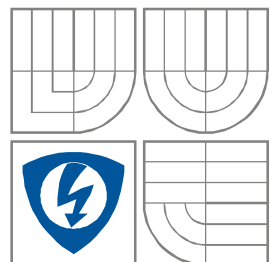




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VÍCEPÁSMOVÁ MAGNETICKÁ ANTÉNA

MULTIBAND MAGNETIC ANTENNA

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

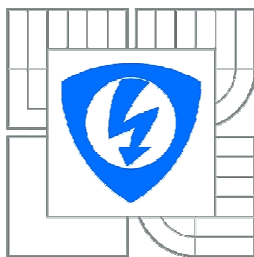
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Martin Ryšánek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních

technologií Ústav

radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Martin Ryšánek

ID: 80491

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Vícepásmová magnetická anténa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem vícepásmové magnetické antény. V programu COMSOL Multiphysics vytvořte rotačně souměrný numerický model této antény a detailně prozkoumejte její vlastnosti (parametrická analýza).

Formulujte jedno-kriteriální optimalizační úlohu, zahrnující impedanční přizpůsobení v pracovních pásmech. Na základě výsledků parametrické analýzy stanovte vhodné stavové proměnné. Optimalizační úlohu řešte globálním skriptem implementovaným v programu MATLAB.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, C. A. Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition. New York: J. Wiley and Sons, 2005.

[2] DEB, K. Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. Chichester: J. Wiley and Sons, 2001.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 21.5.2010

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Martin Ryšánek
Bytem: Vážany nad Litavou 228, Slavkov u Brna, 684 01
Narozen/a (datum a místo): 18. července 1985 ve Vyškově

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vícepásmová magnetická anténa

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 21. května 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Práce se zabývá parametrickou analýzou vícepásmové magnetické antény a objasňuje princip její činnosti. Je zde rovněž podrobně popsána optimalizace antény metodou roje částic pro impedanční přizpůsobení v různých kmitočtových pásmech.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vícepásmová magnetická anténa, COMSOL Multiphysics, metoda roje částic (PSO)

ABSTRACT

The thesis deals with a parametric analysis of a magnetic multiband antenna and explains the principle of its operation. In the thesis, an optimization of the antenna by the particle swarm optimization is performed in order to meet impedance matching in prescribed frequency bands.

KEYWORDS

Multiband magnetic antenna, COMSOL Multiphysics, particle swarm optimization (PSO)

RYŠÁNEK, M. *Vícepásmová magnetická anténa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 44 s. Vedoucí diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Vícepásmová magnetická anténa jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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 21. května 2010

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne 21. května 2010

.....
podpis autora

Obsah

1. Cíl práce	9
2. Popis a princip činnosti	9
3. Numerické modelování.....	10
3.1. Grafický návrh v programu COMSOL.....	11
3.2. Inicializace sítě (Mesh).....	12
3.3. Výpočet elektromagnetického pole v okolí antény	12
3.3.1. Zobrazení činitele odrazu s_{11}	13
3.3.2. Zobrazení směrových charakteristik vzdáleného pole	13
3.3.3. Export modelu do m-file	13
4. Parametrická analýza	16
5. Optimalizace	20
5.1. Metoda roje částic (PSO).....	20
5.2. Optimalizační skript (R, H, L).....	21
5.3. Výsledky optimalizace (R, H, L)	23
5.4. Optimalizační skript (ϵ_r).....	26
5.5. Výsledky optimalizace (ϵ_r).....	26
5.5.1. R = 100 mm, H = 65 mm, L = 45 mm	27
5.5.2. R = 150 mm, H = 65 mm, L = 45 mm	28
5.5.3. R = 200 mm, H = 65 mm, L = 45 mm	29
5.5.4. R = 230 mm, H = 65 mm, L = 45 mm	31
6. Vlastnosti magnetické antény.....	34
6.1. Směrové charakteristiky.....	34
6.2. Rozložení elektromagnetického pole	35
6.3. Vliv PEC a PMC na vlastnosti antény.....	37
7. Ověření vlastností antény programem CST.....	38
7.1. Modelování a simulace	38
7.2. Výsledky simulace.....	42
8. Závěr	43
9. Seznamy.....	44
9.1. Seznam použité literatury	44
9.2. Seznam použitých zkratek.....	44

1. Cíl práce

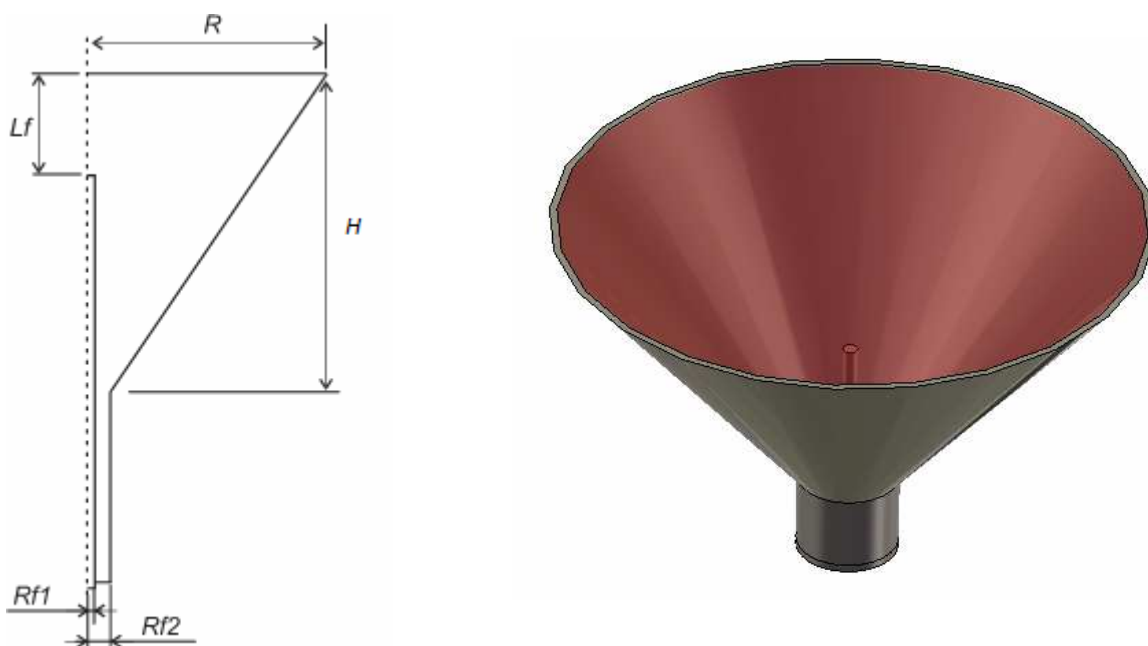
Cílem této práce je navrhnout vícepásmovou magnetickou anténu numerickou simulací antény v programu COMSOL Multiphysics a globální optimalizací numerického modelu. Stavovými proměnnými optimalizační úlohy jsou rozměry antény a permitivita dielektrika uvnitř anténní struktury. Kritériem optimalizace je impedanční přizpůsobení antény v určených pracovních pásmech.

2. Popis a princip činnosti

Vícepásmová magnetická anténa kombinuje principy koaxiálního přenosového vedení (spodní část struktury) a kruhové trychtýřové antény (vrchní část struktury). Skládá se z koaxiálního vedení s charakteristickou impedancí 50Ω , jehož vnější vodič je rozšířen tak, aby vytvořil trychtýřovou anténu.

Prostor mezi vnitřním a vnějším vodičem koaxiálního přenosového vedení stejně tak celý trychtýř až po ústí antény je vyplněn dielektrikem s relativní permitivitou ϵ_r .

Vzhledem k tomu, že provedení antény je rotačně souměrné, můžeme anténu modelovat jako dvojrozměrnou rotačně souměrnou strukturu, což vede k významnému zkrácení doby potřebné pro výpočet. Vertikální řez a model antény je nakreslen na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Magnetická anténa.

Při vybuzení se podél přenosového vedení šíří příčně elektromagnetická vlna. Její siločáry magnetického pole mají tvar prstenců obíhajících okolo vnitřního vodiče napáječe o poloměru R_{f1} . Siločáry elektrického pole mají směr radiály.

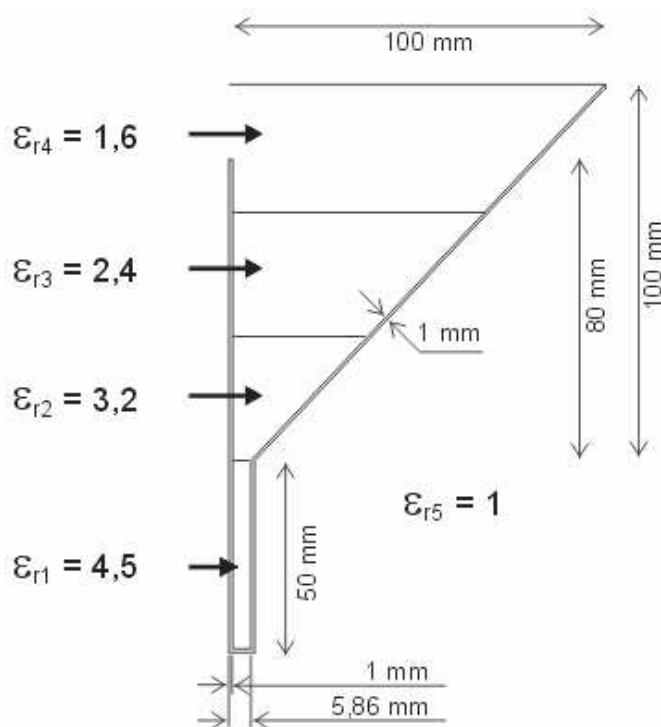
Ve vzdálenosti L_f od ústí antény je střední vodič koaxiálního napáječe ukončen, což má za následek potlačení radiální složky intenzity elektrického pole u ústí antény. Prstence intenzity magnetického pole jsou proto na apertuře dominantní. Prstence intenzity magnetického pole lze považovat za smyčku magnetického proudu, která se chová jako elektrický dipól, jenž je na plochu smyčky kolmý [4].

Rezonanční frekvence smyčkové antény závisí na elektrickém poloměru smyčky kR , kde $k = 2\pi/\lambda$, a λ je vlnová délka. Anténu je proto možné ladit změnou poloměru apertury.

Frekvenční odezva může být také ovlivněna délkou trychtýře H , hloubkou zanoření středního vodiče L_f a permitivitou ϵ_r .

3. Numerické modelování

V této kapitole je popsán kompletní postup návrhu struktury antény, výpočet činitele odrazu s_{11} a zobrazení směrových charakteristik na zvolených frekvencích. Níže popsáný postup je platný pro verzi COMSOL Multiphysics 3.5a. Parametry antény jsem zvolil následovně: poloměr trychtýře $R = 100$ mm, výška trychtýře $H = 100$ mm a zanoření středního vodiče $L_f = 20$ mm. Ve zbytku práce již nebudu parametr zanoření vodiče používat a z praktických důvodů ho nahradím parametrem L , který udává délku středního vodiče ($L = H - L_f$). V tomto případě je tedy $L = 80$ mm. Vnitřní průměr napáječe je 5,86 mm, což odpovídá charakteristické impedanci 50Ω . Vnitřek trychtýře je vyplněn dielektrikem, které je rozděleno na třetiny. To nám umožní vytvořit dielektrický impedanční transformátor, díky kterému můžeme dosáhnout lepšího impedančního přizpůsobení. Jednotlivé permitivity mají hodnotu $\epsilon_{r1} = 4,5$, $\epsilon_{r2} = 3,2$, $\epsilon_{r3} = 2,4$, $\epsilon_{r4} = 1,6$. Relativní permitivita okolí je $\epsilon_{r5} = 1$. Výpočet budeme provádět na frekvenci 600 MHz až 6 GHz s krokem 18 MHz.



Obr 3.1 Rozměry modelované antény

3.1. Grafický návrh v programu COMSOL

Před samotným modelováním musíme nejdříve zvolit vhodný typ analyzované struktury. Pro naše účely se nejlépe hodí dvojrozměrná rotační struktura. Kvůli rotační symetrii budeme kreslit jen jednu polovinu antény.

Vzhledem k tomu, že COMSOL počítá elektrické pole metodou konečných prvků a jelikož je anténa otevřená struktura, bylo by nutné rozdělit na konečné prvky celý nekonečný prostor, který anténu obklopuje. Proto musíme kolem antény vytvořit kulovou dokonale přizpůsobenou vrstvu a na konečné prvky rozdělit pouze prostor uvnitř antény.

Po zakreslení analyzované struktury je třeba zadat okrajové podmínky jednotlivých segmentů. V našem případě využijeme **Axial symmetry** (osová symetrie), **Port, Scattering boundary condition** (přizpůsobená okrajová podmínka) a **Perfect electric conductor** (dokonalý elektrický vodič).

MODEL NAVIGATOR

1. Nejprve zvolíme typ analyzované struktury, v našem případě dvourozměrnou rotační strukturu **Axial symmetry (2D)**, kterou najdeme v rozbalovacím seznamu **Space dimension**.
2. Poté pokračujeme specifikací modelu. V modulu **RF Module** zvolíme **Electromagnetics Wave** (elektromagnetické vlny) a dvakrát klikneme na **TM Waves** (transversálně magnetická vlna).

GEOMETRIE MODELU

1. Klikneme na tlačítko **Line** a zakreslíme vlastní strukturu antény. Konkrétní souřadnice jsou (0,001; 0,08), (0;0,08), (0; -0,051), (0,00686; -0,051), (0,00686; 0), (0,1; 0,099), (0,1; 0,1), (0,00586; 0), (0,00586; -0,05), (0,001; 0,05), (0,001; 0,08). Abychom takto mohli strukturu zakreslit, je třeba ručně nastavit rozložení mřížky. V menu **Options - Axes/Grid Settings - Grid** zadáme do polí *Extra r* a *Extra z* výše uvedené hodnoty.
2. Nyní si vymežíme oblasti výpočtu elektromagnetického pole pomocí kružnice dokonale přizpůsobené vrstvy. Klikneme na tlačítko **Circle (Centered)** a zadáme poloměr kružnice $r = 0,3$.
3. Nakonec ještě nakreslíme obdélník s vrcholy (0; 0,3) a (-0,3; -0,3), který nám překrývá část levé poloviny v grafickém editoru. Označíme všechny nakreslené objekty a stiskneme tlačítko **Diference**, čímž vyčistíme levou polovinu grafického editoru (díky symetrii se zde zrcadlí struktura z pravé poloviny). Tím máme zakreslenou základní konstrukci magnetické antény.
4. Nyní nám ještě zbývá oddělit prostředí s různou permitivitou (vzduch mimo anténu, dielektrikum uvnitř antény). To uděláme zakreslením čtyř čar **Line**. (0,1; 0,1) do bodu (0; 0,1). (0,1; 0,066) do bodu (0,001; 0,066). (0,1; 0,033) do bodu (0,001; 0,033) a nakonec (0,1; 0) do bodu (0,001; 0).

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI MODELU

1. V menu **Physics** otevřeme dialogové okno **Boundary Settings** a nastavíme okrajové podmínky jednotlivých segmentů podle následující tabulky:

HRANICE	1,3, 5	8	30, 31	2, 4, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 22, 23, 26, 28, 29
Okrajová podmínka	Osová Symetrie	Port	Rozptylová okrajová podmínka	Dokonalý elektrický vodič
Typ vlny			Kulová vlna	

- Nastavíme budící port (odpovídá segmentu 8). Zvolíme proto segment 8 a na záložce *Condition* zaškrtneme **Wave excitation at this port**, výkon P_{in} nastavíme na 1 W. Poté se přepneme na záložku port a z rozbalovací nabídky *Mode specification* zvolíme Coaxial.

Nakonec ještě nastavíme relativní permitivity jednotlivých částí dielektrika. V menu *Physics – Subdomain* nastavíme jednotlivé podprostory podle následující tabulky:

Subdomain	ϵ_r
1	1
2	1,6
3	4,5
4	3,2
5	2,4

Tab 3.1 Přiřazení ϵ_r k jednotlivým podprostorům

3.2. Inicializace sítě (Mesh)

Tento krok je důležitou částí návrhu. Nevhodně zvolená síť může způsobovat naprosto chybné výsledky. Navíc, počet vygenerovaných buněk výrazně ovlivňuje dobu výpočtu rozložení elektromagnetického pole. Pokud zvolíme síť příliš řídkou, výsledky jsou zatíženy chybou. Naopak při velmi jemné mřížce může být výpočet neúnosně časově náročný. Je proto nutné zvolit určitý kompromis. Jako nevhodné se u této struktury jeví použití automaticky generované mřížky, kterou COMSOL nabízí. Nicméně v programu máme široké možnosti uživatelského nastavení. Můžeme nastavovat maximální velikosti prvků v okolí jednotlivých segmentů a bodů, stejně tak uvnitř jednotlivých podprostorů. U této struktury se po experimentálním ověření jeví jako nejvhodnější nastavení maximální velikosti prvku sítě uvnitř antény na $6e-4$. Vně (vzduch) postačuje maximální velikost $2,5e-2$. Toto nastavení je dostatečně přesné a zároveň časově přijatelné.

V menu **Mesh** zvolíme **Free Mesh Parametrs** (F9) a na záložce *Subdomain* zadáme do pole *Maximum element size* maximální velikosti prvků pro jednotlivé podprostory. V tomto konkrétním případě $6e-4$ pro *Subdomain 2, 3, 4, 5* a $2,5e-2$ pro *Subdomain 1*.

