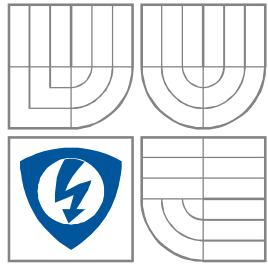


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# NÁVRH DVOUPÁSMOVÉ ANTÉNY PRO PŘÍJEM WIFI SIGNÁLU DO USB KLÍČE

DESIGN OF DUALBAND ANTENNA FOR WIFI USB DONGLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LUKÁŠ PRCHAL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. DAVID WOLANSKÝ

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Lukáš Prchal

**ID:** 100288

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh dvoupásmové antény pro příjem WiFi signálu do USB klíče**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s podstatou návrhu dvoupásmových planárních antén zejména pak s anténami typu IFA. Ve zvoleném programu navrhnete dvoupásmovou anténu umožňující příjem WiFi signálu pomocí USB klíče. Rozměry antény musí být zvoleny s ohledem na omezený prostor.

Navrženou anténu optimalizujte dle zadaných kritérií. Anténu vyrobte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BHARTIA, P., BAHL, I., GARG, R., ITTIPIBOON, A. Microstrip Antenna Design Handbook. Norwood: Artech House, 2001.

[2] POZAR, D. M., SCHAUBERT D. H. Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays. Wiley-IEEE Press, 1995.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. David Wolanský

**Konzultanti bakalářské práce:**

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*Předseda oborové rady*

## 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 návrhem dvoupásmové antény pro příjem Wi-Fi signálu do USB modulu přijímače, který lze pomocí USB rozhraní připojit k notebooku nebo PC a pomocí tohoto přijímat dostupný Wi-Fi signál. Byly vybrány střední frekvence z rozsahu pásma 2,4 GHz a 5 GHz, na kterých se Wi-Fi signál provozuje a na tyto byla naladěna anténa. Celý proces návrhu se uskutečnil v simulačním programu CST Microwave Studio 2010. První část práce se zabývá návrhem samotné antény, kde jsou naladěna dvě pásma. Druhá část se zabývá optimalizací a doladěním pásem s ohledem na fakt že anténa bude uvnitř plastového obalu a uvnitř bude elektronika zabezpečující funkčnost celého zařízení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Planární monopól, IFA anténa, substrát, USB klíč

## **ABSTRACT**

This project deals with the design of dual band antenna for the receiving of Wi-Fi signal integrated to the USB key receiver, which can be connected to notebook or PC with the help of interface and receive available Wi-fi signal . The center frequencies were chosen for 2,4 GHz and 5 GHz where the Wi-Fi signal operates and for these frequencies the antenna has been tuned. The antenna has been designed and simulated in CST Microwave Studio 2010. The first part of this work deals with the design of dual band antenna. Next, the resonant frequencies of the antenna are optimized in order to compensate the influence of the plastic housing and the electronic part of the USB key.

## **KEYWORDS**

Planar monopole, IFA antenna, substrate, USB key

PRCHAL, L. *NÁVRH DVOUPÁSMOVÉ ANTÉNY PRO PŘÍJEM WIFI SIGNÁLU DO USB KLÍČE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 24 s., 5 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: ing. David Wolanský.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh dvoupásmové antény pro příjem Wi-Fi signálu do USB klíče jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Davidovi Wolanskému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>x</b>
<b>1 ÚVOD</b>	<b>1</b>
1.1 Seznámení se zadáním .....	1
1.2 Standard 802.11 .....	1
1.2.1 Standard 802.11b, g .....	1
1.2.2 Standard 802.11a, n .....	2
1.3 Výběr střední frekvence pro pásmo 2,4 GHz a 5 GHz .....	2
1.3.1 Střední frekvence pro pásmo 2,4 GHz .....	2
1.3.2 Střední frekvence pro pásmo 5 GHz .....	3
1.4 Výběr vhodné antény pro tuto aplikaci .....	3
1.4.1 Mikropásková anténa typu obrácené F .....	4
1.4.2 Dvoupásmová mikropásková anténa typu obrácené F .....	5
1.5 Základní koncept dvoupásmové planární antény do USB modulu .....	6
1.5.1 Výsledná podoba USB Modulu modelu v CST Microwave studio .....	7
1.6 CST Microwave studio .....	8
1.6.1 Transient solver .....	8
1.6.2 Frequency domain solver .....	8
<b>2 Návrh antény v programu CST Microwave studio 2010</b>	<b>9</b>
2.1 Návrh v CST Microwave studio .....	9
Napájení: „port“ .....	9
2.1.1 Směrové charakteristiky .....	12
2.1.2 Zisk antény .....	14
2.2 Přizpůsobení návrhu .....	15
2.2.1 Koncept upraveného návrhu dvoupásmové antény .....	15
2.3 Výsledky simulací upraveného návrhu .....	17
2.3.1 Směrové charakteristiky a zisk antény .....	18
2.4 Plastový kryt antény .....	20
2.4.1 Vliv krytu tloušťky 0,9 mm na anténu .....	21

2.4.2	Vliv tloušťky krytu na anténu .....	23
2.4.3	Zhodnocení vlivu tloušťky a relativní permitivity .....	24
<b>3</b>	<b>Simulace připojení notebooku</b>	<b>25</b>
3.1	Zakreslení notebooku v CST MWS .....	25
3.2	Srovnání $S_{11}$ USB modulu bez a s notebookem .....	26
3.3	Doladění antény s připojeným NTB .....	27
3.3.1	Doladění pásma 2,4 GHz .....	27
3.3.2	Model USB antény po doladění .....	28
3.3.3	Výsledky simulace po doladění .....	28
3.3.4	Směrové charakteristiky a zisk antény .....	29
3.3.5	3D směrové charakteristiky .....	31
3.3.6	Rozložení povrchových proudů .....	32
<b>4</b>	<b>Ověření výsledků programem Ansoft HFSS 13</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Vyrobený model a měření</b>	<b>35</b>
5.1	Výsledky měření $S_{11}$ na vektorovém analyzátoru .....	36
5.2	Měření směrových charakteristik .....	37
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>39</b>
	<b>Literatura</b>	<b>40</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>41</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Frekvenční kanály pro bezlicenční pásmo 2,4 GHz standardu 802.11 (převzato z [1]).....	2
Obr. 1.2:	Mikropásková flíčková anténa (převzato z [2]).....	3
Obr. 1.3:	Vyzařování flíčkové mikropáskové antény (převzato z [2]).....	4
Obr. 1.4:	Uspořádání antény typu obrácené F (převzato z [2]).....	4
Obr. 1.5:	Příklad dvoupásmové mikropáskové antény obrácené F.....	5
Obr. 1.6:	Rozměry substrátu, rozložení antény a USB portu.....	6
Obr. 2.1:	Prvotní model s naladěnou anténou na frekvenci 2,448 GHz.....	10
Obr. 2.2:	Graf $S_{11}$ parametrů pro model z Obr. 2.1.....	10
Obr. 2.3:	Anténa v prvotní konfiguraci s nejlepším přizpůsobením.....	11
Obr. 2.4:	Graf $S_{11}$ parametru s nejlepším přizpůsobením pro nižší i vyšší pásmo.....	11
Obr. 2.5:	Graf parametrické analýzy pro přizpůsobovací pahýl.....	12
Obr. 2.6:	Roviny směrových charakteristik.....	12
Obr. 2.7:	Zobrazení sférického systému rovin v programu CST.....	13
Obr. 2.8:	Směrové charakteristiky pro 2,448 GHz v rovině YZ – Theta: vlevo prvotní model viz. Obr. 2.1, vpravo přizpůsobený model viz. Obr. 2.3.....	13
Obr. 2.9:	Směrové charakteristiky pro 2,448 GHz v rovině XY – Phi: vlevo prvotní model viz. Obr. 2.1, vpravo přizpůsobený model viz. Obr. 2.3.....	14
Obr. 2.10:	Směrové charakteristiky pro 2,448 GHz v rovině XZ – Theta: vlevo prvotní model viz. Obr. 2.1, vpravo přizpůsobený model viz. Obr. 2.3.....	14
Obr. 2.11:	Počáteční koncept upraveného návrhu dvoupásmové antény.....	15
Obr. 2.12:	Zobrazení výřezu v upraveném návrhu.....	15
Obr. 2.13:	Zkosená hrana upraveného konceptu.....	16
Obr. 2.14:	Model se zakresleným RF modulem a USB portem.....	16
Obr. 2.15:	Ladění modelu pomocí parametrických koeficientů v CST.....	17
Obr. 2.16:	Okótovaný model antény upraveného návrhu.....	17
Obr. 2.17:	Graf $S_{11}$ modelu antény upraveného návrhu.....	18
Obr. 2.18:	Parametrická analýza přizpůsobovacího pahýlu v horizontální rovině.....	18
Obr. 2.19:	Směrové charakteristiky pro frekvenci 2,448 GHz: Vlevo rovina YZ – Theta, vpravo rovina XY – Phi.....	19
Obr. 2.20:	Směrové charakteristiky pro frekvenci 2,448 GHz: Rovina XZ - Theta.....	19



Obr. 2.21:	Směrové charakteristiky pro frekvenci 5,6 GHz: Vlevo rovina YZ – Theta, vpravo rovina XY – Phi .....	20
Obr. 2.22:	Směrové charakteristiky pro frekvenci 5,6 GHz: Rovina XZ – Theta .....	20
Obr. 2.23:	Plastový kryt antény .....	21
Obr. 2.24:	Přehled relativních permitivit plastových materiálů (převzato z [6]) .....	22
Obr. 2.25:	Vliv změny relativní permitivity krytu na naladění antény – parametrická analýza .....	22
Obr. 2.26:	Vliv změny tloušťky krytu na naladění antény – parametrická analýza .....	24
Obr. 3.1:	Model notebooku v CST MWS .....	25
Obr. 3.2:	Znázornění připojení USB modulu k notebooku .....	26
Obr. 3.3:	Graf $S_{11}$ parametrů USB modulu bez a s připojeným NTB .....	26
Obr. 3.4:	Parametr $aX1$ – změna napájecího ramena .....	27
Obr. 3.5:	Model s upraveným přizpůsobením pro připojení NTB .....	28
Obr. 3.6:	Výsledky simulací USB modulu bez NTB a s NTB před a po vyladění .....	28
Obr. 3.7:	Srovnání směrových charakteristik pro 2,448 GHz v rovině YZ (vlevo) a XY (vpravo) pro USB anténu bez NTB (zelená křivka) a s NTB (červená křivka) .....	29
Obr. 3.8:	Srovnání směrových charakteristik pro 2,448 GHz v rovině XZ pro USB anténu bez NTB (zelená křivka) a s NTB (červená křivka) .....	29
Obr. 3.9:	Srovnání směrových charakteristik pro 5,6 GHz v rovině YZ (vlevo) a XY (vpravo) pro USB anténu bez NTB (zelená křivka) a s NTB (červená křivka) .....	30
Obr. 3.10:	Srovnání směrových charakteristik pro 5,6 GHz v rovině XZ pro USB anténu bez NTB (zelená křivka) a s NTB (červená křivka) .....	30
Obr. 3.11:	Srovnání 3D směrových charakteristik USB modulu bez NTB (vlevo) a s NTB (vpravo) na frekvenci 2,448 GHz .....	31
Obr. 3.12:	Srovnání 3D směrových charakteristik USB modulu bez NTB (vlevo) a s NTB (vpravo) na frekvenci 5,6 GHz .....	31
Obr. 3.13:	Zobrazení povrchových proudů pro frekvenci 5 GHz (vlevo) a 5,6 GHz (vpravo) .....	32
Obr. 3.14:	Zobrazení povrchového proudu pro frekvenci 2,448 GHz .....	32
Obr. 4.1:	Náhledy modelu nakresleného v Ansoft HFSS 13 (vlevo bez krytu, vpravo s krytem) .....	33
Obr. 4.2:	Graf $S_{11}$ parametrů pro model bez krytu (podle Obr. 2.16) a s krytem .....	34
Obr. 5.1:	Vyrobený model USB antény .....	35
Obr. 5.2:	Model antény v plastovém krytu .....	36
Obr. 5.3:	Graf srovnání měření na vektorovém analyzátoru a simulace .....	37

Obr. 5.4: Směrové charakteristiky pro 2,448 GHz.....	37
Obr. 5.5: Směrové charakteristiky pro 5,6 GHz.....	38

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1:	Vliv změny relativní permitivity krytu na zisk antény .....	23
Tab. 2:	Vliv změny tloušťky krytu na zisk antény .....	24
Tab. 3:	Změna nastavení parametrů antény s NTB a bez.....	27
Tab. 4:	Srovnání zisku antény s připojeným NTB a bez připojeného NTB.....	30

# 1 ÚVOD

## 1.1 Seznámení se zadáním

Tato práce se zabývá návrhem IFA antény pro Wi-Fi bezdrátové sítě v programu CST Microwave studio 2010, která bude sloužit jako přídavná síťová karta v notebooku s rozhraním USB. Označení Wi-Fi je „slangové“ pro širokou veřejnost a jako název v technické praxi je tento standard označen 802.11. Standard nabízí různé módy přenosu, které se liší v modulaci, frekvenci a tím pádem přenosovou rychlostí a dosahem příjmu. Tato anténa proto bude naladěna na frekvence, které jsou u tohoto standardu použity. Jelikož se jedná o externí zařízení tak je třeba celou anténu vsadit do plastového krytu, který ochrání zařízení mechanicky a v neposlední řadě bude splňovat i požadavek co do stránky estetické. Tím pádem se mění frekvence naladění antény, protože plastový obal má svoji permitivitu, která anténu ovlivňuje. V této práci je popsán návrh antény od počátečního konceptu do výsledného naladění s ohledem na rozladění při použití plastového krytu a posléze zohlednění rozladění při připojení celého zařízení k notebooku.

Takové zařízení, které slouží jako síťová karta k notebooku nebo i například k PC a nahrazuje tak klasické síťové karty, se nazývá USB Wi-Fi Modul. Klasické síťové karty se připojují přes rozhraní PCI, u notebooku miniPCI, toto připojení je poněkud nepohodlné a u starších modelů třeba i nemožné, a proto je třeba použít modul, který s rozhraním USB je prakticky univerzální. Wi-Fi modul obsahuje jak elektroniku pro samotnou funkci síťového adaptéru, tak i anténu pro komunikaci s jiným Wi-Fi zařízením, kterou se tato práce zabývá, a již zmíněné rozhraní USB.

Pro potřeby simulace USB modul síťového adaptéru je v programu CST Microwave studio vytvořen model, který odpovídá přibližně skutečnému vzhledu skutečného zařízení a tím se dosáhne přesnějších výsledků.

## 1.2 Standard 802.11

V technické praxi se slangový výraz Wi-Fi označuje jako standard 802.11. Standardů 802.11 je více a označují se písmeny a, b, g, ..., atd. Používané standardy v LAN bezdrátových sítích pro IT veřejnost jsou 802.11a, b, g, n, které se liší v pracovní frekvenci, a v použité modulaci což má za následek různé přenosové rychlosti a rozsah pokrytí signálem. Standard 802.11n je z těchto nejnovější a je s nimi zpětně kompatibilní a používá další metody ke zrychlení, jako je např. MIMO.

Pásmo Wi-Fi pracuje v bezlicenčním tzv. ISM pásmu a kompatibilitu kontroluje Wi-Fi aliance. Značka Wi-Fi je ochranná známka. Wi-Fi slouží jako náhrada sítí LAN, a proto se také používá označení WLAN (Wireless LAN) a primárně bylo navrženo pro použití uvnitř budov.

### 1.2.1 Standard 802.11b, g

Standard „b“ nese právě označení Wi-Fi a standard „g“ je bez označení. Oba pracují v bezlicenčním frekvenčním pásmu 2,4 GHz a liší se použitou metodou rozprostření

spektra. Zatímco 802.11b používá rozprostření spektra DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum), tak standard 802.11g využívá OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).

## 1.2.2 Standard 802.11a, n

Tyto standardy pracují v oblasti 5,1 GHz až 5,8 GHz, což je také bezlicenční frekvenční pásmo, které bylo schváleno v roce 1999, ovšem využíváno u nás a v Evropské unii bylo až od září 2005. Standard „a“ využívá rozprostření spektra OFDM, kterou poté převzal právě výše zmíněný standard „g“. Standard „n“ využívá s výhodou systém MIMO a kombinaci více modulací, nicméně byl zaveden poměrně nedávno. Zajímavostí je, že pásmo 5 GHz se dělí ještě na sub pásma podle toho, s jakým maximálním vysílacím výkonem smějí vysílat.

5150 – 5250 MHz: použití uvnitř budov, max. vyzářený výkon 200mW

5250 – 5350 MHz: použití uvnitř budov, max. vyzářený výkon 200mW ovšem pokud nemá zařízení regulaci na snížení vyzářeného výkonu o 3dB tak pouze 100mW

5470 – 5725 MHz: použití uvnitř i vně budov, max. vyzářený výkon až 1W

## 1.3 Výběr střední frekvence pro pásmo 2,4 GHz a 5 GHz

### 1.3.1 Střední frekvence pro pásmo 2,4 GHz

Jak je vidět z Obr. 1.1 Frekvenční kanály pro bezlicenční pásmo 2,4 GHz standardu 802.11, tak pásmo 2,4 GHz obsahuje 14 frekvenčních kanálů s šířkou 22 MHz a s rozstupem mezi středy kanálů 5MHz a pohybuje se od frekvence 2,412 GHz do 2,484 GHz.

Tím pádem lze jednoduše určit střední pásmo z aritmetického průměru nejnižší a nejvyšší frekvence:

$$f_{střed} = \frac{f_{max}[GHz] + f_{min}[GHz]}{2} = \frac{2,484 + 2,412}{2} = \underline{\underline{2,448GHz}}$$

CHANNEL NUMBER	LOWER FREQUENCY MHZ	CENTER FREQUENCY MHZ	UPPER FREQUENCY MHZ
1	2 401	2 412	2 423
2	2 404	2 417	2 428
3	2 411	2 422	2 433
4	2 416	2 427	2 438
5	2 421	2 432	2 443
6	2 426	2 437	2 448
7	2 431	2 442	2 453
8	2 436	2 447	2 458
9	2 441	2 452	2 463
10	2 451	2 457	2 468
11	2 451	2 462	2 473
12	2 456	2 467	2 478
13	2 461	2 472	2 483
14	2 473	2 484	2 495

Obr. 1.1 Frekvenční kanály pro bezlicenční pásmo 2,4 GHz standardu 802.11 (převzato z [1])

Nutno ještě podotknout, že podle Ústavu pro telekomunikační normy (ETSI) není čtrnáctý kanál použit pro Evropu, takže se používá pouze třináct kanálů, ale pro návrh antény, která by měla být kompatibilní s celým standardem, je toto irelevantní a ani to nijak výrazně nezhoršuje podmínky nebo náročnost návrhu.

