



# 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

# KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ ANTÉNA INTEGROVANÁ DO 3D PLETENINY

CIRCULARLY POLARIZED ANTENNA INTEGRATED INTO 3D KNITTED FABRIC

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ladislav Drápal

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Ladislav Drápal

**ID:** 223285

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Kruhově polarizovaná anténa integrovaná do 3D pleteniny**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s koncepcí kruhově polarizované antény se zkratovanými hranami, která byla navržena na pracovní frekvenci 5,8 GHz [1]. Vytvořte numerický model antény a její parametry porovnejte s referenční flíčkovou kruhově polarizovanou anténou. Zamyslete se nad možností realizace obou typů antén sítotiskem na trojrozměrnou pleteninu.

Oba typy antén optimalizujte pro práci v ISM pásmu 2,4 GHz. Pro výrobu antén využijte pleteninu SINTEX 3D097 ( $h = 2.6$  mm,  $\epsilon_r = 1.22$ ). Povrch pleteniny pokryjte ochrannou fólií ( $\epsilon_r = 2.1$ ,  $h = 0.08$  mm), která vyhladí nerovnosti pleteniny a zamezí prosakování stříbrné pasty při sítotisku. Vlastnosti antén proměřte a vzájemně je porovnejte.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] TIANMING YANG; ZHIQIN ZHAO; DEQIANG YANG; ZAIPING NIE; A single-layer circularly polarized antenna with improved gain based on quarter-mode substrate integrated waveguide cavities array. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, vol. 19, no 12, p. 2388-2392. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3033621

[2] CUPAL, M.; RAIDA, Z. Circularly polarized substrate integrated textile antenna for ISM band 24 GHz. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Verona (Italy): IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICEAA.2017.8065472

**Termín zadání:** 11.2.2022

**Termín odevzdání:** 1.6.2022

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Bakalářská práce popisuje kruhově polarizovanou planární anténu s pracovní frekvencí 5,8 GHz, která byla publikovaná v [1]. Pro anténu byl vytvořen numerický model v ANSYS HFSS, a byla ověřena správnost publikovaných parametrů. Anténa [1] má relativně komplikovanou geometrii. Aby byla prokázána její smysluplnost, byl vytvořen numerický model kruhově polarizované flíčkové antény s pracovní frekvencí 5,8 GHz, publikované v [2]. Simulované průběhy kruhově polarizovaných antén byly mezi sebou porovnány. Bylo ukázáno, že anténa [1] vykazuje lepší směrovost a vyšší zisk ve směru hlavního laloku. Poté byly obě antény optimalizovány pro pásmo 2,4 GHz a textilní substrát. Ukázalo se, že flíčková anténa na nižší frekvenci a textilním substrátu má větší zisk a lepší směrovost než anténa [1]. Obě antény byly vyrobeny pomocí měděné fólie. Kruhově polarizovaná planární anténa [1] byla navíc vyrobená sítotiskem, aby se podařilo dosáhnout lepších parametrů. Měření kruhově polarizovaných antén ukázalo, že nejlepší parametry vykazuje flíčková anténa [2]. Planární antény [1] v oblasti kmitočtového pásma 2,4 GHz svou velikostí a složitostí na textilním substrátu neobstály.

## Klíčová slova

Kruhově polarizovaná planární anténa, flíčková anténa, pravotočivá polarizace, levotočivá polarizace, ANSYS HFSS, sítotisk, měděná fólie.

## Abstract

The thesis deals with the circularly polarized planar antenna with a working frequency of 5.8 GHz, which was published in [1]. For the antenna, a numerical model in ANSYS HFSS was created to verify the correctness of published parameters. The antenna [1] is of a relatively complicated geometry. In order to demonstrate sense of this geometry, a numerical model of a circularly polarized patch antenna with a working frequency of 5.8 GHz [2] was created. Simulated parameters of both the circularly polarized antennas were mutually compared. The antenna [1] was shown to exhibit a better directivity and a higher gain in the main lobe direction. Both the antennas were then optimized for the 2.4 GHz operation band and a textile substrate. Simulations showed that the patch antenna exhibits on a lower frequency and a textile substrate a higher gain and a better directivity. Both the antennas were manufactured by using a copper foil. The circularly polarized planar antenna [1] was additionally manufactured by screen printing to achieve better parameters. Measurement showed that the best parameters reach the patch antenna [2]. Planar antennas [1] in the 2.4 GHz frequency band did not meet the expectations by the size and complexity on the textile substrate.

## Keywords

Circularly polarized planar antenna, patch antenna, right-handed polarization, left-handed polarization, ANSYS HFSS, screen printing, copper foil.

## **Bibliografická citace**

DRÁPAL, Ladislav. *Kruhově polarizovaná anténa integrovaná do 3D pleteniny*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141498>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Ladislav Drápal
<b>VUT ID studenta:</b>	223285
<b>Typ práce:</b>	Bakalářská práce
<b>Akademický rok:</b>	2021/22
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Kruhově polarizovaná anténa integrovaná do 3D pleteniny

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: 1. června 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 1. června 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	8
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD .....	11
<b>1. ANTÉNY V PÁSMU KMITOČTŮ 5,8 GHZ.....</b>	<b>12</b>
1.1 TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1.1.1 <i>Kruhově polarizovaná planární anténa</i> .....	12
1.2 PRAKTICKÁ ČÁST .....	15
1.2.1 <i>Simulace kruhově polarizované planární antény</i> .....	15
1.2.2 <i>Simulace referenční antény</i> .....	20
<b>2. OPTIMALIZACE ANTÉN PRO PÁSMO ISM 2,4 GHZ .....</b>	<b>26</b>
2.1 NÁVRH KRUHOVĚ POLARIZOVANÉ PLANÁRNÍ ANTÉNY .....	26
2.2 NÁVRH FLÍČKOVÉ ANTÉNY S OŘEZANÝMI HRANAMI .....	30
<b>3. VÝROBA KRUHOVĚ POLARIZOVANÝCH ANTÉN .....</b>	<b>35</b>
3.1 VÝROBA ANTÉN S MĚDĚNOU FÓLIÍ .....	35
3.2 VÝROBA ANTÉNY SÍTOTISKEM .....	37
<b>4. MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ ANTÉN .....</b>	<b>39</b>
4.1 KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ PLANÁRNÍ ANTÉNA Z MĚDĚNÉ FÓLIE.....	39
4.2 KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ FLÍČKOVÁ ANTÉNA .....	42
4.3 KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ PLANÁRNÍ ANTÉNA ZE SÍTOTISKU.....	45
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>48</b>
LITERATURA.....	51
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	52

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Struktura antény: (a) pohled shora, (b) pohled zespodu. Převzato z [1].	12
Obr. 2 Kmitočtový průběh (a) velikost činitele odrazu, (b) zisku a osového poměru antény. Převzato z [1].	14
Obr. 3 Vyzařovací diagram kruhově polarizované antény pro RHCP a LHCP: (a) v rovině xz, (b) v rovině yz. Převzato z [1].	14
Obr. 4 Numerický model kruhově polarizované antény v ANSYS HFSS: (a) horní strana substrátu (b) spodní strana substrátu.	15
Obr. 5 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény. Výsledek simulace numerického modelu.	16
Obr. 6 Kmitočtový průběh osového poměru. Výsledek simulace numerického modelu.	17
Obr. 7 Vyzařovací charakteristika antény v rovině yz. Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).	17
Obr. 8 Vyzařovací charakteristika antény v rovině xz. Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).	18
Obr. 9 Kmitočtový průběh celkového zisku. Výsledek simulace numerického modelu.	19
Obr. 10 3D směrová charakteristika simulované antény. Výsledek simulace numerického modelu.	19
Obr. 11 Numerický model levotočivě polarizované flíčkové antény.	20
Obr. 12 Numerický model pravotočivě polarizované flíčkové antény.	21
Obr. 13 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované flíčkové antény. Výsledek simulace numerického modelu.	22
Obr. 14 Kmitočtový průběh osového poměru kruhově polarizované flíčkové antény. Výsledek simulace numerického modelu.	23
Obr. 15 Vyzařovací charakteristika flíčkové antény v rovině xz. Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).	24
Obr. 16 Vyzařovací charakteristika flíčkové antény v rovině yz. Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).	24
Obr. 17 3D směrová charakteristika kruhově polarizované flíčkové antény. Simulováno v ANSYS HFSS.	25
Obr. 18 Struktura antény: (a) pohled shora, (b) pohled zespodu	26
Obr. 19 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény. Výsledek simulace numerického modelu.	28
Obr. 20 Kmitočtový průběh velikosti osového poměru na vstupu antény. Výsledek simulace numerického modelu.	28
Obr. 21 Vyzařovací charakteristika antény v rovině xz. Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).	29
Obr. 22 Vyzařovací charakteristika antény v rovině yz. Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).	29
Obr. 23 3D směrová charakteristika simulované antény. Simulováno v ANSYS HFSS.	30
Obr. 24 Numerický model levotočivě polarizované flíčkové antény.	31
Obr. 25 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované flíčkové antény. Výsledek simulace numerického modelu.	32
Obr. 26 Kmitočtový průběh osového poměru kruhově polarizované flíčkové antény. Výsledek simulace numerického modelu.	33
Obr. 27 Vyzařovací charakteristika kruhově polarizované flíčkové antény ve směru vyzařování LHCP, v rovině xz.	33
Obr. 28 Vyzařovací charakteristika kruhově polarizované flíčkové antény ve směru vyzařování LHCP, v rovině yz.	34
Obr. 29 3D směrová charakteristika kruhově polarizované flíčkové antény. Simulováno v ANSYS HFSS.	34
Obr. 30 Vyleptaná flíčková anténa s ořezanými hranami	35



Obr. 31 Tkanina SINTEX 3D097 .....	36
Obr. 32 Výrobek antény (a) pohled shora, (b) pohled zespodu .....	36
Obr. 33 Výrobek flíčkové antény (a) pohled shora, (b) pohled zespodu .....	37
Obr. 34 Vyrobená planární anténa sítotiskem.....	38
Obr. 35 Výrobek antény (a) pohled shora, (b) pohled zespodu .....	38
Obr. 36 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované planární antény. Výsledek změřeného průběhu. ....	39
Obr. 37 Kmitočtový průběh osového poměru planární antény. Výsledek změřeného průběhu.....	40
Obr. 38 Vyzařovací charakteristika antény v rovině xz. Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).....	41
Obr. 39 Vyzařovací charakteristika antény v rovině yz. Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).....	41
Obr. 40 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované flíčkové antény. Výsledek změřeného průběhu. ....	42
Obr. 41 Kmitočtový průběh osového poměru kruhově polarizované flíčkové antény. Výsledek změřeného průběhu.....	43
Obr. 42 Vyzařovací charakteristiky flíčkové antény v rovině xz Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).....	44
Obr. 43 Vyzařovací charakteristiky flíčkové antény v rovině yz Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).....	44
Obr. 44 Kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu planární antény. Výsledek změřeného průběhu. ...	45
Obr. 45 Kmitočtový průběh osového poměru planární antény. Výsledek změřeného průběhu.....	46
Obr. 46 Vyzařovací charakteristiky planární antény v rovině xz Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).....	46
Obr. 47 Vyzařovací charakteristiky planární antény v rovině yz Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).....	47

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozměry antény. Převzato z [1].....	13
Tab. 2 Rozměry kruhově polarizované flíčkové antény. Převzato z [2]. .....	21
Tab. 3 Rozměry antény.....	27
Tab. 4 Rozměry kruhově polarizované flíčkové antény. ....	31

# ÚVOD

Kruhově polarizovaných antén existuje v dnešní době celá řada. Každá kruhově polarizovaná anténa má jinou strukturu a stále se vymýšlí nové struktury těchto antén, aby byly získány co nejlepší parametry.

Kruhově polarizovaná anténa se v dnešní době používá zejména tam, kde potřebujeme zaručit spolehlivé fungování bezdrátového spoje pro libovolnou vzájemnou orientaci vysílací a přijímací antény. Jejich použití je časté v praxi zejména v lékařství a průmyslu.

Tato práce se zabývá v první části vytvořením numerického modelu kruhově polarizované planární antény [1]. Úkolem je vymodelovat kruhově polarizovanou planární anténu s totožnými rozměry jako v [1] a provést veškeré simulace, jako v publikaci [1]. Provedením simulace ověříme, zdali jsou údaje v [1] pravdivé.

Následně bude ke kruhově polarizované planární anténě [1] vytvořena referenční kruhově polarizovaná flíčková anténa, která byla navržena v [2]. Tato anténa poslouží ke zhodnocení, zda je strukturální složitost antény [1] opodstatněná.

Kruhově polarizovaná planární anténa [1] a kruhově polarizovaná flíčková anténa budou mezi sebou porovnány. Poté bude zhodnoceno, zda je složitost struktury antény [1] vyvážena lepšími vlastnostmi.

Ve druhé části se práce bude zabývat optimalizací kruhově polarizovaných antén (planární a flíčková) pro kmitočtové pásmo 2,4 GHz a pro trojrozměrnou pleteninu jako textilní substrát. Budou vytvořeny numerické modely a budou provedeny stejné simulace, jako pro kruhově polarizované antény v pásmu 5,8 GHz.

Kruhově polarizovaná planární anténa a kruhově polarizovaná flíčková anténa v kmitočtových pásmech 2,4 GHz budou mezi sebou vzájemně porovnány. Bude určeno, která anténa vykazuje lepší parametry.

Modelování kruhově polarizovaných antén (planární a flíčkové) bude probíhat v programu ANSYS HFSS, který slouží k numerickému řešení Maxwellových rovnic metodou konečných prvků.

Ve třetí části bude popsán postup výroby kruhově polarizovaných antén (planární a flíčkové), metodou sítotisku a pomocí měděné fólie. Jako substrát použijeme tkaninu SINTEX 3D097.

Ve čtvrté části budou u vyrobených antén změřeny veškeré parametry. Změřené parametry budou následně porovnány jak mezi sebou, tak se simulacemi.

V závěru práce budou zhodnoceny dosažené výsledky a budou popsány nové poznatky, které byly získány.

# 1. ANTÉNY V PÁSMU KMITOČTŮ 5,8 GHz

## 1.1 Teoretická část

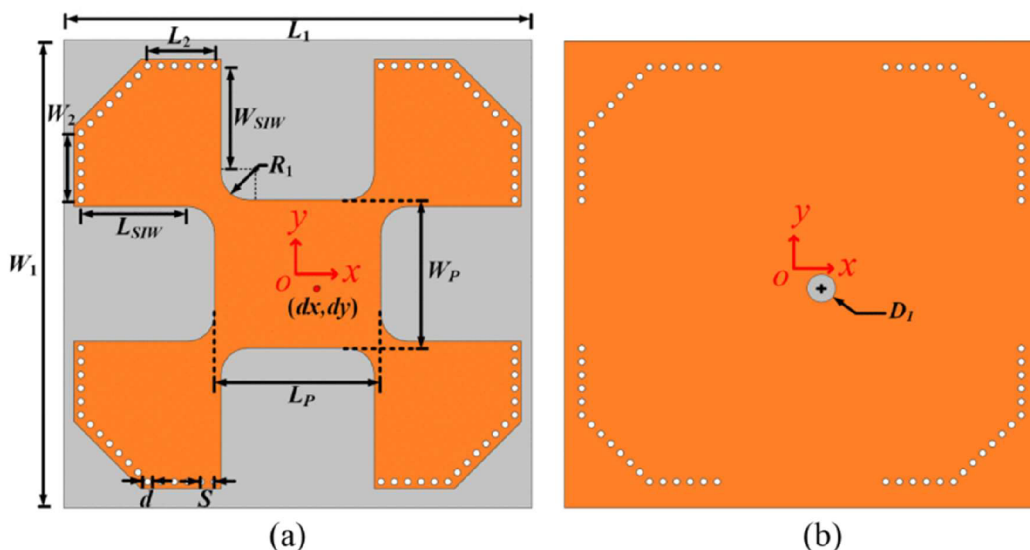
### 1.1.1 Kruhově polarizovaná planární anténa

Kruhově polarizované antény jsou v dnešní době velmi rozšířené. Můžeme je najít zejména v aplikacích, ve kterých nelze zaručit vzájemnou orientaci vysílací a přijímací antény. K takzvanému polarizačnímu nepřizpůsobení může dojít v lékařství u biomedicinských přístrojů, v průmyslu u radiofrekvenčních senzorů, u elektronických systémů pro výběr mýtného, u radarů a řady dalších senzorů.

