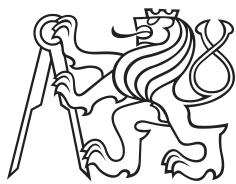


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Aplikace prstencových rezonátorů v mikrovlnných obvodech

Marek Novotný

Vedoucí práce: Ing. Viktor Adler, Ph.D.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **507392**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Mikrovlnné filtry využívající prstencové rezonátory

Název bakalářské práce anglicky:

Microwave Filters Based on Ring Resonators

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši použití a vlastností mikrovlnných prstencových rezonátorů vyrobených pomocí mikropáskových vedení. V rešerši se zaměřte zejména na využití rezonátorů v mikrovlnných filtrech, uveďte některé publikované filtry a proveďte jejich simulace v AWR DE. Vybrané analyzované filtry přelaďte do pásma do 10 GHz a připravte podklady pro jejich výrobu. Vyrobené obvody změřte na vektorovém analyzátoru a změřené parametry porovnejte se simulovanými.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Pozar, D. M.: Microwave Engineering, John Wiley & Sons, Inc, 4th Ed., New York, 2011
- [2] Kai, C., Lung-Hwa, H.: Microwave Ring Circuits and Related Structures, John Wiley & Sons, Inc, 2nd Ed., New York, 2004
- [3] Nafaa, M. S., Amal, E. M., Bashir, M. K.: Design Curves of Microstrip Ring Resonator, The 12th International conference on Sciences and Techniques of Automatic control and computer engineering, 2011
- [4] Michiaki, M., Hiroyuki, Y., Mitsuo, M.: Dual-Mode Stepped-Impedance Ring Resonator for Bandpass Filter Applications, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 49, No. 7, July 2001
- [5] Mohd Salleh, M. K., Yassin, I. M., Baharom, R., Hamzah, M. K., Prigent, G.: Series-Cascaded Ring Resonators for Compact Microwave Filter with High Rejection, IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, 2010

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Viktor Adler, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **06.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**



Ing. Viktor Adler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



v.2.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

20.5.2024

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Poděkování

Nejprve bych rád poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Viktorovi Adlerovi, Ph.D. za jeho cenné rady ohledně dané problematiky a za jeho neustálou podporu.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a všem přátelům, kteří mě při psaní bakalářské práce podporovali.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 22. května 2024

Abstrakt

Předmětem této práce je návrh a následná výroba pěti filtrů, jejichž podstatou jsou prstencové rezonátory tvořené mikropáskovým vedením. Jedná se o tři pásmové propusti a dvě pásmové zádrže, které pracují v pásmu do 10 GHz. Všechny filtry byly navrženy v prostředí AWR Design Environment. Návrh filtrů se opírá o teoretické znalosti získané studováním dříve navržených filtrů. Po vyrobení byly filtry změřeny vektorovým analyzátozem a jejich S-parametry byly porovnány se simulacemi. Čtyři z pěti vyrobených filtrů lze považovat za úspěšné.

Klíčová slova: prstencový rezonátor, mikropáskové vedení, pásmová propust, pásmová zádrž

Vedoucí práce: Ing. Viktor Adler, Ph.D.

Abstract

The subject of this work is the design and subsequent production of five filters, which are based on ring resonators made of microstrip lines. These consist of three band-pass filters and two band-stop filters, which operate in the frequency range up to 10 GHz. All filters were designed using the AWR Design Environment. The design of the filters is based on theoretical knowledge gained from studying previously designed filters. After fabrication, the filters were measured using a vector network analyzer and their S-parameters were compared with the simulations. Four out of the five fabricated filters can be considered successful.

Keywords: ring resonator, microstrip line, bandpass filter, bandstop filter

Title translation: Applications of ring resonators in microwave circuits

Obsah

Úvod	1	5.5 PP - pahýly	40
1 Teoretický rozbor	3	Závěr	43
1.1 Prstencový rezonátor	3	Literatura	45
1.2 Mikropáskové vedení	4		
1.3 Obvody s prstencovým rezonátorem	4		
1.3.1 Spojovací mezera	5		
1.3.2 Přívodní linky	5		
1.3.3 Zářez v prstenci	6		
1.3.4 Rozšířená část prstence	6		
1.3.5 Mezera v prstenci	7		
1.3.6 Pahýl v prstenci	7		
1.3.7 Navázání vedení na rezonátor	8		
1.4 Aplikace prstencových rezonátorů	10		
1.4.1 Použití ve filtrech	10		
1.4.2 Měření efektivní permitivity	11		
2 Analýza publikovaných filtrů	13		
2.1 Kaskádně spojené prstencové rezonátory	13		
2.2 Prstencový rezonátor s rozšířenou částí	14		
2.3 Prstencový rezonátor se 2 otevřenými větvemi	15		
2.4 Prstencové rezonátory vnořené do sebe	16		
2.5 Prstencový rezonátor s mezerou v prstenci	17		
3 Návrh filtrů	19		
3.1 Pásmová propust - kaskáda dvou prstenců	20		
3.2 Pásmová zadrž - prstenec s mezerou	23		
3.3 Pásmová zadrž - kolmá přívodní vedení	25		
3.4 Pásmová propust - rozšířená část prstence	27		
3.5 Pásmová propust - pahýly	29		
4 Výroba filtrů	31		
5 Porovnání vyrobených filtrů s návrhem	33		
5.1 PP - kaskáda dvou prstenců	33		
5.2 PZ - prstenec s mezerou	35		
5.3 PZ - kolmá přívodní vedení	37		
5.4 PP - rozšířená část prstence	38		

Obrázky

1.1 Prstencový rezonátor (převzatý z [2])	3	3.13 Graf S-parametrů filtru 3.5.....	29
1.2 Mikropáskové vedení (převzatý z [4])	4	3.14 Schematic filtru 3.5	30
1.3 Rozložení pole v mikropásku (převzatý z [4])	4	3.15 Layout filtru 3.5	30
1.4 Základní obvod s prstencovým rezonátorem.....	5	4.1 Fréza LPKF ProtoMat E44	32
1.5 Zářez v prstenci	6	5.1 Vyrobený filtr z 5.1	34
1.6 Rozšířená část prstence	6	5.2 Porovnání filtru z 5.1 s návrhem	34
1.7 Mezera v prstenci	7	5.3 Referenční vedení na substrátu RO4350B s tloušťkou 0,254 mm ..	35
1.8 Pahýly v prstenci	7	5.4 Vyrobený filtr z 5.2	35
1.9 Matched loose coupling	8	5.5 Porovnání filtru z 5.2 s návrhem	36
1.10 Vylepšená vazba	8	5.6 Referenční vedení na substrátu RO4003C s tloušťkou 0,508 mm ..	36
1.11 Kruhová vazba	9	5.7 Vyrobený filtr z 5.3	37
1.12 Přímé spojení	9	5.8 Porovnání filtru z 5.3 s návrhem	37
1.13 Boční vazba.....	9	5.9 Vyrobený filtr z 5.4	38
1.14 Příklad pásmové zádrže.....	10	5.10 Porovnání filtru z 5.4 s návrhem	39
2.1 Kaskádně spojené prstencové rezonátory (převzatý z [13])	13	5.11 Referenční vedení na substrátu RO4003C s tloušťkou 1,524 mm ..	39
2.2 Graf s-parametrů filtru 2.1	14	5.12 Vyrobený filtr z 5.5	40
2.3 Prstencový rezonátor s rozšířenou částí (převzatý z [14])	14	5.13 Porovnání filtru z 5.5 s návrhem	41
2.4 Graf s-parametrů filtru 2.2	14	5.14 Referenční vedení na substrátu RO4003C s tloušťkou 0,813 mm ..	41
2.5 Prstencový rezonátor se 2 otevřenými větvemi (převzatý z [15])	15		
2.6 Graf s-parametrů filtru 2.3	15		
2.7 Prstencové rezonátory vnořené do sebe (převzatý z [16]).....	16		
2.8 Graf s-parametrů filtru 2.4	16		
2.9 Prstencový rezonátor s mezerou v prstenci (převzatý z [17])	17		
2.10 Graf s-parametrů filtru 2.5	17		
3.1 Graf S-parametrů filtru 3.1.....	20		
3.2 Schematic filtru 3.1	21		
3.3 Layout filtru 3.1	22		
3.4 Graf S-parametrů filtru 3.2.....	23		
3.5 Schematic filtru 3.2	24		
3.6 Layout filtru 3.2	24		
3.7 Graf S-parametrů filtru 3.3.....	25		
3.8 Schematic filtru 3.3	26		
3.9 Layout filtru 3.3	26		
3.10 Graf S-parametrů filtru 3.4.....	27		
3.11 Schematic filtru 3.4	28		
3.12 Layout filtru 3.4	28		



Úvod

V posledních letech vzrostla poptávka po vysokofrekvenčních filtrech pro aplikace v mikrovlnné technice. Nejčastěji se jedná o pásmové filtry, které propouští či zadržují určité frekvenční pásmo. Jednou z možností, jak vytvořit pásmový filtr, je použití obvodu s prstencovými rezonátory. Různými typy zapojení obvodů s prstenci lze vytvořit buď pásmovou propust nebo pásmovou zádrž. Výhodou takovýchto filtrů jsou malé rozměry obvodu, nízké ztráty v propustném pásmu a vysoký útlum v nepropustném pásmu.

Cílem této práce je návrh pěti filtrů pomocí prstencových rezonátorů. Obvody budou navrženy pomocí mikropáskového vedení na substrátech od firmy Rogers Corporation. Filtry by měly pracovat ve frekvenčním pásmu do 10 GHz. Měly by mít co nejméně zvlněné propustné pásmo, co nejmenší útlum v propustném pásmu a co největší útlum v nepropustném pásmu. Až budou filtry navrženy, měly by být vyrobeny a jejich výsledky porovnány s navrženými simulacemi.

Kapitola 1

Teoretický rozbor

1.1 Prstencový rezonátor

Prstencový rezonátor je část vedení, které je stočené do uzavřené smyčky [1]. Pokud se délka daného vedení rovná celočíselnému násobku vedené vlnové délky λ_g , dochází k rezonanci. To lze vyjádřit vztahem

$$2\pi \frac{(R+r)}{2} = m\lambda_g, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (1.1)$$

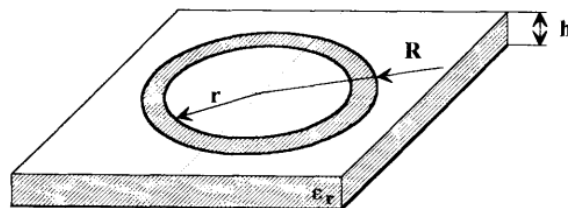
kde R je vnější poloměr prstence, r je vnitřní poloměr prstence, m je násobek vlnové délky a λ_g je vlnová délka vedené vlny (guided wavelength), viz obrázek 1.1. Daná rezonanční frekvence je pak dána vztahem

$$f_0 = \frac{mc}{\pi\sqrt{\epsilon_{ef}}(R+r)}, \quad (1.2)$$

kde c je rychlost světla a ϵ_{ef} je efektivní permitivita [2].

Prstencový rezonátor nemusí mít nutně tvar prstence. Obvod může být ve tvaru čtverce nebo jiného mnohoúhelníku. Pouze musí být splněna podmínka ze vztahu pro vlnovou délku (1.1).

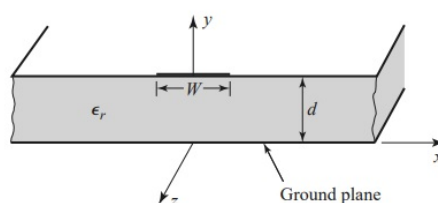
Prstencové rezonátory se dají realizovat několika způsoby. Obvykle se používá mikropáskové vedení (microstrip line), na které cílí i tato práce. Také lze použít „štěrbinové vedení“ (slotline) nebo „koplanární vedení“ [3].



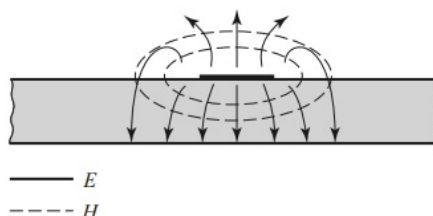
Obrázek 1.1: Prstencový rezonátor (převzatý z [2])

1.2 Mikropáskové vedení

Mikropáskové vedení (angl. microstrip) patří mezi nejpoužívanější plošné přenosové linky. Základní schéma je zobrazeno na obrázku 1.2. Skládá se z vodiče o šířce w a z uzemněného dielektrického substrátu o tloušťce d a relativní permitivitě ϵ_r , která se pohybuje nejčastěji v rozmezí od 2 do 10. Mikropásek obsahuje většinu svého pole v dielektrické oblasti mezi vodičem a zemnicí rovinou. Zbylá část pole je v oblasti vzduchu nad substrátem, jak je zobrazeno v obrázku 1.3. Tím pádem nemůže mikropáskové vedení podporovat čistou TEM vlnu, protože by nebylo možné dodržet podmínku fázové shody na rozhraní vzduch a dielektrikum. Podle [4] se jedná o vlnu kvazi-TEM, což znamená, že pole jsou v podstatě stejná jako pole ve statickém DC případě.



Obrázek 1.2: Mikropáskové vedení (převzatý z [4])

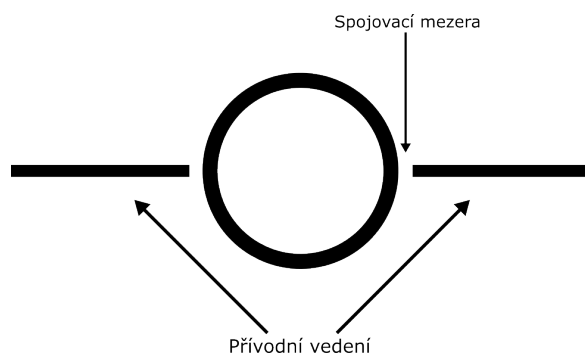


Obrázek 1.3: Rozložení pole v mikropásku (převzatý z [4])

1.3 Obvody s prstencovým rezonátorem

V této kapitole budou rozebrány jednotlivé části obvodu s prstencovým rezonátorem, především jejich funkce a vliv na celkové chování obvodu. Dále bude kapitola zaměřena na úpravy základního obvodu s prstencovým rezonátorem.

Nejjednodušší obvod s prstencovým rezonátorem se skládá z rezonátoru, mezery a přívodních linek. Schéma základního obvodu prstencového rezonátoru je ukázáno v obrázku 1.4. Velikost samotného rezonátoru udává konkrétní rezonanční frekvenci, jak je ukázáno ve vztazích (1.1) a (1.2). Nutno podotknout, že tvar základního obvodu prstence je symetrický.



