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

VÍCEREFLEKTOROVÁ FRAKTÁLNÍ ANTÉNA
MULTIREFLECTOR FRACTAL ANTENNA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Josef Mikulka
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
SUPERVISOR

BRNO, 2007

-

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Mikulka Josef
Ročník: 3

ID: 88413
Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Vícereflektorová fraktální anténa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem fungování fraktálních antén. Vyberte takový typ fraktální antény, který je vhodný k vytvoření dvoupásmové struktury. Anténu optimalizujte a simulací ověřte její vlastnosti.

Anténu doplňte dvěmi planárními reflektory na bázi kmitočtově selektivních povrchů tak, aby první reflektor odrážel vlny na vyšších kmitočtech a pro vlny na nižších frekvencích byl propustný. Druhý reflektor odráží vlny na nižších frekvencích.

Celou strukturu optimalizujte a simulací ověřte její parametry. Optimalizovanou strkuturu vyrobte a pečlivě proměřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HERTL, I. Vícereflektorová anténa: fraktální anténa s frekvenčně selektivními povrchy. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.

[2] WERNER, D.H., GANGULY, S. An overview of fractal antenna engineering research. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2003, vol. 45, no. 1, p. 38-57. ISSN 1045-9243.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 6.6.2008

Vedoucí projektu: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda oborové rady

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení:	Josef Mikulka
Bytem:	Jarošov 101, Uherské Hradiště, 686 01
Narozen/a (datum a místo):	17. června, 1984 ve Zlíně

(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:	Širokopásmová fraktální 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.

_____

-

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 pořizovaní 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 tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.

4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

……..	……
Nabyvatel	Autor

-

Klíčová slova

Vícereflektorová anténa, frekvenčně selektivní povrchy, planární antény, širokopásmový dipól.

Abstrakt

Práce ověřuje postup návrhu vícepásmové antény s reflektory s reflektory na bázi kmitočtově selektivních povrchů. Při návrhu jsou detailně porovnávány vlastnosti programů Zeland IE3D a CST Microwave Studio. Závěrem lze konstatovat, že oba programy produkují podobné výsledky.

Keywords

Multi-reflector antenna, frequency selective surface, planar antenna, wideband dipole.

Abstrakt

The project verifies the methodology of the design of multiband antennas with planar reflectors based on frequency selective surfaces. During the design procedure, Zeland IE3D and CST Microwave Studio are compared in detail. The final conclusion is that both the programs produce similar results.

-

MIKULKA, J. *Vícereflektorová fraktální anténa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 36 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

-

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vícereflektorová fraktální anténa 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 6. června 2008 .....

podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne 6. června 2008 .....

podpis autor

-

1. Úvod **1**

2. Teorie **3**

2.1 Vícepásmové antény 3
2.1.1 Mikropáskové antény 3
2.1.2 Mikropáskový dipól 4
2.2 Kmitočtově selektivní povrchy 6

3. Návrh aktivního prvku a reflektorů **8**

3.1 Velikost prvku 8
3.2 Postup při výpočtech délky ramene 9
3.3 Návrh selektivních povrchů 10

4. Modelování v prostředí CST Microwaves **12**

4.1 Praktický postup v CST Microwaves 12
4.2 Modelování aktivního prvku a jeho optimalizace 15
4.3 Návrh frekvenčně selektivních reflektorů 16
4.4 Vícereflektorová anténa 19

5. Porovnání výsledků **20**

5.1 Porovnání parametrů aktivního prvku 20
5.2 Porovnání parametrů reflektorů 22
5.3 Porovnání výsledků vícereflektorvé antény 24

6. Závěr **26**

7. Seznam použité literatury **27**

Obr. 1 Mikropásková anténa 3
Obr. 2 Modifikace dipólů 4
Obr. 3 Poměry rezonančních kmitočtů 4
Obr. 4 Směrovost v jednotlivých rezonancích 5
Obr. 5 Poměr rezonančních odporů 5
Obr. 6 Selektivní povrchy 6
Obr. 7 Štěrbiny v pokovené vrstvě 6
Obr. 8 Fraktální selektivní povrchy 8
Obr. 9 Korekce rozměrů struktur 8
Obr. 10 Dipól se zužujícími se rameny 9
Obr. 11 Rozměry dipólu 10
Obr. 12 Umístění kmitočtově selektivních povrchů 10
Obr. 13 Kmitočtově selektivní povrchy ve tvaru čtvercové smyčky 11
Obr. 14 Optimalizovaná anténa 15
Obr. 15 Závislost činitele odrazu S11 na frekvenci 15
Obr. 16 Směrové charakteristiky aktivního prvku 16
Obr. 17 Vlnovod 16
Obr. 18 Vlnovody se selektivními povrchy 17
Obr. 19 Závislost frekvence na parametru S 21 pro frekvenci 2,44 GHz 17
Obr. 20 Závislost frekvence na parametru S 21 pro frekvenci 5,67 GHz 18
Obr. 21 Závislost frekvence na parametru S 21 pro frekvence 2,44 GHz a 5,67 GHz 18
Obr. 22 Model vícereflektorové antény 19
Obr. 23 Směrové charakteristiky v pracovních pásmech 19
Obr. 24 Přizpůsobení aktivního prvku 20
Obr. 25 Směrové charakteristiky aktivního prvku 21
Obr. 26 Závislost parametru S21 na frekvenci 5,67 GHz 22
Obr. 27 Závislost parametru S21 na frekvenci 2,44 GHz 23
Obr. 28 Závislost činitele odrazu S11 na frekvenci vícereflektorové antény 24
Obr. 29 Směrové charakteristiky vícereflektorové antény 25

1. Úvod

Základy bezdrátové komunikace byly položeny roku 1865, kdy James Maxwell matematicky odvodil, že existují elektromagnetické vlny, které se šíří rychlostí světla. Výsledky práce shrnul do rovnic, které vysvětlují všechny známé zákonitosti elektrických a magnetických polí. V roce 1888 Heinrich Rudolf Hertz aplikoval Maxwellovy teorie na tvorbu a příjem rádiových vln. Jeho experimenty prokázaly existenci elektromagnetických vln. Otec bezdrátové komunikace Guglielmo Marconi jako první poslal radiový signál přes Atlantický oceán. V roce 1909 se stal za své výzkumy spoludržitelem Nobelovy ceny. Druhou část ceny převzal Ferdinand Brown, který dále rozvinul a vylepšil bezdrátové vysílání.

Nyní, po více než století vývoje a nových objevů, kdy je již bezdrátová komunikace součástí našeho každodenního života, zažíváme drtivý nástup služeb a zařízení pro mobilní komunikaci. Klíčovým prvkem v tomto procesu se staly antény. Jejich miniaturizací jsme získali kompaktní rozměry, a tím volnost designu mobilních zařízení.

Pro svůj nízký profil se v těchto zařízeních začalo používat planárních antén. První zmínky o planárních (mikropáskových) anténách se v literatuře začaly objevovat počátkem 50. let minulého století. Tehdy totiž začala vznikat potřeba vyrobit plošné antény, které by dobře kopírovaly povrch letadel a jiné vojenské techniky. Až později došlo k rozšíření aplikací do oblasti civilní, a to zejména do oblasti komunikací.

Mikropáskové antény jsou stále častěji využívány v současné radiokomunikační praxi. Proto stále důležitější roli hrají počítačové programy, které slouží k jejich návrhu a optimalizaci (např. Ansoft Designer, CST Microwave Studio, Zeland IE3D).

Jedním z nejčastějších požadavků kladených na antény je práce ve více pásmech. Antény tedy můžeme rozdělit na širokopásmové nebo vícepásmové. Širokopásmovou anténou rozumíme vyzařující strukturu mající v širokém souvislém rozsahu kmitočtů požadované vlastnosti impedanční (vstupní impedance) a vyzařovací (tvar směrových charakteristik, polarizace a zisk). Vícepásmová anténa je struktura mající vhodné vlastnosti ve dvou a více izolovaných pásmech, mezi kterými se nacházejí kmitočtové oblasti, ve kterých požadavky splněny nejsou. V současné době jsou nejčastěji používané vícepásmové antény.

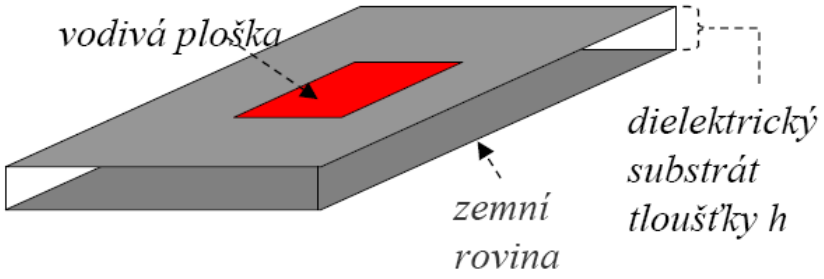
Cílem předkládaného projektu je ověřit funkčnost dvoupásmové antény, která sestává z širokopásmového dipólu a dvou rovinných reflektorů na bázi kmitočtově selektivních povrchů. Anténa byla navržena v [1] a její funkčnost zde byla ověřena v programu Zeland IE3D. V předkládané práci je funkčnost antény ověřována v programu CST Microwave Studio a výsledky jsou detailně porovnávány s výsledky publikovanými v [1].

2. Teorie

2.1 Vícepásmové antény

2.1.1 Mikropáskové antény

Mikropásková anténa se skládá z kovového anténního prvku (angl. patch), z dielektrického substrátu a z kovové zemní desky. Nejjednodušší konfigurace mikropáskové antény je nakreslena na obr. 1.



Obr. 1 Mikropásková anténa

Mikropáskové antény jsou tenké a lehké, a proto se nejvíce využívají v letectví a mobilních aplikacích. Jelikož nejsou schopny pracovat s velkými výkony, jsou používány především v nízkovýkonových vysílacích a přijímacích aplikacích.

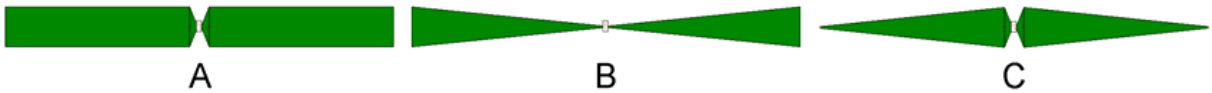
Mikropáskovou anténu si můžeme představit jako mikropáskové vedení na konci naprázdno, jehož konec je výrazně rozšířený (aby bylo dosaženo co největšího vyzařování energie do prostoru). Mikropáskové antény tedy můžeme snadno integrovat do planárních obvodů, které zpracovávají vysílaný (nebo přijímaný) signál. Tato skutečnost vedla k vývoji integrovaných mikropáskových aktivních antén, ve kterých jsou obvodové funkce svázány s funkcemi antény.

Mnoho z anténních aplikací v satelitních spojích, mobilních komunikacích, bezdrátových lokáních sítích a dalších klade požadavky na kompaktnost, fungování na dvou frekvencích, řízení směrové charakteristiky, atd. Tyto funkce mohou být implementovány přímo ve struktuře mikropáskové antény, a proto se tyto antény stávají běžně užívanými.

2.1.2 Mikropáskový dipól

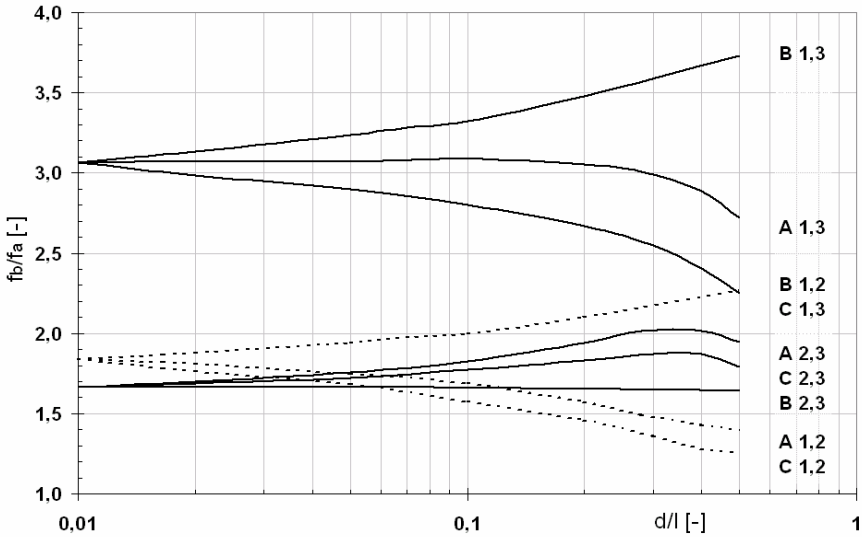
Dipóly obvykle pracují v oblasti první rezonance, kde délka ramene $l_1 = \lambda / 4$ [1]. Hlavním důvodem je rezonanční odpor, který se obvykle pohybuje v rozmez 50 až 75 Ω. Některé aplikace využívají půlvlnné resonance ($l_2 \approx \lambda / 2$), kde rezonanční odpor je výrazně vyšší, často přes 1 kΩ. Poměr rezonančních kmitočtů je stabilní $f_2 / f_1 = 1{,}85$. V ostatních rezonancích je směrová charakteristika nevhodná, s výraznými laloky a nízkým ziskem do pracovní oblasti. Tyto problémy znemožňují použití dipólu ve tří a vícepásmových aplikacích.