3.3. Výpočet elektromagnetického pole v okolí antény

Vzhledem k tomu, že budeme chtít analyzovat anténu na více frekvencích, klikneme na **Solver Parameters** (F11) a v seznamu **Solver** zvolíme položku **Parametric**. Za název parametru zvolíme např. **frequency** a do kolonky **Parameter Values** zadáme pomocí tlačítka **Edit** námi požadovaný vektor frekvencí (popř. ručně $range(600e6,16e6,6.0e9)$).

V dialogu **Scalar Variables** v menu **Physics** do pole frekvence zadáme název našeho vytvořeného parametru, tedy **frequency**. Stisknutím tlačítka **Solve** se zahájí výpočet elektromagnetického pole v okolí antény pro zvolené frekvence.

3.3.1. Zobrazení činitele odrazu s_{11}

Po úspěšném dokončení výpočtu, můžeme zobrazit činitel odrazu s_{11} na vstupu analyzované antény. Otevřeme **Postprocessing - Domain Plot Parameters** a pro typ grafu **Point Plot** vyznačíme všechny frekvence ze seznamu **Solutions to plot**. Na záložce **Point** označíme bod 1 a ze seznamu **Predefined quantities** vybereme *S-parameter (dB)*, popř. do pole **Expressions** zadáme *S11dB_rfwh*. Kliknutím na tlačítko **Apply** zobrazíme závislost činitele odrazu na frekvenci.

3.3.2. Zobrazení směrových charakteristik vzdáleného pole

V menu **Physics** zvolíme **Boundary settings**. Označíme si segmenty které nám ohraničují hranici výpočtu, v tomto případě 30 a 31. Přejdeme na záložku **Far-Field** a do pole **Name** zadáme název proměnné E_{far} a klikneme na tlačítko OK. Zvolíme **Update Model**, který se nachází v menu **Solve**, čímž aktualizujeme model.

Pro samotné zobrazení vyzařovací charakteristiky opět otevřeme okno **Domain Plot Parameters** a ze seznamu **Solution to use** vybereme několik požadovaných frekvencí. Přejdeme na záložku **Line/Extursion** a označíme opět hranice 30 a 31. Pokud chceme, aby se elevační úhel zobrazoval ve stupních, zadáme do pole **Expression** u položky x-axis data vzorec $\text{atan2}(z,r)$ a jako jednotku zvolíme stupně ($^{\circ}$). Nyní již jen do pole **Expression** napíšeme $\text{norm}E_{far}dB$ po stisku tlačítka **Apply** se zobrazí vyzařovací charakteristika.

3.3.3. Export modelu do m-file

Je zřejmé, že uvedený postup je poněkud těžkopádný a při provádění parametrické analýzy, popř. optimalizace, bychom museli při každé změně rozměrů kreslit a nastavovat celý model znovu. Můžeme proto využít exportu již jednou vytvořeného modelu do m-file, který poté můžeme pohodlně zpracovávat v programu Matlab. Je vhodné upozornit, že program COMSOL zaznamenává jakoukoliv změnu modelu. Pokud se chceme vyhnout zbytečnému zneřehlednění výsledného skriptu je vhodné celý model zakreslit a nastavit na první pokus, tj. bez jakýchkoliv zpětných úprav.

Samotný export je velice jednoduchý. Podle výše popsaného návodu vytvoříme model antény, provedeme výpočet včetně zobrazení závislosti činitele odrazu s_{11} na frekvenci a poté model uložíme přes volbu *File -> Save As (*.m)*.

Nyní je potřeba provést korekce právě vytvořeného skriptu. Ze všeho nejdříve ho předefinujeme na funkci, která bude při zvolených vstupních parametrech (poloměr trychtýře ' R ', výška trychtýře ' H ', výška středního vodiče ' L ' a požadované frekvence ' f ') vracet odpovídající činitel odrazu s_{11} .

```
function [out_S11] = model(R, H, L, f)
```

Aby námi vytvořená funkce počítala činitel odrazu pro zadané vstupní parametry, musíme z fixně daných hodnot všech tří rozměrů vytvořit proměnné, definované vstupními parametry funkce. Jak již bylo uvedeno při ručním kreslení, celá vlastní

struktura je vykreslena pomocí funkce *line*. Ve zdrojovém kódu je uvozena příkazem *curve2* ve tvaru:

```
curve2([x_zacatek, x_konec], [Y_zacatek, Y_konec], [1, 1]),
```

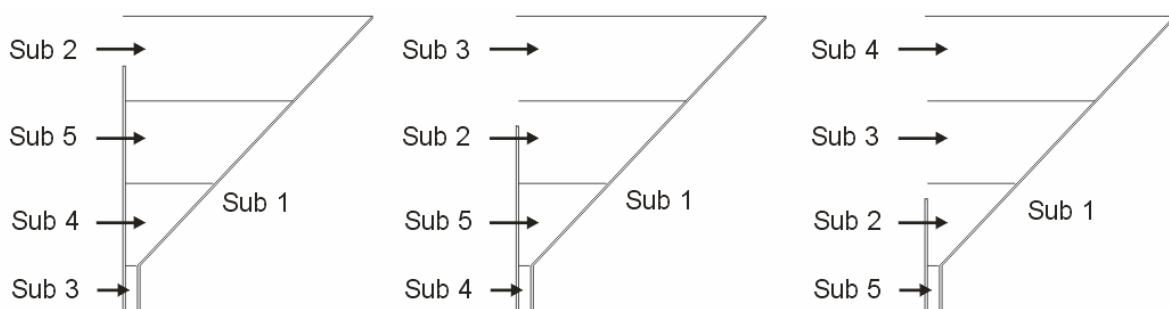
Výsledná úprava je tedy v tomto tvaru:

```
% Geometry
carr={curve2([0.0010,0],[L,L],[1,1]), ... %1
curve2([0,0],[L,-0.051],[1,1]), ... %2
curve2([0,0.00686],[-0.051,-0.051],[1,1]), ... %3
curve2([0.00686,0.00686],[-0.051,0],[1,1]), ... %4
curve2([0.00686,R],[0,(H-0.001)],[1,1]), ... %5
curve2([R,R],[H-0.001,H],[1,1]), ... %6
curve2([R,0.00586],[H,0],[1,1]), ... %7
curve2([0.00586,0.00586],[0,-0.05],[1,1]), ... %8
curve2([0.00586,0.0010],[-0.05,-0.05],[1,1]), ... %9
curve2([0.0010,0.0010],[-0.05,L],[1,1])}; %10

% rozdeleni dielektrika na podprostory
carr={curve2([0,R],[H,H],[1,1])};
g5=geomcoerce('curve', carr);
carr={curve2([ODDEL1,R],[0.6666*H],[0.6666*H],[1,1])};
g6=geomcoerce('curve', carr);
carr={curve2([ODDEL2,R],[0.3333*H],[0.3333*H],[1,1])};
g7=geomcoerce('curve', carr);
carr={curve2([ODDEL3,R],[0,0],[1,1])};
g8=geomcoerce('curve', carr);
```

Tím jsme vytvořili tři klíčové proměnné, jejichž změnou budeme hledat požadované impedanční přizpůsobení.

Nepříjemnou vlastností je, že COMSOL čísluje jednotlivé podprostory a segmenty v závislosti na tom, ve které části dielektrika je ukončen střední vodič. V podstatě mohou vzniknout tři případy, a to že střední vodič je ukončen v první, druhé, resp. třetí třetině dielektrika. V závislosti na tom jsou jednotlivé podprostory očíslovány následovně:



Obr 3.2 Rozdělení podprostorů v závislosti na zakončení středního vodiče

Stejně tak je třeba ošetřit očíslování jednotlivých segmentů a souřadnic čar rozdělující dielektrikum (musí být zakončena u středního vodiče, jinak dojde k jeho protnutí, což má za následek přidání a promíchání dalších segmentů). To je provedeno následovně:

```

% ===== Prirazeni EpsX k SubX = a pocatku oddelovaci cary =====
if L>0.6666*H,...
    Sub1=Eps5; Sub2=Eps4; Sub3=Eps1; Sub4=Eps2; Sub5=Eps3;...
    ODDEL1=0.001;ODDEL2=0.001;ODDEL3=0.001;...
    Okr7=2;Okr8=4;Okr9=2;Okr10=3;Okr12=3;end

if 0.3333*H<L & L<0.6666*H,...
    Sub1=Eps5; Sub2=Eps3; Sub3=Eps4; Sub4=Eps1; Sub5=Eps2;...
    ODDEL1=0;ODDEL2=0.001;ODDEL3=0.001;...
    Okr7=1;Okr8=3;Okr9=2;Okr10=4;Okr12=3;end

if L<0.3333*H,...
    Sub1=Eps5; Sub2=Eps2; Sub3=Eps3; Sub4=Eps4; Sub5=Eps1;...
    ODDEL1=0;ODDEL2=0;ODDEL3=0.001;...
    Okr7=1;Okr8=3;Okr9=1;Okr10=3;Okr12=4;end
% =====

```

Okrajové podmínky jsou rovněž indexovány v závislosti na tom v jakém pořadí je nastavujeme. Aby nám souhlasili výše uvedené proměnné Okr# je nutné je zvolit takto:

```
bnd.type = {'ax','E0','cont','port','SC'}; %ax=1,vodic=2,cont=3,port=4
```

Tím jsme nastavili, že číslo 1 znázorňuje osovou symetrie, 2 dokonalý vodič, 3 průsečík, 4 port a 5 rozptylová okrajová podmínka.

Nyní již můžeme nahradit pevně zadané indexy proměnnými, které se liší v závislosti na tom, ve které části dielektrika je střední vodič umístěn

```

bnd.modespec = {'userdef','userdef','userdef','coaxial','userdef'};
bnd.ind = [1,2,1,2,1,3,Okr7,Okr8,Okr9,Okr10,2,Okr12,2,3,2,3,2,2,2,3,3,2,...
           2,3,3,2,3,2,2,5,5];

```

a přiřadit relativní permitivity ke správné podoblasti.

```

equ.epsilonr = {Sub1,Sub2,Sub3,Sub4,Sub5};
equ.ind = [1,2,3,4,5];

```

Na závěr ještě nahradíme rozsah počítaných frekvencí proměnnou f

```

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem, ...
    'complexfun','on', ...
    'solcomp',{'Hphi'}, ...
    'outcomp',{'Hphi'}, ...
    'blocksize','auto', ...
    'pname','freq', ...
    'plist',{'f'} ←
    'oldcomp',{'});

```

Tím máme provedenou úpravu skriptu pro výpočet činitele odrazu. Postupným krokováním skriptu jsme zjistili, že činitel odrazu je uložen v matici *pline*. Tato matice slouží jako jedna z proměnných pro vykreslovací funkci *postscrolplot* a *fplot*.

Nadefinováním této matice jako globální proměnné ji zpřístupníme pro celý skript. Na závěr ještě vložíme výpis dat:

```
out_S11 = pline (2,1:end-1)
```

*Pozn.: Pokud chceme interpretovat výsledky v jiném programovém prostředí než je Matlab, musíme provést export dat ze souboru grafu *.fig. To provedeme následujícím skriptem:*

```
open('nazev_grafu.fig');
```

```
h = gcf;  
line = findall(h, 'Type', 'Line');  
x_line1 = get(line(1), 'xdata'); %souradnice x  
y_line2 = get(line(1), 'ydata'); %souradnice y
```

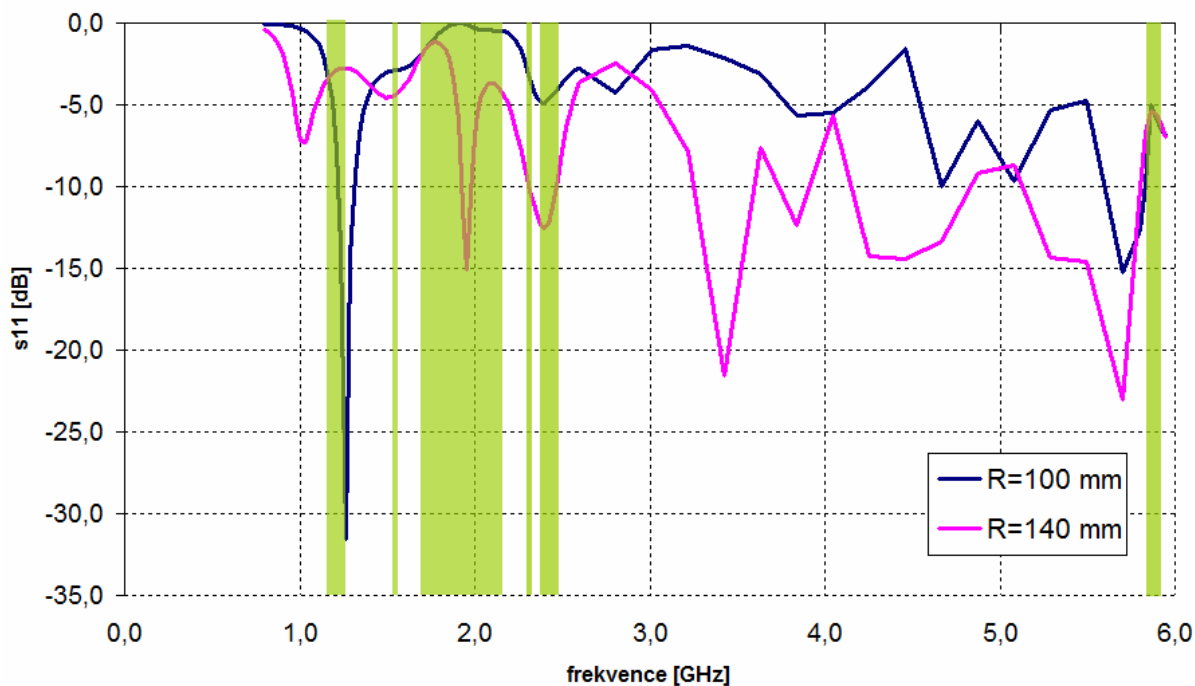
4. Parametrická analýza

V této kapitole se pokusím na základě změny velikosti jednotlivých rozměrů antény dosáhnout impedančního přizpůsobení v následujících pracovních kmitočtech viz. Tab 4.1. Vzhledem k tomu, že poměrně široké pásmo 2500-5800 MHz je pro uvedené zadání nezajímavé, jsou pro toto pásmo v níže uvedených grafech prováděny výpočty s dosti velkým frekvenčním skokem a slouží pouze k orientačnímu přehledu.

f [MHz]	Priorita (1-10)
1176-1278	10
1575,42	10
2320-2345	8
2400-2485	10
5850-5925	5

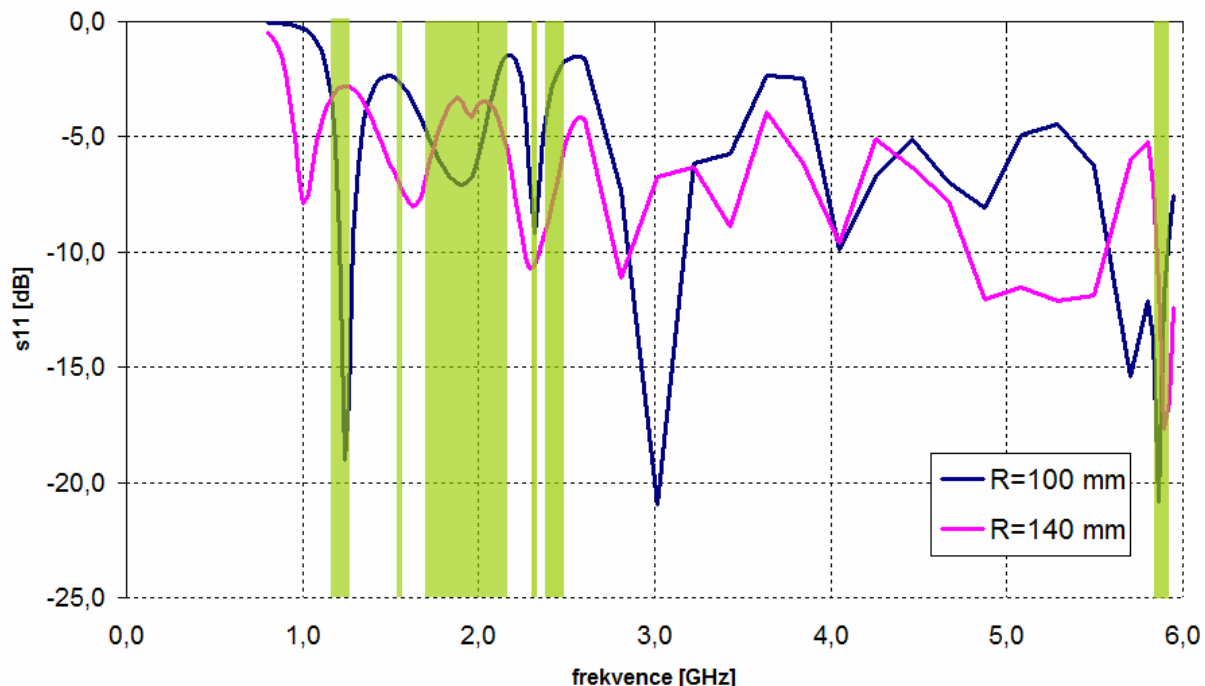
Tab 4.1 Požadovaná pracovní pásma antény

V následujících grafech jsou zobrazeny hodnoty činitele odrazu v závislosti na frekvenci pro rozměry poloměru apertury 100 mm a 140 mm při výšce antény 80 mm, 65 mm, 40 mm a hloubce zanoření středního vodiče 10 mm a 20 mm. Relativní permitivita vloženého dielektrika byla zvolena na hodnotu $\epsilon_r = 4,5$, poloměr vnějšího vodiče napáječe je 5,86 mm, poloměr středního vodiče 1 mm. Kmitočtová pásma, ve kterých chceme dosáhnout impedančního přizpůsobení jsou zvýrazněna zeleně.