Obrázek 1.4: Základní obvod s prstencovým rezonátorem

1.3.1 Spojovací mezera

Velmi důležitou částí obvodu s prstencovým rezonátorem je spojovací mezera mezi samotným rezonátorem a přívodními linkami. Mezera má vliv na rezonanční frekvenci, na přenos přes rezonátor a ovlivňuje také Q -faktor. Vše závisí na šířce mezery. Čím bude spojovací mezera užší, tím více bude ovlivňovat rezonanční frekvenci, respektive tím víc se zmenší rezonanční frekvence. Užší mezera také znamená vyšší hodnotu parametru s_{21} neboli rezonátor s užší mezerou propustí více výkonu. Naopak čím širší spojovací mezera, tím bude parametr s_{21} nižší a ztratí se více výkonu. Větší mezera má také menší vliv na rezonanční frekvenci. Co se týče Q -faktoru, ten se s rozšířením spojovací mezery snižuje [1].

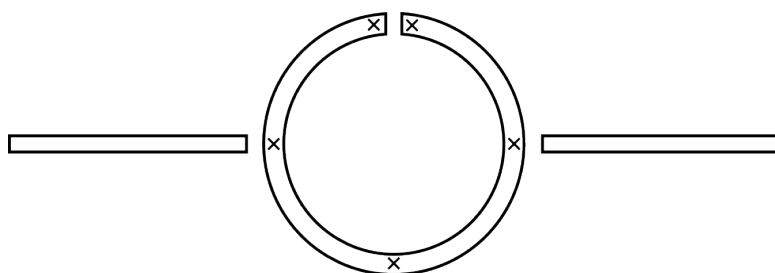
Horní hranici velikosti spojovací mezery bude určovat především parametr s_{21} . Pokud jde o dolní hranici, mezera může být tak úzká, dokud nedojde ke zkratu. Dolní hranice může být případně udána výrobcem plošných spojů, jelikož jsou schopni vyrábět pouze do určité velikosti. Většinou se udává 0,1 mm. Například v AWR DE je nejmenší možná mezera omezená podmínkou, která říká, že poměr šířky mezery a tloušťky substrátu musí být větší než 0,04 [5]. Jak vybrat správnou hodnotu spojovací mezery? Existuje na to několik studií. Jedna z nich je například uvedena v tomto článku [6].

1.3.2 Přívodní linky

Co se týče přívodních linek, mají jedinou podmínku. Musí být impedančně přizpůsobené, standardně na $50\ \Omega$, tudíž budou mít fixní šířku. Délka přívodních vedení vlastnosti rezonátoru neovlivní, tudíž na jejich délce nezáleží. Přívodní linky jsou běžně v poloze 0° a 180° , jak lze vidět na obrázku 1.4. Pokud se úhel mezi linkami změní, bude to mít vliv na rezonanční frekvenci [1]. Například pokud budou přívodní vedení posunuty pouze o 90° , může dojít k excitaci duálního módu, což znamená, že parametr s_{21} základního obvodu bude mít 2 špičky okolo rezonanční frekvence, jedna špička pro sudý mód a druhá pro lichý mód.

1.3.5 Mezera v prstenci

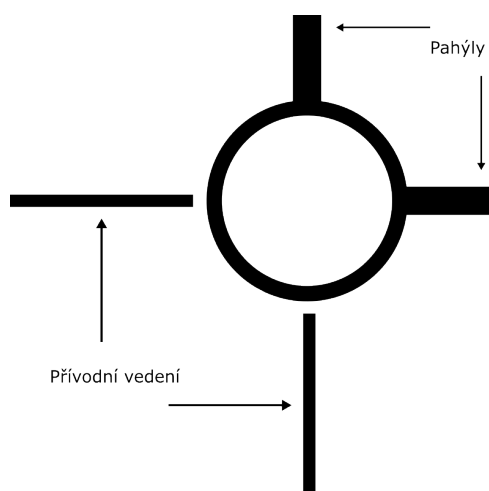
Další možnou úpravou základního obvodu je rozdělení prstence v určitém místě, čímž vzniká mezera. Viz obrázek 1.7, kde x označují maxima elektrického pole. Mezery mají především vliv na pole uvnitř prstence. Pomocí mezer lze manipulovat s maximy pole uvnitř prstence. Tím pádem lze maxima posouvat na vhodná místa, ve kterých lze například připojit přívodní linky a získat vyšší výkon. Tyto mezery se využívají zejména pro integrování prvků, například varaktorů nebo PIN diod [1]. Pomocí mezery můžeme také vytvořit pásmovou zadrž. Podrobněji v kapitole 1.4.



Obrázek 1.7: Mezera v prstenci

1.3.6 Pahýl v prstenci

Prstencový rezonátor lze také upravit přidáním tzv. pahýlů neboli otevřených větví do samotného prstence. Pahýl je část vedení, které je zakončeno otevřeným koncem a implementováno do prstence, viz obrázek 1.8. Tyto úpravy mají využití hlavně ve filtrech, ve kterých lze pomocí těchto přidávaných diskontinuit (angl. perturbation) rozšířit či zúžit propustné pásmo. Vliv mají také na přenos. Pahýly musí být zvoleny na vhodných místech, nejčastěji se volí poloha 0° a 90° a záleží také na jejich délce a šířce.



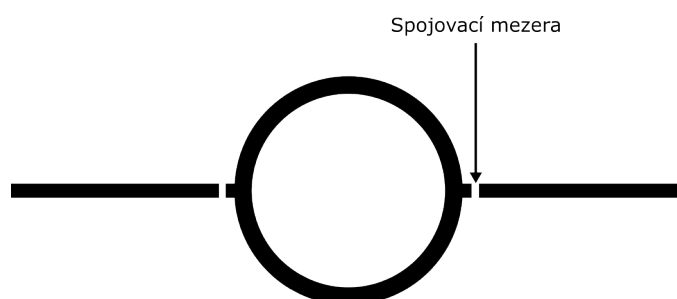
Obrázek 1.8: Pahýly v prstenci

1.3.7 Navázání vedení na rezonátor

Tato kapitola se věnuje tomu, jakým způsobem lze propojit prstencový rezonátor s přívodními vedeními. Existuje hned několik typů vazeb. Ovlivňují především rezonanční frekvenci a Q -faktor. Každá z následujících možností má své výhody a nevýhody, a proto má každá metoda jiné využití.

Volná vazba

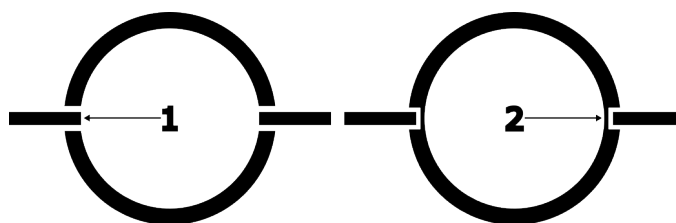
Nezákladnější a nejpoužívanější možností je volná vazba (angl. loose coupling), které už bylo ukázáno v základním obvodu s prstencovým rezonátorem 1.4. Obvody s tímto spojením mají vysoký Q -faktor, ale trpí vyššími ztrátami [1]. Existuje vylepšení této metody s názvem Matched loose coupling, které snižuje ztráty. Je zobrazeno na obrázku 1.9.



Obrázek 1.9: Matched loose coupling

Vylepšená vazba

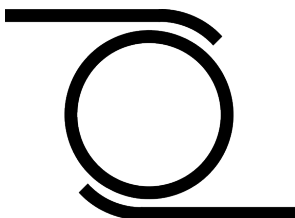
Druhou možností je vylepšená vazba (angl. enhanced coupling), jejíž 2 příklady jsou zobrazeny na obrázku 1.10. V této metodě jsou přívodní linky zabudovány přímo do samotného prstence. Tím se z prstencového rezonátoru stávají 2 zakřivené lineární rezonátory. Proto se této metodě také říká kvazi-lineární spojení. Výhodou této metody je zvýšení přenosu mezi přívodními linkami a prstencem, čímž se snižují ztráty. Její nevýhodou je nižší Q -faktor [1].



Obrázek 1.10: Vylepšená vazba

■ Kruhová vazba

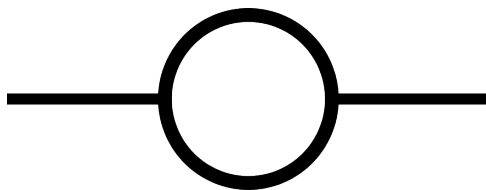
Třetí metodou je kruhová vazba (angl. annular coupling), která je zobrazena na obrázku 1.11. Jejím hlavním cílem je, aby bylo přeneseno co nejvíce energie. K přenosu energie dochází pomocí ohnutých konců přívodních linek. Využití má například v návrhu filtrů [7].



Obrázek 1.11: Kruhová vazba

■ Přímé spojení

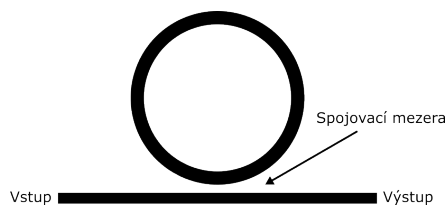
Čtvrtým typem vazby je přímé spojení (angl. Direct connection), ve kterém jsou přívodní vedení přímo spojena s prstencem, jak je ukázáno na obrázku 1.12. Nutno také zmínit, že všechny brány (vstup a výstup) jsou spojeny i stejnosměrně [7] [8].



Obrázek 1.12: Přímé spojení

■ Boční vazba

Poslední metodou je boční vazba (angl. side coupling), která je zobrazena na obrázku 1.13. V tomto zapojení existuje mezera mezi prstencem a přívodním vedením [7]. Využívá se zde principu, při kterém se mění přenosové parametry vedení při přiblížení jiného vedení. Čím blíž bude prstenek u samotného vedení, tím lepší bude přenos, přesněji přenos okolo rezonanční frekvence prstence. Pro mezeru spojení zde platí stejná pravidla jako v části 1.3.1.



Obrázek 1.13: Boční vazba

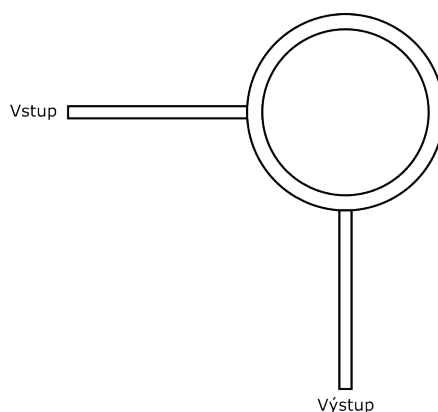
1.4 Aplikace prstencových rezonátorů

Aplikací prstencových rezonátorů je několik. Především se používají na různá mikrovlnná měření. Nejčastěji se jedná o měření permitivity substrátu nebo Q -faktoru. Dají se také použít na vytváření filtrů, na což se zaměřuje tato práce, dále také na vytváření směšovačů například v [9] nebo antén například zde [10].

1.4.1 Použití ve filtrech

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1, prstencový rezonátor má určitou rezonanční frekvenci. To znamená, že na dané frekvenci signál s určitými ztrátami projde, ale mimo rezonanční frekvenci nikoliv. Určitými úpravami lze dosáhnout toho, že se pásmo kolem rezonanční frekvence rozšíří a vznikne tak filtr typu pásmová propust, který propouští signál v daném pásmu. Toho lze dosáhnout například, pokud spojíme prstencový rezonátor se vstupními i výstupními přenosovými linkami. Kaskádním zapojením několika rezonátorů do série lze vylepšit vlastnosti daného filtru. Lze zvýšit propustnost v propustném pásmu, zmenšit zvlhnutí v propustném pásmu a zvýšit útlum v nepropustném pásmu. Rezonátory se do série spojují pomocí vázaného vedení, které má délku čtvrtiny λ_g [1].

Na druhou stranu lze pomocí prstencových rezonátorů také vytvořit filtr typu pásmová zádrž. Zakázané pásmo lze realizovat pomocí navzájem kolmých přírodních linek. Výstupní vedení se posouvá, aby bylo umístěno v místě s nulovým elektrickým polem (magnetické pole má v tomto místě naopak maximum). Příklad je uveden na obrázku 1.14. Pro výsledný obvod pak platí, že na základní rezonanční frekvenci, podle vzorců (1.1) a (1.2), bude na výstupu nulové napětí, a tudíž vzniká pásmová zádrž [1]. Druhou možností je použití mezery v prstenci. Pokud mezeru umístíme doprostřed strany rezonátoru, ke které není navázáno přírodní vedení, spolehlivě vytvoříme pásmovou zádrž. Názorný příklad je později ukázán v 3.3.



Obrázek 1.14: Příklad pásmové zádrže

1.4.2 Měření efektivní permitivity

Další aplikací prstencových rezonátorů je měření efektivní permitivity substrátu. Základní metodou je změření rezonanční frekvence prstencového rezonátoru, ze které je následně vypočtena efektivní permitivita podle vzorce

$$\epsilon_{\text{eff}}(f) = \left(\frac{nc}{fl} \right)^2, \quad (1.3)$$

kde n je řád rezonanční frekvence, c je rychlost světla, f je rezonanční frekvence a l je délka rezonátoru, v tomto případě se jedná o obvod $l = 2\pi r$ (kde r je poloměr prstence). Aby bylo měření přesnější, měří se i vyšší rezonanční frekvence. Pro měření se používá základní obvod, ve kterém je prstenec volně navázán na přírodní vedení pomocí mezery [1]. V článku [11] je dokonce uvedeno, že pro věrnější výsledky byl pro měření použit prstenec o obvodu, který se rovná více vlnovým délkám (nejpřesnější byl pětinašobek vlnové délky). Důvodem je, že rovnice 1.3 je odvozena pro rovná vedení a prstence s větším průměrem se rovnému vedení blíží více. Tím by mělo dojít k minimalizaci chyb při měření.

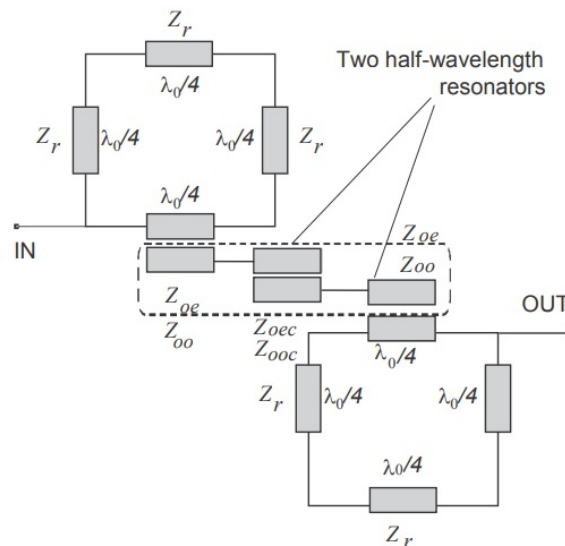
Složitější metodou je měření, při kterém se kromě efektivní permitivity měří také tloušťka substrátu. Měření probíhá pomocí senzorů, které jsou tvořeny prstencovým rezonátorem. Při měření se využívá faktu, že se rezonanční frekvence změní při přiblížení jiného materiálu k rezonátoru. Tím pádem se měří parametr s_{21} , kde sledujeme změnu rezonanční frekvence po přiložení materiálu. Zaznamenají se 2 hodnoty, nová základní rezonanční frekvence a její druhý násobek. Pro obě hodnoty se následně vypočte tloušťka substrátu a pokud je tloušťka shodná pro obě frekvence, vypočte se permitivita. Používají se především jednoduchá zapojení obsahující pouze prstenec a přírodní vedení. Při použití úprav a diskontinuit z 1.3 se výpočet a analýza stávají komplikovanými. Proto se spíše nepoužívají. Podrobněji je tato metoda rozebrána v [12].