### 1.3.2 Střední frekvence pro pásmo 5 GHz

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.2, má pásmo 5 GHz další tři subpásma, které se dělí podle použitého vyzářeného výkonu. Pro tuto práci bude nejzajímavější a také aktuální třetí subpásmo, díky tomu, že se používá v přístrojích pro bezdrátové sítě, které může vyzářovat až s výkonem 1W a používá se jak vně tak i uvnitř budov.

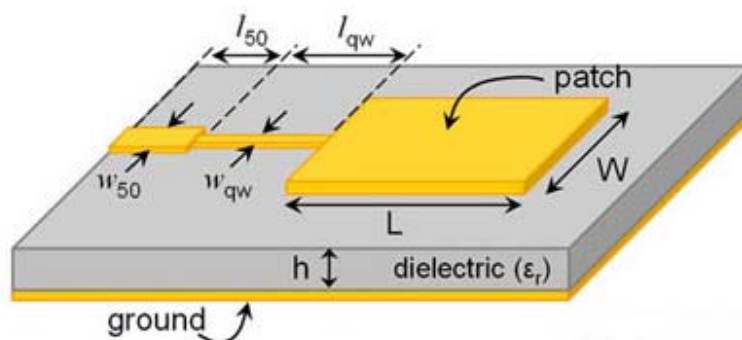
Pro určení středního pásma lze použít stejný postup jako v předchozím případě:

$$f_{střed} = \frac{f_{max}[GHz] + f_{min}[GHz]}{2} = \frac{5470 + 5725}{2} = \underline{\underline{5,6GHz}}$$

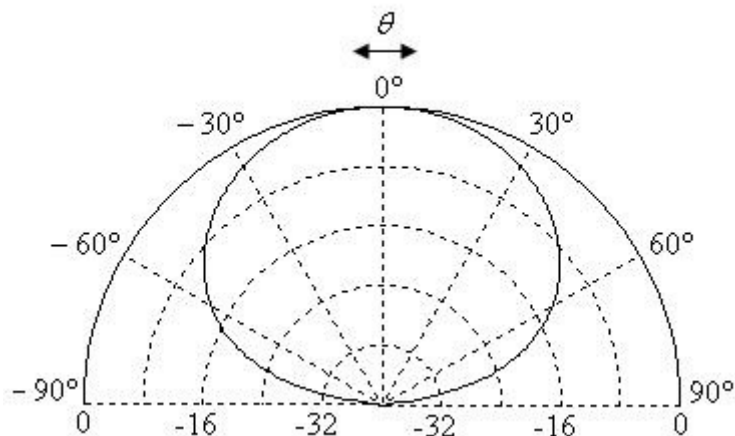
## 1.4 Výběr vhodné antény pro tuto aplikaci

V tomto případě bude potřeba zvážit velikost antény, vyzářovací charakteristiku a také náročnost výroby po stránce ekonomické. Při zvážení všech těchto požadavků vychází nejlépe použití mikropáskového monopólu typu obrácené F. Z hlediska výroby se jedná o nanosenou vrstvu vodivého materiálu (ve tvaru motivu antény), nejčastěji mědi, na dielektrický substrát s danou relativní permitivitou.

Mikropáskový monopól typu obrácené F je charakteristický tím, že nemá zemní plochu jako flíčkové antény, které nejsou všesměrové díky zemní ploše, jež je nanesena pod anténou (flíčkem). Tato zemní plocha je vytvořena kompletním pokovením této plochy pod flíčkem a vlnám zabraňuje odrazem od této plochy zářit ve směru za anténu. Tento typ antény (Obr 1.2) není vhodný pro použití v této práci. Jeho vyzářovací charakteristika je na Obr. 1.3. Při použití klasické flíčkové antény by nebylo možné přijímat signál ze všech směrů.



Obr. 1.2: Mikropásková flíčková anténa (převzato z [2])

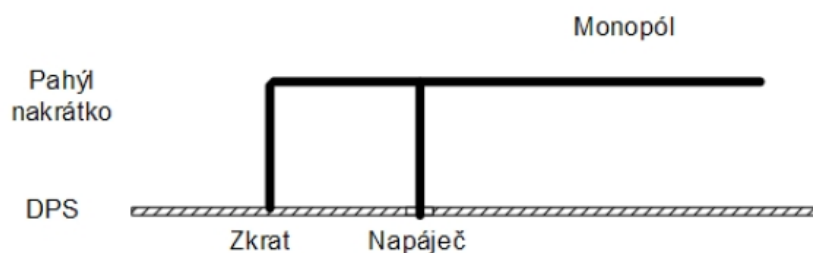


Obr. 1.3: Vyzařování flíčkové mikropáskové antény (převzato z [2])

#### 1.4.1 Mikropásková anténa typu obrácené F

Anténa typu obrácené F je varianta monopólu, který má horní část rovnoběžnou se zemní plochou. Takové uspořádání snižuje výšku antény.

Monopól rovnoběžný se zemní plochou způsobuje kapacitní reaktanci vstupní impedance antény. Kapacitní reaktance je kompenzována reaktancí indukční vytvořenou pomocí pahýlu nakrátko. Zemní plocha výrazně ovlivňuje vlastnosti antény. Elektromagnetické pole vyzářené anténou indukuje do vodivé zemnicí plochy proudy, které také vyzařují. Výsledné elektromagnetické pole je dáno součtem pole antény a její zrcadlové plochy tvořené zemnicími proudy. Polarizace antény je spíše eliptická. Anténa přijímá horizontální i vertikální elektromagnetické vlny. To je výhodné hlavně v uzavřených prostorech, kde dochází k odrazům a změně polarizace elektromagnetických vln. [2]

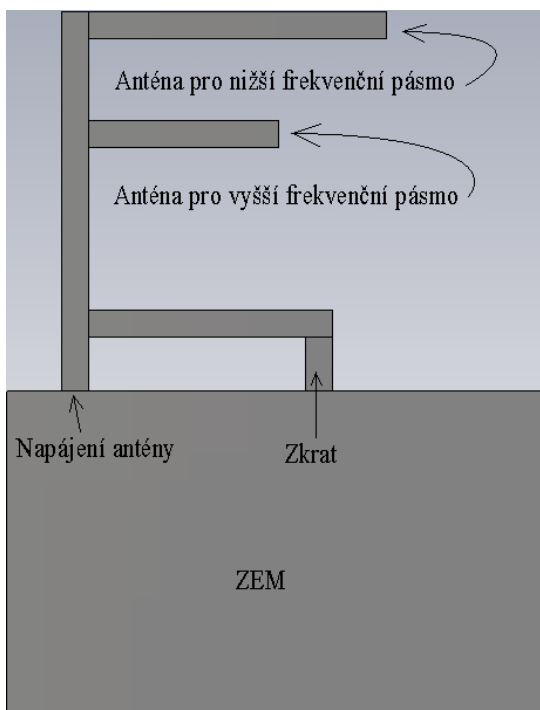


Obr. 1.4: Uspořádání antény typu obrácené F (převzato z [2])

Jelikož bylo vyloučeno použití mikropáskové antény, která je směrová (viz. flíčková anténa), řešení spočívá v použití mikropáskového monopólu typu obrácené F, který má ve své podstatě všesměrovou vyzařovací charakteristiku. S výhodou se potom využije toho, že výroba takové antény je nenákladná a snadno realizovatelná. [2]

### 1.4.2 Dvoupásmová mikropásková anténa typu obrácené F

Výsledný navrhovaný USB modul bude sloužit ovšem pro pásmo 2,4 GHz a 5 GHz. Z toho vyplývá, že anténa obrácené F bude ještě modifikována pro další pásmo. Toho se docílí tak, že k ramenu antény, které bude vyzařovat do rádiového prostředí frekvence z pásma 2,4 GHz, se přidá ještě další rameno pro pásmo 5 GHz.

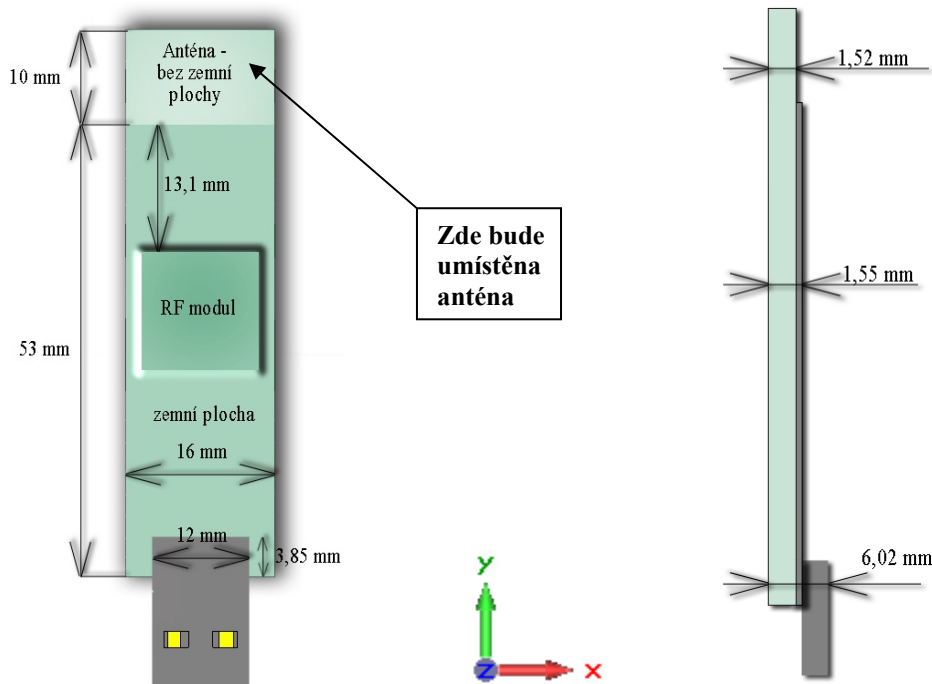


Obr. 1.5: Příklad dvoupásmové mikropáskové antény obrácené F

Z Obr. 1.5: Příklad dvoupásmové mikropáskové antény obrácené F je vidět, že anténa má dvě ramena pro dvě různá pásma, které se liší právě délkou, jež určí její rezonanci na potřebném kmitočtu a také zkrat. Tento zkrat zde slouží pro impedanční přizpůsobení antény. Protože tato mikropásková anténa typu obrácené F je monopól, nelze ji přizpůsobit impedančně jako například fličkovou anténu. Ta se impedančně přizpůsobuje vnořením mikropáskového vedení do fličky. U monopólu typu obrácené F ovšem tuto metodu použít nelze a impedanční přizpůsobení se řeší právě pomocí zkratu.



## 1.5 Základní koncept dvoupásmové planární antény do USB modulu



Obr. 1.6: Rozměry substrátu, rozložení antény a USB portu

V první řadě se bude vycházet z faktu, že délka antény odpovídá délce vlny. Jelikož je pásmo Wi-Fi od 2,4 GHz výše, může se tedy podle tohoto říci, že se jedná o rozměry v centimetrech. Pokud se uváží, že jako vyzařovací anténa stačí čtvrtvlnný monopól, což odpovídá ještě vydělení délky vlny čtyřmi, tak se stále více blížíme k desítkám milimetrů.

Planární anténa je, jak už bylo řečeno, vrstva vodivého materiálu, nejčastěji mědi, která je nanesena na substrát. Tento substrát funguje nejen jako mechanická opora takovéto antény, ale také přispívá svými dielektrickými vlastnostmi k samotné funkci antény.

Podle vzorce:

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

kde:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2)$$

je vidět, že délka vlny takovéto antény bude závislá na frekvenci a také na permitivitě substrátu. A právě tohoto faktu ještě využijeme v případě planární antény, která bude v podobě mikropásku nanesena na substrát o určité permitivitě.

V této práci je použit materiál FR4 s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 4,15$ , který byl nadefinován v programu CST Microwave studio. Je obecně lehce dostupný, cenově přijatelný a dostupný i na místě, kde se bude tato anténa vyrábět.

Lehce se tedy lze dopočítat výsledné délky ramena antény pro frekvenci již určenou dříve a to 2,448 GHz:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,448 \cdot 10^9} = 0,12255m = 12,255cm$$

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0,12255}{\sqrt{4,3}} = 0,0591m = 5,91cm$$

pro délku antény jakožto čtvrtvlnný monopól stačí délka čtyřikrát menší, a proto je výsledná délka ramena rovna:

$$l_m = \frac{\lambda_v}{4} = \frac{0,0591}{4} = 0,014775m = 14,775mm \quad (3)$$

Zde si lze udělat prvotní představu o tom, jaké budou rozměry takovéto antény a tím pádem i celého konceptu a samotné desky substrátu FR4 s relativní permitivitou 4,15.

Pro frekvenci 5,6 GHz bude postup výpočtu zcela identický, jen se změní hodnoty frekvence z 2,448 GHz na 5,6 GHz:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{5,6 \cdot 10^9} = 0,05357m = 5,357cm$$

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0,05357}{\sqrt{4,3}} = 0,02583m = 2,583cm$$

$$l_m = \frac{\lambda_v}{4} = \frac{0,02583}{4} = 0,006459m = 6,459mm$$

### 1.5.1 Výsledná podoba USB Modulu modelu v CST Microwave studio

Na Obr. 1.6 je vidět rozložení anténní plochy, zemní plochy, RF modulu a USB portu a vše je okótováno rozměry v milimetrech. Celý tento model je ovšem ještě umístěn v plastovém krytu, který zde není zobrazen.

Rozměry tohoto modelu byly zvoleny podle vypočítaných délek ramen antén a podle již známých rozměrů USB Wi-Fi modulů, které jsou na trhu dostupné.

## 1.6 CST Microwave studio

Program CST Microwave studio (dále jen CST MWS) slouží k 3D modelování, simulacím a výpočtům elektromagnetických struktur. Program je založen na metodě FIT – Finite Integration Technique, která je velmi podobná metodě konečných diferencí v časové oblasti FDTD – Finite Difference Time Domain. FDTD ovšem řeší Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru, kdežto FIT používá jejich integrální tvar. [3]

Můžeme využít v programu CST Microwave studio několika solverů. Solver znamená metoda pro výpočet odezvy modelu. Z nabízených několika solverů stojí za zmínku Transient (časový) a Frequency domain (frekvenční) solver.

### 1.6.1 Transient solver

Tato metoda výpočtu v CST MWS používá tzv. mesh (mřížku), která se skládá z hexahedral (šestiúhelníkových) buněk. K výběru ovšem jsou i jiné tvary buněk. Na tyto buňky program rozdělí simulovaný model a počítá jednotlivé buňky již výše zmíněnou metodou FIT. Výhodou Transient solver je menší nárok na hardware počítače ale bohužel nevýhodou je poměrná nepřesnost oproti skutečnosti a oproti Frequency domain solver. Zvětšit přesnost se dá volbou Adaptive meshing, která přizpůsobí mřížku podle konkrétního modelu. Transient solver je flexibilní nástroj s širokými možnostmi nastavení, nehodí se pro řešení modelů, které mají menší rozměry, než vlnové délky signálů se kterými pracují – modely se soustředěnými parametry. [7]

V této práci je využito výpočtu Transient solverem.

### 1.6.2 Frequency domain solver

Tento řešič je na hardware mnohem náročnější, ale poskytuje velmi přesné výsledky simulací. Umí také pracovat s hexahedral mřížkou a hodí se perfektně pro řešení úzkopásmových modelů.

## 2 NÁVRH ANTÉNY V PROGRAMU CST MICROWAVE STUDIO 2010

V prvotním návrhu a představě o rozměrech celé desky substrátu byla velikost antény vypočítaná v kapitole 1.5 a také již zmíněné komerční USB moduly Wi-Fi.

Byly zvoleny rozměry v desítkách milimetrů, což těmto požadavkům odpovídá. Rozměry substrátu byly zvoleny:

šířka: 22 mm ; výška: 74 mm ; tloušťka: 1,52mm

Co se týče tloušťky pokovené vrstvy, která bude představovat zemnicí desku a zároveň z ní bude vyroben motiv antény, ta byla zvolena 0,03 mm. Tato hodnota je typická pro pokovené desky substrátu vrstvou mědi.

### 2.1 Návrh v CST Microwave studio

Při prvním spuštění programu je třeba zvolit vhodný mód programu, v tomto případě je to Microwave studio právě pro modelování mikrovlnných struktur.

Poté se nám zobrazí submenu pro výběr konkrétní mikrovlnné struktury, kde se vybere volba: „**Antenna (Plannar)**“

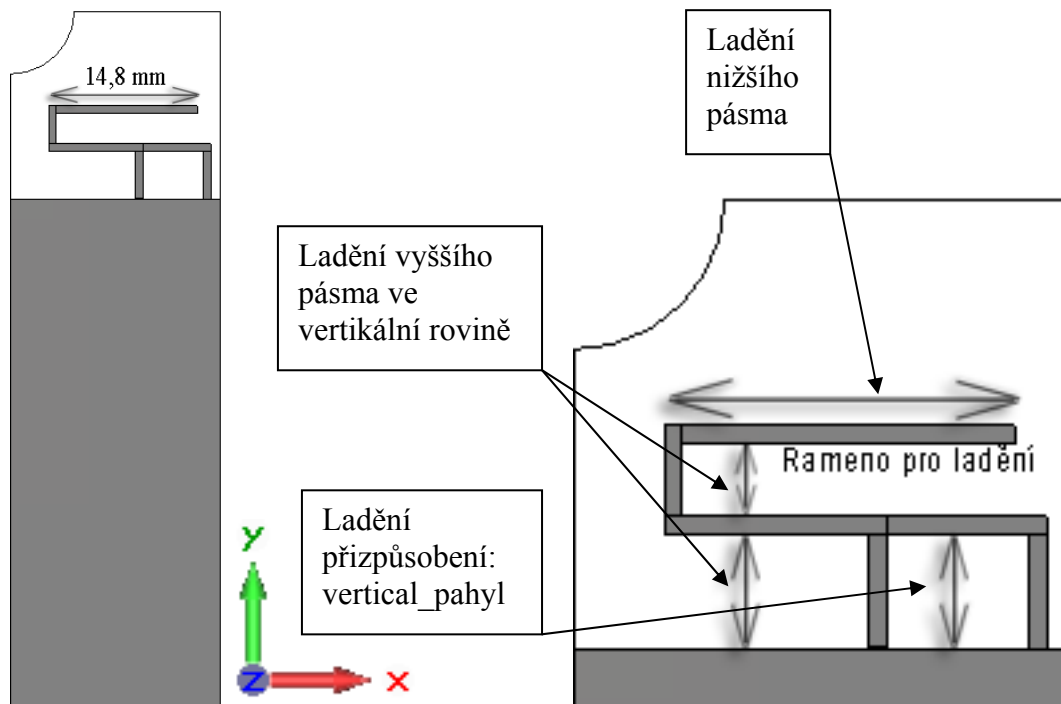
Po tomto prvotním výběru se program implicitně nastaví v tomto módu na rastr v jednotkách milimetrů a do frekvencí v řádech GHz, protože právě pro tyto účely se používají planární struktury, jak již bylo sděleno dříve díky svým rozměrům. Také se nastaví okrajové podmínky, kde materiál okolí je vakuum atd.

