

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

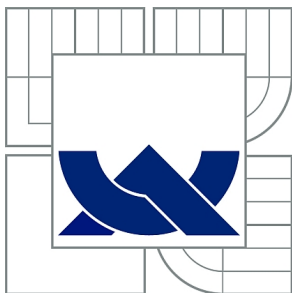
KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ SÉRIOVÁ ANTÉNNÍ ŘADA

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

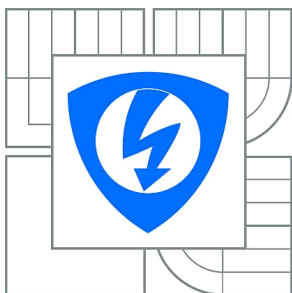
Bc. MARTIN HURT

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ SÉRIOVÁ ANTÉNNÍ ŘADA

CIRCULARLY POLARIZED SERIAL ANTENNA ARRAY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN HURT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN KUFA

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Martin Hurt

**ID:** 125227

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

### Kruhově polarizovaná sériová anténní řada

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem činnosti vybraných typů kruhově polarizovaných anténních řad. Vybrané anténní řady přepočítejte na zadaný substrát, jejich funkčnost ověřte počítačovou simulací ve vhodném programu a vzájemně porovnejte jejich vlastnosti. Obě antény optimalizujte pro práci v pásmu ISM (5,725 GHz až 5,875 GHz).

Antény nechejte vyrobit. Parametry antén proměřte jednak v anténní laboratoři a jednak v osobním automobilu. Experimentálně ověřte vliv vícecestného šíření uvnitř automobilu na přenos mezi anténami. Výsledky měření v automobilu statisticky zpracujte.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] EVANS, H., GALE, P., B. ALJIBOURI, B., LIM, E. G., E. KOROLKCIWICZ, E., SAMBELL, A. Application of simulated annealing to design of serial feed sequentially rotated 2 x 2 antenna array. Electronics Letters . 23 Nov 2000, vol. 36, no. 24, p. 1987 – 1988.

[2] JAZI, M.N.; AZARMANESH, M. N., Experimental design of serial feed sequentially rotated 2x2 truncated corner patch antenna array. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE. 3-8 July 2005, vol. 4A, p. 346 – 349.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 23.5.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Kufa

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

## **ABSTRAKT**

Tato práce je zaměřena na návrh kruhově polarizovaných sériových anténních řad. Antény pracují v pásmu ISM (5,725 GHz až 5,875 GHz). Návrhy antén jsou provedeny ve třech bodech. V prvním bodě je navržena napájecí soustava, následně dva typy kruhově polarizovaných flíčkových antén a v posledním bodě jsou tyto komponenty sjednoceny. Dále jsou tyto antény vyrobeny, proměřeny jejich parametry a použity pro experimentální ověření vlivu vícecestného šíření v automobilu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Kruhově polarizovaná sériová anténní řada, kruhová polarizace, sériové napájení, CST Microwave Studio.

## **ABSTRACT**

This work focuses on the design circularly polarized serial antennas array operate in the ISM band (5.725 GHz to 5.875 GHz). Design of antennas is divided into three parts. In the first part is designed feeding system, followed by two types of circularly polarized antennas and at the last point, these components are integrated. Furthermore, these antennas are fabricated, measured their parameters and used for experimental verification of the influence of multipath transmission in-vehicle.

## **KEYWORDS**

Circularly polarized serial antenna array, circular polarization, serial feed, CST Microwave Studio.

HURT, M. *Kruhově polarizovaná sériová anténní řada*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 42 s.. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Kufa.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Kruhově polarizovaná sériová anténní řada jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Kufovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)



# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>v</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>vii</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>8</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>9</b>
1.1    Obecná fličková anténa.....	9
1.2    Typy napájení .....	10
1.2.1    Mikropáskové napájení.....	10
1.2.2    Napájení koaxiální sondou.....	12
1.3    Volba substrátu .....	12
1.4    Parametry antén .....	13
1.4.1    Činitel odrazu.....	13
1.4.2    Polarizace.....	13
<b>2 NÁVRH ANTÉN</b>	<b>15</b>
2.1    Napájecí systém .....	15
2.2    Návrh první antény .....	20
2.2.1    Anténa s oříznutými rohy .....	20
2.2.2    Kompletace antény s oříznutými rohy .....	22
2.3    Návrh druhé antény.....	26
2.3.1    Anténa napájená kapacitní vazbou .....	26
2.3.2    Kompletace druhé antény .....	28
<b>3 VÝROBA ANTÉN</b>	<b>32</b>
3.1    Anténa s oříznutými rohy .....	32
3.2    Anténa napájená kapacitní vazbou .....	34
<b>4 VLIV VÍCECESTNÉHO ŠÍŘENÍ</b>	<b>37</b>
<b>ZÁVĚR</b>	<b>39</b>
<b>Literatura</b>	<b>40</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>41</b>
<b>Seznam Příloh</b>	<b>42</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Rozměry flíčkové antény.....	9
Obr. 1.2: Zapuštěné mikropáskové napájení. ....	10
Obr. 1.3: Náhradní schéma čtvrtvlnného transformátoru. ....	11
Obr. 1.4: Přizpůsobení pomocí čtvrtvlnného transformátoru. ....	11
Obr. 1.5: Profilový řez antény napájené koaxiální sondou.....	12
Obr. 1.6: Anténa napájená koaxiální sondou.....	12
Obr. 1.7: Vliv parametrů substrátů na vlastnosti antén [2]. ....	13
Obr. 1.8: Osový poměr vektoru elektrické intenzity [2]. ....	14
Obr. 2.1: Náhradní schéma napájecí soustavy [6]. ....	15
Obr. 2.2: Napájecí systém.....	17
Obr. 2.3: Fáze každého portu vůči vstupu v závislosti na frekvenci. ....	18
Obr. 2.4: Přenos každého portu vůči vstupu v závislosti na frekvenci. ....	18
Obr. 2.5: Rozložení proudů na napájecím vedení: a) 0°, b) 45°, c) 90° a d) 135°.....	19
Obr. 2.6: Rozměry antény s uříznutými rohy. ....	21
Obr. 2.7: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci. ....	22
Obr. 2.8: Osový poměr v závislosti na frekvenci. ....	22
Obr. 2.9: Kompletní anténa s oříznutými rohy. ....	23
Obr. 2.10: Ohyb mikropáskového vedení.....	23
Obr. 2.11: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci. ....	24
Obr. 2.12: Osový poměr v závislosti na frekvenci. ....	24
Obr. 2.13: Zisk antény ve vertikální rovině. ....	25
Obr. 2.14: Zisk antény v horizontální rovině.....	25
Obr. 2.15: Rozložení proudů na anténě: a) 0°, b) 45°, c) 90° a d) 135°. ....	26
Obr. 2.16: Rozměry antény napájené kapacitní vazbou. ....	27
Obr. 2.17: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci. ....	28
Obr. 2.18: Osový poměr v závislosti na frekvenci. ....	28
Obr. 2.19: Kompletní anténa napájená kapacitní vazbou. ....	29
Obr. 2.20: Rozměr napájecího vedení k anténě. ....	29
Obr. 2.21: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci. ....	30
Obr. 2.22: Osový poměr v závislosti na frekvenci. ....	30
Obr. 2.23: Zisk antény ve vertikální rovině. ....	31

Obr. 2.24: Zisk antény v horizontální rovině.....	31
Obr. 3.1: Činitel odrazu první vyrobené antény. ....	32
Obr. 3.2: Činitel odrazu druhé vyrobené antény. ....	33
Obr. 3.3: Osový poměr v závislosti na frekvenci. ....	33
Obr. 3.4: Vyzařovací diagram v horizontální rovině. ....	34
Obr. 3.5: Vyzařovací diagram ve vertikální rovině. ....	34
Obr. 3.6: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci. ....	35
Obr. 3.7: Osový poměr v závislosti na frekvenci. ....	35
Obr. 3.8: Vyzařovací diagram v horizontální rovině. ....	36
Obr. 3.9: Vyzařovací diagram ve vertikální rovině. ....	36
Obr. 4.1: Rozložení antén v automobilu. ....	37
Obr. 4.2: Princip zapojení obvodu pro měření přenosů v automobilu [10]. ....	38
Obr. 4.3: Přenos signálu v automobilu na každé pozici.....	38

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Rozměry napájecího systému. ....	17
Tab. 2: Rozměry napájecího systému po úpravě. ....	19
Tab. 3: Rozměry antény. ....	21
Tab. 4: Rozměry antény. ....	27

# ÚVOD

Dnes existuje mnoho lukrativních frekvenčních pásem, které se využívají pro nejrůznější aplikace. Ať už se jedná například o televizní příjem, mobilní komunikace nebo satelitní navigace, vždy je k přenosu signálu zapotřebí anténní prvek. První zmínka o anténách se datuje kolem roku 1896, kdy Gugliermo Marconi dělal při bouři pokusy s drakem. Od té doby se antény neustále vyvíjely a vyvíjí [1].

Pro pásma VKV a UKV se dnes používají především mikropáskové antény. Jsou žádané pro svoji lehkost, snadnou výrobu, cenu a velikost. Avšak mají i některé nedostatky, z nichž největší je jejich úzkopásmovost. Mikropáskové antény s větší šířkou pásma jsou z pravidla složitější [1].

Tato práce je zaměřena na návrh dvou flíčkových (mikropáskových) antén. Jedná se o kruhově polarizované anténní řady, které jsou napájeny sériovým vedením. Antény by měli pracovat v pásmu ISM 5,8 GHz (přesněji od 5,725 do 5,875 GHz).

První kapitola vypovídá o základních vlastnostech a typech mikropáskových antén. Po této kapitole následuje text, věnující se samotnému návrhu antén a výsledků simulací. V další kapitole jsou tyto výsledky porovnány s naměřenými hodnotami vyrobených antén. V předposlední kapitole jsou tyto antény použity k měření přenosů v automobilu a na závěr jsou zhodnoceny všechny dosažené výsledky.

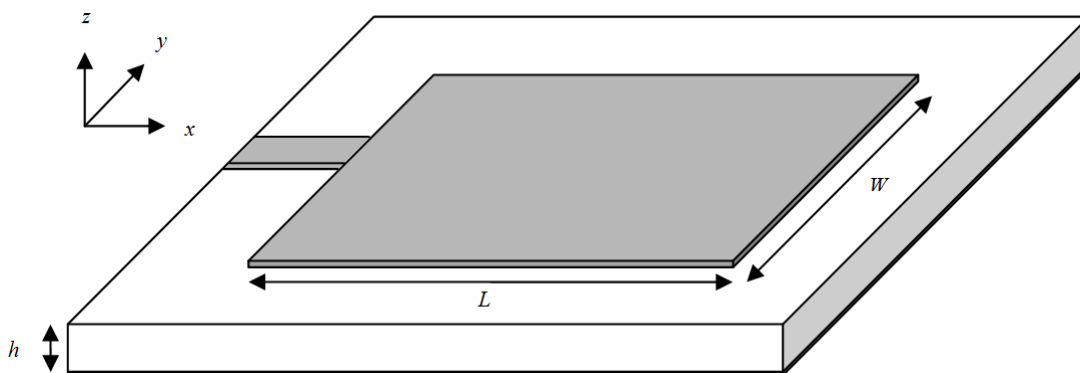
# 1 TEORETICKÁ ČÁST

U flíčkových antén je velice důležitá volba substrátu, především jeho relativní permeabilita  $\epsilon_r$ , ztrátový činitel  $tg\delta$  a jeho tloušťka  $h$ . Dále jsou důležité charakteristické parametry antén, např.: zisk, směrovost, impedanční přizpůsobení, polarizace a další. Na některé z těchto parametrů se v následujících odstavcích zaměříme. Ale nejprve se podíváme na obecnou flíčkovou („patch“) anténu.

## 1.1 Obecná flíčková anténa

Obecně je flíčková anténa tvořena substrátem, který je z obou stran pokoven. Na jednu z těchto stran je vyleptán předem nadefinovaný motiv a druhá strana zůstane nezměněna (zemnicí plocha). Uvedená struktura je představena na obr. 1.1.

Na flíčkovou anténu se můžeme dívat jako na mikropáskové vedení, které je v jednom místě rozšířené a následně zakončeno jako vedení naprázdno. Při vstupu proudu do této oblasti se na nehomogenitách (nehomogenitami je myšleno rozšíření mikropásku a zakončení naprázdno) vyzáří elektromagnetická energie do okolního prostoru. Zemnicí plocha působí jako reflektor a anténa září především ve směru osy  $z$  [1].



Obr. 1.1: Rozměry flíčkové antény.

Velikost strany  $L$  určuje především rezonanční kmitočet, ale už nemá takový vliv na vstupní impedanci. Šířka flíčku  $W$  má vliv právě na vstupní impedanci, ale také na šířku pásma, ve které anténa pracuje.

Rozměry flíčku můžeme spočítat pomocí vztahů (1 - 4) [2]

$$W = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost světla,  $f$  je rezonanční kmitočet flíčku a  $\epsilon_r$  je relativní permitivita substrátu. Následně vypočteme efektivní permitivitu  $\epsilon_{reff}$  a zkrácení  $\Delta$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

$$\Delta = 0,412h \frac{\varepsilon_{reff} + 0,3 \frac{W}{h} + 0,262}{\varepsilon_{reff} - 0,258 \frac{W}{h} + 0,813}, \quad (3)$$

kde  $h$  je výška substrátu. Z těchto hodnot vypočteme druhý rozměr flíčku  $L$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_{reff}}} - 2\Delta. \quad (4)$$

Z předchozích vztahů vyplývá, že anténa bude mít obdélníkový motiv. Pro jednodušší návrh se používá čtvercový motiv, kde pro délku strany  $L$  platí podmínka (5)

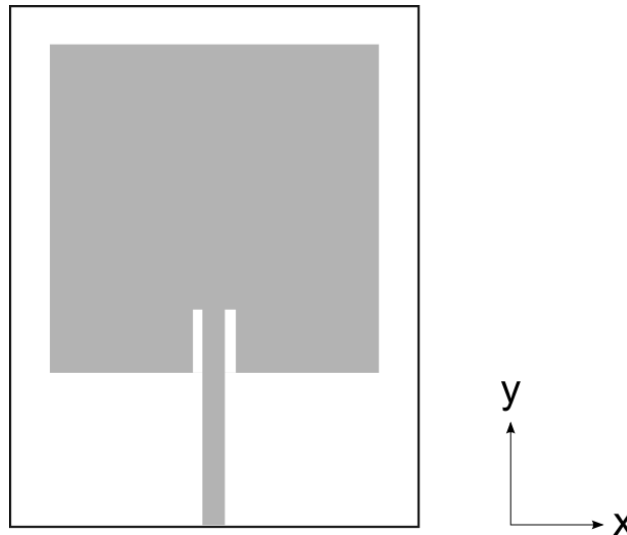
$$\lambda/3 < L < \lambda/2. \quad (5)$$

## 1.2 Typy napájení

U těchto antén existuje několik typů napájení. Zde jsou uvedeny dva nejzákladnější a nejpoužívanější typy.

### 1.2.1 Mikropáskové napájení

Mikropásek je přiveden z hrany substrátu k hraně flíčku (motivu). Impedance tohoto napájení se obvykle volí  $50 \Omega$  a to kvůli připojení konektoru k hraně substrátu. Impedance na hraně flíčku nikdy není  $50 \Omega$ , a proto se musí napájení přizpůsobit. Nejzákladnější typ přizpůsobení u takového typu antény je „zapuštění“ mikropásku do flíčku (obr. 1.2) [1].



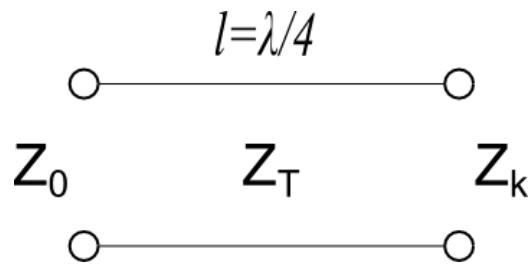
Obr. 1.2: Zapuštěné mikropáskové napájení.

