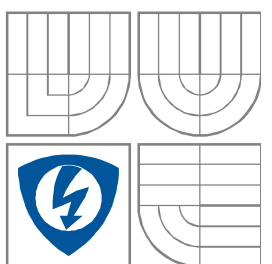


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANTÉNA PRO MIKROVLNNÝ MAJÁK V PÁSMU X THE ANTENNA FOR X-BAND BEACON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE BOŘIVOJ ZAMAZAL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE prof. Ing. MIROSLAV KASAL, CSc.
SUPERVISOR

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bořivoj Zamazal

ID: 134665

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Anténa pro mikrovlnný maják v pásmu X

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte studii antény pro pásmo X (10 GHz), která bude v horizontální rovině zářit všemi směry, zatímco ve vertikální rovině bude mít vyzařovací diagram úzký. Chování vybraných typů antén simulujte v prostředí HFSS nebo CST.

Navrhněte konstrukci vybrané antény a realizujte ji. Proměňte její parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, A. C. Antenna Theory: Analysis and Design, 2/E. New York: J. Wiley & Sons, 1996.

[2] WATERHOUSE, R., B. Microstrip Patch Antennas. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Kasal, CSc.

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

V této bakalářské práci je popsán návrh antény pro mikrovlnný maják v pásmu 10GHz. V první části jsou předložena možná řešení a je zvolena slotová anténa konstruovaná z komerčně dostupného vlnovodu. V druhé části je popsán princip tohoto typu antény a jsou vypočteny rozměry pro zvolenou frekvenci a typ vlnovodu. V třetí části je na základě teoreticky vypočítaných rozměrů vytvořen a odsimulován model v prostředí Ansoft HFSS a na základě těchto simulací je anténa realizována ve dvou možných verzích.

KLÍČOVÁ SLOVA

Slotová anténa, pásmo X, anténa pro mikrovlnný maják, simulace v HFSS.

ABSTRACT

This bachelor's thesis describes an antenna design for microwave beacon in 10 GHz band. In the first section of the work, the possible solutions are presented and a slot antenna, constructed from commercially available waveguide, is chosen. In the second section, the principle of this antenna is described and the dimensions for the chosen frequency and the type of waveguide are calculated. In the third section, the antenna model is built and simulated in the Ansoft HFSS environment in accordance with theoretically calculated dimensions and, based on these simulations, two possible versions of antenna are created.

KEYWORDS

Slot antenna, X band, antenna for microwave beacon, 10GHz, HFSS simulation.

ZAMAZAL, B. *Anténa pro mikrovlnný maják v pásmu X*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 53 s., 4 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. ing. Miroslav Kasal, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Anténa pro mikrovlnný maják v pásmu X 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. května 2013

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Miroslavu Kasalovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 27. května 2013

.....
podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Volba vhodného řešení	2
1.1 Výběr vhodného typu antény	2
1.2 Vlastnosti slotové antény	2
2 Teoretický rozbor	4
2.1 Vlastnosti antén.....	4
2.1.1 Zisk	4
2.1.2 Směrovost	4
2.1.3 Činitel přizpůsobení.....	4
2.2 Dutý kovový vlnovod	5
2.3 Buzení obdélníkového vlnovodu	8
2.4 Princip slotové antény.....	9
2.5 Slot na vlnovodu	10
3 Návrh slotové antény	12
3.1 Shrnutí teoretických poznatků používaných při návrhu	12
3.2 Výpočet rozměrů.....	13
4 Model v prostředí Ansoft HFSS	15
4.1 Ansoft HFSS	15
4.2 Simulace vlnovodu	15
4.3 Simulace navržené slotové antény	17
4.3.1 Ověření teoretických rozměrů antény (anténa s vlnovodnou přírubou)	17
4.3.2 Přechodka SMA – vlnovod.....	19
4.3.3 Anténa s SMA konektorem.....	21
4.3.4 Anténa s SMA konektorem a zvětšenou zemní rovinou.....	23
4.3.5 Anténa s malou a velkou zemní rovinou za použití PML analýzy	26

4.3.6	Srovnání s komerční anténou dle DB6NT	29
5	Realizace antény a její reálné parametry	32
5.1	Realizace antény	32
5.1.1	Anténa	32
5.1.2	Rozšířená zemní rovina	34
5.2	Parametry realizované antény	36
6	Závěr	40
	Literatura	41
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	42
	Seznam příloh	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Slotová anténa.....	3
Obr. 2.1:	Kovový vlnovod obdélníkového průřezu [2].....	5
Obr. 2.2:	Rozložení siločar dominantního vidu TE_{10} ve vlnovodu [6]	7
Obr. 2.3:	Optimální umístění proudové sondy pro buzení vidu TE_{10} v obdélníkovém vlnovodu [2].....	8
Obr. 2.4:	Slot na nekonečně velké vodivé desce napájený koaxiálním vedením.....	9
Obr. 2.5:	Dualita slotu a dipólu	10
Obr. 2.6:	Vertikální slot.....	10
Obr. 3.1:	Základní technické parametry obdélníkových vlnovodů řady R dle IEC 153 [2]	13
Obr. 4.1:	Rozložení elektrického pole ve vlnovodu při vidu TE_{10}	16
Obr. 4.2:	Vyzařovací diagram otevřeného konce vlnovodu.....	16
Obr. 4.3:	Navržená slotová anténa	17
Obr. 4.4:	Zisk antény - rovina XY	18
Obr. 4.5:	Zisk antény - rovina XZ.....	18
Obr. 4.6:	Zisk antény - rovina YZ.....	19
Obr. 4.7	Přechodka SMA - vlnovod.....	20
Obr. 4.8:	Průchozí útlum přechodky SMA - vlnovod	21
Obr. 4.9:	Anténa s SMA konektorem.....	21
Obr. 4.10:	Zisk antény s SMA konektorem - rovina XY	22
Obr. 4.11:	Zisk antény s SMA konektorem - rovina XZ.....	22
Obr. 4.12:	Zisk antény s SMA konektorem - rovina YZ.....	23
Obr. 4.13:	Anténa s SMA konektorem a zvětšenou zemní plochou	24
Obr. 4.14:	Zisk antény s SMA konektorem a zvětšenou zemní plochou - rovina XY ..	24
Obr. 4.15:	Zisk antény s SMA konektorem a zvětšenou zemní plochou - rovina XZ ..	25
Obr. 4.16:	Zisk antény s SMA konektorem a zvětšenou zemní plochou - rovina YZ ..	25
Obr. 4.17:	Zisk antény s SMA konektorem za použití PML - rovina XY	26
Obr. 4.18:	Zisk antény s SMA konektorem za použití PML - rovina XZ.....	27
Obr. 4.19:	Zisk antény s SMA konektorem za použití PML - rovina YZ.....	27
Obr. 4.20:	Zisk antény s SMA konektorem, zvětšenou zemní plochou a s PML - rovina XY	28

Obr. 4.21: Zisk antény s SMA konektorem, zvětšenou zemní plochou a s PML - rovina XZ	28
Obr. 4.22: Zisk antény s SMA konektorem, zvětšenou zemní plochou a s PML - rovina YZ	29
Obr. 4.23: Anténa dle DB6NT [12].....	30
Obr. 4.24: Zisk antény dle DB6NT – rovina XY	30
Obr. 4.25: Zisk antény dle DB6NT - rovina XZ	31
Obr. 4.26: Zisk antény dle DB6NT - rovina YZ	31
Obr. 5.1: Vyrobená anténa	32
Obr. 5.2: Ladicí pístek včetně aretačních šroubů a ladicího mechanismu	33
Obr. 5.3: Konektor s napájecí sondou	33
Obr. 5.4: Detail konstrukce přídavné zemní roviny	34
Obr. 5.5: Hotové dva díly přídavné zemní roviny.....	35
Obr. 5.6: Zkompletovaná anténa s přídavnou zemní rovinou	35
Obr. 5.7: Měření zisku antény	36
Obr. 5.8: Činitel odrazu antény s malou zemní rovinou	37
Obr. 5.9: Činitel odrazu antény s rozšířenou zemní rovinou	37
Obr. 5.10: Zisk antény s malou zemní rovinou - horizontální rovina	38
Obr. 5.11: Zisk antény s rozšířenou zemní rovinou - horizontální rovina	38
Obr. 5.12: Zisk antény s malou zemní rovinou - vertikální rovina	39
Obr. 5.13: Zisk antény s rozšířenou zemní rovinou -vertikální rovina	39

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Shrnutí vypočtených rozměrů antény	14
--	----

ÚVOD

Tento dokument předkládá návrh všesměrové antény pro mikrovlnný maják v pásmu 10GHz. Je zde popsána teorie potřebná pro pochopení principu, vlastní výpočet rozměrů antény, její simulace v prostředí Ansoft HFSS a následná realizace.

Text je členěn do 6 základních kapitol. Kapitola 1 krátce diskutuje možná řešení a je zde představeno vybrané řešení. Samotná teorie potřebná pro návrh tohoto typu antény je shrnuta v kapitole 2. Kapitola 3 předkládá již samotný teoretický návrh antény. Její následné simulace a úpravy jsou popsány v kapitole 4. Kapitola 5 se zabývá vlastní realizací a následným měřením. Poslední kapitola shrnuje dosažené výsledky této bakalářské práce.

1 VOLBA VHODNÉHO ŘEŠENÍ

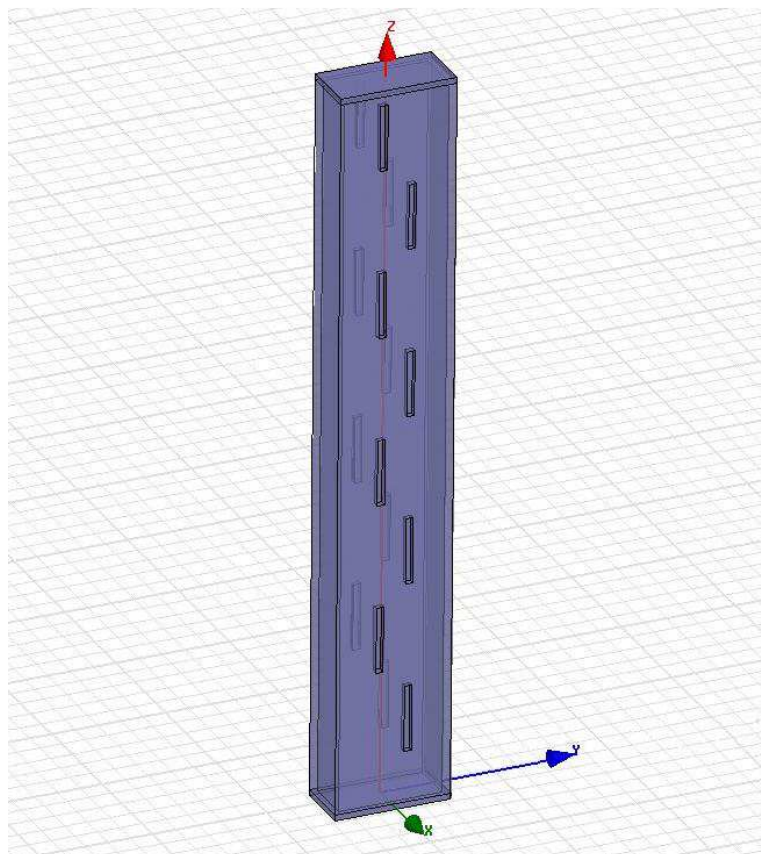
V této kapitole je popsán výběr vhodného řešení zadané antény.

1.1 Výběr vhodného typu antény

Dle požadovaného zadání byly v literatuře vyhledány jednotlivé druhy antén vhodné pro použití v mikrovlnných pásmech. Nalezeno bylo několik běžně známých řešení, a to hornová, slotová a patch anténa. Všechny tyto antény jsou všeobecně známé a jejich vlastnosti mnohokrát ověřené. Hornová a patch anténa se vyznačují svou směrovostí, a jsou tedy pro náš účel nevhodné. Konstrukce by musela být složena z několika takovýchto antén, které by musely být vhodně prostorově uspořádány, fázovány, nemluvě o složitosti mechanické konstrukce. Naproti tomu slotová anténa je díky své horizontální polarizaci a všesměrové vyzařovací charakteristice okolo azimutu pro naše účely vhodná.

1.2 Vlastnosti slotové antény

Slotová vlnovodná anténa (obr. 1.1) se nejčastěji používá jako všesměrová, a to v oblasti mikrovlnných pásem. Byla vynalezena roku 1943 na McGill University v Montrealu. Její zajímavou vlastností je horizontální polarizace a všesměrová vyzařovací charakteristika okolo azimutu. Anténa je nejčastěji vyrobena z komerčně dostupného kovového vlnovodu prostým profrézováním či propilováním štěrbin do jeho pláště. Pro dosažení horizontální polarizace jsou osy jednotlivých štěrbin rovnoběžné s podélnou osou vlnovodu. Nejčastěji je tento typ antén konstruován na obdélníkovém vlnovodu. Konstrukce na válcovém vlnovodu je možná, je ale nutné najít maximum elektrického pole. [1]



Obr. 1.1: Slotová anténa

Výhody:

- Velká mechanická odolnost
- Snadná reprodukovatelnost
- Možnost vysokého výkonového zatížení (řádově stovky kW až jednotky MW) [2]
- Velmi malý průchozí útlum
- Zisk a šířka hlavního laloku se dají měnit změnou počtu slotů

Nevýhody:

- Jedná se o rezonanční anténu, z čehož vyplývá, že s přihlédnutím ke způsobu konstrukce se takřka nedá přeladovat
- Z důvodů rozměrů je oblast využití pouze v pásmu mikrovln

2 TEORETICKÝ ROZBOR

V této kapitole je rozebrána teorie potřebná pro konstruování slotových antén napájených vlnovodem.

2.1 Vlastnosti antén

Anténa je definována jako zařízení sloužící k přijímání a vysílání rádiových signálů. Kvalita antény je dána ziskem. Z hlediska kmitočtu se dělí zásadně na dlouhovlnné, středovlnné a krátkovlnné. Podle účelu se rozeznávají např. radiolokační, letadlové, mobilní, rozhlasové, televizní či zaměřovací. [3]

V následujících podkapitolách budou krátce shrnuty nejdůležitější parametry antény.

2.1.1 Zisk

Zisk je pro antény do 30 MHz definován součinem směrovosti a účinnosti antény. Pro vyšší frekvence se většinou účinnost blíží jedné, a proto je u nich zisk pouze absolutní nebo relativní hodnota činitele směrovosti D_{\max} v decibelech. Výkonový zisk je poměr výkonu vyzářeného měřenou anténou a výkonu antény referenční při stejném výkonu vysílače. Jako referenční anténa se používá dipól nebo izotropní zářič. [4]

2.1.2 Směrovost

Směrovost antény je vlastnost přijímat signály s různým ziskem z různých směrů. Pokud je v jednom směru zisk velký a v ostatních minimální, lze mluvit o anténě směrové. Pokud je zisk přibližně stejný ve všech směrech (přibližně kruhová charakteristika), pak se jedná o anténu všesměrovou. Od této veličiny se odvíjí poměr směrovosti, což je veličina, která udává poměr výkonu vyzářeného referenční anténou ku výkonu měřené antény, a to zpravidla ve směru největšího zisku měřené antény.

2.1.3 Činitel přizpůsobení

Je definován jako podíl napětí odražené vlny ku napětí vlny přímé. Závisí na vlnové délce, polarizaci a úhlu dopadu. [3] Ideálně je anténa přizpůsobena, jestliže se její impedance Z_k , kterou zatěžuje vedení, rovná charakteristické impedanci právě tohoto vedení. Tento stav je ideální a v praxi se mu lze pouze velmi přiblížit. Kvalita přizpůsobení se vyjadřuje pomocí PSV (poměr stojatého vlnění)

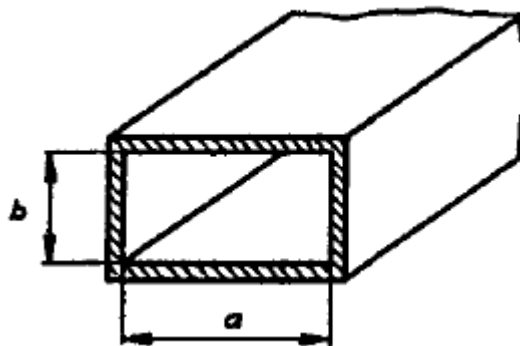
$$PSV = \frac{1+\varrho}{1-\varrho} \quad , \quad (2.1)$$

kde ϱ je činitel odrazu. Ideální je, aby se $PSV = 1$, pak se zpět k vysílači nevrací žádná odražená energie a vše je vyzářeno anténou. [4]

2.2 Dutý kovový vlnovod

Konstrukčně se jedná o trubici z vhodného kovového materiálu. Mechanicky se vyrábějí lisováním a tažením za studena pro vyšší pevnost a odolnost. Jako materiál se nejčastěji používá mosaz pro své výborné mechanické a elektrické vlastnosti. Vnitřní rozměry vlnovodu jsou přesně kalibrovány a dále je jejich vodivost zvyšována stříbřením a rhodiováním (pro zvýšení mechanické odolnosti povrchu). [2]

Vlnovodů existuje více typů provedení. Pro účely této práce bude použit obdélníkový vlnovod (obr. 2.1), a proto i teoretický popis bude vztážen k tomuto typu vlnovodu.



