



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
katedra radioelektroniky**

Návrh mikropáskové směrové odbočnice

Design of microstrip directional coupler

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Multimédia

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Oppl, Ph.D.

Jakub Novotný

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jakub Novotný**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Návrh mikropáskové směrové odbočnice**

Pokyny pro vypracování:


Navrhňte a zrealizujte mikropáskovou směrovou odbočnici, která bude mít vazbu 20 dB na frekvenci 2,45 GHz. Pro její realizaci použijte substrát FR4, jehož relativní permitivita je 4,2 a ztrátový činitel 0,0012. Návrh ověřte v simulátoru elektromagnetického pole. Parametry zrealizované odbočnice pak ověřte měřeními.

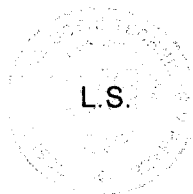
Seznam odborné literatury:

- [1] Hoffmann, K.: Planární mikrovlnné obvody. Skriptum ČVUT, Praha 2007
- [2] Maloratsky, L.: Understand The Basics Of Microstrip Directional Couplers. Microwaves & RF, February 2001, pp. 79 - 94

Vedoucí: Ing. Ladislav Oppl, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


Prof. Ing. Miloš Klíma, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 2. 2014

Čestné 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.

Datum:

.....
podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavu Opplovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, náměty a za zájem, se kterým moji práci sledoval.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá studiem chování planárních mikropáskových struktur, zejména směrovými vazebními členy. Po úvodním studiu problematiky mikrovlnných planárních obvodů následuje návrh vybrané směrové odbočnice a ověření navržených parametrů v příslušném simulačním programu. Po odsimulování jejího chování a kontrole výsledných parametrů bylo přistoupeno k samotné realizaci směrového vazebního členu. Součástí bakalářské práce je i ověření zadaných parametrů měřením.

Klíčová slova

Mikropásková směrová odbočnice, vázaná mikropásková vedení, simulátor elektromagnetického pole.

Abstract

This bachelor thesis deals with the study of planar microstrip structures, primarily with directional couplers. After an initial elaboration of microwave planar circuits, a scheme of chosen coupler was projected and its suggested parameters were tested in applicable simulation program. After the simulation of its functioning and following scrutiny of the resulting parameters, a final realization of directional coupler was performed. The bachelor thesis includes a verification of resulting parameters conducted via actual measurements as well.

Keywords

Microstrip directional coupler, coupled microstrip lines, electromagnetic field simulator.

OBSAH

Seznam obrázků a tabulek

Úvod	9
1 Směrové odbočnice.....	10
1.1 Reálná směrová odbočnice	10
1.1.1 Typy směrovosti odbočnice	11
1.1.2 Technické parametry reálné odbočnice.....	13
1.1.3 Druhy směrových odbočnic	13
1.2 Mikropásková vázaná vedení.....	14
2 Návrh mikropáskové vázané směrové odbočnice	15
2.1 Výpočet parametrů odbočnice	16
2.1.1 Výpočet parametrů programem matlab	16
2.1.2 Návrh pomocí apletů	18
2.2 Porovnání parametrů	19
3 Simulace navrženého modelu směrové odbočnice	20
3.1 Simulace modelu bez konektorů	20
3.1.1 Model 1	20
3.1.2 Model 2	21
3.2 Simulace SMA konektoru	22
3.3 Simulace modelu s konektory	23
3.3.1 Model 1	23
3.3.2 Model 2	24
3.2 Zhodnocení simulací	25
4 Realizace odbočnice	25
5 Měření parametrů směrové mikropáskové odbočnice	27
5.1 Výsledné S parametry vyrobené odbočnice.....	29
5.2 Porovnání simulovaných a výsledných hodnot.....	30
6 Závěr	31
7 Literatura	32
Přílohy	33

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Odbočnice s jednou rovinou symetrie	10
Obr. 1.2: Odbočnice s dvěma rovinami symetrie	11
Obr. 1.3: Směrovost 1. druhu	11
Obr. 1.4: Směrovost 2. druhu	12
Obr. 1.5: Směrovost 3. druhu	12
Obr. 1.6: Mikropáskové vázané vedení a jeho náhradní schéma.....	14
Obr. 1.7: Šíření lichého a sudého vidu na mikropáskovém vázaném vedení	14
Obr. 2.1: Parametry mikropáskové vázané odbočnice	15
Obr. 2.2: Výpočet parametrů vedení v 1. Designéru	18
Obr. 2.3: Výpočet parametrů vedení v 2. Designéru	19
Obr. 3.1.1: Simulovaný 1. model odbočnice bez konektorů	20
Obr. 3.1.2: Výsledné S parametry 1. modelu odbočnice bez konektorů	20
Obr. 3.1.3: Simulovaný 2. model odbočnice bez konektorů	21
Obr. 3.1.4: Výsledné S parametry 2. modelu odbočnice bez konektorů	21
Obr. 3.2.1: Simulovaný konektor SMA	22
Obr. 3.2.2: Simulované S parametry konektoru	22
Obr. 3.2.3: Rozměry konektoru	22
Obr. 3.3.1: Simulovaný 1. model odbočnice s konektory	23
Obr. 3.3.2: Výsledné S parametry 1. modelu odbočnice s konektory	23
Obr. 3.3.3: Simulovaný 2. model odbočnice s konektory	24
Obr. 3.3.4: Výsledné S parametry 2. modelu odbočnice s konektory	24
Obr. 4.1: Vyleptaný plošný spoj odbočnice	25
Obr. 4.2: Plošný spoj odbočnice a hliníkové pásky s konektory	25
Obr. 4.3: Osazená odbočnice konektory	26
Obr. 4.4: Výsledná odbočnice	26
Obr. 5.1: Označení portů odbočnice	27

Obr. 5.2: Změřené S parametry pro buzení z první strany	28
Obr. 5.3: Změřené S parametry pro buzení z druhé strany	29

Seznam tabulek

Tab. 1: Porovnání výsledných parametrů navrhované odbočnice	19
Tab. 2: Výsledné S parametry reálné odbočnice	29
Tab. 3: Porovnání výsledků	30

Seznam použitých symbolů

IL	[dB]	– vložený útlum
C	[dB]	– vazební útlum
I	[dB]	– izolace
D	[dB]	– směrovost
RL	[dB]	– zpětný útlum
PSV	[-]	– poměr stojatých vln
w_0	[mm]	– šířka vázaného vedení
w_1	[mm]	– šířka přívodního vedení
l	[mm]	– délka vázného vedení
h	[mm]	– tloušťka substrátu
s	[mm]	– vzdálenost vazaných mikropásků
Z_0	[Ω]	– impedance konektoru a přívodních vodičů
Z_{oo}	[Ω]	– impedance lichého vidu
Z_{oe}	[Ω]	– impedance sudého vidu
ϵ_r	[-]	– relativní permitivita
ϵ_{ef}	[-]	– efektivní permitivita
c	[m/s]	– rychlost světla
λ	[m]	– vlnová délka
f	[Hz]	– frekvence
w_0/h	[-]	– poměr šířky mikropásku ku šířce substrátu
$(w_0/h)_{se}$	[-]	– poměr šířky mikropásku ku šířce substrátu pro sudý vid
$(w_0/h)_{so}$	[-]	– poměr šířky mikropásku ku šířce substrátu pro lichý vid
S_{11}	[dB]	– činitel odrazu na vstupu odbočnice
S_{12}	[dB]	– činitel přenosu mezi 1. a 2. portem odbočnice
S_{13}	[dB]	– činitel průchozího útlumu odbočnice
S_{14}	[dB]	– činitel izolace odbočnice
P_1	[W]	– vstupní výkon odbočnice
P_{21}	[W]	– výstupní výkon na 2. portu odbočnice
P_{41}	[W]	– výstupní výkon na 4. portu odbočnice
P_{11}	[W]	– odražený výkon na vstupu odbočnice

Úvod

Cílem práce je navrhnout směrový vazební člen (směrovou odbočnici), pomocí mikropáskového vazebního vedení. Tato struktura měla být vytvořena na substrátu FR4, ale po zjištění, že výrobce negarantuje dielektrické parametry substrátu jsme se s vedoucím práce rozhodli pro změnu. Výsledným substrátem byl tedy zvolen GIL GML 1000. Základními požadavky na směrovou odbočnici jsou parametry: vazba $C = 20\text{dB}$ a pracovní kmitočet $f = 2,45\text{ GHz}$. Návrh je založený na výpočtu rozměrů vázaných mikropásků a jejich vzájemné vzdálenosti, tyto parametry pak tvoří výsledné požadované vlastnosti směrové odbočnice. Výpočty provedeme pomocí volně dostupných programů, odkazy na tyto programy uvádím v použité literatuře a pomocí vzorců pro výpočet parametrů mikropáskové vázané směrové odbočnice implementovaných do programu matlab. Výsledný skript přikládám v elektronické podobě. Simulaci jednotlivých návrhů provedeme pomocí programu CST Microwave studio.

1 Směrové odbočnice

V mikrovlnné technice je někdy zapotřebí odbočit ze signálu část výkonu bez zavedení zkreslení a útlumu do procházejícího signálu. Právě pro tyto účely slouží směrové vazební členy (odbočnice). Používají se například v děličích výkonu, směřovačích a v mnoha jiných mikrovlnných zařízeních. Směrové odbočnice jsou pasivní prvky (pasivní prvek = nepotřebuje ke své funkci napájení) mikrovlnné techniky. Využívají dvou vedení umístěných blízko u sebe. Směrové účinky jsou dány superpozicí sudého a lichého vidu elektromagnetického pole. Výhodou směrových odbočnic je jejich jednoduchá konstrukce a simulace.