Kapitola 2

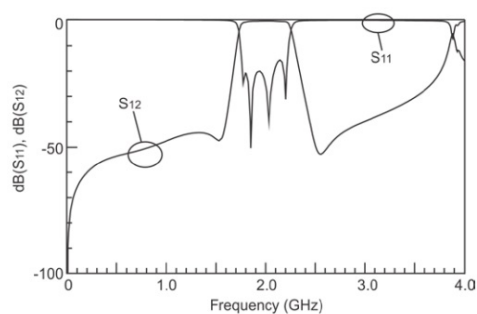
Analýza publikovaných filtrů

2.1 Kaskádně spojené prstencové rezonátory

Jedná se o filtr, který byl navržen na univerzitě v Malajsii. Podstatou filtru jsou 2 shodné rezonátory se stranou délky čtvrt vlny, které jsou spojeny vázanými vedeními s délkou také čtvrt vlny. Vázaná vedení dohromady vytvářejí 2 rezonátory o délce půl vlny. Podstata je objasněna na obrázku 2.1. Celkově tedy obvod obsahuje 2 prstencové rezonátory a 2 půlvlnné rezonátory, což má za následek 4 póly a tím pádem filtr 4. řádu. Filtr je typu pásmová propust a pracuje na frekvenci 2 GHz, s vysokým přenosem a velmi vysokým útlumem v nepropustném pásmu, jak je možné vidět na obrázku 2.2. Obvod byl navržen na substrátu Tachonic s parametry $\epsilon_r = 4,5$, $h=1,63$ mm, $\tan(\delta)=0,0035$ [13].



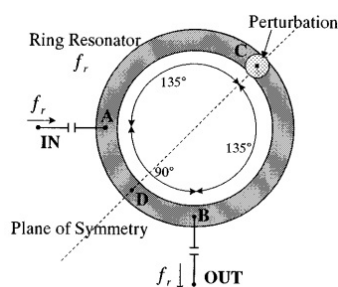
Obrázek 2.1: Kaskádně spojené prstencové rezonátory (převzatý z [13])



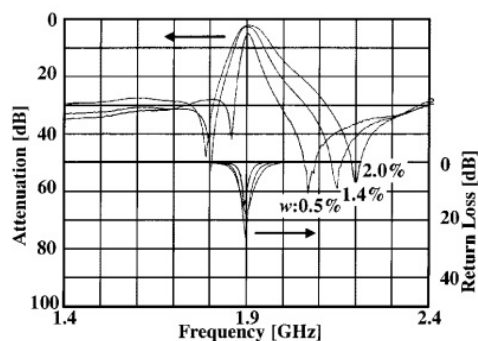
Obrázek 2.2: Graf s-parametrů filtru 2.1

2.2 Prstencový rezonátor s rozšířenou částí

Pásmová propust z článku [14] využívá duální mód prstencového rezonátoru, který je excitován především kvůli poloze přivodních vedení, které jsou spolu svírají úhel 90° . To by znamenalo rozdělení rezonanční frekvence na 2 špičky. Tomuto rozdělení se dá zabránit přidáním určité diskontinuity, zde ve formě rozšířené části prstence, která je od každého vedení vzdálená 135° . Díky poloze této diskontinuity je celý rezonátor symetrický, viz obrázek 2.3. Filtr má pracovní frekvenci 1,9 GHz a je realizován na substrátu RT/Duroid s parametry $\epsilon_r=10,5$, $h=1,27$ mm, $\tan(\delta)=0,002$. Jeho odezvy jsou zobrazeny na obrázku 2.4 pro 3 různé šířky pásma.



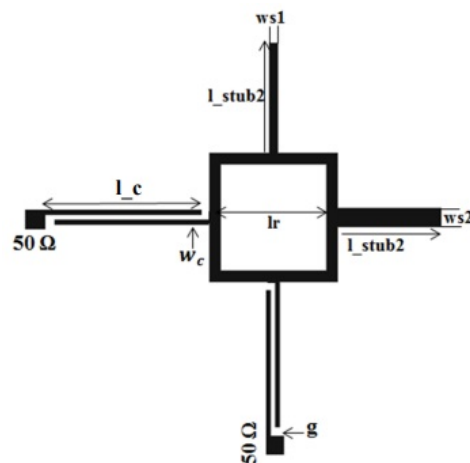
Obrázek 2.3: Prstencový rezonátor s rozšířenou částí (převzatý z [14])



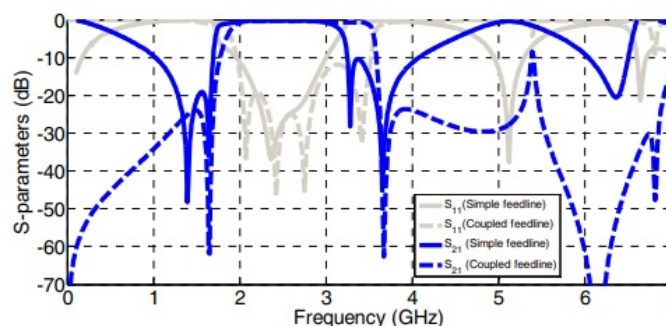
Obrázek 2.4: Graf s-parametrů filtru 2.2

2.3 Prstencový rezonátor se 2 otevřenými větvemi

Na univerzitě na Kypru byl navržen filtr typu pásmová propust, využívající 2 otevřené větve, které jsou přidány do základního obvodu s prstencem, jak lze vidět na obrázku 2.5. Tyto pahýly slouží jednak k tomu, aby nedocházelo k excitaci duálních módů a také lze pomocí jejich šířky měnit šířku pásma daného filtru. Základní přívodní vedení je zde nahrazeno vázanými vedeními, která mají za úkol zvýšit útlum v nepropustném pásmu. Podstata filtru je tím pádem založena jak na prstencovém rezonátoru, tak na vázaných vedeních, která nejsou impedančně přizpůsobená. Z toho důvodu musí být dodržena délka vázaného vedení, za které bude připojeno libovolně dlouhé vedení přizpůsobené na $50\ \Omega$. Filtr je realizován na substrátu Rogers 4003C s parametry $\epsilon_r=3,55$, $h=0,813$ mm, $\tan(\delta)=0,0027$ [15]. Pásmová propust je navržena na frekvenci 2,4 GHz, jak je možné vidět na obrázku 2.6, kde se porovnává filtr s běžnými přívodními linkami s filtrem, který používá vázaná vedení jako přívodní vedení. Tento filtr může nalézt uplatnění v aplikacích založených na WLAN a Bluetooth přijímačích, které pracují na frekvenci 2,4 GHz.



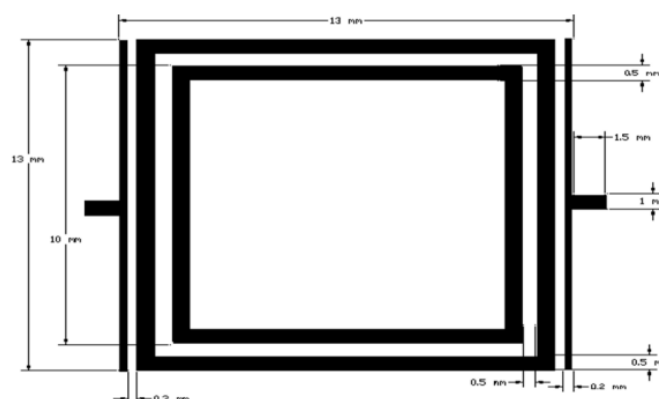
Obrázek 2.5: Prstencový rezonátor se 2 otevřenými větvemi (převzatý z [15])



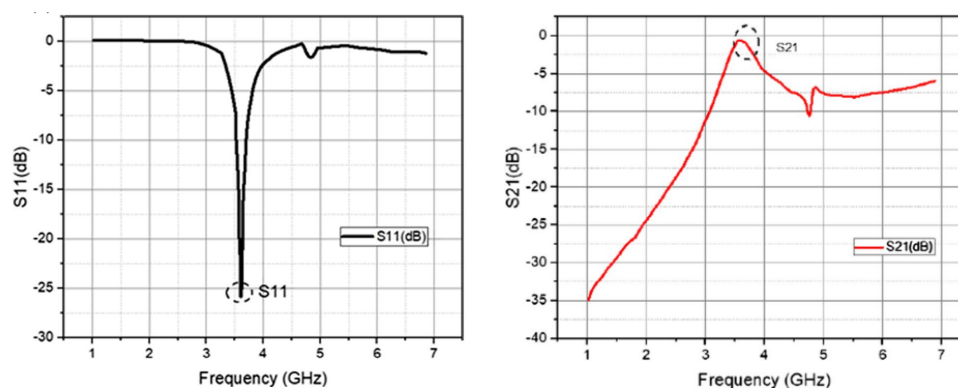
Obrázek 2.6: Graf s-parametrů filtru 2.3

2.4 Prstencové rezonátory vnořené do sebe

Speciálním¹ typem zapojení filtru z prstencových rezonátorů je vnoření jednotlivých prstenců do sebe. Toho využívá filtr z článku [16], kdy je jeden prstenc vnořen do druhého. Prstence jsou dostatečně blízko u sebe, že mezi nimi vzniká kapacitní vazba a dochází k přenosu. Jak lze vidět na obrázku 2.7, přívodní vedení jsou ve tvaru T, za účelem vyššího přenosu. Filtr byl navržen pro 5G sítě. Jedná se o pásmovou propust operující na 3,6 GHz s šířkou pásma 400 MHz (3,4-3,8 GHz) s přenosem -0,1 dB a koeficientem odrazu -27 dB. Jeho odezvy jsou zobrazeny na obrázku 2.8. Je navržen na substrátu FR4 s parametry $\epsilon_r=4,4$ a $h=1,6$ mm



Obrázek 2.7: Prstencové rezonátory vnořené do sebe (převzatý z [16])

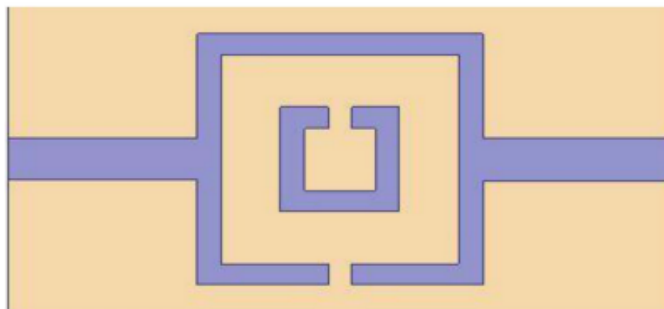


Obrázek 2.8: Graf s-parametrů filtru 2.4

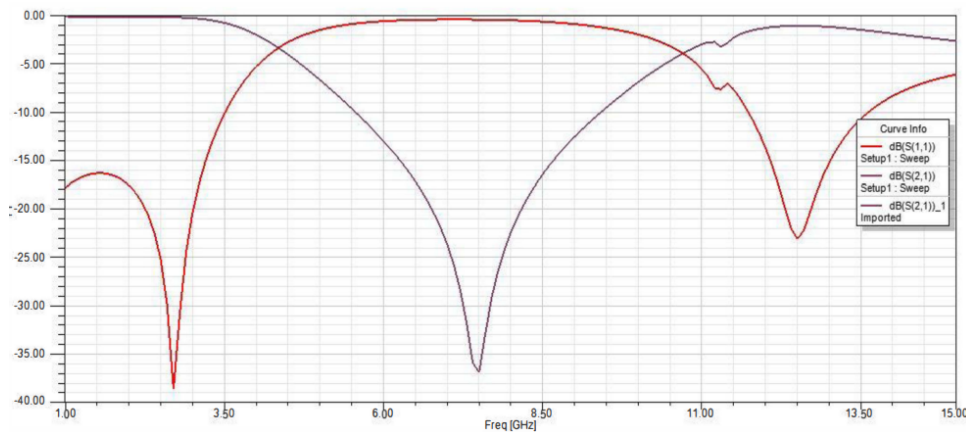
¹Speciální je také v tom, že simulátor AWR DE nepodporuje tento druh vazby mezi rezonátory, resp. mezi vedeními, a proto se jimi v praktické části nebudu zabývat.

2.5 Prstencový rezonátor s mezerou v prstenci

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.4, pásmovou zádrž lze vytvořit například pomocí mezery v prstenci. Tato varianta byla využita při návrhu filtru v článku [17]. Zde byl navržen obvod s prstencem s mezerou, který samostatně tvoří pásmovou zádrž a pro vylepšení vlastností (lepší přenos v propustném pásmu a vyšší útlum v nepropustném pásmu) byl do prstence vnořen druhý prstenec s mezerou. Obvod je zobrazen na obrázku 2.9. Filtr zadržuje pásmo 4,3 až 10,4 GHz (pro pokles o 3 dB), jak lze vidět na obrázku 2.10. Pro útlum 10 dB je zadržované pásmo 5,5 - 9,5 GHz. Pásmová zádrž je realizována na substrátu FR4 s parametry $\epsilon_r=4,4$, $h=0,5$ mm, $\tan(\delta)=0,002$.