Obr. 2.1: Kovový vlnovod obdélníkového průřezu [2]

Ideálním dutým kovovým vlnovodem se signály šíří s minimálním útlumem (desetiny až setiny dB/m), je-li šířící se signál v pásmu propustnosti vlnovodu. Toto nastává při splnění nerovnosti

$$f > f_m , \quad (2.2)$$

případně

$$\lambda < \lambda_m , \quad (2.3)$$

kde f a λ jsou frekvence a vlnová délka signálu a f_m a λ_m jsou mezní frekvence a mezní vlnová délka daného vlnovodu. Pokud tato nerovnost splněna není, pak je signál v pásmu nepropustnosti a je intenzivně tlumen. [2]

Fázová rychlost v_f je rychlost vlny ve vlnovodu, kterou se pohybují místa konstantní fáze v jeho podélném směru

$$v_f = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}} , \quad (2.4)$$

kde $v = 1/(\epsilon\mu)^{1/2}$ je rychlost rovinné elektromagnetické vlny v neomezeném prostoru s parametry ϵ a μ . Pro vzduchové dielektrikum platí $v = c$, kde $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. [2]

Skupinová rychlost v_{sk} vlny je rychlost pohybu míst konstantní fáze modulační obálky v podélném směru vlnovodu a zároveň i rychlost přenosu energie vlnovodem.

Vypočítá se pomocí vztahu

$$v_{sk} = v \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2} = v \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}, \quad (2.5)$$

Jelikož je v pásmu propustnosti $f > f_m$ ($\lambda < \lambda_m$), vychází z rovnice (2.4) $v_f > v$ a z rovnice (2.5) $v_{sk} < v$, což pro vzduchové dielektrikum znamená, že $v_f > c$ a $v_{sk} < c$. Z důvodu závislosti fázové a skupinové rychlosti na frekvenci signálu je dutý kovový vlnovod disperzním vedením. [2]

Délka vlny ve vlnovodu λ_g je jiná než délka vlny λ ve volném prostoru. Délka vlny ve vlnovodu se vypočítá

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}}, \quad (2.6)$$

nebo po úpravě

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_m}\right)^2}}, \quad (2.7)$$

kde λ je délka vlny ve vakuu. [5] Tu lze vypočítat z frekvence podle

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.8)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu ($c=3 \cdot 10^8$ m/s).

Celkové elektromagnetické pole v dutém kovovém vlnovodu lze vyjádřit z Maxwellových rovnic jako superpozici dvou typů vln, a sice transverzálně magnetické vlny (TM) a transverzálně elektrické vlny (TE). Tyto vlny mohou v dutém kovovém vlnovodu existovat nezávisle na sobě a mohou být i nezávisle buzeny. [2]

Charakteristická impedance (Z_{OTM} a Z_{OTE}) je podíl komplexních amplitud příčných složek elektrického a magnetického pole ve vlnovodu. V pásmu propustnosti je ryze reálná a v pásmu nepropustnosti je ryze imaginární. [2]

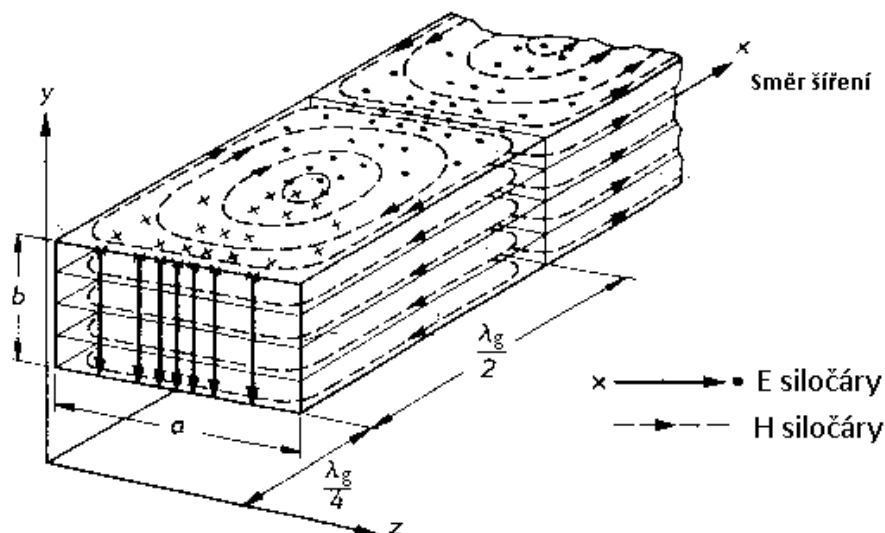
Ve vlnovodu obdélníkového průřezu může existovat nekonečné množství různých vln TM a TE. Tyto vlny označujeme jako vidy. Každý vid je charakterizován tzv. vidovými čísly m a n , což jsou celá nezáporná čísla. Pro vlnu TM musejí být obě nenulová, pro vlnu TE může být jedno z nich nulové. Vidy se zakázanými číselnými kombinacemi nemohou vzniknout, protože nesplňují okrajové podmínky na vodivém plášti vlnovodu. Každý vid má různou f_m a λ_m , což je dáno

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (2.9)$$

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}}, \quad (2.10)$$

kde m a n jsou vidová čísla, a a b jsou příčné rozměry vlnovodu (a je širší rozměr). Na základě toho, že má každý vid různou mezní vlnovou délku a frekvenci, má i různou v_f , v_{sk} , Z_0 , λ_g , přenáší různý činný výkon, mají různé uspořádání pole ve vlnovodu a jsou tlumeny různým měrným útlumem. [2]

Pro použití vlnovodu nás zajímá tzv. dominantní vid. Tento vid se vyznačuje nejnižší f_m (nejdelší λ_m) a potřebuje pro své šíření nejmenší příčné rozměry vlnovodu. Pro obdélníkové vlnovody je dominantní vid TE_{10} (obr. 2.2), s $\lambda_m = 2 \cdot a$ (platí pro řadu vlnovodů „R“, a je širší rozměr vlnovodu). Druhý vyšší vid je TE_{20} , jehož $\lambda_m = a$. Další vidy pro tuto práci nejsou podstatné, jejich čísla a mezní vlnové délky lze vypočítat podle (2.9) nebo (2.10). [2]



Obr. 2.2: Rozložení siločar dominantního vidu TE_{10} ve vlnovodu [6]

Vlnovod je nutno provozovat v režimu jednovidovosti, jinak by byl výstupní signál silně zkreslen. Signál musí splňovat podmínku

$$\lambda_m^{TE20} < \lambda < \lambda_m^{TE10} \quad , \quad (2.11)$$

čili

$$a < \lambda < 2a \quad , \quad (2.12)$$

v praxi se používá spíše $1,1 \cdot a < \lambda < 1,6 \cdot a$. [2]

Pro použití vlnovodu je omezujícím faktorem kromě jeho f_m i maximální přenášený činný výkon. Ten je pro impulsní režim omezen hlavně průraznou pevností dielektrika (nejčastěji vzduchu)

$$P_{max}^{TE10} = \frac{ab}{4} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot E_{max}^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad , \quad (2.13)$$

kde E_{max} je maximální intenzita elektrického pole vidu TE_{10} ve vlnovodu. Z (obr. 2.2) je zřejmé, že maximální hodnoty dosahuje intenzita elektrického pole v polovině strany a obdélníkového průřezu vlnovodu. Budeme-li uvažovat suchý vzduch ($E_{max} = 30$ kV/cm), pak ze vzorce (2.13) jasně vyplývá, že zatížitelnost vlnovodu je stovky kW až jednotky MW. Pro kontinuální režim je nejvíce omezující podmínkou především oteplení stěn vlnovodu

$$P_{max} = 5,4 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\Delta T \cdot l_{obv}}{\alpha} \quad [\text{kW}] \quad , \quad (2.14)$$

kde ΔT [$^{\circ}\text{C}$] je přípustné oteplení vlnovodu, l_{obv} je vnější obvod průřezu vlnovodu a α [dB/m] je měrný útlum vlnovodu vlivem ztrát v nedokonale vodivých stěnách. Vypočítá se

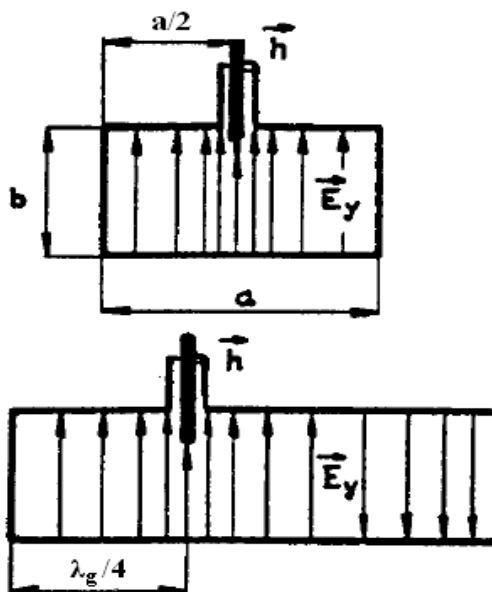
$$\alpha_{TE_{10}} = \frac{R_s}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}} \cdot \frac{\frac{1}{b} + \frac{2}{a} \cdot \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}}, \quad (2.15)$$

kde R_s je povrchový odpor vnitřních stěn vlnovodu. [2]

2.3 Buzení obdélníkového vlnovodu

Budit vlnovod lze třemi možnými způsoby. Proudovou sondou, magnetickou smyčkou a vazebním otvorem. Pro naše účely se nejčastěji používá proudová sonda. Ostatní možnosti se typicky používají pro buzení dutinových rezonátorů a jiných aplikací, a proto v této práci již dále zmiňovány nebudou.

Vlnovodná vedení (např. navrhovaná anténa) jsou běžně buzena právě proudovou sondou, což je úsek lineárního vodiče (typicky střed koaxiálního vedení či konektoru), který zasahuje do vnitřní části dutiny vlnovodu. Sonda musí být umístěna rovnoběžně se siločarami elektrického pole v místě jeho maximální intenzity. [2] Z této podmínky vyplývá prostorové rozmístění pro dominantní vid dle (obr. 2.3).



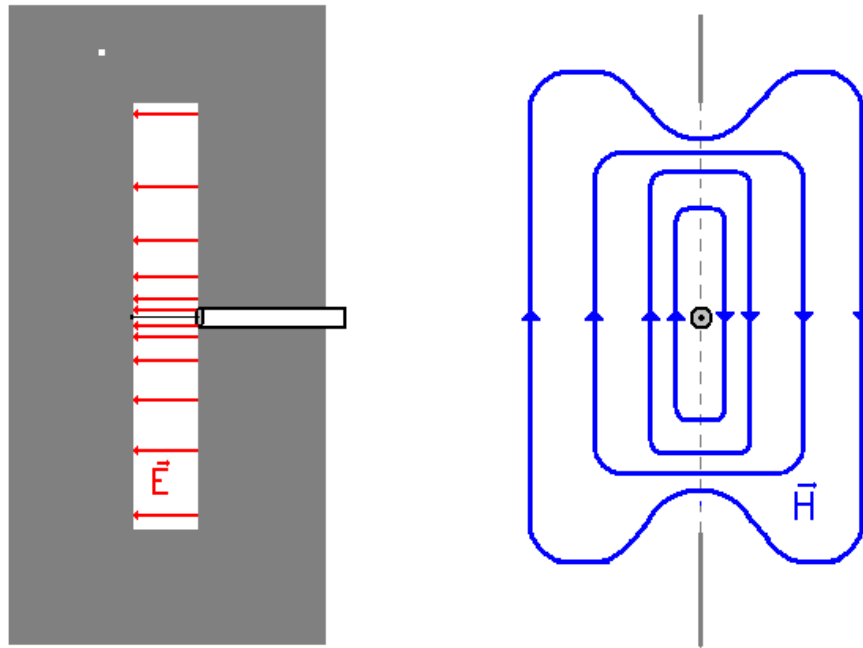
Obr. 2.3: Optimální umístění proudové sondy pro buzení vidu TE_{10} v obdélníkovém vlnovodu [2]

Hloubkou zasunutí sondy se dá částečně kontrolovat velikost buzení. Její délka je mnohem menší než λ_g .

Navrhovaná anténa může být opatřena tímto typem buzení, nebo pouze otevřeným koncem a přírubou pro montáž na další vlnovodný systém. [2]

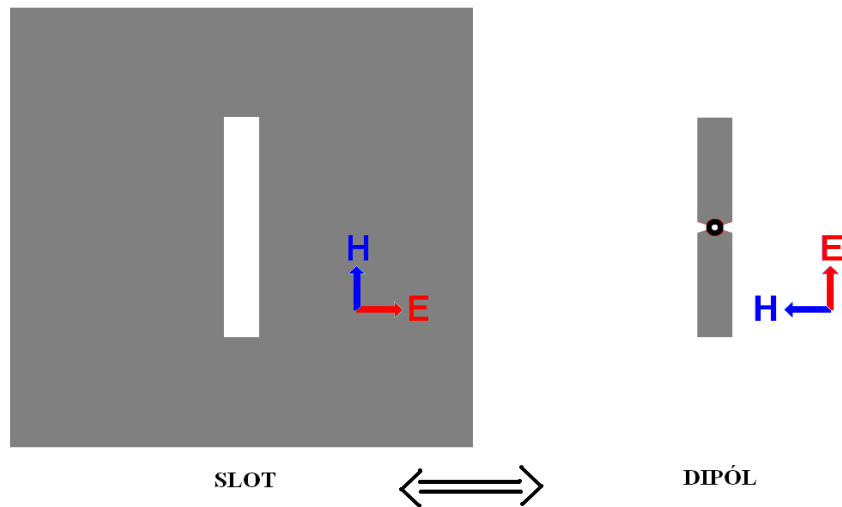
2.4 Princip slotové antény

Máme-li úzkou štěrbinu na nekonečně velké vodivé desce a napájíme-li ji např. koaxiálním vedením, vybudíme ve štěrbině elektrické pole podobné vidu TE_{10} v obdélníkovém vlnovodu (viz obr. 2.4). Je kolmé ke štěrbině, s maximem uprostřed a velikost intenzity pole směrem k okrajům klesá (polovina periody sinusového signálu). [7]



Obr. 2.4: Slot na nekonečně velké vodivé desce napájený koaxiálním vedením

Ze studie H. G. Bookera publikované v roce 1946 [8], který rozšířil Babinetův princip [9] z optiky do teorie antén, vyplývá, že slot je komplementární s dipólem. To znamená, že pokud vytvoříme dle Babinetova principu k slotu duální anténu (zaměníme kovovou plochu za vzduch a vzduchovou štěrbinu za kov), získáme kovový pásek, který bude napájen ve středu a bude mít stejné vlastnosti jako dipól. Obě antény budou mít stejnou vyzářovací charakteristiku. Budou se lišit orientací elektrického a magnetického pole (viz obr. 2.5). Oproti dipólu má slot otočené roviny E a H o 90° , tudíž vertikální slot je polarizován horizontálně. [5]

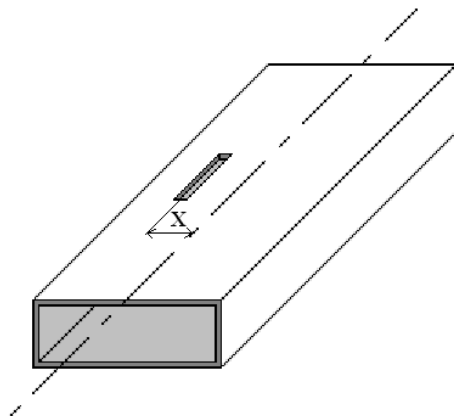


Obr. 2.5: Dualita slotu a dipólu

2.5 Slot na vlnovodu

Na rozdíl od teoretického předpokladu nelze slot umístit na nekonečně velkou kovovou desku. Při praktických aplikacích má vodivá deska, ve které je slot umístěn, konečné rozměry. Pokud budeme např. uvažovat slot napájený vlnovodem, bude vyzařovací charakteristika navíc pouze půlkruhová, protože z jedné strany je slot buzen. Tyto odlišnosti se projeví na výsledném vyzařovacím diagramu superponovaným zvlněním na teoreticky půlkruhové charakteristice. Je to způsobeno obvodovými proudy, které procházejí po hraně vlnovodu, a vzniklé pole interferuje s polem slotu. [5], [2]

Slot na vlnovodu musí být umístěný tak, aby porušoval rozložení proudové hustoty procházející po vnitřní stěně vlnovodu. Pro naše účely, kdy potřebujeme vyzařování v horizontální rovině, je vhodné uspořádání s vertikálně umístěným vlnovodem a na něm umístěným vertikálním slotu, který je rovnoběžný s osou vlnovodu (viz obr. 2.6).



