

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2023

Dušan Kratochvíl



# 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 SE SUPERSTRÁTEM PRO CUBESAT**

CIRCULARLY POLARIZED SUPERSTRATE ANTENNA FOR CUBESAT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Dušan Kratochvíl**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

**BRNO 2023**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Dušan Kratochvíl

**ID:** 230276

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## Kruhově polarizovaná anténa se superstrátem pro CubeSat

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s konceptem flíčkové antény se superstrátem, která byla navržena pro bezdrátovou komunikaci s CubeSatem v kmitočtovém pásmu 8,35 až 8,95 GHz. Počítačovou simulací ověřte, že parametry antény odpovídají hodnotám publikovaným v [1].

Mikrovlnné substráty, které byly použity k realizaci antény v [1], nahradte substrátem ARLON 25N (relativní permitivita 3.38, výška 1.524 mm). Anténu optimalizujte z hlediska impedančního přizpůsobení, osového poměru a zisku. Optimalizovanou anténu vyrobte a změřené parametry porovnejte s výsledky simulací.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] L. LESZKOWSKA; M. RZYMOWSKI; K. NYKA; L. KULAS; High-gain compact circularly polarized X-band superstrate antenna for CubeSat applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, vol. 20, no. 11, p. 2090-2094. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3076673

[2] C. A. BALANIS; Antenna Theory: Analysis and Design, 4th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. ISBN: 978-1-1186-4206-1

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 29.5.2023

**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**

Tato práce se zabývá ověřením parametrů kruhově polarizované antény se superstrátem pro CubeSat, která byla popsána v odborném článku [1]. Anténa je zkoumána v kmitočtovém pásmu 8,35 až 8,95 GHz. Prvně je zkoumána samotná anténa bez superstrátové vrstvy. Změnou polohy bodu napájení a rozměrů anténního prvku zjistíme, jak se mění činitel odrazu na vstupu. Dále je provedena celková simulace antény společně se superstrátovou vrstvou. Substrát antény byl nahrazen mikrovlnným substrátem ARLON 25N dostupným v laboratoři a anténa byla pro tento substrát optimalizována. V poslední řadě je taková anténa zhotovena a její změřené parametry jsou porovnány s výsledky ze simulace.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Anténa, superstrátová vrstva, činitel odrazu, vyzařovací diagram, zisk antény, frekvenční pásmo, dokonalý elektrický vodič (PEC)

## **ABSTRACT**

The thesis is focused on parameter verification of a circularly polarized antenna with a superstrate, which was designed for CubeSat and presented in the research paper [1]. The frequency band of the designed antenna is from 8.35 to 8.95 GHz. First, the antenna is analyzed without the superstrate layer. Varying the feed position and antenna element dimensions, the changes of reflection coefficient at the input is matched. Second, an overall simulation with a superstrate layer is performed. The antenna substrate was replaced with ARLON 25N microwave substrate available in the laboratory, and the antenna was optimized for this substrate. Finally, such an antenna is fabricated, and its measured parameters are compared with the simulation results.

## **KEYWORDS**

Antenna, superstrate layer, reflection coefficient, radiation pattern, antenna gain, frequency band, perfect electric conductor (PEC)

DUŠAN, Kratochvíl. *Kruhově polarizovaná anténa se superstrátem pro cubesat*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2023, 44 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Zbyněk Raida

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Kratochvíl Dušan  
**VUT ID autora:** 230276  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2022/23  
**Téma závěrečné práce:** Kruhově polarizovaná anténa se superstrátem pro cubesat

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Teoretický návrh antény</b>	<b>13</b>
1.1 Shrnutí výsledků odborného článku . . . . .	13
1.2 Anténa a napájení . . . . .	13
1.2.1 Struktura antény . . . . .	13
1.3 Superstrát . . . . .	15
<b>2 Simulace antény bez superstrátové vrstvy</b>	<b>16</b>
2.1 Simulace antény v programu HFSS . . . . .	16
2.2 Simulace napájení . . . . .	16
2.3 Výsledky simulace . . . . .	18
2.4 Parametrizace antény . . . . .	20
2.4.1 Posun bodu napájení . . . . .	20
2.4.2 Změna velikosti anténní plošky . . . . .	23
<b>3 Simulace antény včetně superstrátové vrstvy</b>	<b>26</b>
<b>4 Náhrada mikrovlnného substrátu</b>	<b>31</b>
4.1 Změna velikosti parametrů anténního elementu . . . . .	31
4.2 Struktura antény . . . . .	33
4.3 Struktura superstrátové vrstvy . . . . .	34
4.4 Zkonstruovaná anténa . . . . .	35
<b>5 Porovnání výsledků zhotovené antény</b>	<b>36</b>
5.1 Porovnání činitelů odrazu . . . . .	36
5.2 Porovnání osových poměrů . . . . .	37
5.3 Vyzařovací charakteristika . . . . .	38
<b>Závěr</b>	<b>41</b>
<b>Literatura</b>	<b>43</b>
<b>Seznam symbolů a zkratek</b>	<b>44</b>



# Seznam obrázků

1.1	Návrh antény v programu Ansys Electronic Desktop. . . . .	13
1.2	Rozměry anténního prvku . . . . .	14
1.3	Geometrické rozmístění kovových plošek [1] . . . . .	15
2.1	Anténní prvek v HFSS . . . . .	16
2.2	Vlnový port . . . . .	17
2.3	Simulace antény bez superstrátu . . . . .	17
2.4	Činitel odrazu antény bez superstrátové vrstvy . . . . .	18
2.5	Vyzařovací diagram v rovině XZ . . . . .	19
2.6	Vyzařovací diagram v rovině YZ . . . . .	19
2.7	Rozměrové parametry anténní plošky . . . . .	20
2.8	Činitel odrazu pro $-P_y$ . . . . .	21
2.9	Činitel odrazu pro $-P_x$ . . . . .	21
2.10	Činitel odrazu pro $P_y - 1$ mm . . . . .	21
2.11	Činitel odrazu pro $P_x = 0$ . . . . .	22
2.12	Činitel odrazu pro $P_y + 1$ mm . . . . .	22
2.13	Rozměrové parametry anténní plošky . . . . .	23
2.14	Činitel odrazu pro $L_h - 0,2$ mm . . . . .	24
2.15	Činitel odrazu pro $L_h - 0,5$ mm . . . . .	24
2.16	Činitel odrazu pro $L_h - 1$ mm . . . . .	24
2.17	Činitel odrazu pro $L_h + 0,2$ mm . . . . .	25
2.18	Činitel odrazu pro $L_h + 0,5$ mm . . . . .	25
2.19	Činitel odrazu pro $L_h + 1$ mm . . . . .	25
3.1	Superstrátová vrstva v HFSS . . . . .	26
3.2	Činitel odrazu antény publikovaný v odborném článku [1] . . . . .	27
3.3	Simulovaný činitel odrazu pro kompletní anténu se superstrátem . . . . .	27
3.4	Směrové charakteristiky z článku [1]:(a) XZ rovina, (b) YZ rovina . . . . .	28
3.5	Vyzařovací diagram z programu HFSS: XZ rovina . . . . .	28
3.6	Vyzařovací diagram z programu HFSS: YZ rovina . . . . .	29
3.7	3D Vyzařovací charakteristika . . . . .	29
3.8	Kmitočtový průběh osového poměru z článku [1] . . . . .	30
3.9	Simulovaný kmitočtový průběh osového poměru . . . . .	30
4.1	Rozměry anténního prvku . . . . .	32
4.2	Schéma spodní desky . . . . .	33
4.3	superstrátová vrstva s rozměry 64x64 mm . . . . .	34
4.4	Zkonstruovaná anténa . . . . .	35
5.1	porovnání činitelů odrazu: červený průběh - měření fyzické antény, modrý průběh - výsledek simulace . . . . .	36

5.2	porovnání osových poměrů: oranžový průběh - měření fyzické antény, modrý průběh - výsledek simulace . . . . .	37
5.3	Vyzařovací charakteristika - podélná rovina . . . . .	38
5.4	Vyzařovací charakteristika - příčná rovina . . . . .	39
5.5	Vyzařovací charakteristika simulace - podélná rovina . . . . .	39
5.6	Vyzařovací charakteristika simulace - příčná rovina . . . . .	40

# Seznam tabulek

1.1	Číselné hodnoty rozměrů antény . . . . .	14
2.1	Přehled změny rozměrů napájení antény . . . . .	20
2.2	Přehled změny velikosti anténní plošky . . . . .	23
4.1	Číselné hodnoty původních rozměrů nových rozměrů antény . . . . .	32

# Úvod

V rámci semestrální práce jsem se zabýval ověřením parametrů kruhově polarizované antény se superstrátem pro CubeSat popsané v odborném článku [1].

Během posledních let můžeme pozorovat rostoucí zájem o malé satelity založené na principu CubeSat. Z praktického hlediska potřebujeme dosáhnout co nejnižší hmotnosti a malého rozměru. Takový satelit by měl splňovat pevně dané rozměry 100 mm x 100 mm x 100 mm, což představuje 1U modul a hmotnost by neměla přesahovat 1,3 kg na modul.

Primárním úkolem komunikačních modulů upevněných na CubeSat je rychlý přenos velkého objemu dat. Kvalitní komunikace dosahujeme mimo jiné díky kruhové polarizaci antény, čímž zajišťujeme shodu polarizace vůči změnám relativní orientace vysílací antény směrem k přijímací anténě. S pomocí kruhové polarizace taky předcházíme účinku Faradayova jevu (*interakce mezi světlem a magnetickým polem*) na přenášený signál.

V první kapitole se budeme krátce zabývat výsledky zkoumaného odborného článku [1]. Dále se zaměříme na prvky tvořící anténu, včetně parametrů antény, napájení a superstrátové vrstvy.

Ve druhé kapitole se zabýváme simulací samotné antény bez superstrátu v programu Ansys Electronics Desktop Student, kde budeme sledovat výsledky simulací při určitých změnách parametrů antény.

Třetí kapitola se věnuje finální simulaci antény se superstrátovou vrstvou společně s hodnocením získaných vlastností antény a porovnání našich hodnot s hodnotami uvedenými v článku [1].

V rámci čtvrté kapitoly je původní substrát RO3003 nahrazen mikrovlnným substrátem ARLON 25N dostupným v laboratoři. Pro optimalizaci antény je zde vypočtena změna vlnové délky pro nový substrát a je zde uvedena tabulka s upravenými rozměry prvků antény.

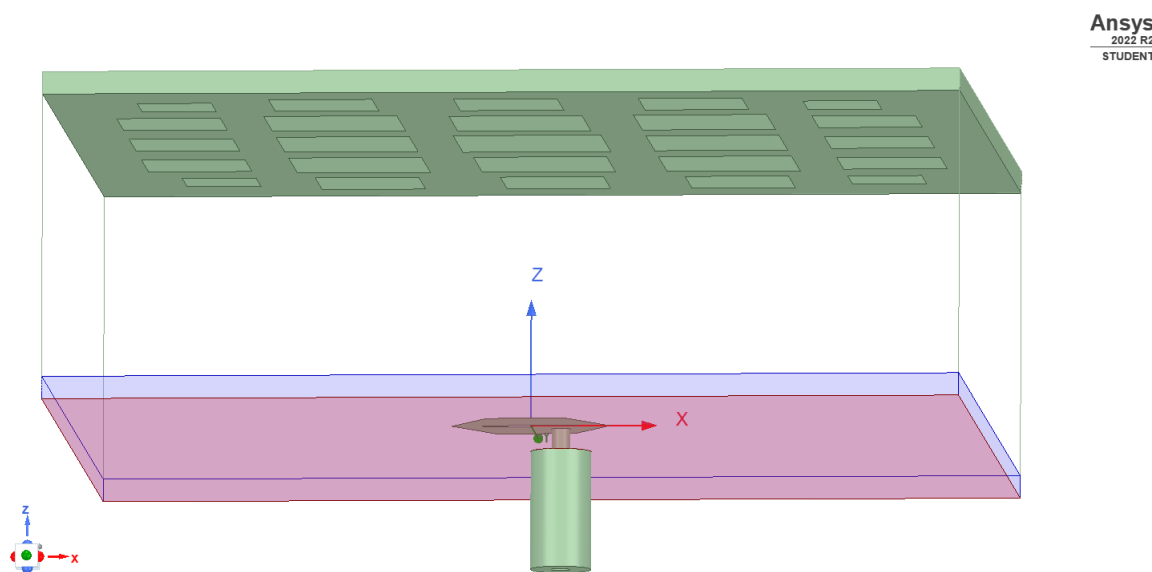
Porovnáním výsledných vlastností fyzické a simulované antény se zabývá pátá kapitola. Zde je vynesena závislost činitele odrazu, osového poměru a v poslední řadě vyzařovací charakteristika.

Na závěr se zaměříme na shrnutí výsledků z předešlých bodů a celkové zhodnocení vyrobené antény.

# 1 Teoretický návrh antény

## 1.1 Shrnutí výsledků odborného článku

V původním článku [1] je zkoumána planární anténa s levotočivou kruhovou polarizací, která je doplněna o částečně odrazný povrch (PRS). Navržená anténa má rozměry 62 mm x 62 mm x 22,2 mm a dosahuje hmotnosti 29,7 g, což ji činí vhodnou pro použití v systémech CubeSat, dronech a v podobných aplikacích. Navrhovaná anténa je v simulaci zkoumána pro kmitočtové pásmo 8,35 GHz až 8,95 GHz. Zisk antény je okolo 14 dB.



