

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Jan Kloboučník

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Návrh a optimalizace dvoupásmové antény pro příjem signálů na vlakové  
soupravě metra

Bakalářská práce

2020

Jan Kloboučník

---

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan Kloboučník**  
Osobní číslo: **I16029**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
Téma práce: **Návrh a optimalizace dvoupásmové antény pro příjem signálů na  
vlakové soupravě metra**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

### Zásady pro vypracování

Úkolem studenta bude se teoreticky seznámit s několika typy anténních elementů, které lze využít pro zachycení signálů v pásmu Wi-Fi 2,4 a 5 GHz v prostředí vlkové soupravy metra, přičemž antény budou umístěny na střeše hnacího vozidla. Práce bude zaměřena na využití planárních anténních struktur se specifickými profily, umožňující impedanční přizpůsobení anténního prvku ve dvou pásmech současně. Cílem práce bude navrhnout anténu s následujícími parametry: centrální frekvence 2,4 GHz a 5 GHz, šířka pásma minimálně 50 MHz kolem centrálních kmitočtů a přibližná 3dB šířka svazku v azimutu  $120^\circ$  a v elevaci  $60^\circ$ , přičemž celkové rozměry anténního systému se musí vejít do rozměru  $s \times v \times h$ : 150 x 150 x 150 mm z důvodu omezených rozměrových možností v rámci metra. Student provede rozbor a návrh možných typů antén a jejich analýzu v programu CST Microwave Studio. Na zhotoveném vzorku ověří dosažené parametry měřením.

Rozsah pracovní zprávy: **70**  
Rozsah grafických prací: **0**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

RAIDA, Z., HANUS, S. Vysokofrekvenční technika a antény. Edice „Elektronická skripta“. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002.  
Antenna engineering handbook. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1993, 1 sv. ISBN 0-07-032381-x.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Zálabský, Ph.D.**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. května 2020**



L.S.

---

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 17. prosince 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze 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, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne .....

Jan Kloboučník

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád velmi poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Tomáši Zálabskému, Ph.D. za účinnou odbornou a metodickou pomoc, kterou mi poskytoval v průběhu tvorby celé této bakalářské práce.

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem dvoupásmové antény, která bude schopna vysílat a přijímat signály na kmitočtech 2,4 a 5 GHz. Práce zahrnuje úvod do problematiky, návrh a porovnání různých možností napájení a konstrukčního provedení dvoupásmové mikropásmové antény, následnou optimalizaci a simulaci v programu CST Microwave studio, výrobu a měření antény.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Mikropásmová anténa, rezonanční frekvence, flíček, činitel odrazu, vyzařovací charakteristiky.

## **TITLE**

Design and optimization of a dual band antenna for receiving signals on the subway train set.

## **ANNOTATION**

Bachelor thesis is describing design two-banded patch antenna which will be able to signal transmission at 2,4 and 5 GHz. Content of thesis is focused on introduction to the theoretical part, describing of the structural proposal include various types of feeding methods of microstrip patch antenna and subsequent simulation in program called CST Microwave studio and subsequent preparation of the sample and verification of its parameters by measurement.

## **KEYWORDS**

Patch antenna, resonant frequency, patch, reflection coefficient, radiation pattern.

## OBSAH

|  |    |
|--|----|
| SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....  | 10 |
| SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK .....  | 12 |
| ÚVOD.....  | 13 |
| 1. ANTÉNA A ŠÍŘENÍ SIGNÁLŮ.....  | 14 |
| 1.1 Princip vysílací a přijímací antény .....  | 15 |
| 1.2 Základní parametry anténních prvků.....  | 15 |
| 1.2.1 Vstupní impedance .....  | 15 |
| 1.2.2 Směrnost .....   | 15 |
| 1.2.3 Zisk .....   | 16 |
| 1.2.4 Šířka přenášeného pásma.....   | 17 |
| 1.2.5 Vyzařovací diagram.....  | 17 |
| 2. MIKROPÁSKOVÁ ANTÉNA.....  | 19 |
| 2.1 Dielektrický substrát.....   | 19 |
| 2.2 Flíček .....   | 20 |
| 2.3 Napájení koaxiálním vodičem.....   | 21 |
| 2.4 Napájení pomocí mikropáskového vedení .....  | 21 |
| 3. MIKROPÁSKOVÁ ANTÉNA PRO DVĚ FREKVENCE .....   | 22 |
| 3.1 Skládaná mikropásková anténa .....   | 22 |
| 3.2 PIFA anténa .....  | 22 |
| 3.3 Mikropásková anténa s modifikovaným flíčkem .....  | 23 |
| 4. NÁVRH MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY NA FREKVENCI 2,4 A 5 GHz<br>V PROGRAMU CST.....                 | 25 |
| 4.1 Výběr dielektrického substrátu.....  | 25 |
| 4.2 Návrh flíčku a jeho rozměry.....   | 25 |
| 4.3 Výpočet velikosti flíčku .....   | 26 |
| 4.4 Volba napájení.....  | 27 |
| 4.4.1 Návrh napájení mikropáskovým vedením .....   | 27 |
| 4.4.2 Výpočet hloubky vnoření napájecího mikropásku a jeho šířky.....                        | 28 |
| 4.4.3 Návrh a výpočet pozice napájení koaxiální sondou.....                                  | 29 |
| 4.5 Simulace mikropáskové antény na frekvenci 2,4 GHz napájené mikropáskovým<br>vedením..... | 29 |
| 4.6 Simulace mikropáskové antény na frekvenci 2,4 GHz napájené koaxiální sondou              |    |
| 31   |    |
| 5. NÁVRH DVOUPÁSMOVÉ MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY NA FREKVENCI 2,4 A 5<br>GHz V PROGRAMU CST .....    | 34 |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.1   | Výběr vhodného provedení antény.....   | 34 |
| 5.2   | Návrh a simulace dvoupásmové mikropáskové antény s modifikovaným flíčkem<br>34 |    |
| 5.2.1 | Výchozí tvar antény .....  | 34 |
| 5.2.2 | Návrh a simulace mikropáskové antény s flíčkem tvaru MFA1 .....                | 34 |
| 5.2.3 | Optimalizace a simulace mikropáskové antény s flíčkem tvaru MFA1 .....         | 36 |
| 5.2.4 | Návrh reflektoru pro mikropáskovou anténu s modifikovaným flíčkem .....        | 40 |
| 5.2.5 | Výsledný návrh a simulace dvoupásmové mikropáskové antény .....                | 42 |
| 6.    | OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ NA ZHOTOVENÉM VZORKU .....                                    | 45 |
| 6.1   | Měření impedančního přizpůsobení .....   | 46 |
| 6.2   | Měření vyzařovacího diagramu .....   | 48 |
|       | ZÁVĚR .....  | 51 |
|       | POUŽITÁ LITERATURA .....   | 52 |
|       | PŘÍLOHY .....  | 54 |

## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1 Přeměna elektrického signálu na magnetické pole a naopak [1] .....  | 14 |
| Obrázek 2 Vyzařovací diagram směrové antény [9] .....   | 18 |
| Obrázek 3 Konstrukce mikropáskové antény [11] .....   | 19 |
| Obrázek 4 Závislost činitele odrazu $S_{11} _{(db)}$ na výšce substrátu [18] .....  | 20 |
| Obrázek 5 Různé tvary anténních flíčků [8] .....  | 20 |
| Obrázek 6 Flíčková anténa napájená koaxiálním kabelem [13] .....  | 21 |
| Obrázek 7 Způsoby připojení napájecího mikropásku k flíčku: a) přizpůsobený flíček, b) transformátor, c) zapuštěné napájení. [13] .....                                 | 21 |
| Obrázek 8 Skládaná mikropásková anténa [16] .....   | 22 |
| Obrázek 9 PIFA anténa [16] .....  | 23 |
| Obrázek 10 MFA – Flíček tvaru vidlice (Meandered fork-shaped antenna) [18] .....  | 23 |
| Obrázek 11 SFA – Flíček tvaru vidlice do spirály (Spiral fork-shaped antenna) [18] .....  | 24 |
| Obrázek 12 DSFA – Flíček tvaru dvojité vidlice do spirály (Dual spiral fork-shaped antenna) [18] .....  | 24 |
| Obrázek 13 Flíček tvaru dvojitá invertovaná $\Omega$ (double inverted $\Omega$ -shaped strip) .....   | 24 |
| Obrázek 14 Realizace patch antény napájené mikropáskem .....  | 30 |
| Obrázek 15 Frekvenční závislost činitele odrazu $S_{11} _{(db)}$ patch antény napájené mikropáskovým napájením .....  | 30 |
| Obrázek 16 Směrové charakteristiky patch antény napájené mikropáskem v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz .....  | 31 |
| Obrázek 17 Realizace patch antény napájené koaxiální sondou – čelní strana .....  | 32 |
| Obrázek 18 Realizace patch antény napájené koaxiální sondou – zadní strana .....  | 32 |
| Obrázek 19 Frekvenční závislost činitele odrazu $S_{11} _{(db)}$ patch antény napájené koaxiální sondou .....   | 33 |
| Obrázek 20 Směrové charakteristiky patch antény napájené koaxiální sondou v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz .....   | 33 |
| Obrázek 21 Postupný návrh designu antény MFA: a) Fork-shaped antenna FA, b) Meandered fork-shaped antenna MFA1, c) Double meandered fork-shaped antenna MFA2 [18] ..... | 34 |
| Obrázek 22 Návrh dvoupásmové mikropáskové antény tvaru MFA1 .....   | 35 |
| Obrázek 23 Rozměry návrhu dvoupásmové mikropáskové antény tvaru MFA1 .....  | 35 |
| Obrázek 24 Frekvenční závislost činitele odrazu $S_{11} _{(db)}$ dvoupásmové patch antény tvaru MFA1 .....  | 36 |
| Obrázek 25 Optimalizace dvoupásmové mikropáskové antény pomocí funkce Optimizer .....   | 36 |
| Obrázek 26 Frekvenční závislost činitele odrazu $S_{11} _{(db)}$ dvoupásmové patch antény po optimalizace funkcí Optimizer .....  | 37 |
| Obrázek 27 Manuální optimalizace dvoupásmové mikropáskové antény .....  | 37 |
| Obrázek 28 Rozměry návrhu dvoupásmové mikropáskové antény s modifikovaným flíčkem .....   | 38 |
| Obrázek 29 Frekvenční závislost činitele odrazu $S_{11} _{(db)}$ manuálně optimalizované dvoupásmové patch antény .....   | 38 |
| Obrázek 30 Směrové charakteristiky patch antény s modifikovaným flíčkem v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz .....   | 39 |
| Obrázek 31 Směrové charakteristiky patch antény s modifikovaným flíčkem v polárních souřadnicích na frekvenci 5 GHz .....   | 39 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 32 Návrh reflektoru dvoupásmové mikropáskové antény s modifikovaným flíčkem .....   | 40 |
| Obrázek 33 Frekvenční závislost činitele odrazu $S_{11}$ (db) dvoupásmové patch antény s modifikovaným flíčkem a reflektorem .....        | 41 |
| Obrázek 34 Směrové charakteristiky patch antény s modifikovaným flíčkem a reflektorem v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz ..... | 41 |
| Obrázek 35 Směrové charakteristiky patch antény s modifikovaným flíčkem a reflektorem v polárních souřadnicích na frekvenci 5 GHz .....   | 42 |
| Obrázek 36 Návrh umístění reflektorů dvoupásmové mikropáskové antény s modifikovaným flíčkem .....  | 43 |
| Obrázek 37 Frekvenční závislost činitele odrazu $S_{11}$ (db) dvoupásmové patch antény s modifikovaným flíčkem a reflektory .....         | 43 |
| Obrázek 38 Směrové charakteristiky dvoupásmové patch antény s reflektory v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz.....               | 44 |
| Obrázek 39 Směrové charakteristiky dvoupásmové patch antény s reflektory v polárních souřadnicích na frekvenci 5 GHz.....                 | 44 |
| Obrázek 40 Návrh dvoupásmové mikropáskové antény ze substrátu FR4 .....   | 45 |
| Obrázek 41 Zhotovená dvoupásmová mikropásková anténa ze substrátu FR4.....  | 45 |
| Obrázek 42 Blokové schéma měřicího pracoviště pro měření impedančního přizpůsobení ...  | 46 |
| Obrázek 43 Fotografie pracoviště pro měření impedančního přizpůsobení .....   | 46 |
| Obrázek 44 Závislost odraženého výkonu od vstupního portu antény na frekvenci .....   | 47 |
| Obrázek 45 Frekvenční závislost činitele odrazu $S_{11}$ (db) dvoupásmové patch antény s modifikovaným flíčkem.....                       | 47 |
| Obrázek 46 Blokové schéma měřicího pracoviště pro měření vyzařovacího diagramu.....   | 48 |
| Obrázek 47 Fotografie pracoviště pro měření vyzařovacího diagramu antény .....  | 49 |
| Obrázek 48 Vyzařovací diagram v horizontální rovině na frekvenci 2,4 GHz .....  | 49 |
| Obrázek 49 Vyzařovací diagram v horizontální rovině na frekvenci 5 GHz .....  | 50 |
| <br>  |    |
| Tabulka 1 Rozměry mikropáskové antény napájené mikropáskovým vedením .....  | 29 |
| Tabulka 2 Rozměry mikropáskové antény napájené koaxiální sondou.....  | 31 |

## **SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK**

CST (MW Studio) – CST Microwave studio

PIFA – Planární anténa typu obrácené F

MFA1 – Meandered fork-shaped antenna

FEI UPCE – Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice

## ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou návrhu dvoufrekvenční antény v pásmech 2,4 a 5 GHz, která by měla být umístěna na střeše hnacího kolejového vozidla soupravy metra.

První kapitola seznamuje s teorií vyzařování elektromagnetické energie prostřednictvím základních anténních prvků. Dále jsou v této kapitole popsány základní parametry antén.

Ve druhé kapitole je proveden teoretický rozbor mikropáskových antén. Je zde popsán vliv volby vhodného substrátu na vlastnosti flíčkových antén. Podstatnou částí této kapitoly je též porovnání dvou základních typů napájení flíčkové antény.

Třetí kapitola se věnuje teoretickému rozboru různých možností návrhu vícepásmové patch antény. Jsou zde uvedeny základní koncepty návrhů různých tvarů a provedení těchto antén.

Ve čtvrté kapitole je proveden teoretický návrh mikropáskové patch antény, přičemž jsou zde uvedeny vztahy pro výpočet rozměrů jednotlivých částí antény. Také jsou zde diskutovány různé tvary antény, které umožňují dosažení rozdílných tvarů vyzařovacích charakteristik a různých šířek frekvenčního přizpůsobení. Na základě tohoto návrhu byl v softwaru CST MW Studio sestaven a optimalizován simulační model. Jsou zde porovnány simulační modely pro dva typy napájení – mikropáskové a koaxiální sondou.

Pátá kapitola navazuje na předchozí kapitolu a upravuje tvar výchozího patch anténního elementu napájeného mikropáskovým vedením tak, aby bylo dosaženo impedančního přizpůsobení v obou požadovaných frekvenčních pásmech. V této kapitole je popsána výsledná optimalizovaná anténní struktura. Jelikož ovšem takto navržená anténa ještě nedosahuje potřebného tvaru vyzařovacího diagramu, byl v této kapitole proveden rozbor a návrh anténního reflektoru, který transformuje vyzařovanou elektromagnetickou energii do požadovaných směrů.

Poslední šestá kapitola popisuje návrh a zhotovení vzorku dvoufrekvenční antény bez reflektoru. Následně na vyrobeném vzorku je provedeno měření impedančního přizpůsobení a vyzařovací charakteristiky v bezodrazové komoře. Tato měření jsou porovnána s očekávanými výsledky získanými numerickou simulací.

## 1. ANTÉNA A ŠÍŘENÍ SIGNÁLŮ

Anténa je prvek vysokofrekvenčního vedení, který je určený k vyzařování nebo přijímání energie, typicky rádiových signálů. Antény tudíž mohou být vyzařovací, přijímací, nebo vysílací a přijímací zároveň. Přenos signálu funguje na principu přeměny proměnlivého elektrického pole z vysílací antény na proměnlivé magnetické pole, viz první Maxwellova rovnice (1.1), která vychází z Ampérova zákona [1][2]:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \iint_s \frac{\delta \vec{D}}{\delta t} d\vec{S} \quad (1.1)$$

kde:  $\vec{E}$  je vektor magnetické intenzity a  $\frac{\delta \vec{D}}{\delta t}$  je časová změna vektoru elektrické indukce.

Z druhé Maxwellovy rovnice vycházející z Faradayova zákona elektromagnetické indukce lze říci, že magnetické pole se zase opět může přeměnit na elektrické:

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = -\iint_s \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} d\vec{S} = -\frac{\delta}{\delta t} \iint_s \vec{B} d\vec{S} \quad (1.2)$$

kde  $\vec{E}$  je vektor elektrické intenzity a  $\frac{\delta \vec{B}}{\delta t}$  je časová změna vektoru magnetické indukce,

Tímto procesem se elektromagnetické pole může odpoutat od zdroje signálu, kterým je zde proud tekoucí vysílací anténou, a šířit se za pomoci postupného opětovného přeměňování dále, jak je znázorněno na Obrázku 1 [1]:

$$\begin{aligned} \iint_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S} &= \oint_l \vec{H} d\vec{l} \\ \uparrow \quad \circlearrowleft \quad \downarrow \\ \oint_l \vec{E} d\vec{l} &= -\iint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \end{aligned}$$

Obrázek 1 Přeměna elektrického signálu na magnetické pole a naopak [1]

Pokud takto volně šířené elektromagnetické pole dospěje do prostředí s velkou vodivostí, které přijímací anténa představuje, pak na základě Ohmova zákona v diferenciálním tvaru se intenzita elektrického pole  $E$  změní na (vodivostní) proud s hustotou  $J$  tekoucí přijímací anténou a odvádí se dále do přijímače [1]:

$$U = R \cdot I \quad (1.3)$$

$$U = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot I \quad (1.4)$$

$$\frac{U}{l} = \rho \cdot \frac{I}{S} \quad (1.5)$$

$$E = \rho \cdot J \quad (1.6)$$

## 1.1 Princip vysílací a přijímací antény

Jelikož podle první Maxwellovy rovnice je elektrické pole na vysílači zdrojem magnetického pole, lze přímou úměrou pomocí velikosti tekoucího proudu na vysílači přímo ovlivnit velikost odpoutaného elektromagnetického pole v prostoru. Při konstrukci vysílacích a přijímacích antén se využívá vlastností sériového rezonančního obvodu, kdy v rezonanci sériovým rezonančním obvodem protéká největší proud, a tudíž i přenášený signál ve formě elektromagnetického pole je silnější. [1]

## 1.2 Základní parametry anténních prvků

Antén existuje několik typů, přičemž základní a nejčastěji používané jsou: dipól, monopól, smyčka a flíček (neboli patch). Složitější antény se většinou vytváří pomocí kombinace několika stejných typů, popřípadě kombinací několika různých typů. Každá z antén má své charakteristické vlastnosti, respektive parametry. Jedny z nejdůležitějších parametrů jsou vstupní impedance, zisk, šířka přenášeného pásma, směrovost, vyzářovací diagram a polarizace.