Obrázek 2.9: Prstencový rezonátor s mezerou v prstenci (převzatý z [17])



Obrázek 2.10: Graf s-parametrů filtru 2.5

Kapitola 3

Návrh filtrů

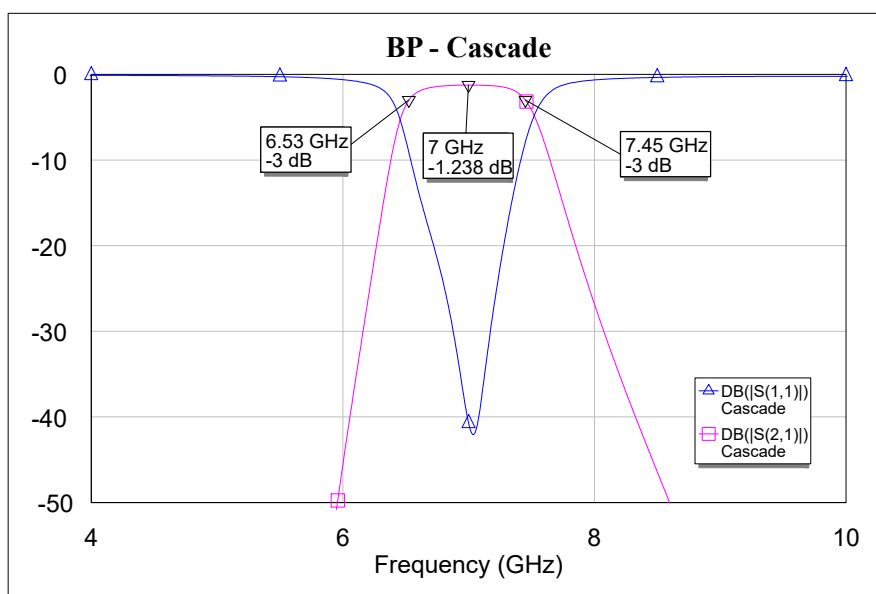
Tato kapitola se věnuje návrhu filtrů v programu AWR Design Environment, které budou použitelné v pásmu do 10 GHz. Návrh každého z následujících filtrů probíhal stejným způsobem. Vždy vycházel buď z konkrétní předlohy v podobě již zmíněných článků, případně vycházel z teoretických znalostí z kapitoly 1.1. Na návrh mohlo být použito několik druhů substrátů. Jednalo se o substráty od výrobce Rogers: RO4350B ($\epsilon_r=3,66$) s výškou 0,254 mm nebo RO4003C ($\epsilon_r=3,55$) s výškou 0,508 nebo 0,813 mm. Velikost filtrů byla omezena velikostí měřicí krabičky, která má rozměry 34x34 mm². Kvůli konektorům je nutné mít volný prostor na okraji substrátu. Proto je maximální možná velikost obvodu 20x20 mm². Návrh probíhal v několika krocích:

- V první řadě byl vymodelován schematic, vycházející z dané předlohy.
- V druhém kroku bylo nutné připravit si parametry pro přeladění filtru. Určit si pracovní frekvenci, na které bude filtr realizován. S tím souvisí i základní parametry obvodu jako jsou délka, resp. obvod rezonátoru a tloušťka vedení, které by v ideálním případě mělo mít charakteristickou impedanci 50 Ω. Tyto parametry je možné vypočítat pomocí nástroje TXLine.
- Třetím krokem bylo aplikování nových parametrů na schematic.
- Dalším krokem bylo vytvoření grafu s s-parametry daného filtru.
- Pokud odezvy filtru nevyhovovaly danému zadání, bylo nutné optimalizovat parametry. Optimalizace byla provedena pomocí nástroje Optimizer, který podle zvolených cílů pro s-parametry (jedná se o co nejvyšší přenos v propustném pásmu, ideálně lepší než -0.5 dB, případně byl požadován co nejnižší odraz v propustném pásmu, ideálně -20 dB a méně), nalezne vhodné řešení. Použita byla metoda Pointer-Hybrid, která byla shledána jako nejúčinnější [5].
- Posledním krokem byla úprava layoutu.

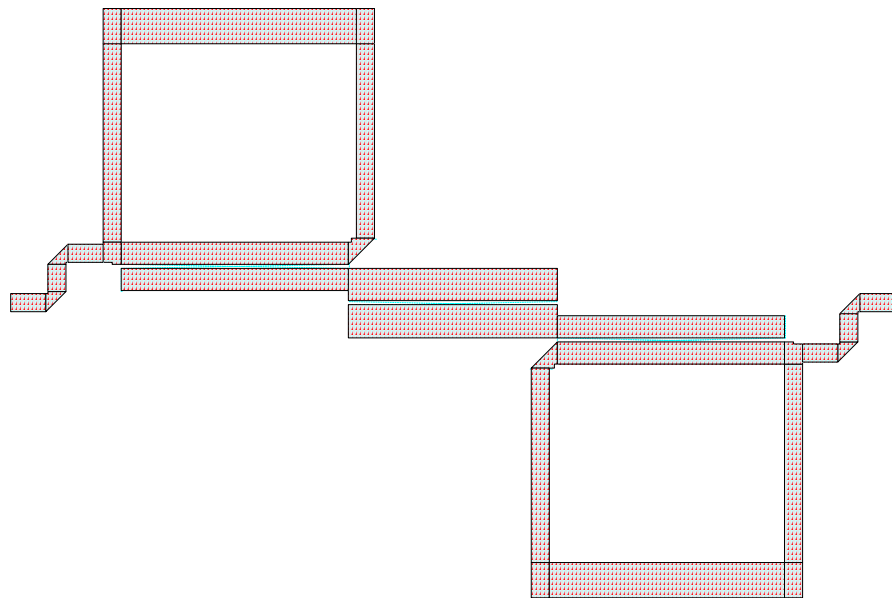
3.1 Pásmová propust - kaskáda dvou prstenců

Filtr tvořený kaskádou dvou stejných prstencových rezonátorů, byl navržen podle obvodu v 2.1. Jedná se tedy o pásmovou propust. Předloha je realizována na frekvenci 2,4 GHz. Tomu odpovídá obvod, který svojí velikostí přesahuje plochu 20x20 mm². Z toho důvodu musel být filtr přeladěn na vyšší frekvenci, aby se zmenšily jeho rozměry. Byla zvolena frekvence 7 GHz a substrát RO4350B s výškou 0,254 mm. Těmto parametrům odpovídá vlnová délka $\lambda_g=25,75$ mm a šířka vedení $w=0,51$ mm. Po přeladění neměl filtr vyhovující odezvy, a proto musel být optimalizován.

Výsledkem optimalizace je filtr typu pásmová propust se šířkou pásma téměř 1 GHz se začátkem na 6,53 GHz a koncem na 7,45 GHz. V propustném pásmu se podařilo dosáhnout útlumu -1,238 dB. Mimo propustné pásmo má filtr velmi vysoký útlum. Koeficient odrazu v propustném pásmu dosáhl hodnot pod -15 dB, jak lze vidět na obrázku 3.1. Výsledný obvod je uveden na obrázcích 3.2 a 3.3. Obvod je symetrický. Šířky stran rezonátoru jsou různé od 0,51 mm, a proto budou mít jinou impedanci než 50 Ω . Pokud jde o přívodní vedení, ta jsou impedančně přizpůsobená a nezáleží na jejich délce.



Obrázek 3.1: Graf S-parametrů filtru 3.1



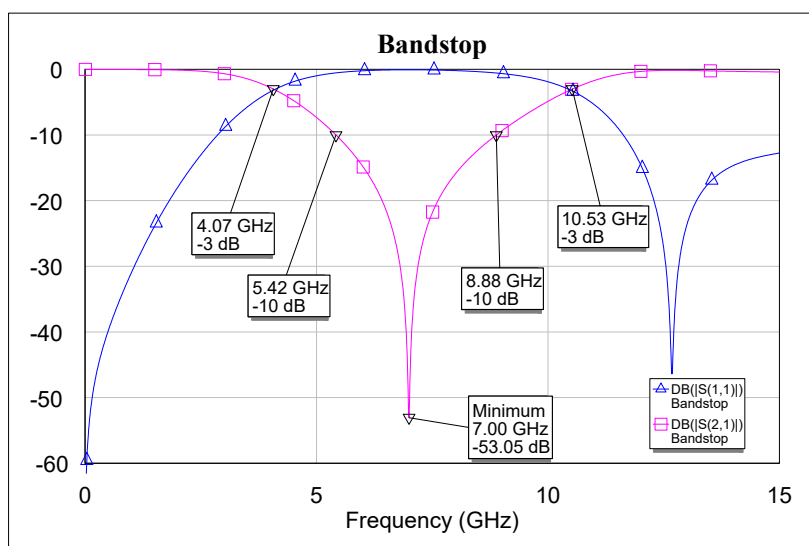
Obrázek 3.3: Layout filtru 3.1

3.2 Pásmová zadrž - prstenec s mezerou

V této sekci je navrhován filtr pásmová zadrž využívající mezeru v prstenci. Schéma filtru vychází z předlohy popsané v 2.5 a opírá se o teorii popsanou v 1.3.5. Filtr je realizován na frekvenci 7 GHz na substrátu RO4003C s výškou 0,508 mm. Použit byl pouze jeden prstenec, neboť program AWR DE nepodporuje zapojení vnořených prstenců jako v předloze [5]. Jakmile byly zobrazeny S-parametry tohoto obvodu, vykazovaly velmi dobré výsledky. Pro dosažení ještě lepších výsledků byl obvod optimalizován. Jak lze vidět na obrázku 3.4, tato pásmová zadrž zadržuje pásmo 4,07 - 10,53 GHz při uvážení poklesu o 3 dB, resp. pásmo 5,42 - 8,88 GHz při poklesu o 10 dB. Schematic a layout filtru jsou zobrazeny na obrázcích 3.5 a 3.6. Přívodní vedení o šířce $w=1,07$ mm jsou impedančně přizpůsobené. Impedance rezonátoru je přibližně 75Ω .

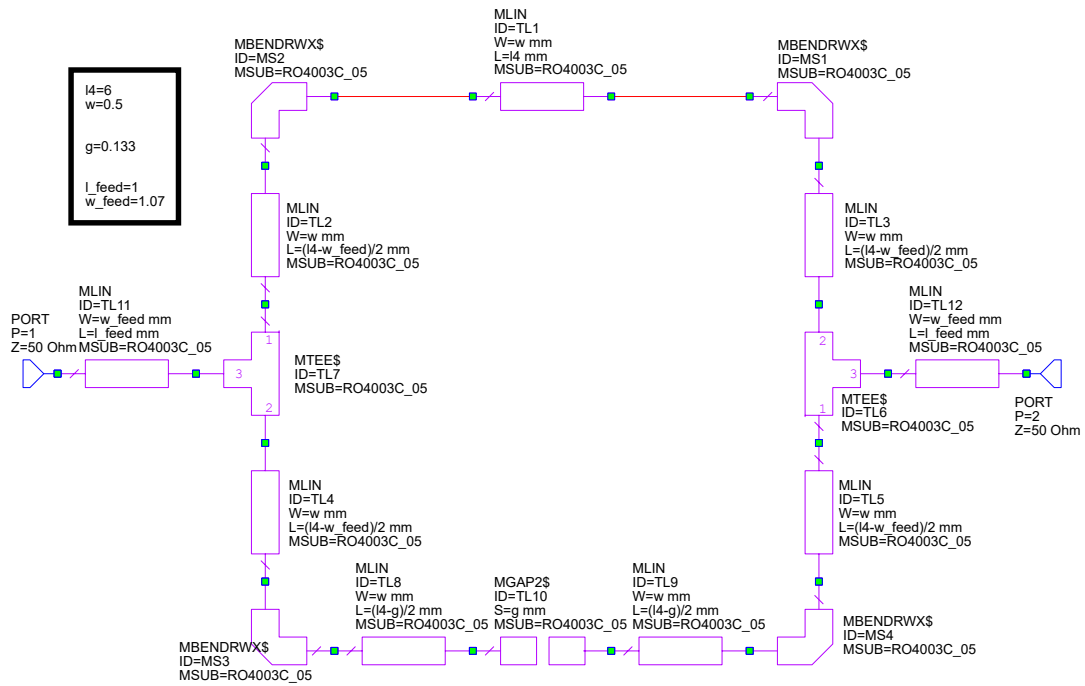
Důležitou roli zde hraje velikost mezery, která byla optimalizována na 0,133 mm. Zvýšením (snížením) velikosti mezery lze posouvat rezonanční frekvenci (tím pádem i pásmovou zadrž) na vyšší (nižší) frekvence. Nutno podotknout, že mezeru lze měnit pouze do určité meze. Pokud by byla mezeru moc malá nebo moc velká, změnil by se charakter obvodu. Dále je možné měnit velikost obvodu prstence, která odpovídá vlnové délce, čímž se mění také rezonanční frekvence.

Tento typ zapojení lze považovat za univerzální metodu, jak vytvořit pásmovou zadrž pomocí prstencového rezonátoru. Stačí zvolit rezonanční frekvenci, které odpovídá konkrétní vlnová délka a mezeru v prstenci zajistí, že se obvod bude chovat jako pásmová zadrž.

