

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## MONOPOL INTEGROVANÝ DO 3D TEXTILU

3D TEXTILE INTEGRATED MONOPOLE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Füll

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Cupal

BRNO 2017



# Diplomová práce

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

**Student:** Bc. David Füll

**ID:** 158135

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Monopol integrovaný do 3D textilu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte drátový monopol integrovaný do 3D textilu pro ISM pásmo 24 GHz. Ve vhodně zvoleném programu vytvořte numerický model antény a simulujte anténu v blízkosti vodivých a dielektrických povrchů. Prozkoumejte možnosti napájení antény a zvolte jeho vhodný způsob. Dále prozkoumejte možnosti úpravy směrové charakteristiky antény pro vytvoření směrového spoje.

Navrženou anténu vyrobte pomocí různých typů vodivých nití a pomocí měděného drátu. Změřte parametry vyrobených antén a dosažené výsledky vzájemně porovnejte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SONG, K.S., ROJAS, R.G. Electrically small wire monopole antenna with Non-Foster impedance element. In Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, 2010, pp. 1-4.

[2] BALANIS, C.A. Antenna theory: analysis and design. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 047166782X.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 16.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Miroslav Cupal

**Konzultant:**

**prof. 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.

## **ABSTRAKT**

Tato práce pojednává o návrhu všesměrové monopólové antény. Pomocí parabolického reflektoru a direktorů dochází k úpravě směrových vlastností monopólové antény. U této směrové antény, společně se všesměrovou anténou, se zkoumá vliv různých materiálů, na vyzařovací charakteristiku a vstupní činitel odrazu, v blízkosti antény. Tyto antény jsou vyrobeny na 3D textilu, změřeny v bezodrazové komoře a porovnány s navrženými anténami. V závěru práce je shrnutí a zhodnocení výsledku.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Monopólová anténa, 3D textil, parabolický reflektor, direktor, koplanární vlnovod, CST

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the design of omnidirectional monopole antennas. Using the parabolic reflector and the directors, the directional characteristics of monopole antennas are modified. This directional antenna, together with the omnidirectional antenna, examines the effect of various materials, the emission characteristics and the input reflection factor, near the antennas. These antennas are made of 3D textile, measured in anechoic chamber and compared to the designed antennas. At the end of the thesis is the summary and evaluation of the result.

## **KEYWORDS**

Monopole antenna, 3D textile, parabolic reflector, director, coplanar waveguide, CST

FÜLL, D. *Monopol integrovaný do 3D textilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 49 s., 2 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Miroslav Cupal

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Monopol integrovaný do 3D textilu 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

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavovi Cupalovi za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>ix</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xiii</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Monopólová anténa</b>	<b>2</b>
1.1 Popis.....	2
1.2 Vstupní impedance .....	3
1.3 Vliv zemnicí plochy.....	5
<b>2 Napájení planárních antén</b>	<b>7</b>
2.1 Různé druhy napájení .....	7
2.2 Koplanární vlnovod .....	9
<b>3 Úprava směrových vlastností monopólové antény</b>	<b>12</b>
3.1 Možnosti úpravy směrových vlastností .....	12
3.2 Úprava směrových vlastností pomocí direktorů .....	12
3.3 Úprava směrových vlastností pomocí reflektoru .....	14
<b>4 Návrh a simulace monopólové antény</b>	<b>16</b>
4.1 Návrh a simulace všesměrové monopólové antény .....	16
4.2 Návrh a simulace směrové monopólové antény .....	19
<b>5 Vliv materiálů v blízkosti antény na vyzařovací charakteristiku</b>	<b>25</b>
5.1 Všesměrová anténa .....	26
5.1.1 Vliv polyethylentereftátu .....	26
5.1.2 Vliv vodivé desky .....	28
5.1.3 Vliv prstu při dotyku s anténou.....	31
5.2 Směrová anténa.....	35
5.2.1 Vliv polyethylentereftátu .....	35
5.2.2 Vliv vodivé desky .....	37
5.2.3 Vliv prstu při dotyku s anténou.....	40
<b>6 Realizace a porovnání antén</b>	<b>42</b>
6.1 Všesměrová anténa .....	42
6.2 Směrová anténa.....	45

<b>7 Závěr</b>	<b>48</b>
<b>Literatura</b>	<b>50</b>
<b>A Umístění prokovů paraboly</b>	<b>51</b>
<b>B Motiv měděné fólie</b>	<b>52</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Vzhled monopólové antény při napájení z koaxiálního vedení. ....	2
Obrázek 1.2: Princip zrcadlení u monopólové antény. ....	3
Obrázek 1.3: Vstupní odpor dipólu [2]. ....	4
Obrázek 1.4: Vstupní reaktance dipólu [2]. ....	4
Obrázek 1.5: Vliv velikosti zemní desky na vyzařovací charakteristiku. ....	5
Obrázek 1.6: Vyzařovací charakteristika monopólové antény se zemní plochou $\lambda/2$ . ....	6
Obrázek 1.7: Vyzařovací charakteristika dipólu. ....	6
Obrázek 2.1: Příčný řez daným mikropáskem. ....	7
Obrázek 2.2: Rozložení elektrického pole u mikropáskových vedení. ....	8
Obrázek 2.3: Rozložení magnetického pole u mikropáskových vedení. ....	8
Obrázek 2.4: Závislost impedance na šířce středního vodiče. ....	10
Obrázek 2.5: Vzhled koplanárního vlnovodu. ....	10
Obrázek 2.6: Vyzařovací 3D charakteristika koplanárního vlnovodu. ....	11
Obrázek 3.1: Vzhled parabolické antény. ....	14
Obrázek 3.2: Parametry pro návrh parabolického zrcadla. ....	14
Obrázek 4.1: Vzhled konektoru RADIALL R12541400 RF. ....	16
Obrázek 4.2: Vzhled všesměrové monopólové antény. ....	17
Obrázek 4.3: Vstupní činitel odrazu modelu všesměrové monopólové antény. ....	17
Obrázek 4.4: 3D vyzařovací charakteristika modelu všesměrové monopólové antény. ....	18
Obrázek 4.5: Vyzařovací charakteristika modelu všesměrové monopólové antény v kolmém řezu. ....	18
Obrázek 4.6: Vyzařovací charakteristika modelu všesměrové monopólové antény v podélném řezu. ....	19
Obrázek 4.7: Vzhled antény s parabolou. ....	20
Obrázek 4.8: Vstupní činitel odrazu směrové antény s parabolou. ....	20
Obrázek 4.9: 3D vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou. ....	21
Obrázek 4.10: Vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou v podélném řezu. ....	21
Obrázek 4.11: Vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou v kolmém řezu. ....	21
Obrázek 4.12: Vzhled antény s parabolou a s direktory. ....	22

Obrázek 4.13: Vstupní činitel odrazu směrové monopólové antény s parabolou a s direktory. ....	23
Obrázek 4.14: 3D vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou a s direktory. ....	23
Obrázek 4.15: Vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou a s direktory v podélném řezu.....	24
Obrázek 4.16: Vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou a s direktory v kolmém řezu. ....	24
Obrázek 5.1: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s deskou vyrobené z PET ve vzdálenosti 0 mm. ....	26
Obrázek 5.2: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s deskou vyrobené z PET ve vzdálenosti 5 mm. ....	26
Obrázek 5.3: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s deskou vyrobené z PET ve vzdálenosti 10 mm. ....	26
Obrázek 5.4: Vstupní činitel odrazu všesměrové antény v závislosti na vzdálenosti desky z PET od antény. ....	27
Obrázek 5.5: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v závislosti na vzdálenosti přiloženého materiálu v podélném řezu. ....	27
Obrázek 5.6: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v závislosti na vzdálenosti přiloženého materiálu v kolmém řezu. ....	28
Obrázek 5.7: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s vodivou deskou ve vzdálenosti 5 mm. ....	28
Obrázek 5.8: Vstupní činitel odrazu všesměrové antény v závislosti na vzdálenosti vodivé desky od antény. ....	29
Obrázek 5.9: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v závislosti vzdálenosti vodivé desky od antény.....	29
Obrázek 5.10: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v kolmém řezu v závislosti na vzdálenosti vodivé desky od antény.....	30
Obrázek 5.11: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s prstem dotýkajícím se monopólu. ....	31
Obrázek 5.12: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s prstem dotýkajícím se poblíž monopólu. ....	31
Obrázek 5.13: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s prstem dotýkajícím se u kraje antény. ....	32
Obrázek 5.14: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s prstem dotýkajícím se mimo osu x .....	32
Obrázek 5.15: Vstupní činitel všesměrové antény v závislosti na poloze dotyku prstu.	33
Obrázek 5.16: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v podélném řezu v závislosti na poloze dotyku prstu.....	33

Obrázek 5.17: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v kolmém řezu v závislosti na poloze dotyku prstu. ....	34
Obrázek 5.18: 3D vyzařovací charakteristika pro směrovou anténu s deskou vyrobenou z PET ve vzdálenosti 0 mm. ....	35
Obrázek 5.19: Vstupní činitel odrazu směrové antény v závislosti na vzdálenosti desky vyrobené z PET. ....	35
Obrázek 5.20: Vyzařovací charakteristika směrové antény v podélném řezu v závislosti na vzdálenosti desky vyrobené z PET. ....	36
Obrázek 5.21: Vyzařovací charakteristika směrové antény v kolmém řezu v závislosti na vzdálenosti desky vyrobené z PET. ....	36
Obrázek 5.22: 3D vyzařovací charakteristika směrové antény s vodivou deskou ve vzdálenosti 0 mm. ....	37
Obrázek 5.23: 3D vyzařovací charakteristika směrové antény s vodivou deskou ve vzdálenosti 5 mm. ....	37
Obrázek 5.24: Vstupní činitel odrazu směrové antény v závislosti na vzdálenosti vodivé desky od antény. ....	38
Obrázek 5.25: Vyzařovací charakteristika směrové antény v závislosti na vzdálenosti vodivé desky v podélném řezu. ....	38
Obrázek 5.26: Vyzařovací charakteristika směrové antény v závislosti na vzdálenosti vodivé desky v kolmém řezu. ....	39
Obrázek 5.27: 3D vyzařovací charakteristika směrové antény s prstem umístěným na pinu konektoru. ....	40
Obrázek 5.28: Vstupní činitel odrazu směrové antény v závislosti na poloze prstu. ....	40
Obrázek 5.29: Vyzařovací charakteristika směrové antény v závislosti na poloze prstu v podélném řezu. ....	41
Obrázek 5.30: Vyzařovací charakteristika směrové antény v závislosti na poloze prstu v kolmém řezu. ....	41
Obrázek 6.1: Vyrobená všesměrová monopólová anténa ze strany konektoru. ....	42
Obrázek 6.2: Vyrobená všesměrová monopólová anténa z vrchní strany. ....	42
Obrázek 6.3: Graf vstupního činitele odrazu vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény. ....	43
Obrázek 6.4: Vyzařovací charakteristika vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény v podélném řezu. ....	43
Obrázek 6.5: Vyzařovací charakteristika vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény v kolmém řezu. ....	44
Obrázek 6.6: Vyrobená směrová monopólová anténa ze strany konektoru. ....	45
Obrázek 6.7: Vyrobená směrová monopólová anténa z vrchní strany. ....	45
Obrázek 6.8: Graf vstupního činitele odrazu vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény. ....	46

Obrázek 6.9: Vyzařovací charakteristika vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény v podélném řezu .....	46
Obrázek 6.10: Vyzařovací charakteristika vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény v kolmém řezu .....	47

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 3.1: Rozměry a parametry pro různé návrhy Yagiho antén [4]. .....	13
Tabulka 4.1: Umístění direktorů. ....	22

# ÚVOD

Tato semestrální práce se zabývá návrhem monopólové antény s pólem vedeným skrze substrát, který se nazývá 3D textil. 3D textil je pletenina skládající se ze 3 vrstev. Spodní a horní vrstva jsou od sebe odděleny prostřední vrstvou, takzvaným monofilem. V této práci je použit 3D textil o tloušťce 2,6 mm a relativní permitivitě 1,4.

Výhody antén vyrobených na substrátu spočívají v jednoduchosti výroby, stačí danou anténu vyleptat na substrátu, na kterém je vodivá vrstva nebo například pomocí 3D tiskárny, vodivou vrstvu nanést na daný substrát. Další výhodou je v úspoře vodivých materiálů, oproti drátovým anténám, kde se u antén na substrátu používají vodivé plochy o tloušťce cca. 30  $\mu\text{m}$ . Neposlední výhodou je, že mohou být menší oproti drátovým anténám v závislosti na použitém substrátu a jeho relativní permitivitě.

Nevýhodou u antén na substrátu je zhoršení vysílacích (přijímacích) vlastností dané antény na substrátech s vyšší permitivitou. Většina substrátů používá měděné vodivé plochy, které jsou náchylné na kyselé prostředí a rozpouštějí se. Taková anténa by nešla použít ve venkovních prostorech, kde by byla vystavena kyselému dešti. Na takovou anténu by musela být nanášena ochranná vrstva, nebo by musela být skryta v „krabici“, kde by byla chráněna před okolními vlivy. Pokud by ale ochranný materiál neměl elektrické vlastnosti vzduchu, mohlo by dojít k ovlivnění vysílacích (přijímacích) vlastností.

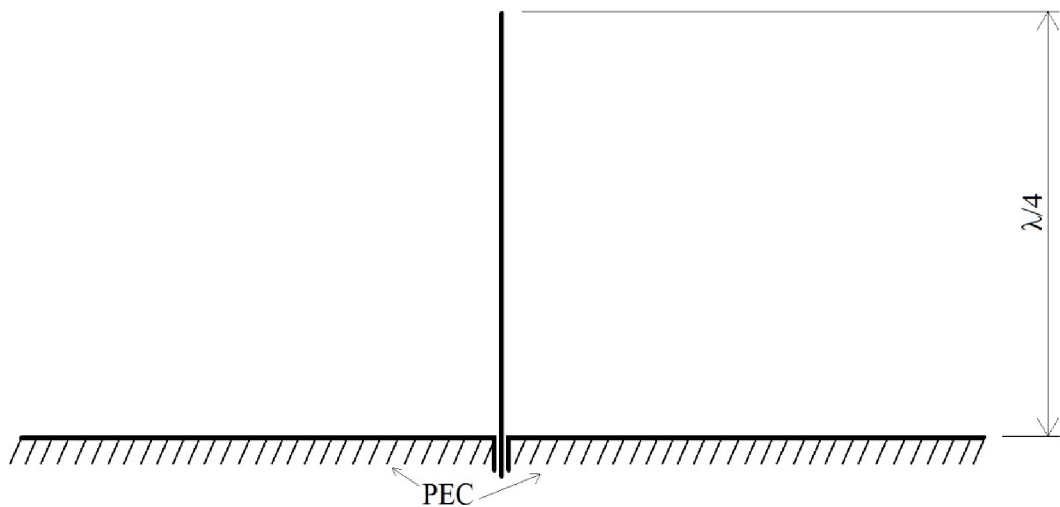
Tato anténa by mohla být využita v dopravních prostředcích, kde se používá tkanina. Tato tkanina může být nahrazena právě 3D textilem, na kterém by daná anténa byla. Nahradila by vnitřní drátovou komunikaci bezdrátovou komunikací. Ta by se šířila skrze 3D textil. To by mělo za následek úsporu nerostných surovin používaných na výrobu kabeláže a také by to mělo vliv na odlehčení dopravních prostředků, kde se drátové vedení používá ve velké míře, například v letadlech.

Cílem této práce je návrh monopólových antén, pracujících v pásmu ISM 24 GHz, to je od 24 GHz do 24,25 GHz. Jedna anténa se všesměrovou charakteristikou a druhá se směrovou charakteristikou pro směrové spoje. Tyto antény vyrobit na daném 3D textilu a pomocí vodivé nitě.

# 1 MONOPÓLOVÁ ANTÉNA

## 1.1 Popis

Monopólová anténa je ve své podstatě dipólová anténa, u které je jedno rameno (pól) vyvedeno kolmo k zemní ploše. Délka daného ramene může být libovolná, nejčastěji se však volí o délce čtvrtiny vlnové délky a vůči co největší zemi, aby ve výsledku se jednalo o tzv. půlvlnný dipól. Monopólová anténa je znázorněna na obrázku č. 1.1.



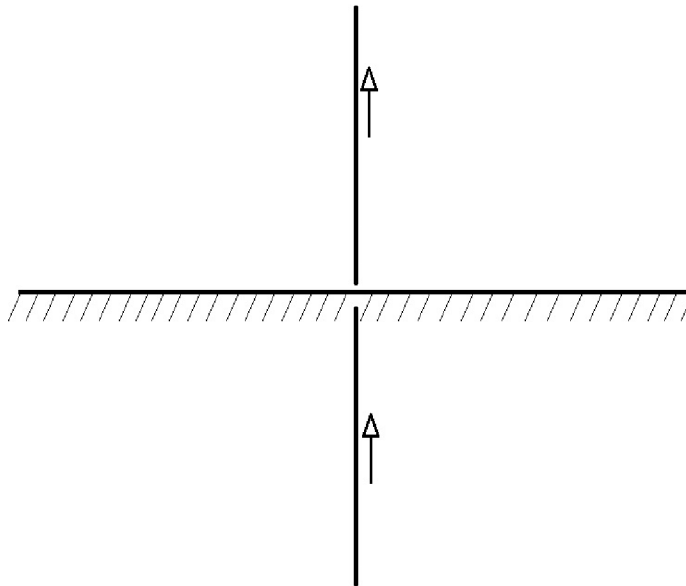
Obrázek 1.1: Vzhled monopólové antény při napájení z koaxiálního vedení.

V obrázku č.1.1 PEC znázorňuje zemnicí plochu. PEC znamená **P**erfect **E**lectrical **C**onductor (dokonalý elektrický vodič), jedná se o vodič, který má nulový elektrický odpor. Znak  $\lambda$  značí vlnovou délku, která se vypočítá pomocí následujícího vzorce (1.1),

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

kde  $c$  značí rychlost světla a  $f$  značí frekvenci, na které má daná anténa pracovat.

Pomocí nekonečné zemnicí plochy se využívá princip zrcadlení, který zapříčiňuje, že se monopólová anténa chová jako dipólová [1]. Princip zrcadlení je znázorněn na obrázku 1.2. Na daném obrázku je znázorněn směr proudu jak u ramene vyvedeného kolmo ze zemnicí plochy, tak i u zrcadlového protějšku.



Obrázek 1.2: Princip zrcadlení u monopólové antény.

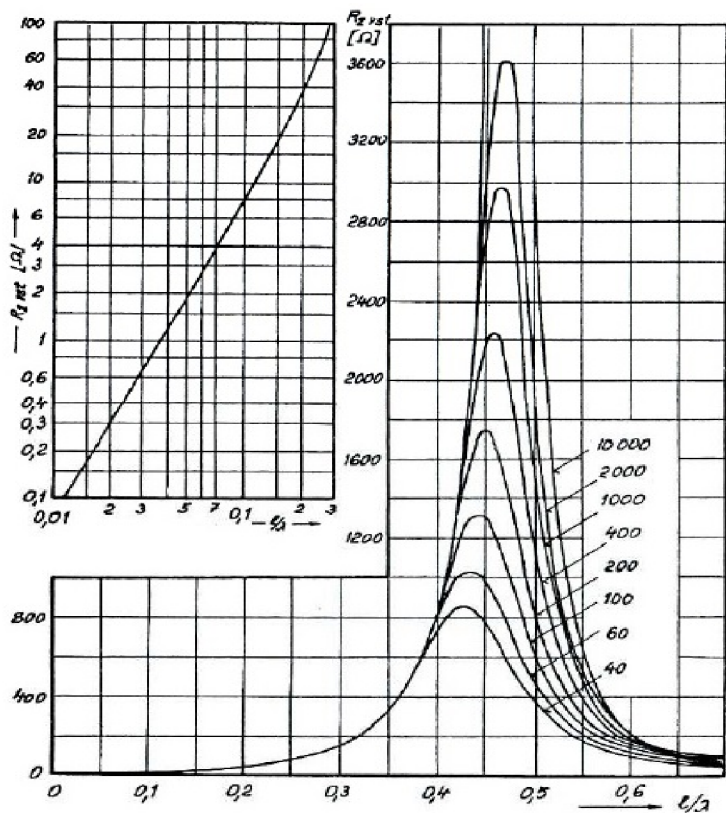
Napájení oproti dipólu, které je symetrické, musí být asymetrické. To je dáno tím, že pól u monopólové antény je obklopen zemní plochou. Proud vedený touto zemní plochou je roven proudu protékajícího monopólem. Taktéž je rovnoměrně rozložený, a kdyby se použilo symetrické napájení musel by být sveden do jediného bodu, a to do středu zemní plochy, jenomže v tomto bodě je již pól a musel by být proud sveden do bodu mimo střed. To by mělo za následek změnu rozložení proudu v zemní ploše a vliv na vlastnosti monopólu. [1]

## 1.2 Vstupní impedance

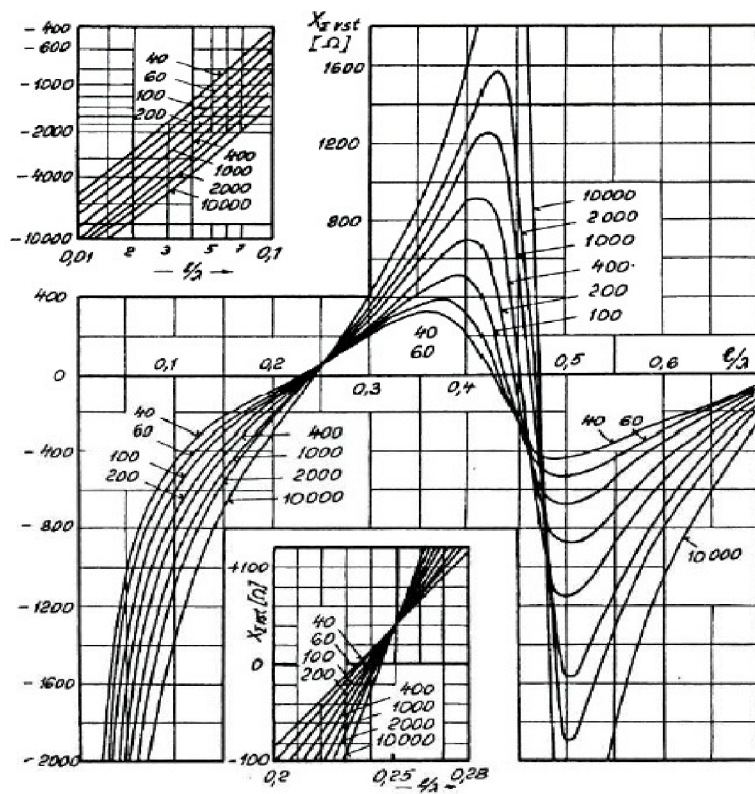
Pomocí zrcadlení, které se využívá u monopólové antény, lze dosáhnout stejného proudu při polovičním napětí oproti dipólové anténě. Z toho vyplývá, že vstupní impedance bude o polovinu menší než u dipólové antény [2].