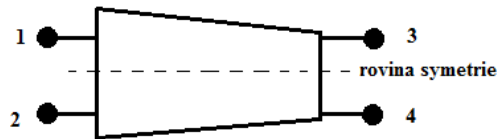
1.1 Reálná směrová odbočnice

Oproti ideální směrové odbočnici, která má některé prvky v rozptylové matici nulové, má reálná odbočnice všechny prvky nenulové a pro úplný popis vlastností je zapotřebí všech 10 komplexních parametrů:

$$S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{34}, S_{33}, S_{44}$$

Reálné odbočnice rozdělujeme z hlediska rovin symetrie dle [3] na:

a) Odbočnice s jednou rovinou symetrie



Obr. 1.1: Odbočnice s jednou rovinou symetrie

rozptylová matice:

$$(S) = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{11} & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{33} & S_{34} \\ S_{14} & S_{13} & S_{34} & S_{33} \end{pmatrix}$$

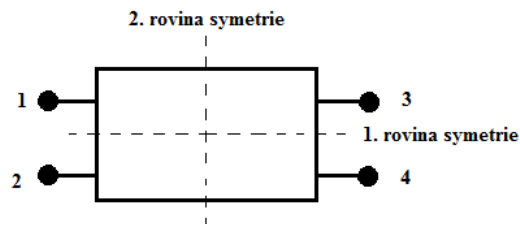
Ze symetrie vyplývá:

$$S_{11} = S_{22}, S_{33} = S_{44}, S_{13} = S_{24}, S_{14} = S_{23}$$

Pro popis vlastností stačí 6 komplexních parametrů:

$$S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{33}, S_{34}$$

b) Odbočnice se dvěma rovinami symetrie



Obr. 1.2: Odbočnice se dvěma rovinami symetrie

rozptylová matice:

$$(S) = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{11} & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{11} & S_{12} \\ S_{14} & S_{13} & S_{12} & S_{11} \end{pmatrix}$$

Ze symetrie vyplývá:

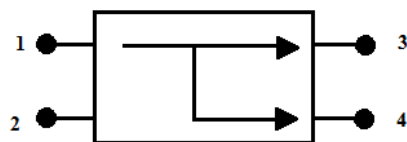
$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44}, S_{13} = S_{24}, S_{14} = S_{23}, S_{12} = S_{34}$$

Pro popis vlastností stačí 4 komplexní parametry:

$$S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}$$

1.1.1 Typy směrovosti odbočnice dle [3]:

- Směrovost 1. druhu



Obr. 1.3: Směrovost 1. druhu

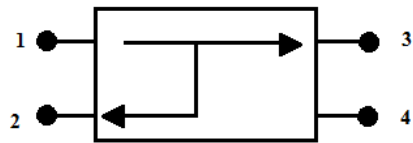
rozptylová matice:

$$(S) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & 0 & 0 \\ S_{14} & S_{24} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$$

$$S_{12} = S_{21} = S_{34} = S_{43} = 0$$

- **Směrovost 2. druhu**



Obr. 1.4: Směrovost 2. druhu

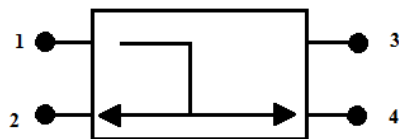
rozptylová matice:

$$(S) = \begin{pmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{24} & S_{34} & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$$

$$S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} = 0$$

- **Směrovost 3. druhu**



Obr. 1.5: Směrovost 3. druhu

rozptylová matice:

$$(S) = \begin{pmatrix} 0 & S_{12} & 0 & S_{14} \\ S_{12} & 0 & S_{23} & 0 \\ 0 & S_{23} & 0 & S_{34} \\ S_{14} & 0 & S_{34} & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$$

$$S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} = 0$$

1.1.2 Technické parametry reálné odbočnice dle [3]:

1) Vložný útlum (dB)

$$IL = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_{31}} \right) = 20 \log \left(\frac{1}{|S_{31}|} \right) \quad 1.1$$

2) Vazební útlum (dB)

$$C = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_{21}} \right) = 20 \log \left(\frac{1}{|S_{21}|} \right) \quad 1.2$$

3) Izolace (dB)

$$I = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_{41}} \right) = 20 \log \left(\frac{1}{|S_{41}|} \right) \quad 1.3$$

4) Směrovost (dB)

$$D = 10 \log \left(\frac{P_{21}}{P_{41}} \right) = 20 \log \left(\frac{|S_{21}|}{|S_{41}|} \right) \quad 1.4$$

$$I = C + D$$

5) Zpětný útlum, odrazné ztráty (dB)

$$RL = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_{11}} \right) = 20 \log \left(\frac{1}{|S_{11}|} \right) \quad 1.5$$

6) Vstupní PSV (VSWR)

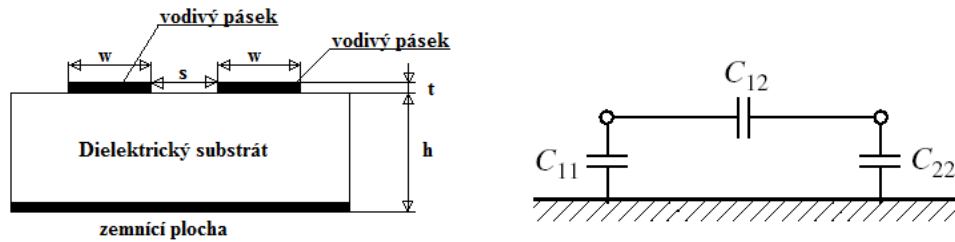
$$PSV = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad 1.6$$

1.1.3 Druhy směrových odbočnic:

Podle tvaru mikropáskových struktur odbočnice, konstrukční složitosti, druhu směrovosti a počtu rovin symetrie lze směrové odbočnice rozdělit na:

- Příčkový vazební člen
- Kruhová směrová odbočnice
- Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení
- Kombinovaný člen

1.2 Mikropásková vázaná vedení

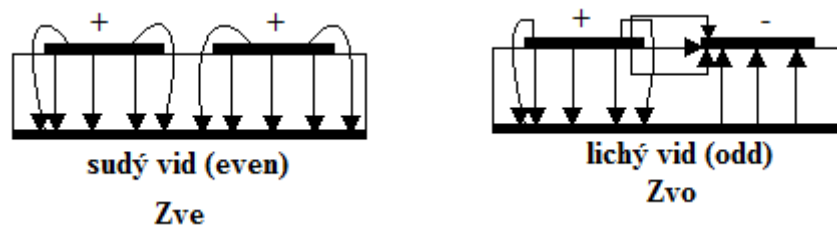


Obr. 1.6: Mikropáskové vázané vedení a jeho náhradní schéma

Mikropásková vedení jsou základním typem planárních obvodů. Skládají se z dielektrického substrátu (destičky), který je z jedné strany zcela pokovený, tato strana slouží jako zemní elektricky vodivá plocha, na druhé straně je vytvořena pásková struktura přenosových linek. Přenosové linky mají kapacitní vazbu. To znamená, že na dielektrický prostor mezi jednotlivými páskovými vodiči a zemní deskou můžeme pohlížet jako na jednotlivé kapacity. Pokud jsou oba pásy identické pak jsou i kapacity C_{11} a C_{22} identické a navzájem se rovnají. Dielektrický substrát je definován svou relativní permitivitou ϵ_r , tloušťkou h a ztrátovým činitelem $\text{tg } \delta$.

Nehomogenita vedení neumožňuje šíření klasické TEM vlny, ani čisté TM a TE vlny. Vedením se šíří takzvaná hybridní vlna HEM, kterou na relativně nízkých kmitočtech lze aproximovat takzvanou vlnou kvazi – TEM. Na vyšších kmitočtech přibližně od 5 GHz se začíná uplatňovat disperze, což má za následek kmitočtovou závislost parametrů vedení (impedance, konstanta šíření, délka vlny...) zde se zavádí kmitočtově korigovaná aproximace kvazi – TEM.

Ve vázaných vedeních se současně mohou šířit $N - 1 =$ dominantní vidy HEM, kde N je počet páskových vodičů, v našem případě je $N = 3$ a šíří se lichý a sudý HEM vid. Sudý vid odpovídá soufázovému a lichý vid protifázovému buzení obou mikropásků.



Obr. 1.7: Šíření lichého a sudého vidu na mikropáskovém vázaném vedení

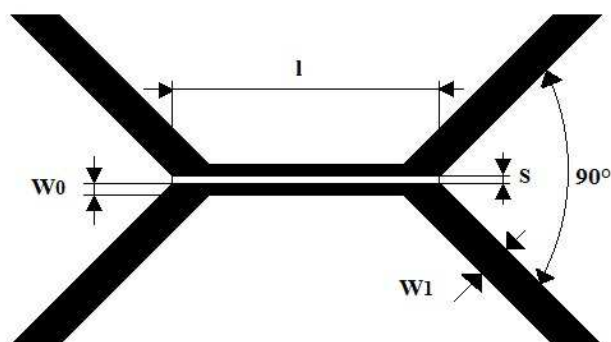
V případě buzení jen jednoho pásku (nesymetrické buzení do jedné brány) dojde k vybudění obou vidů, ale jen s poloviční amplitudou.

