



**F3** Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektromagnetického pole

**Diplomová práce**

**Interferometrický vlnododový senzor pro měření  
výšky vodní hladiny**

**Interferometric Waveguide Sensor for Water  
Level Measurements**

**Bc. Tomáš Vaňkát**

**Vedoucí: Prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc.  
Studijní program: Elektronika a komunikace  
Obor: Rádiové systémy**

**Praha, Květen 2020**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaňkát** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **457162**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Specializace: **Rádiové systémy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Interferometrický vlnovodový senzor pro měření výšky vodní hladiny**

Název diplomové práce anglicky:

**Interferometric Waveguide Sensor for Water Level Measurements**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte interferometrický vlnovodový senzor pro měření výšky vodní hladiny. Použijte vlnovod R100. Požadovaný rozsah měřené výšky hladiny minimálně 30 cm. Požadované rozlišení minimálně 1 mm. Navrhněte vhodnou kalibraci senzoru. Vlastnosti realizovaného senzoru experimentálně ověřte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Karel Hoffmann, Zbyněk Škvor, „New method suitable for relative short distance measurement,“ Proceedings of the 40th European Microwave Conference, 28-30 September 2010, Paris, France, pp. 1524-1527.
- [2] Karel Hoffmann ; Zbynek Skvor, „Contactless distance measurement method,“ 77th ARFTG Microwave Measurement Conference, 10 June 2011, Baltimore, MD, USA, DOI: 10.1109/ARFTG77.2011.6034559

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc., katedra elektromagnetického pole FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2020** Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





## 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.“

V Praze, 22. května 2020

.....  
Bc. Tomáš Vaňkát



## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu profesoru Ing. Karlu Hoffmannovi, CSc., za celkové odborné vedení mé diplomové práce a množství cenných podnětů, rad a připomínek. Dále také za čas věnovaný konzultacím jak osobním, tak později i distančním, vzhledem k nelehké celosvětové situaci v tomto období. Děkuji také svým nejbližším za podporu, trpělivost a toleranci v průběhu celého mého studia.

## Abstrakt

Cílem této diplomové práce je pomocí 3D simulátoru elektromagnetického pole navrhnout a následně realizovat senzor pro měření výšky vodní hladiny, založený na principu interferenčního jevu a jeho teoretické vlastnosti získané při návrhu experimentálně ověřit. Základní konstrukcí je symetrická trojbranová struktura vlnovodu R100 (WR90). K využívanému interferenčnímu jevu dochází mezi tzv. sudým a lichým módem vybuzení symetrické struktury. Součástí práce je také vytvoření algoritmu výpočtu hledané vzdálenosti z naměřených dat a návrh vhodné kalibrace senzoru.

**Klíčová slova:** Vlnovod, trojbran, interferometrie, interferenční jev, mikrovlnný senzor, měření vzdálenosti, měření výšky hladiny, mikrovlnné měření, symetrická struktura, módy buzení, sudý a lichý vid

## Abstract

The goal of this diploma thesis is to devise and realize a microwave sensor for water level measurement, based on interferometric principle. Subsequently, verify the theoretical design features. The basic construction is a symmetrical three-port structure of the R100 (WR90) waveguide. The interferometric phenomenon used occurs between the so-called even and odd modes of excitation of the symmetric structure. Part of the thesis is the implementation of an algorithm for determining the searched distance from the measured data and a design of a suitable sensor calibration.

**Keywords:** Waveguide, three-port, interferometry, microwave sensor, distance measurement, water level measurement, microwave measurement, symmetric structure, excitation modes, even and odd excitation

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	<b>6 Experimentální měření</b>	<b>30</b>
<b>2 Teoretický rozbor</b>	<b>3</b>	6.1 Vyhodnocení naměřených dat . .	32
2.1 Interferenční měření . . . . .	3	<b>7 Závěr</b>	<b>38</b>
2.2 Buzení symetrické struktury . . . .	3	7.1 Zhodnocení výsledků . . . . .	39
2.3 Základní parametry . . . . .	6	7.2 Další možná vylepšení . . . . .	40
2.3.1 Impedance vlnovodu . . . . .	7	<b>A Literatura</b>	<b>42</b>
2.4 Změna impedance vedení . . . . .	8	<b>B Zdrojové kódy</b>	<b>43</b>
<b>3 Model struktury</b>	<b>10</b>	B.1 Metoda určení vzdálenosti výpočtem . . . . .	43
3.1 Parametry a požadavky na strukturu . . . . .	10	B.2 Metoda určení vzdálenosti modelem . . . . .	46
3.2 Zkoumané struktury . . . . .	11		
3.3 Finální model . . . . .	18		
<b>4 Simulace</b>	<b>23</b>		
<b>5 Určení vzdálenosti a kalibrace</b>	<b>27</b>		
5.1 Určení vzdálenosti výpočtem . . .	27		
5.2 Určení vzdálenosti porovnáním s modelem . . . . .	29		



## Obrázky

2.1 Trojbran symetrický podle osy. . . . .	3	3.7 Rozložení $\vec{E}$ v modelu D. . . . .	14
2.2 Rozložení $\vec{E}$ v portech při sudém buzení. . . . .	4	3.8 Koeficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu D. . . . .	15
2.3 Rozložení $\vec{E}$ v portech při lichém buzení. . . . .	4	3.9 Koeficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu E. . . . .	15
2.4 Zapojení pro simulaci sudého a lichého buzení a měření koeficientu odrazu obou vidů. . . . .	5	3.10 Rozložení $\vec{E}$ v modelu E. . . . .	16
2.5 Koeficient odrazu od symetrického trojbranu při různém buzení. . . . .	6	3.11 Lichý vid modelu E na $f=8\text{GHz}$ . . . . .	16
2.6 Frekvenční průběh impedance vlnovodu R100 dle různých definic. . . . .	8	3.12 Lichý vid modelu E na $f=12\text{GHz}$ . . . . .	17
2.7 Amplituda koeficientu odrazu v závislosti na délce transformátoru [1]. . . . .	9	3.13 Koeficient odrazu modelu E při interferenci mezi test. a ref. signálem. . . . .	17
3.1 Rozložení $\vec{E}$ v modelu A. . . . .	11	3.14 Rozměry finálního modelu. . . . .	18
3.2 Koeficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu A. . . . .	12	3.15 Detail spoje ramen. . . . .	19
3.3 Rozložení $\vec{E}$ v modelu B. . . . .	12	3.16 Koeficient odrazu při sudém a lichém buzení finálního modelu. . . . .	19
3.4 Koeficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu B. . . . .	13	3.17 Rozložení $\vec{E}$ sudého vidu ve výsledném modelu. . . . .	20
3.5 Rozložení $\vec{E}$ v modelu C. . . . .	13	3.18 Rozložení $\vec{E}$ lichého vidu ve výsledném modelu na $f=8\text{GHz}$ . . . . .	21
3.6 Koeficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu C. . . . .	14	3.19 Rozložení $\vec{E}$ lichého vidu ve výsledném modelu na $f=12\text{GHz}$ . . . . .	21
		3.20 Model pro výrobu jedné poloviny senzoru. . . . .	22

4.1 Základní zapojení pro simulování interference sudého a lichého vidu. . . . .	23	6.6 Porovnání frekvenčních průběhů měření ve vzdálenosti 80mm při odrazu vodou a simulovaným modelem se zkratem pro vzdálenost 80,5mm. . . . .	37
4.2 Frekvenční závislost fáze koeficientu odrazu sudého a lichého vidu při zakončení zkratem ve vzdálenosti 100mm. . . . .	24	6.7 Porovnání frekvenčních průběhů měření ve vzdálenosti 311mm při odrazu vodou a simulovaným modelem se zkratem. . . . .	37
4.3 Frekvenční průběh interference při zakončení zkratem v různých vzdálenostech. . . . .	25	7.1 Detail jednotlivých částí vytvořeného senzoru. . . . .	41
4.4 Frekvenční průběhy interference při zakončení odrazu s rozdílnou amplitudou nebo fází. . . . .	26		
6.1 Uspořádání experimentálního měření. . . . .	31		
6.2 Odchylka vypočtené vzdálenosti zkratu od nastavené dle různých metod. . . . .	33		
6.3 Odchylka vypočtené vzdálenosti vodní hladiny od nastavené pro různé metody výpočtu. . . . .	34		
6.4 Porovnání frekvenčních průběhů měření ve vzdálenosti 50mm při odrazu zkratem, vodou a simulovaným modelem se zkratem. . . . .	36		
6.5 Porovnání frekvenčních průběhů měření ve vzdálenosti 80mm při odrazu zkratem, vodou a simulovaným modelem se zkratem. . . . .	36		

## Tabulky

6.1 Tabulka vypočtených vzdáleností  
zkratu. .... 32

6.2 Tabulka vypočtených vzdáleností  
vodní hladiny. .... 34

## Seznam symbolů

$\vec{E}$	intenzita elektrického pole
$\Gamma$	koeficient odrazu
$\Gamma_{++}$	koeficient odrazu sudého vidu
$\Gamma_{+-}$	koeficient odrazu lichého vidu
$\varepsilon$	permitivita
$\varepsilon_0$	permitivita vakua
$\varepsilon_r$	relativní permitivita
$\mu$	permeabilita
$\mu_0$	permeabilita vakua
$\mu_r$	relativní permeabilita
$f$	frekvence
$f_c$	mezní (kritická) frekvence
$\lambda$	vlnová délka ve volném prostoru
$\lambda_v$	vlnová délka na vedení
$c$	rychlost světla
$a$	šířka vlnovodu (větší rozměr)
$b$	výška vlnovodu (menší rozměr)
$m, n$	indexu vidu elektromagnetické vlny
$v_f$	fázová rychlost
$U_r$	poměrné napětí
$I_r$	poměrný proud
$P_r$	poměrný výkon
$Z$	impedance
$L$	délka impedančního transformátoru
$Z(z)$	funkce změny impedance
$z$	vzdálenost ( $\epsilon < 0, L >$ )
$f_k$	frekvence k-tého interferenčního minima
$k$	index (pořadí) interferenčního minima
$l_1$	délka referenčního kanálu
$l_2$	délka testovacího kanálu

# Kapitola 1

## Úvod

Měření výšky vodní hladiny, respektive měření vzdálenosti obecně, není nikterak nová problematika. Existuje mnoho metod měření, lišících se přesností, technologií, náročností na provedení měření, finanční náročností na měřící zařízení a tak dále. V některých případech postačí odečítat hodnotu pouhým okem ze stupnice nebo použít jiné mechanické měřidlo. V jiných případech, kdy je třeba vyšší přesnost nebo není možné nahlédnout na stupnici, případně se měří taková vzdálenost, kdy mechanické měřidlo není vhodné, přicházejí na řadu zpravidla elektronické, optické nebo elektronicko-optické metody. Dále budou zmíněny pouze některé elektronické, případně elektronicko-optické metody.

Vývoj prvních elektronicko-optickým metod byl založen na metodách určení rychlosti světla, jež byla určena v polovině devatenáctého století. První elektronicko-optické měřidlo vzdálenosti bylo vyvinuto v roce 1936. Důležitým milníkem pro vývoj bylo uvedení heterodynní techniky měření, která umožnila přesnější fázové měření. Mezi elektronicko-optickou techniku spadá například laser. Použití odrazu elektromagnetických vln pro měření vzdálenosti navrhl již Nikola Tesla v roce 1889. První patentovaná aplikace elektromagnetického měřícího zařízení byla uvedena v roce 1923. Měřič pracující na rádiových vlnách a využívající fázového měření byl představen v roce 1954. V druhé polovině 20. století se rychlost vývoje dalších měřících přístrojů a metod ještě zvýšila.[2]

Mezi aktuálně používané principy při elektronickém měření vzdálenosti patří například metoda pulsní. Při této metodě se vyšle krátký intenzivní signál, který se odrazí od cíle a vrací se zpět. Měří se čas mezi vysláním a opětovným přijetím pulsu, z něhož se vypočte vzdálenost. Pro puls se využívají jak rádiové (například radary), tak laserové pulsy. Další metodou je měření fázového rozdílu spojitě vlny. Tato metoda využívá spojitěho měřícího signálu, namodulovaného na světelnou, infračervenou nebo mikrovlnnou nosnou vlnu. Signál se odráží od cíle zpět do přijímače a porovnává se fáze signálu vyslaného a přijatého. Při další metodě se využívá Dopplerova jevu. Jiná metoda se zase zakládá na (optické) interferometrii, s níž je možné dosáhnout velmi přesných měření na krátké vzdálenosti.[2]

Hoffmann a Škvor v článku [3] představili novou metodu měření relativní vzdálenosti elektricky odrazného povrchu, odvozené z interference dvou koherentních signálů. Metoda využívá jeden zdroj signálu, který je rozdělen magickým T do dvou kanálů - testovací a referenční. Signál v testovacím kanále se šíří dále, odrazí se od odrazného povrchu a vrací se zpět. Tento signál ve své fázi obsahuje informaci o vzdálenosti odrazné plochy. Referenční signál se šíří referenčním kanálem o známé délce a je tlumen atenuátorem tak, aby měl pokud možno shodnou amplitudu se signálem testovacím v místě druhého magického T, kde se signály opět sčítají. Na frekvenci, na které se délka testovacího a referenčního kanálu liší přesně o lichý násobek poloviny vlnové délky dochází k destruktivní interferenci[3]. V dalším článku [4] pak autoři uvádějí reálné experimentální měření a výsledky získané touto metodou.

Na výše popsané metodě se zakládá článek [5], kde autoři zjednodušují zapojení pouze na jedno magické T a ukazují, že tuto interferenční metodu lze použít pro určení vzdálenosti materiálu, který nemá ideální odrazné vlastnosti (například kapaliny uvnitř vlnovodu). V tomto článku je také uvažovaná interference mezi testovacím a referenčním signálem, z nichž se každý po určité vzdálenosti šíří vlastním fyzickým kanálem.

Tato diplomová práce vychází z metody popsané a představené ve výše uvedených článcích [3, 4, 5], ovšem cílem je vytvořit vlnovodný trojbran, který ještě více zjednoduší zapojení a ve kterém bude referenční signál po celé své trase šíření využívat pouze kanál sdílený i se signálem testovacím. Nebudou tak zde dva fyzické kanály (testovací a referenční), ale stále dva koherentní signály, z nichž jeden bude testovací a druhý referenční, šířící se po trase se známou délkou. Ideou je využít tzv. sudý a lichý vid vybuzení symetrické struktury jako zmíněné dva koherentní signály. Tato metoda buzení je podrobněji popsána dále v sekci 2.2. Předložená práce nemá za cíl přinést převratný systém pro měření výšky vodní hladiny, jenž by předčil všechny dosud známé měřicí přístroje, ale navrhnout a vytvořit vlnovodnou součástku, jež by mohla být další možností pro taková měření a její fungování by se zakládalo na nové metodě, představené ve výše uvedených článcích.

## Kapitola 2

### Teoretický rozbor

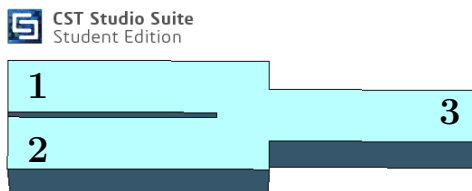
V této kapitole jsou popsány a uvedeny jak všechny zkoumané a využívané základní vlastnosti, vzorce vlnovodů a elektromagnetických vln, tak jevy a principy na kterých je založena funkce navrhovaného senzoru. Konkrétní způsob a důvod využití daného principu je vždy uveden v dalších částech práce.

#### 2.1 Interferenční měření

K interferenci dochází, pokud je v systému přítomen více než jeden signál, v důsledku superpozice (sčítání) těchto signálů. Při interferenčním měření vzdálenosti se využívá superpozice dvou koherentních signálů, z nichž jeden je referenční a druhý testovací. Jsou-li signály na shodné frekvenci fázově posunuté přesně o  $180^\circ$ , tedy o půlku vlnové délky, odečtou se a vzniká interferenční minimum. Mají-li navíc shodnou amplitudu, na dané frekvenci bude amplituda superponovaného signálu nulová. Pokud je tedy při interferenčním měření nalezeno takové minimum, je zřejmé, že testovací kanál je oproti referenčnímu delší o lichý násobek poloviny vlnové délky, odpovídající frekvenci minima.[2, 3, 5]

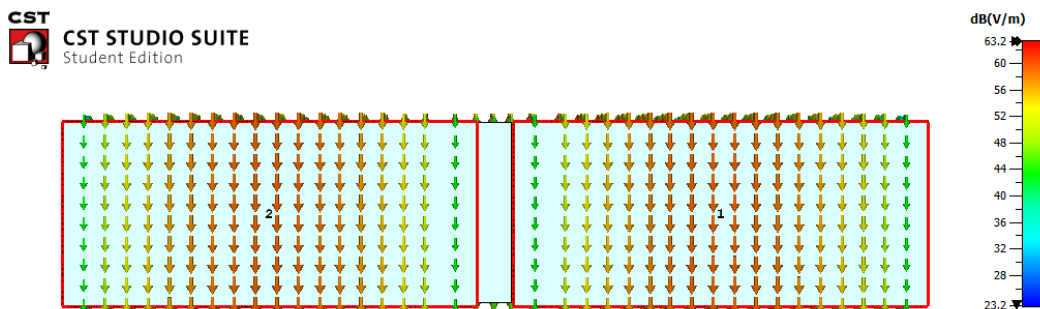
#### 2.2 Buzení symetrické struktury

Symetrickou strukturu lze analyzovat poměrně jednoduše metodou sudého a lichého módu vybuzení, tuto metodu podrobně popisuje Reed a Wheeler[6] na symetrickém čtyřbranu. Ovšem lze ji použít i pro strukturu s jiným počtem bran, je-li daná struktura symetrická alespoň podle osy symetrie. Metodu pro symetrický trojbran aplikoval například Cohn v [7] vycházející z [6]. Princip je stručně uveden na příkladu struktury na následujícím obrázku 2.1.



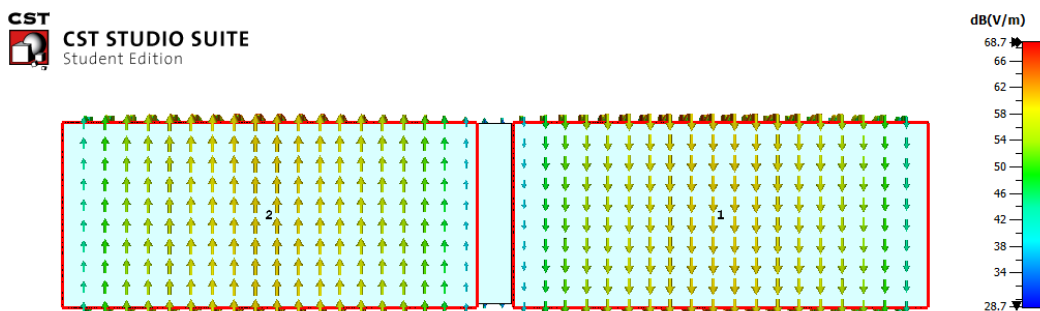
Obrázek 2.1: Trojbran symetrický podle osy.

