S_{21} parametara dobiveni su rezultati prikazani na slikama 4.4, 4.5, 4.6 i 4.7:

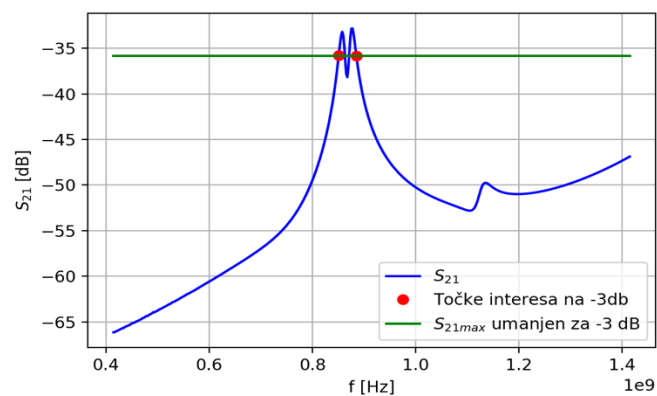


Slika 4.4 S_{21} parametar za RR frekvencije 915 MHz

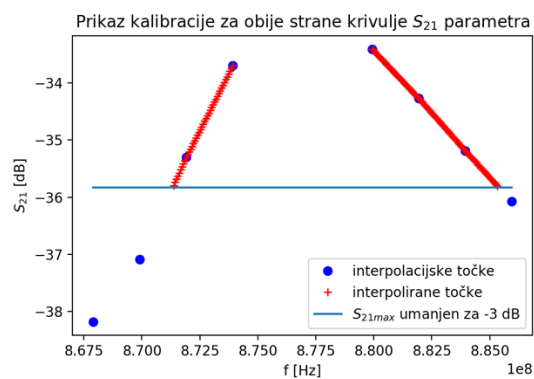
U programu za analizu Q faktora potrebno je modificirati raspon frekvencija kako bi se izbjegla pogreška očitavanja frekvencijskog pojasa zbog dva vrlo izražena rezonantna vrha. Modifikacija se vrši od sedme točke u grafu prikazanog na slici 4.5. Ukoliko se ne modificira raspon frekvencija, rezultat očitavanja frekvencijskog pojasa biti će pogrešan i izgledati će kao na slici 4.6.



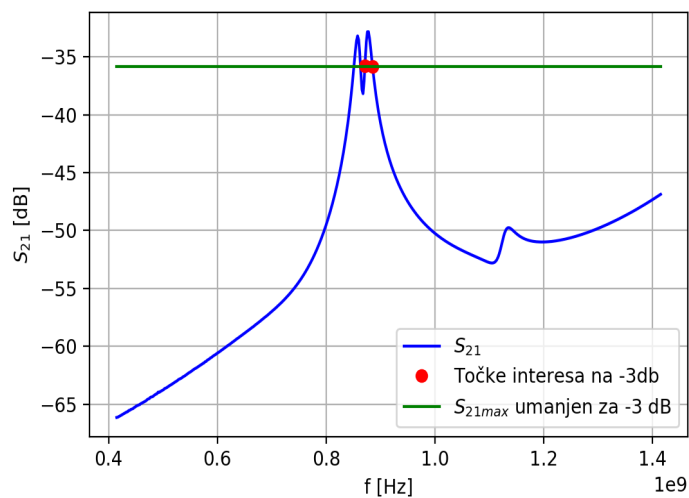
Slika 4.5 Traženje frekvencijskog prozora najvišeg rezonantnog vrha



Slika 4.6 Pogreška nastala ne korištenjem frekvencijskog prozora



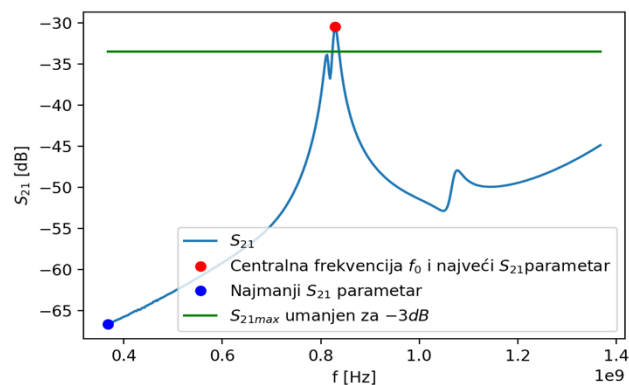
Slika 4.7 Traženje točaka i njihova kalibracija na -3dB od S_{max} nakon pronalaska željenog frekvencijskog prozora



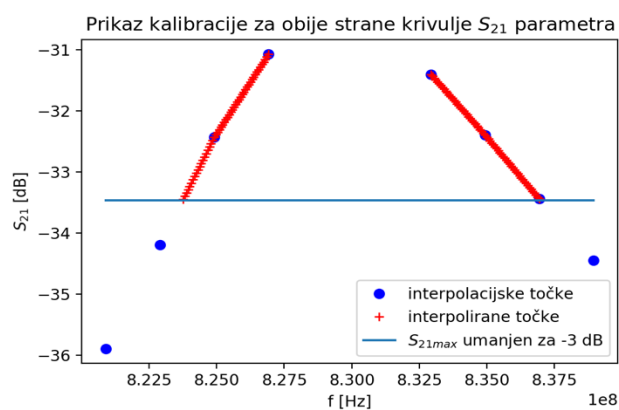
Slika 4.8 3 Pronađene točke interesa na -3dB od S_{max}