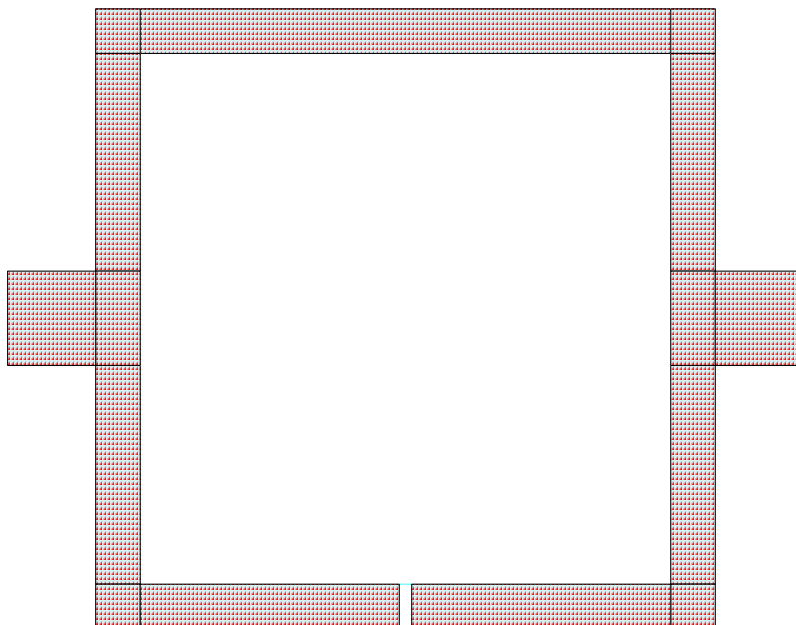


Obrázek 3.4: Graf S-parametrů filtru 3.2

3. Návrh filtrů



Obrázek 3.5: Schematic filtru 3.2

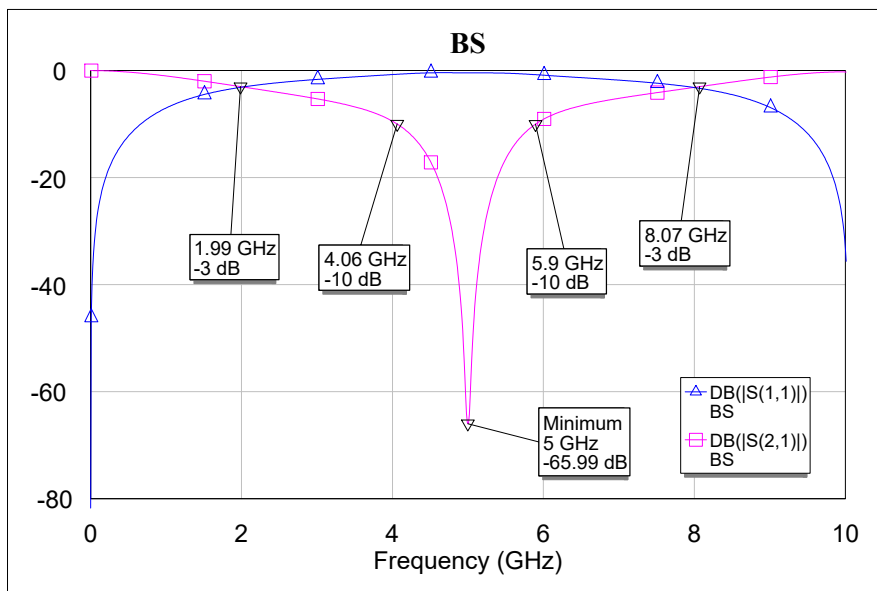


Obrázek 3.6: Layout filtru 3.2

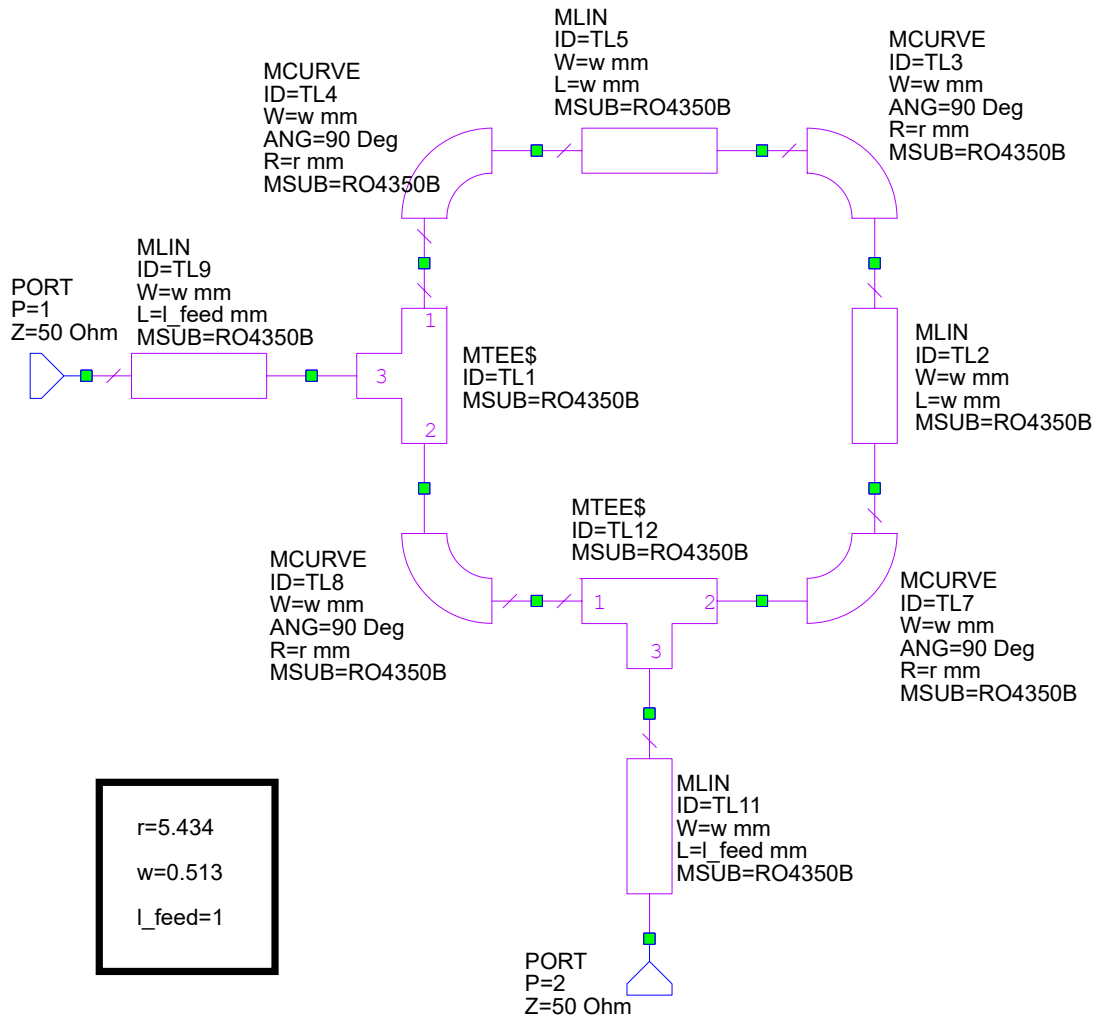
3.3 Pásmová zadrž - kolmá přívodní vedení

Zapojení tohoto filtru vychází z teoretických znalostí z 1.4.1. Využívá navzájem kolmá přívodní vedení, která zajišťují charakter pásmové zadrž. Jedná se o filtr pracující na 5 GHz. Zvolený substrát je RO4350B s výškou 0,254 mm. Těmto parametrům odpovídá vlnová délka $\lambda_g=36,075$ mm a šířka vedení $w=0,513$ mm. Změnou délky prstence lze měnit rezonanční frekvenci. Z toho důvodu může tato metoda sloužit také jako spolehlivý návod na pásmovou zadrž.

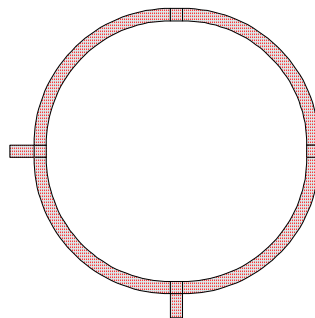
Obvod prstence byl zmenšen na 34,14 mm, aby byl vycentrován na 5 GHz. Celý obvod je impedančně přizpůsoben. Výsledkem je pásmová zadrž zadržující pásmo 1,99 - 8,07 GHz viz obrázek 3.7. Schematic a layout filtru jsou zobrazeny na obrázcích 3.8 a 3.9.



Obrázek 3.7: Graf S-parametrů filtru 3.3



Obrázek 3.8: Schematic filtru 3.3

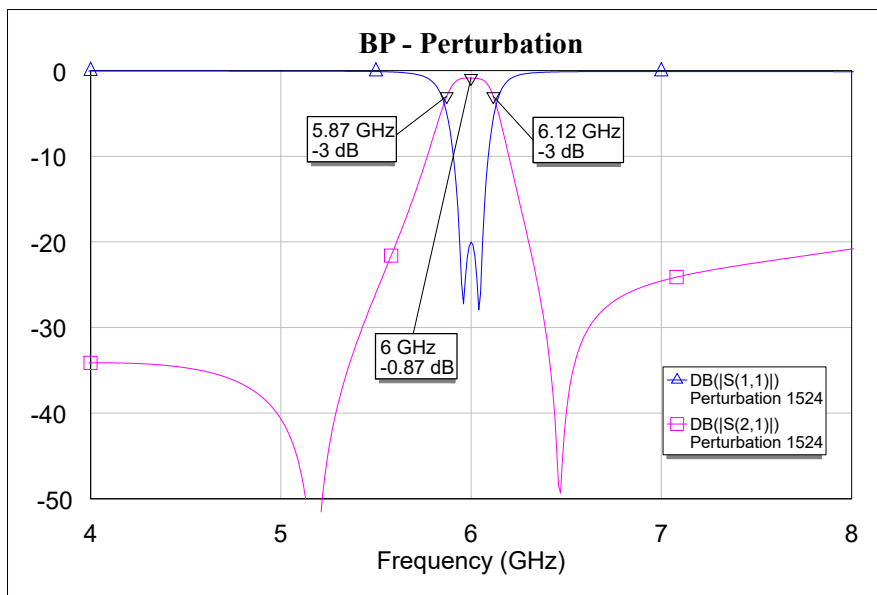


Obrázek 3.9: Layout filtru 3.3

3.4 Pásmová propust - rozšířená část prstence

Schéma této pásmové propusti vychází z 2.2, kde se využívají navzájem kolmá přívodní vedení a rozšířená část prstence. Rozšířené vedení se nachází přímo mezi přívodními linkami, tzn. střed tohoto vedení je od každého přívodního vedení vzdálen 135° . Předloha pracuje na 2 GHz, čemuž odpovídají moc velké rozměry¹. Filtr byl proto přeladěn na 6 GHz. Na druhou stranu podobně jako v předloze byl využit substrát s větší výškou a to RO4003C s výškou 1,524 mm. Takovému zadání odpovídá vlnová délka $\lambda_g=29,48$ mm a šířka vedení $w=3,41$ mm.

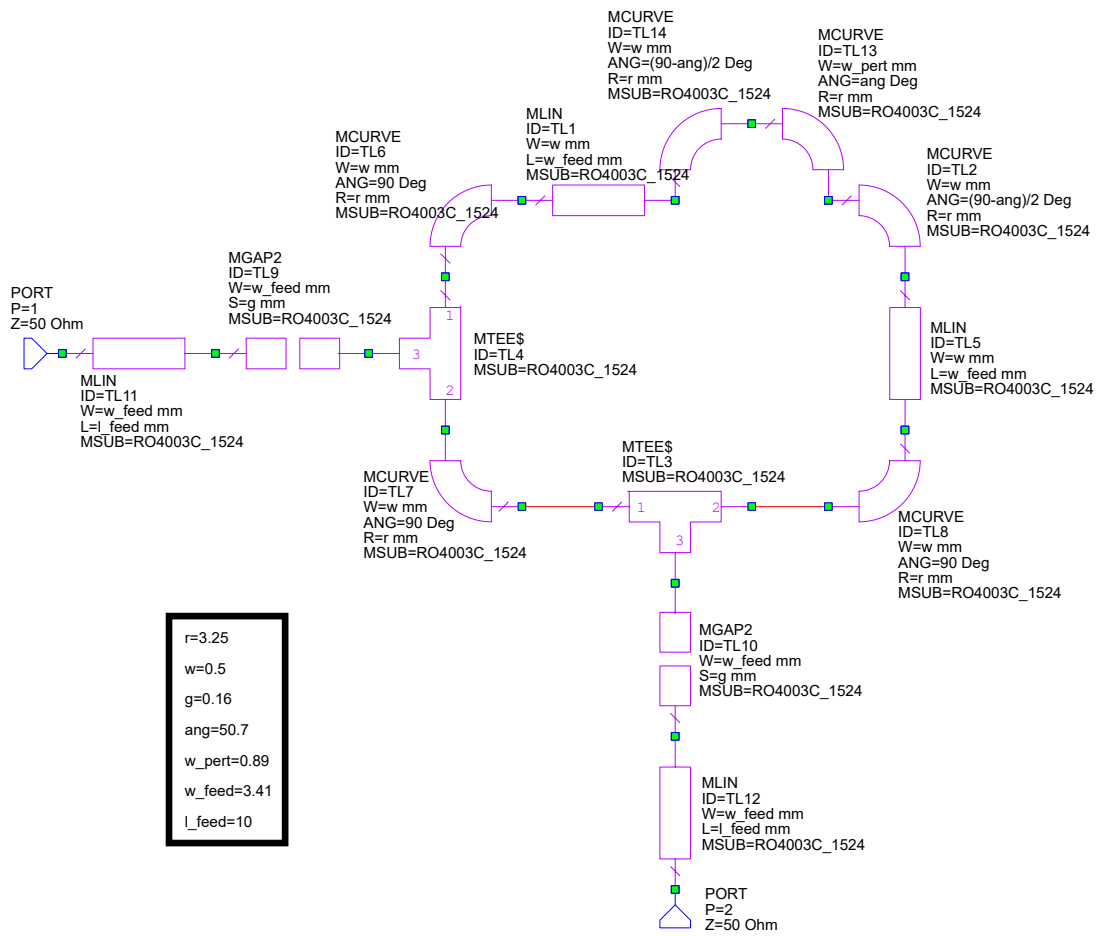
Filtr byl optimalizován. Především byla laděna délka a šířka rozšířeného vedení. Optimálním řešením je vedení o délce $50,7^\circ$ se šířkou 0,89 mm ($96,8 \Omega$). Šířka základního prstence je 0,5 mm ($117,6 \Omega$). Přívodní vedení jsou impedančně přizpůsobená na 50Ω . Jak již bylo zmíněno, tato pásmová propust pracuje na 6 GHz. Propouští pásmo 5,87 - 6,12 GHz, viz obrázek 3.10. Schematic a layout jsou zobrazeny na obrázcích 3.11 a 3.12.



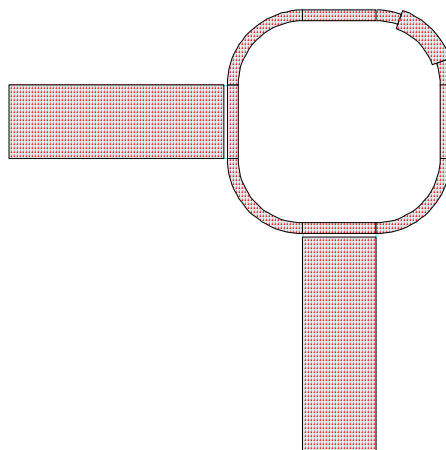
Obrázek 3.10: Graf S-parametrů filtru 3.4

¹Vzhledem k velikosti měřicí krabice 20x20 mm².