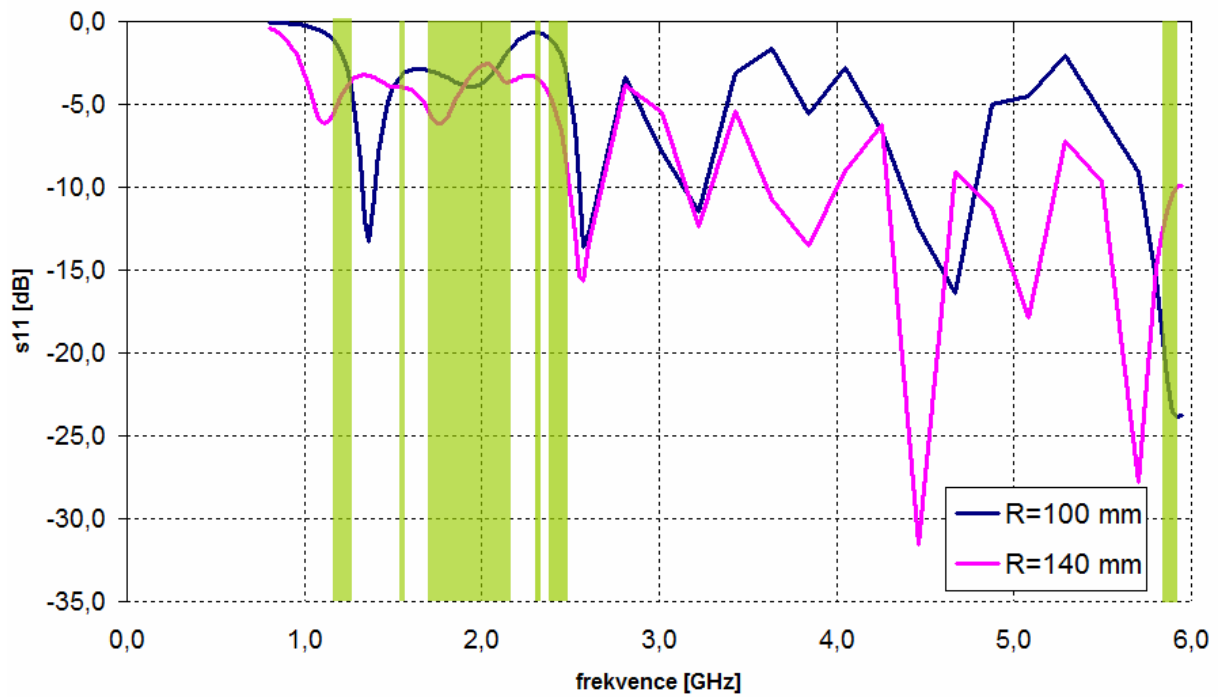
Obr. 4.1 Činitel odrazu ($H=80$ mm, $L=70$ mm)

Při takto zvolených rozměrech antény simulace nevykazuje dobré impedanční přizpůsobení. Při velikosti poloměru $R = 100$ mm je modul s_{11} v pásmu 1710-2170 MHz blízky nule, v ostatních má hodnotu přibližně -5 dB. U poloměru 140 mm je situace o něco lepší. Zcela je přizpůsobeno pásmo 2320-2345 a 2400-2485 MHz, nicméně ostatní pásma se pohybují opět okolo -5 dB.

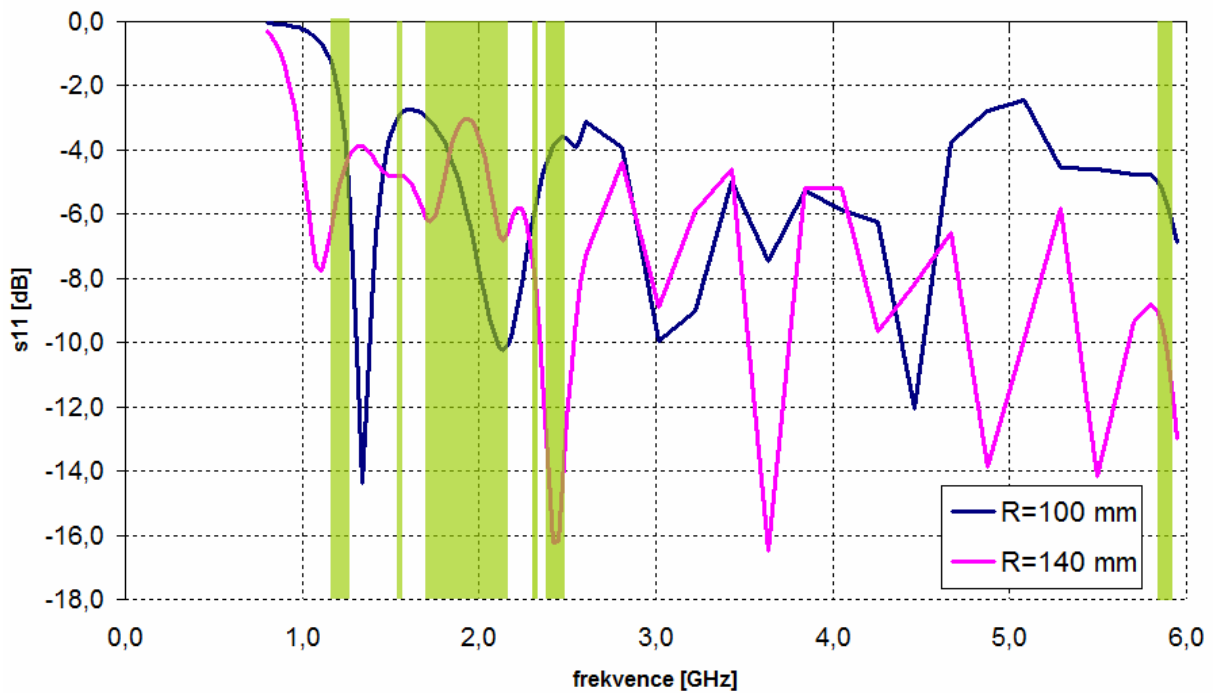


Obr. 4.2 Činitel odrazu ($H=80$ mm, $L=60$ mm)

Pokud změním hloubku zanoření středního vodiče na 20 mm, situace se nezlepší. Impedančně přizpůsobené bude pouze pásmo 5850-5925 MHz a to pro oba poloměry R .

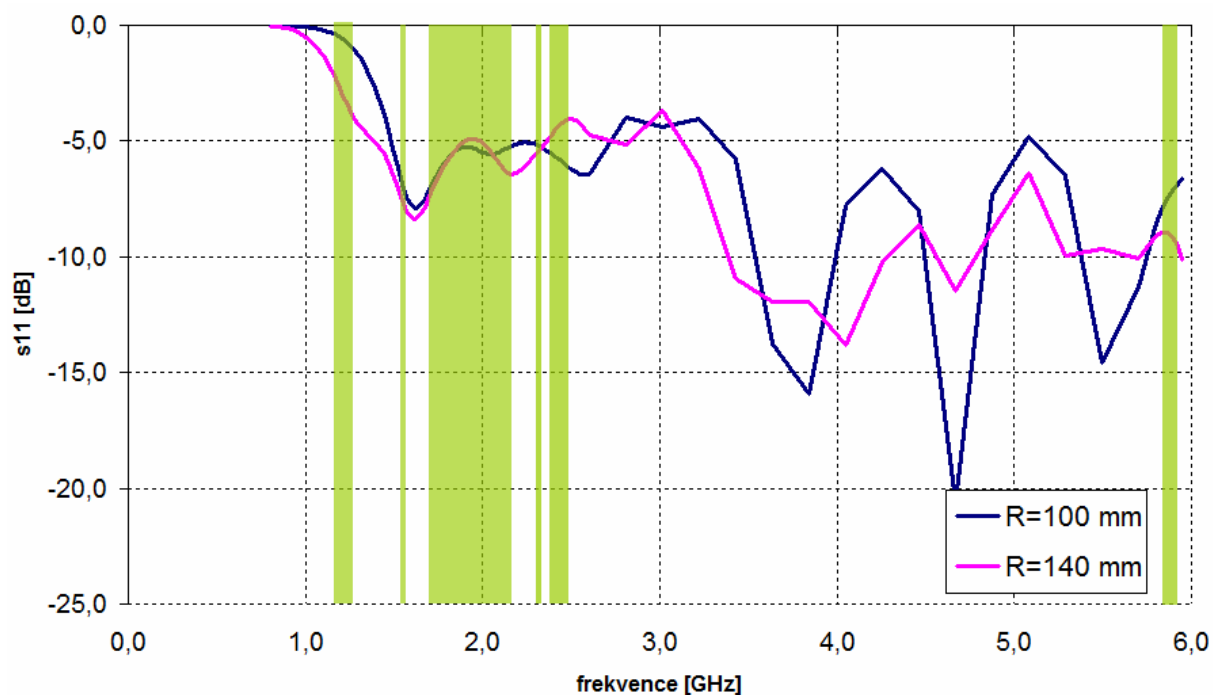


Obr. 4.3 Činitel odrazu ($H=65$ mm, $L=55$ mm)

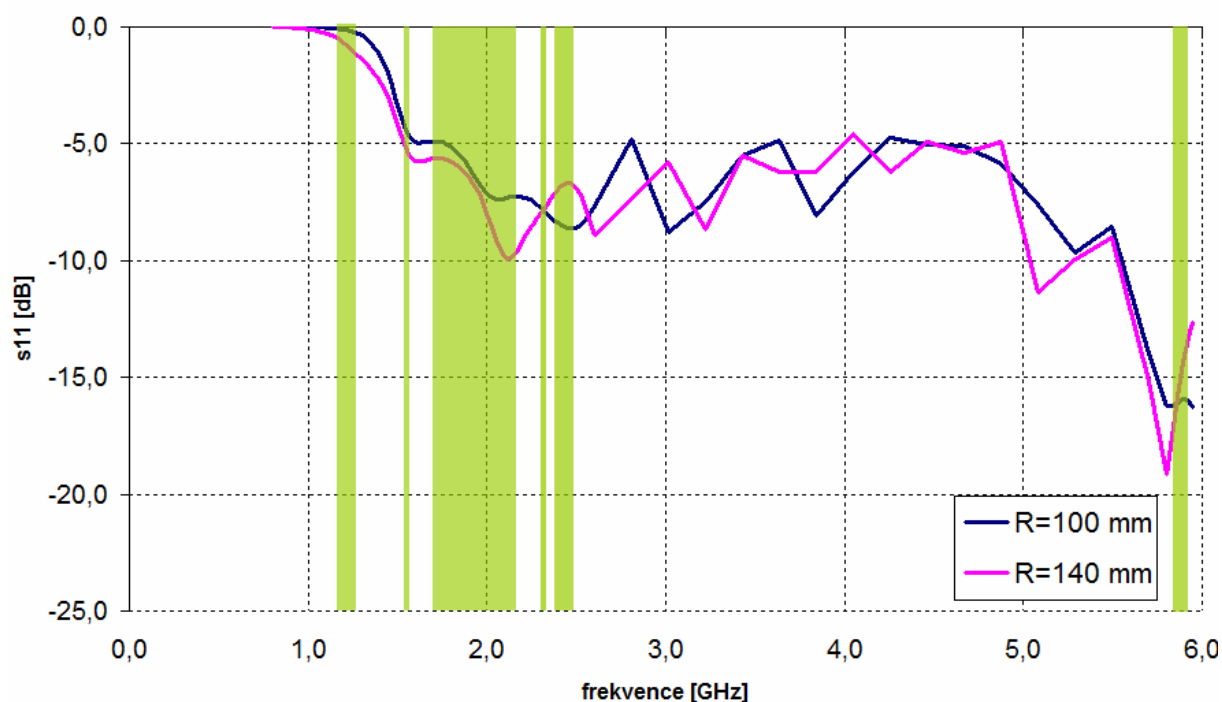


Obr. 4.4 Činitel odrazu ($H=65$ mm, $L=45$ mm)

Jestliže zvolíme výšku trychtýře 65 mm, situace se mírně zlepší. Podaří se dosáhnout přizpůsobení ve třech pracovních pásmech (2320-2345 MHz, 2400-2485 MHz, 5850-5925 MHz), a to za předpokladu, že anténa bude mít průměr 140 mm a hloubka zanoření středního vodiče bude 20 mm.



Obr. 4.5 Činitel odrazu ($H=40$ mm, $L=30$ mm)



Obr. 4.6 Činitel odrazu ($H=40$ mm, $L=20$ mm)

Pokud zvolíme výšku trychtýře 40 mm, dosáhneme přizpůsobení v pásmu 5850-5925 MHz. Můžeme si všimnout, že průběh činitele je téměř stejný jak pro poloměr 100 mm tak pro 140 mm.

Vzhledem k tomu, že z vyobrazených grafů nelze přesně vypočítat závislost jednotlivých parametrů na výsledném činiteli odrazu, v další části práce se pokusím anténu přizpůsobit vhodnou optimalizační metodou.

5. Optimalizace

Optimalizace je proces hledání nejvhodnějšího (optimálního) řešení. Při optimalizaci měníme tzv. stavové proměnné optimalizovaného objektu a sledujeme, jaký vliv má změna těchto proměnných na výsledné parametry [1]. V našem případě sledujeme vliv změny parametrů R , H , L a ε_r na výsledný činitel odrazu v námi určených frekvenčních pásmech.

Optimalizační metody dělíme na lokální (zlepšují parametry v blízkém okolí našeho návrhu) a globální (zlepšují parametry v celém prostoru). Nejpoužívanějšími globálními algoritmy jsou genetické algoritmy (GA), metoda roje částic (PSO) a metoda společenství mravenců (ACO) [2]. V této práci je využito metody roje částic.

5.1. Metoda roje částic (PSO)

Metoda roje částic je optimalizace založená na principu chování a inteligence roje. Princip je nejčastěji vysvětlován na roji včel, které hledají na louce místo s největší hustotou rozkvetlých květin. Bez jakékoliv znalosti lokality začnou včely prohledávat louku náhodně a s různou rychlostí. Každá včela si pamatuje, kde ona sama našla největší hustotu rozkvetlých květin, a zároveň má informace o tom, kde byly úspěšné ostatní včely. Jednotlivé včely pak poletují mezi místem, které našly osobně, a mezi tím místem, o kterém se dozvěděly od ostatních včel. Při tomto přelétávání z místa na místo stále prozkoumávají další vhodná místa s lepším a výhodnějším výskytem rozkvetlých květin. Jakmile včela najde po cestě z jedné lokality do druhé zajímavější místo s větším počtem květin než doposud, změní se její trajektorie podle nově nalezeného místa. Takto roj včel prozkoumá celou louku a skončí v místě s největším počtem květin [3].

Analogicky tedy můžeme popsat optimalizaci technických problémů. Dle [3] lze algoritmus shrnout do několika bodů. Ze všeho nejdříve musíme nadefinovat prostor, nad kterým se budou částice pohybovat. Dimenze obecně N -rozměrného prostoru odpovídá počtu optimalizovaných parametrů. Pro příklad si uveďme optimalizaci velikosti kvádrů. Stavové proměnné budou tři: délka, šířka, výška. Částice se tak budou pohybovat ve 3D prostoru. Soubor souřadnic $[x_i, y_i, z_i]$ bude reprezentovat aktuální řešení tohoto problému v prostoru.

Nad celým prohledávaným prostorem se definuje kriteriální funkce. Ta slouží k ohodnocení nalezeného řešení na dané pozici v prostoru. Nejlepší nalezená pozice řešení pro jednotlivé částice se označuje jako p_{best} (personal best). V každém následujícím bodě trajektorie se srovnává nově vypočtená hodnota kriteriální funkce s nejlepší doposud nalezenou. Pokud je aktuální hodnota kriteriální funkce lepší, je p_{best} nahrazeno aktuálním umístěním částice. Vzhledem k tomu, že každá částice je informována o objevech zbytku roje, dokáže si vyhodnotit doposud nejlepší nalezené řešení celého roje označené jako g_{best} (global best). Všechny částice se poté pohybují mezi aktuálním g_{best} a svým osobním p_{best} .