2 Návrh mikropáskové vázané směrové odbočnice

Návrh budeme provádět pro požadované parametry: pracovní kmitočet $f = 2450$ MHz a vazební útlum $C = 20$ dB.

Parametry substrátu: relativní permitivita $\epsilon_r = 3.05 \pm 0.05$, ztrátový činitel $\text{tg } \delta = 0.003$, tloušťka substrátu je 1.5 mm, tloušťka pokovení 35 μm .

Směrová odbočnice bude konstruována pomocí mikropáskového vázaného vedení se směrovostí 2. druhu a 2 rovin symetrie.



Obr. 2.1: Parametry mikropáskové vázané odbočnice

- l – délka vázaného vedení
- s – vzdálenost vázaných mikropásků
- w_0 – šířka vázaného vedení
- w_1 – šířka přívodního vedení

Přívodní vedení se zpravidla odklání o 90° , aby se zamezilo ovlivnění vázaného vedení, jeho délku volíme v závislosti na velikosti destičky substrátu, tudíž jeho délka nemá přímý vliv na funkčnost odbočnice, naopak je to s jeho šířkou, která určuje jeho impedanci a měla by být volena tak, aby byla impedančně přizpůsobená k impedanci konektorů. Velikost mezery "s" ovlivňuje parametr vazby C, velikost vazby ovlivňuje i délka vázaného vedení "l", která také určuje velikost izolace.

2.1 Výpočet parametrů odbočnice

Tato část je rozdělena na dvě, v první jsou parametry vázaného vedení a parametry přírodních vodičů vypočteny pomocí programu matlab, v druhé části jsou parametry navrhovány pomocí volně dostupných internetových aplikací. Na závěr této kapitoly je shrnutí a porovnání dosažených výsledků. Takto získané parametry poslouží především jako počáteční hodnoty pro optimalizaci v simulátoru elektromagnetického pole. Výsledné parametry budou určeny z výsledného návrhu v simulátoru.

2.1.1 Výpočet parametrů programem matlab

Nejprve výpočet parametrů vázaného vedení:

Šířka vázaného vedení w_0 :

$$w_0 = h * \frac{2}{\pi} * \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} * \left\{ (\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r}) \right\} \right] \quad 2.1$$

Kde:

šířka substrátu $h = 1.5 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 3.05$

$$B = \frac{377 * \pi}{2 * Z_0 * \sqrt{\epsilon_r}} \quad 2.2$$

Nejprve spočítáme rovnici 2.2, do které za Z_0 dosazujeme velikost impedance a za ϵ_r relativní permitivitu substrátu (v našem případě $Z_0 = 50\Omega$ a $\epsilon_r = 3,05$). Po dosazení parametru B do rovnice 2.1 dostaneme požadovanou šířku mikropásky.

$$w_0 = 3,729 \text{ mm}$$

Šířka mezery mezi mikropásky s:

$$s = h * \frac{2}{\pi} * \left[\frac{\cosh\left\{\frac{\pi}{2} * \left(\frac{w_0}{h}\right)_{se}\right\} + \cosh\left\{\frac{\pi}{2} * \left(\frac{w_0}{h}\right)_{so}\right\} - 2}{\cosh\left\{\frac{\pi}{2} * \left(\frac{w_0}{h}\right)_{so}\right\} - \cosh\left\{\frac{\pi}{2} * \left(\frac{w_0}{h}\right)_{se}\right\}} \right] \quad 2.3$$

Kde:

$$\left(\frac{w_0}{h}\right)_{se} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{2d-g+1}{g+1} \right) \quad 2.4$$

$$\left(\frac{w_0}{h}\right)_{so} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{2d-g-1}{g-1} \right) + \frac{4}{\pi * \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)} * \cosh^{-1} \left(\frac{\frac{w_0}{h}}{\frac{s}{h}} \right) \quad 2.5$$

$$g = \cosh \left(\frac{\pi * s}{2 * h} \right) \quad 2.6$$

$$d = \cosh \left(\frac{\pi^2 * s * w_0}{2 * h^2} \right) \quad 2.7$$

Výpočet parametru „s“ plně vychází z rovnice č. 2.3, do které dosazujeme hodnoty poměrů šířek pro (oba vidy) vázaných mikropásků ku tloušťce substrátu.

Výsledná šířka s je tedy:

$$s = 1,6929 \text{ mm}$$

Délka vázaného vedení l:

$$l = \frac{c}{4 * f * \sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad 2.8$$

kde:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Při výpočtu délky vázaného vedení vycházíme z rovnice 2.8, kde za parameter f dosazujeme frekvenci (číselně f = 2450 MHz) a za parameter ϵ_{ef} dosazujeme efektivní permitivitu substrátu, její přesný výpočet je uveden v příloze pomocí scriptu v matlabu. Výsledná délka l je tedy:

$$l = 17.5285 \text{ mm}$$

Výpočet parametrů přívodního vedení:

Výpočet šířky přívodního vedení vychází z rovnice 2.9

$$Z_v = \frac{120\pi * h}{\sqrt{\epsilon_{ef}} * w_f} \quad 2.9$$

Kde se šířka mikropásku w_1 počítá z efektivní šířky w_f a celý postup výpočtu šířky w_1 pomocí programu matlab je opět uveden v příloze, výsledná hodnota šířky přívodních vodičů je:

$$w_1 = 3,7898 \text{ mm}$$

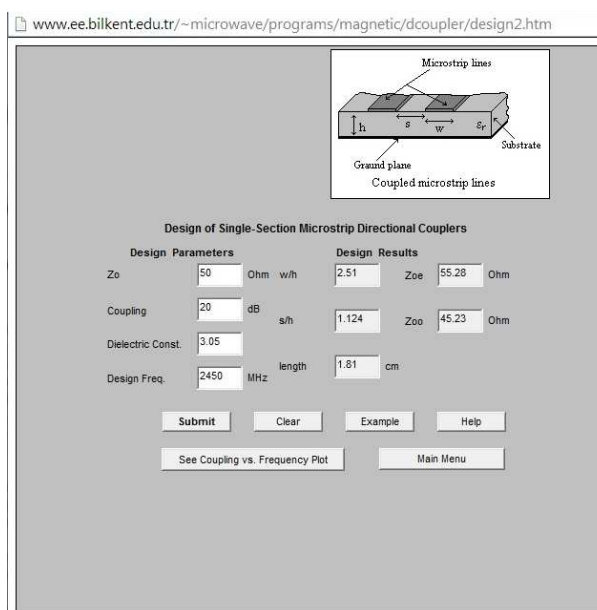
2.1.2 Návrh parametrů pomocí apletů

Návrh pomocí aplikací volně dostupných na internetu je nenáročný a velice jednoduchý. Různých designérů je na internetu mnoho, zde jsou uvedeny dva z nich.

První je dostupný na adrese [1]

Tento aplet využívá stejného způsobu výpočtu parametrů w_0 jakého jsme využili i my při výpočtu v Matlabu, rozdíl je až ve výpočtu délky vázaného vedení, kde aplet počítá pomocí kapacitních vazeb mezi mikropáskami, celý teoretický postup výpočtu je uveden na téže internetové stránce. Tento aplet neumožňuje výpočet šířky přírodního vedení w_1 .

Okna do kterých zadáváme potřebné parametry se nacházejí v levém sloupci, dosadíme námi požadovanou impedanci 50Ω (Z_0), vazbu $c = 20\text{dB}$ (Coupling), relativní permitivitu substrátu $\epsilon_r = 3.05$ (Dielectric constant) a požadovanou frekvenci 2450MHz (Design Freq.) Po stisknutí tlačítka submit program vypočítá požadované parametry, aplet také umožňuje ze zadaných hodnot vykreslit graf závislosti vazby na frekvenci.



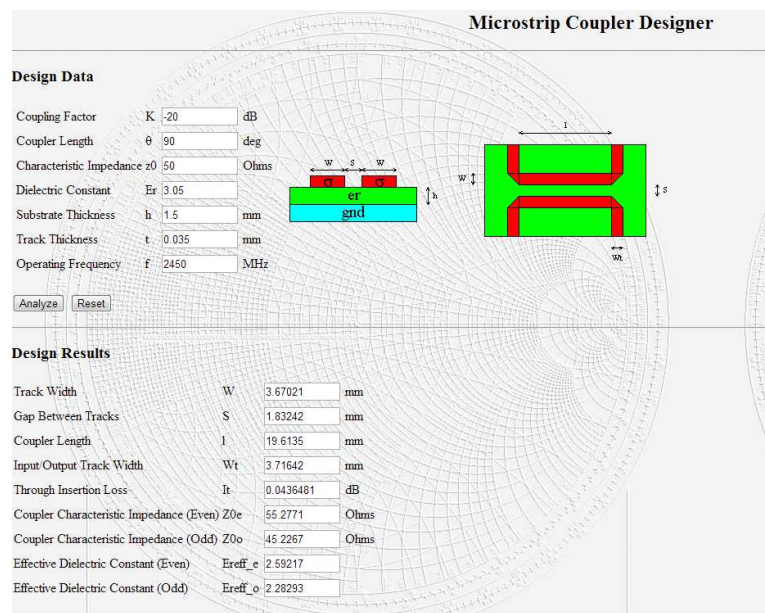
Obr. 2.2: Výpočet parametrů vedení v 1. designéru

Designér umožňuje kromě samotné syntézy i zpětnou analýzu, ve které se zadávají parametry šířky, délky a vzdálenosti vázaných mikropásků. Program na základě takto dosazených hodnot vypočítá parametr vazby, hodnotu frekvence, impedanci sudého a lichého vidu.