Nebo může být použit čtvrtvlnný transformátor, který transformuje impedanci mikropásku ( $50 \Omega$ ) na impedanci, která je na hraně flíčku pomocí rovnice (6) [3]

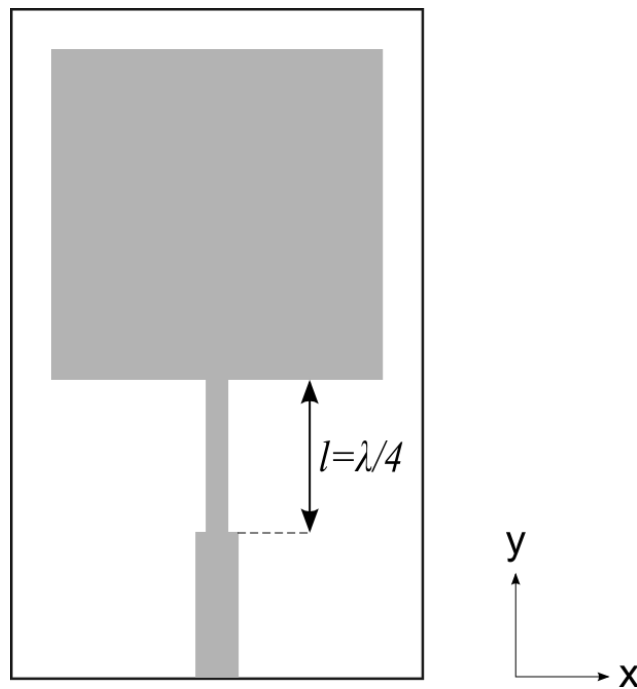
$$Z_T = \sqrt{Z_0 Z_k}, \quad (6)$$

kde  $Z_0$  je impedance napájecího mikropásku ( $50 \Omega$ ),  $Z_k$  je impedance na hraně flíčku a výsledná  $Z_T$  je impedance čtvrtvlnného transformátoru (obr. 1.3). Jak toto napájení

vypadá ve skutečnosti, je znázorněno na obr. 1.4.



Obr. 1.3: Náhradní schéma čtvrtvlnného transformátoru.



Obr. 1.4: Prizpůsobení pomocí čtvrtvlnného transformátoru.

Při využití tohoto typu napájení, je zapotřebí spočítat z impedance napájecího mikropásku jeho šířku. Postup tohoto výpočtu znázorňují rovnice (7 - 9) [4]

$$\frac{h}{w} = \frac{1}{4} \left( \frac{e^H}{2} - e^{-H} \right), \quad (7)$$

kde  $H$  bylo vypočteno jako

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} * \frac{Z_0}{60} + \frac{0,9}{\pi} * \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}. \quad (8)$$

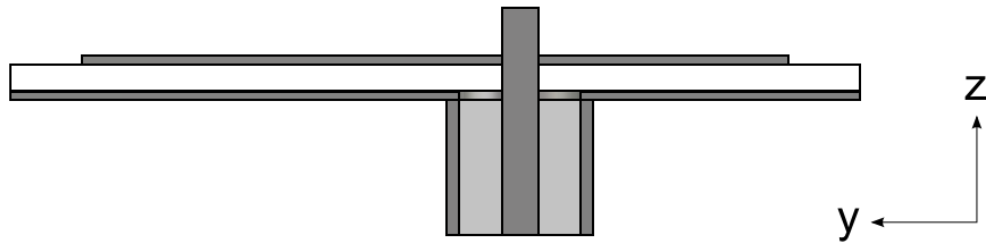
Rovnice (7) a (8) platí pro úzké vedení  $w/h \leq 1$ . Pro široké vedení  $w/h \geq 1$  platí rovnice (9)

$$\frac{w}{h} = \frac{120\pi}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} - \frac{2}{\pi} - \left( \frac{2}{\pi} - \frac{\epsilon_r - 1}{3,7 * \epsilon_r} \right) * \ln \left( \frac{120\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} - 1 + 1,84 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \right). \quad (9)$$

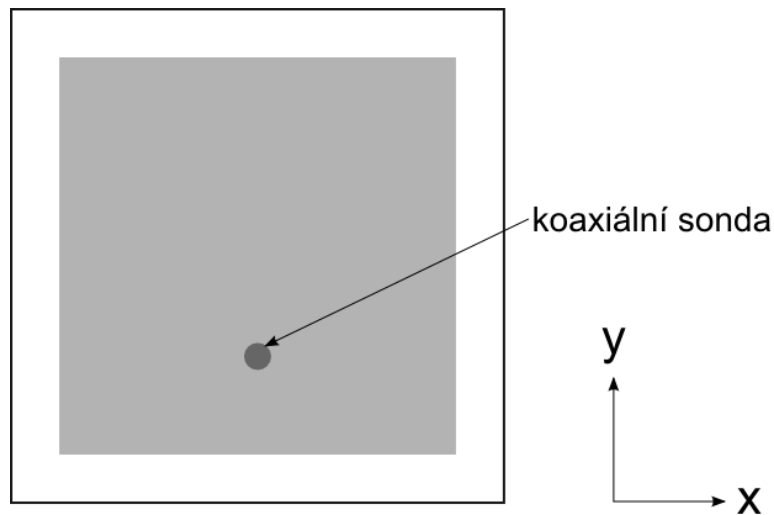


### 1.2.2 Napájení koaxiální sondou

Tento typ napájení může být využit například v případech, kdy nelze anténu napájet mikropáskem. Koaxiální sonda je ve většině případů koaxiální konektor, který se přivede ze strany zemnicí desky, skrz otvor, k fličku. Pro lepší pochopení poslouží následující obrázky (obr. 1.5 a 1.6) [1].



Obr. 1.5: Profilový řez antény napájené koaxiální sondou.

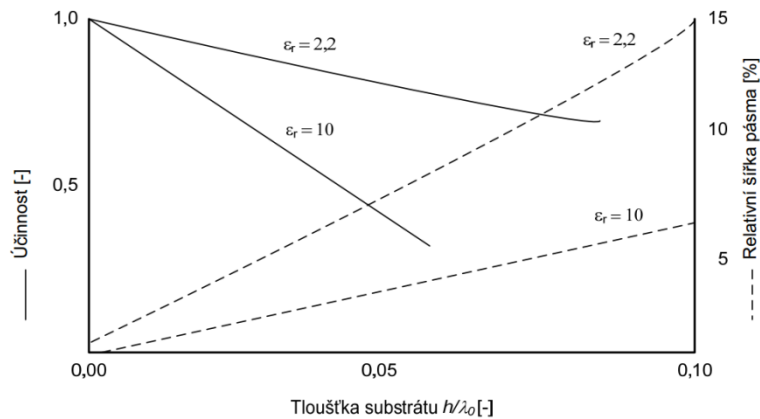


Obr. 1.6: Anténa napájená koaxiální sondou.

Koaxiální sonda je posunována od hrany fličku směrem ke středu, ve směru osy  $y$ , tím se hledá nejlepší přizpůsobení (nejmenší hodnota činitele odrazu).

### 1.3 Volba substrátu

Dnes existuje velké množství různých substrátů, které se od sebe odlišují různými vlastnostmi. Podle těchto vlastností určujeme, zda se substrát použije například k výrobě antény, mikrovlnného obvodu nebo jako deska plošných spojů. Vlastností je celá řada, ale pro výrobu antén jsou nejdůležitější permitivita substrátu  $\epsilon_r$ , ztrátový činitel  $tg\delta$  a tloušťka substrátu  $h$ . Jak je těmito parametry ovlivněna účinnost a relativní šířka pásma antény, je znázorněno na obr. 1.7 [2].



Obr. 1.7: Vliv parametrů substrátů na vlastnosti antén [2].

Z grafu vyplývá, že pro návrh antén bude nejvhodnější substrát, který má malou hodnotu relativní permitivity  $\epsilon_r$ . Dále je patrné, že pro větší účinnost se zhorší šířka pásma a naopak. Je proto nutné volit kompromis mezi těmito parametry. Záleží na typu využití antény.

## 1.4 Parametry antén

Vlastnosti antén představují jejich parametry, jako jsou zisk, pracovní kmitočet, polarizace, směrovost a další. Zde budou představeny dva z nich, jelikož budou dominující v následujících kapitolách.

### 1.4.1 Činitel odrazu

Činitel odrazu  $\delta$  obecně udává, v jakém poměru jsou vůči sobě vlna postupná a vlna odražená. Je-li vedení dokonale přizpůsobeno (nevznikají-li žádné odrazy), je hodnota činitele odrazu 0. Když se však postupná vlna odrazí v celé své míře, je hodnota činitele odrazu 1 a vzniká tzv. stojaté vlnění (dále jen PSV). PSV z činitele odrazu spočítáme z rovnice (10) [2]

$$PSV = \frac{1+\delta}{1-\delta}, \quad (10)$$

kde činitel odrazu může nabývat hodnot 0 až 1.

Podle PSV můžeme také určovat kvalitu antény. Bude-li hodnota PSV rovna jedné, vyzáří se celkový výkon vstupující do systému, k tomuto výsledku je ve skutečnosti možné se pouze přiblížit (vždy vznikají nějaké odrazy). Za ideální se považuje hodnota PSV 1,1-1,5. Nad hodnotu 2 už mohou vznikat problémy s přenosem signálu.

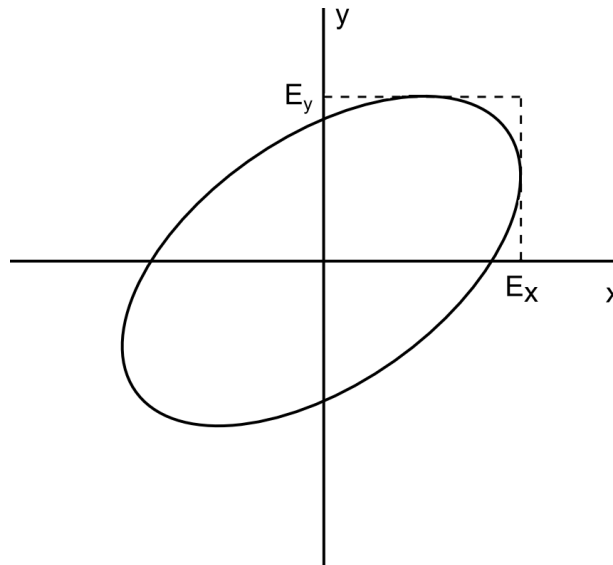
Činitel odrazu se většinou vyjadřuje jako závislost na frekvenci a udává se v decibelech.

### 1.4.2 Polarizace

Polarizace antén je shodná s polarizací elektromagnetických vln. Elektromagnetickou vlnu tvoří elektrické a magnetické složky, které jsou k sobě navzájem kolmé. Vertikálně polarizovaná vlna má siločáry elektrického pole kolmé k zemskému povrchu a u horizontálně polarizované antény jsou siločáry elektrického pole rovnoběžné

s povrchem země [5]. Z předchozí věty je zřejmé, že polarizace antény se určuje z elektrické složky elektromagnetického pole, které je anténou vyzářeno do prostoru.

Typ polarizace určuje osový poměr (AR-Axial Ratio). Je to poměr mezi elektrickými složkami, které jsou vyzářeny v rovině xy (obr. 1.8).



Obr. 1.8: Osový poměr vektoru elektrické intenzity [2].

Výsledný poměr se jednoduše určí ze vztahu (11) [4]

$$AR = \frac{E_x}{E_y}. \quad (11)$$

Osový poměr může nabývat hodnot 0 – 1. V případě, že je osový poměr roven nule, anténa pracuje s lineární polarizací (dále rozlišujeme horizontální nebo vertikální, jak je uvedeno výše). V případě, že je osový poměr roven jedné, anténa pracuje s kruhovou polarizací (dále dělíme na pravotočivou RHCP a levotočivou LHCP). Pro ostatní hodnoty osového poměru anténa pracuje s eliptickou polarizací.

## 2 NÁVRH ANTÉN

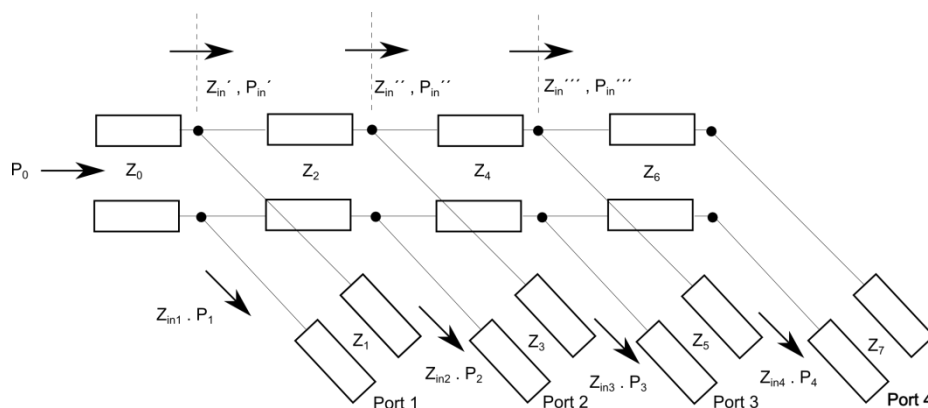
Tato práce je zaměřena na návrh dvou kruhově polarizovaných anténních řad s pracovním kmitočtem v pásmu ISM 5,8 GHz. V následujících podkapitolách je tento návrh podrobně popsán. Návrh antén byl rozdělen do tří částí. Za prvé byla navržena napájecí soustava [6], v druhé části byly navrženy dva typy mikropáskových antén podle literatury [7] a [8]. Na závěr byly tyto jednotlivé části sloučeny. Výsledkem tohoto snažení by měli být dvě kruhově polarizované anténní řady typu 2x2.

Pro návrh antén bylo použito několik typů dostupného substrátu. Jako první byl použit Arlon 25N ( $\epsilon_r=3,38$ ,  $h=0,762$  mm), tento typ ale nevyhovoval výrobním možnostem školní dílny. Další typ, který byl použit, byl FloamClad ( $\epsilon_r=1,25$ ,  $h=1,88$  mm). Díky svým materiálovým vlastnostem tento typ nevyhovoval především pro návrh napájecí soustavy. Na příklad pro impedanci 50  $\Omega$  šířka mikropásku vyšla přibližně 8 mm, to by mohlo vést ke značným komplikacím návrhu při zachování malých rozměrů antén. Jako třetí substrát byl použit CuClad 233 ( $\epsilon_r=2,33$ ,  $h=0,508$  mm), tento typ plně vyhovoval našim potřebám.

Obě antény byly navrženy a odsimulovány v programu CST Microwave Studio.

### 2.1 Napájecí systém

Napájecí systém má za úkol dodat každé anténě stejný výkon a signál fázově zpožděný o 90° vůči předchozí anténě. Při výpočtu rozměrů tohoto vedení bylo postupováno podle náhradního schématu (obr. 2.1) [6].



Obr. 2.1: Náhradní schéma napájecí soustavy [6].