Vstupní impedance se skládá ze vstupního odporu a vstupní reaktance. Velikost daných hodnot je závislá na délce a tloušťce (průměru, pokud je použit drát kruhového průřezu) ramene. Vstupní odpor je možné zjistit pomocí následujícího obrázku 1.3 a vstupní reaktanci na obrázku 1.4.





Obrázek 1.3: Vstupní odpor dipólu [3]



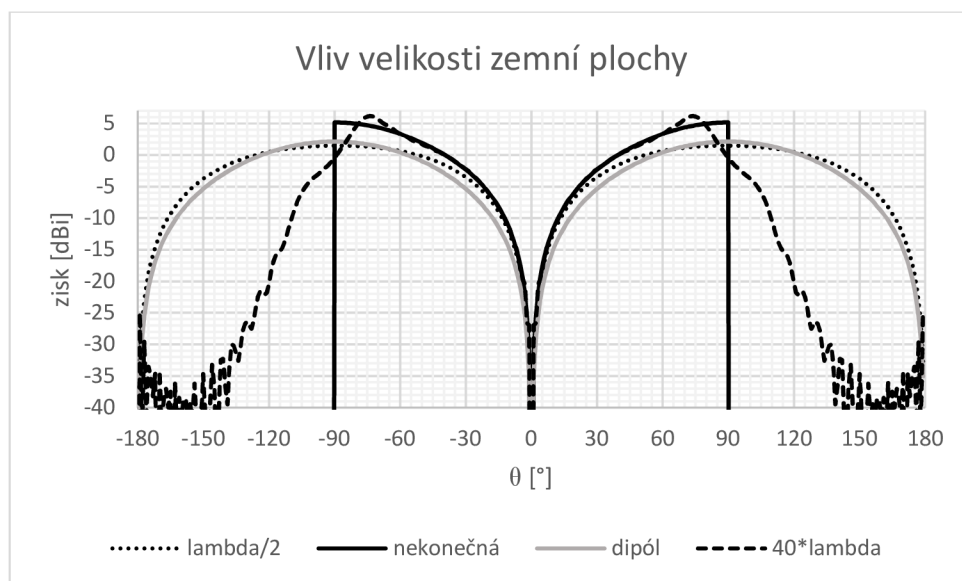
Obrázek 1.4: Vstupní reaktance dipólu [3].

U obrázku 1.3 a 1.4 je na ose  $x$  znázorněna elektrická délka pólu (poměr reálné délky vůči vlnové délce) a na ose  $y$  je vynesena hodnota odporu, případně reaktance. Parametrem křivek je  $a/l$  (poloměr/délka pólu). U prvního grafu (obrázek č. 1.3) je patrné, že vstupní odpor, do přibližné elektrické délky 0,375, je nezávislý na poměru  $a/l$ . U obrázku č. 1.4 lze odečíst, že na elektrické délce 0,25 je reaktance nezávislá na poloměru  $a/l$ . Po odečtení těchto hodnot z předchozích grafů, lze zjistit vstupní impedanci dipólu a pokud je tato hodnota vydělena dvěma, jedná se o vstupní impedanci monopólu. Vstupní impedance monopólu o elektrické délce 0,25 se běžně uvažuje  $(36,5+j21,25) \Omega$ . [2]

### 1.3 Vliv zemnicí plochy

V předchozí kapitole byla monopólová anténa popsána pro nekonečnou zemní plochu. Ve skutečném světě nelze docílit nekonečně velké zemní plochy, ale můžeme se k ní přiblížit, a to za předpokladu, kdy velikost zemní plochy bude mnohonásobně větší, než délka vlny, na které monopól vyzařuje.

Na obrázku 1.5 je graf, ve kterém jsou vyneseny vyzařovací charakteristiky monopólů pro různě velké zemní plochy, a to pro plochu o průměru  $\lambda/2$ , 20krát  $\lambda$  a pro nekonečně velkou zemní plochu. Pro porovnání je v grafu vynesena i vyzařovací charakteristika půlvlnného dipólu.

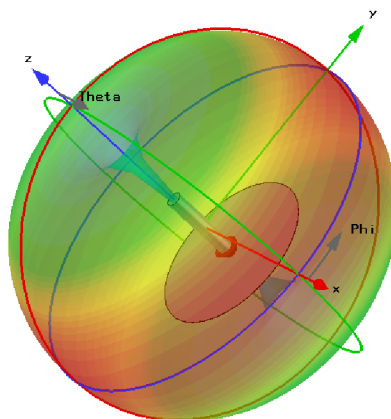


Obrázek 1.5: Vliv velikosti zemní desky na vyzařovací charakteristiku.

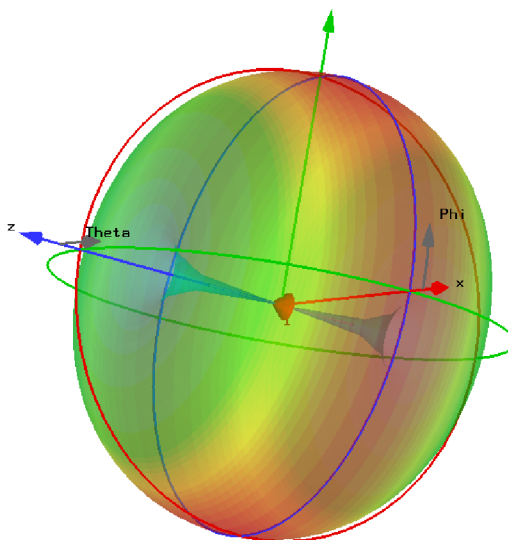
Hodnoty z obrázku 1.5 jsou zjištěny pomocí programu CST microwave studio pro frekvenci 24 GHz. Na ose  $x$  jsou vyneseny stupně úhlu  $\theta$ , která určuje úhel mezi osou  $z$  a  $x$  kartézské soustavy. V ose  $z$  je vyveden pól a v ploše  $x y$  je zemní plocha. Osa  $z$  je brána jako  $0^\circ$   $\theta$ .

Z grafu je poznat, že vyzařovací charakteristika je symetrická kolem úhlu  $\theta 0^\circ$ . U monopólové antény o průměru zemní plochy  $\lambda/2$  bylo dosaženo zisku 1,5 dBi v úhlu  $90^\circ$  a šířka hlavního laloku pro pokles o 3 dB je  $99^\circ$ , vyzařovací charakteristika je velice

podobná půlvlnnému dipólu. U monopólové antény se zemní plochou o průměru *40krát*  $\lambda$  bylo dosaženo zisku 6,18 dBi pro úhel  $74^\circ$  se šířkou hlavního laloku, pro pokles o 3 dB,  $24^\circ$ . Dochází zde taktéž k vyzařování pod zemní plochu, ale o poznání menší než u antény se zemní plochou o poloměru  $\lambda/2$ . Zisk  $-20\text{dBi}$  ( $100\times$  menší výkon než u izotropního zářiče) nastává u úhlu  $120^\circ$ . Pro monopol, se zemní plochu o nekonečné velikosti, dosahuje zisk hodnoty 5,2 dBi v úhlu  $90^\circ$  se šířkou laloku  $39^\circ$ , u tohoto případu nedochází k vyzařování pod zemní plochou. U dipólové antény bylo dosaženo zisku 2,1 dBi v úhlu  $90^\circ$  se šířkou laloku  $68^\circ$ . Při porovnání dipólové antény a monopólové antény s nekonečně velkou zemní plochou. Bylo u monopólové antény dosaženo většího zisku a to o 3,1 dBi a šířka laloku byla o polovinu menší než u dipólové antény. Vzhled monopólové antény se zemní plochou o průměru  $\lambda/2$  a dipólové antény, společně s 3D vyzařovacím diagramem, je na obrázku č.1.6 a na obrázku č.1.7.



Obrázek 1.6: Vyzařovací charakteristika monopólové antény se zemní plochou  $\lambda/2$ .



Obrázek 1.7: Vyzařovací charakteristika dipólu.

## 2 NAPÁJENÍ PLANÁRNÍCH ANTÉN

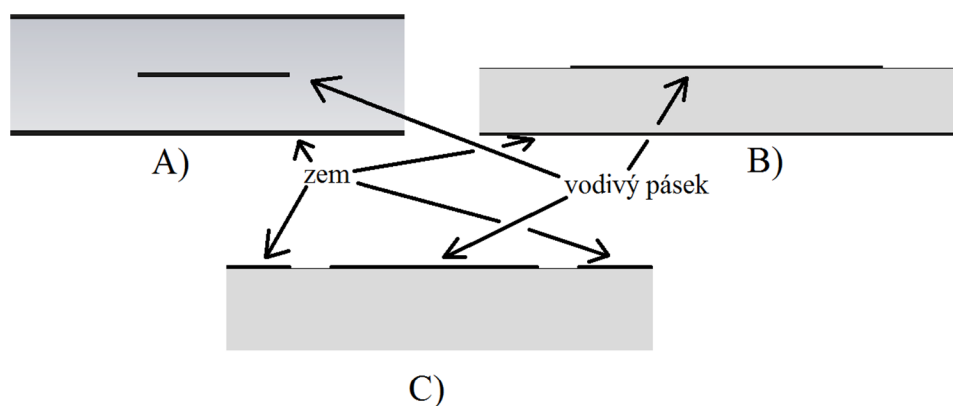
Pro napájení planárních antén lze použít různé druhy napájecích vedení. Existují mikropáskové či vlnodové druhy a jejich obměny. Pro anténu, která je navrhována v rámci této práce, je potřeba zvolit druh napájení, který bude co nejbližší k teorii, aby se ze zemní plochy vyvedl pól. Nejjednodušší by bylo, z koaxiálního vedení vyvést střední vodič skrz substrát, na kterém by byla nanesena vrstva mědi jako zemní deska, která by byla spojena s pláštěm koaxiálního vedení. Toto provedení by mělo za následek navýšení tloušťky antény, ze které by vyčníval koaxiální vodič. Ten by se však mohl neopatrnou manipulací poškodit. Proto by bylo vhodnější mít napájení z hrany substrátu. Z toho důvodu je zvoleno mikropáskové napájení, které bude mít na hraně vyveden konektor pro koaxiální vodič.

### 2.1 Různé druhy napájení

Existuje několik druhů planárních vedení a jejich obměn. V této kapitole budou popsány 3 základní druhy. [4]

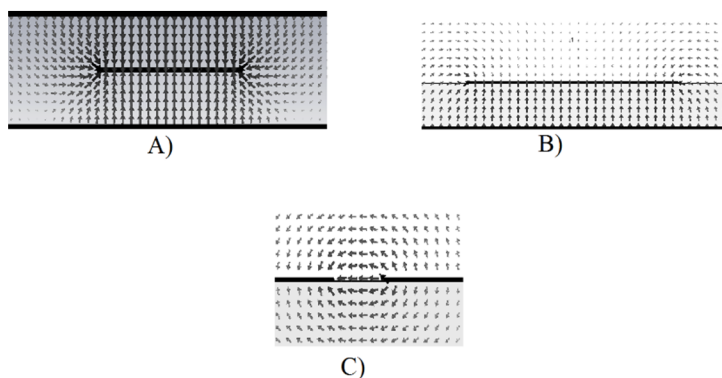
- A) mikropásek vedený mezi dvěma zemními deskami
- B) otevřený mikropásek nad zemní deskou
- C) koplanární vlnovod. [4]

Vzhledy těchto vedení jsou znázorněny na obrázku č.2.1 v příčném řezu. A) značí mikropásek vedený mezi dvěma zemními deskami, B) značí otevřený mikropásek nad zemními deskami, C) koplanární vlnovod. Takto jsou i značeny planární vedení na obrázcích 2.2 a 2.3.

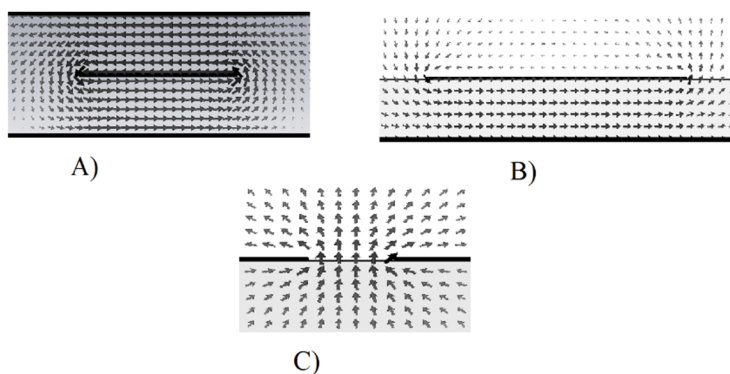


Obrázek 2.1: Příčný řez daným mikropáskem.

Na obrázcích 2.2 a 2.3 je znázorněno elektrické pole a magnetické pole. Pro koplanární vlnovod je pouze zobrazeno rozložení E-pole a H-pole pro jednu mezeru.



Obrázek 2.2: Rozložení elektrického pole u mikropáskových vedení.



Obrázek 2.3: Rozložení magnetického pole u mikropáskových vedení.

U mikropásku vedeného mezi dvěma zemními deskami je z obrázku č.2.2 patrné, že dochází k vedení energie mezi páskem a zemními deskami a nedochází k vyzařování skrze tyto plochy. Proto by byla vhodná k napájení antén, u kterých by nebyla ovlivňována vyzařovací charakteristika vlivem vedení. Pro použití napájení monopólové antény je ale tento styl napájení nevhodný. Je potřeba docílit, aby ze zemní plochy byl vyveden pól. Toto napájení by bylo vhodné pro napájení slotových antén. Případně pro vedení signálů, který by byl chráněn vůči elektromagnetickému rušení z okolí.

Otevřený mikropásek nad zemní deskou má pouze z jedné strany zemní desku, jak je patrné z obrázku č.2.1, ale dochází k vyřazování do stran (obrázek č.2.2). To by mohlo mít za následek ovlivnění vyzařovacího diagramu dané antény. Toto vedení by bylo vhodné pro napájení flíčkových antén.

Koplanární vlnovod, jak je patrné z obrázku č.2.1, se skládá z jednoho vodiče vedeného mezi dvěma zemními deskami. U rozložení E-pole, na obrázku 2.2, je patrné, že mezery mezi vodičem a zemí vyzařují do okolí, to by mohlo mít neblahý vliv na vyzařovací charakteristiku antény. Výhoda by byla, pokud by se vedení zakončilo na prázdko a byl vyveden monopól skrze substrát. Byl by obklopen zemní deskou, kromě směru, odkud by byl přiveden signál.

## 2.2 Koplanární vlnovod

V kapitole 2.1 byly popsány základní druhy planárních vedení a u každého byly napsány výhody a nevýhody pro danou anténu, na kterou se zaměřuje tato práce. Mezi nevhodnější vedení se nabízí koplanární vlnovod, pomocí kterého se bude možno co nejlíže přiblížit k teoretickému vzhledu antény. U návrhu vedení je potřeba dbát na charakteristickou impedanci. Ta by měla být stejná jako impedance antény a jako impedance vstupního zdroje. Toho lze docílit pomocí přizpůsobovacích obvodů. Pro výpočet charakteristické impedanci pro koplanární vlnovod lze použít následující vzorce, [5]

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\pi}{\ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}}\right)} \quad \text{pro } 0 \leq k \leq \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (2.1)$$

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \frac{\ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right)}{\pi} \quad \text{pro } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1, \quad (2.2)$$

$K(k)$  a  $K'(k)$  značí eliptický integrál a vzorec (2.1) vypočítává hodnotu poloměru. Hodnotu  $k'$  a  $k$  lze vypočítat pomocí vzorce (2.3) a (2.4),

$$k' = \sqrt{1 - k^2}, \quad (2.3)$$

$$k = \frac{W}{W + 2 \cdot s}, \quad (2.4)$$

kde  $W$  značí šířku vodivého mikropásku a  $s$  značí šířku mezery. K výpočtu impedance koplanárního vlnovodu je potřeba znát také efektivní permitivitu  $\epsilon_{\text{reff}}$ ,

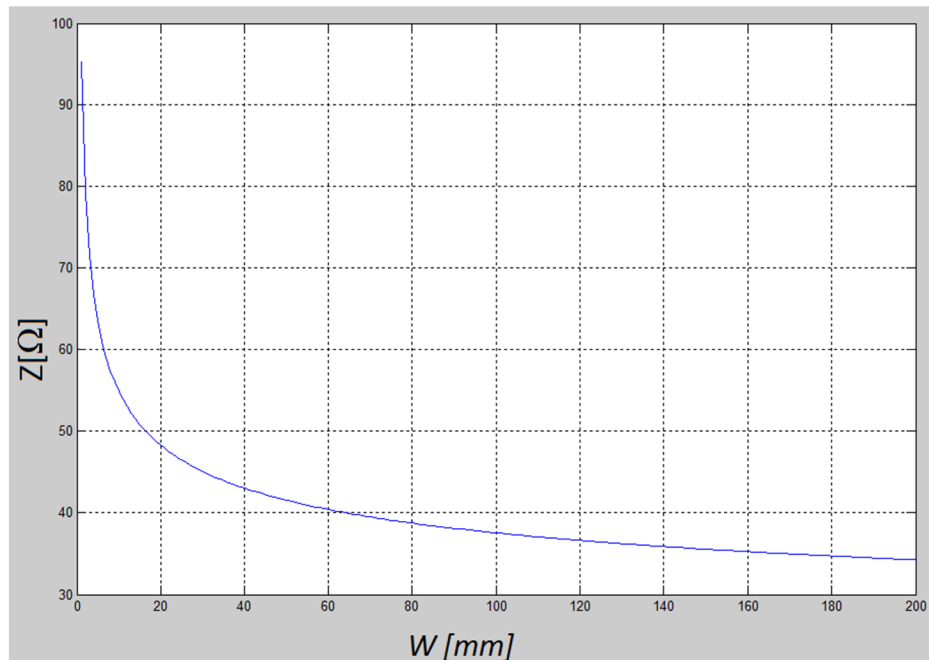
$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2}, \quad (2.5)$$

$\epsilon_r$  značí relativní permitivitu. Poté, co jsou známy tyto hodnoty, lze je dosadit do vzorce pro výpočet impedance,

$$Z = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} * \frac{K'(k_1)}{K(k_1)}, \quad (2.6)$$

$Z$  značí impedanci daného vedení. Pomocí těchto vzorců lze orientačně vypočítat impedance koplanárního vlnovodu. Ve výpočtech se nepočítá s tloušťkou vodivých materiálů a neuvažuje se, že substrát má konečnou tloušťku. To bude mít za následek rozdíl mezi skutečnou a vypočítanou impedancí

Pomocí programu Matlab byla vypočítána závislost impedance koplanárního vlnovodu na šířce středního vodiče. Ta je vyobrazena na obrázku 2.4. Výpočet byl proveden pro relativní permitivitu o hodnotě 1,4 a pro šířku mezery 0,3 mm.

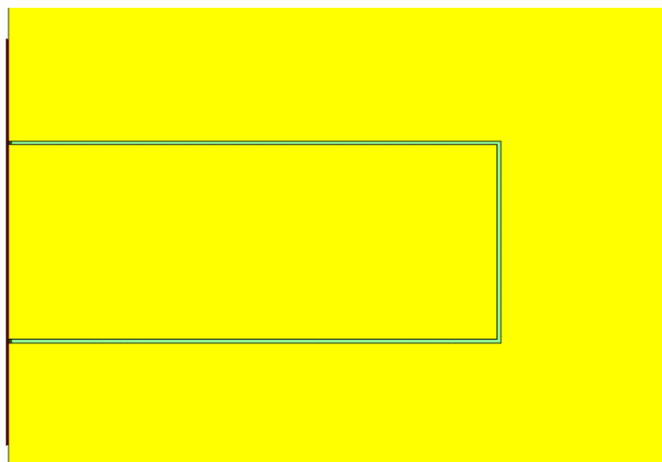


Obrázek 2.4: Závislost impedance na šířce středního vodiče.

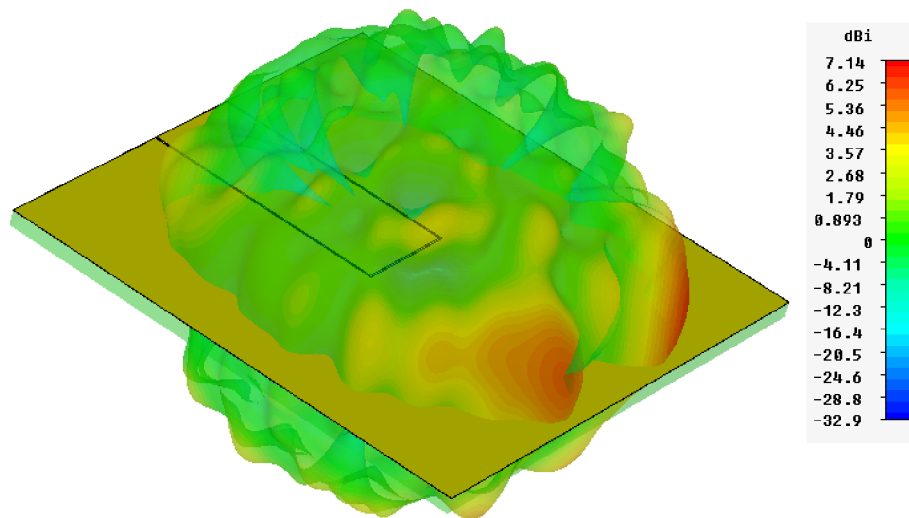
Z grafu je možné odečíst, že pro impedanci  $36,5\Omega$ , je potřeba zvolit střední vodič o velikosti 123 mm, to by mohla být další nevýhoda, kromě parazitního vyzařování, že střední vodič je cca. 10krát širší než délka vlny pro 24 GHz. Délka vlny je vypočítaná následujícím vzorcem,

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300000000}{24000000000} = \underline{12,5 \text{ mm}} \quad (2.7)$$

Teď je již známá potřebná šířka středního vodiče pro koplanární vlnovod. Aby byli zjištěny vyzařovací vlastnosti samostatného koplanárního vlnovodu zakončeného naprázdno, byl pomocí programu CST microwave studio vytvořen, pro tyto účely, model. Vzhled tohoto modelu je na obrázku 2.5 a na obrázku 2.6 je zobrazena 3D vyzařovací charakteristika.