Druhý výpočetní aplet je dostupný na adrese [2]

U tohoto apletu jsem nezjistil přesný teoretický způsob výpočtů, podle kterých tento program počítá výsledné parametry, proto budu dále považovat tento designér za pomocný a kontrolní k předchozímu designéru.

Zde, kromě dosazení stejných parametrů jako v předchozím apletu se dosazují i některé parametry navíc. Do okna Coupler length dosadíme hodnotu 90, tato hodnota vypovídá vzájemnému odbočení přívodního vedení o 90°, tloušťku substrátu (Substrate Thickness h volíme 1.5 mm), šířku pokovení (Track Thickness $t = 35\mu\text{m}$). Po stisknutí tlačítka „Analyze“ program vypočítá výsledné hodnoty.



Obr. 2.3: Výpočet parametrů vedení v 2. designéru

2.2 Porovnání výsledných parametrů

Výpočet	Délka l	Šířka s	w_0	w_1	Z_{oe}	Z_{oo}
Matlab	19.5911	1,6929	3.7285	3.7898	55.2771	45.2267
Designér 1	18.1000	1.6860	3.7650	-	55.2800	45.2300
Designér 2	19.6135	1.8324	3.6702	3.7164	55.2771	45.2267

Tab. 1: Porovnání výsledných parametrů navrhované odbočnice

Většina vypočtených parametrů se shoduje, větších odlišností dosahujeme jen při výpočtu délky vázaného vedení, kde 1. Designér oproti předchozí a následující metodě výpočtu udává délku přibližně o 1.5 mm kratší.

3 Simulace navrženého modelu směrové odbočnice

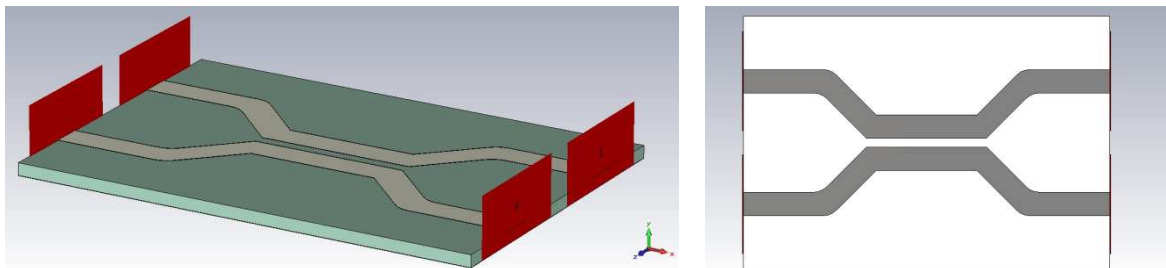
Simulace byla provedena pomocí programu CST Microwave studio. Vodiče jsou navrženy jako materiál PEC (perfect electric conductor) neboli perfektní elektrický vodič. Simulace byla provedena v kmitočtovém rozsahu 500MHz – 5GHz. Pro simulace byly vytvořeny dva modely.

3.1 Simulace modelu bez konektorů

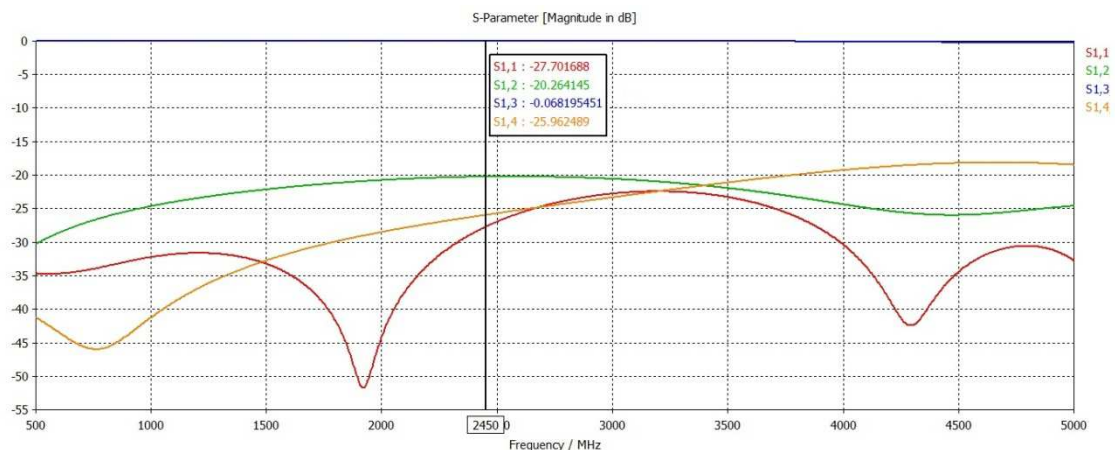
3.1.1 Model 1

Na substrát GIL GML 1000 o rozměrech 60 x 40 mm byla ze spodní strany umístěna zemnicí vodivá deska, která byla opět vytvořena z materiálu PEC, na vrchní straně substrátu bylo vytvořeno samotné vázané vedení a přívodní vedení. Výsledné parametry simulovaného vedení:

$l = 19\text{mm}$, $s = 1.4\text{mm}$, $w_0 = w_1 = 3.7\text{mm}$, vzájemné odbočení přívodních pásků 90°



Obr. 3.1.1: Simulovaný 1. model odbočnice bez konektorů



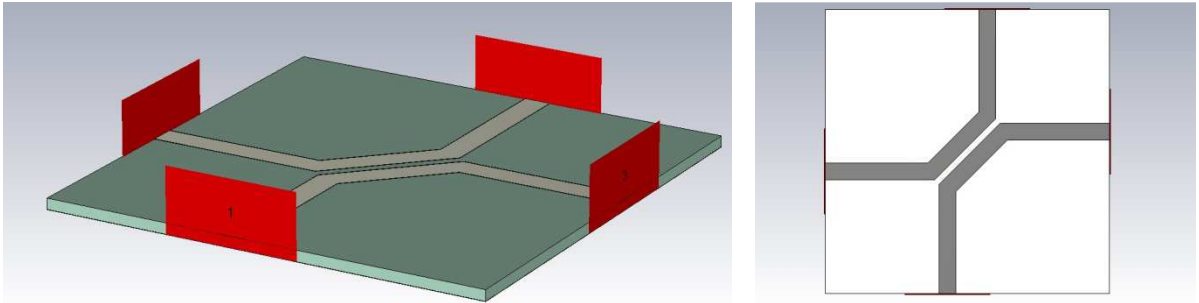
Obr. 3.1.2: Výsledné S parametry 1. modelu odbočnice bez konektorů

Obrázek 4.1.2 zobrazuje výsledné S parametry, na požadované frekvenci je parametr $S_{11} = -27.7\text{dB}$, vazba C neboli parametr $S_{12} = -20.26\text{dB}$, činitel přenosu $S_{13} = -0.07\text{dB}$ a činitel přenosu $S_{14} = -25.96\text{dB}$ (izolace).

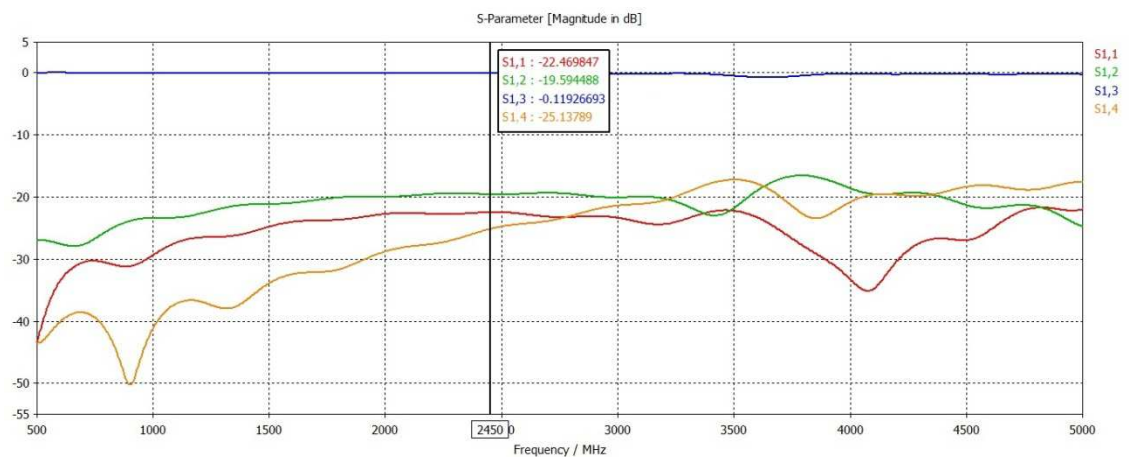
3.1.2 Model 2

Tento model byl opět vytvořen na substrátu GIL GML 1000 zde o rozměrech 60 x 60 mm. Opět byla vytvořena zemnicí deska a vázané vedení. Výsledné parametry simulovaného vedení:

$l = 19\text{mm}$, $s = 1.4\text{mm}$, $w_0 = w_1 = 3.7\text{mm}$, vzájemné odbočení přívodních pásků 90°



Obr. 3.1.3: Simulovaný 2. model odbočnice bez konektorů

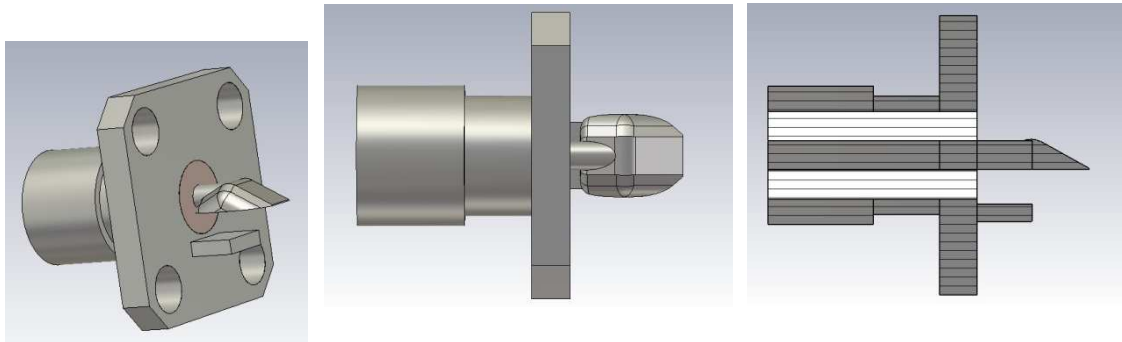


Obr. 3.1.4: Výsledné S parametry 2. modelu odbočnice bez konektorů

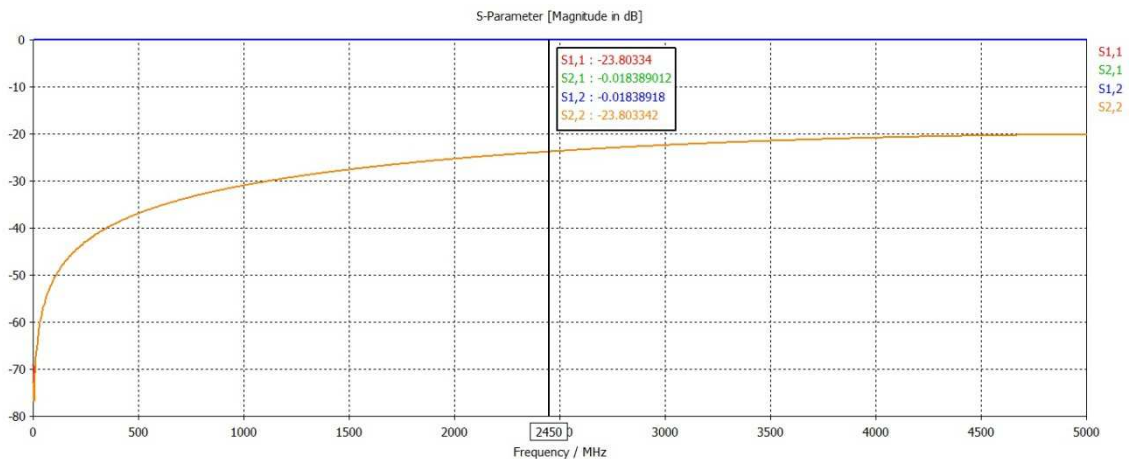
Oproti předchozímu modelu zde dosahujeme horší hodnoty parametru S11 a to -22,5 dB, činitel přenosu S13 se navýšil na -0,12 dB, izolace zůstala podobná, činitel přenosu S14 = -25,13 dB a parametr vazby klesl na hodnotu S12 = -19,59 dB.

3.2 Simulace SMA konektoru

Obrázek 4.2.1 obsahuje 2 různé pohledy a řez simulovaného SMA konektoru. Jako dielektrikum mezi vodičem a pláštěm konektoru byl použit teflon, ostatní materiál je navržen jako PEC. V simulaci je zahrnuto i spojení konektoru s mikropáskem a zemnicí deskou. Na obrázku 4.2.3 jsou udány rozměry konektoru v mm.

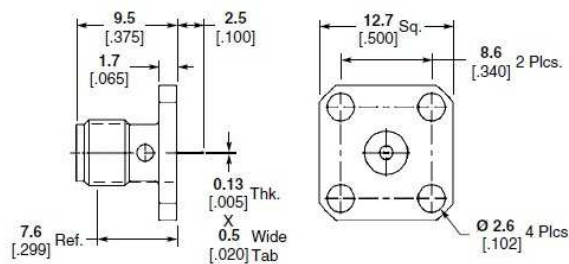


Obr. 3.2.1: Simulovaný konektor SMA



Obr. 3.2.2: Simulované S parametry konektoru

Výsledné S parametry ukazují, že konektor má na námi požadované frekvenci parametr $S_{11} = -23.80$ dB a činitel přenosu $S_{12} = -0.02$ dB, což jistě vnese změny i do výsledných S parametrů navržené odbočnice s konektory.

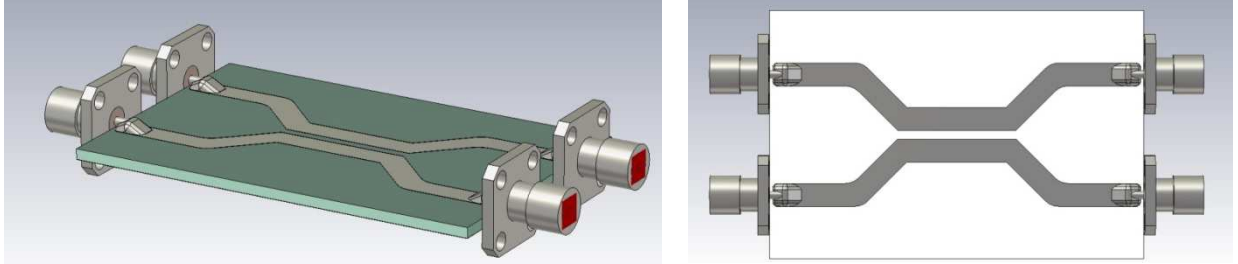


Obr. 3.2.3: Rozměry konektoru [7]

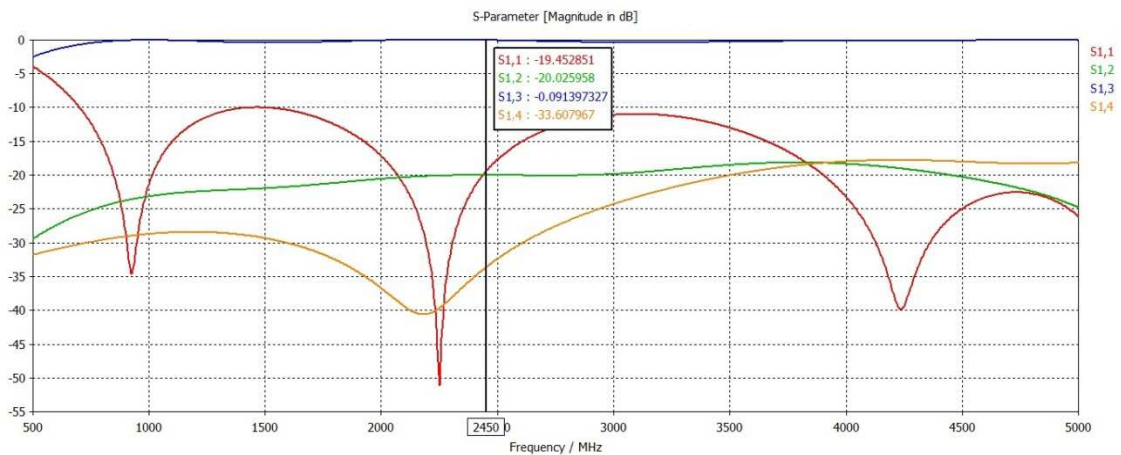
3.3 Simulace zahrnující konektory

3.3.1 Model 1

Tento model plně vychází z modelu bez konektorů. Došlo jen ke zkrácení přívodních vodičů v oblasti připojení konektoru a to z důvodu zamezení zkratu mezi mikropáskem a tělem SMA konektoru.