Nyní již lze přistoupit k samotné tvorbě antény. Jako počáteční krok bude vytvořena deska ze substrátu FR4 s permitivitou 4,15 a na ní vytvořen motiv antény. Jako prvotní motiv antény je zvolena vypočítaná délka ramena pro pásmo 2,4 GHz, která činí 14,778 mm.

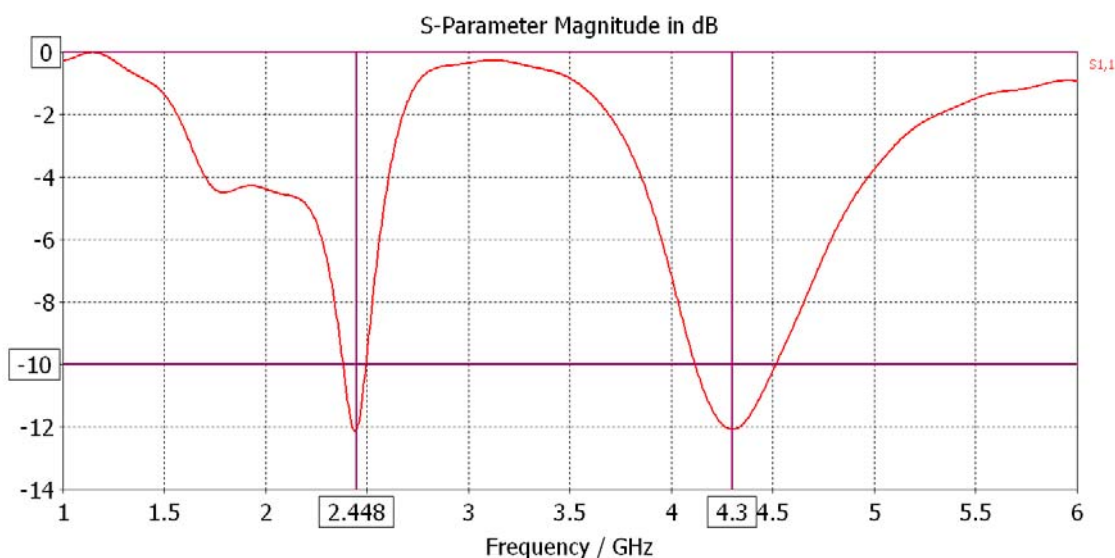
Na Obr. 2.1 je tedy prvotní model s délkou antény 14,8 mm, což by odpovídalo frekvenci nižší, než té, které je třeba dosáhnout, ale je třeba brát ohled na tvar antény. V horizontální rovině mezi rameny jsou parazitní kapacity a také přizpůsobovací zkrat změny poměry proudů v anténě. Parazitní kapacity způsobily rezonanci pro pásmo odpovídající frekvenci 4,3 GHz. Nastavení přesné délky na rezonanci 2,448 bylo provedeno experimentálně pomocí parametrické analýzy.

#### Napájení: „port“

Pro napájení simulovaného modelu monopólu byl zvolen „Discrete port“. Nastavení portu je pro impedanci 50 ohmů, takže anténu je třeba na tuto impedanci přizpůsobit.



Obr. 2.1: Prvotní model s naladěnou anténou na frekvenci 2,448 GHz



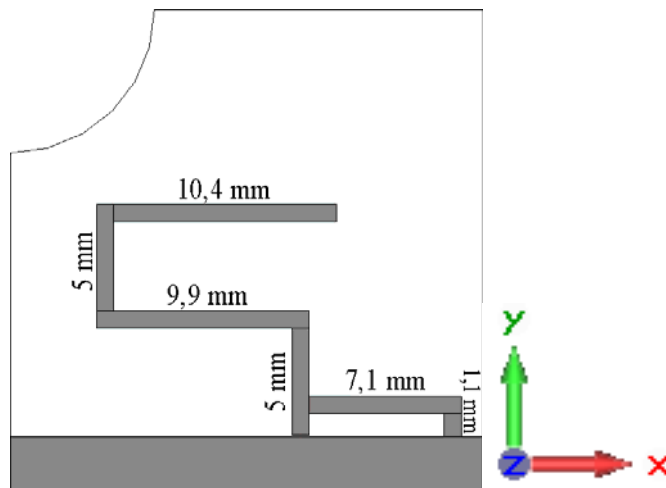
Obr. 2.2: Graf  $S_{11}$  parametrů pro model z Obr. 2.1

Z Obr. 2.2 je patrné, že přizpůsobení by se již dalo považovat za uspokojivé. Parametr  $S_{11}$  je třeba dosáhnout minimálně -10 dB a znamená to, že vlna odražená od vstupní impedance je asi třikrát menší než vlna postupná. Zde je -12 dB a to odpovídá čtyřikrát menším odrazům. Na frekvenci 2,448 GHz už anténa vyzařuje a díky parazitním kapacitám mezi rameny antény se vybudilo i druhé pásmo, avšak na frekvenci jen 4,3 GHz.

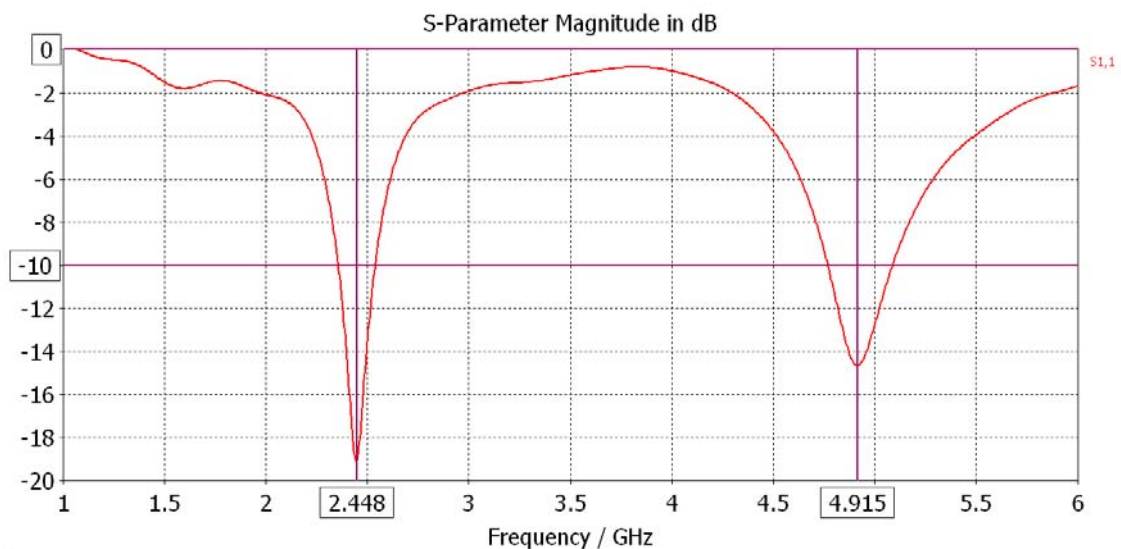
Při ladění druhého pásma na 5,6 GHz se ovšem vyskytly problémy s laděním. V případě doladování vyššího pásma je třeba měnit vzdálenost mezi rameny antény ve vertikální rovině podle Obr. 2.1. Zde se ovšem projevil fakt, že při změnách mezer mezi rameny se změní jak frekvence nižšího pásma, tak přizpůsobení. Impedanční

přizpůsobení pro pásmo 5,6 GHz není možné naladit při zachování nižšího i vyššího pásma na přesně zvolených frekvencích. Při zvětšování mezery mezi rameny se prodlužuje zároveň délka antény pro 2,4 GHz a je třeba ji doladovat.

Při konfiguraci z Obr. 2.3 se dosáhne nejlepšího přizpůsobení pro obě pásma, ale stále nelze naladit vyšší frekvence než 4,915 GHz (Obr. 2.4).

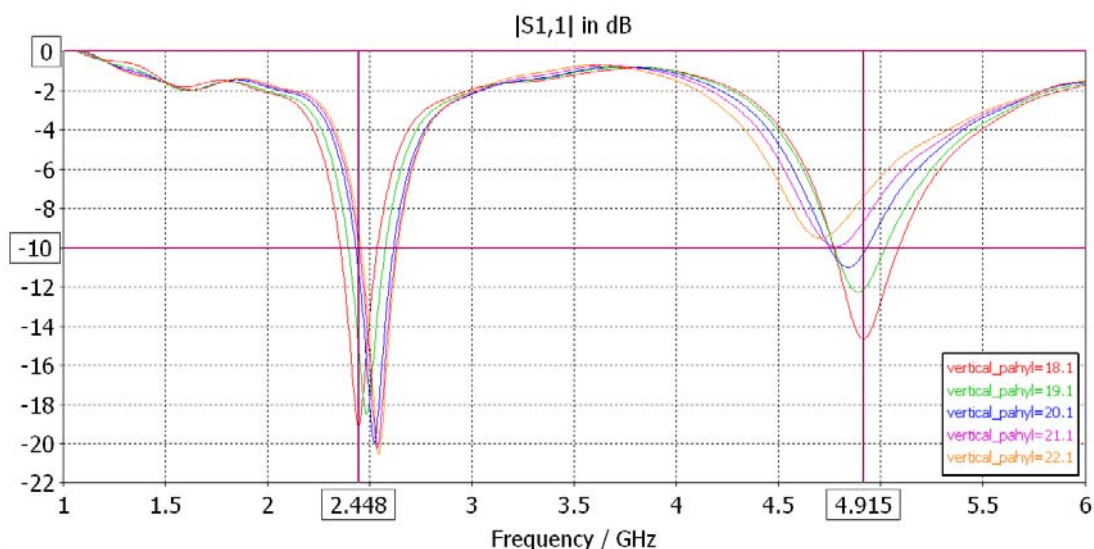


Obr. 2.3: Anténa v prvotní konfiguraci s nejlepším přizpůsobením



Obr. 2.4: Graf  $S_{11}$  parametru s nejlepším přizpůsobením pro nižší i vyšší pásmo

Model v CST byl vytvořen s definovanými parametry, takže anténu je možné ladit ve všech směrech a přizpůsobí se přitom ostatní ramena nastavené velikosti. Díky tomuto je možné využít parametrického výpočtu v CST, kdy v Transient solver se nastaví parametr, který se bude měnit v daném intervalu hodnot. Nakonec se nastaví počet kroků, na které se interval rozdělí, a program provede sérii výpočtů a vykreslí je do jednoho grafu. Pro příklad parametrické analýzy je zde graf pro nastavení přizpůsobení pomocí pahýlu, ve vertikálním směru (Obr. 2.5).

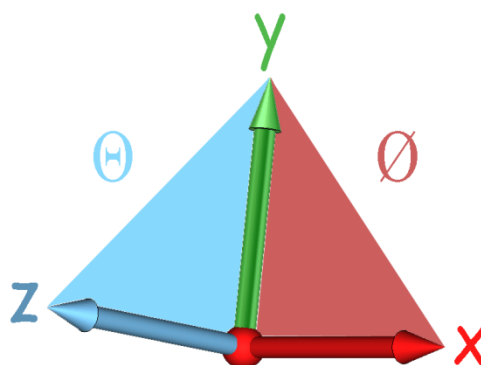


Obr. 2.5: Graf parametrické analýzy pro přizpůsobovací pahýl

Hodnota „vertical\_pahyl=18,1“ (viz. Obr. 2.1) odpovídá vzdálenosti mezi zemnicí plochou a zkratovacím pahýlem (viz. Obr. 2.3) a to je 1,1 mm. Další hodnoty v parametrické analýze jsou vždy o jeden milimetr větší. Je vidět z grafu na Obr. 2.5, že se zvětšováním mezery se zvyšuje frekvence nižšího pásma a naopak snižuje frekvence vyššího pásma. Impedanční přizpůsobení u nižšího pásma se mírně zlepšuje se zvětšující se mezerou, ale u vyššího pásma naopak rapidně zhoršuje.

## 2.1.1 Směrové charakteristiky

Co se týče směrových charakteristik, je potřeba je zde zobrazovat ve třech rovinách, jelikož se jedná o všesměrovou anténu. A to v rovinách **XY**, **YZ** a **XZ**.



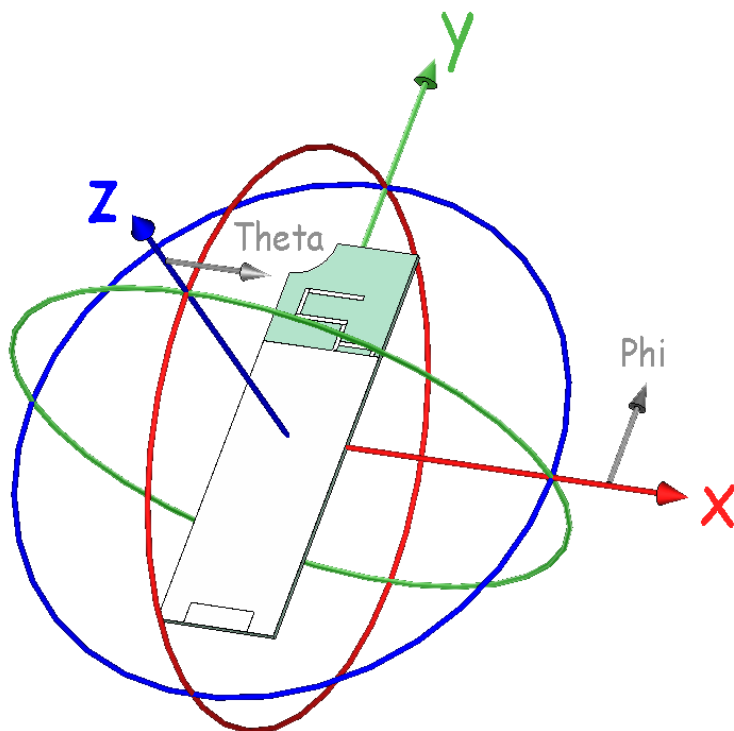
Obr. 2.6: Roviny směrových charakteristik

Rovina XY se nazývá jako rovina Phi [Ø] a proto Ø-diagram.

Rovina YZ se nazývá jako rovina Theta [Θ] a proto Θ-diagram.

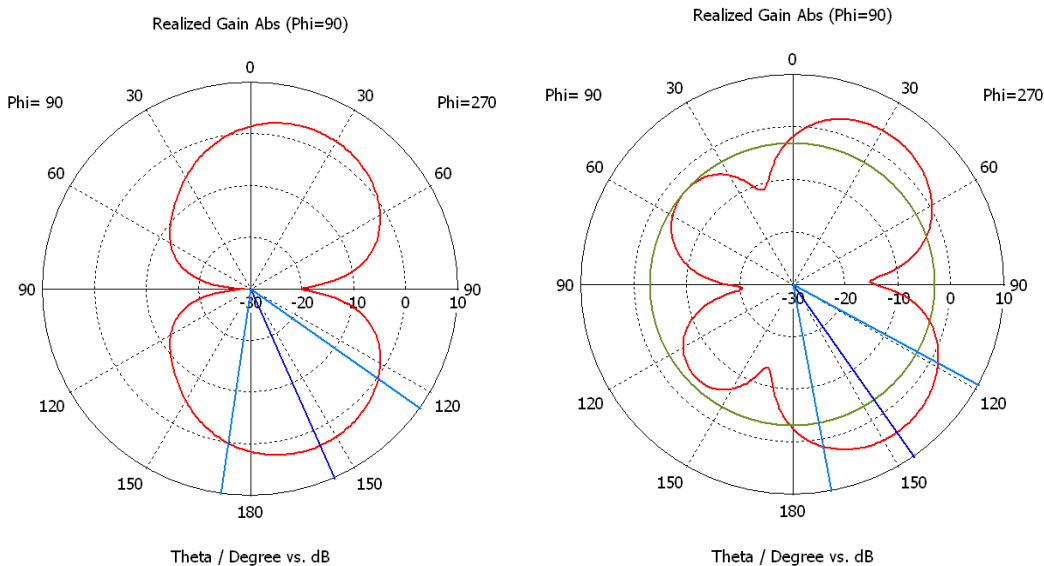
Rovina XZ se také nazývá jako rovina Theta [Θ] a proto Θ-diagram.

Názvy diagramů se určují podle toho, který úhel necháme rozmítat. Může to být právě buď Phi a nebo Theta, jak je naznačeno na Obr. 2.7.