Pomocí struktur uvedených na obrázku 2 je možné dosáhnout provoz s poměrem rezonančních kmitočtů $f_2 / f_1 = 1{,}3$ až 3,7. S rostoucí šířkou ramen, se zvyšuje potlačení bočních laloků, což i ve třetí resonanci.



Obr. 2 Modifikace dipólů

Na následujícím grafu je uvedený poměr rezonančních kmitočtů jednotlivých struktur v závislosti na šířce ramene, vyjádřené ve vztahu k jeho délce (*d*/*l*). Tento graf byl určen pro výběr vhodné struktury a šířky ramene pro požadovanou kombinaci pracovních kmitočtů.

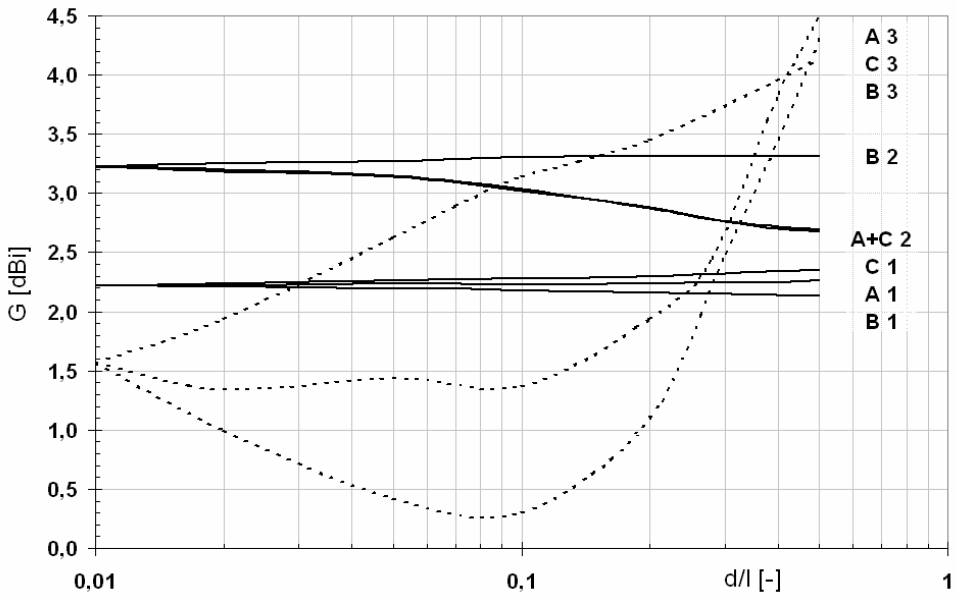


Obr. 3 Poměry rezonančních kmitočtů

Pod označením B 1,3 je uveden poměr mezi rezonančním kmitočtem ve třetí a první rezonanci u struktury s označením B podle obrázku 15. Výsledky ukázaly, že s pomocí změny tvaru ramene dipólu je možno dosáhnout poměru rezonančních kmitočtů mezi 1,3 a 3,7.

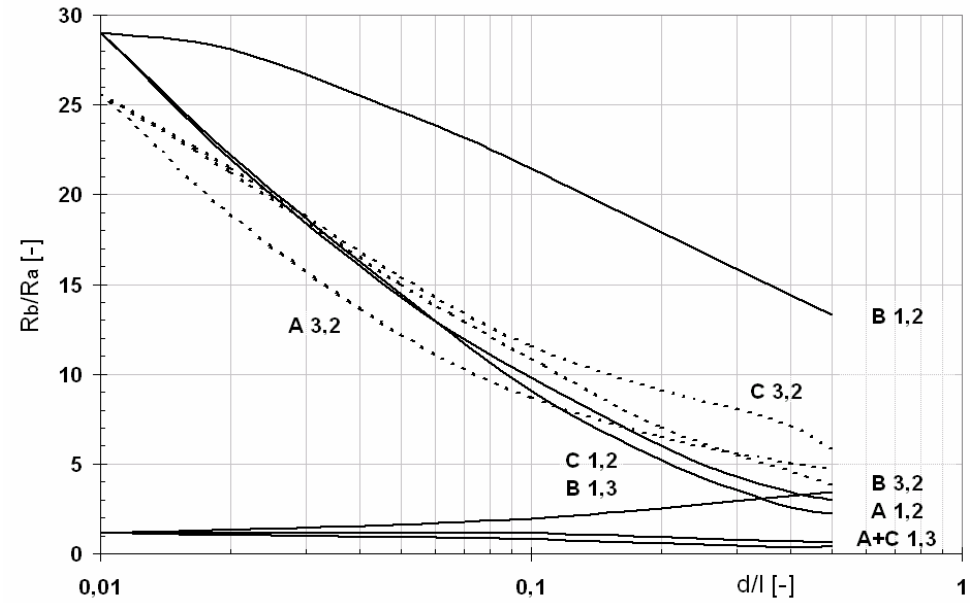
Na obrázku 4 je pro sledované modifikace (A až C) uveden činitel směrovosti do pracovní oblasti v první až třetí rezonanci. V první a druhé rezonanci se se změnou šířky

ramen tento parametr zásadně nemění. Naopak se zvyšující se šířkou ramene se zvyšuje směrovost ve třetí rezonanci, což umožňuje její použití.



Obr. 4 Směrovost v jednotlivých rezonancích

Obrázek 5 uvádí poměr mezi rezonančními odpory. Se zvyšujícími se příčnými rozměry ramen poměr rezonančních odporů ve většině případů klesá. Tento stav usnadňuje impedanční přizpůsobení. Rezonanční odpory v prvních a třetích rezonancích jsou si blízké, což je pro návrh výhodné.



Obr. 5 Poměr rezonančních odporů

Mikropásková provedení nabízí možnost snadné reprodukce a jsou tedy vhodná pro sériovou výrobu. Možnost změny šířky mikropásku částečně zvyšuje dosažitelná rozmezí poměru rezonančních odporů. Konstrukce na desce plošného spoje je vhodnější pro vícevrstvá uspořádání a má také vyšší mechanickou odolnost.

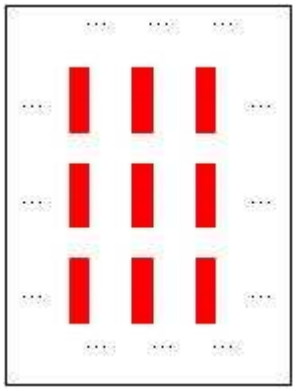
Mikropásková provedení s nestejnou šířkou mikropásku umožňují nejvyšší variabilitu v poměru rezonančních kmitočtů. Také ovlivnění rezonančních odporů je při tomto provedení nejefektivnější. Proto je tato skupina antén zvolena pro použití jako aktivní prvek ve vícereflektorové anténě.

2.2 Kmitočtově selektivní povrchy

Kmitočtově selektivní povrchy jsou planární periodické struktury sestávající z vodivých elementů, které jsou periodicky rozmístěny na jedné straně dielektrické desky. Planární vodivé elementy mohou být různě tvarovány (obr. 6). Kmitočtově selektivní povrchy na určitých kmitočtech veškerou energii dopadající vlny odrážejí stejně jako reflektor ze souvislého kovu, a na jiných kmitočtech energii propouštějí tak, jako by v prostoru nebyla žádná překážka.

Obr. 6 Selektivní povrchy

V rámci jednoho kmitočtově selektivního povrchu bývají většinou všechny elementy stejného tvaru (obr. 6). Elementy mohou být realizovány buď jako kovové nebo jako štěrbiny ve zcela pokovené lícní vrstvě (obr. 7).



Obr. 7 Štěrbiny v pokovené vrstvě

Při návrhu konkrétního selektivního povrchu budeme vycházet z popisu kmitočtového průběhu modulu a fáze činitele odrazu. Jejich kmitočtový průběh bude záviset na tvaru vodivých elementů, na jejich rozmístění na dielektrickém substrátu a na jejich velikosti.

Pokud chceme navrhovat selektivní povrchy s určitou kmitočtovou charakteristikou (tj. s určitým kmitočtovým průběhem modulu a fáze činitele odrazu), musíme umět tyto

povrchy matematicky modelovat. A jelikož analytický popis chování povrchů není znám, musíme stejně jako v případě planárních mikrovlnných vedení sáhnout po numerických metodách.

Mezi nejčastěji používané metody analýzy kmitočtově selektivních povrchů patří momentová metoda. Na rozdíl od metody konečných diferencí, metody konečných prvků nebo metody přímek vychází momentová metoda z Maxwellových rovnic v integrálním tvaru. Při použití momentové metody pak pracujeme s elektrickými proudy indukovanými v elektricky vodivých elementech (nebo s magnetickými proudy v magneticky vodivých elementech štěrbinách) a z těchto proudů pak počítáme kmitočtové vlastnosti povrchu. Nemusíme tudíž pracovat s okolním prostorem a diskretizační sítí pokrýváme pouze vodivé elementy.

Pokud kmitočtově selektivní povrch je vytvořen s identických vodivých elementů, které jsou na dielektrickém substrátu rozmístěny ekvidistantně, můžeme s výhodou použít spektrální formulaci momentové metody. Při spektrální formulaci předpokládáme, že kmitočtově selektivní povrch je nekonečně rozlehlý, takže rozmístění vodivých elementů je periodické, a tudíž i rozložení proudů na těchto elementech je periodickou funkcí. Jelikož spektrum periodické funkce je diskrétní, spojitému rozložení proudů na vodivých elementech odpovídá diskrétní prostorové spektrum. Rovnice pro diskrétní spektra pak lze relativně snadno přepsat do maticové formy a získané maticové rovnice lze poté řešit na počítači.

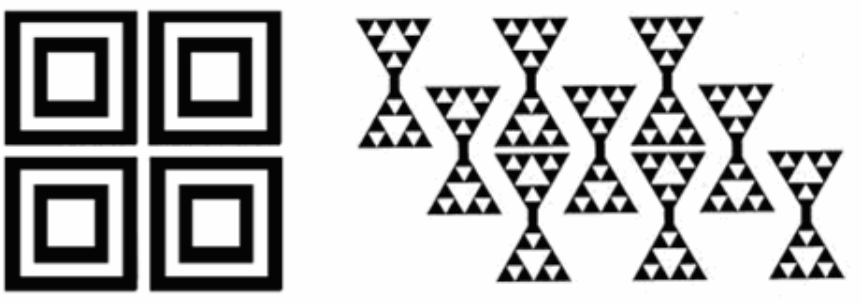
Nevýhodou klasické momentové metody i její spektrální verze ovšem je, že s ní lze těžko modelovat vodivé elementy s netriviální geometrií (jiného nežli obdélníkového nebo kruhového tvaru). K řešení tohoto problému lze přitom použít dvou různých přístupů.

První přístup spočívá v opuštění momentové metody a k návratu k metodě konečných diferencí.

Druhý přístup spočívá ve využití metody konečných diferencí nebo metody konečných prvků k modelování jediného vodivého elementu kmitočtově selektivního povrchu, a to pomocí formální aproximace rozložení proudu s neznámými aproximačními koeficienty. Takto získaný model je pak použit ve spektrální momentové metodě, která se postará o efektivní určení hodnoty neznámých aproximačních koeficientů.

Nástup moderních výpočetních technologií umožnil kvalitní a rychlou numerickou analýzu struktur kmitočtově selektivních povrchů. Většina autorů pracujících s kmitočtově selektivními povrchy využívá spektrální metodu momentů pro numerickou analýzu struktur. Tato metoda je implementována například v prostředí Ansoft Designer. Pro řešení drátových struktur se jako vhodná ukázala momentová metoda s Thin Wire aproximací . Na rozdíl od antén se drátové realizace struktur kmitočtově selektivních povrchů často nepoužívají, zejména pro složitost jejich realizace. Jako možné se rovněž ukázalo použití metody konečných diferencí v časové oblasti, ale nerozšířilo se. Mnozí autoři ve svém návrhu uplatnili optimalizaci s využitím genetických algoritmů.