### 1.2.1 Vstupní impedance

Vstupní impedance neboli impedance antény by měla být impedančně přizpůsobená, tzn. ideálně shodná s impedancí napáječe (neboli napájecího vedení). Například při použití koaxiálního kabelu pro televizní techniku jakožto napáječe by anténa měla mít vstupní impedanci rovno 75 Ω. Pokud anténa není impedančně přizpůsobená, dochází k odrazům a narůstá odražený výkon, zatímco klesá přenesený výkon. [2] Pokud je anténa v rezonanci, pak je imaginární složka vstupní impedance nulová a uvádí se pouze reálná složka. [3]

### 1.2.2 Směrovost

Směrovost antény je schopnost vyzářovat nebo přijímat elektromagnetické vlny s různou intenzitou v požadovaných směrech. Je definována jako poměr intenzity záření v daném směru k průměrné intenzitě záření v celém sférickém prostoru. Průměrná intenzita záření ve všech ostatních směrech je rovna celkovému vyzářenému výkonu anténou podělenému hodnotou 4π. [7]

Jednou z možností je vyjádření grafické – pomocí vyzářovacího diagramu.

Druhá možnost vyjádření je číselná – takzvaným činitelem směrovosti  $D$ . V případě, že je stanoven konkrétní směr záření, lze provést výpočet následovně [8]:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P_{rad}} \quad (1.7)$$

V případě, že není směr specifikován, lze použít maximální intenzitu záření [7]:

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (1.8)$$

kde:  $D$  – činitel směrovosti (v daném směru),

$D_{\max}$  – maximální činitel směrovosti,

$U$  – intenzita záření (v daném směru),

$U_{\max}$  – maximální intenzita záření,

$P_{\text{rad}}$  – celkový vyzářený výkon.

### 1.2.3 Zisk

Zisk antény je přímo závislý nejen na směrovosti, ale také na účinnosti antény. Zisk je definován jako poměr intenzity v daném směru k intenzitě ideálního izotropního zářiče v odpovídajícím směru, který lze brát jako zářič referenční [7]:

$$G = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{\text{ref}}(\theta, \varphi)} \quad (1.9)$$

kde  $U_{\text{ref}}(\theta, \varphi)$  je vyzářená intenzita ideálního izotropního zářiče.

Za předpokladu, že intenzita záření izotropně vyzářeného výkonu referenčním zářičem je rovna vstupnímu výkonu referenčního zářiče vydělenému  $4\pi$ , lze pak zisk vyjádřit jako [8]:

$$G = 4\pi \cdot \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{\text{in}}} \quad (1.10)$$

kde  $P_{\text{in}}$  je celkový vstupní výkon bezeztrátového izotropního zářiče.

Celkový vyzářený výkon  $P_{\text{rad}}$  je dle [8] definovaný jako:

$$P_{\text{rad}} = \eta \cdot P_{\text{in}} \quad (1.11)$$

kde  $\eta$  je účinnost vyzařování dané antény.

Po dosazení do vztahu (1.7) je možné vyjádřit zisk ve tvaru:

$$G(\theta, \varphi) = \eta \cdot \left[ 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{\text{rad}}} \right] \quad (1.12)$$

Z čehož je patrná následná závislost na účinnosti a směrovosti antény, neboť po dosazení ze vzorce (1.5) lze zisk (v daném směru) definovat vztahem:

$$G(\theta, \varphi) = \eta \cdot D(\theta, \varphi) \quad (1.13)$$

Zisk se nejčastěji uvádí v jednotkách dBi a dBD, přičemž záleží, zda je zisk vztažen k ideálnímu izotropickému zářiči, který vyzařuje elektromagnetickou energii symetricky do celého prostoru (pak používáme jednotku dBi), nebo jestli jej vztahujeme k ideálnímu půlvlnnému dipólu (pak používáme jednotku dBD).

Pro převod mezi jednotkami dBi a dBD platí [4]:

$$G_{[\text{dBi}]} = G_{[\text{dBD}]} + 2,15 \quad (1.14)$$

Převod mezi jednotkami dBi a dB je možný za pomoci vzorce [21]:



$$G_{[dBi]} = 10 \cdot \log(G) \quad (1.15)$$

Který lze upravit na následující tvar:

$$G_{[dB]} = 10^{\frac{G_{[dBi]}}{10}} \quad (1.16)$$

### 1.2.4 Šířka přenášeného pásma

Pojem šířka přenášeného pásma je definována jako „rozsah frekvencí, kde anténní parametry odpovídají stanovené normě.“ [5] V praxi je většinou šířka přenášeného pásma stanovena měřením charakteristik PSV (poměr stojatého vlnění) nebo měřením vyzařovaného výkonu v požadovaném rozsahu. [6]

- pro širokopásmové antény se šířka přenášeného pásma vyjadřuje jako poměr maximální a minimální frekvence pásma [6]:

$$B = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (1.17)$$

- pro úzkopásmové antény se šířka přenášeného pásma vyjadřuje v procentech rozsahu od mezní (rezonanční) frekvence [6]:

$$B = 100 \cdot \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{rez}} [\%] \quad (1.18)$$

### 1.2.5 Vyzařovací diagram

Směrový (vyzařovací) diagram je grafické znázornění směrové závislosti vyzařovaného výkonu v horizontální nebo vertikální rovině. Směrovost je zde reprezentována několika vyzařovacími laloky, v nichž má anténa největší vyzařovací potenciál. Osa hlavního laloku je orientována ve směru maximální intenzity záření, říká se mu také hlavní (vyzařovací) svazek antény. Ostatní laloky se nazývají vedlejší.

Z toho vyplývá, že z hlediska vyzařování můžeme antény rozdělit do dvou typů:

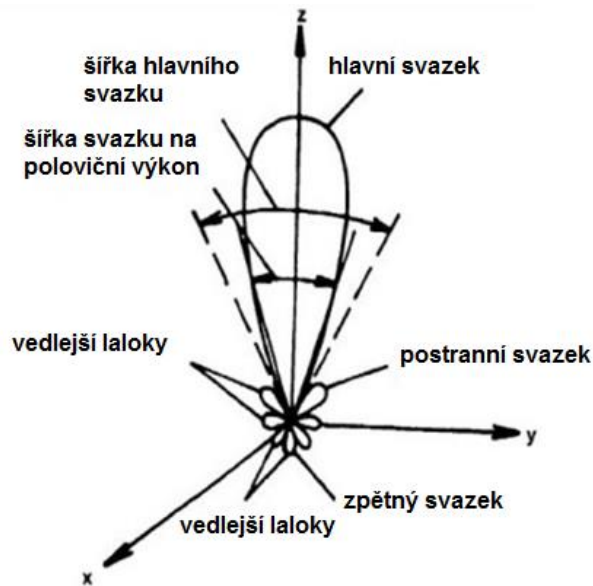
- Směrové – vyzařují do různých směrů s různou intenzitou.
- Všesměrové – vyzařují do všech směrů přibližně stejnou intenzitou.

Každý vyzařovací diagram má dvě roviny:

- Rovinu horizontální, značící se jako H.
- Rovinu vertikální, značící se jako E.

Součet těchto rovin pak reprezentuje prostorové vyjádření vlastností antény.

U vyzařovacích diagramů směrových antén se v obou rovinách udává šířka hlavního svazku, nebo také vyzařovací úhel antény (značený jako  $\alpha$ ). Ten je definován jako úhel, ve kterém intenzita záření klesne o hodnotu -3 dB vůči maximu (hlavního svazku). Jinak řečeno, jde o pokles zisku na polovinu. Vyzařovací diagram a popis jednotlivých laloků je znázorněný níže na Obrázku 2.

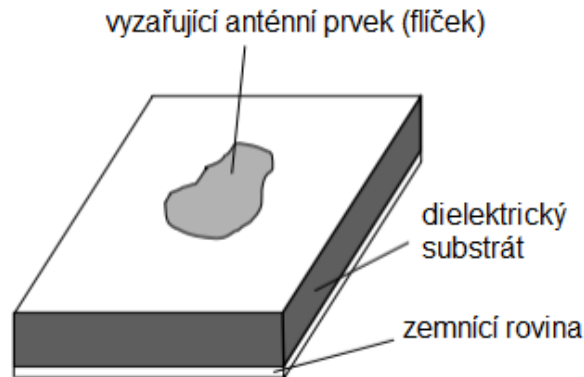


Obrázek 2 Vyzařovací diagram směřové antény [9]

Je také nutno podotknout, že vyzařovací diagram je měřen buď v bezodrazové komoře, tedy v prostředí, kde na anténu nepůsobí žádné okolní vlivy, avšak vzhledem k frekvenčnímu pásmu antény a jejím konstrukčním rozměrům musí být zvolena vhodná technika měření, nebo na volném prostranství, na místě k tomu určeném, které se označuje jako měřící polygon. V praxi se může vyzařovací diagram vlivem nosných konstrukcí antén, okolních antén či staveb nebo terénních překážek různě deformovat. [10]

## 2. MIKROPÁSKOVÁ ANTÉNA

Flíčková anténa nebo patch anténa, jak se také jinak říká mikropáskové anténě, je anténa zhotovená dielektrického substrátu, na který je z obou stran nanesená tenká vrstva mědi. Na jedné straně funguje vrstva mědi jako zemnicí rovina a na druhé straně jako anténa.



Obrázek 3 Konstrukce mikropáskové antény [11]

Hlavní výhody mikropáskových antén:

- Malé rozměry a hmotnost, ekonomicky nenáročné.
- Nízké výrobní náklady a snadná sériová výroba.
- Napájecí vedení může být vyrobeno současně s anténou.
- Snadná výroba duálně frekvenční antény.
- Lineární a kruhová polarizace je možná s jednoduchým napájením.

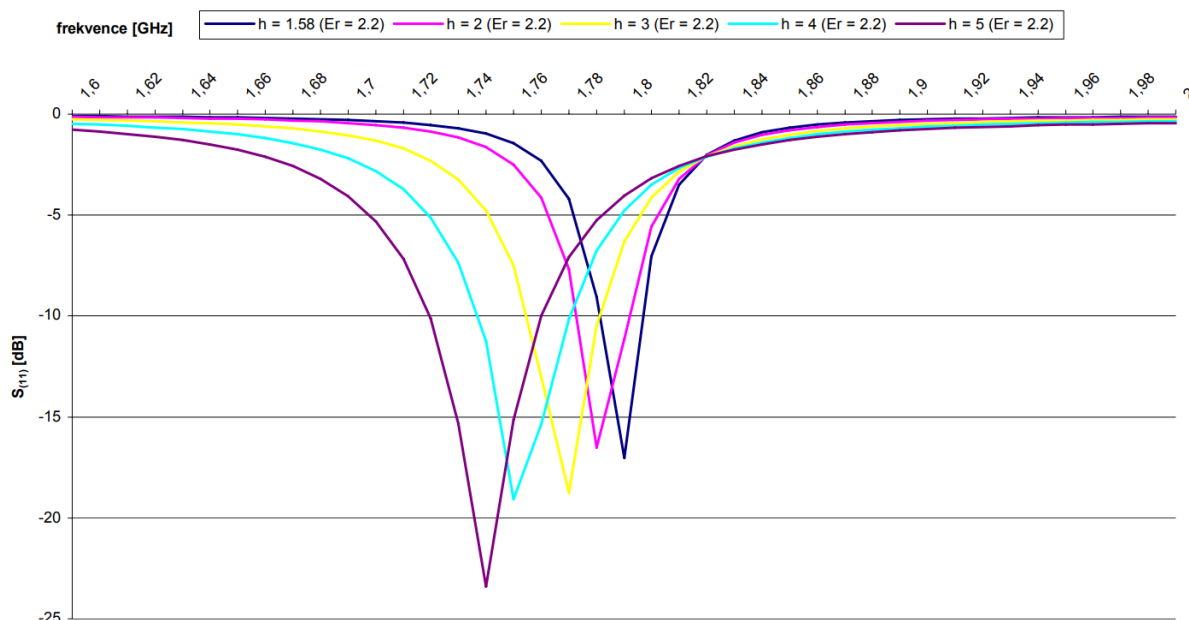
Hlavní nevýhody mikropáskových antén [11]:

- Úzká šířka frekvenčního pásma.
- Poměrně malý zisk.
- Velké ohmické ztráty při použití v anténních polích.
- Většina flíčkových antén vyzařuje pouze v půlprostoru.
- Schopnost pracovat pouze s malými výkony.

### 2.1 Dielektrický substrát

Existuje mnoho dostupných dielektrických substrátů, které lze pro výrobu mikropáskové antény využít. Nejdůležitějšími vlastnostmi jsou relativní permitivita  $\epsilon_r$ , činitel dielektrických ztrát  $\tan \delta$  a vhodné substráty se také značí stálou teplotní a frekvenční závislostí. Permitivita substrátů, neboli jinak řečeno dielektrická konstanta, se obvykle pohybuje v rozmezí  $2,2 < \epsilon_r < 12$ . Pokud využijeme substrát s větší tloušťkou a nízkou permitivitou, zvolenou co nejbližší vůči permitivitě okolnímu prostředí, můžeme očekávat větší hodnoty vyzářeného výkonu a také větší šířku pásma. [12] V tomto případě je však nevýhodou zvětšení rozměrů antény. Naopak tenké substráty s vysokou dielektrickou konstantou mívají menší rozměry, čímž se zmenší i plocha vyzářovacího flíčku, anténa pak vyzáří méně výkonu a účinnost a směrovost klesá. [15]

Na Obrázku 4 je vynesena závislost pracovního kmitočtu antény a především jeho šířky, tedy šířky pásma antény, na tloušťce substrátu. Z výsledků je patrné, že čím je tloušťka substrátu větší, tím je větší i šířka pásma antény. Tento jev je ovšem kompenzován většími ztrátami a tím i snížením účinnosti antény. Z tohoto důvodu je při návrhu flíčkové antény vždy nutné hledat kompromis mezi potřebnou šířkou pásma, tloušťkou substrátu a relativní permitivitou substrátu.

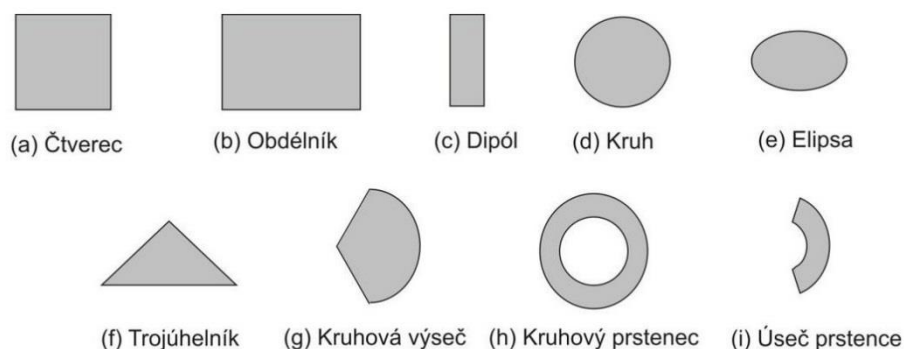


Obrázek 4 Závislost činitele odrazu  $S_{11}(\text{dB})$  na výšce substrátu [18]

## 2.2 Flíček

Flíček, stejně jako případný napájecí mikropáskový proužek, je nejčastěji vytvořen z mědi nebo zlata a na dielektrický substrát se obvykle leptá fotoelektrickou cestou. Pomocí materiálových a mechanických parametrů flíčku lze ovlivnit vysílací kmitočty, hloubku a šířku pásma.

Flíčky tvořící anténu jsou nejčastěji tvaru čtverce, obdélníku nebo kruhu, ale lze se setkat i s různými prstenci, kruhovou výsečí, kříží a podobně. Pro modifikaci anténních parametrů lze v daném tvaru (nejčastěji v obdélníku nebo čtverci) vytvořit i vnitřní šterbiny nebo apertury.

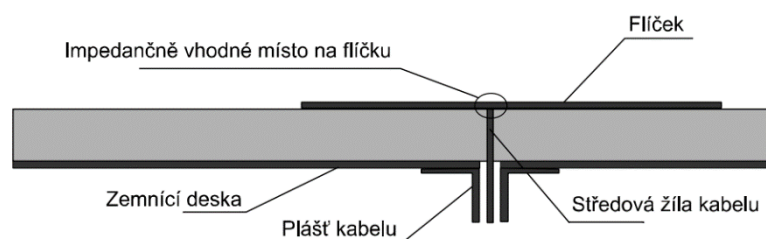


Obrázek 5 Různé tvary anténních flíčků [8]

U čtvercových a obdélníkových flíčků lze obecně říci, že délka flíčku určuje rezonanční kmitočet, zatímco šířka flíčku ovlivňuje vstupní impedanci a šířku pásma. Pravoúhlé tvary flíčků mají také všeobecně větší impedanci a šířku pásma oproti jiným motivům, jelikož mají největší rozměry (větší plochu). Čtvercový flíček je vhodný k vyzařování kruhové polarizace. [15]

### 2.3 Napájení koaxiálním vodičem

Jeden z nejčastějších způsobů napájení flíčkových antén je koaxiálním vodičem (Obrázek 6). Koaxiální konektor (plášť kabelu) je připojen na zemnicí rovině a střed vodiče se po průchodu dielektrikem napájí na flíček. S touto možností napájení je vhodné počítat již při návrhu, neboť je potřeba zvolit impedančně vhodné místo připojení (impedance je uprostřed nulová a roste směrem ke krajům) a anténu je nutné vyrobít již s otvorem pro střední žílu koaxiálního kabelu, což ovlivní parametry antény. [13]

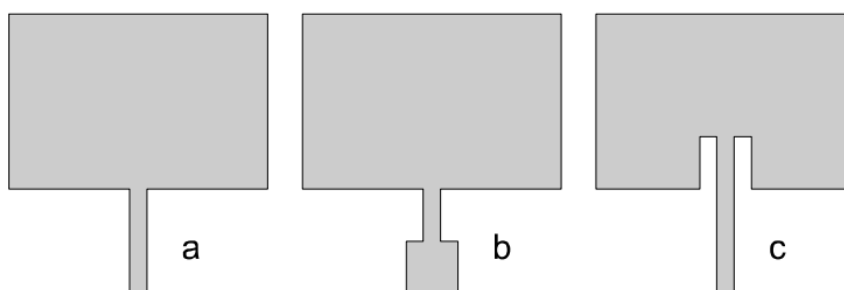


Obrázek 6 Flíčková anténa napájená koaxiálním kabelem [13]

Nevýhoda koaxiálního napájení spočívá v možném vyzařování rušivého záření a v tvorbě indukčnosti, která ohrožuje kvalitu antény. Ta lze kompenzovat sériovou kapacitou v podobě pahýlu (zkratu) na vedení. [11]

### 2.4 Napájení pomocí mikropáskového vedení

Dalším z častých způsobů napájení je mikropáskovým vedením. Jde o napájecí „pásek“, který je nejčastěji galvanicky přímo napojen na hranu flíčku. Hlavní výhodou tohoto způsobu napájení je použití stejné výrobní technologie a materiálu jako pro samotný flíček. Kontaktní připojení pásků lze navrhnout několika způsoby – typické jsou znázorněny na Obrázku 7.