Obr. 2.6: Vertikální slot

Takto umístěný slot se ve vedení jeví jako vložená reálná část admitance G (při rezonanci je imaginární část nulová). Lze ji vypočítat podle

$$\frac{G}{G_v} = \left(2,09 \cdot \frac{\lambda_g a}{\lambda b} \cdot \cos^2 \frac{\pi \lambda}{2 \lambda_g} \right) \cdot \sin^2 \frac{\pi x}{a} \quad , \quad (2.16)$$

kde G_v je vodivost vlnovodu, G je vodivost slotu, x je vzdálenost od osy vlnovodu. Ze vztahu (2.16) vyplývá, že slot umístěný v ose vlnovodu by nezářil. Pozice slotu vůči ose určuje množství energie navázané na slot a vyzářené do prostoru. Slot dále od osy představuje větší admitanci. Nejnižšího PSV dosáhneme, pokud se admitance slotu a vlnovodu rovnají. [7]

Dále je nutno se pozastavit nad následující úvahou. Pokud bychom umístili sloty ve vzdálenosti x od osy vlnovodu v jedné linii, výsledné elektrické pole by bylo vždy v protifázi k sousedním slotům, což vyplývá z rozložení pole ve vlnovodu při vybuzení vidu TE_{10} (viz obr. 2.2). To by znamenalo, že by se jednotlivá vybuzená pole navzájem odečetla a anténa by nezářila. Z tohoto důvodu je nutné, aby se sloty na přeskáčku střídaly okolo osy vlnovodu. Toto rozložení zajistí, že všechny sloty jsou buzeny ve stejné fázi a anténa vyzařuje. [5]

3 NÁVRH SLOTOVÉ ANTÉNY

V této kapitole bude na základě předchozí teorie popsán postup návrhu antény a budou předloženy teoreticky vypočítané parametry řešené antény.

3.1 Shrnutí teoretických poznatků používaných při návrhu

První úvaha při návrhu tohoto typu antény je, aby byly sloty v rezonanci, a tím byla zátěž pro vedení čistě reálná. To znamená, že slot musí rezonovat na požadované frekvenci (délka slotu je rovna $\lambda/2$). Dle [5] není délka slotu přesně $\lambda/2$, ale $0,464 \cdot \lambda$ pro obdélníkový slot a $0,483 \cdot \lambda$ pro slot s kulatými konci (zhotovený frézováním).

Aby bylo docíleno horizontálního vyzařování, je nutno, aby všechny sloty byly napájené ve fázi. Toho je dosaženo správnou vzdáleností středů jednotlivých slotů. Tato vzdálenost je rovna $\lambda_g/2$. Vlnová délka ve vlnovodu je delší než ve volném prostoru (viz vzorce 2.5 nebo 2.6).

Vzdálenost středu posledního slotu od uzavřeného konce vlnovodu je celý lichý násobek $\lambda_g/4$ z důvodu vhodného přizpůsobení vedení.

Každý slot na anténě lze chápat jako paralelní admitanci na vedení. Aby bylo $PSV = 1$, je nutno, aby se součet všech admitancí slotů rovnal vstupní admitanci vedení. Z tohoto vyplývá, že pokud máme N slotů, respektive N stejných admitancí, bude mít každý slot admitanci $1/N$ z celkové admitance. Vzdálenost slotu od osy vlnovodu se vypočítá po úpravě vzorce (2.16) jako

$$x = \frac{a \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{g}{g1}}\right)}{\pi}, \quad (3.1)$$

kde

$$g = \frac{G}{G_v}, \quad (3.2)$$

$$g1 = 2,09 \cdot \frac{\lambda_g}{\lambda} \cdot \frac{a}{b} \cdot \cos^2 \frac{\pi\lambda}{2\lambda_g}, \quad (3.3)$$

Veličina g je normalizovaná vodivost a jejím používáním nám vypadnou obtížné výpočty s vlnovou vodivostí. Numericky je rovna hodnotě $1/N$, kde N je celkový počet slotů na anténě.

Šířka slotu je dle [9] rovna $1/20 \cdot \lambda$, případně se dle autora osvědčila $1/16$ palce ($1,5875$ mm) pro vlnovod R100 a dle jeho zkušeností není její přesná hodnota kritická.

Dle [5] můžeme přibližně určit zisk antény a šířku hlavního laloku podle následujících vzorců

$$G = 10 \cdot \log\left(\frac{N \cdot \frac{\lambda_g}{2}}{\lambda}\right) \quad [\text{dB}], \quad (3.4)$$

$$\theta = 50,7 \cdot \frac{\lambda}{\frac{N \cdot \lambda_g}{2}} \quad [^\circ], \quad (3.5)$$

Ze vzorců (3.4) a (3.5) vyplývá, že s rostoucím počtem slotů se zvyšuje zisk antény

v hlavní laloku a zmenšuje se jeho vyzařovací úhel. Naproti tomu z praktických simulací je známo, že s rostoucím počtem slotů roste i počet postranních laloků a jejich velikost.

Z důvodu napájení slotů z jedné strany vlnovodem bude charakteristika teoreticky pouze půlkruhová. Z tohoto důvodu je nutno na druhou stranu vlnovodu umístit stejný systém slotů, aby byla vyzařovací charakteristika skutečně v horizontální rovině všesměrová.

3.2 Výpočet rozměrů

Anténa má být provozována na $f = 10,3686$ GHz. Po dohodě s vedoucím práce byl zvolen celkový počet slotů $N = 16$. Pro danou frekvenci byl zvolen z tabulky vlnovodů řady R dle IEC 153 [2] vlnovod R100, který svým kmitočtovým rozsahem vyhovuje požadavkům pro naši anténu.

Označení pásma	S	C (G)	X _b (J)	X	K _n (P)	K	K _a (R)
Kmitočtový rozsah [GHz]	2,60 ÷ 3,95	3,94 ÷ 5,99	5,38 ÷ 8,17	8,20 ÷ 12,50	11,9 ÷ 18,0	17,6 ÷ 26,7	26,4 ÷ 40,0
Střední kmitočet [GHz]	3,0	5,0	7,5	10,0	15,0	20,0	30,0
Rozsah vlnových délek [cm]	11,55 ÷ 7,60	7,61 ÷ 5,01	5,58 ÷ 3,67	3,66 ÷ 2,40	2,52 ÷ 1,67	1,70 ÷ 1,12	1,14 ÷ 0,75
Střední vlnová délka [cm]	10,0	6,0	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0
Mezní kmitočet vidu TE ₁₀ [GHz]	2,080	3,156	4,285	6,560	9,490	14,080	21,100
Označení vlnovodu dle IEC	R 32	R 48	R 70	R 100	R 140	R 220	R 320
Vnitřní rozměry [mm]	72,14x34,04	47,55x22,15	34,85x15,80	22,86x10,16	15,80x7,90	10,67x4,32	7,11x3,56
Označení příruby dle IEC	UER 32	UER 48	UER 70	UBR 100	UBR 140	UBR 220	UBR 320
Teoretický měrný útlum [dB/m] *)	0,019	0,0331	0,0509	0,106	0,164	0,378	0,599
Maximální přenášený výkon [MW] **)	10,565	4,877	2,691	1,046	0,577	0,196	0,107

Obr. 3.1: Základní technické parametry obdélníkových vlnovodů řady R dle IEC 153 [2]

Dle vzorce (2.7) přepočítáme frekvenci na vlnovou délku ve volném prostoru $\lambda = 0,028934$ m. Dále je nutné přepočítat vlnovou délku ve volném prostoru na vlnovou délku ve vlnovodu dle vzorce (2.5) či (2.6) $\lambda_g = 0,03768$ m. Vzdálenost slotů mezi sebou je pak $\lambda_{g/2} = 0,01884$ m.

Podle vzorců (3.4) a (3.5) vypočteme přibližný zisk antény $G = 10,14$ dB a šířku hlavního laloku $\theta = 9,81^\circ$.

Délka slotu je při uvážení korekce dle [5] vychází na 1,4467 cm.

Šířka slotu bude dle [5] rovna 1,5875 mm. Vzdálenost slotu od osy vypočítaná podle (3.1) je rovna 2,386 mm.

Veličina	Hodnota
Frekvence signálu	10,3686 GHz
Zvolený vlnovod	R100
Rozměr a	22,86 mm
Rozměr b	10,16 mm
Vlnová délka ve volném prostoru	0,028934 m
Vlnová délka ve vlnovodu	0,037368 m
Přibližný zisk	10,14 dB
Přibližný úhel hlavního laloku	9,81 °
Délka slotu	0,014467 m
Vzdálenost slotů mezi sebou	0,01884 m
Šířka slotu	1,5875 mm
Vzdálenost slotu od osy	2,386 mm

Tab. 3.1: Shrnutí vypočtených rozměrů antény

4 MODEL V PROSTŘEDÍ ANSOFT HFSS

V této kapitole bude krátce pohovořeno o simulačním prostředí Ansoft HFSS verze 11. Dále bude v tomto prostředí odsimulována anténa, jejíž rozměry byly teoreticky vypočítány v předchozí kapitole.

4.1 Ansoft HFSS

Prostředí Ansoft HFSS je sofistikovaný program umožňující zkoumat chování elektromagnetických obvodů ve vysokofrekvenční elektrotechnice. Je vhodný pro návrh a analýzu především planárních mikrovlnných struktur, antén, vysokofrekvenčních komponent, atd. [10]

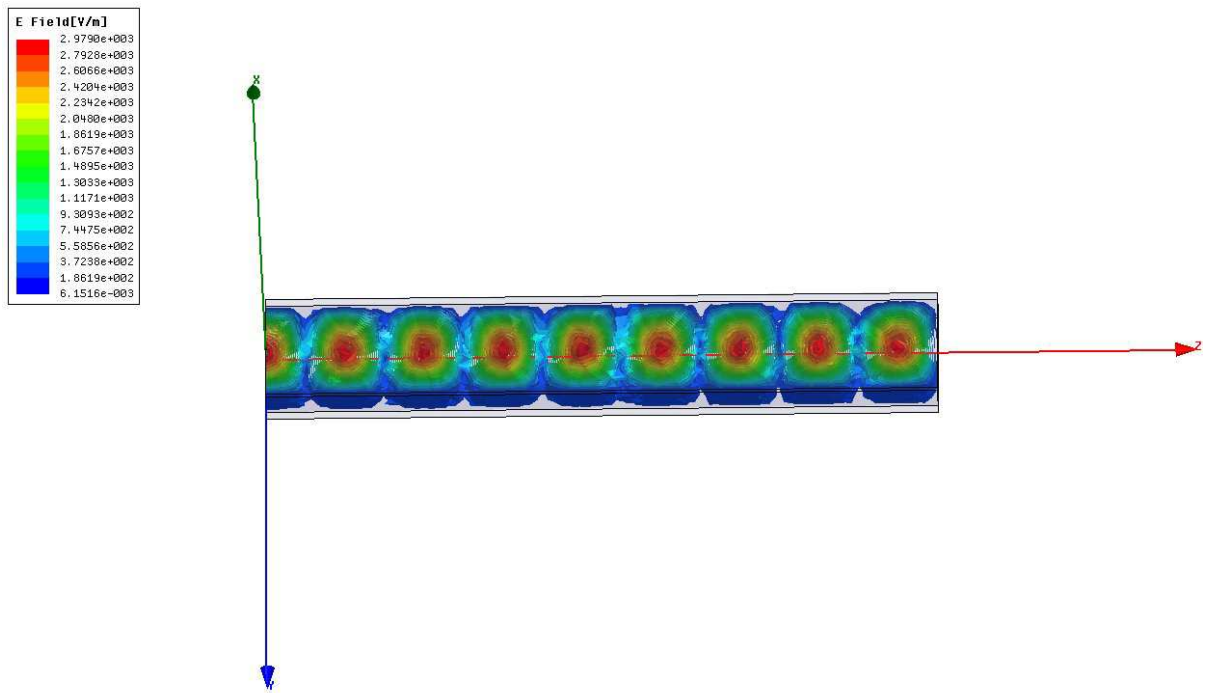
HFSS využívá pro své výpočty metodu FEM - finite element method (metoda konečných prvků). Tato numerická metoda byla vyvinuta v 50. letech 20. století a slouží k simulaci průběhů napětí, vlastních frekvencí a jevů v elektromagnetismu na vytvořeném fyzikálním modelu. Princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do konečného počtu prvků, přičemž hledané parametry jsou počítány v jednotlivých uzlových bodech. [11] HFSS generuje diskretizační síť automaticky dle zvolených parametrů. Parametry sítě jsou uživatelsky nastavitelné a na jejich vhodné volbě závisí správnost výsledků simulace. Segmenty diskretizační sítě musejí splňovat Nyquistův-Shannonův teorém.

4.2 Simulace vlnovodu

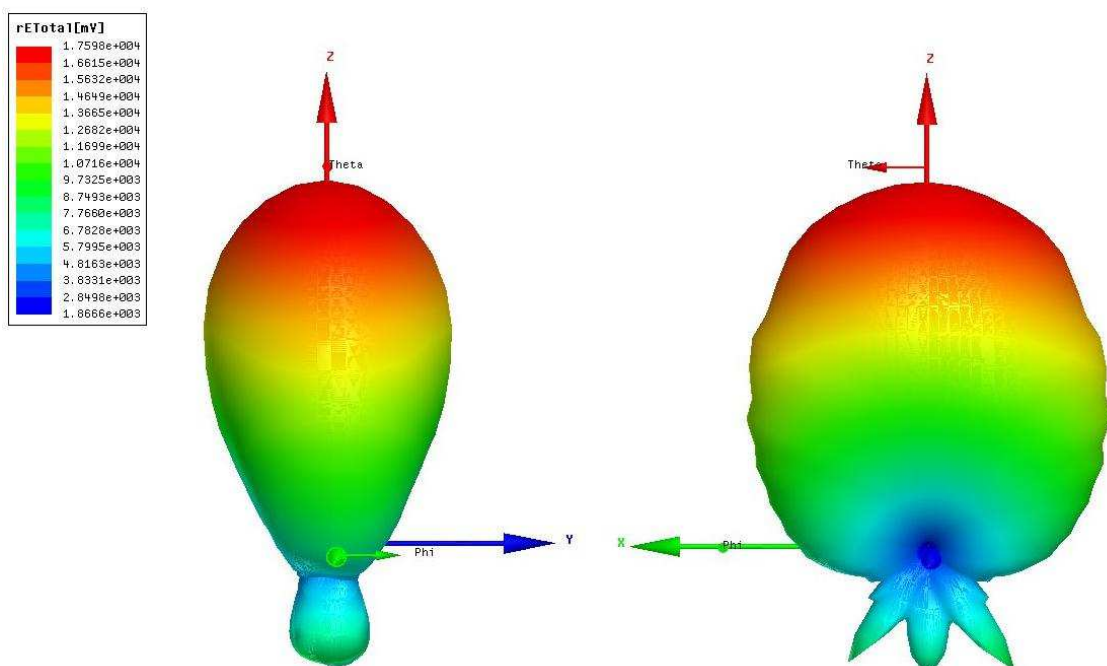
V prostředí HFSS lze definovat v podstatě jakkoliv prostorově tvarovanou strukturu. Pro odsimulování pole uvnitř vlnovodu byl zvolen vlnovod R100, který bude použit pro zvolenou anténu. Pro potřeby simulace byly uvažovány reálné konstrukční parametry tohoto vlnovodu. Materiál vlnovodu je tvořen mosazí, dielektrikum je tvořeno suchým vzduchem a tloušťka stěny je dle normy 1,27 mm. Vlnovod je buzen za pomoci vlnového portu v pásmu jednovidovosti, a to dominantním videm TE_{10} . Vlnový port má definovaný směr integrace elektromagnetického pole a lze mu definovat charakteristickou impedanci.

Na (obr. 4.1) je vidět rozložení elektrického pole ve vlnovodu při vybuzení vidu TE_{10} . Na obrázku jsou jasně rozlišitelné kmitny a uzly tohoto pole.

HFSS umožňuje analýzu vzdáleného pole antény. Používá se k tomu *Radiation box*, jehož vzdálenost od objektu musí být nejméně $\lambda/4$. Výsledky této simulace lze interpretovat buď v polárních nebo kartézských souřadnicích, popřípadě jako 3D graf. V (obr. 4.2) je vidět 3D graf vyzařování otevřeného konce vlnovodu. Vlnový port je umístěn na jednom konci vlnovodu a je překryt vodivou deskou (takové uspořádání zajišťuje, že vlnovod na této straně je uzavřený a nevyzařuje).