Kombinací postupů a prvků jednotlivých různých struktur je možno dosáhnout nepřeberného množství tvarů s různými vlastnostmi. Samostatnou skupinou jsou kmitočtově selektivní povrchy s fraktálním motivem (obr. 8). Zavedením těchto prvků do struktur kmitočtově selektivních povrchů je možné dosáhnout specifických vlastností, zejména vícepásmového provozu.



a) b)

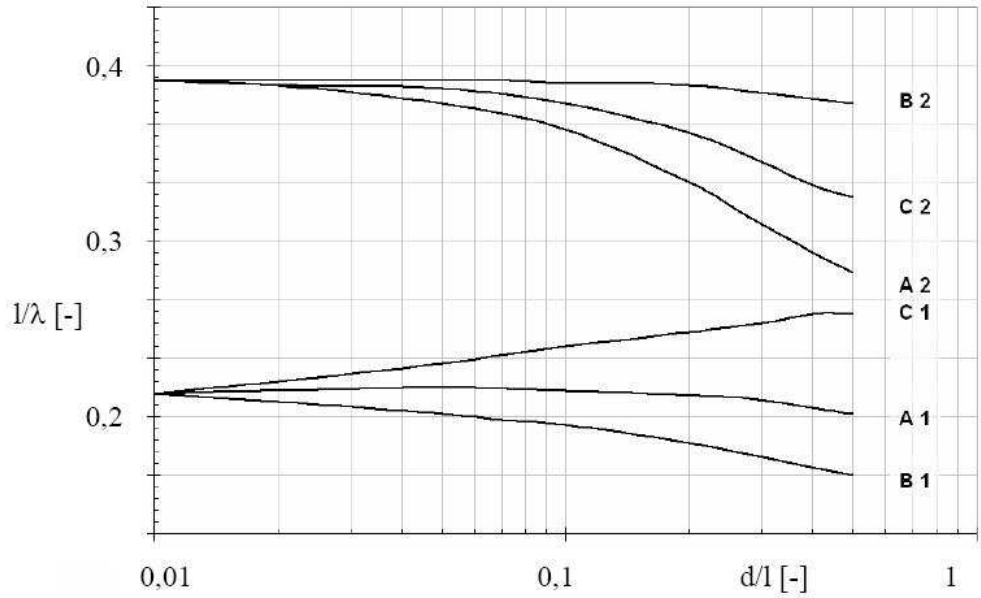
Obr. 8 Fraktální selektivní povrchy
a) čtvercový ; b) sierpinského

3. Návrh aktivního prvku a reflektorů

3.1 Velikost prvku

Návrh prvku bude proveden dle postupu [1]. Bude využit jen postup bez upřesnění konkrétních hodnot rozměru aktivního prvku.

Při návrhu zářiče můžeme postupovat s pomocí (obr. 9). Na něm jsou uvedeny hodnoty poměrů l/λ v prvních a druhých rezonancích v závislosti na relativní šířce ramene dipólu d/l. Výslednou délku ramene stanovíme pomocí nejnižšího pracovního kmitočtu a nejnižší použité rezonance.

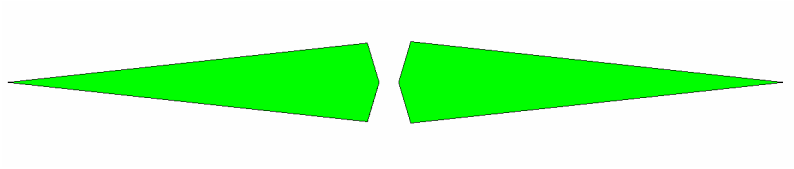


Obr. 9 Korekce rozměrů struktur

3.2 Postup při výpočtech délky ramene

Aktivní prvek bude navržen jako vícepásmová anténa pro pásma ISM 2,4 / 5,7 GHz. Navrhovaná anténa bude dipól se zužujícími se rameny. Byl vybrán díky jeho rezonančním odporům pro pásma 2,4-2,483 GHz a 5,47-5,87 GHz. Návrh a optimalizace budou prováděny v návrhovém prostředí CST Microwaves oproti návrhu z prostředí Zéland IE3D, z kterým budeme v poslední řadě výsledky porovnávat.

Finálním tvarem bude dipól se zužujícími se rameny (obr.10). Vhodný poměr rezonančních kmitočtů splňuje provedení s poměrem šířky a délky ramene *d*/*l* = 0,5. Uvedená struktura má v jednotlivých pracovních pásmech směrovosti 2,3 dBi a 4,3 dBi.



Obr. 10 Dipól se zužujícími se rameny

Nejdříve jsme si dle níže uvedeným postupem vypočítali délku ramene. Délku ramene jsme počítali pro nižší frekvenci 2,4 GHz (byl použit jednoduchý vzorec pro výpočet vlnové délky pro anténu, která je v prostředí s permitivitou 1.Shodnotili jsme, že substrát s permitivitou 3,38, na kterém bude anténa vytvořena je na tolik tenký a z druhé strany nebude žádný kov, tudíž bude mít na vlnovou délku zanedbatelný vliv)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.10^8}{2,4.10^9} = 0,125\,m = 125\,mm$$

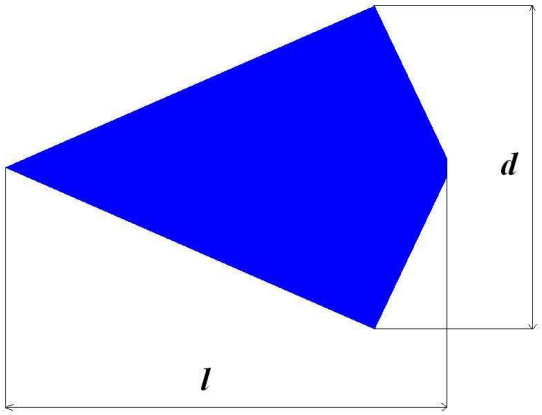
Výchozím tvarem je dipól se zužujícími se rameny, motiv C podle obrázku 2. Vhodný poměr rezonančních kmitočtů splňuje provedení s poměrem šířky a délky ramene *d*/*l* = 0,5.

Dle poměru *d*/*l* = 0,5 jsme z grafu (obr. 9) určili poměr *l*/λ , který přísluší motivu C *l*/λ = 0,26 a vypočítali jsme si délku ramene.

$$l / \lambda = 0,26 \Rightarrow l = \lambda \cdot 0,26 = 0,125 \cdot 0,5 = 0,0326\,m = 32,6\,mm$$

Dále za pomocí stejného poměru *d*/*l* = 0,5 jsme vypočítali šířku ramene.

$$d / l = 0,5 \Rightarrow d = l \cdot 0,5 = 0,0326 \cdot 0,5 = 0,0163\,m = 16,3\,mm$$

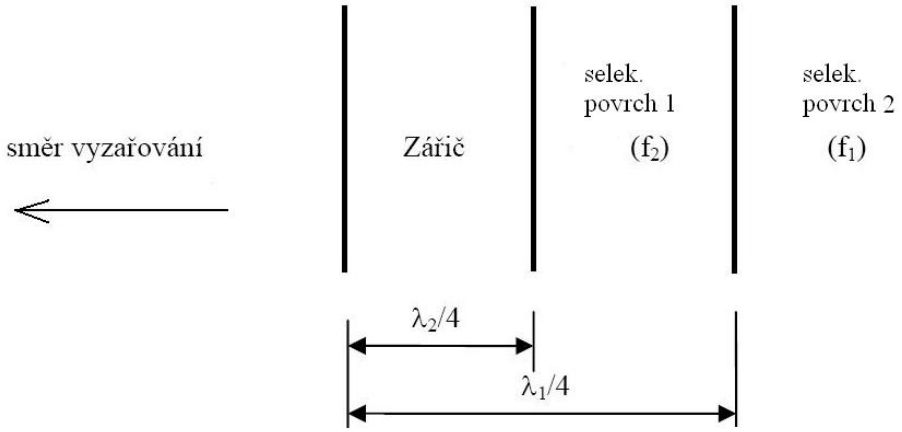


Obr. 11 Rozměry dipólu

3.3 Návrh selektivních povrchů

Tvar a umístění motivu kmitočtově selektivních reflektorů se přímo odvíjí od pracovních kmitočtů a polarizací. Množství využitelných pracovních pásem u dipólových kmitočtově selektivních povrchů není v tomto případě výhodou. Pro provozy s kruhovou nebo obecnou polarizací se jako nejvhodnější ukázalo použití motivu kruhového prstence. Pro provozy s lineární polarizací je nejvhodnějším tvarem obdélníkový motiv.

Podobně jako motiv aktivního prvku je motiv kmitočtově selektivního povrchu umístěn na desce plošného spoje. Substráty jsou umístěny tak, aby vzdálenost aktivního prvku od reflektoru byla rovna čtvrtině vlnové délky na jednotlivých pracovních kmitočtech. Umístění substrátů je uvedeno na obrázku (obr. 12).



Obr. 12 Umístění kmitočtově selektivních povrchů

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{2{,}4 \cdot 10^9} = 0{,}125\, m = 125\, mm$$

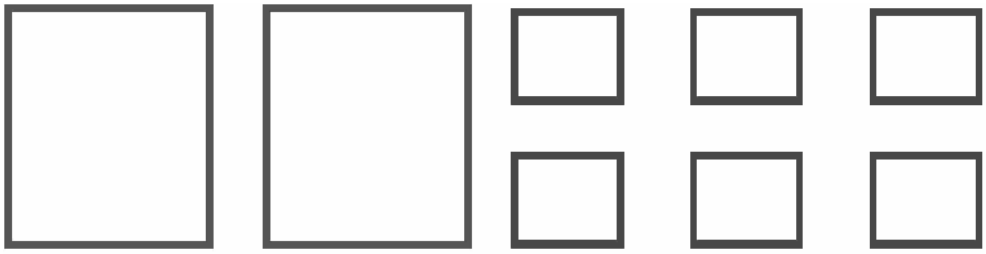
$$\lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{3.10^8}{5{,}7.10^9} = 0{,}0526\, m = 52{,}6\, mm$$

$$\lambda_1 / 4 = \frac{0{,}125}{4} = 0{,}03125\, m = 31{,}25\, mm$$

$$\lambda_2 / 4 = \frac{0{,}0526}{4} = 0{,}01315\, m = 13{,}15\, mm$$

Vzdálenost pro selektivní povrch 1 (obr. 13b) volíme dle výpočtů vzdálenost *14 mm* a pro selektivní povrch 2 (obr. 13a) volíme vzdálenost *32 mm.*

Pro aktivní prvky byla zvolena struktura čtvercových smyček (obr. 13). Pro jejich vyladění byly vyzkoušeny dva postupy.



a) b)

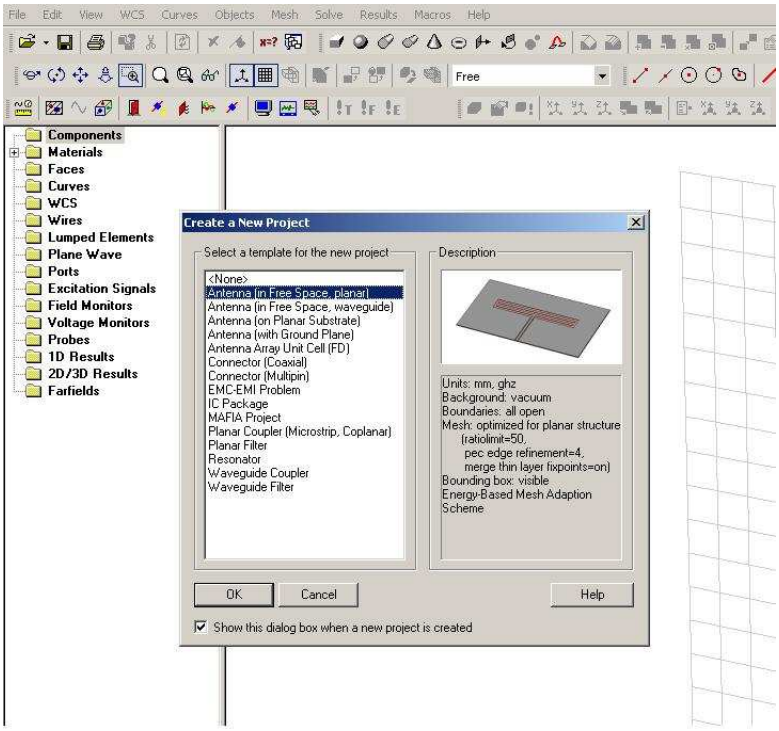
Obr. 13 Kmitočtově selektivní povrchy ve tvaru čtvercové smyčky
a) struktura pro frekvenci 2,44 GHz b) struktura pro frekvenci 5,67 GHz

Při prvním postupu jsme používali ozařování rovinnou vlnou ale při práci s omezenou plochou je to sporně interpretovatelné. Proto jsme zvolili druhý postup, a to za použití vlnovodu. Do vlnovodu jsme vložili laděnou strukturu a postupně jsme tvary struktury optimalizovali tak, abychom ji vyladili na požadované kmitočtové pásmo.

