



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

FLÍČKOVÁ ANTÉNA S FRAKTÁLNÍM VZOREM

FRACTAL PATTERN PATCH ANTENNA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Prouza

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Jakub Prouza

ID: 162923

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Fličková anténa s fraktálním vzorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s konceptem fličkové antény s periodickým vzorem. Pomocí numerického modelu porovnejte vlastnosti antény s periodickým vzorem s konvenční fličkovou anténou. Zaměřte se na fraktální periodické vzory a numerickou simulací prozkoumejte vliv typu fraktálu a řádu fraktálu na parametry antény. Zhodnoťte vliv fraktálních vzorů na parametry antény.

Na základě zhodnocení výsledků první etapy projektu rozhodněte o vhodné anténě pro realizaci. Anténu navrhnete pro pracovní kmitočet 8 GHz, dielektrický substrát ARLON CuClad 217 (výška 1,54 mm) a kruhovou polarizaci. Anténu vyrobte a výsledky měření porovnejte se simulací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KUBACKI, R., LAMARI, S., RUDYK, K. The dispersion diagram used for periodic patterned microstrip antenna analysis, In Proceedings of the 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications MIKON 2016, Krakow (Poland): AGH University of Science and Technology.

[2] PRAJAPATI, P. R.; MURTHY, G. G. K.; PATNAIK, A.; KARTIKEYAN, M. V. Design and testing of a compact circularly polarised microstrip antenna with fractal defected ground structure for L-band applications, IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2015, vol. 9, no. 11, p. 1179-1185.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 30.5.2017

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Konzultant:



prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá využitím fraktálových motivů při návrhu mikropáskových antén. Důraz je kladen na posouzení jejich vlivu na vlastnosti konvenční flíčkové antény. První část práce se zaměřuje na teoretické poznatky z oblasti fraktálové geometrie a planárních antén. V další části je pozornost zaměřena na první zkoumanou anténu spolu s metodami jejího návrhu. V závěrečné části je navržena další anténa využívající fraktálový motiv, která je následně realizována, dosažené výsledky jsou mezi sebou porovnány a je zhodnocen přínos fraktálového motivu na flíčkovou anténu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fraktál; Sierpinského trojúhelník; Kochova vločka; periodická zemní plocha

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the application of fractal layouts in the design of microstrip antennas. Attention is turned to assessing their impact on properties of a conventional patch antenna. The first part of thesis is focused on theoretical knowledge of fractal geometry and planar antennas. In the next part of this thesis, first antenna is describer together with ways of its design. In the final section, next fractal antenna design is given. Proposed antenna is made, the results obtained are compared and benefits of the fractal design are evaluated.

KEYWORDS

Fractal; Sierpinski triangle; Koch snowflake; periodic ground plane

PROUZA, J. Flíčková anténa s fraktálním vzorem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 38 s., 7 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Flíčková anténa s fraktálním vzorem“ 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 semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za odbornou pomoc, cenné rady a velmi pozitivní přístup při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam příloh	x
Úvod	1
1 Fraktály	2
1.1 Sierpinského trojúhelník	2
1.2 Kochova vložka	3
2 Mikropáskové antény	4
2.1 Flíčkové antény	4
2.2 Fraktálové antény	7
3 Návrh antény se Sierpinského motivem	8
3.1 Jednoduchá flíčková anténa	8
3.2 Fraktálová anténa s periodickou zemní plochou	9
3.3 Sierpinského anténa v návrhovém softwaru	10
3.3.1 ANSYS HFSS	10
3.3.2 CST Microwave Studio	11
3.3.3 Ansoft Designer	12
4 Výsledky Sierpinského antény získané simulacemi	13
4.1 Anténa s obdélníkovým flíčkem	13
4.2 Sierpinského anténa	14
4.2.1 Fraktálový motiv se spojitou zemní plochou	15
4.2.2 Sierpinského motiv s DGS	16
5 Zhodnocení výsledků Sierpinského antény	19
6 Návrh anténa s motivem Kochovy vložky	20
6.1 Spojitá zemní plocha	22
6.2 Porušená zemní plocha s Kochovou vložkou	22
6.3 Kochova anténa v návrhovém softwaru	25
6.3.1 ANSYS HFSS	25