Obrázek 7 Způsoby připojení napájecího mikropásku k flíčku: a) přizpůsobený flíček, b) transformátor, c) zapuštěné napájení. [13]

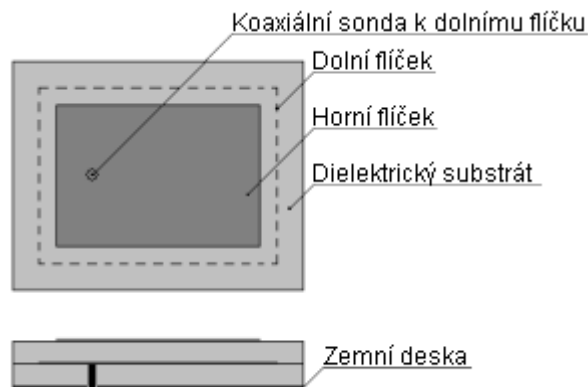
Impedanční přizpůsobení se provádí volbou vhodné polohy, šířky a hloubky zapuštěného napájecího pásku. Za předpokladu, že impedance na okraji flíčku je nejvyšší (řádově stovky ohmů) a směrem ke středu flíčku impedance klesá až na  $0 \Omega$ , je možné určit délku vloženého vedení tak, aby vstupní impedance antény (flíčku) byla v daném místě rovna charakteristické impedanci použitého mikropáskového vedení. [14]

### 3. MIKROPÁSKOVÁ ANTÉNA PRO DVĚ FREKVENCE

Existuje několik konstrukčních možností, jak docílit vícepásmovosti u mikropáskových antén. Jako příklad lze uvést několik nejčastějších a konstrukčně nejjednodušších variant.

#### 3.1 Skládání mikropásková anténa

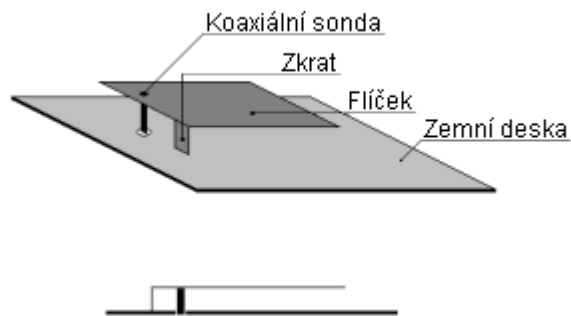
Jednou z často používaných možností je konfigurace několika flíčků umístěných na sebe, takzvaně skládaná anténa, neboli anglicky *stacked patch*. Spodní flíček je obvykle napájen koaxiální sondou a je rozměrově větší, zatímco horní flíček je menší a je napájený nepřímou. Dvouvrstvá skládaná mikropásková anténa má dva rezonanční kmitočty, přičemž nižší rezonanční kmitočet je dán rozměry dolního většího flíčku a vyšší rezonanční kmitočet určují parametry horního flíčku. [16]



Obrázek 8 Skládání mikropásková anténa [16]

#### 3.2 PIFA anténa

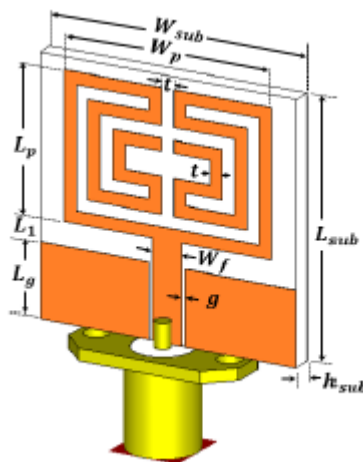
Další variantou vícepásmové patch antény může být planární anténa typu obrácené F, zkráceně PIFA anténa. Anglicky *planar inverted-F antenna*. Konstrukčně je anténa řešená jako zemnicí rovina, nad kterou je pomocí vzduchového dielektrického substrátu společně se zkratovacím a napájecím bodem umístěný odděleně i flíček. Vložením zkratových plošek a jejich správnému umístění vděčí PIFA anténa větší šířce pásma oproti klasickým mikropáskovým anténám. Další podstatnou výhodou je schopnost pracovat s dvojí polarizací, čehož se využívá především u mobilních telefonů. [17]



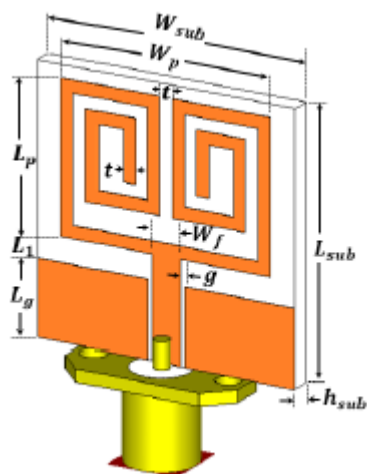
Obrázek 9 PIFA anténa [16]

### 3.3 Mikropásková anténa s modifikovaným flíčkem

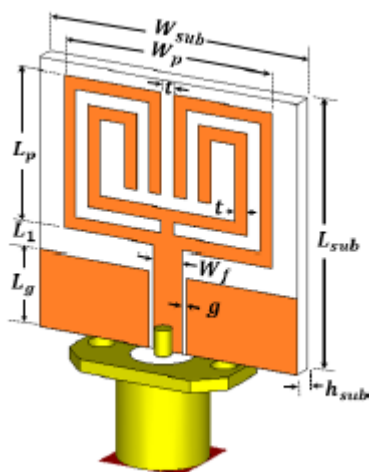
Schopnosti rezonance na několika frekvencích může být docíleno i pomocí modifikace flíčku. Obvykle se vychází z flíčku obdélníkového nebo čtvercového tvaru, který je následně upraven tak, aby anténní parametry odpovídaly požadavkům. Výsledné parametry antény určuje vzor flíčku, rozměry flíčku a tloušťka meandru (vzoru). Design těchto antén může vypadat následovně, viz Obr. 10 až Obr. 13.



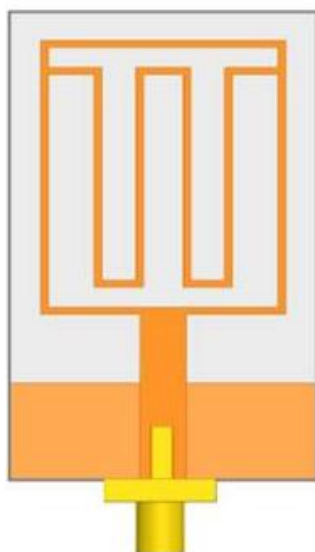
Obrázek 10 MFA – Flíček tvaru vidlice (Meandered fork-shaped antenna) [18]



Obrázek 11 SFA – Flíček tvaru vidlice do spirály (Spiral fork-shaped antenna) [18]



Obrázek 12 DSFA – Flíček tvaru dvojitá vidlice do spirály (Dual spiral fork-shaped antenna) [18]



Obrázek 13 Flíček tvaru dvojitá invertovaná  $\Omega$  (double inverted  $\Omega$ -shaped strip)



## 4. NÁVRH MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY NA FREKVENCI 2,4 A 5 GHz V PROGRAMU CST

Cílem této práce je navrhnout dvoupásmovou anténu v souladu se stanovenými požadavky. Anténa bude mít za úkol přijímat signály v pásmu Wi-Fi 2,4 a 5 GHz v prostředí vlakové soupravy metra. Antény budou umístěny na střeše hnacího vozidla a šířka pásma bude minimálně 50 Hz kolem centrálních kmitočtů. Přibližná šířka svazku v azimutu  $120^\circ$  a v elevaci  $60^\circ$  bude 3 dB.

Kapitola 4 je zaměřena na návrh obdélníkové antény vyzařující pouze v jednom frekvenčním pásmu, z které se následně bude vycházet při tvorbě antény vyzařující na dvou rezonančních frekvencích.

### 4.1 Výběr dielektrického substrátu

Při zohlednění rozměrů 150 x 150 mm a pracovních frekvencích 2,4 a 5 GHz byl pro použití zvolen materiál ROGERS RO4350B. Tento substrát je vhodný pro jeho tuhost, stabilní permitivitu a nízké dielektrické ztráty, které vykazuje i na vysokých frekvencích. Materiál je vyroben z uhlíkového keramického laminátu procesem FR-4 (epoxid/sklo). Vzhledem k mechanickým otřesům byla tloušťka materiálu zvolena nejvyšší ze všech standardů.

Dielektrické ztráty materiálu:  $\tan \delta = 0,0037$  pro 10 GHz.

Dielektrická konstanta (relativní permitivita):  $\epsilon_r = 3,66$ .

Tloušťka materiálu:  $h = 1,524$  mm.

### 4.2 Návrh flíčku a jeho rozměry

V této části jsou uvedeny vztahy pro návrh mikropáskové antény s flíčkem tvaru obdélníku. Výsledné hodnoty jsou pouze orientační a v minulosti se tak anténa musela ladit za pomoci drobných úprav, kdy se nožem odstraňovaly malé části flíčku a následně se měřilo, zda parametry antény již vyhovují daným požadavkům. V dnešní době existují programy typu CST, v kterých je možno provést simulaci a pokud parametry nevyhovují, program disponuje funkcí *Optimizer*, která provede následnou optimalizaci dle zadaných požadavků a pomocí algoritmu najde nejvhodnější možnost úpravy.

Při návrhu obdélníkové flíčkové antény je nutno znát relativní permitivitu materiálu  $\epsilon_r$ , tloušťku materiálu  $h$  a rezonanční frekvenci  $f_0$ , na které má anténa pracovat. Pomocí těchto veličin jsme schopni na základě vzorců dle [8] spočítat délku a šířku flíčku.

Šířka flíčku  $W$  je dána vztahem:

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (4.1)$$

kde  $c$  je rychlost světla.

Pro následující výpočty bude také nutno určit efektivní dielektrickou konstantu neboli efektivní permitivitu. Ta se vypočítá vztahem:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{h}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

kde  $h$  je výška substrátu.

Nyní je možné stanovit efektivní prodloužení délky flíčku:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \cdot \frac{\epsilon_{eff} + 0,3}{\epsilon_{eff} - 0,258} \cdot \frac{\frac{W}{h} + 0,264}{\frac{W}{h} + 0,8} \quad (4.3)$$

Efektivní délka flíčku pro požadovanou rezonanční frekvenci  $f_0$  je definována jako:

$$L_{eff} = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4.4)$$

Skutečná délka flíčku pak lze vypočítat jako rozdíl efektivní délky flíčku a dvojnásobku efektivního prodloužení flíčku:

$$L = L_{eff} - 2 \cdot \Delta L \quad (4.5)$$

Pro impedanci antény je také nutno znát vodivost  $G$ , která je dána vztahem:

$$G = \frac{W}{120 \cdot \frac{c}{f_0}} \cdot \left[1 - \frac{(k \cdot h)^2}{24}\right] \quad (4.6)$$

kde  $k$  je vlnová konstanta a lze definovat jako:

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \quad (4.7)$$

Výsledná mezní impedance antény na okraji patche se následně vypočítá vztahem:

$$R = \frac{1}{2 \cdot G} \quad (4.8)$$

### 4.3 Výpočet velikosti flíčku

Výpočty jsou provedeny pro rezonanční frekvenci  $f_0 = 2,4$  GHz, relativní permitivitu  $\epsilon_r = 3,66$  a tloušťku materiálu  $h = 1,524$  mm.

Šířka flíčku je vypočtena dle vztahu (4.3):

$$W = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,4 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{\frac{3,66 + 1}{2}}} = 40,95 \text{ mm}$$

Efektivní relativní permitivita lze vypočítat z (4.2):

$$\epsilon_{eff} = \frac{3,66 + 1}{2} + \frac{3,66 - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \cdot \frac{1,524 \cdot 10^{-3}}{40,95 \cdot 10^{-3}}\right)^{\frac{1}{2}} = 3,93$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{3,66 + 1}{2} + \frac{3,66 - 1}{2} \cdot \left( 1 + 12 \cdot \frac{1,524 \cdot 10^{-3}}{40,95 \cdot 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{2}} = 3,93$$

Efektivní prodloužení délky flíčku je dáno (4.3):

$$\Delta L = 0,412 \cdot 1,524 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3,93 + 0,3}{3,93 - 0,258} \cdot \frac{\frac{40,95 \cdot 10^{-3}}{1,524 \cdot 10^{-3}} + 0,264}{\frac{40,95 \cdot 10^{-3}}{1,524 \cdot 10^{-3}} + 0,8}} = 0,66 \text{ mm}$$

Pomocí vzorce (4.4) můžeme spočítat efektivní délku flíčku:

$$L_{eff} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,4 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3,93}} = 31,53 \text{ mm}$$

Skutečná délka flíčku je dle definice (4.5):

$$L = 31,53 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,66 \cdot 10^{-3} = 30,21 \text{ mm}$$

Pro výpočet vodivosti  $G$  dle (4.6) je potřeba dle (4.7) znát vlnovou konstantu  $k$ :

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2,4 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} = 16\pi = 50,27 \text{ m}^{-1}$$

$$G = \frac{40,95 \cdot 10^{-3}}{120 \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{2,4 \cdot 10^9}} \cdot \left[ 1 - \frac{(50,27 \cdot 1,524 \cdot 10^{-3})^2}{24} \right] = 2,73 \text{ mS}$$

Impedance antény je dána vztahem (4.8):

$$R = \frac{1}{2 \cdot 2,73 \cdot 10^{-3}} = 183,2 \Omega$$

## 4.4 Volba napájení

Existují čtyři základní varianty, jak realizovat napájení flíčkové antény – napájení mikropáskovým vedením, napájení koaxiální sondou, napájení blízkým vedením a napájení vazební štěrbinou. Z hlediska snazší modifikace flíčku bylo pro návrh antény zvoleno napájení mikropáskovým vedením a koaxiální sondou.

### 4.4.1 Návrh napájení mikropáskovým vedením

V tomto případě se využívá toho, že impedance na okraji flíčku je nejvyšší a směrem do středu flíčku klesá (až na  $0 \Omega$ ). Prakticky se dle [20] návrh provádí výpočtem vhodné hloubky pro vložení napájecího pásku, jeho šířkou a volbou materiálu (relativní permitivitou). Cílem návrhu tedy je, aby vstupní impedance antény byla přímo rovna charakteristické impedanci vloženého napájecího mikropásku, neboli  $Z_0 = R_{in} = 50 \Omega$ .

Hloubku vnoření dle [19] je možno spočítat jako:

$$\frac{R_{in}}{R} = \sin^4 \left( \frac{\pi \cdot x_s}{L} \right) \quad (4.9)$$

kde  $R$  je impedance antény na okraji flíčku,  $R_{in}$  je požadovaná vstupní impedance antény,  $L$  je skutečná délka antény a  $x_s$  je vzdálenost od středu flíčku.

Úpravou je získán vzorec:

$$x_s = \frac{L}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left( \sqrt[4]{\frac{R_{in}}{R}} \right) \quad (4.10)$$

Pro stanovení šířky napájecího mikropáskového vedení tak, aby bylo impedančně přizpůsobené, je nutné určit pomocné proměnné  $a$  a  $b$ . Výpočty pomocných proměnných jsou dle [14][20] dány vztahy:

$$a = \frac{Z_0}{60} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \cdot \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r}\right)} \quad (4.11)$$

$$b = \frac{60 \cdot \pi^2}{Z_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.12)$$

Pokud vyjde pomocná proměnná  $a \leq 1,52$ , dle [14][20] je pak šířka mikropásku dána vztahem:

$$\frac{W_s}{h} = \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ b - 1 - \ln(2 \cdot b - 1) + \frac{\epsilon_r + 1}{2 \cdot \epsilon_r} \cdot \left[ \ln \left( b - 1 + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) \right] \right\} \quad (4.13)$$

#### 4.4.2 Výpočet hloubky vnoření napájecího mikropásku a jeho šířky

Dosazením konkrétních hodnot do vzorců získáme potřebné parametry pro realizaci antény.

Hloubka vnoření  $x_s$  je vypočtena ze vzorce (4.10):

$$x_s = \frac{30,21 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left( \sqrt[4]{\frac{50}{183,2}} \right) = 7,8 \text{ mm}$$

Pomocné proměnné se určí dosazením do vztahů (4.11) a (4.12):

$$a = \frac{50}{60} \cdot \sqrt{\frac{3,66 + 1}{2} + \frac{3,66 - 1}{3,66 + 1} \cdot \left(0,23 + \frac{0,11}{3,66}\right)} = 1,42$$

$$b = \frac{60 \cdot \pi^2}{50 \cdot \sqrt{3,66}} = 6,19$$

Z výsledků je patrné, že parametr  $a$  je menší, než 1,52. Proto je možné využít vztah (4.13):

$$W_s = \frac{2 \cdot 1,524 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \left\{ 5,19 - \ln(2 \cdot 6,19 - 1) + \frac{3,66 + 1}{2 \cdot 3,66} \cdot \left[ \ln(5,19) + 0,39 - \frac{0,61}{3,66} \right] \right\}$$

$$W_s = 3,83 \text{ mm}$$

### 4.4.3 Návrh a výpočet pozice napájení koaxiální sondou

Při napájení koaxiálním kabelem se impedanční přizpůsobení antény provádí volbou vhodné pozice sondy. Kabel je přiveden kolmo na anténu a vnější vodič koaxiálního kabelu se připojí na zemnicí desku, zatímco vnitřní vodič (sonda) je veden provrtaným otvorem v substrátu a je poté přímo připojený na flíček, viz Obrázek 6 v kapitole 2.