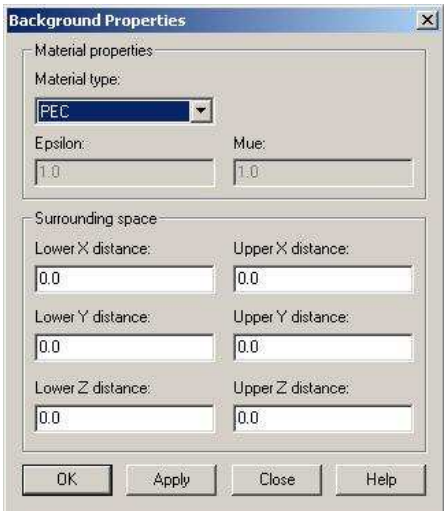
4. Modelování v prostředí CST Microwaves

4.1 Praktický postup v CST Microwaves [5]

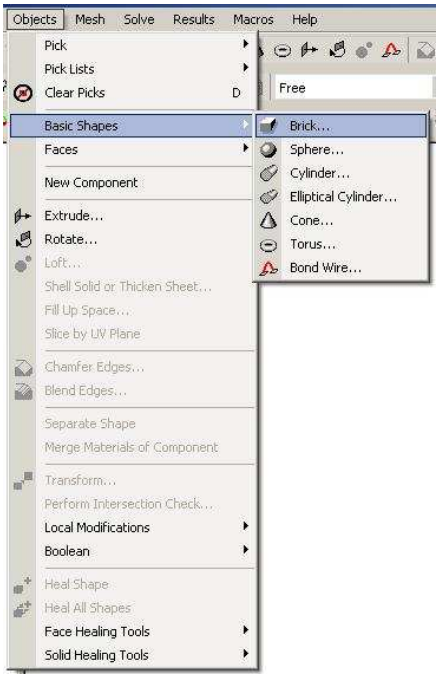
1. Otevřeme nový návrh planární antény: *File → New → Antenna (in Free Space, planar)→OK*. Nastavíme jednotky, s kterými budeme pracovat: *Solve → Units*.



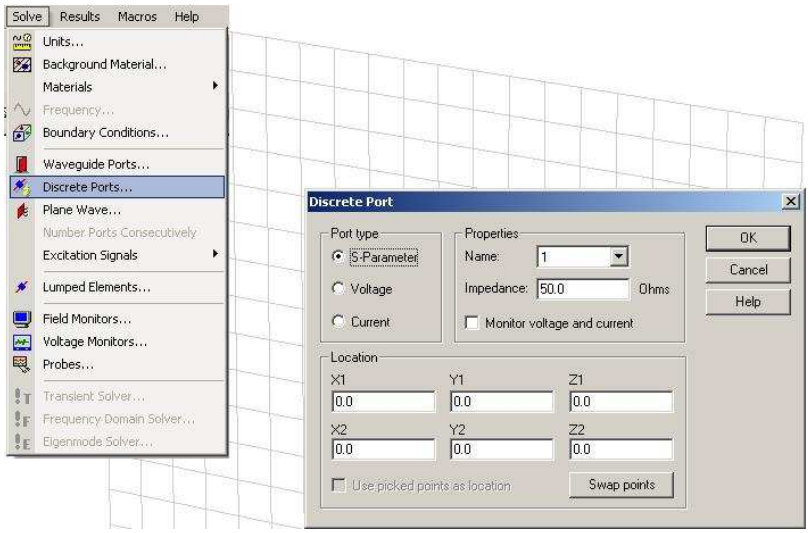
2. Vybereme substrát, na kterém bude anténa vytvořena: *Solve → Background material.*



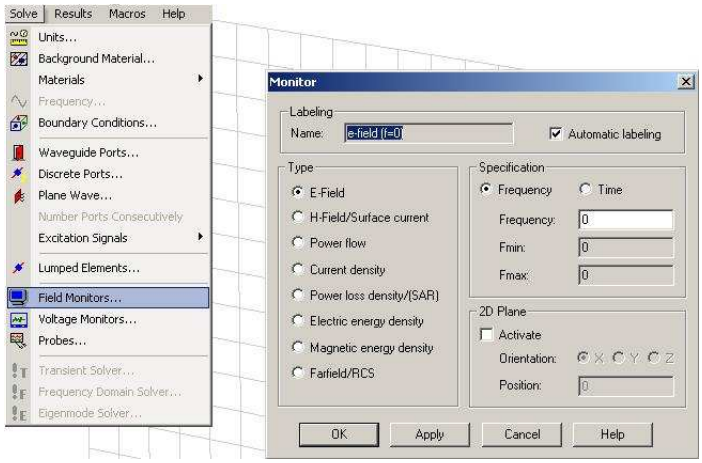
3. Definujeme strukturu antény: *Objects → Basic Shapes → Brick*. Poklepeme myší na návrhovou plochu, čímž zadáme první bod kvádrové struktury. Druhým poklepáním na jiném místě plochy definujeme obdélník, který bude podstavou hranolu. Jako poslední zadáme výšku. Po potvrzení se nám otevře okno, kde si můžeme změnit název, rozměry a materiál, z něhož bude zadaná struktura vyrobena. Tlačítko *Preview* vykreslí strukturu do pracovního pole.



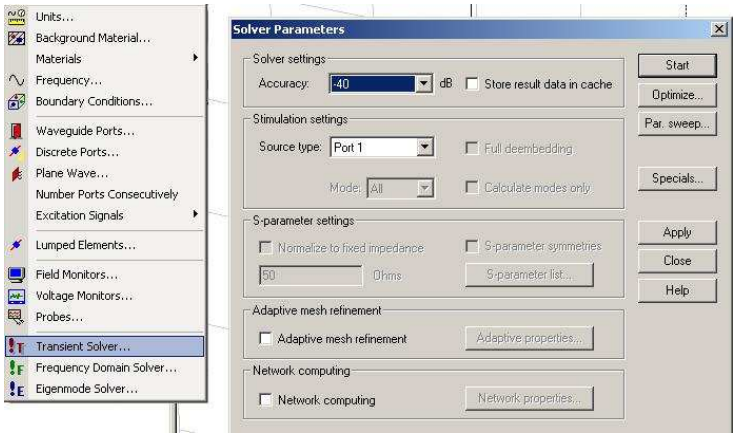
4. Zadáme frekvenční interval, pro který se má struktura analyzovat: *Solve → Frequency*.Zadáme zdroj signálu: *Solve → Discrete Ports*. Zdrojem může být buď impedanční sonda, proudový nebo napěťový zdroj. Zdroj je prostorově určen dvěma body. Souřadnice s indexem 1 (X1, Y1, Z1) udávají polohu prvního bodu, to samé platí pro souřadnice s indexem 2.



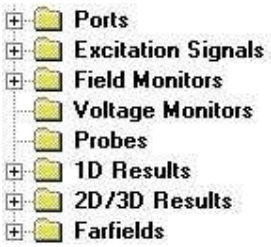
5. Nastavíme parametry, které chceme sledovat: *Solve → Field Monitors*. Při zadání více parametrů potvrzujeme volbu tlačítkem *Apply*, při zadání posledního potvrdíme tlačítkem *OK*.



6. Zvolíme druh simulace. Na výběr pro tuto simulaci máme ze tří možností – časovou, frekvenční a vlastní režim. Poslední možnost volíme, pokud máme zadané určité hodnoty, frekvenční režim je velmi složitý a náročný na výpočetní výkon. Časový režim je přesný, navíc není tak náročný na výpočetní výkon a tudíž ani na čas. Proto jej preferujeme: *Solve → Transient Solver.*

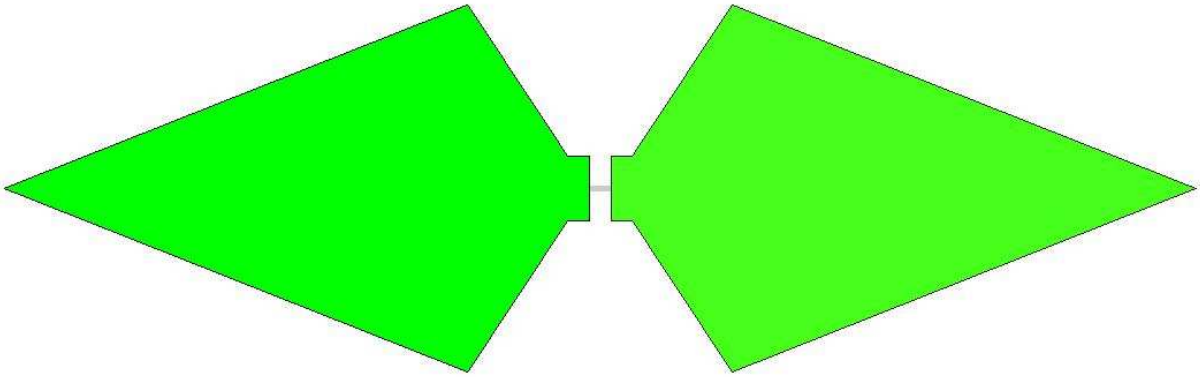


7. Po výpočtu jsou výsledky v nabídce vlevo pod názvy *1D Results, 2D/3D Results a Farfield.*



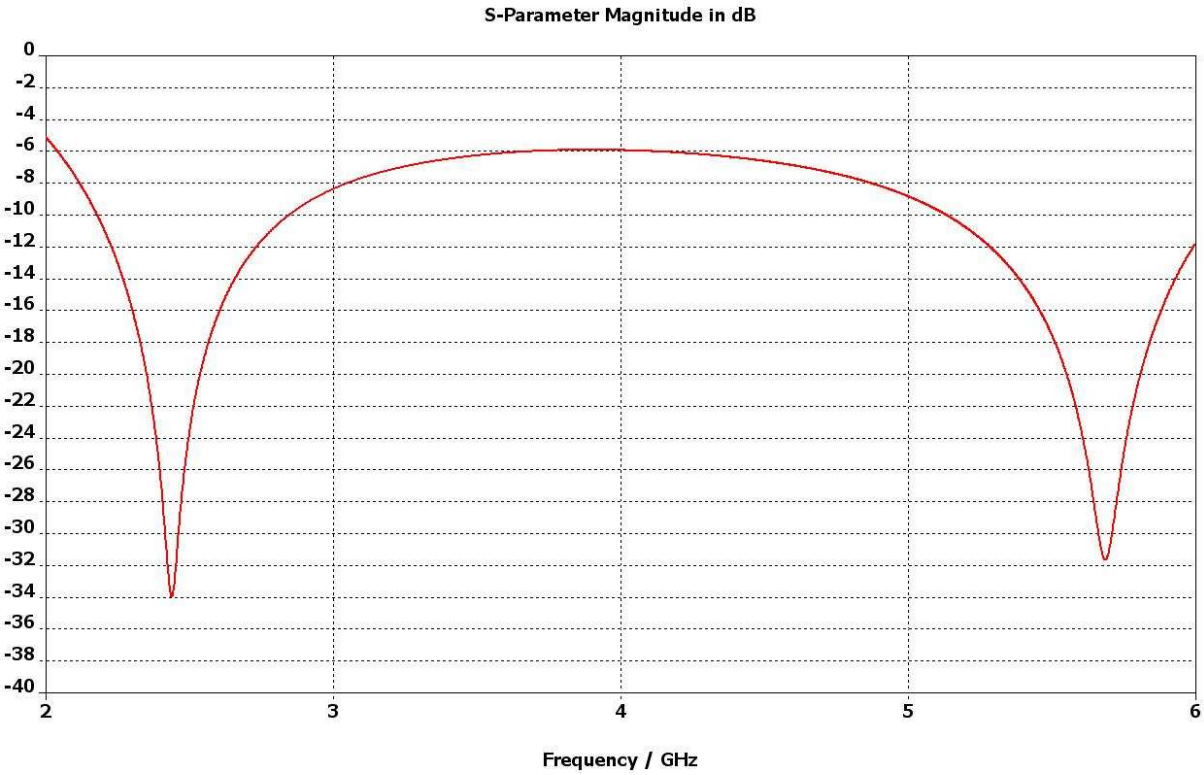
4.2 Modelování aktivního prvku a jeho optimalizace

Aktivní prvek je vytvořen na substrátu s názvem 25N s parametry *h=0,77 mm*, ε_r*=3,38, tg (δ)=0,0025*. Rozměry substrátu jsou 40x80mm. Na substrát jsme navrhli dipólovou anténu se zužujícími se rameny. Anténa byla optimalizovaná postupnými změnami délky *d* a *l* ,a posouváním zlomového bodu. Optimalizovaný tvar antény je na obr. 14.