Aby byl do každé antény dodán stejný výkon, musí platit vztah (12)

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4. \quad (12)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že výkon dodávaný do každé antény, bude roven čtvrtině výkonu vstupnímu (13)

$$\frac{1}{4}P_0 = P_1 = P_2 = P_3 = P_4. \quad (13)$$

Podle náhradního schématu mohou být dále zjištěny výkony  $P_{in}'$  (16),  $P_{in}''$  (15) a  $P_{in}'''$  (14).

$$P_{in}''' = P_4 = \frac{1}{4}P_0, \quad (14)$$

$$P_{in}'' = P_3 + P_{in}''' = \frac{1}{2}P_0, \quad (15)$$

$$P_{in}' = P_2 + P_{in}'' = \frac{3}{4}P_0. \quad (16)$$

Po znalosti těchto rovnic, mohou být spočteny impedance jednotlivých úseků vedení. Všechny úseky vedení posouvají fázi o  $90^\circ$  a jejich délka bude  $\lambda/4$ . Proto se při výpočtech impedancí bude uplatňovat vztah pro čtvrtvlnný transformátor (6). Pro impedanci mikropásku  $Z_l$  platí vztah (17)

$$Z_1 = \sqrt{Z_{in1}Z_k}, \quad (17)$$

kde  $Z_k$  je impedance na vstupu připojené antény ( $50 \Omega$ ) a  $Z_{in1}$  bylo odvozeno ze vztahu (18)

$$Z_0 = \frac{Z_{in1}Z'_{in}}{Z_{in1}+Z'_{in}} = \frac{1}{4}Z_{in1}. \quad (18)$$

Pro další hodnotu impedance vedení platí vztah (19)

$$Z_2 = \sqrt{Z'_{in} \frac{Z_{in2}Z''_{in}}{Z_{in2}+Z''_{in}}}. \quad (19)$$

Všechny neznámé impedance byly vypočítány ze vstupní impedance (impedance je nepřímo úměrná výkonu) (20)

$$Z'_{in} = \frac{4}{3}Z_0, \quad Z_{in2} = 4Z_0, \quad Z''_{in} = 2Z_0. \quad (20)$$

Tento postup se opakuje, dokud nebudou obdrženy všechny výsledné vztahy (21 - 27) impedancí pro všechny úseky vedení.

$$Z_3 = \sqrt{Z_{in2}Z_k}, \quad (21)$$

$$Z_4 = \sqrt{Z''_{in} \frac{Z_{in3}Z'''_{in}}{Z_{in3}+Z'''_{in}}}, \quad (22)$$

$$Z''_{in} = 2Z_0, \quad Z_{in2} = 4Z_0, \quad Z'''_{in} = 4Z_0, \quad (23)$$

$$Z_5 = \sqrt{Z_{in3}Z_k}, \quad (24)$$

$$Z_6 = \sqrt{Z_{in4}Z'''_{in}}, \quad (25)$$

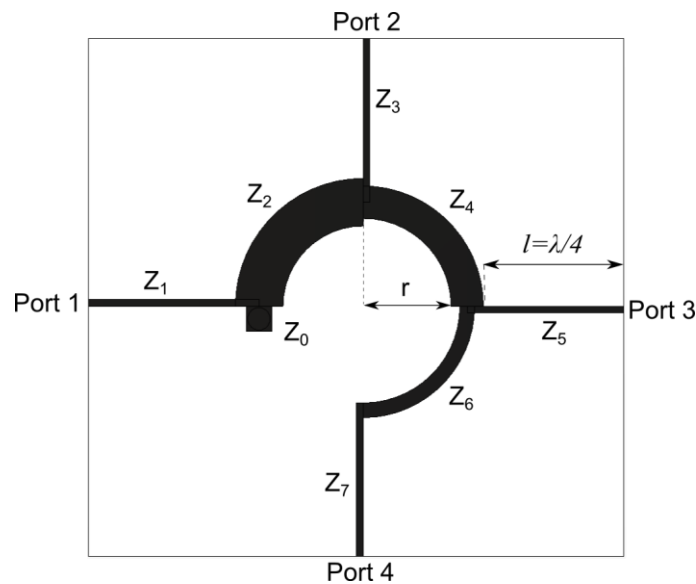
$$Z_7 = \sqrt{Z_{in4}Z_k}, \quad (26)$$

$$Z_{in3} = 4Z_0, \quad Z_{in4} = 4Z_0. \quad (27)$$

Po dosažení hodnoty  $Z_0=Z_k=50 \Omega$ , byly všechny tyto hodnoty vypočítány a zaznamenány do tabulky 1. Dále zde byly uvedeny hodnoty šířky mikropásků pro dané impedance, které byly přepočítány z již uvedených vztahů (7 - 9). Výsledný napájecí systém je na obr. 2.2. Délka každého mikropásku  $l$  je rovna čtvrtině vlnové délky  $\lambda/4=8,47 \text{ mm}$ . Poloměr  $r=5,39 \text{ mm}$ .

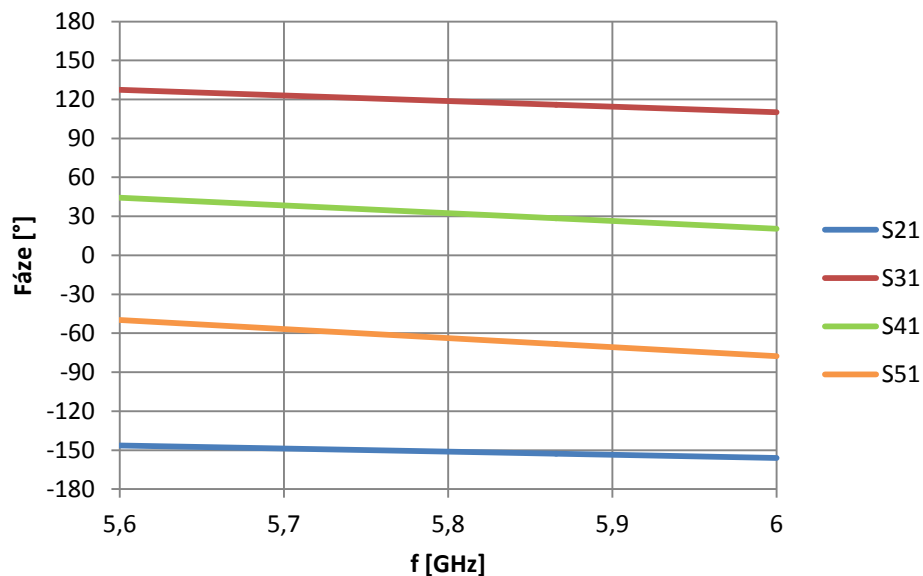
Tab. 1: Rozměry napájecího systému.

Pořadí mikropásku $i$	Charakteristická impedance $Z_i [\Omega]$	Šířka mikropásku $w_i [\text{mm}]$
1	100	0,389
2	66,67	0,902
3	100	0,389
4	100	0,389
5	100	0,389
6	141,42	0,135
7	100	0,389



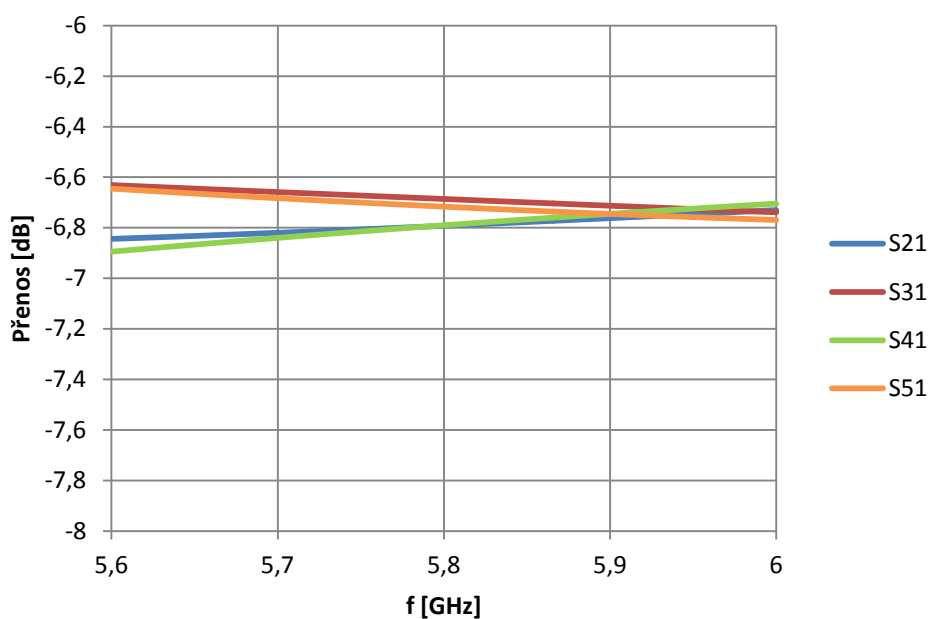
Obr. 2.2: Napájecí systém.

Při těchto rozměrech byl napájecí systém odsimulován, ale výsledky neodpovídaly předpokladům. Fáze na každém portu byly zpožděny o menší hodnotu než  $90^\circ$  a přenos (výkon) mezi porty byl rozdílný. V prvním kroku byly prodlouženy délky pásků  $Z_2$ ,  $Z_4$  a  $Z_6$  (změna poloměru  $r$ ) tak, aby fázový rozdíl mezi jednotlivými porty byl  $90^\circ$  (obr. 2.3). Výsledná hodnota poloměru  $r=6 \text{ mm}$ .



Obr. 2.3: Fáze každého portu vůči vstupu v závislosti na frekvenci.

Pro změnu přenosu byly měněny šířky jednotlivých mikropásků celého napájecího systému. Výsledné jednotlivé přenosy jsou uvedeny v grafu (obr. 2.4). Rozměry výsledného napájecího systému jsou uvedeny v tabulce 2.

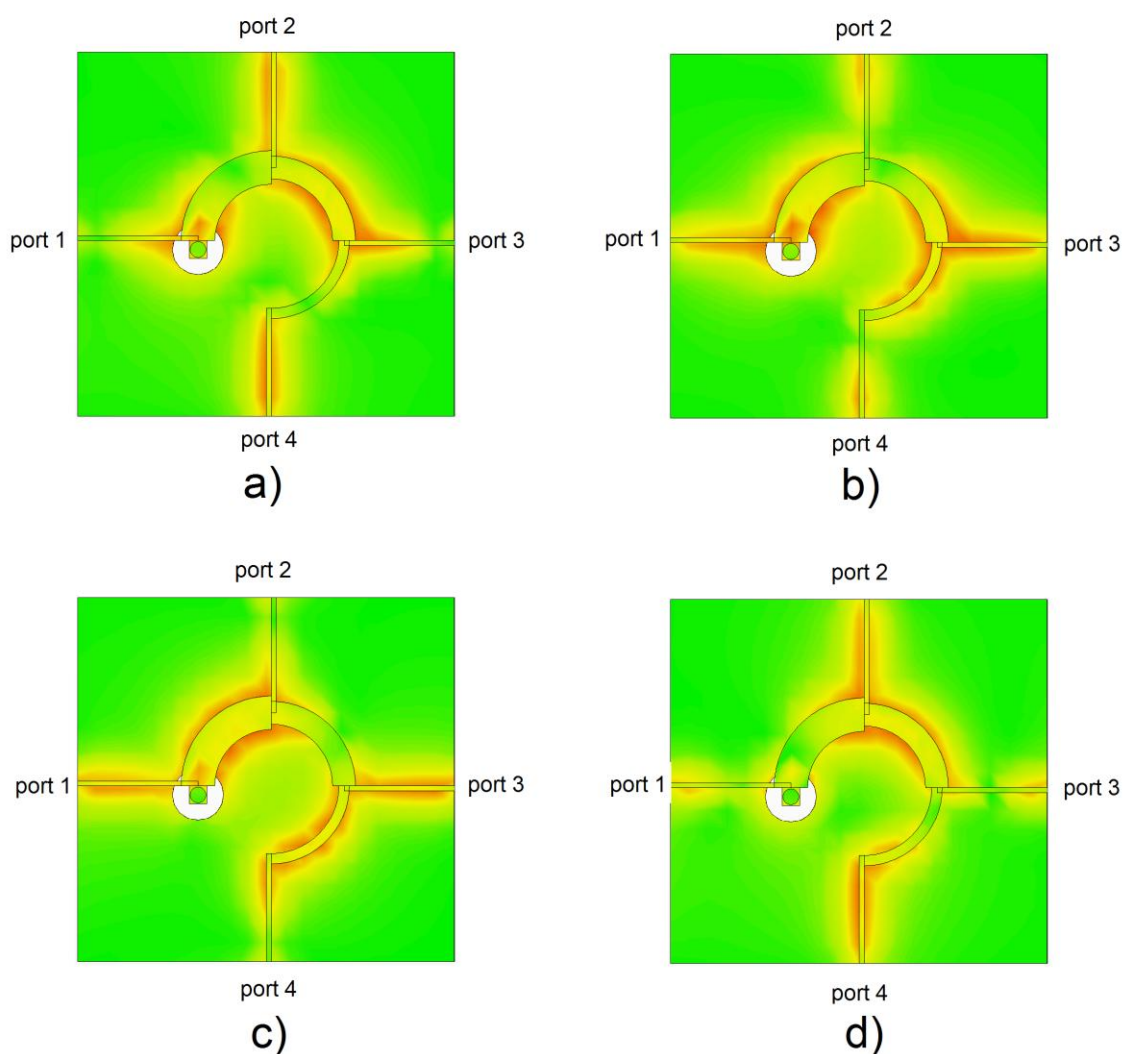


Obr. 2.4: Přenos každého portu vůči vstupu v závislosti na frekvenci.

Tab. 2: Rozměry napájecího systému po úpravě.

Pořadí mikropásku $i$	Šířka mikropásku $w_i [mm]$
1	0,39
2	2,75
3	0,39
4	1,87
5	0,39
6	0,85
7	0,39

Na obr. 2.5 je dodatečně znázorněno rozložení proudů na napájecím systému pro lepší pochopení funkce tohoto typu vedení. Z obrázku je patrné, že proud teče vždy ve stejném okamžiku do protějších větví (porty 2 a 4) a po fázovém posuvu signálu o  $90^\circ$  do následujících větví (porty 1 a 3).



Obr. 2.5: Rozložení proudů na napájecím vedení: a)  $0^\circ$ , b)  $45^\circ$ , c)  $90^\circ$  a d)  $135^\circ$ .



## 2.2 Návrh první antény

### 2.2.1 Anténa s oříznutými rohy

Při návrhu této antény byla nejprve spočítána velikost flíčku. Podle teorie, která je uvedena výše, by měla být velikost flíčku v mezích podle rovnice (5). Postup výpočtu byl následující

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{5,8 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{2,33}} = 33,886 \text{ mm}, \quad (28)$$

$$\lambda/3 < L < \lambda/2, \quad (29)$$

$$11,295 \text{ mm} < L < 16,943 \text{ mm}. \quad (30)$$

Ze zkušenosti víme, že délka strany  $L$  by měla být blíže hodnotě  $\lambda/2$ , proto volíme  $L=16 \text{ mm}$ .

Pro výpočet šířky napájecího mikropásku byly použity rovnice (7 - 9)

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}} \cdot \frac{Z_0}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1} = \sqrt{\frac{2,33+1}{2}} \cdot \frac{50}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{2,33-1}{2,33+1} = 1,19, \quad (31)$$

$$\frac{h}{w} = \frac{1}{4} \left( \frac{e^H}{2} - e^{-H} \right) = \frac{1}{4} \left( \frac{e^{1,19}}{2} - e^{-1,19} \right) = 0,3347. \quad (32)$$

Jelikož výsledek nesplňuje podmínku  $w/h \leq 1$ , byla použita rovnice (9)

$$\begin{aligned} \frac{w}{h} &= \frac{120\pi}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} - \frac{2}{\pi} - \left( \frac{2}{\pi} - \frac{\epsilon_r-1}{3,7*\epsilon_r} \right) * \ln \left( \frac{120\pi^2}{Z_0\sqrt{\epsilon_r}} - 1 + 1,84 \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r} \right) = \\ &= \frac{120\pi}{50\sqrt{2,33}} - \frac{2}{\pi} - \left( \frac{2}{\pi} - \frac{2,33-1}{3,7*2,33} \right) * \ln \left( \frac{120\pi^2}{50\sqrt{2,33}} - 1 + 1,84 \frac{2,33-1}{\epsilon_r 2,33} \right) = \\ &= 2,98. \end{aligned} \quad (33)$$

Zde je podmínka  $w/h \geq 1$  splněna. Výsledná šířka mikropáskového vedení vychází  $w=1,51 \text{ mm}$ .