Na obrázku 2.1 jsou očíslována jednotlivá ramena. Ramena **1** a **2** jsou zakončena porty, kterými bude struktura analyzována, port **3** je zakončen přizpůsobením. Vybudí-li se struktura dvěma signály do portu **1** a **2** o shodných amplitudách o velikostech  $1/2$  a nulovém fázovém posuvu (ve fázi), budí se tzv. sudým videm. Rozložení intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  na portech při sudém buzení je zobrazeno na obrázku 2.2. Od takto vybuzené struktury vzniká koeficient odrazu, označený  $\Gamma_{++}$ .



Obrázek 2.2: Rozložení  $\vec{E}$  v portech při sudém buzení.

Naopak tzv. lichým videm se budí struktura dvěma signály opět o amplitudách  $1/2$ , ale v protifázi, tedy se vzájemným fázovým posuvem o  $180^\circ$ . Rozložení  $\vec{E}$  na portech vidíme na následujícím obrázku 2.3. Koeficient odrazu se tentokrát značí  $\Gamma_{+-}$ .

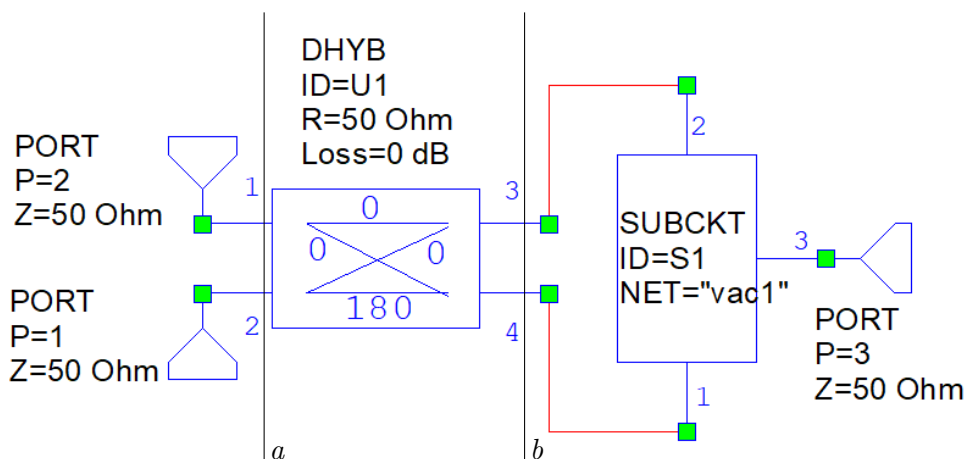


Obrázek 2.3: Rozložení  $\vec{E}$  v portech při lichém buzení.

Konkrétní zapojení pro buzení struktury sudým a lichým videm a měření koeficientu odrazu těchto vidů v simulátoru je zobrazeno na obrázku 2.4. *SUBCKT* je symetrická trojbranová struktura s ramenem 3 zakončeným přizpůsobením (portem), ramena 1 a 2 připojenými přes ideální hybrid (*DHYB*) ke dvěma budícím/měřícím portům. Z obrázku je patrné, že port  $P=2$  vybudí strukturu sudým videm (soufázovým), zatímco port  $P=1$  vybudí strukturu videm lichým (protifázovým), díky  $180^\circ$  posuvu mezi branou 2 a 4 hybridu. Struktura je oběma vidy buzena v rovině  $b$ , koeficienty odrazu od struktury  $\Gamma_{+-}$  a  $\Gamma_{++}$  jsou zkoumány samozřejmě také v rovině  $b$ . Je patrné, že měření takto popsaných koeficientů odrazu je velice složité, obzvláště proto, že struktura je buzena zároveň ze dvou portů. V článku [8] je tato

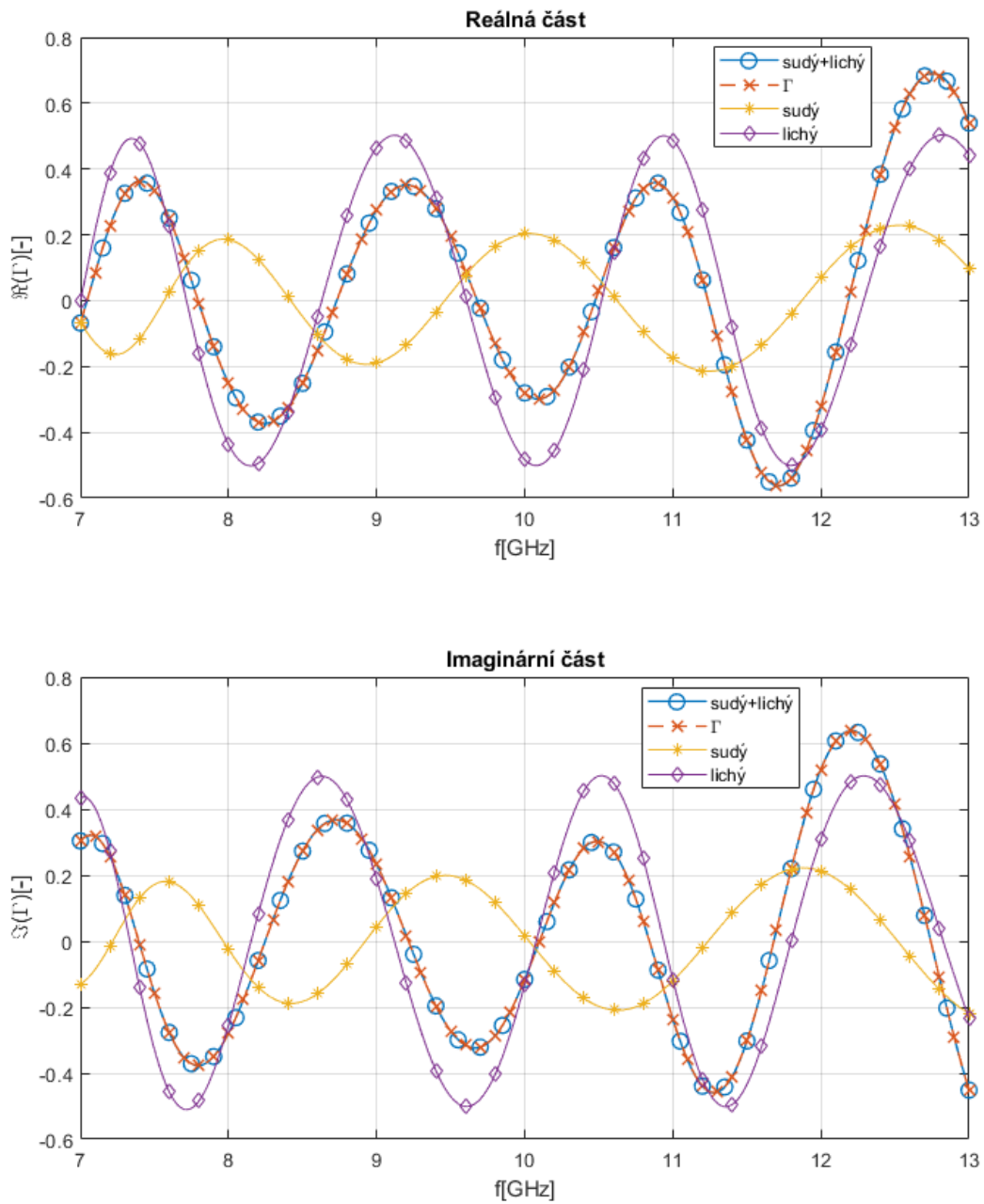


problematika podrobně řešena a autoři uvádějí, že koeficient odrazu sudého vidu v rovině  $b$  je totožný s koeficientem odrazu měřeným portem  $P=2$  v rovině  $a$  a koeficient odrazu lichého vidu v rovině  $b$  je rovný koeficientu odrazu měřenému portem  $P=1$  v rovině  $a$ . Autoři také uvádějí, že koeficienty odrazu měřené porty v rovině  $a$  se vztahují k impedanci  $50\Omega$ , zatímco koeficient odrazu v rovině  $b$  pro sudý vid je vztažen k impedanci  $25\Omega$  a pro lichý vid k impedanci  $100\Omega$ . [8]



**Obrázek 2.4:** Zapojení pro simulaci sudého a lichého buzení a měření koeficientu odrazu obou vidů.

Vybudí-li se struktura pouze jedním signálem (bez použití ideálního hybridu, kdy porty jsou připojeny přímo na ramena struktury) o jednotkové amplitudě do jednoho portu, vznikne koeficient odrazu od struktury  $\Gamma$  a parametry struktury (odraz, přenos i rozložení  $\vec{E}$ ) jsou součtem parametrů při sudém a lichém vidu [6, 7]. Na následujícím obrázku 2.5 je vynesena reálná a imaginární část  $\Gamma_{++}$  označená jako *sudý*,  $\Gamma_{+-}$  jako *lichý*, součet  $\Gamma_{++} + \Gamma_{+-}$  jako *sudý + lichý* a  $\Gamma$ . Je patrné, že součet sudého a lichého vidu se v reálné i imaginární části shoduje s  $\Gamma$ .



Obrázek 2.5: Koefficient odrazu od symetrického trojbranu při různém buzení.

## 2.3 Základní parametry

V dalších částech práce je používáno několik základních parametrů, které je třeba definovat. Jde o vlnovou délku ve volném prostoru:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (m) \quad (2.1)$$

kde  $c$  je rychlost světla a  $f$  frekvence. Dále o délku vlny na vedení:

$$\lambda_v = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (m) \quad (2.2)$$

kde  $\mu_r$  je relativní permeabilita,  $\varepsilon_r$  relativní permitivita a  $f_c$  je mezní, neboli kritická frekvence vedení (v tomto případě mezní frekvence základního vidu vlnovodu  $TE_{10}$ ):

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (Hz) \quad (2.3)$$

kde  $a$  je šířka a  $b$  výška vlnovodu,  $m, n$  označení vidu  $TE_{mn}$ . Fázová rychlost šíření vlny  $v_f$  je definována:

$$v_f = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad \left(\frac{m}{s}\right) \quad (2.4)$$

Vzorce 2.1 až 2.4 jsou uvedeny v [9].

Dle rozměrů  $a$  a  $b$  lze pro konkrétní frekvenci určit poměrné napětí  $U_r$ , poměrný proud  $I_r$  a poměrný výkon  $P_r$  v daném místě vlnovodu:

$$U_r = \frac{2ab}{\lambda} \mu_r \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (V) \quad (2.5)$$

$$I_r = \frac{4}{\pi} \frac{a^2}{\lambda_v} \quad (A) \quad (2.6)$$

$$P_r = \frac{a^3 b}{\lambda \lambda_v} \mu_r \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (W) \quad (2.7)$$

Výše uvedené rovnice 2.5 až 2.7 jsou převzaty z [10].

### ■ 2.3.1 Impedance vlnovodu

Pro transverzálně elektrickou vlnu lze určit charakteristickou impedanci vlnovodu dle následujícího vztahu 2.8 [9, 10]:

$$Z_{TE} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \mu_r \frac{\lambda_v}{\lambda} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (\Omega) \quad (2.8)$$

Obecně lze impedanci určit poměrem napětí a proudu nebo analogicky nahrazením jedné z těchto veličin výkonem. Vrba v [10] dále uvádí následující vztahy 2.9 až

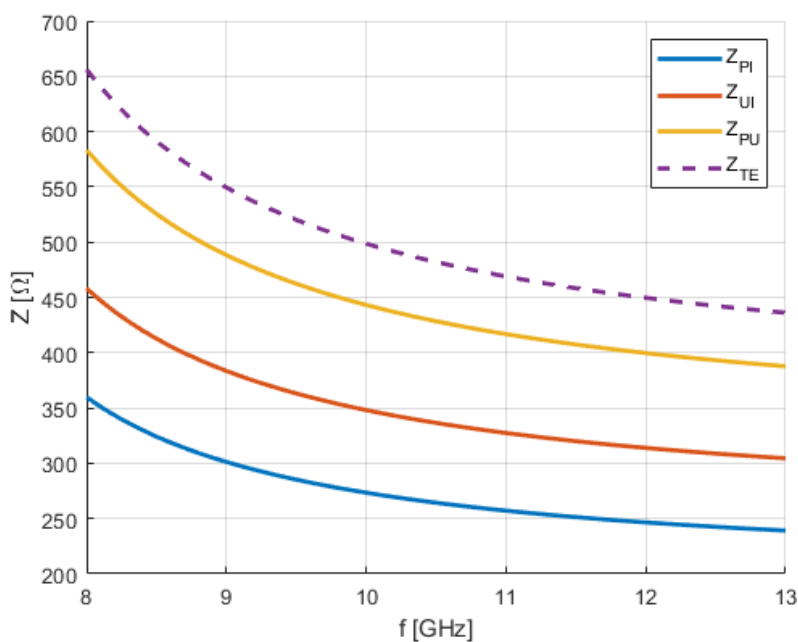
2.11 pro výpočet impedance vlnovodu právě na základě výše uvedených poměrných napětí, proudů a výkonů, respektive na základě rozměrů vlnovodu.

$$Z_{PI} = \frac{2P_r}{I_r^2} = \frac{\pi^2 b}{8 a} Z_{TE} \quad (\Omega) \quad (2.9)$$

$$Z_{UI} = \frac{U_r}{I_r} = \frac{\pi b}{2 a} Z_{TE} \quad (\Omega) \quad (2.10)$$

$$Z_{PU} = \frac{U_r^2}{2P_r} = 2 \frac{b}{a} Z_{TE} \quad (\Omega) \quad (2.11)$$

Tyto vztahy pro stejné rozměry sice udávají různé výsledky, to ovšem není pro další účely této práce podstatné, protože bude využita dále jen jedna z těchto definic poměrově, lze tedy použít kteroukoli z nich. Frekvenční průběhy impedancí dle definic 2.8 až 2.11 pro vlnovod R100 jsou znázorněny na následujícím obrázku 2.6.

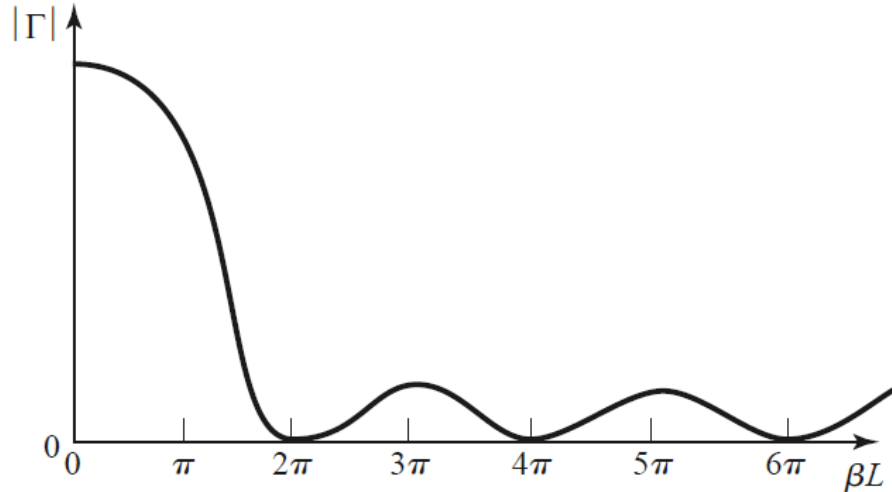


Obrázek 2.6: Frekvenční průběh impedance vlnovodu R100 dle různých definic.

## 2.4 Změna impedance vedení

Skoková změna impedance vedení vytváří nehomogenitu, způsobující nežádoucí odrazy na vedení. Je-li nutné na vedení přejít z jedné impedance  $Z_0$  na jinou impedanci  $Z_L$ , je vhodné tak učinit přes takový impedanční transformátor, který minimalizuje vznik odrazů. Několik takových přizpůsobovacích transformátorů v podobě zužujícího se vedení odvozuje Pozar v [1, kap. 5.8 „Tapered Lines“]. Pro tuto práci je

z uváděných transformátorů vybrán tzv. „Triangular Taper“, jenž má ze všech tří uváděných metod nejnižší a nejvíce plochý průběh amplitudy koeficientu odrazu, v závislosti na délce transformátoru  $L$ . Tento průběh je znázorněn na následujícím obrázku 2.7, z něhož je patrné, že minimálního koeficientu odrazu je dosahováno pokud délka transformátoru  $L$  odpovídá celému násobku vlnové délky.



**Obrázek 2.7:** Amplituda koeficientu odrazu v závislosti na délce transformátoru [1].

Funkce popisující průběh změny impedance vedení je značena  $Z(z)$ , kde  $z$  je vzdálenost od začátku transformátoru a nabývá hodnot od  $0$  do délky transformátoru  $L$ . V krajních hodnotách je  $Z(0) = Z_0$  a  $Z(L) = Z_L$ . Předpis funkce  $Z(z)$  udává rovnice 2.12 [1].

$$Z(z) = \begin{cases} Z_0 e^{2(z/L)^2 \ln(Z_L/Z_0)} & : 0 \leq z \leq L/2 \\ Z_0 e^{[4z/L - (2z^2/L^2) - 1] \ln(Z_L/Z_0)} & : L/2 \leq z \leq L \end{cases} \quad (2.12)$$

## Kapitola 3

### Model struktury

V této kapitole jsou definovány dva základní požadavky na vlastnosti a parametry, které by dle předpokladů měla struktura splňovat. Dále některé zkoumané tvary trojbranů, jež nebyly nakonec vybrány jako nejvhodnější pro realizaci této práce, ale je na nich demonstrováno, z jakého hlediska nebyly vhodné nebo naopak předešly směr dalších modifikací k dosažení výsledného modelu. V poslední části kapitoly je podrobně popsán výsledný model struktury.