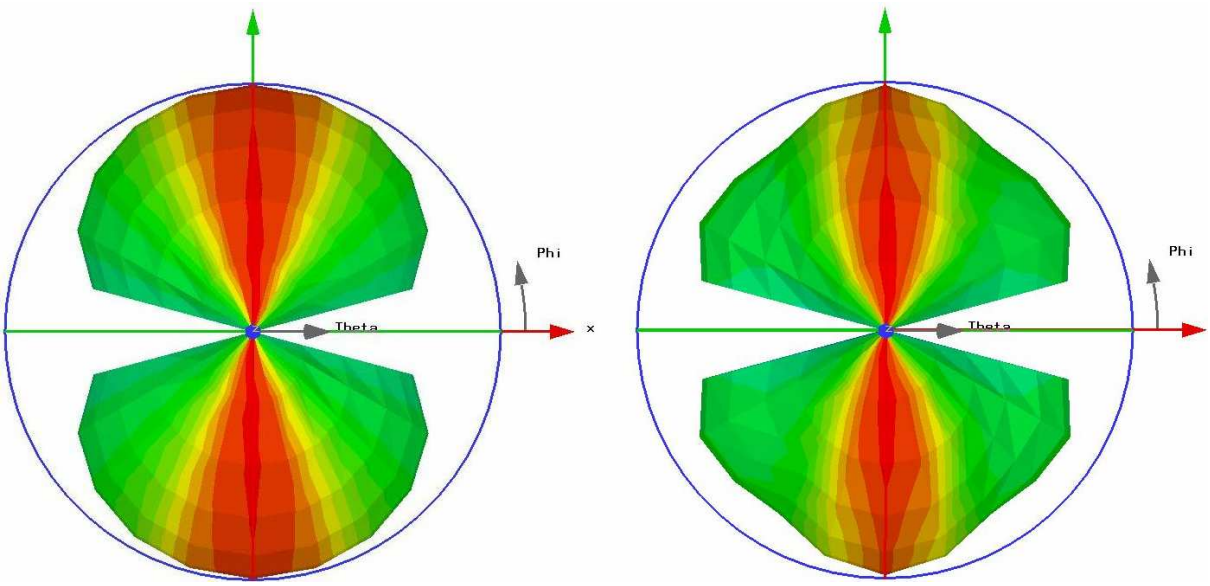
Obr. 14 Optimalizovaná anténa

Simulace byla prováděna v kmitočtovém pásmu 1,5 – 6,5 GHz. Anténa byla optimalizována pro pásma 2,4-2,483 GHz a 5,47-5,87 GHz (obr. 15).



Obr. 15 Závislost činitele odrazu S11 na frekvenci

Směrové charakteristiky optimalizované antény v rovině intenzity elektrického a magnetického pole jsou pro obě pracovní pásma uvedeny na obrázku 16.



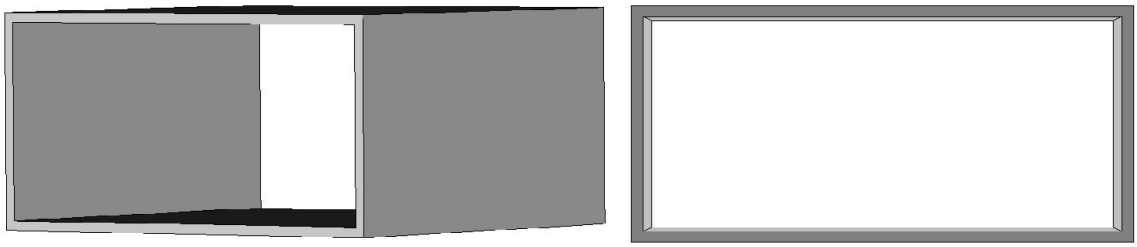
a) b)

Obr. 16 Směrové charakteristiky aktivního prvku
a) v pásmu 2,4 GHz; b) v pásmu 5,7 GHz

4.3 Návrh frekvenčně selektivních reflektorů

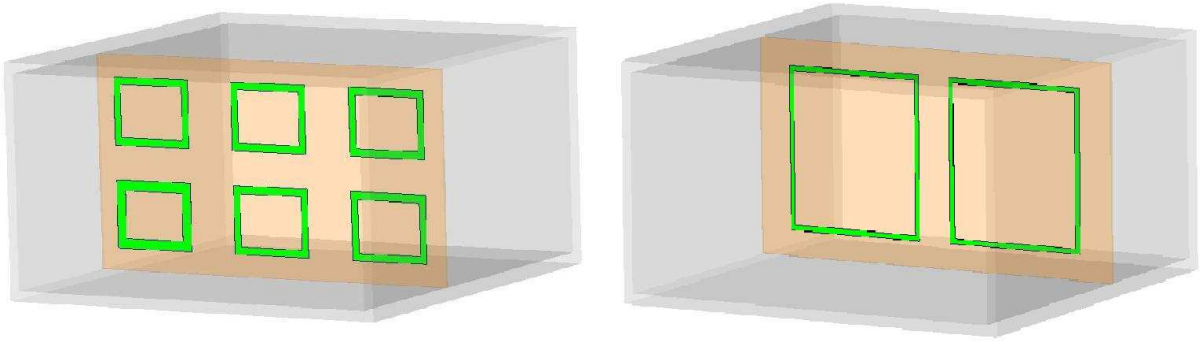
V následující kapitole je upřesněn postup návrhu frekvenčně selektivních reflektorů. Pro návrh je opět použita kombinace pásem ISM 2,4 / 5,7 GHz, jako aktivní prvek je použita anténní struktura navržená v předchozích kapitolách. Jako substrát byl vybrán dostupný materiál 25N ($\varepsilon_r = 3{,}38$; $tg\ (\delta) = 0{,}0025$; $h = 0{,}77\ mm$).

V návrhovém prostředí jsme si namodelovali vlnovod s patřičnými rozměry tak(obr. 17), abychom mohli konkrétní kmitočtově selektivní povrchy do něj vložit (obr. 18).



Obr. 17 Vlnovod

Nejprve byla provedena optimalizace rozmístění elementů. V druhém kroku byla provedena optimalizace podélných a příčných rozměrů čtvercových smyček, čímž byl umožněn přechod od čtvercového k obdélníkovému motivu. Ve třetí fázi byla optimalizována šířka smyček.

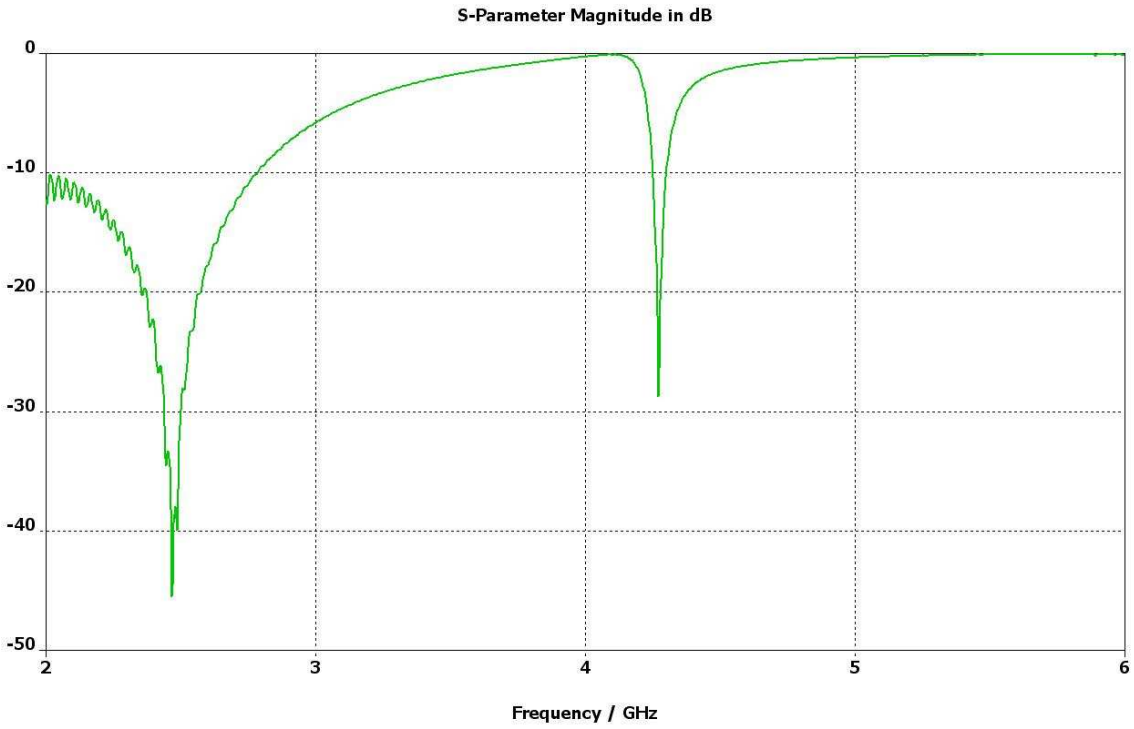


a) b)

Obr. 18 Vlnovody se selektivními povrchy
a) pro pásmo 5,7 GHz; b) pro pásmo 2,4 GHz

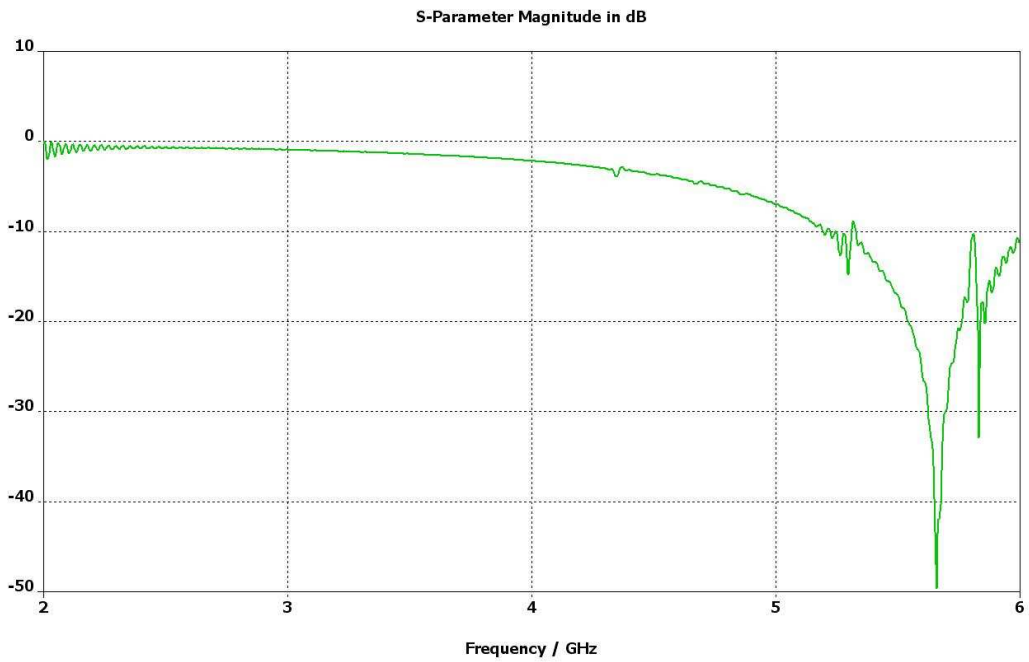
Vlnovod byl opatřen z obou stran tzv. “waveguide“ porty. Porty slouží k vyzařování vln o konkrétních frekvencích a zároveň pro výpočet v našem případě odražené vlny. Simulace byla prováděna v rozmezí 2 až 6 GHz.

V prvním případě jsme ladili kmitočtově selektivní povrch pro nižší frekvenci 2,44 GHz. Našim cílem bylo abychom v této frekvenci dosáhli co největšího odrazu (obr. 19).