Polohu koaxiální sondy  $x_p$  vztaženou ke středu flíčku lze dle [19] stanovit ze vzorce:

$$\frac{R_{in}}{R} = \sin^2\left(\frac{\pi \cdot x_p}{L}\right) \quad (4.14)$$

za pomoci jednoduché úpravy získáme vyjádření:

$$x_s = \frac{L}{\pi} \cdot \sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{R_{in}}{R}}\right) \quad (4.15)$$

Dosazením konkrétních hodnot se zjistí přibližná poloha koaxiální sondy:

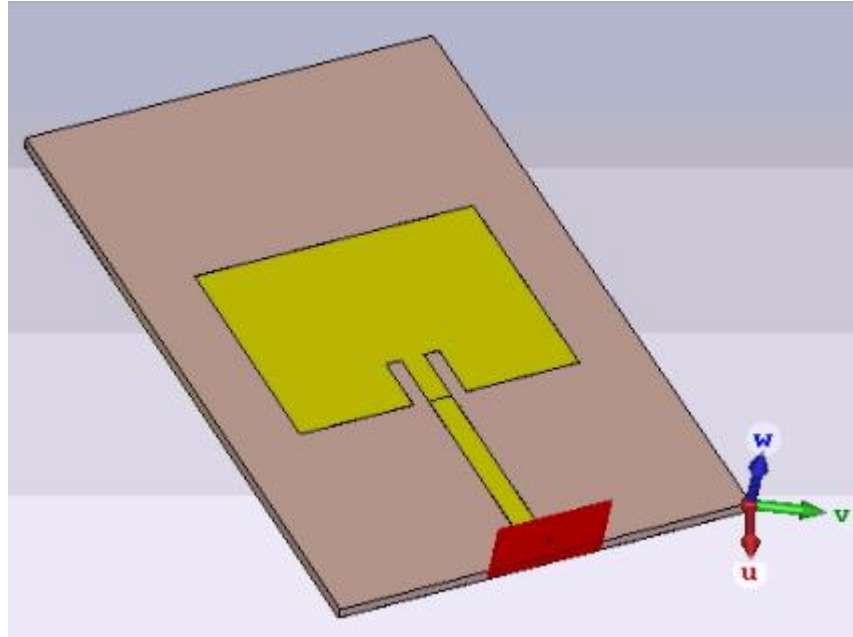
$$x_s = \frac{30,21 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{50}{183,2}}\right) = 5,3 \text{ mm}$$

### 4.5 Simulace mikropáskové antény na frekvenci 2,4 GHz napájené mikropáskovým vedením

Simulace se provedla v programu CST Microwave studio a vychází z předešlých spočítaných rozměrů a teoretických předpokladů. Na spodní hraně antény je zemnicí rovina, přičemž na vrchní (čelní) straně lze vidět vstupní port, impedančně přizpůsobený napájecí mikropásek a flíček obdélníkového tvaru (viz Obrázek 14). Rozměry jsou následující:

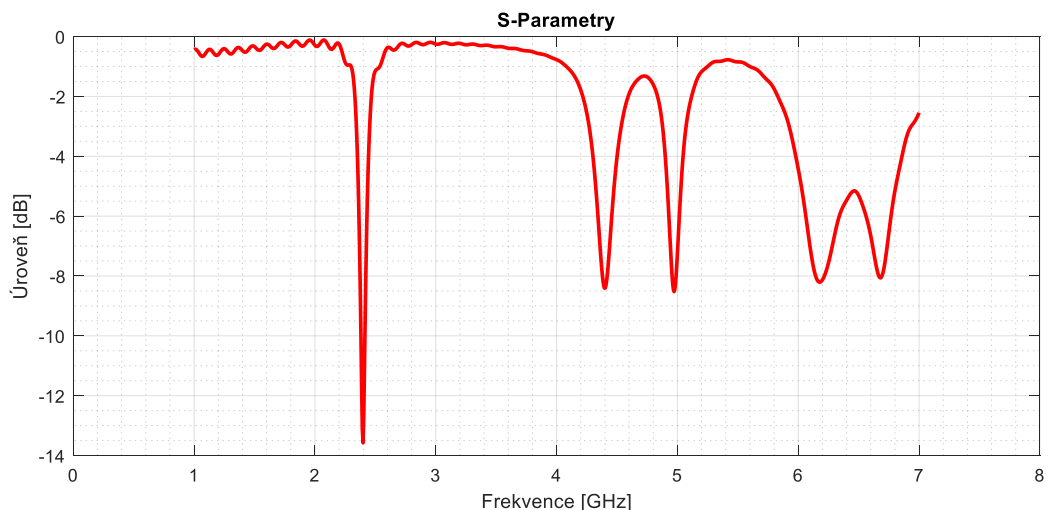
Tabulka 1 Rozměry mikropáskové antény napájené mikropáskovým vedením

| Název                       | Hodnota [mm] |
|-----------------------------|--------------|
| Tloušťka substrátu          | 1,524        |
| Tloušťka mědi               | 0,035        |
| Šířka flíčku                | 40,95        |
| Délka flíčku                | 30,21        |
| Šířka napájecího mikropásku | 3,35         |
| Šířka výřezu                | 2,18         |
| Délka výřezu                | 7,8          |



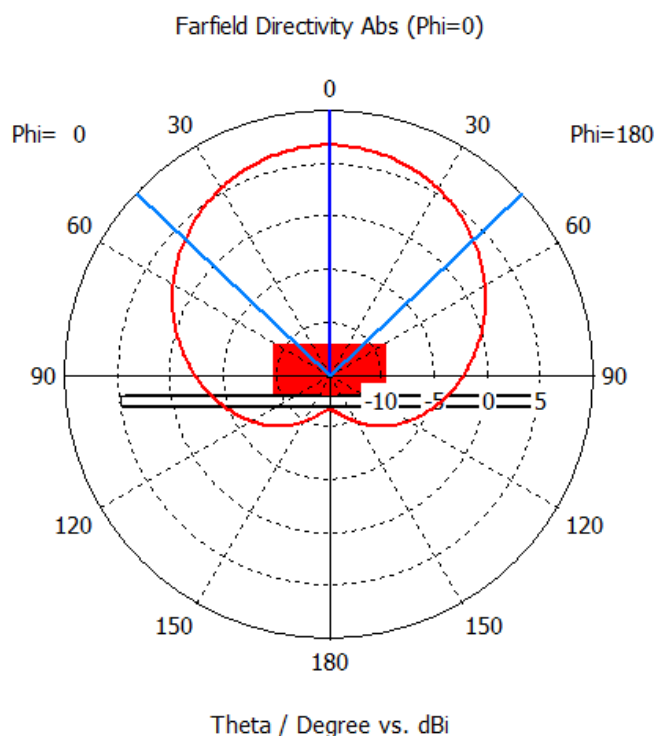
Obrázek 14 Realizace patch antény napájené mikropáskrm

Na požadované frekvenci 2,4 GHz má činitel odrazu hodnotu  $S_{11}|_{(db)} = -13,265 \text{ dB}$ , přičemž by bylo vhodné, aby měl hodnotu alespoň -15 dB, neboť tento parametr určuje množství výkonu odraženého zpět k vysílači. Dle teoretických předpokladů se při činiteli ztrát  $S_{11}|_{(db)} = -3 \text{ dB}$  odrazí polovina výkonu, zatímco při  $S_{11}|_{(db)} = -15 \text{ dB}$  se již odrazí pouze  $\frac{1}{32}$  výkonu. Snížení činitele odrazu lze docílit následnou optimalizací délky a šířky flíčku, popřípadě hloubkou vnoření mikropásku. Jak je z Obr. 15 patrné, šířka pásma kolem centrálního kmitočtu 2,4 GHz je 2,38 – 2,41 GHz, což odpovídá 30 MHz a tudíž není splněna podmínka šířky pásma alespoň 50 MHz. Pro splnění této podmínky bude muset být provedena další optimalizace tohoto návrhu.



Obrázek 15 Frekvenční závislost činitele odrazu  $S_{11}|_{(db)}$  patch antény napájené mikropáskovým napájením

Směrové charakteristiky anténky s vnořeným mikropáskovým napájením znázorněné na Obrázku 16 odpovídají vyzářovacím charakteristikám ideálního dipólu. Podmínka šířky svazku 3 dB v azimutu  $120^\circ$  je splněna.



Obrázek 16 Směrové charakteristiky patch antény napájené mikropáskrm v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz

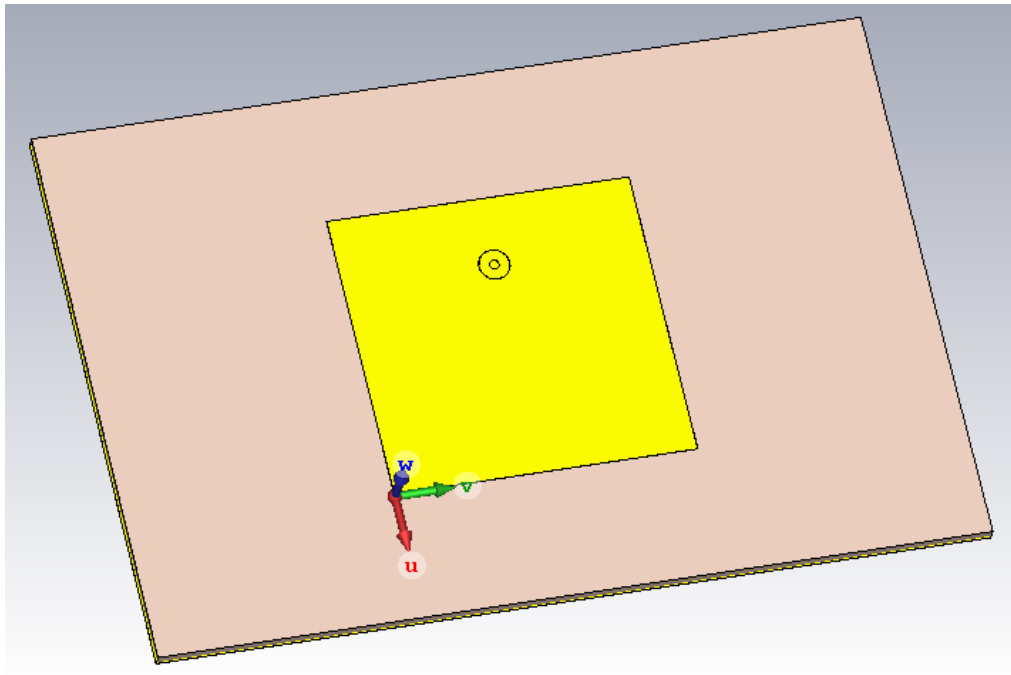
#### 4.6 Simulace mikropáskové antény na frekvenci 2,4 GHz napájené koaxiální sondou

V programu CST Microwave studio se na základě výše spočítaných rozměrů a teoretických předpokladů provedl návrh koaxiálního napájení anténky a následná simulace. Aby rezonance antény byla přesně na frekvenci 2,4 GHz, bylo nutné vypočtené parametry anténky dodatečně optimalizovat v programu CST pomocí funkce *Optimizer*. Rozměry a umístění koaxiálního napájení vychází následovně, viz Tab. 2:

Tabulka 2 Rozměry mikropáskové antény napájené koaxiální sondou

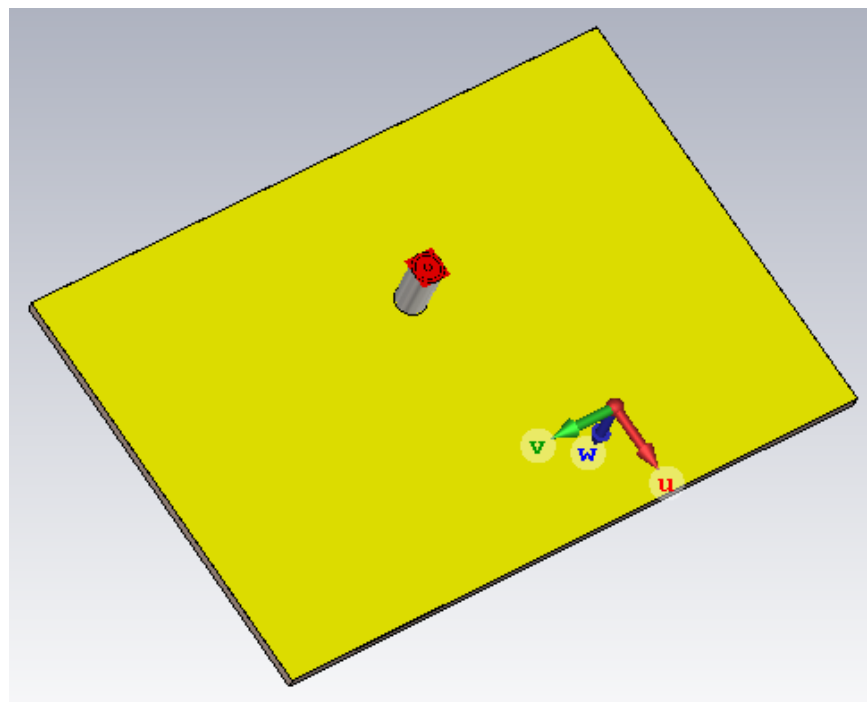
| Název  | Hodnota [mm] |
|--|--------------|
| Tloušťka substrátu                                     | 1,524        |
| Tloušťka mědi  | 0,035        |
| Šířka flíčku   | 31,64        |
| Délka flíčku   | 32,78        |
| Vzdálenost otvoru v substrátu od horního okraje flíčku | 7,61         |

Grafické zobrazení návrhu je na Obr. 17 a Obr. 18. Na čelní straně je znázorněn otvor v substrátu pro zavedení koaxiální sondy a obdélníkový flíček.



Obrázek 17 Realizace patch antény napájené koaxiální sondou – čelní strana

Zadní strana antény je zobrazena na Obrázku 18. Zde je znázorněn konektor, přičemž středový napájecí vodič prochází substrátem a je vodivě spojen s patch anténním elementem.

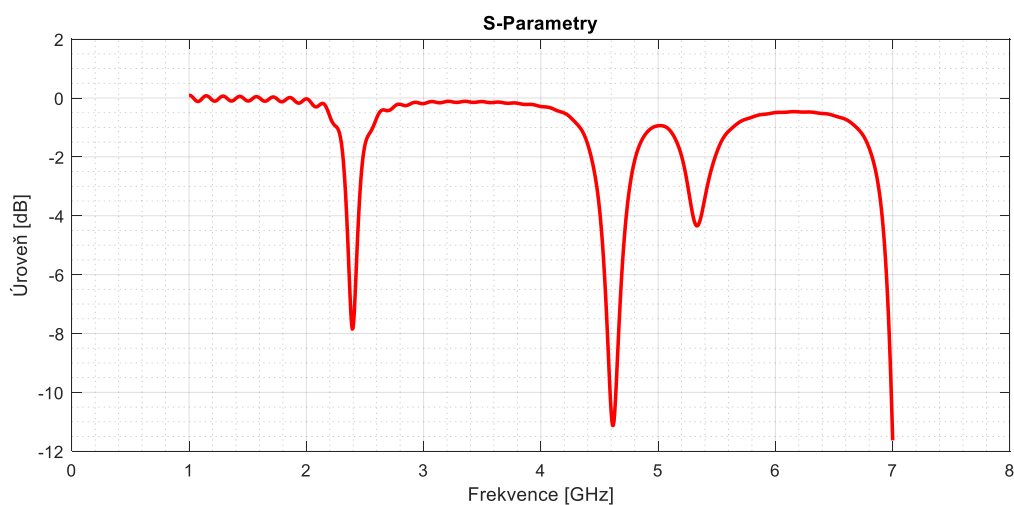


Obrázek 18 Realizace patch antény napájené koaxiální sondou – zadní strana

Po porovnání výsledků následné simulace (viz Obrázek 19) lze říci, že oproti anténě s mikropáskovým napájením je činitel odrazu ( $S_{11}|_{dB} = -7,75dB$ ) vyšší a pro účely zadání je nevyhovující, neboť se odráží příliš velká část přijatého výkonu. Šířka pásma by byla vzhledem k požadavkům vyhovující, neboť při hodnotě činitele odrazu  $S_{11}|_{dB} = -5 dB$  je šířka pásma  $2,36 - 2,44 GHz$  (84MHz).

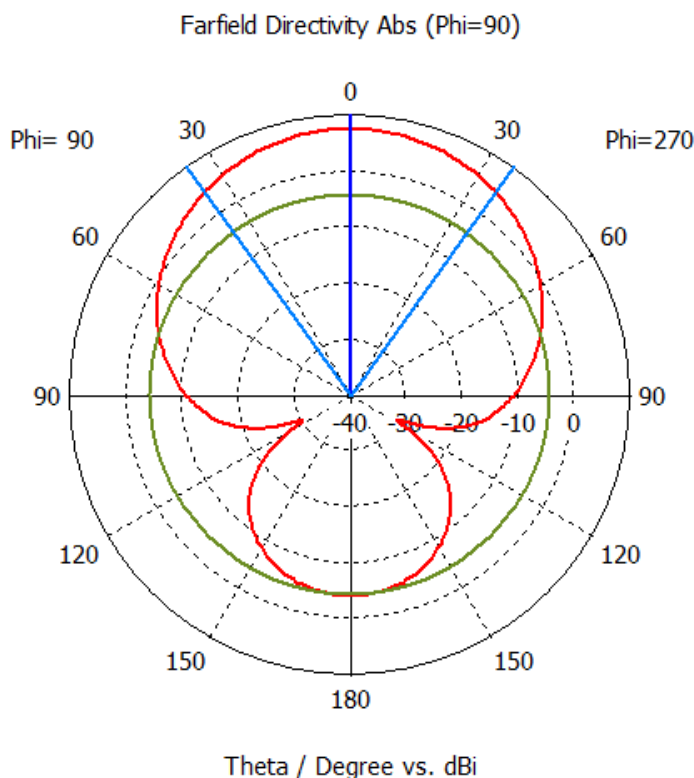


Další rezonanční kmitočety se nachází na frekvenci 4,6 GHz, z čehož vyplývá, že pro nastavení rezonanční frekvence na 5 GHz by bylo nutné parametry anténky ještě modifikovat.



Obrázek 19 Frekvenční závislost činitele odrazu  $S_{11}$ (dB) patch antény napájené koaxiální sondou

Z vyzářovacího diagramu v polárních souřadnicích je patrné, že patch anténa napájená koaxiální sondou vyzářuje ve dvou směrech – v hlavním vyzářovacím svazku a také ve zpětném laloku – což snižuje úroveň výkonu vyzářeného v hlavním laloku.



Obrázek 20 Směrové charakteristiky patch antény napájené koaxiální sondou v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz

Z tohoto důvodu se jeví jako lepší využití anténky napájené mikropáskovým vedením, neboť její vyzářovací charakteristiky nám poskytují větší efektivitu. Také má menší činitel odrazu a pro následnou modifikaci flíčku je vhodnější, neboť by bylo složité realizovat impedančně přizpůsobené napájení koaxiální sondou například na flíčku tvaru *fork-shaped* (viz Obr. 10).

## 5. NÁVRH DVOUPÁSMOVÉ MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY NA FREKVENCI 2,4 A 5 GHz V PROGRAMU CST

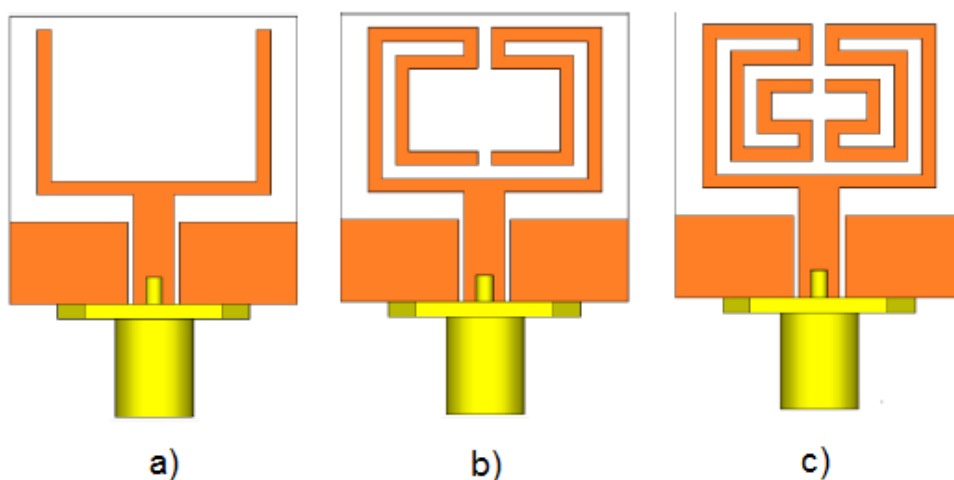
### 5.1 Výběr vhodného provedení antény

Existuje několik možností včetně výše zmíněných, jak zkonstruovat dvoupásmovou kruhově polarizovanou mikropáskovou anténu. Flíčkové dvoupásmové antény, které jsou vyrobeny jen na jednom substrátu a skládají se pouze z jednoho vyleptaného motivu, vyžadují přesný a poměrně složitý návrh. Výhodou avšak je snadná a levná reprodukovatelnost, odolnost vůči mechanickým otřesům, snadná montáž a také kompatibilita s technologií mikrovlnných obvodů. Z hlediska modelování a realizace antény je tedy výhodné přistoupit k návrhu dvoupásmové mikropáskové antény metodou modifikovaného flíčku.