6.3.2	CST Microwave Studio	25
7	Výsledky Kochovy antény získané simulacemi	26
7.1	Anténa se spojitou zemní plochou	26
7.2	Kochova anténa.....	27
8	Realizovaná Kochova anténa a výsledky měření	30
8.1	Výsledky měření	31
9	Zhodnocení výsledků Kochovy antény	34
10	Závěr	35
	Literatura	36
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	38
	Přílohy	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Motiv druhé iterace Sierpinského koberečku.....	2
Obrázek 1.2 Proces generování Kochovy vložky	3
Obrázek 2.1 Obdélníková flíčková anténa s napájením mikropáskem	5
Obrázek 2.2 Sierpinského dipól	7
Obrázek 3.1 Fraktálový motiv a motiv zemní desky	9
Obrázek 3.2 Realizace navrhované Sierpinského antény	9
Obrázek 3.3 Sierpinského anténa v prostředí programu HFSS	10
Obrázek 3.4 Nastavení simulace v programu CST	11
Obrázek 4.1 Průběh parametru S11 pro jednoduchou flíčkovou anténu	13
Obrázek 4.2 Očekávané hodnoty navrhované antény	14
Obrázek 4.3 Průběhy parametru S11 z jednotlivých programů.....	15
Obrázek 4.4 Porovnání vlastností jednotlivých konstrukcí	16
Obrázek 4.5 Vyzařovací diagram Sierpinského antény na 4,75 GHz	17
Obrázek 4.6 Vyzařovací diagram Sierpinského antény na 8,31 GHz	17
Obrázek 4.7 Vyzařovací diagram Sierpinského antény na 12,5 GHz	18
Obrázek 4.8 Plošné rozložení proudu na dvou rezonančních kmitočtech	18
Obrázek 6.1 Navrhovaná anténa s motivem Kochovy vložky.....	20
Obrázek 6.2 Analýza vlivu šířky slotu na parametr S11	21
Obrázek 6.3 Analýza vlivu délky slotu na parametr S11	22
Obrázek 6.4 Analýza vlivu umístění motivu Kochovy vložky na parametr S11	23
Obrázek 6.5 Analýza vlivu velikosti Kochovy vložky na parametr S11.....	24
Obrázek 6.6 Export výrobních dat v programu CST	25
Obrázek 7.1 Ověření frekvenčních vlastností antény se spojitou zemní plochou	26
Obrázek 7.2 Průběh parametru S11 Kochovy antény	27
Obrázek 7.3 Simulovaný zisk antén v rovině E.....	28
Obrázek 7.4 Simulovaný zisk antén v rovině H	28

Obrázek 7.5 Průběh osového poměru pro simulované antény.....	29
Obrázek 8.1 Vyhotovené antény – plocha flíčku.....	30
Obrázek 8.2 Vyhotovené antény – zemní plocha	30
Obrázek 8.3 Průběh parametru S11 vyhotovených antén.....	31
Obrázek 8.4 Měřený zisk antén v rovině E.....	32
Obrázek 8.5 Měřený zisk antén v rovině H	33

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Očekávané výsledky jednoduché flíčkové antény	39
Příloha 2 Vyzařovací diagram antény se spojitou zemní plochou.....	39
Příloha 3 Znázornění rozložení proudu jednoduché flíčkové antény	40
Příloha 4 Průběh parametru S_{11} pro jednoduchou flíčkovou anténu s DGS.....	40
Příloha 5 Průběh PSV jednoduché flíčkové antény	41
Příloha 6 Průběh PSV fraktálové antény	41
Příloha 7 Osový poměr pro Sierpinského anténu	41
Příloha 8 Vliv délky slotu na osový poměr.....	42
Příloha 9 Vliv použité iterace motivu na parametr S_{11}	42
Příloha 10 Průběh parametru S_{11} Kochovy antény s původním rozměrem flíčku	43
Příloha 11 Napájení navržené antény	44
Příloha 12 Měřený a simulovaný zisk Kochovy antény v rovině E.....	45
Příloha 13 Měřený a simulovaný zisk Kochovy antény v rovině H	45

ÚVOD

Antény je možné v radioelektronice považovat za jednu z nejdůležitějších komponent. Účelem antén je převod elektromagnetického vlnění šířícího se po vedení na vlnění ve volném prostoru a naopak.