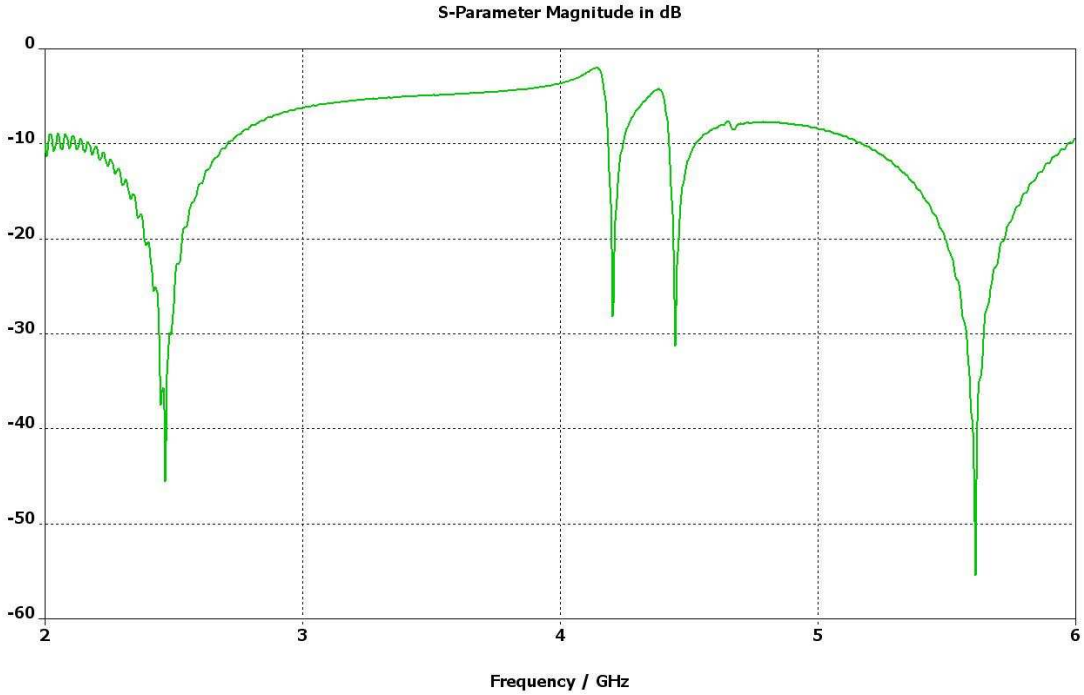
Obr. 19 Závislost frekvence na parametru S 21 pro frekvenci 2,44 GHz

V druhém případě jsme ladili kmitočtově selektivní povrch pro frekvenci 5,67 GHz (obr. 20).



Obr. 20 Závislost frekvence na parametru S 21 pro frekvenci 5,67 GHz

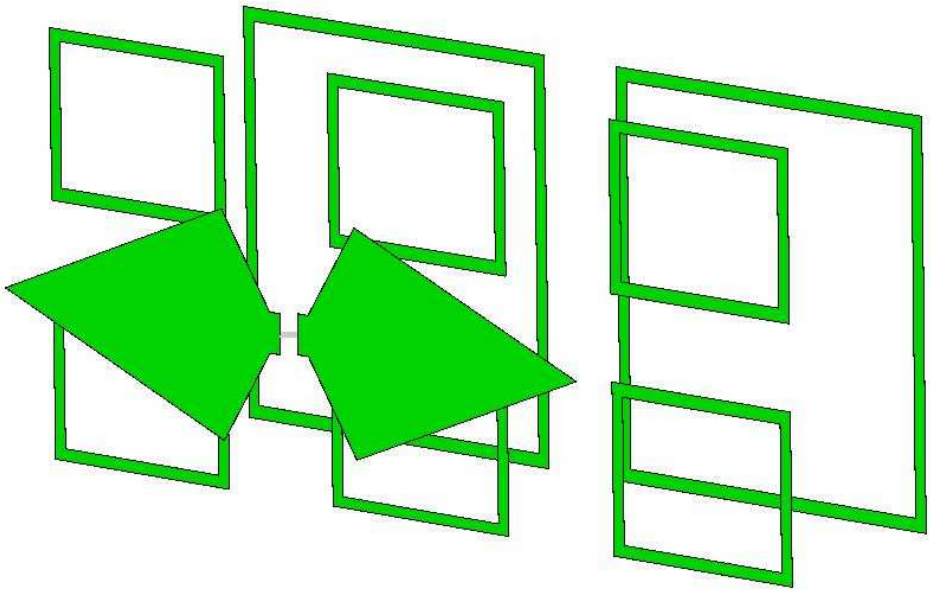
Ve třetím případě jsme do vlnovodu vložili oba dva kmitočtově selektivní povrchy (obr.21).



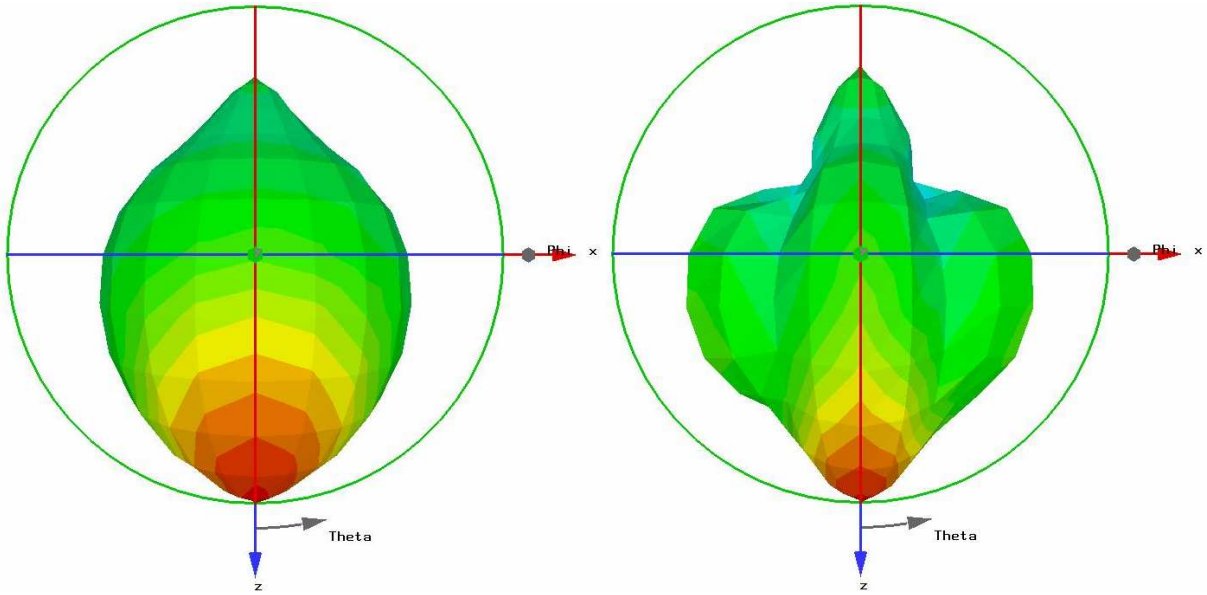
Obr. 21 Závislost frekvence na parametru S 21 pro frekvence 2,44 GHz a 5,67 GHz

4.4 Vícereflektorová anténa

Navržená struktura vícereflektorové antény (obr. 22). Její přizpůsobení a směrové charakteristiky antény jsou zobrazeny na obrázku 23. Vyzařování na nižších kmitočtech zajišťují kromě aktivního prvku především větší prvky na vzdálenější ploše. Menší, k dipólu blíže umístěné elementy vyzařují téměř výhradně jen na vyšším kmitočtu.



Obr. 22 Model vícereflektorové antény

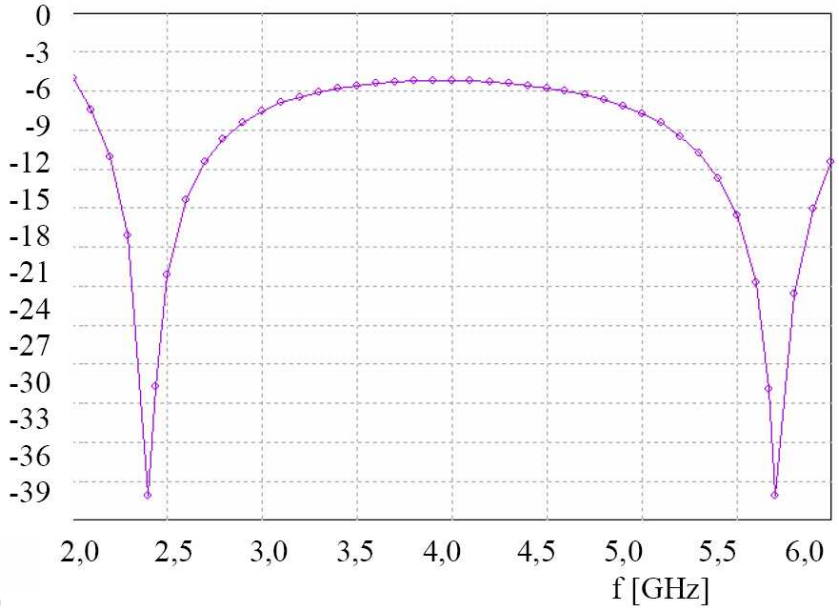


Obr. 23 Směrové charakteristiky v pracovních pásmech

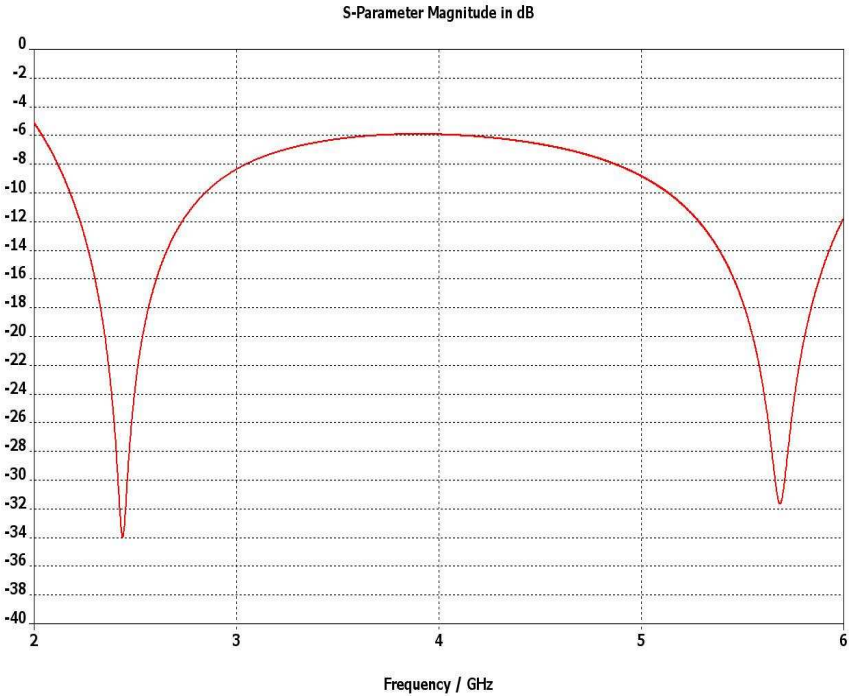
5. Porovnání výsledků

5.1 Porovnání parametrů aktivního prvku

V obou případech bylo docíleno požadovaných pásem 2,4-2,483 GHz a 5,47-5,87 GHz. V náhrvu z IE3D bylo docíleno přizpůsobení parametru S_{11} [dB] 37dB (obr. 24a) v obou pásmech a má v jednotlivých pracovních pásmech směrovosti zisk 2,3 dBi a 4,3 dBi (obr. 25a,b). V návrhu CST jsme dosáhli přizpůsobení parametru S_{11} [dB] 34 dB pro 2,44GHz a 32 dB pro 5,67GHz (obr. 24b) . V jednotlivých pracovních pásmech směrovosti jsme dosáhli nižších zisků 2,18 dBi a 3,95 dBi (obr. 25c,d).