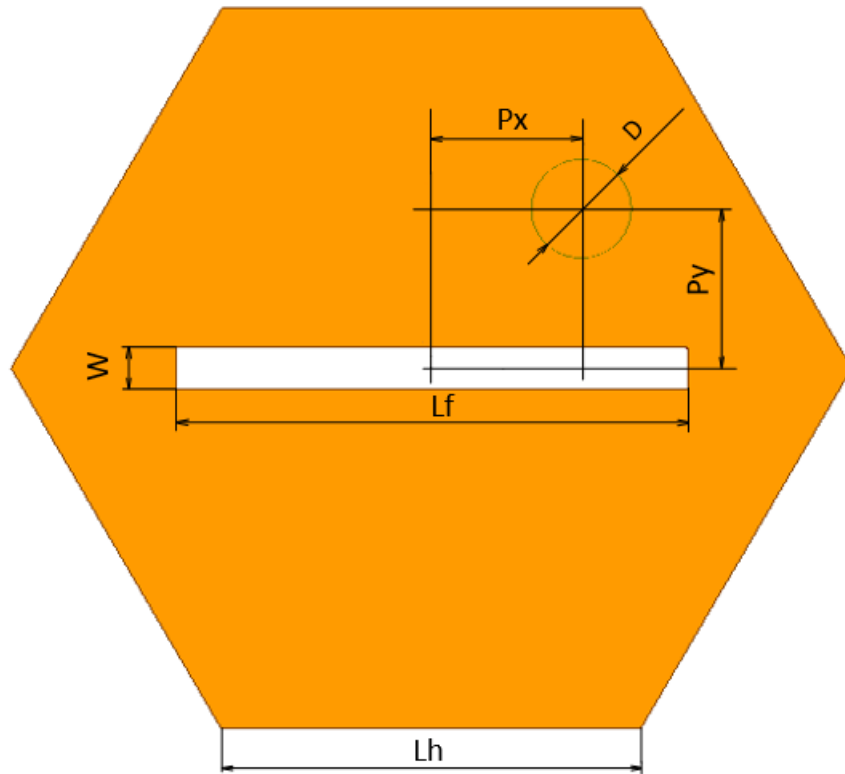
Obr. 1.1: Návrh antény v programu Ansys Electronic Desktop.

## 1.2 Anténa a napájení

### 1.2.1 Struktura antény

V uvažované struktuře je anténní element vytvořen na substrátu RO3003 s tloušťkou 1,52 mm, jehož permitivita je 3,0 a ztrátový činitel se rovná 0,001. Vlna, jež je aktivním prvkem vysílána, se částečně odráží od PRS a částečně prochází. Tím je docíleno konstruktivní interference a lepší fokusace vyzářované vlny. Navrhovaný anténní prvek má hexagonální tvar s obdélníkovým výřezem ve středu a bodem

napájení posunutým o souřadnice  $P_x$ ,  $P_y$  od středu plošky. Anténa je napájena  $50 \Omega$  koaxiální sondou.



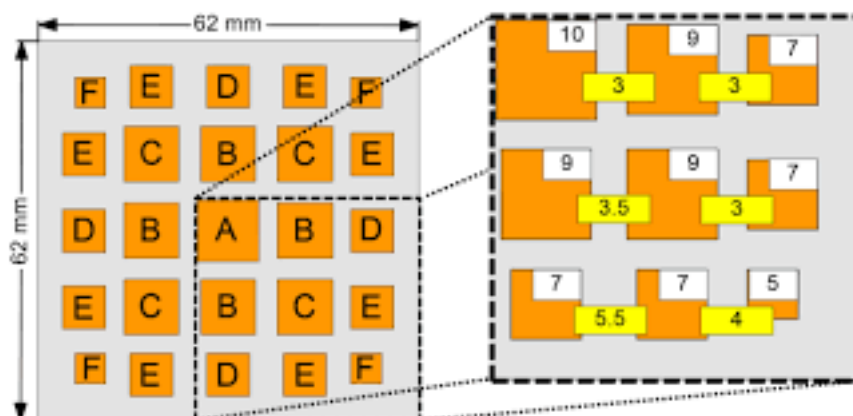
Obr. 1.2: Rozměry anténního prvku

Tab. 1.1: Číselné hodnoty rozměrů antény

Parametr	Rozměr	Jednotka
Lh	5,34	mm
Lf	6,5	mm
W	0,54	mm
Px	1,9	mm
Py	2,05	mm
D	1,27	mm

## 1.3 Superstrát

Superstrátová vrstva je navržena pro docílení co největšího zisku antény. Pro tento účel použijeme opět substrát RO3003 s rozměry 62 mm x 62 mm x 1,52 mm. Tato vrstva je umístěna 22,2 mm nad spodním substrátem. Tento substrát je pokryt ze spodní strany polem 5x5 kovových plošek pro docílení kmitočtové selektivity činitele odrazu. Plošky ve tvaru čtverce mají určitou velikost a určitou mezeru mezi sebou. Pro přehlednost jsou plošky označeny písmeny A až F, kde jednotlivá písmena určují velikost daného čtverce.

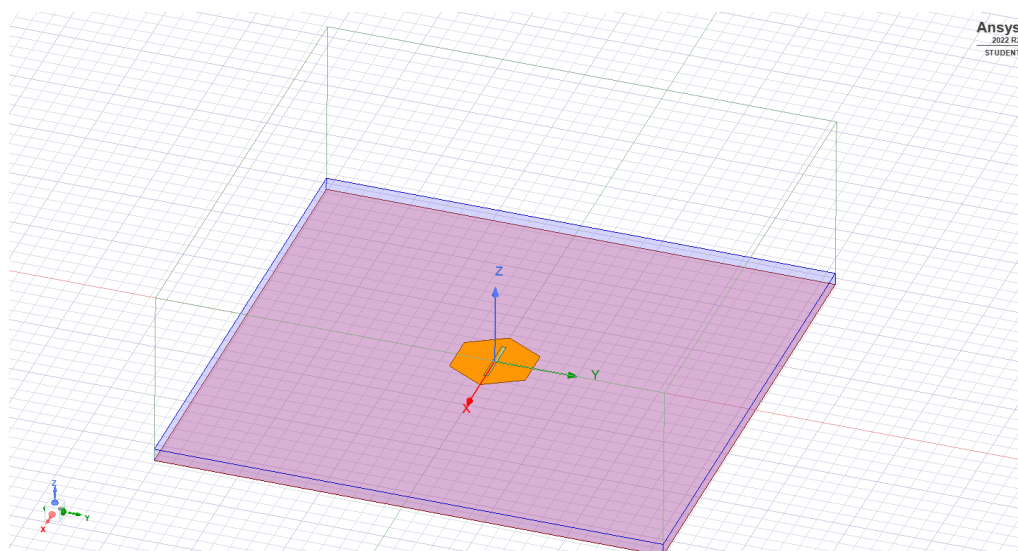


Obr. 1.3: Geometrické rozmístění kovových plošek [1]

## 2 Simulace antény bez superstrátové vrstvy

### 2.1 Simulace antény v programu HFSS

V první části bakalářské práce jsme se zabývali simulací antény bez superstrátové vrstvy v programu Ansys Electronics Desktop Student, abychom ověřili základní parametry antény. Využili jsme přitom High Frequency Structure Simulator (HFSS). Simulaci byla započata umístěním tenké dokonale elektricky vodivé (PEC) plochy pod substrát o stejné velikosti, čímž se vytvořila zemní plocha. Po vynesení substrátu RO3003 se na jeho střed umístil anténní prvek, z jehož středu byla odebrána plocha ve tvaru obdélníku o rozměrech, uvedených v tabulce 4.1. V poslední řadě byl nad substrát vynesena kvádr o velikosti 62,0 mm x 62,0 mm x 22,2 mm pro vytvoření prázdného prostoru nad anténou (v našem případě vakuum).



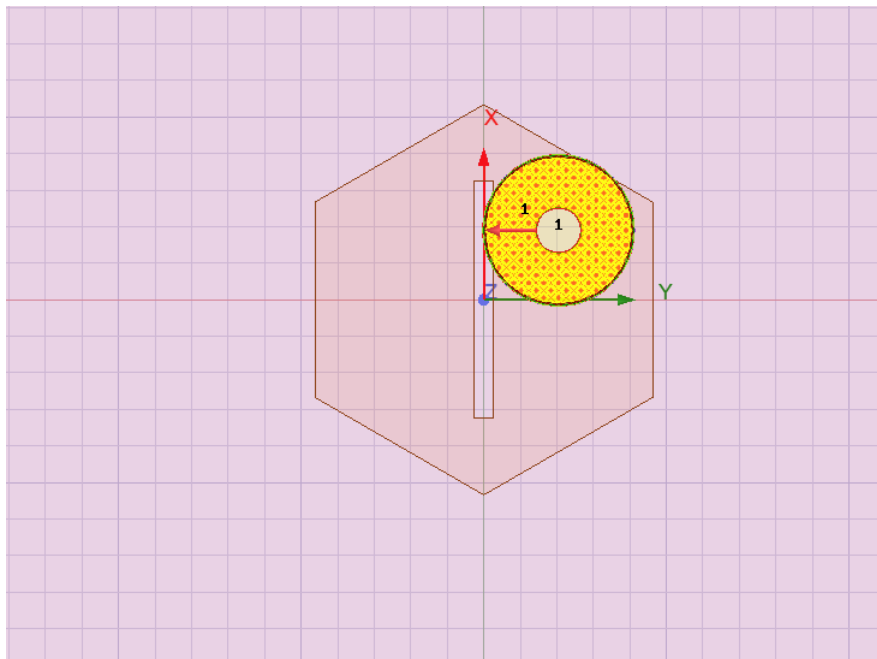
Obr. 2.1: Anténní prvek v HFSS

### 2.2 Simulace napájení

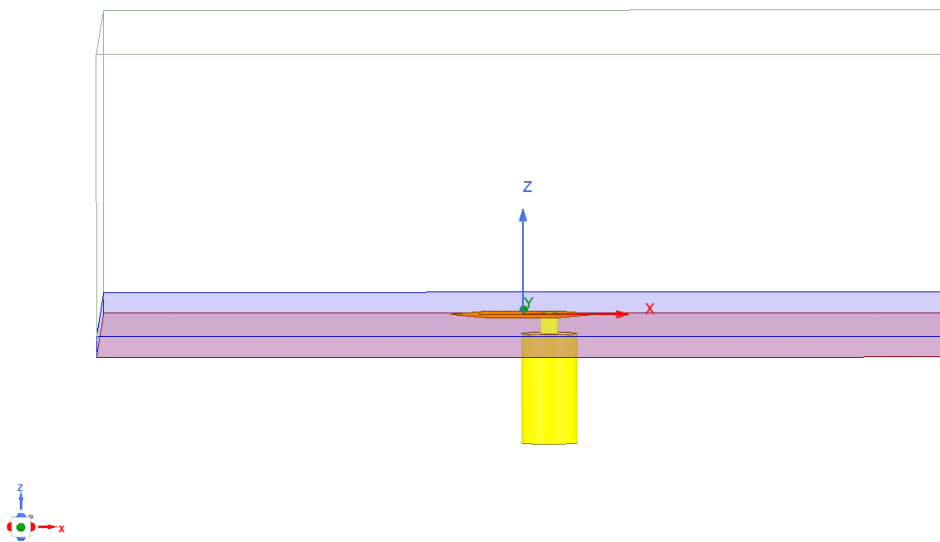
Pro dosažení požadované impedance napájení  $50 \Omega$  musíme zvolit vhodný koaxiální konektor. Pro tento účel je v simulaci použit model konektoru 32K449-500L5 od výrobce Rosenberger [3]. V simulaci je konektor tvořen vnějším válcem o průměru 4,10 mm a vnitřním válcem o průměru 1,27 mm. Vnější vodič konektoru je připojen k zemní ploše, vnitřní vodič k anténnímu prvku. Prostor zespodu mezi vnějším a vnitřním válcem označíme jako vlnový port (wave port) a definujeme vektor pole.



Vnitřní i vnější válec označíme jako PEC. Boční stěny prázdného prostoru označíme jako RAD, čímž simulujeme otevřený prostor.



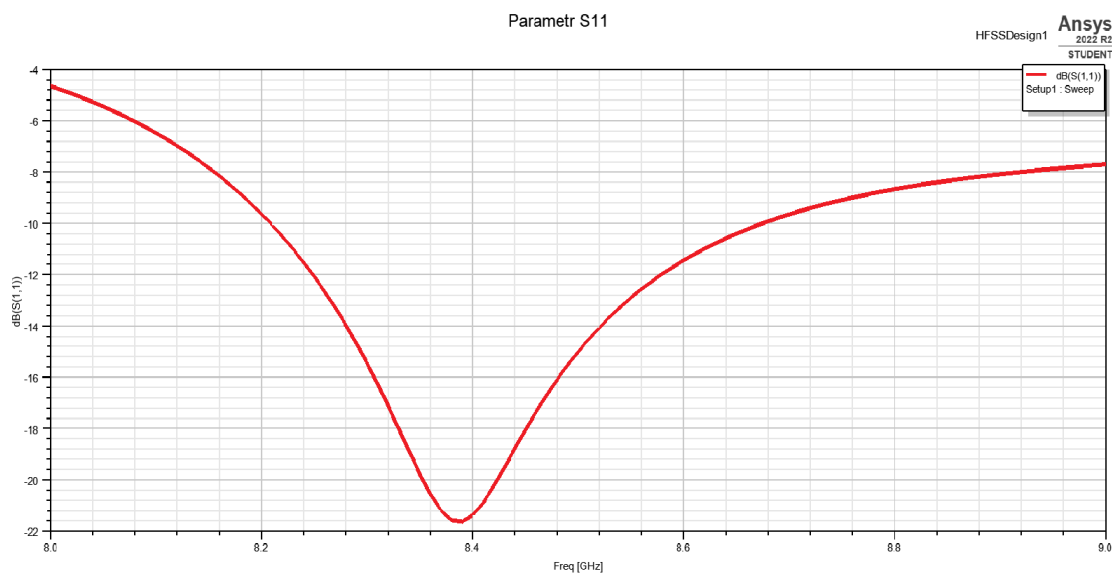
Obr. 2.2: Vlnový port



Obr. 2.3: Simulace antény bez superstrátu

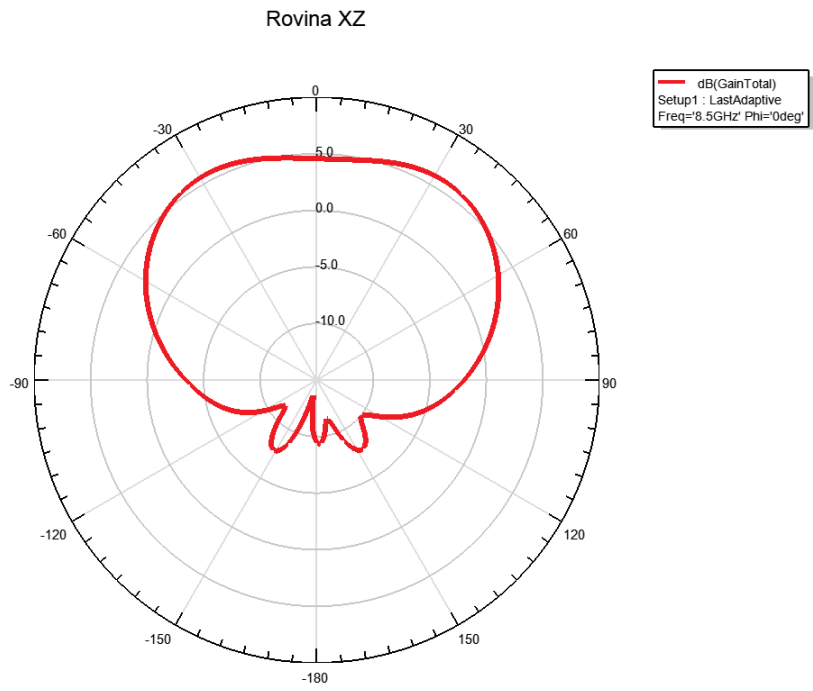
## 2.3 Výsledky simulace

Po dokončení modelu antény jsme spustili simulaci. Simulaci jsme nastavili tak, abychom byli schopni prozkoumat charakteristiku antény v kmitočtovém pásmu 8,35 až 8,95 GHz. Výsledky můžeme vidět na obr. 2.4, 2.5, 2.6