4.3.Q faktor jednostrukog prstenastog rezonatora 868 MHz

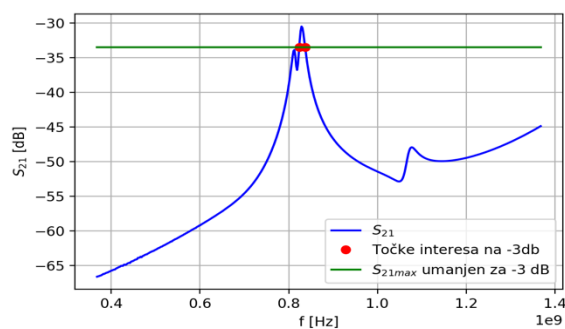
Korištenjem programa za analizu Q faktora S_{21} parametara dobiveni su rezultati prikazani na slikama 4.9, 4.10 i 4.11.



Slika 4.9 S_{21} parametar za RR frekvencije 915 MHz



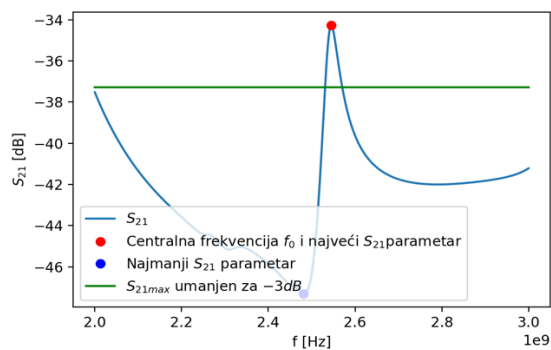
Slika 4.10 Traženje točaka i njihova kalibracija na $-3dB$ od S_{max}



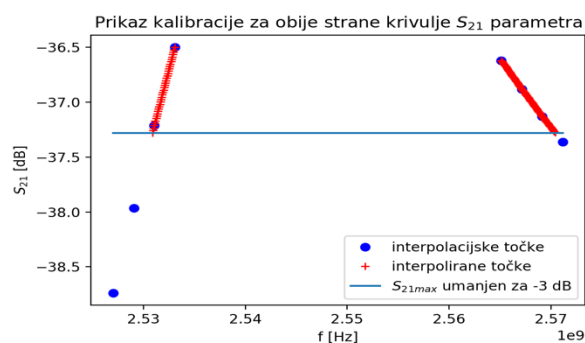
Slika 4.11 Pronađene točke interesa na $-3dB$ od S_{max}

4.4.Q faktor dvostrukog prstenastog rezonatora 2.45 GHz

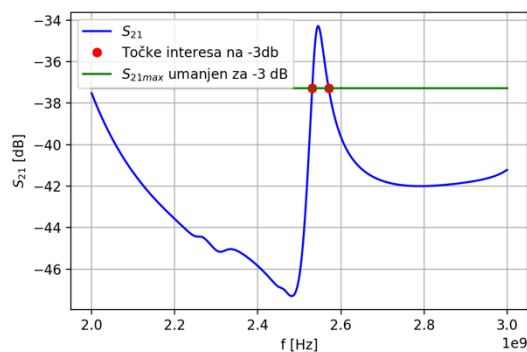
Korištenjem programa za analizu Q faktora S_{21} parametara dobiveni su rezultati prikazani na slikama 4.12, 4.13 i 4.14.



Slika 4.12 S_{21} parametar za DRR frekvencije 2.45GHz



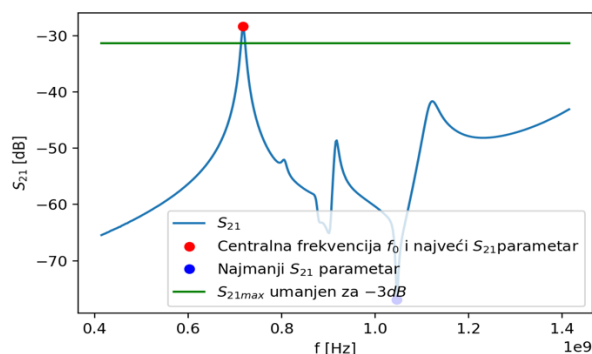
Slika 4.13 Traženje točaka i njihova kalibracija na $-3dB$ od S_{max}



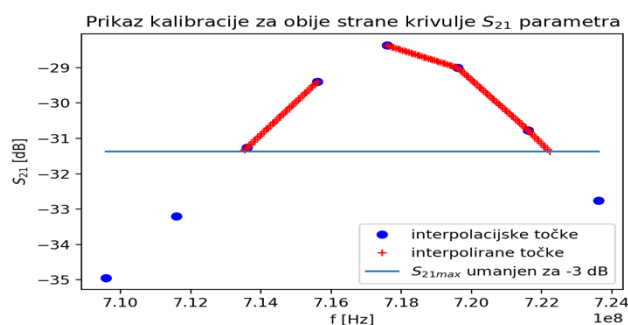
Slika 4.14 Pronađene točke interesa na $-3dB$ od S_{max}