3. Návrh filtrů



Obrázek 3.11: Schematic filtru 3.4

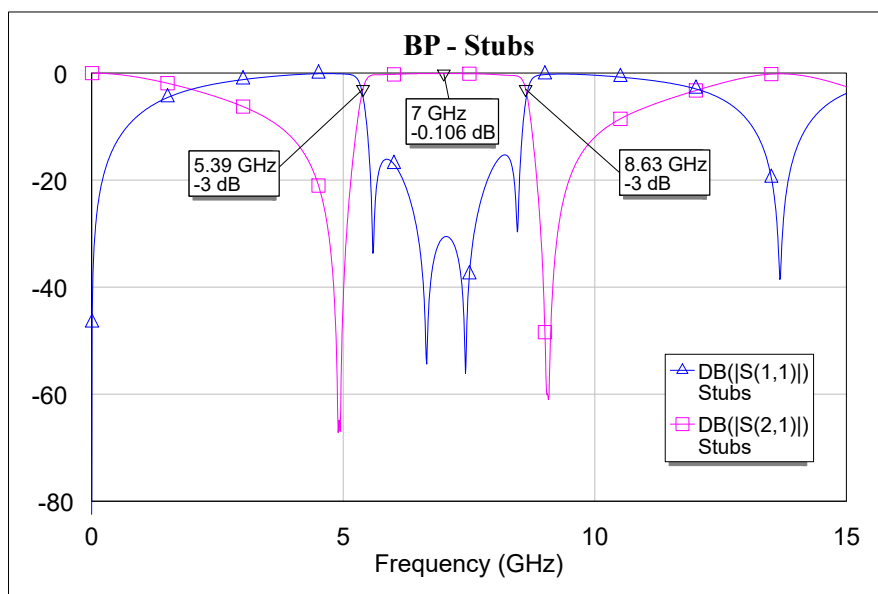


Obrázek 3.12: Layout filtru 3.4

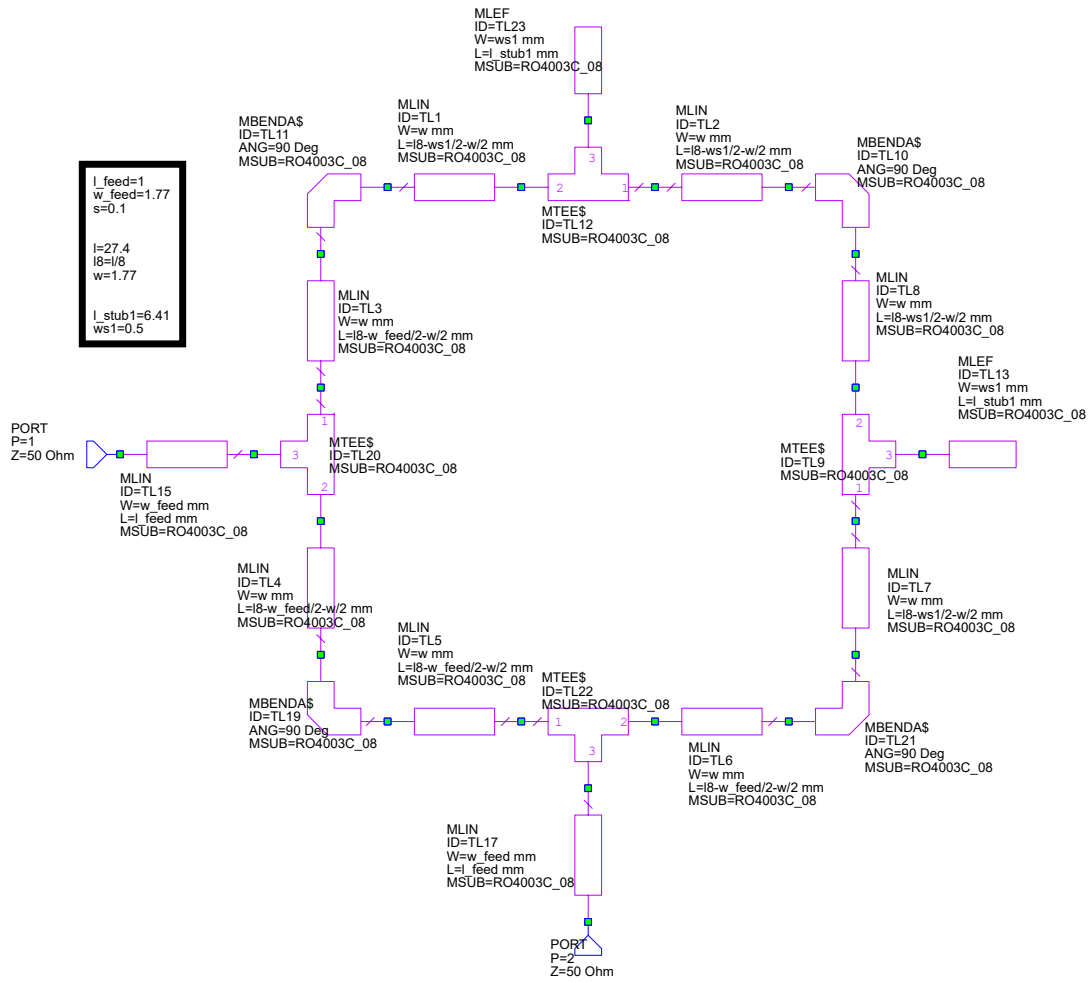
3.5 Pásmová propust - pahýly

Posledním filtrem je pásmová propust, jejíž obvod je založen na 2.3. Pro návrh filtru byl zvolen stejný substrát jako v předloze, tzn. RO4003C ($h=0,813$ mm) a pracovní frekvence 7 GHz. Základní parametry obvodu jsou $\lambda_g=25,57$ mm a $w=1,77$ mm. Na rozdíl od předlohy, není použito vázané vedení jako přívodní vedení. To by sice mohlo zlepšit vlastnosti filtru, ale jak již bylo zmíněno, tato práce se zaměřuje na návrh filtrů pomocí prstencových rezonátorů, nikoliv pomocí vázaného vedení. Přívodní linky jsou tedy impedančně přizpůsobeny s fixní šířkou 1,77 mm, libovolnou délkou a jsou od sebe vzdáleny 90° . Na protější straně od přívodního vedení je vždy vložený pahýl. Oba pahýly mají stejné rozměry: $l_{\text{stub}}=6,41$ mm a $w_{\text{stub}}=0,5$ mm ($92,6 \Omega$), a proto je celý obvod symetrický. Šířka pahýlů ovlivňuje šířku pásma. Se zvyšující se šířkou se rozšiřuje pásmo. Délka pahýlů má vliv na pozici pásma. Když se délka zvyšuje, pásmo se posouvá na nižší frekvence.

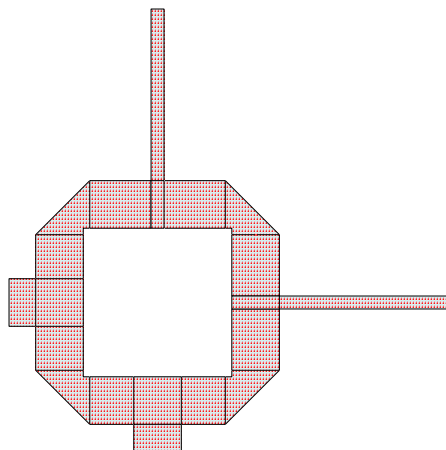
Na obrázku 3.13 je zobrazeno optimalizované propustné pásmo 5,39 - 8,63 GHz. Filtr má velmi dobrý přenos s maximem -0,106 dB. Odraz se podařilo optimalizovat pod -15 dB v celém propustném pásmu. Schematic a layout jsou zobrazeny na obrázcích 3.14 a 3.15.



Obrázek 3.13: Graf S-parametrů filtru 3.5



Obrázek 3.14: Schematic filtru 3.5



Obrázek 3.15: Layout filtru 3.5

Kapitola 4

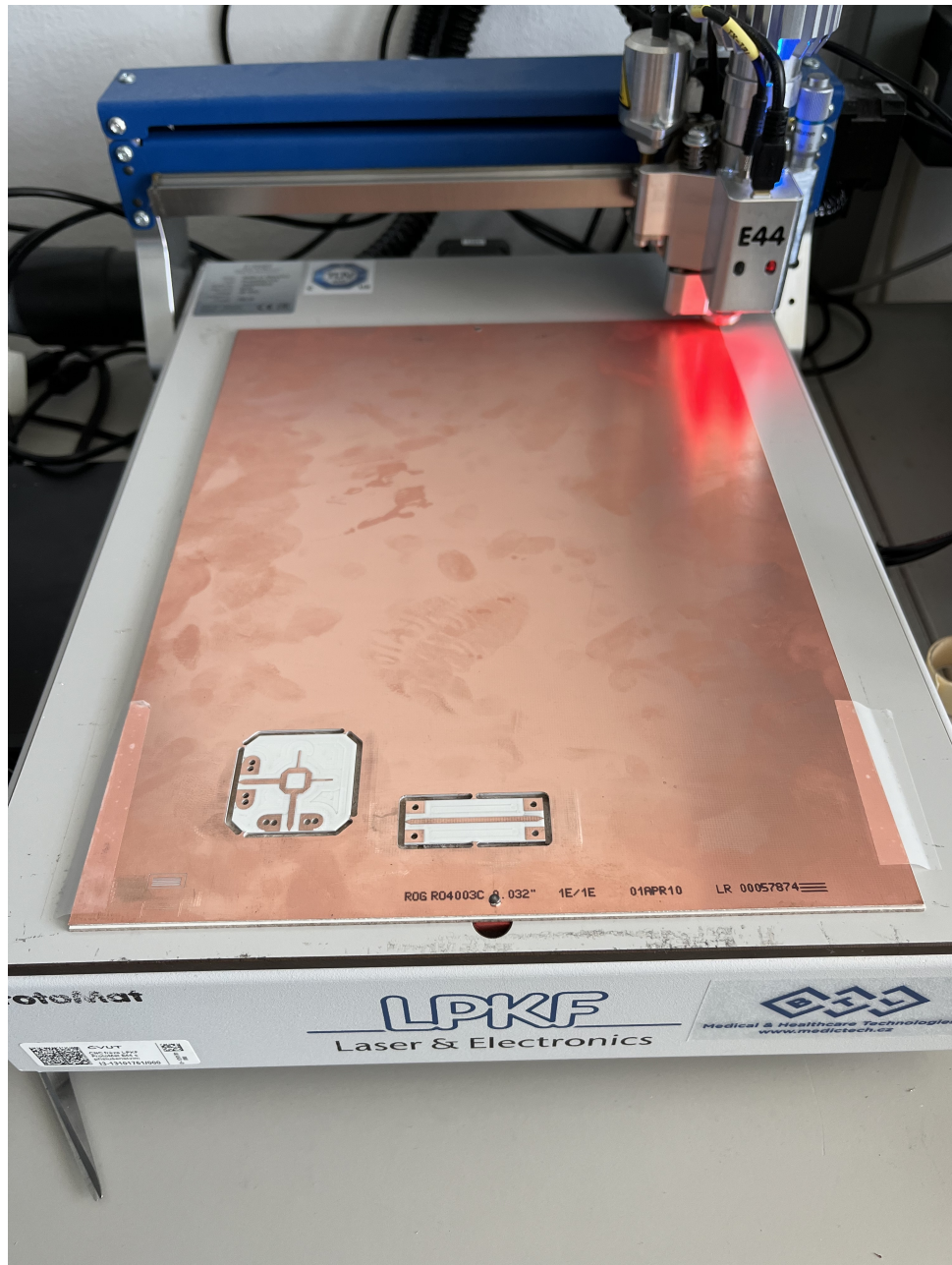
Výroba filtrů

Aby mohly být funkce filtrů reálně otestována, bylo potřeba filtry vyrobit. Výroba filtrů probíhala dvojitým způsobem. Dva filtry vyrobené na substrátu RO4350B byly svěřeny do rukou odborníků ve firmě PCB Benešov, a.s., kde byly filtry vyrobené na zakázku.

Druhým způsobem je vlastní výroba na Fakultě elektrotechnické. Za celou výrobu je zodpovědný autor této práce pod vedení vedoucího Ing. Viktora Adlera, Ph.D. Výroba zbylých 3 filtrů byla provedena na fréze LPKF Proto-Mat E44 od společnosti LPKF, která je zobrazena na obrázku 4.1. Nejprve byla otestována fréza na jednoduchém mikropáskovém vedení, které bylo následně použito jako referenční vedení viz další kapitola 5.

Výroba filtru začala exportováním layoutu daného filtru z AWR DE do programu KiCAD, kde byly k layoutu přidány otvory pro připojení měřicích konektorů. Následně byl layout převeden do programu LPKF CircuitPro, ve kterém operuje fréza. V programu LPKF CircuitPro bylo zahájeno frézování, ve kterém bylo použito několik různých fréz o velikostech hrotu 0,1 až 2 mm v závislosti na velikosti obvodu a v závislosti na potřebách frézy.

Po skončení frézování byl výrobek vyjmut z frézy a pomocí brusného papíru byly doupřraveny nerovnosti na okrajích, aby mohly být přišroubovány měřicí konektory. Použity byly SMA konektory od společnosti Southwest Microwave model 292-04A-5.



Obrázek 4.1: Fréza LPKF ProtoMat E44

Kapitola 5

Porovnání vyrobených filtrů s návrhem

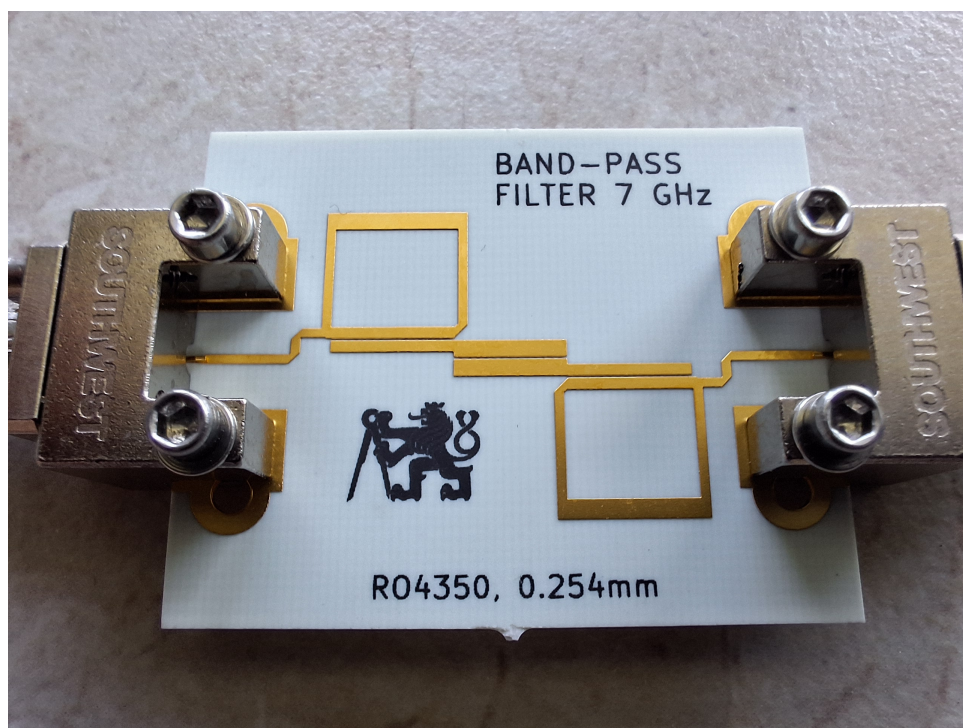
Vyrobené filtry byly následně změřeny vektorovým analyzátozem ZVA 67 od společnosti Rohde & Schwarz, aby mohly být hodnoty porovnané s hodnotami navrženými. V první řadě byl vektorový analyzátor zkalibrován kalibrační jednotkou ZV-Z52 také od společnosti Rohde & Schwarz, aby byly naměřené hodnoty co nejvěrnější. Nutno také zmínit, že referenční roviny měření jsou v referenčních rovinách SMA konektorů, což znamená, že prezentovaná data obsahují i vliv těchto konektorů a přechodů na vedení.

Z každého typu substrátu bylo také vyrobeno a následně změřeno impedančně přizpůsobené vedení o délce 4 cm, které slouží jako referenční vedení.

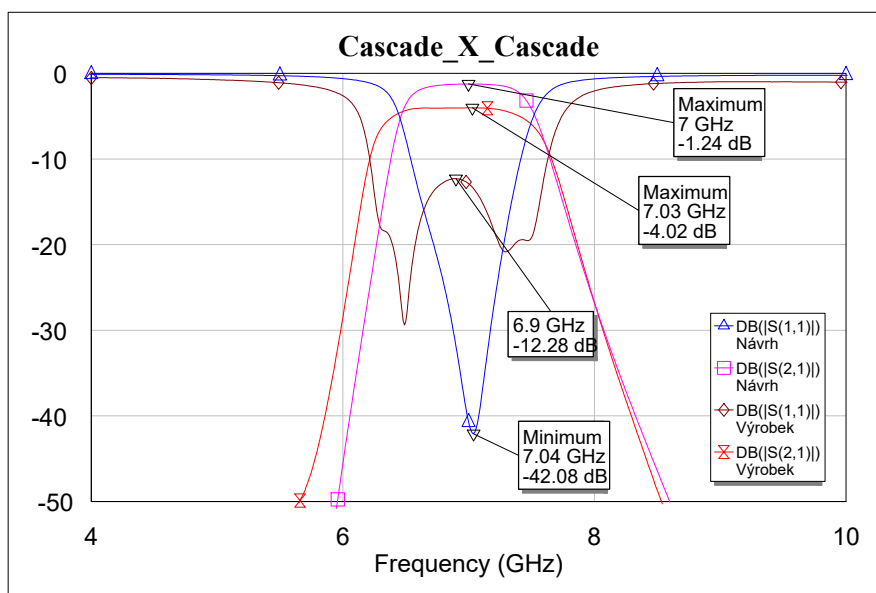
Filtry byly měřeny v pásmu 0,1-15 GHz, což je stejný rozsah, ve kterém byly navrhovány. U všech filtrů byly změřeny parametry s_{11} a s_{21} . S-parametry byly uloženy jako soubor typu S2P, který byl nahrán do programu AWR DE, kde byly S-parametry porovnány s návrhem.