### 5.2 Návrh a simulace dvoupásmové mikropáskové antény s modifikovaným flíčkem

#### 5.2.1 Výchozí tvar antény

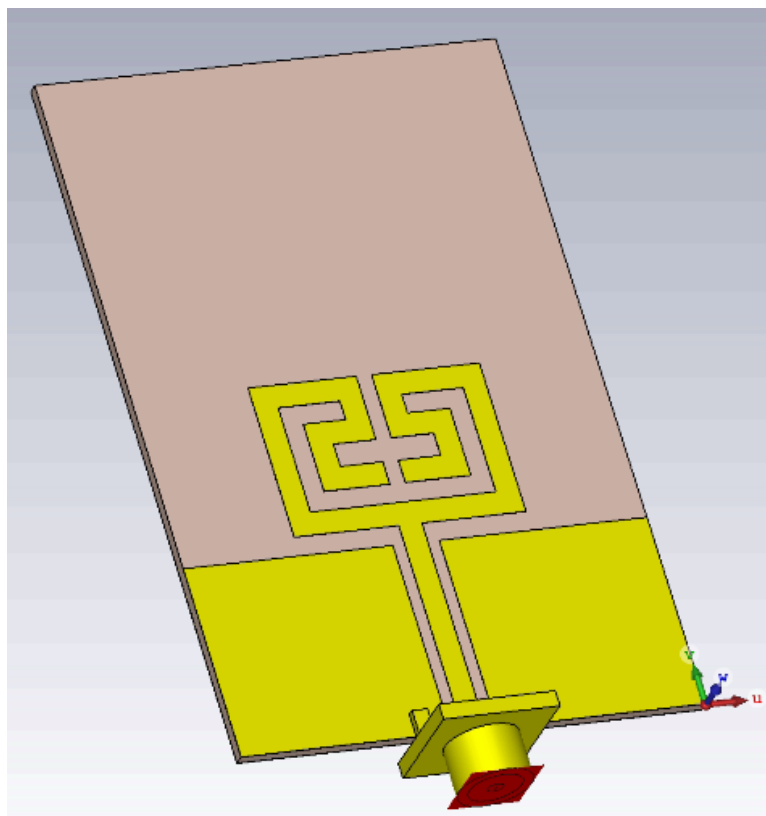
Při návrhu flíčku se vycházelo z antény znázorněné na Obrázku 21 níže, varianta b) MFA1. Jde o vzor flíčku *Meandered fork-shaped*, který je znázorněn na Obrázku 10). Oba typy flíčku vychází z tvaru *Fork-shaped* (viz Obrázek 23, varianta a) FA, neboli v českém znění „anténa tvaru vidlice“). Tento tvar byl zvolen pro jeho vyhovující schopnosti rezonovat na dvou frekvencích a pro vhodné směrové vyzařovací charakteristiky.



Obrázek 21 Postupný návrh designu antény MFA: a) Fork-shaped antenna FA, b) Meandered fork-shaped antenna MFA1, c) Double meandered fork-shaped antenna MFA2 [18]

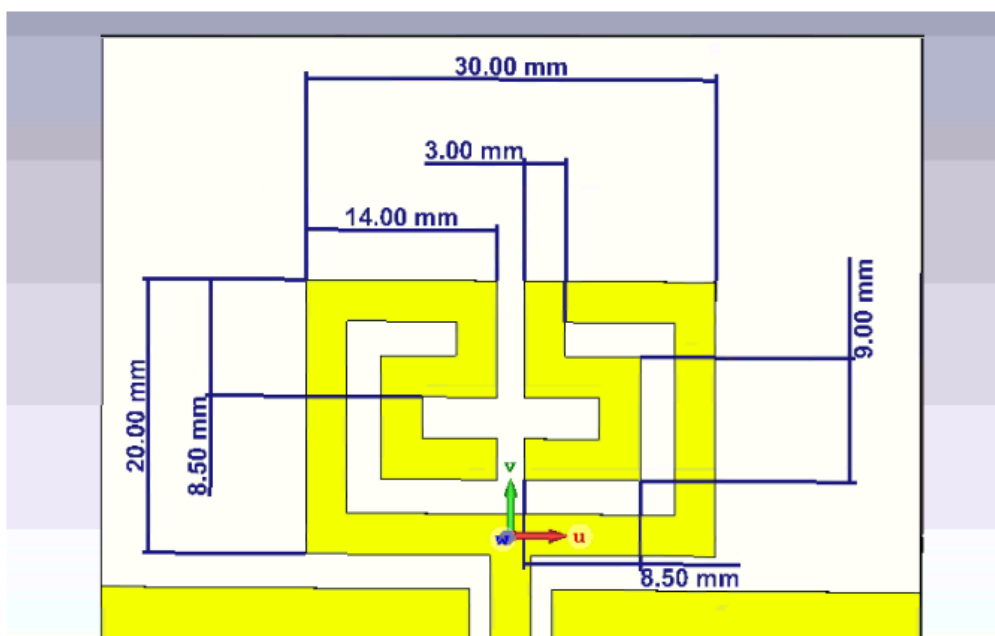
#### 5.2.2 Návrh a simulace mikropáskové antény s flíčkem tvaru MFA1

V tomto návrhu byla realizována anténa s flíčkem tvaru *Meandered fork-shaped antenna MFA1*, jak je možné vidět na Obrázku 21 varianta b). Na napájecí mikropásek je již v návrhu vložený napájecí konektor, který je znázorněn na Obr. 22. Zemnicí rovina na spodní straně není po celé ploše substrátu, nýbrž dosahuje pouze po okraj tvaru flíčku (ze směru od napájecího konektoru).



Obrázek 22 Návrh dvoupásmové mikropáskové antény tvaru MFA1

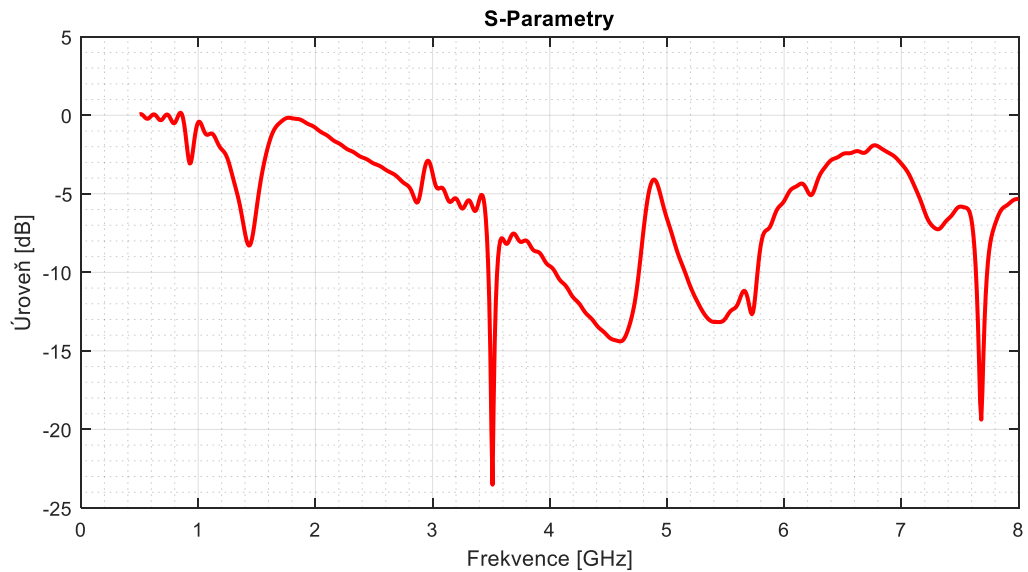
Níže na Obrázku 23 je znázorněný vzor antény s vyznačenými konkrétními rozměry flíčku.



Obrázek 23 Rozměry návrhu dvoupásmové mikropáskové antény tvaru MFA1

Z výsledných  $S_{11}$  charakteristik je patrné, že nejlepší impedanční přizpůsobení anténky rozměry anténky je na frekvencích 3,51 a 7,68 GHz. Na frekvenci 2,4 GHz má činitel odrazu hodnotu  $S_{11}|_{(db)} = -2,683 \text{ dB}$  a na frekvenci 5 GHz  $S_{11}|_{(db)} = -6,576 \text{ dB}$ . Abychom

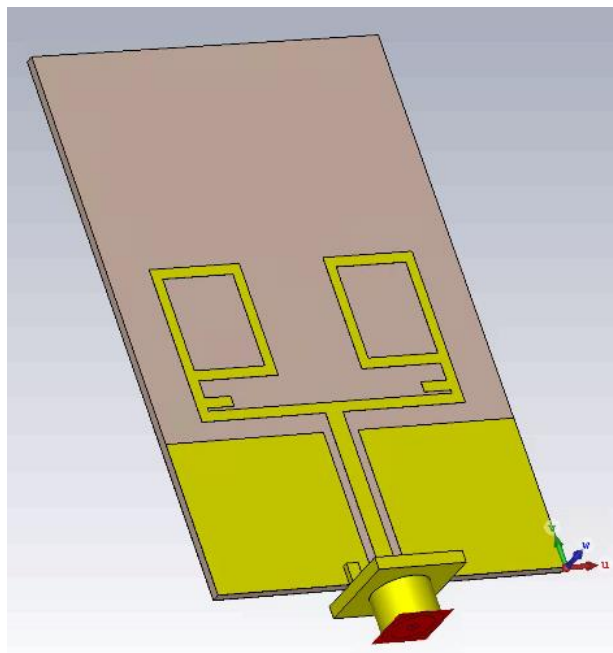
docílili lepšího impedančního přizpůsobení a posunutí rezonančních frekvencí, bude potřeba následná úprava flíčku.



Obrázek 24 Frekvenční závislost činitele odrazu  $S_{11}$ (dB) dvoupásmové patch antény tvaru MFA1

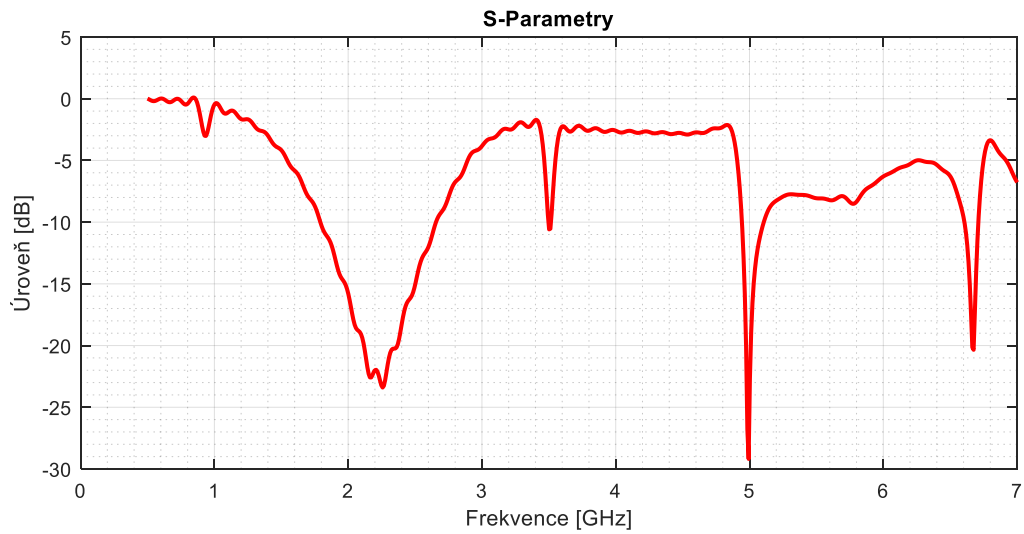
### 5.2.3 Optimalizace a simulace mikropáskové antény s flíčkem tvaru MFA1

Abychom docílili posunutí rezonančních kmitočtů na frekvence 2,4 a 5 GHz, bylo nutné provést optimalizaci. K tomu je možné využít funkci *Optimizer*, kterou Program CST Microwave studio disponuje. Ta na základě zadaných požadavků provede pomocí algoritmu výpočet, který určí nejvhodnější úpravy rozměrů. Zvětšením délky a šířky flíčku a zúžením meandru (viz Obr. 25) se docílilo posunutí rezonančních kmitočtů na požadované hodnoty, jak je k vidění na Obr. 26.



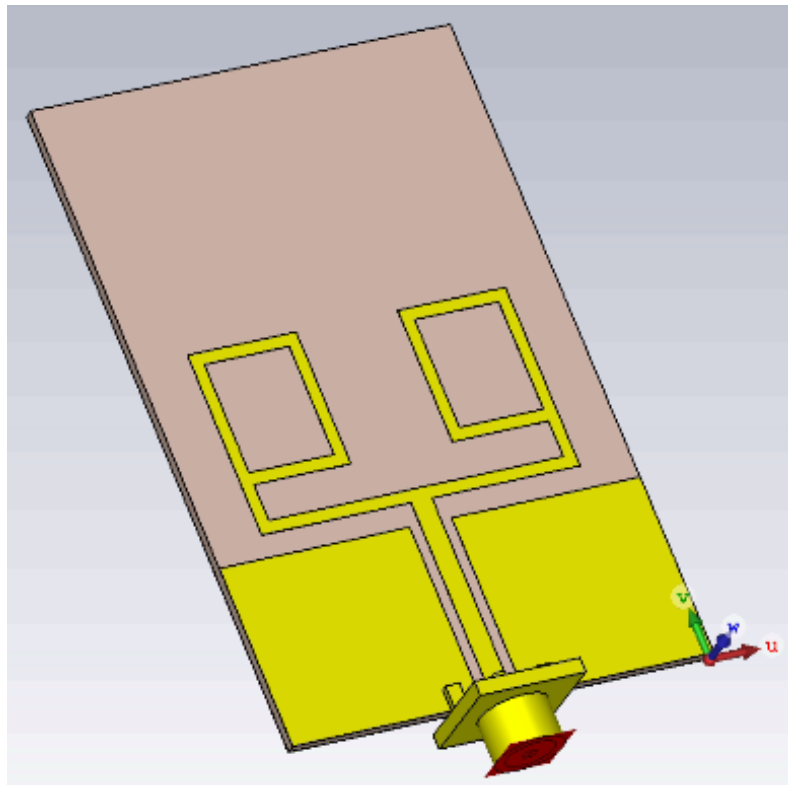
Obrázek 25 Optimalizace dvoupásmové mikropáskové antény pomocí funkce Optimizer

Z charakteristik  $S_{11}$  je patrné, že anténka je nyní impedančně přizpůsobená na 2,2 a 5 GHz. Na frekvenci 2,4 GHz je činitel odrazu  $S_{11}|_{(dB)} = -18,280 \text{ dB}$  a na 5 GHz  $S_{11}|_{(dB)} = -24,752 \text{ dB}$ , což splňuje požadavky na vyzářený výkon.



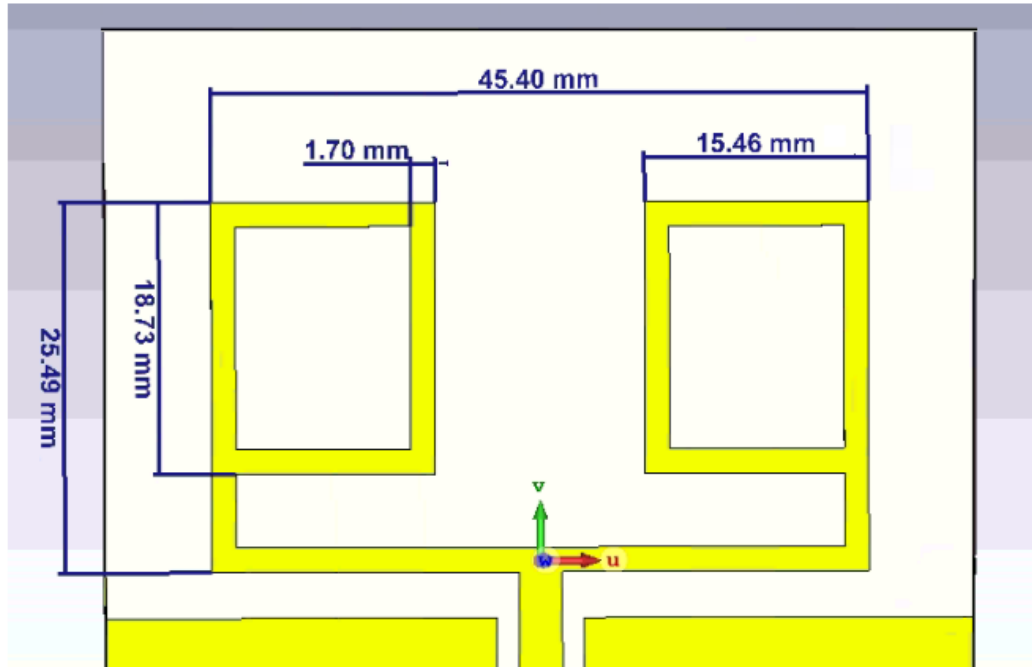
Obrázek 26 Frekvenční závislost činitele odrazu  $S_{11}|_{(dB)}$  dvoupásmové patch antény po optimalizace funkcí Optimizer

Jak je k vidění výše na Obrázku 24, vzor flíčku je poměrně atypický. Pokud se odstraní výčnělky na páscích vedoucích od napájecího mikropásku k „obdélníkům“ na konci vidlice (viz Obr. 26), pak tvar flíčku připomíná *fork-shaped* anténu, která je znázorněna na Obrázku 21 varianta a). Rozdíl mezi standardní *fork-shaped* anténou a návrhem anténky na Obr. 27 je v zakončení vidlice.



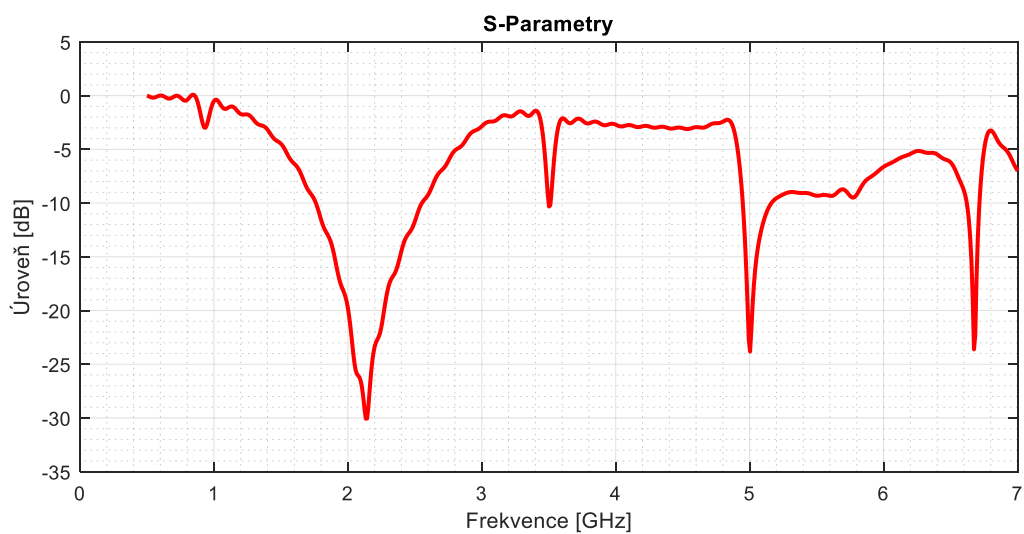
Obrázek 27 Manuální optimalizace dvoupásmové mikropáskové antény

Na Obr. 28 jsou vyznačené rozměry flíčku po optimalizaci. Z výsledků je patrné, že oproti návrhu mikropáskové antény s flíčkem tvaru MFA (viz Obr. 22 a Obr. 23) je vzor (meandr) patche téměř o polovinu užší. Délka a šířka patche se zvětšila, ale stejně tak mezera mezi jednotlivými vidlicemi. Největší změnou je zakončení vidlice, kde nyní má tvar obdélníku, zatímco předchozí návrh měl zakončení typu spirály („Meandered“ fork-shaped antenna).