4.5.Q faktor dvostrukog prstenastog rezonatora 915 MHz

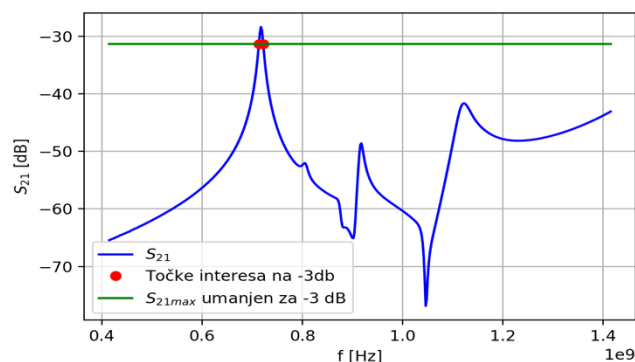
Korištenjem programa za analizu Q faktora S_{21} parametara dobiveni su rezultati prikazani na slikama 4.15, 4.16 i 4.17



4.15 S_{21} parametar za DRR frekvencije 915 MHz

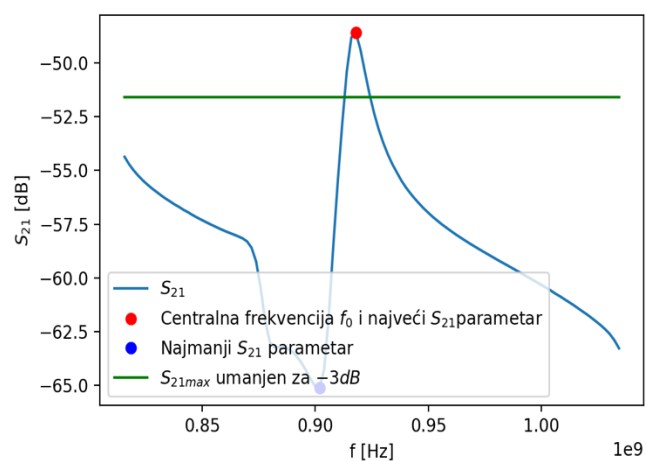


4.16 Traženje točaka i njihova kalibracija na -3dB od S_{max}

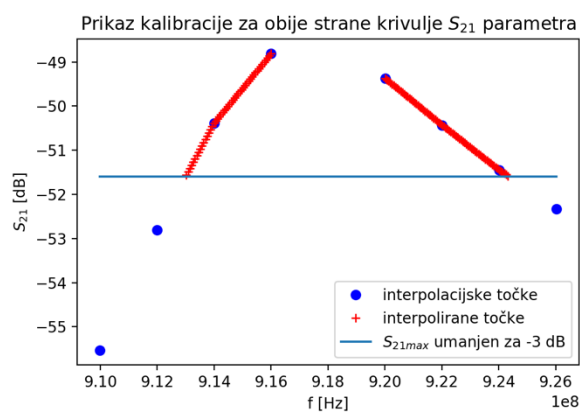


4.17 Pronađene točke interesa na -3dB od S_{max} na najvišem rezonantnom vrhu

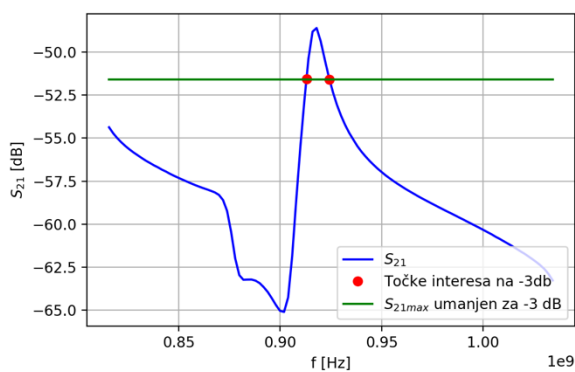
Modificiranjem frekvencije, prozor pretraživanja može se vidjeti na slici 4.18, 4.19, 4.20



Slika 4.18 parametar za DRR frekvencije 915 MHz nakon pronalaska željenog frekvencijskog prozora



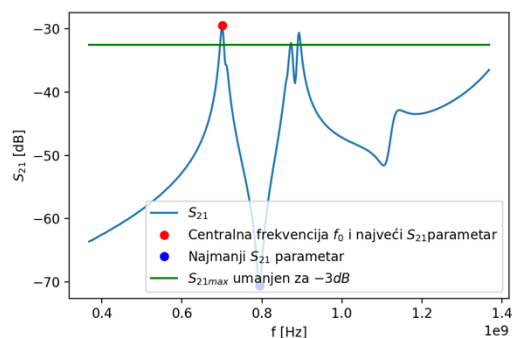
Slika 4.19 Traženje točaka i njihova kalibracija na -3dB od Smax u željenom frekvencijskom prozoru



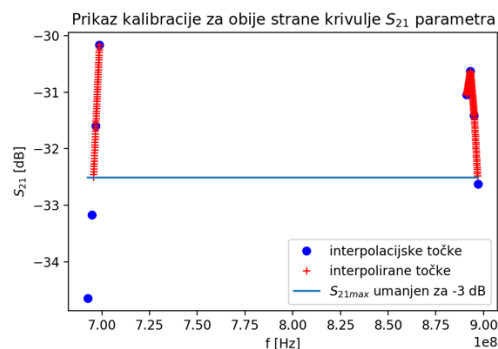
Slika 4.20 Pronađene točke interesa na -3dB od Smax u željenom frekvencijskom prozoru