S rozvojem moderních technologií a vzrůstajícím počtem elektronických zařízení je i u těchto důležitých komponent vyvíjen velký tlak na jejich zdokonalování spolu s trendem minimalizace a co největší integrace jednotlivých částí elektronického zařízení do jednoho celku. Velký přínos v této snaze má v oblasti antén využití planárních technologií výroby antén.

Jako každá technologie, i planární antény mají určité nevýhody, jejichž dopady se dnešní vývoj snaží redukovat. Jednou z možností, jak toho docílit, je využití různých geometrických struktur při návrhu takových antén.

Tato bakalářská práce je zaměřena na seznámení se s konceptem flíčkových a fraktálových antén, ověření vlastností antén uvedených v literatuře, které kombinují různé fraktálové motivy jak v ploše flíčku, tak v zemní rovině, a prozkoumání reálného přínosu motivů na zhotovených anténách.

První část práce slouží jako teoretický úvod do problematiky flíčkových antén a možnosti využití fraktálních motivů při jejich konstrukci. Další část je věnována vytvořenému numerickému modelu flíčkové antény využívající Sierpinského motivu (dále jen Sierpinského anténa). Zde jsou shrnuty a zhodnoceny přínosy použitého motivu na danou konstrukci.

Na základě získaných výsledků byla pro další část práce navržena kruhově polarizovaná anténa využívající motivu Kochovy vločky (dále jen Kochova anténa), která byla následně vyrobena leptací technologií a její chování bylo ověřeno měřením.

1 FRAKTÁLY

Fraktál lze definovat jako rovinný nebo prostorový útvar, jenž je na pohled složitě členěný, zároveň je ale vcelku snadno matematicky popsatelný.

Princip vzniku takového útvaru je v opakování generace základního tvaru, kdy dochází zároveň ke zmenšování nebo zvětšování jeho rozměrů. Takové útvary lze nazvat jako soběpodobné [1]. Typicky to znamená, že tyto útvary jsou neměnné při změně měřítka a jejich motiv se v nekonečně mnoha velikostech opakuje. Počet opakování této generace je nazván jako iterace. Základní útvar lze tedy nazvat jako nultá iterace.

Jako vědní disciplína se fraktální geometrie rozvíjela zhruba od šedesátých let dvacátého století a za jejíhož zakladatele se považuje polský matematik Benoît B. Mandelbrot, který také jako první použil slovo fraktál [2]. Fraktály definoval jako útvary, jejichž jednotlivé části jsou zmenšenou kopií celku.

Zřejmě neznámějším fraktálem, se kterým se lidé setkávali odjakživa v přírodě, je sněhová vločka. Dalšími fraktálovými útvary jsou Minkowského ostrov, Kochova křivka, jež je součástí Kochovy vločky, nebo Sierpinského trojúhelník [1].

1.1 Sierpinského trojúhelník

Sierpinského trojúhelník je fraktálovým motivem vzniklým rekurzivním vykreslováním rovnostranného trojúhelníku při současném zmenšování jeho strany dvakrát.

V literatuře se lze dočíst i o tzv. Sierpinského koberečku, což je fraktální útvar vzniklý výše popsaným principem s tím rozdílem, že nově vzniklé trojúhelníky jsou odstraňovány z povrchu základního útvaru [3]. Tímto postupem při každé iteraci vzniknou tři zmenšené kopie základního útvaru (nulté iterace).

Zde zobrazený motiv (obr. 1.1) je druhou iterací Sierpinského koberečku, který byl dále použit jako základ pro konstrukci jedné ze zkoumaných fraktálových antén.



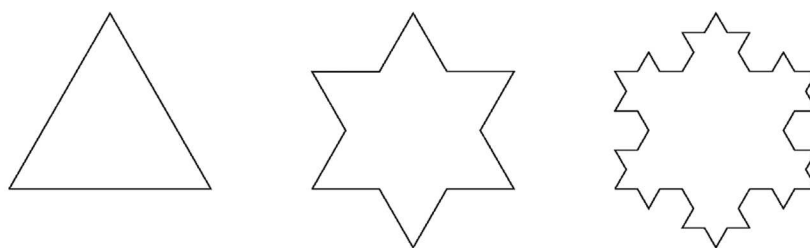
Obrázek 1.1 Motiv druhé iterace Sierpinského koberečku

1.2 Kochova vložka

Dalším fraktálovým útvarem, se kterým se lze často setkat, a který byl také použit v této práci při konstrukci flíčkové antény, je tzv. Kochova křivka, častěji známé pod názvem celého fraktálového útvaru Kochova vločka.