Obr. 3.3.1: Simulovaný 1. model odbočnice s konektory

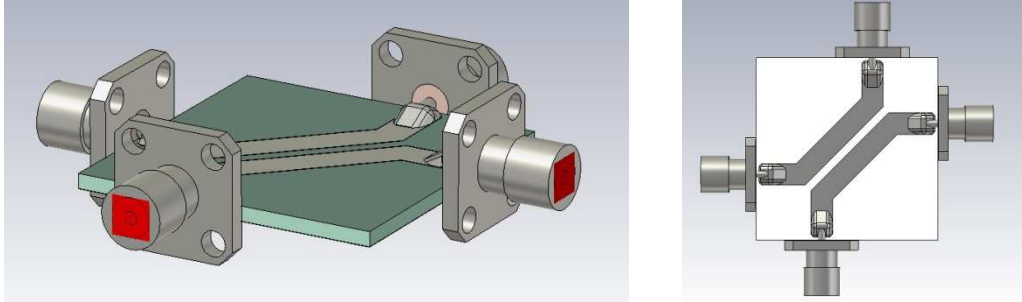


Obr. 3.3.2: Výsledné S parametry 1. modelu odbočnice s konektory

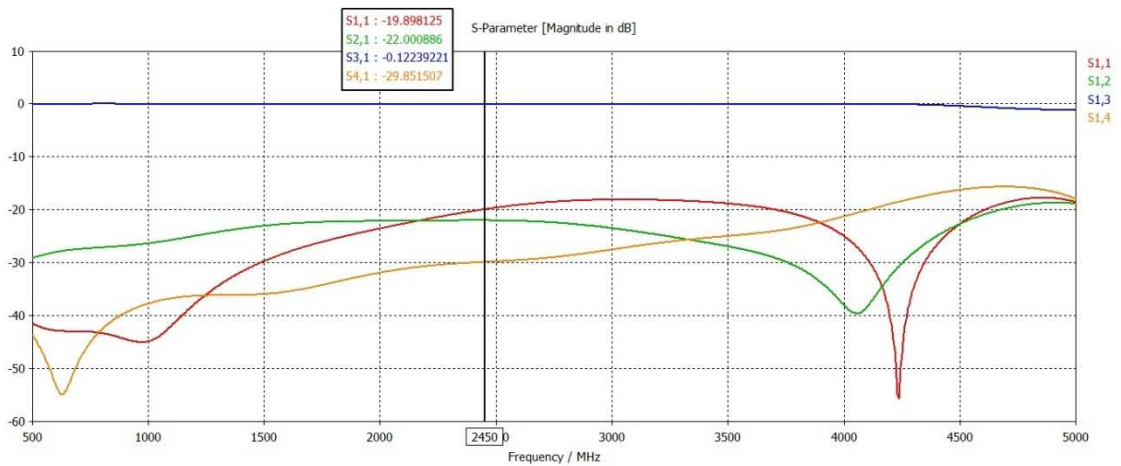
Z výsledných S parametrů je patrné, že konektor nám některé parametry pozměnil, zejména parametr S11, který se změnil o 8,2 dB na -19,45 dB, parametr S14 (izolace) se také změnil o 7.6 dB na výsledných -33,6 dB, parametry průchozího útlumu a vazby zůstaly obdobné. Vazba C neboli parametr S12 = -20,02 dB, parametr S13 = -0,09 dB (průchozí útlum).

3.3.2 Model 2

Po připojení konektorů docházelo u původní velikosti substrátu k velkým odrazům a proto bylo nutné snížit velikost tohoto substrátu. Po mnoha pokusech byla nejmenší možná změna velikosti při zkrácení o polovinu a to na 30 x 30 mm. Opět došlo ke zkrácení přívodních vodičů v oblasti připojení konektoru.



Obr. 3.3.3: Simulovaný 2. model odbočnice s konektory



Obr. 3.3.4: Výsledné S parametry 2. modelu odbočnice s konektory

Připojením konektorů se parametr vazby C zvýšil o 2.4 dB na 22 dB, průchozí útlum nepatrně klesl, parametr S11 stoupl na -19,9 dB a hodnota S14 klesla na -29,85 dB (izolace).

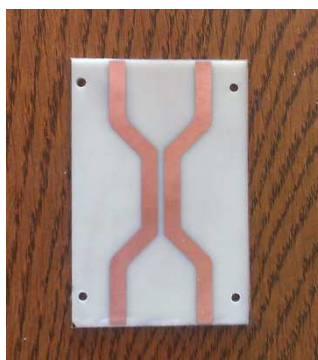
3.4 Zhodnocení simulací

Druhý model vykazuje horší parametry než první model a dále je tento model nevhodný z hlediska malé vzdálenosti konektorů od vázaného vedení. Pro realizaci je tedy nejvhodnější model číslo 1.

Nejlepší parametry vykazuje první model na kmitočtu 2250 MHz kde je parametr $S_{11} = -50$ dB a parametr izolace $S_{14} = -40$ dB. Můžeme tedy mluvit o posunutí frekvenčního pásma o 200 MHz, toto posunutí je zapříčiněno zaokrouhlením parametrů na 1 desetinné místo, zaokrouhlení na více desetinných míst nám neumožňuje technologie výroby plošných spojů, u které nelze dosáhnout větší přesnosti než je jedna desetina milimetru.

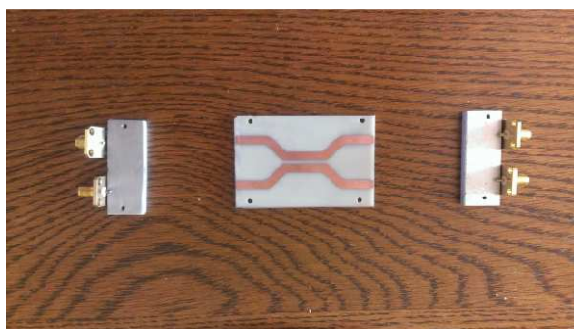
4. Realizace směrové mikropáskové odbočnice

Při realizaci byl nejprve vytvořen grafický model vycházející z přesných parametrů odbočnice navržených a odsimulovaných v simulačním programu. Z takto připraveného modelu byla za pomoci osvitu vytvořena šablona. Po vytvoření šablony došlo k samotné realizaci plošného spoje.



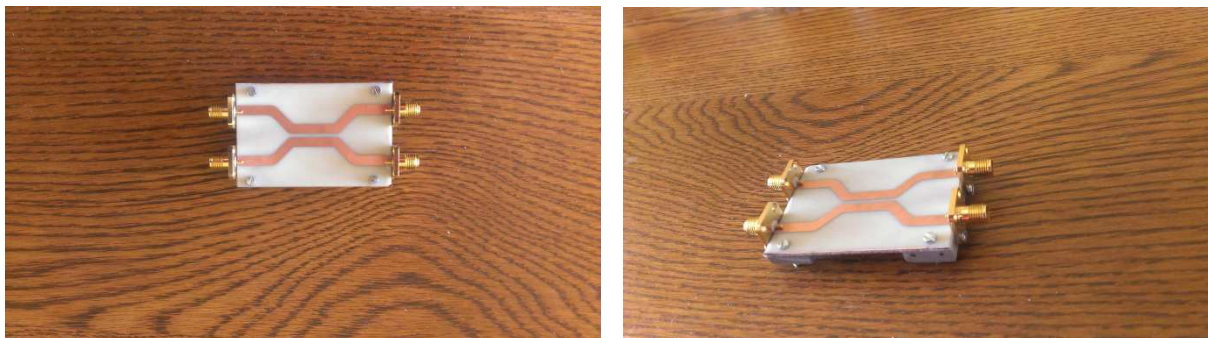
Obr. 4.1: Vyleptaný plošný spoj odbočnice

Pro připojení konektorů byly vytvořeny dva hliníkové pásky, do kterých byly vyvrtány otvory jednak pro připojení pásek k substrátu a jednak pro připojení konektorů.

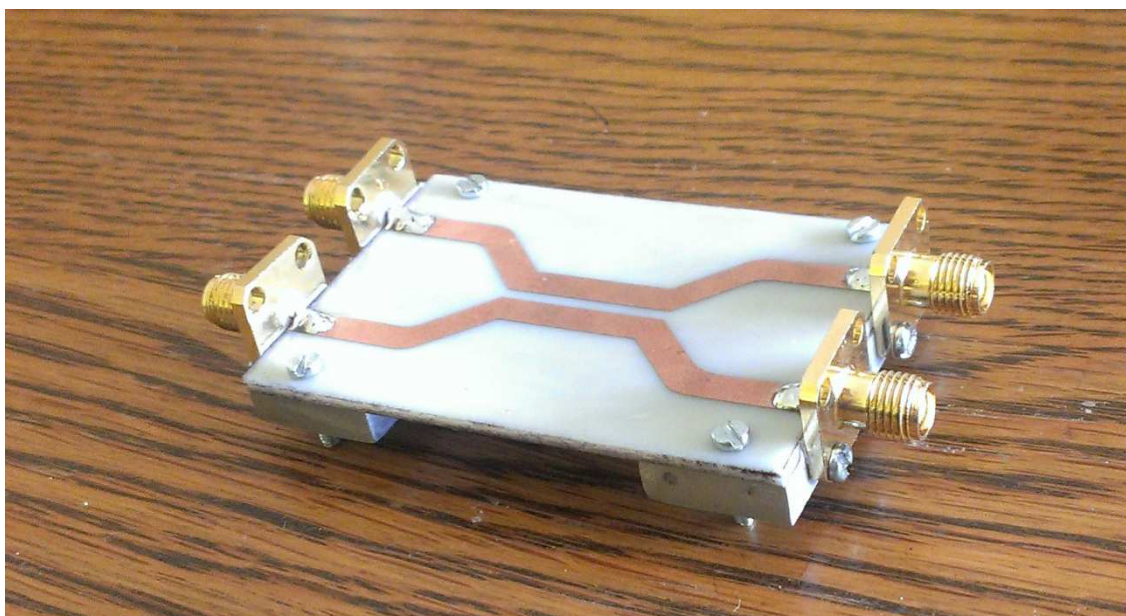


Obr. 4.2: Plošný spoj odbočnice a hliníkové pásky s konektory

Na závěr došlo k samotnému osazení a připájení konektorů k plošnému spoji.