Cílem předkládaného projektu je ověřit parametry kruhově polarizované antény popsané v [1]. Tato anténa sestává z planárního motivu na horní straně mikrovlnného substrátu a ze souvislé zemní desky na spodní straně. K buzení antény je využita koaxiální sonda. Vnější hrany anténního prvku jsou pomocí prokovů propojeny se zemní deskou. Maximální zisk antény dosahuje hodnoty až 10,4 dBi. Hodnota osového poměru (AR, *axial ratio*) se blíží k 0 dB. Střední pracovní frekvence této antény je 5,78 GHz [1].

Geometrie antény je zobrazena na obr. 1, jednotlivé rozměry antény jsou uvedeny v tab. 1. Anténa byla navržena pro dielektrický substrát s relativní permitivitou 2,2, který má tloušťku 1,5 mm [1].

Prvním krokem řešení projektu bylo ověřit, zda je publikovaná anténa funkční a zda dosahuje parametrů prezentovaných v [1]. K ověření funkčnosti byl využit program ANSYS Electronics Desktop a jeho modul HFSS (*High Frequency Structure Simulator*). Tento modul řeší metodou konečných prvků Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru pro ustálený harmonický stav.



Obr. 1 Struktura antény: (a) pohled shora, (b) pohled zespodu. Převzato z [1].

Tab. 1 Rozměry antény.  
Převzato z [1].

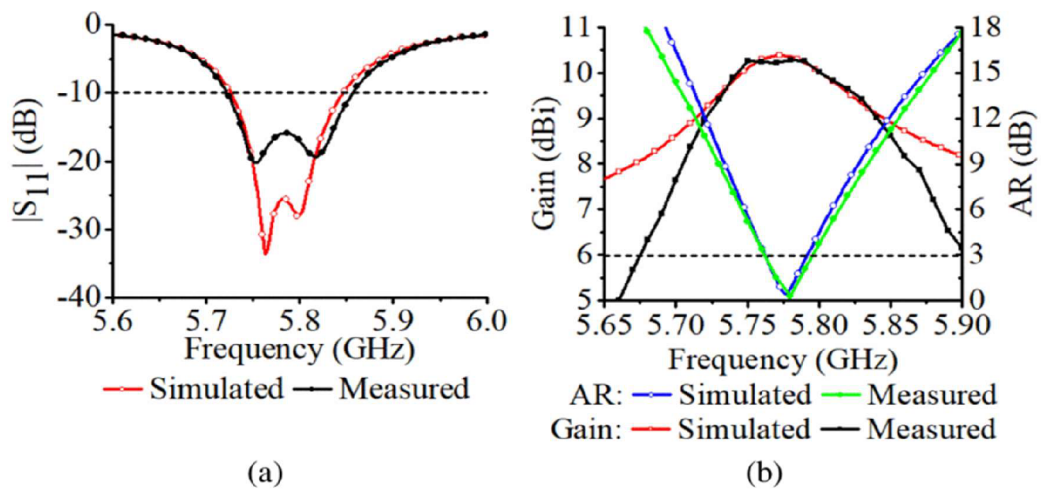
Parametr	Velikost [mm]
$L_1$	70,0
$W_1$	70,0
$L_{siw}$	15,3
$W_{siw}$	15,3
$L_p$	24,2
$W_p$	21,5
$L_2$	9,6
$W_2$	9,6
$R_1$	4,0
$d$	1,0
$s$	1,9
$dx$	3,1
$dy$	2,1
$D_1$	4,1

Simulací ověříme, zda impedanční, polarizační a vyzařovací charakteristiky antény odpovídají charakteristikám zveřejněným v [1].

Impedanční vlastnosti antény popisujeme kmitočtovým průběhem velikostí činitele odrazu na vstupu antény  $|S_{11}|$ . Z obr. 2a je zřejmé, že anténa je impedančně přizpůsobená v kmitočtovém intervalu přibližně od 5,7 GHz do 5,9 GHz;  $|S_{11}| < -10$  dB. Relativně širokého pásma impedančního přizpůsobení je dosaženo vybuzením dvou rezonancí na kmitočtech přibližně  $f_1 = 5,75$  GHz a  $f_2 = 5,85$  GHz.

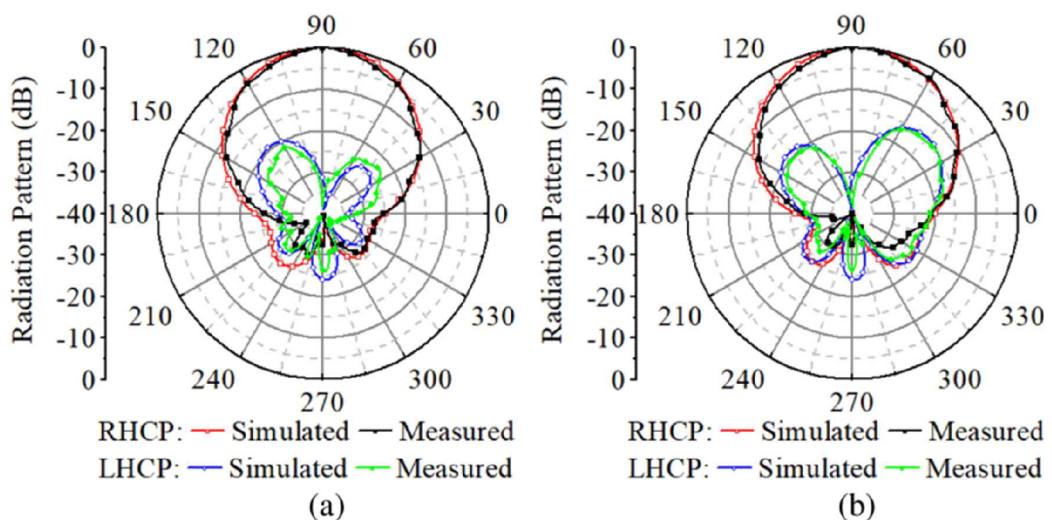
Polarizační vlastnosti antény popisujeme kmitočtovým průběhem osového poměru AR. Z obr. 2b je zřejmé, že anténa je polarizačně přizpůsobena v kmitočtovém intervalu od 5,77 GHz do 5,79 GHz;  $AR < 3$  dB. Je tedy zřejmé, že polarizační šířka pásma je mnohem menší než impedanční.

V blízkosti pracovní frekvence dosahuje anténa zisku přibližně  $G = 10$  dB; viz obr. 2b.



Obr. 2 Kmitočtový průběh (a) velikost činitele odrazu, (b) zisku a osového poměru antény. Převzato z [1].

Směrové charakteristiky antény v rovinách  $xz$  a  $yz$  (orientace podle obr. 1) jsou vykresleny v obr. 3 pro pravotočivou polarizaci (RHCP, *right hand circular polarization*) a pro levotočivou polarizaci (LHCP, *left hand circular polarization*).



Obr. 3 Vyzařovací diagram kruhově polarizované antény pro RHCP a LHCP: (a) v rovině  $xz$ , (b) v rovině  $yz$ . Převzato z [1].

V následující kapitole bude popsán numerický model antény. Simulací modelu, se pokusím získat výše uvedené charakteristiky. Výsledné charakteristiky následně porovnám s charakteristikami publikovanými [1].

## 1.2 Praktická část

### 1.2.1 Simulace kruhově polarizované planární antény

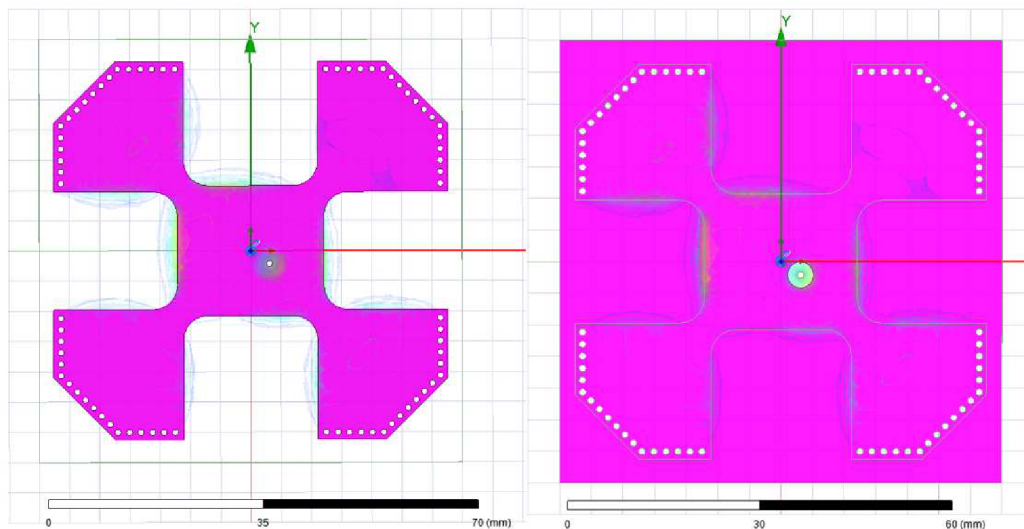
Podle popisu antény z [1], byl vytvořen v programu ANSYS HFSS numerický model této antény. Nejprve byl vytvořen středový obdélník reprezentující substrát. Substrát má tloušťku 1,5 mm. Jako materiál byl použit duroid, který má permitivitu 2,2. Ze spodní strany byl na každý z vrcholu substrátu navázán dokonale vodivý čtverec (zemní plocha).

Obdobně jsem postupoval při vytváření anténního prvku na horní straně substrátu. Vedle základního čtverce byly vytvořeny kružnice o poloměru 4 mm, které se hranou dotýkaly. Ve čtverci byly ze známých údajů (vzdálenosti středů kružnic a velikostí kružnic) rozpočítány kruhy tak, aby měly od sebe stejnou vzdálenost.

U zkosení v rozích antény bylo zapotřebí Pythagorovou větou vypočítat vzdálenosti středů kružnic, aby se daly zapsat přesné souřadnice  $(x, y)$ , a zároveň byla dodržena stejná vzdálenost středů kružnic mezi sebou (požadováno 1,9 mm). Poté byl ze všech obrazců vytvořen jeden celkový tvar.

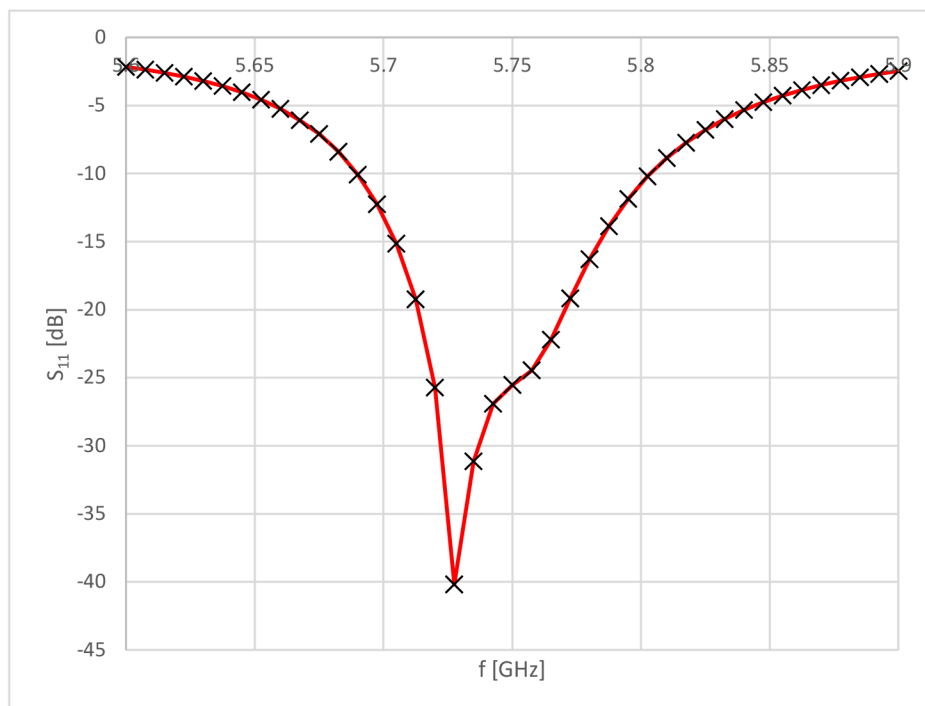
V dalším kroku byly vytvořeny po stranách antény válce (prokovy), které propojují anténu se zemní deskou. Pro napájení byla dle zadání [1] zvolena koaxiální sonda. Jak už bylo zmíněno v teoretické části, koaxiální sonda měla připojen střední vodič k anténě a vnější vodič k zemní desce. Jako materiál pro dielektrikum mezi vnějším a vnitřním vodičem koaxiální sondy byl zvolen Neltec NX9240.

Aby byl správně reprezentován volný prostor nad anténou, bylo potřeba nad horní plochou antény vytvořit vzduchovou krychli. Tato krychle představuje prostředí, do kterého anténa vyzařuje. Bylo zvoleno, že vzduchová krychle má stejné parametry jako vakuum.



Obr. 4 Numerický model kruhově polarizované antény v ANSYS HFSS:  
(a) horní strana substrátu (b) spodní strana substrátu.

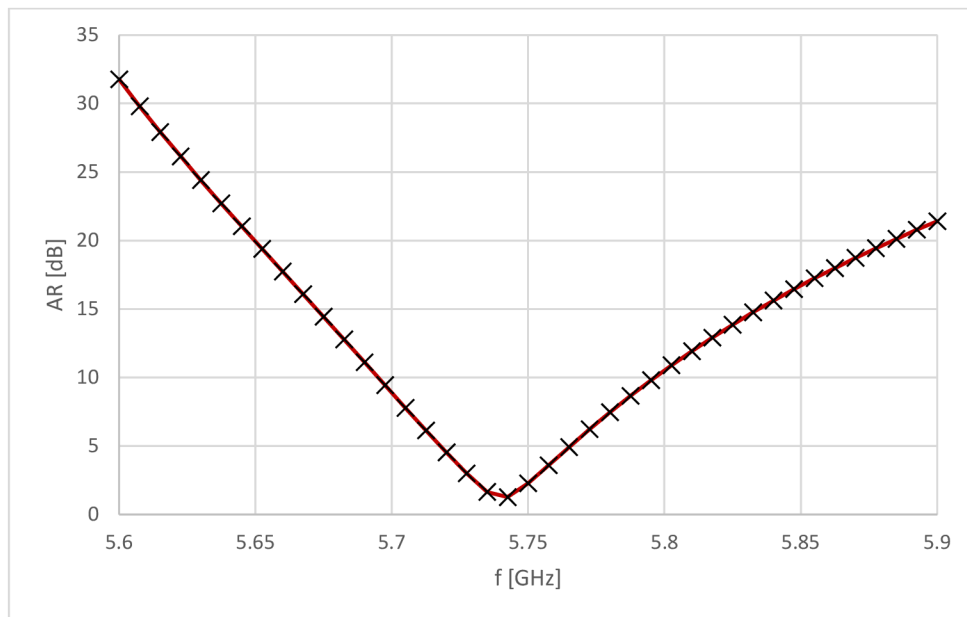
Prvním vypočítaným průběhem byla kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu  $S_{11}$  na vstupu antény (viz obr. 5). Střední kmitočet byl stanoven na 5,73 GHz. Při  $S_{11} = -10$  dB byly odečteny mezní frekvence. Frekvenční rozsah měla anténa v rozmezí od 5,68 do 5,81 GHz. Publikovaná impedanční charakteristika (obr. 2a) vykazovala pásmo impedančního přizpůsobení v intervalu od 5,70 do 5,90 GHz. Je tedy zřejmé, že pásmo přizpůsobení modelu je mírně posunuto k nižším kmitočtům (ve srovnání s publikovanými charakteristikami). Vzhledem k tomu, že anténa má být přepočítána pro práci v ISM pásmu 2,4 GHz, nebyl tento posuv nijak řešen.



Obr. 5 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény.  
Výsledek simulace numerického modelu.