#### 3.1 Parametry a požadavky na strukturu

Dle zadání je v celé práci uvažován obdélníkový vlnovod R100 o rozměrech vnitřních stran  $a = 22,86\text{mm}$  a  $b = 10,16\text{mm}$ . Mezní frekvence základního vidu  $TE_{10}$  vlnovodu R100 je  $f_c = 6,557\text{GHz}$ . Pásmo použití tohoto vlnovodu je běžně od 8,2GHz do 12,4GHz. Navrhovaná struktura má být vlnovodným trojbranem, k jehož prvním dvěma branám je připojen měřicí přístroj (generátor a analyzátor), třetí brána je „měřicí“ (testovací). Jako základní tvar takového spojení tří vlnovodů, z něhož lze vycházet, lze uvést obyčejné vlnovodné T. Aby bylo možné využít jako referenční a testovací signál tzv. sudý a lichý vid vybuzení, popsány v druhé kapitole v sekci 2.2, je nezbytné, aby tvar struktury byl symetrický podle osy třetího (testovacího) ramene, respektive podle roviny, která ve středu tohoto ramene dělí strukturu na dvě identické části, z nichž každá obsahuje jedno rameno pro připojení měřicího přístroje.

Prvním sledovaným parametrem u zkoumaných struktur je koeficient odrazu sudého a lichého vidu vybuzení tak, jak je popsán v sekci 2.2. Zapojení modelu je dle obrázku 2.4, porty **1** a **2** jsou připojeny přes hybrid, port **3** je zakončen přizpůsobením (portem). Vzhledem k tomu, že třetí rameno je zakončeno bezodrazově, tak je cílem, aby se jeden vid (referenční) do třetího ramene nešířil vůbec a co nejvíce se odrazil od struktury zpět do portů **1** a **2**, zatímco druhý vid (testovací) se do třetího ramene šířil a odrazil se od struktury pokud možno co nejméně. Jinak řečeno, aby koeficient odrazu jednoho z vidů v tomto zapojení byl ideálně jednotkový v celém frekvenčním pásmu, druhého vidu pak nulový. Tím by mělo být zajištěno, že interference vzniklá po zakončení třetího ramene odrazem, bude způsobena ideálně pouze sečtením vidu referenčního a vidu testovacího, odraženého od zakončení a ne v důsledku jiného, nechtěného, odrazu testovacího vidu od samotné struktury.

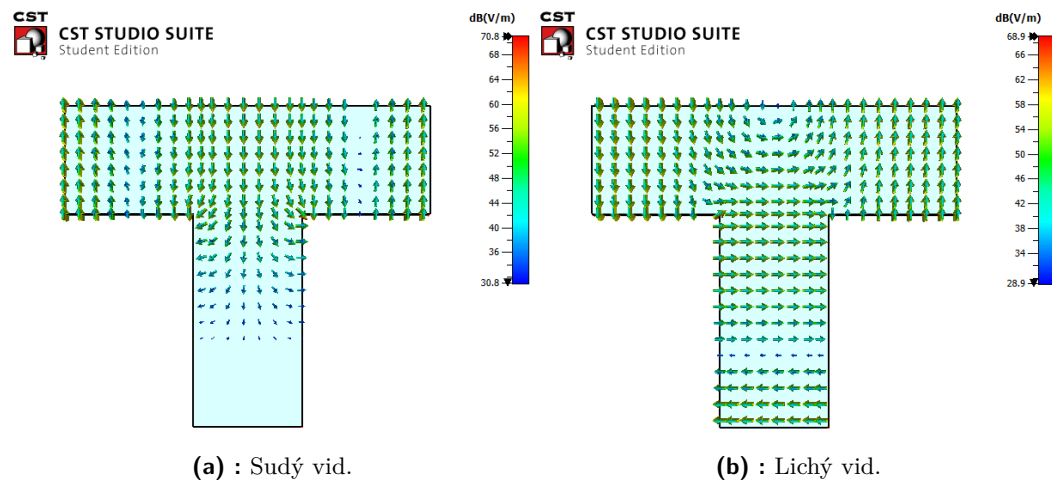
Druhým základním parametrem je rozložení intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  sudého a lichého vidu. Výhodné je takové rozložení, kdy jsou  $\vec{E}$  jednotlivých vidů na sebe kolmé v určitém místě (na ose symetrie) bez ohledu na aktuální úhel fáze. Takové rozložení by mohlo umožnit ovlivňovat pole jednoho vidu tak, aby se pole druhého vidu změnilo jen nepatrně. Této vlastnosti by bylo možné využít pro další modifikaci vyvíjeného senzoru a vylepšit tak jeho vlastnosti. Toto je podrobněji popsáno v kapitole 7, části 7.2.

## 3.2 Zkoumané struktury

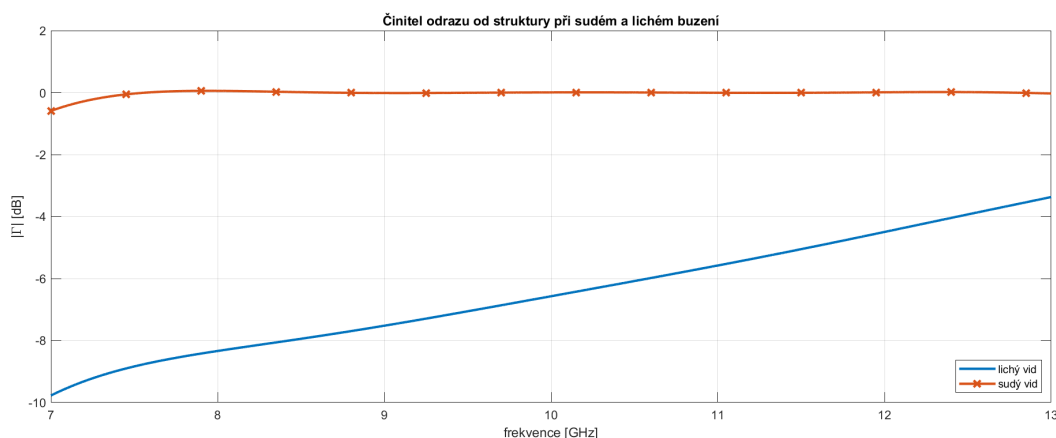
Tato část obsahuje stručný popis některých vybraných modelů z těch, které byly postupně navrženy a simulovány. Návrh výsledného modelu je podrobně popsán v další části 3.3. Pro vytváření a zkoumání modelů bylo využito simulátorů CST Studio Suite a AWR.

### Model A

Model A je jednoduché vlnovodné T v E-rovině, na následujících obrázku 3.1 má tedy struktura šířku ramen  $b$  a výšku  $a$ . Rozložení  $\vec{E}$  pro oba vidy na obrázku 3.1 je v určitých místech na sebe kolmé, nicméně ne ideálně. Zejména v horní části obrázku 3.1b je pozorovatelné nežádoucí natočené  $\vec{E}$ , u jiných modelů níže bude vidět vhodnější rozložení  $\vec{E}$ . Koeficienty odrazu od struktury na obrázku 3.2 nesplňují požadavek na velký amplitudový odstup, respektive koeficient odrazu lichého vidu je silný a s frekvencí poměrně strmě roste. Na konci běžného pásma použití vlnovodu R100, tedy na frekvenci 12,4GHz je rozdíl mezi vidy pouze přibližně 4dB.



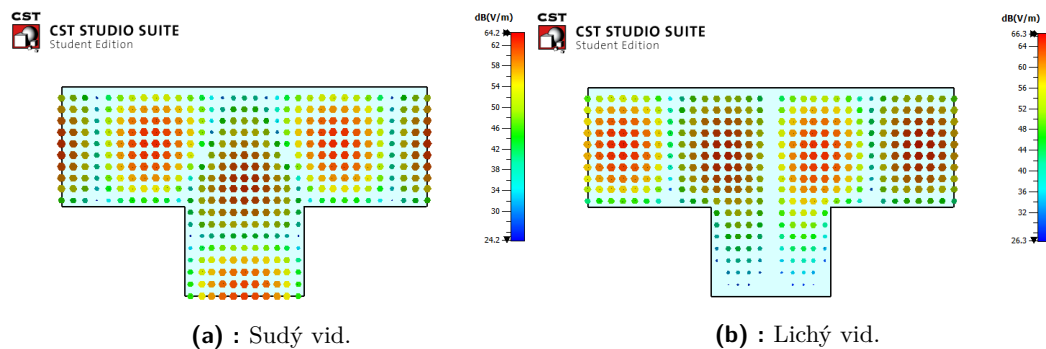
Obrázek 3.1: Rozložení  $\vec{E}$  v modelu A.



Obrázek 3.2: Koefficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu A.

### Model B

Tento model je, obdobně jako předchozí, jednoduché vlnovodné T, ovšem tentokrát v H-rovině, šířka ramen na obrázku 3.3 je tedy  $a$  a naopak výška struktury je  $b$ . Z obrázku 3.3 je ihned patrné, že  $\vec{E}$  má pro oba vidy stejnou orientaci, nespňuje tak zmíněný požadavek a pro účel této práce je nevhodná. Všechny následující modely tak využívají obdobnou orientaci ramen jako model A (tedy různé modifikace geometrie ramen jako model A), protože u všech vytvořených struktur, kde byla použita orientace v rovině H, jako zde, nastává stejný problém s rozložením  $\vec{E}$ , a tak nemá smysl je v této práci uvádět. Na první pohled je také zřejmé nesplnění požadavků na amplitudy koeficientů odrazu.

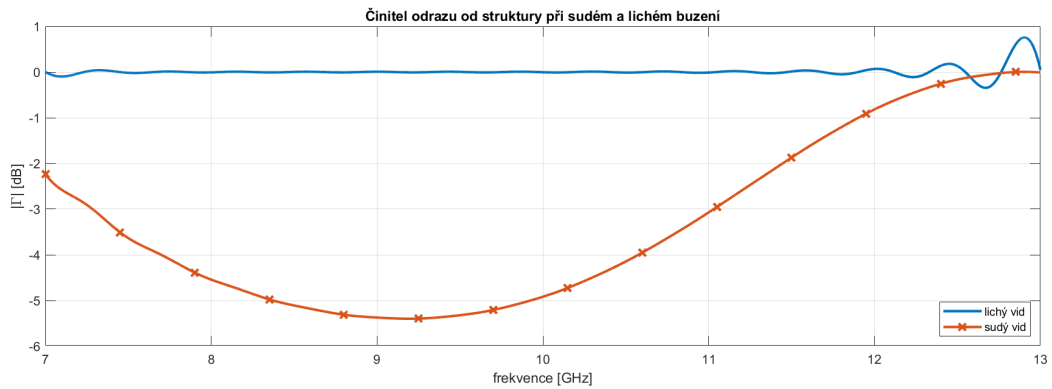


(a) : Sudý vid.

(b) : Lichý vid.

Obrázek 3.3: Rozložení  $\vec{E}$  v modelu B.

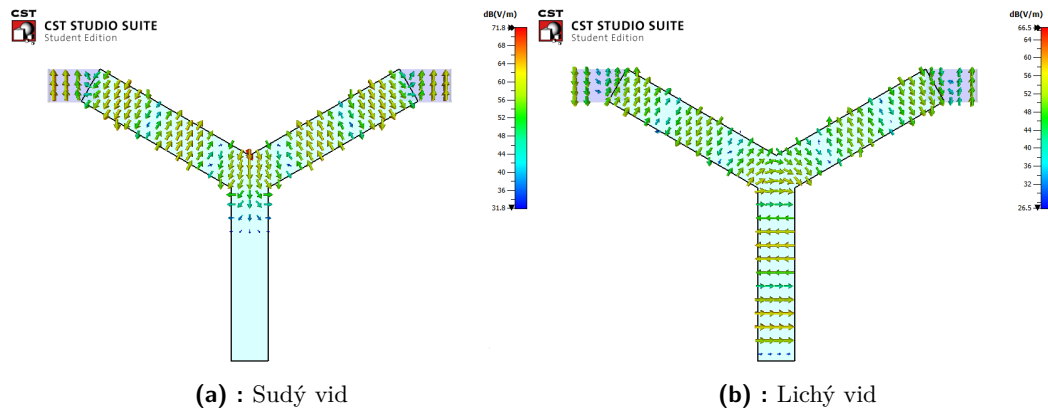




Obrázek 3.4: Koefficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu B.

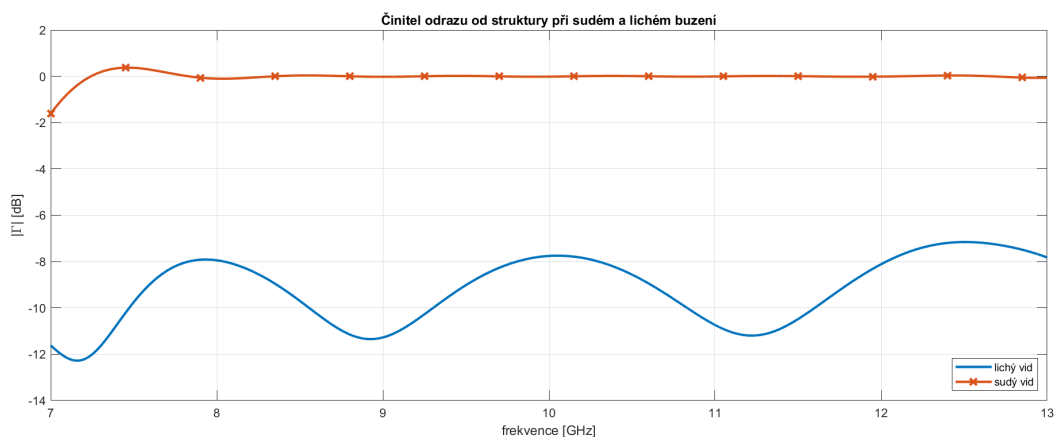
### Model C

Všechna ramena struktury na obrázku 3.5 svírají mezi svými osami úhly  $120^\circ$ . Model je tak symetrický dle os všech tří ramen. Struktura díky rohu na vrcholu diskontinuity splňuje požadavek na orientaci  $\vec{E}$ , nicméně amplituda koeficientu odrazu lichého vidu vykazuje v místech svých maxim odstup menší než 8dB od vidu sudého. Příliš vhodná tak tato struktura není. Úsek modelu zobrazený jinou barvou na konci pravého a levého ramene je ve struktuře pouze kvůli podmínkám simulátoru na umístění portů.



Obrázek 3.5: Rozložení  $\vec{E}$  v modelu C.

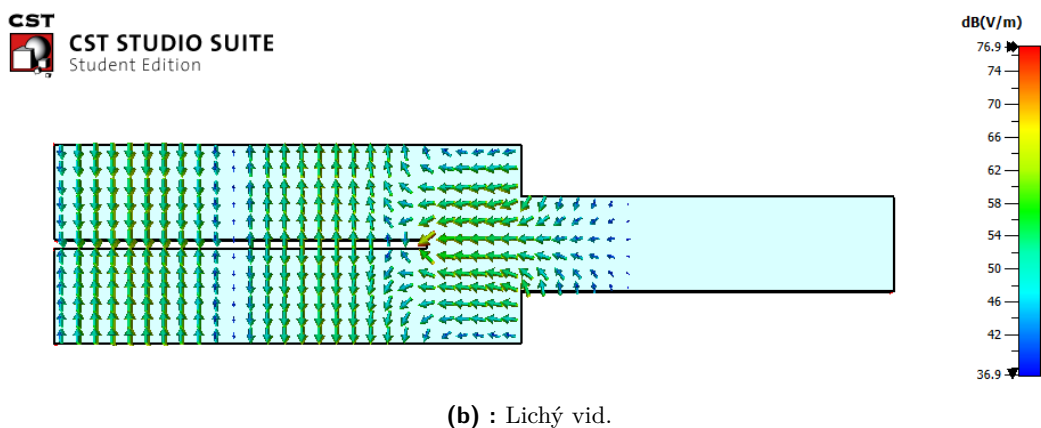
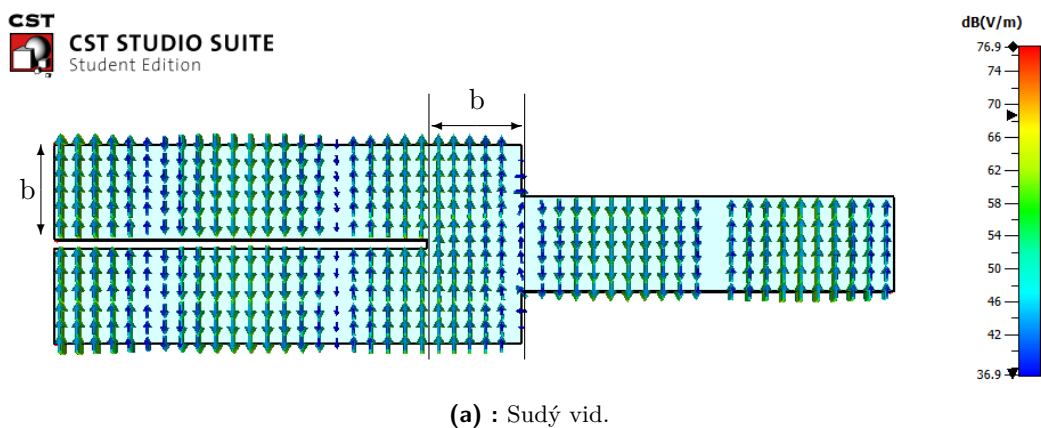
### 3. Model struktury



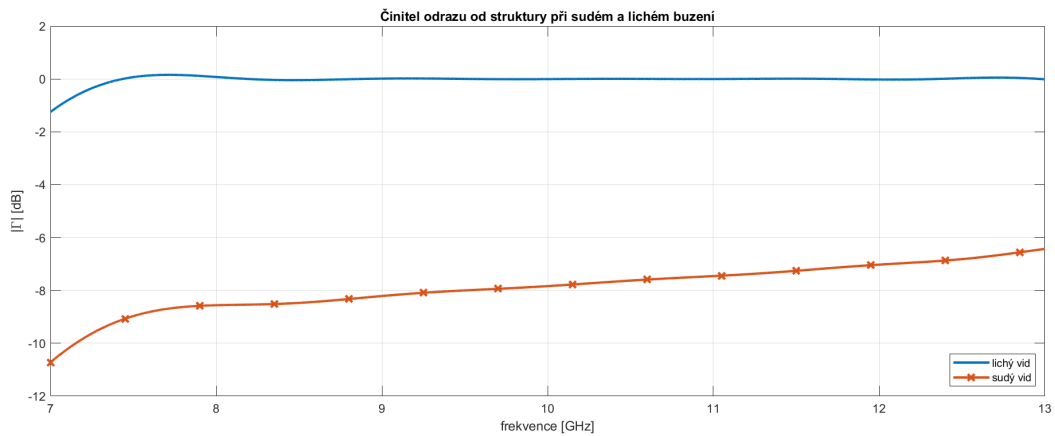
Obrázek 3.6: Koeficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu C.