Obr. 4.3: Osazená odbočnice konektory



Obr. 4.4: Výsledná odbočnice

5. Měření parametrů směrové mikropáskové odbočnice

Měření bylo provedeno v laboratorních podmínkách, za použití přístrojového vybavení:

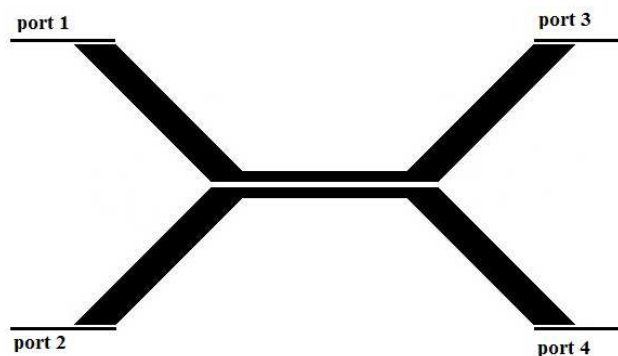
Analyzátor obvodů Agilent E5071C

Kalibrační kit SMA

Propojovací vodiče CBL-1.5FT-SMSM+

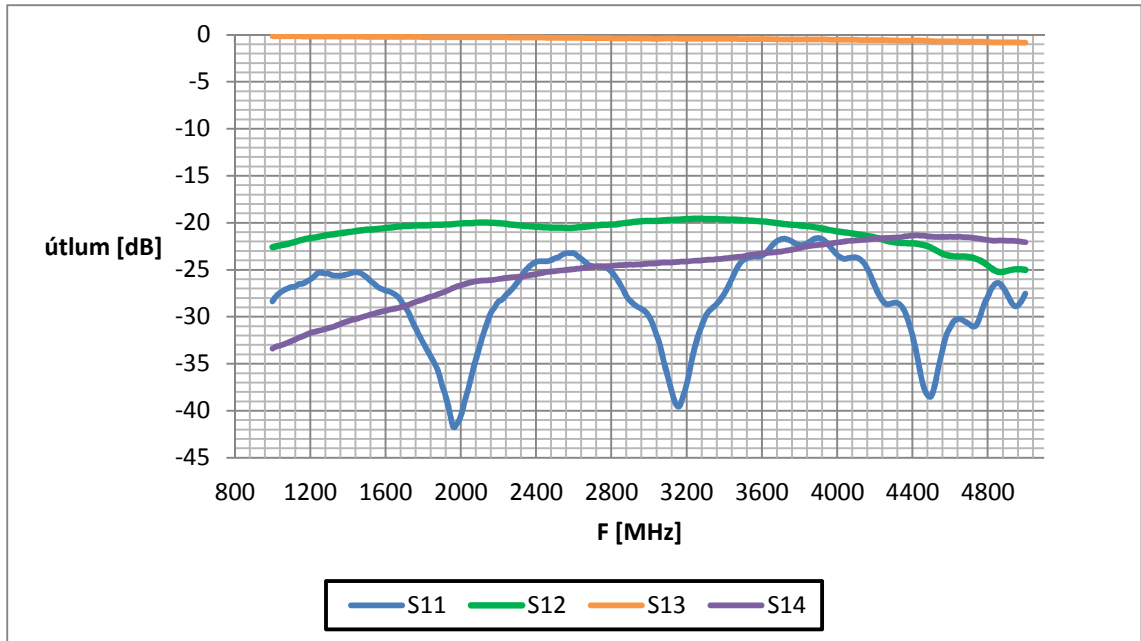
Pro správné měření bylo nejprve nutné zkalibrovat měřicí přístroj pomocí kalibračního setu SMA, kalibrace je nutná z požadavku na přesné měření, při kalibraci dochází k odstranění vlivů propojovacích vodičů na měřicí subjekt. Kalibrace se provádí postupným připojováním jednotlivých kalibrů (Open, Short a Load) na měřicí obvod, přesněji postupně na oba konce propojovacích kabelů a to do místa konečného připojení měřicího prvku.

Na Obrázku 5.1 je zobrazeno očíslování portů odbočnice. Měření bylo provedeno pro dvě varianty buzení. První variantou je buzení z první strany a to do portu 1, druhá varianta spočívá v buzení prvku z druhé strany a tedy buzení do portu 3. Ze symetričnosti prvku vyplývá, že by se obě dvě varianty měly shodovat, ovšem toto platí jen za ideálních podmínek (například v simulačních programech), při výrobě ale nelze nikdy dosáhnout 100 % přesnosti, ať už se jedná o samotnou výrobu plošného spoje tak i o konečné osazení prvku konektory. Toto měření lze tedy specifikovat jako ověření symetričnosti prvku.



Obr. 5.1: Označení portů odbočnice

Na obrázku 5.2 jsou výsledné S parametry odbočnice s buzením do portu 1. Parametr S11 odpovídá odrazu na prvním konektoru, S12 je závislost vazby C na frekvenci, S13 je průchozí útlum vedení a konečně parametr S14 udává frekvenční závislost izolace.



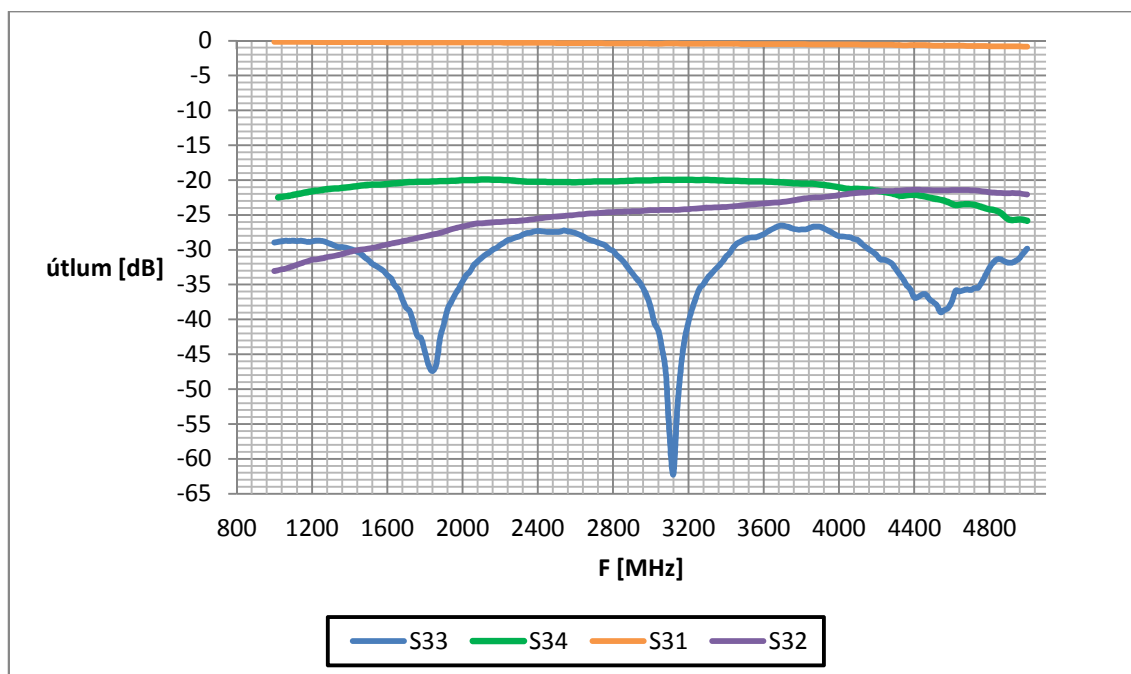
Obr. 5.2: Změřené S parametry pro buzení z první strany

Na požadovaném kmitočtu je činitel vazby C (parametr S12) = - 20,48 dB, S13 = - 0,31 dB (průchozí útlum), odraz na vstupu S11 = - 24,08 dB a parametr S14 = - 25,30 dB (izolace).

Oproti simulovanému modelu se některé parametry změnily a to zejména izolace, která oproti simulaci stoupla o 8,3 dB, parametr S11 tedy odraz na vstupu naopak klesl o necelých 5 dB, parametry vazby a průchozího útlumu se podstatněji neliší.

Z výsledného měření vyplývá, že pokud připustíme nepřesnost vazby o 1 dB lze tuto odbočnici použít pro šířku pásma 2,6 GHz, tedy od 1,4 GHz do 4 GHz.

Obrázek 5.3 popisuje S parametry při buzení z druhé strany odbočnice.



Obr. 5.3: Změřené S parametry pro buzení z druhé strany

Při buzení z druhé strany dosahujeme nepatrně lepších parametrů a to především pro parametr odrazu na vstupu $S_{33} = -27,44$ dB, který je o 3,36 dB nižší než při buzení z první strany, parametr vazby C ($S_{34} = -20,27$ dB), průchozí útlum zůstal stejný, $S_{31} = -0,31$ dB a parametr S_{32} (izolace) se nepatrně snížil na -25,40 dB.

Šířka pásma při zachování stejné tolerance poklesu vazby maximálně o 1 dB zůstala stejná a to od 1,4 GHz do 4 GHz.