4.6.Q faktor dvostrukog prstenastog rezonatora 868 MHz

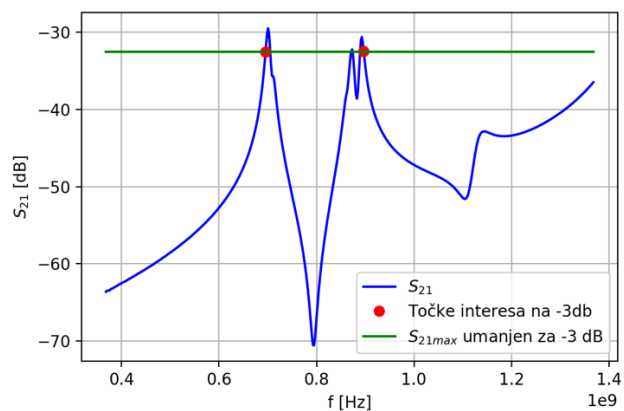
Korištenjem programa za analizu Q faktora S_{21} parametara dobiveni su rezultati prikazani na slikama 4.21, 4.22 i 4.23.



Slika 4.21 S_{21} parametar za DRR frekvencije 868 MHz

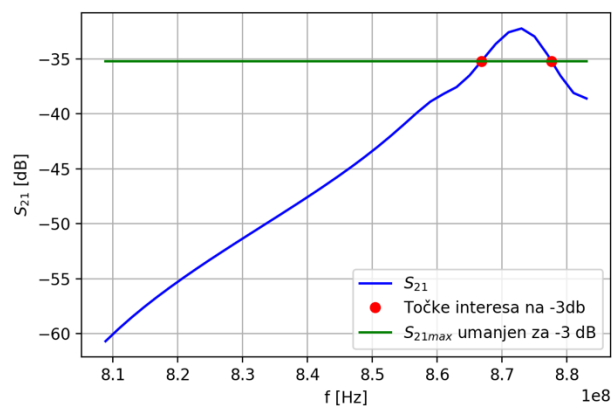


Slika 4.22 Traženje točaka i njihova kalibracija na -3 dB od S_{max}



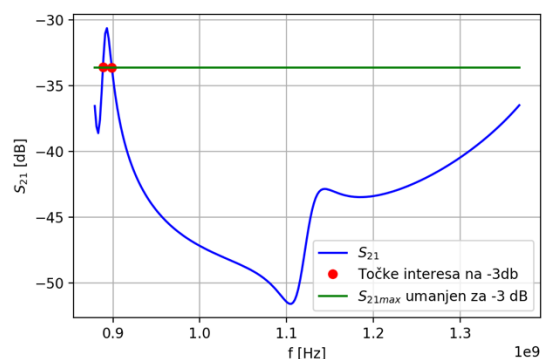
Slika 4.23 Pronađene točke interesa na -3 dB od S_{max} (problem)

Podešavanjem frekvencijskog prozora prema drugom rezonantnom vrhu $f_2 = 893.0501$ MHz dobijemo rezultat prikazan na slici 4.25.



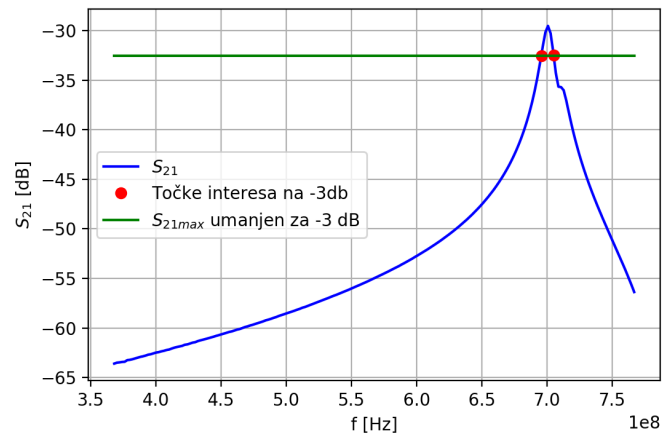
Slika 4.24 Pronađene točke interesa na -3dB od S_{max}

Podešavanjem frekvencijskog prozora prema trećem rezonantnom vrhu $f_3 = 873.01002$ MHz dobijemo rezultat prikazan na slici 4.25.



Slika 4.25 Pronađene točke interesa na -3dB od S_{max}

Podešavanjem frekvencijskog prozora prema prvom rezonantnom vrhu $f_1 = 700.665331$ MHz dobijemo rezultat prikazan na slici 4.26.