Obr. 4.1: Rozložení elektrického pole ve vlnovodu při vidu TE_{10}



Obr. 4.2: Vyzářovací diagram otevřeného konce vlnovodu

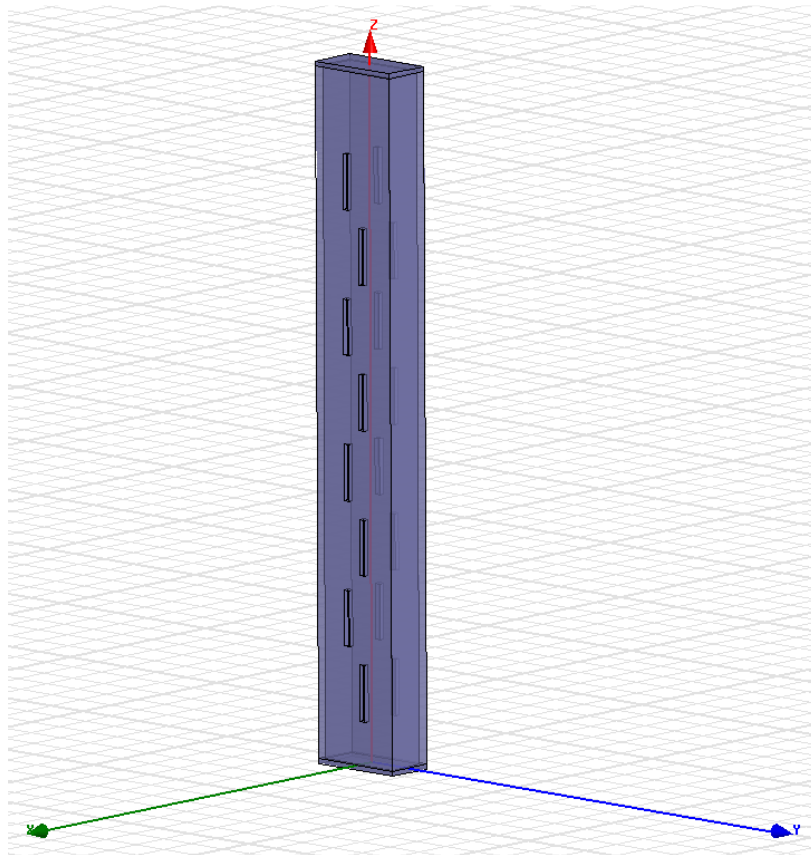
4.3 Simulace navržené slotové antény

Pro účely simulací variant navržených antén je v celé práci dodržován stejný systém os. Rovině H odpovídá rovina XY a rovině E pak odpovídají roviny XZ (ve směru kolmém na rovinu slotů) a YZ (ve směru rovnoběžném s rovinou slotů) (viz obr. 4.3). Dále, pokud nebude uvedeno jinak, jsou všechny následující grafy v dB a se stejným měřítkem (pro lepší orientaci).

4.3.1 Ověření teoretických rozměrů antény (anténa s vlnovodnou přírubou)

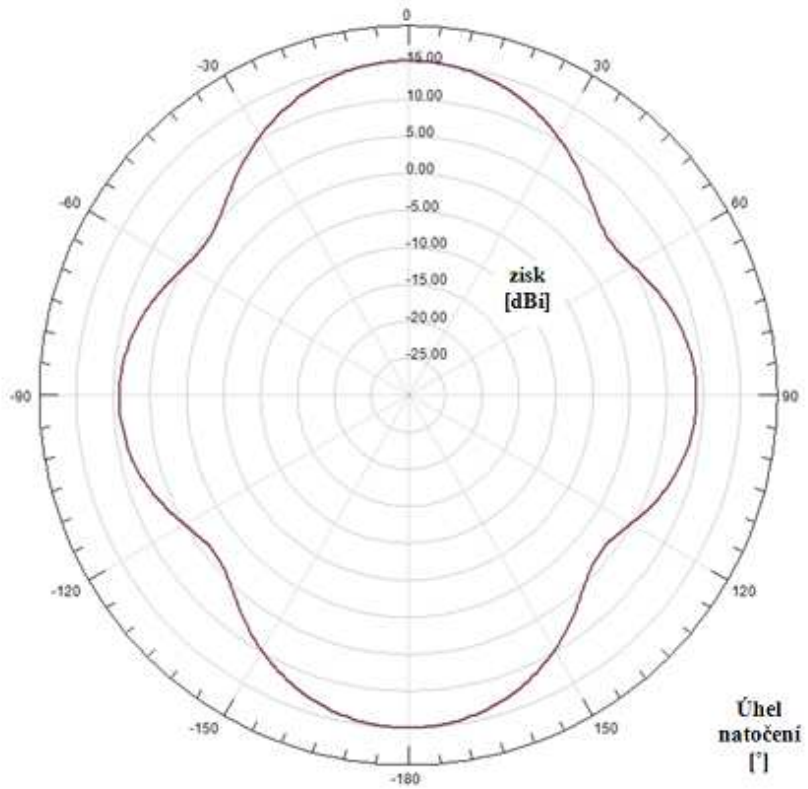
Pro vypočtené rozměry z (tab. 3.1) byla vytvořena simulace. Anténa byla původně odsimulována experimentálně pouze s vakuovým dielektrikem a tenkým pláštěm z materiálu *pec* (perfect electric conductivity, neboli ideálně elektricky vodivý materiál). Tato cesta se ukázala jako špatná z důvodu změny délky vlny na vedení oproti reálným předpokladům. Vlnová délka na vedení pak vycházela $\lambda_g = 0,041472$ m, na rozdíl od reálné hodnoty $\lambda_g = 0,037368$ m.

Jako druhá cesta byla zvolena simulace s reálnými parametry vlnovodu (tloušťka stěny, materiál stěny a materiál dielektrika). Do takto vytvořeného vlnovodu byly pomocí funkce subtract „vyříznuty” sloty (obr. 4.3).

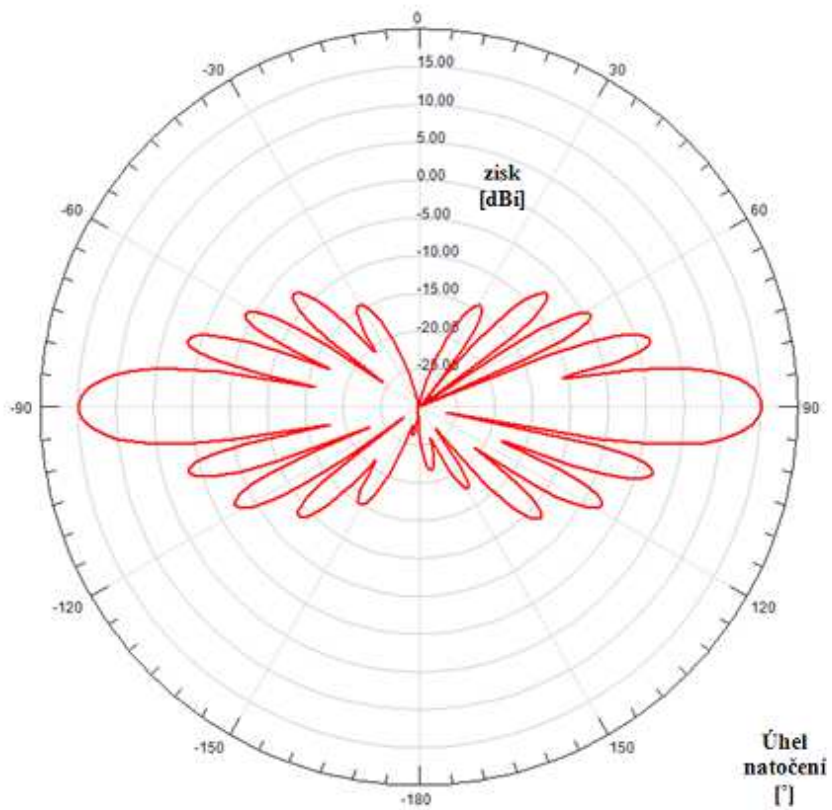


Obr. 4.3: Navržená slotová anténa

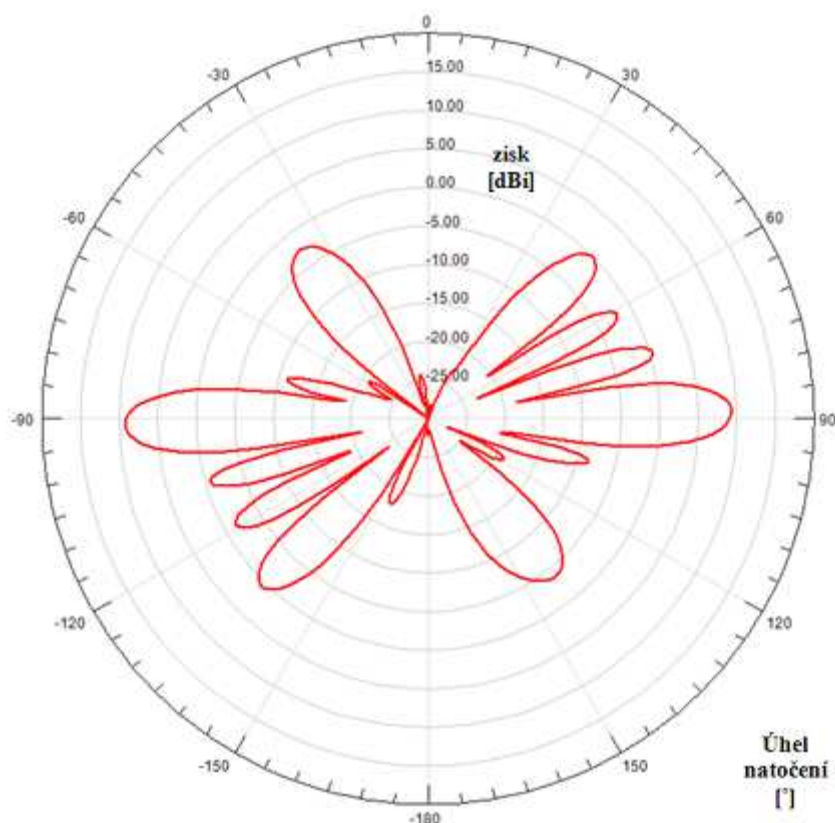
Kolem takto navržené antény bylo vytvořeno radiační pole a byla provedena simulace v rozsahu 9-11 GHz, se střední frekvencí $f = 10,3686$ GHz. Výsledky byly vykresleny do polárního grafu (viz obr. 4.4, 4.5, 4.6).



Obr. 4.4: Zisk antény - rovina XY



Obr. 4.5: Zisk antény - rovina XZ

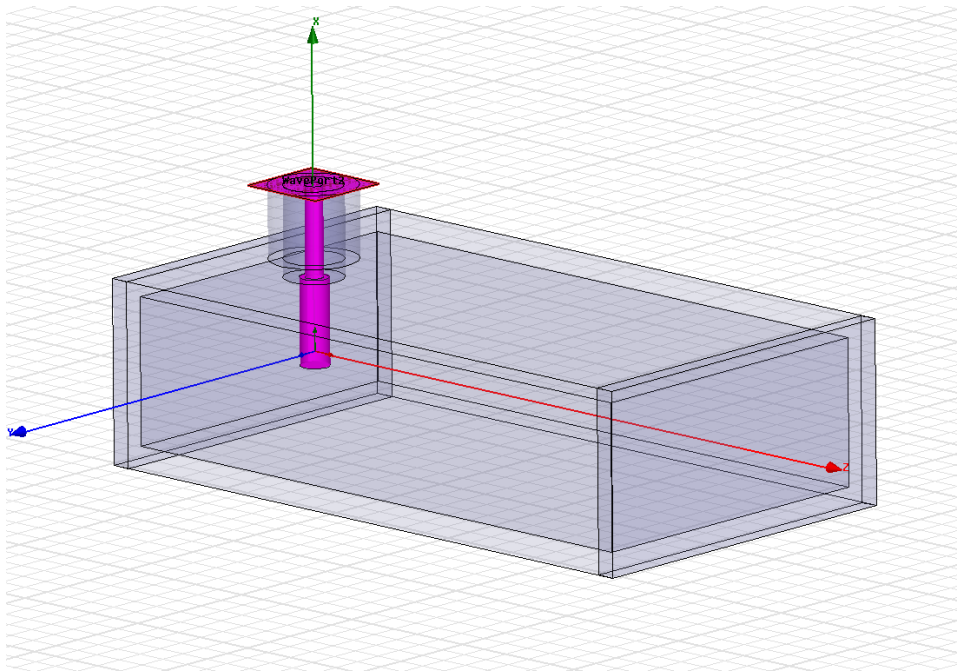


Obr. 4.6: Zisk antény - rovina YZ

Z (obr. 4.4), je vidět, že anténa je skutečně všesměrová. Bohužel simulace potvrzuje problém, který byl zmíněn v teoretickém úvodu. Vyzařovací charakteristika není okolo azimutu uniformní. To se projevuje i na zisku, kdy v některých místech je zisk větší než teoreticky vypočítaný a v některých místech je menší (viz obr. 4.4).

4.3.2 Přechodka SMA – vlnovod

Pro účely dalších simulací a následné realizace byla odsimulována přechodka koaxiální vedení (konektor typu SMA) - vlnovod. Simulace přechodky je vytvořena vložením modelu konektoru SMA [12] s teflonovým dielektrikem, opatřeným na středním vodiči sondou, jež zasahuje do vnitřního dielektrika vlnovodu, do modelu vlnovodu (viz obr. 4.7).

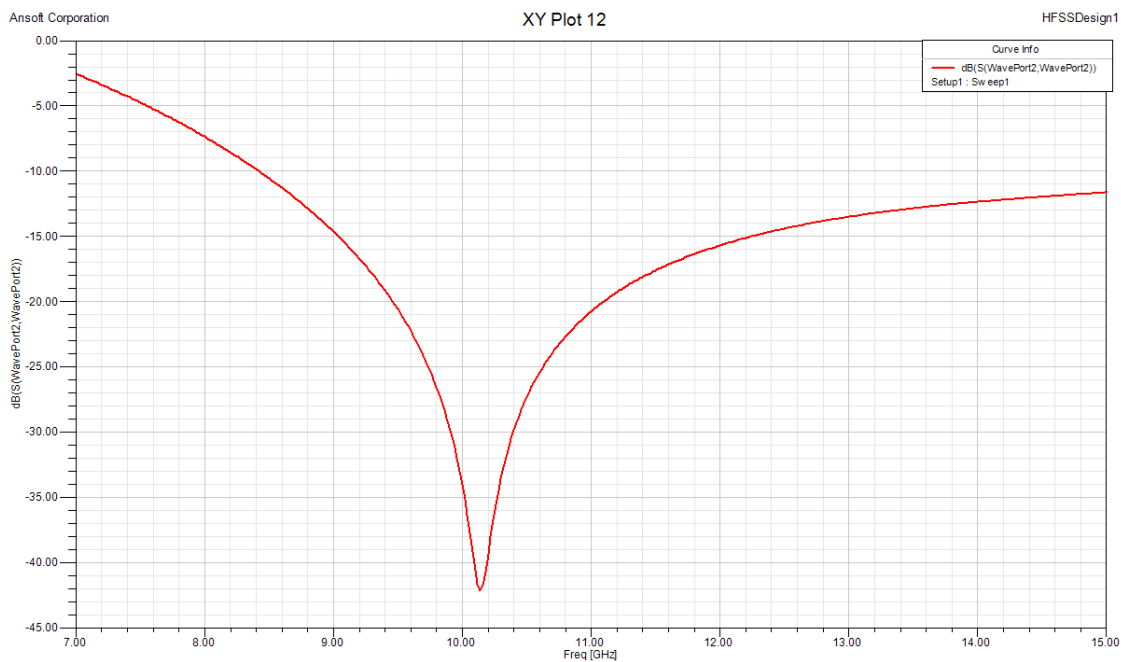


Obr. 4.7 Přechodka SMA - vlnovod

Poloha a rozměr anténky byly v první fázi zvoleny v souladu s teoretickým úvodem. Toto se ukázalo jako nevhodné řešení a pro vybuzení vidu TE₁₀ ve vlnovodu R100 při nejlepšímu parametru S₁₁ byly optimalizovány následující rozměry:

- Průměr sondy = 2 mm
- Hloubka sondy = 6 mm
- Vzdálenost středu sondy od zkratovaného konce vlnovodu = 5 mm

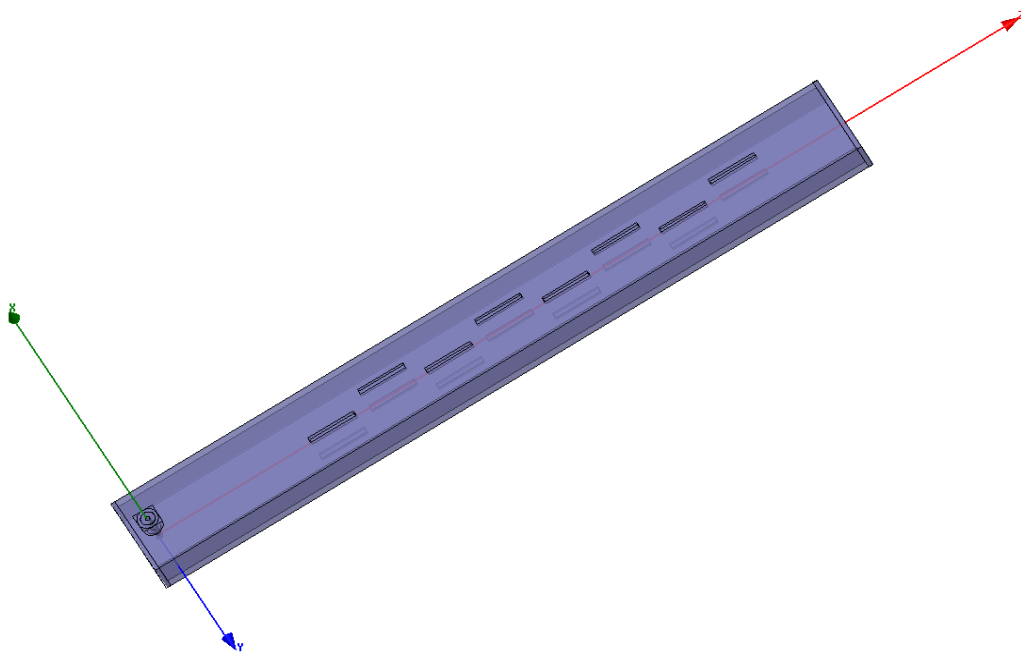
S těmito rozměry bylo dosaženo v pásmu 9,7-10,6 GHz průchozího útlumu $\leq -25\text{dB}$ s minimem -42dB (viz obr. 4.8), jehož polohu lze přesně doladit pomocí vzájemné vzdálenosti sondy a zkratovaného konce vlnovodu (v praxi realizováno ladícím pístkem).