### Model D

Rozložení  $\vec{E}$  obou vidů tohoto modelu je na sebe kolmé v téměř celé části diskontinuity, zejména v ose symetrie. Toto rozložení napovídá, že úzká hrana (destička, špička apod.) v ose symetrie by mohla zaručit požadované rozložení  $\vec{E}$ . Ovšem koeficient odrazu sudého vidu je stále znatelný.



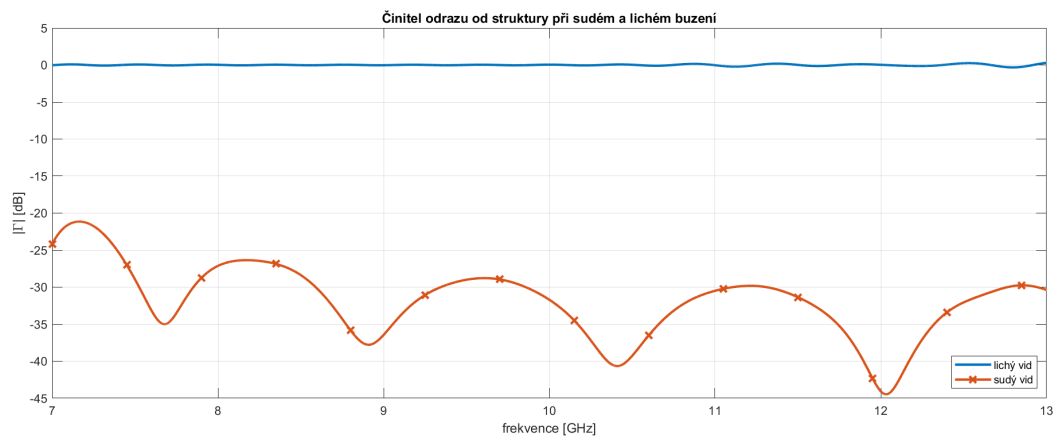
Obrázek 3.7: Rozložení  $\vec{E}$  v modelu D.



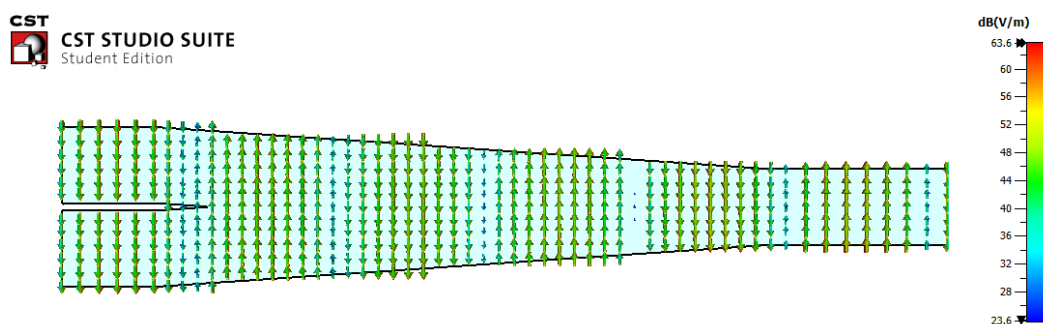
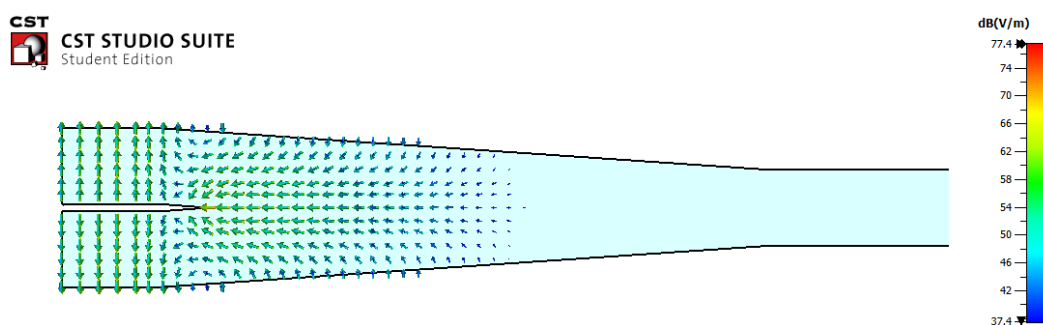
Obrázek 3.8: Koefficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu D.

### Model E

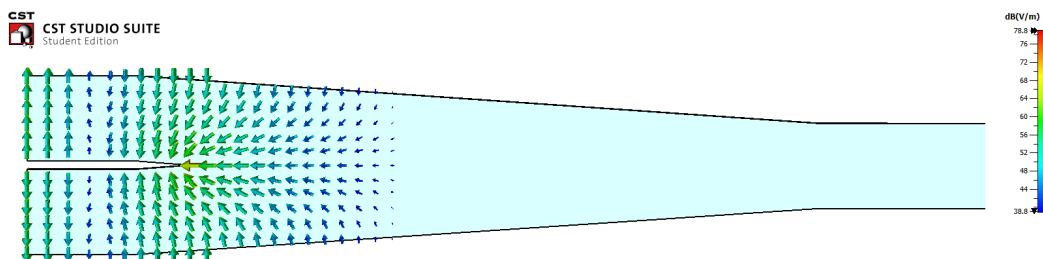
Délka diskontinuity od začátku zkosení vlnovodu až po napojení na opět vodorovný úsek R100 je  $82\text{mm}$ . Jedná se o kompromisní rozměr, kdy kratší diskontinuita má parametry horší, delší zase utlumení odrazu sudého vidu nevylepší natolik, aby mělo smysl ji zvětšovat i jen o pár desítek milimetrů. Rozložení  $\vec{E}$  splňuje velmi dobře požadavek na vzájemnou kolmost obou vidů přesně v ose symetrie, díky „hrotu“ na konci dělicí přepážky mezi rameny. Odraz sudého vidu v celém zobrazeném pásmu je nižší o více než 20dB oproti vidu lichému, v pásmu použití (8,2-12,4GHz) o více než 25dB. Dle základních požadavků se zdá struktura téměř vyhovující, činitel odrazu sudého vidu od samotné struktury lze ještě více potlačit. Například pozvolnějším přechody mezi jednotlivými rameny a diskontinuitou („zakulacením“ rohů) lze snížit odraz sudého vidu na hodnoty menší než -35dB. Ovšem při dalším zkoumání takovéto struktury (zobrazené na obr. 3.10 nebo obdobné jen se zmíněnými pozvolnějším přechody) se objevuje zásadní problém, popsany níže.

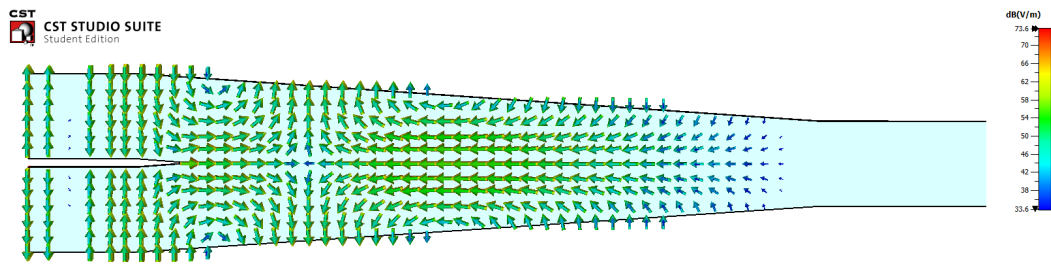


Obrázek 3.9: Koefficient odrazu při sudém a lichém buzení modelu E.

(a) : Sudý vid na  $f=10\text{GHz}$ .(b) : Lichý vid na  $f=10\text{GHz}$ .**Obrázek 3.10:** Rozložení  $\vec{E}$  v modelu E.

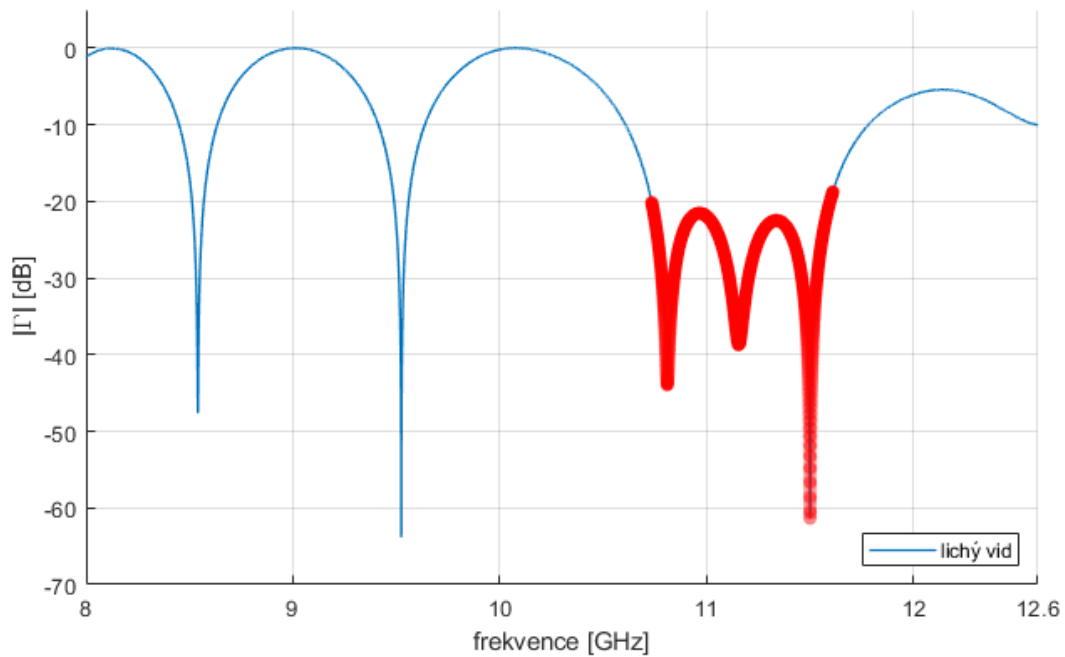
Je třeba poznamenat, že rozložení  $\vec{E}$  na obrázku 3.10b odpovídá frekvenci 10GHz, na jiných frekvencích se lichý vid šíří různě hluboko do struktury směrem k testovacímu ramenu tak, že s rostoucí frekvencí se šíří dále. Tento jev je znázorněn na obrázcích 3.10b, 3.11 a 3.12. Nejvíce zjevný je problém na obrázku 3.12, tedy při frekvenci 12GHz, kdy se lichý vid šíří dle simulace téměř podél celé diskontinuity až k samotnému testovacímu ramenu. V důsledku různé délky šíření se razantně mění délka referenčního kanálu a lichý vid se pravděpodobně odráží na různých místech, ne-li i na několika současně. To způsobuje problémy při sledování samotného interferenčního jevu mezi referenčním a testovacím signálem a tedy i následném určení vzdálenosti (problém při interferenci je znázorněn na obrázku 3.13).

**Obrázek 3.11:** Lichý vid modelu E na  $f=8\text{GHz}$ .



Obrázek 3.12: Lichý vid modelu E na  $f=12\text{GHz}$ .

Frekvenční průběh koeficientu odrazu od struktury, zobrazený na následujícím obrázku 3.13, je získán po připojení portů k ramenům **1** a **2** bez hybridu přímo ke struktuře. Testovací rameno je prodlouženo úsekem vlnovodu délky 14mm a zakončeno zkratem. Červeně je zvýrazněna problematická část ve frekvenčním průběhu. V kapitole 4 je zobrazeno konkrétní zapojení pro sledování tohoto jevu a frekvenční průběhy interference bez tohoto problematického jevu.

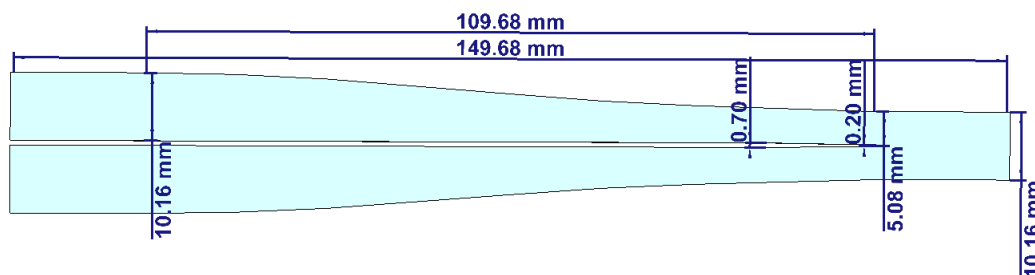


Obrázek 3.13: Koeficient odrazu modelu E při interferenci mezi test. a ref. signálem.

Vzhledem k jinak dobrým základním parametrům se nabízí hledat takovou modifikaci modelu D, jež eliminuje výše popsaný problém v důsledku rozšíření vlnovodu, ale zároveň zachová nebo ještě vylepší potlačení odrazu sudého vidu. Taková struktura je podrobně rozebrána v následující části 3.3 a je konečným řešením, navrženým a vyrobeným, v rámci této diplomové práce.

### 3.3 Finální model

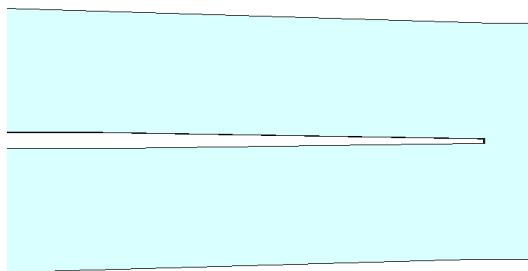
Z výše uvedených požadavků na strukturu a problémů u předešlých modelů, se nabízí vyzkoušet možnost prodloužení dělicí přepážky mezi rameny **1** a **2** až do místa samotného ramene **3**. První dvě ramena postupně zužovat až bude šířka celé struktury rovna šířce třetího ramene ( $b = 10.16\text{mm}$ ) v místě ukončení přepážky (respektive snižovat, vzhledem k orientaci vlnovodů, tedy měnit menší rozměr vlnovodu  $b$  (výšku)). Pokud se nebude měnit šířka struktury po sloučení ramen **1** a **2**, mohla by být omezena změna délky šíření referenčního (lichého) vidu. Zároveň je cílem minimalizovat odraz od struktury pro testovací (sudý) vid. Obecně je odraz na vedení způsoben skokovou změnou impedance, neboli nepřizpůsobením a je tedy žádoucí nahradit skokovou změnou impedance změnou postupnou, jež minimalizuje odraz. Takový přechod mezi impedancemi, který minimalizuje odraz, se často označuje jako impedanční transformátor. V druhé kapitole této práce, v části 2.3.1, jsou uvedeny vztahy pro výpočet impedance vlnovodu na základě jeho rozměrů (výšky i šířky), lze tedy změnou jednoho rozměru vlnovodu změnit jeho impedanci, a naopak z požadované impedance určit potřebný rozměr. V téže kapitole, v části 2.4, je popsán také jeden konkrétní impedanční transformátor, jehož funkce průběhu změny impedance je použita pro tvar diskontinuity navržené struktury, jejíž podoba se základními rozměry je na následujícím obrázku 3.14.



Obrázek 3.14: Rozměry finálního modelu.

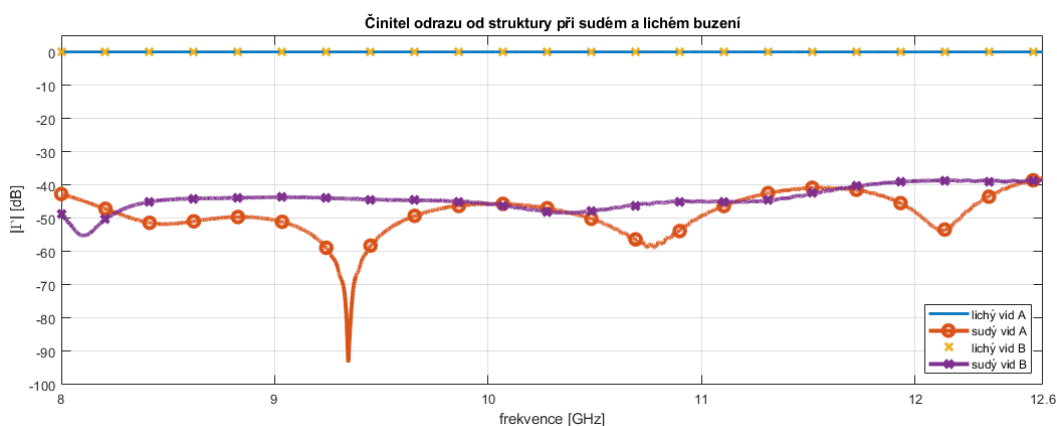
Délka samotného transformátoru (diskontinuity) je  $L = 109.68\text{mm}$ , což je vzdálenost od místa, kde se ramena **1** a **2** začínají zužovat, až do místa kde se spojí do ramene **3**, opět o rozměrech R100. Celý model je prodloužením transformátoru o 20mm na každém rameni vlnovodem R100. Transformátor, popsáný v části 2.4, není primárně určen pro vlnovodné vedení, jež má impedanci silně frekvenčně závislou. Zároveň se struktura bude využívat v určitém frekvenčním pásmu a nelze tak optimalizovat impedanční transformátor na jednu konkrétní frekvenci. Proto délku  $L$  výsledné struktury nelze jednoduše odvodit přímo z obrázku 2.7, ale je optimalizována po provedení simulací s různými délkami a sledování koeficientu odrazu testovacího vidu. Tyto délky odpovídaly celým násobkům vlnových délek na významných frekvencích (např. kritická frekvence, počáteční, konečná a střední frekvence pásma použití). Výsledná délka  $L$  odpovídá trojnásobku vlnové délky na frekvenci 8,2GHz, což je právě počáteční frekvence běžně používaného pásma.

Přepážka mezi rameny **1** a **2** je široká 0,7mm v téměř celé své délce, až necelých 11mm od konce přepážky (přesněji v poslední desetinné impedančního transformátoru) se zužuje na konečnou šířku 0,2mm. Detail zakončení přepážky je na obrázku 3.15. V ideálním případě by se přepážka zužovala do špičky (respektive nulové šířky), ovšem vzhledem k možnému snadnému poškození ostré špičky a přesnosti výroby je vhodné zvolit robustnější řešení. Šířka přepážky 0,7mm vychází z dostupné součástky, jež přibližuje dva vlnovody do těsné blízkosti v požadované orientaci (součástka je blíže popsána a zobrazena v kapitole 6).