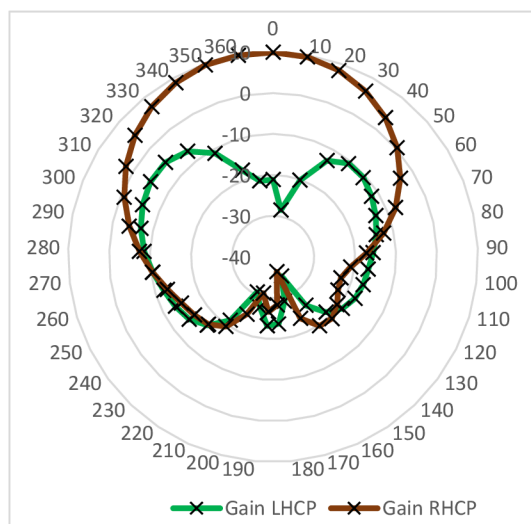
Dalším vypočítaným průběhem byla kmitočtová závislost velikosti osového poměru (viz obr. 6). Pásmo polarizačního přizpůsobení je od 5,73 GHz do 5,76 GHz. Publikovaná polarizační charakteristika vykazovala pásmo polarizačního přizpůsobení od 5,77 GHz do 5,79 GHz. I u polarizační charakteristiky je tedy zřejmý mírný posuv k nižším frekvencím.



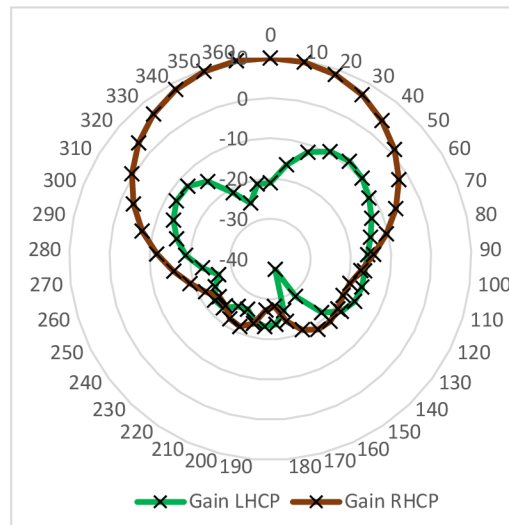


Obr. 6 Kmitočtový průběh osového poměru.  
Výsledek simulace numerického modelu.

Ze zobrazení vyzářovacích diagramů vidíme, že zisk antény pro levotočivou polarizaci (LHCP) je menší než pro polarizaci pravotočivou (RHCP), a to jak v rovině  $xz$  (obr. 8), tak v rovině  $yz$  (obr. 7). Frekvence, na niž byly směrové charakteristiky počítány, byla nastavena na 5,75 GHz (střed pásma impedančního přizpůsobení).



Obr. 7 Vyzářovací charakteristika antény v rovině  $yz$ .  
Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).

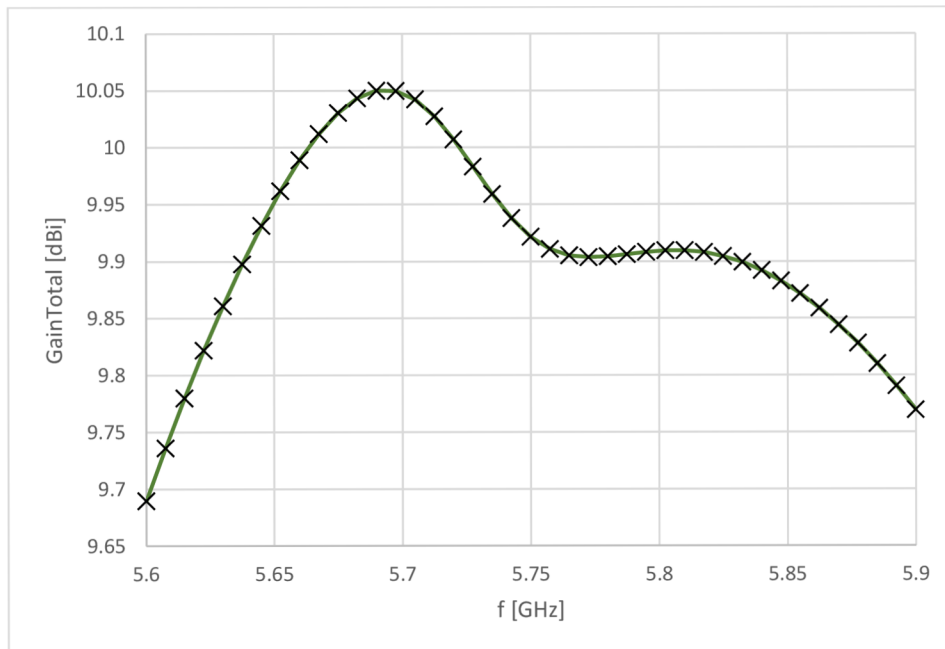


Obr. 8 Vyzařovací charakteristika antény v rovině  $xz$ .  
Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).

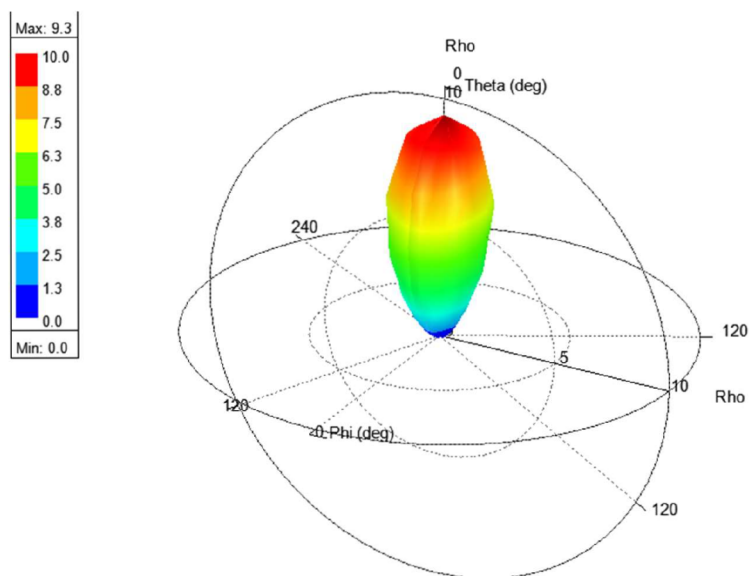
Z porovnání simulovaných charakteristik z obr. 7 a 8 s charakteristikami publikovanými (obr. 3) vyplývá, že v rovině  $xz$  a  $yz$  jsou charakteristiky pro pravotočivou polarizaci (RHCP) i levotočivou polarizaci (LHCP) téměř shodné. Jedinou odlišností simulovaných charakteristik je jinak cejchovaná osa ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ) vyzařovacího diagramu. Z tohoto důvodu jsou simulované charakteristiky z obr. 7 a 8 zrcadlově otočeny vůči publikovaným charakteristikám z obr. 3.

Z kmitočtového průběhu celkového zisku na obr. 9 je patrné, že v okolí pracovního kmitočtu 5,70 GHz má anténa zisk 10 dBi. Jak už bylo řečeno výše, je i zde zřejmé, že pásmo pracovních kmitočtů je posunuto směrem k nižším frekvencím (viz porovnání s obr. 2, kde byla anténa přizpůsobena v intervalu od 5,77 GHz do 5,79 GHz). Jinak je kmitočtový průběh zisku antény z obr. 9 téměř totožný s průběhem zisku na obr. 2b.

Na obr. 10 je vykreslena 3D směrová charakteristika antény. Z této 3D charakteristiky je vidět, že vyzařování antény je koncentrováno do doutníkového hlavního laloku. V této simulaci byl vypočítán zisk  $G = 9,3$  dBi, což je zhruba o 0,7 dB méně, než na obr. 9.



Obr. 9 Kmitočtový průběh celkového zisku.  
Výsledek simulace numerického modelu.



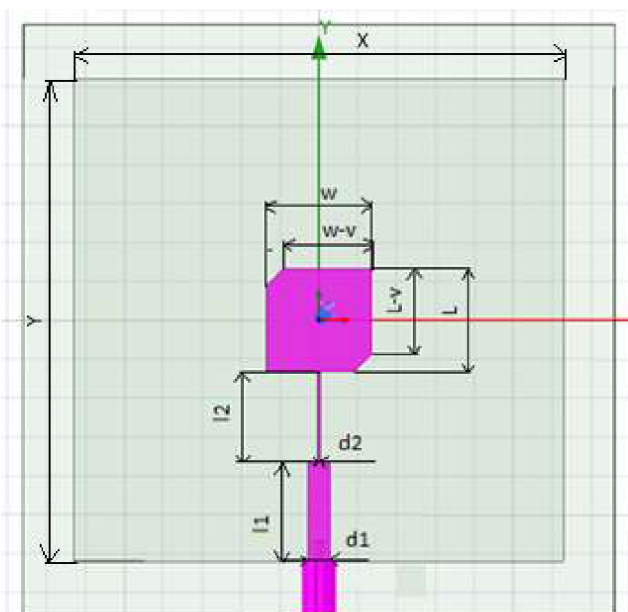
Obr. 10 3D směrová charakteristika simulované antény.  
Výsledek simulace numerického modelu.

### 1.2.2 Simulace referenční antény

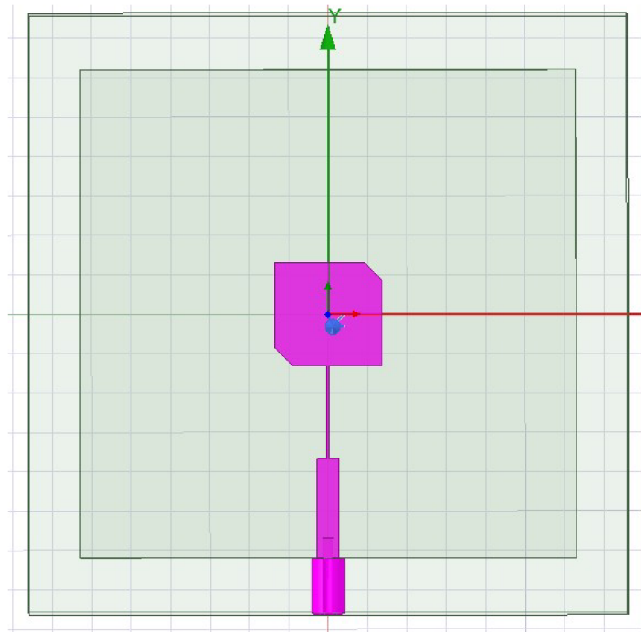
Kruhově polarizovaná planární anténa, která byla popsána v [1] a nezávisle ověřena v podkapitole 2.1, je relativně komplikovaná a náročná na výrobu, a to zejména kvůli prokům na okrajích anténního prvku. Abych zjistil, jaké výhody přináší složitější geometrie a komplikovanější výroba antény publikované v [1], vytvořil jsem numerické modely konvenčních fličkových antén jako referenčních struktur.

Numerický model antény z obr. 11 vyzařuje levotočivě polarizovanou vlnu, model z obr. 12 vlnu pravotočivou. Rozměry anténního prvku a napájecího mikropásku jsou uvedeny v tab. 2. Napájecí mikropásek má charakteristickou impedanci  $50 \Omega$ .

K napájecímu mikropásku je připojen koaxiální konektor. Vnější plášť konektoru je připojen k zemní desce a vnitřní vodič k samotnému mikropásku. Model koaxiálního konektoru má vnější průměr 4,30 mm s délkou 7,00 mm. Vnitřní vodič konektoru má průměr 1,26 mm a dlouhý je 9,56 mm. Anténa je optimalizována pro substrát s permitivitou 3,38 a výškou 1,52 mm. Modely antén z obr. 11 a 12 mají totožné rozměry, liší se pouze jinými zaoblenými rohy. Veškeré rozměry modelu kruhově polarizované antény byly převzaty z [2].



Obr. 11 Numerický model levotočivě polarizované fličkové antény.



Obr. 12 Numerický model  
pravotočivě polarizované fličkové antény.

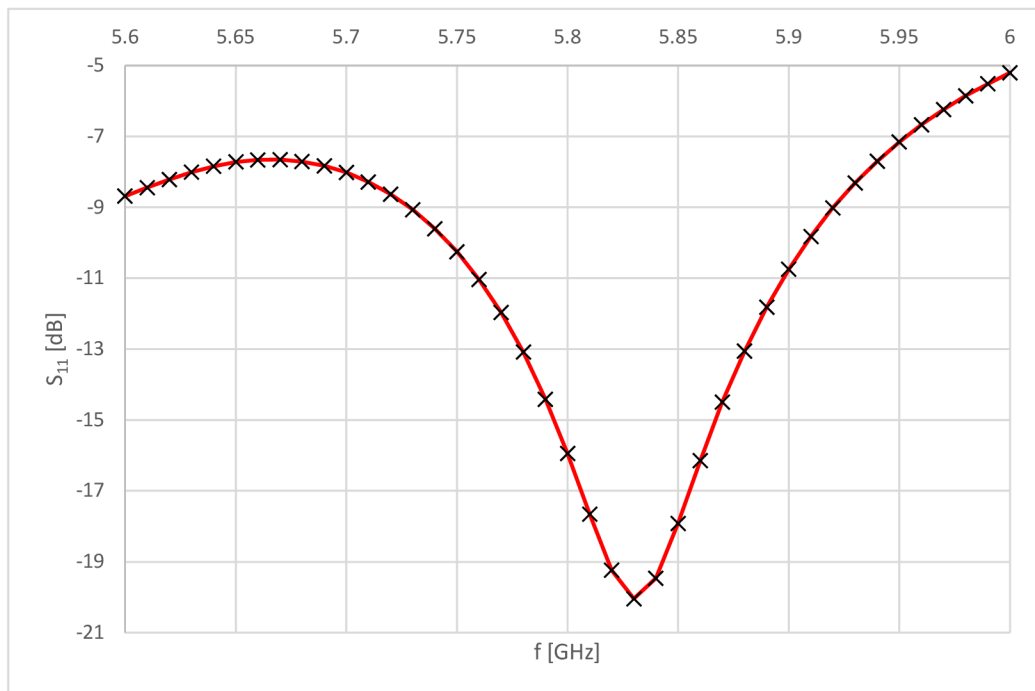
Tab. 2 Rozměry kruhově polarizované fličkové antény.  
Převzato z [2].

Parametr	Velikost [mm]
$X$	62,96
$Y$	61,99
$w$	13,56
$L$	13,11
$v$	2,23
$l_1$	12,65
$l_2$	11,80
$d_1$	2,80
$d_2$	0,30

Z vytvořených numerických modelů v programu ANSYS HFSS (viz obr. 11 a 12) byly získány výsledky simulací antén s levotočivou i pravotočivou polarizací. Anténa s levotočivou polarizací z obr. 11 měla stejné výsledky simulací jako anténa s pravotočivou polarizací z obr. 12.

Prvním vypočítaným průběhem byla kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu  $S_{11}$  na vstupu antény (viz obr. 13). Z průběhu je patrné, že kmitočet rezonance je

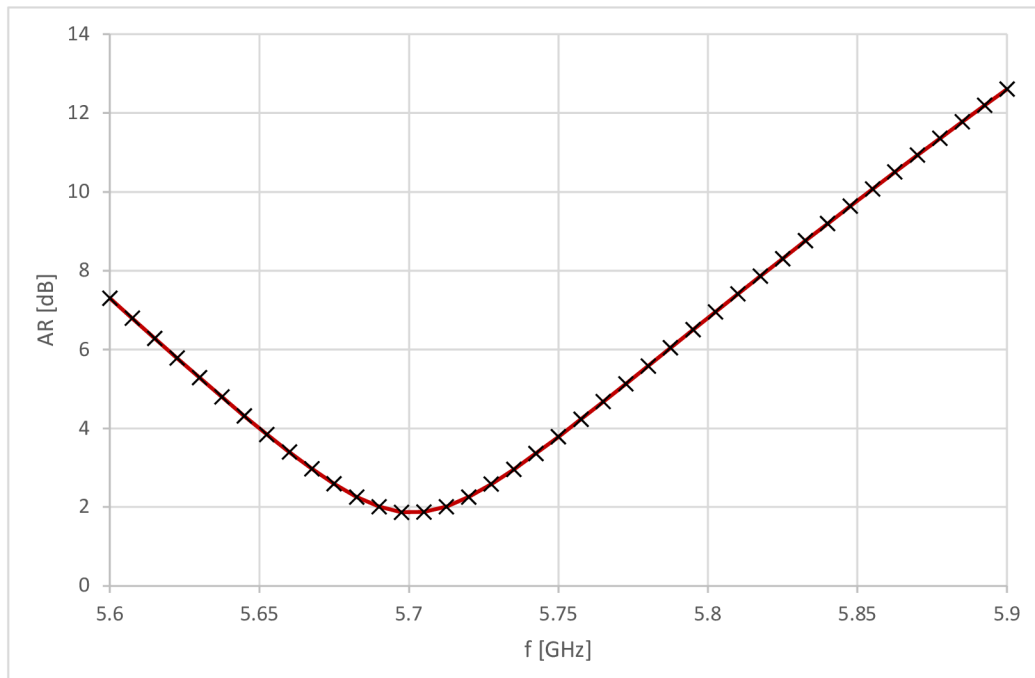
na frekvenci 5,83 GHz. Frekvenční pásmo impedančního přizpůsobení antény pro  $S_{11} = -10$  dB je od 5,74 GHz do 5,91 GHz, tj. 2,9% relativně. Kruhově polarizovaná anténa z [1] vykazovala impedanční přizpůsobení v pásmo od 5,68 do 5,81 GHz, tj. 2,2% relativně (viz obr. 5). Z hlediska šířky pásma impedančního přizpůsobení jsou tedy obě antény srovnatelné.