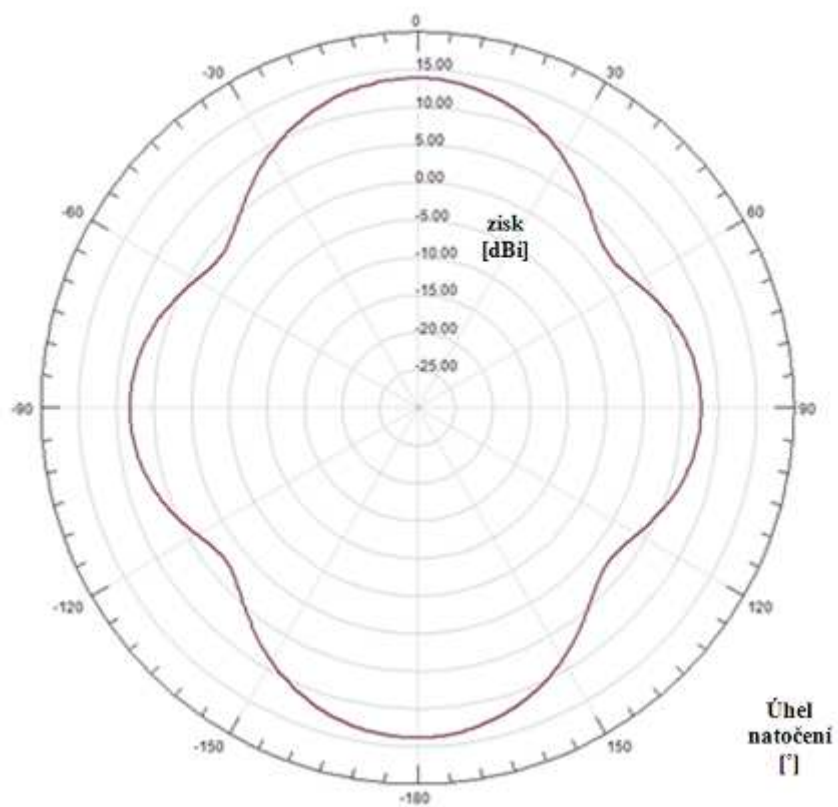
Obr. 4.8: Průchozí útlum přechodky SMA - vlnovod

4.3.3 Anténa s SMA konektorem

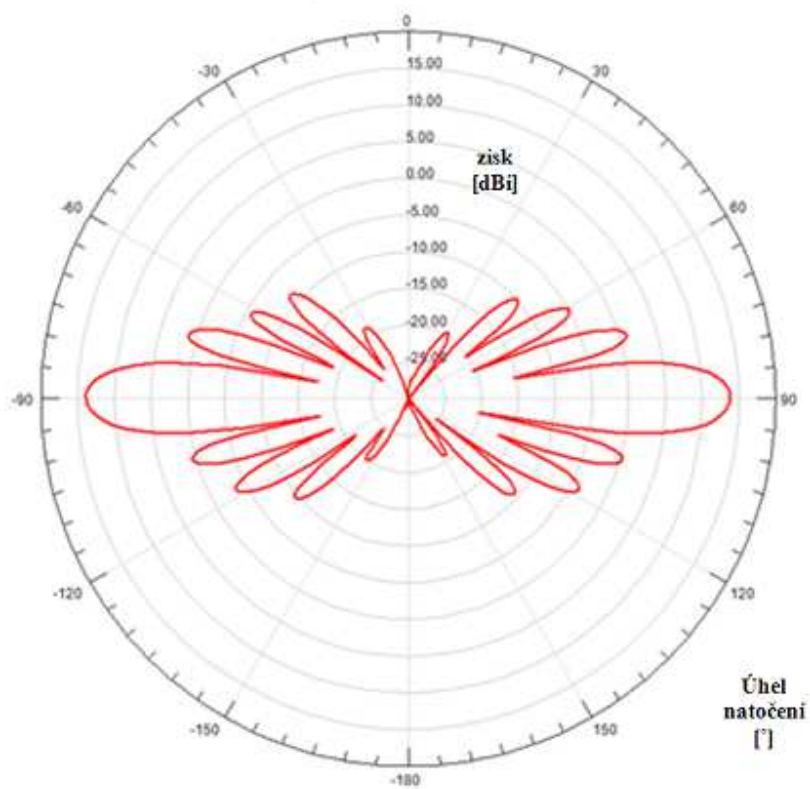
Na základě simulací antény s vlnovodnou přírubou a vlnovodné přechodky byla vytvořena simulace antény napájené konektorem typu SMA. Ladění antény je realizováno pomocí pohyblivých přepážek (pístků) na obou koncích antény (obr. 4.9). Po provedení optimalizační analýzy bylo dosaženo výsledků, které se nijak výrazně neliší od antény s vlnovodnou přírubou (viz obr. 4.10, 4.11, 4.12).



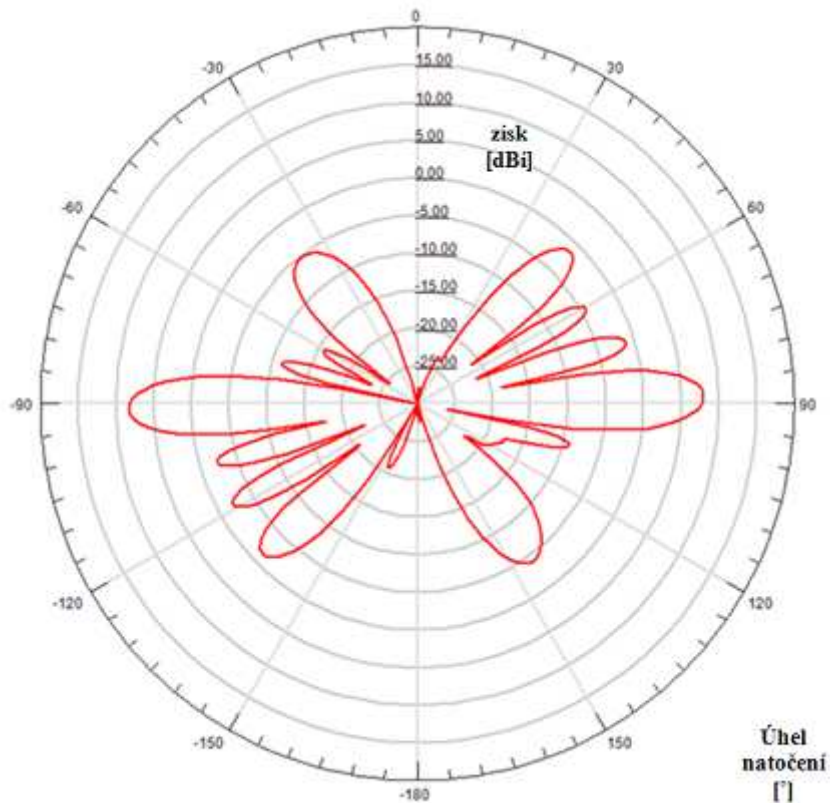
Obr. 4.9: Anténa s SMA konektorem



Obr. 4.10: Zisk antény s SMA konektorem - rovina XY



Obr. 4.11: Zisk antény s SMA konektorem - rovina XZ

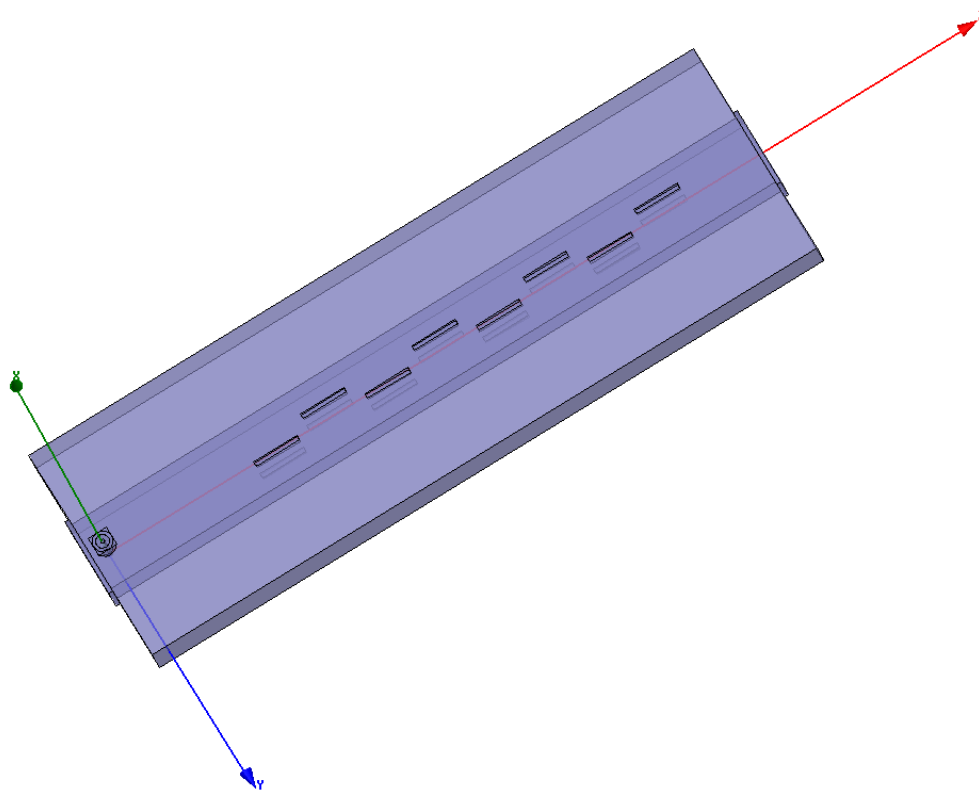


Obr. 4.12: Zisk antény s SMA konektorem - rovina YZ

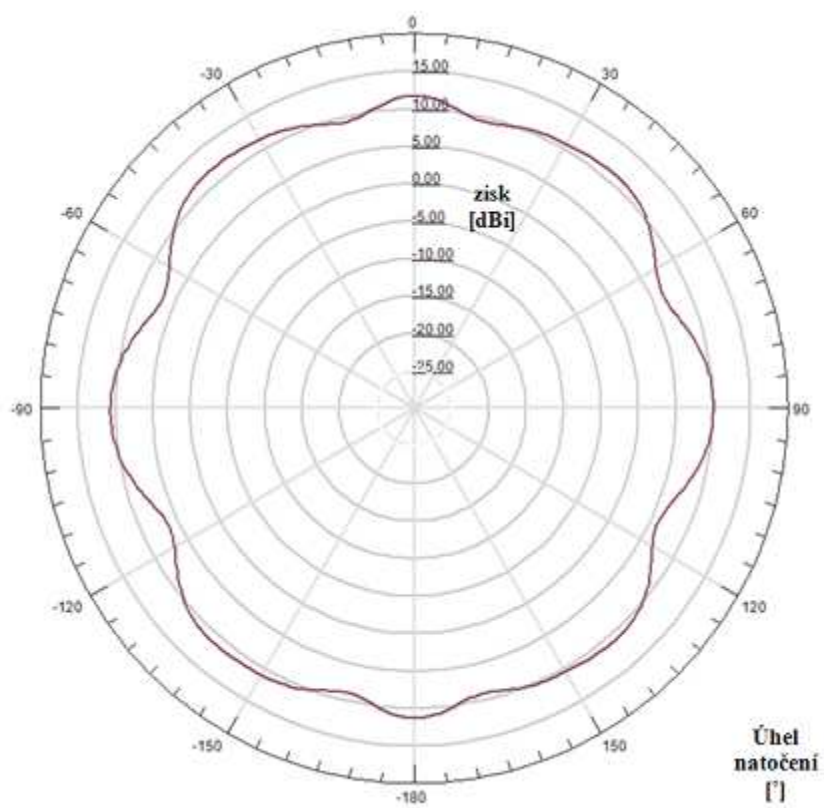
4.3.4 Anténa s SMA konektorem a zvětšenou zemní rovinou

Problém neuniformity vyzařovacího diagramu v horizontální rovině (rovina XY) je způsoben konečnou velikostí zemní plochy okolo slotu. Ze znalosti příčiny vyplývá i možné řešení tohoto problému. Pokud bychom zvětšovali zemní plochu do nekonečna, měla by být vyzařovací charakteristika kruhová. Z konstrukčních důvodů to není možné, nicméně každé zvětšení zemní plochy by mělo přinést zlepšení. Z prostorových důvodů budoucí konstrukce byla pro další simulaci zvětšena zemní plocha třikrát (viz obr. 4.13). Jinak je konstrukce totožná s předchozí anténou (viz kapitola 4.3.3).

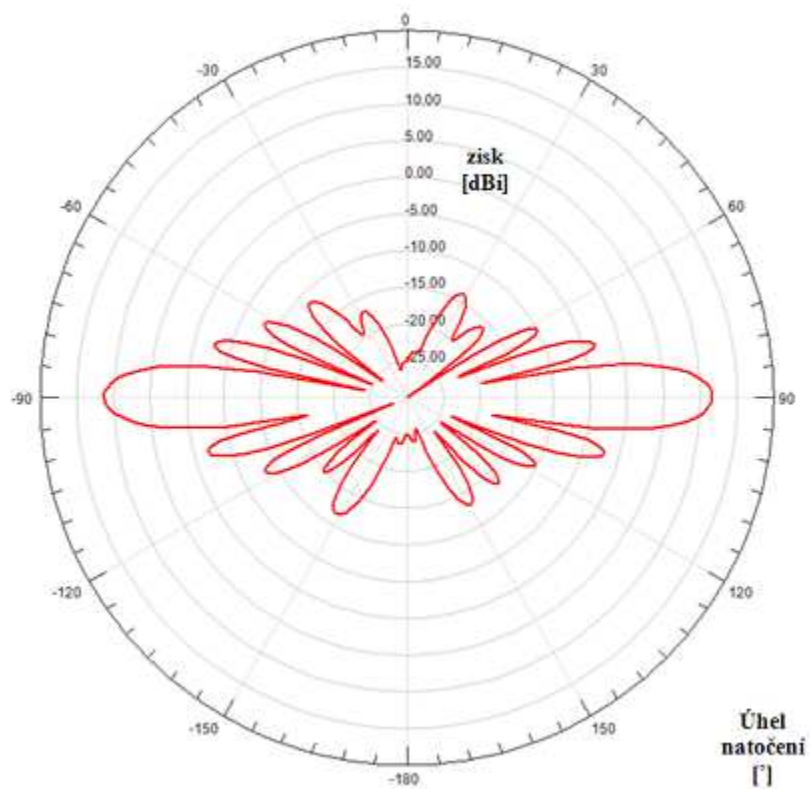
Jak je vidět z charakteristik (obr. 4.14, 4.15, 4.16), tato konstrukční úprava unifikuje diagram v horizontální rovině. Rozdíl mezi minimy a maximy okolo azimutu je maximálně 4 dB na rozdíl od antény s malou zemní plochou, kde je rozdíl mezi minimy a maximy okolo azimutu přes 10 dB. Vliv na vyzařování v rovině E (roviny YZ a XZ) tato úprava nemá.