Důležitým parametrem optimalizace je rychlost pohybu jednotlivých částic. Z [3] víme, že rychlost lze vypočítat podle vztahu:

$$v_n = w \cdot v_n + c_1 \cdot rand() \cdot (p_{BEST,n} - x_n) + c_2 \cdot rand() \cdot (g_{BEST,n} - x_n) \quad (1)$$

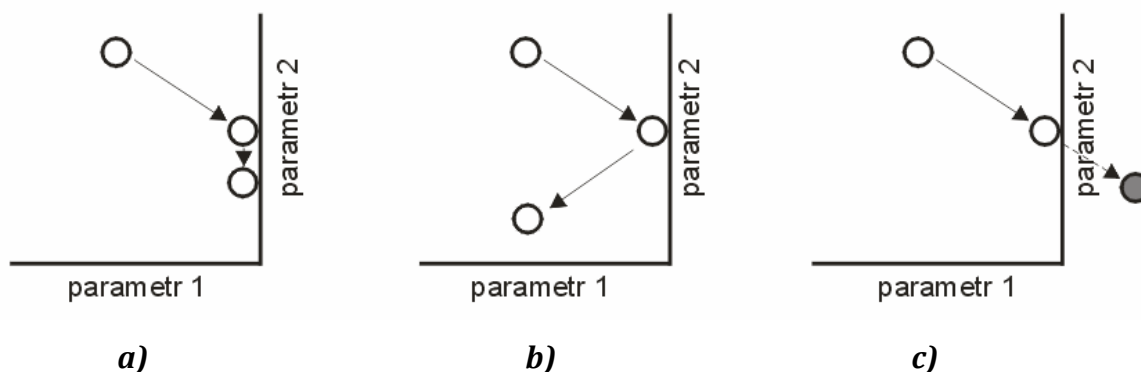
kde v_n je rychlost částice v n -té dimenzi a x_n je souřadnice částice v n -té dimenzi. Výpočet se provádí pro každou dimenzi optimalizace. Váhový faktor w určuje, jak velkou část

původní rychlosti převezme částice do dalšího časového kroku, tedy jak moc se nechá ovlivnit „tahem“ k p_{BEST} a g_{BEST} . Koeficienty c_1 a c_2 jsou mírou příspěvku „tahu“ směrem k p_{BEST} resp. g_{BEST} . S rostoucím faktorem c_1 povzbudíme částici v prozkoumávání prostoru v okolí vlastního p_{BEST} . Zvýšíme-li faktor c_2 , částice budou povzbuzovány k prohledávání okolí u údajného globálního maxima. Funkce $rand$ představuje náhodné číslo na intervalu $<0; 1>$ a má za cíl simulovat nepředvídatelnost část chování jedince [3]. Pokud známe výslednou rychlost částice v_n a délku časového kroku odpovídající jedné interaci Δt , můžeme vypočítat nové souřadnice částice x_n podle vztahu:

$$x_n = x_n + \Delta t \cdot v_n. \quad (2)$$

Tento postup opakujeme tak dlouho, dokud není vyčerpán předepsaný počet kroků optimalizace nebo není dosaženo zadané velikosti chyby.

Při vykonávání algoritmu může dojít k situaci, kdy je včela nucena opustit prostor optimalizace. Abychom tomu zabránili, zavádíme hraniční podmínky. Jejich princip při dvourozměrné optimalizaci je uveden na obr. 4.1.



Obr. 5.1 Ohraničení prostoru optimalizace:
a) absorpční stěny, b) odrazné stěny, c) neviditelné stěny.

Omezení prostoru absorpční zdi je založeno na principu nulování složky vektoru rychlosti, která je kolmá na hranici. Omezení prostoru pomocí odrazné zdi pracuje na principu změny znaménka složky vektoru rychlosti, která je kolmá na hranici.

V případě neviditelné stěny částice směřjí vylétnout z definovaného prostoru libovolným směrem. Pro tyto částice se již dále nevypočítává kriteriální funkce, takže hodnota p_{BEST} je pořád uvnitř oblasti řešení. Jakmile se částice ocitne uvnitř definovaného prostoru, opět se začne počítat hodnota kriteriální funkce [3].

5.2. Optimalizační skript (R, H, L)

Nyní již k samotné optimalizaci vícepásmové magnetické antény. Anténu potřebujeme optimalizovat z hlediska impedančního přizpůsobení na frekvencích uvedených v Tab 4.1.

Jako volné parametry zvolíme poloměr trychtýře R , výšku H a délku středního vodiče L . Relativní permitivitu dielektrika ponecháme v tomto případě konstantní $Eps1=Eps2=Eps3=Eps4=3,6$. Poloměr středního vodiče zvolíme 1 mm a poloměr vnějšího vodiče 4,86 mm.

Abychom mohli anténu považovat za impedančně přizpůsobenou je nutné aby byl v požadovaných pracovních pásmech činitel odrazu $s_{11} < -10$ dB.

Optimalizační proces bude minimalizovat kritériální funkci, která popisuje odchylky činitele odrazu vypočteného pomocí modelu v COMSOLu od hodnot požadovaných.

Samotný optimalizační výpočet uložíme do skriptu. Funkci nazveme *optim_PSO* a přiřadíme ji dva vstupní parametry

```
function out = optim_PSO( G, I)
```

kde G je počet generací (iteračních cyklů) I reprezentuje počet částic. Je vhodné volit dostatečný počet cyklů i částic, aby bylo dosaženo globálního optima. Pod hlavičkou je dále definován požadavek na velikost činitele odrazu (volíme hodnotu -15), požadované frekvence, délka časové kroku Δt , koeficienty tahu k osobnímu a globálnímu optimu c_1 a c_2 . Počáteční rozmístění částic je náhodné a je řešeno pomocí funkce *rand*. Z praktického hlediska jsou parametry R , H , L omezeny na velikost 80 až 200 mm. Z důvodů stability skriptu pro výpočet činitele odrazu je podmínka $H > L$.

```
f = [1176, 1190, 1200, 1230, 1278, 1575, 1710, 1750,...
     1800, 1900, 2000, 2100, 2170, 2320, 2345, 2400, 2485, 5850, 5900,
     5925]*1e6;

s11 = -15; % pozadovany cinitel odrazu

dt = 0.1;
c1 = 1.49; % koeficient tahu k osobnímu optimu
c2 = 1.49; % koeficient tahu ke globálnímu optimu

x = zeros ( I, 4); % pozice agentu; x(4) = kritériální funkce v x
p = zeros ( I, 4); % osobní optimum; p(4) = kritériální funkce v p

for n=1:I
    x(n, 1) = 80 + 120*rand(); p(n,1) = x(n,1); % polomer R
    x(n, 3) = 80 + 120*rand(); p(n,3) = x(n,3); % delka L
    x(n, 2) = x(n,3) + ( 200 - x(n,3))*rand(); p(n,2) = x(n,2); % vyska H>L
    p(n,4) = 1e+7; % vysoka hodnota kriterialni funkce na pocatku
end
```

Dále jsou vygenerovány počáteční vektory rychlostí agentů a další. Poté již následuje hlavní smyčka, která obsahuje váhovací faktor a volání funkce *model.m*, kterou jsme vytvořili v kapitole 3.3.3. Váhovací faktor postupem iterací slábne a dovoluje tak částicím větší možnost odpoutat se od původního směru.

```
v = rand(I,3); % rychlost agenta v prostoru [R, H, L]
g = zeros(1,4); % globální maximum v prostoru [R, H, L];
g(4) = 1e+7; % vysoka hodnota kriterial. fce na pocatku
e = zeros( G, 1); % casovy prubeh globalni kriterial. fce

for m=1:G % +++ HLAVNÍ SMYČKA +++
    w = 0.5*(G-m)/G + 0.4; % vahovaci faktor

    for n=1:I
        [S11] = model( x(n,1)*1e-3, x(n,2)*1e-3, x(n,3)*1e-3, f);
        x(n,4) = (S11-s11) * (S11-s11)';
    end
```

Následuje nalezení nejmenší chyby a uložení jejího indexu.

```
[e(m), ind] = min( x(:,4)); % nejmensi chyba a její index
```

Pokud je právě nalezená chyba menší než je nejmenší globální chyba, dojde k aktualizaci globální chyby.

```
if e(m) < g(4)           % pokles globalni chyby
    g(:) = x( ind, :);
end
```

V následujícím cyklu dochází k aktualizaci osobních optim, k výpočtu nových rychlostí a pozic podle (1) a (2).

```
for n=1:I
    if x(n,4)<p(n,4)       % pokud kriterial.fce v x mensi nez v p
        p(n,:) = x(n,:); % aktualizuji osobni optimum
    end

    v(n,:) = w*v(n,:) + c1*rand()*( p(n,1:3) - x(n,1:3));
    v(n,:) = v(n,:) + c2*rand()*( g(1,1:3) - x(n,1:3));
    x(n,1:3) = x(n,1:3) + dt*v(n,:);
end
```

Dále jsou implementovány hraniční podmínky. Je zřejmé, že prostor je omezen absorpčními stěnami.

```
if x(n,1) > 200, x(n,1) = 200; end %okrajove podminky
if x(n,1) < 80, x(n,1) = 80; end

if x(n,2) > 200, x(n,2) = 200; end
if x(n,2) < 80, x(n,2) = 80; end

if x(n,3) > x(n,2), x(n,3) = x(n,2)-1; end
end
end
```

Na úplný závěr vykreslíme chybovou funkci a vypíšeme optimální rozměry antény.

```
figure; plot( log10( e)); % vykresleni prubehu chybove funkce
out = g;
```

5.3. Výsledky optimalizace (R , H , L)

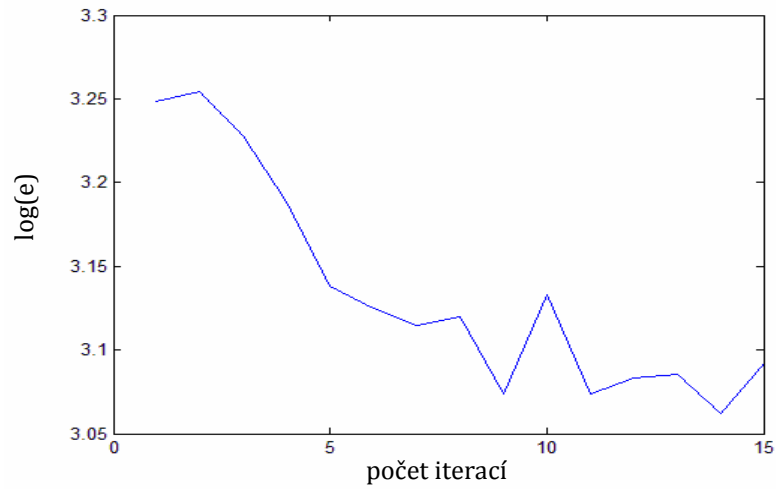
V této části jsou zobrazeny grafické výstupy optimalizačního algoritmu. Parametry optimalizačního procesu jsou:

- počet iterací $G = 15$
- počet agentů $I = 10$

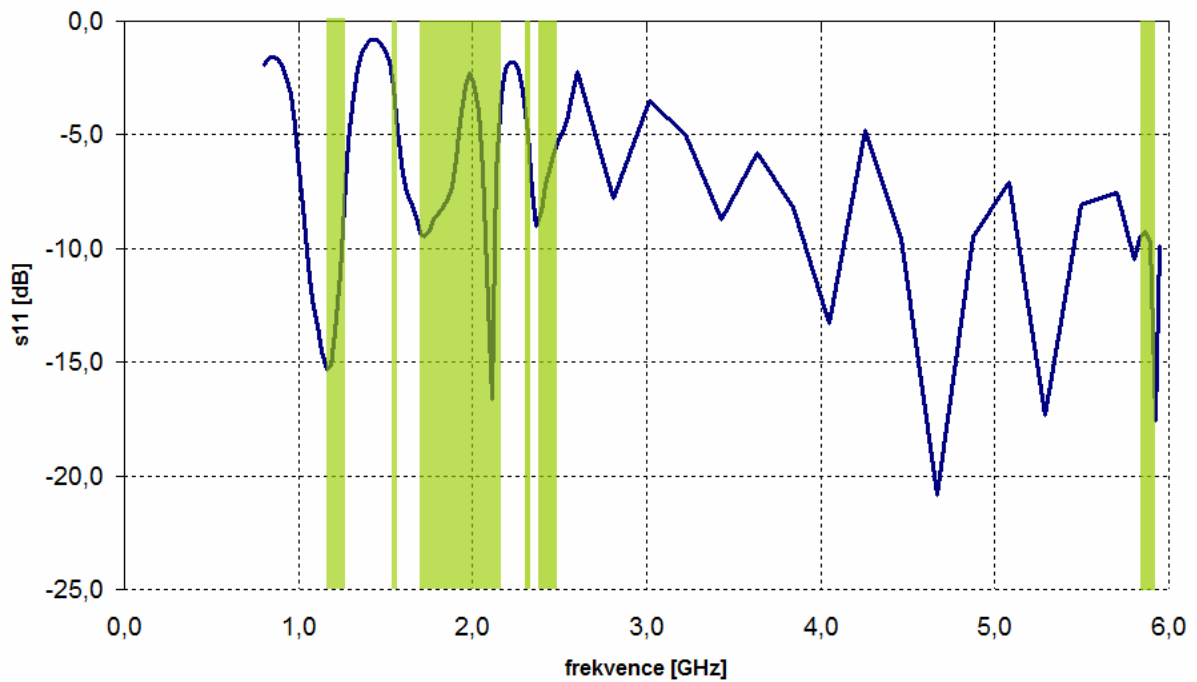
Běh optimalizace	poloměr R [mm]	výška H [mm]	délka L [mm]	chyba [-]
1	190,3	153,3	107,5	1154
2	166,3	167,6	160,8	1079
3	158	130,1	100,7	1282
4	100,4	164,1	153,7	1524
5	94,1	195,7	170	1322
6	141,1	191,7	166,5	1246

Tab. 5.1 Výsledky optimalizace antény metodou PSO (parametry R , H , L)

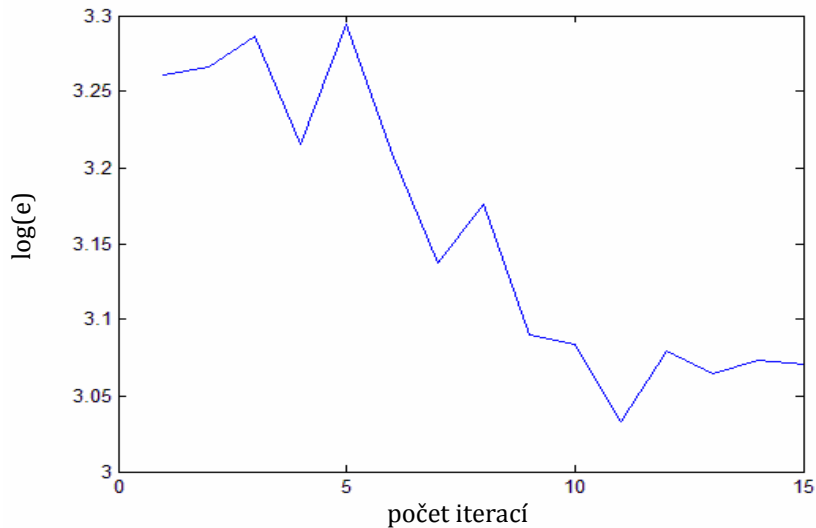
Jak je vidět z Tab. 5.1, nejlepší shody bylo dosaženo u prvního a druhého běhu. Proto se na ně podíváme blíže a u každého běhu zobrazíme průběh chybové funkce a výsledný činitel odrazu.



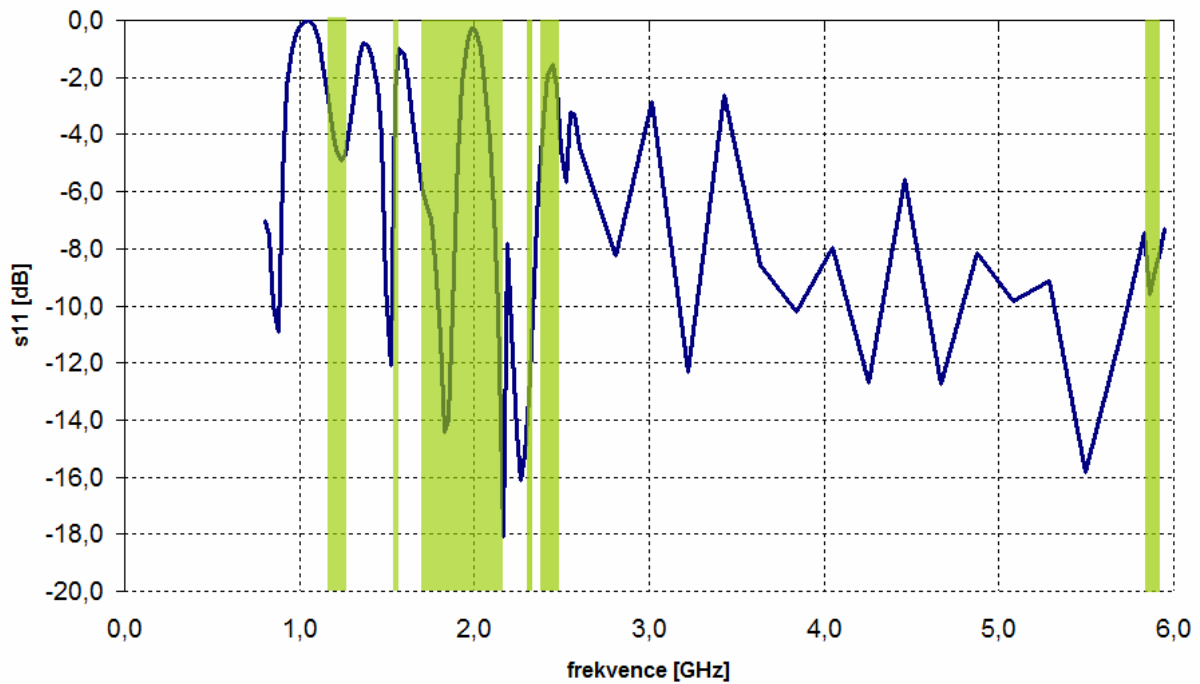
Obr. 5.2 Chybová funkce prvního běhu optimalizace.



Obr. 5.3 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény získané prvním během optimalizace.



Obr. 5.4 Chybová funkce druhého běhu optimalizace.



Obr. 5.5 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény získané druhým během optimalizace.

Z uvedených výsledků je zřejmé, že se impedanční přizpůsobení nepodařilo na všech požadovaných kmitočtech. Navíc si můžeme všimnout, že rozměry antény jsou spíše u horní hranice naší podmínky, což má za následek velmi dlouhou dobu trvání optimalizačního procesu. Z grafů chybových funkcí je zřejmé, že zvolený počet iteračních kroků je nedostatečný. Bohužel, v tomto případě je výpočetní náročnost velmi zdlouhavá a neumožňuje nám jejich zvýšení.