Obr. 13 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované fličkové antény. Výsledek simulace numerického modelu.

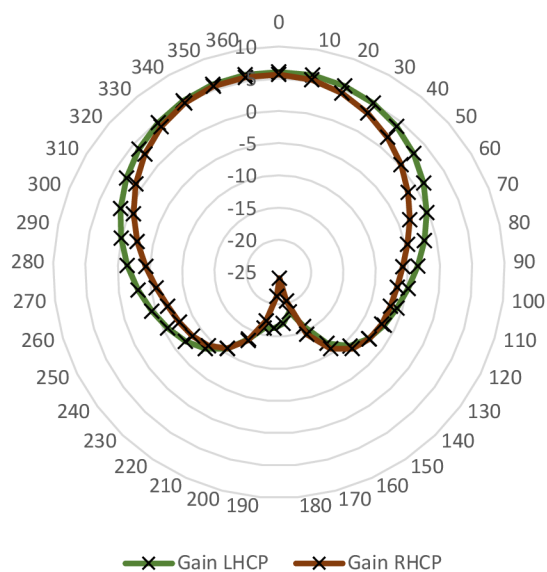
Na obr. 14 lze vidět vypočítaný průběh kmitočtové závislosti osového poměru fličkové antény. Z průběhu je patrné, že minimum osového poměru se nachází na kmitočtu 5,7 GHz. Stejně jako u kmitočtového průběhu velikosti činitele odrazu (viz obr. 13), vzniklo posunutí řádově o 100 MHz.

Porovnáme-li kmitočtový průběh osového poměru fličkové antény (obr. 14) a antény popsané v [1] (obr. 6), dostáváme frekvenční pásmo polarizačního přizpůsobení  $AR < 3$  dB od 5,67 GHz do 5,73 GHz (1,0% relativně) pro fličkovou anténu a od 5,73 GHz do 5,76 GHz (0,5% relativně) pro anténu popsanou v [1]. Konvenční fličková kruhově polarizovaná anténa má tedy rovněž srovnatelnou šířku polarizačního přizpůsobení.

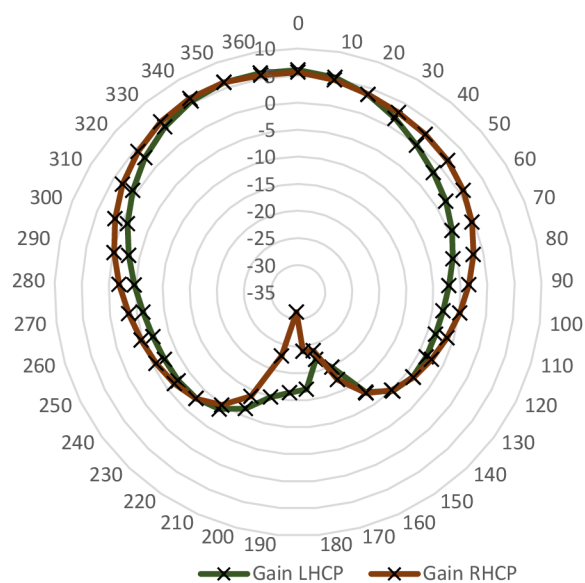


Obr. 14 Kmitočtový průběh osového poměru kruhově polarizované flíčkové antény.  
Výsledek simulace numerického modelu.

Dalším simulovaným parametrem byly vyzařovací diagramy. Vyobrazené charakteristiky antény jsou pro levotočivou polarizaci (LHCP) a pro polarizaci pravotočivou (RHCP); viz obr. 15 a 16. Simulované charakteristiky na obr. 15 byly vypočítány nejprve pro model antény levotočivě polarizované (obr. 11) a poté pro pravotočivě polarizovanou anténu (obr. 12). V programu Microsoft Excel byly hodnoty obou simulací sloučeny, a byla vykreslena vyzařovací charakteristika z obr. 15. Z teoretického hlediska, by měly být vyzařovací charakteristiky zcela totožné, protože modely antény (viz obr. 11 a 12) měly stejné parametry, pouze byl změněn směr vyzařování. Směrové charakteristiky byly v obou případech počítány při frekvenci 5,8 GHz. Na obr. 15 je zobrazena charakteristika v rovině  $xz$ , na obr. 16 v rovině  $yz$ . Z obr. 16 je patrné, že v rovině  $yz$  nejsou vyzařovací charakteristiky pro LHCP a RHCP také totožné.



Obr. 15 Vyzářovací charakteristika flíčkové antény v rovině  $xz$ .  
 Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).



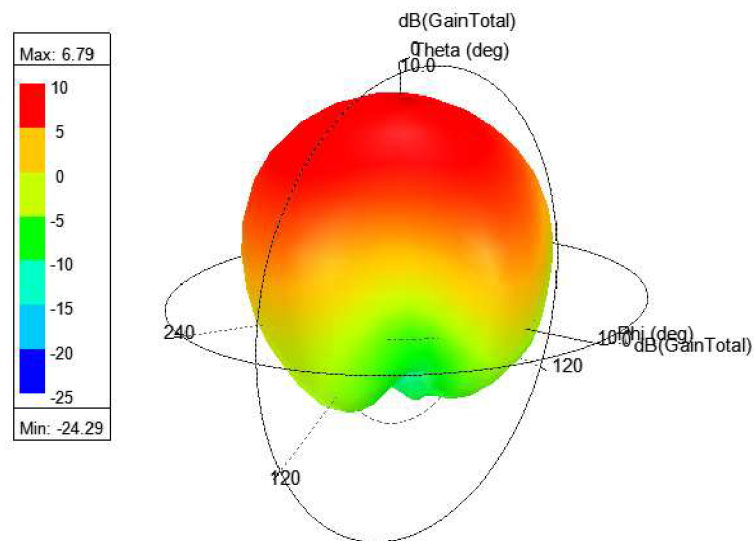
Obr. 16 Vyzářovací charakteristika flíčkové antény v rovině  $yz$ .  
 Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).

Porovnáme-li vyzářovací charakteristiky kruhově polarizované flíčkové antény z obr. 15 a obr. 16, není vidět žádný rozdíl.



Porovnání kruhově polarizované flíčkové antény (obr. 15 a 16) s kruhově polarizovanou anténou popsanou v [1] (obr. 7 a 8) ukazuje se, že antény mají v obou případech dobré vyzařovací vlastnosti.

V programu ANSYS HFSS byla vypočtena rovněž 3D směrová charakteristika kruhově polarizované flíčkové antény. Flíčková anténa vykazovala pro levotočivou i pravotočivou polarizaci stejné parametry. Hlavní vyzařovací lalok má tvar podobný jablku; zisk antény ve směru maxima záření dosahoval hodnoty  $G = 6,8$  dBi.



Obr. 17 3D směrová charakteristika kruhově polarizované flíčkové antény.  
Simulováno v ANSYS HFSS.

Je tedy zřejmé, že hlavní výhodou antény popsané v [1] je směrovější vyzařování, kterému odpovídá vyšší hodnota zisku ve směru maxima záření; ten dosahuje hodnoty  $G = 9,3$  dBi (viz obr. 10). Zisk flíčkové kruhově polarizované antény je nižší o 2,5 dB.

## 2. OPTIMALIZACE ANTÉN PRO PÁSMO ISM 2,4 GHz

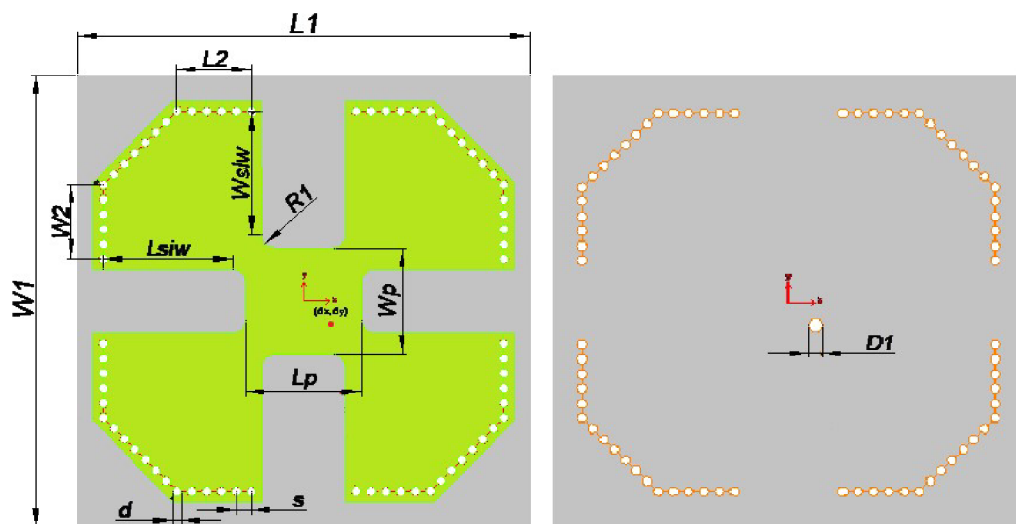
### 2.1 Návrh kruhově polarizované planární antény

V předchozí kapitole byla vytvořena anténa s pracovním kmitočtem 5,8 GHz. Výška substrátu byla 2,6 mm s permitivitou 2,2. V této kapitole se budeme zabývat optimalizací antény pro pracovní kmitočet 2,4 GHz a pro textilní substrát s výškou 2,6 mm a s permitivitou 1,22. Povrch textilního substrátu je pokryt fólií s výškou 0,08 mm a s relativní permitivitou 2,21. Pro optimalizaci byl použit stejný typ antény, jako v kapitole 1.2.1.

Prvním krokem optimalizace bylo zvětšení stran středového obdélníku ( $L_p$ ,  $W_p$ ) ve stejném poměru o dvou-násobek. To odpovídá změně délky vlny při snížení pracovní frekvence z 5,8 GHz na 2,4 GHz a při záměně konvenčního substrátu substrátem textilním. Následovalo zvětšení průměru prokovů z 1,0 mm na 2,8 mm; potom můžeme konvenční prokovy nahradit šitím vodivou nití. Anténa však bohužel vykazovala impedanční nepřizpůsobení.

Impedančního přizpůsobení bylo dosaženo zvětšením rozměrů stran antény. Velikost průměru prokovů byla ponechána na  $d = 2,8$  mm. Byly zvětšeny vzdálenosti mezi prokovy na 1,8 mm, takže vzdálenost  $L_2$ ,  $W_2$  se zvětšila. Tímto způsobem se zvětšily i vzdálenosti  $L_{SIW}$  na 40 mm a  $W_{SIW}$  na 38,2 mm, a došlo tedy ke zvětšení celého anténního prvku.

Velikostmi stran obdélníkových štěrbin  $L_p$ ,  $W_p$  se měnil pracovní kmitočet osového poměru. Postupným doladováním byl stanoven pracovní kmitočet u osového poměru na 2,4 GHz. Finální rozměry stran obdélníkových štěrbin  $L_p$ ,  $W_p$  byly optimalizací stanoveny na 33 mm a 36 mm.



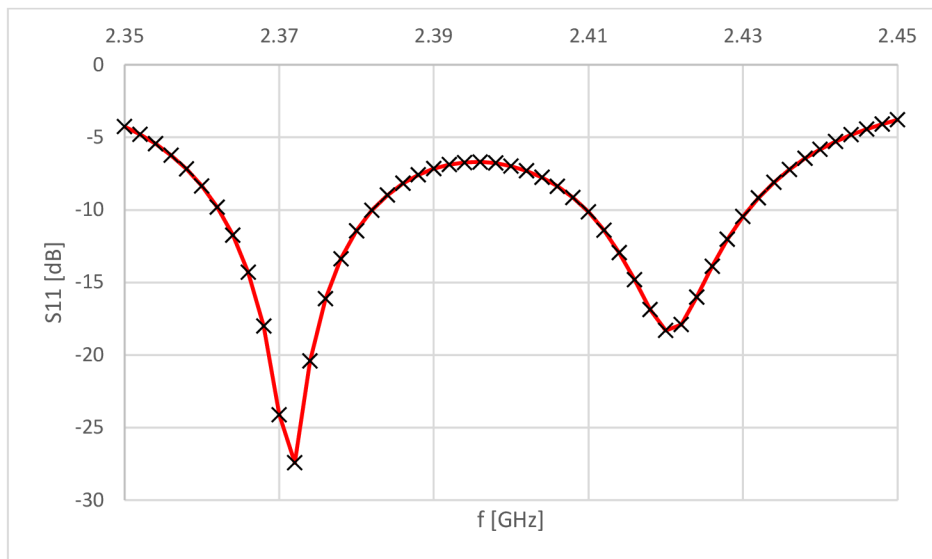
Obr. 18 Struktura antény: (a) pohled shora, (b) pohled zespodu

Tab. 3 Rozměry antény.

Parametr	Velikost [mm]
$L_1$	140,0
$W_1$	140,0
$L_{siv}$	40,0
$W_{siv}$	38,2
$L_p$	36,0
$W_p$	33,0
$L_2$	23,1
$W_2$	23,1
$R_1$	4,0
$d$	2,8
$s$	4,6
$dx$	8,1
$dy$	7,1
$D_1$	4,1

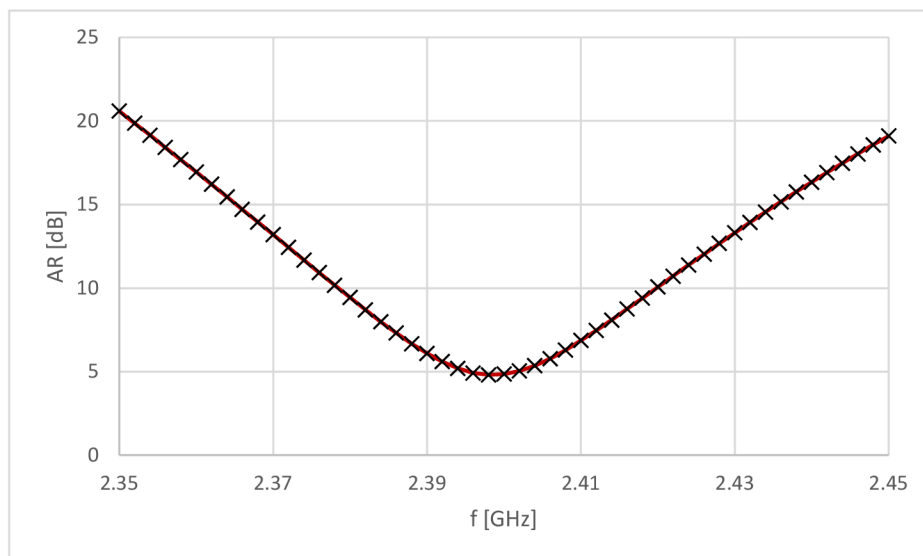
Následně byla řešena velikost činitele odrazu. Velikost činitele odrazu se spolu s osovým poměrem měnila v závislosti velikosti anténního prvku. Dále byla měněna délka  $L_{siv}$  a  $W_{siv}$ , aby došlo k co nejlepšímu přizpůsobení. Změnou polohy napájení koaxiální sondy, byla měněna úroveň činitele odrazu. Posunutím napájecí koaxiální sondy směrem ke kraji anténního prvku se zvyšovala úroveň činitele odrazu. Koaxiální sonda byla posunuta od středu na souřadnice [8,1 mm; -7,1 mm].

První vypočítaný kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu  $S_{11}$  na vstupu antény je na obr. 19. Střední kmitočet je stanoven na hodnotě 2,372 GHz. Mezní frekvence při  $S_{11} = -10$  dB jsou v kmitočtovém rozsahu od 2,362 GHz do 2,382 GHz. Je tedy patrné, že impedanční charakteristika je mírně posunutá k nižším kmitočtům a nezasahuje ke kmitočtu 2,4 GHz. Zlepšení výsledku tohoto parametru dále nebylo řešeno, protože publikovaná anténa byla přizpůsobena na rezonanční kmitočet 2,4 GHz u kmitočtové závislosti osového poměru.