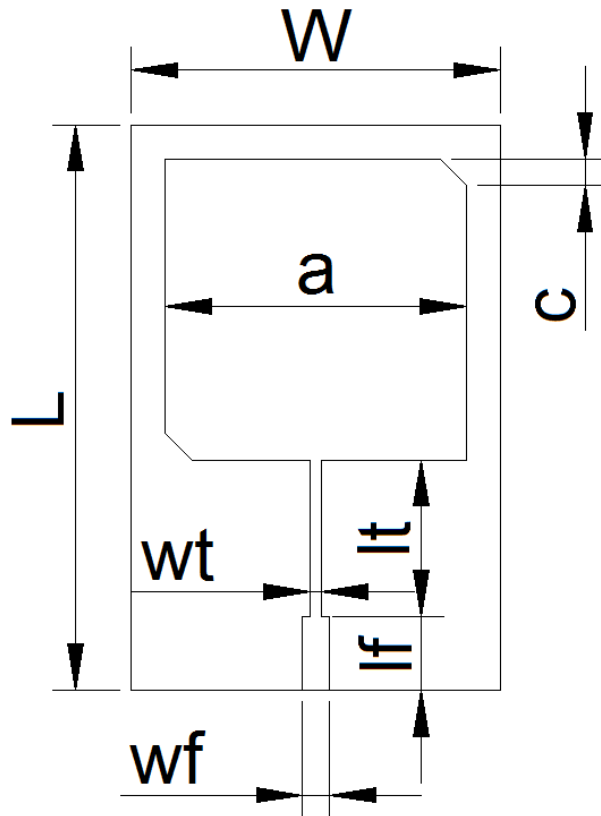
Toto vedení muselo být přizpůsobeno k hraně flíčku. Zde bylo využito vlastností čtvrtvlnného transformátoru. Délka tohoto vedení, jak už z názvu vyplývá, je  $\lambda/4=8,47 \text{ mm}$ . Aby bylo možno vypočítat impedanci tohoto vedení, je potřeba znát impedanci na hraně flíčku. Tuto hodnotu obdržíme z rovnice (34) [1]

$$R_{edg} = 120 \frac{\lambda_0}{2W} = 120 \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 16 \cdot 10^{-3}} = 193,97 \Omega. \quad (34)$$

Hodnota impedance čtvrtvlnného transformátoru bude podle rovnice (6)

$$Z_T = \sqrt{Z_0 Z_k} = \sqrt{50 * 187,42} = 98,48 \Omega \Rightarrow w_t = 0,4 \text{ mm}. \quad (35)$$

V posledním kroku návrhu byly oříznuty dva protilehlé rohy flíčku, tím bylo dosaženo pravotočivé kruhové polarizace. Velikost jedné hrany uříznutého rohu, byla zvolena  $c=3 \text{ mm}$ . Celá konstrukce antény je znázorněna na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Rozměry antény s uříznutými rohy.

Z praxe je známo, že výsledné rozměry antény podle vzorců, nikdy nebudou přesně vykazovat očekávané výsledky. Pro zlepšení vlastností antény je vždy zapotřebí výsledné parametry optimalizovat. Výsledné rozměry jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3: Rozměry antény.

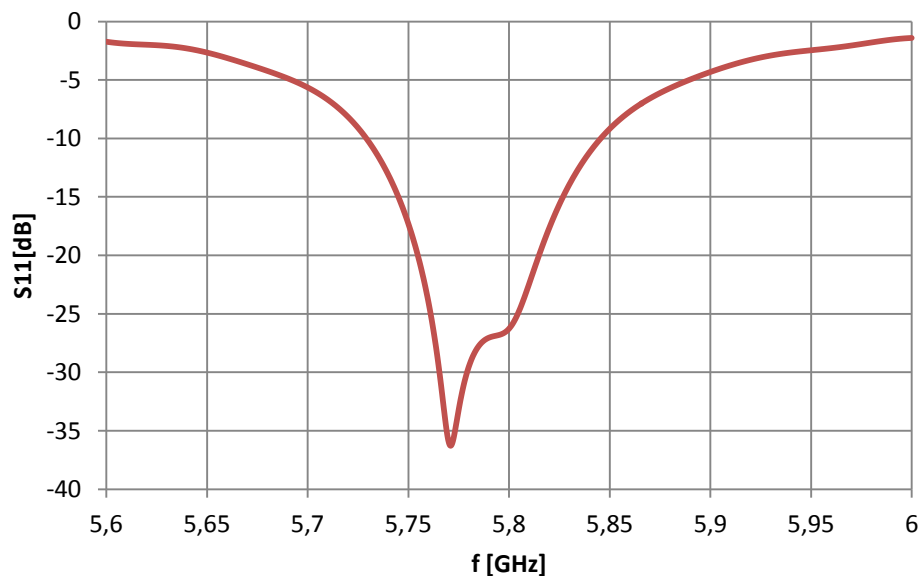
L [mm]	W [mm]	a [mm]	c [mm]	lf [mm]	lt [mm]	wf [mm]	wt [mm]
40,63	20	16,31	1,44	4	8,47	1,45	0,6

Výsledky simulace antény při těchto rozměrech, jsou zobrazeny v následujících grafech. Činitel odrazu (obr. 2.7) na frekvenci 5,8 GHz je -26,3 dB. Z této hodnoty může být vypočten, podle rovnice (10), poměr stojatých vln.

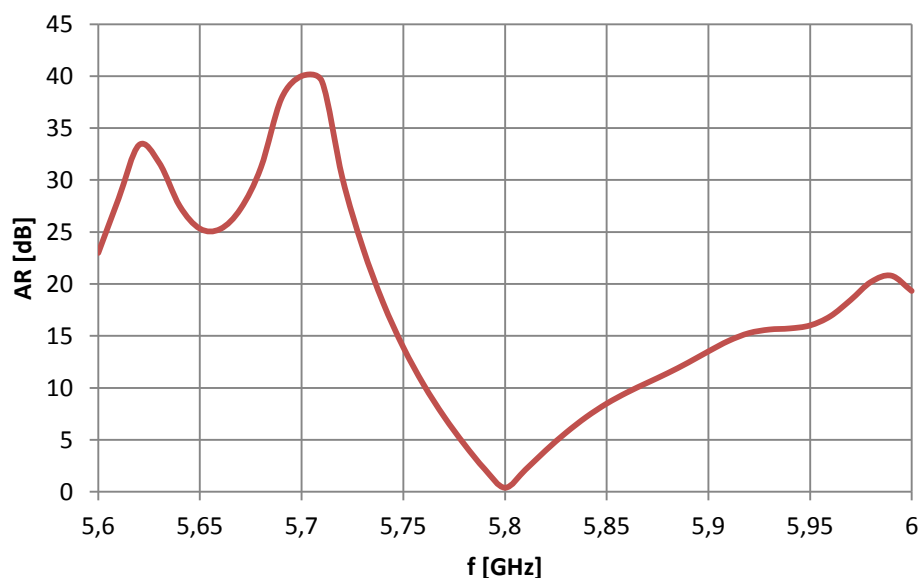
$$\delta = 10^{\frac{-26,3}{20}} = 0,048, \quad (36)$$

$$PSV = \frac{1+\delta}{1-\delta} = \frac{1+0,048}{1-0,048} = 1,1. \quad (37)$$

Osový poměr antény (obr. 2.8) na frekvenci 5,8 GHz dosahuje hodnoty 0,39 dB. Po přepočtu je tato hodnota rovna 0,95. Z teorie je známo, že u kruhové polarizace je osový poměr roven jedné. Jako mezní hodnota osového poměru, kdy anténa ještě pracuje s kruhovou polarizací, se udává 3 dB.



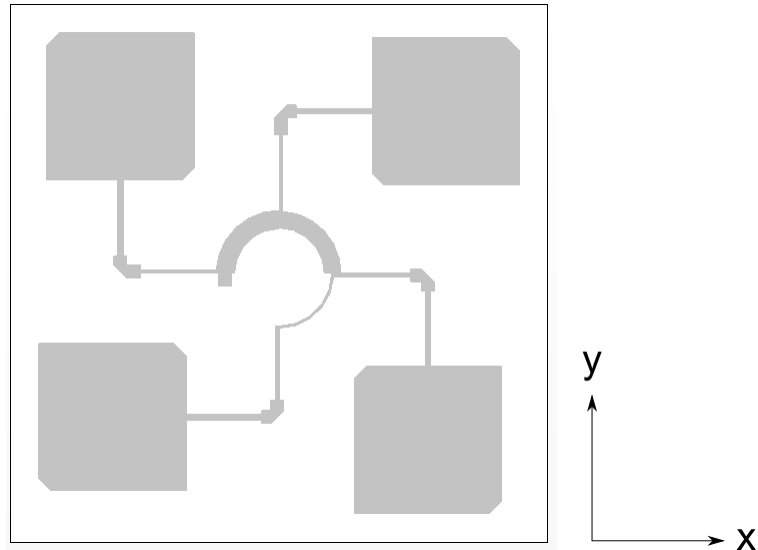
Obr. 2.7: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci.



Obr. 2.8: Osový poměr v závislosti na frekvenci.

### 2.2.2 Kompletace antény s oříznutými rohy

Při kompletaci (obr. 2.9), antény s oříznutými rohy a napájecího systému, byly antény zahnuty do pravého úhlu v místě napájecího mikropásku, který je přizpůsoben na impedanci  $50 \Omega$ , z důvodu velikosti anténního systému, ale především kvůli zachování kruhové polarizace antény (flíčky musí být od sebe tak daleko, aby se vzájemně neovlivňovali a přitom splňovali podmínku kruhové polarizace).

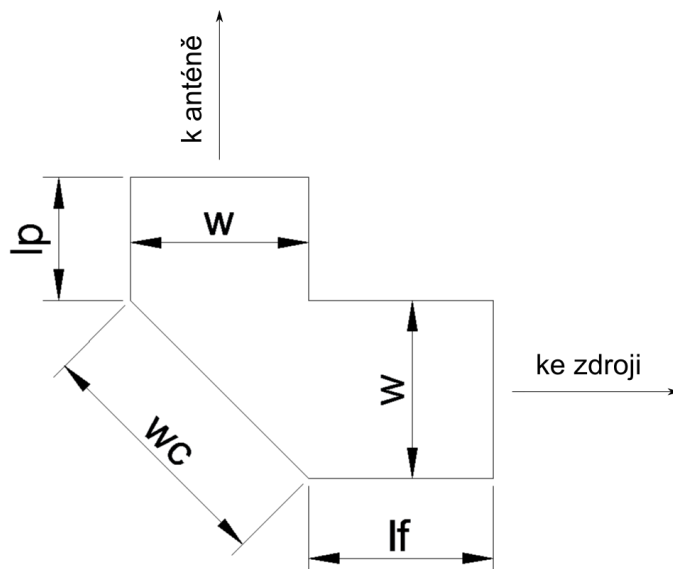


Obr. 2.9: Kompletní anténa s oříznutými rohy.

Ostrý úhel při zalomení mikropásku byl odstraněn, kvůli lepšímu průchodu signálu tímto bodem. Při výpočtu tohoto zkosení bylo postupováno podle vztahu (38) z [9]

$$w_c = w * 2\sqrt{2} \left( 0,52 + 0,65e^{-1,35\frac{w}{h}} \right), \quad (38)$$

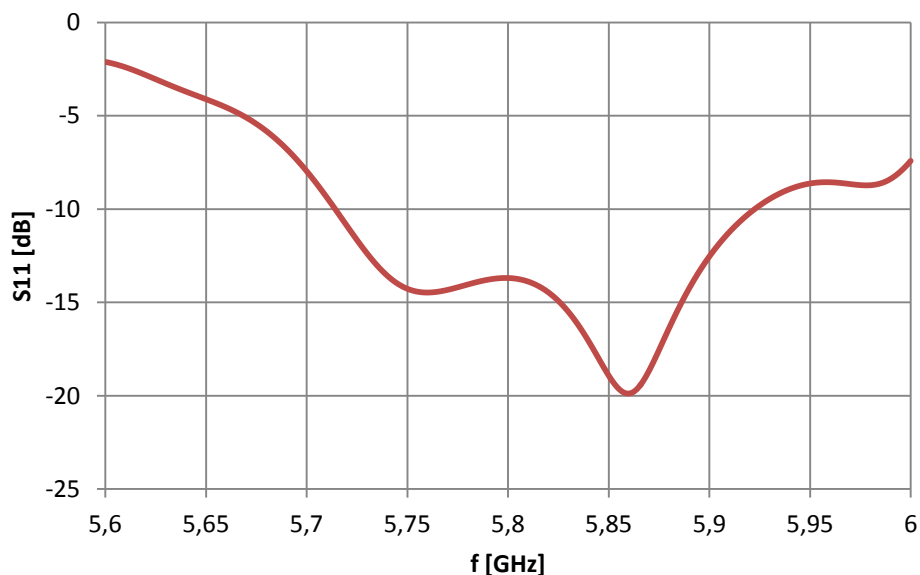
kde  $w$  je šířka mikropásku a  $h$  je výška substrátu. Po dosazení do vztahu, délka zkosení vychází  $w_c=2,19 \text{ mm}$  (obr. 2.10).



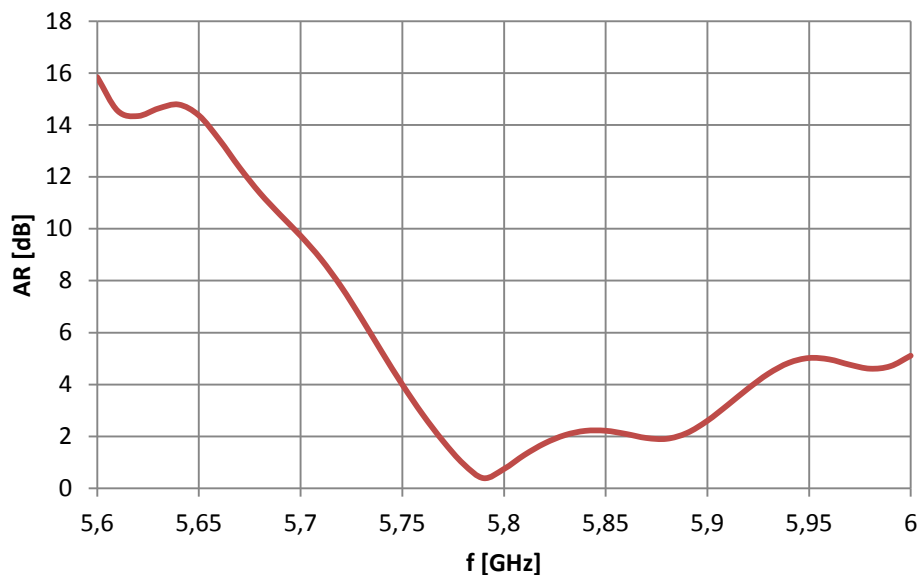
Obr. 2.10: Ohyb mikropáskového vedení.

Na obrázku jsou dále vyznačeny délky úseků vedení  $l_p$  a  $l_f$ . Velikost úseků těchto vedení musí být tak velké, aby rezonance antén nebyly ovlivňovány napájecími cestami a přitom byly zachovány požadované frekvenční charakteristiky. Po optimalizaci těchto parametrů jsou výsledné délky  $l_p=1 \text{ mm}$  a  $l_f=1,5 \text{ mm}$ .

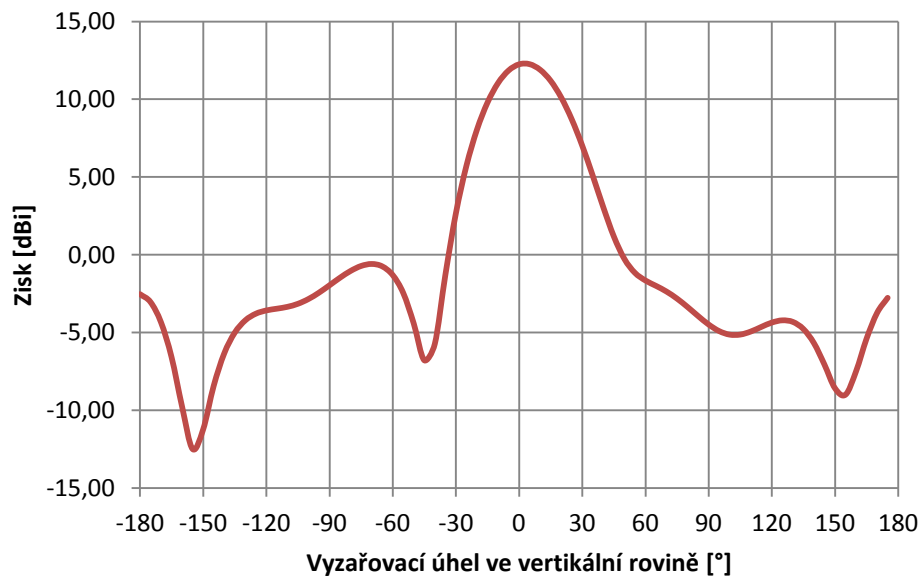
Výsledky simulace této soustavy jsou uvedeny v následujících grafech. Činitel odrazu (S11) dosahuje na frekvenci 5,8 GHz hodnoty -13,8 dB (obr. 2.11). Poměr stojatých vln na této frekvenci je roven hodnotě 1,51. Osový poměr je roven hodnotě 1,7 dB (obr. 2.12). Po převodu z decibelů na bezrozměrnou hodnotu je výsledný poměr 0,78. Zisk anténní soustavy (obr. 2.13 a 2.14) ve směru osy z, dosahuje hodnoty 12,3 dBi.