Obrázek 2.5: Vzhled koplanárního vlnovodu.



Obrázek 2.6: Vyzařovací 3D charakteristika koplanárního vlnovodu.

Z obrázku 2.6 je patrné, že dochází k velkému parazitnímu vyzařování koplanárního vlnovodu a to až 7,14 dBi. Z tohoto důvodu je nevhodné použít toto vedení pro napájení monopólové antény. Proto nejvhodnějším způsobem zůstává napájení pomocí koaxiálního vedení.



## 3 ÚPRAVA SMĚROVÝCH VLASTNOSTÍ MONOPÓLOVÉ ANTÉNY

Jak bylo zmíněno v úvodu. Tato anténa by měla být určena pro komunikaci uvnitř vozidla. Ta může probíhat mezi více body. Pro tento účel je vhodnější použít všesměrovou anténu. Komunikace může probíhat také mezi dvěma body jako směrový spoj. Pro tento účel by bylo vhodnější použít anténu se směrovou vyzařovací charakteristikou. Monopólová anténa vyzařuje v celé ploše XY a pro úpravu směrových vlastností je potřeba zvolit vhodné úpravy antény, které popisuje tato kapitola.

### 3.1 Možnosti úpravy směrových vlastností

Pro dosažení většího zisku v požadovaném směru, lze dosáhnout pomocí [6]:

- a) Direktoru – který usměrňuje elektrickou energii a pomocí něhož lze dosáhnout většího zisku. Zpravidla bývá o cca. 5 % kratší než délka půlvlnného dipólu na pracovním kmitočtu.
- b) Reflektoru – u kterého se využívá princip zrcadlení, a od kterého se daná elektromagnetická vlna „odráží“. Zpravidla bývá o cca. 5 % delší než délka půlvlnného dipólu na pracovním kmitočtu.

Reflektor se využívá například u monopólové antény a u parabolických antén, kde bývá reflektor zakřiven, aby se dosáhlo maximálního zisku [7]. Požití reflektoru a direktoru se využívá u Yagiho antény a u logaritmicko-periodické antény [8]. Reflektor i direktor ovlivňují vstupní impedanci antény.

### 3.2 Úprava směrových vlastností pomocí direktorů

Pro návrh direktorů lze použít Yagiho anténu, která jich využívá pro dosažení úzkého hlavního laloku a maximálního zisku. Aby se dosáhlo u Yagiho antény maximálního zisku, musí být fázová rychlost budící vlny menší, než je rychlost světla. Ta závisí na průměru použitých vodičů, rozteči mezi prvky a délkou prvků [8].

Yagiho anténa se skládá ze tří hlavních prvků a to: z aktivního zářiče, reflektoru a direktoru. Pro návrh Yagiho antény lze použít následující tabulku 3.1

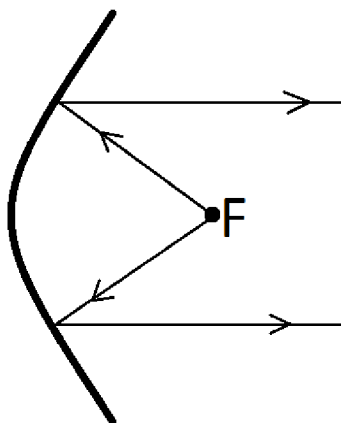
Tabulka 3.1: Rozměry a parametry pro různé návrhy Yagiho antén [9].

Typ	5Y0,4-0,85 A	5Y0,42-0,9 B	7Y1,7-0,98 C	12Y2-0,92 D	14Y2,7-0,9 E	20Y4-0,91 F	17Y4,1-0,96 G	28Y7,3-0,9 H	21Y6,6-0,96 I
Rozměry									
$L_R$	0,63 (2×)	0,608 (2×)	0,476 (1×)	0,6 (2×)	0,59 (2×)	0,604 (3×)	0,53 (2×)	0,615 (2×)	0,52 (1×)
$p_1$	0,19	0,19	0,25	0,226	0,23	0,15+0,07	0,177	0,18	0,2
$L_2$	0,56	0,54	0,478	0,55	0,57	0,552	0,522	0,57	0,51
$p_1$	0,032	0,036	0,05	0,06	0,05	0,05	0,064	0,044	0,084
$l_{d1}$	0,472	0,47	0,45	0,47	0,464	0,48	0,461	0,426	0,469
$p_2$	0,19	0,2	0,289	0,094	0,165	0,083	0,254	0,128	0,107
$l_{d2}$	0,45	0,44	0,436	0,46	0,456	0,463	0,433	0,41	0,455
$p_3$			0,406	0,132	0,172	0,121	0,304	0,266	0,234
$l_{d3}$			0,43	0,453	0,448	0,459	0,433	0,408	0,44
$p_4$			0,323	0,172	0,192	0,155	0,304	0,285	0,263
$l_{d4}$			0,434	0,445	0,441	0,456	0,428	0,408	0,44
$p_5$			0,422	0,208	0,211	0,19	0,304	0,303	0,289
$l_{d5}$			0,43	0,436	0,433	0,452	0,415	0,403	0,433
$p_6$				0,206	0,23	0,219	0,304	0,303	0,335
$l_{d6}$				0,43	0,425	0,449	0,412	0,403	0,433
$p_7$				0,264	0,25	0,242	0,304	0,303	0,39
$l_{d7}$				0,426	0,418	0,446	0,408	0,403	0,433
$p_8$				0,24	0,268	0,268	0,304	0,303	0,39
$l_{d8}$				0,432	0,41	0,442	0,405	0,403	0,419
$p_9$				0,320	0,287	0,293	0,304	0,303	0,39
$l_{d9}$				0,415	0,402	0,439	0,401	0,398	0,419
$p_{10}$					0,306	0,31	0,304	0,303	0,39
$l_{d10}$					0,395	0,435	0,401	0,398	0,419
$p_{11}$					0,325	0,31	0,304	0,303	0,39
$l_{d11}$					0,387	0,432	0,401	0,398	0,419
$p_{12}$						0,31	0,304	0,303	0,39
$l_{d12}$						0,428	0,401	0,398	0,419
$p_{13}$						0,31	0,304	0,303	0,39
$l_{d13}$						0,425	0,401	0,395	0,411
$p_{14}$						0,31	0,304	0,303	0,39
$l_{d14}$						0,421	0,396	0,395	0,411
$p_{15}$						0,31	–	0,303	0,39
$l_{d15}$						0,418	–	0,395	0,411
$p_{16}$						0,31	–	0,303	0,39
$l_{d16}$						0,414	–	0,395	0,404
$p_{17}$						–	–	0,303	0,39
$l_{d17}$								0,39	0,404
$p_{18}$								0,303	0,39
$l_{d19}$								0,39	0,404
$p_{19}$								0,303	0,39
$l_{d19}$								0,39	0,404
$p_{20 \text{ až } 25}$								0,303	
$l_{d20 \text{ až } 25}$								0,39	
$h$	0,28	0,27	–	0,28	0,3	0,5	0,27	0,22	–
$r$	0,0034	0,005	0,0067	0,005	0,0045	0,01	0,01	0,0155	0,0058
$T$	0,004	0,004	–	0,225	0,015	0,035	0,03	0,042	0,024
$m$	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,005
$l_c$	0,41	0,43	1,67	1,84	2,68	4,02	4,14	7,27	6,58
$S_E$	1,2	1,2	1,6	1,5	1,7	2,2	2,3	3,0	2,8
$S_H$	0,75	0,7	1,5	1,3	1,5	2,0	2,1	2,8	2,6
EI Parametry									
$G_d$ [dB]	5,1 až 6,2	5,0 až 6,0	11,6	10,5–12	10,5–12,2	12,5–13,4	13,5–14,0	12,0–15,2	14–15,2
$\text{ČSV}_{300\Omega}$	1,3 až 2,5	< 1,4	< 1,6	< 1,6	< 1,3	< 1,3	< 1,6	< 1,5	< 1,6
$\text{ČZP}$ [dB]	21 až 14	25 až 17	18	> 18	> 23	> 24	> 20	> 20	> 18
$\gamma_{\text{dB E}}$ [°]	65 až 62	65 až 62	38	43 až 38	42 až 36	33 až 29	30 až 27	26 až 19	26 až 22
$\gamma_{\text{dB H}}$ [°]	108–92	114–106	40	53 až 43	50 až 41	35 až 31	34 až 30	30 až 20	28 až 24
$l.p.l_E$ [dB]	–	–	18	> 20	> 20	> 20	16	10,6	16
$l.p.l_H$ [dB]	–	–	13	> 18	> 18	> 14	12	8,5	13

Rozměry jsou vztaženy k vlnové délce  $\lambda$  na nejvyšším pracovním kmitočtu. Rozměr  $l$  značí délku daného prvku a rozměr  $p$  rozteč mezi daným prvkem a předchozím prvkem. Typ značí, o který typ se jedná např. 7Y1,7-0,98 značí, že se jedná o sedmi prvkovou anténu o celkové délce  $1,7 \lambda_{\text{min}}$  v pásmu  $f_{\text{min}}/f_{\text{max}}=0,98$ .

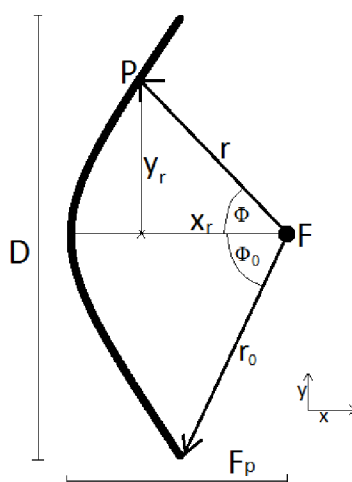
### 3.3 Úprava směrových vlastností pomocí reflektoru

Pro úpravu směrových vlastností pomocí reflektoru se lze inspirovat parabolickou anténou, která využívá parabolicky zakřivený reflektor, pro dosažení maximálního zisku. Parabolická anténa se skládá ze dvou částí. Z aktivního zářiče a z reflektoru. Vzhled parabolické antény je znázorněn na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Vzhled parabolické antény.

V ohnisku jednoduché parabolické antény (na obrázku 3.1 značeno F) bývá aktivní zářič, který vyzařuje kulovou vlnu. Ta dopadá na parabolické zrcadlo, od kterého se odráží a dále pokračuje jako rovinná vlna. Pro výpočet parabolického reflektoru je třeba znát parametry, které jsou znázorněny na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Parametry pro návrh parabolického zrcadla.

Na obrázku 3.2  $F_p$  značí vzdálenost mezi ohniskem a vrcholem paraboly,  $D$  značí průměr paraboly,  $r_0$  je vzdálenost mezi ohniskem a hranou paraboly,  $r$  je vzdálenost mezi ohniskem a bodem  $P$  na parabole,  $y_r$  je vzdálenost mezi bodem  $P$  a osou  $x$ , která prochází ohniskem,  $x_r$  je vzdálenost mezi ohniskem a osou  $y$ , která prochází bodem  $P$ ,  $\Phi$  je úhel mezi osou  $x$ , procházející ohniskem, a bodem  $P$ ,  $\Phi_0$  je úhel mezi hranou paraboly a osou  $x$ .

Hodnota  $F_p$  se volí jako několikanásobek čtvrtinové vlnové délky,

$$F_p = n \frac{\lambda}{4}, \quad (3.1)$$

pomocí  $F_p$  a parametru  $p$  můžeme určit průměr paraboly. Parametr  $p$  se volí v hodnotách 0,3 až 1, [10]

$$D = \frac{F_p}{p}, \quad (3.2)$$

z těchto hodnot lze vypočítat hodnota  $x_0$ , vzdálenost mezi ohniskem a osou  $y$  procházející hranou paraboly,

$$x_0 = F_p - \frac{D^2}{(16 * F_p)}, \quad (3.3)$$

pomocí hodnoty  $x_0$  a  $D$  lze vypočítat úhel sevření  $\Phi_0$  mezi osou  $x$  a hranou paraboly,

$$\Phi_0 = \arctg\left(\frac{D}{x_0}\right), \quad (3.4)$$

pomocí těchto vzorců lze zjistit maximální úhly sevření mezi osou  $x$  a bodem  $P$ . Po dosažení úhlů od 0 do  $\Phi_0$  lze zjistit velikost vzdálenosti mezi ohniskem  $F$  a bodem  $P$ . Poté je možné zjistit hodnoty  $y_r$  a  $x_r$ ,

$$r = \frac{(2F_p)}{(1 + \cos(\Phi))}, \quad (3.5)$$

$$x_r = r \cdot \cos(\Phi), \quad (3.6)$$

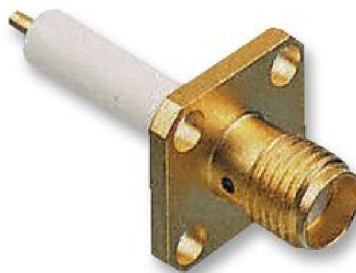
$$y_r = r \cdot \sin(\Phi). \quad (3.7)$$

## 4 NÁVRH A SIMULACE MONOPÓLOVÉ ANTÉNY

Simulace a návrh antén byl proveden v programu CST microwave studio. Jedná se o modul programu CST studio suite, pomocí kterého lze modelovat různé elektrotechnické prvky, jako antény, vedení, filtry a jiné, a pomocí simulace lze zjistit parametry těchto modelů. Například vstupní činitel odrazu, vyzařovací charakteristiky, případně přenosový parametr  $S_{12}$ .

### 4.1 Návrh a simulace všesměrové monopólové antény

Jak bylo popsáno v kapitole 2, nejlepší možností napájení, je napájení pomocí koaxiálního vodiče. Z toho důvodu je třeba zvolit vhodný konektor, u kterého výrobce udává, možnost přenášet elektrickou energii na frekvenci 24 GHz, bez velkých ztrát. Pro účely této antény byl zvolen konektor RADIALL R12541400 RF, u kterého výrobce udává maximální frekvenci 24,5 GHz. Vzhled tohoto konektoru je na obrázku 4.1. [11]

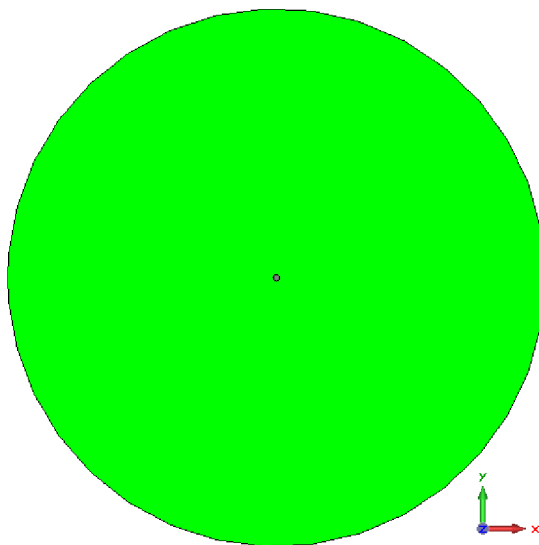


Obrázek 4.1: Vzhled konektoru RADIALL R12541400 RF.

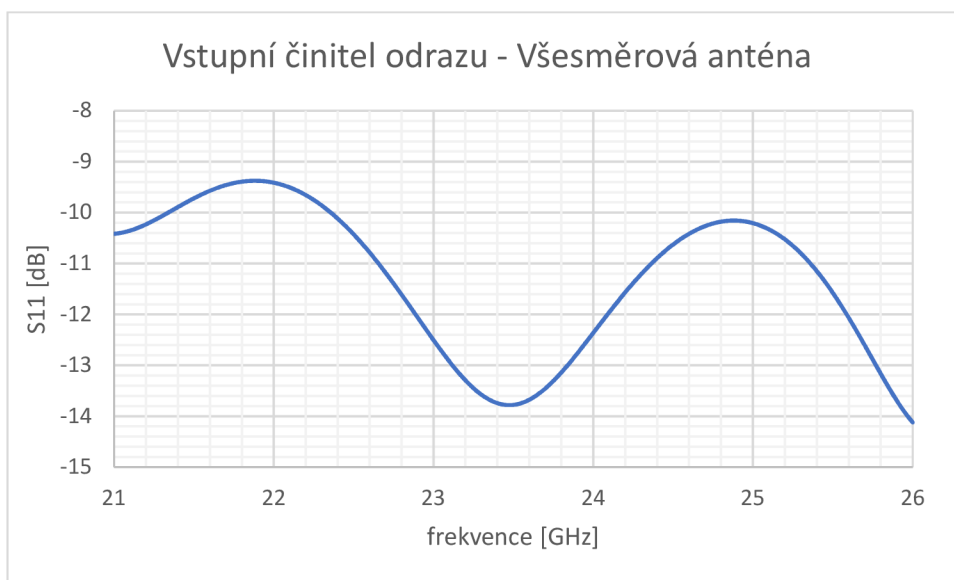
Anténa se navrhuje na 3D textil, který má tloušťku 2,6 mm a relativní permitivitu 1,4. Ztrátový činitel tohoto materiálu je neznámý. Byl zvolen maximální průměr antény 10 cm, který je považován za dostatečný. Tímto jsou dány rozměry a délka monopólu. Délka monopólu by měla být zjištěna pomocí následujícího vzorce,

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{300000000}{24000000000 \cdot \sqrt{1.4}} = \underline{\underline{2,64 \text{ mm}}}, \quad (4.1)$$

kde  $\lambda$  značí vlnovou délku na frekvenci  $f$ , v prostředí o relativní permeabilitě  $\epsilon_r$ . Rozdíl mezi tloušťkou textilu a čtvrtvlnnou délkou na požadované frekvenci je 0,04 mm. To bude mít mírný vliv na rezonanční kmitočtu monopólové antény. Na obrázku 4.2 je znázorněn vzhled všesměrové antény. Na obrázku 4.3 je graf vstupního činitele odrazu.



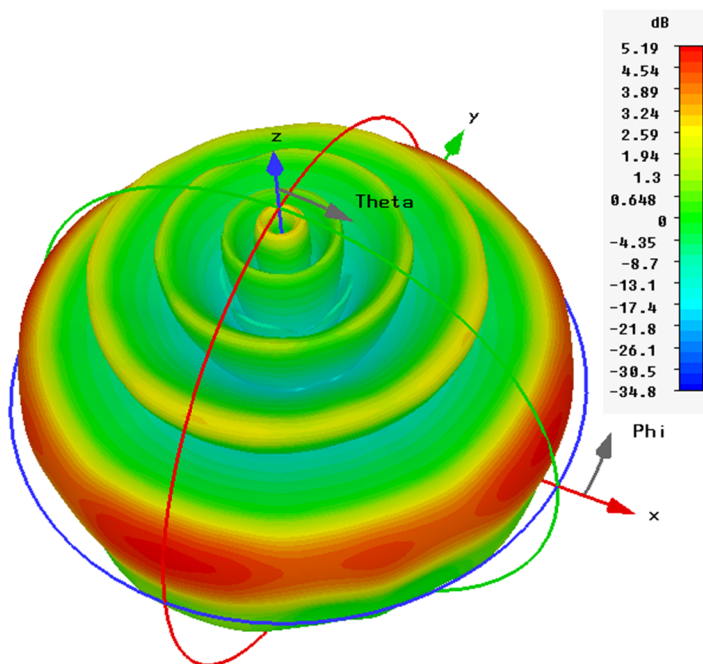
Obrázek 4.2: Vzhled všesměrové monopólové antény.



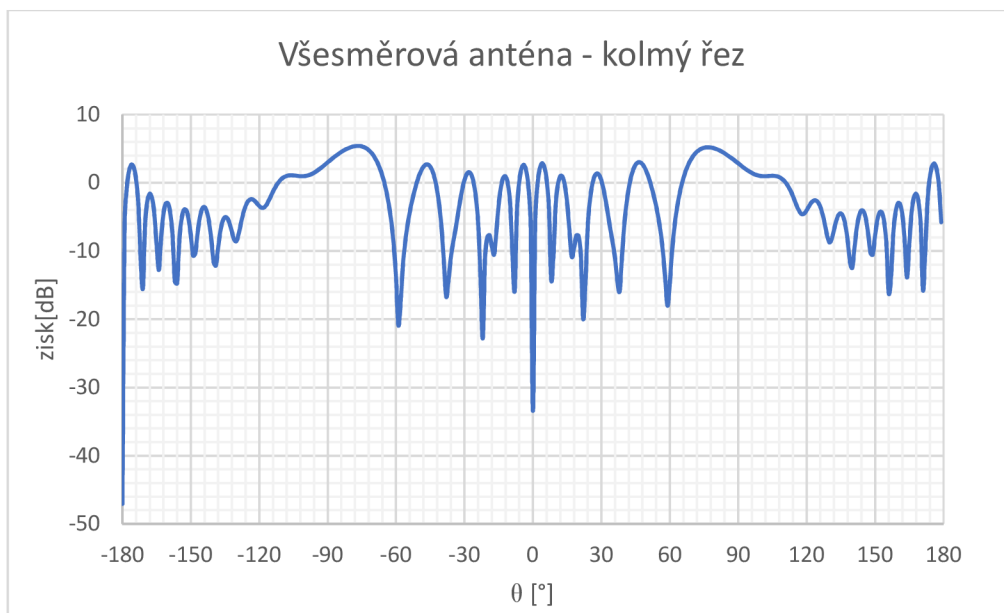
Obrázek 4.3: Vstupní činitel odrazu modelu všesměrové monopólové antény.

Z obrázku 4.3 je patrné, že monopól rezonuje na frekvenci 23,47 GHz. Kde má vstupní činitel odrazu hodnotu -13,8 dB. Na frekvenci 24 GHz má hodnotu -12,4 dB. Na frekvenci 24,25 GHz, je tato hodnota -11,4 dB. Tím je splněn požadavek přizpůsobení vstupu antény. Je všeobecně dáno, že anténa by na pracovních kmitočtech měla mít hodnotu vstupního činitele odrazu alespoň -10 dB nebo nižší. Tuto hodnotu anténa splňuje od frekvence 22,36 GHz do frekvence 24,88 GHz kde je hodnota parametru  $S_{11}$  -10,1 dB.