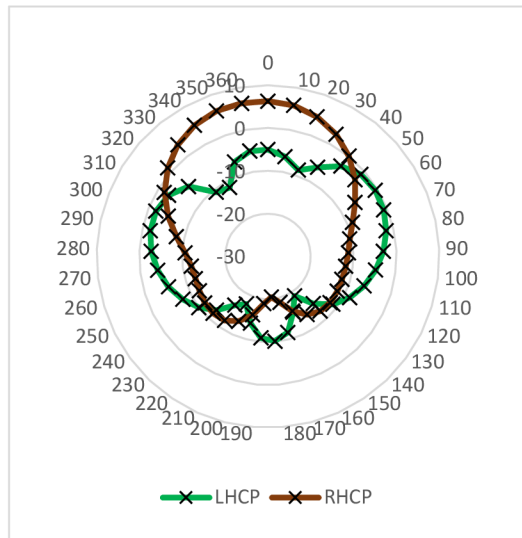
Obr. 19 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény.  
Výsledek simulace numerického modelu.

Následujícím vypočítaným průběhem byla kmitočtová závislost velikosti osového poměru. Jak již bylo řečeno, anténa byla přizpůsobována tímto průběhem (viz obr. 20) na rezonanční kmitočet 2,4 GHz. Polarizační pásmo přizpůsobení je v rozmezí od 2,385 GHz do 2,410 GHz. Pásmo přizpůsobení je lehce nad 5 dB.

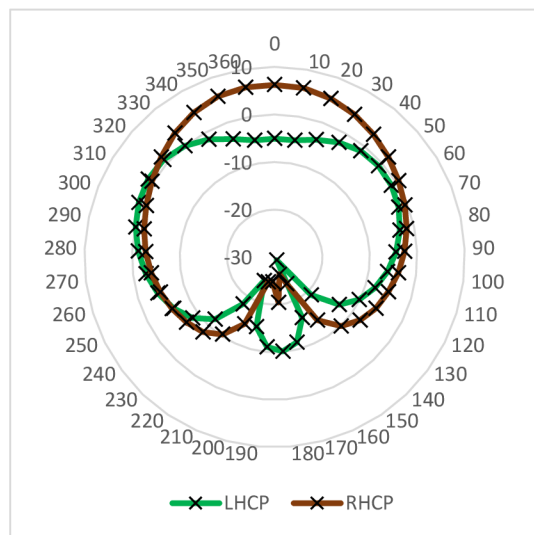


Obr. 20 Kmitočtový průběh velikosti osového poměru na vstupu antény.  
Výsledek simulace numerického modelu.

Na obr. 21 a 22 jsou směrové vyzařovací charakteristiky. V rovině  $xz$  i  $yz$  je patrné, že anténa má lepší pravotočivou směrovost RHCP. Směrové vyřazovací charakteristiky mají správnou směrovost.



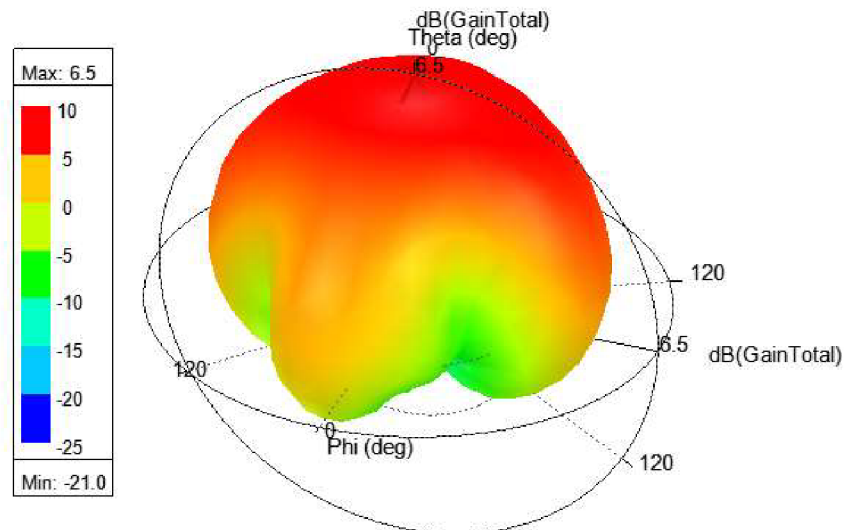
Obr. 21 Vyzařovací charakteristika antény v rovině  $xz$ . Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).



Obr. 22 Vyzařovací charakteristika antény v rovině  $yz$ . Simulovaná LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).

Na obr. 23 je znázorněn 3D model směrové charakteristiky antény. Kruhově polarizovaná anténa má zisk 6,5 dBi. Porovnáním zisku totožné antény v kmitočtovém pásmu 5,8 GHz

je zřejmé, že anténa má při tomto návrhu na pracovním kmitočtu 2,4 GHz menší zisk o 2,8 dB.



Obr. 23 3D směrová charakteristika simulované antény.  
Simulováno v ANSYS HFSS.

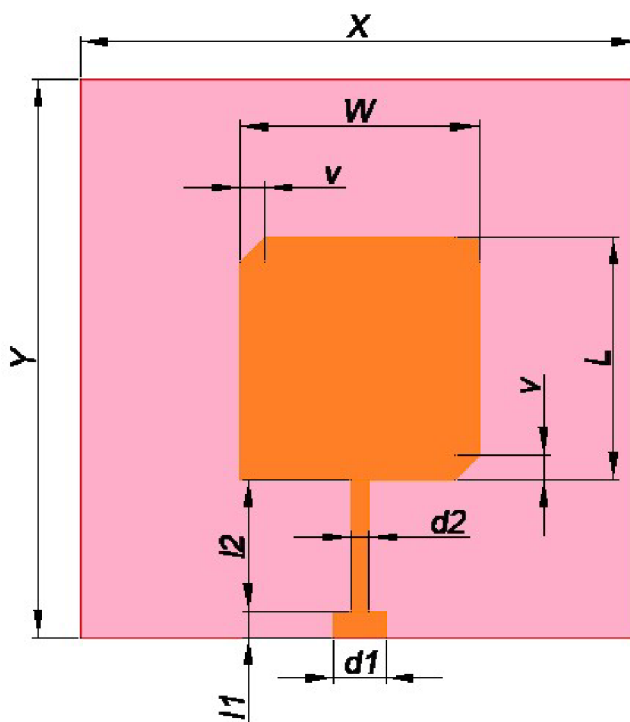
## 2.2 Návrh flíčkové antény s ořezanými hranami

V kapitole 1.2.2, byla vytvořena kruhově polarizovaná flíčková anténa v pásmu 5,8 GHz. V této kapitole je popsána optimalizace flíčkové antény s ořezanými hranami pro frekvenční pásmo 2,4 GHz, textilní substrát s výškou 2,6 mm a s relativní permitivitou 1,22 a krycí fólií s výškou 0,08 mm a s relativní permitivitou 2,21.

Abych dosáhl pracovního kmitočtu 2,4 GHz, bylo zapotřebí vhodně zvětšit flíček antény. Nejprve byly vypočítány rozměry flíčkové antény  $W$  a  $L$ , pro kmitočet 2,4 GHz s permitivitou substrátu 1,22. Následně byly ořezány dvě protilehlé hrany flíčkové antény a anténa byla přizpůsobována na požadovaný kmitočet.

Z důvodu nedostatečného impedančního přizpůsobení na anténě bylo zapotřebí použít vhodný přizpůsobovací obvod. V tomto případě bylo použito přizpůsobení čtvrtvlnným transformátorem. Díky tomuto přizpůsobení se podařilo dosáhnout přijatelné úrovně činitele odrazu pro charakteristickou impedanci  $50 \Omega$  koaxiálního konektoru na vstupu mikropáskového napáječe.

Porovnáme-li fličkové antény v pásmu 2,4 GHz oproti pásmu 5,8 GHz, jsou v pásmu 2,4 GHz rozměry fličkové antény  $W$ ,  $L$  větší přibližně 4x. Velikost substrátu  $X$ ,  $Y$  a velikost ořezu fličkové antény  $v$  je skoro dvou-násobná.

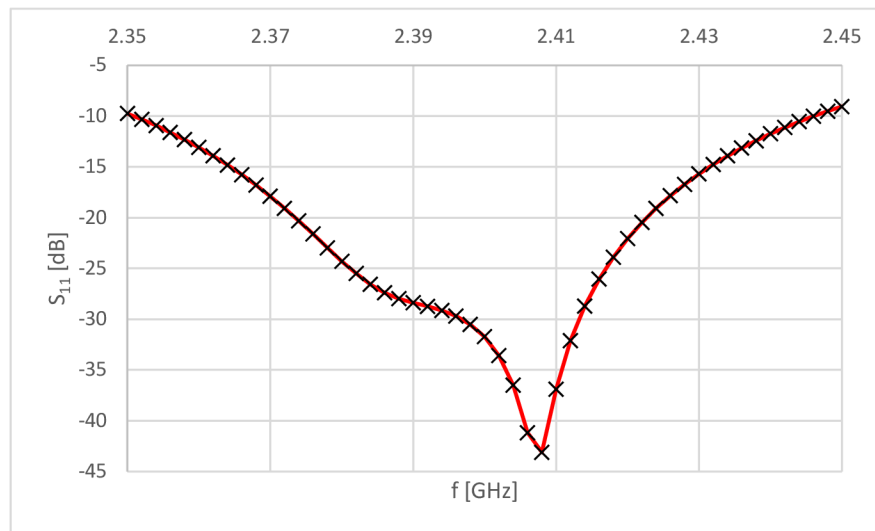


Obr. 24 Numerický model levotočivě polarizované fličkové antény.

Tab. 4 Rozměry kruhově polarizované fličkové antény.

Parametr	Velikost [mm]
$X$	120,0
$Y$	120,0
$W$	51,20
$L$	52,05
$v$	5,200
$l_1$	5,675
$l_2$	28,30
$d_1$	11,40
$d_2$	4,000

Prvním vypočítaným průběhem byl kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu. Z grafu (viz obr. 25) je patrné, že kmitočtový rozsah při -10 dB je v rozmezí od 2,351 GHz do 2,448 GHz. Rezonanční kmitočet je 2,408 GHz. Relativní odchylka je 4 %. Kruhově polarizovaná anténa měla kmitočtový rozsah v pásmu od 2,362 do 2,382, tj. 0,83 % relativně. Lepší šířku pásma má tedy kruhově polarizovaná planární anténa.

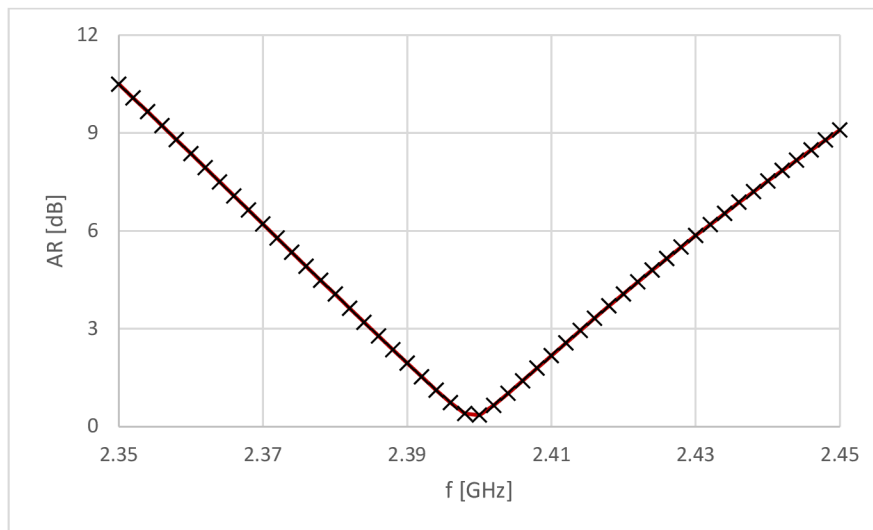


Obr. 25 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované fličkové antény. Výsledek simulace numerického modelu.

Dalším průběhem (obr. 26), je kmitočtový průběh osového poměru. Nejnižší úroveň (AR = 0,35 dB) je dosažena při kmitočtu 2,4 GHz. V tomto případě je anténa velmi dobře polarizačně přizpůsobena.

Porovnáním osových poměrů v závislosti na kmitočtu, je patrné, že polarizační přizpůsobení  $AR < 3$  dB je od 2,385 GHz do 2,414 GHz, což je 1,2% relativně. Kruhově polarizovaná anténa měla rozsah u osového poměru nad 5 dB od 2,385 GHz do 2,410 GHz (1,0% relativně). Obě kruhově polarizované antény mají tedy srovnatelné šířky polarizačního přizpůsobení.

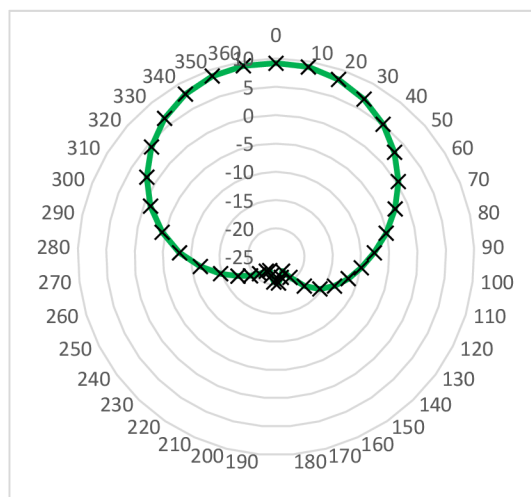




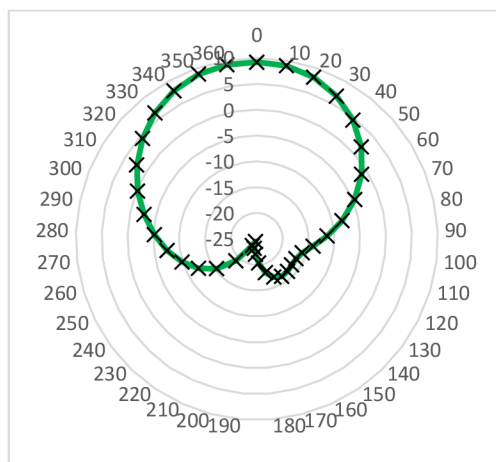
Obr. 26 Kmitočtový průběh osového poměru kruhově polarizované fličkové antény. Výsledek simulace numerického modelu.

Posledním simulovaným parametrem byly diagramy vyzařování. V této kapitole je modelována pouze kruhově polarizovaná levotočivá fličková anténa (LHCP). Obr. 27 znázorňuje vyzařovací charakteristiku v rovině  $xz$  a obr. 28 vyzařovací charakteristiku v rovině  $yz$ .

Pokud porovnáme vyzařovací charakteristiky obou antén v pásmu 2,4 GHz, je jediný rozdíl ve směrovosti. Kruhově polarizovaná planární anténa vyzařuje pravotočivě (RHCP) a kruhově polarizovaná fličková anténa levotočivě (LHCP). Tvarem charakteristiky mají antény předpokládanou vyzařovací charakteristiku.



Obr. 27 Vyzařovací charakteristika kruhově polarizované fličkové antény ve směru vyzařování LHCP, v rovině  $xz$ .

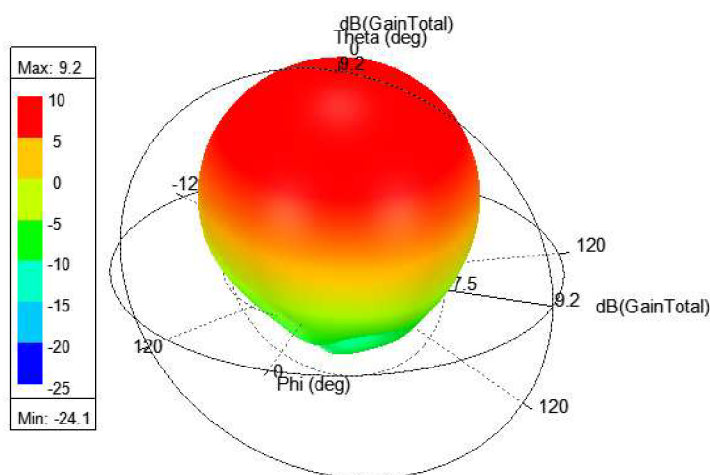


Obr. 28 Vyzařovací charakteristika kruhově polarizované fličkové antény ve směru vyzařování LHCP, v rovině yz.