**Obrázek 3.15:** Detail spoje ramen.

Tato varianta, kdy přepážka zůstává na svém konci v určité šířce, ještě změní šířku ramen **1** a **2** a tím i jejich impedanci oproti hodnotám určeným výpočtem impedančního transformátoru (viz dále) a tedy i koeficient odrazu. Z tohoto důvodu jsou na následujícím obrázku 3.16 vyneseny koeficienty odrazu obou vidů určené simulací, a to jak pro variantu s přepážkou končící ostrou špičkou (A), tak i pro variantu končící šířkou 0,2mm (B). Je zřejmé, že koeficient odrazu sudého vidu je u varianty B o něco horší, nicméně stále zůstává v téměř celém frekvenčním pásmu pod hodnotou -40dB, což je oproti jiným modelům, uvedeným výše, podstatně lepší a pro účely této práce dostačující hodnota. Zakončení přepážky variantou B je tedy kompromisním řešením.

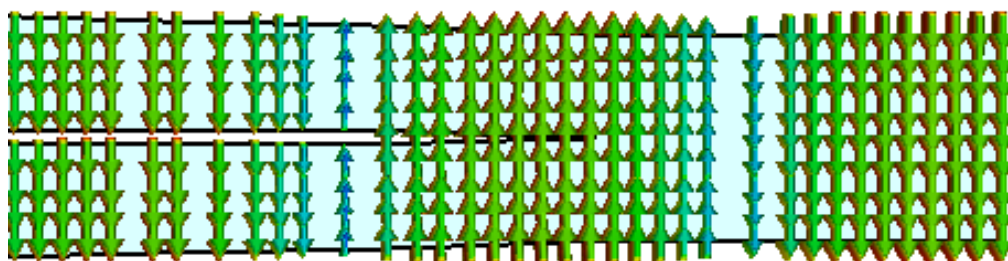


**Obrázek 3.16:** Koeficient odrazu při sudém a lichém buzení finálního modelu.

Přesný tvar, respektive šířka obou ramen v rámci impedančního transformátoru vychází z funkce popsané rovnicí 2.12. Do rovnice je za  $L$  dosazena délka transformátoru (109.68mm), za  $Z_L$  impedance spočtená dle vztahu 2.9 pro plné rozměry ( $a, b$ ) vlnovodu R100 a frekvenci 10,3GHz (střed používaného pásma, ale volba frekvence nikterak neovlivní výsledné šířky ramen). Za  $Z_0$  je dosazena polovina  $Z_L$ , neboli impedance ze vztahu 2.9 při polovičním rozměru  $b$ . Poslední proměnná  $z$  je pozice v rámci délky transformátoru, tedy body v nichž je výpočtem určena impedance ramene, a tak i rozměr  $b$ . Těchto bodů je definováno 11 (od vzdálenosti  $0L$ , do vzdálenosti  $1L$ , s krokem  $L/10$ ) a definují křivku stěny transformátoru v simulačním programu CST. Šířka (a impedance) v ostatních místech je získána prostým proložením skrze tyto definované body zmíněnou křivkou. Hledaný rozměr ramene, v libovolném místě  $z$ , se při znalosti impedance  $Z(z)$  v daném místě určí snadno, vyjádřením ze vztahu 2.9:

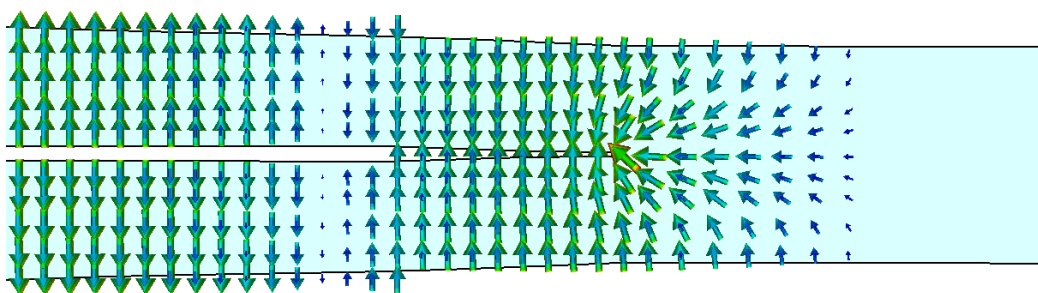
$$b(z) = \frac{8a Z(z)}{\pi^2 Z_{TE}} \quad (3.1)$$

Základním sledovaným parametrem je také rozložení intenzity elektrického pole. Pro oba vidy v okolí spojení všech tří ramen je vykresleno na následujících obrázcích 3.17 až 3.19. Je patrné, že rozložení  $\vec{E}$  splňuje stanovený požadavek na vzájemnou kolmost sudého a lichého vidu v ose symetrie. Při porovnání  $\vec{E}$  lichého vidu na frekvenci 8GHz a 12GHz (obr. 3.18 a 3.19) je sice stále patrné šíření lichého (referenčního) vidu dále od spojení ramen s rostoucí frekvencí, ovšem je třeba vzít v potaz, že celková vzdálenost mezi koncem přepážky a koncem struktury (koncem ramene **3**) je 20mm. Na frekvenci 12GHz se tak oproti 8GHz šíří lichý vid pouze o několik málo milimetrů dál (u modelu D (3.2) to byla více než polovina délky diskontinuity, tedy několik centimetrů). Při interferenčním jevu tak již nevzniká problém popsáný u modelu D (3.2).

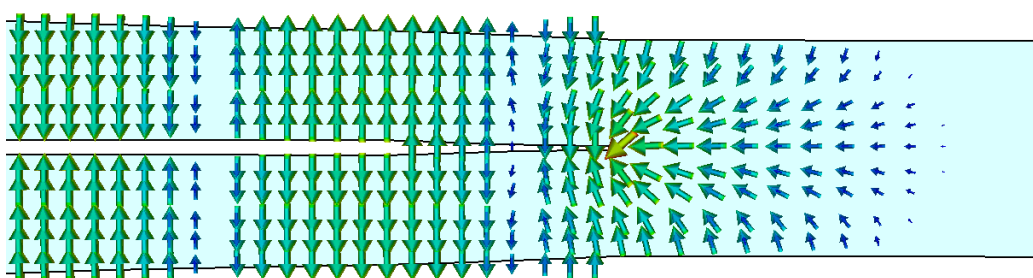


Obrázek 3.17: Rozložení  $\vec{E}$  sudého vidu ve výsledném modelu.





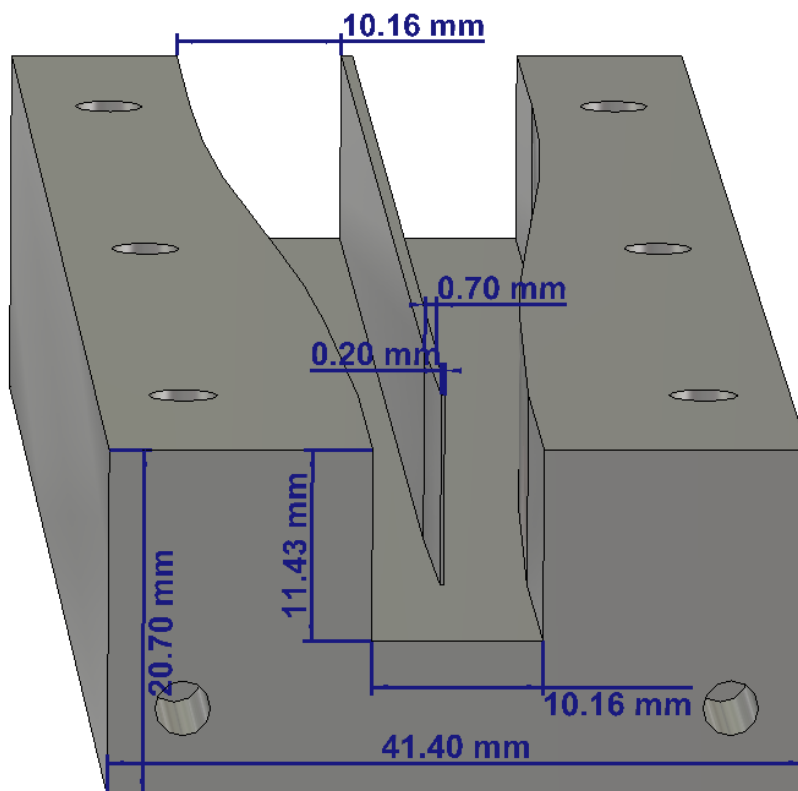
Obrázek 3.18: Rozložení  $\vec{E}$  lichého vidu ve výsledném modelu na  $f=8\text{GHz}$ .



Obrázek 3.19: Rozložení  $\vec{E}$  lichého vidu ve výsledném modelu na  $f=12\text{GHz}$ .

### Model pro výrobu

Pro účely výroby senzoru na stroji byl vytvořen 3D model struktury, rozdělený na dvě poloviny na výšku. Tyto dvě poloviny se liší pouze v otvorech pro šrouby, jimiž se obě části spojí pevně dohromady. Vnitřní rozměry, tvořící vlnovody, a délka hranolu odpovídají rozměrům uvedeným výše v této části 3.3. Pouze rozměr  $a = 11,43\text{mm}$  je tedy pro každou část poloviční. Vnější rozměry hranolu nejsou příliš podstatné, ovšem důležité je umístění závitů pro šrouby na stranách, kde se připojí úseky vlnovodů. Toto umístění odpovídá rozměrům na běžně dostupných přírubách vlnovodů R100. Vnější rozměry hranolu tak v návrhu kopírují také rozměry příruby. Otvory odpovídají rozměrům závitového šroubu M4, který se u vlnovodů R100 často používá pro spojování přírub jednotlivých dílů.

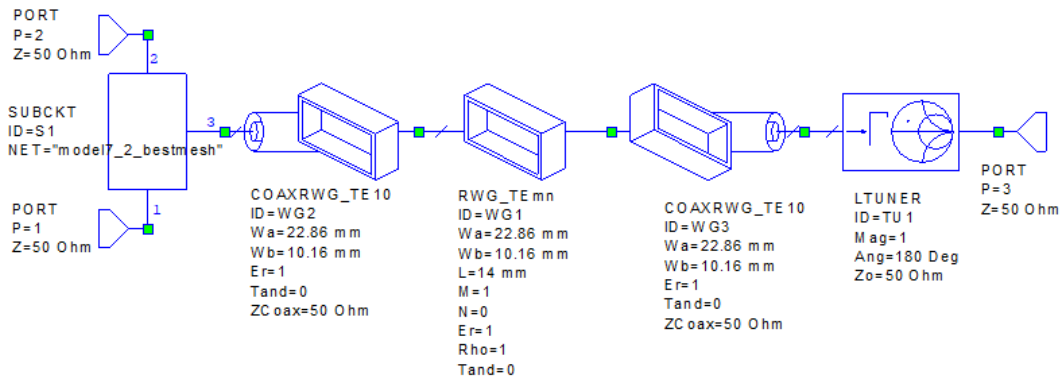


Obrázek 3.20: Model pro výrobu jedné poloviny senzoru.

# Kapitola 4

## Simulace

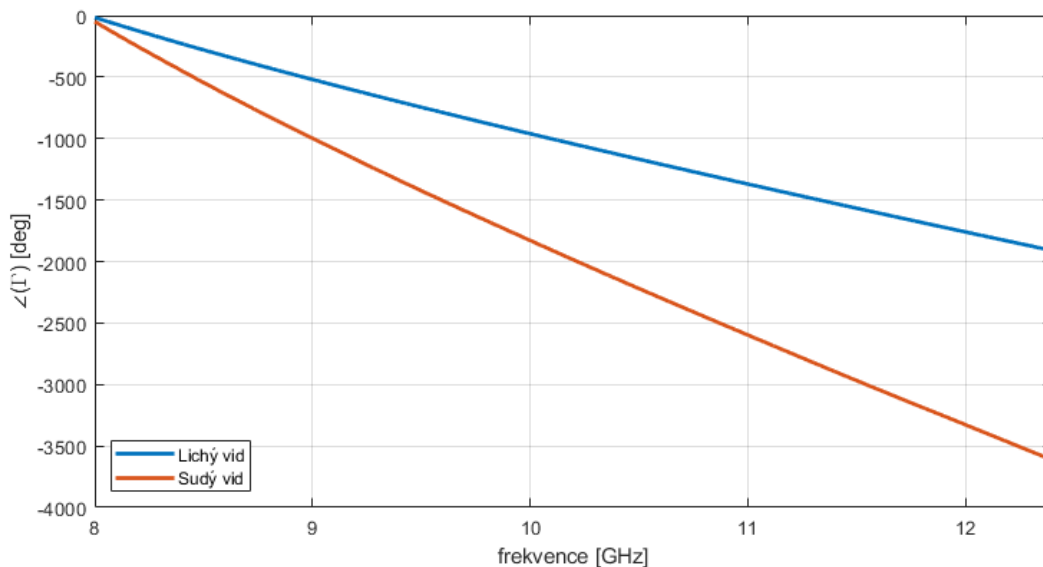
Pro účely dalších podrobnějších simulací senzoru, byly z 3D simulátoru elektromagnetického pole CST vyexportovány s-parametry struktury, pro jednodušší zpracování přepočítané do impedance  $50\Omega$ . V podobě podrobných s-parametrů byl trojbran dále zkoumán v simulačním prostředí AWR. V simulátoru bylo využíváno jak zapojení zobrazené na následujícím obrázku 4.1 pro simulování interferenčního jevu sudého a lichého vidů, tak obdobné zapojení pouze s připojením portů 1 a 2 přes ideální hybrid, stejně jako na obrázku 2.4 pro sledování vlastností sudého a lichého vidu zvlášť. Na testovacím rameni je v případně znázorněném na obrázku 4.1 připojen přechod z koaxiálního kabelu, simulující vedení o impedanci  $50\Omega$  (do které jsou přepočítány s-parametry struktury), úsek vlnovodu, jehož délka určuje vzdálenost odrazné plochy, druhý přechod vlnovod-koaxiální kabel a LTUNER, kterým lze nastavit libovou amplitudu a fázi koeficientu odrazu. Celý úsek je zakončen přizpůsobením (portem), pro eliminaci vzniku nežádoucích (a nerelevantních) odrazů.



Obrázek 4.1: Základní zapojení pro simulování interference sudého a lichého vidu.

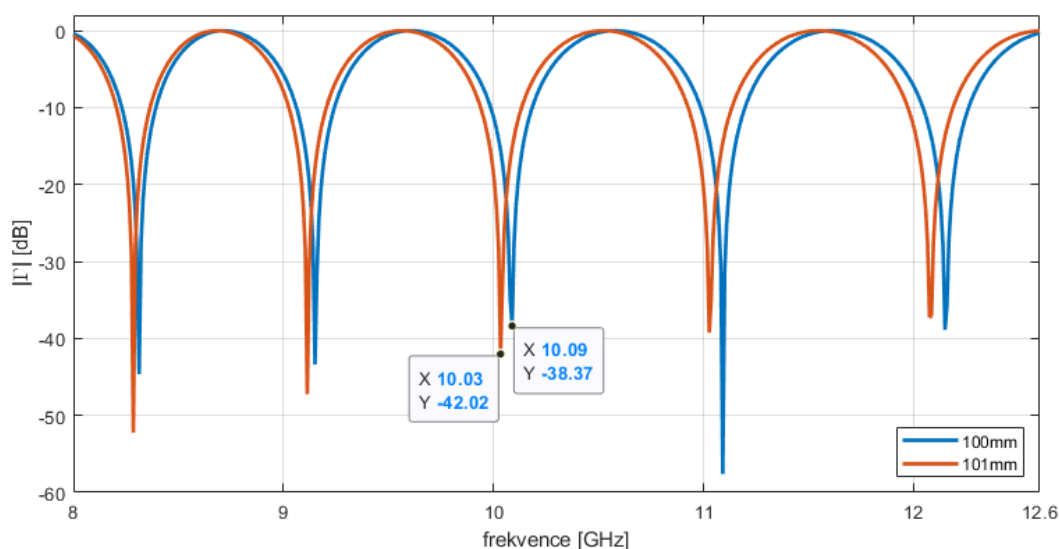
Frekvenční průběhy na následujícím obrázku 4.2 zobrazují změnu fáze s frekvencí, zvlášť pro koeficient odrazu sudého a lichého vidu. Pro zobrazení těchto parametrů bylo použito simulované zapojení s ideálním hybridem, na testovacím rameni zakončené odrazem, jenž odpovídá zkratu (jednotková amplituda a fáze  $180^\circ$ ) ve vzdálenosti 100mm. Obě křivky mají jednoznačně jiný sklon, fáze obou koeficientů odrazu se tak s frekvencí mění jinak „rychle“. Z toho je patrné, že na určitých frekvencích se fáze obou koeficientů budou lišit přesně o lichý násobek  $180^\circ$ . Na těchto frekvencích se oba vidy nachází v protifázi a při zapojení bez hybridu se tak

odečtou a vznikne interferenční minimum. Na jiných frekvencích se naopak fáze koeficientů liší o sudý násobek  $180^\circ$ , v tom případě se vlny sečtou ve fázi a vznikne interferenční maximum. Jak konkrétně vypadá uvedená interference pro zkrat v této vzdálenosti zobrazuje obrázek 4.3.



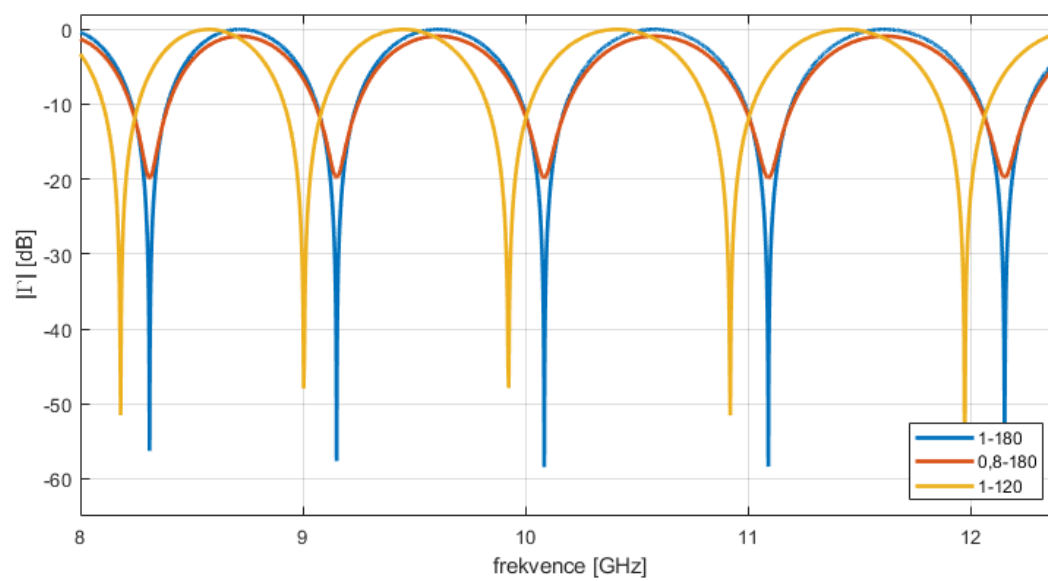
**Obrázek 4.2:** Frekvenční závislost fáze koeficientu odrazu sudého a lichého vidu při zakončení zkratem ve vzdálenosti 100mm.