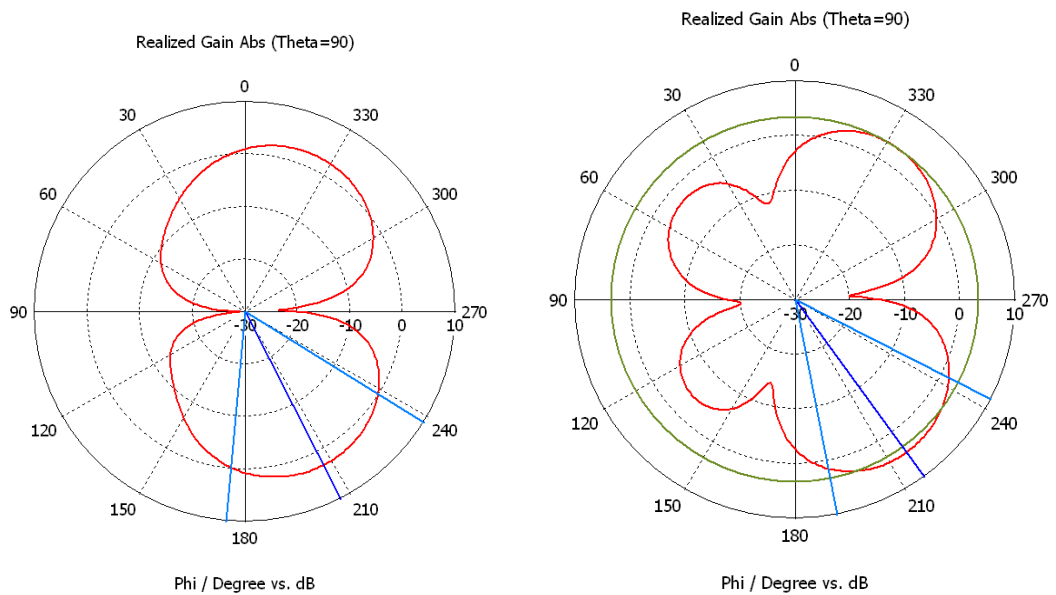
Obr. 2.7: Zobrazení sférického systému rovin v programu CST

Pro srovnání směrových charakteristik jsou zde uvedeny grafy pouze pro nižší pásmo, jelikož vyšší se nepodařilo naladit při tomto konceptu na 5,6 GHz, a proto nemá smysl je zobrazovat.

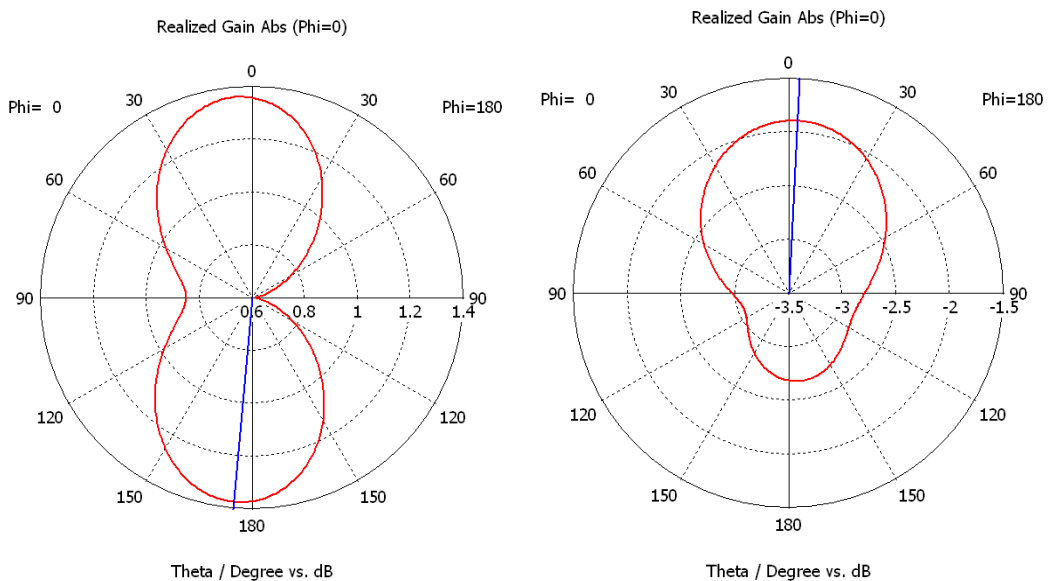


Obr. 2.8: Směrové charakteristiky pro 2,448 GHz v rovině YZ – Theta: vlevo prvotní model viz. Obr. 2.1, vpravo přizpůsobený model viz. Obr. 2.3





Obr. 2.9: Směrové charakteristiky pro 2,448 GHz v rovině XY – Phi: vlevo prvotní model viz. Obr. 2.1, vpravo přizpůsobený model viz. Obr. 2.3



Obr. 2.10: Směrové charakteristiky pro 2,448 GHz v rovině XZ – Theta: vlevo prvotní model viz. Obr. 2.1, vpravo přizpůsobený model viz. Obr. 2.3

### 2.1.2 Zisk antény

Jedná se o zisk antény s uvažováním nepřizpůsobení na vstupu antény (realized gain), tedy neuvažuje ztráty napájecího portu.

Zisk antény byl spočítán v CST pro prvotní model bez impedančního přizpůsobení. Pro frekvence 2,448 GHz je zisk roven  $G = 3,037$  dB. Pro model impedančně přizpůsobený činí zisk  $G = 4,441$  dB.

## 2.2 Přizpůsobení návrhu

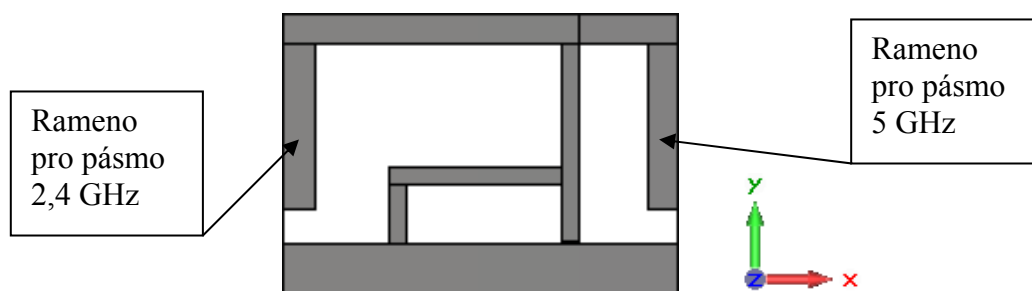
Vzhledem k tomu, že v prvotním konceptu se nepodařilo naladit druhé pásmo na 5,6 GHz, je potřeba motiv antény upravit do jiné podoby. Také je vidět, že deska substrátu je oproti anténě zbytečně velká a lze ji tedy zmenšit a motiv antény upravit tak, aby bylo nejlepší využití místa na desce substrátu.

Jelikož má být celá anténa umístěna v plastovém krytu, je třeba brát ohled i na tento fakt. Prvotní model byl navržen pro předpokládaný plastový kryt, který se ovšem nepodařilo získat. Místo toho je k dispozici kryt s šířkou 16 mm a výškou 52 mm. Výška není tak důležitá, protože důležité je, aby pro přesné výsledky praktického měření byla zakryta hlavně samotná anténa, a tímto se dosáhne přesných výsledků konceptu.

### 2.2.1 Koncept upraveného návrhu dvoupásmové antény

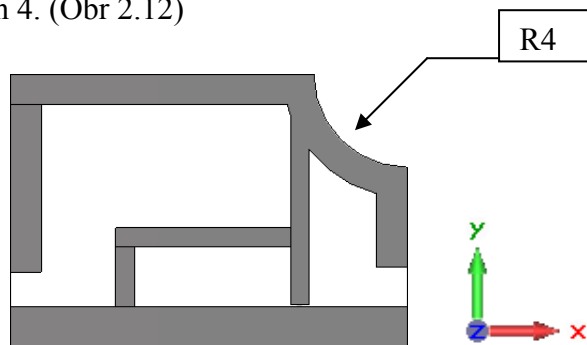
Rozměry konceptu jsou tedy podle Obr. 1.7 a bude nakreslen tak, aby bylo využito co nejvíce místa na desce substrátu, tzn. po okrajích substrátu. Myšlenka, jak bude počáteční koncept vypadat, je na Obr. 2.11.

Tentokrát tedy nebudou využity myšlenky z prvotního návrhu vytvořit rameno pro nižší pásmo 2,4 GHz, a poté se snažit pomocí změn parazitních kapacit mezi rameny vybudit vyšší pásmo. Zde bude snaha vytvořit jednoduše dvě ramena, pro každé pásmo. Bude to výhodné právě z hlediska využití místa na desce substrátu, kde je anténa umístěna.



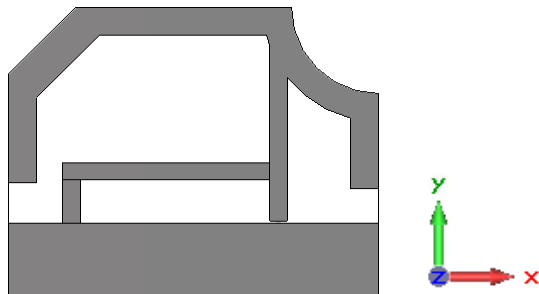
Obr. 2.11: Počáteční koncept upraveného návrhu dvoupásmové antény

Kulatý výřez z prvotního modelu, například z Obr. 2.1, zde bude vytvořen pro změnu na pravé straně a bude sloužit buďto jako místo při sešroubování plastového krytu, nebo jako místo pro vytvoření očka na poutko k celému zařízení. Rádus výřezu byl zvolen 4. (Obr 2.12)



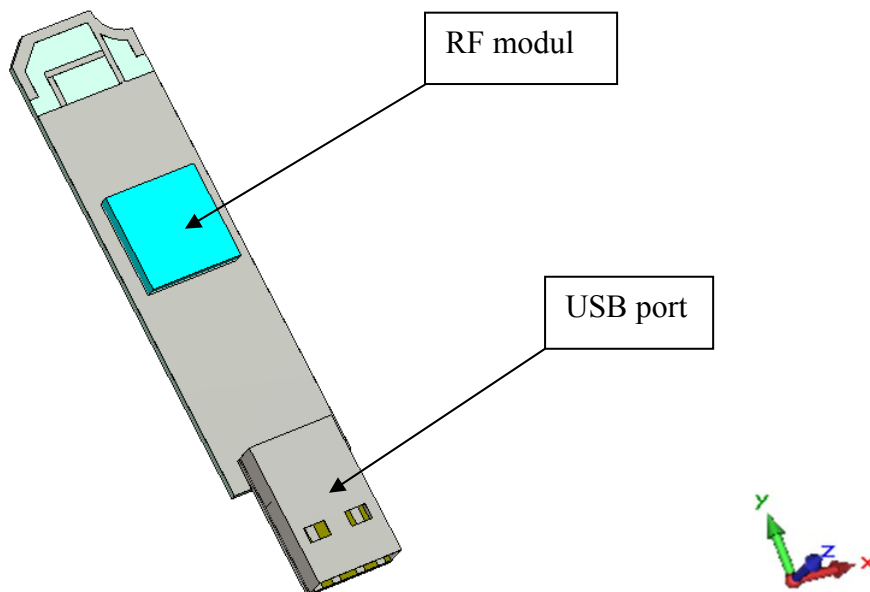
Obr. 2.12: Zobrazení výřezu v upraveném návrhu

Dále v konceptu modelu byl upraven levý horní roh, který byl zkosen (Obr. 2.13). Tím se zkrátí délka ramena pro pásmo 2,4 GHz, ale v tomto případě to nevadí, protože je ještě dostatečná rezerva pro ladění. Zkosení hrany nebylo nutné, ale vzniklo tak další místo pro případné mechanické uchycení, atd.



Obr. 2.13: Zkosená hrana upraveného konceptu

Při takto vytvořeném motivu antény je velice výhodné pro co nejpřesnější výpočty analýzy zakreslit USB port a přibližně i RF modul, aby se eliminovala případná rozladění antény při výrobě USB modulu (Obr. 2.14). Tyto části zajisté ke každému modulu patřit musí, a proto jsou zde zakresleny také. USB port je vytvořen z materiálu PEC (Perfect Electric Conductor), jak již název napovídá, je to teoretický ideální vodič, a z plastu PE s permitivitou  $\epsilon_r = 2,4$ . RF modul je zakreslen jako křemíkový kvádr s  $\epsilon_r = 11,7$ . Zvolené tvary, hlavně u RF modulu jsou přibližné, a jelikož se nenacházejí v těsné blízkosti antény, nemá smysl je modelovat přesně a ani to není vhodné, protože návrh je obecného charakteru.

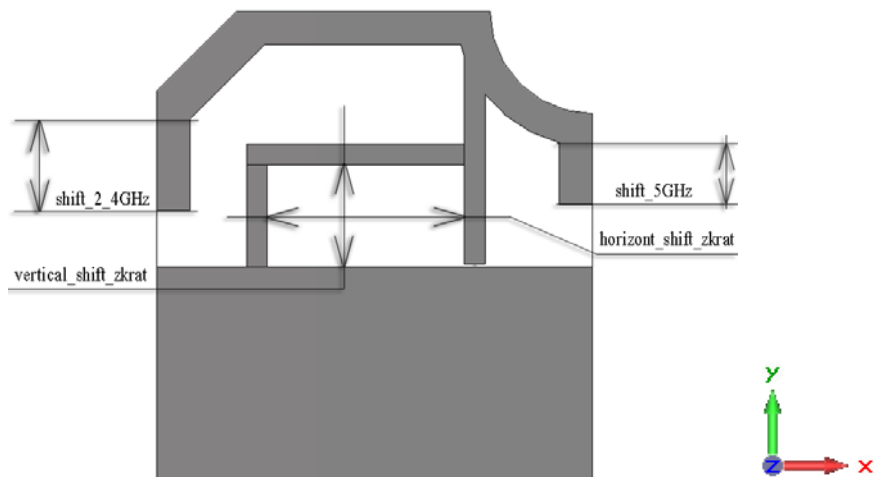


Obr. 2.14: Model se zakresleným RF modulem a USB portem

Hodnota permitivity křemíku byla převzata z [4].

Na Obr. 2.15 je zobrazen model s nastavenými parametry v CST. Tím pádem stačí pouze při ladění frekvence měnit parametr nebo využít parametrické analýzy a sledovat, jak se bude měnit frekvence s délkou ramene pro vyšší nebo pro nižší pásmo nebo ladit již zmíněné impedanční přizpůsobení. Na obrázku jsou uvedeny názvy parametrů, které

k tomuto účelu slouží a lze s nimi anténu ladit.

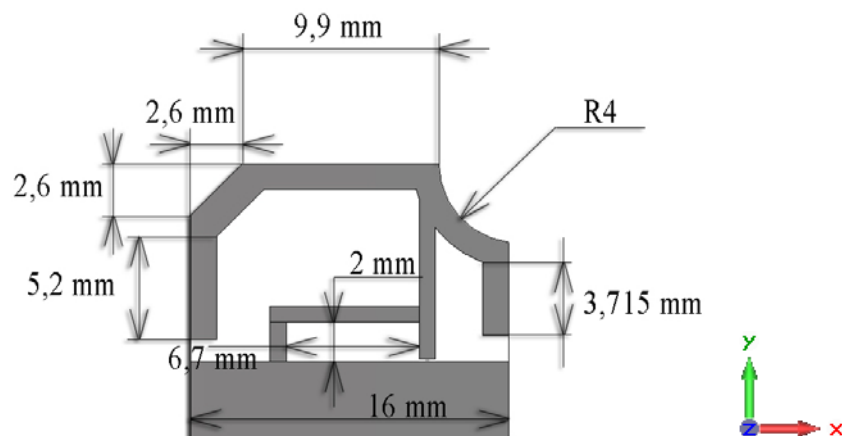


Obr. 2.15: Ladění modelu pomocí parametrických koeficientů v CST

Při ladění zvolených frekvencí nebo přizpůsobení antény v programu CST stačí ve sloupci „Parameter list“ měnit koeficienty „shift\_5GHz“ a „shift\_2\_4GHz“ jejich přepsáním na jinou hodnotu. To usnadní práci při ladění a opět umožní použití parametrické analýzy.

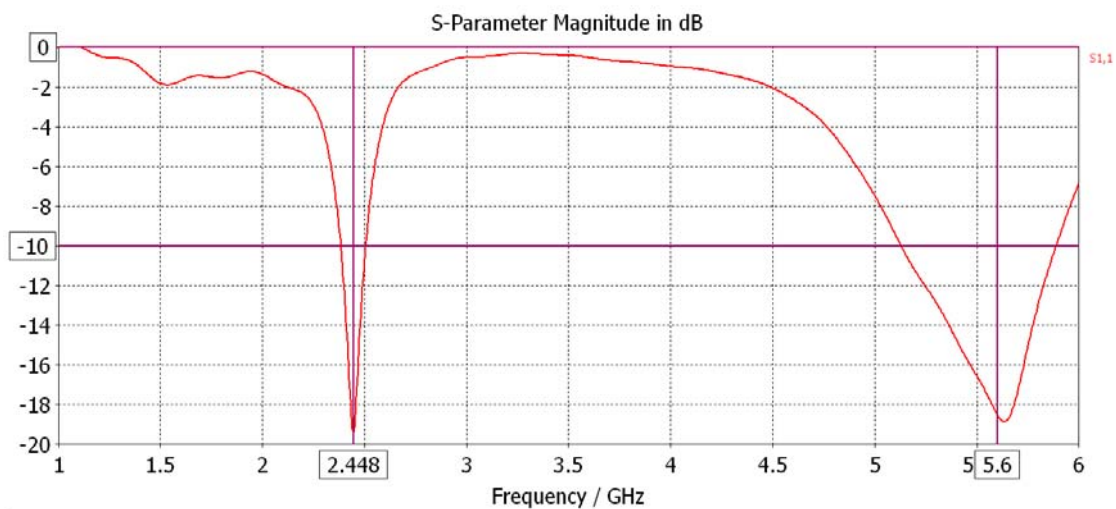
### 2.3 Výsledky simulací upraveného návrhu

Anténa byla naladěna a přizpůsobena pro požadované frekvence 2,448 GHz pro nižší a 5,6 GHz pro vyšší pásmo. Okótovaný model se všemi rozměry je na Obr 2.16

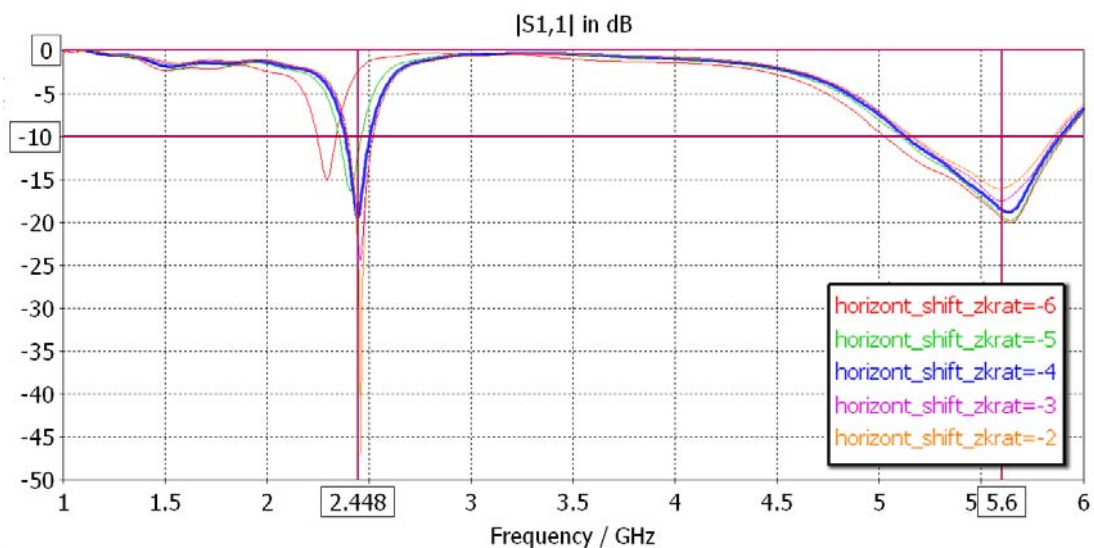


Obr. 2.16: Okótovaný model antény upraveného návrhu

Na Obr. 2.17 je graf  $S_{11}$  parametrů a je z něj patrné, že oproti původnímu návrhu je anténa více přizpůsobena a odrazy na zvolených frekvencích jsou menší. Na dalším Obr. 2.18 je parametrická analýza zkratovacího pahýlu v horizontální rovině „horizontal\_shift\_zkrat“. Jako ideální kompromis se ukázalo použít rozteč pahýlu a napájecí části (jak je zobrazeno na Obr. 2.15) 6,7 mm. V grafu parametrické analýzy je toto vyznačeno modrou křivkou s názvem „horizont\_shift\_zkrat= -4“. Parametr „horizont\_shift\_zkrat“ byl v parametrické analýze změněn vždy o 1 mm.