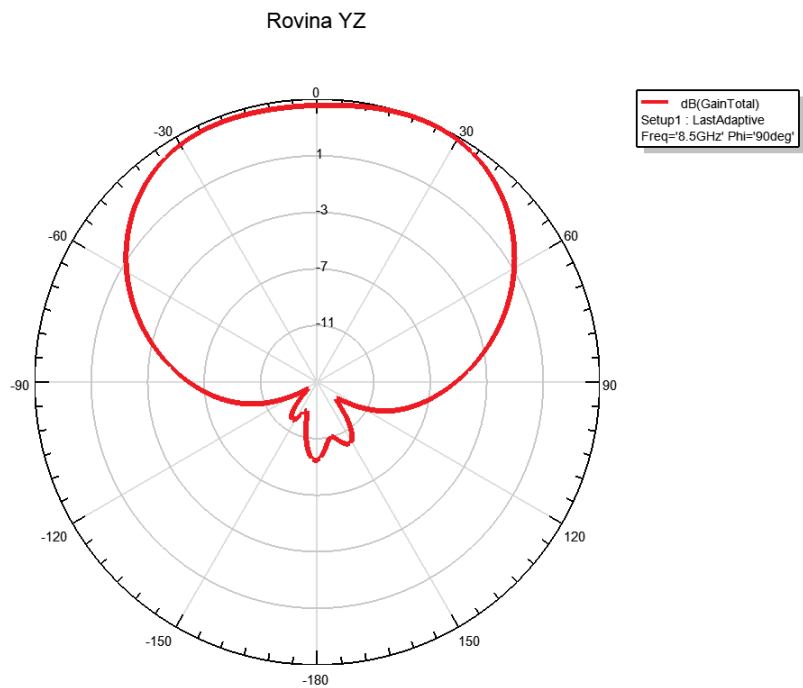


Obr. 2.4: Činitel odrazu antény bez superstrátové vrstvy

Můžeme si povšimnout, že nejvyšší záporná hodnota činitele odrazu rovna hodnotě -22 dB se nachází na frekvenci 8,39 GHz. Na obr. 2.5, 2.6 vidíme vyzařovací diagram v rovinách  $\Phi = 0^\circ$  (rovina XZ) a  $\Phi = 90^\circ$  (rovina YZ).



Obr. 2.5: Vyzářovací diagram v rovině XZ



Obr. 2.6: Vyzářovací diagram v rovině YZ

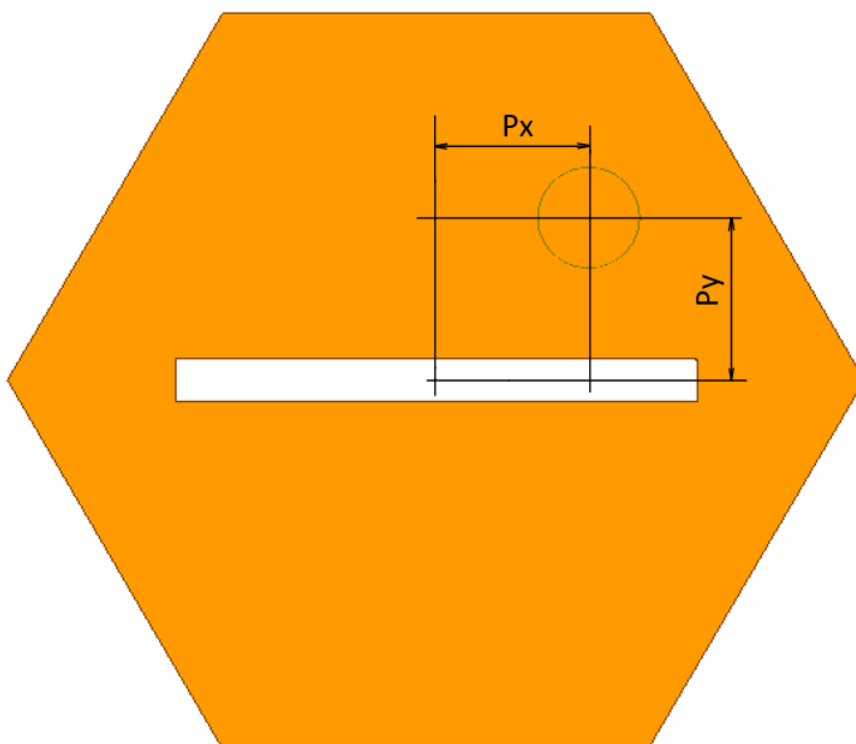
## 2.4 Parametrizace antény

V této kapitole se zaměříme na změnu parametrů antény pro zjištění, jak se mění vlastnosti antény v závislosti na změně bodu napájení, či velikosti anténní plošky.

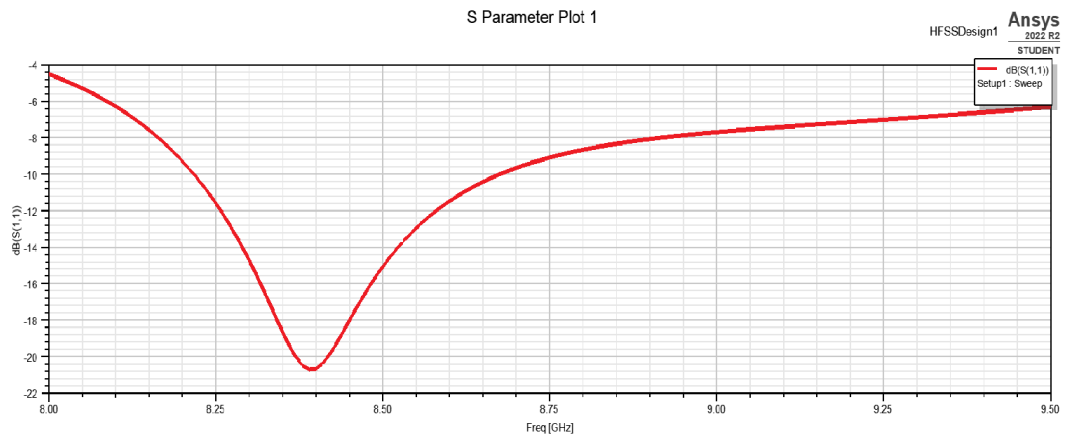
### 2.4.1 Posun bodu napájení

Tab. 2.1: Přehled změny rozměrů napájení antény

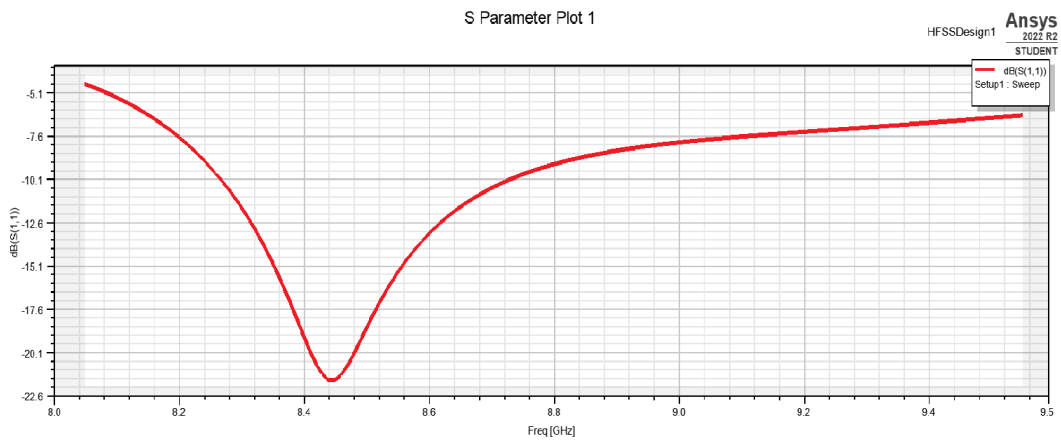
Rozměr parametru $P_x$	Rozměr parametru $P_y$	Obrázek
$P_x$	$-P_y$	obr. 2.8
$-P_x$	$P_y$	obr. 2.9
$P_x$	$P_y - 1 \text{ mm}$	obr. 2.10
0	$P_y$	obr. 2.11
$P_x$	$P_y + 1 \text{ mm}$	obr. 2.12



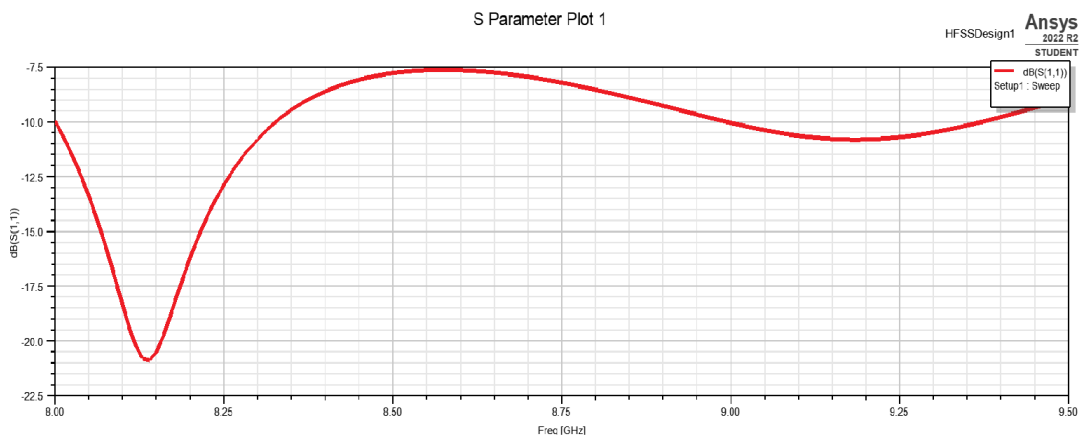
Obr. 2.7: Rozměrové parametry anténní plošky