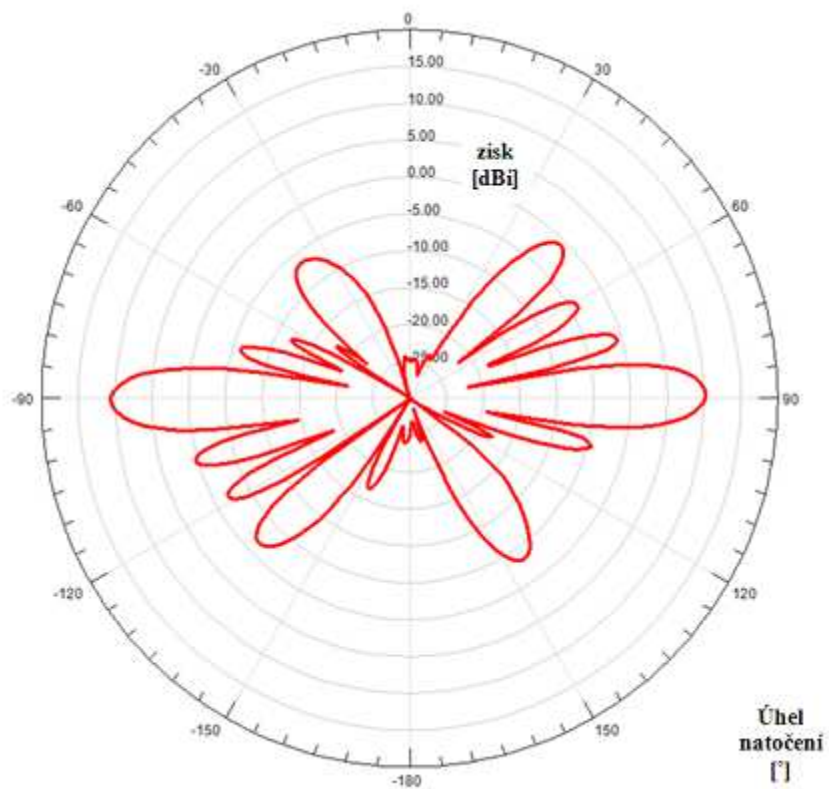
Obr. 4.13: Anténa s SMA konektorem a zvětšenou zemní plochou



Obr. 4.14: Zisk antény s SMA konektorem a zvětšenou zemní plochou - rovina XY



Obr. 4.15: Zisk antény s SMA konektorem a zvětšenou zemní plochou - rovina XZ

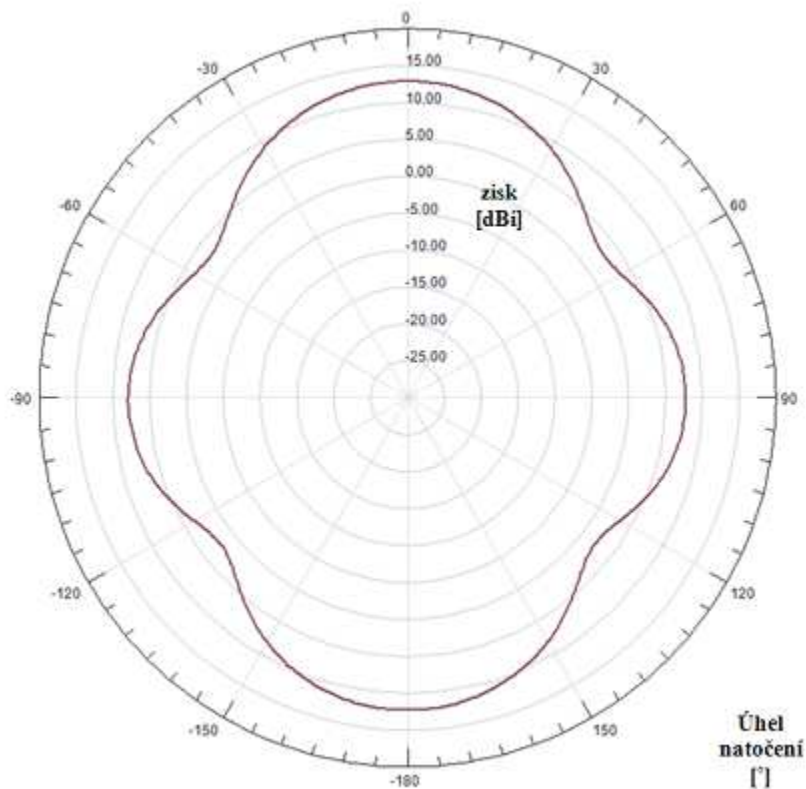


Obr. 4.16: Zisk antény s SMA konektorem a zvětšenou zemní plochou - rovina YZ

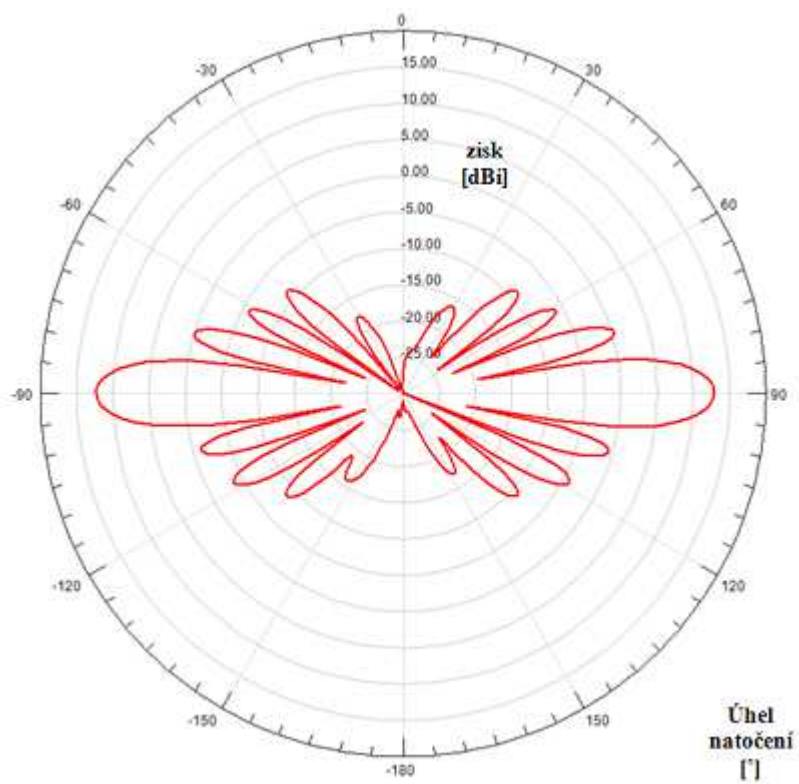
4.3.5 Anténa s malou a velkou zemní rovinou za použití PML analýzy

Jedním z požadavků na tuto práci bylo použít analýzu s PML (Perfectly Matched Layer) a zjistit, zda se bude lišit od klasické analýzy s použitím Radiation Boundary. PML je fiktivní okrajová podmínka. Jedná se o vrstvy obsahující okrajové podmínky se ztrátovým a neizotropním materiálem, což prakticky znamená, že simulované prostředí je bezodrazové a v simulaci lze použít RadBox s menší vzdáleností než $\lambda_0/4$ od antény.

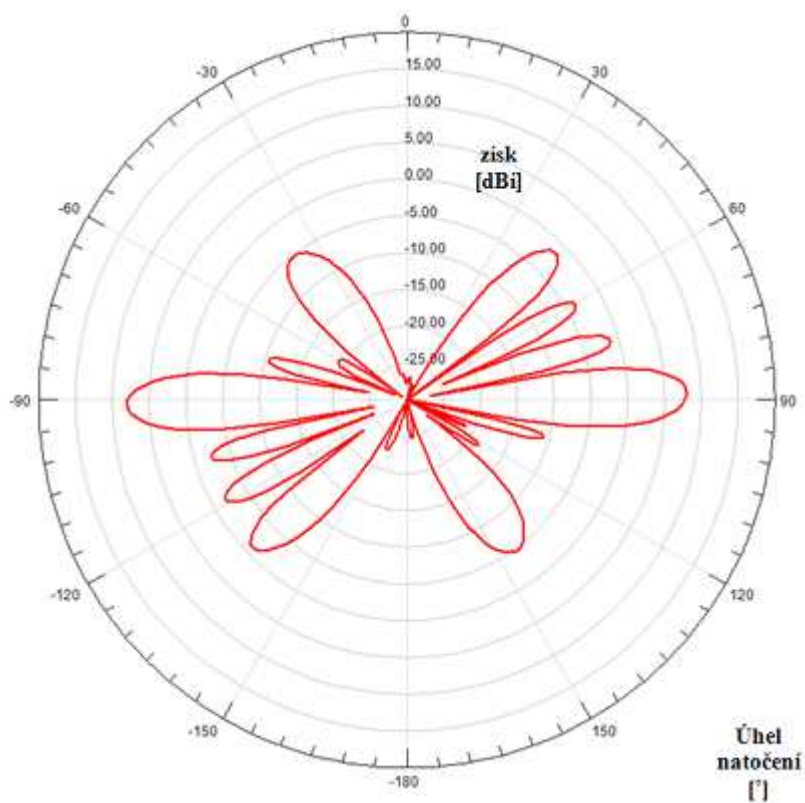
Byly provedeny simulace za použití PML pro anténu s normální a zvětšenou zemní plochou. Výsledky těchto simulací jsou velmi podobné s výsledky analýzy za použití Radiation Boundary. To je patrné pokud porovnáme vyzářovací diagramy těchto antén (viz obr. 4.10 a 4.17, 4.11 a 4.18, 4.12 a 4.19) pro normální velikost zemní plochy a (obr. 4.14 a 4.20, 4.15 a 4.21, 4.16 a 4.22) pro zvětšenou zemní plochu.



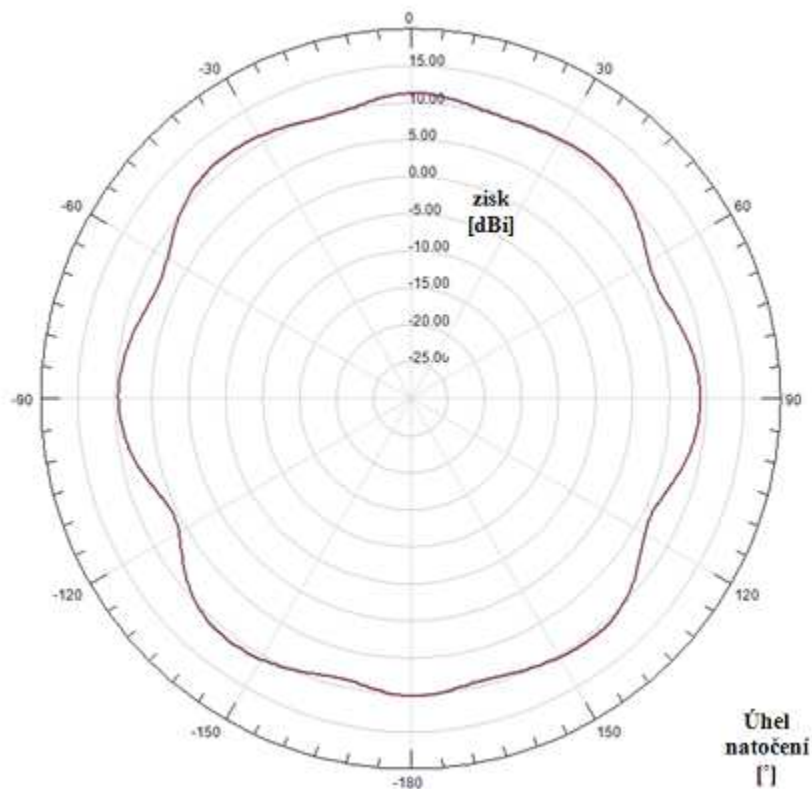
Obr. 4.17: Zisk antény s SMA konektorem za použití PML - rovina XY



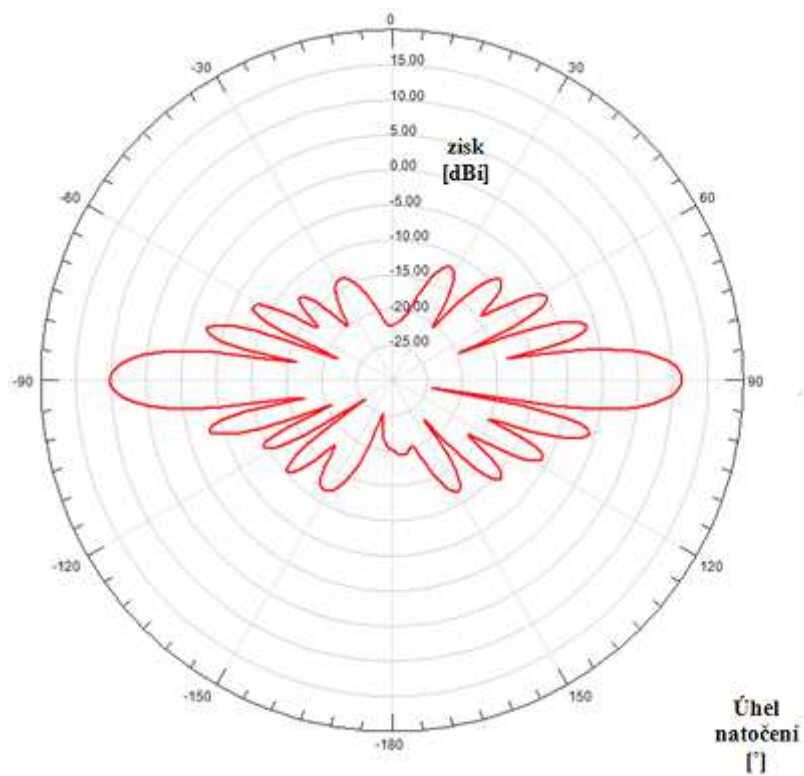
Obr. 4.18: Zisk antény s SMA konektorem za použití PML - rovina XZ



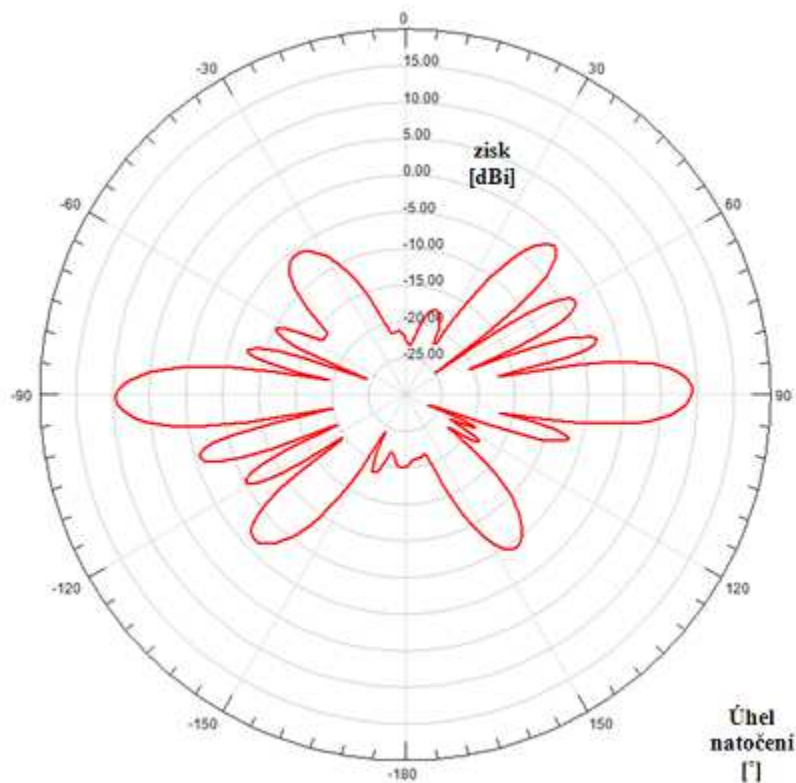
Obr. 4.19: Zisk antény s SMA konektorem za použití PML - rovina YZ



Obr. 4.20: Zisk antény s SMA konektorem, zvětšenou zemní plochou a s PML - rovina XY



Obr. 4.21: Zisk antény s SMA konektorem, zvětšenou zemní plochou a s PML - rovina XZ

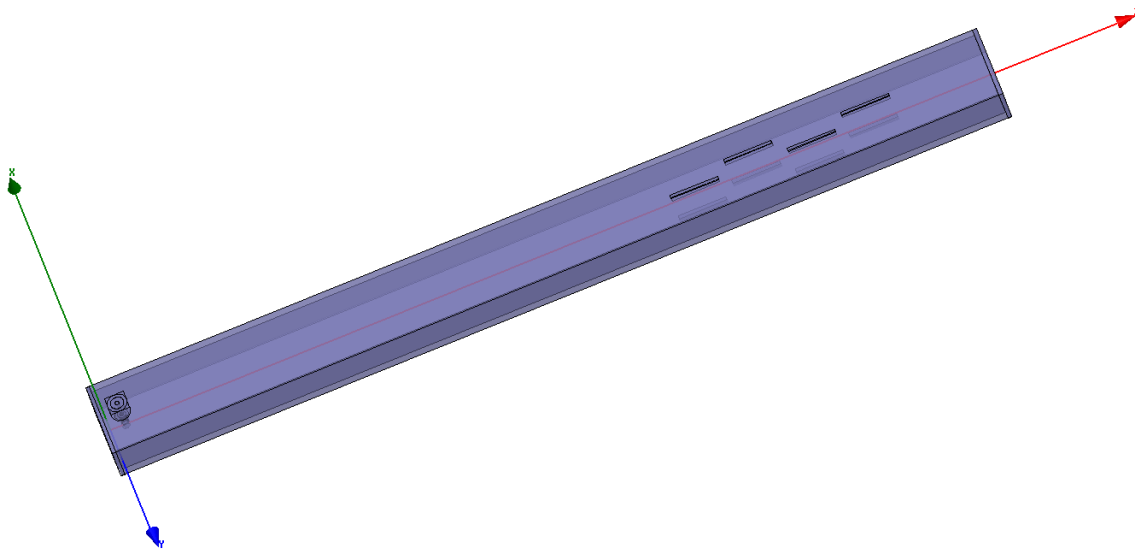


Obr. 4.22: Zisk antény s SMA konektorem, zvětšenou zemní plochou a s PML - rovina YZ