5.1 Výsledné S parametry vyrobené odbočnice:

S	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{22}
Přenos (dB)	-24,08	-20,48	-0,31	-25,30	-29,43
S	S_{23}	S_{24}	S_{33}	S_{34}	S_{44}
Přenos (dB)	-25,40	-0,31	-27,44	-20,27	-27,04

Tab. 2: Výsledné S parametry reálné odbočnice

5.2 Porovnání simulovaných a výsledných hodnot

-	Činitel odrazu na vstupu dB	Vazební přenos dB	Přímý přenos dB	Přenos do izolované brány dB
simulace	$S_{11} = -19,45$	$S_{12} = -20,02$	$S_{13} = -0,09$	$S_{14} = -33,60$
buzení 1	$S_{11} = -24,08$	$S_{12} = -20,48$	$S_{13} = -0,31$	$S_{14} = -25,30$
buzení 2	$S_{33} = -27,44$	$S_{34} = -20,27$	$S_{31} = -0,31$	$S_{32} = -25,40$

Tab. 3: Porovnání výsledků

V tabulce číslo 3 je uvedeno srovnání skutečných naměřených hodnot reálné odbočnice oproti simulovanému modelu. Při srovnání jednotlivých parametrů, dosahují největších odlišností parametry vstupního odrazu (S_{11} , S_{33}) a izolace (S_{14} , S_{32}). V prvním případě jde o jednoznačné zlepšení parametrů, zde můžeme hovořit o skutečně dobře přizpůsobeném vstupním konektoru. Rozdíl simulovaných hodnot od skutečných činí bez mála 5 dB v případě buzení č.1 a 8 dB v případě buzení č.2. Oproti tomu v druhém případě, tedy parametru izolace jsme bohužel dosáhli horších skutečných výsledků než v simulaci, zde parametr izolace klesl o 8,3 dB v případě buzení č.1 a o 8,2 dB v druhém případě buzení. Přesto je, ale odstup vazebního útlumu (20 dB) od parametru izolace dostatečný. Rozdíly mezi simulovanými a skutečnými hodnotami jsou zapříčiněny v první řadě idealizovaným prostředím simulací, kterého za reálných podmínek nelze prakticky dosáhnout. V druhé řadě zjednodušením simulovaných modelů, kde jsou materiály navrhovány jako dokonalé vodiče neboli PEC.

6. Závěr

Po úvodním seznámení a teoretické průpravě mikrovlnnými obvody, zejména směrovými vazebními členy, jsem přistoupil k samotnému návrhu mikropáskové vázané odbočnice.

Návrh byl optimalizován pro kmitočet 2,45 GHz a vazební útlum 20 dB. V návrhu jsem využil jak výpočetního programu matlab tak i internetových aplikací určených přímo pro návrh mikropáskových struktur. Takto získané parametry jsem použil pro výchozí nastavení simulačních modelů. Po parametrickém popisu navrhované odbočnice jsem přistoupil k samotným simulacím.

Pro simulace jsem použil simulační program elektromagnetického pole CST Microwave Studio. Zde jsem navrhl dva modely mikropáskové odbočnice, které jsem vzájemně porovnával a po výsledném porovnání byl vybrán první model, který byl i dále realizován.

Realizace odbočnice zahrnovala vytvoření šablony, která byla dále použita pro výrobu plošného spoje metodou leptání. Dále byly vytvořeny dva hliníkové hranoly určené pro připojení konektorů, tyto hranoly přispěly jak k celé konstrukční pevnosti odbočnice tak také k lepšímu uzemnění konektorů neboli přechodu konektor zemnicí deska.

V dalším kroku jsem přistoupil k samotnému měření výsledné odbočnice. Z měření vyplynulo, že je výhodnější používat odbočnici při buzení z druhé strany, tedy do portu č. 3 neboť při tomto buzení odbočnice vykazuje nepatrně lepší parametry v celé šířce frekvenčního pásma. Z teorie víme, že by metoda buzení vzhledem k symetrii celé odbočnice neměla mít vliv na výsledné parametry, ovšem skutečnost ukázala, že nelze dosáhnout ideální symetrie. Tyto rozdíly způsobují i napájené konektory, které nejsou dokonale stejně přiletovány a tak vznikají různé velikosti impedančních skoků, které ovlivňují činitele odrazu na jednotlivých konektorech a tak i parametry celé odbočnice.

Po porovnání simulovaných a změřených parametrů lze říci, že námi vytvořená mikropásková odbočnice splňuje zadané parametry.

7. Literatura

- [1] Designér č. 1, určený pro výpočet parametrů mikropáskové odbočnice.
Dostupný z:
<http://www.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/programs/magnetic/dcoupler/design2.htm>.
- [2] Designér č. 2, určený pro výpočet parametrů mikropáskové odbočnice. Dostupný z: http://people.web.psi.ch/gaspar_m/cgi-bin/rfmwtools/rfmwtools.html
- [3] K. Hoffmann, „*Planární mikrovlnné obvody*“, Skriptum ČVUT, Praha 2003
- [4] Leo G, Maloratsky. *Passive RF & Microwave Integrated Circuits*. Elsevier Science, 2003. ISBN 9780080492056
- [5] Maloratsky, L.: *Understand The Basics Of Microstrip Directional Couplers*. *Microwaves & RF*, February 2001, pp. 79 - 94
- [6] Petr Orság, Jiří Svačina. Kmitočtové vlastnosti mikrovlnných planárních směrových vazebních a hybridních členů. *Elektrorevue* [online]. 12. 2. 2009. Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/file.php?id=200000282-ad960ae8fe>
- [7] Tyco Electronics. RF Coax Connectors. Catalog 1307191. Dostupný z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.te.com%2Fcommerce%2FDocumentDelivery%2FDDEController%3FAction%3Dshowdoc%26DocId%3DCatalog%2BSection%257F1307191_SMA_Connectors%257F0307%257Fpdf%257FEnglish%257FENG_CS_1307191_SMA_Connectors_0307.pdf&ei=aJtuU62RCIXJPLregZgG&usg=AFQjCNGFBJxDbZu-C-rI8gK4kHp4ieX28Q&sig2=Zs58JdDxfd7B1btJGaTRdA

Přílohy

Příloha č.1

Skript pro výpočet parametrů v programu Matlab

```
%% návrh přívodního mikropáskového vedení(vedení od
vazaného vedení ke konektorům) charakteristická impedance
50 ohmů
% X = tloušťka h/w
clear all;
clc;
F = 2.45 * 10 ^9; % frekvence
u0=4*pi()*10^(-7); % permeabilita vakua
t=0.035; % tloušťka pokovení
Er = 3.05; % relativní permitivita
h=1.5; % tloušťka substrátu
Zv=50; % impedance vedení

for x =0:40000 % cyklus pro výpočet šířky mikropásku
    w=x/10000;
    X=1.5/w;% poměr šířky pásku ku tloušťce substrátu
    Ef0 = (Er+1)/2+(Er-1)/2*(1/sqrt(1+12*X))
        -((Er-1)/4.6)*t/h*1/sqrt(1/X); % efektivní
        permitivita                spočítaná pomocí hodnoty X
    wlf = 120*pi()/sqrt(Ef0)*h/Zv; % vypočítaná efektivní šířka
    pásku pomocí impedance vedení
    wf0=w+2.42*h-0.44*((h*h)/w)+h*(1-h/w)^6; % výpočet
    efektivní šířky pásku
    w1lf=wlf*10000;
    wf00=wf0*10000;

    a=round(wf00);
    b=round(w1lf);

    if a==b
        i=w;
    end
end

w1=i

%% Výpočet vázaného vedení
%Zoe a Zoo
Er = 3.05; % relativní permitivita substrátu
c=3*10^8; % rychlost světla
C0 = 20; % vazební útlum (dB)
C=10^(-C0/20); % přepočet vazebního útlumu
Z0=50; % impedance přívodního vedení
h=1.5; %mm
```

```

f=2450*10^6; %frekvence
Zoe=Z0*sqrt((1+C)/(1-C)) % impedance sudého vidu (even)

Zoo =Z0*sqrt((1-C)/(1+C)) %impedance lichého vidu (odd)

% výpočet w označení w0,
A = (Z0/60*sqrt((Er+1)/2))+((Er-
1)/(Er+1)*(0.23+(0.11/Er)));
B = (377*pi())/ (2*Z0*sqrt(Er));
% pro w/h <2
%w0=(8*exp(A))/(exp(2*A)-2);
% pro w/h >2
w0 = (2/pi()*(B-1-log(2*B-1)+((Er-1)/(2*Er)*(log(B-1)+0.39-
(0.61/Er)))))*h

% výpočet (w/h)se,

Bse = (377*pi())/ (2*(Zoe)*sqrt(Er));
% pro w/h <2
%w0=(8*exp(A))/(exp(2*A)-2);
% pro w/h >2
e = (2/pi()*(Bse-1-log(2*Bse-1)+((Er-1)/(2*Er)*(log(Bse-
1)+0.39-(0.61/Er)))));

% výpočet (w/h)so,

Bso = (377*pi())/ (2*(Zoo)*sqrt(Er));
% pro w/h <2
%w0=(8*exp(A))/(exp(2*A)-2);
% pro w/h >2
o = (2/pi()*(Bso-1-log(2*Bso-1)+((Er-1)/(2*Er)*(log(Bso-
1)+0.39-(0.61/Er)))));

% vzdálenost mezi mikropásky s
i=((cosh(pi/2*e)+cosh(pi/2*o)-2)/(cosh(pi/2*o)-
(cosh(pi/2*e))));
s=h*2/pi*i

%výpočet délky vázaného vedení l (mm)
Ef0=2.4416; %efektivní permitivita spočítáno v 1 části
l = c/(4*f*sqrt(Ef0))* 10^3

```