Z těchto důvodů pro optimalizaci zvolíme jiné volné parametry. Geometrické rozměry ponecháme konstantní a měnit budeme pouze relativní permitivitu uvnitř trychtýře.

5.4. Optimalizační skript (ϵ_r)

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3, dielektrikum uvnitř trychtýře je rozděleno na třetiny. Změnou permitivit jednotlivých částí tak můžeme vytvořit jakýsi transformátor a docílit tak lepšího impedančního přizpůsobení.

Pokud chceme optimalizovat pomocí změny relativní permitivity, musíme skript *optim_PSO.m* mírně upravit. Nejprve upravíme počáteční rozmístění částic tak, aby nabývaly hodnoty maximálně 10

```
x(n, 1) = 1+rand()*9;      p(n,1) = x(n,1);  % Eps2  
x(n, 2) = 1+rand()*9;      p(n,2) = x(n,2);  % Eps3  
x(n, 3) = 1+rand()*9;      p(n,3) = x(n,3);  % Eps4
```

a volání funkce *model.m* upravíme do následujícího tvaru

```
[S11] = model( x(n,1), x(n,2), x(n,3), f);
```

Nakonec ještě zrušíme veškeré okrajové podmínky (popř. nastavíme $Eps > 1$). Tím je úprava dokončena.

Nesmíme zapomenout změnit vstupní proměnné funkce *model.m*

```
function [out_S11] = model(Eps2, Eps3, Eps4, f)
```

Poloměr středního vodiče zvolíme 1 mm, poloměr koaxiálního kabelu 5,86 mm a jeho relativní permitivitu nastavíme na $Eps1 = 4,5$, čímž zajistíme charakteristickou impedanci 50 Ω . Permitivita v okolí antény je $Eps5 = 1$. Velikost antény jsou zvoleny následovně: výška $H = 65$ mm, délka středního vodiče $L = 45$ mm. Poloměr antény se postupně mění $R = 100/150/200/230$ mm a pro každý takový rozměr je provedeno několik běhů optimalizace.

5.5. Výsledky optimalizace (ϵ_r)

V této části jsou uvedeny grafické výstupy optimalizačního algoritmu. Parametry optimalizačního procesu byly nastaveny následovně:

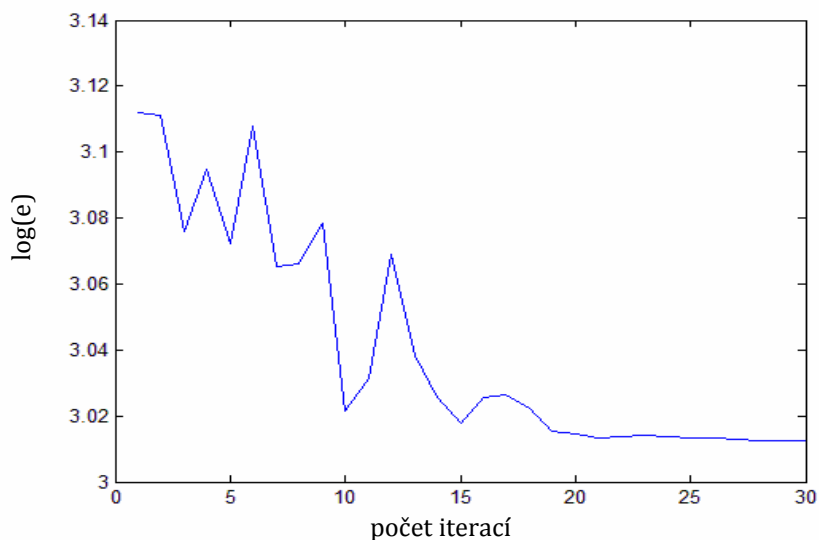
- počet iterací $G = 30$
- počet agentů $I = 15$

U výsledků s nejmenší chybou jsou uvedeny průběhy chybové funkce a frekvenční závislost činitele odrazu. Opět platí, že nepotřebné pásmo 2500-5800 MHz je zobrazeno s hrubým frekvenčním skokem a slouží pouze k orientačnímu přehledu. Kmitočty na kterých chceme mít anténu přizpůsobenou jsou podbarveny zeleně.

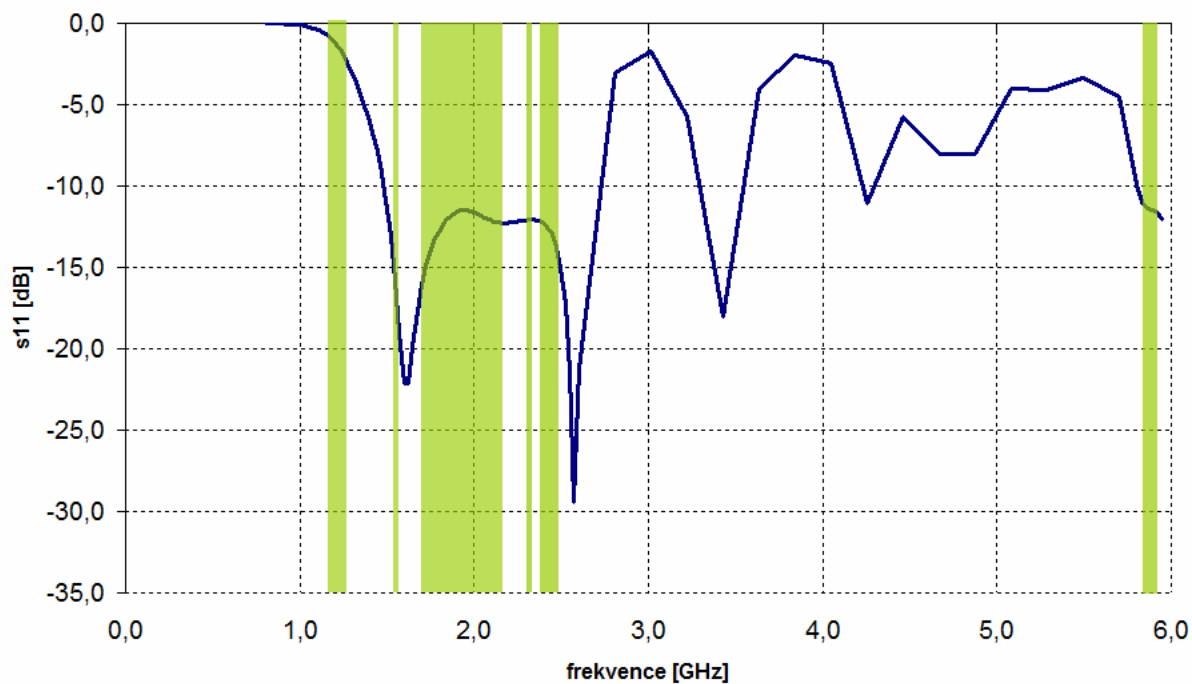
5.5.1. R = 100 mm, H = 65 mm, L = 45 mm

Běh optimalizace	ϵ_{r2} [-]	ϵ_{r3} [-]	ϵ_{r4} [-]	chyba [-]
1	7,2	5,2	7,4	1421
2	7,5	1,7	4,1	1029
3	7,2	5,8	7,5	1336

Tab. 5.2 Výsledky optimalizace antény metodou PSO (parametry ϵ_r , R=100 mm)



Obr. 5.6 Chybová funkce druhého běhu optimalizace.

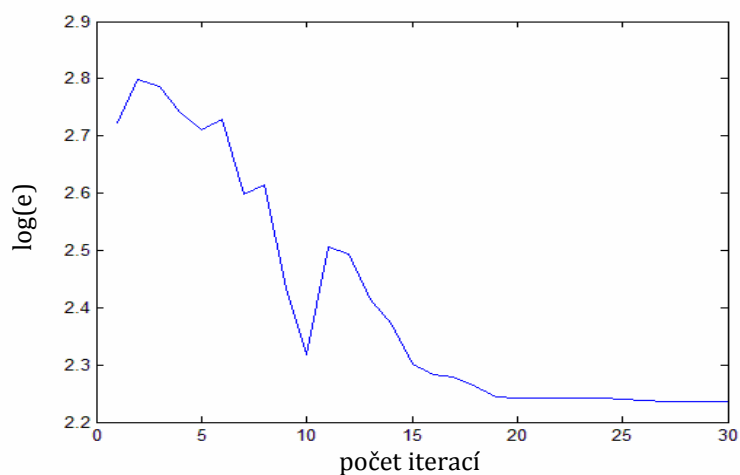


Obr. 5.7 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény získané druhým během optimalizace.

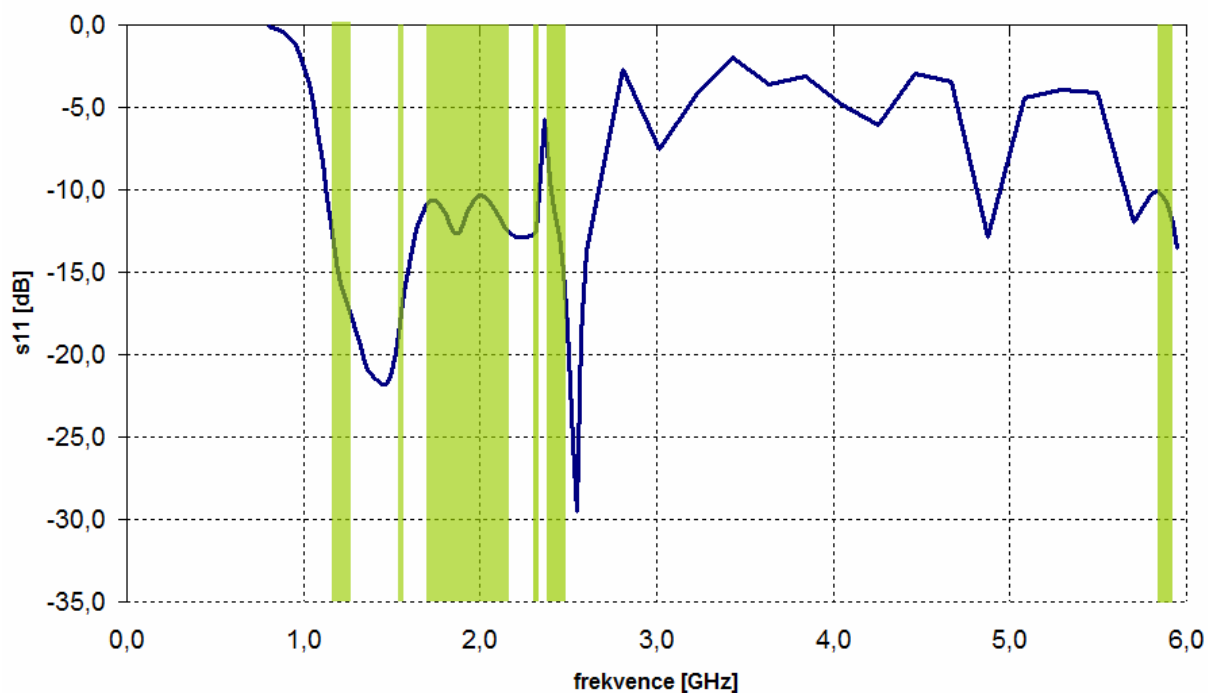
5.5.2. R = 150 mm, H = 65 mm, L = 45 mm

Běh optimalizace	ϵ_{r2} [-]	ϵ_{r3} [-]	ϵ_{r4} [-]	chyba [-]
1	9,7	1,5	4,7	172
2	4,6	1,3	6,1	607
3	7,1	1,5	4,5	301
4	11,6	1,8	3,8	463

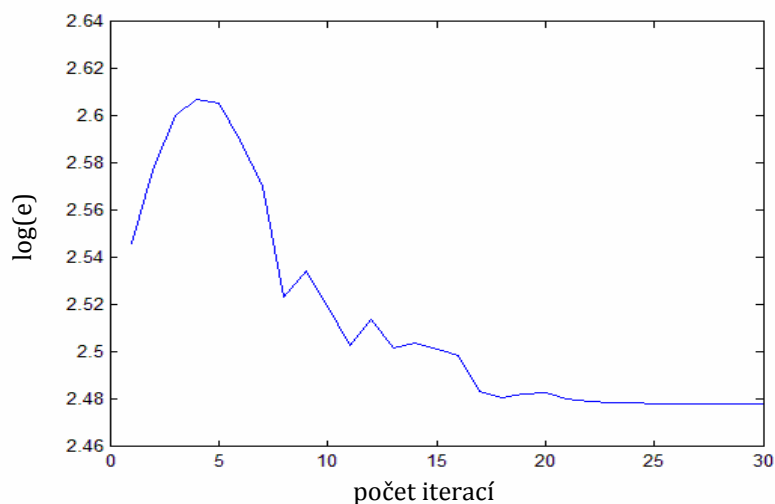
Tab. 5.3 Výsledky optimalizace antény metodou PSO (parametr ϵ_r , R=150 mm)



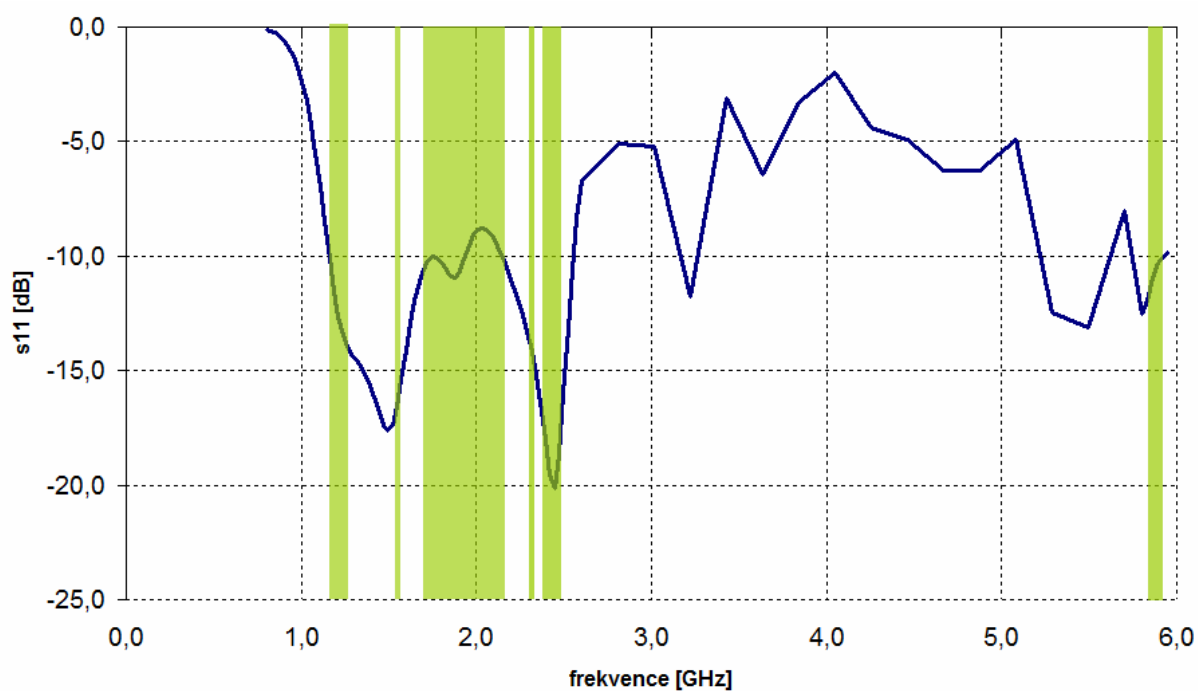
Obr. 5.8 Chybová funkce prvního běhu optimalizace.



Obr. 5.9 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény získané prvním během optimalizace.



Obr. 5.10 Chybová funkce třetího běhu optimalizace.

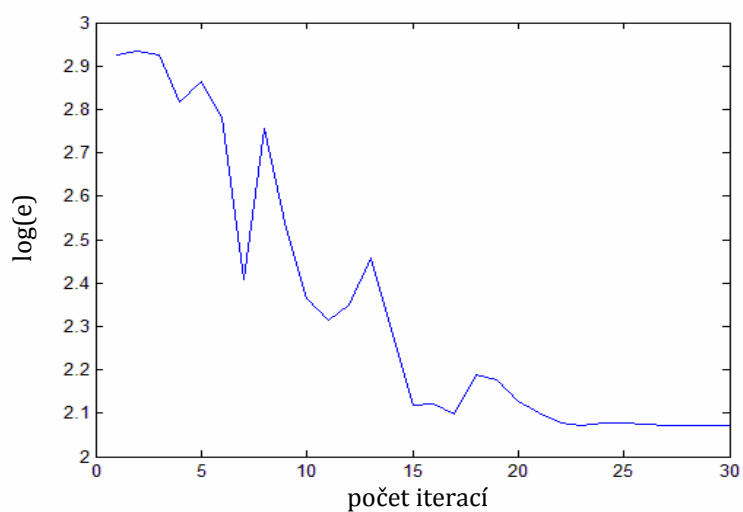


Obr. 5.11 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény získané třetím během optimalizace.