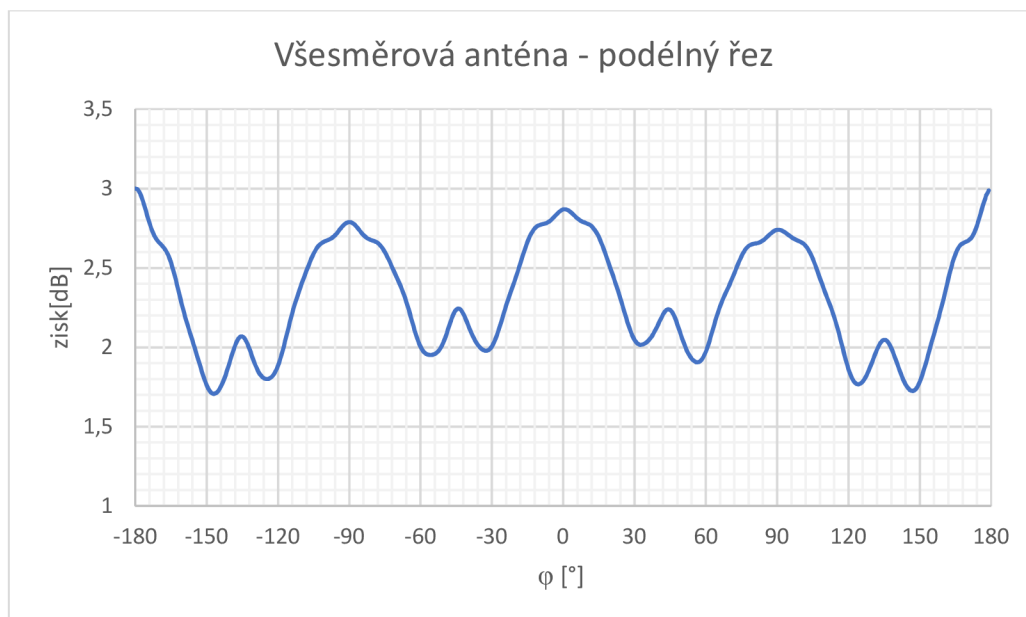
Na obrázku 4.4 je vzhled 3D vyzařovací charakteristiky monopólové antény. Na obrázcích 4.5 a 4.6 je znázorněna vyzařovací charakteristika v kolmém řezu, v ploše  $XZ$  a v podélném řezu, v ploše  $XY$ .



Obrázek 4.4: 3D vyzařovací charakteristika modelu všesměrové monopólové antény.



Obrázek 4.5: Vyzařovací charakteristika modelu všesměrové monopólové antény v kolmém řezu.



Obrázek 4.6: Vyzařovací charakteristika modelu všesměrové monopólové antény v podélném řezu.

Z obrázku 4.5 je patrné, že hlavní lalok vyzařování je v úhlu  $\theta 77^\circ$  ( $\theta -77^\circ$ ) se ziskem 5,2 dB. Šířka tohoto laloku, pro pokles o 3 dB, je  $24^\circ$  v úhlu od  $92^\circ$  do  $68^\circ$   $\theta$ . V podélném řezu se hodnota zisku pohybuje od 3 dB do 1,7 dB. Ideálně by měla být tato hodnota konstantní.

## 4.2 Návrh a simulace směrové monopólové antény

Jak bylo zmíněno v úvodu, komunikace by mohla probíhat mezi dvěma pevně danými body. Pro tento typ komunikace je vhodné použít antény pro směrový spoj. Monopólová anténa navržená v předešlé kapitole bude upravena na základě kapitoly 3.

Pomocí vzorců uvedených v kapitole 3.3, lze vypočítat umístění prokovů, skrze 3D textil, parabolického zrcadla, které budou spojeny se zemní deskou. Za parametr  $n$  byla zvolena hodnota 11 a za parametr  $p$  byla zvolena hodnota 0,3. Tyto hodnoty byly zvoleny tak, aby nebyl přesažen maximální poloměr antény 10 cm. Následující vzorce ukazují příklad výpočtu umístění prokovu pro hranu paraboly. Osa 0,0 je v ohnisku paraboly, v místě vyvedení monopólu. Hodnota  $\Phi$  byla zvolena od  $\Phi_0$  do 0 tak, aby vzdálenost mezi prvky byla mnohem menší, než je  $\lambda$ . V tabulce, která je v příloze tohoto dokumentu, jsou udány polohy prokovů v kladných hodnotách  $y_r$ . Parabola je symetrická kolem osy  $x$ .

$$F_p = n \frac{\lambda}{4} = 11,2,64 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{29,5 \text{ mm}}}, \quad (4.2)$$

$$D = \frac{F_p}{p} = \frac{29,5 \cdot 10^{-3}}{0,3} = \underline{\underline{96,8 \text{ mm}}}, \quad (4.3)$$

$$x_o = F_p - \frac{D^2}{(16 \cdot F_p)} = 29,5 \cdot 10^{-3} - \frac{(96,8 \cdot 10^{-3})^2}{(16 \cdot 29,5 \cdot 10^{-3})} = \underline{\underline{8,8 \text{ mm}}}, \quad (4.4)$$



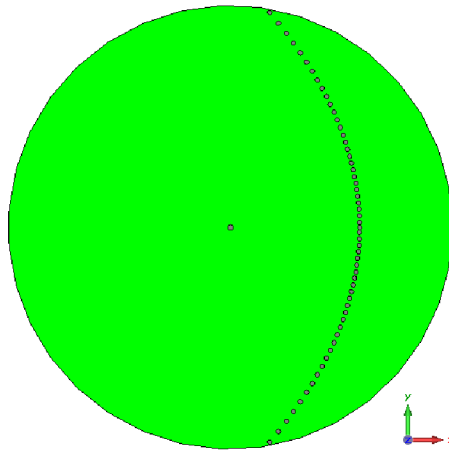
$$\Phi_0 = \arctg\left(\frac{9,68 \cdot 10^{-3}}{8,8 \cdot 10^{-3}}\right) = \underline{\underline{1,389 \text{ rad}}}, \quad (4.5)$$

$$r = \frac{(2 \cdot F_p)}{(1 + \cos(\Phi))} = \frac{(2 \cdot 29,5 \cdot 10^{-3})}{(1 + \cos(1,389))} = \underline{\underline{49,2 \text{ mm}}}, \quad (4.6)$$

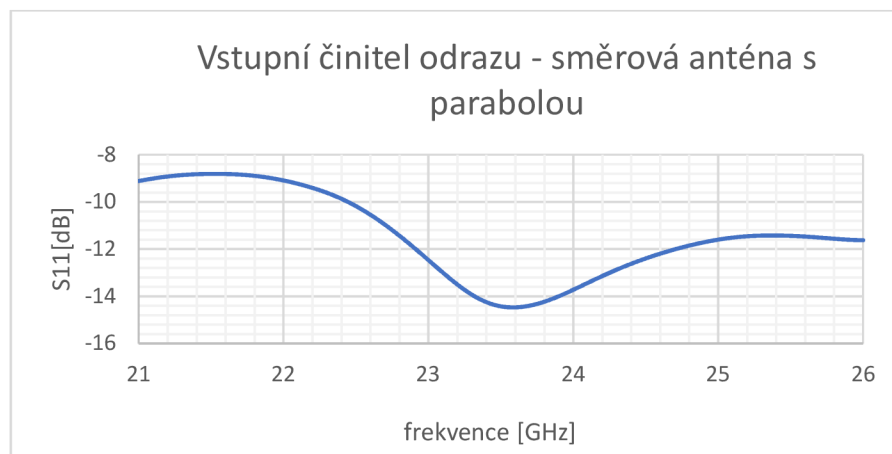
$$x_r = r \cdot \cos(\Phi) = 49,2 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(1,389) = \underline{\underline{8,8 \text{ mm}}}, \quad (4.7)$$

$$y_r = r \cdot \sin(\Phi) = 49,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(1,389) = \underline{\underline{48,4 \text{ mm}}}. \quad (4.8)$$

Na obrázku 4.7 je vzhled této antény s parabolickým zrcadlem, který byl navržen pomocí tabulky 4.1. Průměr prokovů je 1 mm. Na obrázku 4.8 je graf vstupního činitele odrazu  $S_{11}$ .



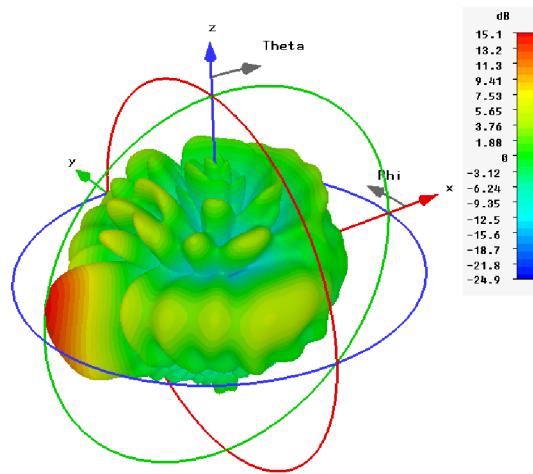
Obrázek 4.7: Vzhled antény s parabolou.



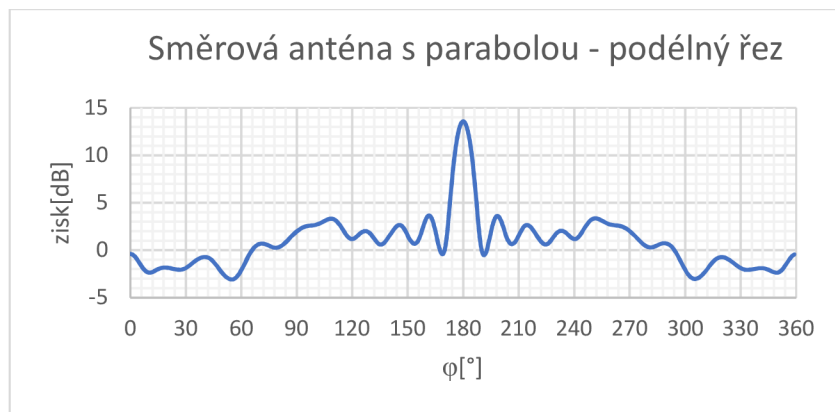
Obrázek 4.8: Vstupní činitel odrazu směrové antény s parabolou.

Z grafu na obrázku 4.8 lze zjistit, že monopól je nejlépe přizpůsobený na frekvenci 23,13, kde parametr  $S_{11}$  dosahuje hodnoty -13,6 dB. Anténa pracuje od frekvence 22,22 GHz až do kmitočtu 26 GHz, do kterého byla anténa simulována. V tomto rozsahu anténa splňuje podmínku, že  $S_{11}$  musí být menší než -10 dB.

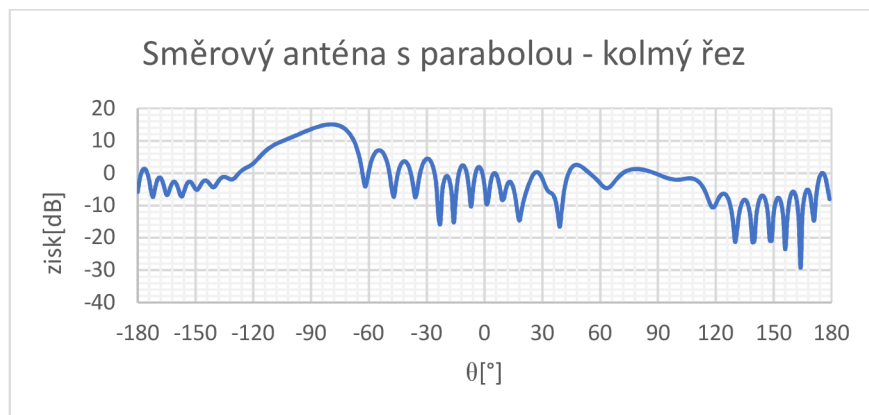
Na obrázku 4.9 je 3D vyzařovací charakteristika antény s parabolou a na obrázcích 4.10 a 4.11 jsou grafy vyzařovacích charakteristik v podélném řezu XY a v kolmém řezu XZ.



Obrázek 4.9: 3D vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou.



Obrázek 4.10: Vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou v podélném řezu.



Obrázek 4.11: Vyzařovací charakteristika Směrové monopólové antény s parabolou v kolmém řezu.

Anténa dosahuje největšího zisku v podélném řezu v úhlu  $180^\circ \varphi$  a to 13,58 dB. Šířka hlavního laloku je  $8,5^\circ$ . Rozdíl mezi 1. maximem a 2. maximem je 9,9 dB. V kolmém řezu je dosaženo největšího zisku 15 dB v úhlu  $-80^\circ \theta$ . Šířka hlavního laloku v ose XZ je  $26^\circ$ , od  $-70^\circ$  do  $-96^\circ \theta$ .

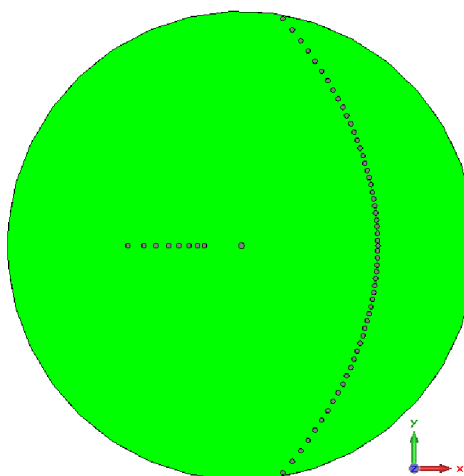
Pro směrovou monopólovou anténu s reflektorem a direktorem byl zvolen direktor pomocí tabulky 3.1 v kapitole 3.2. Byl zvolen direktor z Yagoho antény typu 12Y2-0,92. V tabulce 4.1 jsou uvedeny rozměry a umístění direktorů použitých při modelování antény.

Tabulka 4.1: Umístění direktorů.

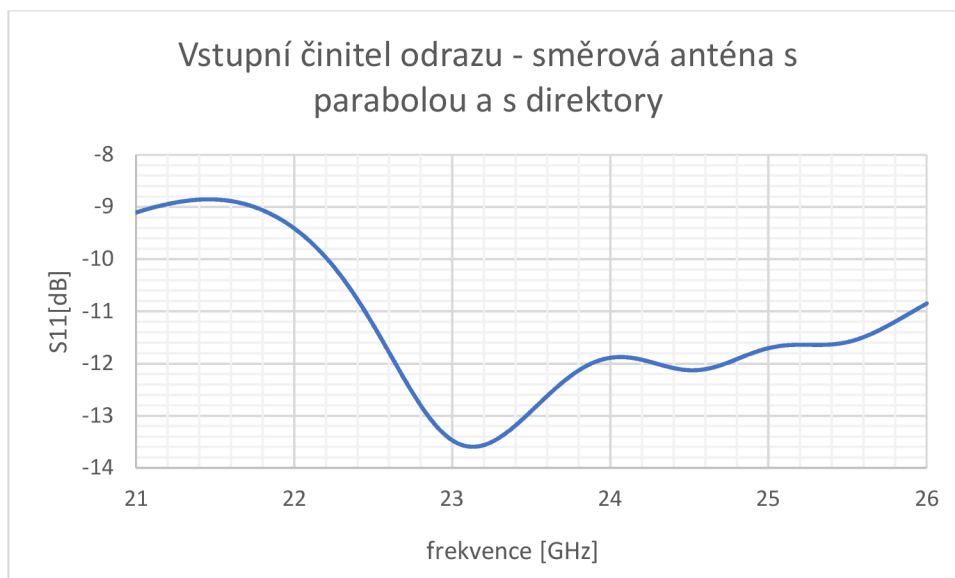
direktor	P	rozteč [mm]	poznámka	X [mm]	Y [mm]
D1	0,06	0,6336	nerealizován		
D2	0,094	0,99264		-7,98	0
D3	0,132	1,39392		-9,37	0
D4	0,172	1,81632		-11,18	0
D5	0,208	2,19648		-13,38	0
D6	0,206	2,17536		-15,56	0
D7	0,264	2,78784		-18,35	0
D8	0,24	2,5344		-20,88	0
D9	0,32	3,3792		-24,26	0

P značí rozteč mezi prvky antény v závislosti na  $\lambda$  a rozteč značí konkrétní vzdálenost mezi prvky. Direktor D1 nebyl realizovaný, protože při průměru prokůvů 1 mm by zasahoval do vedlejšího prokovu D2. Ve sloupci X a Y jsou udány souřadnice umístění prokůvů. Direktory byly posunuty, aby nezasahovaly do konektoru.

Na obrázku 4.12 je vzhled modelované antény a na obrázku 4.13 je graf vstupního činitele odrazu.



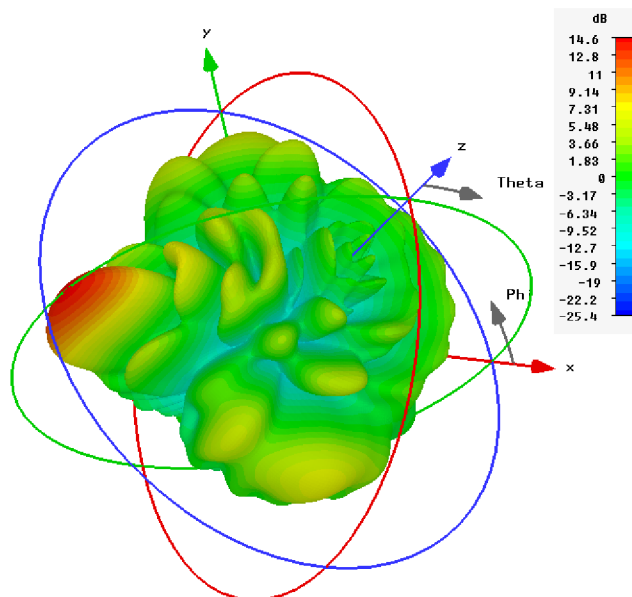
Obrázek 4.12: Vzhled antény s parabolou a s direktory.



Obrázek 4.13: Vstupní činitel odrazu směrové monopólové antény s parabolou a s direktory.

Nejllepší hodnota  $-13,6$  dB  $S_{11}$  je na frekvenci  $23,13$  GHz. U antény se samostatnou parabolou to bylo též na této frekvenci se stejnou hodnotou. Anténa pracuje od frekvence  $22,22$  GHz až do simulované frekvence  $26$  GHz. To je stejné jak u monopólové antény s parabolou.

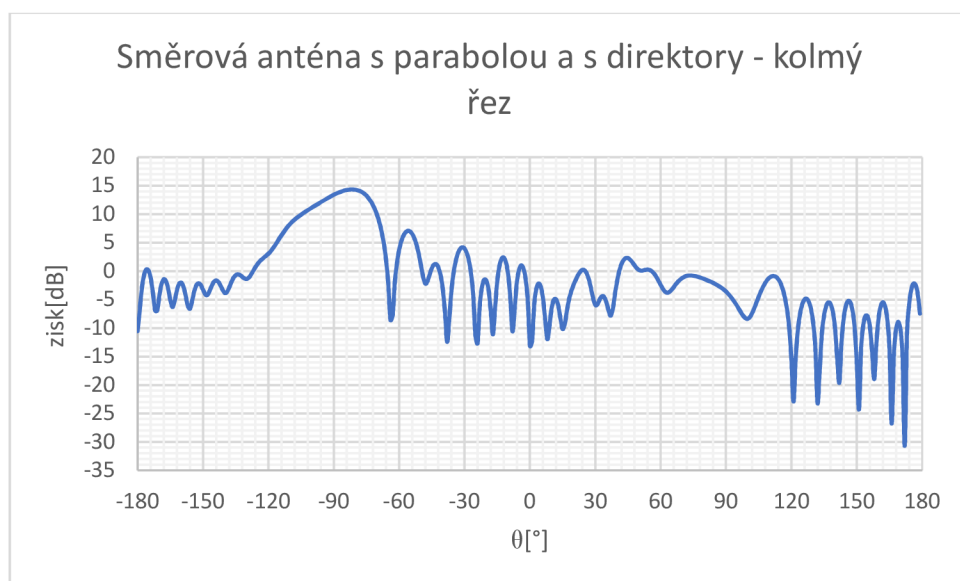
Na obrázku 4.14 je znázorněna 3D vyzařovací charakteristika. Na obrázcích 4.15 a 4.16 je graf vyzařovacích charakteristik v podélném a kolmém řezu.



Obrázek 4.14: 3D vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou a s direktory.



Obrázek 4.15: Vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou a s direktory v podélném řezu



Obrázek 4.16: Vyzařovací charakteristika směrové monopólové antény s parabolou a s direktory v kolmém řezu.

V podélném řezu je dosaženo zisku 13,4 dB v úhlu  $180^\circ \varphi$ . Šířka laloku je  $8,4^\circ$ . U antény s parabolou bylo dosaženo zisku 13,58 dB se šířkou laloku  $8,5^\circ$ . V kolmém řezu bylo dosaženo zisku 14,6 dB v úhlu  $-82^\circ \theta$ . Šířka laloku je  $27^\circ$  v úhlu od  $-99^\circ$  do  $-72^\circ \theta$ . Při porovnání s anténou, která má pouze parabolou se výsledky změnili jen mírně. Pro výrobu byla zvolena anténa s parabolou a s direktory.

## 5 VLIV MATERIÁLŮ V BLÍZKOSTI ANTÉNY NA VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKU

V této kapitole se simuluje vliv různých materiálů na vyzářovací vlastnosti navržených antén z kapitoly 4. Protože se předpokládá využití této antény uvnitř dopravního prostředku, kde by k nim byl volný přístup. Cestující by se jich mohli dotýkat, případně by mohli přiložit nějaký materiál k dané anténě. To by mohlo mít vliv na vyzářovací charakteristiky antén a tím i vliv na funkčnost systému, který by je využíval pro bezdrátovou komunikaci.