Slika 4.26 Pronađene točke interesa na -3dB od S_{max}

4.7.Q faktor svih simuliranih rezonantnih prstena

U tablici 4.1. nalaze se vrijednosti svih simuliranih rezonantnih prstena

Tablica 4.1

Vrsta rez. prstena	f	Q	Df
RR	2.45GHz	25.2258	0.03964
	915MHz	62.8556	0.01590
	868MHz	62.9025	0.01589
DRR	2.45GHz	64.3778	0.01553
	915MHz	Za f_1 na 717.60521MHz $Q1 = 82.6350$ Za f_2 na 918.006012 MHz $Q2 = 81.27314$	Za f_1 na 717.60521MHz $Df1 = 0.0121014$ Za f_2 na 918.006012 MHz $Df2 = 0.0123041$
	868MHz	Za f_1 na 700.665331MHz $Q1 = 73.96061$	Za f_1 na 700.665331MHz $Df1 = 0.013520$

		Za f_2 na 873.01002 MHz Q2= 80.7632	Za f_2 na 873.01002 MHz Df2= 0.012381
		Za f_3 na 893.0501 MHz Q3= 87.5348	Za f_3 na 893.0501 MHz Df3= 0.01142

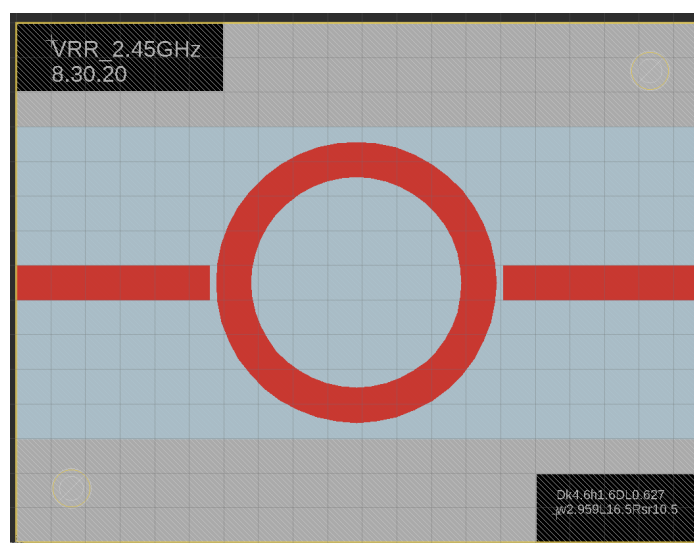
5. DIZAJNIRANJE PCB PLOČICE

Za dizajn PCB pločica korišten je Cad EAGLE programski paket. Eksport dizajna je .gerber ekstenzija.

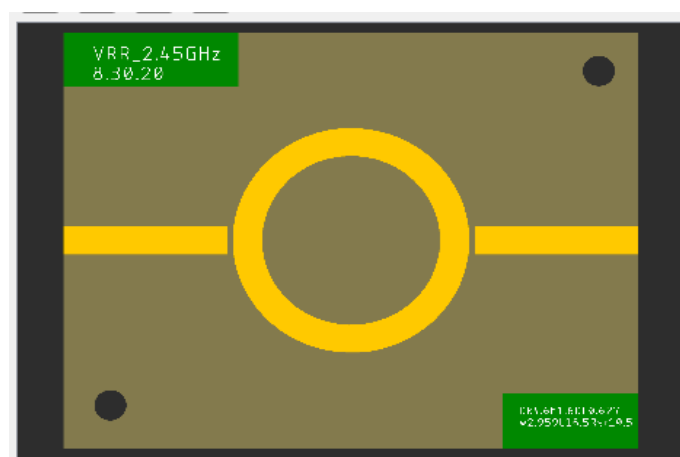
Materijal pločice je standardni FR4 sa DK 4.6 i Df 0.011

5.1. Dizajn PCB-a za prstenasti rezonator 2.45GHz

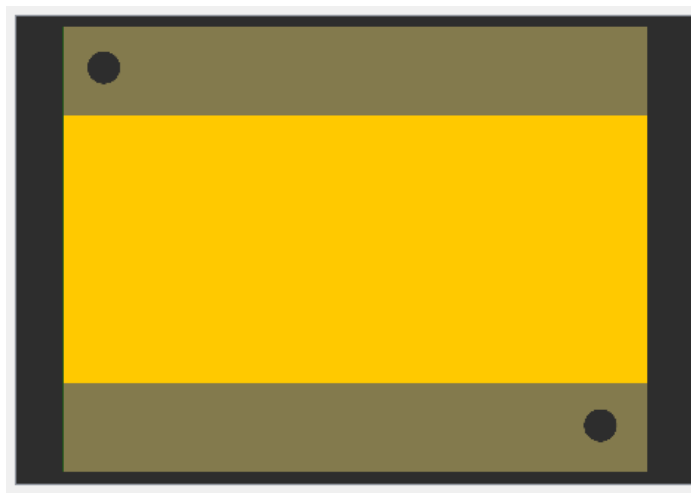
Na slikama 5.1, 5.2 i 5.3 nalazi se izgled dizajnirane pločice.