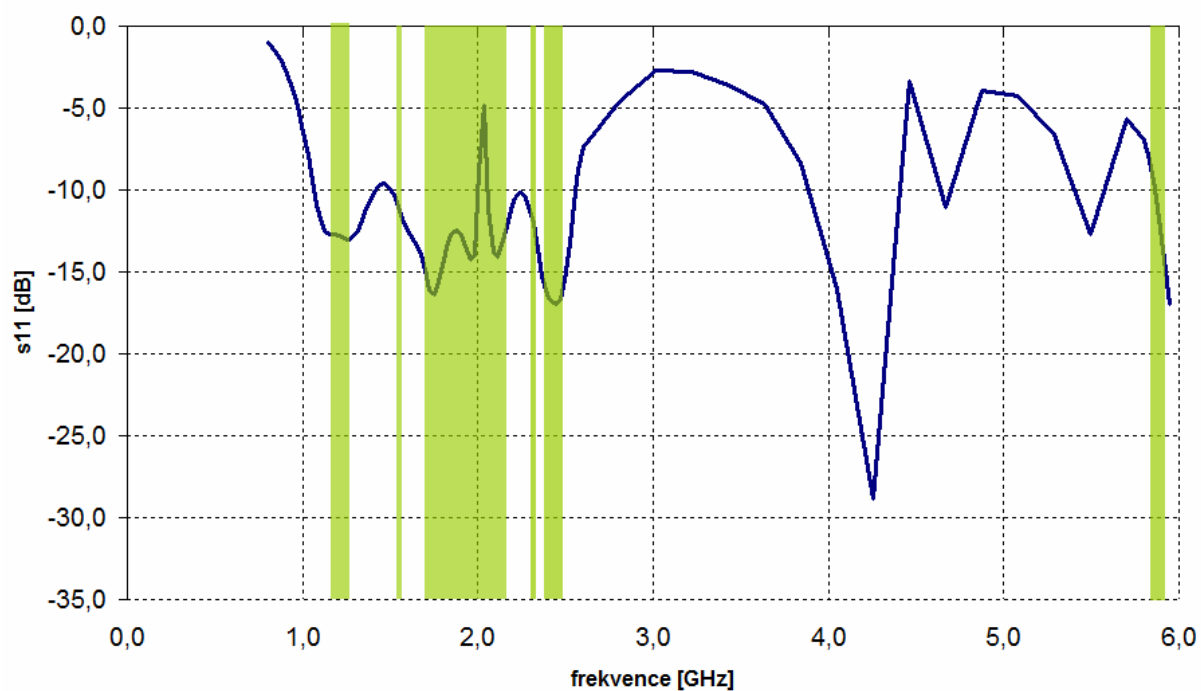
5.5.3. R = 200 mm, H = 65 mm, L = 45 mm

Běh optimalizace	ϵ_{r2} [-]	ϵ_{r3} [-]	ϵ_{r4} [-]	chyba [-]
1	8,2	1,7	5,7	355
2	5,3	1,4	6,1	316
3	6,4	1,3	4,7	266
4	10,8	1,8	5,1	118
5	9,2	1,4	5,4	233
6	9,9	1,6	4,7	265

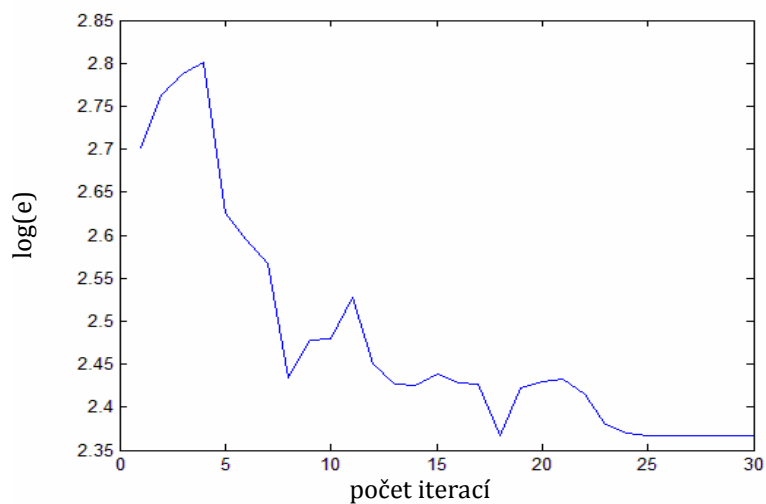
Tab. 5.4 Výsledky optimalizace antény metodou PSO (parametry ϵ_r , R=200 mm)



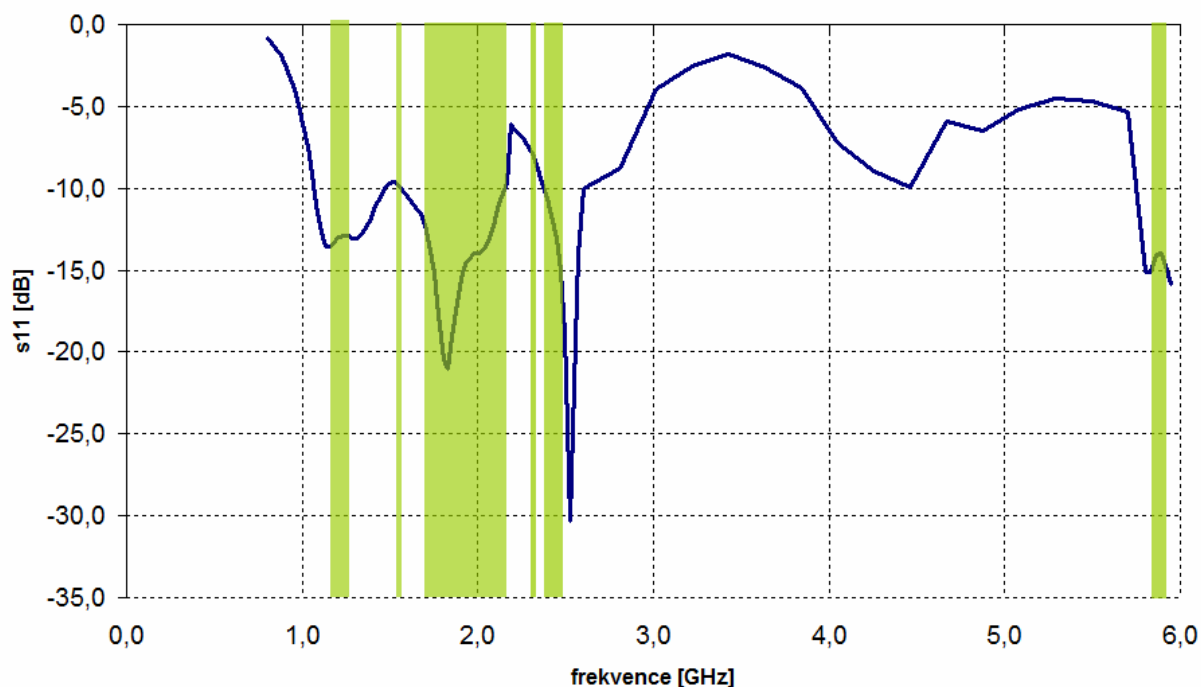
Obr. 5.12 Chybová funkce čtvrtého běhu optimalizace.



Obr. 5.13 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény získané čtvrtým během optimalizace.



Obr. 5.14 Chybová funkce pátého běhu optimalizace.

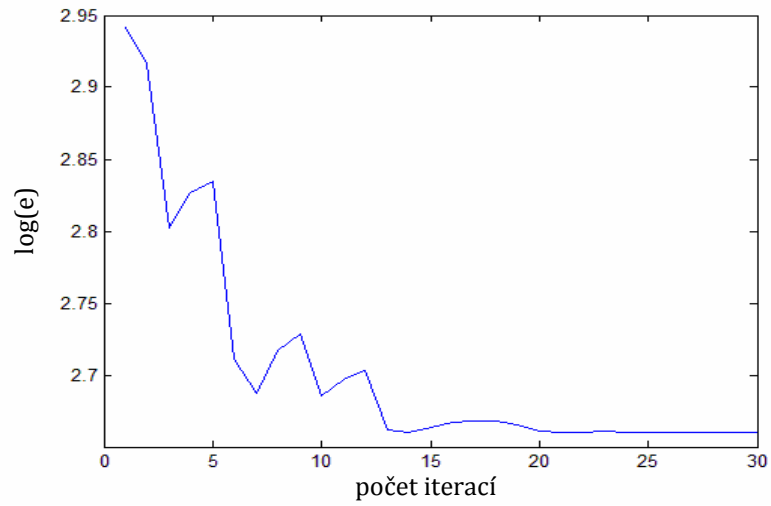


Obr. 5.15 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény získané pátým během optimalizace.

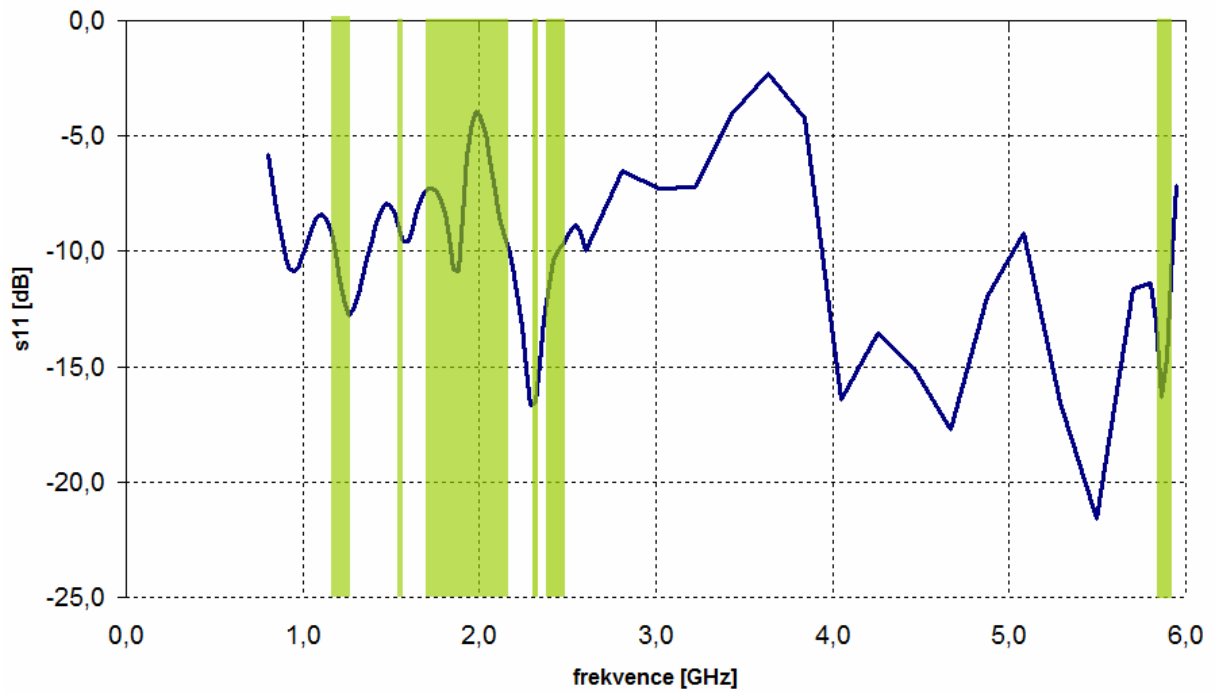
5.5.4. R = 230 mm, H = 65 mm, L = 45 mm

Běh optimalizace	ϵ_{r2} [-]	ϵ_{r3} [-]	ϵ_{r4} [-]	chyba [-]
1	7,5	2,5	7,1	457
2	8,4	2,8	8,1	441
3	11,6	5,1	8,0	610
4	7,6	1,8	5,3	545
5	7,1	2,5	7,6	732
6	8,5	3,3	7,2	673

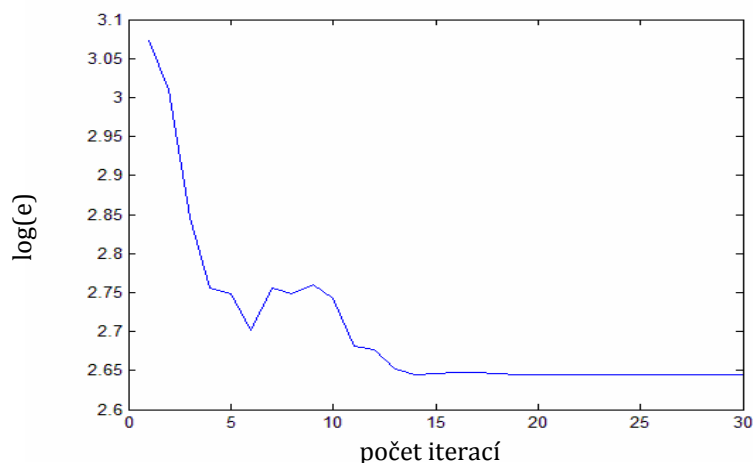
Tab. 5.5 Výsledky optimalizace antény metodou PSO (parametry ϵ_r , R=230 mm)



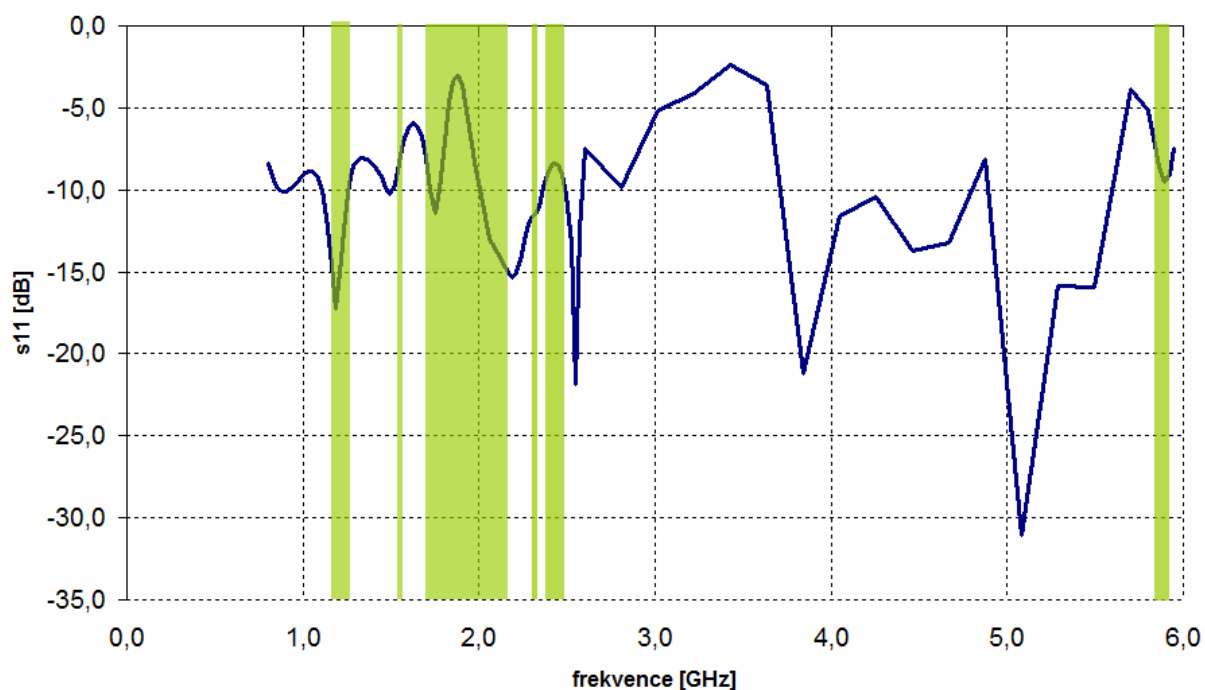
Obr. 5.16 Chybová funkce prvního běhu optimalizace.



Obr. 5.17 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény získané prvním během optimalizace.



Obr. 5.18 Chybová funkce druhého běhu optimalizace.



Obr. 5.19 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény získané druhým během optimalizace.

Z grafů chybových funkcí lze vyzorovat, že zvolený počet iteračních kroků je dostatečný. Funkce je ke konci vždy již ustálena a velikosti hledaných proměnných se nadále nemění.

Co se týče impedančního přizpůsobení, nejlepších výsledků bylo dosaženo při poloměrech trychtýře 150 mm. Jak je vidět z Obr. 5.9 a Obr. 5.11, při takto zvolených proměnných je anténa přizpůsobená na všech požadovaných pracovních kmitočtech. Uspokojivého výsledku je dosaženo i v případě, kdy má poloměr apertury hodnotu 100 mm. V tomto případě sice není přizpůsobeno jedno pásmo (1176 – 1278 MHz), na druhou stranu má však anténa podstatně menší rozměry. Další relativně úspěšný byl

pátý běh u rozměru $R = 200$ mm (Obr. 5.15), kdy se nepodařilo přizpůsobit pouze frekvenci 1575 MHz. Nejhoršího výsledku bylo dosaženo při zvoleném poloměru 230 mm.

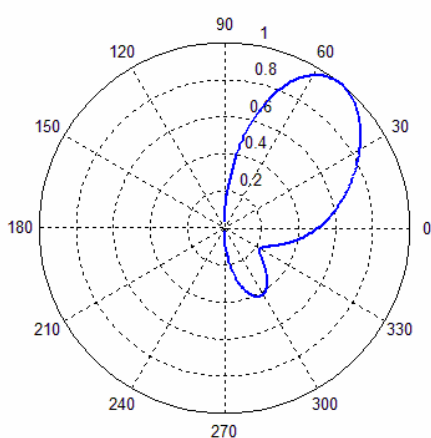
6. Vlastnosti magnetické antény

Jak je uvedeno v předešlé kapitole, díky optimalizaci se podařilo najít rozměry a vhodné hodnoty relativní permitivity dielektrika, při které je anténa impedančně přizpůsobená. Nyní si u takto přizpůsobené antény blíže prostudujeme její vlastnosti.