5.1 PP - kaskáda dvou prstenců

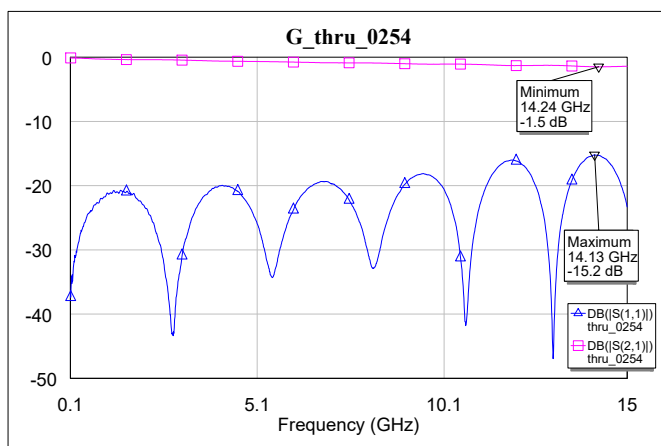
Filtr tvořený kaskádou 2 prstenců byl vyroben na substrátu RO4350B s tloušťkou 0,254 mm a je zobrazený na obrázku 5.1. Byl navržen jako pásmová propust na 7 GHz. Na obrázku 5.2 jsou zobrazeny S-parametry navrženého a vyrobeného filtru. Jak lze vidět z grafu, pásmo vyrobeného filtru je širší než navrhované pásmo a přenos je horší o cca 2,8 dB. Co se týče odrazu, výrobek má odraz v celém použitelném pásmu pod -12 dB. Celkově v porovnání s návrhem se odraz znatelně zhoršil. Nepřesnosti výrobku jsou nejspíš způsobeny chybami ve výrobě, jelikož určité rozměry nesedí o setiny mm. Např. mezery byly navrženy na 0,12 mm, ale u vyrobeného filtru byly pod mikroskopem změřeny jako 0,14 mm. Druhou možností výskytu chyb jsou vlastnosti vedení na tomto substrátu. Jak bylo zmíněno, na substrátu RO4350B bylo vyrobeno také referenční vedení, jehož S-parametry jsou zobrazeny v 5.3. Se zvyšující se frekvencí se mírně zvyšuje odraz a snižuje se přenos. Celkově by výrobek mohl být označen za relativně úspěšný, jelikož se jedná o pásmovou propust pracující na 7 GHz, což je v souladu s návrhem.



Obrázek 5.1: Vyrobený filtr z 5.1



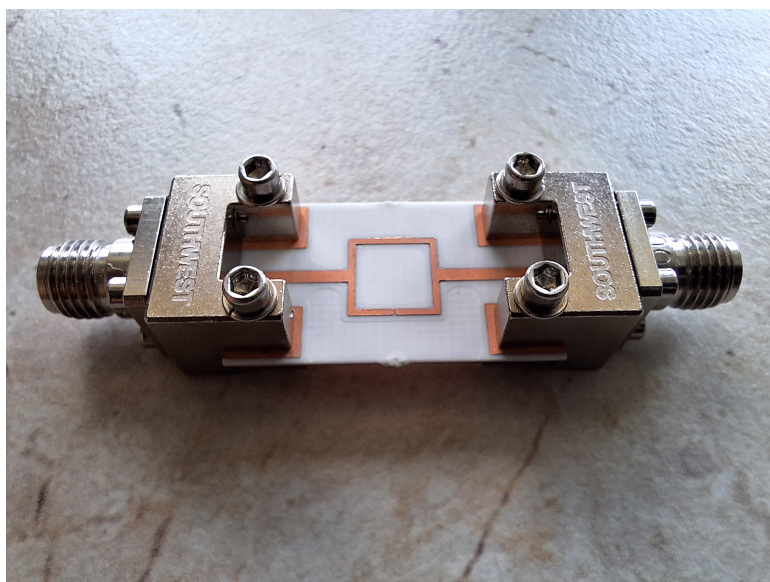
Obrázek 5.2: Porovnání filtru z 5.1 s návrhem



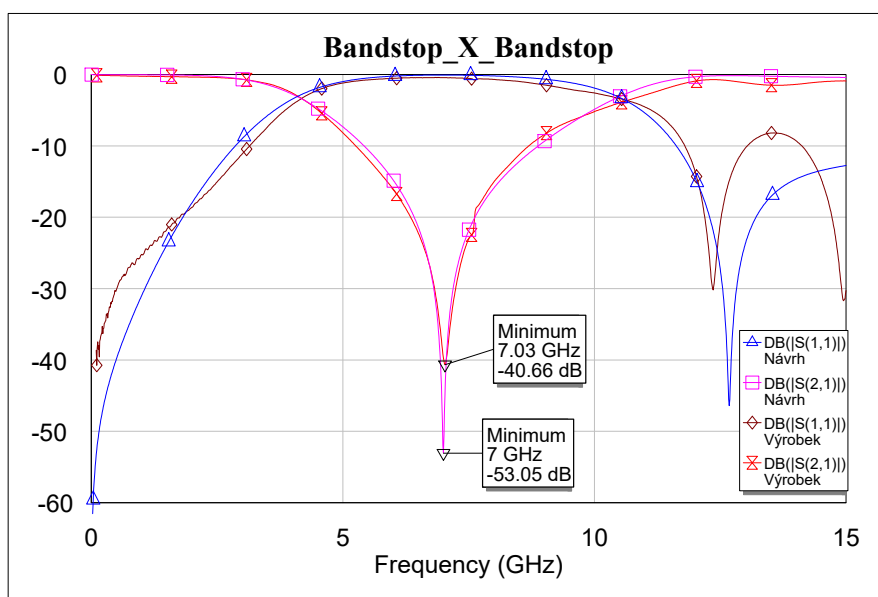
Obrázek 5.3: Referenční vedení na substrátu RO4350B s tloušťkou 0,254 mm

5.2 PZ - prstenec s mezerou

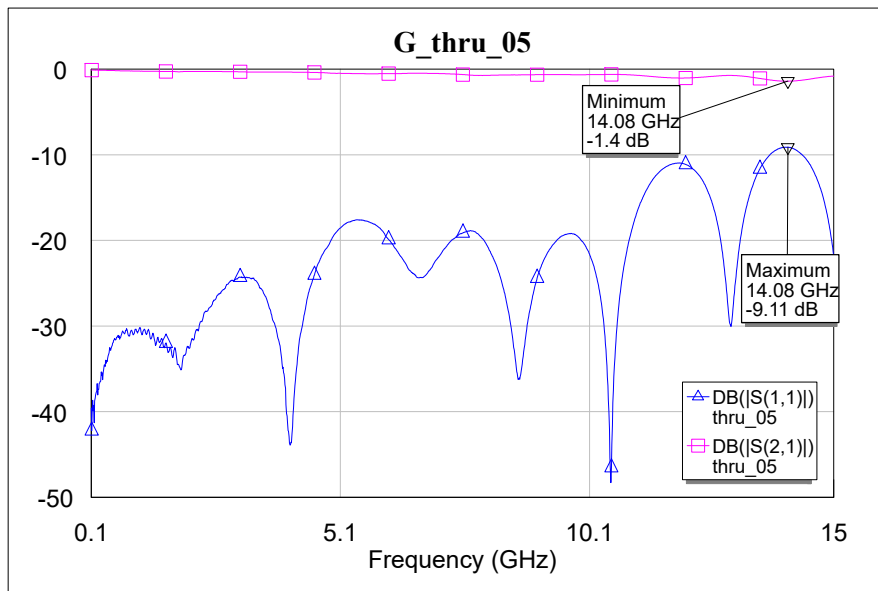
Druhým vyrobeným filtrem je pásmová zadrž vyrobená na substrátu RO4003C s tloušťkou 0,508 mm. Výsledek je ukázán na obrázku 5.4. Na obrázku 5.5 lze vidět, že filtr byl navržen na 7 GHz. Vyrobený filtr je mírně posunut na 7,03 GHz, kde je přenos o 12,39 dB vyšší. Stále se ale jedná o velmi přesnou realizaci, neboť s_{21} výrobku téměř kopíruje průběh z návrhu. Parametry s_{11} jsou v použitelném pásmu také velmi podobné. Tento výrobek je možné označit za nejvěrnější realizaci ze všech 5 vyráběných filtrů. Pro srovnání jsou na obrázku 5.6 ukázány S-parametry přizpůsobeného vedení o délce 4 cm.



Obrázek 5.4: Vyrobený filtr z 5.2



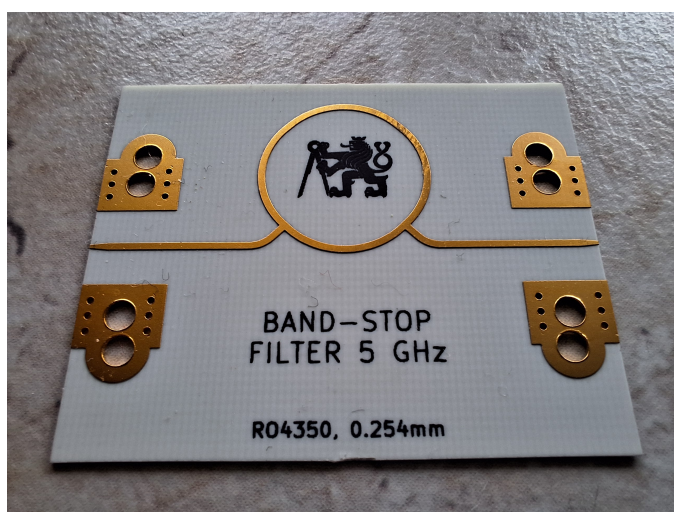
Obrázek 5.5: Porovnání filtru z 5.2 s návrhem



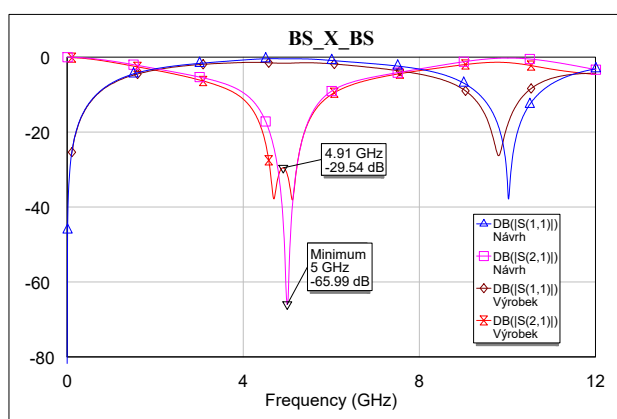
Obrázek 5.6: Referenční vedení na substrátu RO4003C s tloušťkou 0,508 mm

5.3 PZ - kolmá přívodní vedení

Třetím výrobkem je další pásmová zadrž, která byla vyrobena na substrátu RO4350B s tloušťkou 0,254 mm, viz obrázek 5.7. Na obrázku 5.8 jsou zobrazeny S-parametry návrhu a výrobku, ze kterých je možné vidět, že se zadrž posunula z navrhovaných 5 GHz na 4,91 GHz. Také je vidět, že se změnil charakter grafu okolo rezonanční frekvence. Kromě této odlišnosti se s_{11} i s_{21} výrobku velice podobají návrhu. Rozdíly výrobku oproti návrhu mohou být znovu způsobeny nepřesnou výrobou, jelikož šířka vedení, které tvoří rezonátor, je 0,492 mm místo 0,513 mm. Případně může být výsledek ovlivně vlastnostmi vedení, jehož charakteristiky jsou ukázány v 5.3. Výrobek lze ale také označit za úspěšný, protože se jedná o pásmovou zadrž, která funguje na téměř 5 GHz.



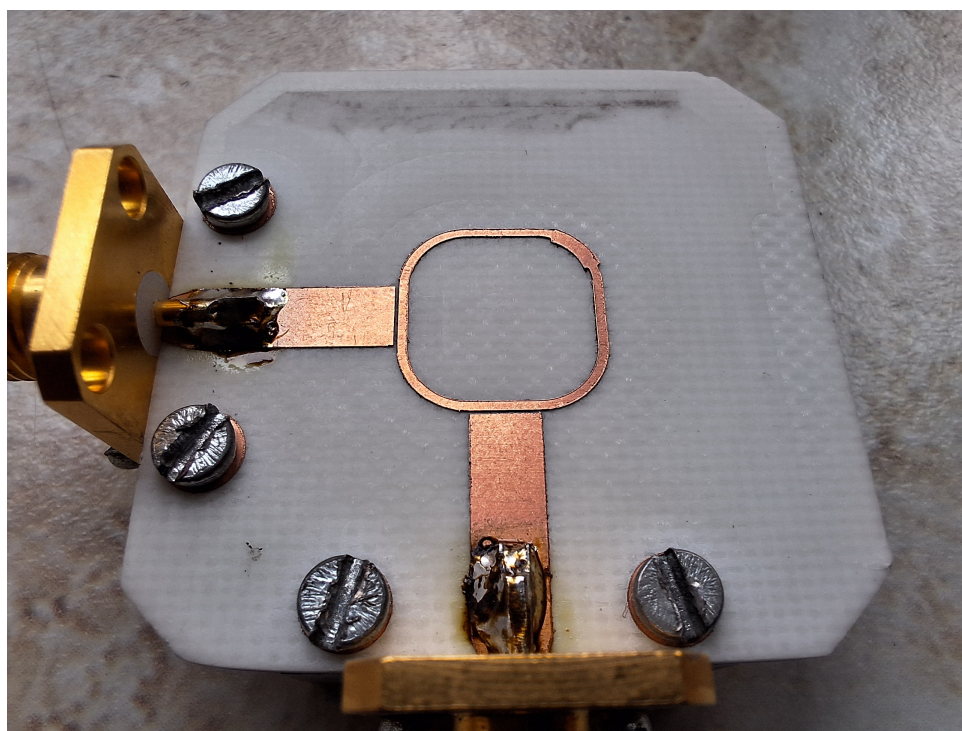
Obrázek 5.7: Vyroběný filtr z 5.3



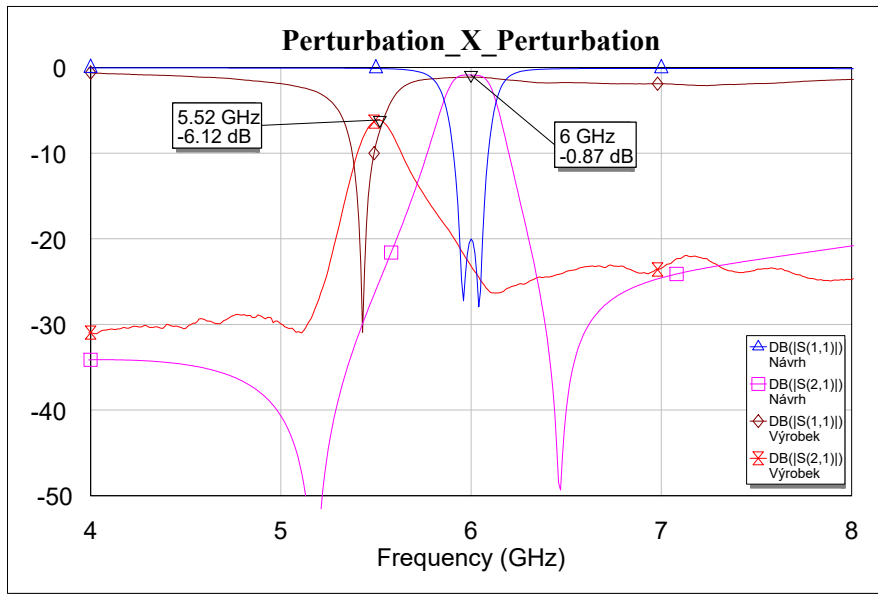
Obrázek 5.8: Porovnání filtru z 5.3 s návrhem