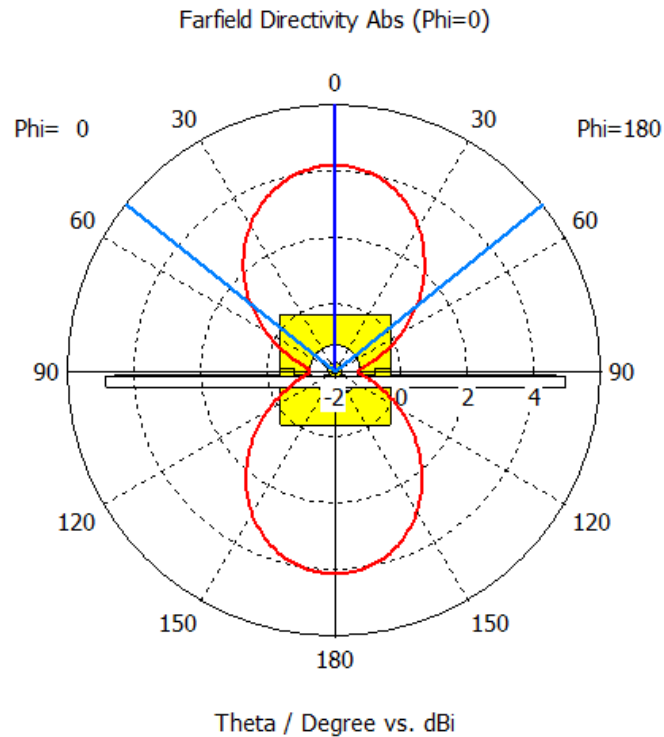
Obrázek 28 Rozměry návrhu dvoupásmové mikropáskové antény s modifikovaným flíčkem

Následná úprava spočívající v odstranění výčnělků se provedla se manuálně a došlo k posunutí a „vyhlazení“ lokálního minima na frekvenci 2,14 GHz, jak je patrné z charakteristik  $S_{11}$ . Činitel odrazu na 2,4 GHz je nyní roven  $S_{11}(\text{db}) = -14,45 \text{ dB}$  a na 5 GHz  $S_{11}(\text{db}) = -23,462 \text{ dB}$ .

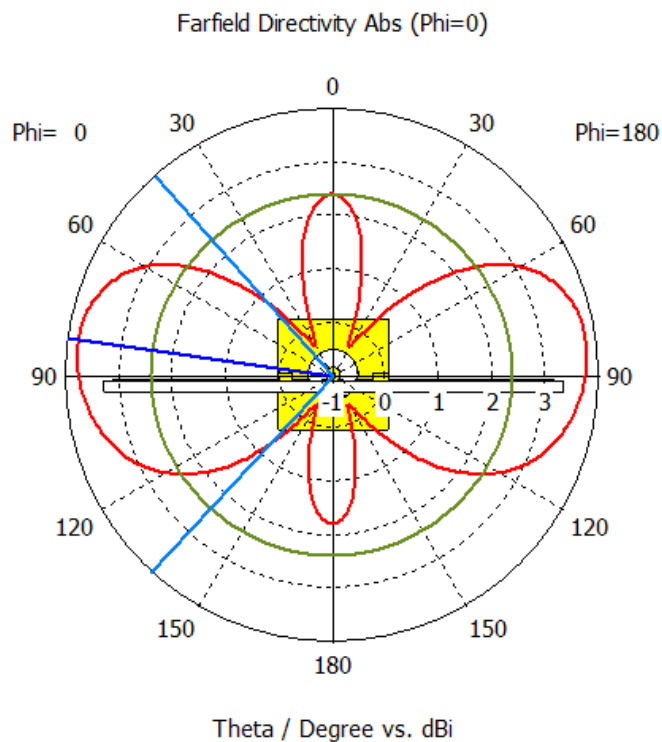


Obrázek 29 Frekvenční závislost činitele odrazu  $S_{11}(\text{db})$  manuálně optimalizované dvoupásmové patch antény

Ze směrových charakteristik znázorněných na Obr. 28 a Obr. 29 vyplývá, že na frekvenci 2,4 GHz anténka vyzařuje v hlavním a zpětném vyzařovacím svazku stejnou intenzitou. Naopak na frekvenci 5 GHz vyzařuje největší intenzitou v postranních lalokách. K dosažení požadované šířky vyzařovacího svazku 3dB v azimutu  $120^\circ$  a v elevaci  $60^\circ$  je možné využít reflektor.



Obrázek 30 Směrové charakteristiky patch antény s modifikovaným flíčkem v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz



Obrázek 31 Směrové charakteristiky patch antény s modifikovaným flíčkem v polárních souřadnicích na frekvenci 5 GHz

#### 5.2.4 Návrh reflektoru pro mikropáskovou anténu s modifikovaným flíčkem

Aby se docílilo splnění požadavků na směrovost anténky a maximalizoval se vyzářený výkon v dopředném směru, je možné využít funkci reflektoru. Jde o kovový profil několik milimetrů široký, který je ve vzdálenosti přibližně  $x = 0,2 \div 0,4 \cdot \lambda$  vložen za vysílací anténku směrem ke straně, kde je zemnicí rovina. Tím minimalizujeme vyzářený výkon tím směrem, neboť se signál reflektuje a většina výkonu se vyzáří převážně ve směru hlavního vyzářovacího laloku. Umístění reflektoru lze spočítat ze vzorce:

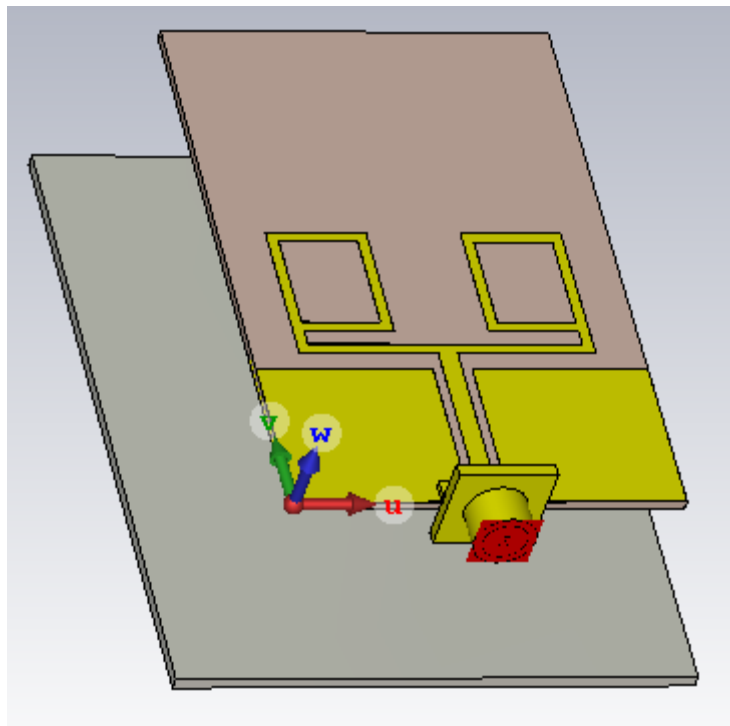
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5.1)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $c$  je rychlost světla ve vakuu a  $f$  je příslušná rezonanční frekvence.

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{2,4 \cdot 10^9} = 12,5 \text{ cm}$$

Reflektor je tedy umístěn ve vzdálenosti  $x = 30 \text{ mm}$  od anténky.

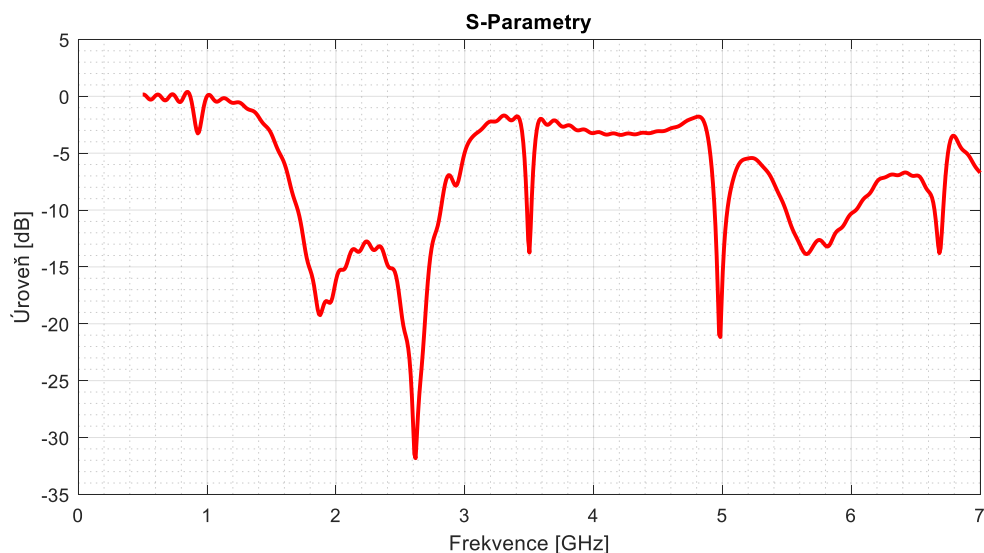
Výsledný návrh je zobrazený níže na Obrázku 32, přičemž reflektor má obdélníkový tvar a je umístěn rovnoběžně s patch anténou. Jeho rozměry jsou  $80 \times 100 \times 2 \text{ mm}$ .



Obrázek 32 Návrh reflektoru dvoupásmové mikropáskové antény s modifikovaným flíčkem

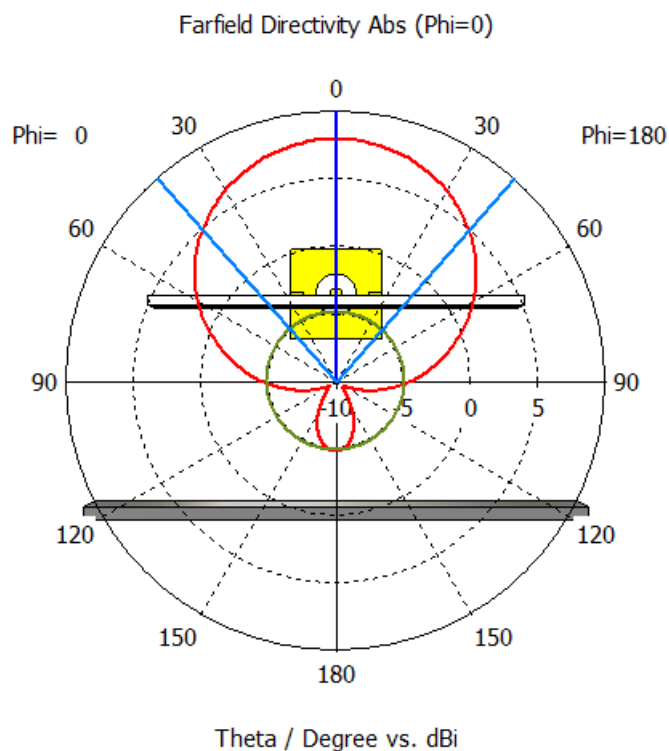
Umístění reflektoru posunulo rezonanční kmitočet z 2,14 GHz na frekvenci 2,62 GHz, jak je patrné z charakteristik  $S_{11}$  (Obr. 33). Činitel odrazu se pro 2,4 GHz téměř nezměnil, zatímco pro 5 GHz se dokonce zvýšil ( $S_{11|(\text{db})} = -16,289 \text{ dB}$ ).





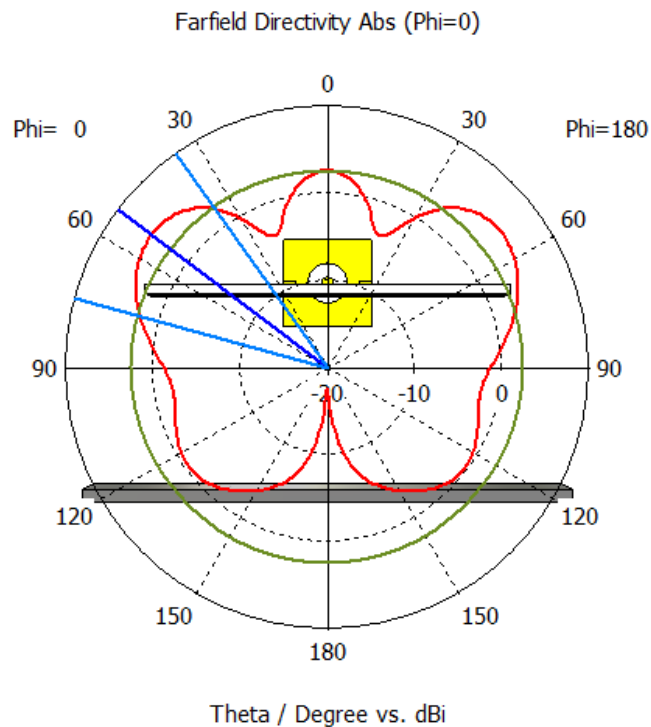
Obrázek 33 Frekvenční závislost činitele odrazu  $S_{11}$ (dB) dvoupásmové patch antény s modifikovaným flíčkem a reflektorem

Z porovnání směrových charakteristik antén bez reflektoru a s reflektorem na vyzářovací frekvenci 2,4 GHz znázorněných na Obr. 30 a Obr. 34 je patrné, že signál vyzářující ve zpětném laloku je nyní díky použití reflektoru oproti signálu vyzářenému v dopředném směru minimální. Šířka svazku v azimutální rovině je přibližně  $85^\circ$  což je o trochu méně než je požadovaná hodnota. Ovšem pokles průběhu hlavního laloku je velice pozvolný, tedy požadované hodnotě  $120^\circ$  odpovídá pokles vyzářeného výkonu o přibližně 5,5 dB. A vzhledem k tomu, že tyto postranní části hlavního laloku se budou pro komunikaci s okolní infrastrukturou využívat pouze na velmi krátkou vzdálenost, tak tato drobná odchylka nepředstavuje žádný problém. Směrnost antény tedy odpovídá požadavkům.



Obrázek 34 Směrové charakteristiky patch antény s modifikovaným flíčkem a reflektorem v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz

Zatímco umístění reflektoru pozitivně ovlivnilo směrové charakteristiky na 2,4 GHz, směrové charakteristiky na 5 GHz je potřeba ještě dále korigovat. Jak lze vidět na Obr. 35, nejvíce výkonu je nyní vyzářeno do bočních laloků přibližně pod úhlem 55° a do dopředného směru kolmého na anténu. Mezi těmito dvěma laloky ovšem dochází k nežádoucímu propadu a proto v další části práce bude navržena úprava reflektoru s cílem zlepšení tvaru vyzářovacího diagramu na této frekvenci.

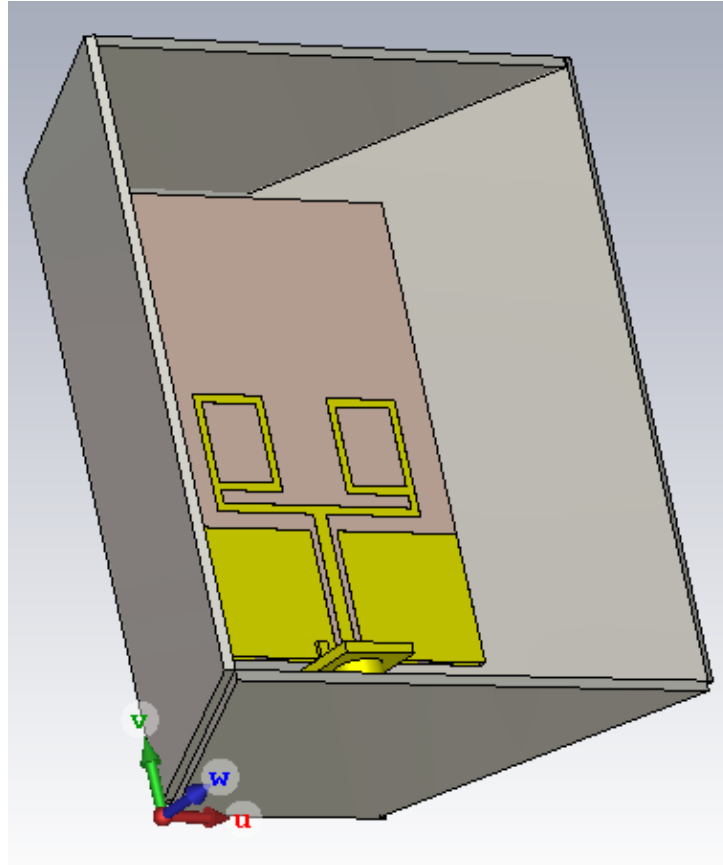


Obrázek 35 Směrové charakteristiky patch antény s modifikovaným fličkem a reflektorem v polárních souřadnicích na frekvenci 5 GHz

### 5.2.5 Výsledný návrh a simulace dvoupásmové mikropáskové antény

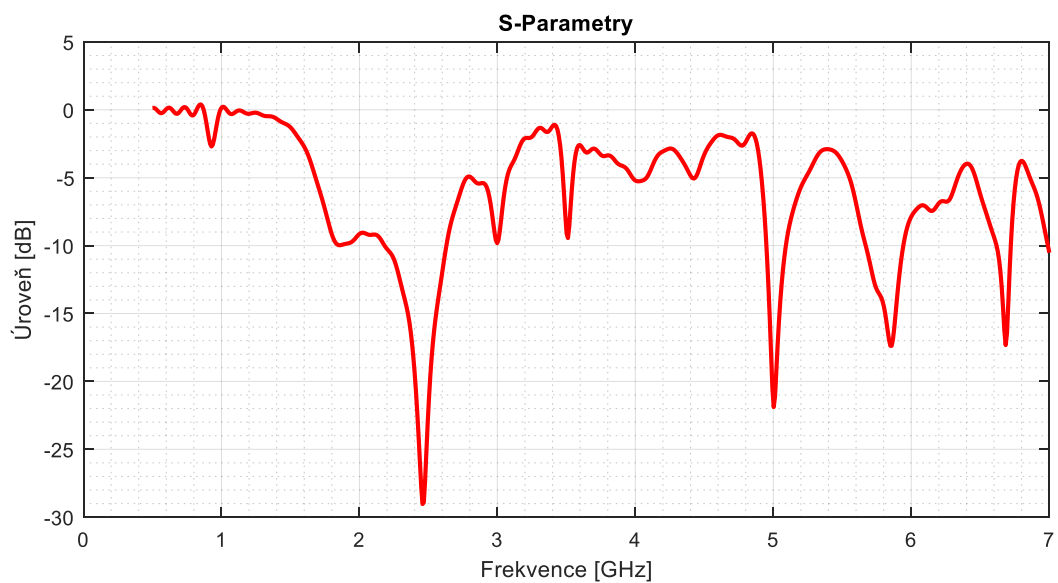
K zlepšení směrovosti antény na frekvenci 5 GHz lze opět využít funkci reflektorů. Ty se umístí do příslušných míst kolem antény a tím lze regulovat směr vyzářování. Na základě provedených analýz je nutné přidat i reflektory kolem antény do patřičné vzdálenosti tak, abychom byly schopny odrážet vyzářený výkon i v rovině horizontální a směřovat vyzářený signál převážně do azimutu v rozpětí 120°

Toho lze docílit vložení dvou reflektorů po stranách antény v úhlu 45° a dvou reflektorů nad a pod anténou, viz níže návrh na Obrázku 36.