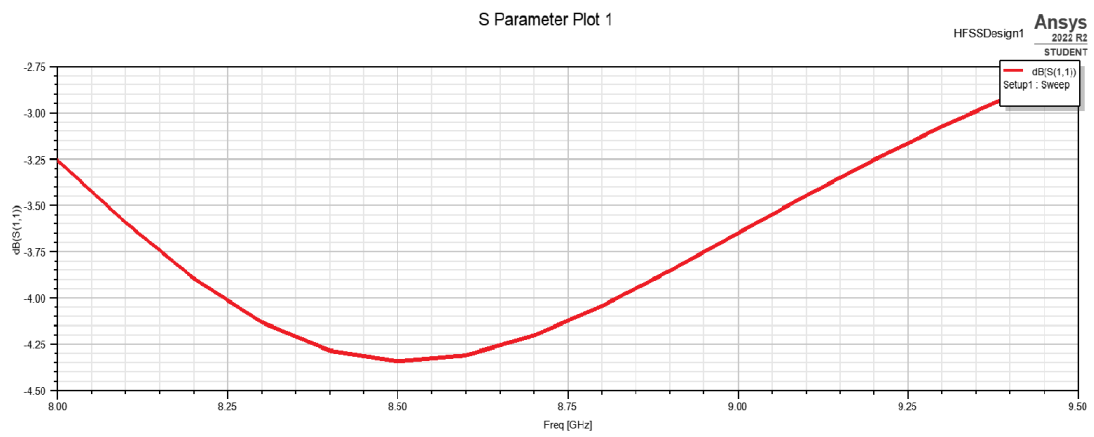
Obr. 2.8: Činitel odrazu pro -Py



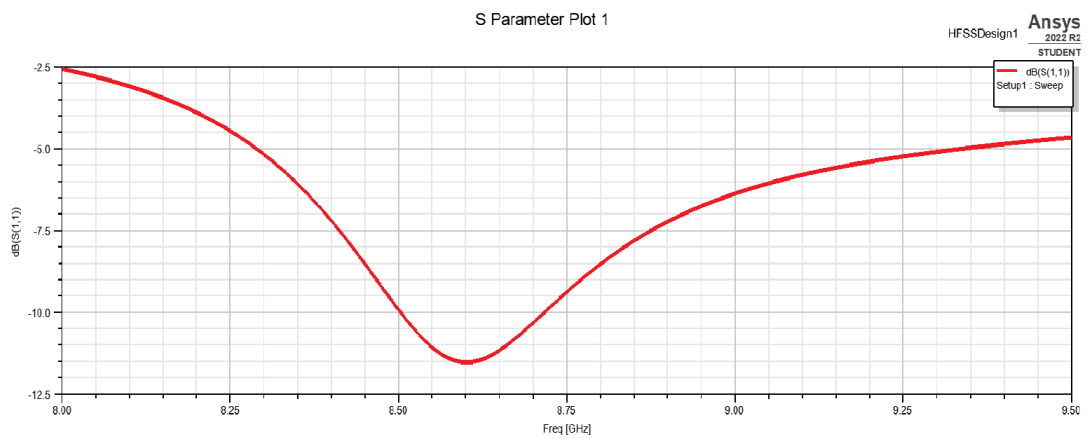
Obr. 2.9: Činitel odrazu pro -Px



Obr. 2.10: Činitel odrazu pro Py - 1 mm



Obr. 2.11: Činitel odrazu pro  $P_x = 0$

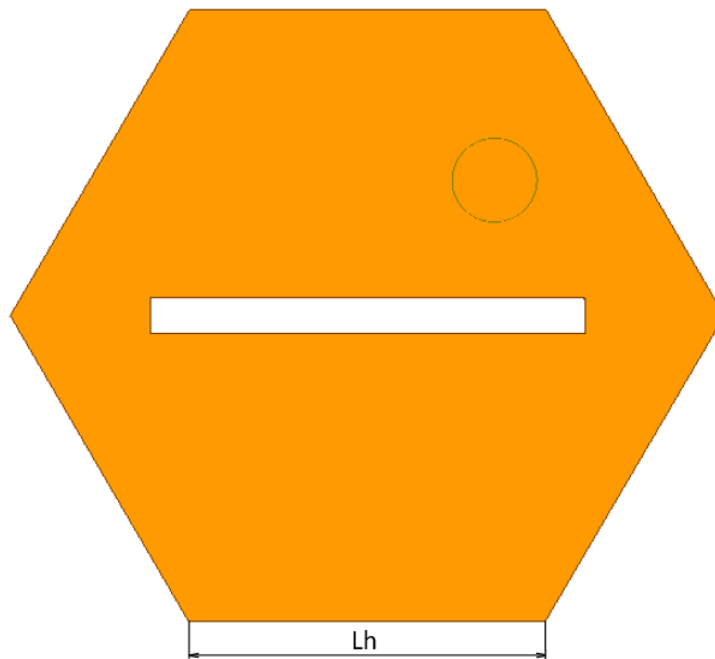


Obr. 2.12: Činitel odrazu pro  $P_y + 1 \text{ mm}$

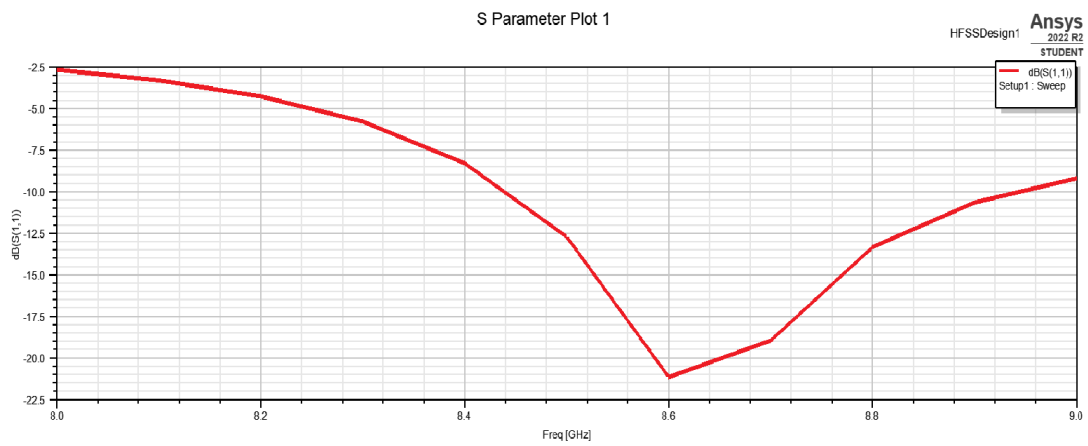
## 2.4.2 Změna velikosti anténní plošky

Tab. 2.2: Přehled změny velikosti anténní plošky

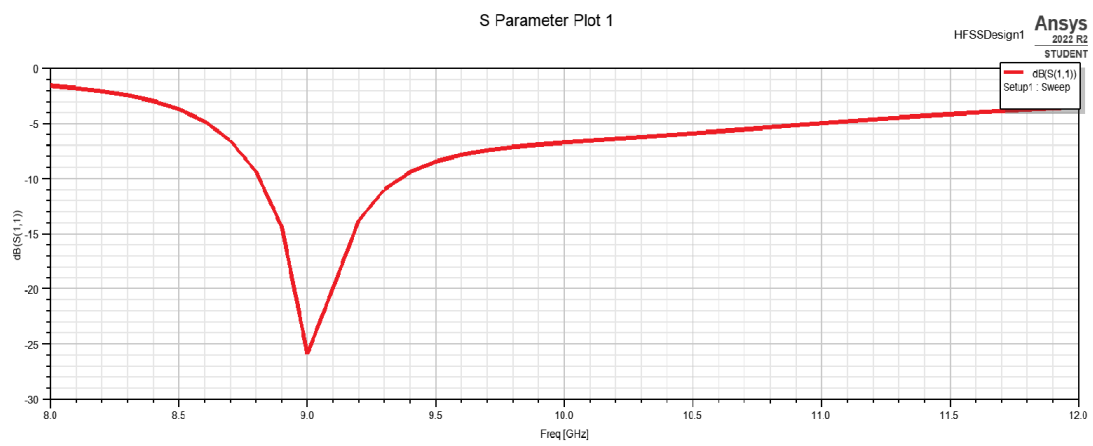
Rozměr parametru Lh	Obrázek
Lh - 0,2 mm	Obr. 2.14
Lh - 0,5 mm	Obr. 2.15
Lh - 1 mm	Obr. 2.16
Lh + 0,2 mm	Obr. 2.17
Lh + 0,5 mm	Obr. 2.18
Lh + 1 mm	Obr. 2.19



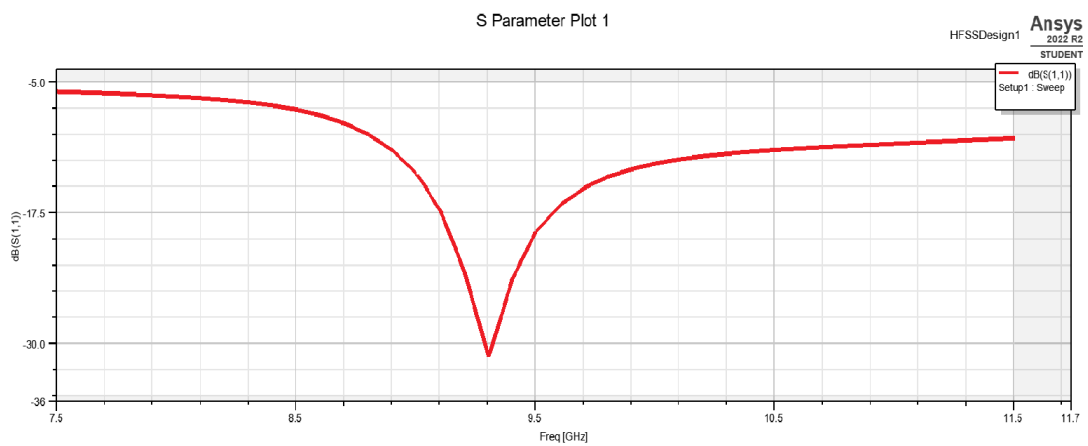
Obr. 2.13: Rozměrové parametry anténní plošky



Obr. 2.14: Činitel odrazu pro Lh - 0,2 mm

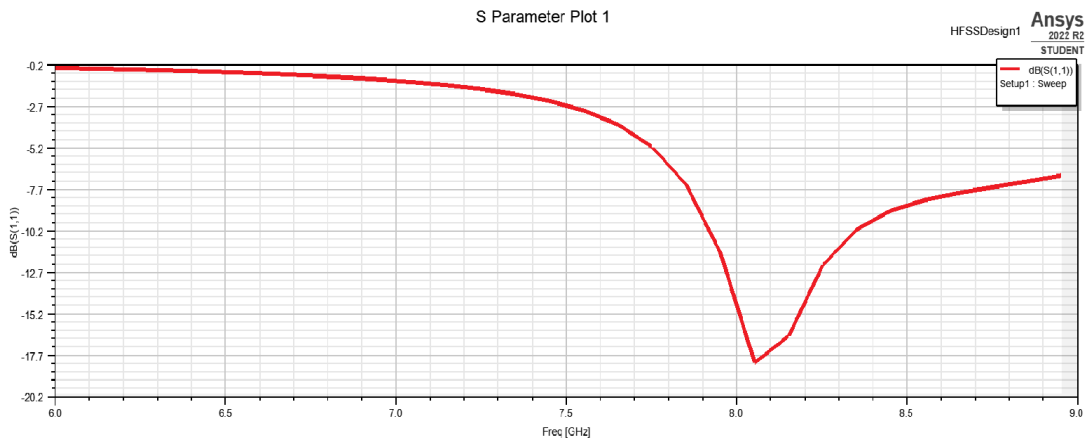


Obr. 2.15: Činitel odrazu pro Lh - 0,5 mm

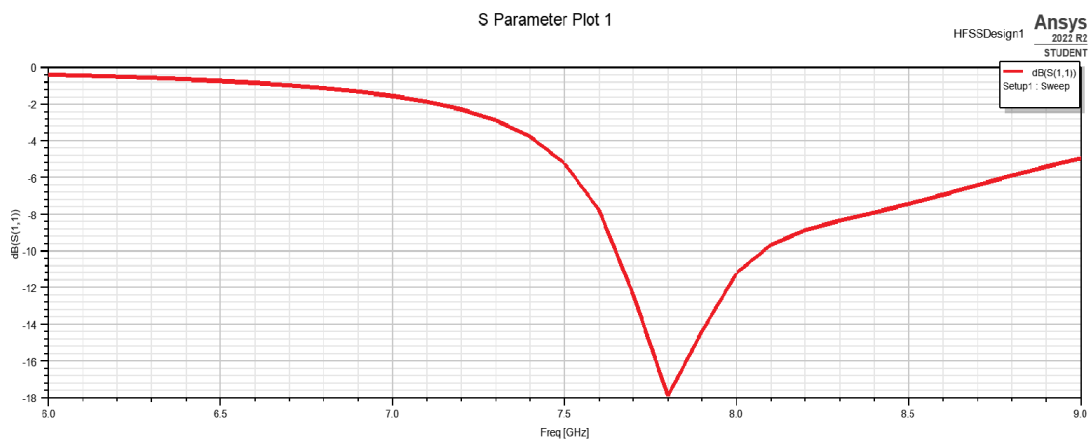


Obr. 2.16: Činitel odrazu pro Lh - 1 mm

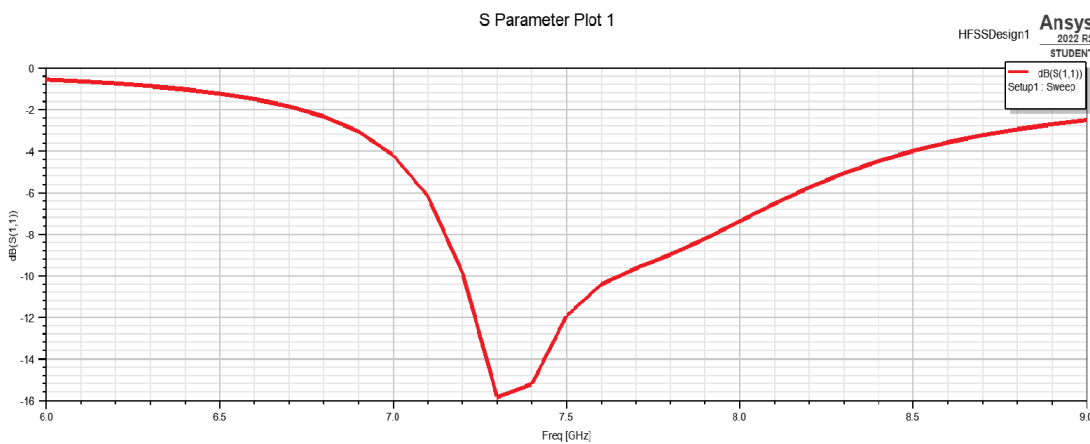




Obr. 2.17: Činitel odrazu pro  $L_h + 0,2$  mm



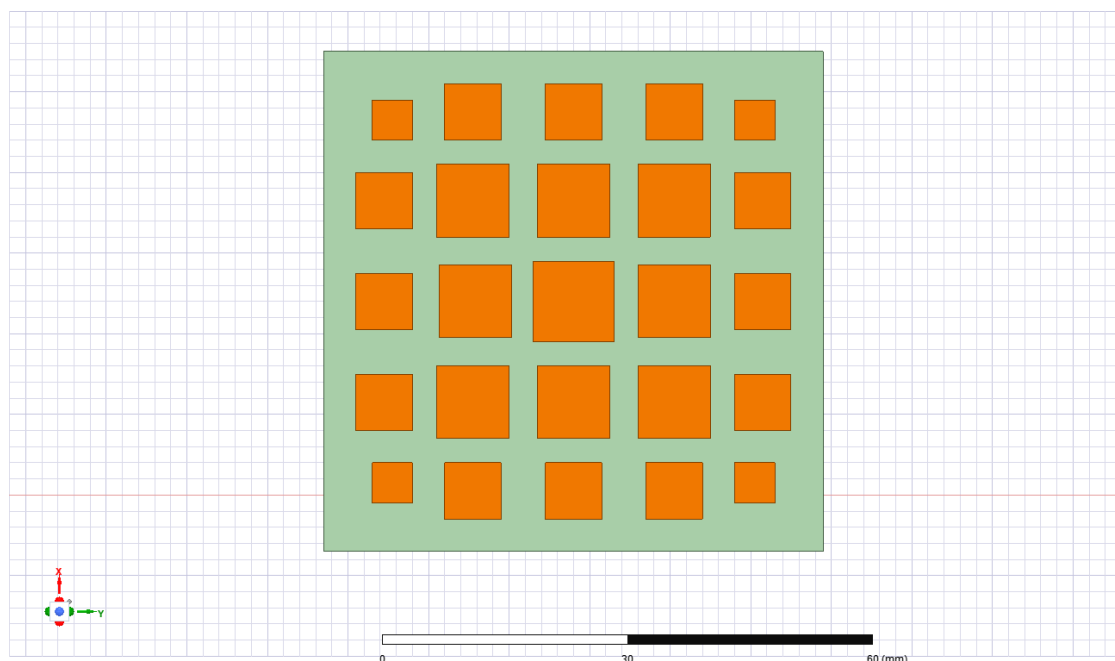
Obr. 2.18: Činitel odrazu pro  $L_h + 0,5$  mm