Programem ANSYS HFSS byla modelována 3D směrová charakteristika kruhově polarizované fličkové antény. Anténa dosahuje ve směru maxima záření zisku  $G = 9,2$  dBi. Tvar vyzařovacího laloku je stejný jako v kapitole 1.2.2 u kruhově polarizované fličkové antény v pásmu 5,8 GHz.

Pokud se porovnají fličkové antény v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz a 5,8 GHz, je vidět, že anténa má při kmitočtu 2,4 GHz větší zisk o 2,4 dB oproti kruhově polarizované fličkové anténě v pásmu 5,8 GHz.

Porovnáme-li kruhově polarizovanou planární a fličkovou anténu, je rozdíl v zisku mezi těmito anténami  $G = 2,7$  dB.



Obr. 29 3D směrová charakteristika kruhově polarizované fličkové antény. Simulováno v ANSYS HFSS.

### 3. VÝROBA KRUHOVĚ POLARIZOVANÝCH ANTÉN

Výrobní proces začíná převedením vytvořeného modelu antény do správného formátu. Nejdříve exportováním antény ze simulačního prostředí ANSYS HFSS z formátu ANSYS Electronics Desktop (aedt) do formátu Drawing Exchange Format (dxf), který slouží zejména pro prostředí AutoCAD, ze kterého jde anténa exportovat do formátu Gerber. Formát Gerber se používá zejména pro práci fotoplotru v průmyslovém odvětví [3].

#### 3.1 Výroba antén s měděnou fólií

Nejprve byla vytvořena šablona antény na průhlednou fólii. Následně se ve fotoplotru natiskne na měděnou desku světelná fólie. Měděná deska spojená se světelnou fólií se spolu s vytisknutým tvarem antény na průhledné folii vloží pod UV lampu, kde se cca. po 10 vteřinách obtiskne tvar antény ze šablony na měděnou nalepovací fólii. Následně se měděná nalepovací fólie vloží do vany s chemickou kyselinou, při které dojde ke zvýraznění vodivých prvků antény. Poté se měděná nalepovací fólie přesune do druhé vany, ve které dojde k vyleptání požadovaného tvaru. Celý chemický proces se někdy nepovede na první pokus a je nutné jej opakovat. Následně se hotová anténa jemně omyje a následuje schnutí.



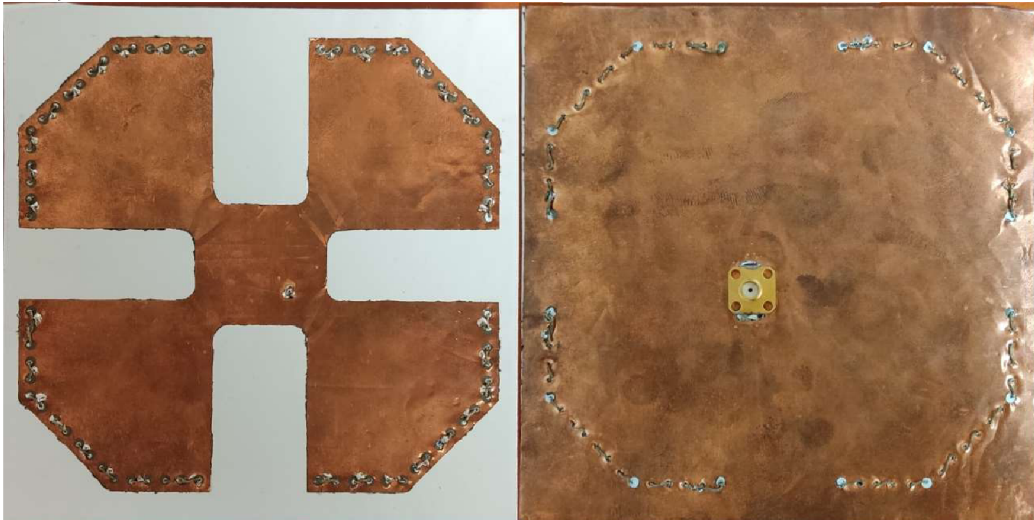
Obr. 30 Vyleptaná fličková anténa s ořezanými hranami

Textilním substrátem o výšce 2,6 mm byla vybrána tkanina 3D097, (viz obr. 31), vyrobená společností SINTEX. Tkanina 3D097 má relativní permitivitu 1,2 [4].



Obr. 31 Tkanina SINTEX 3D097

Na tkaninu viz obr. 31 bylo zapotřebí žehličkou nažehlit z obou stran bílou krycí fólií, která vyrovnala nerovnosti na tkanině. Na bílou krycí fólii se následně nalepila měděná fólie, viz obr. 32 a 33.



Obr. 32 Výrobek antény (a) pohled shora, (b) pohled zespodu

Kruhově polarizovaná planární anténa viz obr. 32 byla skrz postranní prokovy prošita postříbřenou vodivou nití. Z důvodu velké velikosti prokovů ( $d = 2,8$  mm) a malého průměru vodivé nitě ( $d = 1$  mm), bylo nutné vodivou nit s přidáním cínu přiletovat k měděné fólii. Díky tomu došlo k vodivému spojení anténního prvku s nití.

K anténě byl přiletován SMA konektor. U kruhově polarizované planární antény byl střed konektoru připojen k vrchní straně anténního prvku a obal konektoru k zemní desce.



Obr. 33 Výrobek flíčkové antény (a) pohled shora, (b) pohled zespodu

Z důvodu velké šířky napáječe ( $d_1=11,4$  mm) přizpůsobovacího obvodu flíčkové antény viz obr. 33, nebylo možné SMA konektor připojit přímo k napáječi (šířka dielektrika SMA konektoru je zhruba 4 mm). Muselo tedy dojít ke kompromisu a vymyslet správné připojení SMA konektoru k mikropásku. Nabízelo se více možností, například připojení SMA konektoru ze spodu k mikropásku, to se ale simulací vyvrátilo, protože by došlo k impedančnímu nepřizpůsobení. Nakonec se jako nejlepší varianta jevila seříznout hrany mikropáskového napáječe tak, aby nedošlo ke zkratu mezi středem a zemí a připojit SMA konektor napřímo. Na obr. 33 u flíčkové antény s ořezanými hranami byl střed konektoru připojen k mikropásku a obal konektoru k zemní desce.

Seříznutím hran mikropáskového napáječe se nyní předpokládá mírné posunutí kmitočtových charakteristik v závislosti na činiteli odrazu a v závislosti na osovém poměru směrem k nižším kmitočtům. Vyzařovací charakteristiky a zisk flíčkové antény by měly zůstat stejné.

### 3.2 Výroba antény sítotiskem

I v tomto případě je potřeba nejdříve vyrobit šablonu antény tím, že se tvar antény otiskne na průhlednou fólii. Šablona vznikne vyplněním vnějšího prostoru antény. Dále se na sebe naváže hotová šablona s krycí fólií. Celá šablona spolu s krycí fólií se nalepí na desku s jemným sítem. Síto musí být dokonale čisté, aby stříbrná pasta, která se na síto následně nanese, dokonale protekla. Postupným stěrkováním se dosáhne rovnoměrného prolití stříbrné pasty sítem. Z druhé strany síta vznikne díky přilepené šabloně požadovaný tvar antény na krycí fólii. Následně je nutné nechat stříbrnou pastu ideálně 24 hodin při pokojové teplotě vysychat. Po zaschnutí se vyjme síto i se šablonou, zůstane krycí fólie, na které je stříbrnou pastou vyobrazen motiv antény, viz obr. 34.



Obr. 34 Vyrobená planární anténa sítotiskem

Z důvodu nedostatku materiálu pro výrobu antény sítotiskem se na spodní stranu nalepila měděná fólie. Postupem bylo nažehlení krycí fólie na zadní stranu pleteniny SINTEX 3D097. Poté se nažehlila vrchní část antény se sítotiskem z obr. 34. Nakonec se na krycí fólii na spodní straně nalepila měděná fólie.

Následně se stejně jako v kapitole 3.1 prošla prokovo postříbřená vodivá nit. Z důvodu dobré vodivosti mezi anténním prvkem a nití, se speciálním vodivým lepidlem spojila nit s anténním prvkem.

Planární kruhově polarizovaná anténa je stejně jako předchozí antény z kapitoly 3.1 napájena SMA konektorem. Střed konektoru se s anténním prvkem spojil vodivým lepidlem a vnější plášť konektoru se přiletoval k zemní desce antény.

Z důvodu použití speciálního vodivého lepidla bylo potřeba nechat lepidlo důkladně vytvrdnout při pokojové teplotě, alespoň 24 hodin.



Obr. 35 Výrobek antény (a) pohled shora, (b) pohled zespodu

## 4. MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ ANTÉN

Měření bylo uskutečněno na třech anténách:

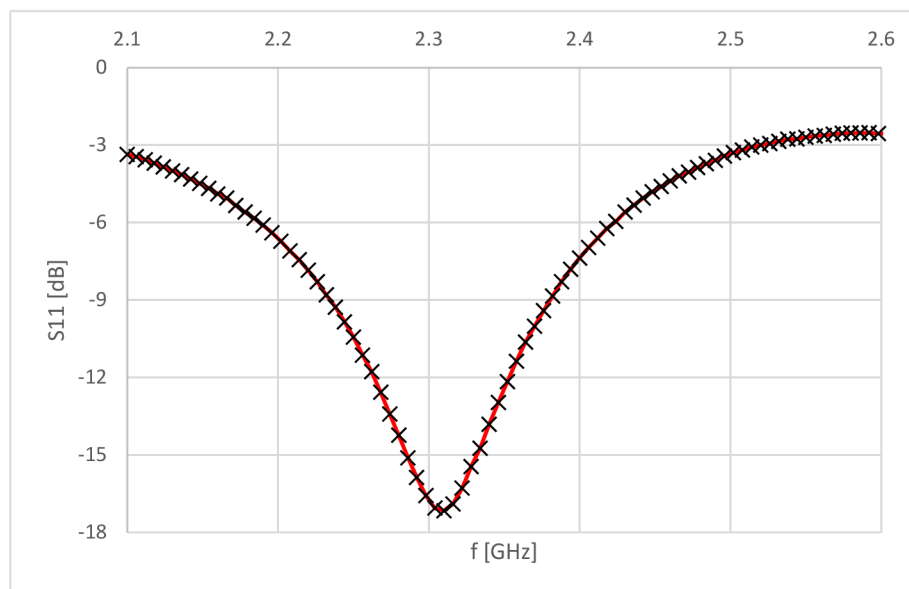
- Na kruhově polarizované flíčkové anténě vyrobené z měděné fólie;
- Na kruhově polarizované planární anténě vyrobené z měděné fólie;
- Na kruhově polarizované planární anténě vyrobené sítotiskem.

Kmitočtové průběhy velikosti činitele odrazu byly změřeny na vektorovém obvodovém analyzátoru. Kmitočtová závislost osového poměru, směrové charakteristiky a zisk antén byly změřeny ve stíněné komoře.

### 4.1 Kruhově polarizovaná planární anténa z měděné fólie

Prvním změřeným průběhem kruhově polarizované planární antény viz obr. 32, byl kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu. Kmitočtový rozsah při  $S_{11} = -10$  dB je v rozmezí od 2,25 GHz do 2,37 GHz. Relativní odchylka je 5 %. Kmitočtový průběh má nejmenší velikost činitele odrazu při 2,31 GHz,  $S_{11} = -17,2$  dB.

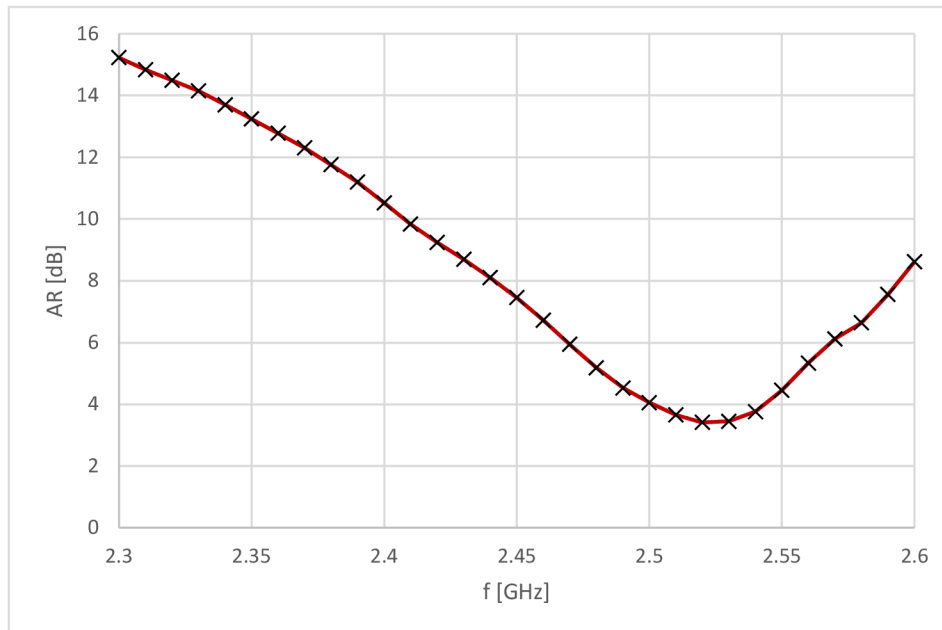
Porovnáním se simulovaným průběhem této antény je patrné, že rezonanční kmitočet velikosti činitele odrazu je posunut k nižším kmitočtům o 60 MHz.



Obr. 36 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované planární antény. Výsledek změřeného průběhu.

Následujícím změřeným průběhem byl osový poměr v závislosti na kmitočtu. Z naměřeného průběhu je patrný značný posun k vyšším frekvencím. Nejnižší úroveň osového poměru je při rezonančním kmitočtu 2,53 GHz.

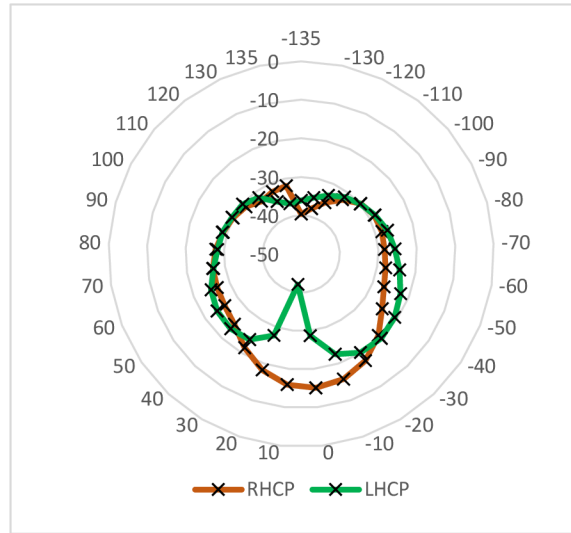
Oproti simulovanému průběhu totožné antény, je posun k vyšším kmitočtům o 130 MHz. Pásmo polarizačního přizpůsobení  $AR < -3$  dB je u této antény v rozsahu od 2,47 GHz do 2,57 GHz, tj. 4,2 % relativně.



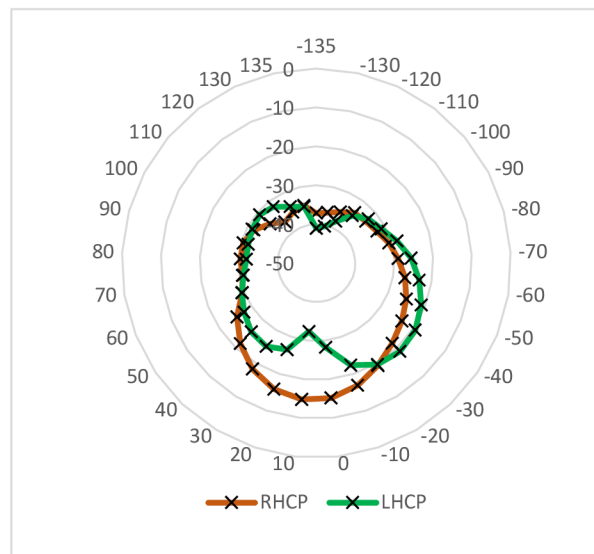
Obr. 37 Kmitočtový průběh osového poměru planární antény.  
Výsledek změřeného průběhu.