Zapojení dle schématu na obr. 4.1 bylo využito pro simulace na dalších dvou grafech. Obrázek 4.3 zobrazuje frekvenční průběhy koeficientu odrazu od senzoru při zakončení testovacího ramene zkratem, ve dvou mírně odlišných vzdálenostech (100mm a 101mm). Z frekvenční vzdálenosti minim je možné si udělat představu o citlivosti senzoru na změnu vzdálenosti odrazu. Zde je patrné, že v okolí 10GHz a vzdálenosti 100mm se při změně vzdálenosti o 1mm posune označené frekvenční minimum přibližně o 60MHz. Také lze pozorovat, že na vyšších frekvencích je citlivost (změna frekvence minima) vyšší než na frekvencích nižších.



**Obrázek 4.3:** Frekvenční průběh interference při zakončení zkratem v různých vzdálenostech.

Závislost změny frekvenčního průběhu interference (koeficientu odrazu od senzoru) při změně nastavení koeficientu odrazu, jímž je zakončeno testovací rameno, je znázorněna na další obrázku 4.4. Odraz je simulován pro tři případy vždy ve stejné vzdálenosti. Modrý průběh je zde „referenční“, vznikl po zakončení testovacího ramene zkratem. Červený průběh odpovídá zakončení odrazem také s fází jako zkrat ( $180^\circ$ ), ale s nižší amplitudou (0,8). Protože se testovací vid vrací zpět do senzoru s výrazně nižší amplitudou než má vid referenční, tak při sečtení v protifázi nedochází k destruktivní interferenci (amplituda výsledného signálu není nulová) a interferenční minimum tedy není tak hluboké ani ostré. Dokonalá destruktivní interference, při které byla amplituda výsledného signálu přesně nulová, samozřejmě nenastává ani při zakončení zkratem, protože určité ztráty vykazuje každý úsek vedení. Ovšem minimalizováním ztrát se minimalizuje i amplituda výsledného signálu v interferenčním minimu. Poslední, žlutý průběh je získán po zakončení testovacího ramene odrazem s jednotkovou amplitudou jako má zkrat, ale jinou fází ( $120^\circ$ ). Amplituda výsledného signálu není postižena. Velká rozdílnost v hloubce minim žlutého a modrého průběhu je způsobena hustotou a rozložením bodů, v nichž je signál spočítán. Minima žlutého průběhu nevycházejí tak dobře na frekvenční body, v nichž se počítá, jako u průběhu referenčního. Změna fáze ovšem patrně posouvá interferenční průběh ve frekvenci, protože se testovací signál odráží s jinou fází. To je třeba při samotném určování vzdálenosti ošetřit vhodnou kalibrací, respektive referenčním měřením, pokud není znám přesný koeficient odrazu, jímž je testovací rameno zakončeno (koeficient odrazu kapaliny, jejíž výška hladiny je určována).



**Obrázek 4.4:** Frekvenční průběhy interference při zakončení odrazy s rozdílnou amplitudou nebo fází.

# Kapitola 5

## Určení vzdálenosti a kalibrace

Pro určení vzdálenosti z frekvenčního průběhu koeficientu odrazu od senzoru byly v rámci této práce používány dvě metody. První metoda vychází z výpočtu představeném v článku [3], druhá metoda je založená na porovnávání naměřených hodnot s uměle vytvořeným modelem senzoru v simulačním prostředí. Obě tyto metody vyžadují pro jednoznačné určení neznámé vzdálenosti odrazu alespoň dvě interferenční minima, každá z metod z odlišných důvodů, vyplývajících z popisu níže.

Počet interferenčních minim ve frekvenčním pásmu se mění v závislosti na vzdálenosti odrazu. Čím menší je vzdálenost, tím méně je v pásmu minim a naopak. Zvyšováním vzdálenosti se jednotlivá interferenční minima posouvají směrem k nižším frekvencím. Pokud je vzdálenost odrazu 11mm a méně, je ve frekvenčním pásmu pouze jedno (první) minimum. Při větší vzdálenosti se objevuje druhé minimum, ovšem při 15mm se první minimum posune již pod hranici 8GHz, mimo sledované frekvenční pásmo. Tím je v pásmu opět pouze jedno minimum a obecně při neznalosti vzdálenosti nebo jiných okolností nelze určit zda se jedná o první nebo druhé minimum. Třetí se objevuje při vzdálenosti odrazu 26mm a při větších vzdálenostech jsou v pásmu vždy již alespoň dvě interferenční minima. Minimální, jednoznačně měřitelná vzdálenost odrazu je tedy 26mm, při menší vzdálenosti je určení nejednoznačné. Důvod nejednoznačnosti vyplývá dále z popisu každé metody.

### 5.1 Určení vzdálenosti výpočtem

Tato metoda určuje vzdálenost výpočtem z frekvencí, na nichž se nacházejí interferenční minima. Metodu představili autoři v článkách [3, 4] a odvodili vztahy pro výpočet. Jediným, autory odvozeným, vztahem použitým pro účely této práce je následující rovnice, ovšem v mírně modifikované podobě, jež se při vytváření a testování algoritmu pro výpočet pro vyvinutý senzor osvědčila o něco více.

$$f_k = \frac{v_f k}{2(l_1 - l_2)} \quad (\text{Hz}) \quad (5.1)$$

Kde  $k$  je pořadí minima (a celé kladné číslo),  $f_k$  je frekvence minima,  $l_1$  délka referenčního kanálu a  $l_2$  hledaná délka testovacího kanálu. Frekvence minima je





## ■ 5.2 Určení vzdálenosti porovnáním s modelem

Metoda porovnání naměřeného frekvenčního průběhu s modelem je, co se zdrojového kódu týče, kratší a jednodušší. Ovšem je třeba mít uložený v paměti podrobný model senzoru. Modelem jsou myšleny soubory s nasimulovanými frekvenčními průběhy koeficientu odrazu od senzoru, v celém pásmu měřených vzdáleností a s takovým krokem, který má být při měření rozlišován. Je-li tedy požadováno měřit například v rozsahu 30cm s rozlišením 1mm, je třeba mít uloženo 300 souborů s nasimulovanými frekvenčními průběhy ve 300 různých vzdálenostech. Skript implementující tuto metodu pouze načte soubor s naměřenými daty a postupně provede korelaci s daty ze všech souborů modelu. Soubor modelu s daty která jsou „nejpodobnější“ naměřeným, určuje hledanou vzdálenost. Zdrojový kód je dostupný v příloze [B.2](#).

## Kapitola 6

### Experimentální měření

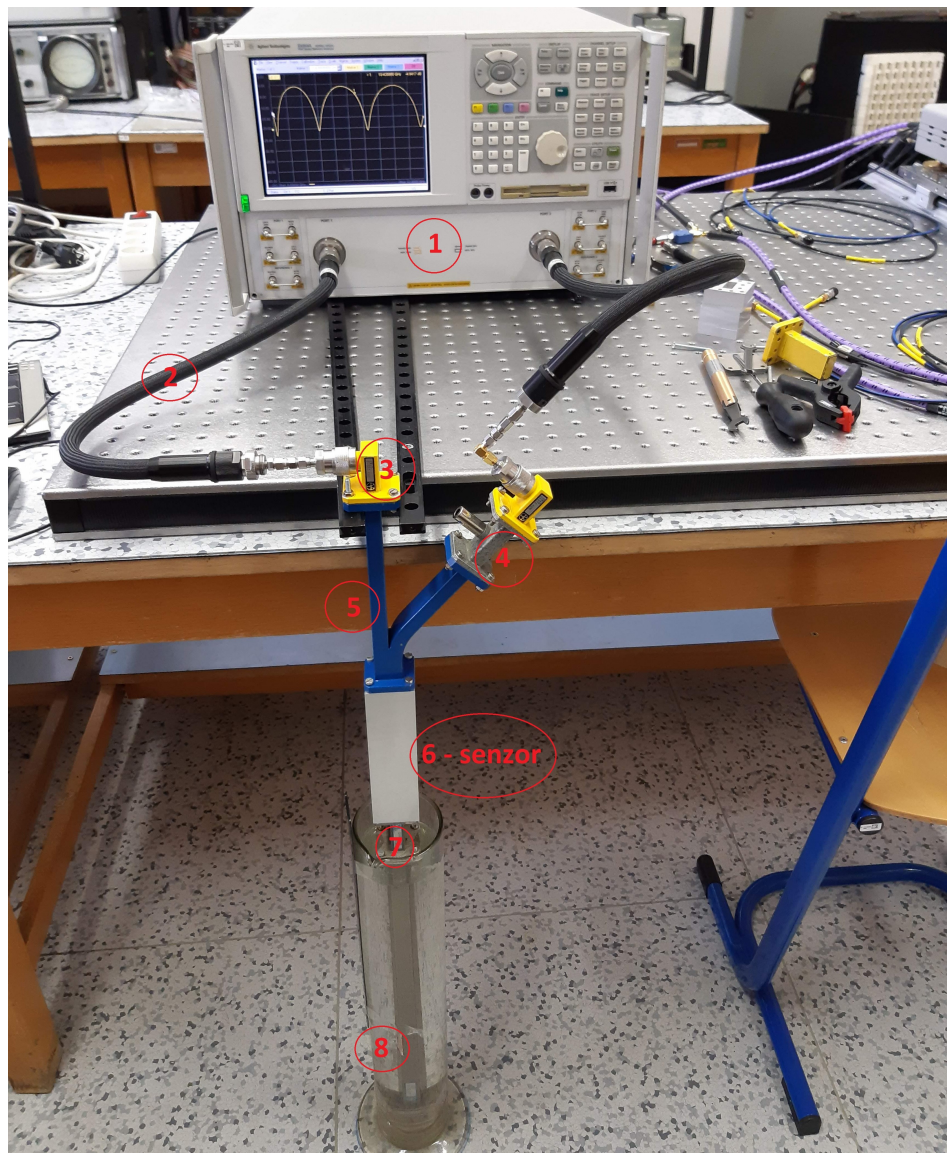
Pomůcky použité pro realizaci experimentálního měření jsou vypsány v následujícím seznamu (vyjma věcí, potřebných pro sestavení měřicí soustavy dohromady). Uspořádání je zobrazeno a očíslováno dle seznamu na obrázku 6.1.

1. Vektorový analyzátor *Agilent Technologies E8364A*.
2. Koaxiální testovací kabely (2x) *Agilent 85133*.
3. Přejechod z kabelu na vlnovod R100 (2x).
4. Úsek vlnovodu (5cm) s otevřeným otvorem na širší stěně (kvůli volnému pohybu vzduchu z/do struktury při změně hladiny uvnitř vlnovodu).
5. Konstrukce svádějící dva vlnovody R100 do těsné vzájemné blízkosti, na konci konstrukce jsou vlnovody rozděleny stěnou o šířce 0,7mm.
6. Navržený interferenční senzor vyrobený z duralu.
7. Úseky vlnovodu R100, připojené k testovacímu rameni senzoru (1x 5cm, 1x 40cm).
8. Odměrný válec 2000ml.
9. Další pomůcky: přesně definované úseky vlnovodného vedení a vlnovodný zkrat pro kalibraci a některá měření, měřidlo vzdálenosti (pravítko, metr), menší odměrný válec, injekční stříkačka, voda (kohoutková).

Kalibrace vektorového analyzátoru byla provedena metodou TRL v rovině napojení vedení od analyzátoru na konstrukci svádějící vedení k sobě (č. 5). Postupně tak byl kalibrován zkrat na výstupu části č. 3, poté části č. 4, přímé spojení obou vedení v této rovině a spojení přes krátký úsek vlnovodu. Použitý kalibrační kit byl v analyzátoru definován pro frekvenční pásmo 7-12,4GHz. Samotné měření bylo tedy provedeno v pásmu 8-12,4GHz, protože simulace senzoru byly uvažovány právě až od frekvence 8GHz. Počet vzorků ve frekvenčním pásmu byl nastaven na 1601.

Při měření byl nejprve na testovací rameno senzoru připojen pouze úsek vlnovodu o délce 5cm, k němuž se přidávaly další krátké úseky vedení, jež se zakončovaly

zkratem. Následně byl k uvedenému 5cm úseku připojen další vlnovod o délce 40cm a zakončen také zkratem. Takto byly získány frekvenční průběhy s-parametrů, pro zakončení zkratem ve vzdálenostech 50-80mm (s krokem 5mm) a vzdálenosti 450mm. Tyto průběhy velmi dobře poslouží pro porovnání reálného senzoru s nasimulovaným modelem. Následně se testovací rameno „pověsilo“ nad odměrný válec, na jehož boku bylo připevněno pravítko, s nulou co možná nejpřesněji umístěnou ve výšce spojení testovacího výstupu senzoru a úseku vlnovodu (spojení částí č. 6 a č. 7). Do odměrného válce byla následně postupně přilévána voda a v několika bodech byly uloženy frekvenční průběhy s-parametrů, dále byla odečtena vzdálenost hladiny od senzoru na pravítku a hodnota objemu na stupnici válce (jež nebyla totožná s objemem vody ve válci, protože objem válce byl zmenšen úsekem vlnovodu uvnitř).



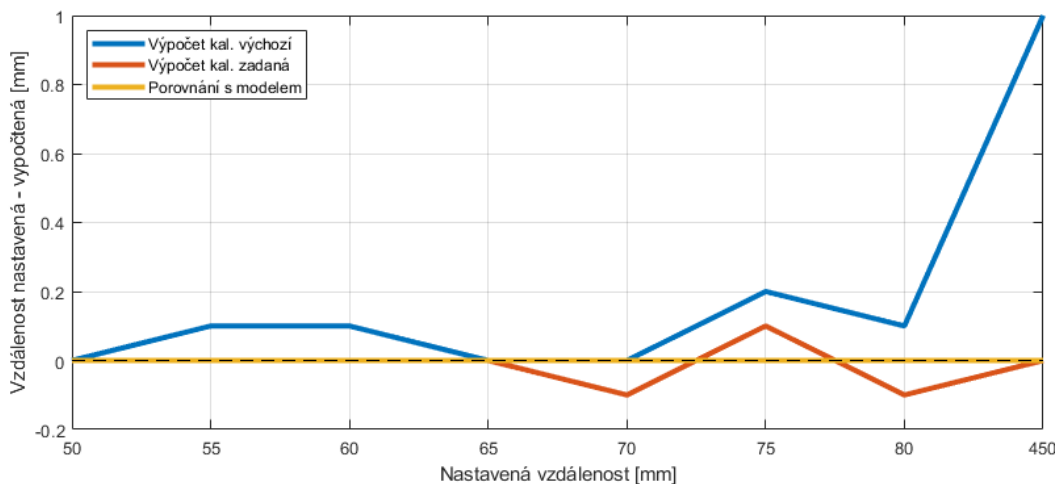
Obrázek 6.1: Uspořádání experimentálního měření.

## 6.1 Vyhodnocení naměřených dat

Prvním vyhodnocovaným měřením je zakončení testovacího ramene zkratem v různých vzdálenostech. Tyto vzdálenosti jsou definovány poměrně přesně, protože je známa délka použitých vedení, na jejichž konec byl přiložen vlnovodný zkrat. V následující tabulce 6.1 jsou v prvním sloupci uvedeny nastavené vzdálenosti zkratu, v druhém sloupci vypočtené vzdálenosti z frekvenčních průběhů metodou výpočtu (sekce 5.1) za použití výchozích (předdefinovaných) hodnot korekcí, obsažených v parametru  $l_1$  (viz konec části 5.1). Třetí sloupec obsahuje vzdálenosti vypočtené stejnou metodou, ale s korekcemi ( $l_1$ ) určenými zadáním dvou reálných kalibračních měření se zkratem v referenčních vzdálenostech 50mm a 450mm (viz část 5.1). Čtvrtý sloupec udává vzdálenosti získané pomocí metody porovnání změřených frekvenčních průběhů s modelem (viz část 5.2), vytvořeným v simulačním prostředí, při zakončení testovacího ramene zkratem. Model je definován ve vzdálenostech 0-600mm s krokem 0,5mm (nejmenší možný rozdíl určených vzdáleností je tedy s tímto modelem právě 0,5mm). Následující obrázek 6.2 pak zobrazuje odchylku vypočtené vzdálenosti zkratu (osa y) od vzdálenosti nastavené (osa x), pro všechny tři použité výpočty. Porovnání změřených frekvenčních průběhů koeficientu odrazu při zakončení zkratem, pro vzdálenost 50mm a 80mm, s frekvenčními průběhy modelu pro stejnou vzdálenost, zobrazuje obrázek 6.4, respektive obrázek 6.5.