Pro konstrukci tohoto motivu je výchozím tvarem úsečka, pokud je výchozím tvarem rovnostranný trojúhelník, nazývá se pak vzniklý fraktálový motiv Kochovou vločkou.

Princip generování tohoto útvaru spočívá v rozdělení úsečky původního útvaru na tři úsečky shodné délky a sestrojením rovnostranného trojúhelníku nad prostřední nově vzniklou úsečkou.



Obrázek 1.2 Proces generování Kochovy vločky

2 MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY

Mikropáskové antény jsou v současných technologiích velmi rozšířeným druhem antén. K jejich rozvoji došlo spolu s nástupem mikrovlnných obvodů. Zjednodušeně si lze mikropáskovou anténu představit jako oboustranně pokovený dielektrický substrát, kdy na vrchní stranu je nanesen motiv různého tvaru (viz dále) a spodní strana je pokovena souvisle. Tato strana má z hlediska napájení nulový potenciál a omezuje vyzařování antény ve směru normály této plochy.

Jelikož jde o zařízení vyráběné stejnou technologií jako tištěné spoje, přináší to s sebou výhody v podobě nízké tloušťky, dané pouze tloušťkou použitého substrátu, a nízké výrobní ceny. Rozměry těchto antén je předurčují k integraci na povrch koncových zařízení, případně je lze umístit i na stejný substrát jako zbytek mikrovlnných obvodů [4].

Mezi hlavní nedostatky technologie mikropáskových antén patří jejich šířka pásma pohybující se při rozsahu poměru stojatých vln (PSV) od 1 do 2 v rozmezí od 1 % do 5 %, případně parazitní vyzařování napájecího mikropásku vedoucí k nízké celkové účinnosti [5].

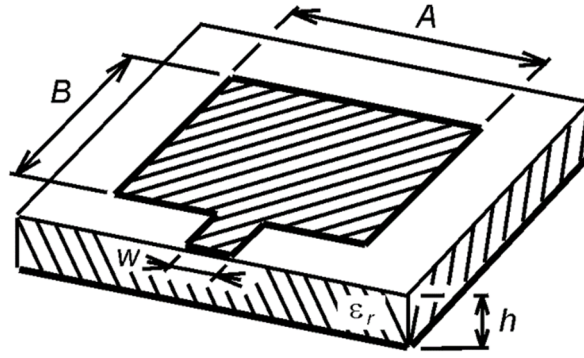
Zmíněnou nevýhoda parazitního vyzařování napájecího mikropásku lze vcelku účinně potlačit použitím napájení pomocí koaxiálního kabelu. Při tomto způsobu napájení je vnější vodič koaxiálního vedení připojen k zemní desce, zatímco střední vodič prochází otvorem v zemní desce a v substrátu směrem k vrchnímu mikropáskovému prvku, ke kterému je napojen. Nevýhodou tohoto je ale ztráta možnosti jednoduchého napájecího systému více sdružených mikropáskových prvků.

Z důvodu výše zmíněné nenáročnosti na výrobu těchto antén lze anténní prvek realizovat pomocí různých tvarů a motivů. Nejčastěji se realizují antény pomocí obdélníkového flíčku, dále pak dipólové antény, fraktální antény, případně lze sdružit více prvků do celých anténních řad.

2.1 Flíčkové antény

Flíčková anténa je jedním z nejčastěji používaných a zároveň konstrukčně nejjednodušších typů mikropáskové antény. Anténním prvek je v tomto případě vodivá plocha, tzv. flíček. Nejčastější jsou flíčky obdélníkové nebo kruhové, lze se ale setkat i s flíčky jiných tvarů. Příkladem takové antény může být širokopásmová Vivaldiho anténa.

Na flíčkovou anténu lze pohlížet jako na mikropáskové vedení na konci naprázdno. Při šíření elektromagnetické vlny dochází na skokovém rozšíření mezi napájecím vedením a anténním prvkem k vyzařování elektromagnetické energie do okolí. Příklad takové antény je schematicky nakreslen na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 Obdélníková flíčková anténa s napájením mikropáskem [5]

Obdélníkový flíček o rozměrech $A \times B$ je nanesen na dielektrický substrát o tloušťce h a relativní permitivitě ϵ_r . Šířka napájecího mikropásku je označena jako w .