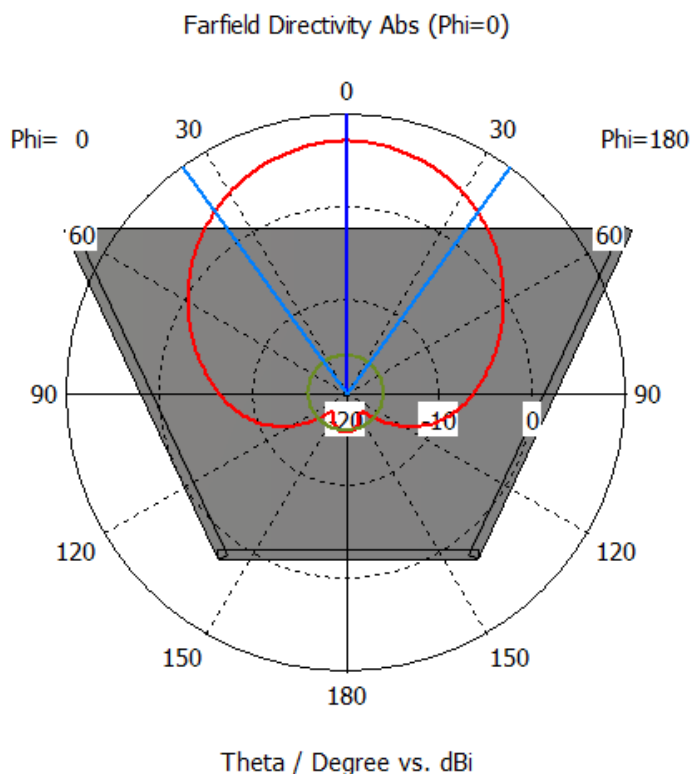
Obrázek 36 Návrh umístění reflektorů dvoupásmové mikropásmové antény s modifikovaným fličkem

Touto úpravou se dosáhlo výrazného zlepšení anténních parametrů. Činitel odrazu na frekvenci 2,4 GHz je roven  $S_{11}|_{(db)} = -19,348 \text{ dB}$ , přičemž při  $S_{11}|_{(db)} = -15 \text{ dB}$  je šířka pásma 2,35 – 2,55 GHz. Na frekvenci 5 GHz je činitel odrazu roven  $S_{11}|_{(db)} = -21,458 \text{ dB}$  a při poklesu o 15 dB je frekvenční pásmo široké 4,975 – 5,05 GHz. Podmínka šířky pásma alespoň 50 MHz je tedy splněna pro oba rezonanční kmitočty.

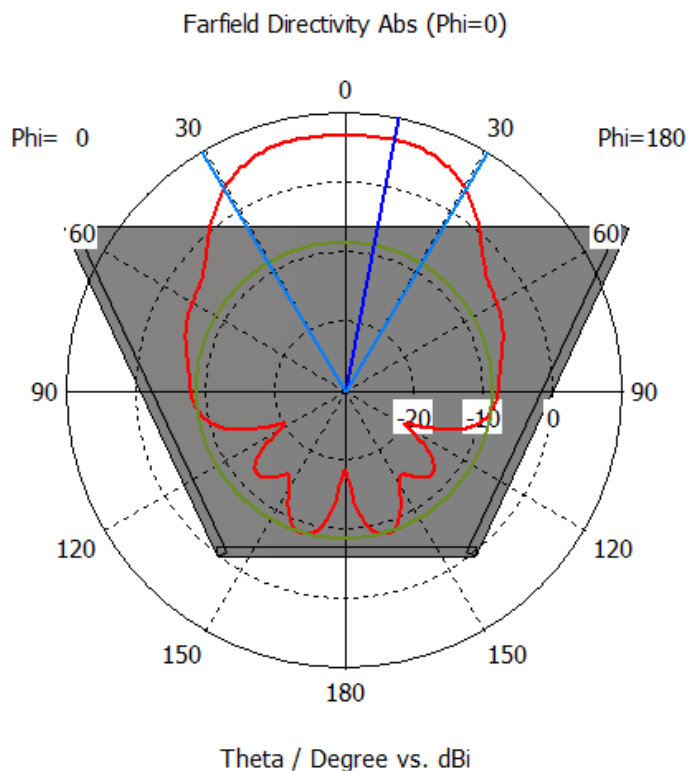


Obrázek 37 Frekvenční závislost činitele odrazu  $S_{11}|_{(db)}$  dvoupásmové patch antény s modifikovaným fličkem a reflektory

Ze směrových charakteristik na Obr. 38 a Obr. 39 je patrné, že vysílaný svazek je trošičku užší, než je požadovaná hodnota  $120^\circ$ . Avšak za předpokladu, že nejvíce signálu potřebujeme vysílat a přijímat v ose antény, kdy se komunikační bod na okolní infrastrukturu může nacházet nejdále od této antény, to není až takový problém.



Obrázek 38 Směrové charakteristiky dvoupásmové patch antény s reflektory v polárních souřadnicích na frekvenci 2,4 GHz

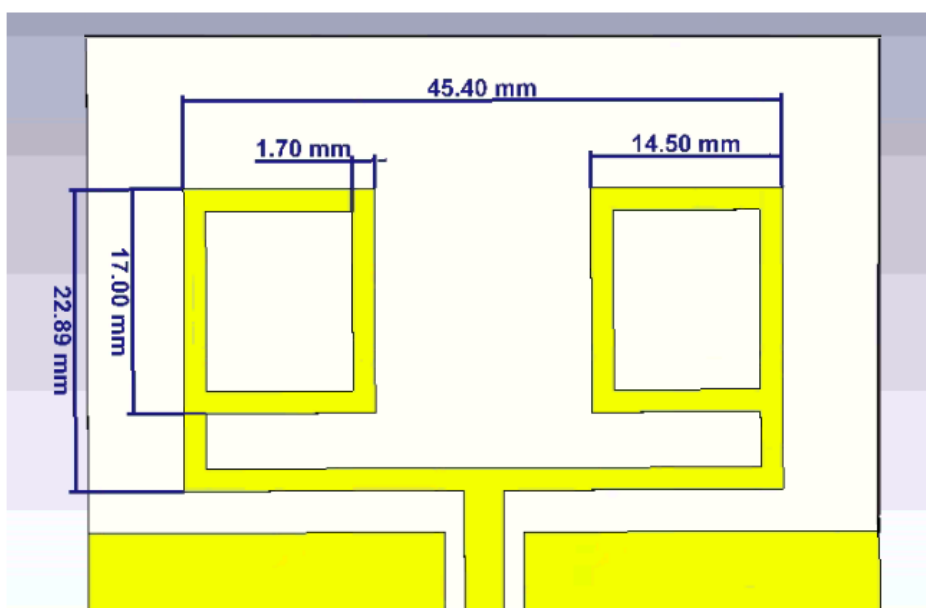


Obrázek 39 Směrové charakteristiky dvoupásmové patch antény s reflektory v polárních souřadnicích na frekvenci 5 GHz

## 6. OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ NA ZHOTOVENÉM VZORKU

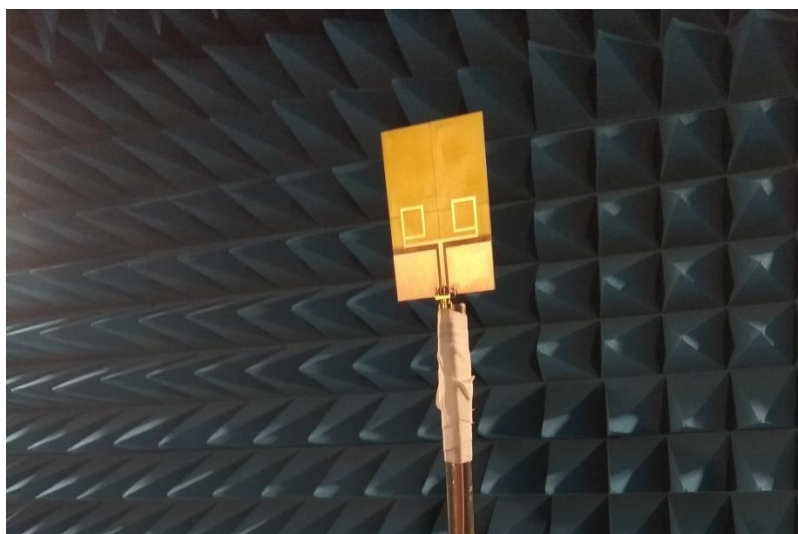
Pro účely ověření simulovaných parametrů dvoufrekvenční antény byl zhotoven její upravený vzorek. Tato úprava spočívala ve změně substrátu. Mikrovlnný substrát ROGERS RO4350B o tloušťce 1,524 mm byl nahrazen substrátem FR4 o tloušťce 1,5 mm, kterým fakulta disponuje. Jelikož oba substráty mají rozdílnou hodnotu relativní permitivity, bylo nutné provést korekci v rozměrech navržené antény.

Na následujícím Obrázku 40 je zobrazen simulační návrh této antény včetně jejich základních rozměrů. Anténa byla vzhledem k aktuálním omezeným možnostem výroby zhotovena bez reflektoru, tudíž v dalších částech své práce budu porovnávat výsledky simulací samostatné antény bez reflektoru s výsledky ověřovacích měření bez reflektoru.



Obrázek 40 Návrh dvoupásmové mikropáskové antény ze substrátu FR4

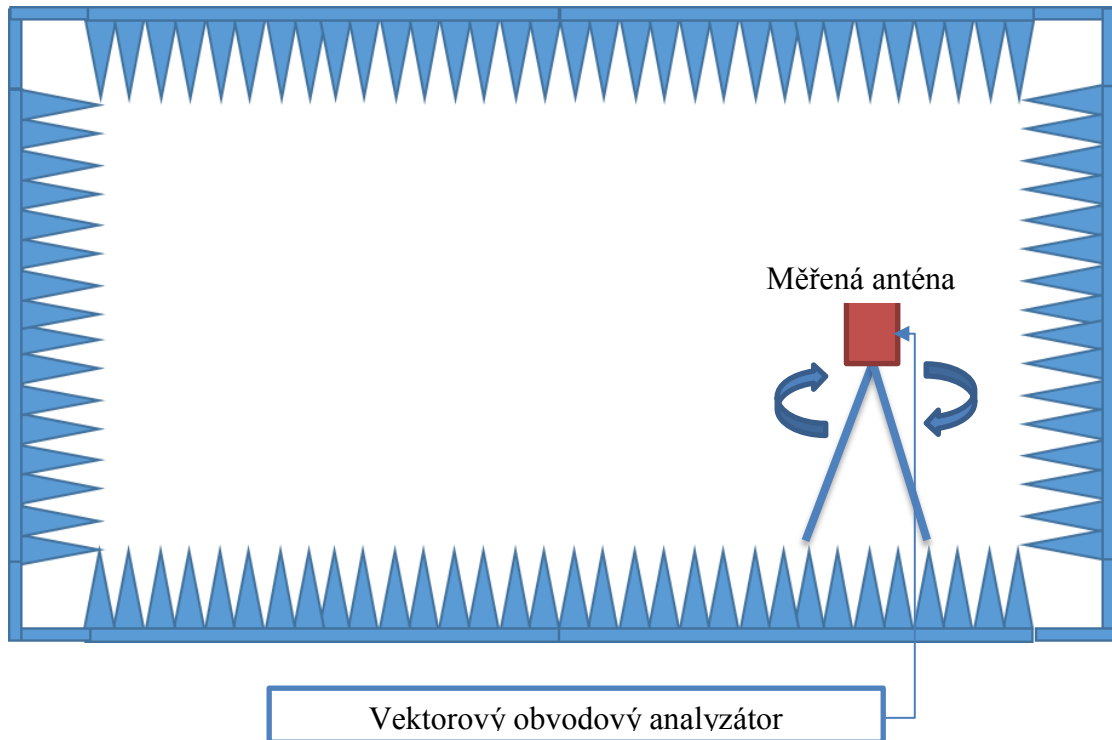
Výše uvedená anténa byla následně zhotovena, výsledný vzorek antény pro měření je na následujícím obrázku.



Obrázek 41 Zhotovená dvoupásmová mikropásková anténa ze substrátu FR4

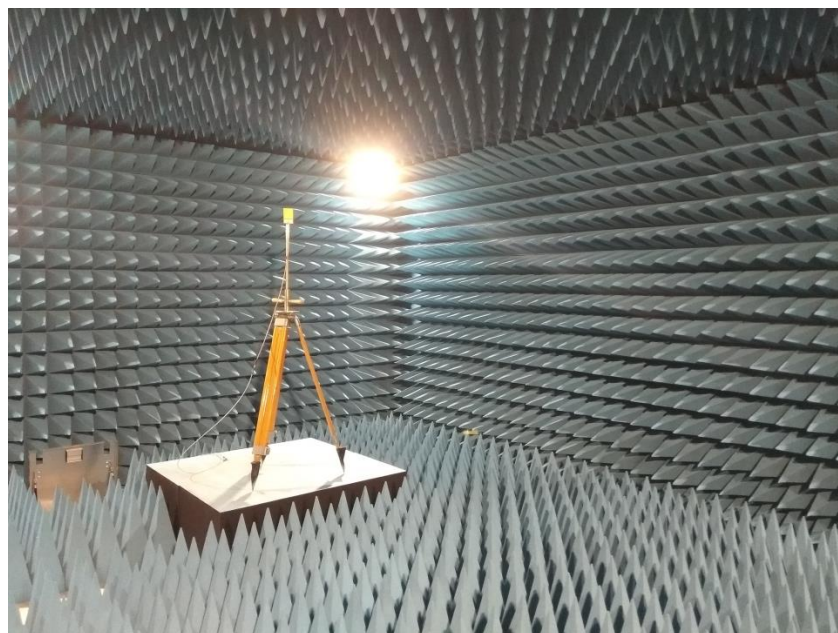
## 6.1 Měření impedančního přizpůsobení

Měření impedančního přizpůsobení probíhalo v bezodrazové komoře. Anténa byla umístěna na stativu a směřována hlavním svazkem směrem do volného prostoru bezodrazové komory. Toto měření bylo provedeno s využitím vektorového obvodového analyzátoru R&S®ZNB20. Vektorový obvodový analyzátor měřil velikost odraženého signálu na vstupu anténního systému v rozsahu  $1,5 \div 6$  GHz.



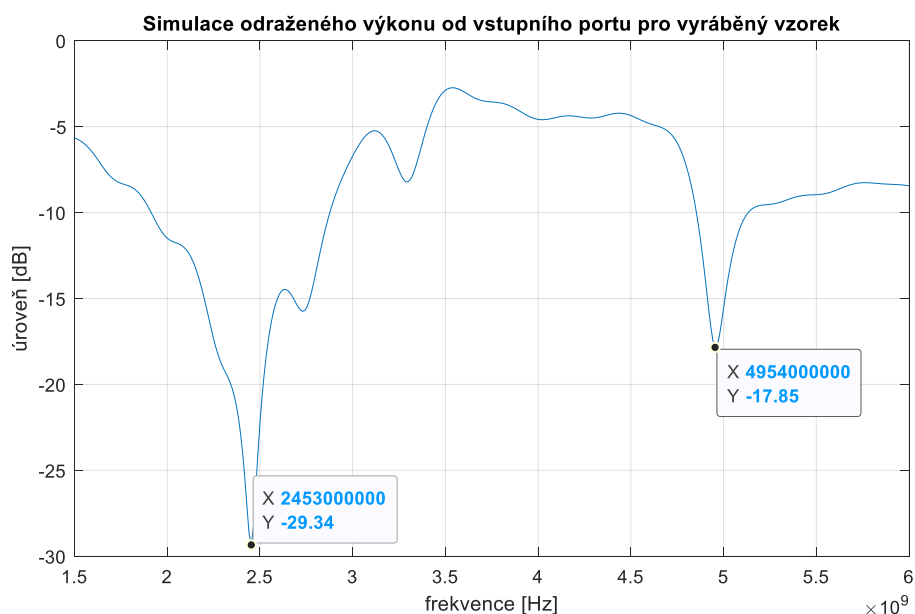
Obrázek 42 Blokové schéma měřícího pracoviště pro měření impedančního přizpůsobení

Následující fotografie vystihuje pracoviště pro měření antén na FEI UPCE.



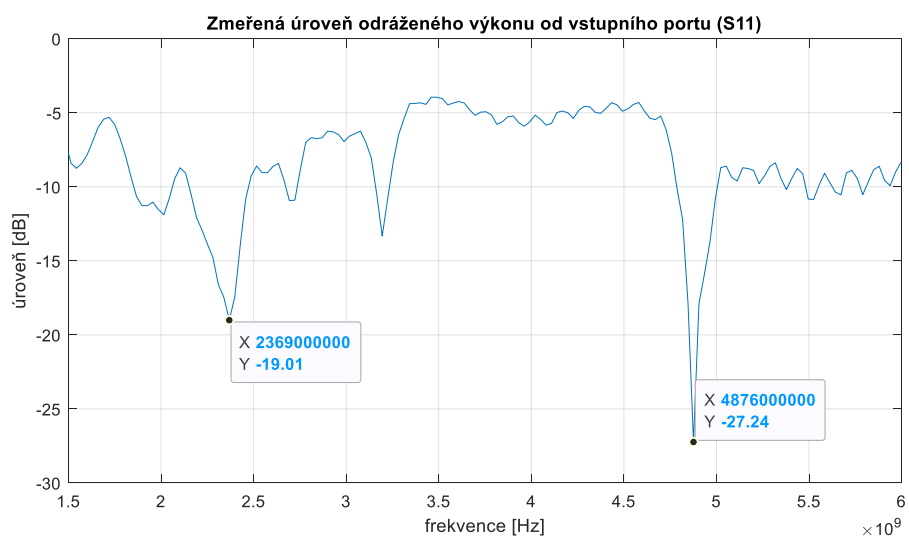
Obrázek 43 Fotografie pracoviště pro měření impedančního přizpůsobení

Následující Obrázek 44 ukazuje simulovanou závislost odraženého výkonu od vstupního portu antény na frekvenci, Jsou zde velice dobře patrná dvě minima na frekvenci 2,45 GHz a na frekvenci 4,95 GHz, přičemž pokud budeme považovat jako podmínku vhodného impedančního přizpůsobení hodnotu odraženého výkonu pod úroveň -10 dB, a požadovanou šířku pásma antény na obou kmitočtech 50 MHz, je z tohoto obrázku zřejmé, že navržená simulovaná anténa tyto požadavky splňuje.



Obrázek 44 Závislost odraženého výkonu od vstupního portu antény na frekvenci

Na následujícím Obrázku 45 je vynesena graf změřené závislosti odraženého signálu na vstupním portu antény na frekvenci. Porovnáním s Obr. 43 je patrná velmi dobrá shoda obou průběhů. Z výsledků je patrné, že došlo k drobnému frekvenčnímu posuvu, přibližně o 60 MHz, tento posuv může být způsoben odchylkou relativní hodnoty permitivity substrátu od hodnoty udávané výrobcem. Pro ověřovací měření ovšem tento drobný posuv není podstatný a lze shrnout, že změřený průběh velikosti odraženého výkonu od vstupního portu antény velice dobře odpovídá očekávaným hodnotám.