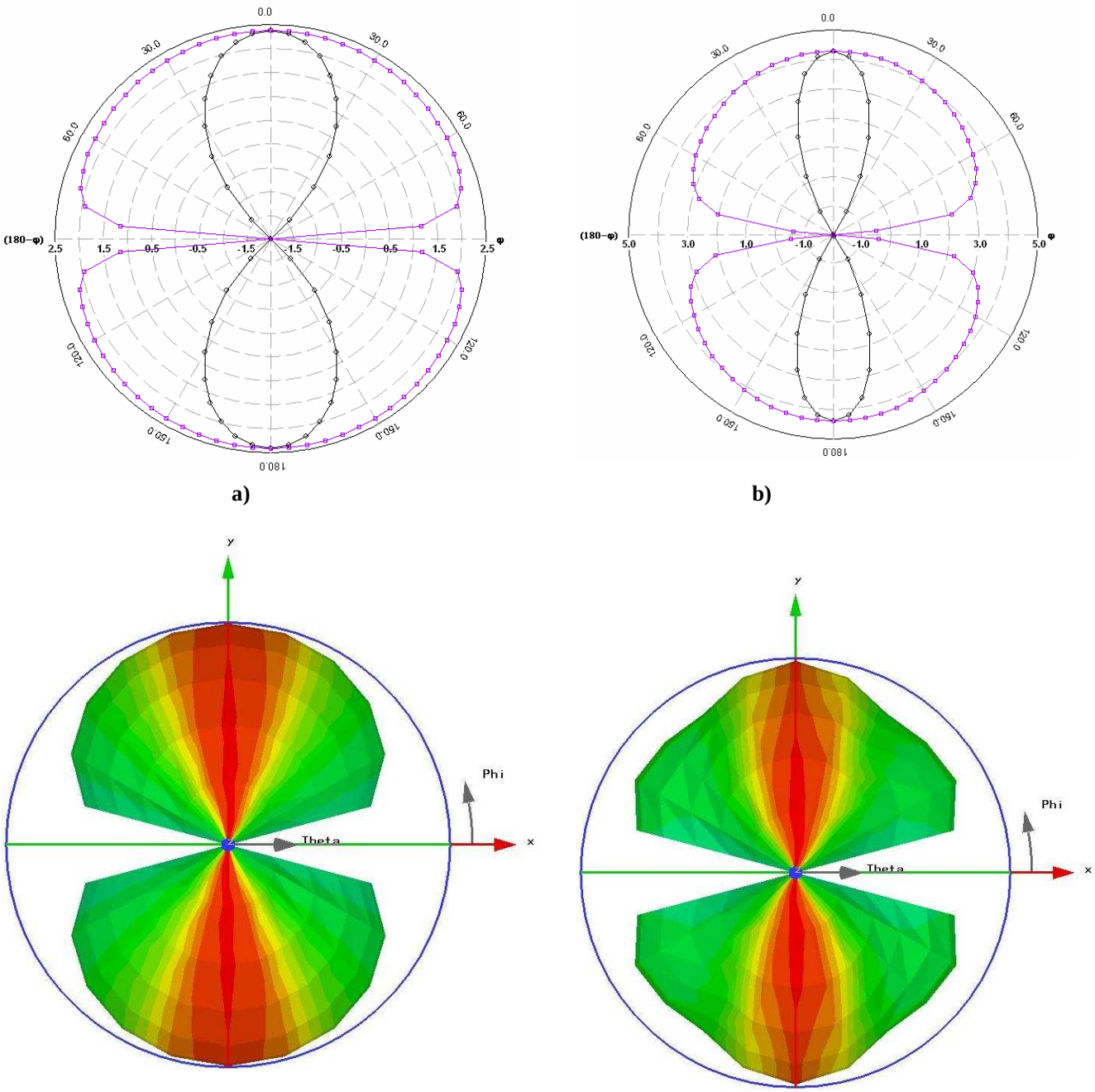


a)



b)

Obr. 24 Přizpůsobení aktivního prvku
a) IE3D b) CST Microwaves

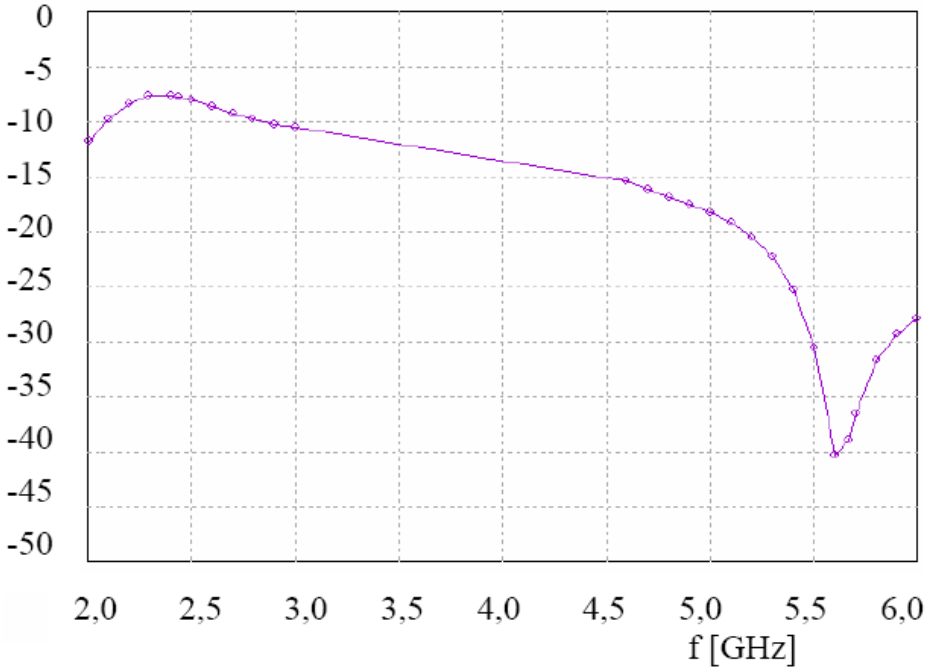


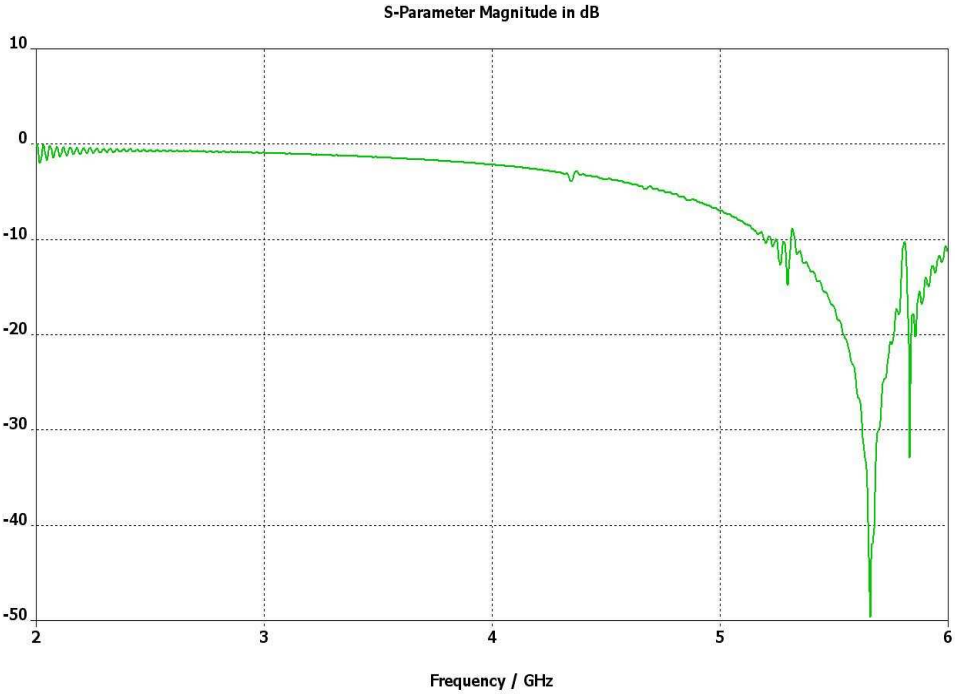
a) b)

Obr. 25 Směrové charakteristiky aktivního prvku
a) IE3D v pásmu 2,4 GHz; b) IE3D v pásmu 5,7 GHz
c) CST v pásmu 2,4 GHz; d) CST v pásmu 5,7 GHz

5.2 Porovnání parametrů reflektorů

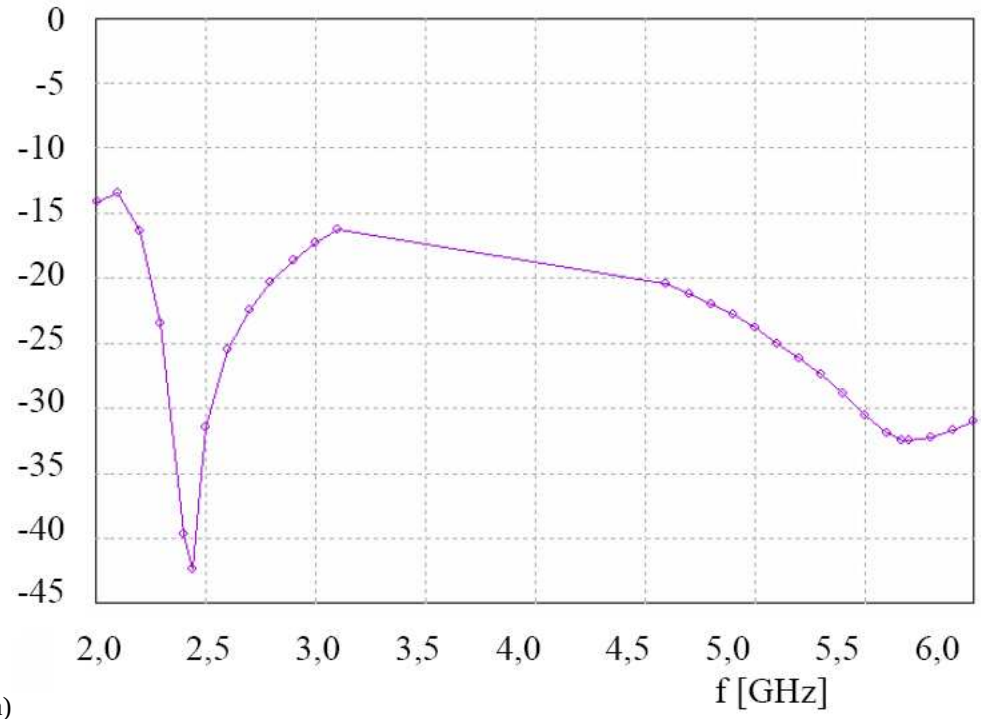
Reflektory v prostředí IE3D byly laděny odlišnou metodou ,jakou jsme používali mi. I když byly použity rozdílné metody ladění reflektorů, snažili jsme se dosáhnout stejného výsledku. Našim cílem bylo, abychom dosáhli co největšího odrazu na konkrétní frekvenci. V případě IE3D bylo dosaženo, pro frekvenci 5,67 GHz, přizpůsobení parametru S_{21}[dB] 40 dB (obr. 26a) a v CST jsme dosáhli přibližně stejného přizpůsobení parametru S_{21}[dB] 40 dB (obr. 26b).



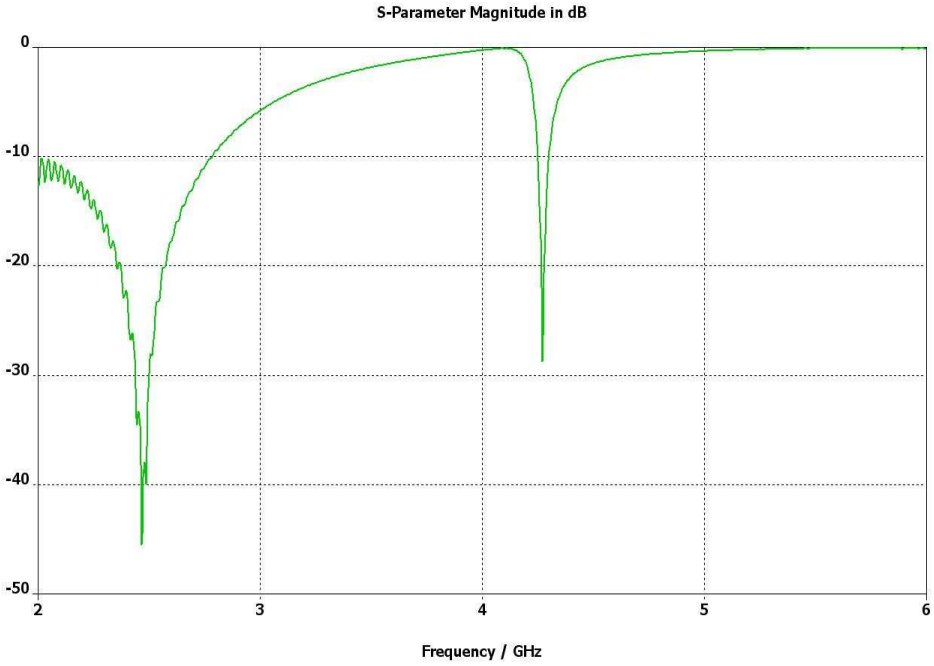


Obr. 26 Závislost parametru S21 na frekvenci 5,67 GHz
a) IE3D b) CST Microwaves

Dále v případě IE3D bylo dosaženo, pro frekvenci 2,44 GHz, přizpůsobení parametru S_{21}[dB] 42 dB (obr. 27a) a v CST jsme dosáhli přibližně stejného přizpůsobení parametru S_{21}[dB] 40 dB (obr. 27b).