Šířku flíčku A lze vypočítat dle [6]:

$$A = \frac{1}{2 f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (2.1)$$

kde f_r je rezonanční kmitočet antény, μ je permeabilita vakua, ϵ je permitivita vakua a ϵ_r je relativní permitivita použitého dielektrického substrátu.

Dále je nutné určit efektivní permitivitu antény ϵ_{reff} [6]:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{A} \right]^{-1/2}, \quad (2.2)$$

kde h je tloušťka zvoleného dielektrického substrátu a A je výše vypočtená šířka antény.

Následně můžeme spočítat zdánlivé prodloužení flíčku ΔB vzniklé vlivem působení rozptylových polí na jeho okraji [6]:

$$\frac{\Delta B}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 1) \left(\frac{A}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 1) \left(\frac{A}{h} + 0,8 \right)}, \quad (2.3)$$

Ze získaných hodnot můžeme nakonec spočítat skutečnou délku flíčku B :

$$B = \frac{1}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2 \cdot \Delta B, \quad (2.4)$$

Význam symbolů použitý ve vztazích (2.3) a (2.4) je uveden výše.

Kruhové flíčky bývají zpravidla oproti obdélníkovým flíčkům menší a jsou tedy často využívány v případech, kdy je cílem úspora plochy flíčku. Napájení je možné pomocí jak koaxiální sondy, tak pomocí mikropáskového vedení, které je použito pro konstrukci antén v této práci. Při návrhu kruhových flíčku nelze využívat výše naznačených vzorců pro obdélníkové flíčky.

V [6] se lze dočíst o několika možných přístupech k získání rozměrů kruhového flíčku. Zde uvedené základní rovnice pro rezonanci takového flíčku je:

$$J'_n(\sqrt{\varepsilon_r} k_0 a) = 0 \quad (2.5)$$

kde J_n je Besselova funkce n -tého řádu a a je poloměr kruhového flíčku. Stejně jako u předchozích obdélníkových flíčků, i zde lze pro zjednodušení práce využít volně dostupné jednoduché kalkulátory pro výpočet požadovaných rozměrů flíčku při zadání parametrů substrátu a požadovaného rezonančního kmitočtu.

Pro ruční výpočet počátečního odhadu velikosti kruhového flíčku se lze v řadě publikací, např. v [7], setkat s využitím vzorců převzatých z práce C. A. Balanise, které počítají s využitím nejnižšího vidu TM_{110} .

Podle těchto vzorců lze rozměry flíčku spočítat následovně:

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \varepsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}}, \quad (2.6)$$

kde a je poloměr flíčku, h je tloušťka použitého substrátu, ε_r je relativní permitivita použitého dielektrického substrátu a F je dáno jako:

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\varepsilon_r}}, \quad (2.7)$$

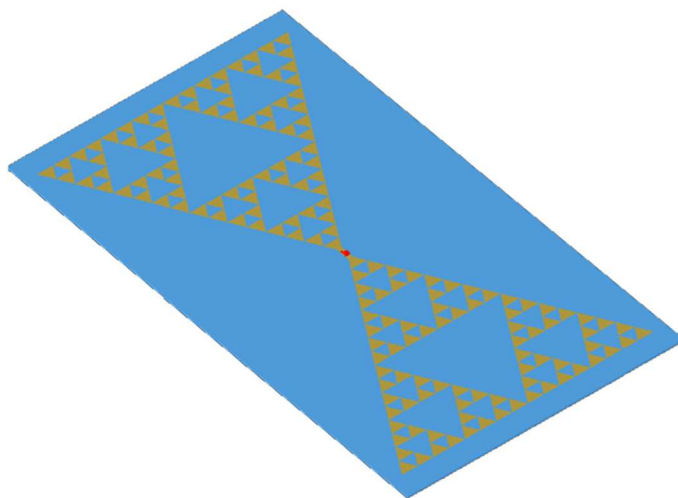
kde f_r je požadovaný rezonanční kmitočet antény.