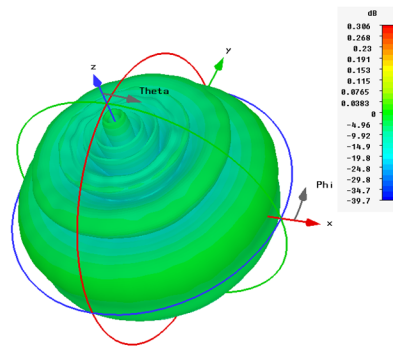
Prvním materiálem je polyethylentereftát, zkráceně *PET*. Tento materiál se běžně používá pro výrobu láhví na tekutiny. Pro tento materiál byla zjištěna relativní permeabilita a vodivost [12] [13]. Relativní permeabilita pro frekvenci 60 Hz má hodnotu 3,4 a pro frekvenci 1 MHz má hodnotu 3. Pro účely simulace byla dána hodnota relativní permitivity 3. Odpor polyethylentereftátu je  $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ . Vodivost je, pro tento materiál, považována pro simulaci jako nulová. Dále byla potřeba určit přibližnou tloušťku. Ta byla určena pomocí měření. Dále se zkoušel vliv vodivé desky v blízkosti antén. V simulaci, pro tento účel, byl použit *PEC*. A jako poslední se zkoušel vliv dotyku prstu na navržené antény v různých místech. Elektrické vlastnosti kůže, svalů a kostí byli zjištěny pomocí internetové stránky [14].

Pro simulaci materiálu PET a PEC byly použity čtvercové desky o tloušťce 0,25 mm a o délce jedné hrany 10 cm. Ty byly umístěny ve vzdálenosti 0 mm, 5 mm a 10 mm od dané antény ve směru osy  $Z^+$ . Pro simulaci prsu byl využit jednoduchý model obdélníkového tvaru o celkovém rozměru 12 mm x 10 mm x 20 mm. Tloušťka kůže byla dána 1 mm a tloušťka svaloviny 2 mm. Místa dotyku jsou na monopólu, poblíž monopólu, ve směru osy  $x^+$ , na hraně antény a v bode mimo osu  $x$ . v souřadnicovém systému  $[X; Y]$ , střed prstu je umístěn v poloze  $[0; 0]$ ,  $[6 \text{ mm}; 0]$ ,  $[42 \text{ mm}; 0]$  a  $[30 \text{ mm}; 27 \text{ mm}]$ . Poloha  $[0; 0]$  je uvažována jako střed navržené antény. Pro anténu s reflektorem a direktorem byla poloha prstu  $[0; 0]$ ,  $[-6 \text{ mm}; 0]$ ,  $[-42 \text{ mm}; 0]$  a  $[-30 \text{ mm}; 27 \text{ mm}]$ .

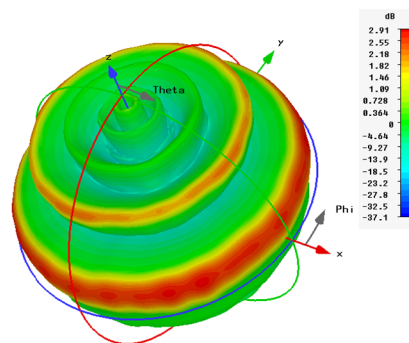
## 5.1 Všesměrová anténa

### 5.1.1 Vliv polyethylentereftátu

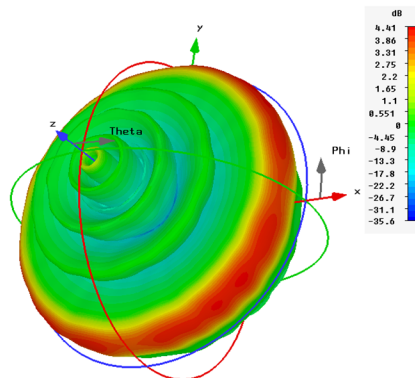
Na obrázcích 5.1, 5.2, 5.3 jsou znázorněny 3D vyzařovací diagramy pro anténu ke které byl přiložen polyethylentereftát do vzdáleností 0 mm od antény, 5 mm od antény a 10 mm od antény. Na obrázku 5.4 je graf vstupního činitele odrazu pro jednotlivé vzdálenosti a pro porovnání i samostatné antény.



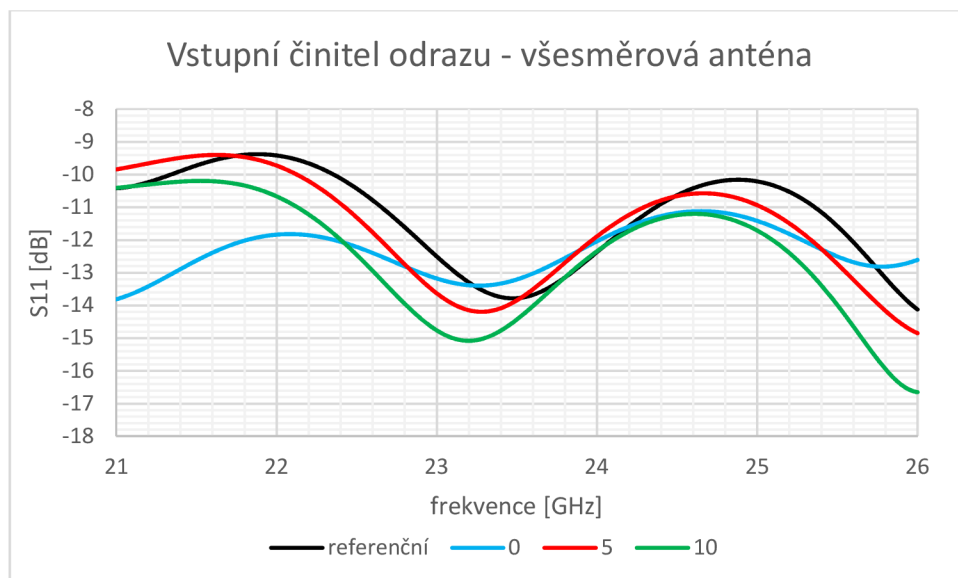
Obrázek 5.1: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s deskou vyrobené z PET ve vzdálenosti 0 mm.



Obrázek 5.2: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s deskou vyrobené z PET ve vzdálenosti 5 mm.

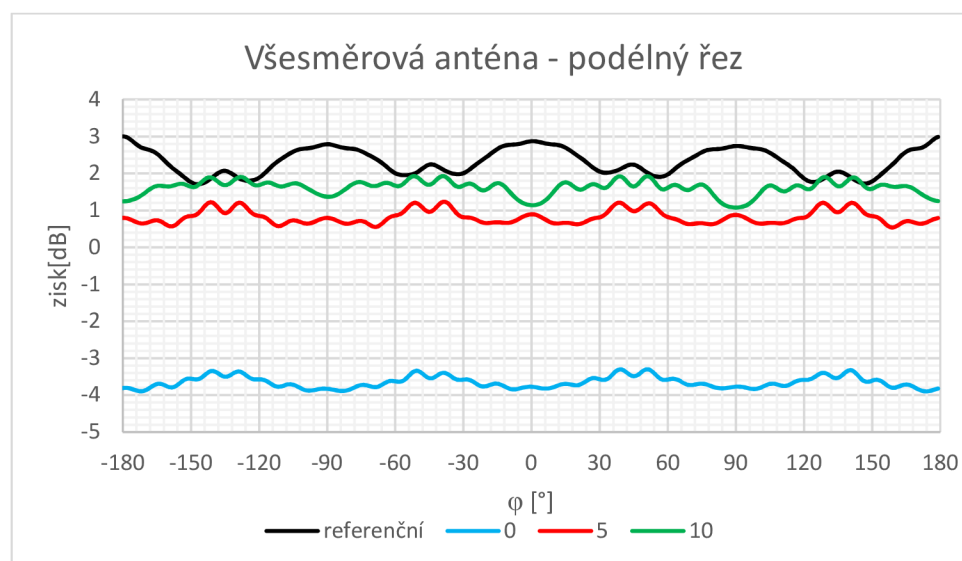


Obrázek 5.3: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s deskou vyrobené z PET ve vzdálenosti 10 mm.



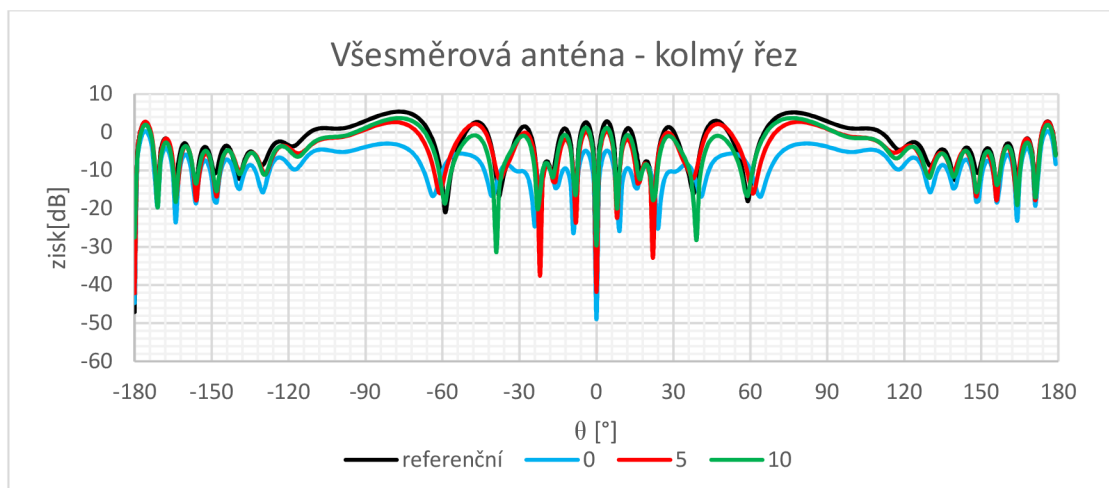
Obrázek 5.4: Vstupní činitel odrazu všesměrové antény v závislosti na vzdálenosti desky z PET od antény.

Vlivem přiloženého materiálu se mění vstupní činitel odrazu. Na frekvenci 24 GHz má anténa bez přiložené desky hodnotu -12,4 dB. S přiložením materiálu ve vzdálenosti 0 mm má parametr  $S_{11}$  hodnotu -12 dB. Pro vzdálenost 5 mm má hodnotu -11,9 dB a pro vzdálenost 10 mm má hodnotu -12,35 dB. Na frekvenci 24,25 GHz má anténa bez přiložené desky hodnotu -11,4 dB. S přiložením materiálu ve vzdálenosti 0 mm má parametr  $S_{11}$  hodnotu -11,48 dB. Pro vzdálenost 5 mm má hodnotu -11,1 dB a pro vzdálenost 10 mm má hodnotu -11,6 dB. Z tohoto pohledu anténa splňuje pro všechny vzdálenosti podmínku, aby  $S_{11}$  mělo na pracovních frekvencích hodnotu nižší než -10 dB. Dalším důležitým faktorem je vyzařovací charakteristika pro dané vzdálenosti. Na obrázku 5.5 jsou vyzařovací charakteristiky v podélném řezu. A na obrázku 5.6 v kolmém řezu.



Obrázek 5.5: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v závislosti na vzdálenosti přiloženého materiálu v podélném řezu.



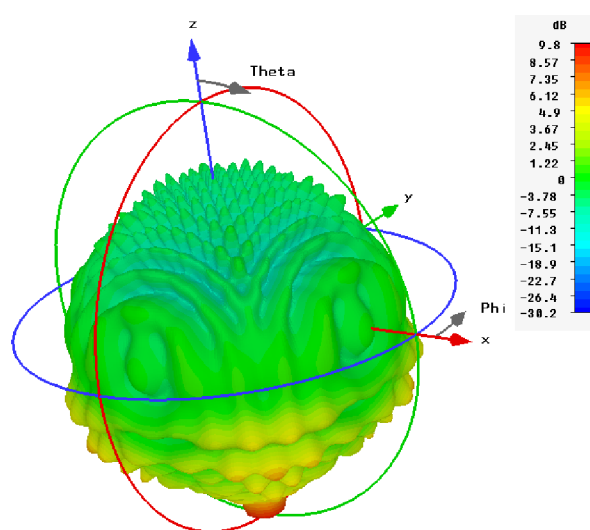


Obrázek 5.6: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v závislosti na vzdálenosti přiloženého materiálu v kolmém řezu.

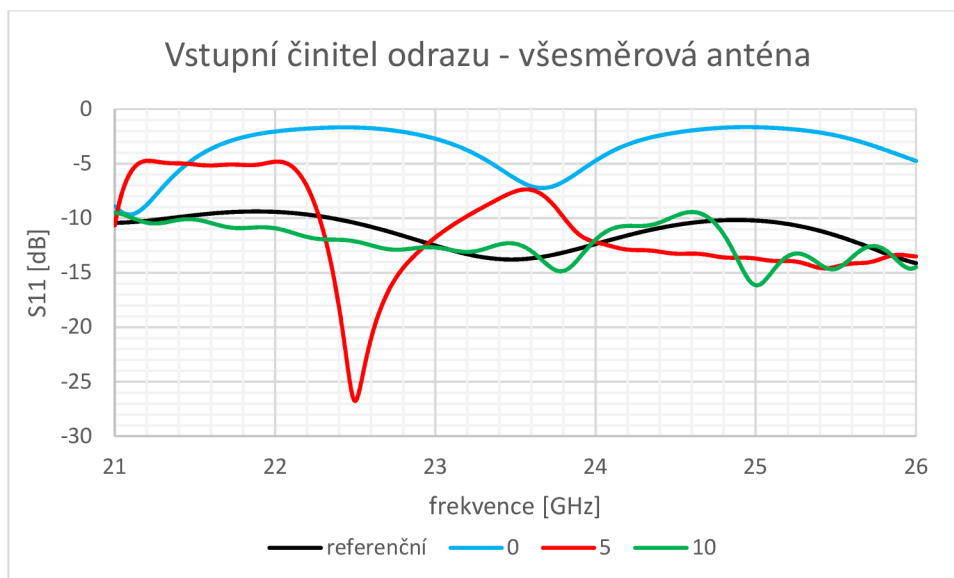
V podélném řezu se hodnota zisku pro anténu s deskou z PET ve vzdálenosti 0 mm pohybuje od -3,9 dB do -3,35 dB. V porovnání s referenční anténou je zisk nižší o cca. 6 dB. Pro vzdálenost desky 5 mm od antény se hodnota zisku pohybovala od 0,56 dB do 1,2 dB. Pro vzdálenost desky 10 mm od antény se hodnota zisku pohybovala od 1,37 dB do 1,9 dB. Čím blíže byla deska k anténě tím se snižoval její zisk v podélném směru. To by mohlo mít za následek nefunkčnost systému. Pokud by signál nebyl dostatečně zesílen.

### 5.1.2 Vliv vodivé desky

Na obrázku 5.7 je 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s přiloženou vodivou deskou do vzdálenosti 5 mm. Pro ostatní vzdálenosti je tvar velice podobný a mění se jen úroveň zisku. Na obrázku 5.8 je graf vstupního činitele odrazu v závislosti na vzdálenosti přiložené desky a pro porovnání i samostatné antény.

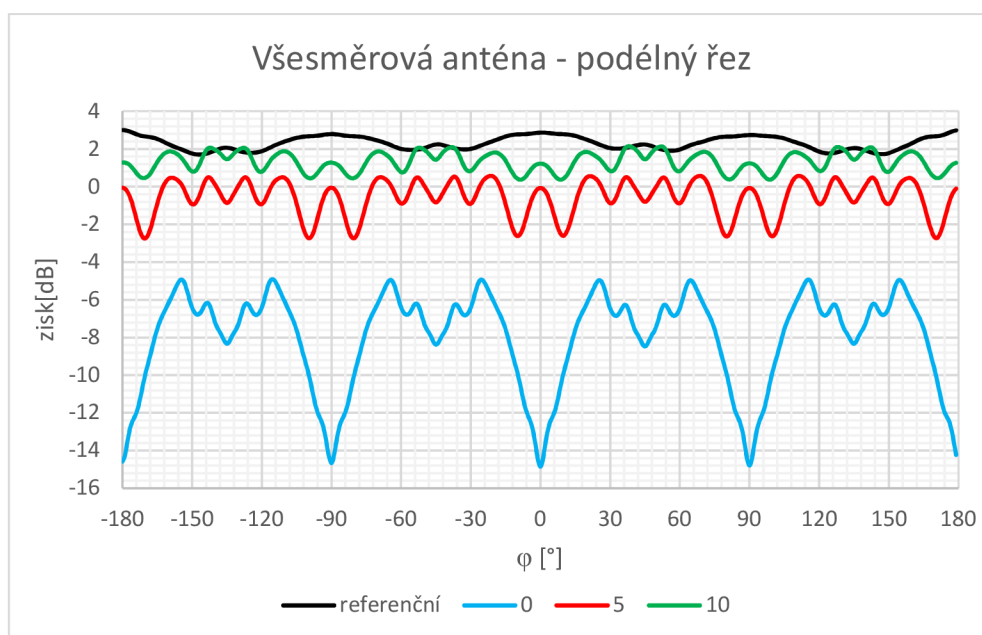


Obrázek 5.7: 3D vyzařovací charakteristika všesměrové antény s vodivou deskou ve vzdálenosti 5 mm.

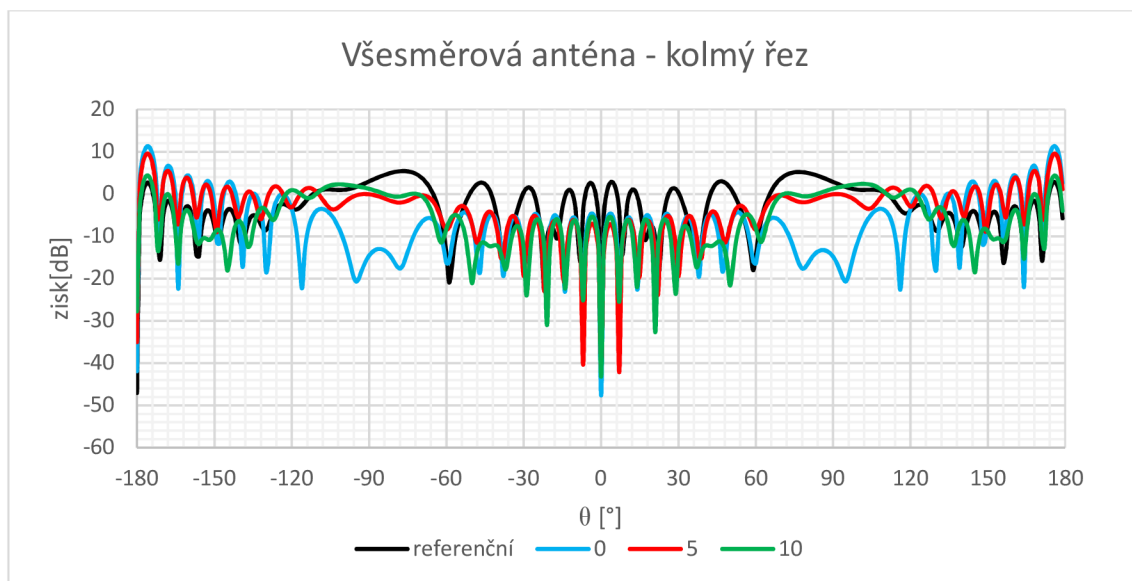


Obrázek 5.8: Vstupní činitel odrazu všesměrové antény v závislosti na vzdálenosti vodivé desky od antény.

Vlivem přiložení vodivé desky dochází k výraznému ovlivnění vstupního činitele odrazu. U vzdálenosti vodivé desky 0 mm od antény má vyšší činitel odrazu než -10 dB, v celém simulovaném pásmu. U vodivé desky ve vzdálenosti 5 mm na frekvenci 24 GHz dosahuje parametr  $S_{11}$  hodnoty -12,19 dB. Na frekvenci 24,25 GHz je dosaženo hodnoty -12,91 dB. Pásmo, pro které je parametr  $S_{11}$  nižší než -10 dB, je od 23,8 GHz až do 26 GHz. Pro vzdálenost 10 mm od antény, je na frekvenci 24 GHz dosaženo hodnoty -11,97 dB a pro frekvenci 24,25 GHz tato hodnota je -10,7 dB. Pásmo, pro méně jak -10 dB, je od 21,1 GHz do 24,46 GHz. Na obrázcích 5.9 a 5.10 jsou grafy vyzářovacích charakteristik v podélném a kolmém řezu.



Obrázek 5.9: Vyzářovací charakteristika všesměrové antény v závislosti vzdálenosti vodivé desky od antény.

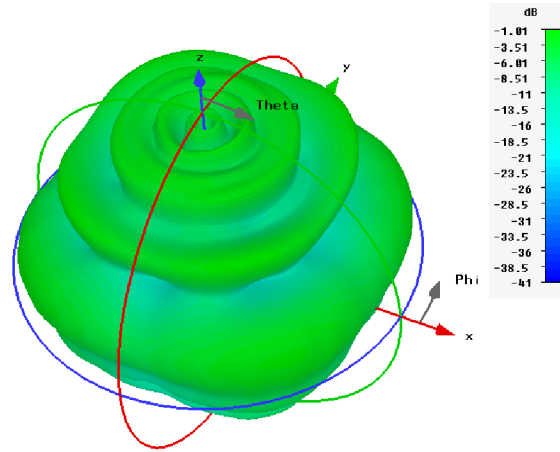


Obrázek 5.10: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v kolmém řezu v závislosti na vzdálenosti vodivé desky od antény.