Ze směrových charakteristik z obr. 38 a 39 je patrné, že anténa vyzařuje nejlépe v pravotočivém směru. Vyzařovací charakteristiky byly změřené při kmitočtu 2,53 GHz. Při tomto kmitočtu byla nejnižší hodnota osového poměru. Naopak na tomto kmitočtu nebyla velikost činitele odrazu optimální, anténa zde nebyla impedančně přizpůsobená.





Obr. 38 Vyzařovací charakteristika antény v rovině xz.  
Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).



Obr. 39 Vyzařovací charakteristika antény v rovině yz.  
Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).

Zisk antény z důvodu impedančního nepřizpůsobení na rezonančním kmitočtu osového poměru, byl  $G = -1,6$  dBi.

Změřené parametry kruhově polarizované planární antény se od simulace výrazněji lišily. U kmitočtové závislosti činitele odrazu a kmitočtové závislosti osového poměru mohla za změnu bílá krycí fólie, s výškou 0,08 mm a s relativní permitivitou 2,21, mezi zemní měděnou fólií a tkaninou. V simulaci použita nebyla, z toho důvodu se změnil činitel odrazu i osový poměr.

Dalším vlivem na tyto parametry byla samotná velikost antény. Textil je ohebný materiál, a i když výroba antény probíhala co nejpřesněji, nepodařilo se anténu vzhledem k textilu dostatečně zafixovat. Při měření tedy nebyla anténa zcela rovná, z toho důvodu také mohlo dojít k posunutí rezonančního kmitočtu u jednotlivých průběhů.

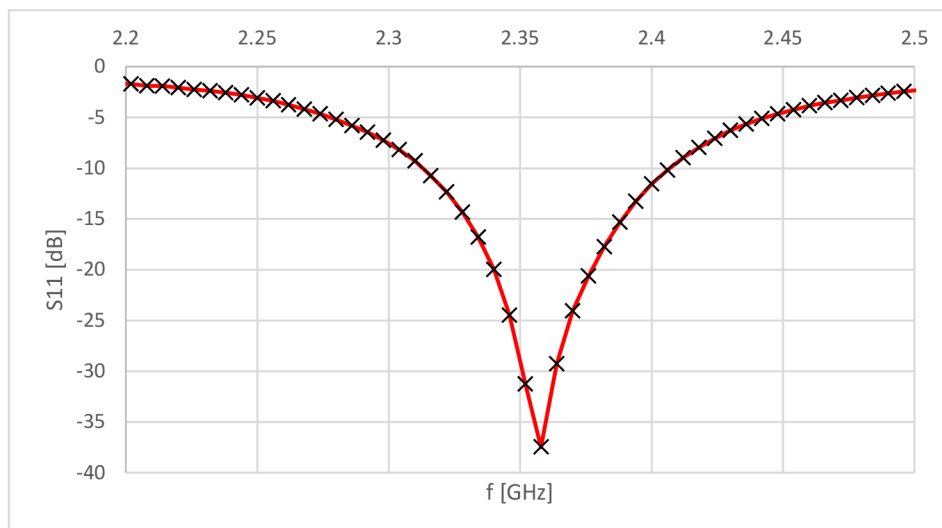
## 4.2 Kruhově polarizovaná flíčková anténa

Prvním změřeným průběhem kruhově polarizované flíčkové antény byl kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu, viz obr. 40. Z grafu je vidět, že kmitočtový rozsah při -10 dB je od 2,315 GHz do 2,410 GHz. Rezonanční kmitočet antény je 2,36 GHz, v minimu  $S_{11} = -37,5$  dB. Relativní odchylka je 4 %.

Pokud porovnáme změřený průběh s výsledkem simulace uvidíme, že změřený kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu má rezonanční kmitočet posunut o 50 MHz k nižším kmitočtům. Relativní odchylka je stejná, v obou případech 4 %. Úroveň činitele odrazu se v případě změřené antény snížila o 6 dB.

Odchylka změřeného rezonančního kmitočtu od simulovaného, byla pravděpodobně způsobena ochranou fólií o relativní permitivitě 2,21 s výškou 0,08 mm, která byla nažehlena mezi zemní měděnou fólií a textilem, ale v simulaci byla z této strany zanedbána. Dále mohla být odchylka způsobena seřiznutím hran napáječe mikropásku.

Oproti kruhově polarizované planární anténě je kruhově polarizovaná flíčková anténa lépe přizpůsobená, má rezonanční kmitočet blíže k 2,4 GHz a vykazuje lepší pásmo přizpůsobení.



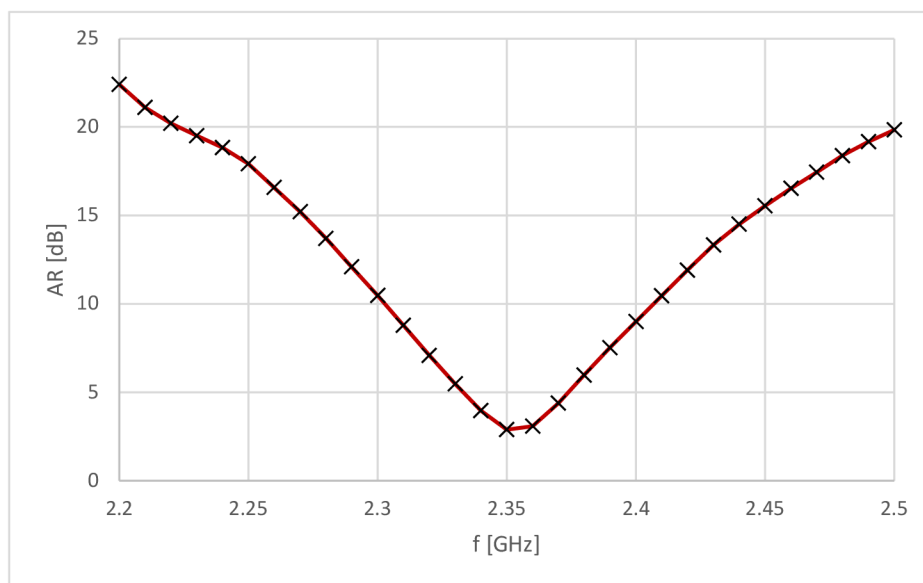
Obr. 40 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované flíčkové antény. Výsledek změřeného průběhu.

Dalším změřeným průběhem byl kmitočtový průběh osového poměru, viz obr. 41. Z průběhu je patrné, že rezonanční kmitočet je 2,35 GHz, při nejnižší úrovni 2,5 dB. Resonanční kmitočet je stejně, jako u S11 posunut oproti simulaci o 50 MHz. I v tomto případě za odchylku pravděpodobně mohou již zmiňované důvody.

Polarizační přizpůsobení  $AR < 3$  dB je v rozsahu od 2,325 GHz do 2,375 GHz, to je 2 % relativně.

Porovnáním kmitočtové závislosti osového poměru oproti stejné anténě ze simulace, lze říci, že je polarizační přizpůsobení srovnatelné.

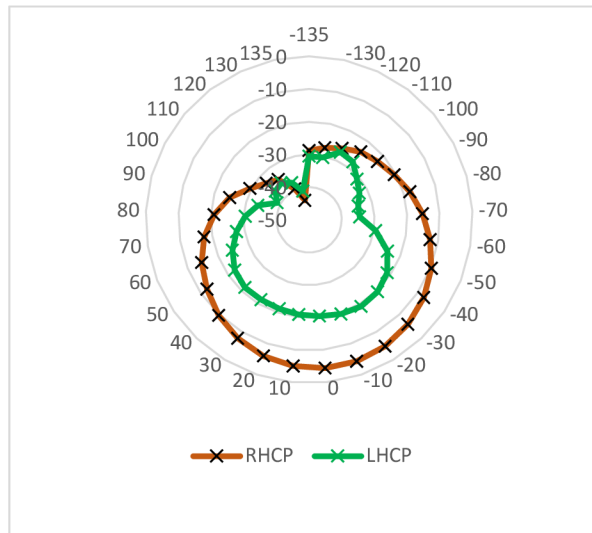
I u tohoto průběhu vykazuje kruhově polarizovaná fličková anténa lepší polarizační přizpůsobení, oproti kruhově polarizované planární anténě.



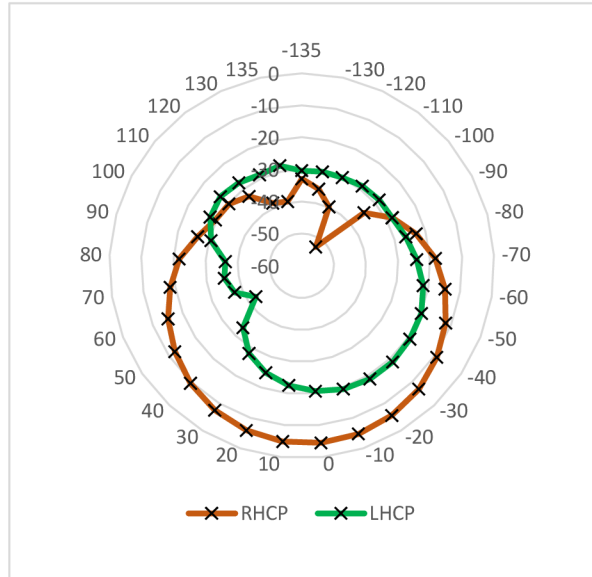
Obr. 41 Kmitočtový průběh osového poměru kruhově polarizované fličkové antény. Výsledek změřeného průběhu.

Posledními změřenými parametry u kruhově polarizované fličkové anténě byly směrové charakteristiky. Oproti simulovaným charakteristikám byla vyrobena fličková anténa ve směru vyzařování RHCP. To má za následek pouze opačný směr vyzařování.

Ze změřených vyzářovacích charakteristik viz obr. 42 a 43, je vidět, že se opravdu jedná o pravotočivou směrovost. Vyzářovací charakteristiky byly z důvodu posunutí rezonančního kmitočtu změřené na kmitočtu 2,35 GHz od 0° do 270°.



Obr. 42 Vyzářovací charakteristiky flíčkové antény v rovině xz  
Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).



Obr. 43 Vyzářovací charakteristiky flíčkové antény v rovině yz  
Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).

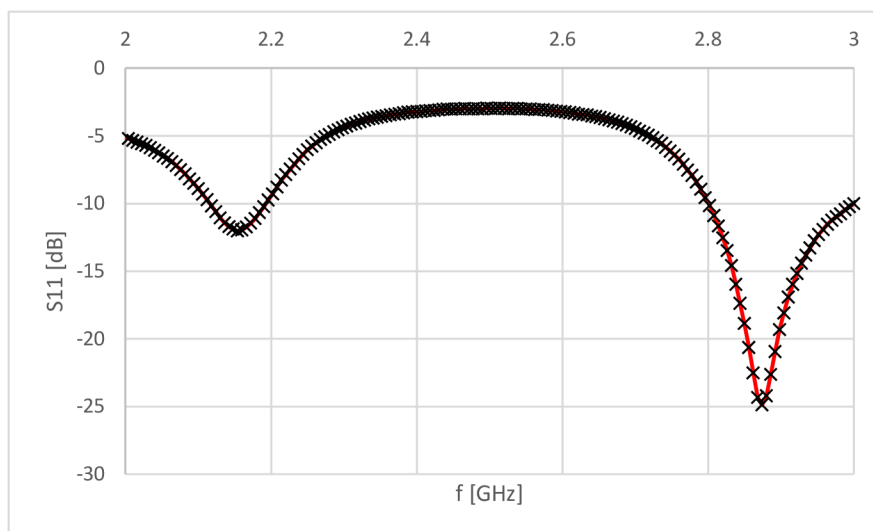
Zisk kruhově polarizované flíčkové antény byl  $G = 8,4$  dBi, při kmitočtu 2,35 GHz. Oproti simulované anténě je zde pokles zisku o 0,8 dB.

### 4.3 Kruhově polarizovaná planární anténa ze sítotisku

Poslední anténou, která byla vyrobena, byla kruhově polarizované planární anténa, která byla vyrobena metodou sítotisku. Anténa byla vyrobena s totožnými rozměry, jako v případě první antény s měděnou fólií.

Nejdříve byl změřen činitel odrazu v závislosti na kmitočtu. Rezonanční kmitočet je nejnižší při činiteli odrazu -25 dB na kmitočtu 2,88 GHz. Při  $S_{11} = -10$  dB je kmitočtové pásmo v rozsahu od 2,80 GHz do 3 GHz, tj. 8,3 % relativně. Oproti simulované anténě, je v tomto případě rezonanční kmitočet posunut o 510 MHz k vyšším kmitočtům.

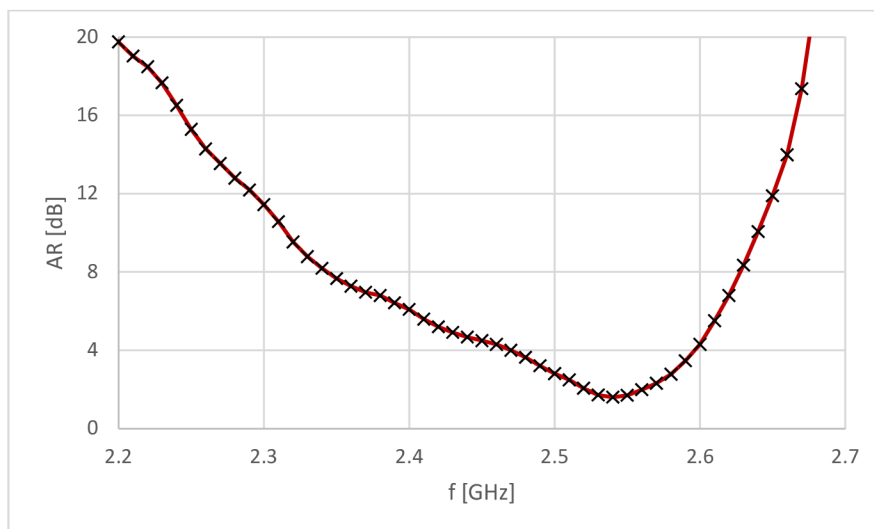
U antény ze sítotisku je kmitočtová závislost činitele odrazu z publikovaných antén nejhorší. I v tomto případě budou za výraznou odchylkou stejné chyby, jako u předešlé kruhově polarizované planární antény s měděnou fólií. U této antény je vidět, jak velký vliv na výsledný kmitočtový průběh činitele odrazu má velikost prokovů. Oproti simulaci, kde měly prokovy průměr 2,8 mm, má vyrobená anténa na zemní měděné desce průměr prokovů 1 mm. Z tohoto důvodu byl rezonanční kmitočet posunut o 510 MHz.



Obr. 44 Kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu planární antény. Výsledek změřeného průběhu.

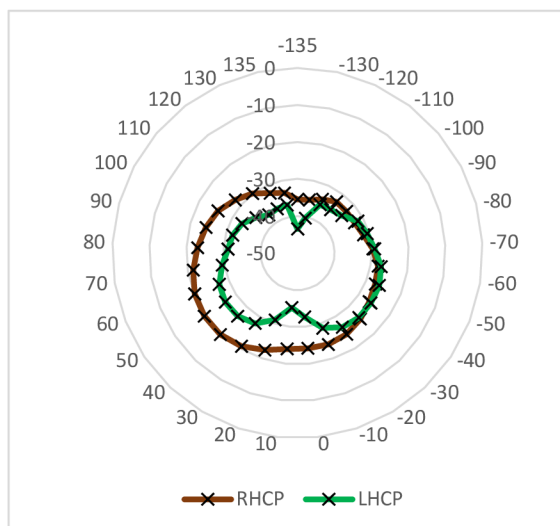
Následujícím průběhem je kmitočtová závislost osového poměru. Osový poměr je nejnižší v úrovni 1,6 dB, při rezonančním kmitočtu 2,54 GHz. Pásmo propustnosti  $AR < 3$  dB je od 2,440 GHz do 2,605 GHz, tj. 6,9 % relativně.

Porovnáním s kruhově polarizovanou flíčkovou anténou a planární anténou s měděnou fólií má anténa se sítotiskem horší pásmo propustnosti. O kruhově polarizované planární anténě s měděnou fólií a se sítotiskem, se dá říci, že antény mají stejný rezonanční kmitočet.