Slika 5.1 Eagle design za RR 2.45 GHz



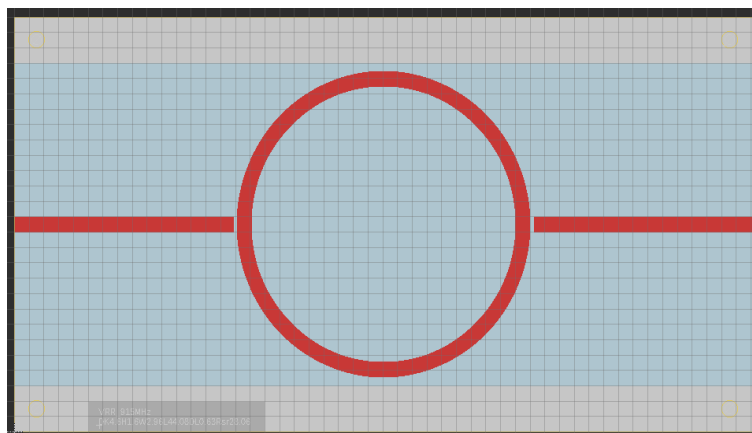
Slika 5.2 Top gerber out za RR 2.45 GHz



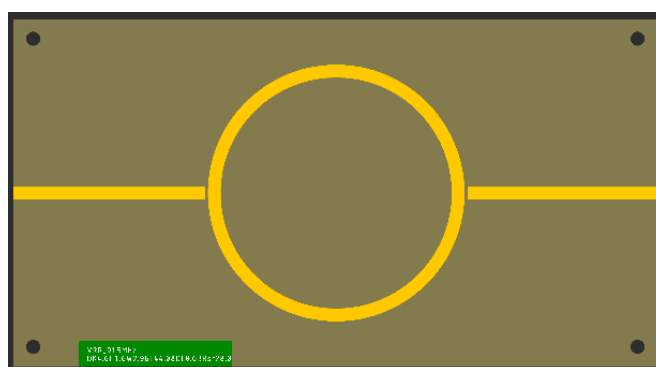
Slika 5.3 Slika 5.2 Botom gerber out za RR 2.45 GHz

5.2.Dizajn PCB-a za prstenasti rezonator 915 MHz

Na slikama 5.4, 5.5 i 5.6 nalazi se izgled dizajnirane pločice.



Slika 5.4 Eagle design za RR 915 MHz



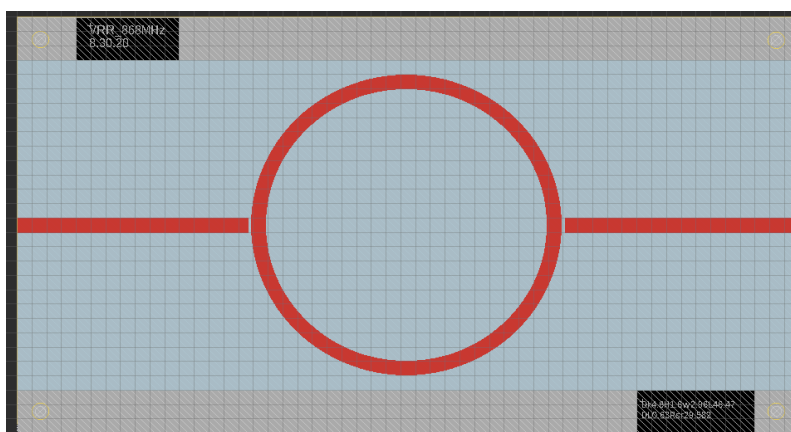
Slika 5.5 Top gerber out za RR 915 MHz



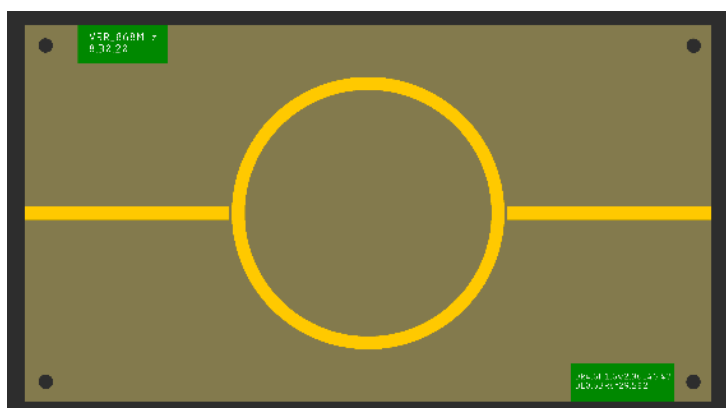
Slika 5.6 Botom gerber out za RR 915 MHz

5.3.Dizajn PCB-a za prstenasti rezonator 868 MHz

Na slikama 5.7, 5.8 i 5.9 nalazi se izgled dizajnirane pločice.



Slika 5.7 Eagle design za RR 868 MHz



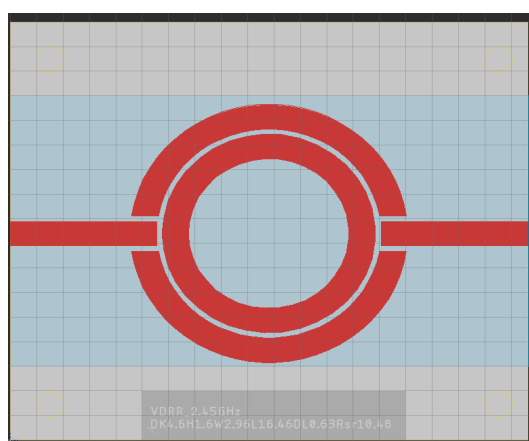
Slika 5.8 Top gerber out za RR 868 MHz



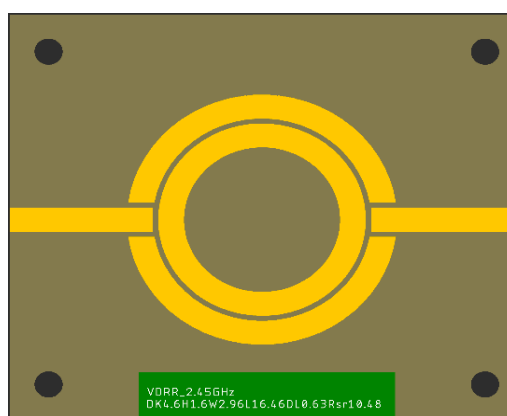
Slika 5.9 Botom gerber out za RR 915 MHz