Obrázek 45 Frekvenční závislost činitele odrazu S11(db) dvoupásmové patch antény s modifikovaným fličkem

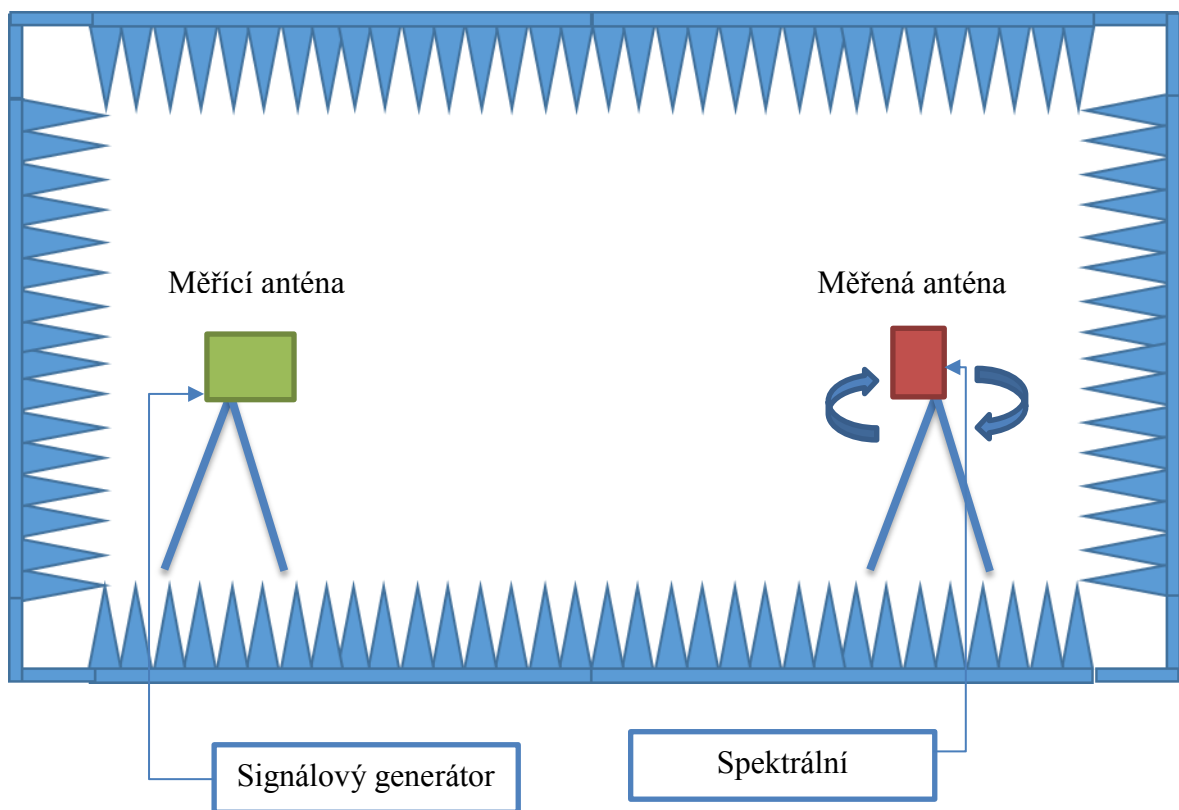


## 6.2 Měření vyzářovacího diagramu

Při tomto měření byla anténa umístěna na otočném anténním stavivu, který umožňoval pevné zafixování v elevační rovině a zároveň plynulé otáčení v azimutální rovině. Výstup z antény byl přiveden k signálovému analyzátoru. Druhá anténa, která byla měřicí, byla umístěna na fixní stavivě a byla připojena k signálovému generátoru, který generoval potřebný harmonický signál s kmitočtem 2,4 a následně 5 GHz. Tato anténa ozařovala rovnoměrně měřenou anténu, přičemž vzdálenost mezi těmito anténami byla 4,5 m a obě antény byly umístěny v bezodrazové komoře – viz Obr. 46. S měřenou anténou bylo plynule otáčeno a byla zaznamenávána úroveň přijímaného signálu pro jednotlivá natočení – úhly v azimutální rovině. Pro měření byly použity následující přístroje:

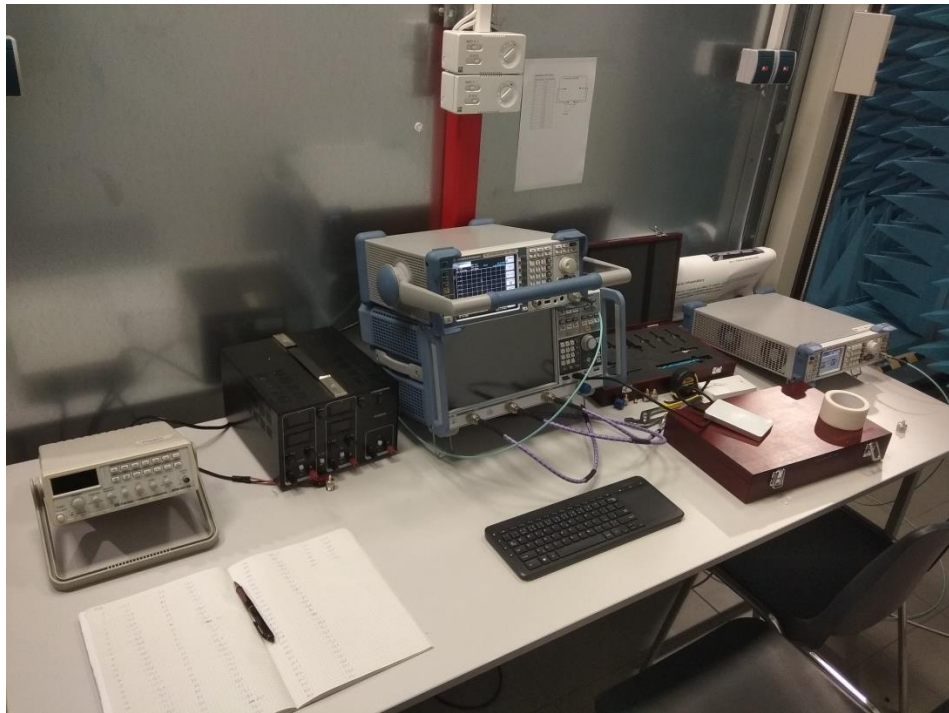
- Anténní sada R&S®HE300, s logaritmicko periodickou anténou 0,5 GHz až 7,5 GHz
- Spektrální analyzátor R&S®FSL6
- Signálový generátor R&S®SMB100A

Blokové schéma měřícího pracoviště je na obrázku 1.



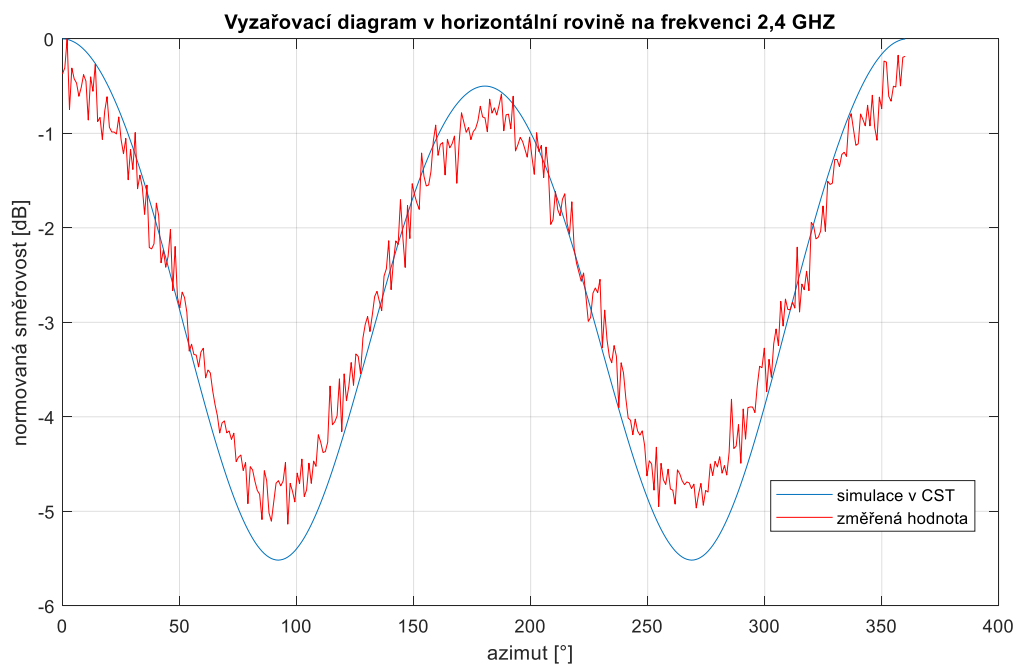


Na následující fotce je zachyceno pracoviště pro měření vyzařovacího diagramu antény.



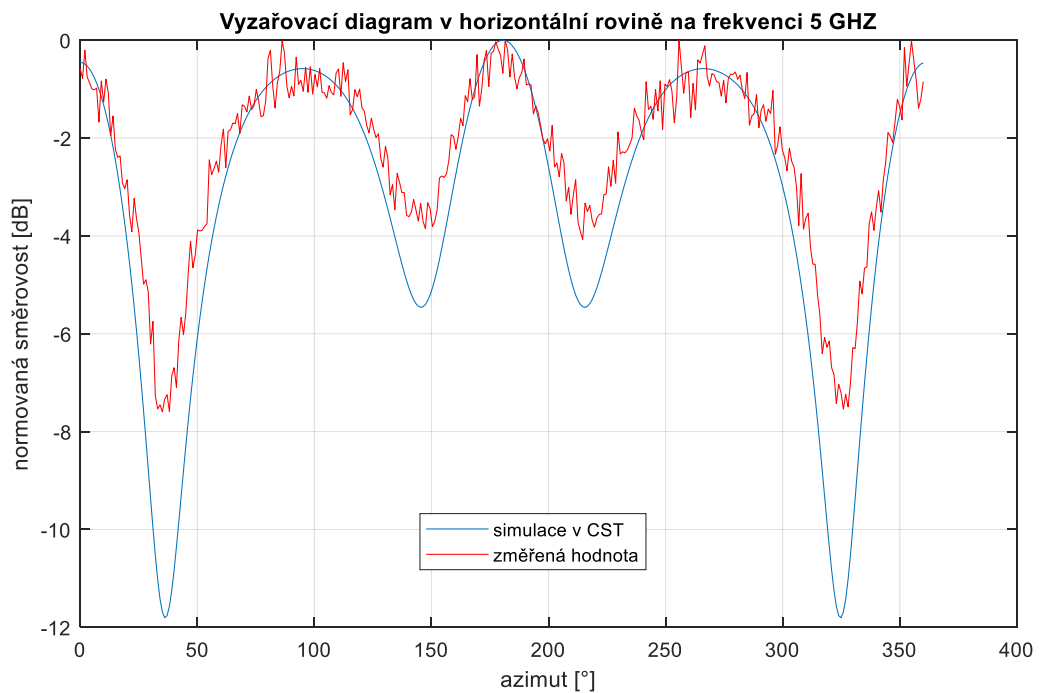
Obrázek 47 Fotografie pracoviště pro měření vyzařovacího diagramu antény

Na následujícím Obr. 48 jsou vyneseny dva průběhy. Modře je zde vynesena horizontální řez simulovanou vyzařovací charakteristikou anténního vzorku na frekvenci 2,4 GHz, červeně je zde pak vynesena průběh změřeného vyzařovacího diagramu. Nulová hodnota azimutu odpovídá ose vyzařování antény v dopředném směru. Naopak hodnota 180° odpovídá vyzařování v zadní ose antény. Porovnáním obou vynesných průběhů je zřejmá velice dobrá shoda.



Obrázek 48 Vyzařovací diagram v horizontální rovině na frekvenci 2,4 GHz

Další Obrázek 49 ukazuje porovnání simulovaného a měřeného horizontálního vyzařovacího diagramu na frekvenci 5 GHz. Opět tyto výsledky prokazují velice dobrou shodu a dá se tedy konstatovat, že zhotovený anténní vzorek velice dobře odpovídá simulačnímu modelu.



Obrázek 49 Vyzařovací diagram v horizontální rovině na frekvenci 5 GHz

Z prezentovaných výsledků je zřejmá velice dobrá shoda simulovaného modelu dvoufrekvenční antény s realizovaným vzorkem. Je patrné, že pro dosažení požadovaného tvaru anténního diagramu v dopředném směru je nutné anténu doplnit vhodným reflektorem, který byl navržen a popsán v předchozí kapitole této práce.

## ZÁVĚR

Tato práce nejprve popisuje základní parametry anténních prvků, následně je proveden teoretický rozbor základních patch anténních struktur, přičemž jsou porovnány různé metody napájení těchto prvků.

V rámci praktické části této práce byla nejprve navržena patch anténa na frekvenci 2,4 GHz, jejíž počítačový model by sestaven v programu CST Microwave Studio, kde byl též následně optimalizován s cílem zlepšit impedanční přizpůsobení antény na zájmové frekvenci. Na tento model byly aplikovány dva možné přístupy napájení tohoto elementu. Jednak mikropáskové napájení a jednak napájení koaxiální sondou. Na základě porovnání obou výsledků bylo pro další využití vybráno napájení mikropáskem.

Následně byla provedena úprava tohoto výchozího anténního prvku na dvoufrekvenční řešení, které bylo dále optimalizováno v programu CST MW Studio. Pro dosažení požadovaného tvaru vyzařovacího diagramu především v azimutální rovině byl navržen a optimalizován anténní reflektor z vodivého materiálu. Z výsledků je zřejmé, že vysílaný svazek je trošičku užší než byla požadovaná hodnota  $120^\circ$ . Nicméně toto zúžení přibližně na  $80^\circ$  není systémově kritické, jelikož nejvíce signálu potřebujeme vysílat a přijímat v ose antény, kdy se komunikační bod na okolní infrastruktuře může nacházet nejdále od této antény. V případě, že budeme využívat boční části hlavního anténního laloku, se komunikační bod okolní infrastruktury nachází výrazně blíže, tudíž není již nutné vysílat a přijímat s tak velkou směrovostí antény. Tedy dá se shrnout, že simulovaná a optimalizovaná anténa s aplikovaným reflektorem splňuje jak požadavky na impedanční přizpůsobení, tak na tvar vyzařovacího diagramu v obou frekvenčních pásmech.

Pro ověření správnosti návrhu byl zhotoven vzorek této antény. Byla provedena korekce návrhu na dostupný substrát FR4, který má sice horší vysokofrekvenční parametry a nestálou hodnotu relativní permitivity, ovšem pro ověření konceptu návrhu je naprosto dostačující. Pro tuto úpravu musela být provedena opětovná optimalizace celé anténní struktury. Tento vzorek byl následně zhotoven a podroben ověřovacím měřením v bezodrazové komoře. Nejprve bylo provedeno měření impedančního přizpůsobení. Porovnáním naměřených výsledků s daty obdrženými simulací je prokázána velká shoda simulačního modelu s reálným vzorkem. Dá se říct, že po této stránce je vzorek vhodný pro další využití. Nepatrný frekvenční posuv nepředstavuje zásadní problém a bude jej možné korigovat v návrhu dalšího anténního vzorku. Dále byla anténa podrobena měření horizontálního vyzařovacího diagramu. Porovnáním těchto měření se simulovaným průběhem je i v tomto případě zřejmá velká shoda výsledků. Je tedy možné shrnout, že vyrobený vzorek dobře odpovídá simulačnímu modelu. Vzhledem k časovým a výrobním možnostem už ovšem nebylo možné zhotovit navržený anténní reflektor a provést testování i s ním. Toto může být námět na další postup v této práci. V dalším pokračování mé práce bych také rád provedl ověření vlivu zástavby antény na střeše hnacího kolejového vozidla metra, kde bych mohl testovat vliv okolní zástavby a infrastruktury na impedanční přizpůsobení a případně i tvar vyzařovacího diagramu navržené dvoupásmové antény.

Závěrem se dá shrnout, že bakalářská práce naplnila stanovené cíle a její řešení bylo úspěšné.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BRTNÍK, Bohumil. *Teoretická elektrotechnika*. Praha: BEN - technická literatura, 2017. ISBN Teoretická elektrotechnika.
- [2] SMUTNÝ, Martin. *Anténa pro impulzní širokopásmový signál*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Petr Drexler.
- [3] MAZÁNEK, Miloš, Jaroslav VOKURKA a Pavel PECHAČ. *Antény a šíření vln*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1855-5.
- [4] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény: encyklopedická příručka*. 3., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0166-7.
- [5] *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*. Revision. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993. ISBN 978-0-7381-8927-7.
- [6] STUTZMAN, Warren L. a Gary A. THIELE. *Antenna theory and design*. 2nd ed. New York: J. Wiley, c1998. ISBN 04-710-2590-9.
- [7] HALM, Martin. *TECHNICKÝ VÝPOČET ZÁŘENÍ SOUSTAV LINEÁRNÍCH ANTÉN*. Brno, 2010. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Michal Pokorný.
- [8] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005. ISBN 978-0-471-66782-7.
- [9] Základy vyzařování elektromagnetických vln. [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://www.bakal06.chytrak.cz/37---Anteny.pdf>
- [10] HEBELKA, Vladimír. *ŠIROKOPÁSMOVÁ ANTÉNA PRO PÁSMO OD 5 GHZ DO 10 GHZ*. Brno, 2009. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Zdeněk Řezníček.
- [11] JANEČKA, Radek. *Rozbor vlastností anténních prvků typu patch*. Pardubice, 2016. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Vadim Závodný.
- [12] MAZÁNEK, Miloš a Pavel PECHAČ. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3032-6.
- [13] HEJNÁ, Eva. *Návrh a optimalizace flíčkové anténní řady*. Plzeň, 2013. Bakalářská. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jan Mráz.
- [14] ŠEBESTA, Jiří. *Vícepásmová flíčková anténa*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Petr Všetula.
- [15] MIKULÁŠEK, Tomáš. *Dvoupásmová anténa pro globální navigační satelitní systém*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jaroslav Láčík.

- [16] RAIDA, Zbyněk. Vícepásmové flíčkové antény. [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=4-6-A>
- [17] BARSUKOV, Kirill. *Malé víceprvkové antény pro vícepásmový nebo širokopásmový provoz*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Marek Dvorský.
- [18] SYROVÝ, Jiří. *Planární anténa s vícepásmovou zemní deskou*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jaroslav Láčík.
- [19] MILLIGAN, Thomas A. *Modern antenna design*. 2nd edition. New Jersey: John Willey, 2005. ISBN 978-0-471-45776-3.
- [20] RAIDA, Zbyněk. Plošné antény. [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lectures/B\\_ANT\\_09b.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lectures/B_ANT_09b.pdf)
- [21] *DBi – energetický zisk izotropní antény: Technický slovník* [online]. In: [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: [https://shopdelta.eu/dbi-energeticky-zisk-izotropni-anteny\\_18\\_aid836.html](https://shopdelta.eu/dbi-energeticky-zisk-izotropni-anteny_18_aid836.html)

## **PŘÍLOHY**

Příloha A – Simulační modely z aplikace CST Microwave studio