Obr. 2.19: Činitel odrazu pro  $L_h + 1$  mm

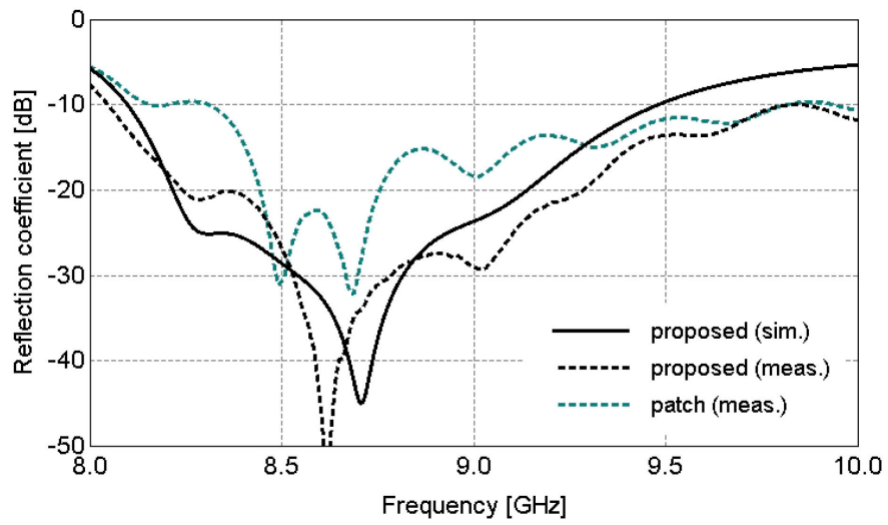
### 3 Simulace antény včetně superstrátové vrstvy

V této kapitole popíšeme výsledky simulace antény se superstrátovou vrstvou, kterou přidáme nad anténní prvek. Všechny plošky superstrátu definujeme jako PEC. Celý superstrát jsme umístili nad anténní prvek tak, aby plocha superstrátu s ploškami směřovala čelem k anténnímu prvku. Opět bylo nutné nastavit boční strany prázdného prostoru jako RAD.

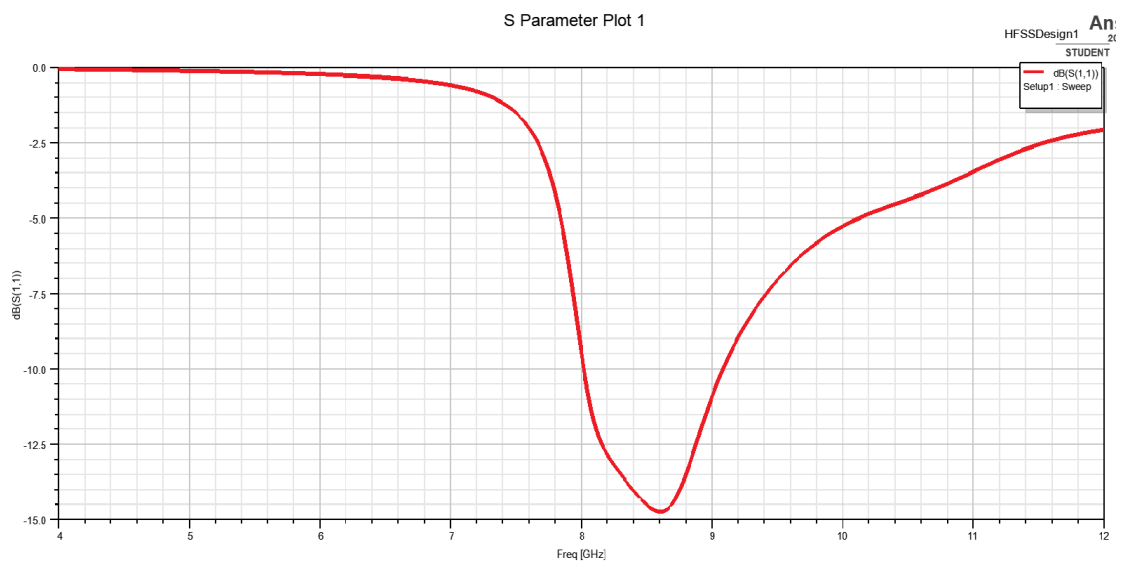


Obr. 3.1: Superstrátová vrstva v HFSS

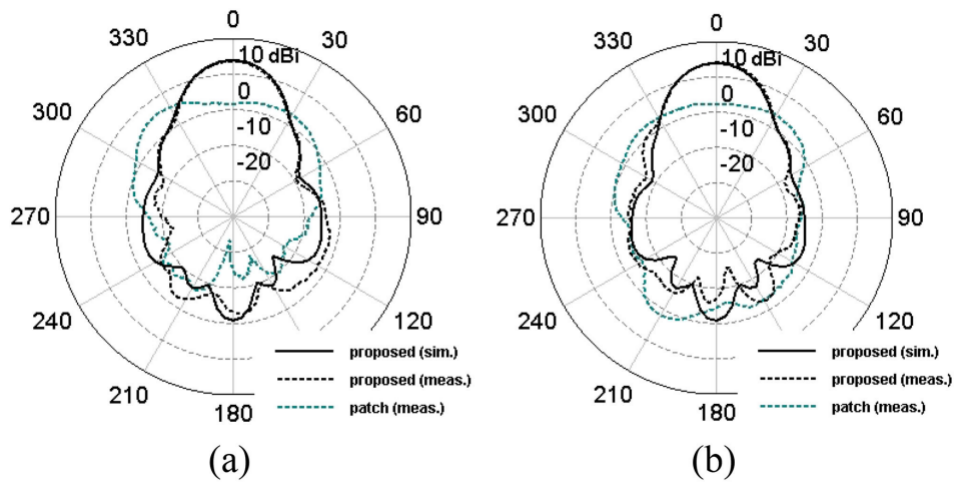
Na obr. 3.3 můžeme sledovat kmitočtový průběh činitele odrazu pro anténu se superstrátem. K největšímu poklesu činitele dochází na frekvenci 8,56 GHz, kde činitel odrazu nabývá hodnoty -15 dB. Následně můžeme z vyzařovací charakteristiky vyčíst hodnotu zisku antény 11,02 dB. Na obr. 3.2 můžeme pozorovat průběh činitele odrazu antény se superstrátem popisovaném v odborném článku [1], kde si můžeme povšimnout, že jeho maximální záporná hodnota dosahuje téměř trojnásobku v porovnání s hodnotou činitele odrazu získaného naší simulací. Při porovnání vyzařovacího diagramu (obr. 3.4) antény uvedené v článku [1] s našimi diagramy získanými simulací (obr. 3.5, 3.6) jsme zjistili, že ve směru šíření se dostáváme na velmi podobnou hodnotu zisku. V ostatních směrech je vyzařování o něco menší. Dále je s pomocí simulace vynesena kmitočtový průběh osového poměru antény (axial ratio); viz obr. 3.9. Ten má sice v porovnání s průběhem uvedeným na obr. 3.8 odlišný průběh, ale v naší pracovní kmitočtové oblasti se blíží žádané hodnotě.



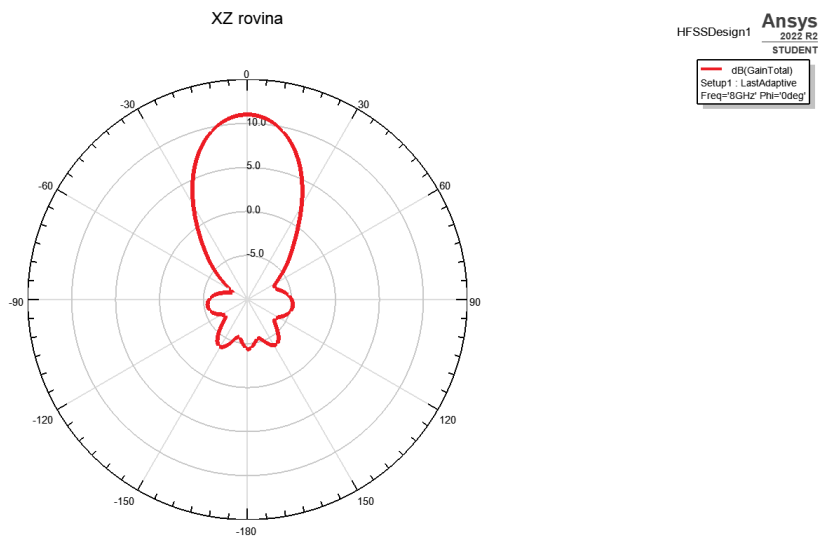
Obr. 3.2: Činitel odrazu antény publikovaný v odborném článku [1]



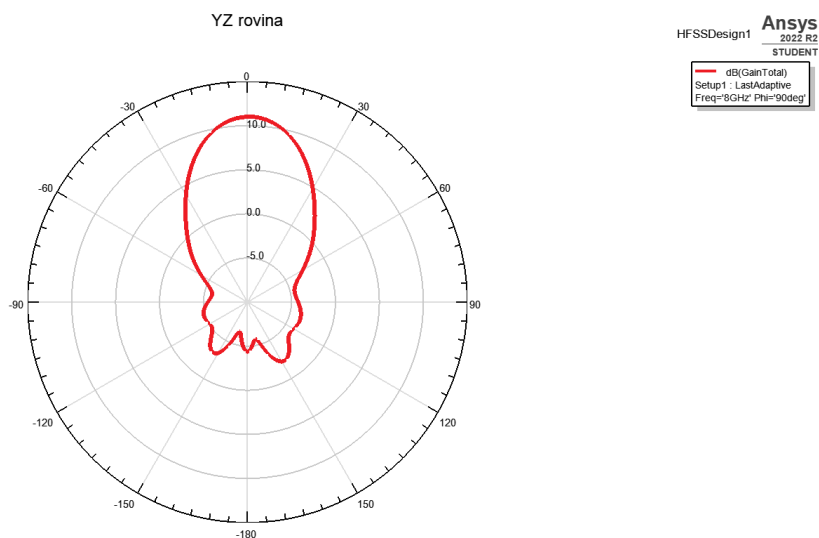
Obr. 3.3: Simulovaný činitel odrazu pro kompletní anténu se superstrátem



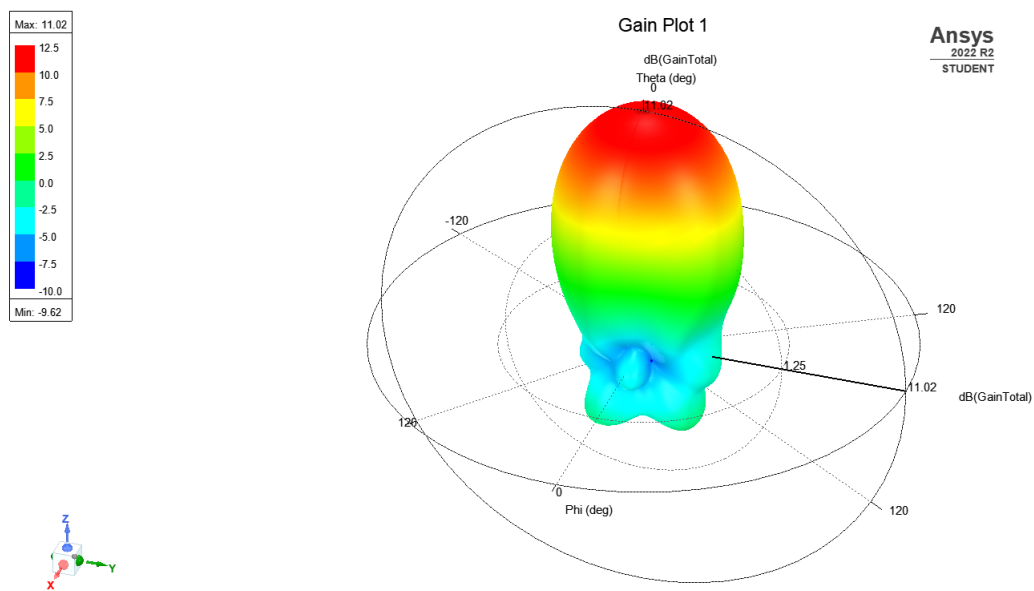
Obr. 3.4: Směrové charakteristiky z článku [1]:(a) XZ rovina, (b) YZ rovina