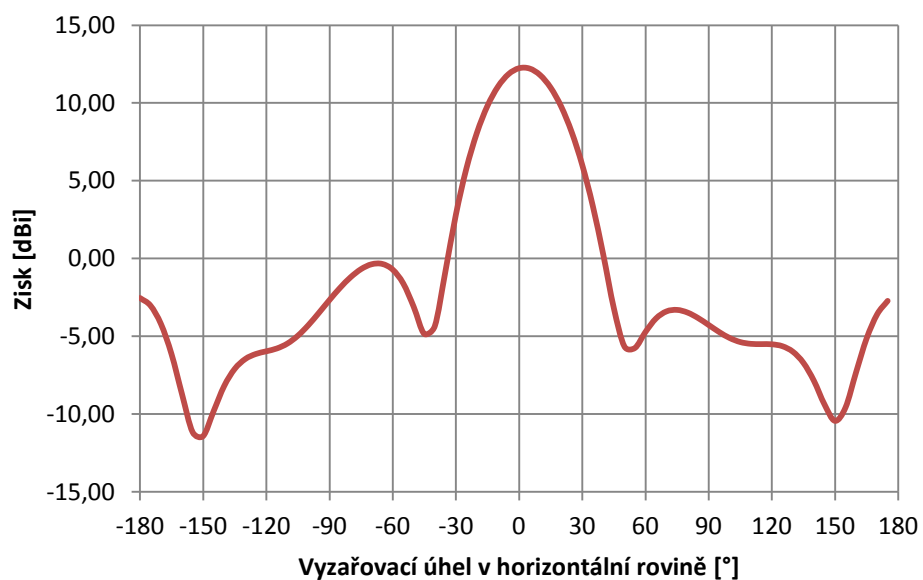
Obr. 2.11: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci.



Obr. 2.12: Osový poměr v závislosti na frekvenci.



Obr. 2.13: Zisk antény ve vertikální rovině.



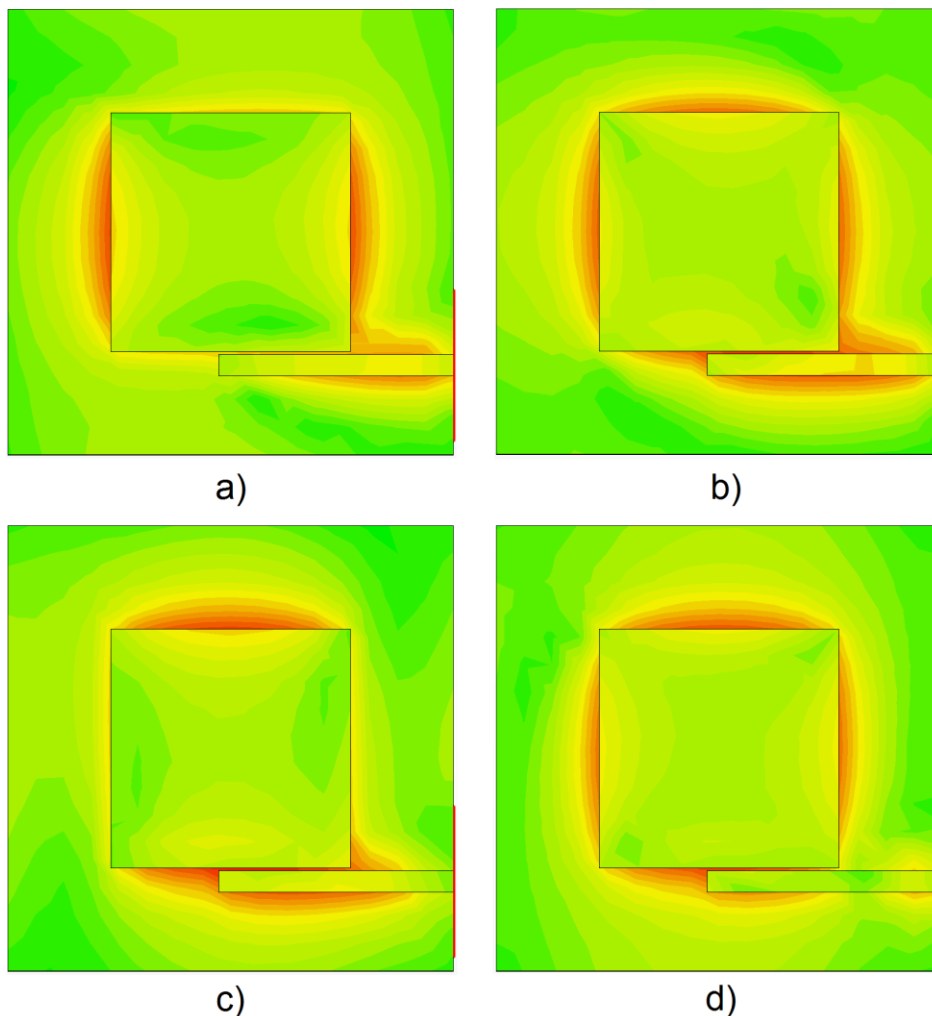
Obr. 2.14: Zisk antény v horizontální rovině.

## 2.3 Návrh druhé antény

### 2.3.1 Anténa napájená kapacitní vazbou

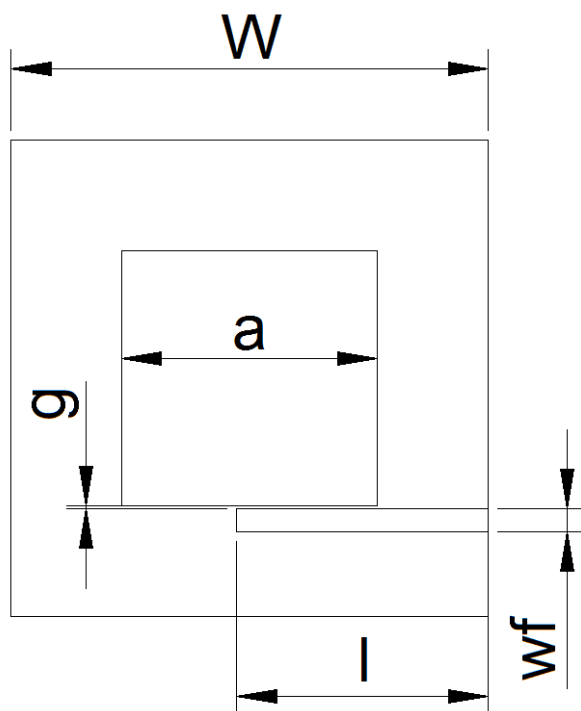
Jako druhý typ kruhově polarizované antény byla zvolena anténa napájená kapacitní vazbou [8]. Pro popis funkce této antény poslouží obr. 2.15, kde je zobrazeno rozložení proudů na anténě.

Proud se postupně šíří po napájecím vedení ( $50 \Omega$ ), které je paralelně s hranou flíčku. Mezi napájením a anténou je nepatrná štěrbina (kapacitní mezera), přes kterou se proudy z napájecího mikropásku dostávají do flíčku. Ze situací na obrázku je patrné, kdy anténa rezonuje ve svislém a kdy ve vodorovném směru (záleží na rozložení proudu na vedení).



Obr. 2.15: Rozložení proudů na anténě: a)  $0^\circ$ , b)  $45^\circ$ , c)  $90^\circ$  a d)  $135^\circ$ .

Velikost flíčku  $a$  a šířka napájecího vedení  $w_f$  byly převzaty z předchozí antény ( $a=16,31 \text{ mm}$ ,  $w_f=1,45 \text{ mm}$ ). Další rozměry, které bylo potřeba zjistit, byly délka napájecího vedení  $l$  a šířka štěrbiny mezi vedením a flíčkem  $g$  (obr. 2.16). Tyto hodnoty byly experimentálně zvoleny a poté optimalizovány. Bylo zjištěno, že při změně šířky štěrbiny se měnila polarizace antény (osový poměr) a při změně délky vedení se měnilo její přizpůsobení.



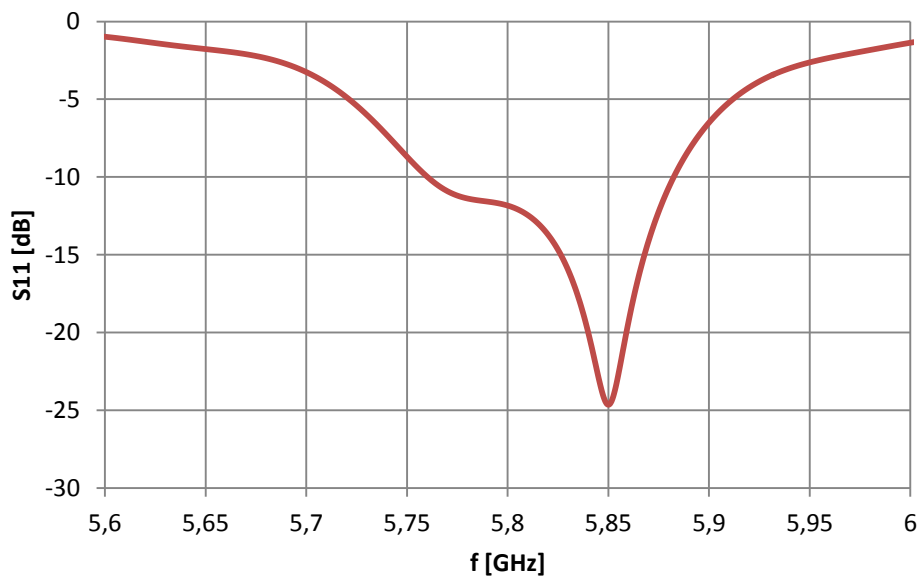
Obr. 2.16: Rozměry antény napájené kapacitní vazbou.

Dosažené výsledné rozměry antény jsou uvedeny v tabulce 4. Výsledné charakteristiky pro anténu s těmito rozměry jsou zobrazeny na obr. 2.17 (činitel odrazu) a obr. 2.18 (osový poměr). Hodnota činitele odrazu na frekvenci 5,8 GHz dosahuje hodnoty -11,83 dB (PSV=1,69) a osový poměr na této frekvenci dosahuje hodnoty 0,86 dB (v bezrozměrném měřítku je to 0,9). Anténa pracuje s levotočivou kruhovou polarizací.

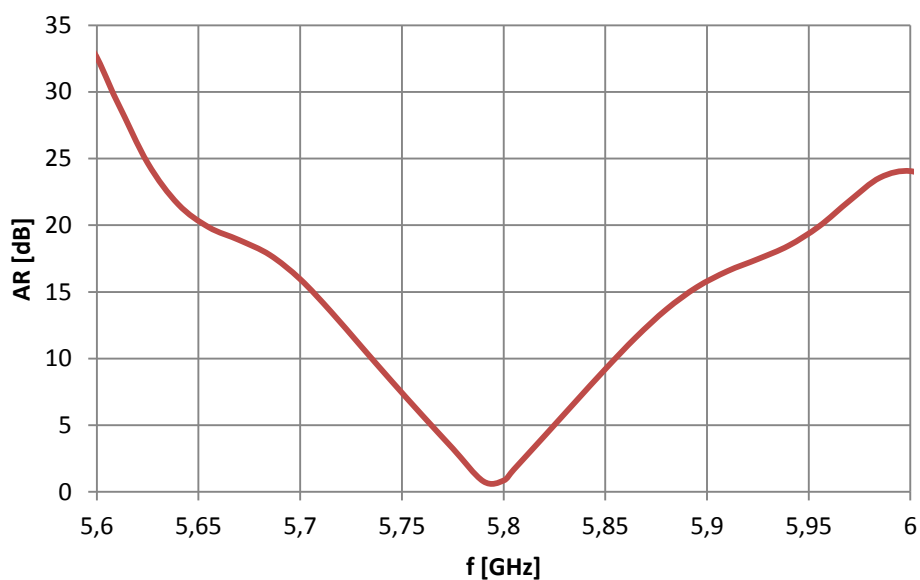
Tab. 4: Rozměry antény.

$W$ [mm]	$a$ [mm]	$g$ [mm]	$l$ [mm]	$w_f$ [mm]
30	16,1	0,19	15,8	1,45





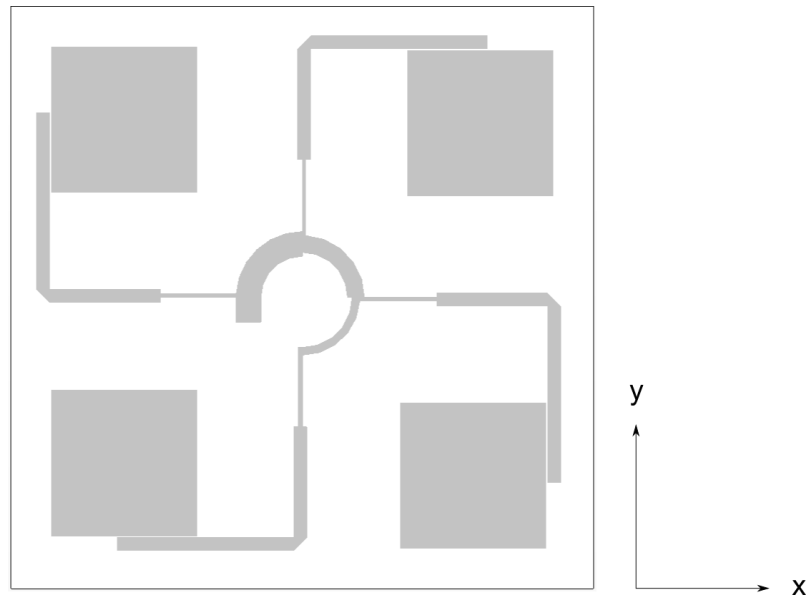
Obr. 2.17: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci.



Obr. 2.18: Osový poměr v závislosti na frekvenci.

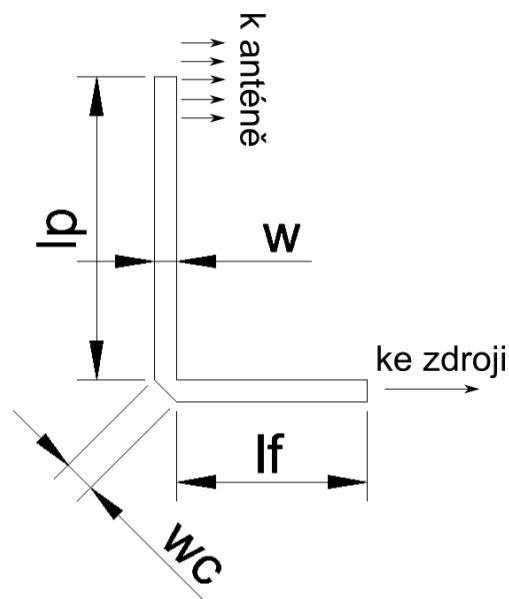
### 2.3.2 Kompletace druhé antény

Anténa napájená kapacitní vazbou byla kompletována obdobně jako anténa s oříznutými rohy. Napájecí vedení této antény bylo prodlouženo a zahnuto do pravého úhlu tak aby rezonance flíčků nebyly ovlivňovány napájecím systémem a při tom byla zachována soustavnost antény pro splnění podmínky pro kruhovou polarizaci. Výsledný motiv antény je zobrazen na obr. 2.19.



Obr. 2.19: Kompletní anténa napájená kapacitní vazbou.