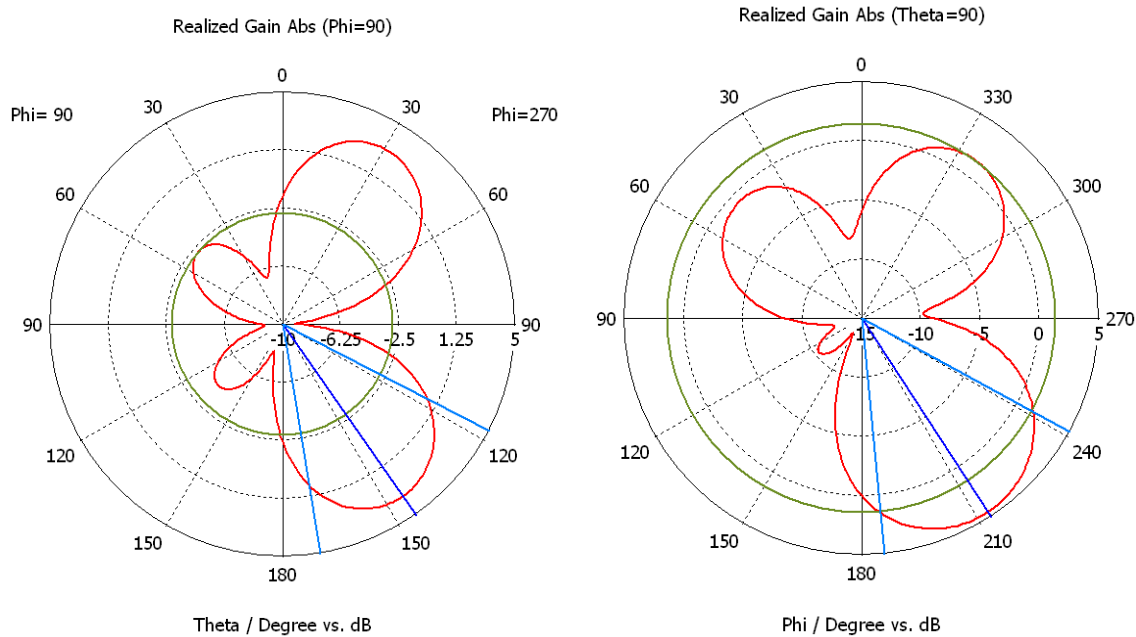
Obr. 2.17: Graf  $S_{11}$  modelu antény upraveného návrhu



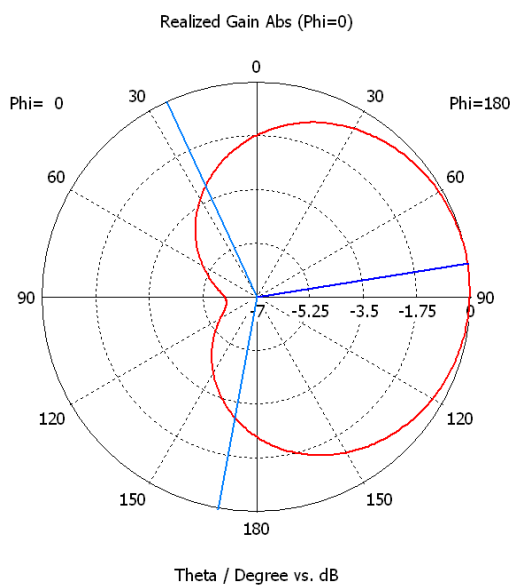
Obr. 2.18: Parametrická analýza přizpůsobovacího pahýlu v horizontální rovině

### 2.3.1 Směrové charakteristiky a zisk antény

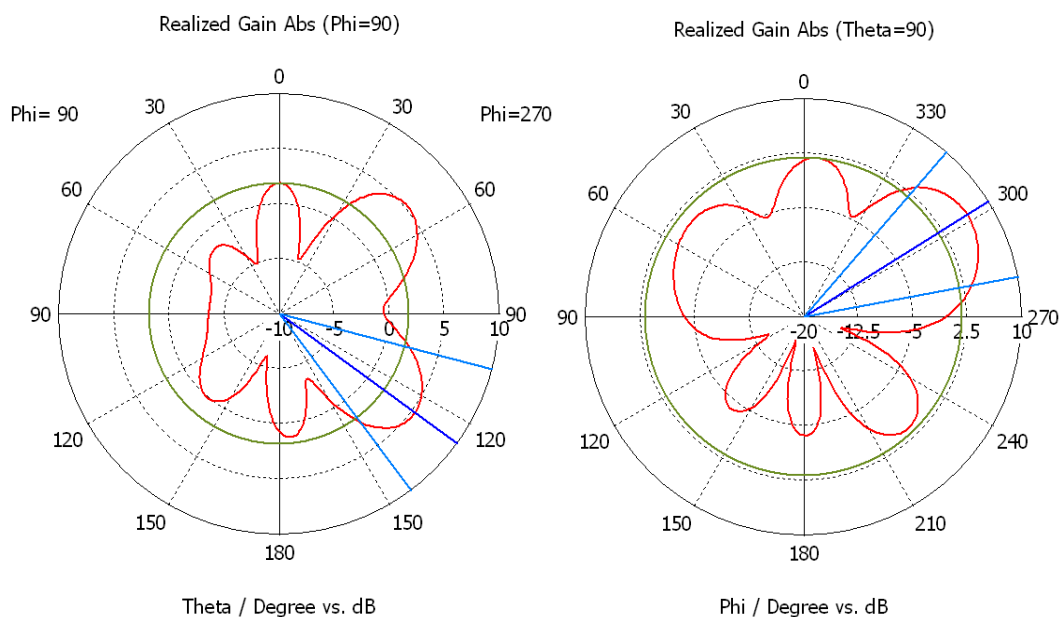
Zisk antény pro frekvenci 2,448 GHz byl spočítán v CST s hodnotou 4,474 dB a podle Obr. 2.19 je to v rovině XY – Phi (vpravo), kde této hodnotě odpovídá lalok ve směru 210 stupňů. Pro frekvenci 5,6 GHz je zisk roven 6,448 dB a je to pro rovinu XY – Phi pro lalok ve směru 300 stupňů podle Obr. 2.21 (vpravo).



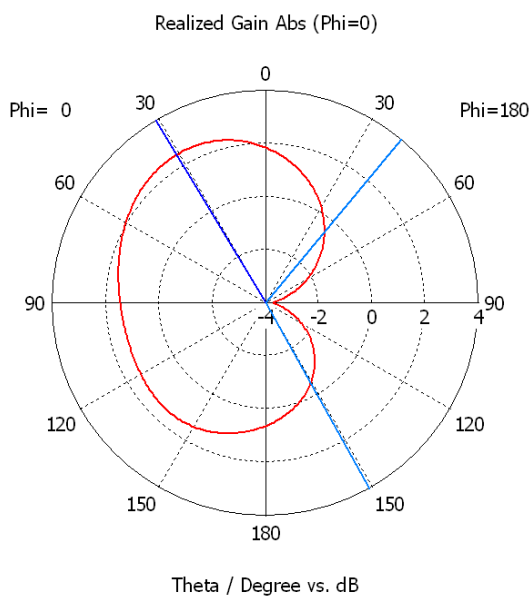
Obr. 2.19: Směrové charakteristiky pro frekvenci 2,448 GHz: Vlevo rovina YZ – Theta, vpravo rovina XY – Phi



Obr. 2.20: Směrové charakteristiky pro frekvenci 2,448 GHz: Rovina XZ - Theta



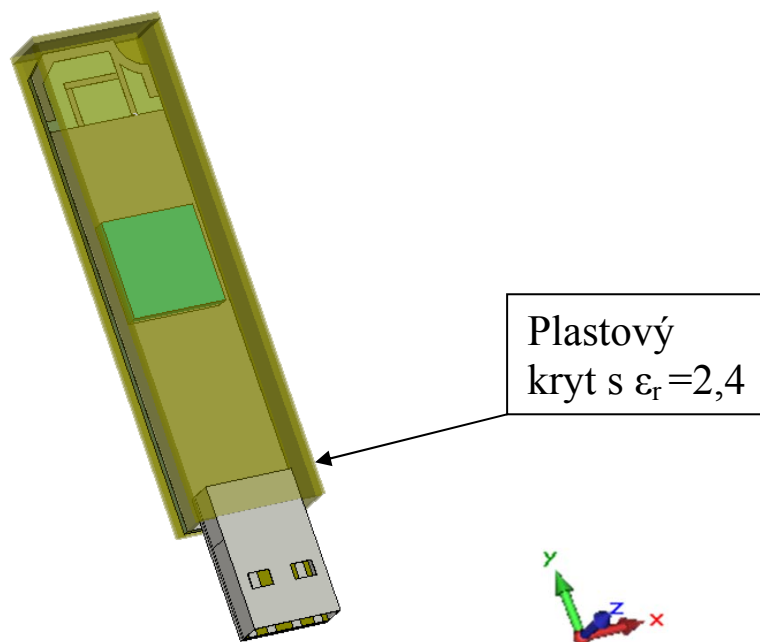
Obr. 2.21: Směrové charakteristiky pro frekvenci 5,6 GHz: Vlevo rovina YZ – Theta, vpravo rovina XY – Phi



Obr. 2.22: Směrové charakteristiky pro frekvenci 5,6 GHz: Rovina XZ – Theta

## 2.4 Plastový kryt antény

Již na začátku práce bylo zmíněno, že celý koncept antény se bude nacházet v plastovém krytu, který má svoje dielektrické vlastnosti (permitivitu  $\epsilon_r$ ). Jelikož plastový kryt bude v bezprostřední blízkosti antény, rozladí se jeho dielektrickými vlastnostmi celá anténa. Tento fakt je třeba zohlednit a v simulaci modelu zahrnout i tento kryt.



Obr. 2.23: Plastový kryt antény

Ovšem krabička, která je zde k dispozici pro vyrobenou anténu, je z plastu, u kterého není známa jeho permitivita, protože není znám ani konkrétní typ plastu. V této práci je použit materiál Polyethylen (dále jen PE), který bývá často používaným plastovým materiálem při výrobě plastových dílů k přístrojům a podle zdroje [5] má relativní permitivitu  $\epsilon_r = 2,4$  (viz. Obr. 2.23). Důležitější než to, z jakého materiálu je kryt vyroben, je jeho permitivita a tloušťka. PE je zde použit také v modelu USB portu, který je ovšem od antény poměrně daleko, a tak neovlivňuje tak zásadním způsobem rezonanční frekvenci antény, tak jako kryt, který je v bezprostřední blízkosti antény. Proto USB portu není věnována taková pozornost.

#### 2.4.1 Vliv krytu tloušťky 0,9 mm na anténu

Protože není znám materiál plastového krytu a jeho vlastnosti, bude třeba udělat obecné řešení pro určitou škálu permitivit, aby se dosáhlo představy o tom, jak různé permitivity ovlivní rozladění antény.

Předpoklad, že kryt je z materiálu PE, se bude brát v potaz pouze pro účely simulace v programu CST, protože se vždy musí zvolit nějaký typ materiálu. Nejdůležitější bude právě změna permitivity, která bude provedena parametrickou analýzou, aby se dosáhlo představy o tom, jak bude mít různá permitivita vliv na rozladění antény. Poté bude možné určit, v jakém rozmezí permitivit je možno použít materiál pro kryt.

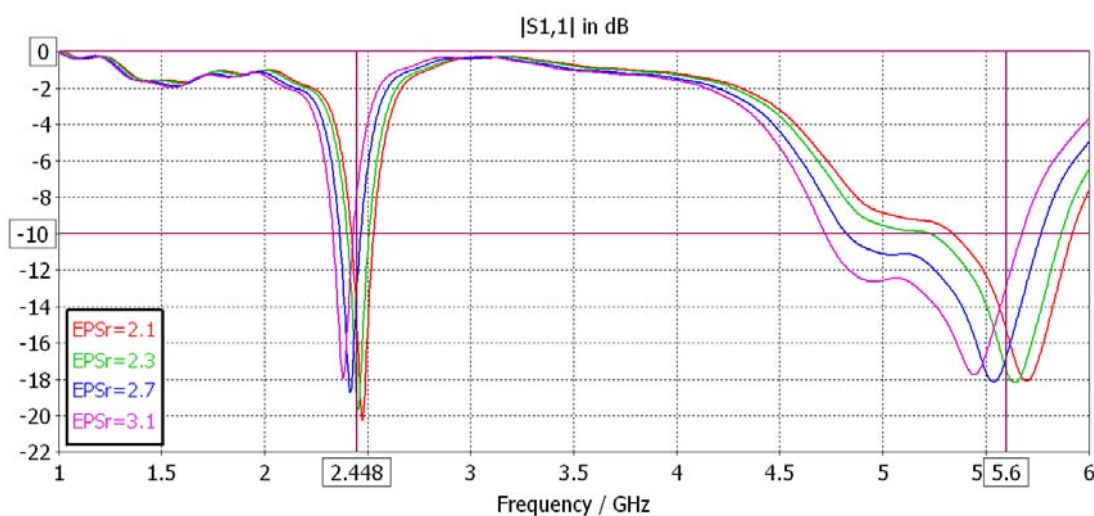


materiál	$\epsilon_r$
Polyacetal	3,6 ... 3,7
Polyamid – PA	4,0 ... 5,0
Polydichlorstyrol	2,7
Polyetereterketon – PEEK	3,2
Polyeterimid – PEI	3,0
Polyethylen – PE	2,16
Polyfenylsulfid – PPS	3,3
Polymethylmetakrylát	2,56
Polypropylen – PP	2,0 ... 2,2
Polystyrol	2,39
Polysulfon – PSU	3,0
Polytetrafluoretylen – PTFE	2,0 ... 2,1
Polyvinylacetát	2,7
Polyvinylchlorid – PVC	2,51 ... 3,10

Obr. 2.24: Přehled relativních permitivit plastových materiálů (převzato z [6])

V tabulce na Obr. 2.24 je seznam permitivit různých plastových materiálů. Dá se předpokládat, že z některého z nich je vyroben i kryt, který je k dispozici. Komerčně používané materiály například PVC, PP a již výše zmíněné PE se pohybují v rozmezí relativních permitivit asi od 2,1 do 3,1. PE z tabulky na Obr. 2.24 má hodnotu 2,16 a jelikož plasty z PE se dělí i na další poddruhy, je možné, že tuto hodnotu některé PE mají. Častější je ovšem relativní permitivita 2,4.

Jako vhodná demonstrace vlivu materiálu a tím pádem relativní permitivity na anténu, bude parametrická analýza proměnné “EPSr“ v programu CST. Tato analýza se pohybuje od relativní permitivity krytu 2,1 do 3,1.



Obr. 2.25: Vliv změny relativní permitivity krytu na naladění antény – parametrická analýza

Z Obr. 2.25 je vidět, že změna relativní permitivity od hodnoty 2,1 do hodnoty 3,1 způsobí rozladění frekvence antény, na kterou byla naladěna. Při nižší  $\epsilon_r$  se frekvence zvyšuje a naopak při zvyšování  $\epsilon_r$  frekvence klesá. Zároveň se také zhoršuje přizpůsobení antény. Může se tedy říci, že permitivita krytu má poněkud zásadní vliv na naladění a je třeba na ni brát zřetel.

V tomto případě ale jako závěr z tohoto faktu plyne, že bude velice výhodné, vzhledem k tomu, že není známa přesná hodnota permitivity, aby anténa byla navržena pro relativní permitivitu vyšší. Toto z důvodu, že zkrátit obě ramena již vyrobené antény pro dosažení vyšší rezonanční frekvence je možné díky konstrukci antény. Konkrétně by se jednalo o odškrábání části ramene a tím zvýšení rezonanční frekvence.