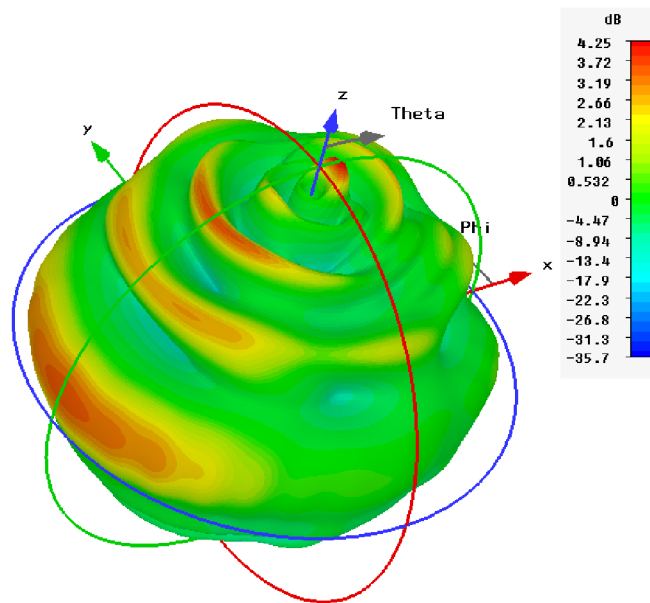
Vlivem přiložení vodivé desky k anténě dochází ke snížení zisku. Při vzdálenosti vodivé desky 0 mm od antény, v podélném řezu se zisk pohybuje od -14,7 dB do -4,94 dB. V kolmém řezu dochází ke značnému vyzařování pod anténu (v úhlu  $-180^\circ$  až  $-90^\circ$ ,  $90^\circ$  až  $180^\circ$ ) oproti směru, kterým by anténa měla vyzařovat (v úhlu  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ ). K tomuto vyzařování dochází i u vodivé desky vzdálené 5 mm od antény. V podélném řezu se hodnota zisku pohybuje od 0,45 dB do -2,6 dB. V kolmém řezu dochází také k vyzařování pod anténu, a to se ziskem až 10 dB. U vodivé desky ve vzdálenosti 10 mm hodnota vyzařování pod anténu klesla na úroveň zisku 4,3 dB. To je i nejvyšší hodnota vyzařování antény. Druhá nejvyšší hodnota vyzařování antény v kolmém řezu, je 2,4 dB v úhlu  $-102^\circ$  a  $102^\circ$ . Šířka tohoto laloku, pro pokles o 3 dB, je  $40^\circ$  v úhlu od  $83^\circ$  do  $123^\circ$   $\theta$ .

### 5.1.3 Vliv prstu při dotyku s anténou

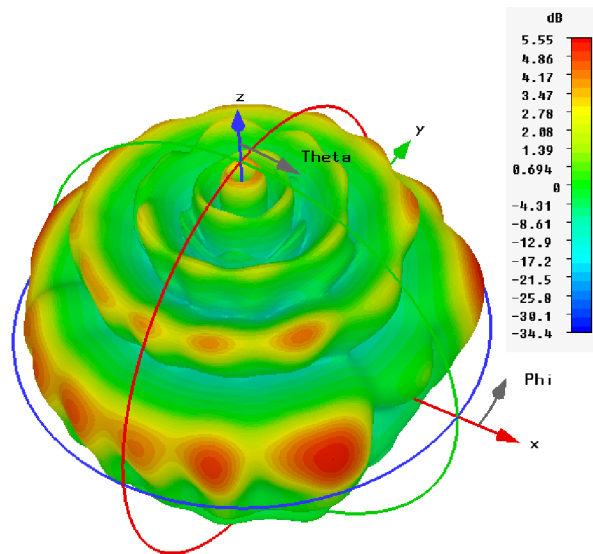
Na obrázcích 5.11, 5.12, 5.13 a 5.14 jsou 3D vyzářovací charakteristiky s různou polohou prstu. Na obrázku 5.15 je graf vstupního činitele odrazu v závislosti na poloze prstu a samostatné všesměrové antény.



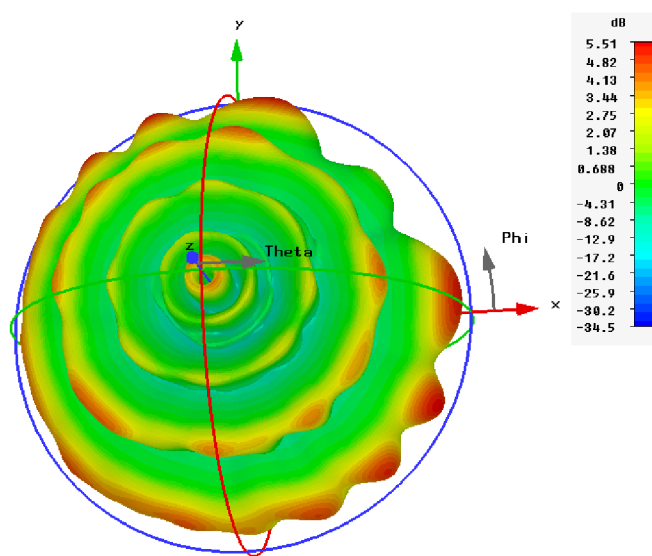
Obrázek 5.11: 3D vyzářovací charakteristika všesměrové antény s prstem dotýkajícím se monopólu.



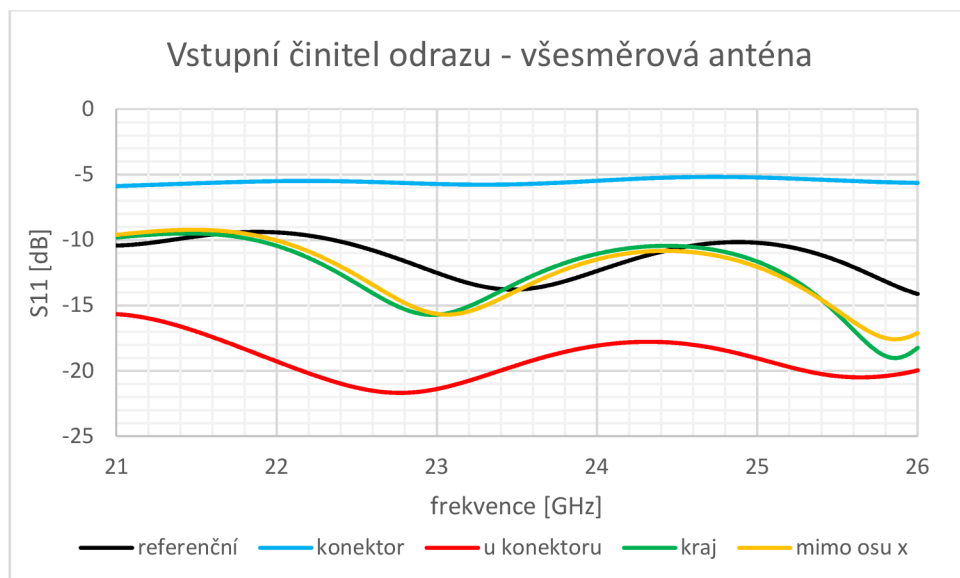
Obrázek 5.12: 3D vyzářovací charakteristika všesměrové antény s prstem dotýkajícím se poblíž monopólu.



Obrázek 5.13: 3D vyzářovací charakteristika všesměrové antény s prstem dotýkajícím se u kraje antény.

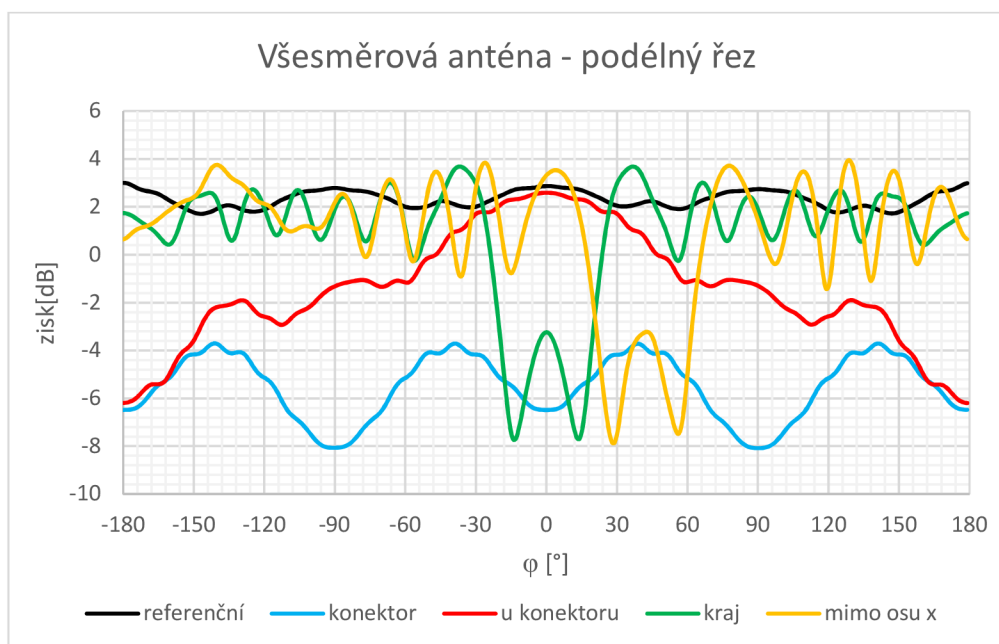


Obrázek 5.14: 3D vyzářovací charakteristika všesměrové antény s prstem dotýkajícím se mimo osu x

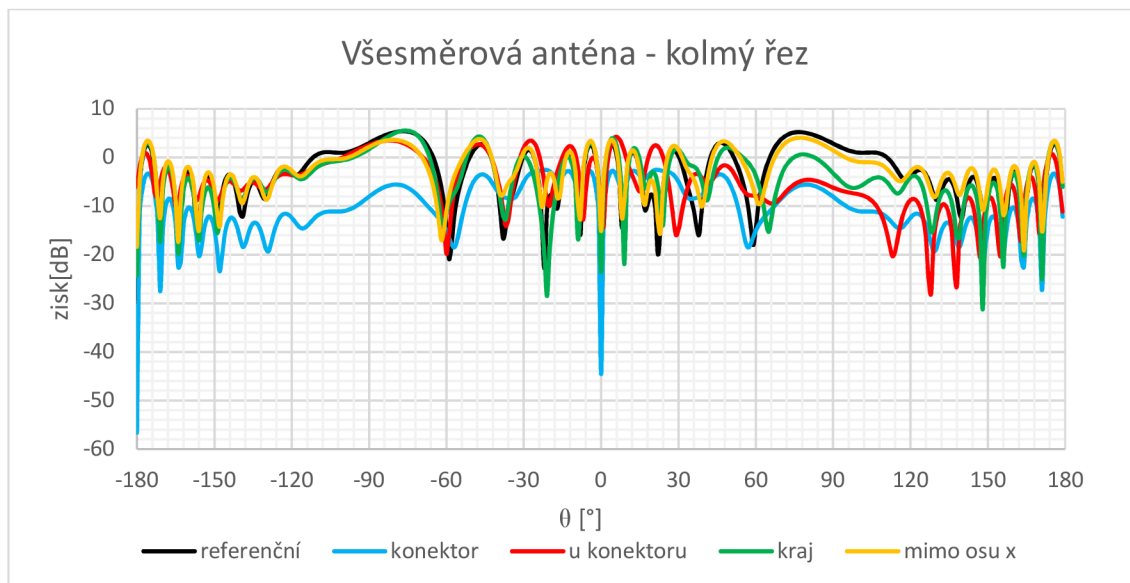


Obrázek 5.15: Vstupní činitel všesměrové antény v závislosti na poloze dotyku prstu.

Vlivem různé polohy prstu dochází k ovlivnění vstupního činitele odrazu. Pokud se prst dotýká přímo pinu konektoru, dochází k velkému odrazu vstupní energie od vstupu antény, a to s hodnotou cca. -6 dB. Pokud se prst přiloží poblíž pinu konektoru, aniž by se ho dotýkal, dochází ke zlepšení vstupního činitele odrazu. V celém simulovaném pásmu se hodnota  $S_{11}$  pohybuje od -21,68 dB do -15,66 dB. Vstupní činitel odrazu pro polohu prstu u kraje antény je podobný vstupnímu činiteli odrazu pro polohu prstu mimo osu x. Pracovní pásmo pro tyto dvě polohy je od 22 GHz do 26 GHz. Na obrázcích 5.16 a 5.17 jsou grafy vyzářovacích charakteristik v podélném a kolmém řezu.



Obrázek 5.16: Vyzářovací charakteristika všesměrové antény v podélném řezu v závislosti na poloze dotyku prstu.



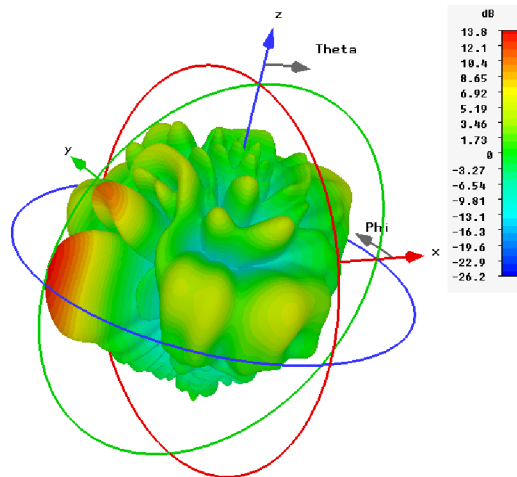
Obrázek 5.17: Vyzařovací charakteristika všesměrové antény v kolmém řezu v závislosti na poloze dotyku prstu.

Vlivem dotyku prstu pinu konektoru dochází k útlumu zisku antény. Úroveň tohoto zisku v podélném řezu je od -8 dB do -3,7 dB. V kolmém řezu je největší úroveň zisku -2,85 dB v úhlu  $-4^\circ$  a  $4^\circ$   $\theta$ . Při přiložení prstu poblíž konektoru dochází odrazu energie od prstu. Zisk této odražené vlny v podélném řezu má úroveň 2,59 dB. Ve směru prstu je zisk, v podélném řezu, -6,2 dB. V kolmém řezu je maximální úroveň zisku 3,51 dB v úhlu  $-82^\circ$   $\theta$  se šířkou laloku  $28^\circ$  v úhlu od  $-98^\circ$  do  $-70^\circ$   $\theta$ . Při přiložení prstu ke kraji antény dochází ke stínění ve směru prstu od středu antény.

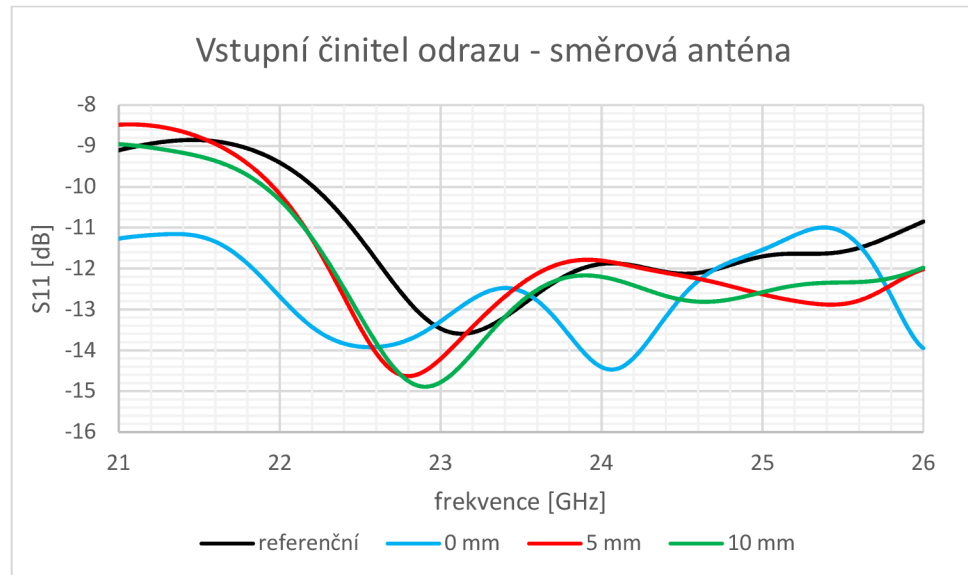
## 5.2 Směrová anténa

### 5.2.1 Vliv polyethylentereftátu

Na obrázku 5.18 je 3D vyzařovací charakteristika směrové antény s deskou vyrobené z PET ve vzdálenosti 0 mm. Pro ostatní vzdálenosti je tvar podobný. Na obrázku 5.19 je graf vstupního činitele odrazu v závislosti na vzdálenosti desky.



Obrázek 5.18: 3D vyzařovací charakteristika pro směrovou anténu s deskou vyrobenou z PET ve vzdálenosti 0 mm.

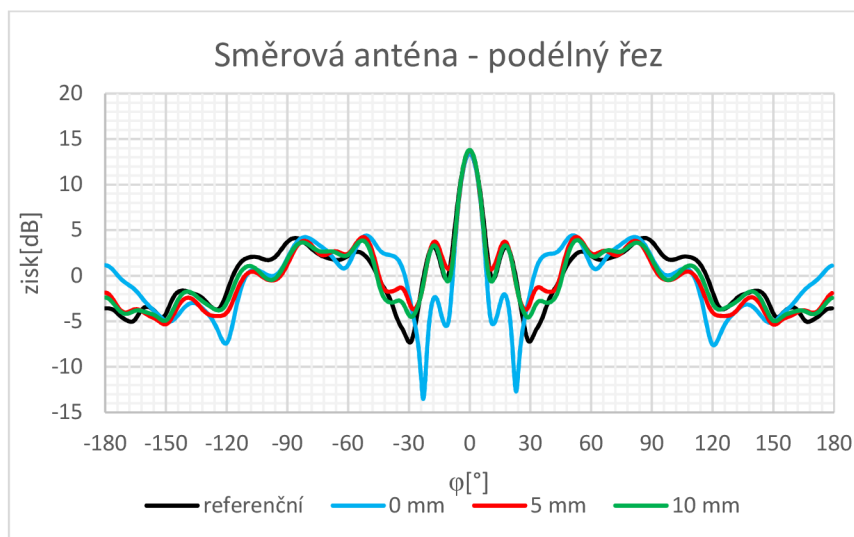


Obrázek 5.19: Vstupní činitel odrazu směrové antény v závislosti na vzdálenosti desky vyrobené z PET.

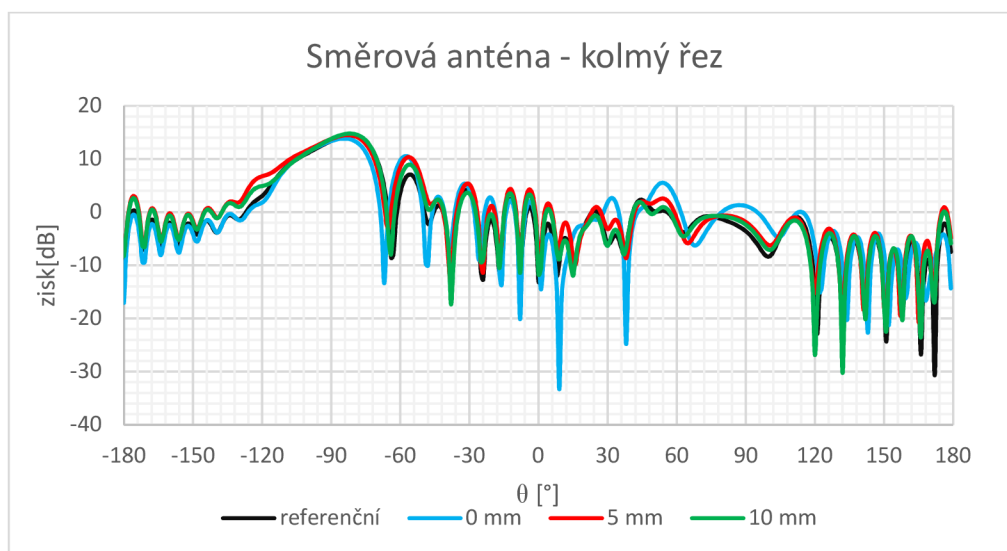
Vlivem desky vyrobené z PET, došlo ke změně vstupního činitele odrazu. U samostatné antény bylo dosaženo nejlepší hodnoty -13,6 dB na frekvenci 23,13 GHz. Pracovní pásmo bylo od 22,22 GHz do 26 GHz. U antény s deskou ve vzdálenosti 0 mm bylo dosaženo nejlepší hodnoty -14,5 dB na frekvenci 24,06 GHz. Pracovní pásmo



s hodnotou nižší jak -10 dB je v celém frekvenčním rozsahu dané simulace. Pro anténu s deskou ve vzdálenosti 5 mm bylo dosaženo nejlepší hodnoty -14,6 dB na frekvenci 22,8 GHz. Pásmo pro tuto anténu je od 22 GHz do 26 GHz. A pro poslední vzdálenost 10 mm, bylo dosaženo nejlepší hodnoty -14,9 dB na frekvenci 22,9 GHz. Pracovní pásmo je od 21,9 GHz do 26 GHz. Na obrázcích 5.20 a 5.21 jsou znázorněny vyzářovací charakteristiky pro jednotlivé vzdálenosti v podélném a kolmém řezu.



Obrázek 5.20: Vyzářovací charakteristika směrové antény v podélném řezu v závislosti na vzdálenosti desky vyrobené z PET.



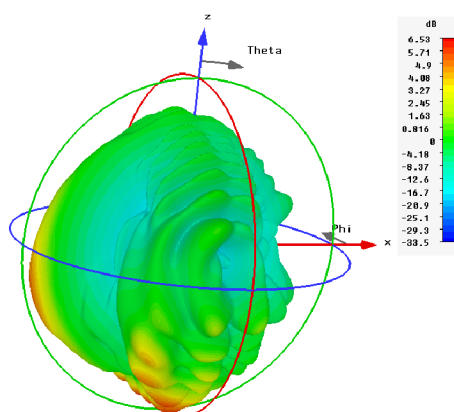
Obrázek 5.21: Vyzářovací charakteristika směrové antény v kolmém řezu v závislosti na vzdálenosti desky vyrobené z PET.

V podélném a v kolmém řezu bylo dosaženo velice podobné charakteristiky oproti samostatné směrové anténě. V podélném řezu bylo dosaženo stejného maximálního zisku a stejné šířky hlavního laloku. V kolmém řezu se maximální úroveň zisku mírně liší oproti samostatné směrové anténě, a to pouze v rozsahu 1 dB. Díky těmto výsledkům lze

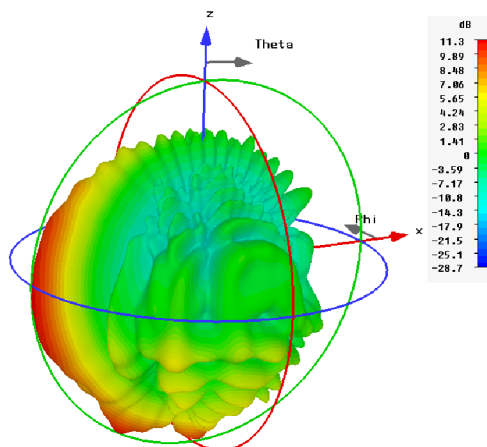
považovat, že v případě přiložení polyethyltereftátu by došlo k nevýraznému ovlivnění zisku antény ve směru hlavního laloku.