Délky napájecího vedení byly experimentálně zvoleny a následně optimalizovány. Podle obr. 2.20 délka tohoto vedení je  $l_p=12,35 \text{ mm}$  a  $l_f=19,7 \text{ mm}$ . Jelikož napájecí vedení má impedanci  $50 \Omega$  a jeho šířka je stejná jako u antény s oříznutými rohy ( $w=1,45 \text{ mm}$ ), bude délka zkosené hrany stejná ( $w_c=2,19 \text{ mm}$ ).

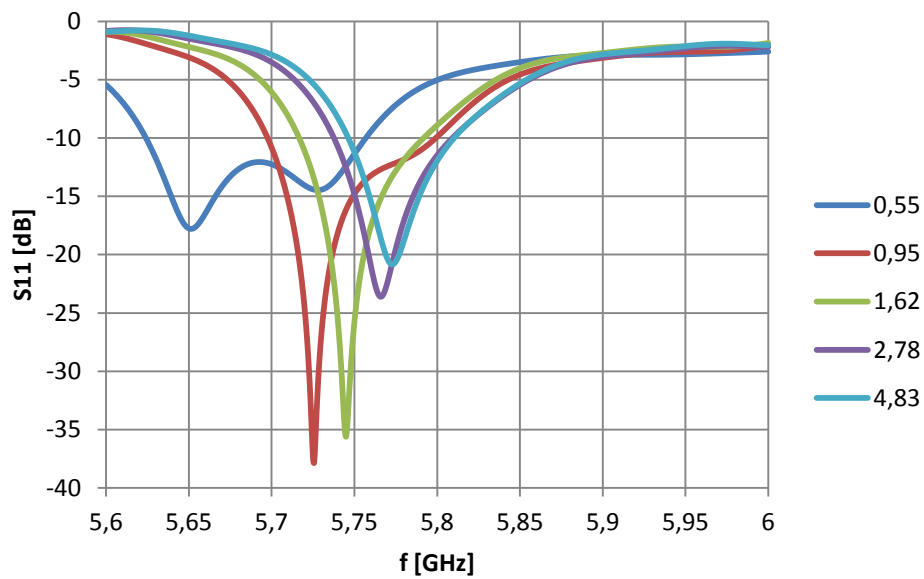


Obr. 2.20: Rozměr napájecího vedení k anténě.

Tuto anténu bylo velice obtížné vyladit na požadované hodnoty. Při zjemňování výpočetních buněk se rezonanční kmitočet posouval směrem nahoru, stejně tak osový poměr a zisk antény. Proto musela být anténa nejprve naladěna na nižší kmitočet pro hrubší síť výpočetních buněk a následně při zjemňování těchto buněk se rezonanční kmitočet posouval směrem k požadovaným hodnotám.

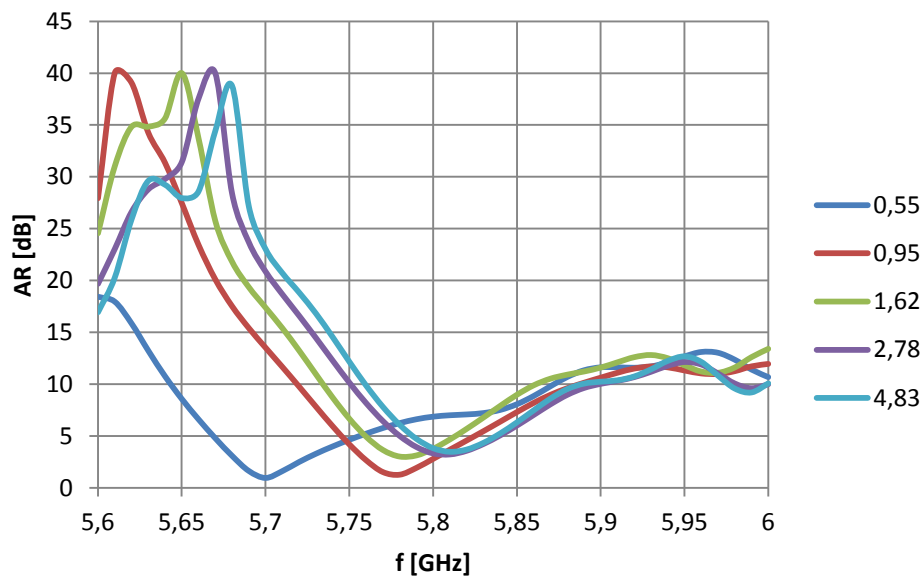
Zvyšování počtu výpočetních buněk pro průběh činitele odrazu je uvedeno na obr. 2.21. Z grafu je patrný posun rezonančního kmitočtu při zvyšování počtu buněk.

Počet buněk pro jednotlivé průběhy je udáván v milionech.

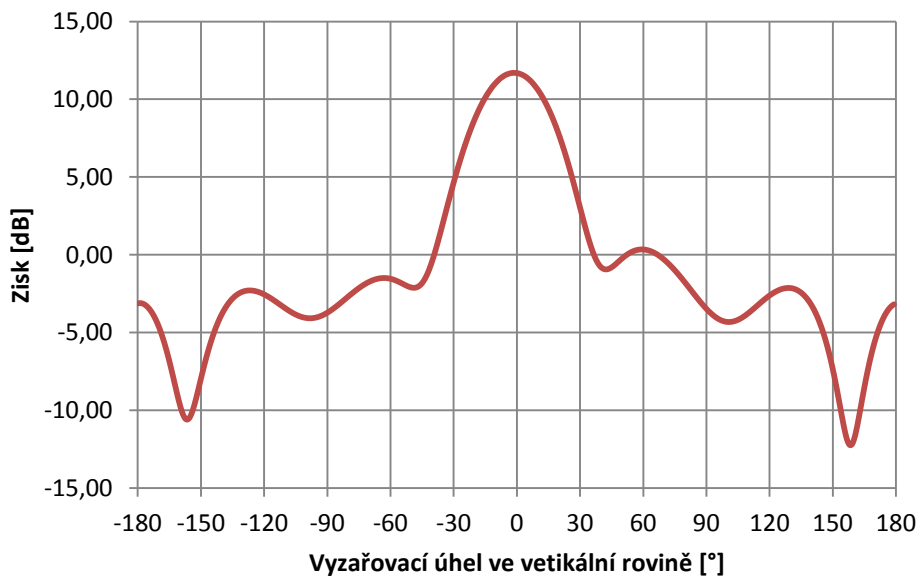


Obr. 2.21: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci.

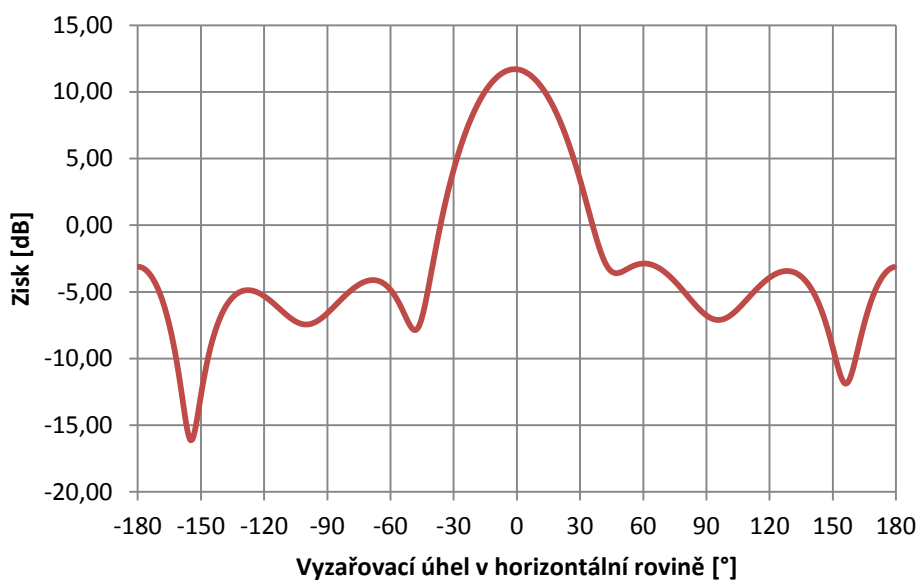
Činitel odrazu na frekvenci 5,8 GHz je roven hodnotě -11,96 dB (PSV=1,67). Osový poměr (obr. 2.22) byl kvůli posuvu frekvence také dost ovlivněn, na rezonanční frekvenci dosahuje hodnoty 3,8 dB. Zisk antény při nejjemnější simulaci dosahuje hodnoty 11,7 dBi (obr. 2.23 a 2.24).



Obr. 2.22: Osový poměr v závislosti na frekvenci.



Obr. 2.23: Zisk antény ve vertikální rovině.



Obr. 2.24: Zisk antény v horizontální rovině.

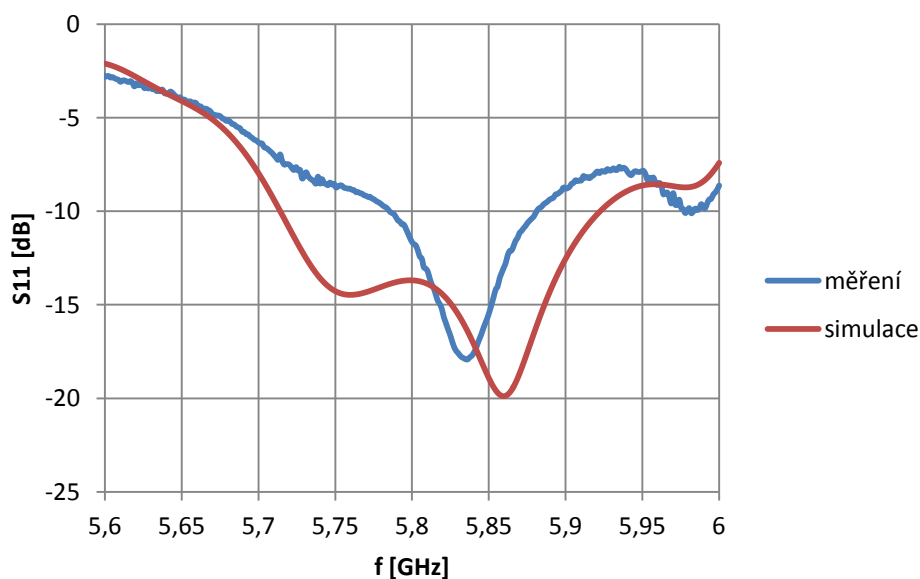
## 3 VÝROBA ANTÉN

Jak je již uvedeno výše, obě antény byly navrženy v programu CST Microwave Studio. Pro návrh a později pro výrobu byl použit substrát CuClad 233 ( $\epsilon_r=2,33$ ,  $h=0,508\text{ mm}$  a  $tg\delta=0,0013$ ). Pro co nejpřesnější výrobu byl vyexportován tvar antén ze simulačního programu ve formátu gerber.

Výsledky zhotovených a proměřených antén jsou uvedeny a zhodnoceny v následujících podkapitolách.

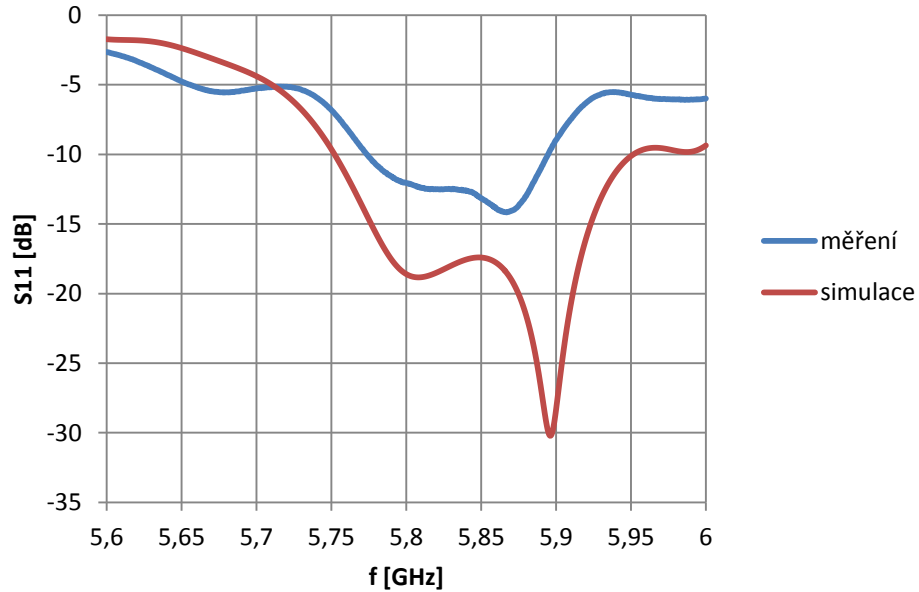
### 3.1 Anténa s oříznutými rohy

Jako první byla vyrobena a proměřena anténa s oříznutými rohy. Výsledek měření činitele odrazu je uveden na obr. 3.1. Z průběhu je zřejmé, že šířka pásma reálné antény je mnohem menší než u antény simulované ( $B_{\text{měř}}=90\text{ MHz}$  a  $B_{\text{sim}}=207\text{ MHz}$ ). Z grafu je dále patrné, že anténa rezonuje na nežádoucí frekvenci okolo 5,98 GHz. Proto byla simulovaná anténa upravena a následně opět vyrobena.



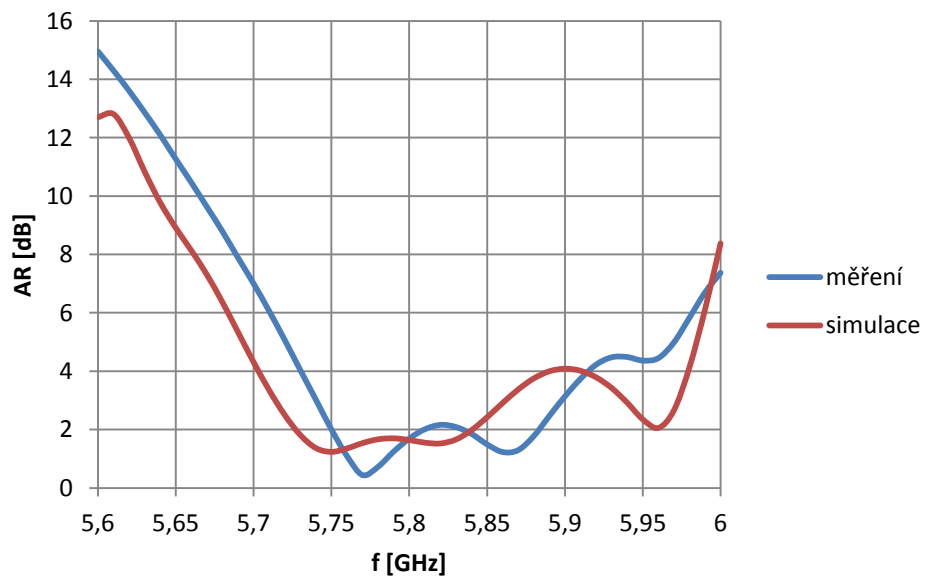
Obr. 3.1: Činitel odrazu první vyrobené antény.

Průběh činitele odrazu druhé antény s oříznutými rohy je uveden na obr. 3.2. Podle průběhu se zdá být anténa nepřiliš dobře přizpůsobena, to je ale způsobeno podleptáním motivu při výrobě, tato nepřesnost by měla mít důsledek pouze na průběh činitele odrazu. I přes tento nedostatek anténa vykazuje lepší výsledky než ta předchozí ( $B_{\text{měř}}=120\text{ MHz}$  a  $B_{\text{sim}}=196\text{ MHz}$ ).



Obr. 3.2: Činitel odrazu druhé vyrobené antény.