5.4. Dizajn PCB-a za dvostruki prstenasti rezonator 2.45 GHz

Na slikama 5.10, 5.11 i 5.12 nalazi se izgled dizajnirane pločice.



Slika 5.10 Eagle design za DRR 2.45 GHz



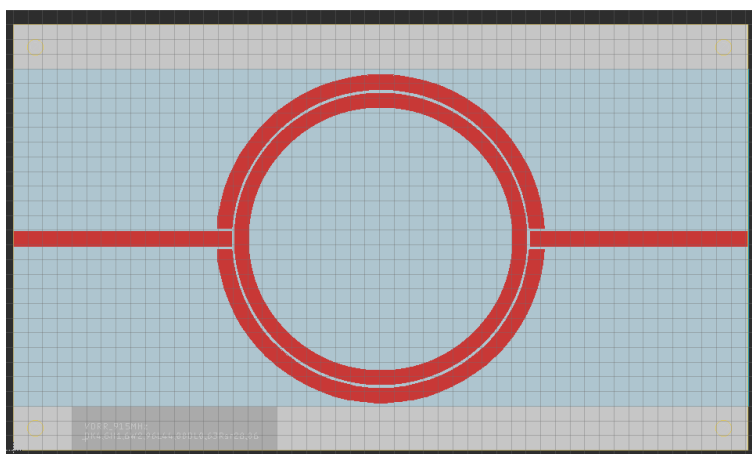
Slika 5.11 Top gerber out za DRR 2.45 GHz



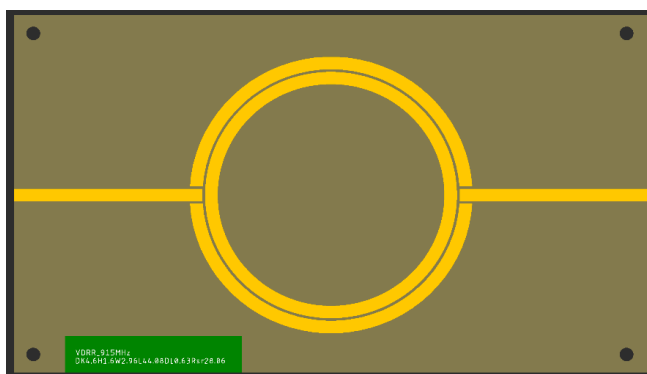
Slika 5.12 Botom gerber out za DRR 2.45 GHz

5.5.Dizajn PCB-a za dvostruki prstenasti rezonator 915 MHz

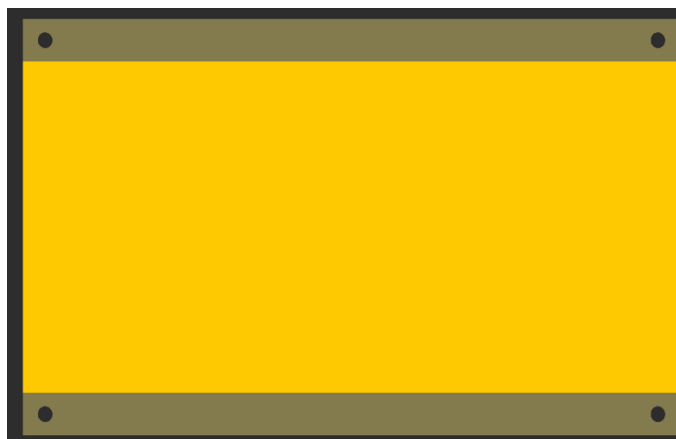
Na slikama 5.13, 5.14 i 5.15 nalazi se izgled dizajnirane pločice.



Slika 5.13 Eagle design za DRR 915 MHz



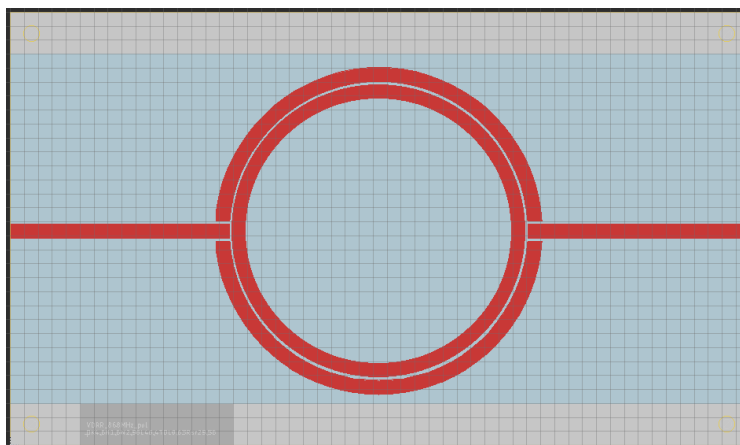
Slika 5.14 Top gerber out za DRR 915 MHz