5.4 PP - rozšířená část prstence

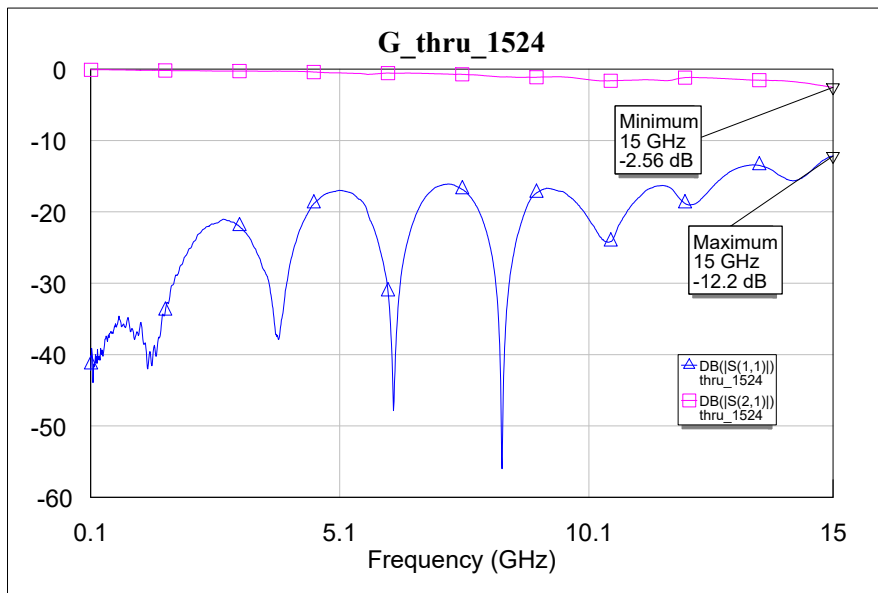
Čtvrtým výrobkem je obvod zobrazený na obrázku 5.9, který byl vyroben na substrátu RO4003C s tloušťkou 1,524 mm. Navržená pásmová propust byla realizována na 6 GHz. Z obrázku 5.10 je patrné, že výrobek se výrazně liší od návrhu. Celý průběh s_{21} je posunut o cca 0,5 GHz a přenos se zřetelně zhoršil. Pro parametr s_{11} platí to stejné. Rozměry výrobku jsou velice podobné navrhovaným hodnotám, liší se pouze o setiny mm. Takovéto odchylky však nezpůsobí tak výrazné změny, jaké jsou u charakteristik výrobku. Co se týče samotného vedení, na tomto substrátu bylo také vyrobeno referenční vedení. Jeho S-parametry jsou zobrazeny v 5.11, ze kterých je vidět, že se přenos začíná mírně zhoršovat až na vyšších kmitočtech. Důvod výrazného rozdílu v S-parametrech je proto neznámý. Tento výrobek je proto možné označit za neúspěšný.



Obrázek 5.9: Vyrobený filtr z 5.4



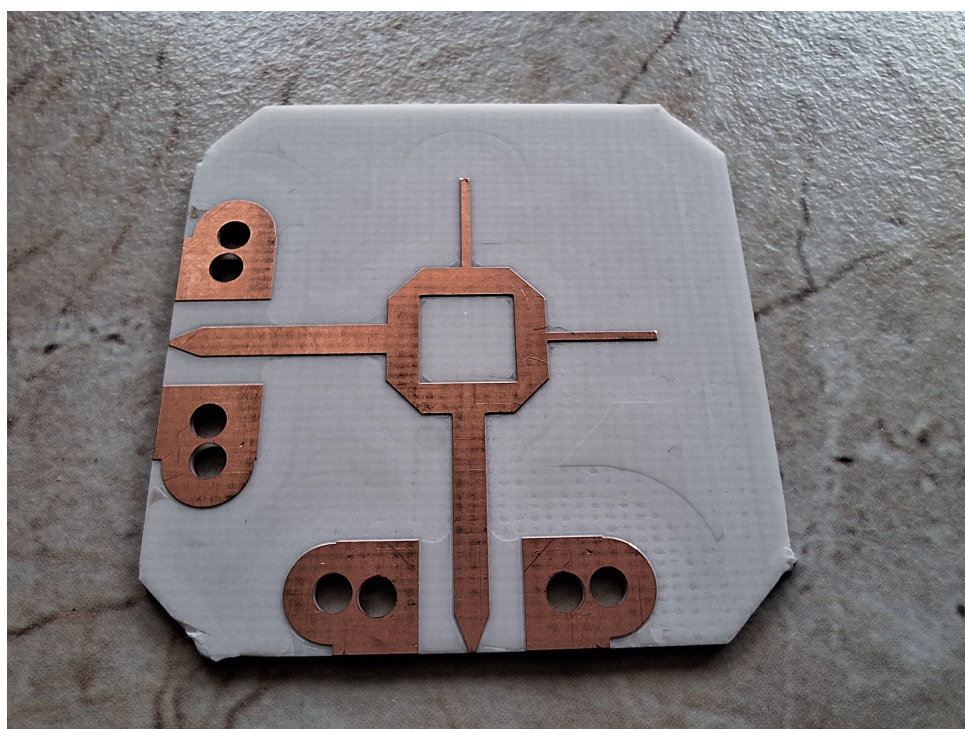
Obrázek 5.10: Porovnání filtru z 5.4 s návrhem



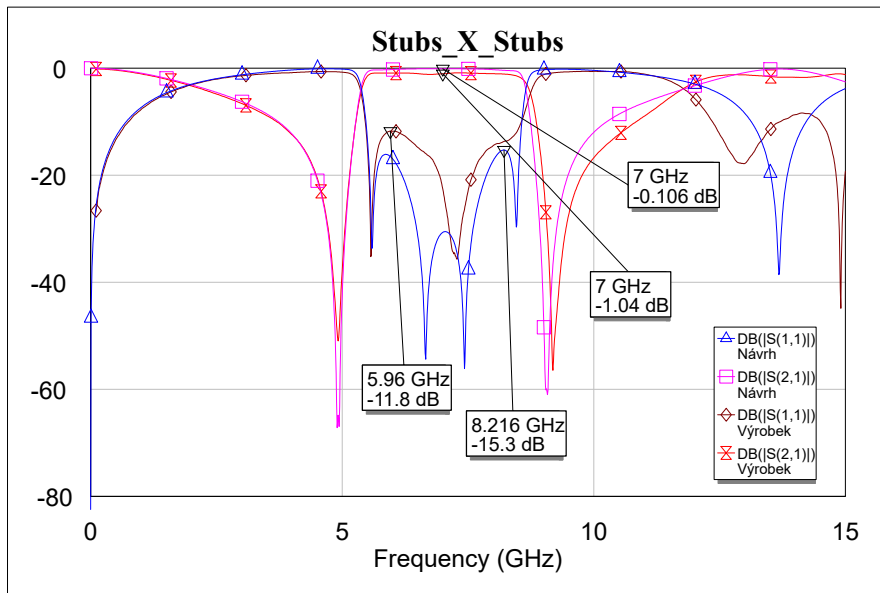
Obrázek 5.11: Referenční vedení na substrátu RO4003C s tloušťkou 1,524 mm

5.5 PP - pahýly

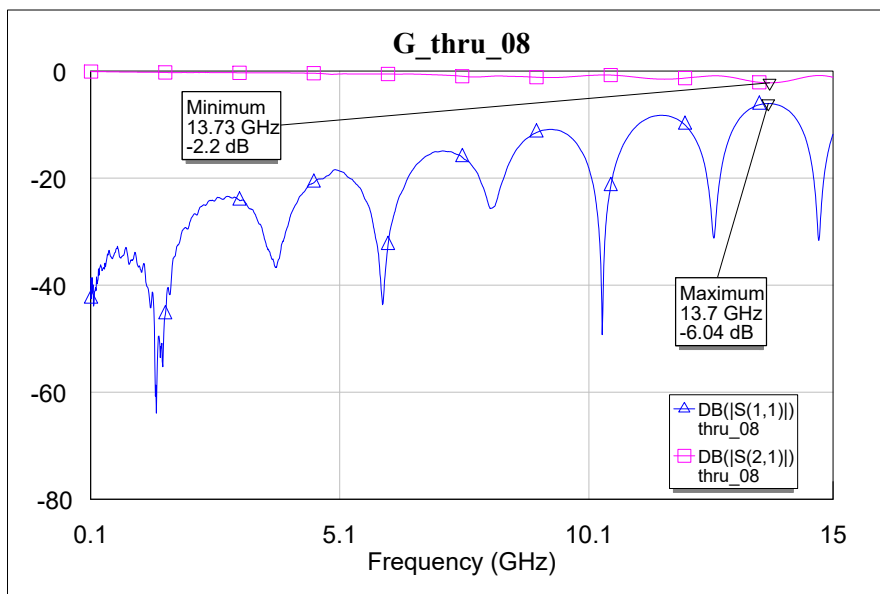
Poslední filtr byl vyráběn na substrátu RO4003C s tloušťkou 0,813 mm. Je zobrazen na obrázku 5.12. V návrhu se jednalo o pásmovou propust na 7 GHz. Z průběhů na obrázku 5.13 je vidět, že charakter pásmové zadržky pracující na 7 GHz byl dodržen. Přenos se v propustném pásmu pouze mírně zvlnil a snížil se na -1,04 dB. Celkově jsou průběhy s_{21} podobné. Průběhy s_{11} se liší více. V propustném pásmu se odraz zhoršil, alespoň se odraz drží pod -10 dB. Odchytky mohou být znovu způsobeny nepřesnou výrobou, jelikož se jednotlivé vrtáky opotřebovávají a fréza z toho důvodu není zcela přesná. S-parametry referenčního vedení jsou zobrazeny v 5.14. Tento filtr může být také označen jako relativně úspěšný.



Obrázek 5.12: Vyrobený filtr z 5.5



Obrázek 5.13: Porovnání filtru z 5.5 s návrhem



Obrázek 5.14: Referenční vedení na substrátu RO4003C s tloušťkou 0,813 mm



Závěr

V práci byl popsán návrh pěti filtrů, které pracují ve frekvenčním pásmu do 10 GHz. Návrh byl proveden v programu AWR DE. Obvody byly následně vyrobeny a porovnány se simulacemi z návrhu. Výsledkem jsou tři filtry typu pásmová propust a dva filtry typu pásmová zádrž. Celkově lze čtyři z pěti vyrobených filtrů považovat za úspěšné, jelikož jsou velice podobné návrhu. Pouze jedna pásmová propust dopadla neúspěšně.

Dalším závěrem této práce je skutečnost, že bylo otestováno několik způsobů, jak filtry tvořit. Za spolehlivou metodu pro vytvoření pásmové zádrže lze považovat obvod s kolmými přívodními vedeními nebo obvod s mezerou uvnitř prstence. Spolehlivou metodou pro pásmovou propust může být kaskáda dvou prstenců nebo použití pahýlů uvnitř prstence. Nutno podotknout, že pásmové zádrže dopadly lépe.

Pokračováním této práce by mohlo být otestování více typů substrátu, protože tato práce se věnovala pouze dvěma typům z hlediska permitivity.



Literatura

- [1] CHANG, Kai a HSIEH, Lung-Hwa. *Microwave ring circuits and related structures*. Vyd. 2. New Jarsey: Wiley-Interscience, 2004. ISBN 04-714-4474-X.
- [2] HOFFMANN, Karel. *Planární mikrovlnné obvody*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03705-8.
- [3] MARTÍN, Ferran; ZHU, Lei; HONG, Jiasheng a MEDINA, Francisco. *Balanced Microwave Filters*. Vyd.1. John Wiley & Sons, Incorporated, 2018. ISBN 9781119237617.
- [4] POZAR, David M. *Microwave engineering*. Vyd.4. John Wiley & Sons, Incorporated, 2012. ISBN 978-0-470-63155-3.
- [5] *AWR Design Environment User Guide*. Product Version 17. Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved, 2022.
- [6] MARTIN, Tracy Scott. *A study of the microstrip ring resonator and its applications*. Texas, 1987. Thesis. Texas A&M University.
- [7] RAJESWART, D., A. Sri RANJINI a S. THENKUZHALI. *Design and optimization of various coupling micro strip ring resonators* [online]. IEEE, 2017, 895-899 [cit. 2024-02-01]. ISBN 978-1-5090-4855-7. Dostupné z: doi:10.1109/ICONSTEM.2017.8261331
- [8] FRANC, Anne-Laure a Gaetan PRIGENT. *Compact capacitive loaded ring filter with simplified feeding lines*. 2014 44th European Microwave Conference [online]. IEEE, 2014, 1234-1237 [cit. 2024-02-01]. ISBN 978-2-8748-7035-4. Dostupné z: doi:10.1109/EuMC.2014.6986665
- [9] PHANI KUMAR, K.V. a S.S. KARTHIKEYAN. *Wideband three section branch line coupler using triple open complementary split ring resonator and open stubs*. AEU - International Journal of Electronics and Communications [online]. 2015, 69(10), 1412-1416 [cit. 2024-02-08]. ISSN 14348411. Dostupné z: doi:10.1016/j.aeue.2015.06.003
- [10] MORADI, Bahareh, Marc MARTINEZ, Raúl FERNÁNDEZ-GARCÍA a Ignacio GIL. *Wearable Ring Resonator Antenna*. Physica status solidi (a)