**Tabulka 6.1:** Tabulka vypočtených vzdáleností zkratu.

Odečtení ze stupnice (mm)	Metoda výpočtu (sekce 5.1)		Metoda modelu (sekce 5.2) (mm)
	výchozí korekce (mm)	zadaná korekce (mm)	
50	50	50	50
55	54,9	55	55
60	59,9	60	60
65	65	65	65
70	70	70,1	70
75	74,8	74,9	75
80	79,9	80,1	80
450	449	450	450

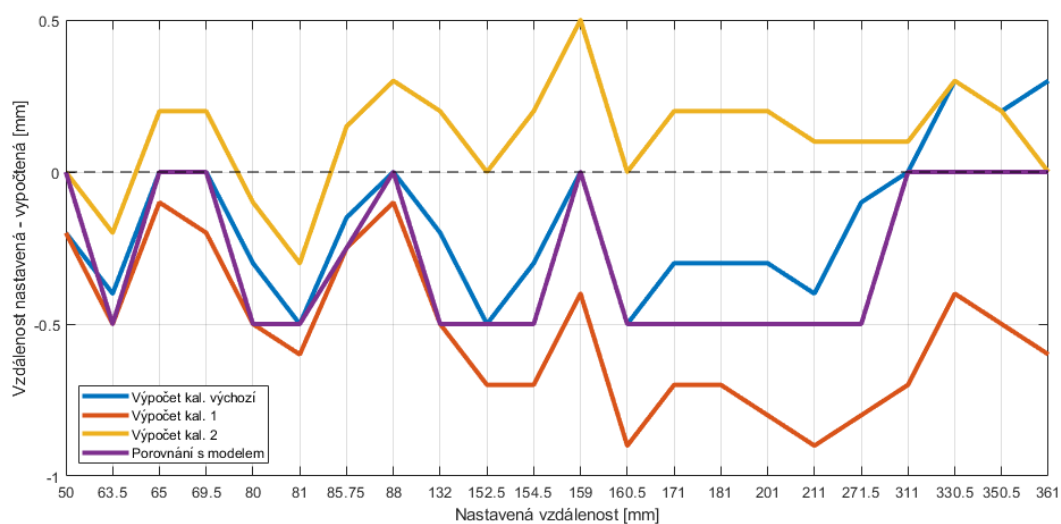


**Obrázek 6.2:** Odchylka vypočtené vzdálenosti zkratu od nastavené dle různých metod.

Druhé vyhodnocované měření je již dle frekvenčních průběhů koeficientu odrazu, získaných při odrazu od vodní hladiny, při postupném přilévání vody do odměrného válce. Tabulka 6.2 ve svém prvním sloupci uvádí vzdálenost vodní hladiny od hrany senzoru, odečtené ze stupnice pravítka (viz popis měřící soustavy v první části této kapitoly). Je třeba poznamenat, že takové určení vzdálenosti není příliš přesné, zejména vzhledem k jemnosti dělení stupnice (1mm) a přesnosti umístění pravítka. Další možné nepřesnosti, které mohli poznamenat měření, jsou uvedeny dále. Druhý sloupec obsahuje vzdálenosti určené metodou výpočtu s použitím výchozích (předdefinovaných) korekčních hodnot obsažených v  $I_1$ . Třetí sloupec udává vzdálenosti určené také dle metody výpočtu, ale korekce vycházejí ze zadání dvou reálných kalibračních měření při zakončení zkratem (v referenčních vzdálenostech 50mm a 450mm), stejně jako v prvním vyhodnocovaném měření. Čtvrtý sloupec obsahuje hodnoty získané také stejnou metodou, ale se zadáním tří reálných kalibračních měření s odrazem od hladiny vody (zakončení vodou, ne již zkratem) v referenčních vzdálenostech hladiny 50mm, 160,5mm a 361mm. Poslední pátý sloupec udává vzdálenosti získané porovnáním s totožným modelem jako v prvním vyhodnocovaném měření. Obrázek 6.3 zobrazuje opět odchylku vypočtené vzdálenosti (vodní hladiny) od vzdálenosti odečtené ze stupnice, pro všechny použité typy korekcí a oba algoritmy. Porovnání frekvenčních průběhů měření s vodou, se zkratem a modelem ve dvou vzdálenostech uvádějí obrázky 6.4 a 6.5.

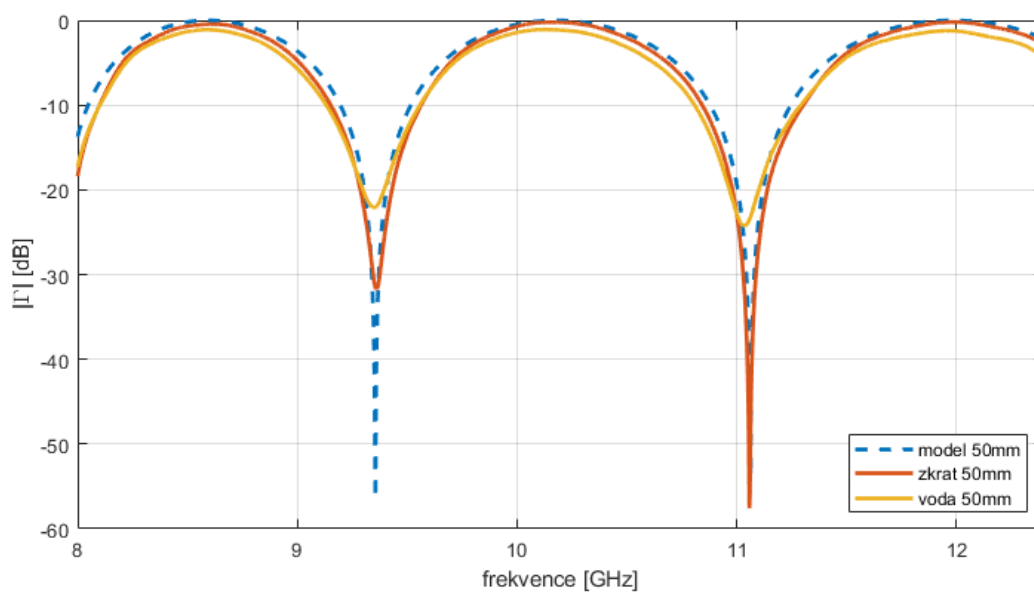
**Tabulka 6.2:** Tabulka vypočtených vzdáleností vodní hladiny.

Odečtení ze stupnice (mm)	Metoda výpočtu (sekce 5.1)			Metoda modelu (sekce 5.2) (mm)
	výchozí kor. (mm)	zadaná kor. 1 (mm)	zadaná kor. 2 (mm)	
50	50,2	50,2	50	50
63,5	63,9	64	63,7	64
65	65	65,1	64,8	65
69,5	69,5	69,7	69,3	69,5
80	80,3	80,5	80,1	80,5
81	81,5	81,6	81,3	81,5
85,5-86	85,9	86	85,6	86
88	88	88,1	87,7	88
132	132,2	132,5	131,8	132,5
152,5	153	153,2	152,5	153
154,5	154,8	155,2	154,3	155
159	159	159,4	158,5	159
160,5	161	161,4	160,5	161
171	171,3	171,7	170,8	171,5
181	181,3	181,7	180,8	181,5
201	201,3	201,8	200,8	201,5
211	211,4	211,9	210,9	211,5
271,5	271,6	272,3	271,4	272
311	311	311,7	310,9	311
330,5	330,2	330,9	330,2	330,5
350,5	350,3	351	350,3	350,5
361	360,7	361,6	361	361

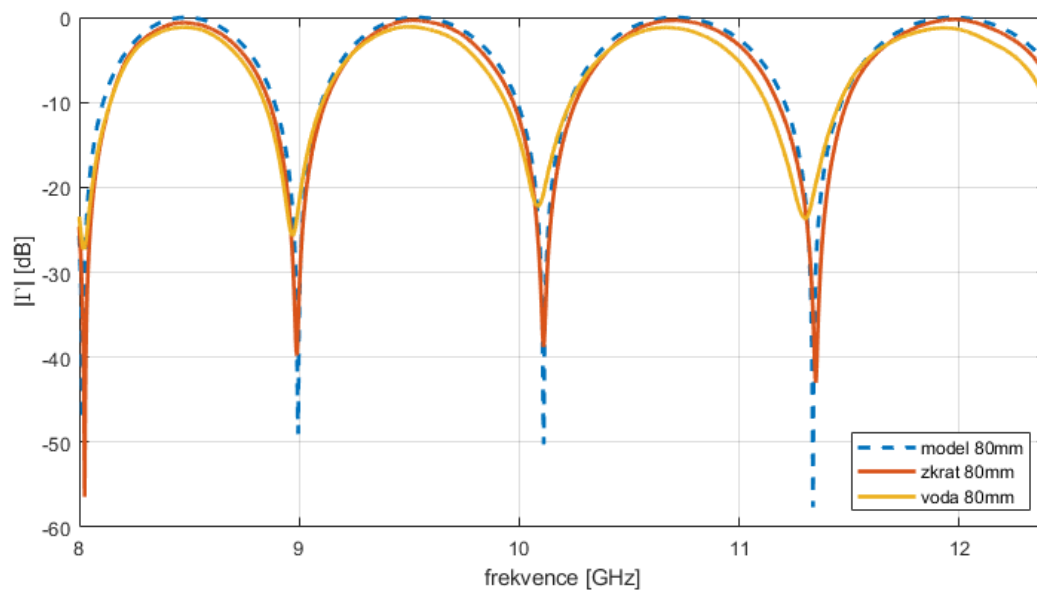
**Obrázek 6.3:** Odchylka vypočtené vzdálenosti vodní hladiny od nastavené pro různé metody výpočtu.

Z výše zobrazených odchylek na obrázku 6.3 lze vypočítat chybu, jež ve většině případů zatěžuje měření jedním směrem, určená vzdálenost je tak nepatrně větší než nastavená. To může být samozřejmě způsobeno nepřesně nastavenou výškou hladiny, ovšem zatížení jedním směrem se vyskytuje pouze u výpočtů s předdefinovanou korekcí (získanou simulací se zkratem), dále s korekcemi z kalibračních měření taktéž se zakončením zkratem a u porovnání s modelem vytvořeným simulací se zkratem. Naopak v případě, kdy pro určení korekčních hodnot byla použita měření s vodou se chyba zmenšila, respektive se posunula druhým směrem a určená vzdálenost vycházela tak spíše o něco menší než nastavená. Z toho lze vyvozovat původ nepřesnosti v jiné fázi koeficientu odrazu vody, než má zkrat. Frekvenční minima jsou tak při odrazu od vody mírně posunuta oproti zakončení zkratem. Kalibrační měření s vodou informací o této fázi obsahuje a při získané korekci je tedy již frekvenční posun uvažován v parametru  $l_1$ . Například při nastavené vzdálenosti hladiny 80mm od senzoru udává metoda porovnání s modelem hodnotu 80,5mm. To, že model pro 80mm neodpovídá přesně změřenému průběhu, je vidět na obrázku 6.5. Naopak to, že model pro 80,5mm změřenému průběhu odpovídá velmi dobře, je patrné z obrázku 6.6. Porovnání s modelem udává totožnou hodnotu jako nastavenou například pro vzdálenost 311mm, porovnání měření s modelem v této vzdálenosti je na obrázku 6.7. Při této vzdálenosti buď byla výška hladiny nastavena přesněji než v předchozím případě, nebo se z nějakých příčin zmenšila nepřesnost způsobená rozdílností fáze odrazu.

Pro zmenšení nepřesností při určování vzdálenosti hladiny se nabízí několik způsobů. Například při použití metody porovnání lze vytvořit a využít takový porovnávací model, jenž bude respektovat vlastnosti koeficientu odrazu měřené kapaliny, zejména pak fázi, je-li známa. Přesnost této metody ovlivňuje také jemnost vzdálenostního kroku modelu, ale vzhledem k nepřiliš přesnému odečítání nastavené výšky hladiny nemělo, při tomto konkrétním experimentálním měření, smysl vytvářet detailnější model. Další možností je, při využití metody výpočtu, zadat několik kalibračních měření v co možná nejpřesněji definované vzdálenosti, ovšem k tomu je třeba mít k dispozici jiný přesný nástroj pro určení této vzdálenosti. Případně využít jiný způsob korekce nepřesností, jsou-li alespoň přibližně tyto nepřesnosti známy (například systematické chyby). Další možné příčiny vzniku nepřesností a jiné nedostatky tohoto způsobu určování výšky vodní hladiny, ale i návrhy na další vylepšení senzoru jsou popsány v závěrečné kapitole 7.

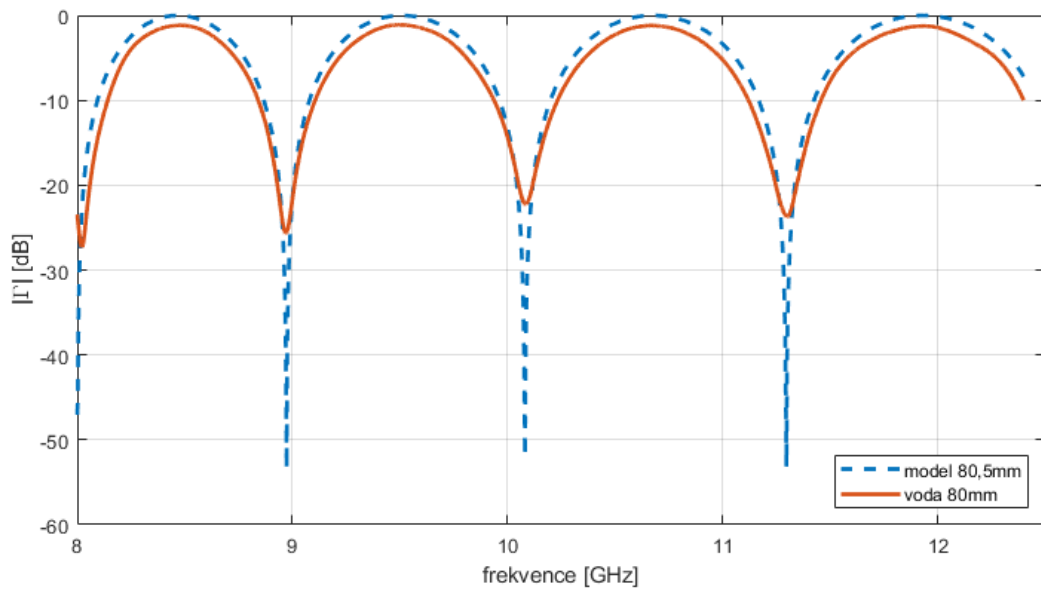


**Obrázek 6.4:** Porovnání frekvenčních průběhů měření ve vzdálenosti 50mm při odrazu zkratem, vodou a simulovaným modelem se zkratem.

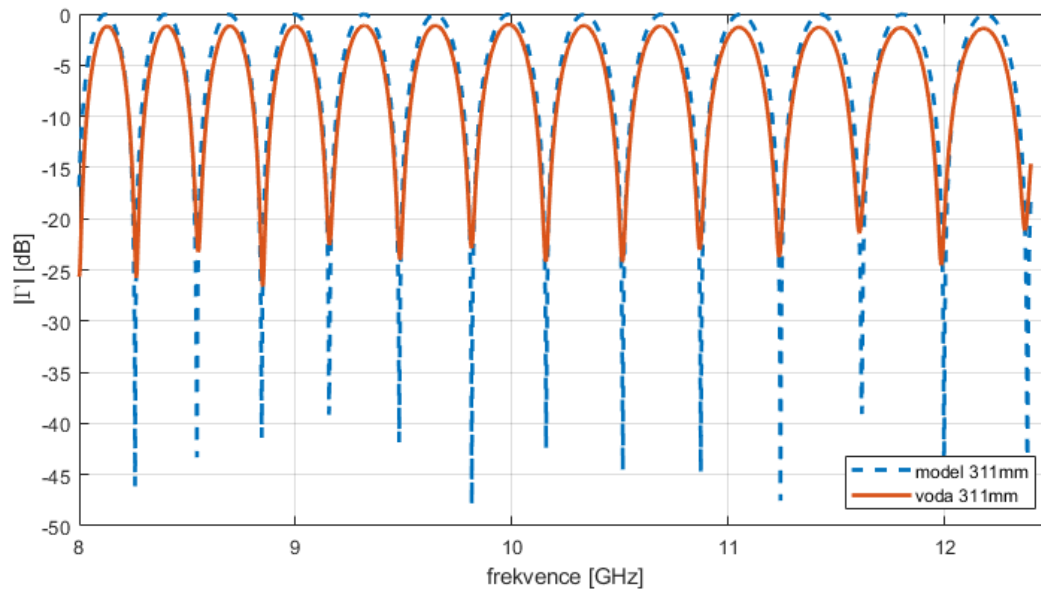


**Obrázek 6.5:** Porovnání frekvenčních průběhů měření ve vzdálenosti 80mm při odrazu zkratem, vodou a simulovaným modelem se zkratem.





**Obrázek 6.6:** Porovnání frekvenčních průběhů měření ve vzdálenosti 80mm při odrazu vodou a simulovaným modelem se zkratem pro vzdálenost 80,5mm.



**Obrázek 6.7:** Porovnání frekvenčních průběhů měření ve vzdálenosti 311mm při odrazu vodou a simulovaným modelem se zkratem.

# Kapitola 7

## Závěr

V rámci této diplomové práce bylo simulacemi prozkoumáno několik různých struktur vlnovodných trojbranů a nalezený model, který se jevil jako nejvhodnější pro účely práce, byl navrhnut, vyroben a experimentálně proměřen. Interferenční jev mezi sudým a lichým videm, zde využívaný pro určení vzdálenosti (potažmo výšky) vodní hladiny, vzniká u všech zkoumaných struktur a pravděpodobně by bylo možné provádět totéž měření za určitých okolností i s nimi (třeba i s obyčejným vlnovodným T (sekce 3.2). Ovšem nejen dle parametrů uvedených v kapitole 3, by tato měření byla buď méně přesná, náročnější na různé korekce, kalibraci nebo podmínky měření, anebo by neumožňovala případná další vylepšení parametrů senzoru uvedená dále.

Zásadní výhoda této nové struktury oproti jiným vlnovodným trojbranům, uvedeným v kapitole 3, je utlumení odrazu testovacího vidu (v tomto případě sudého) od samotné struktury, pozorovatelné při bezodrazovém zakončení testovací brány. Tento parametr je u každého popsaného modelu vyneseno v grafu frekvenčního průběhu koeficientu odrazu. Tím, že je tento odraz velmi dobře eliminován, je při měření umožněna interference pouze dvou dominantních signálů (referenčního a testovacího, odraženého od hladiny vody) a další nežádoucí signály jsou velmi dobře potlačeny. Nežádoucím signálem je myšlena právě část testovacího vidu odražená od samotné struktury. Čím je toto potlačení menší, tím je třetí (rušivý) interferující signál silnější a mění frekvenční průběh interference a polohy interferenčních minim. Důsledky rušivého signálu vzniklého nežádoucím odrazem jsou popsány na konci následující části 7.1. U vytvořeného senzoru je hodnota tohoto potlačení nežádoucího odrazu, dle simulací, v převážné části frekvenčního pásma vyšší než **40dB**, pouze v malé části je potlačení nepatrně nižší (viz obr. 3.16). Oproti obyčejnému vlnovodnému T (model A, viz obr. 3.2) to je zlepšení o více než 30dB, T v H rovině (model B) není vhodné i vzhledem k rozložení  $\vec{E}$  a zlepšení je ještě o několik dB větší. Model C je v tomto ohledu překonán o více než 28dB (obr. 3.6), model D pak minimálně o 30dB (obr. 3.8). Model E v tomto ohledu dopadl lépe než předešlé, ale i tak byl v převážné části frekvenčního pásma překonán alespoň o 5dB (místy o méně, ale převážně i o více, viz obr. 3.9), u modelu E byly ovšem nalezeny a zmíněny i jiné nežádoucí problémy.