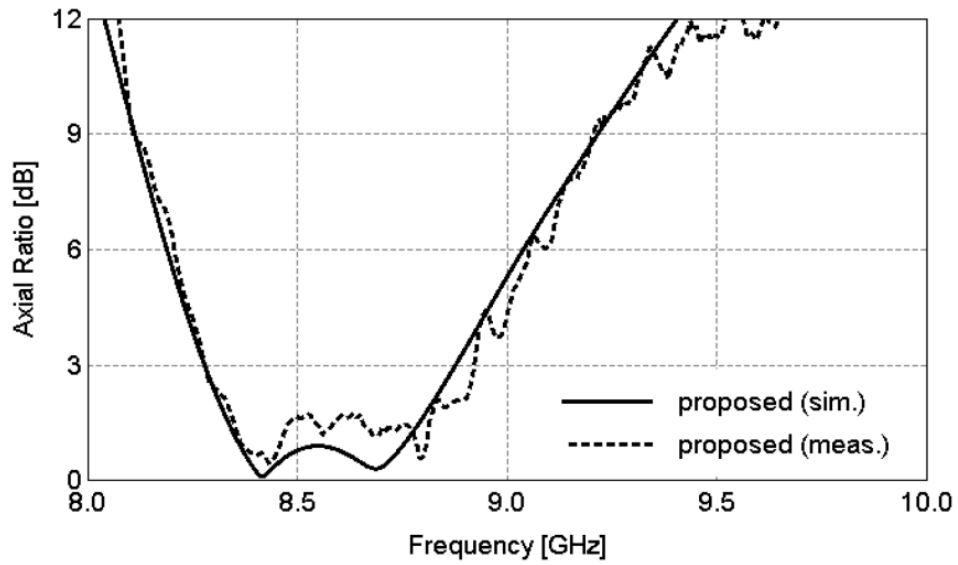
Obr. 3.5: Vyzařovací diagram z programu HFSS: XZ rovina



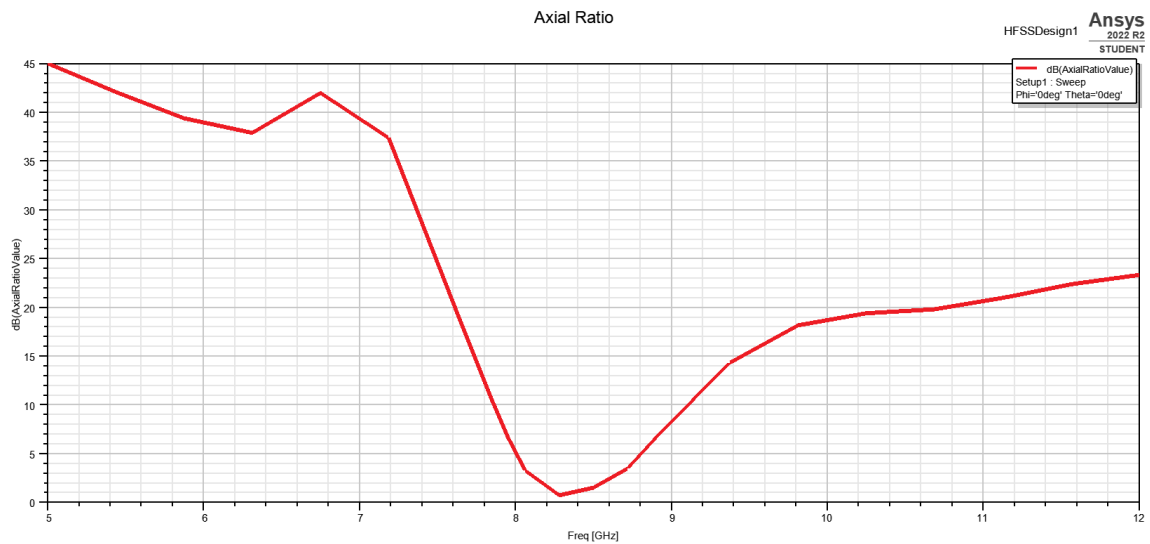
Obr. 3.6: Vyzařovací diagram z programu HFSS: YZ rovina



Obr. 3.7: 3D Vyzařovací charakteristika



Obr. 3.8: Kmitočtový průběh osového poměru z článku [1]



Obr. 3.9: Simulovaný kmitočtový průběh osového poměru

## 4 Náhrada mikrovlnného substrátu

Prvním bodem fyzické realizace kruhově polarizované antény je náhrada mikrovlnného substrátu RO3003 uvedeného v článku [1] za substrát dostupný v laboratoři. V tomto případě byl jako náhrada zvolen mikrovlnný substrát ARLON 25N s parametry  $\epsilon_r = 3,38$  a výškou  $h = 1,524$  mm. Vzhledem k podstatnému rozdílu hodnoty relativní permitivity zadaného substrátu je nutné pozměnit rozměry původní antény. Zde můžeme využít závislost délky vlny vzhledem k použitému substrátu a vyjít tak ze vztahu 4.1.

$$\lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.1)$$

Pro původní mikrovlnný substrát je délka vlny:

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3}} = 2,04 \text{ cm} \quad (4.2)$$

Pokud původní RO3003 substrát nahradíme mikrovlnným substrátem ARLON 25N dostaneme délku vlny:

$$\lambda_1 = \frac{3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3,38}} = 1,92 \text{ cm} \quad (4.3)$$

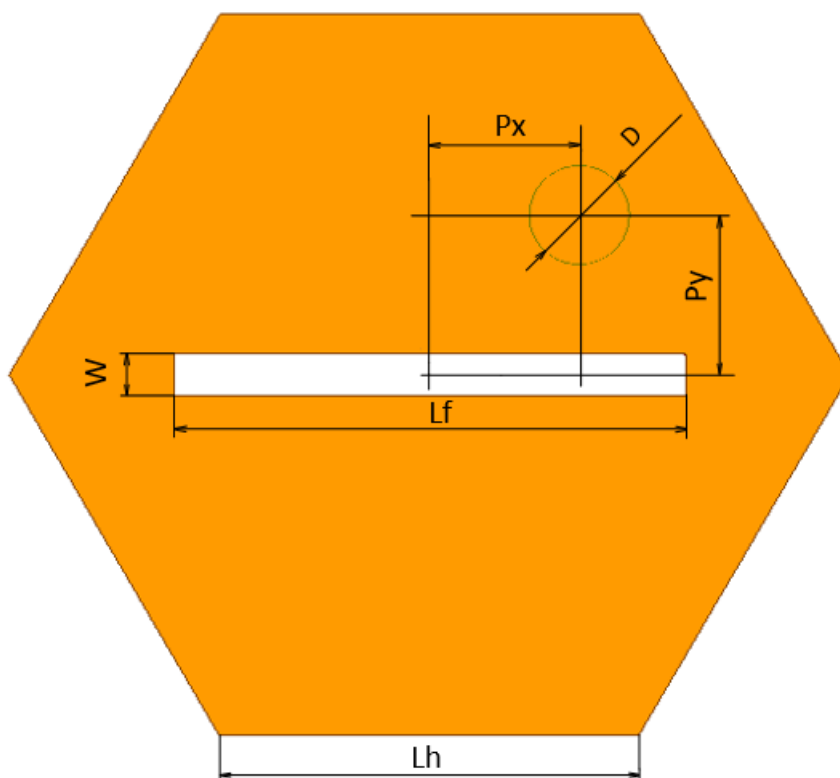
Z rovnic 4.2 a 4.3 můžeme pozorovat, že délka vlny se nám vlivem vyšší hodnoty relativní permitivity nového mikrovlnného substrátu zmenšila. Z toho vyplývá, že chceme-li mít anténu pracující ve stejném kmitočtovém pásmu (8,35 - 8,95 GHz), musíme taky velikost anténní plošky o určitou hodnotu snížit.

### 4.1 Změna velikosti parametrů anténního elementu

V tab. 4.1 můžeme vidět změnu velikosti parametrů antény při změně substrátu z RO3003 na ARLON 25N. Nejvýraznější změna nastala ve velikosti anténní plošky (Lh), která se zmenšila o 0,44 mm, na hodnotu 4,9 mm. Pro zjištění této hodnoty jsme vycházeli právě z poměru vlnových délek při použití daného substrátu. Dále nastala změna v šířce štěrbin  $W$  a posunu bodu napájení po ose  $y$  ( $Py$ ), kde bylo nutné zaokrouhlit hodnotu přinejmenším na desetiny milimetru, aby byly tyto parametry reálné pro výrobu.

Tab. 4.1: Číselné hodnoty původních rozměrů nových rozměrů antény

Parametr	RO3003	ARLON 25N	Jednotka
Lh	5,34	4,9	mm
Lf	6,5	6,5	mm
W	0,54	0,6	mm
Px	1,9	1,9	mm
Py	2,05	2,1	mm
D	1,27	1,27	mm

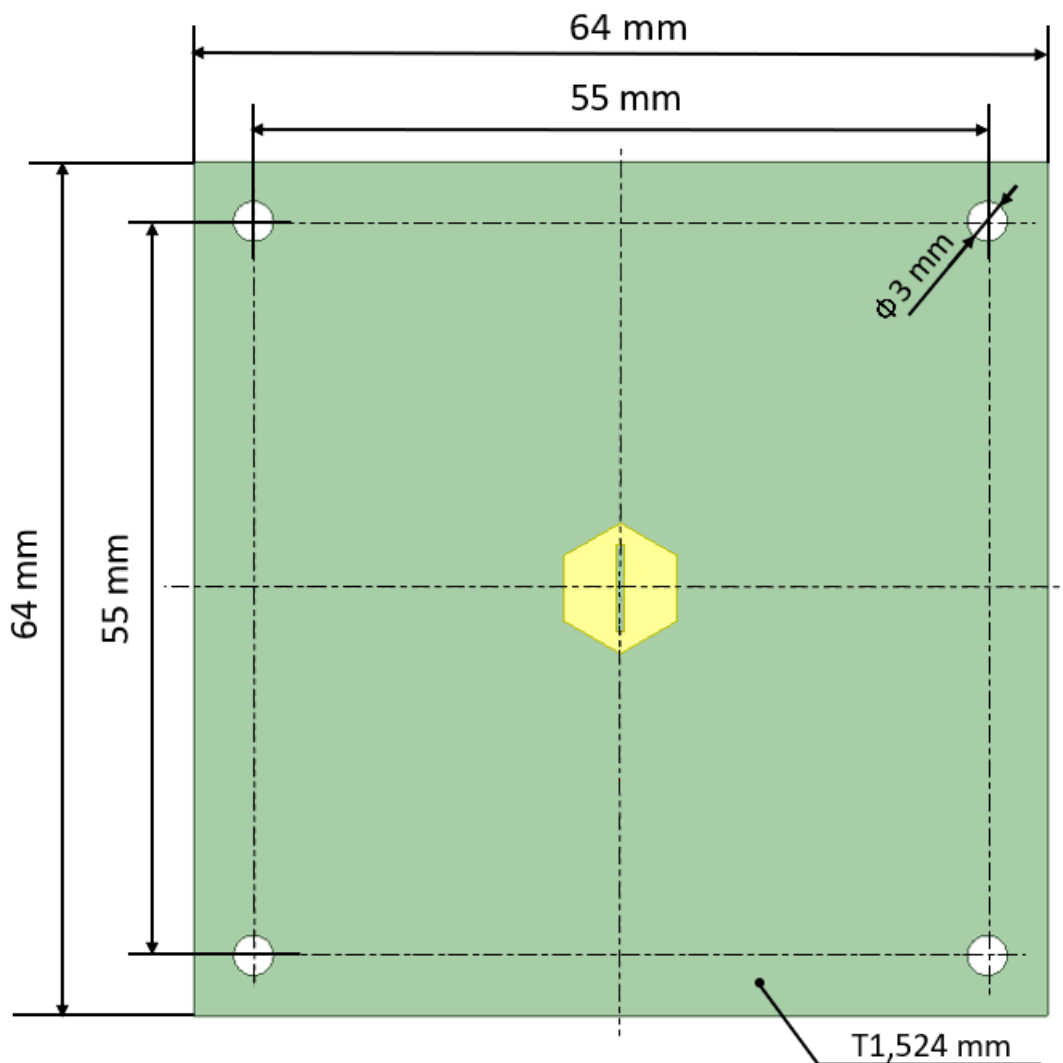


Obr. 4.1: Rozměry anténního prvku



## 4.2 Struktura antény

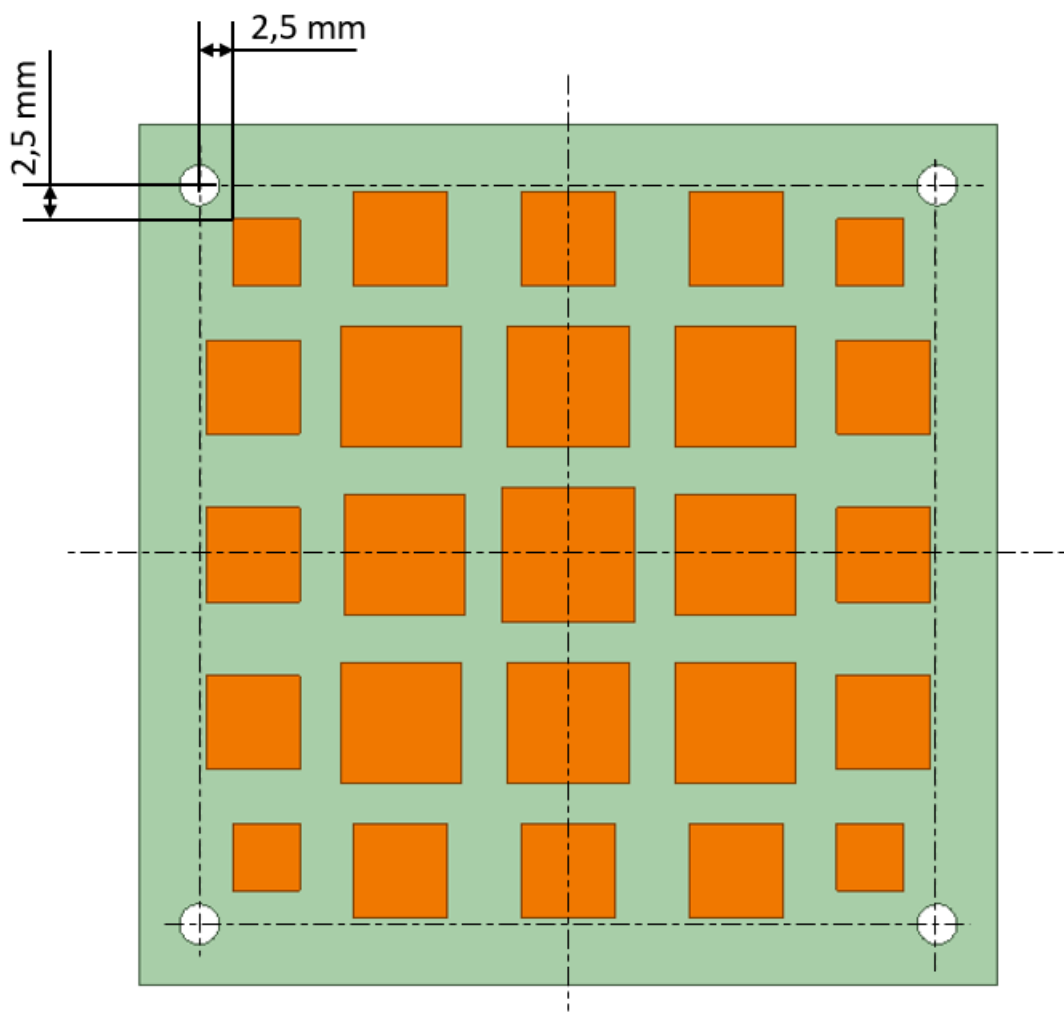
Na obr. 4.2 můžeme vidět strukturu spodní desky antény. V každém jejím rohu nalezneme otvor kruhového průřezu o průměru 3 mm. Tyto díry jsou zde umístěny z konstrukčního důvodu, a to abychom mohli upevnit nad základní spodní desku anténního elementu vrstvu superstrátovou. K tomu využijeme plastový šroub společně se třemi plastovými matkami (obr. 4.4), s jejichž pomocí dokážeme snadno ovlivňovat vzájemnou vzdálenost desek.