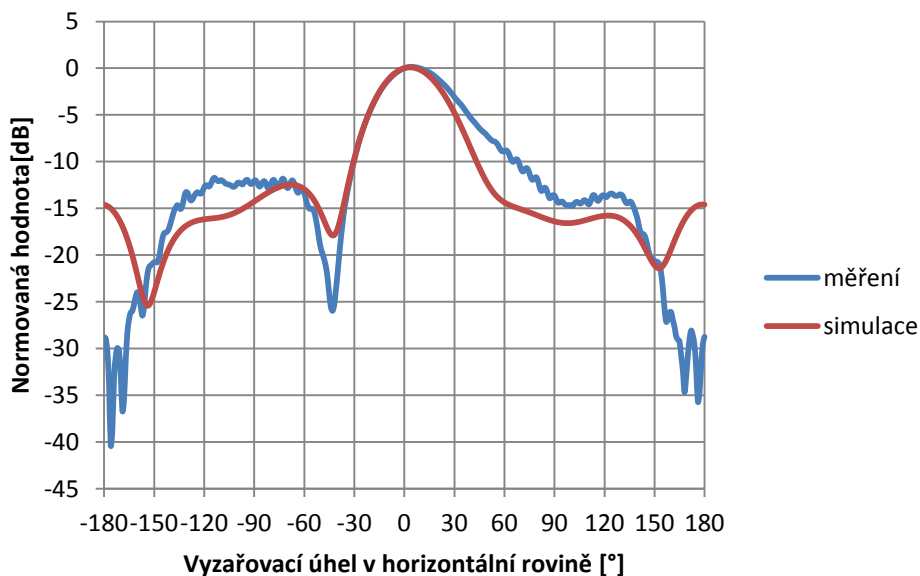
Osový poměr antény je uveden na obr. 3.3. Výsledky jsou mírně frekvenčně posunuté, ale jinak si poměrně odpovídají. V odborných člancích se uvádí, že anténa pracuje s kruhovou polarizací do AR=3 dB. Na této úrovni anténa pracuje s kruhovou polarizací v pásmu B=160 MHz.



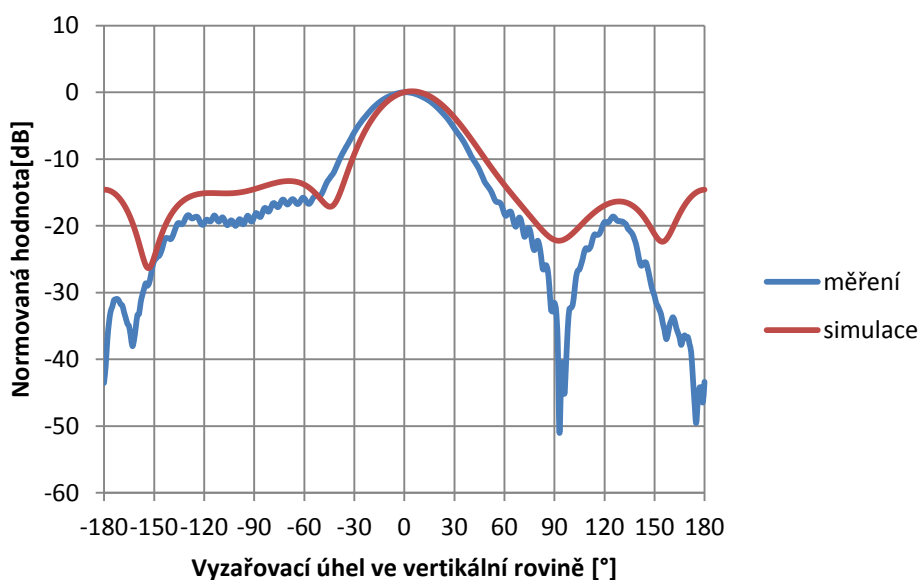
Obr. 3.3: Osový poměr v závislosti na frekvenci.

Dalšími uvedenými výsledky jsou vyzářovací diagramy antény v horizontální rovině (obr. 3.4) a ve vertikální rovině (obr. 3.5). Na svislé ose je uvedena normovaná hodnota těchto závislostí vztažená k největší hodnotě.

Z průběhů je patrné zvlnění charakteristik, to bylo zapříčiněno odrazy od rotátoru a upevnění antény na něj.



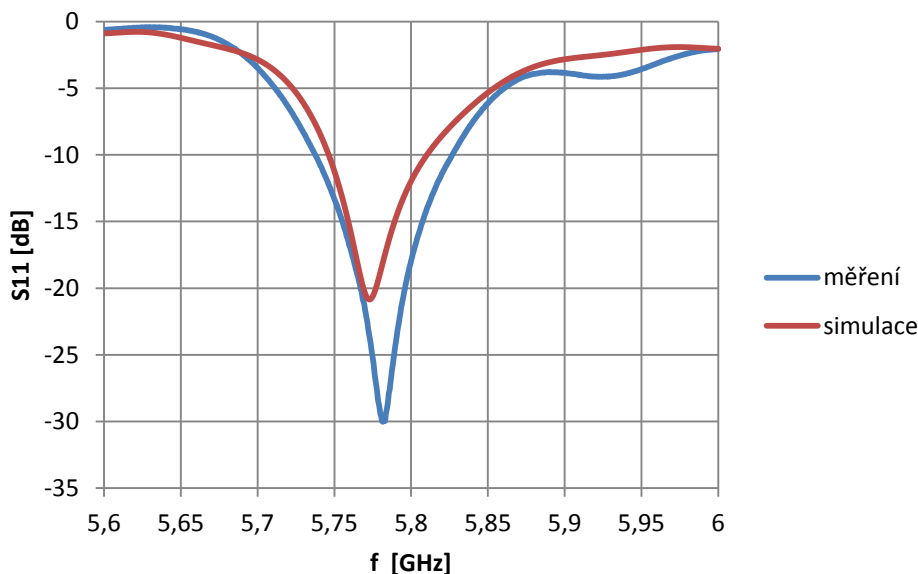
Obr. 3.4: Vyzařovací diagram v horizontální rovině.



Obr. 3.5: Vyzařovací diagram ve vertikální rovině.

### 3.2 Anténa napájená kapacitní vazbou

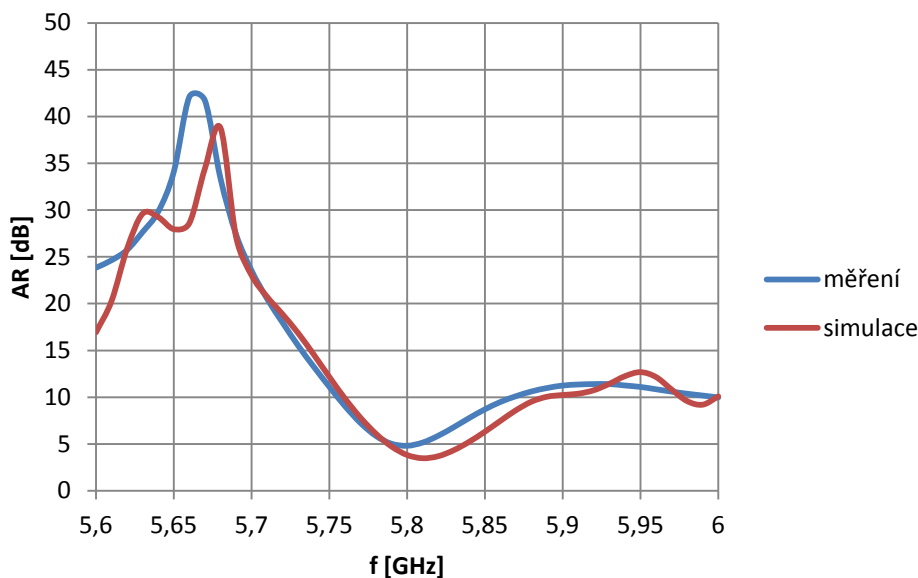
Jak je patrné z předchozího textu, očekávané výsledky měření této antény nebudou tak příznivé jako u antény předešlé. Jako srovnávací výsledek ze simulací byl vzat výsledek s nejjemnější mřížkou (4,83 mil. buněk). Závislost činitele odrazu na frekvenci pro tuto anténu je uvedena na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Činitel odrazu v závislosti na frekvenci.

Z průběhu je patrné, že výsledky naměřené vycházejí lépe než výsledky obdržené ze simulace. Pro změřené hodnoty anténa pracuje s šířkou pásma  $B_{\text{měř}}=90$  MHz ( $B_{\text{sim}}=63$  MHz).

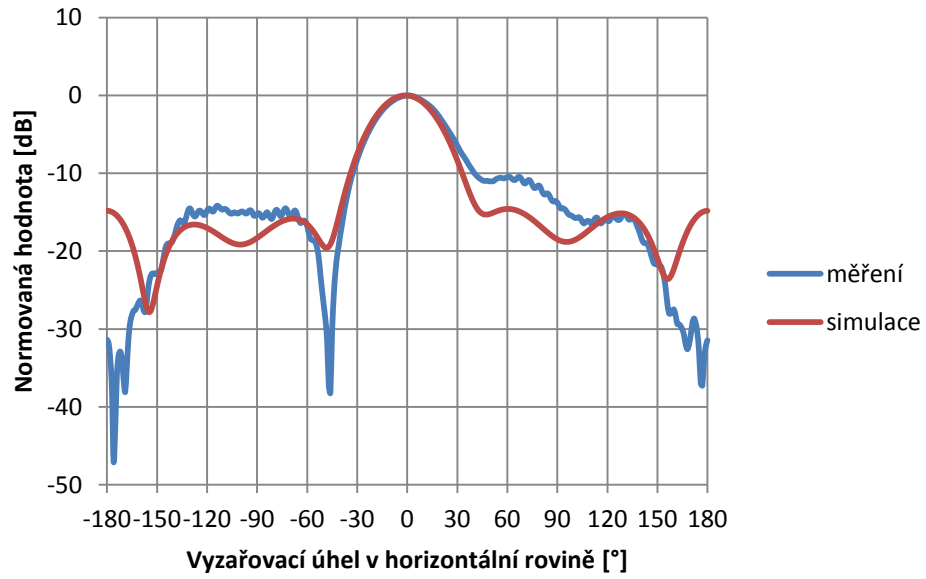
Průběh osového poměru v závislosti na frekvenci je uveden na obr. 3.7. Změřené hodnoty a hodnoty ze simulace si přibližně odpovídají, hodnota osového poměru na frekvenci 5,8 GHz je o něco horší ( $AR=4,8$  dB). Tato hodnota spíše odpovídá polarizaci eliptické než kruhové.



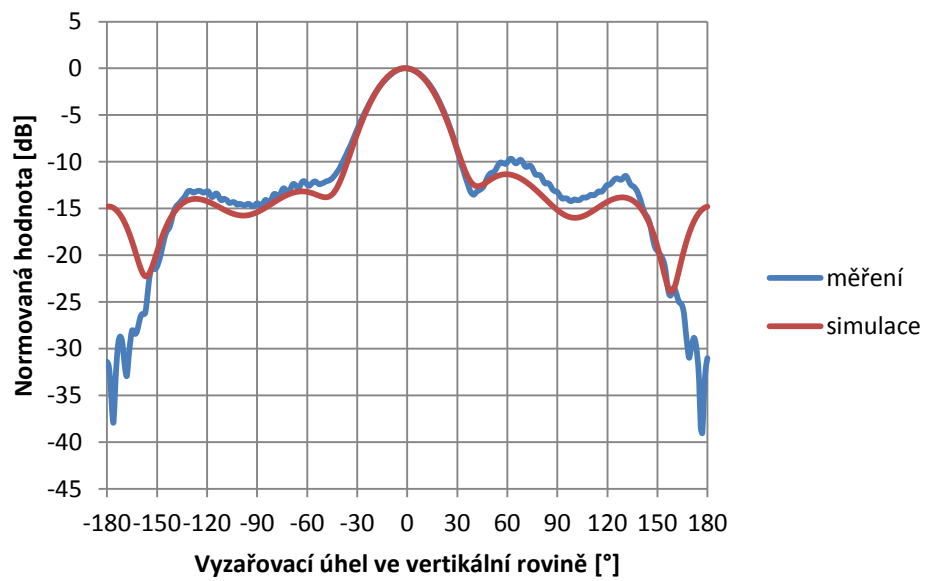
Obr. 3.7: Osový poměr v závislosti na frekvenci.

Na obr. 3.8 a obr. 3.9 jsou uvedeny průběhy vyzářovacích charakteristik. Opět je z průběhů patrný vliv rotátoru, ale i tak je vidět, že si průběhy poměrně odpovídají, především okolo vyzářovacího úhlu  $0^\circ$ .





Obr. 3.8: Vyzařovací diagram v horizontální rovině.

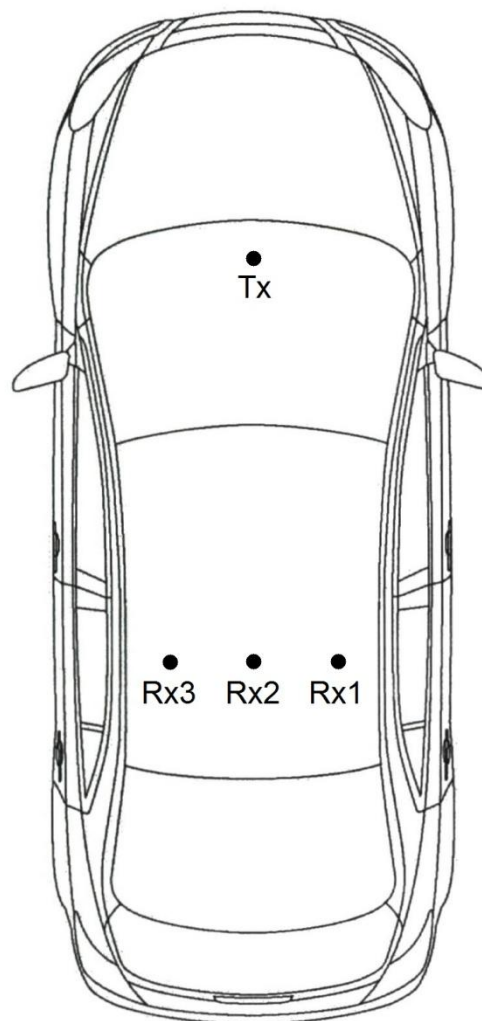


Obr. 3.9: Vyzařovací diagram ve vertikální rovině.

## 4 VLIV VÍCECESTNÉHO ŠÍŘENÍ

Podle zadání měli být tyto antény použity na experimentální ověření vlivu vícecestného šíření elektromagnetických vln na přenos mezi anténami v automobilu (Škoda Octavia III).

Antény byly rozmístěny podle obr. 4.1, kde  $T_x$  je vysílací anténa a  $R_x$  jsou přijímací antény. Jako vysílací anténa měla být použita anténa napájená kapacitní vazbou, ale jelikož anténa pracuje s eliptickou polarizací a s úzkou šířkou pásma, byl použit širokopásmový lineárně polarizovaný kónický monopól, který byl připevněn na přední sklo uprostřed palubní desky. Jako přijímací anténa byla použita kruhově polarizovaná sériová anténní řada s oříznutými rohy z předchozích kapitol. Podle obrázku jsou přijímací antény označeny jako  $R_{x1-3}$ , kde číslo v indexu označuje pozici antény (při každém měření byly v autě pouze dvě antény, vysílací a přijímací).

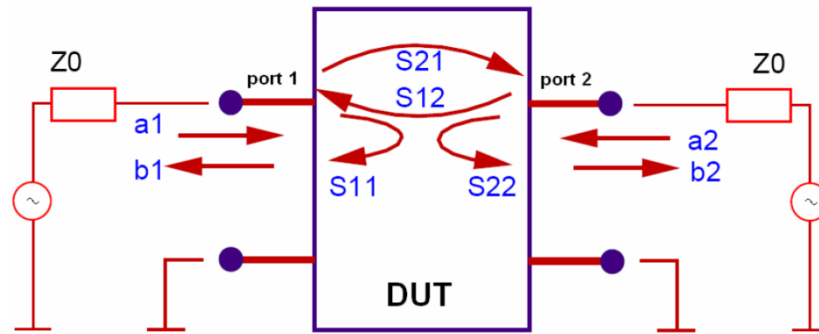


Obr. 4.1: Rozložení antén v automobilu.