### 5.2.2 Vliv vodivé desky

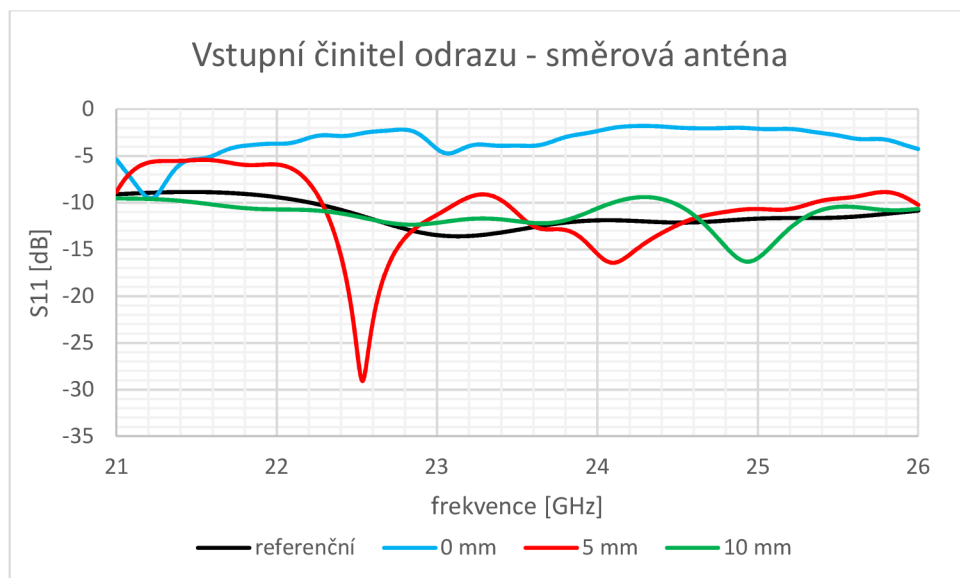
Na obrázcích 5.22 a 5.23 jsou 3D vyzařovací charakteristiky směrové antény s vodivou deskou ve vzdálenosti 0 mm a 5 mm. Vyzařovací charakteristika pro vzdálenost 10 mm je podobná vyzařovací charakteristice pro vzdálenost 5 mm. Na obrázku 5.24 je graf vstupního činitele odrazu v závislosti na vzdálenosti vodivé desky od antény.



Obrázek 5.22: 3D vyzařovací charakteristika směrové antény s vodivou deskou ve vzdálenosti 0 mm.

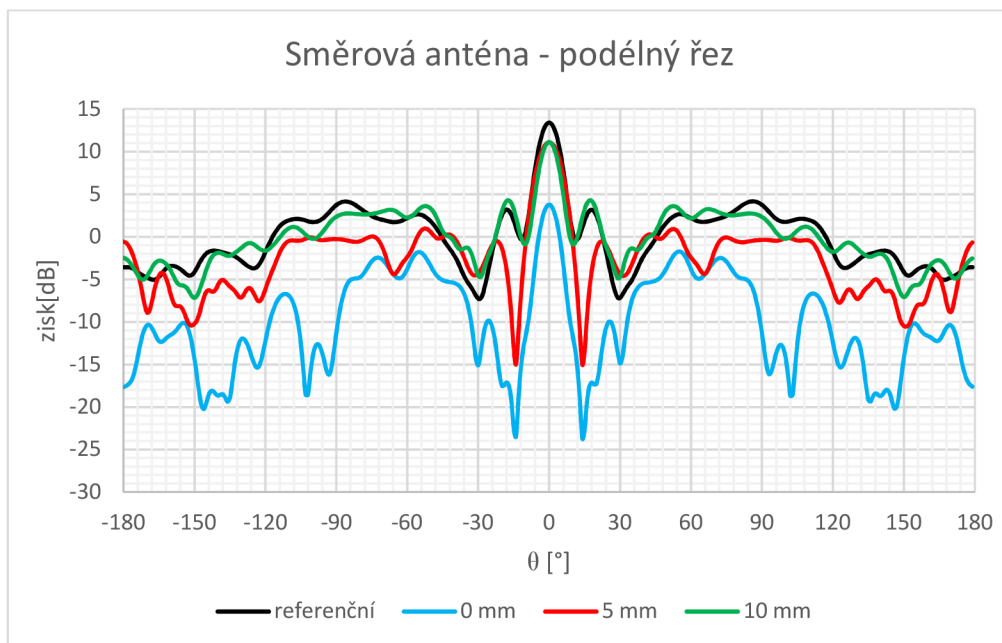


Obrázek 5.23: 3D vyzařovací charakteristika směrové antény s vodivou deskou ve vzdálenosti 5 mm.

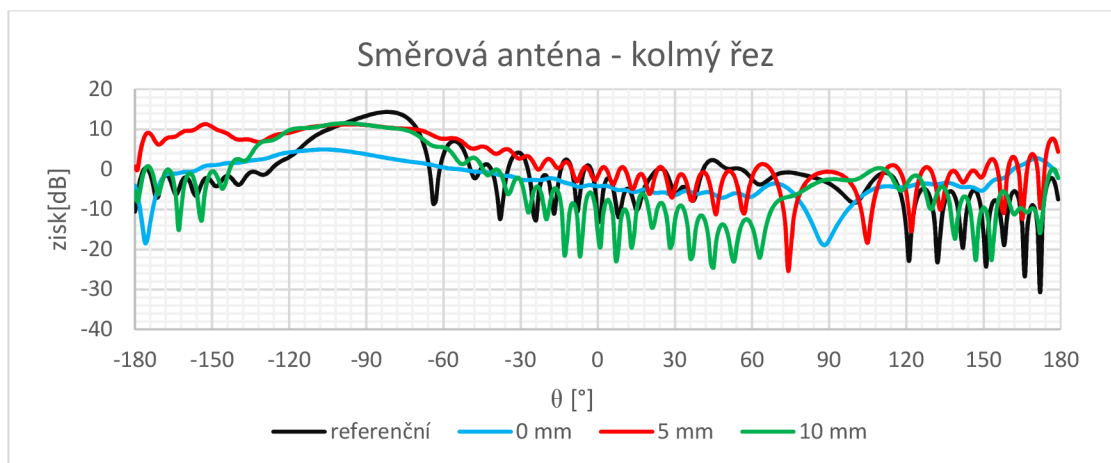


Obrázek 5.24: Vstupní činitel odrazu směrové antény v závislosti na vzdálenosti vodivé desky od antény.

Pro anténu s vodivou deskou ve vzdálenosti 0 mm není splněna podmínka, v celém simulovaném pásmu, aby vstupní činitel odrazu byl nižší než -10 dB. Pro vzdálenost 5 mm bylo dosaženo nejlepší hodnoty -29 dB pro frekvenci 22,54 GHz a -16,4 pro frekvenci. Pracovní pásmo je od 22,29 GHz do 23,13 GHz a od 23,43 GHz do 25,4 GHz. Pro vzdálenost 10 mm je dosažena nejlepší hodnota -16,3 dB na frekvenci 24,94 GHz. Pracovní pásmo je od 21,51 GHz do 24,1 GHz a od 24,47 GHz do 26 GHz. Na obrázcích 5.25 a 5.26 je vyzářovací charakteristika směrové antény v závislosti na vzdálenosti vodivé desky v podélném a kolmém řezu.



Obrázek 5.25: Vyzářovací charakteristika směrové antény v závislosti na vzdálenosti vodivé desky v podélném řezu



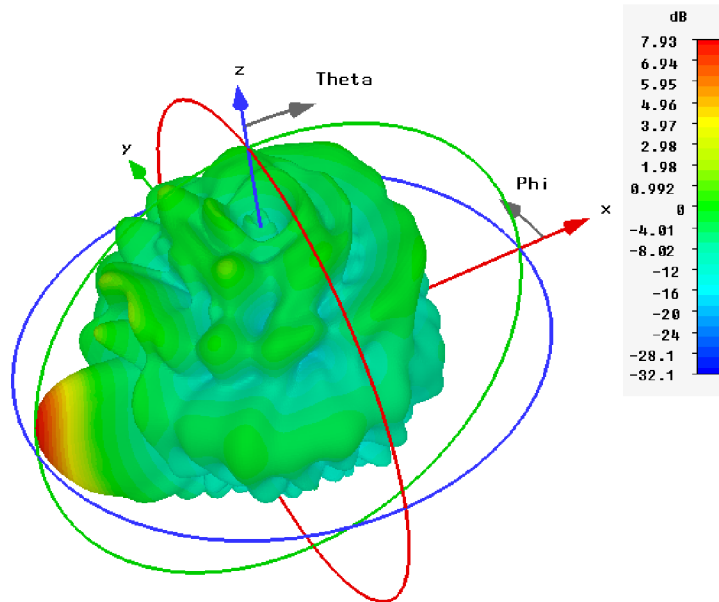
Obrázek 5.26: Vyzařovací charakteristika směrové antény v závislosti na vzdálenosti vodivé desky v kolmém řezu.

V podélném řezu ve vzdálenosti 0 mm bylo dosaženo maximálního zisku 3,77 dB v úhlu  $0^\circ \varphi$ . Šířka hlavního laloku je  $8^\circ$  od  $-4^\circ$  do  $4^\circ \varphi$ . Hodnota mezi prvním maximem a druhým maximem je 8,65 dB. Pro vzdálenost 5 mm bylo dosaženo zisku 11,08 dB v úhlu  $0^\circ \varphi$ . Šířka hlavního laloku je  $10^\circ$  od  $-5^\circ$  do  $5^\circ \varphi$ . Hodnota mezi prvním maximem a druhým maximem je 11,6 dB. Pro vzdálenost 10 mm bylo dosaženo zisku 11,11 dB v úhlu  $0^\circ \varphi$ . Šířka hlavního laloku je  $8^\circ$  od  $-4^\circ$  do  $4^\circ \varphi$ . Hodnota mezi prvním maximem a druhým maximem je 6,8 dB. U samostatné antény bylo dosaženo zisku 13,4 dB v úhlu  $0^\circ \varphi$  se šířkou hlavního laloku  $8,4^\circ$ . Hodnota mezi prvním maximem a druhým maximem je 10,2 dB.

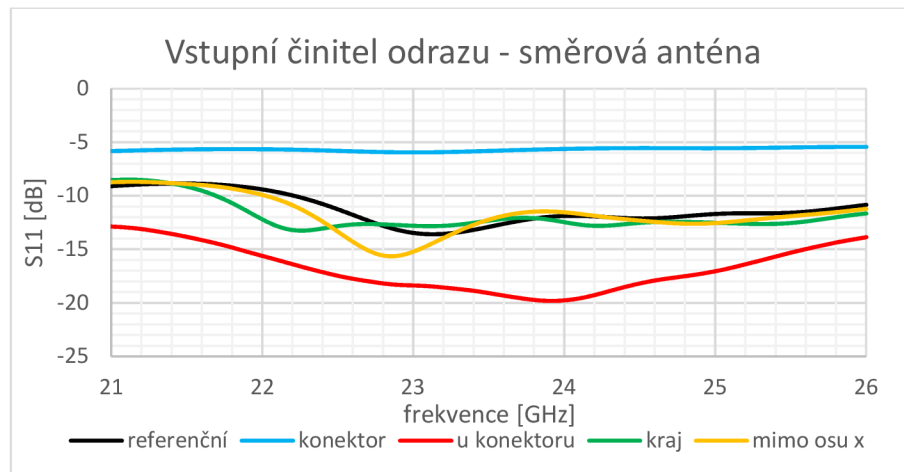
V kolmém řezu pro vzdálenost 0 mm bylo dosaženo maximálního zisku 4,97 dB v úhlu  $-107^\circ \theta$  se šířkou laloku  $62^\circ$  v úhlu od  $-136^\circ$  do  $-74^\circ \theta$ . Pro vzdálenost 5 mm bylo dosaženo maximálního zisku 11,2 dB v úhlu  $-96^\circ \theta$  se šířkou laloku  $56^\circ$  v úhlu od  $-122^\circ$  do  $-66^\circ \theta$  a pro vzdálenost 10 mm bylo dosaženo maximálního zisku 11,5 dB v úhlu  $-98^\circ \theta$  se šířkou laloku  $49^\circ$  v úhlu od  $-121^\circ$  do  $-72^\circ \theta$ . U samostatné antény bylo dosaženo zisku 14,6 dB v úhlu  $-82^\circ \theta$  se šířkou laloku  $27^\circ$  v úhlu od  $-99^\circ$  do  $-72^\circ \theta$ .

### 5.2.3 Vliv prstu při dotyku s anténou

Na obrázku 5.27 je 3D vyzařovací charakteristika směrové antény s prstem přiloženým na pin konektoru. Pro ostatní polohy je 3D vyzařovací charakteristika podobná. Na obrázku 5.28 je graf vstupního odrazového činitele v závislosti na poloze prstu.



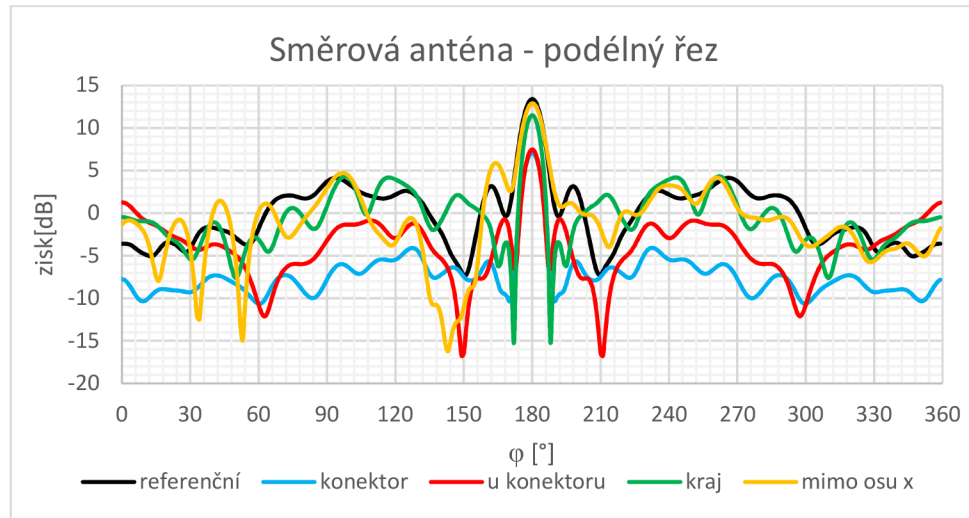
Obrázek 5.27: 3D vyzařovací charakteristika směrové antény s prstem umístěným na pinu konektoru.



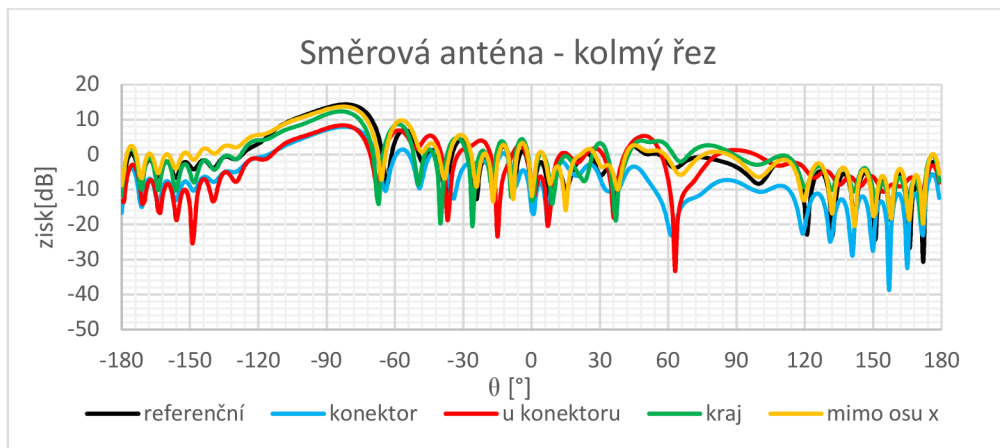
Obrázek 5.28: Vstupní činitel odrazu směrové antény v závislosti na poloze prstu.

Umístění prstu na anténu má vliv na vstupní činitel odrazu. Při umístění prstu na pin konektoru, má parametr  $S_{11}$  hodnotu cca. -6 dB. Nejnižší hodnota vstupního činitele odrazu je pro umístění prstu poblíž konektoru. Pro frekvenci 23,92 GHz je hodnota  $S_{11}$  -19,18 dB. Pro umístění prstu na kraj antény je pásmo, pro hodnotu  $S_{11}$  nižší než -10 dB, od 21,70 GHz do 26 GHz. Pro umístění prstu mimo osu  $x$  je toto pásmo od

22 GHz do 26 GHz. Na obrázcích 5.29 a 5.30 jsou grafy vyzářovacích charakteristik v podélném a kolmém řezu.



Obrázek 5.29: Vyzářovací charakteristika směrové antény v závislosti na poloze prstu v podélném řezu



Obrázek 5.30: Vyzářovací charakteristika směrové antény v závislosti na poloze prstu v kolmém řezu

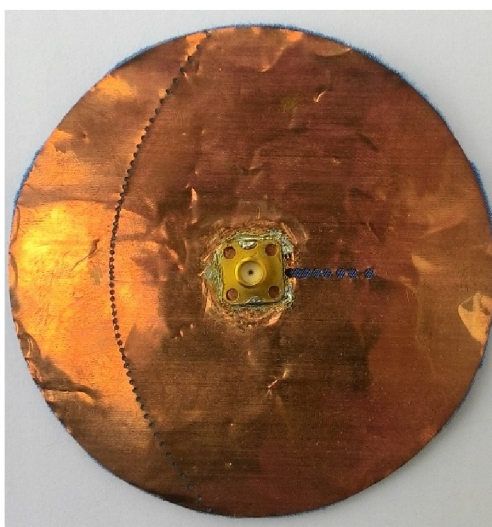
Vyzářovací charakteristiky mají podobný tvar jako vyzářovací charakteristika samostatné antény. Při přiložení prstu na pin konektoru a poblíž konektoru, maximální úroveň zisku v podélném řezu je 7,2 dB v úhlu  $180^\circ \varphi$  se šířkou laloku  $7^\circ$ . V kolmém řezu, pro prst přiložený na pin konektoru, byla maximální úroveň zisku 7,94 dB v úhlu  $-82^\circ \theta$  se šířkou laloku  $26^\circ$  v úhlu od  $-100^\circ$  do  $-72^\circ \theta$ . Pro umístění prstu poblíž pinu konektoru, bylo v kolmém řezu dosaženo nejvyššího zisku 8,38 dB v úhlu  $-83^\circ \theta$  se šířkou laloku  $28^\circ$  od  $-102^\circ$  do  $-74^\circ \theta$ . Vyzářovací charakteristiky, pro prst umístění na kraj antény a mimo osu x, si jsou podobné. Maximálního zisku v podélném řezu, pro anténu s prstem na kraji, bylo dosaženo v úhlu  $180^\circ \varphi$  a to s úrovní 11,5 dB. S prstem umístěným mimo osu x tato úroveň byla 12,9 dB. Pro oba případy je šířka laloku  $8^\circ$ . V kolmém řezu bylo dosaženo zisku 12,3 dB, pro prst umístění na kraj antény, a 13,7 dB, pro prst umístění mimo osu x. Oba zisky byli dosaženy v úhlu  $-83^\circ \theta$  se šířkou laloku  $25^\circ$  v úhlu od  $-98^\circ$  do  $-73^\circ$

## 6 REALIZACE A POROVNÁNÍ ANTÉN

Obě antény byly vyrobeny podle předlohy, vyobrazené v příloze B této práce. Nejdříve byl vyleptán motiv na měděnou fólii, která byla po vyleptání nalepena na daný 3D textil. 3D textil byl poté vystřížen do kruhového tvaru. Pin konektoru byl zkrácen na požadovanou délku a prostrčen 3D textilem. Následně byl přiletován k měděné vrstvě. Pomocí vodivé nitě byly vyšity prokopy pro směrovou monopólovou anténu.

### 6.1 Všesměrová anténa

Na obrázcích 6.1 a 6.2 je vyfotografován vzhled vyrobené všesměrové monopólové antény.

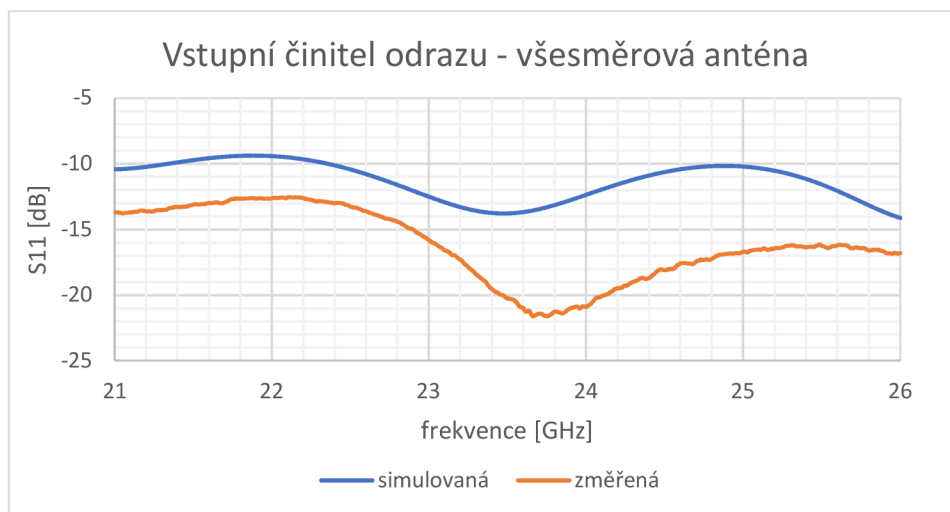


Obrázek 6.1: Vyrobena všesměrová monopólová anténa ze strany konektoru.



Obrázek 6.2: Vyrobena všesměrová monopólová anténa z vrchní strany.