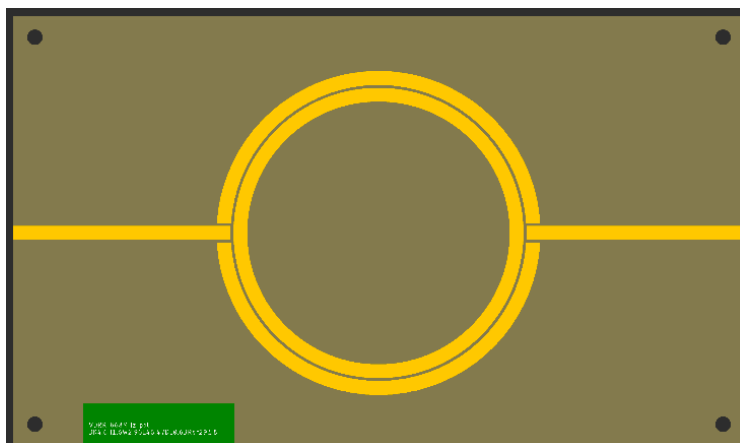
Slika 5.15 Botom gerber out za DRR 915 MHz

5.6.Dizajn PCB-a za dvostruki prstenasti rezonator 868 MHz

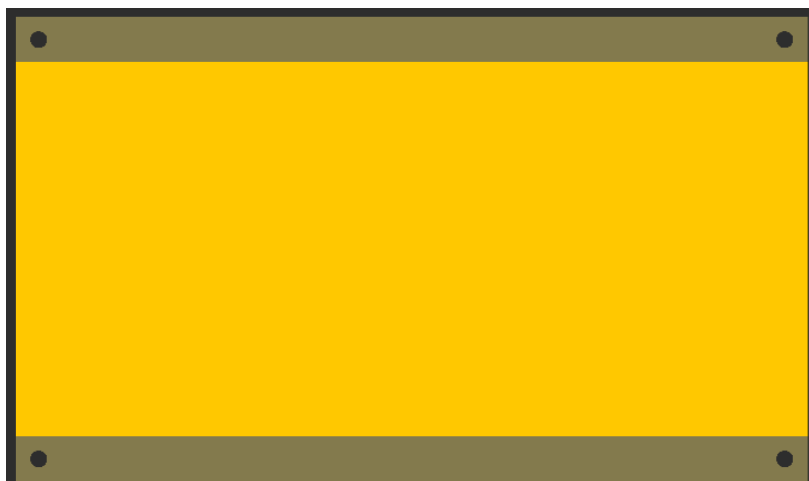
Na slikama 5.16, 5.17 i 5.18 nalazi se izgled dizajnirane pločice.



Slika 5.16 Eagle design za DRR 868 MHz















Slika 5.17 Top gerber out za DRR 868 MHz



Slika 5.18 Botom gerber out za DRR 868 MHz

5.7.Narudžba PCB-a

Product Detail	Product File	Price	Order Status	Operate
2020-09-23	W202009232157260			+ Add new item
 <p>PCB Prototype Order Number: Y6-3246536A 5 pcs \$8.60 Build Time:1-2 days Product Details</p>	<p>Ring_rezonator_915_MHz_202</p> <p> Data Preparation</p>	<p>Merchandise Total: \$44.90 Shipping Charge: \$27.07 Order Total: \$71.97</p>	<p>In Production ▶</p> <p>The order cannot be cancelled once it has been put into production.</p>	<p>Order Details</p> <p>Invoice</p>
 <p>PCB Prototype Order Number: Y4-3246536A 5 pcs \$5.10 Build Time:1-2 days Product Details</p>	<p>Ring_rezonator_2.45GHz_2021</p> <p> Reviewing File review will be completed in 10-60 mins when business hours.</p>			
 <p>PCB Prototype Order Number: Y3-3246536A 5 pcs \$9.10 Build Time:1-2 days Product Details</p>	<p>DRR_915MHz_2020-09-23_Y1</p> <p> Reviewing File review will be completed in 10-60 mins when business hours.</p>			
 <p>PCB Prototype Order Number: Y5-3246536A 5 pcs \$9.30 Build Time:1-2 days Product Details</p>	<p>Ring_rezonator_868_MHz_4.6</p> <p> Reviewing File review will be completed in 10-60 mins when business hours.</p>			
 <p>PCB Prototype Order Number: Y2-3246536A 5 pcs \$9.50 Build Time:1-2 days Product Details</p>	<p>DRR_868MHz_2_2020-09-23_</p> <p> Reviewing File review will be completed in 10-60 mins when business hours.</p>			
 <p>PCB Prototype Order Number: Y1-3246536A 5 pcs \$3.10 Build Time:1-2 days Product Details</p>	<p>DRR_2.45GHz_2_2020-09-23_</p> <p> Reviewing File review will be completed in 10-60 mins when business hours.</p>			