2.2 Fraktálové antény

Hlavní motivací pro konstrukci fraktálové antény je dosažení vícepásmových a širokopásmových vlastností a maximálního zisku při zachování rozměrů klasické antény. Zde se využije vlastnosti soběpodobnosti. Jelikož různé části antény mají stejný tvar o různé velikosti, tyto části rezonují na různých kmitočtech. Princip fungování fraktálových motivů lze vztáhnout také na fungování pravidelné logaritmicko-periodické antény nebo antény spirálové [2]. Své využití fraktálové motivy našly i při konstrukci drátových antén.

Pro tuto práci je ale přednější jejich využití v planárních strukturách, kde lze díky nim například dosáhnout větší šířky pásma oproti běžným flíčkovým anténám. Případně je lze využít v konstrukci porušené zemní plochy tak, jak je naznačeno v jedné z částí této práce, díky čemuž lze potlačit parazitní ztráty v rezonanci.

Příkladem planárních fraktálových antén může být Sierpinského monopól a dipól (obr. 2.2). Nejnižší pracovní frekvence antény je dána velikostí základního útvaru, v tomto případě trojúhelníku. S přibývajícím počtem iterací fraktálového motivu přibývají i vyšší rezonanční kmitočty určené velikostí jednotlivých elementů tohoto motivu.



Obrázek 2.2 Sierpinského dipól [8]

3 NÁVRH ANTÉNY SE SIERPINSKÉHO MOTIVEM

První navrhovanou a zkoumanou anténou byla anténa navržená v [9]. Jde o flíčkovou anténu s fraktálovým vzorem v podobě Sierpinského trojúhelníku spolu s periodickým motivem zemní plochy. Pro porovnání přínosu fraktálového motivu byla provedena i simulace jednoduché flíčkové antény a také fraktálové antény se spojitou zemní plochou.

Fraktálový vzor simulované antény byl zvolen především pro jednoduchou opakovatelnost a také kvůli častému použití u mikropáskových antén pro zajištění širokopásmovosti.

Ve všech případech byl při simulacích použit substrát Rogers RT5880 s relativní permitivitou $\varepsilon_r = 2,2$ a tloušťkou $h = 0,787$ mm. Při pokusné realizaci antény na substrát byl použit Arlon CuClad 217 s relativní permitivitou $\varepsilon_r = 2,2$ a tloušťkou $h = 1,54$ mm. Tento materiál byl zvolen pouze z důvodu využití tohoto materiálu na dále navrhované antény. Rozměry Sierpinského antény nebyly pro tento substrát nijak přepočítávány a takto realizovaná anténa sloužila hlavně pro vyzkoušení možností použité technologie leptání na drobnou strukturu, jakou Sierpinského motiv je. Výsledky realizované Sierpinského antény jsou stručně shrnuty v závěru celé práce.

Simulace byly primárně prováděné v softwaru ANSYS HFSS 15.0 a pro porovnání byly použity i výsledky simulací z programů CST MWS 2015 a Ansoft Designer 8.0. Popis modelování a nastavení simulací v těchto programech bude popsán v následující kapitole.

3.1 Jednoduchá flíčková anténa

Rozměry simulované jednoduché flíčkové antény byly převzaty z [9] pro lepší možnost porovnání s dále navrhovanou fraktálovou anténou. Při ručním výpočtu rozměrů podle vzorců uvedených v kapitole 2.1 a uvažování přibližné rezonančního kmítu $f_r = 7,8$ GHz vycházející z výsledků v [9], je šířka flíčku $A = 15,2$ mm a délka flíčku $B = 13,1$ mm. Tyto výpočty ale neberou v úvahu vychýlení napájecího mikropásku pro získání kruhové polarizace. Ke stejným rozměrům lze dojít i při použití kalkulátoru dostupného z [10].

Při výpočtu rozměrů flíčku v programu Ansoft Designer (viz dále) je možné určit offset napájecího mikropásku při známé délce flíčku. Při uvážení rezonančního kmítu $f_r = 7,8$ GHz, délky flíčku $A = 16,00$ mm, poměru stojatých vln $VSWR = 1$ a vstupní impedance 50Ω je šířka flíčku $B = 12,46$ mm a napájecí mikropásek je vychýlen o 4,13 mm. Tyto parametry již korespondují údaji s uvedenými v [9].