Obr. 4.2: Schéma spodní desky

### 4.3 Struktura superstrátové vrstvy

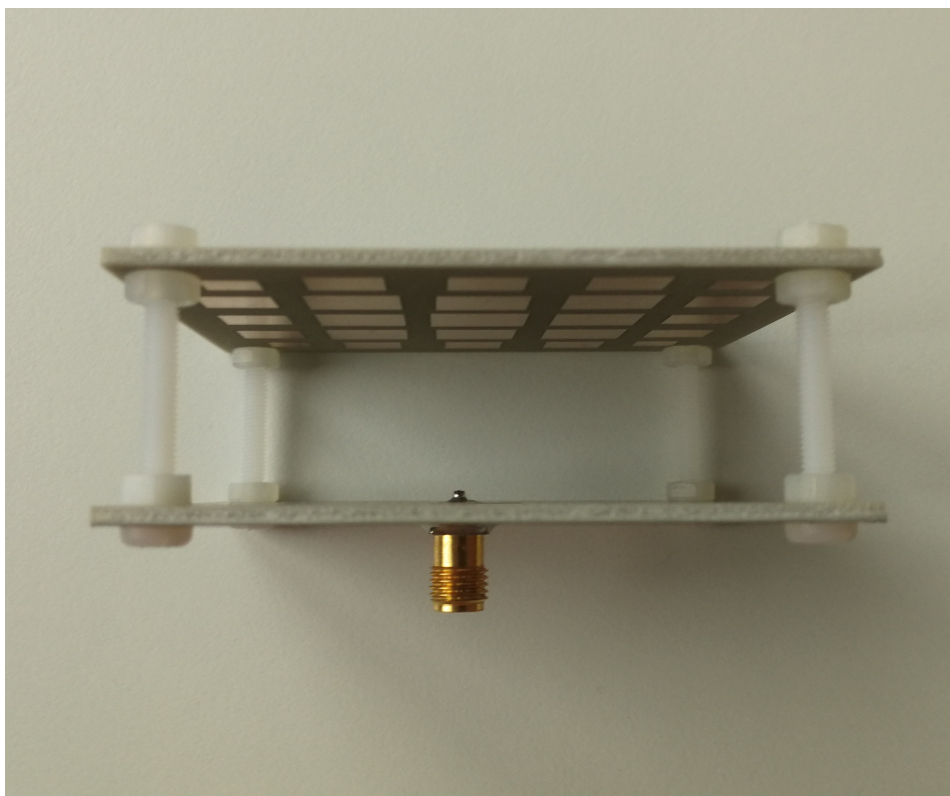
Při optimalizaci antény byla původní délka strany substrátu zvětšena o 2 mm na hodnotu 64 mm (z původních 62 mm). Není to z důvodu zlepšení parametrů antény, ale kvůli tomu, že vyvrtaný otvor v substrátu by byl pro původní rozměry velmi blízko kovové plošky, a bylo by zde riziko jejího narušení.



Obr. 4.3: superstrátová vrstva s rozměry 64x64 mm

## 4.4 Zkonstruovaná anténa

K anténnímu elementu je na závěr připájen koaxiální konektor s charakteristickou impedancí  $50 \Omega$ . Superstrátová vrstva je s pomocí šroubků a matic nastavena do vzdálenosti 22,2 mm nad spodní substrát (obr. 4.4).

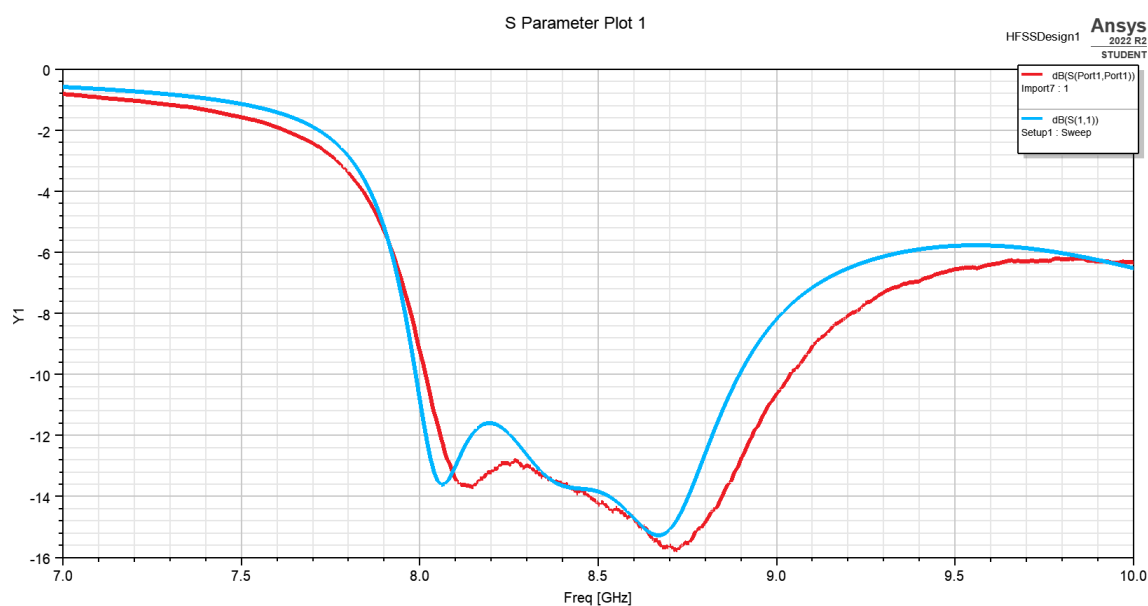


Obr. 4.4: Zkonstruovaná anténa

## 5 Porovnání výsledků zhotovené antény

### 5.1 Porovnání činitelů odrazu

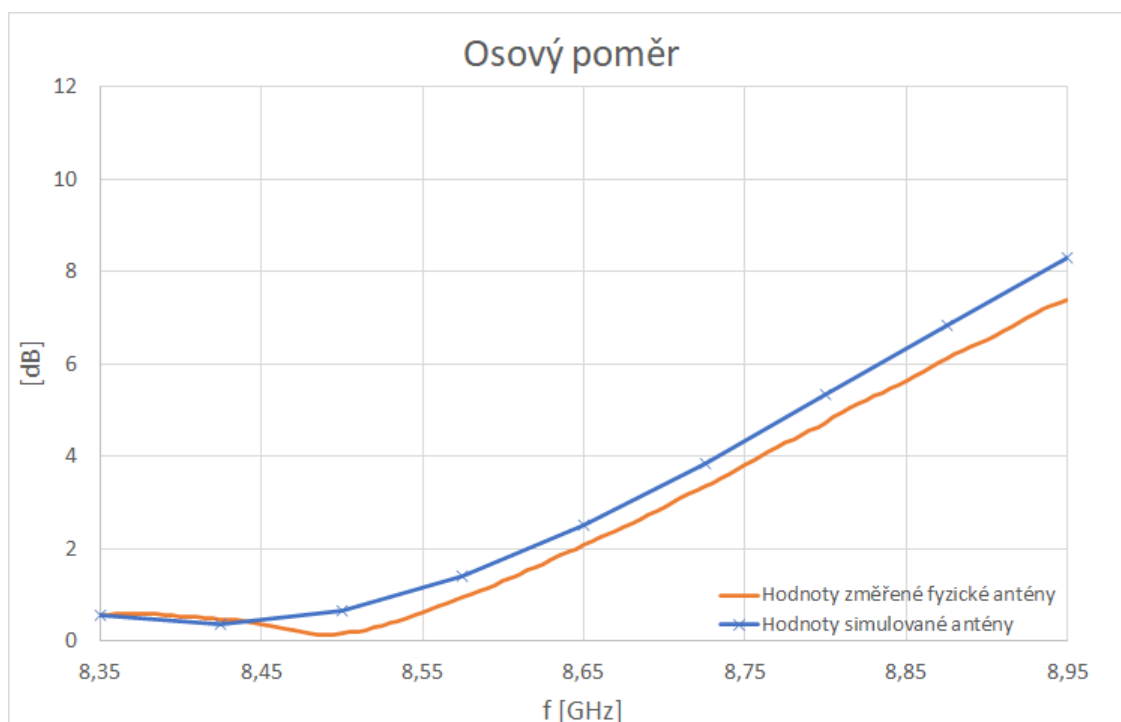
Na obr. 5.1 je zobrazeno porovnání průběhů činitele odrazu fyzické antény (červený průběh) a antény vytvořené v simulačním prostředí HFSS (modrý průběh) pro kmitočtové pásmo 7 GHz - 10 GHz. Můžeme si povšimnout že průběh fyzické antény s menšími odchylkami a mírným frekvenčním posuvem kopíruje činitele odrazu simulované antény, ačkoliv rozsah frekvenčního pásma pro pokles -10 dB je pro vyrobenou anténu širší zhruba o 100 MHz.



Obr. 5.1: porovnání činitelů odrazu: červený průběh - měření fyzické antény, modrý průběh - výsledek simulace

## 5.2 Porovnání osových poměrů

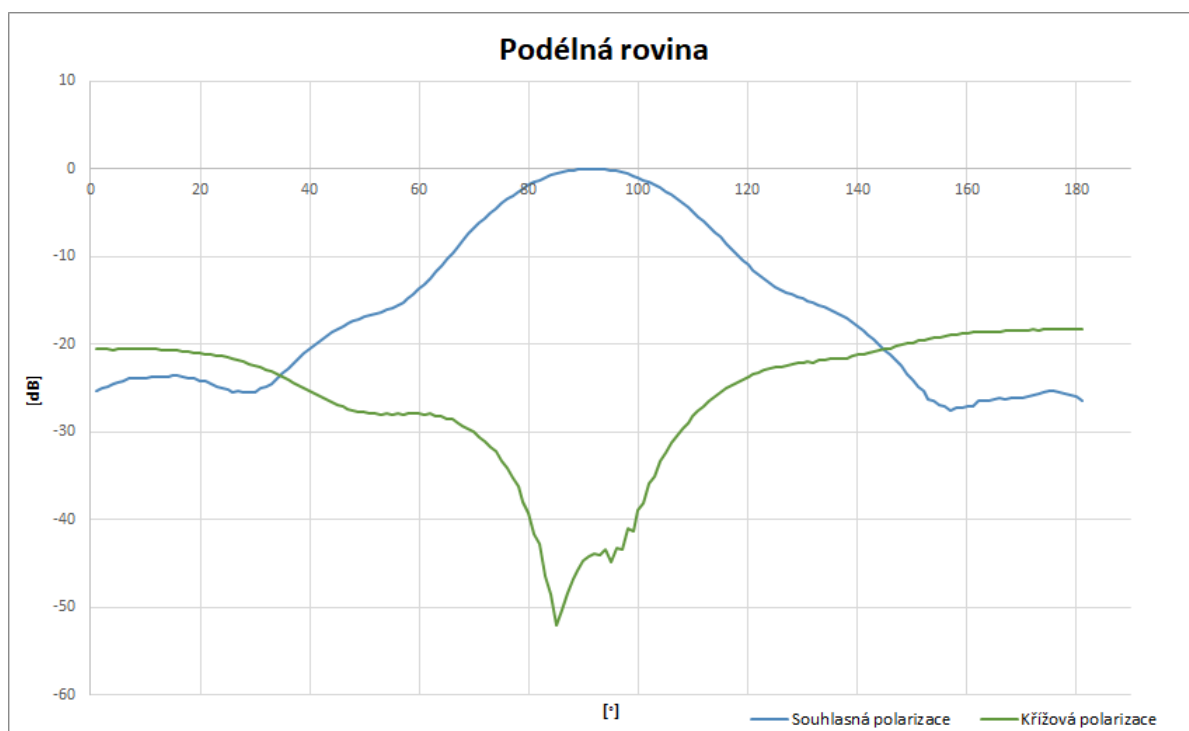
Na obr. 5.2 je vynesena osový poměr fyzické a simulované antény. Na nejnižším kmitočtu 8,35 GHz je hodnota osového poměru obou antén téměř totožná. Ke značnému rozdílu dochází na frekvenci 8,5 GHz, kde zhotovená oproti simulované anténě vykazuje výrazně lepší hodnotu 0,127 dB (zatímco hodnota charakteristiky simulované antény na tomto kmitočtu již mírně roste), dále stoupají hodnoty osového poměru obou antén téměř symetricky.