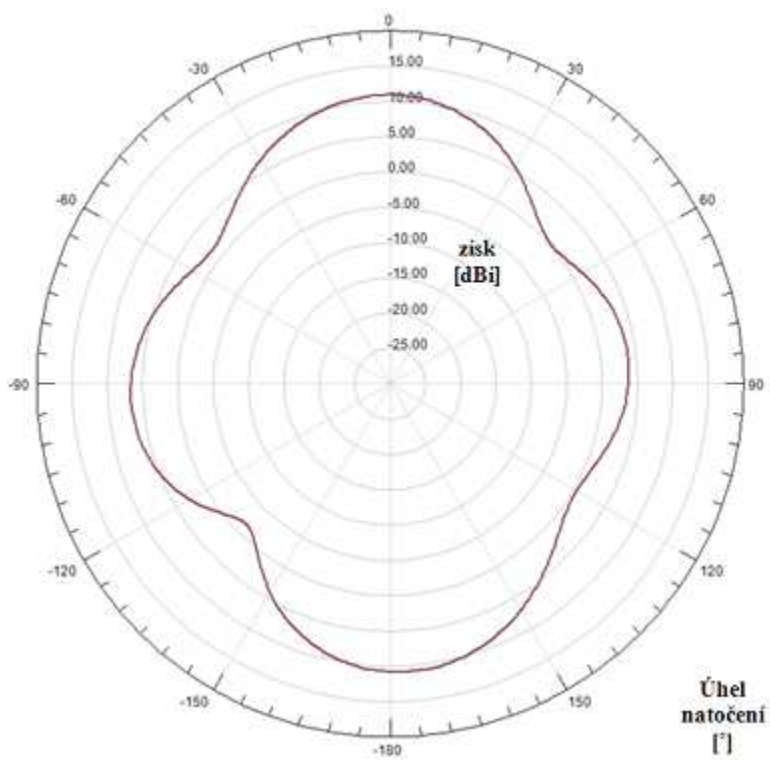
4.3.6 Srovnání s komerční anténou dle DB6NT

Pro porovnání dosažených výsledků byla provedena simulace antény dle DB6NT (viz obr. 4.23). Tato anténa se liší počtem slotů (celkem 8) a tím i většinou konstrukčních rozměrů. [13] Z důvodu účelu této simulace (porovnání vlastností antén) byla provedena pouze simulace za použití Radiation Boundary.

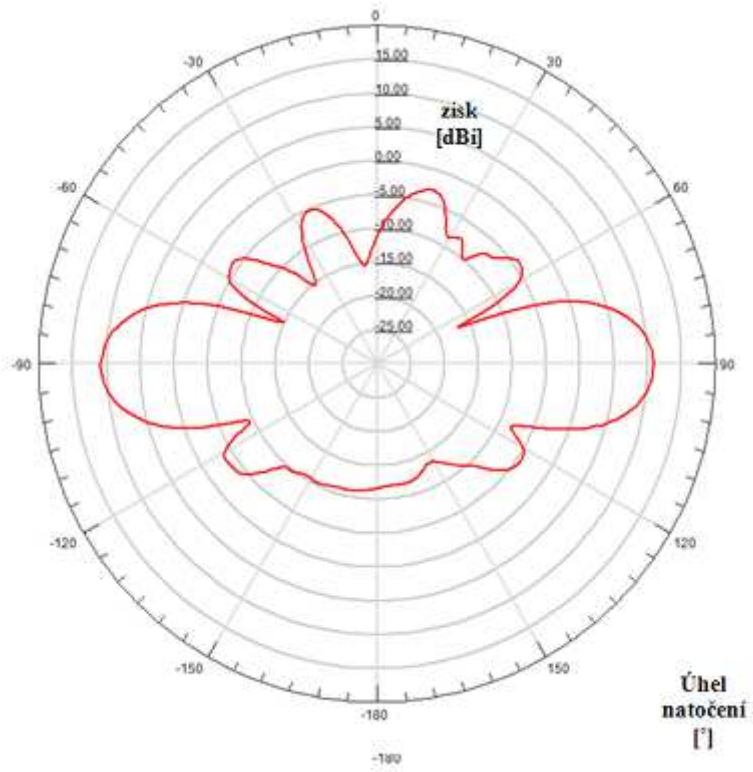
Výsledky simulace (viz obr. 4.24-4.26) potvrzují teorii v úvodu této práce. Tím, že má anténa poloviční počet slotů oproti zde navrhované, by měl její zisk být o 3 dB menší, vyzařovací úhel dvojnásobný a počet postranních laloků poloviční, což, pokud porovnáme příslušné diagramy navrhované antény a antény dle DB6NT (obr. 4.10 a 4.24; 4.11 a 4.25; 4.12 a 4.26), odpovídá skutečnosti. Anténa dle DB6NT má hlavní lalok rozdělen na několik maxim a minim, jak je patrné na (obr. 4.26). Tento jev se optimalizací polohy ladících pístků v rámci optimalizační analýzy nepodařilo odstranit a je pravděpodobně způsoben nevhodnou délkou slotu (tato je o 1,466 mm větší než je hodnota délky vlny ve volném prostoru).



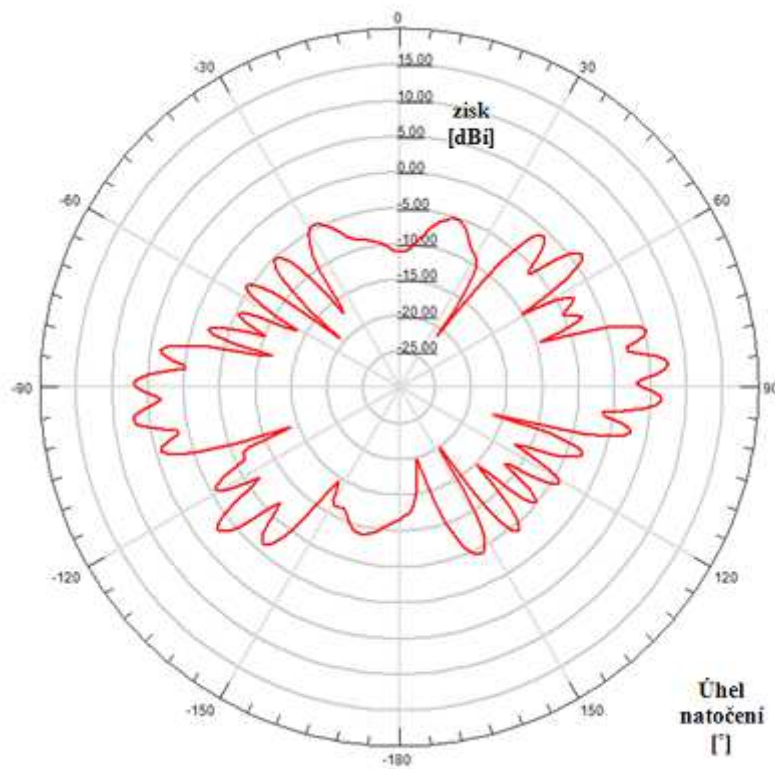
Obr. 4.23: Anténa dle DB6NT [12]



Obr. 4.24: Zisk antény dle DB6NT – rovina XY



Obr. 4.25: Zisk antény dle DB6NT - rovina XZ



Obr. 4.26: Zisk antény dle DB6NT - rovina YZ

5 REALIZACE ANTÉNY A JEJÍ REÁLNÉ PARAMETRY

5.1 Realizace antény

Na základě teoreticky a simulací stanovených rozměrů (viz tab. 3.1) byla vytvořena výkresová dokumentace pro výrobu (viz Seznam příloh).

Jako polotovar bylo použito standardně vyráběného vlnovodu R100 s vlnovodnými přírubami a povrchem ošetřeným kladívkovou barvou. Po uvážení všech dostupných obráběcích metod bylo rozhodnuto (při zachování rozumné výrobní náročnosti, přesnosti a ceny obrábění), že část prací bude provedena na CNC obráběcím stroji a část ručně.

5.1.1 Anténa

Samotná anténa se skládá ze tří částí. Hlavní částí je těleso antény (viz příloha 3-ELE 001), jež je vyrobeno frézováním do vlnovodu. Nejprve byla z povrchu vlnovodu odstraněna barva a poté byl povrch zbroušen do roviny. Po samotném odfrézování všech otvorů byly odstraněny otěpy a povrch vyleštěn (obr. 5.1).



Obr. 5.1: Vyrobená anténa

Druhou částí antény jsou ladicí pístky (viz příloha 4-ELE 002). Tyto byly vyrobeny z mosazi pomocí CNC obrábění. Pístky byly pro zlepšení vlastností antény vyrobeny o 40 μm větší a poté ručně zabroušeny a zaleštěny tak, aby přesně přilehly na vnitřní stěny vlnovodu. Čelní stěna obou pístků pak byla vyleštěna do zrcadlového lesku (obr. 5.2).



Obr. 5.2: Ladicí pístek včetně aretačních šroubů a ladicího mechanismu

Třetí část antény pak tvoří napájecí konektor a budicí sonda. Konektor byl zvolen typu SMA. Bylo nutno upravit délku vyčnívajícího dielektrika tak, aby odpovídala šířce stěny vlnovodu. Střední vodič byl zkrácen na délku kratší, než je potřebná délka budicí sondy. Na takto upravený střední vodič pak byla naletována mosazná trubička s vnějším průměrem 2 mm a délkou 6 mm (viz část 4.3.2). Vzniklá sonda pak byla vyleštěna a celek (obr. 5.3) byl přišroubován do těla antény.



Obr. 5.3: Konektor s napájecí sondou

5.1.2 Rozšířená zemní rovina

Pro realizaci obou navržených antén bylo rozhodnuto, že rozšířená zemní rovina bude realizována jako odnímatelná. Jako materiálu bylo opět použito mosazi. Z důvodu dostupnosti vhodných polotovarů byla tato dvoudílná součást vyrobena z pásoviny šířky 30 mm a tloušťky 3 mm. Délka samotných desek byla s ohledem na možnosti uchycení k anténě zvolena na 205 mm (viz příloha 4-ELE 003). Takto zhotovené desky byly vždy po dvou přišroubovány k hranolům 6 x 6 x 205 mm (viz příloha 4-ELE 004) a dva takto vzniklé celky pak byly pomocí šroubů připevněny k užším stěnám antény (viz obr. 5.4-5.6).



Obr. 5.4: Detail konstrukce přídavné zemní roviny



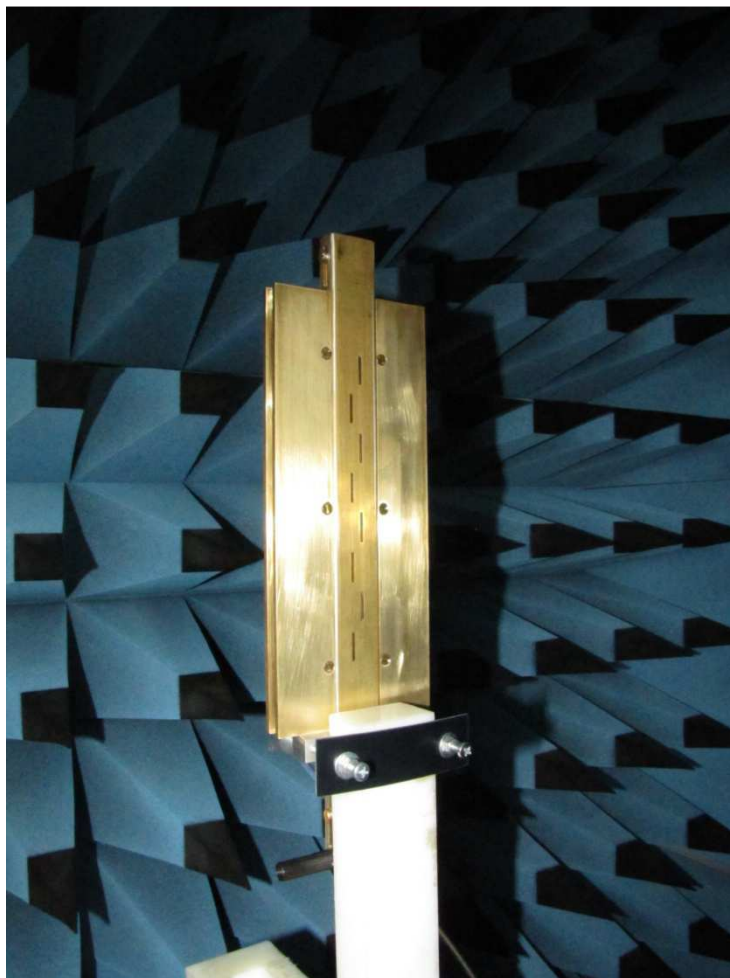
Obr. 5.5: Hotové dva díly přídavné zemní roviny



Obr. 5.6: Zkompletovaná anténa s přídavnou zemní rovinou

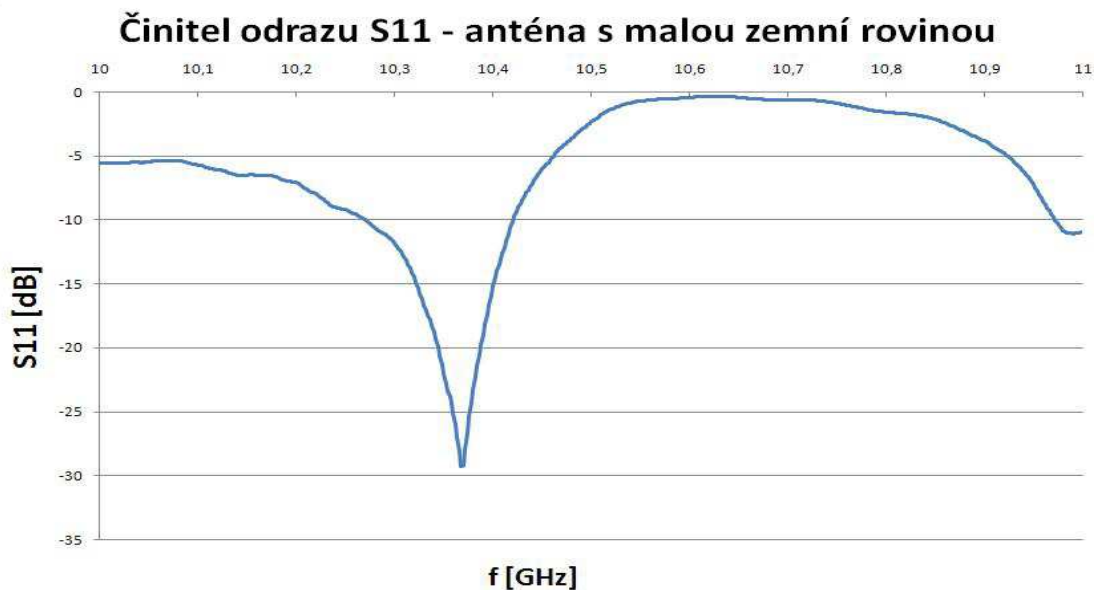
5.2 Parametry realizované antény

Měření byla realizována v laboratoři VUT Brno. Byly provedeny dvě série měření. První byla provedena bez rozšířené zemní roviny a druhá s rozšířenou zemní rovinou. Nejprve byla anténa naladěna do rezonance na frekvenci 10,3686 GHz pomocí vektorového obvodového analyzátoru a poté bylo provedeno měření v bezodrazové komoře (obr. 5.7). Měřen byl zisk antény v horizontální a vertikální rovině.