## Směrové charakteristiky a zisk

Tab. 1: Vliv změny relativní permitivity krytu na zisk antény

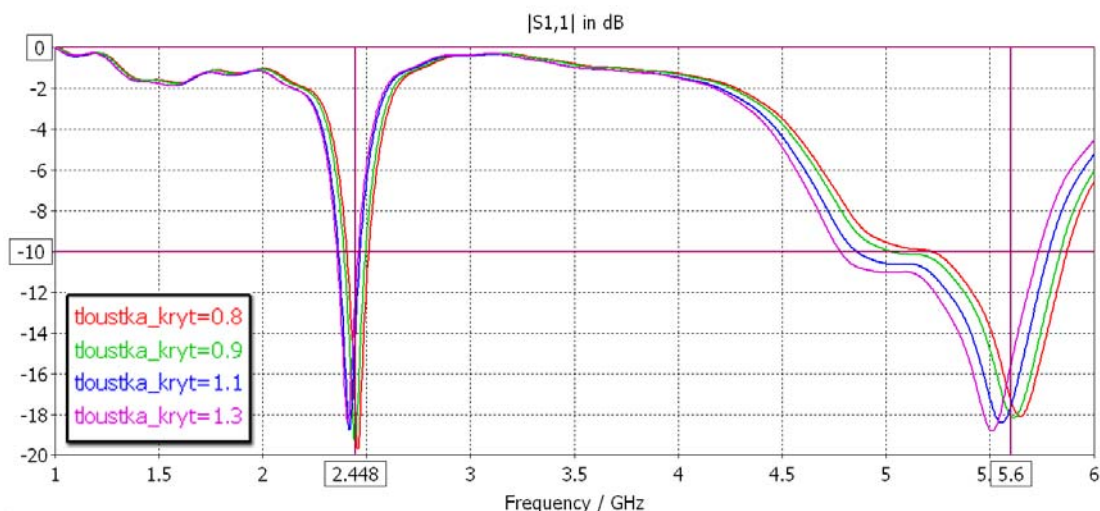
Relativní permitivita	Realized Gain [dB]	
	2,448 [GHz]	5,6 [GHz]
bez krytu	4,474	6,448
2,1	4,475	6,764
2,3	4,567	6,871
2,7	4,482	6,978
3,1	4,086	6,945

Směrové charakteristiky pro různé hodnoty relativní permitivity krytu se nijak zásadně nemění. Při vyšších hodnotách  $\epsilon_r$  pouze dochází k zúžení vyzařovacích laloků, ale úhly vyzařování zůstávají stejné.

### 2.4.2 Vliv tloušťky krytu na anténu

V tomto případě zůstane zachována relativní permitivita na konstantní hodnotě a bude se zjišťovat, jaký vliv bude mít na anténu tloušťka stěn krytu. Pro tento případ bude  $\epsilon_r = 2,4$ . Tloušťka stěn krytu se bude měnit v hodnotách 0,8 mm až 1,3 mm.

Tloušťka stěn dostupného krytu byla změřena posuvným měřítkem na hodnotu 0,9 mm. Aby se ale mohla vytvořit představa, co se stane, když nebude měření naprosto přesné, byla provedena parametrická analýza pro různou tloušťku stěn krytu (Obr. 2.26).



Obr. 2.26: Vliv změny tloušťky krytu na naladění antény – parametrická analýza

Tab. 2: Vliv změny tloušťky krytu na zisk antény

Tloušťka stěn krytu [mm]	Realized Gain [dB]	
	2,448 GHz	5,6 GHz
0,8	4,553	6,848
0,9	4,586	6,928
1,1	4,506	7,040
1,3	4,441	7,133

### 2.4.3 Zhodnocení vlivu tloušťky a relativní permitivity

Největší vliv na anténu má podle výsledků parametrické analýzy hlavně relativní permitivita krytu. Dle grafu na Obr. 2.25 je patrné, že pro  $\epsilon_r = 3,1$  už anténa nebude dostatečně vyzařovat na frekvenci vyšší jak 2,448 GHz, protože se posunula výrazněji k nižší hodnotě. U frekvence 5,6 GHz je problém obdobný.

Vliv tloušťky krytu se projevil ještě mírněji a lze tedy předpokládat, že neovlivní při nepřesném změření tloušťky stěny krytu naladění na požadovanou frekvenci v 2,4 GHz ani v 5,6 GHz pásmu.

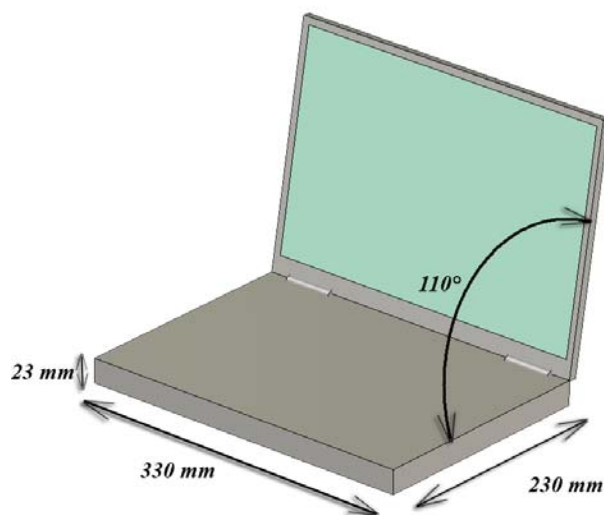
### 3 SIMULACE PŘIPOJENÍ NOTEBOOKU

Z podstaty USB modulu vyplývá, že nebude pracovat samostatně, ale bude připojen k zařízení, konkrétně k notebooku. Zohlednění plastového krytu už bylo provedeno dříve a anténa byla doladěna tak, aby s tímto krytem pracovala na potřebných frekvencích. Ovšem celý modul se bude připojovat k notebooku, který vzhledem k velikosti celého modulu a velikosti elektromagnetických vln na zvolených frekvencích může anténu ovlivňovat.

Proto je třeba model notebooku přibližně zakreslit v programu CST Microwave studio (dále jen CST MWS) a zjistit tak vliv notebooku na parametry připojené antény.

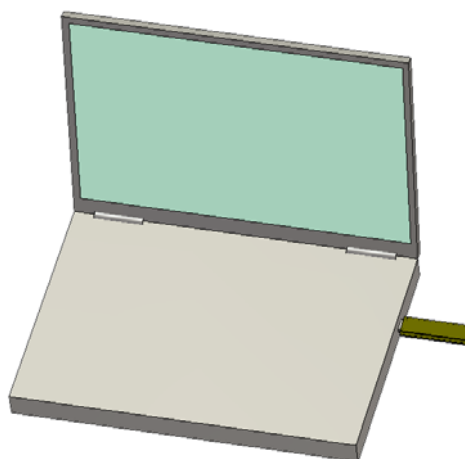
#### 3.1 Zakreslení notebooku v CST MWS

Zakreslení notebooku je přibližné. U notebooku byly zvoleny rozměry asi velikosti 14 palců. Celý notebook byl zakreslen z materiálu PEC, s otevřeným víkem (displej), pod úhlem  $110^\circ$  (viz. Obr. 3.1). Víko je stejné velikosti jako tělo notebooku a má tloušťku 8 mm. Ve víku je zakresleno i sklo (displej) o permitivitě 4,82.



Obr. 3.1: Model notebooku v CST MWS

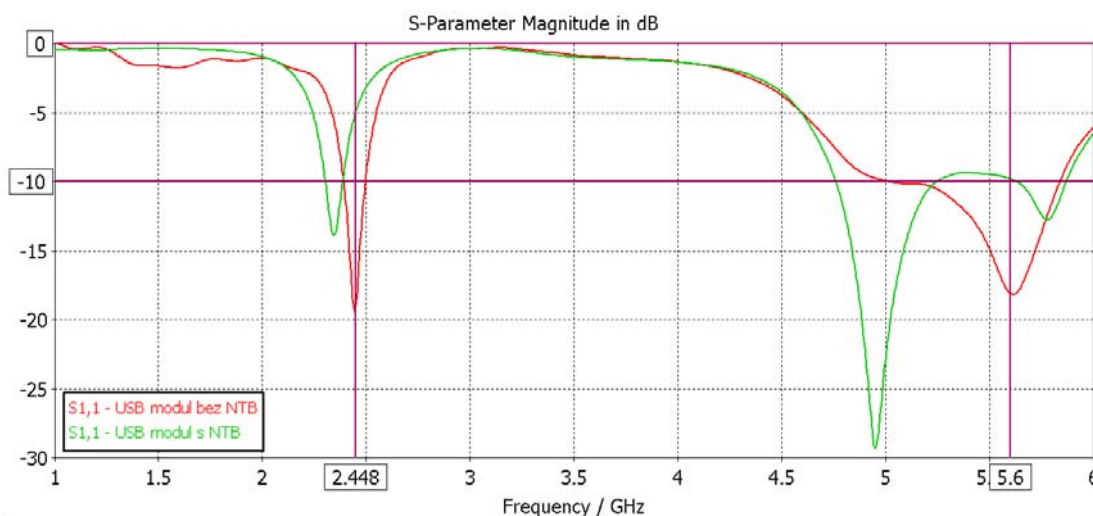
USB modul se připojí z boku přístroje, kde se standardně nacházejí USB konektory. Provede se výpočet  $S_{11}$  parametrů. Zakreslením notebooku se ale rapidně zvětší počet buněk modelu, ze kterých Transient solver určuje odezvu a doba pro výpočet se značně prodlouží. Proto je třeba zredukovat v programu počet buněk tzv. Local meshing, což znamená ruční zhuštění mřížky v místě modelu, které má největší vliv na hodnotu rezonančního kmitočtu a úrovně přizpůsobení antény.



Obr. 3.2: Znáznornění připojení USB modulu k notebooku

### 3.2 Srovnání $S_{11}$ USB modulu bez a s notebookem

USB modul je připojen k notebooku (dále jen NTB), jak je znázorněno na Obr. 3.2 z boku. Na Obr. 3.3 je zobrazen vliv NTB na parametry antény, konkrétně impedanční přizpůsobení.



Obr. 3.3: Graf  $S_{11}$  parametrů USB modulu bez a s připojeným NTB

Z grafu na Obr. 3.3 je vidět, že pro pásmo 2,4 GHz se posunula rezonance směrem k nižším kmitočtům o 100 MHz a zhoršilo se impedanční přizpůsobení o 5 dB. Pro pásmo 5,6 GHz je ovšem změna dramatičtější. Zde už se rezonanční frekvence antény posunula o 650 MHz směrem k nižším kmitočtům s ještě lepším přizpůsobením, než bylo přizpůsobení samotného USB modulu.

Avšak na požadované frekvenci 5,6 GHz se přizpůsobení zmenšilo pod hranici -10 dB, anténa by tedy nevyzařovala dostatečně a bylo by třeba provést doladění. Na vyšší frekvenci vznikla další rezonance, která je vzdálena o 180 MHz a její přizpůsobení je -12,7 dB. Z toho všeho se dá usoudit, že vlivem vlnové délky na frekvenci 5,6 GHz, která činí podle vzorce (2) zaokrouhleně 5,4 cm, se vytvořila vazba mezi NTB a USB modulem. Vazba se vytvořila díky srovnatelným anebo menším rozměrům zařízení vůči

vlnové délce, na které pracuje.

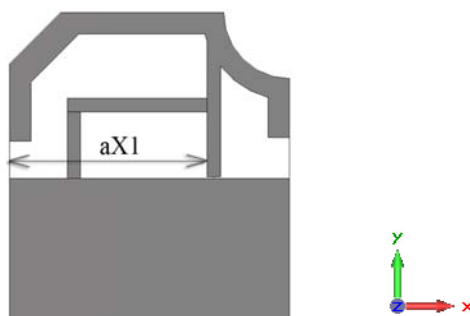
Postupným doladěním rozměrů antény se lze opět naladit na požadované frekvence s dostatečným přizpůsobením.

### 3.3 Doladění antény s připojeným NTB

#### 3.3.1 Doladění pásma 2,4 GHz

Na doladění pásma 2,4 GHz a 5 GHz bude třeba měnit délku ramena shift\_2,4GHz a shift\_5GHz (viz. kapitola 2.2.1) pomocí parametrů v modelu vytvořeném v CST MWS a tímto lze změnit frekvenci nižšího a vyššího pásma na požadovaných 2,448 GHz a 5,6 GHz. Pro zachování přizpůsobení bude zřejmě nutné měnit i přizpůsobovací zkrat.

Je možné říct, že NTB vytvořený celý z PEC materiálu je limitní případ, který ve skutečnosti nemůže nastat. Po doladění se dá tedy předpokládat, že ovlivnění skutečného USB modulu nebude tak dramatické.



Obr. 3.4: Parametr aX1 – změna napájecího ramena

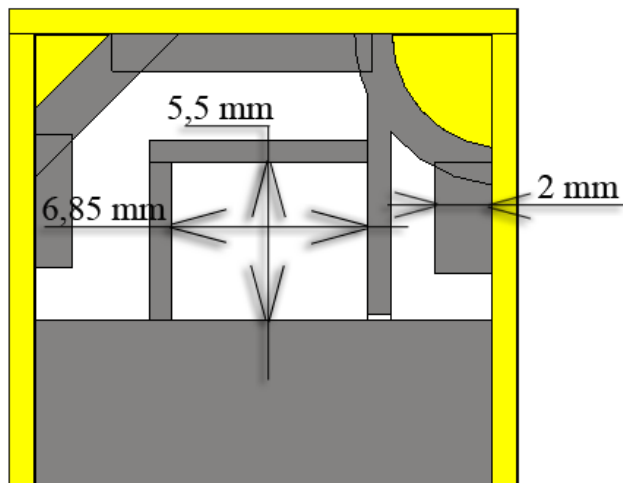
Na Obr. 3.4 je znázorněn parametr aX1, kterým lze v modelu měnit polohu napájecího přívodu v horizontálním směru, jak naznačuje kóta, a tím také docílit přizpůsobení a naladění vyššího pásma. Zbylé parametry jsou na Obr. 2.15.

V Tab. 3 je zobrazeno, jak bylo potřeba změnit parametry pro doladění na požadované frekvence.

Tab. 3: Změna nastavení parametrů antény s NTB a bez

Parametr	USB modul bez NTB [mm]	USB modul s NTB [mm]
aX1	11,5	11,65
shift_2_4GHz	4,88	4,45
shift_5GHz	3,2	3,4
vertical_shift_zkrat	5	5,5
horizont_shift_zkrat	7,5	7,65

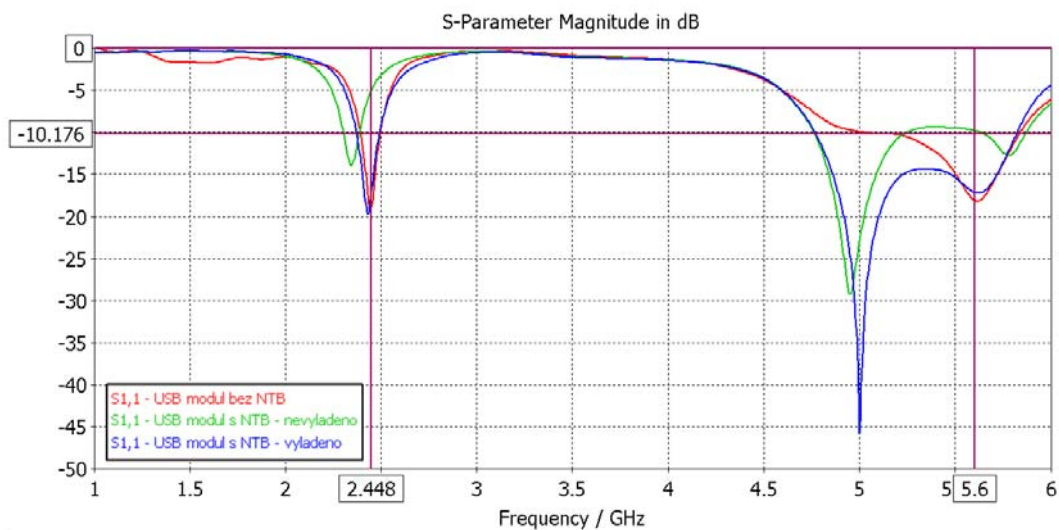
### 3.3.2 Model USB antény po doladění



Obr. 3.5: Model s upraveným přizpůsobením pro připojení NTB

Na Obr. 3.5 je model přizpůsobený k připojení NTB. Rozměry jsou změněny podle Tab. 3 a navíc je zde u ramena pro vyšší pásmo změněna šířka z 1,3 mm na 2 mm.

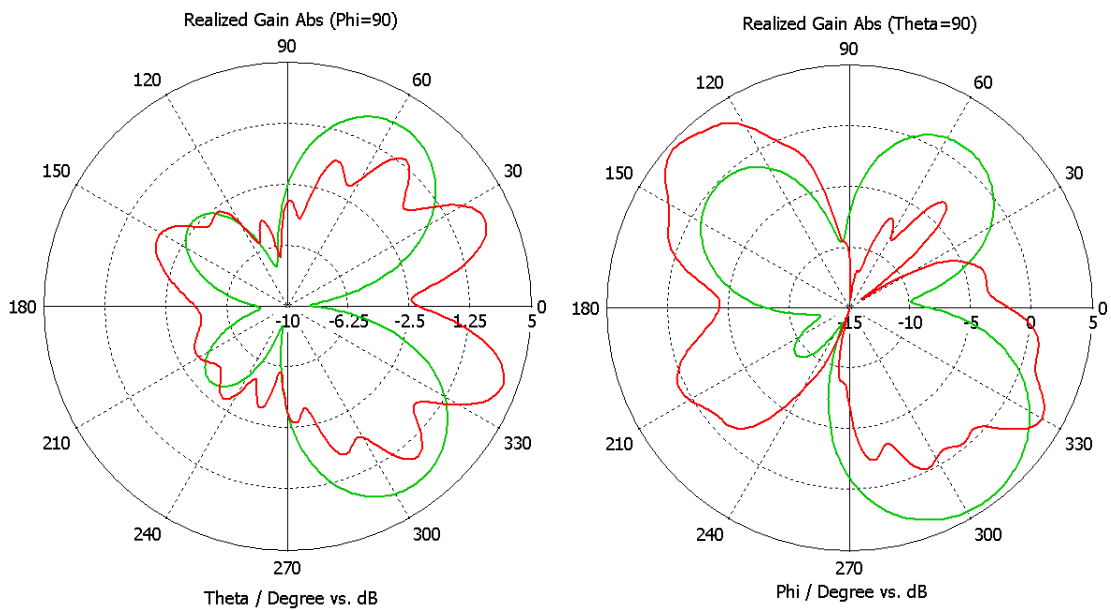
### 3.3.3 Výsledky simulace po doladění



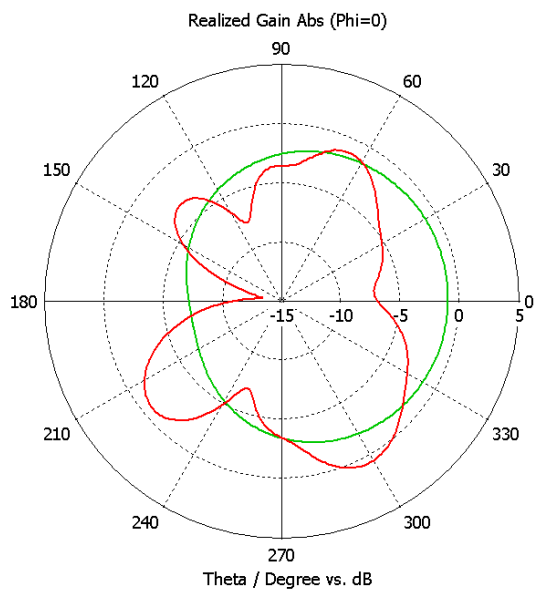
Obr. 3.6: Výsledky simulací USB modulu bez NTB a s NTB před a po vyladění

Po doladění parametrů, jak je znázorněno v Tab. 3, se přizpůsobení podařilo docílit na hodnotu -12,95 dB pro frekvenci 5,6 GHz (viz. modrá křivka).