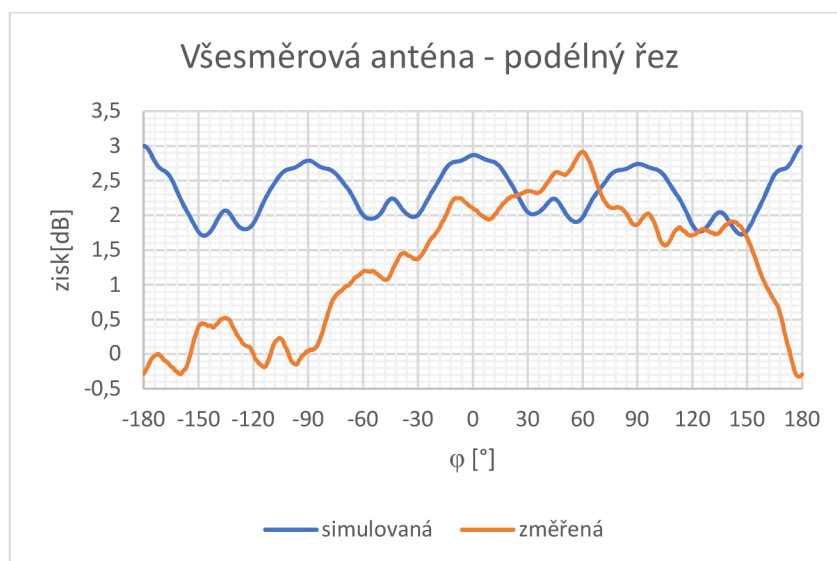
Na obrázku 6.3 je graf vstupního činitele odrazu realizované antény a pro porovnání i simulované všesměrové monopólové antény.



Obrázek 6.3: Graf vstupního činitele odrazu vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény.

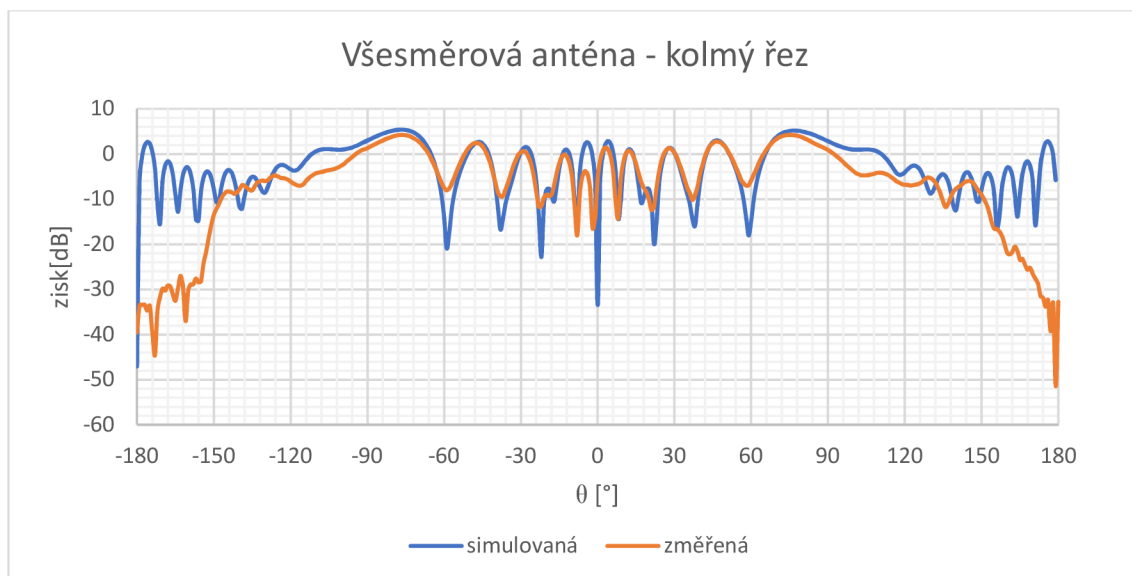
Z grafu je možné zjistit, že vyrobená anténa má nižší hodnotu vstupního činitele odrazu oproti simulované. V simulaci bylo dosaženo nejlepšího přizpůsobení na frekvenci 23,47 GHz s hodnotou  $S_{11} = -13,8$  dB oproti vyrobené anténě. U vyrobené antény bylo dosaženo nejlepšího přizpůsobení na frekvenci 23,75 GHz, kde činitel vstupního odrazu má hodnotu -21,6 dB. To může být dáno jinou délkou pinu konektoru, který nebyl zkrácen přesně na délku 2,6 mm. Vyrobená anténa má na frekvenci 24 GHz hodnotu  $S_{11} = -20,9$  dB a na frekvenci 24,25 GHz tato hodnota je -19,3 dB. Tím je splněn požadavek, aby hodnota  $S_{11}$  na pracovních frekvencích, byla nižší než -10 dB.

Na obrázcích 6.4 a 6.5 jsou grafy vyzařovacích charakteristik v podélném a kolmém řezu vyrobené antény a pro porovnání i simulované antény.



Obrázek 6.4: Vyzařovací charakteristika vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény v podélném řezu.





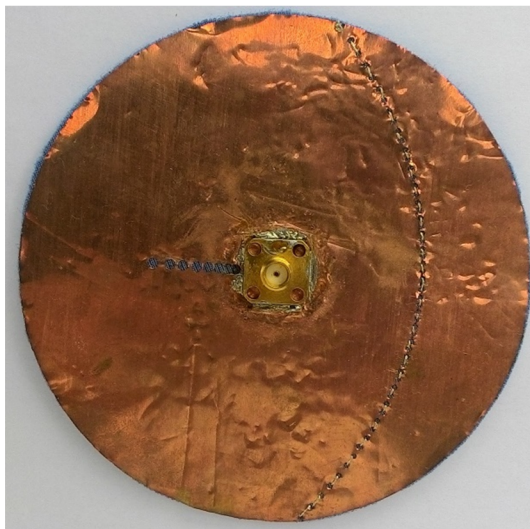
Obrázek 6.5: Vyzařovací charakteristika vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény v kolmém řezu.

V podélném řezu se hodnota zisku, pro simulovanou anténu, pohybovala od 3 dB do 1,7 dB. U vyrobené antény se tato hodnota pohybovala od 2,9 dB do -0,28 dB. Tento rozdíl by mohl být dán 3D textilem, který je v porovnání s klasickými substráty ohebný a anténa nemusela být při měření přesně v rovině. Tato hodnota by měla být v ideálním případě konstantní.

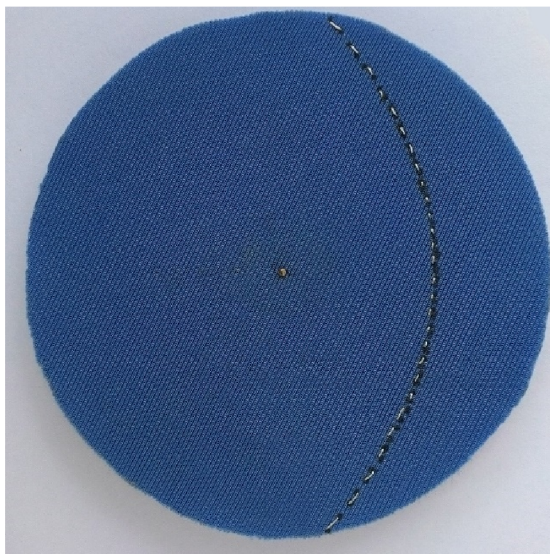
V kolmém řezu bylo u simulované antény dosaženo největšího zisku 5,7 dB v úhlu  $77^\circ \theta$ . U vyrobené antény bylo dosaženo zisku 4,2 dB u úhlu  $-77^\circ \theta$  a 4,2 dB v úhlu  $75^\circ \theta$ . Šířka hlavního laloku je  $22^\circ$  od  $89^\circ \theta$  do  $67^\circ \theta$  (od  $-90^\circ$  do  $-68^\circ$ ), u simulované antény měl hlavní lalok šířku  $24^\circ$  od  $92^\circ \theta$  do  $68^\circ \theta$ .

## 6.2 Směrová anténa

Na obrázcích 6.6 a 6.7 je vyfotografován vzhled vyrobené směrové monopólové antény.

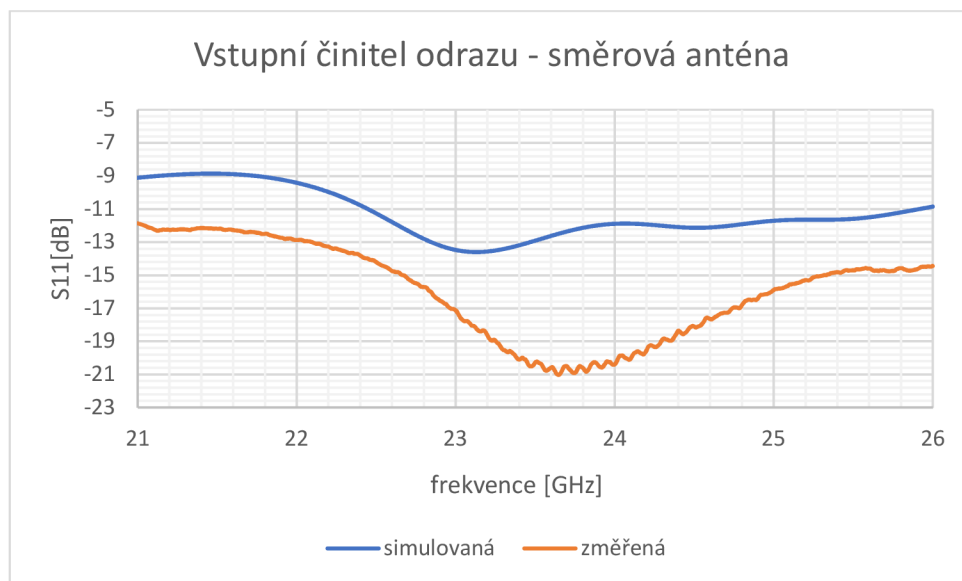


Obrázek 6.6: Vyrobená směrová monopólová anténa ze strany konektoru.



Obrázek 6.7: Vyrobená směrová monopólová anténa z vrchní strany.

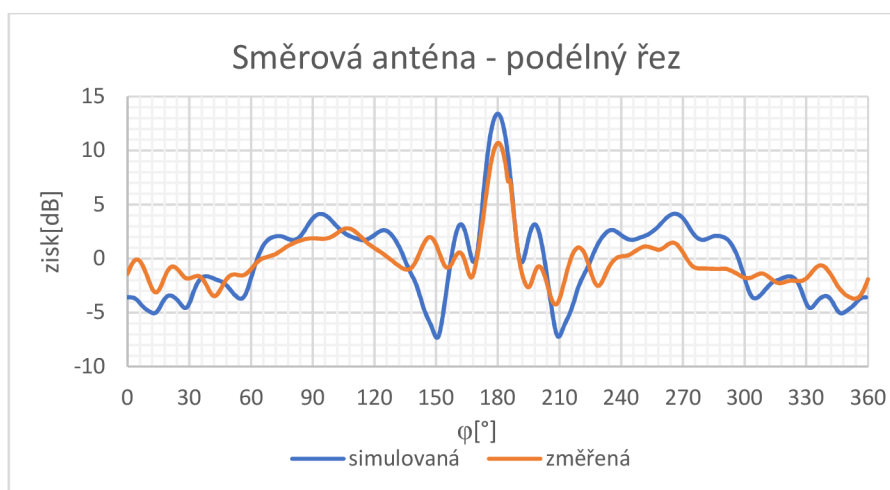
Na obrázku 6.8 je graf vstupního činitele odrazu vyrobené antény a pro porovnání i simulované všesměrové monopólové antény.



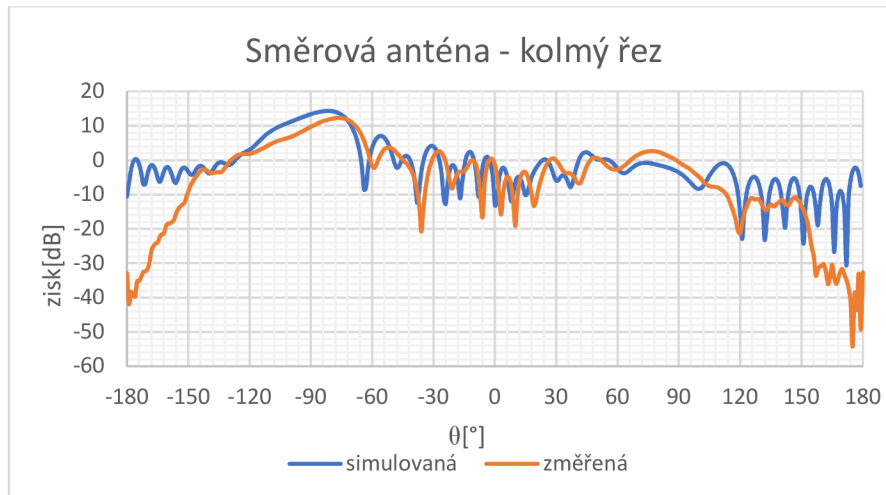
Obrázek 6.8: Graf vstupního činitele odrazu vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény.

Z grafu je možné zjistit, že vyrobená anténa má nižší hodnotu vstupního činitele odrazu oproti simulované. V simulaci bylo dosaženo nejlepšího přizpůsobení na frekvenci 23,13 GHz s hodnotou  $S_{11} = -13,6$  dB oproti vyrobené anténě. U vyrobené antény bylo dosaženo nejlepšího přizpůsobení na frekvenci 23,65 GHz, kde činitel vstupního odrazu má hodnotu -21 dB. To může být dáno jinou délkou pinu konektoru, který nebyl zkrácen přesně na délku 2,6 mm. Vyrobená anténa má na frekvenci 24 GHz hodnotu  $S_{11} = -20,39$  dB a na frekvenci 24,25 GHz tato hodnota je -19,33 dB. Tím je splněn požadavek, aby hodnota  $S_{11}$  na pracovních frekvencích, byla nižší než -10 dB.

Na obrázcích 6.4 a 6.5 jsou grafy vyzařovacích charakteristik v podélném a kolmém řezu vyrobené antény a pro porovnání i simulované antény.



Obrázek 6.9: Vyzařovací charakteristika vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény v podélném řezu.



Obrázek 6.10: Vyzařovací charakteristika vyrobené a simulované všesměrové monopólové antény v kolmém řezu.

V podélném řezu byla maximální hodnota zisku 13,4 dB v úhlu  $180^\circ \varphi$ , pro simulovanou anténu. U vyrobené antény tato hodnota byla 10,7 dB v úhlu  $180^\circ \varphi$ . Šířka laloku pro simulovanou anténu byla  $8,4^\circ$ . U vyrobené antény tato hodnota je  $10^\circ$ . V kolmém řezu bylo u simulované antény dosaženo největšího zisku 14,6 dB v úhlu  $82^\circ \theta$  se šířkou laloku  $27^\circ$  od  $-99^\circ$  do  $-72^\circ \theta$ . U vyrobené antény bylo dosaženo zisku 12,3 dB u úhlu  $-76^\circ \theta$  se šířkou laloku  $24^\circ$  od  $-91^\circ$  do  $-67^\circ$ .

## 7 ZÁVĚR

V této práci byli navrženy 3 antény pracující v pásmu ISM 24 GHz, na základě popsané teorie. Jedna všesměrová monopólová anténa se ziskem 5,2 dB a se šířkou hlavního laloku v úhlu od  $68^\circ$  do  $92^\circ$   $\theta$ . Další dvě směrové monopólové antény, přičemž jedna byla upravena pomocí reflektoru a druhá byla upravena pomocí reflektoru a direktorů. U obou směrových antén byli dosaženy velice podobné výsledky. U antény s parabolou byl dosažen zisk 13,58 dB v rovině H se šířkou laloku  $8,5^\circ$  a se ziskem 15 dB v rovině E se šířkou laloku  $26^\circ$ . Pro anténu s parabolou a direktory bylo v rovině H dosaženo zisku 13,4 dB se šířkou laloku  $8,4^\circ$ . V rovině E bylo dosaženo zisku 14,6 dB se šířkou laloku  $27^\circ$ .

V kapitole 2 se popisovalo několik základních tipů planárních vedení a byl vybrán typ vedení vhodný pro napájení monopólové antény. Byl zvolen koplanární vlnovod, pro který byla vypočítána šířka středního vodiče. V simulaci samostatného vedení zakončeného naprázdno docházelo k parazitnímu vyzařování, hodnota tohoto vyzařování dosahovala 7,14 dBi. Jako nejvhodnější druh napájení monopólových antén bylo zvoleno koaxiální vedení.

Zkoumal se také vliv různých materiálů na vlastnosti antén v blízkosti všesměrové antény a směrové antény s parabolou a s direktory. Mezi zkoumanými materiály byla deska vyrobená z polyethylentereftátu, vodivá deska a lidský prst. U všesměrové antény se vlivem přibližujícího polyethylentereftátu snižoval dosažený zisk. U vzdálenosti desky 0 mm od antény byl zisk v rovině H od -3,9 dB do -3,35 dB. U vzdálenosti desky 5 mm od antény byl zisk v rovině H od 0,56 dB do 1,2 dB. U vzdálenosti desky 10 mm od antény byl zisk v rovině H od 1,37 dB do 1,9 dB. Po přiložení vodivé desky docházelo ke značnému vyzařování pod anténu. Pro lidský prst se simulovaly 4 polohy, na konektoru, poblíž konektor, ve směru osy  $x^+$  na kraji antény a mimo osu  $x$ . Vlivem přiložení prstu k anténě docházelo ke snížení zisku. Se vzdalujícím se prstem od pinu konektoru úroveň zisku narůstala, ale docházelo ke stínění ve směru prstu.

Směrová anténa nebyla výrazně ovlivněna deskou z polyethylentereftátu a dosahovalo se podobných výsledků jako u samostatné směrové antény. Po přiložení došlo k výraznému ovlivnění vyzařovacích charakteristik a ke snížení zisku. Šířka laloku byla velice podobná šířce samostatné směrové antény. Pro vodivou desku, která byla dána na anténu, se snížil zisk v rovině H na 3,77 dB a v rovině E na 4,97 dB. Při vzdálenosti 5 mm se úroveň zisku v rovině H navýšil na 11,08 dB a v rovině E na 11,2 dB. Pro vzdálenost 10 mm byla úroveň zisku v rovině H 11,11 dB a v rovině E 11,5 dB. Pro lidský prst se simulovaly 4 polohy, na konektoru, poblíž konektor, ve směru osy  $-x$  na kraji antény a mimo osu  $x$ . Vlivem přiložení prstu docházelo ke snížení úrovně zisku, ale stále docházelo ke směrovému vyzařování antény. Při umístění prstu na kraj antény nebo mimo osu  $x$ , vyzařovací charakteristika byla velice podobná samostatné směrové anténě. Směrová anténa oproti všesměrové nebyla příliš ovlivňována deskou z polyethylentereftátu a dosahovala stále vysokého zisku.

Byli realizované dvě antény na 3D textil a to všesměrová anténa a směrová anténa, na kterou byla pomocí vodivé nitě vyšita parabola a jednotlivé direktory. Tyto antény byli změřeny v bezodrazové komoře a naměřené výsledky byli porovnány s výsledky ze simulace. U všesměrové antény byly hodnoty, naměřené v rovině E, velice podobné výsledků ze simulace. V rovině H byli rozdíly. Ty by mohly být dány neumístěním antény

do přesné roviny. U směrové antény byli naměřené hodnoty podobné v porovnání s výsledky ze simulace. V porovnání s výsledky ze simulace má anténa v rovině E o 0,8 dB nižší zisk a v rovině H má nižší zisk o 2,7 dB.

# LITERATURA

- [1] GANDHI, O. P., a G. LAZZI. *MONOPOLE ANTENNAS* [online]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Om\\_Gandhi2/publication/228018204\\_Monopole\\_Antennas/links/0c96052408aefe723b000000/Monopole-Antennas.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Om_Gandhi2/publication/228018204_Monopole_Antennas/links/0c96052408aefe723b000000/Monopole-Antennas.pdf)
- [2] *The Monopole Antenna* [online]. 2011. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/antennas/monopole.php>
- [3] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., RAIDA, Z., Elektromagnetické vlny a vedení, Skriptum FEI VUT v Brně, 1999.
- [4] Microstrip , Stripline, and CPW Design [online]. Dostupné z: [http://www.qsl.net/va3iul/Microstrip\\_Stripline\\_CPW\\_Design/Microstrip\\_Stripline\\_and\\_CPW\\_Design.pdf](http://www.qsl.net/va3iul/Microstrip_Stripline_CPW_Design/Microstrip_Stripline_and_CPW_Design.pdf)
- [5] Coplanar waveguides (CPW). *Quite Universal Circuit Simulator* [online]. 2007. Dostupné z: <http://qucs.sourceforge.net/tech/node86.html>
- [6] *Reflectors and Directors* [online]. Dostupné z: [http://www.ph.surrey.ac.uk/satellites/main/assets/schoolzone/project1/reflectors\\_directors.htm](http://www.ph.surrey.ac.uk/satellites/main/assets/schoolzone/project1/reflectors_directors.htm)
- [7] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 047166782X.
- [8] MAIER, Stefan A., Mark L. BRONGERSMA a Harry A. ATWATER. *Electromagnetic energy transport along Yagi arrays* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/9598/1e596f2cd900584379d411a1aaf7f74e71e3.pdf>
- [9] PROCHÁZKA, M. Antény: encyklopedická příručka, BEN, Praha, 2005.
- [10] *Parabolické antény [1994]* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: [http://www.ok2kkw.com/next/ok1ca\\_1994dish.htm](http://www.ok2kkw.com/next/ok1ca_1994dish.htm)
- [11] *RADIALL R125414000 RF* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/radiall/r125414000/rf-coaxial-sma-straight-jack-50ohm/dp/4194779>
- [12] *PET(polyethylene terephalate)* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.plastic-products.com/part12.htm>
- [13] *Electrical Properties of Plastics* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://members.tm.net/lapointe/Plastics.htm>
- [14] *Dielectric Properties of Body Tissues* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/#over>

## A UMÍSTĚNÍ PROKOVŮ PARABOLY

$\phi$	$x_r$	$y_r$
1,39	8,88	48,42
1,34	10,84	46,01
1,29	12,63	43,69
1,24	14,26	41,46
1,19	15,76	39,30
1,14	17,13	37,22
1,09	18,39	35,20
1,04	19,54	33,25
0,99	20,60	31,35
0,94	21,57	29,50
0,89	22,45	27,69
0,84	23,27	25,93
0,79	24,01	24,21
0,74	24,69	22,52
0,69	25,31	20,86
0,64	25,87	19,24
0,59	26,37	17,64
0,54	26,83	16,06
0,49	27,24	14,51
0,44	27,60	12,98
0,39	27,92	11,46
0,34	28,20	9,96
0,29	28,43	8,47
0,24	28,63	6,99
0,19	28,79	5,52
0,14	28,91	4,06
0,09	28,99	2,60
0,04	29,04	1,15
0,00	29,05	0,00



## B MOTIV MĚDĚNÉ FÓLIE