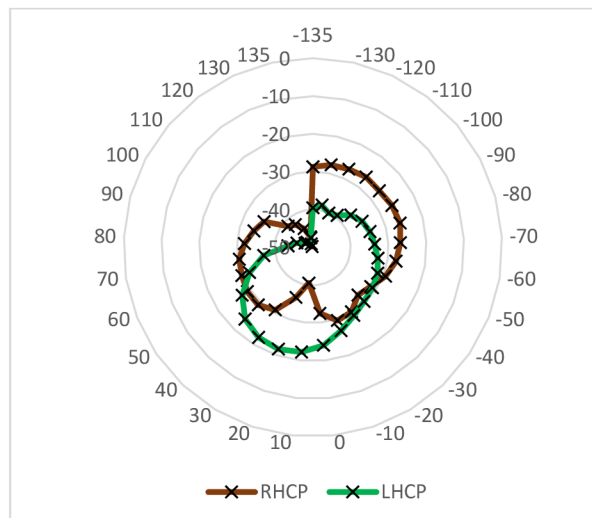


Obr. 45 Kmitočtový průběh osového poměru planární antény.  
Výsledek změřeného průběhu.

U směrové charakteristiky kruhově polarizované planární antény se sítotiskem viz obr. 46 je poznat, že se jedná o pravotočivou polarizaci. U obr. 47, kdy byla změřena vyzářovací charakteristika v rovině  $yz$  není patrné, o jakou polarizaci se jedná. Směrové charakteristiky byly měřeny při rezonančním kmitočtu osového poměru (2,54 GHz). Na tomto kmitočtu nebyla anténa dostatečně impedančně přizpůsobená a byla nízká úroveň přenosu, z toho důvodu nejsou zcela optimální ani vyzářovací charakteristiky.



Obr. 46 Vyzářovací charakteristiky planární antény v rovině  $xz$   
Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).



Obr. 47 Vyzařovací charakteristiky planární antény v rovině yz  
Změřená LHCP (zeleně) a RHCP (hnědě).

Zisk kruhově polarizované planární antény ze sítotisku byl z důvodu nízké úrovně přenosu  $G = -11,3$  dBi.

Kruhově polarizovaná planární anténa ze sítotisku měla oproti anténám s měděnou fólií nejhorší parametry. Pravděpodobně největším důvodem je velikost prokůvů antény. Zemní deska z měděné fólie byla prošitá pouze nití o velikosti 1 mm, anténní prvek měl ale velikost prokůvů 2,8 mm.

U kmitočtové závislosti osového poměru měly všechny antény posun rezonančního kmitočtu od simulovaných charakteristik s rezonančním kmitočtem 2,4 GHz. Tato odchylka vznikla s největší pravděpodobností vlivem zanedbané krycí fólie v simulaci.

Nejllepšími naměřenými parametry oproti simulaci se ukázala být kruhově polarizovaná fličková anténa. Fličková anténa i přes kmitočtový posun o 50 MHz od rezonančního kmitočtu 2,4 GHz, byla dobře impedančně přizpůsobená na rezonančním kmitočtu 2,35 GHz. Díky tomu byly velmi dobré směrové charakteristiky a výsledný zisk antény.

Naopak u kruhově polarizovaných planárních antén došlo u obou antén (měděnou fólií a sítotiskem) k posunutí rezonančního kmitočtu osového poměru zhruba o 130 MHz, oproti simulovanému rezonančnímu kmitočtu 2,4 GHz. Ukázalo se, že vlivem složitosti planární antény došlo k impedančnímu nepřizpůsobení na rezonančním kmitočtu 2,53 GHz. Z tohoto důvodu ostatní naměřené parametry planární antény měděnou fólií a sítotiskem se ukázaly být špatné.

## 5. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala návrhem kruhově polarizovaných planárních antén v pásmu 5,8 GHz a 2,4 GHz, a dále výrobou a měřením parametrů navržených antén v pásmu 2,4 GHz. V první kapitole byl vytvořen numerický model kruhově polarizované planární antény, která byla popsána v [1], a dále model kruhově polarizované fličkové antény, která byla do práce doplněna jako referenční. Byly ověřeny veškeré publikované průběhy a parametry obou antén.

Kmitočtová závislost činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované planární antény měla minimum na kmitočtu 5,73 GHz, frekvenční rozsah impedančního přizpůsobení byl v rozmezí 5,68 až 5,81 GHz. Podle [1] měla anténa minimum činitele odrazu na kmitočtu 5,78 GHz a frekvenční rozsah impedančního přizpůsobení byl 5,70 až 5,90 GHz.

Kmitočtová závislost osového poměru vykazovala pásmo polarizačního přizpůsobení 5,73 až 5,76 GHz. Podle [1] měla anténa pásmo polarizačního přizpůsobení 5,77 až 5,79 GHz.

Vyzařovací charakteristiky a kmitočtový průběh celkového zisku jsou téměř shodné s [1]. Ze simulací je vidět, že průběh zisku je mírně posunutý k nižším kmitočtům ve srovnání s [1]. Vypočítaný celkový zisk antény je 9,3 dB oproti zisku 10,0 dB v [1].

Kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu kruhově polarizované fličkové antény vykazovala minimum na kmitočtu 5,83 GHz a frekvenční pásmo impedančního přizpůsobení bylo v rozmezí 5,74 až 5,91 GHz. Relativní šířka pásma fličkové antény byla 2,9 % a kruhově polarizované antény [1] je 2,2 %. V porovnání je vidět, že fličková anténa má rezonanční kmitočet vyšší než planární anténa, ale frekvenční pásmo impedančního přizpůsobení je u obou antén srovnatelné.

Co se týče osového poměru, fličková anténa má frekvenční pásmo polarizačního přizpůsobení 5,67 až 5,73 GHz. Relativní šířka pásma je u fličkové antény 1 %, zatímco u antény [1] je 0,5 %. Obě antény jsou i v tomto případě srovnatelné.

Kruhově polarizovaná anténa [1] má směrovější vyzařovací charakteristiky než anténa fličková. Celkový zisk fličkové antény dosahoval 6,8 dBi. Je vidět, že kruhově polarizovaná planární anténa [1] má díky své složitosti zisk větší o 2,5 dB.

Ve druhé kapitole byly kruhově polarizované antény z první kapitoly, optimalizovány pro pásmo 2,4 GHz. Konvenční substrát byl nahrazen trojrozměrnou pleteninou. Aby se eliminovaly nerovnosti pleteniny, byla na povrch nažehlena krycí fólie. I zde byly vypočítány kmitočtové průběhy parametrů obou antén.

Kmitočtová závislost činitele odrazu na vstupu kruhově polarizované planární antény měla minimum na kmitočtu 2,372 GHz, frekvenční rozsah impedančního přizpůsobení byl v rozmezí 2,362 až 2,382 GHz.

Kmitočtová závislost osového poměru vykazovala pásmo polarizačního přizpůsobení lehce nad 5 dB v rozmezí 2,385 až 2,410 GHz.



Vyzařovací charakteristiky měly dobrou směrovost v pravotočivém směru vyzařování. Zisk antény byl 6,5 dBi. Oproti stejné anténě na kmitočtu 5,8 GHz poklesl zisk na kmitočtu 2,4 GHz o 2,8 dB.

Kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu kruhově polarizované flíčkové antény vykazovala minimum na kmitočtu 2,408 GHz a frekvenční pásmo impedančního přizpůsobení bylo v rozmezí 2,351 až 2,448 GHz. Relativní šířka pásma impedančního přizpůsobení flíčkové antény byla 4,0 %, zatímco kruhově polarizovaná anténa vykazovala 0,83 %. Porovnáním je patrné, že širší frekvenční pásmo impedančního přizpůsobení má flíčková anténa.

Osový poměr flíčkové antény vykazuje pásmo polarizačního přizpůsobení 2,385 až 2,414 GHz. Relativní šířka pásma polarizačního přizpůsobení flíčkové antény je 1,2 %, zatímco u planární antény je to 1,0 %. Polarizační přizpůsobení mají obě antény v tomto případě srovnatelné.

Směrové charakteristiky u flíčkové antény mají lepší vyzařování ve směru hlavního laloku než u planární antény. Charakteristiky u flíčkové antény mají větší směrovost. Zisk flíčkové antény je 9,2 dBi. Oproti stejné anténě na kmitočtu 5,8 GHz měla flíčková anténa na kmitočtu 2,4 GHz větší zisk o 2,4 dB. Ukázalo se, že složitost planární antény v tomto případě nehraje roli, flíčková anténa má oproti planární anténě větší zisk o 2,7 dBi.

Ve třetí kapitole byla vyrobena planární anténa a flíčková anténa pomocí měděné fólie, a planární anténa byla vyrobena i sitotiskem. Antény se podařilo vyrobit, ale vyskytly se problémy, se kterými se při návrhu antén nepočítalo. Při výrobě planárních antén se vyskytl problém s velikostí prokuvů, které měly průměr 2,8 mm, ale byly prošity vodivou nití pouze o průměru 1 mm. U flíčkové antény muselo dojít k seříznutí hran napáječe mikropásku, z důvodu velké šířky mikropásku.

Ve čtvrté kapitole popisují, jak proběhlo měření parametrů vyrobených antén. První anténou byla kruhově polarizovaná planární anténa vyrobená z měděné fólie. Kmitočtový průběh činitele odrazu měl minimum při 2,31 GHz, frekvenční pásmo impedančního přizpůsobení je v rozmezí 2,25 až 2,37 GHz. Relativní odchylka je 5 %. Rezonanční kmitočet byl posunut oproti simulaci o 60 MHz a o 90 MHz ke kmitočtu 2,4 GHz.

Osový poměr v závislosti na kmitočtu měl rezonanci při 2,53 GHz. Pásmo polarizačního přizpůsobení bylo v rozsahu 2,47 až 2,57 GHz. Relativní odchylka 4,2 %.

Směrové charakteristiky byly změřeny na kmitočtu 2,53 GHz. Potvrdily se předpoklady ze simulace, že anténa vyzařuje nejlépe v pravotočivém směru. Z důvodu impedančního nepřizpůsobení při měřeném kmitočtu 2,53 GHz byl zisk antény -1,3 dBi.

Druhou měřenou anténou byla flíčková anténa z měděné fólie. Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu měl minimum při kmitočtu 2,36 GHz, pásmo impedančního přizpůsobení bylo v rozmezí 2,315 až 2,410 GHz. Relativní odchylka je 4 %.

Kmitočtový průběh osového poměru měl rezonanční kmitočet při 2,35 GHz. Polarizační přizpůsobení je v pásmu 2,325 až 2,375 GHz. Relativní odchylka je 2 %.

Vyzařovací charakteristiky byly změřeny na kmitočtu 2,35 GHz. Prokázalo se, že se jedná o pravotočivou polarizaci. Z důvodu zrcadlení antény na měděné fólii, byla vyrobena oproti simulaci flíčková anténa s pravotočivou polarizací. Tento fakt byl zanedbán, protože ostatní parametry bývají stejné (viz kapitola 1.2.2). Zisk antény je 8,4 dBi, oproti simulaci došlo ke snížení zisku o 0,8 dB.

Třetí změřenou anténou byla kruhově polarizovaná planární anténa vyrobená sítotiskem. Kmitočtová závislost činitele odrazu měla minimum při kmitočtu 2,88 GHz. Pásmo impedančního přizpůsobení bylo v rozmezí 2,80 až 3 GHz. Relativní odchylka je 8,3 %. Rezonanční kmitočet je oproti simulované anténě posunut o 510 MHz.

Kmitočtová závislost osového poměru má rezonanční kmitočet při 2,54 GHz. Polarizační přizpůsobení je v rozmezí 2,440 až 2,605 GHz. Relativní odchylka je 6,9 %. Oproti simulované anténě je rezonanční kmitočet posunut o 140 MHz.

Směrové charakteristiky byly měřeny při rezonančním kmitočtu osového poměru, na kmitočtu 2,54 GHz. Na tomto kmitočtu byla anténa impedančně nepřizpůsobená, to vedlo k nedokonalému vyzařování. Z tohoto důvodu byl špatný i zisk, který byl -11,3 dBi.

Porovnáním tří změřených antén, vykazovala nejlepší parametry kruhově polarizovaná flíčková anténa z měděné fólie. Rezonanční kmitočet činitele odrazu i osového poměru byl od kmitočtu 2,4 GHz posunut o 50 MHz.

Porovnáním planárních antén s měděnou fólií a sítotiskem, vyšla lépe planární anténa z měděné fólie. Rezonanční kmitočty osových poměrů obou antén byly srovnatelné, ale impedanční přizpůsobení, vlivem činitele odrazu, měla s menším posuvem od kmitočtu 2,4 GHz anténa s měděnou fólií. Oproti anténě se sítotiskem, která měla rezonanční kmitočet posunut o 480 MHz od kmitočtu 2,4 GHz, měla anténa s měděnou fólií posun o 90 MHz. Z tohoto důvodu měla anténa s měděnou fólií i lepší směrové charakteristiky. Zisky obou antén vlivem impedančního nepřizpůsobení byly špatné.

Na změřených parametrech jednotlivých antén, se projevil nedostatek zkušeností s návrhem a samotnou výrobou antén. Už při návrhu vznikly chyby, které bych nyní řešil jiným způsobem. Největším problémem, který mohl za posun u všech vyrobených antén, byla krycí fólie. Při simulacích, oproti výrobě, nebyla použita krycí fólie mezi zemní deskou a tkaninou. U planárních antén mohly za další kmitočtový posun ještě velikosti prokovic a u flíčkové antény velká šířka napáječe mikropásku, kdy bylo nutné seříznout hrany, aby nedošlo ke zkratu mezi mikropáskem a SMA konektorem.

Ukázalo se, že „jednoduchá“ kruhově polarizovaná flíčková anténa měla na pletenině lepší vlastnosti než složitá, kruhově polarizovaná planární anténa. Důvodem podstatného rozdílu mezi planární a flíčkovou anténou byla velikost anténního prvku. Planární anténa byla svými rozměry na pleteninu velká. Z důvodu velké velikosti docházelo k deformaci anténního prvku a k nepřesnému vyzařování antény.

Aby bylo dosaženo lepších vlastností kruhově polarizované planární antény, bylo by nutné zpevnit textilní substrát tak, aby se předešlo ohýbání antény.

## LITERATURA

- [1] TIANMING YANG; ZHIQIN ZHAO; DEQIANG YANG; ZAIPING NIE;  
*A single-layer circularly polarized antenna with improved gain based on quarter-mode substrate integrated waveguide cavities array*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, vol. 19, no 12, p. 2388-2392. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3033621
- [2] ÖPER, MERVE. *Internship Report: Circularly polarized patch antenna was designed (5.8 GHz)*. Brno University of Technology, 2016-09. Internship Report. The Faculty of Electrical Engineering and Communication Brno University of Technology. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.
- [3] KLAUZ, Milan. DPS - elektronika od A do Z: odborný časopis pro vývoj a výrobu v oboru elektroniky. *DPS elektronika: CAD/CAE/CAM - články*. Liberec: CADware, 2012-, 2013. ISSN 1805-5044. Dostupné z: doi:1805-5044
- [4] CUPAL, M.; RAIDA, Z. Circularly polarized substrate integrated textile antenna for ISM band 24 GHz. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Verona (Italy): IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICEAA.2017.8065472

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

CP	Circular Polarization
RHCP	Right Handed Circular Polarization
LHCP	Left Handed Circular Polarization
ISM	Industrial Scientific and Medical
HFSS	High Frequency Structure Simulator
AEDT	ANSYS Electronics Desktop
DXF	Drawing Exchange Format

Symbols:

$f$	frekvence	(Hz)
$G$	zisk	(dB)
$AR$	osový poměr	(dB)
$\epsilon_r$	relativní permitivita	(-)
$L_1$	délka substrátu	(m)
$W_1$	šířka substrátu	(m)
$L_{SIW}$	délka od středu prokovu po rádius	(m)
$W_{SIW}$	šířka od středu prokovu po rádius	(m)
$L_2$	vzdálenost mezi šesti prokovy	(m)
$W_2$	vzdálenost mezi šesti prokovy	(m)
$R_1$	rádius	(m)
$d$	průměr prokovu	(m)
$S$	vzdálenost středů prokovů	(m)
$dx$	vzdálenost ve směru osy x	(m)
$dy$	vzdálenost ve směru osy y	(m)
$D_1$	průměr koaxiálního konektoru	(m)
$X$	šířka substrátu	(m)
$Y$	délka substrátu	(m)
$w$	šířka anténního modelu	(m)
$L$	délka anténního modelu	(m)
$v$	délka odvěsny trojúhelníku	(m)
$l_1$	délka napájecího mikropásku	(m)
$l_2$	délka mikropásku	(m)
$d_1$	šířka napájecího mikropásku	(m)
$d_2$	šířka mikropásku	(m)