V textu práce je psáno pojednáváno o určování vzdálenosti vodní hladiny, a ne o její výšce. Pro stanovení výšky hladiny ode dna nádoby stačí znát pouze vzdálenost

mezi hranou na výstupu senzoru a dnem nádoby. Vytvořený senzor se skládá ze dvou polovin, jež jsou identické vnitřními rozměry. Tyto dvě poloviny se skládají na sebe a upevňují se šrouby se závity M4. Detail rozloženého senzoru zachycuje obrázek 7.1 na konci této kapitoly.

## 7.1 Zhodnocení výsledků

V zadání této diplomové práce byl stanoven požadavek, aby rozsah měřených vzdáleností byl alespoň 30cm a rozlišení minimálně 1mm. Sestavená měřicí soustava umožnila při experimentálním ověření provést měření, při zakončení testovacího ramene zkratem, ve vzdálenostech 5 až 45cm (rozsah 40cm). Při použití metody výpočtu a předdefinovaných nasimulovaných korekcí byla chyba menší než 0,2mm (kromě jednoho měření při vzdálenosti 450mm). Při určení korekcí ze dvou zadaných kalibračních měření vznikla chyba pouze ve třech případech, a to o velikosti 0,1mm. Při použití metody porovnání s nasimulovaným modelem nevznikla pozorovatelná chyba dokonce v žádném případně tohoto měření (viz obr. 6.2).

Při určování vzdálenosti vodní hladiny bylo měřeno v rozsahu 35,1cm. Nepřesnost určení se pohybovala pod hranicí 1mm, konkrétně nejhůře dopadla metoda výpočtu s korekcemi získanými ze zadaných kalibračních měření při zakončení zkratem (chyba až 0,9mm). Lépe dopadla metoda výpočtu při použití předdefinovaných korekcí a metoda porovnání se zkratovým modelem, v obou případech chyba uvedených výsledků nepřekročila hodnotu 0,5mm. Nejlépe dopadla metoda výpočtu, při zadání tří kalibračních měření při odrazu od vodní hladiny, z nichž se vypočetly korekční hodnoty  $l_1$ . Kromě jednoho případu byla chyba této metody menší než 0,5mm (viz obr. 6.3). Z tohoto pohledu bylo zadání práce splněno, ovšem je třeba zmínit nepřesnosti, nedostatky a možné příčiny chyb obou použitých metod a také provedení experimentálního měření a případných dalších budoucích experimentů.

Pravděpodobně nejzásadnější nepřesnost provedení měření vychází z použité metody odečtení nastavené výšky vodní hladiny (jemnost dělení a přesnost umístění stupnice). Další nepřesnost mohla vzniknout při sestavování měřicí trasy, kdy vlnovod, tvořící testovací rameno, nemusel být umístěn přesně kolmo k vodní hladině, v tom případě by klidná hladina uvnitř vlnovodu nesvírala pravý úhel se stěnami a vzdálenost by nebyla v celém průřezu stejná. Podobný problém může být způsoben u stěn nádoby, protože kapalina v nádobě typicky smáčí její stěny a v těsné blízkosti těchto stěn je tedy hladina nepatrně vyšší. To by ovšem mělo být pozorováno ve všech vzdálenostech a případně způsobovat téměř konstantní chybu, jež by měla být řešitelná kalibrací. Smáčivost stěn odměrného válce ovšem ztěžovala odečtení výšky hladiny na stupnici.

Slabá místa mají i obě použité metody určení vzdáleností z frekvenčních průběhů koeficientu odrazu. Metoda výpočtu se opírá o změření přesné frekvence interferenčního minima. Má-li měřená kapalina malou amplitudu koeficientu odrazu, případně jsou-li ztráty v testovacím kanálu příliš velké, amplituda testovacího signálu bude

výrazně nižší než amplituda signálu referenčního. Interferenční minimum pak nebude ostré ani hluboké a určení frekvence interferenčního minima nebude přesné. Stejný problém s přesností určení frekvence může vzniknout, objeví-li se „parazitní“ odraz buď v měřené trase, anebo odrazem ode dna nádoby (je-li kapalina málo odrazná a zároveň málo absorbuje neodražený výkon). V takovém případě se může v blízkosti hledaného, správného, interferenčního minima objevit více lokálních minim, způsobených nechtěným slabým signálem v měřicí trase, což znemožňuje identifikaci správné frekvence hledaného minima. To by bylo možné obejít za použití metody výpočtu tím, že namísto interferenčního minima by se uvažoval bod na strmé „stěně“ tohoto minima, tedy místo s určitou malou amplitudou, ale ne úplné minimum. Metoda porovnání s modelem zase závisí na samotném použitém modelu, jenž je omezen jemností dělení a tím, jak moc odpovídá reálným průběhům koeficientu odrazu od kapaliny (amplitudě a zejména fázi). Další tipy, jak zmenšit chybu určení vzdálenosti při samotné výpočtu, byly uvedeny ke konci kapitoly 6.

## 7.2 Další možná vylepšení

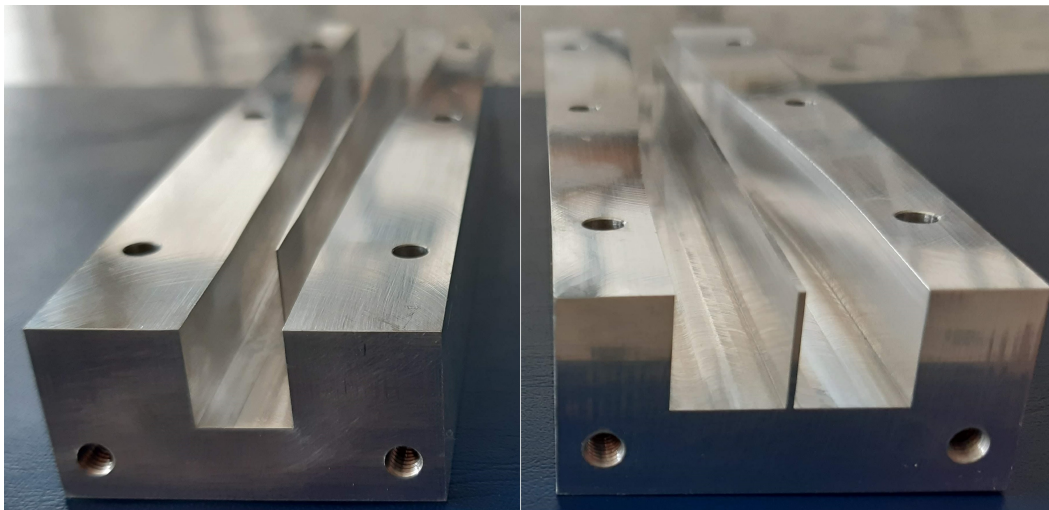
V této části jsou diskutovány některé návrhy na zpřesnění měření a vylepšení parametrů senzoru úpravami fyzických částí měřicí soustavy.

Díky vzájemnému kolmému rozložení  $\vec{E}$  sudého a lichého vidu v ose symetrie by bylo teoreticky možné například tenkou destičkou z útlumového materiálu ztlumit amplitudu referenčního vidu tak, aby měl shodnou amplitudu s odraženým videm testovacím, čímž by bylo možné se přiblížit ideální destruktivní interferenci, protože by se nastavovala shodná amplituda obou vidů. Bylo by tak získáno hlubší interferenční minimum, jež by umožnilo přesněji určit frekvenci na níž se nachází, tedy i přesněji určit vzdálenost. Vzhledem ke kolmosti  $\vec{E}$  by pole jednoho vidu prostupovalo celou délkou tenké destičky a bylo ovlivněno více, zatímco pole druhého vidu pouze její malou šířkou a bylo tak ovlivněno výrazně méně.

Pro řešení problémů při měření kapalin s malou amplitudou koeficientu odrazu, by mohl být do vlnovodu, který tvoří testovací rameno, vložen plovák, jehož vrchní část by byla pokryta vodivým kovem a jeho rozměry o něco menší než vnitřní rozměry vlnovodu, aby se mohl volně pohybovat se změnou hladiny. Jednoduchá realizace by mohla být tvořena blokem z lehkého plastu (např. polystyren) a tenkou hliníkovou destičkou. Pokud by byla destička vybavena nějakými vodivými štětinkami, jež by zajišťovaly kontakt se stěnami vlnovodu, ale zároveň neovlivňovaly volný pohyb, představovala by tato destička v podstatě zkrat. Výšku plováku s destičkou by bylo možné zahrnout do kalibrace. Tím by se mohli redukovat také nedostatky způsobené rozdílností fáze koeficientu odrazu kapaliny a použitého modelu pro porovnání (nebo výchozí kalibrace).

Poslední úprava není návrhem na možné, okamžité zlepšení parametrů, ale spíše nutností vzhledem k životnosti a dlouhodobým parametrům měřicí soustavy. Vzhledem k tomu, že část měřicí soustavy by byla při reálném používání, např. v průmyslu,

dlouhodobě vystavena styku s nějakou kapalinou, které mají často korozivní účinky, bylo by vhodné vnější i vnitřní části všech vlnodů ošetřit antikorozní vrstvou, jež by ale neměla případný negativní vliv na vodivost (a tedy i ztrátovost) vedení.



**Obrázek 7.1:** Detail jednotlivých částí vytvořeného senzoru.

# Příloha A

## Literatura

- [1] POZAR, David M. *Microwave engineering*. Wiley, Hoboken, N.J., 4th edition, c2012. ISBN 978-0-470-63155-3.
- [2] RÜEGGER, Jean M. *Electronic Distance Measurement: An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin, 4th edition, 1996. ISBN 978-3-540-61159-2.
- [3] HOFFMANN, Karel and Zbyněk ŠKVOR. New method suitable for relative short distance measurement. In *The 40th European Microwave Conference*, pages 1524–1527, Sep. 2010.
- [4] HOFFMANN, Karel and Zbyněk ŠKVOR. Contactless distance measurement method. In *77th ARFTG Microwave Measurement Conference*, pages 1–4, June 2011.
- [5] HOFFMANN, Karel, Zbyněk ŠKVOR and Milan PŘÍHODA. Precise microwave measurement of liquid level. In *79th ARFTG Microwave Measurement Conference*, pages 1–2, June 2012.
- [6] REED, J. and G. J. WHEELER. A method of analysis of symmetrical four-port networks. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 4(4):246–252, October 1956.
- [7] COHN, S. B. A class of broadband three-port tem-mode hybrids. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 16(2):110–116, February 1968.
- [8] HAASE, Martin, Karel HOFFMANN and Přemysl HUDEC. Advanced evaluation of minimum insertion loss of power-line emi/rfi filters in rf and microwave frequency bands. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(6):1887–1896, Dec 2017.
- [9] TYSL, Václav a Vladimír RŮŽIČKA. *Teoretické základy mikrovlnné techniky*. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1989. ISBN 80-03-00141-2.
- [10] VRBA, Jan. *Měření na centimetrových vlnách*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1958.

## Příloha B

### Zdrojové kódy

#### B.1 Metoda určení vzdálenosti výpočtem

: Metoda\_vypoctu.m

```
1  %pripadne zadani kalibracnich mereni + jejich vzdalenost
2  cal_files(1).a = 'meas\w29.s2p';
3  cal_files(1).b = 50*1e-3;
4  cal_files(2).a = 'meas\w16.s2p';
5  cal_files(2).b = 160.5*1e-3;
6  cal_files(3).a = 'meas\w2.s2p';
7  cal_files(3).b = 361*1e-3;
8  %zadani mereni v hledane vzdalenosti
9  file = 'meas\w16.s2p';
10 %jsou zadana kalibracni mereni?
11 if exist('cal_files','var')
12     %ano -> vypoctou se korekcní hodnoty
13     cal = zeros(length(cal_files),2);
14     %projiti vsech kalibracnich souboru
15     for i = 1:length(cal_files)
16         %zavolani funkce urcujici korekcní hodnotu pro X minim
17         tmp = Calibration(cal_files(i).a,cal_files(i).b);
18         cal(i,1) = tmp(1);
19         cal(i,2) = tmp(2);
20     end
21     XI = (1:1:max(cal(:,2)));
22     %interpolace korekci pro ostatní počty minim
23     cal_inter = interp1(cal(:,2),cal(:,1),XI,'pchip');
24 else
25     %ne -> precteni korekcních hodnot vychozí kalibrace
26     calib = [-2.70226 -2.7793 -2.87 -2.968 -3.0648 -3.158627
27             -3.254]*1e-3;
28     %pocet minim pro danou hodnotu
29     X = [1 5 9 13 17 22 26];
30     XI = (1:1:X(length(X)));
31     %interpolace pro ostatní počty minim
32     cal_inter = interp1(X,calib,XI,'pchip');
33     cal_inter = cal_inter + 20e-3;
34 end
35 %Zavolani funkce pro urceni hledane vzdalenosti
36 Distance = DisDeter(file,cal_inter)
```

## : Calibration.m

```

1 function [calib] = Calibration(file ,d)
2     %nacteni s-parametru z kalib. souboru ve formatu .s2p
3     meas = dlmread(file ,'', 6, 0);
4     data = zeros(1601,2);
5     %frek. v mereni je v Hz, pozadovana v GHz
6     data(:,1) = meas(:,1)*1e-9;
7     %amplituda merenych dat je linearni -> pozadovana v dB
8     data(:,2) = 10*log(meas(:,2));
9     %nalezeni interfer. minim v mereni
10    TF = islocalmin(data(:,2), 'MinProminence', 2);
11    %nalezeni frekvenci danych minim
12    min_freq = data(TF,1).*1e9;
13    %vypocteni vzdalenosti dle zadaneho mereni
14    dis = DisDeter(file , 0);
15    calib = zeros(2,1);
16    %vraceni korekcní hodnoty z daneho mereni (vypoctena-zadana)
17    calib(1) = dis - d;
18    %vraceni poctu nalezenych minim v kalibracnim mereni
19    calib(2) = length(min_freq);
20 end

```

## : DisDeter.m

```

1 function [dist] = DisDeter(file ,calib)
2     %nacteni s-parametru ze souboru ve formatu .s2p
3     meas = dlmread(file ,'', 6, 0);
4     data = zeros(1601,2);
5     %frek. v mereni je v Hz, pozadovana v GHz
6     data(:,1) = meas(:,1)*1e-9;
7     %amplituda merenych dat je linearni -> pozadovana v dB
8     data(:,2) = 10*log(meas(:,2));
9     %nalezeni interfer. minim v mereni
10    [TF,P] = islocalmin(data(:,2), 'MinProminence', 2, '
        FlatSelection', 'center');
11    %nalezeni nejhubsiho minima
12    [max_prominence, index] = max(P);
13    %nalezeni frek. bodu v nichz je minimum
14    PP = find(TF);
15    %nalezeni frek. bodu v nemz je nejhlubsi minimum
16    PPP = find(PP==index);
17    %nalezeni frekvenci danych minim
18    min_freq = data(TF,1).*1e9;
19    c0 = 299792458; %m/s - rychlost svetla
20    fm = 6.55e9; %kriticka frekvence zakladniho vidu R100
21    %je-li urcena kalibrace, korekcní vzdalenosti dej ref. kanalu
22    if calib == 0
23        l1=0;
24    else
25        l1 = calib(length(min_freq));
26    end
27    %urceni fazove rychlosti ve vsech frek. bodech

```



```

28 v_f = (c0) ./ ( sqrt( 1 - (( fm ./ min_freq ).^2) ) );
29 %je-li mene nez 2 inter. minima, vrat chybovou hodnotu
30 if length(min_freq) < 2
31     dist = -1;
32     return
33 else
34     %jinak pocitej vzdalenost
35     %vedlejsi minimum je prechozi (vlevo, k-1)
36     v = -1;
37     if PPP == 1
38         %je-li nejblusi minimum 1. v prubehu, vedelejsi bude
39         %nasledujici (k+1)
40         v = 1;
41     end
42     %definice neznamych a predpisu rovnice pro urceni K
43     syms kk l2
44     eqn = -l2 + l1 - ((v_f(PPP)*(kk)) / (2*min_freq(PPP))) == -
45           l2 + l1 - ((v_f(PPP+v)*(kk+v)) / (2*min_freq(PPP+v)));
46     %vyres rovnici pro neznamou K, l2 se povazuje
47     %za konstantu a ted nas nezajima
48     j = solve(eqn, kk);
49     j = double(j); %pretypovani
50     k = round(j); %zaokrouhleni
51     %urceni celk. poradí prvního minima ve frek. prubehu
52     k = k - PPP + 1;
53 end
54 len2 = zeros(length(min_freq), 1);
55 %spocetni vzdlanosti l2 dle vsech minim samostatne
56 for j=1:length(min_freq)
57     len2(j) = - l1 + ( (v_f(j)*(k+j-1)) / (2*min_freq(j)) );
58 end
59 %urceni prumerne vypoctene vzdalenosti ze vsech minim
60 l2_sum = sum(len2);
61 dist = ((l2_sum) / length(min_freq));
end

```

## B.2 Metoda určení vzdálenosti modelem

: Metoda\_porovnani.m

```

1  %cesta k souboru s konkrétním měřením s-par. ve formátu .s2p
2  meas = dlmread('mereni\w1.s2p', '', 6, 0);
3  %nacteni souboru modelu dle cesty ke složce, obsahující model
4  model_files = dir("model");
5  data = zeros(1601,2);
6  %v souborech modelu je frek. v GHz, v měření v Hz -> převedení
7  data(:,1) = meas(:,1)*1e-9;
8  %amplitudy měření jsou lineární, požadovány v dB -> převedení
9  data(:,2) = 10*log(meas(:,2));
10 corr = zeros(length(model_files),1);
11 lag = zeros(length(model_files),1);
12 %v cyklu se porovnávají všechny soubory modelu s měřením
13 for i=3:1:length(model_files)
14     %nacteni nazvu souboru modelu + cesta ze seznamu
15     filename = "model\"+model_files(i).name;
16     %otevreni a nacteni souboru
17     model = dlmread(filename, '', 1, 0);
18     %urceni korelace (s nulovým vzájemným posuvem v tomto případě)
19     [c11norm, lag11]=xcorr(data(:,2),model(:,2),0,'coeff');
20     %při povolení většího posuvu, nalezení maximální hodnoty
21     [corr(i), lag(i)] = max(c11norm);
22 end
23 %nalezení nejvyšší hodnoty korelace s modelem
24 [max, index] = max(corr);
25 %urceni nazvu souboru, který nejlepe odpovídá
26 filename = "model\"+model_files(index).name
27 %název souboru je tvoren vzdáleností
28 distance = erase(filename, "model\");
29 distance = erase(distance, ".txt");
30 distance = strrep(distance, ',', '.');
31 %cistý název souboru modelu = určená vzdálenost
32 distance = str2double(distance)
33 %posun korelace v počtu frek. bodu
34 posun = lag(index)

```