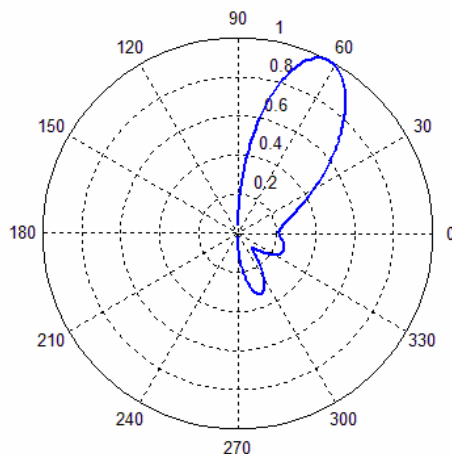
R	H	L	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	ϵ_{r3}	ϵ_{r4}
[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]
150	65	45	4,5	9,7	1,5	4,7

Tab 6.1 Výsledné rozměry a hodnoty relativní permitivity antény

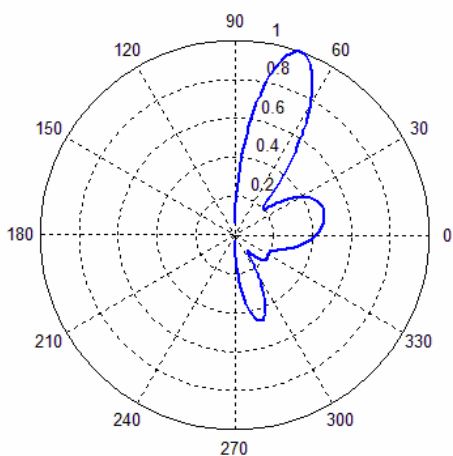
6.1. Směrové charakteristiky



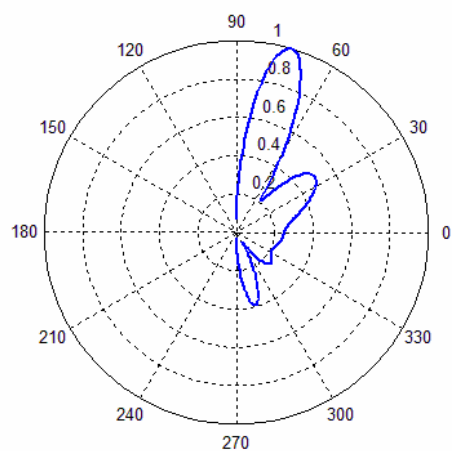
Obr. 6.1 Směr. charakteristika ($f=1,2$ GHz)



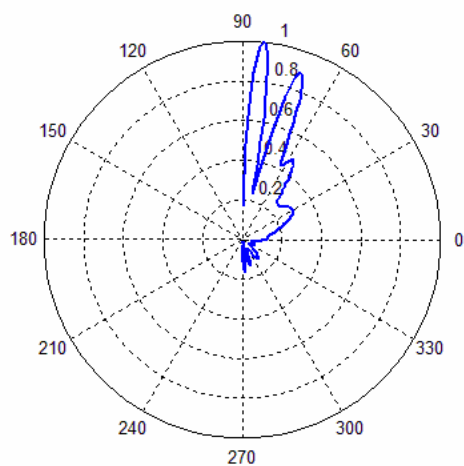
Obr. 6.2 Směr. charakteristika ($f=1,575$ GHz)



Obr. 6.3 Směr. charakteristika ($f=2$ GHz)



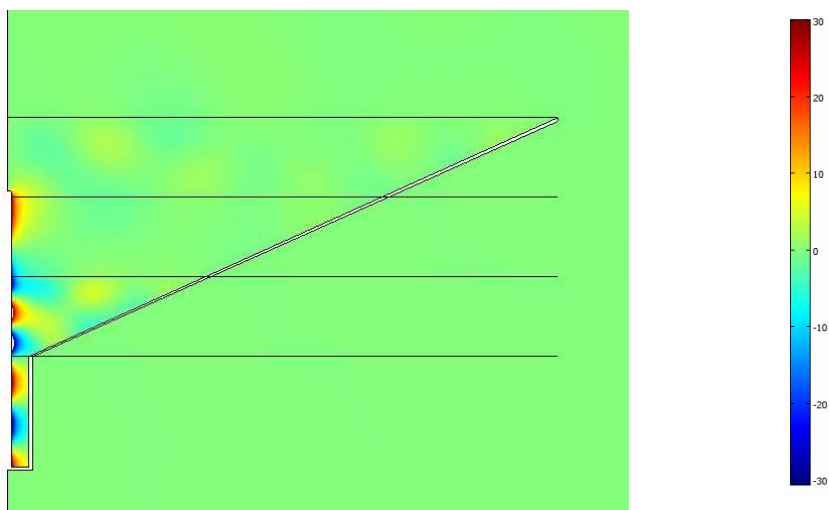
Obr. 6.4 Směr. charakteristika ($f=2,33$ GHz)



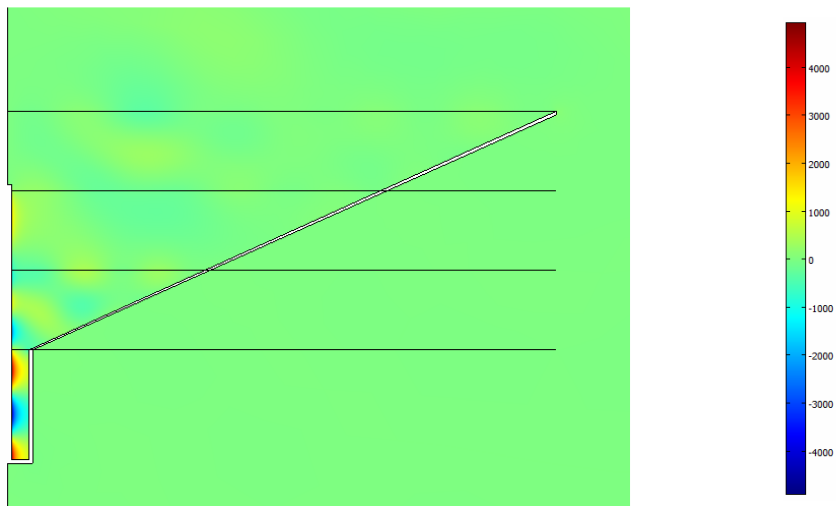
Obr. 6.5 Směr. charakteristika ($f=5,9$ GHz)

Na obrázcích 6.1 až 6.5 jsou znázorněny normované směrové charakteristiky v pěti požadovaných pásmech.

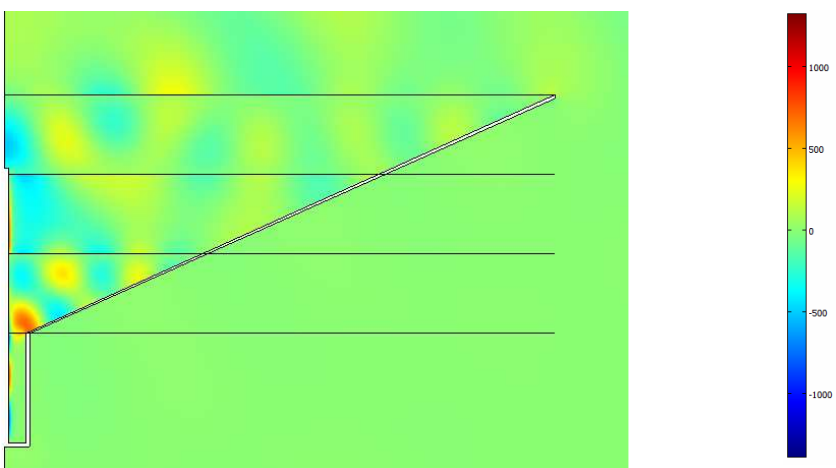
6.2. Rozložení elektromagnetického pole



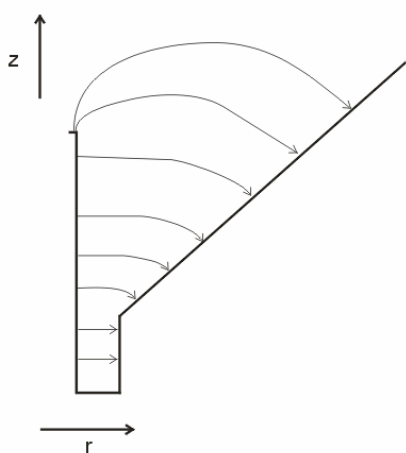
Obr. 6.6 Magnetické pole, složka phi [A/m], frekvence 6 GHz



Obr. 6.7 Rozložení elektrického pole, složka r [V/m], frekvence 6 GHz



Obr. 6.8 Rozložení elektrického pole, složka z [V/m], frekvence 6 GHz

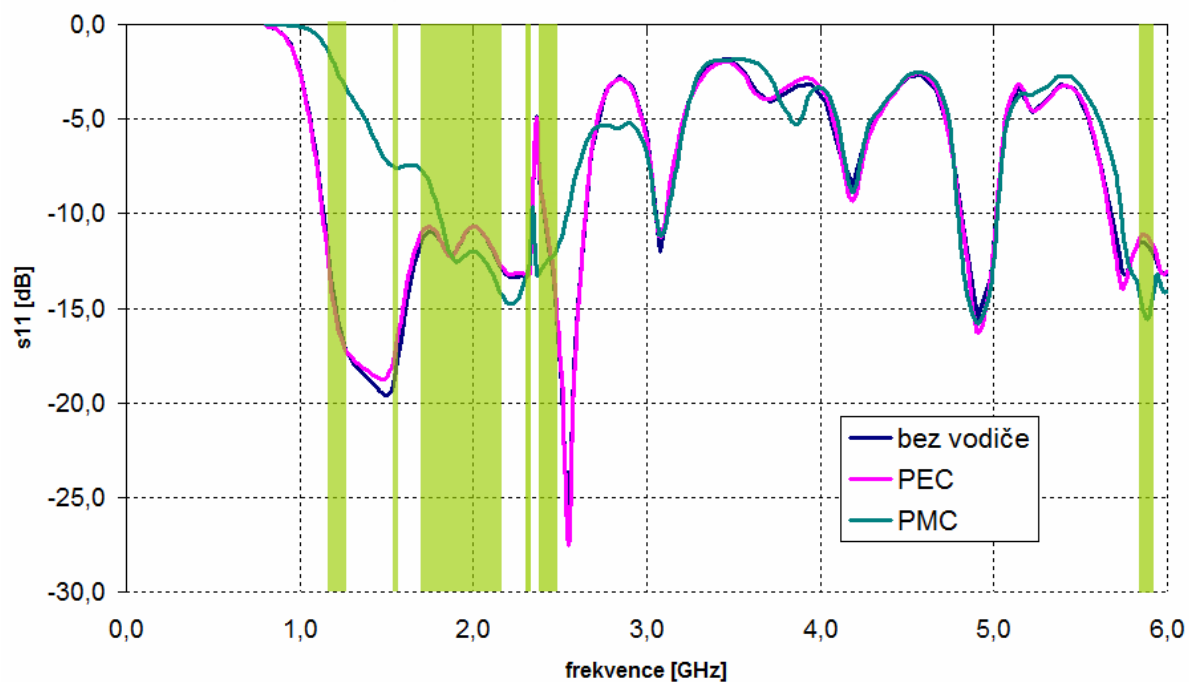


Na Obr. 6.9 jsou vykresleny siločáry intenzity elektrického pole uvnitř antény. Jelikož zkrácený střední vodič a trychtýř jsou z velmi dobrého elektrického vodiče, musejí být siločáry pole k těmto vodivým stěnám kolmé. Z obrázku je zřejmé, že v apertuře antény je dominantní z -ová složka elektrického pole, zatímco radiální složka pole je méně významná.

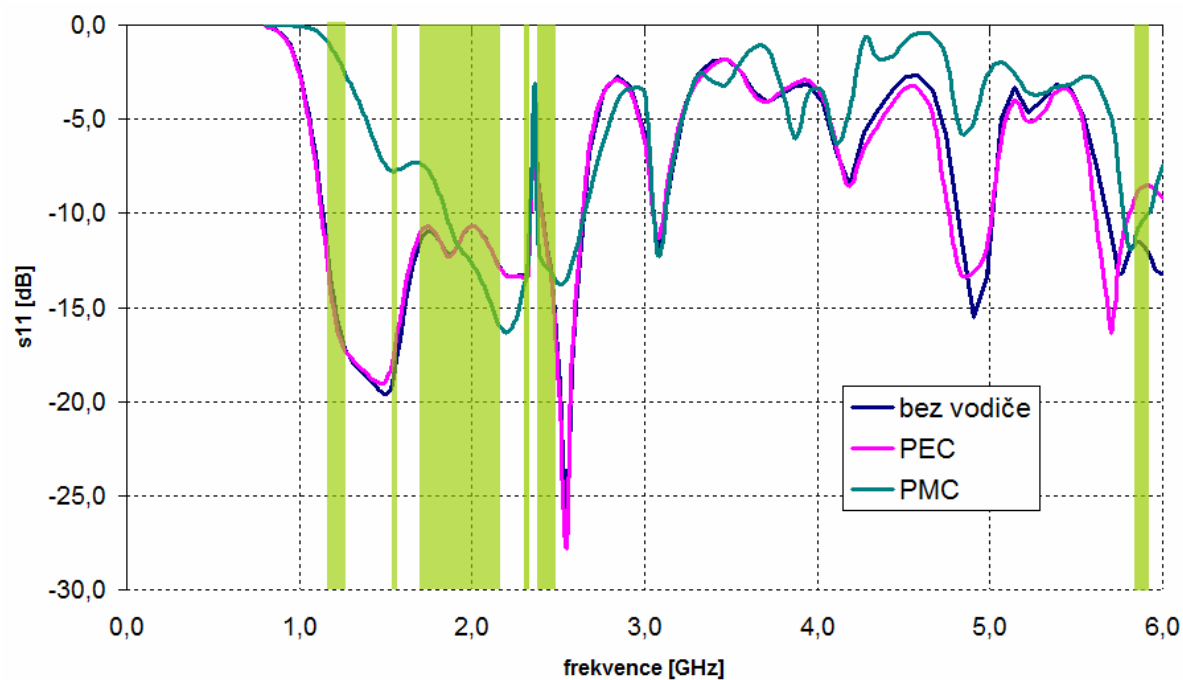
Obr. 6.9 Siločáry elektrického pole

6.3. Vliv PEC a PMC na vlastnosti antény

Nyní vyzkoušíme, jaký vliv na výsledný činitel odrazu bude mít umístění dokonalého elektrického vodiče (PEC) a dokonalého magnetického vodiče (PMC) na aperturu antény. Budeme zkoumat dva případy. Nejprve vložíme jeden prvek o velikosti 10x2 mm do vzdálenosti 6,5 cm od středu antény. Následně k němu přidáme totožný prvek do vzdálenosti 3 cm od středu antény.



Obr. 6.10 Vliv jednoho vodiče umístěného nad ústí antény na výsledný činitel odrazu



Obr. 6.11 Vliv dvou vodičů umístěných nad ústí antény na výsledný činitel odrazu

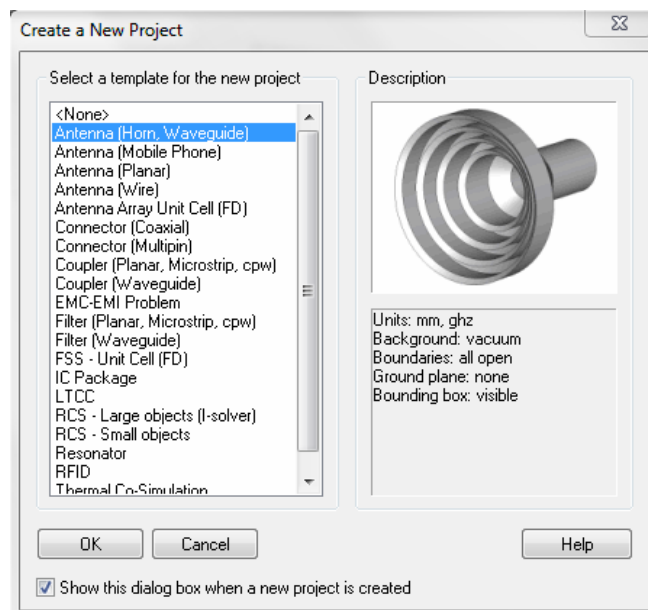
Z uvedených závislostí vyplývá, že magnetický dokonalý vodič umístěný do apertury má mnohem větší vliv na výsledný činitel odrazu než dokonalý elektrický vodič. Je to způsobeno dominancí radiální složky magnetického pole na apertuře antény, čímž jsme potvrdili teoretický předpoklad uvedený v kapitole 2.

7. Ověření vlastností antény programem CST

K ověření výsledků vypočtených programem COMSOL Multiphysics byl použit program CST Microwave Studio 2008. Tento program, na rozdíl od zmíněného COMSOLu, neumí analyzovat dvourozměrné rotační struktury. Anténu je tedy nutno simulovat v trojrozměrném prostoru, což neúnosně zvyšuje náročnost na paměť a výpočetní výkon. Vzhledem k tomuto faktu se nepodařilo simulovat chování antény na vyšších kmitočtech (čím vyšší je kmitočet simulace, tím jemnější musí být diskretizační síť).

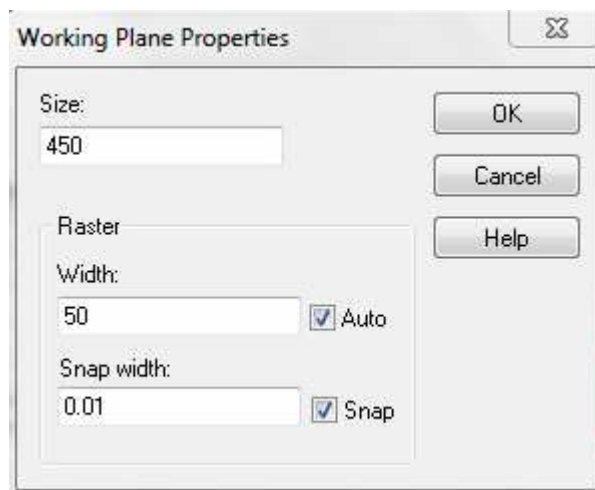
7.1. Modelování a simulace

Po spuštění CST DESIGN ENVIRONMENT vybereme z předložené nabídky vytvoření nového projektu CST MICROWAVE STUDIO a zvolíme šablonu *Antenna (Horn, Waveguide)*.