Měření probíhalo následujícím způsobem (obr. 4.2): z vektorového analyzátoru byl generován signál přes kabel ( $Z_0=50 \Omega$ ), který byl do automobilu protažen okénkem, ke kónické anténě (*port 1*). Od přijímací antény byl veden druhý kabel ( $Z_0$ ) zpět do vektorového analyzátoru (*port 2*). Vektorový analyzátor byl kalibrován i s útlumy

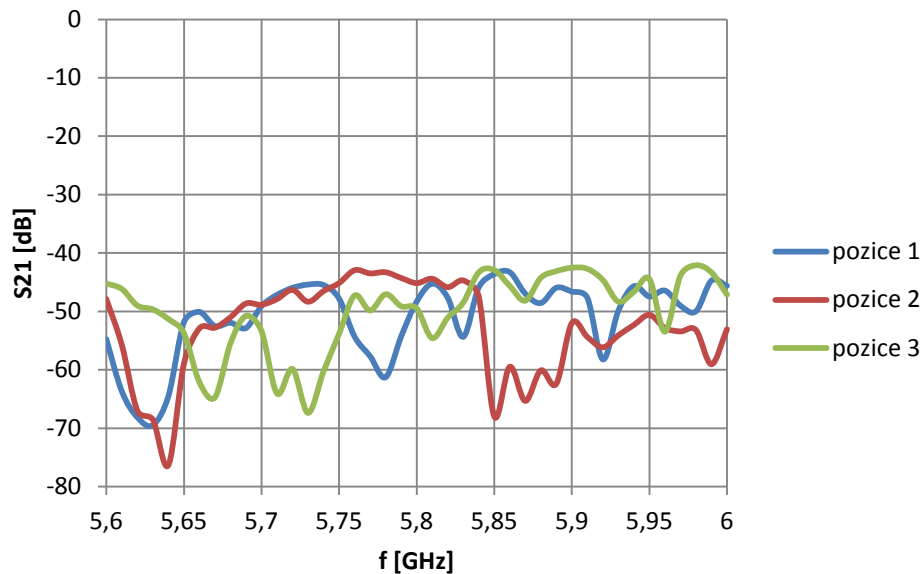
kabelů, nemusejí se proto nijak započítávat do výsledných hodnot.

Přijímací anténa, jak již plyne z předchozího textu, byla umístěna na zadním sedadle. Při prvním měření bylo zvoleno umístění antény za sedadlem řidiče (automobil měl řízení na pravé straně), následně byla anténa umístěna mezi sedadla a na konec za sedadlo spolujezdce. Výška umístění antény měla přibližně simulovat přítomnost cestujícího, kterému leží na klíně přijímací zařízení (např. notebook).



Obr. 4.2: Princip zapojení obvodu pro měření přenosů v automobilu [10].

Pro měření byl nejdůležitější parametr  $S_{21}$ , tj. přenos z portu 1 na port 2 (DUT-testované zařízení, v tomto případě dvě antény a přenos mezi nimi). Jednotlivé přenosy mezi anténami v různých pozicích, jsou uvedeny na obr. 4.3.



Obr. 4.3: Přenos signálu v automobilu na každé pozici.

Přijímací anténa pracuje v pásmu 5,77 - 5,89 GHz, proto budeme výsledky zohledňovat pouze v tomto pásmu. Z teoretických předpokladů by měl být nejlepší přenos v tomto pásmu mezi anténami při pozici 2 (přenos je ve skoro celém pásmu přibližně konstantní), jelikož dráha mezi vysílací a přijímací anténou není tolik ovlivňována předními sedačkami. Zda toto tvrzení platí, je ale pouze úvaha, v automobilu vzniká mnoho odrazů od jeho konstrukce a když se tyto odražené vlny různě odečtou nebo sečtou na přijímací anténě, mohou i silně zatlumit přijímaný signál (např. pozice 1 na frekvenci 5,765 GHz).

# ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout dvě kruhově polarizované sériové anténní řady. Pro návrh byl použit substrát CuClad 233. Samotný návrh byl rozdělen do tří částí, nejprve byl navržen napájecí systém, který má za úkol každé anténě dodat stejný poměr vstupního výkonu a také musí jednotlivým anténám dodávat signál fázově posunutý vždy o  $90^\circ$  oproti předchozí anténě. Dále byly navrženy dva typy kruhově polarizovaných antén. Jako první byla navržena anténa s oříznutými rohy a následně anténa napájená přes kapacitní vazbu. Napájecí systém a jednotlivé typy kruhově polarizovaných antén byly na konec seskupeny do jednoho celku. Návrh a simulace byly prováděny v programu CST Microwave Studio.

Po návrhu byly obě antény vyrobeny a proměřeny jejich vlastnosti. První vyrobená anténa s oříznutými rohy při měření činitele odrazu nedosahovala předpokládané šířky pásma, proto byla tato anténa upravena a následně vyrobena znovu. Po výrobě druhé antény bylo zjištěno, že anténa byla při výrobě mírně podleptána, to by však mělo mít vliv pouze na činitel odrazu. Po změření tohoto parametru, bylo zjištěno, že anténa pracuje v pásmu 5,77 - 5,89 GHz. Dále byla anténa podrobena měření v odstíněné komoře, kde byly zjištěny hodnoty pro kruhovou polarizaci a vyzářovací diagramy. Bylo zjištěno, že anténa pracuje s pravotočivou kruhovou polarizací v pásmu 5,74 - 5,9 GHz.

U antény napájené kapacitní vazbou bylo obtížné anténu vyladit na předem dané pracovní pásmo. Rezonanční kmitočet se při jemnějších simulacích pohyboval směrem nahoru a šířka pásma se zmenšovala, zhoršoval se i osový poměr. Výsledná anténa pracuje v pásmu 5,74 - 5,83 GHz. Osový poměr antény se nepodařilo vylepšit, anténa proto pracuje s levotočivou eliptickou polarizací. Z vyzářovacích charakteristik je zřejmá podobnost průběhů.

Dále byla anténa s oříznutými rohy použita k experimentálnímu ověření vlivu vícecestného šíření v automobilu mezi dvěma anténami. Při tomto měření byly naměřeny tři přenosové charakteristiky mezi vysílacím kónickým monopólem a přijímací kruhově polarizovanou anténou, která byla postupně umístěna do třech pozic na zadním sedadle automobilu. Tyto výsledky není možné s ničím porovnat, proto byly porovnány pouze jednotlivé přenosy mezi sebou. Nejlepší výsledek vykazuje měření, kdy byla přijímací anténa umístěna mezi sedadly automobilu. Ostatní charakteristiky jsou ovlivněny vícecestným šířením větší mírou, jelikož mezi vysílací a přijímací anténou není přímá viditelnost (sedadlo řidiče a spolujezdce).

Tento typ antén by se dal nejlépe využít k dnes se poměrně rozvíjejícímu typu aplikací, kdy modeláři chtějí přenášet obrazový signál z palubní kamery svého modelu do zobrazovacích jednotek. U zobrazovací jednotky je k přijímači připojena právě anténa s kruhovou polarizací. Tento přenos probíhá v pásmu ISM 5,8 GHz.

# LITERATURA

- [1] RAIDA, Z., *Multimediální učebnice* [online]. 2010, [cit. 16.12.2013]. Dostupné z <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>>
- [2] MILLIGAN, T., A., *Modern antenna design*. 2nd ed. Hoboken: IEEE Press ; John Wiley & Sons, 2005. 614s. ISBN 0-471-45776-0.
- [3] NOVÁČEK, Z., *Elektromagnetické vlny, antény a vedení : Přednášky*. 1. vyd. Brno : VUT FEKT, 2006. 133 s. ISBN 80-214-3301-9.
- [4] HANUS, S., SVAČINA, J., *Vysokofrekvenční a mikrovlňná technika : Přednášky*. 2. vyd. dopl. Brno: VUT FEKT, 2002. 210 s. ISBN 80-214-2222-x.
- [5] MATUSZCZYK, J., *Antény : prakticky*. 3. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-178-0.
- [6] CHEN, A., ZHANG, Y., CHEN, Z., CAO, S., A Ka-band high-gain circularly polarized microstrip antenna array. *Antennas and Propagation*. Jan 1995, vol. 43, no. 1, p. 113-116.
- [7] NIROOJAZI, M., AZARMANESH, M., N., Practical design of single feed truncated Conner microstrip antenna. *Communication Networks and Services Research*. 19-21 May 2004, 25-29.
- [8] WEI, K., ZHANG, Z., FENG, Z., New Coplanar Capacitively Coupled Feeding Method for Circularly Polarized Patch Antenna. *Antenna and Propagation (APSURSI)*. 3-8 July 2011, 3099-3102.
- [9] HANÁK, P., *Lineární výkonový zesilovač vysílače v pásmu L*. Brno, 2004. 56 s., 5 s. příloh. Diplomová práce na Vysokém učení Technickém na Ústavu Radioelektroniky. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing Miroslav Kasal, CSc.
- [10] MOHAMMADI, M., LAMPE, L., LOK, M., MIRABBASI, S., MIRVAKILI, M., ROSALES, R., VAN VEEN, P., Measurement Study and Transmission for In-vehicle Power Line Communication. *Power Line Communications and Its Applications*. 29 March-1 April 2009, 73-78.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

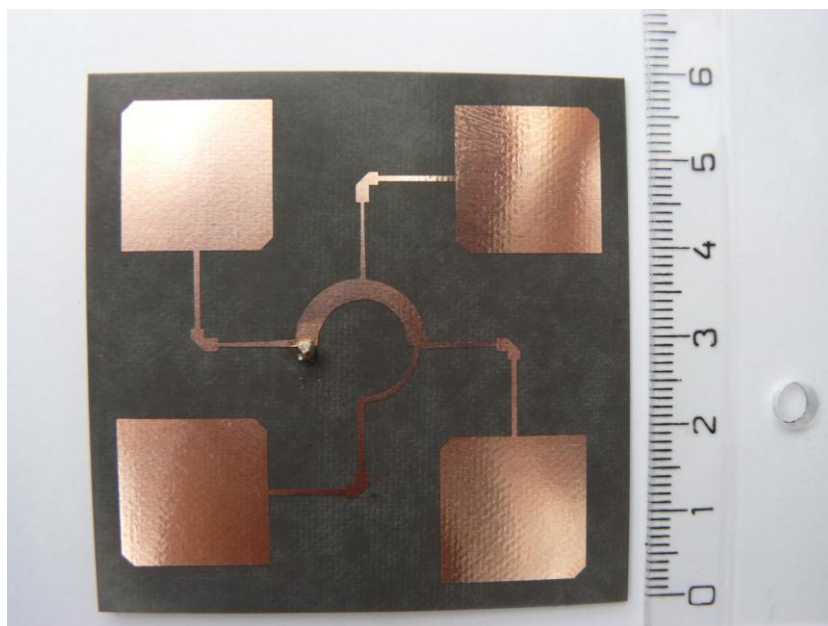
$f$	Signál v časové oblasti
$\lambda$	Vlnová délka
$c$	rychlost světla
$Z$	Impedance vedení
$P$	Výkon
$S_{11}$	Činitel odrazu činitel odrazu v decibelech
$\delta$	Činitel odrazu v bezrozměrné míře
$PSV$	Poměr stojatých vln
$\epsilon_r$	Relativní permitivita
$tg\delta$	Ztrátový činitel
$AR$	Axial Ratio (osový poměr)
$DUT$	Device Under Test (testované zařízení)

# SEZNAM PŘÍLOH

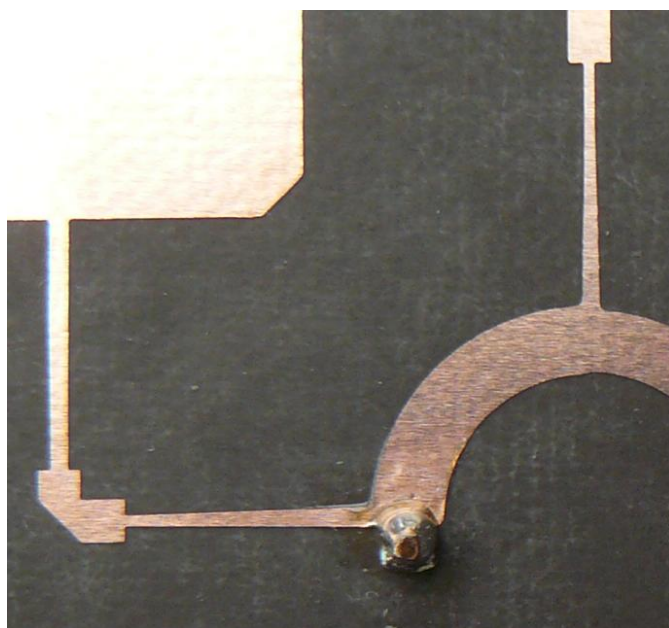
Příloha A: Fotografie antén

Příloha B: Rozmístění antén v automobilu

## Příloha A: Fotografie antén

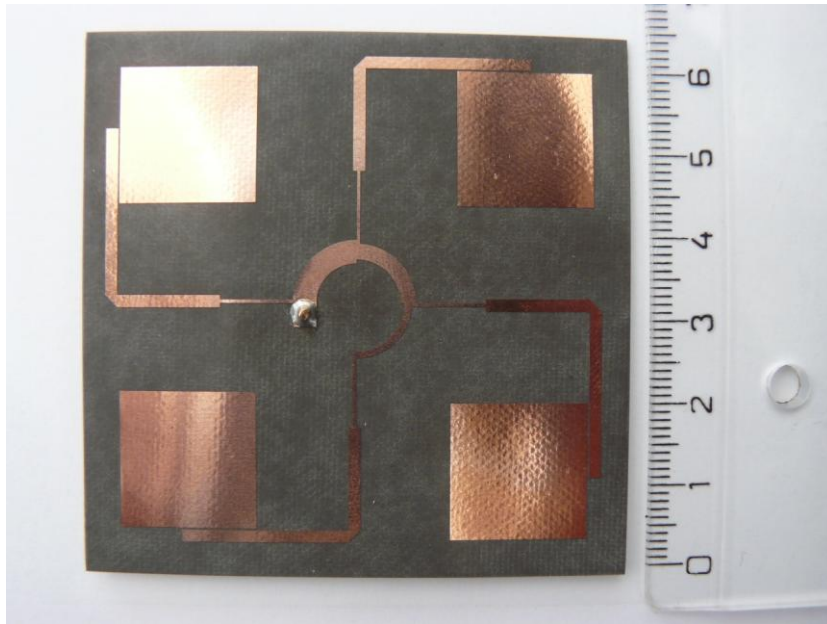


Obr. 1: Anténa s oříznutými rohy.



Obr. 2: Detail podleptané anténní části.



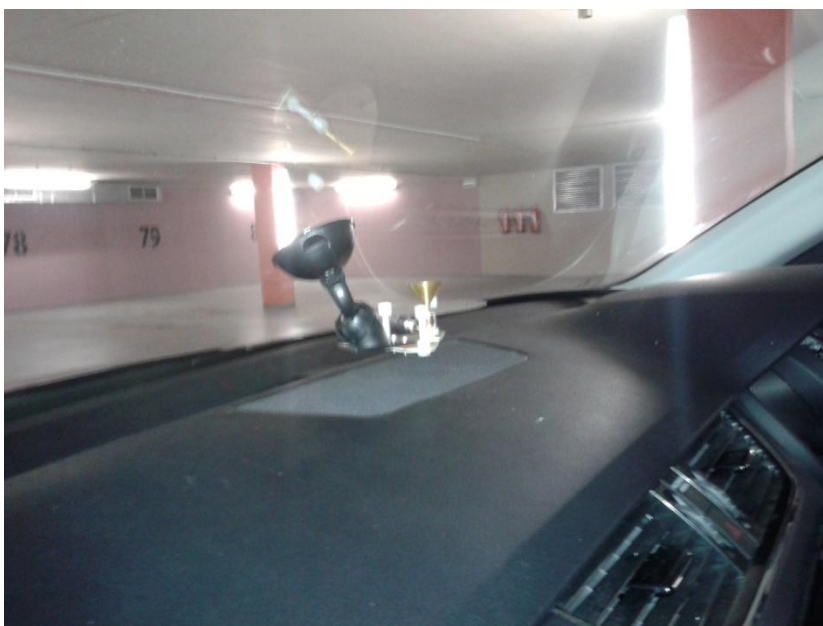


Obr. 3: Anténa napájená kapacitní vazbou.

## Příloha B: Rozmístění antén v automobilu



Obr. 4: Kónický monopól jako vysílací anténa (snímek 1).



Obr. 5: Kónický monopól jako vysílací anténa (snímek 2).



Obr. 5: Přijímací anténa na zadním sedadle na pozici 1.