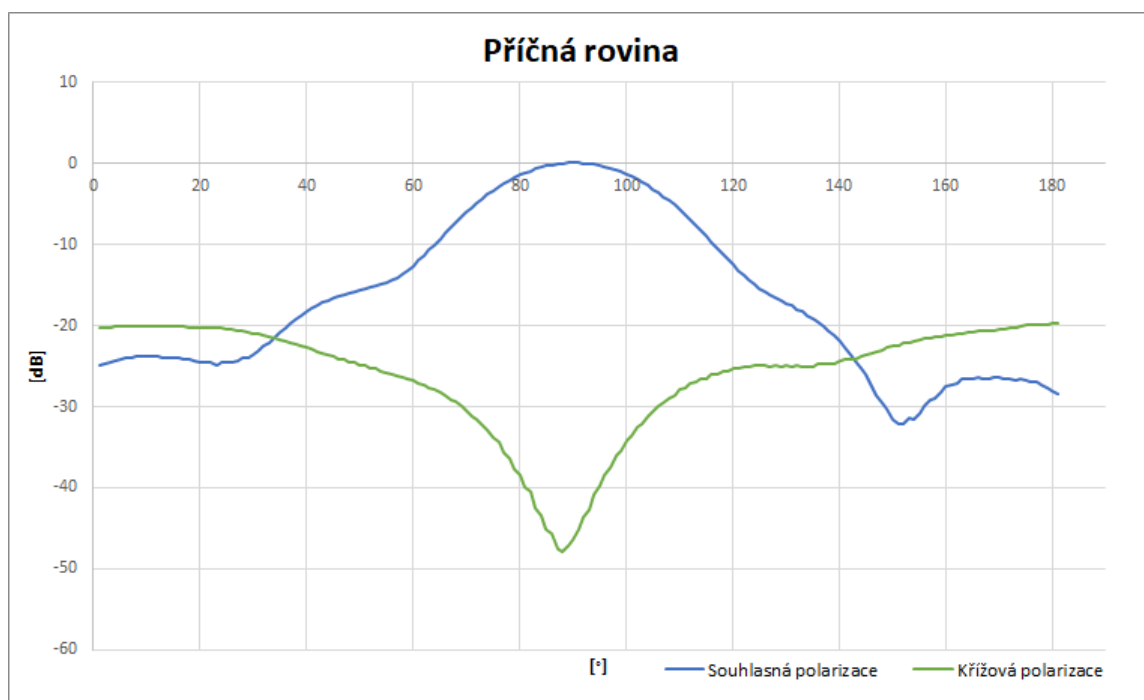
Obr. 5.2: porovnání osových poměrů: oranžový průběh - měření fyzické antény, modrý průběh - výsledek simulace

### 5.3 Vyzařovací charakteristika

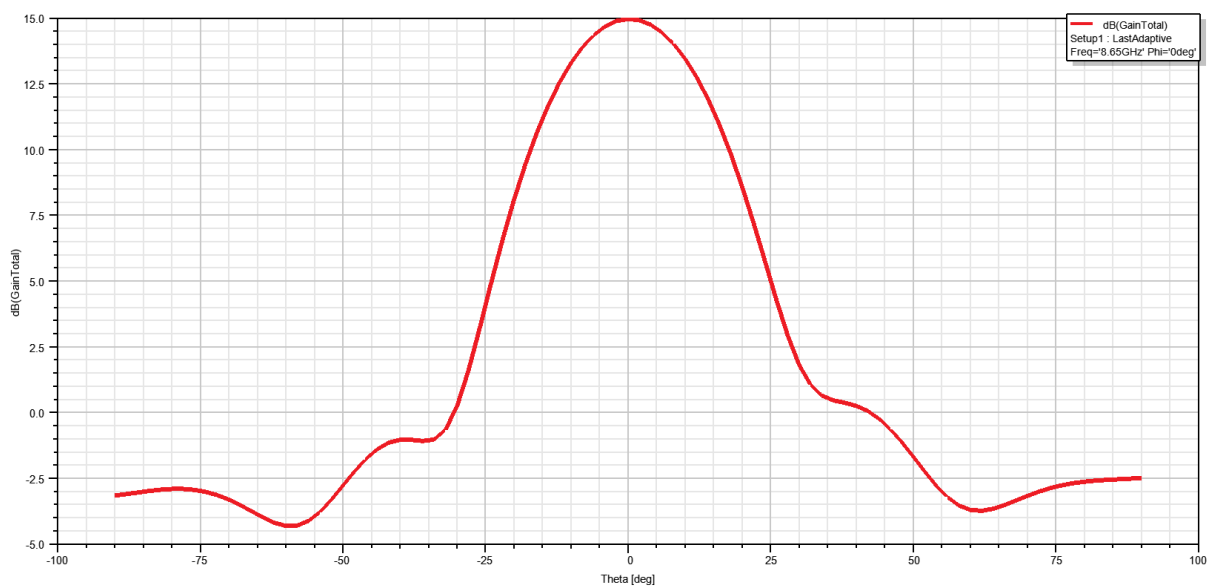
V poslední řadě je vynesena vyzařovací charakteristika podélné a příčné roviny zhotovené antény (obr. 5.3, 5.4). Můžeme pozorovat, že v bodě maxima souhlasné polarizace se nachází křížová polarizace v bodě minima. Měřením jsme zjistili zisk vyrobené antény 13,8 dB. Výsledky antény simulované v programu HFSS jsou uvedeny na obr. 5.5, 5.6. Při porovnání obou antén si můžeme všimnout, že vyzařovací charakteristika simulované antény má užší vyzařovací charakter. Zisk simulované antény je 15 dB.



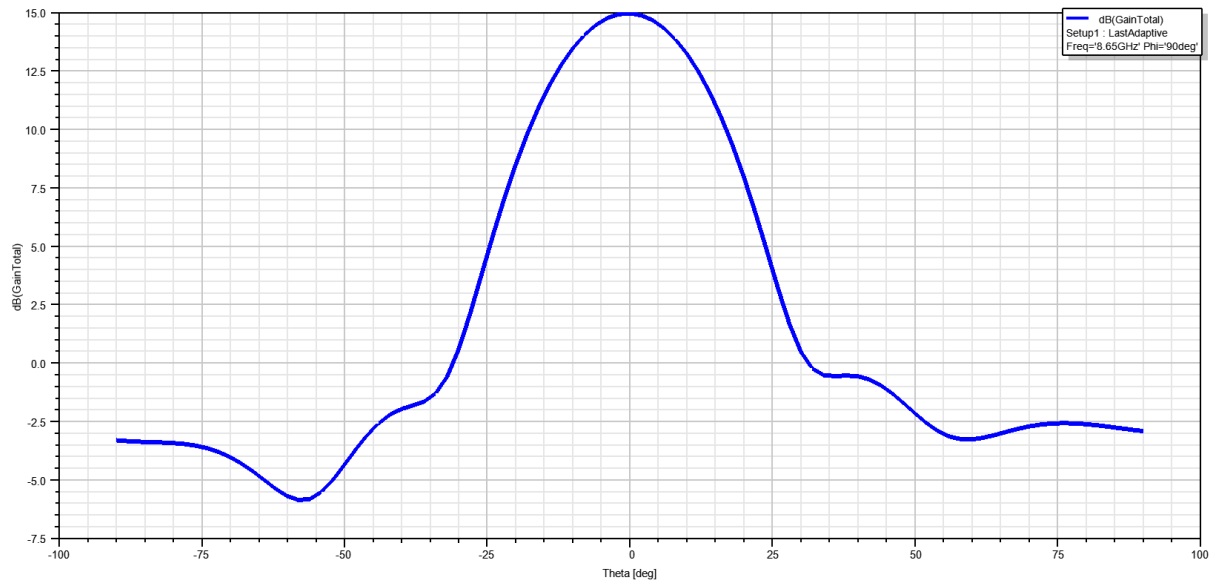
Obr. 5.3: Vyzařovací charakteristika - podélná rovina



Obr. 5.4: Vyzařovací charakteristika - příčná rovina



Obr. 5.5: Vyzařovací charakteristika simulace - podélná rovina



Obr. 5.6: Vyzařovací charakteristika simulace - příčná rovina



## Závěr

Ve své práci jsem ověřil parametry kruhově polarizované antény se superstrátem pro CubeSat publikované v [1]. Anténa popisovaná v článku byla simulována s pomocí programu Altair FEKO, kdežto mé simulace probíhaly výhradně v modulu HFSS z programového balíku Ansys Electronics Desktop. Mezi publikovanými výsledky a vlastními simulacemi můžeme pozorovat menší i větší odchylky.

V první kapitole bakalářské práce popisují publikovanou anténní strukturu, a to včetně napájení a superstrátové vrstvy. Uvádím zde základní poznatky z odborného článku [1], včetně rozměru a hmotnosti. To jsou důležité parametry pro výsledné použití antény.

Druhá kapitola popisuje vytváření modelu antény v programu HFSS. Pozornost je věnována nastavením včetně okrajových podmínek a podmínek na rozhraní (PEC, RAD). Můžeme zde taky nalézt popis vytváření napájení pomocí koaxiálního konektoru.

Následně jsou vyneseny grafy s výsledky simulací. Kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu antény dosahuje hodnoty -22 dB na frekvenci 8,39 GHz. Poté jsou vyneseny vyzařovací diagramy v jednotlivých rovinách XZ a YZ.

Abych zjistil, jak změna polohy napájení či změna velikosti anténního prvku ovlivňuje vlastnosti antény, provedl jsem několik parametrických studií. Z výsledných grafů lze vyvodit, že změna polohy napájení má razantní vliv na šířku frekvenčního pásma a velikost činitele odrazu. Naopak změnou rozměru anténního prvku se podstatně mění frekvence, na které dosáhne činitel odrazu nejvyšší záporné hodnoty. Například u obr. 2.16 můžeme pozorovat hodnotu činitele odrazu přesahující hodnotu -32 dB. K tomuto poklesu však dochází až na frekvenci 9,3 GHz, což je mimo námi zkoumané frekvenční pásmo.

Ve třetí kapitole jsem do simulace přidal superstrátovou vrstvu. Tato vrstva se skládá ze substrátu R03003 a polem 5x5 destiček různých velikostí. Po odsimulování modelu můžeme pozorovat, že jsme docílili užšího frekvenčního pásma poklesu činitele odrazu, ačkoliv jeho hodnota se navýšila zhruba o 6 dB. Tím pádem je zde podstatný rozdíl mezi hodnotou činitele odrazu uváděnou na obr. 3.2 a činitelem odrazu simulované antény (obr. 3.3). Následný vyzařovací diagram nám udává zisk antény 11,02 dB, což se liší od hodnoty zisku antény z článku [1] o -3 dB. Nakonec je na obr. 3.9 vynesena kmitočtová závislost osového poměru, která sice nemá zcela odpovídající průběh obr. 3.8, nicméně v naší pracovní frekvenční oblasti se dost přibližuje žádané hodnotě.

Změnou rozměrů antény se zabývá čtvrtá kapitola. Zde jsem s pomocí vzorce 4.2 a 4.3 vypočetl vlnovou délku při dané permitivitě substrátu. Z jejich poměru lze vyvodit procentuální zmenšení velikosti anténního elementu. Tímto však získáme

optimalizovanou anténu pouze v ideálních podmínkách. S pomocí parametrického zkoumání v programu HFSS jsme získali optimální rozměr flíčku antény.

V poslední řadě jsem porovnal charakteristické vlastnosti simulované antény s anténou vyrobenou. Pozoroval jsem, že průběh činitele odrazu vyrobené antény téměř přesně odpovídá průběhu simulované antény. Malé nepřesnosti mohou být dány odchylkami při výrobě. Taktéž při vynesení průběhu osového poměru pozorujeme značnou podobnost obou průběhů, ačkoliv na frekvenci 8,5 GHz má fyzická anténa pokles až na 0,127 dB. V poslední řadě je vynesena vyzařovací charakteristika obou antén. Zisk fyzické antény je o trošku menší oproti simulované a má hodnotu 13,8 dB. Při nanášení anténního flíčku na substrát došlo zřejmě k drobné chybě, a anténa nebyla zrcadlená, to má za následek to, že z původní levotočivě polarizované antény se stala pravotočivá.

Zhodnotíme-li celkově zhotovenou kruhově polarizovanou anténu, můžeme prohlásit, že se její vlastnosti velmi přibližují vlastnostem předpokládaným díky simulaci. Menší rozdíly výsledků mohly vzniknout odchylkami měřících přístrojů, nepřesností vyrobených rozměrů celkové antény (vzdálenost superstrátové vrstvy nemusela být přesně 22,2 mm nad spodním substrátem, jelikož se nastavovala ručně). V posledním kroku je anténě změřena přibližná hmotnost 24 g, což je o 5,7 g méně než u antény popisované v odborném článku [1].

# Literatura

- [1] L. LESZKOWSKA; M. RZYMOWSKI; K. NYKA; L. KULAS *High-gain compact circularly polarized X-band superstrate antenna for CubeSat applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, vol. 20, no. 11, p. 2090-2094. DOI: 10.1109/LAWP.2021.3076673* Dostupné z URL: [<https://ieeexplore.ieee.org/document/9419713/>](https://ieeexplore.ieee.org/document/9419713/).
- [2] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. Fourth edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, [2016]. ISBN 978-1-1186-4206-1.
- [3] VF koaxiální konektory: Rosenberger 32K449-500L5. *Mouser Electronics, Inc.* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z URL: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Rosenberger/32K449-500L5?qs=ehM%252BESVsXgwGoPWrGaNs7w%3D%3D>

## Seznam symbolů a zkratek

<b>PRS</b>	Částečně reflexní plocha
<b>PEC</b>	Dokonale elektrický vodič
<b>RAD</b>	Dokonale elektrický vodič