a)

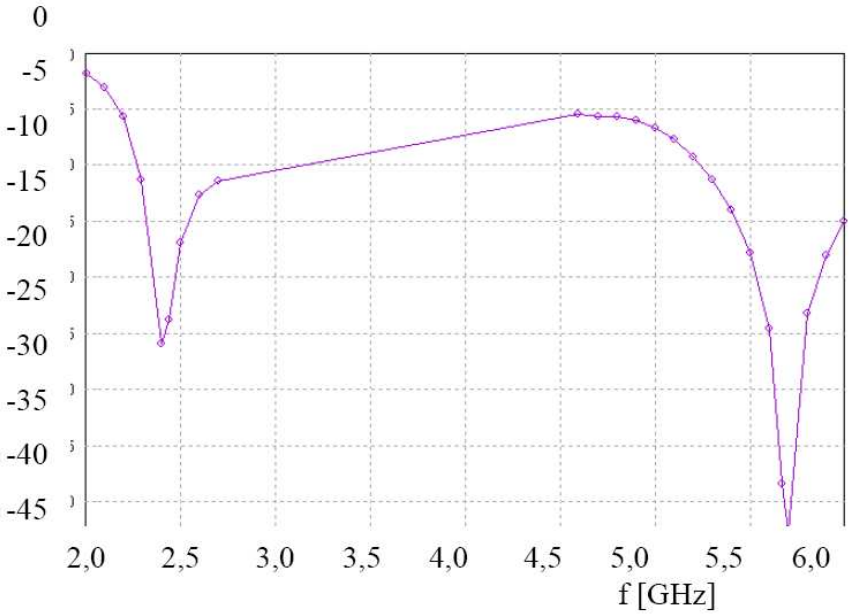


b)

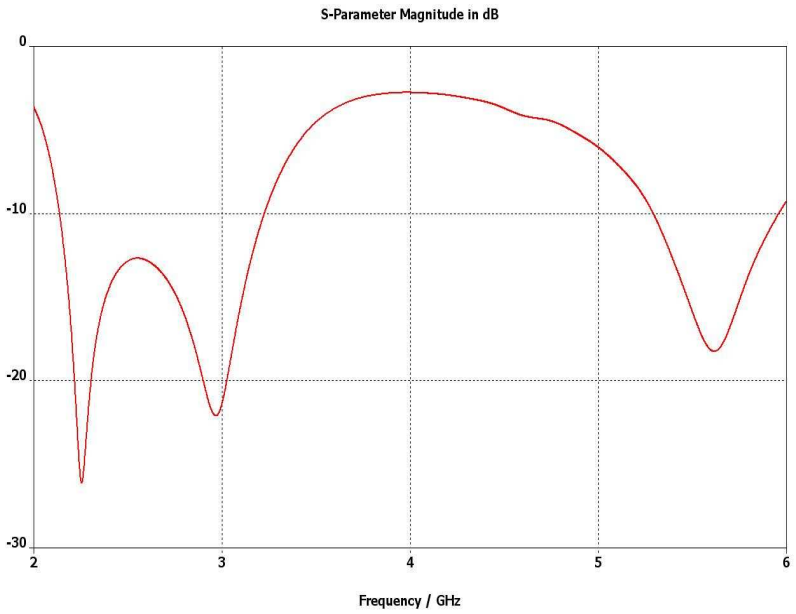
Obr. 27 Závislost parametru S21 na frekvenci 2,44 GHz
a) IE3D b) CST Microwaves

5.3 Porovnání výsledků vícereflektorvé antény

Mezi poslední porovnávané parametry patří parametry konečné vícereflektorové anténa. Vícerfelektorová anténa navržená v prostředí IE3D má přizpůsobení parametru S_{11}[dB] 31 dB pro 2,44 GHz a 47 dB pro 5,67 GHz (obr 28a). V pracovních pásmech směrovosti bylo dosaženo zisků 6,49 dBi a 9,34 dBi (obr. 29a,b). Anténa navržená v CST má přizpůsobení parametru S_{11}[dB] 15 dB pro 2,44 GHz a 18 dB pro 5,67 GHz (obr 28b). V pracovních pásmech směrovosti bylo dosaženo zisků 6,19 dBi a 8,47 dBi (obr. 29c,d).

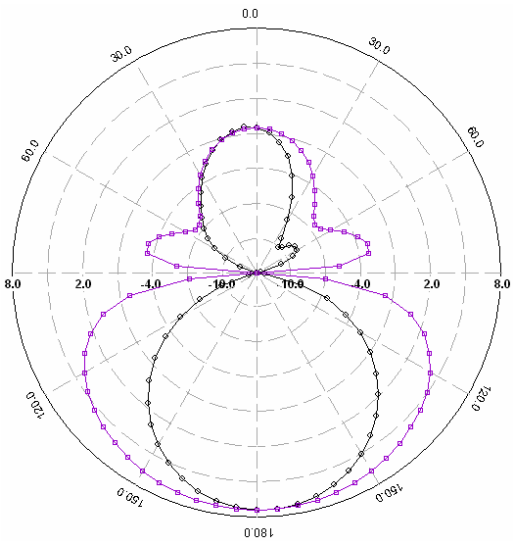


a)

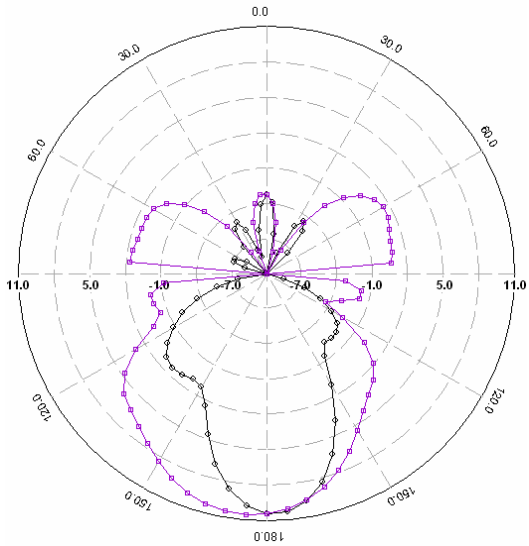


b)

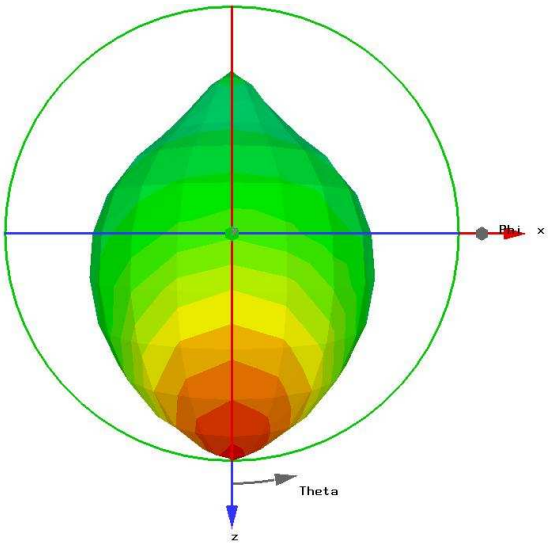
Obr. 28 Závislost činitele odrazu S11 na frekvenci vícereflektorové antény
a) IE3D b) CST Microwaves



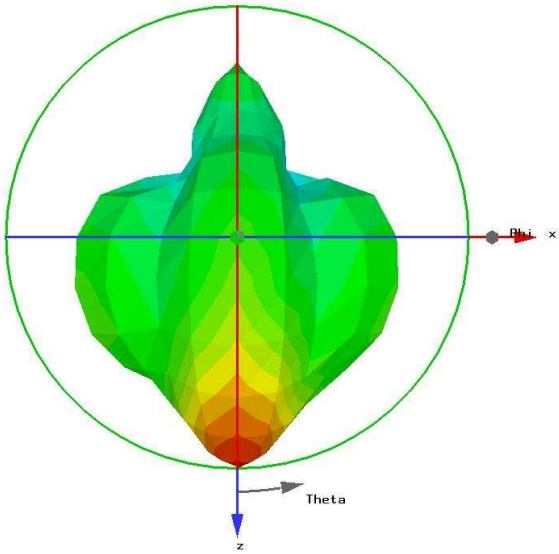
a)



b)



c)



d)

Obr. 29 Směrové charakteristiky vícereflektorové antény
a) IE3D v pásmu 2,4 GHz; b) IE3D v pásmu 5,7 GHz
c) CST v pásmu 2,4 GHz; d) CST v pásmu 5,7 GHz

6. Závěr

Cílem předložené bakalářské práce bylo ověřit návrh dvoupásmové antény, sestávající z širokopásmového dipólu a dvou rovinných reflektorů na bázi kmitočtově selektivních povrchů. Popsaná anténa byla zveřejněna v [1], výsledky měření zde byly porovnány s numerickými simulacemi v programu Zeland IE3D, který je založen na momentové metodě (integrální formulace Maxwellových rovnic).

Jelikož v [1] nebyly uvedeny rozměry motivů dílčích planárních součástí anténního systému, ve své práci jsem celý návrh zopakoval a navrženou anténu jsem namodeloval v programu CST Microwave Studio, který je založen na metodě konečných diferencí v časové oblasti (diferenciální formulace Maxwellových rovnic).

Z porovnání publikovaných výsledků s výsledky dosaženými vlastními simulacemi lze učinit následující závěry:

- Navržený aktivní prvek (širokopásmový dipól) vykazuje při porovnání kmitočtového průběhu činitele odrazu na vstupu a při porovnání směrových charakteristik jen nepatrné rozdíly. V případě směrové charakteristiky jsou rozdíly způsobeny hrubším krokem v diferenciálním modelu. V případě kmitočtového průběhu činitele odrazu si rezonanční kmitočty vzájemně odpovídaly, hodnota s_{11} v rezonanci se lišila nejvýše o 5 dB (–34 dB versus –39 dB). Velmi dobré shody bylo dosaženo rovněž u zisku: v našem případě jsme dosáhli zisku 2,2 dBi pro první pásmo a 4,0 dBi pro druhé pásmo, v [1] bylo dosaženo zisku 2,3 dBi pro první pásmo a 4,3 dBi pro druhé pásmo.
- Kmitočtově selektivní povrchy, navržené vlastní vlnovodovou metodou, byly naladěny na stejný kmitočet jako v [1]. Oproti výsledkům z [1] bylo dosaženo v pásmech odrazu stejných nebo lepších hodnot činitele přenosu (reflektory na požadovaných frekvencích odrážely více energie a propouštěly méně energie). U simulací v programu CST Microwave Studio jsme pozorovali zákmity kmitočtového průběhu činitele přenosu na nižších kmitočtech. Usuzuji, že tyto zákmity mohly být způsobeny nedostatečně jemnou diskretizační sítí.
- Celková anténní soustava sestávající ze širokopásmového dipólu a dvou kmitočtově selektivních reflektorů vykazovala relativně dobrou shodu kmitočtových charakteristik a méně dobrou shodu kmitočtových průběhů činitele odrazu na vstupu antény. Složením celé antény dohromady totiž pravděpodobně došlo k rozladění aktivního prvku. Soustavu by tedy bylo zapotřebí v několika iteracích doladit tak, aby byl vliv reflektorů na rezonanční kmitočty minimalizován.

Závěrem lze shrnout, že principy publikované v [1] byly úspěšně ověřeny. Dále lze konstatovat, že při návrhu anténní soustavy produkovaly programy Zeland IE3D a CST Microwave Studio srovnatelné výsledky.

Seznam použité literatury

[1] HERTL, I. Vícereflektorová anténa: fraktální anténa s frekvenčně selektivními povrchy. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.

[2] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z. Antény a šíření rádiových vln. Skripta FEKT VUT, Brno 2003, ISBN 80-86056-47-3.

[3] ČERNOHORSKÝ, D., RAIDA, Z., ŠKVOR, Z., NOVÁČEK, Z. Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur. VUTIUM, Brno1999. ISBN 80-214-1512-6.

[4] About CST Microwave. Dostupné na WWW: http://www.cst.com/

[5] Manual CST Microwave Studio version 5.0

[6] Multimediální učebnice. Dostupná na WWW: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/