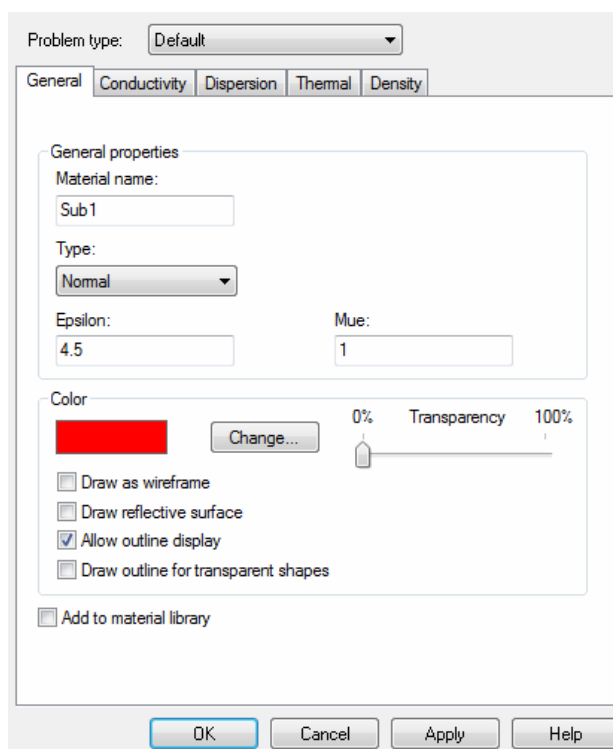
Obr. 7.1

Dalším krokem je nastavení pracovní oblasti na takovou velikost, aby se nám do ní modelovaná anténa vlezla. Toto nastavení provedeme v dialogovém okně *Working Plane Properties* v menu *Edit*.



Obr. 7.2

Nyní si nadefinujeme materiály dielektrika s různou permitivitou. V navigačním stromě klikneme pravým tlačítkem na položku *Materials* a zvolíme *New Material*.

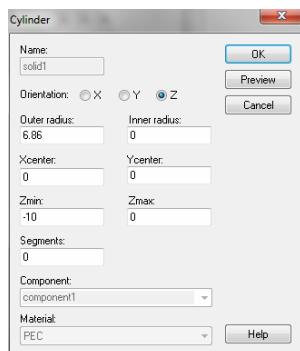


Obr. 7.3

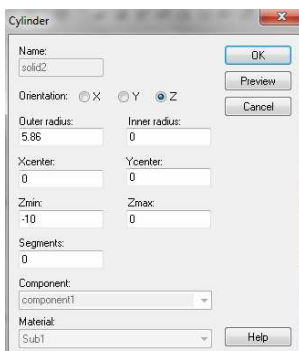
V dialogovém okně *New Material Parameter* zvolíme *Type: Normal*, a nastavíme *Epsilon: 4.5* a pojmenujeme *Material name: Sub1*. Nakonec si můžeme vybrat barvu a průhlednost tohoto nového materiálu a kliknutím na tlačítko OK dojde k jeho uložení. Tento krok ještě zopakujeme pro další tři materiály Sub2 - Eps: 9.7, Sub3 - Eps: 1.5 a Sub 4 - Eps: 4.7. Tím máme vytvořeny veškeré potřebné materiály, ze kterých je anténa modelována.

Přejdeme k vlastnímu vytvoření modelu antény. Jako první vytvoříme koaxiální napáječ. Zvolíme *Create Cylinder* a nastavíme jeho parametry podle Obr. 7.4. Nyní do tohoto válce vložíme dielektrikum. Opět zvolíme *Create Cylinder* a nastavíme parametry

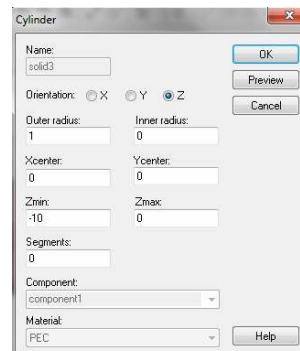
podle Obr. 7.5. Po stisknutí OK se objeví dialogové okno, kde zatrhneme *Insert highlighted shape* a potvrdíme. Nakonec vložíme střední vodič, opět pomocí funkce *Create Cylinder* a jeho parametry nastavíme podle Obr. 7.6



Obr. 7.4

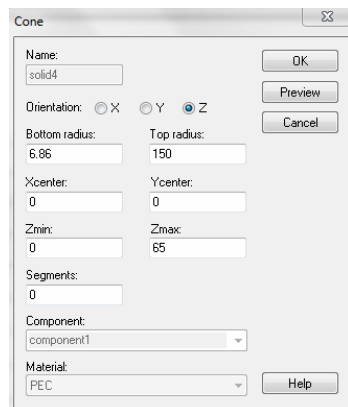


Obr. 7.5

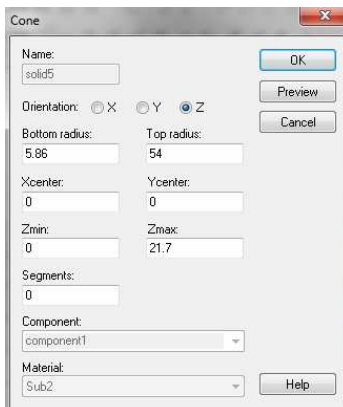


Obr. 7.6

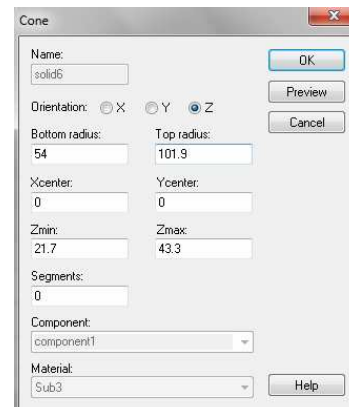
Ted' již máme vytvořený koaxiální napáječ. Zbývá nám vytvořit vlastní trychtýř antény. Budeme postupovat analogicky s předchozím případem, jen s tou výjimkou, že budeme používat *Create cone*. Postupně tak vytvoříme čtyři kužely, jejichž parametry nastavíme podle Obr. 7.8 až Obr 7.11.



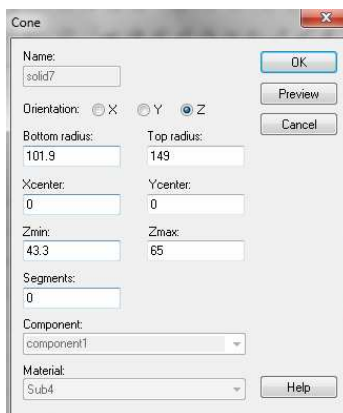
Obr. 7.8



Obr. 7.9

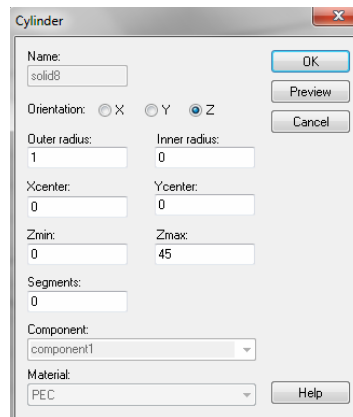


Obr 7.10



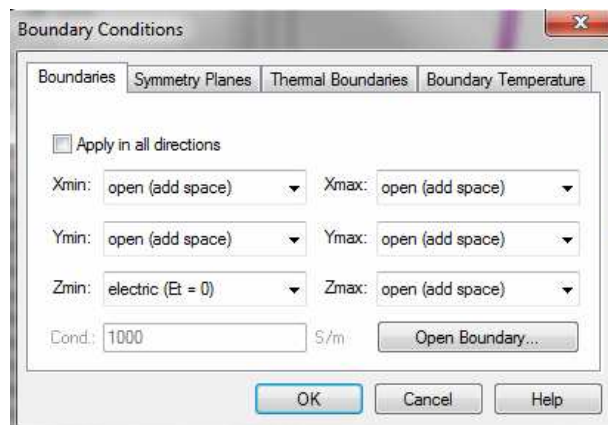
Obr. 7.11

Tímto jsme vytvořili vložené dielektrikum uvnitř trychtýře. Nakonec už zbývá jen vytvořit prodloužený střední vodič pomocí *Create Cylinder* a nastavením jeho parametrů podle Obr. 7.12.



Obr. 7.12

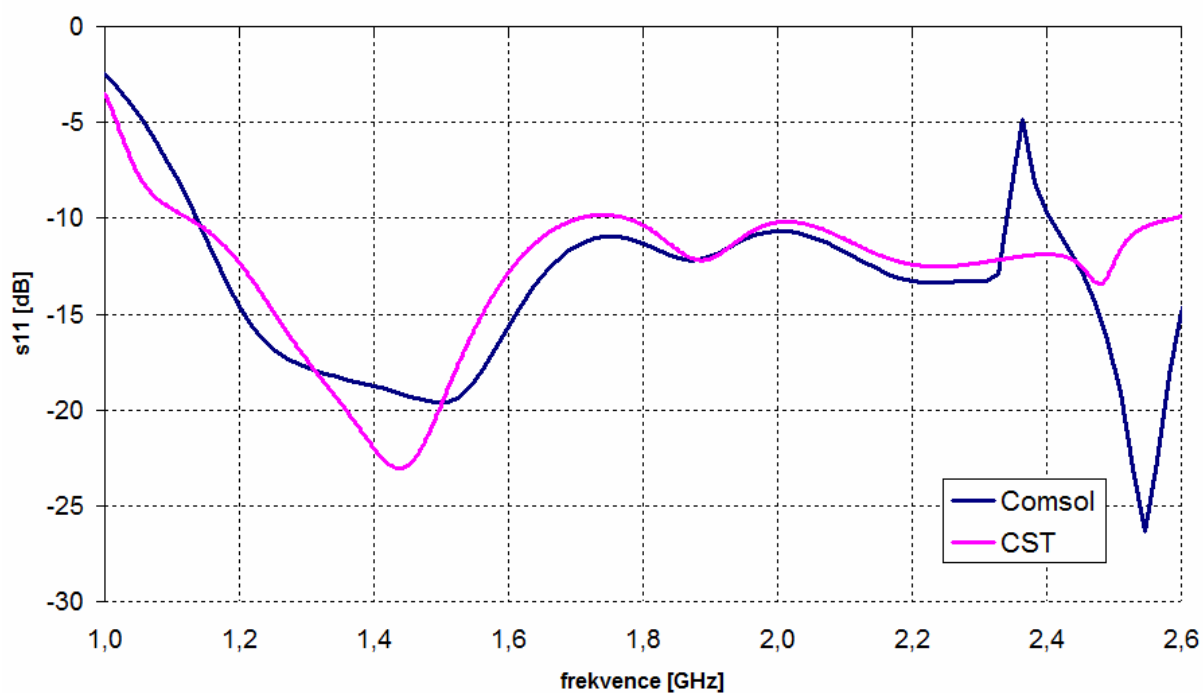
Tím máme model hotov. Nyní si nadefinujeme frekvence, které chceme simulovat *Solve – Frequency* od 1 GHz do 2,6 GHz a nastavíme okrajové podmínky tak, jak je uvedeno na Obr. 7.13.



Obr. 7.13

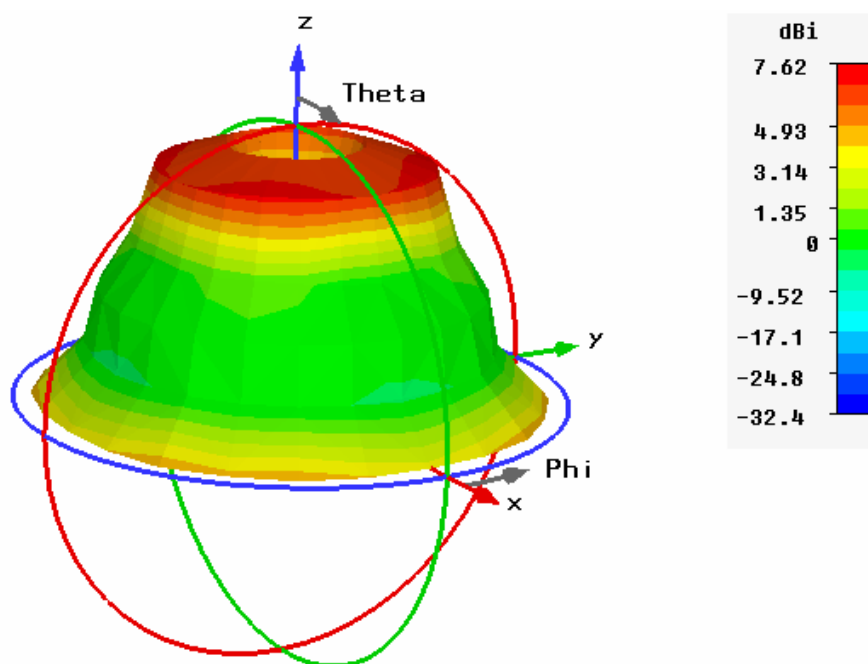
Simulaci spustíme z menu *Solve*, zvolíme *Frequency domain solver* a kliknem na tlačítko *Start*.

7.2. Výsledky simulace



Obr. 7.14 Srovnání hodnot činitele odrazu

Z Obr. 7.14 můžeme konstatovat dobrou shodu obou výsledků. Vzhledem k tomu, že při simulaci v programu COMSOL byla použita hustější diskretizační, lze považovat výsledky z toho programu za přesnější.



Obr. 7.15 Směrová charakteristika magnetické antény $f = 2$ GHz vypočtena v CST

8. Závěr

V diplomové práci jsem se věnoval numerickému ověření funkčnosti tzv. magnetické antény. Koncept magnetické antény byl stručně popsán v neveřejné výzkumné zprávě, její funkčnost nebyla dostatečně ověřena. U antény byla požadována dominance magnetické složky na apertuře, aby vlastnosti antény nebyly citlivé na elektricky vodivé nečistoty, námrazu a další překážky.

V první části práce jsem se pokusil na výsledcích simulací v programovém prostředí COMSOL Multiphysics vysvětlit princip fungování antény. Rozsáhlé parametrické analýzy (v práci jsou uvedeny pouze souhrnné výsledky) měly vést k nalezení závislostí mezi stavovými proměnnými struktury (rozměry, elektrické vlastnosti dielektrika uvnitř antény) a parametry antény (pro jednoduchost byl uvažován kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu antény).

Vzhledem k tomu, že ve výsledcích parametrických analýz nebylo možno jednoduše vypočítat závislost mezi impedančním přizpůsobením antény v pracovních kmitočtových pásmech stavovými proměnnými antény, přešel jsem v další části práce k optimalizaci antény pomocí metody roje částic.

Ze všeho nejdříve jsem se soustředil na možnost anténu optimalizovat pouhou změnou jejich rozměrů. To však mělo za následek velmi dlouhé výpočetní časy a nepříliš velkou úspěšnost. Z tohoto důvodu jsem od tohoto přístupu upustil a začal se soustředit na optimalizaci antény pomocí změny dielektrika uvnitř trychtýře.

Dielektrický impedanční transformátor, který byl tvořen třemi vrstvami různých dielektrik, vykazoval mnohem lepší výsledky: podařilo se zjistit hodnoty permitivity vrstev, pro něž byla anténa impedančně přizpůsobena ve všech pracovních pásmech kmitočtů. Tím bylo splněno zadání.

Optimalizovaná anténa byla dále podrobně zkoumána. Byly zobrazeny její normované vyzařovací charakteristiky, rozložení elektrického a magnetického pole v jejím okolí.

Dále jsem sledoval vliv vodivých materiálů, umístěných v apertuře antény. Bylo zjištěno, že magneticky vodivý materiál ovlivňuje výsledný činitel odrazu podstatně více, než elektricky vodivý materiál. Z tohoto důvodu tak lze předpokládat, že se na apertuře vyskytuje dominantně tečná složka magnetického pole.

V poslední části práce je prezentováno ověření dosažených výsledků programem CST Microwave Studio. Byla konstatována dobrá shoda obou výsledků. Experimentální ověření výsledků nebylo součástí zadání a bylo plánováno jako obsah následného projektu.

9. Seznamy

9.1. Seznam použité literatury

- [1] RAIDA, Z. Optimalizace v elektrotechnice [online]. Brno: FEKT VUT v Brně – [cit. 29. prosince 2009]. Dostupné na www:
<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/optimalizace/index.htm>
- [2] LUKEŠ, Z. *Analýza a optimalizace mikrovlnných antén v časové oblasti. Disertační práce*. Brno. FEKT VUT v Brně, 2003. 83 s.
- [3] ROBINSON, J., RAHMAT-SAMII, Y. Particle swarm optimization in electromagnetics, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2004, vol. 52, no. 2, p. 397–407.
- [4] COMSOL Multiphysics 3.3 User's Guide. Stockholm: Comsol AB, 2006
- [5] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., RAIDA, Z. *Elektromagnetické vlny a vedení. Skriptum*. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 1999.

9.2. Seznam použitých zkratk

s_{11}	rozptylový parametr, činitel odrazu
PSO	metoda roje částic
GA	genetické algoritmy
ACO	metoda společenství mravenců
k	vlnové číslo
ϵ_r	relativní permitivita
λ	vlnová délka
TM	příčně magnetická vlna
CST	Computer Simulation Technology
PEC	dokonalý elektrický vodič
PMC	dokonalý magnetický vodič