### 3.3.4 Směrové charakteristiky a zisk antény

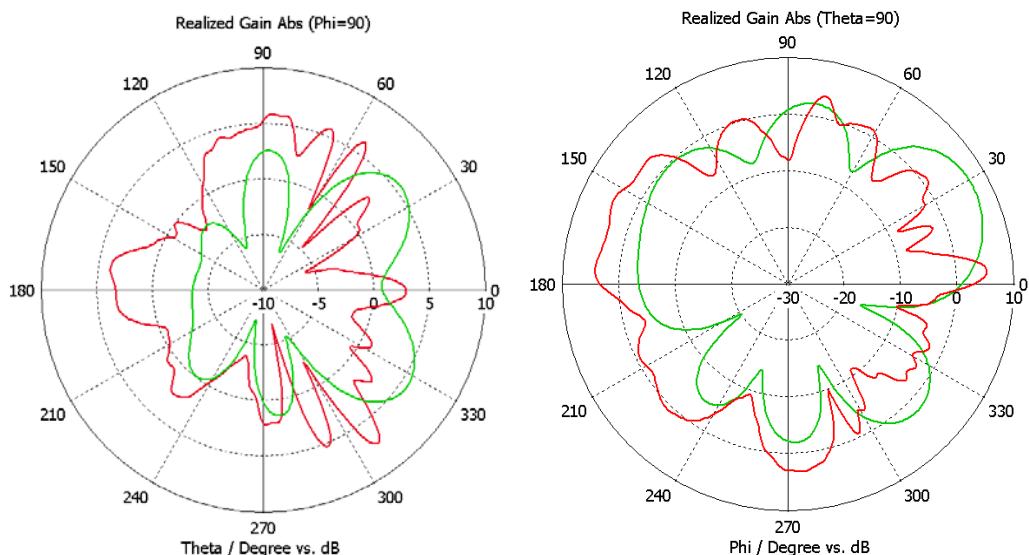


Obr. 3.7: Srovnání směrových charakteristik pro 2,448 GHz v rovině YZ (vlevo) a XY (vpravo) pro USB anténu bez NTB (zelená křivka) a s NTB (červená křivka)

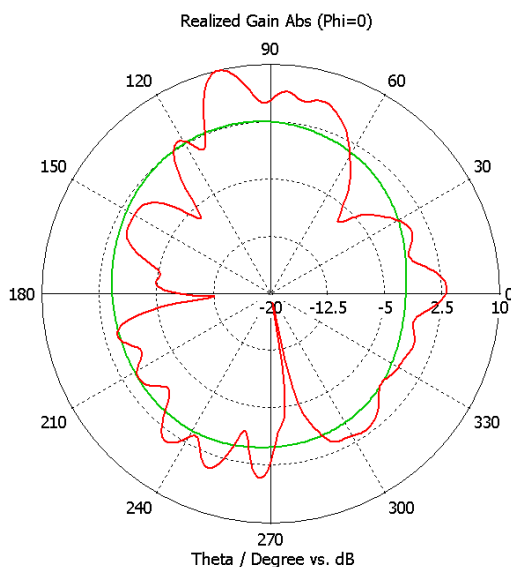


Obr. 3.8: Srovnání směrových charakteristik pro 2,448 GHz v rovině XZ pro USB anténu bez NTB (zelená křivka) a s NTB (červená křivka)





Obr. 3.9: Srovnání směrových charakteristik pro 5,6 GHz v rovině YZ (vlevo) a XY (vpravo) pro USB anténu bez NTB (zelená křivka) a s NTB (červená křivka)



Obr. 3.10: Srovnání směrových charakteristik pro 5,6 GHz v rovině XZ pro USB anténu bez NTB (zelená křivka) a s NTB (červená křivka)

Na Obr. 3.7 až 3.10 ze směrových charakteristik v polárních grafech je zřejmé, že notebook ovlivní značným způsobem vyzařování antény. Vyzařovací laloky jsou zdeformované, ale stále připomínají původní vyzařovací charakteristiku bez připojeného notebooku.

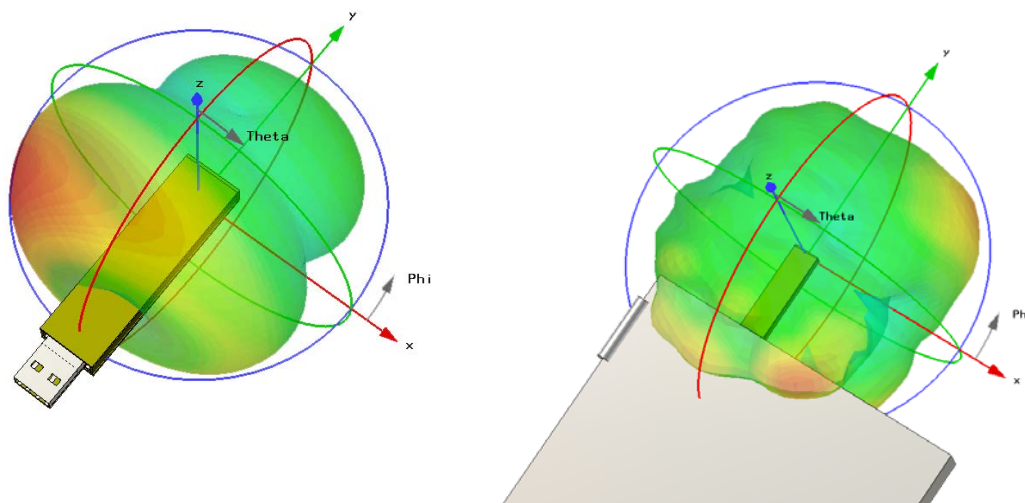
Tab. 4: Srovnání zisku antény s připojeným NTB a bez připojeného NTB

	USB modul bez NTB		USB modul s NTB	
	2,448 [GHz]	5,6 [GHz]	2,448 [GHz]	5,6 [GHz]
Zisk [dB]	4,45	6,93	6,2	9,67

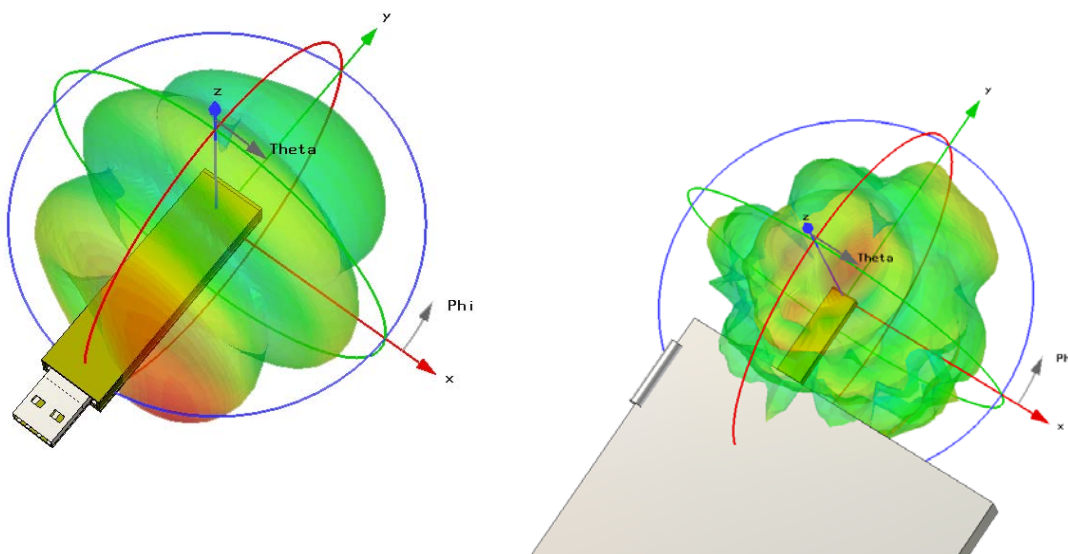
V Tab. 4 je vidět zisk antény s uvažováním nepřizpůsobení antény. Pro modul USB s NTB se po doladění zisk zlepšil oproti USB modulu bez NTB.

### 3.3.5 3D směrové charakteristiky

Znázornění směrových charakteristik v 3D prostoru kolem antény viz. Obr. 3.11 pro 2,448 GHz a Obr. 3.11 pro 5,6 GHz.

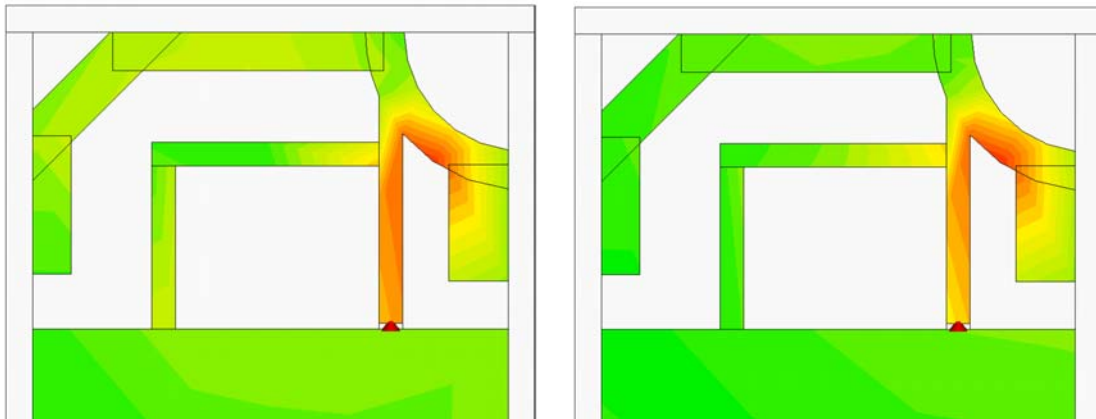


Obr. 3.11: Srovnání 3D směrových charakteristik USB modulu bez NTB (vlevo) a s NTB (vpravo) na frekvenci 2,448 GHz

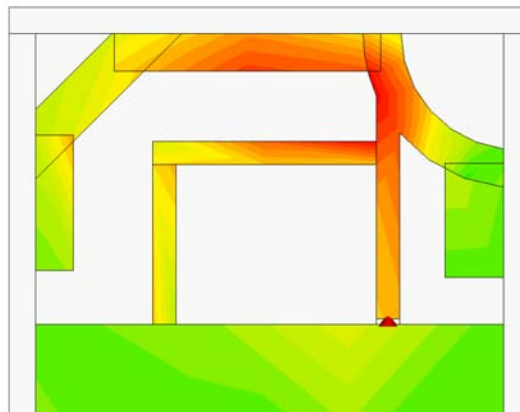


Obr. 3.12: Srovnání 3D směrových charakteristik USB modulu bez NTB (vlevo) a s NTB (vpravo) na frekvenci 5,6 GHz

### 3.3.6 Rozložení povrchových proudů



Obr. 3.13: Zobrazení povrchových proudů pro frekvenci 5 GHz (vlevo) a 5,6 GHz (vpravo)



Obr. 3.14: Zobrazení povrchového proudu pro frekvenci 2,448 GHz

Na Obr. 3.13 je vidět rozložení povrchového proudu na anténě pro vyšší pásmo, kde se, jak je zobrazeno na Obr. 3.5 v grafu, objevila rezonance na 5 GHz, která je velice výrazná. Pro názornost je proto zobrazeno rozložení proudů právě pro obě frekvence vedle sebe, aby bylo vidět, kterou částí antény prochází největší hodnota proudu na zvolené frekvenci. Ačkoliv na první pohled pro vyšší pásmo se dá říci, že mezi nimi není rozdíl, při bližším pohledu je pozorovatelné maximum proudu, na kterém se podílí více napájecí přívod. Na frekvenci 5,6 GHz již září více rameno právě pro vyšší pásmo, rozdíly ovšem jsou opravdu pozorovatelné jen při bližším pohledu.

Na Obr. 3.14 je zobrazení povrchového proudu pro frekvenci 2,448 GHz a je zde už jasně vidět, že proud se soustředí do ramena pro nižší pásmo.

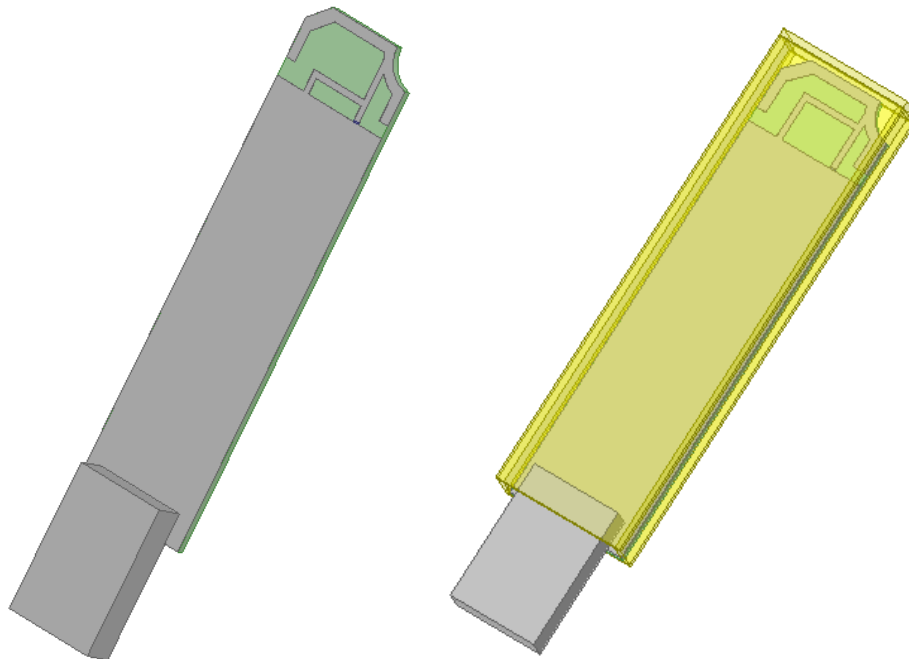
## 4 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ PROGRAMEM ANSOFT HFSS 13

Pro pasivní mikrovlnné struktury se kromě CST MWS může použít i program Ansoft HFSS, jenž dosahuje také přesných výsledků. V této práci je pro ověření výsledků výpočtu, které byly provedeny pomocí CST MWS, použit program HFSS ve verzi 13 a v něm vymodelován identický model.

Z příslušné knihovny byl pro materiál krytu zvolen „polyethylene“ s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 2,33$ . Ostatní rozměry byly zvoleny identicky podle modelu v CST MWS, stejně jako ostatní materiály. Výsledky výpočtu jsou vyneseny v grafu v Obr. 4.2 a model je znázorněn na Obr. 4.1.

Z grafu  $S_{11}$  parametrů je vidět, že dle Ansoft HFSS je odchylka ve výpočtu oproti CST MWS. Ovšem rezonance antény se pohybuje kolem žádaných kmitočtů, a jelikož každý program má odlišnou metodu výpočtu elektromagnetických struktur, daly se odchylky předpokládat.

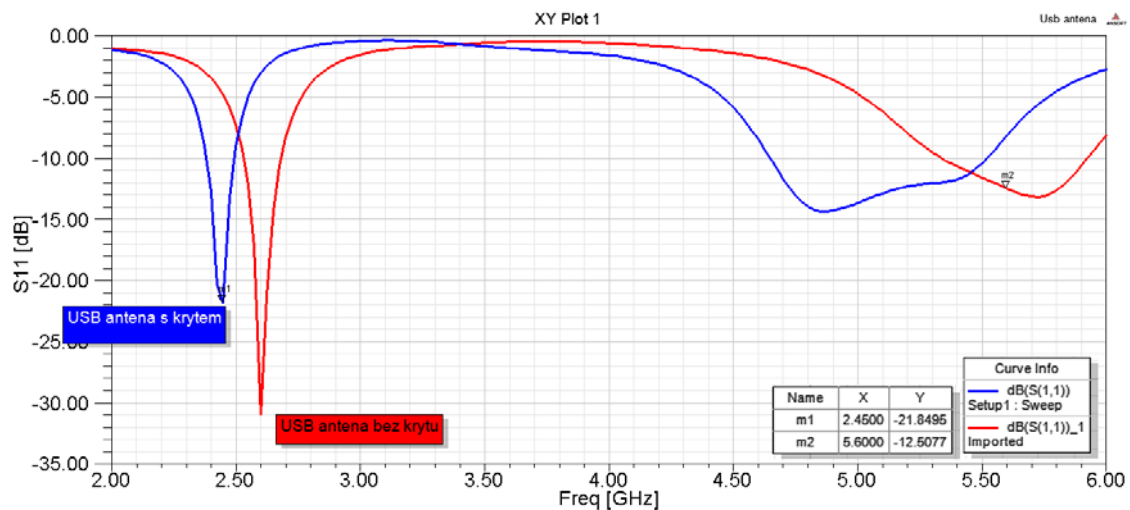
Konkrétně v grafu pro model bez krytu je vidět, že nižší rezonance je zde na kmitočtu asi o 150 MHz vyšším oproti programu CST. U pásma 5 GHz je rezonance na požadovaném kmitočtu s dostatečným přizpůsobením.



Obr. 4.1: Náhledy modelu nakresleného v Ansoft HFSS 13 (vlevo bez krytu, vpravo s krytem)

U modelu s krytem je rezonance vyššího pásma na nižším kmitočtu, ale co se týče nižšího pásma, tam je přizpůsobení i naladění optimální.