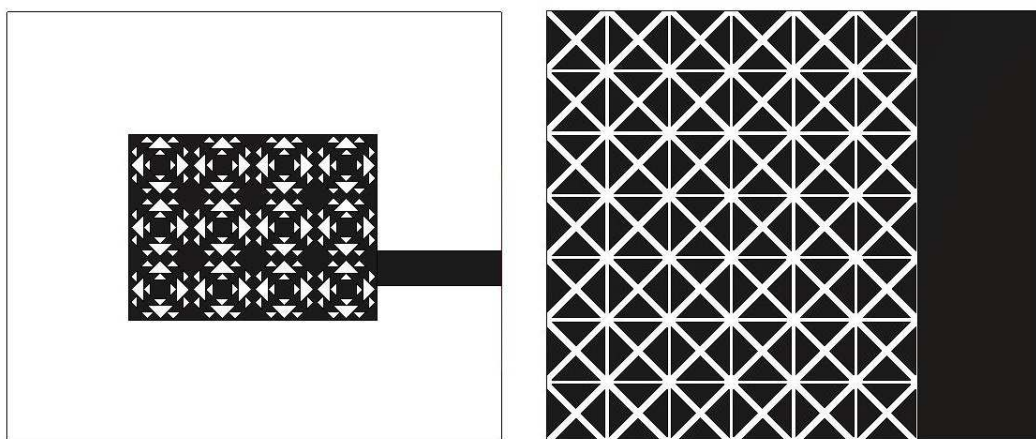
Rozměry jednoduché flíčkové antény, která sloužila jako referenční, byly dány substrátem o rozměrech $28,00 \times 32,00 \times 0,787$ mm, na kterém byl nanesen flíček o rozměrech $12,00 \times 16,00$ mm a napájecí mikropáskové vedení s rozměry $2,46 \text{ mm} \times 8,00 \text{ mm}$. Osa napájecího mikropásku byla od osy flíčku vychýlená o 2,64 mm, čímž by mělo být dosaženo levotočivé polarizace [9].

3.2 Fraktálová anténa s periodickou zemní plochou

Anténa s fraktálovým motivem na straně jedné a zemní plochou se strukturou z izolovaných rovnoramenných trojúhelníků na straně druhé byla realizována na substrátu Rogers RT5880 s rozměry shodnými jako u jednoduché flíčkové antény.

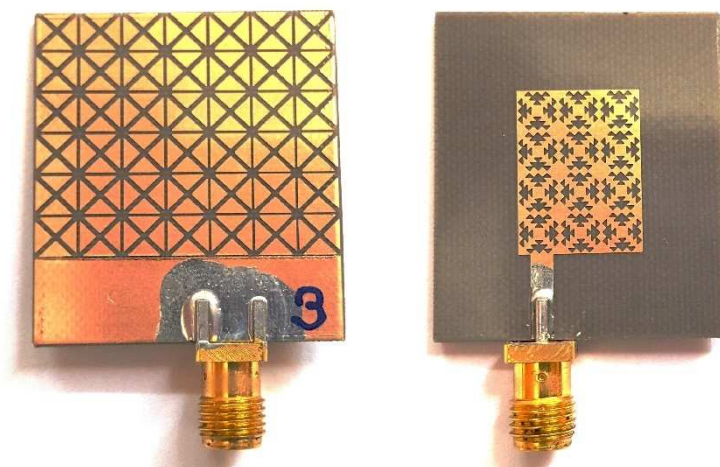
Oproti jiným konstrukcím fraktálových antén je u této antény fraktální motiv nanesen na geometrii běžného obdélníkového flíčku, čímž se liší například od dříve zmiňovaného Sierpinského monopólu.

Motiv zemní plochy je složen z oddělených rovnoramenných trojúhelníků umístěných tak, že jeden tento trojúhelník odpovídá motivu Sierpinského trojúhelníku na vrchní straně, a spojitého obdélníkem ležícího pod napájecím mikropáskem. Tímto by mělo být dosaženo maximálního zisku.



Obrázek 3.1 Fraktálový motiv a motiv zemní desky

Strukturu flíčku a zemní plochy lze vidět na obrázku 3.1. Na obrázku 3.2 je zobrazena realizovaná anténa se Sierpinského motivem na substrátu Arlon CuClad 217.