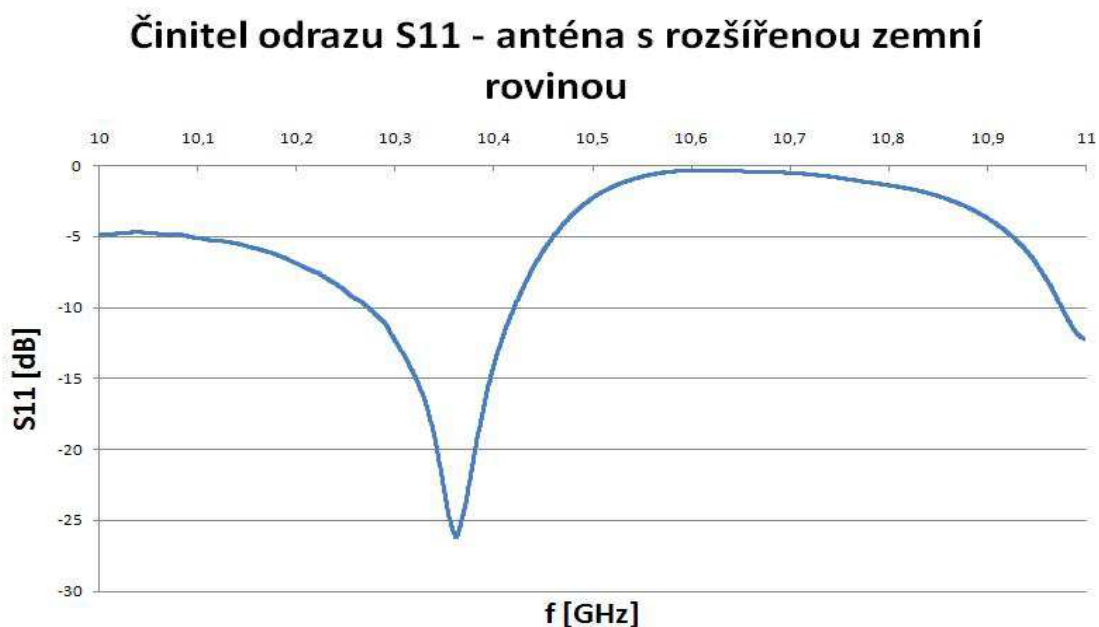


Obr. 5.7: Měření zisku antény

Činitel odrazu obou provedení antény je menší než -25 dB, což je hodnota více než uspokojivá (viz obr. 5.8 a 5.9). Dále je z těchto grafických závislostí patrné, že činitel odrazu je lepší než -10dB pro rozsah frekvencí 10,273-10,420 GHz pro obě provedení antény.

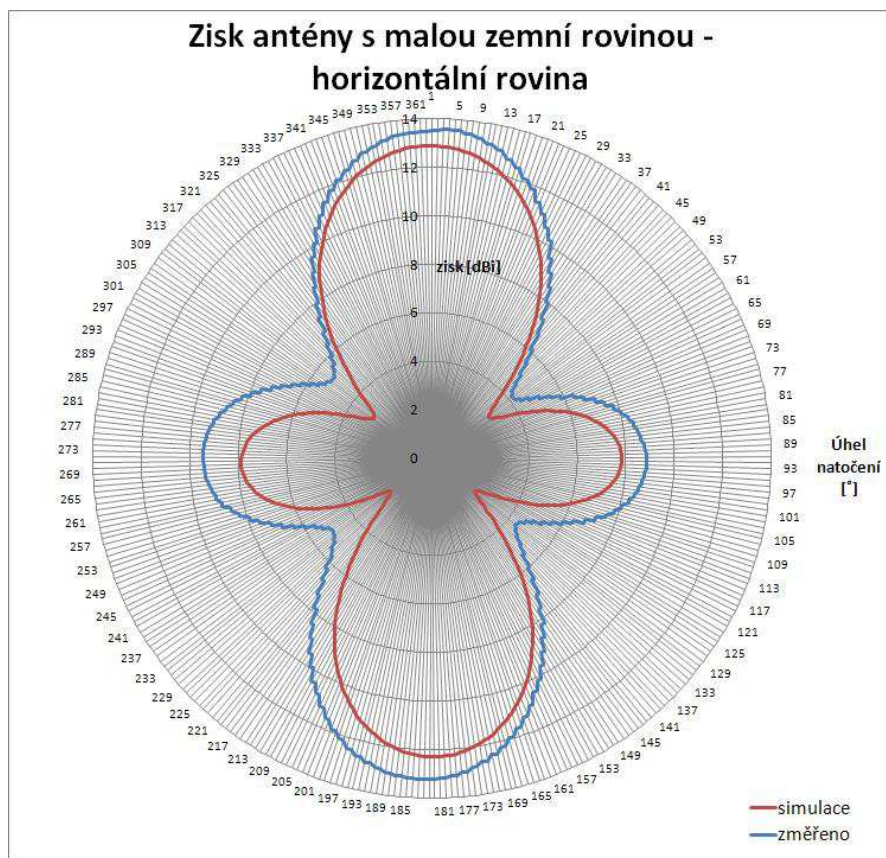


Obr. 5.8: Činitel odrazu antény s malou zemní rovinou

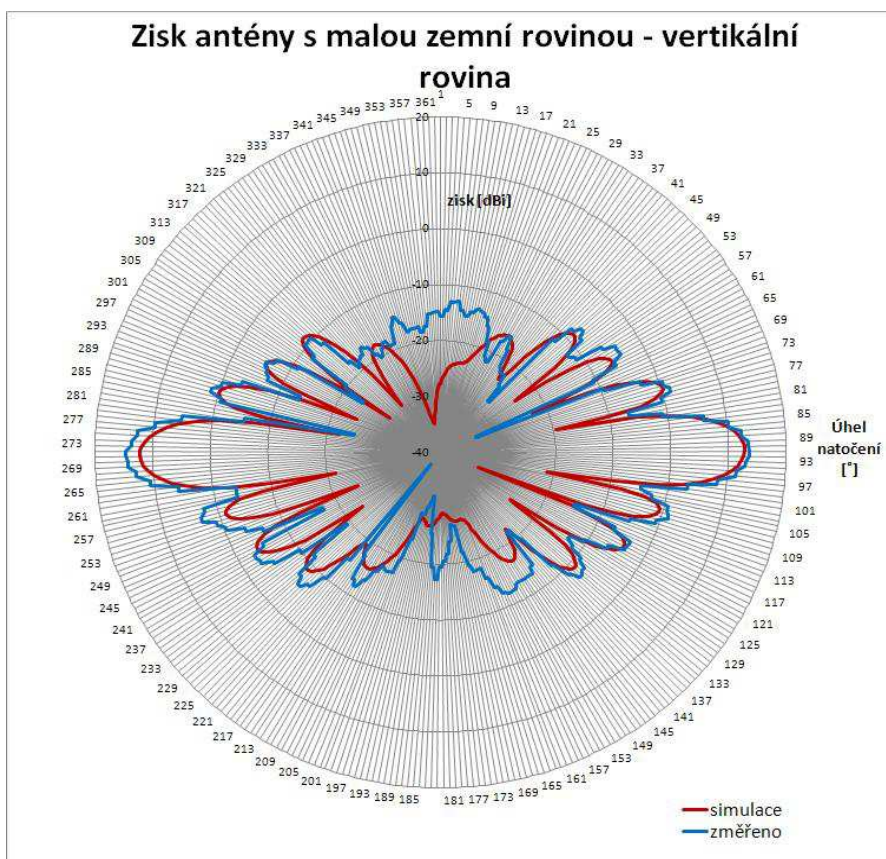


Obr. 5.9: Činitel odrazu antény s rozšířenou zemní rovinou

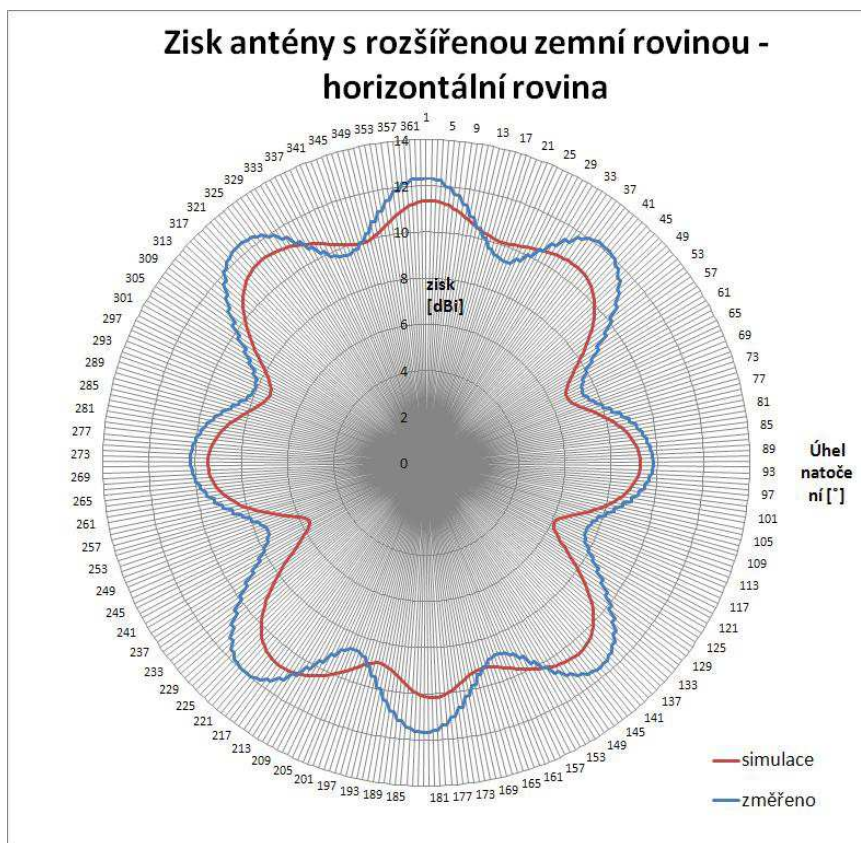
Na (obr. 5.10-5.13) jsou směrové charakteristiky obou provedení antény. V každém grafu je pro srovnání vložena charakteristika totožné antény odsimulovaná v prostředí HFSS. Z těchto charakteristik vyplývá, že realizovaná anténa odpovídá do značné míry simulacím, jež jsou uvedeny v předchozích částech tohoto dokumentu. Charakteristiky se tvarově shodují. Liší se ve velikosti zisku, a to o 1-2 dB oproti simulaci. Tato odlišnost může být způsobena nedokonalou nastavenou simulací, případně nedokonalými podmínkami měření v bezodrazové komoře.



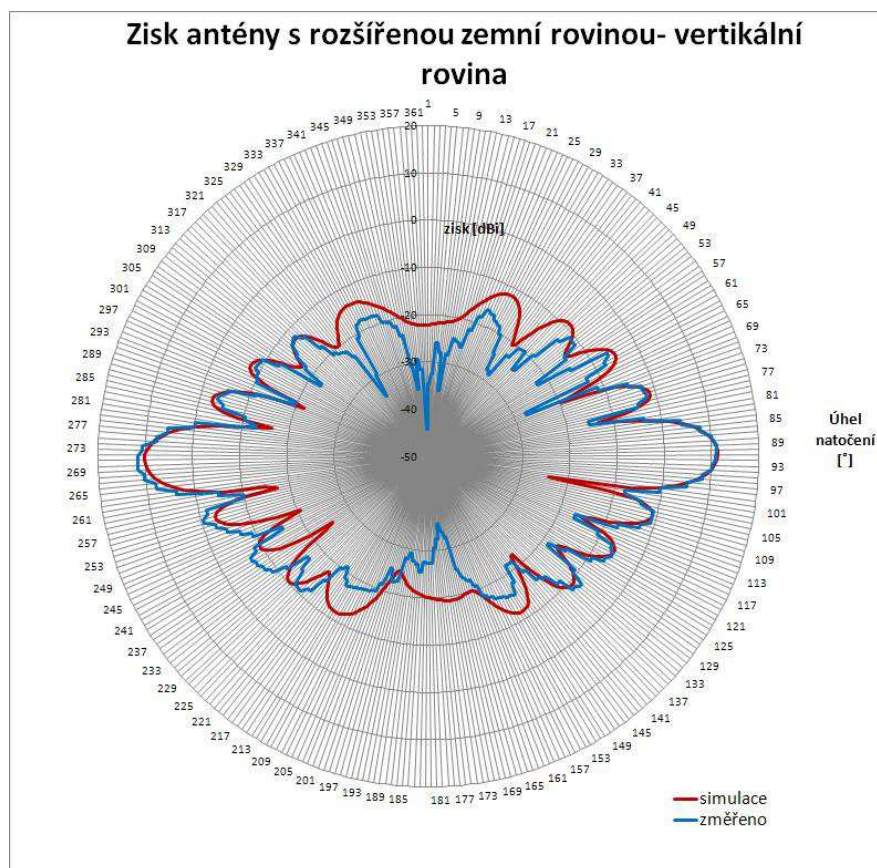
Obr. 5.10: Zisk antény s malou zemní rovinou - horizontální rovina



Obr. 5.11: Zisk antény s rozšířenou zemní rovinou - horizontální rovina



Obr. 5.12: Zisk antény s malou zemní rovinou - vertikální rovina



Obr. 5.13: Zisk antény s rozšířenou zemní rovinou - vertikální rovina

6 ZÁVĚR

Cílem tohoto projektu bylo navrhnout všesměrovou anténu, která bude v horizontální rovině zářit všemi směry a ve vertikální rovině bude mít vyzařovací diagram úzký. Po předběžném prostudování literatury byl zvolen nejvhodnější typ antény, a to slotová anténa, která splňuje vstupní požadavky. Na základě vybraného typu antény byla prostudována odborná literatura a podle teoretických znalostí a poznatků byly navrženy a spočítány rozměry této antény.

V druhé části bylo podrobně prostudováno ovládání, funkce a možnosti práce v simulačním prostředí Ansoft HFSS verze 11. V tomto programu byl pro praktické ověření vlastností vlnovodu proveden jeho návrh a simulace. Konkrétně byl modelován vlnovod R100 buzený dominantním videm TE_{10} a výsledné rozložení pole odpovídá teoretickým předpokladům. Dále již byla modelována samotná anténa s parametry vypočtenými na základě teoretických poznatků. Tento model potvrdil správnost teoretických rozměrů antény.

Problémem byla neuniformnost vyzařovací charakteristiky v horizontální rovině způsobena konečnými rozměry zemnicí plochy, která je u této antény tvořena širší stěnou vlnovodu. Tato skutečnost byla zmírněna zvětšením zemní roviny.

Simulace byly provedeny za použití klasického Radiation Boundary a také za použití PML. Rozdílnost výsledků simulace za použití PML je oproti Radiation Boundary takřka zanedbatelná. Dále byla uskutečněna analýza komerční antény DB6NT a provedena diskuze rozdílů s výše uvedenými simulacemi.

Na základě simulací, jež byly provedeny, byla realizována anténa s možností dodatečné montáže prvků rozšiřujících zemní rovinu. Obě realizované verze se téměř shodují s provedenými simulacemi. Rozdíl je ve velikosti zisku, a to o 1-2 dB oproti simulaci. Tato odlišnost může být způsobena nedokonalě nastavenou simulací, případně nedokonalými podmínkami měření v bezodrazové komoře.

LITERATURA

- [1] BALANIS, A. C. *Antenna Theory: Analysis and Design, 2/E*. New York: J. Wiley & Sons, 1996.
- [2] HANUS, S., SVAČINA, J. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika-Přednášky*. Skripta FEKT VUT, BRNO 2004., str. 149-166
- [3] *Malá československá encyklopedie*. Praha: Academia, 1984
- [4] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Skripta FEKT VUT, BRNO 2009.
- [5] WADE, P. *Microwave Antenna book-part 1.7* [online]. c1994, aktualizováno 27. 11. 2012 [citováno 5. 12. 2012]. Dostupné na www: <<http://www.qsl.net/n1bwt/contents.htm>>.
- [6] RISMAN, P. O. *Microwave physic* [online]. c2003, aktualizováno 2. 3. 2011 [citováno 5. 12. 2012]. Dostupné na www: <<http://por.se/sitemap.html>>.
- [7] DĚDEK, L., DĚDKOVÁ, J. *Elektromagnetismus*. Vysoké učení technické v Brně. 1. vyd. 1998. 229 s. ISBN 80-214-1106-6
- [8] BOOKER, H.G. *Slot Aerieals and theit relation to complementary wire aerials*. J.IEE, 1946, str. 620-626
- [9] COLLIN, R.E., ZUCKER, F.J. *Antenna Theory-part1*. McGraw-Hill, 1969, str. 565-567
- [10] ANSOFT. *HFSS online help*. [nápověda aplikace HFSS verze 11]. c2008
- [11] HEBELKA, V. *Širokopásmová anténa pro pásmo od 5GHz do 10GHz*: Bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně. 41s.
- [12] SMA-KFD31 connector, *SEI* [online]. c2008, [citováno 20. 3. 2013]. Dostupné na www: <<http://www.seimw.com/connectors/SMA-KFD31.jpg>>
- [13] KUHNE, M. *10GHz Waveguide Slot Antenna* [online]. c1999, aktualizováno 4. 10. 2010 [citováno 24. 3. 2013]. Dostupné na www: <<http://www.dl6nci.de/slotant.htm>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

λ	Vlnová délka
ϱ	Činitel odrazu
c	Rychlost světla $c = 3 \cdot 10^8$ m/s
D_{max}	Činitel směrovosti
f	Frekvence
<i>FEM</i>	metoda konečných prvků
G	Zisk
P	Činný výkon
<i>PSV</i>	Poměr stojatého vlnění
R_s	Povrchový odpor
<i>TE</i>	Transverzálně elektrická vlna
<i>TM</i>	Transverzálně magnetická vlna
v	Rychlost
Z_0	Charakteristická impedance
Z_k	Impedance zátěže

SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace

Výrobní výkres antény.....	3-ELE 001
Výrobní výkres pístku	4-ELE 002
Výrobní výkres zemní desky	4-ELE 003
Výrobní výkres hranolu	4-ELE 004