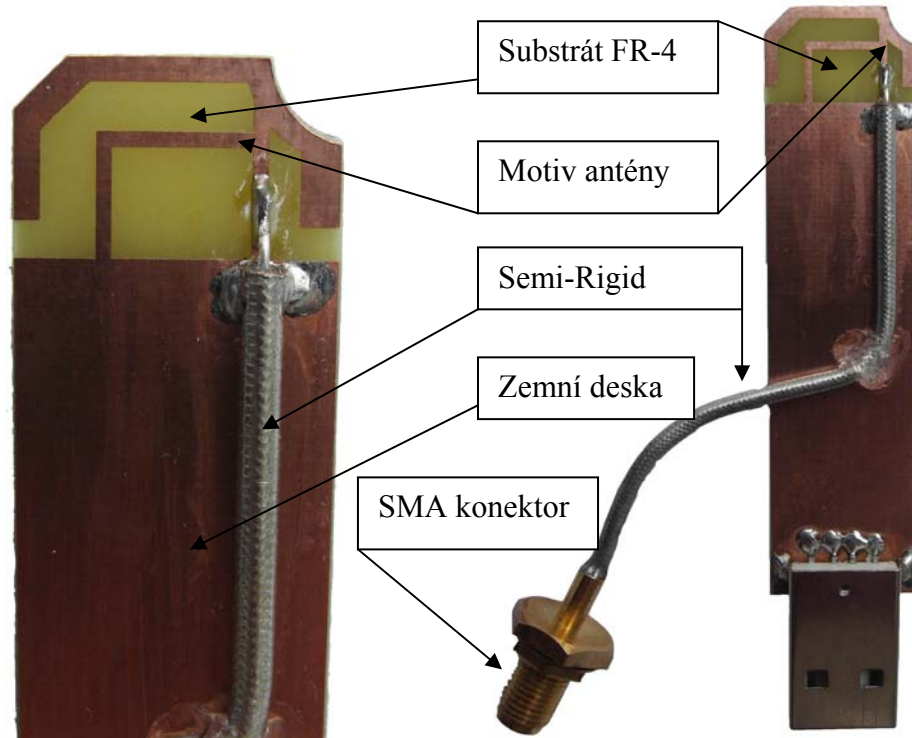
Vzhledem k výsledkům je vidět, že anténa byla navržena správně, což je potvrzeno výsledky ze dvou různých programů pro výpočet planárních mikrovlnných struktur.



Obr. 4.2: Graf  $S_{11}$  parametrů pro model bez krytu (podle Obr. 2.16) a s krytem

## 5 VYROBENÝ MODEL A MĚŘENÍ

Motiv modelu dvoupásmové antény do USB klíče byl nanesen na substrát FR-4 s relativní permitivitou 4,15 a tloušťkou 1,52 mm a je na obrázku 5.1. Takto vyrobenou anténu bylo potřeba ořezat od zbytků substrátu, aby zůstal pouze navržený model.



Obr. 5.1: Vyrobený model USB antény

Motiv je nanesen vrstvou mědi o tloušťce 0,03 mm. K napájecímu vedení je připájen střed Semi-Rigid kabelu, který je na druhém konci osazen SMA konektorem. Opletení kabelu, které slouží i jako zem, je připájeno na zemní desku celé antény. Zhruba uprostřed je kabel přilepen k zemní desce tavným lepidlem, aby se nenamáhal při měření připájený konec. Na konci zemní plochy (protější strana od antény) je napájen USB konektor (zástrčka) typu A.

Celý model antény je vsunut do plastového krytu (viz. Obr. 5.2), u kterého není známa přesná relativní permitivita. Anténa byla navržena pro standardní relativní permitivitu 2,3, a pokud by došlo při měření k zjištění, že rezonance je na jiných kmitočtech z důvodu vyšší permitivity (nižší se nepředpokládá a plastu PE), bylo by možné, podle grafu na Obr. 2.25, odškrábat motiv a tím zkrátit délku ramena a zvýšit rezonanční frekvenci.



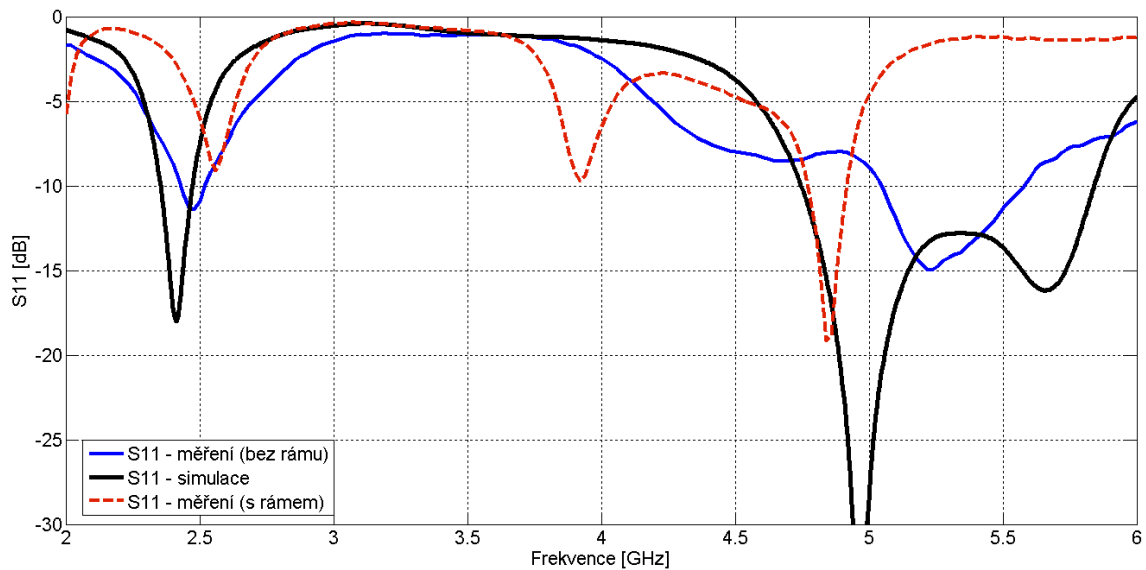
Obr. 5.2: Model antény v plastovém krytu

## 5.1 Výsledky měření $S_{11}$ na vektorovém analyzátoru

Na vektorovém obvodovém analyzátoru R&S ZLV Vector Network Analyzers s frekvenčním rozsahem 9 kHz až 6 GHz bylo provedeno měření  $S_{11}$  parametrů na anténě s plastovým krytem při připojení celého modulu k notebooku. Celé měření proběhlo na ústavu UREL elektrotechnické fakulty VUT v Brně.

Po kalibraci přístroje pro impedanci 50 ohmů bylo možné připojit USB anténu pomocí SMA konektoru Semi-Rigid kabelu k vektorovému analyzátoru pomocným úsekem vedení. Následně se připojil notebook a po nastavení rozmítání v rozmezí 2 GHz až 6 GHz a výběru zobrazení  $S_{11}$  parametrů se na displeji zobrazil průběh, který je v grafu zobrazen modrou plnou čarou. Z tohoto průběhu je vidět, že skutečné vlastnosti antény se blíží simulované anténě a celý výrobek pracuje správně. Přizpůsobení na frekvenci 2,448 GHz je pod hodnotou -10 dB, což znamená dostatečné přizpůsobení, ale celkově přizpůsobení není tak ideální jako v simulaci a posunulo se mírně k vyšším frekvencím. Na hodnotě 5,6 GHz je přizpůsobení zhruba -9.6 dB, což už není ideální, ale stále se dá tvrdit, že je výsledek blízko simulace.

Při bližším pohledu na plastový kryt (Obr. 5.2) si lze všimnout lesklého stříbrného rámu po obvodu krytu, u kterého není známo, z jakého materiálu je vyroben. Při praktickém měření na analyzátoru se výsledky podstatně lišily od simulace a anténa se nechovala podle simulace (viz. červený průběh v Obr. 5.3). Ovšem při odstranění tohoto rámu se anténa začala přibližovat k výsledkům simulace.



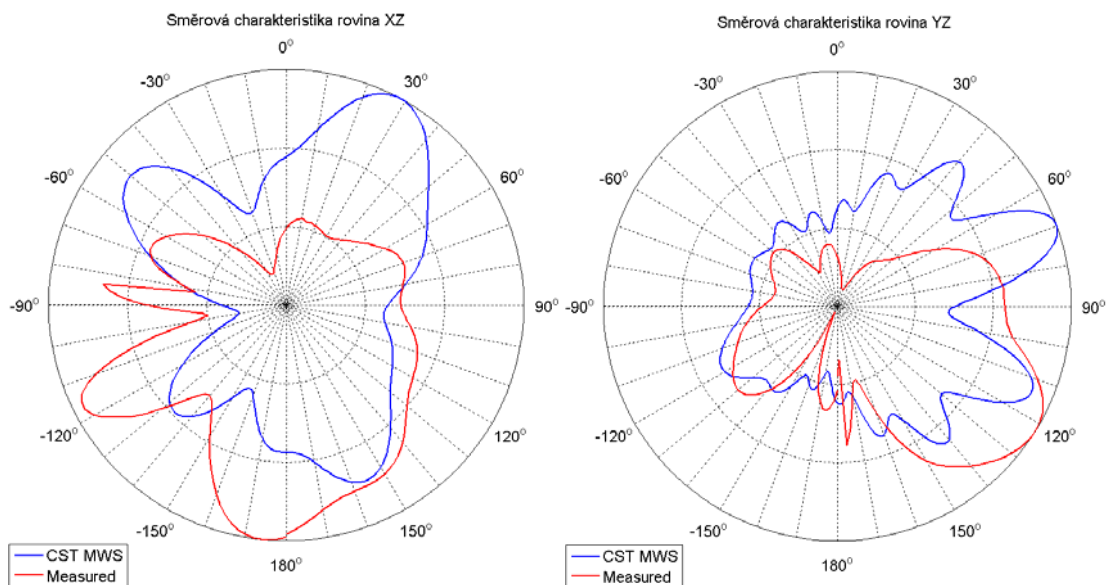
Obr. 5.3: Graf srovnání měření na vektorovém analyzátoru a simulace

Vzniklé rezonance při měření s rámem krytu mohou být způsobeny zvýšenou vodivostí tohoto rámu. Jelikož je rám blízko antény a vlnová délka je 6,5 mm, je možné vytvoření vazby mezi anténou a rámem. Rezonance totiž jsou, jak je vidět z grafu, dokonce tři a to právě způsobují tyto vazby.

Graf na Obr. 5.3 byl vytvořen v programu Matlab z naměřených hodnot vektorového analyzátoru při měření antény s rámem a bez rámu a hodnot ze simulace v CST MWS, vše s připojeným notebookem.

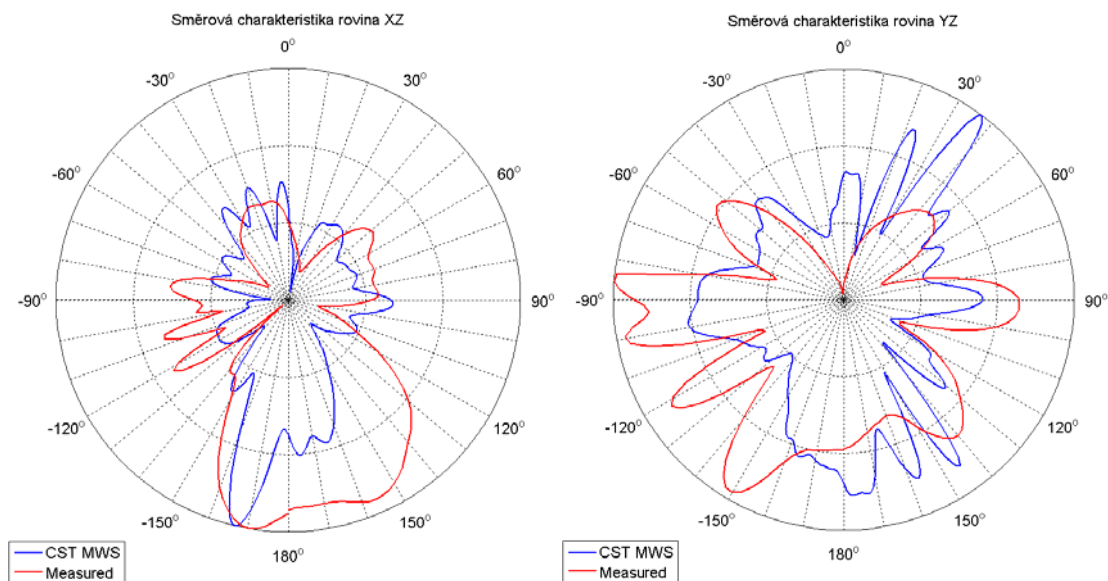
## 5.2 Měření směrových charakteristik

Směrové charakteristiky byly měřeny na ústavu UREL fakulty elektrotechniky VUT v Brně v bezodrazové komoře. Směrové charakteristiky jsou na Obr. 5.4 a 5.5.



Obr. 5.4: Směrové charakteristiky pro 2,448 GHz





Obr. 5.5: Směrové charakteristiky pro 5,6 GHz

Měřená anténa byla umístěna na točném, která zajistí otáčení od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ . Napájena byla z generátoru požadovanou frekvencí a pomocí přijímací trychtýřové antény připojené k vektorovému obvodovému analyzátoru se měří úroveň vyzařování. Bezodrazová komora zajistí utlumení elektromagnetických vln vyzářených anténou do okolí mimo přijímací anténu.

Měření z technických důvodů proběhlo pro roviny XZ a YZ, nikoliv už pro rovinu XY. Z polárních grafů vyplývá, že směrové charakteristiky změřené se od simulovaných liší. Vzhledem k faktu, že všechny podmínky měření se nedají uskutečnit přesně podle simulace, daly se odchylky předpokládat. Rozdíly ale nejsou příliš velké a charakteristiky se podobají simulovaným výsledkům.

## 6 ZÁVĚR

V první části návrhu se nepodařilo navrhnutý model doladit na potřebnou frekvenci 5,6 GHz při rozložení ramen antény, jako je například na Obr 2.1. Poté bylo výhodné vzhledem k rozměrům motivu zmenšit rozměry celého modelu, aby byla využita co nejvíce plocha s naneseným motivem antény a také přepracován výřez, který se původně nacházel v levém rohu a slouží pro možnost případného mechanického připevnění nebo jako místo pro vytvoření poutka v krytu. Dále bylo vytvořeno zkosení levé horní hrany pro případ dalšího mechanického upevnění.

Jako další byl přepracován motiv antény, jak je naznačeno na Obr. 2.11. Tímto způsobem bylo velice efektivně využito místo, kde se anténa nachází, a také se podařilo anténu naladit na frekvenci 5,6 GHz. Tím pádem byly obě pásma naladěny pro požadované frekvence a bylo možné anténu přizpůsobit na impedanci  $50 \Omega$ .

Dále bylo výhodné do simulace zahrnout i plastový kryt celé antény, aby byly výsledky co nejvíce přesné. Pro dostupný plastový kryt pro praktické měření směrových charakteristik ale nebyla známa jeho relativní permitivita, a tak byla provedena parametrická analýza pro objasnění chování antény právě při různé hodnotě permitivity. Nakonec byla zohledněna tloušťka krytu pro zjištění chování antény i v tomto případě, když by nebyla tloušťka změřena přesně.

Protože bude celý modul připojen k zařízení (nejčastěji notebooku), je výhodné, aby v simulacích byl notebook zahrnut. Výsledky s připojeným notebookem se ukázaly jako zásadní, protože anténa se značně rozladila a bylo nutné provést doladění, které bylo úspěšné. Směrové charakteristiky se výrazně změnily (rozštěpily).

Celý model byl nakreslen v programu Ansoft HFSS pro ověření výsledků. Vzhledem k odlišnostem metod výpočtu elektromagnetických struktur obou programů se daly předpokládat odchylky. Ale celkový výsledek potvrzuje správnost výsledků.

U vyrobeného modelu byly změřeny vektorovým analyzátozem  $S_{11}$  parametry a v jednom grafu je srovnání, ze kterého je patrné že vyrobený model se dostatečně shoduje se simulací. Problémy způsobil u plastového krytu stříbrný rám, který byl nakonec odstraněn. Směrové charakteristiky byly změřeny na ústavu UREL fakulty VUT v Brně a výsledky srovnány se simulací.

Výsledná navržená dvoupásmová anténa pro USB modul má uspokojivé výsledky, které se přibližují simulacím vytvořeným v programu CST Microwave studio.

# LITERATURA

- [1] Wi-Fi / WLAN channels, frequencies and bandwidths: Resources and analysis for electronics engineers. Radio-electronics.com [online]. [cit. 2011-10-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/80211-channels-number-frequencies-bandwidth.php>>
- [2] DANĚK, J., Anténa pro univerzální vysílač. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010/2011.
- [3] RAIDA, Z., Multimediální učebnice elektromagnetických vln a mikrovlnné techniky [online] Dostupné z WWW: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=4-6-B>>
- [4] Converter.cz: Relativní permitivita. www.converter.cz [online]. [cit. 2011-11-2]. Dostupné z WWW: <[www.converter.cz/tabulky/relativni-permitivita.htm](http://www.converter.cz/tabulky/relativni-permitivita.htm)>
- [5] *VM plast* [online]. [cit. 2011-11-5]. Dostupné z WWW: <[www.vmplast.cz/Polyethylen-PE-500-PE-HMW.php?s=50](http://www.vmplast.cz/Polyethylen-PE-500-PE-HMW.php?s=50)>
- [6] Tabulka permitivit [online]. c2001-2011 [cit. 2011-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.dinel.cz/uploads/pdf/100831100313-relativni-permitivity.pdf>>
- [7] CST MICROWAVE STUDIO. Workflow & overview. c1998-2010

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

<i>USB</i>	Universal Serial Bus, datová sběrnice PC
<i>IFA</i>	Inverted F antenna, anténa typu obrácené F
<i>Wi-Fi</i>	Wireless fidelity, označení se používá pro bezdrátový přenos dat
<i>OFDM</i>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing, ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením je širokopásmová modulace, která využívá kmitočtové dělení kanálu
<i>DSSS</i>	Direct Sequence Spread Spektrum, technika přímého rozprostřeného spektra
<i><math>f_{střed}</math></i>	Střední frekvence
$\lambda_v$	Vlnová délka zadané frekvence
$\lambda_0$	Vlnová délka rychlosti světla
<i>c</i>	Rychlost světla
<i>f</i>	Frekvence
$\epsilon_r$	Relativní permitivita
<i><math>l_m</math></i>	Délka ramene antény
<i>dB</i>	Decibely
<i><math>S_{1,1}</math></i>	Rozptylové parametry
<i>PEC</i>	Perfekt Electric Conductor
<i>RF modul</i>	Rádiový modul
<i>PE</i>	PolyEthylen
<i>MIMO</i>	Multiple-input and multiple-output, zařízení pracující s technologií MIMO využívající více vysílacích a přijímacích antén k dosažení lepších parametrů, především zvýšení dosahu a zmenšení chybovosti.