Obrázek 3.2 Realizace navrhované Sierpinského antény

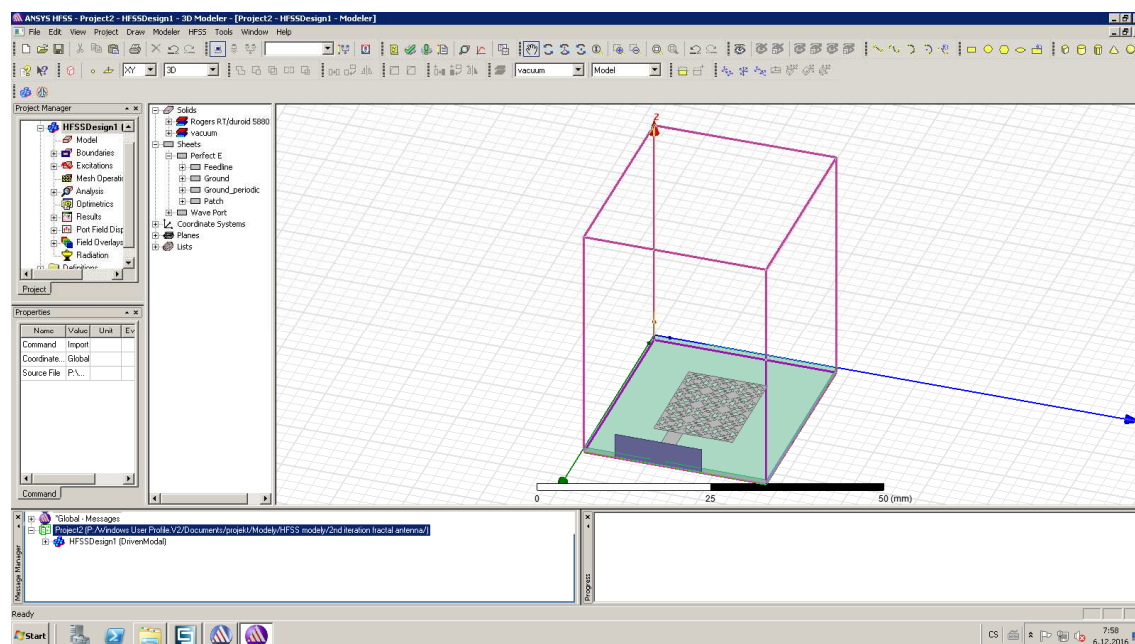
3.3 Sierpinského anténa v návrhovém softwaru

3.3.1 ANSYS HFSS

Návrhový software ANSYS HFSS byl použit jako primární při řešení navrhovaných antén. Jde o program zpracovávající řešení pomocí metody konečných prvků.

Základní motiv fraktálové antény [9] se skládal z jedné čtvercové buňky (položka *Draw rectangle*), z jejíhož povrchu byly následně odebrány čtyři motivy druhé iterace Sierpinského trojúhelníku. Tento motiv byl vymodelován pomocí trojúhelníků vytvořených ze tří křivek (položka *Draw line*) a následně byly pomocí funkcí *Rotate*, *Move* a *Mirror* vytvořeny na čtvercové buňce čtyři druhé iterace Sierpinského motivu vzájemně otočené o 90°. Následně pomocí funkce *Subtract* dojde k odečtení fraktálového motivu od povrchu čtvercové buňky. Tato buňka je následně rozkopírována do celkové velikosti flíčku navrhované antény. Stejným postupem byla vytvořena i zemní plocha.

Po dokončení modelu je třeba nadefinovat okrajové podmínky. Pro všechny vodivé vrstvy byla pod položkou *Assign Boundary* přiřazena položka *Perfect E* – dokonalý elektrický vodič. Pro definování okolního prostředí byl namodelován kvádrový objekt z vakua s půdorysnými rozměry odpovídajícími rozměrům namodelovaného substrátu. Tomuto objektu jsou na všech stěnách, kromě stěny v rovině antény, přiřazena okrajová podmínka typu *Radiation*.



Obrázek 3.3 Sierpinského anténa v prostředí programu HFSS

Napájení antény bylo zajištěno pomocí vlnového portu (*Wave port*) s impedancí $50\ \Omega$. Rozměry byly dle doporučení určeny jako šestinásobek šířky napájecího mikropásku a pětinasobku výšky substrátu.

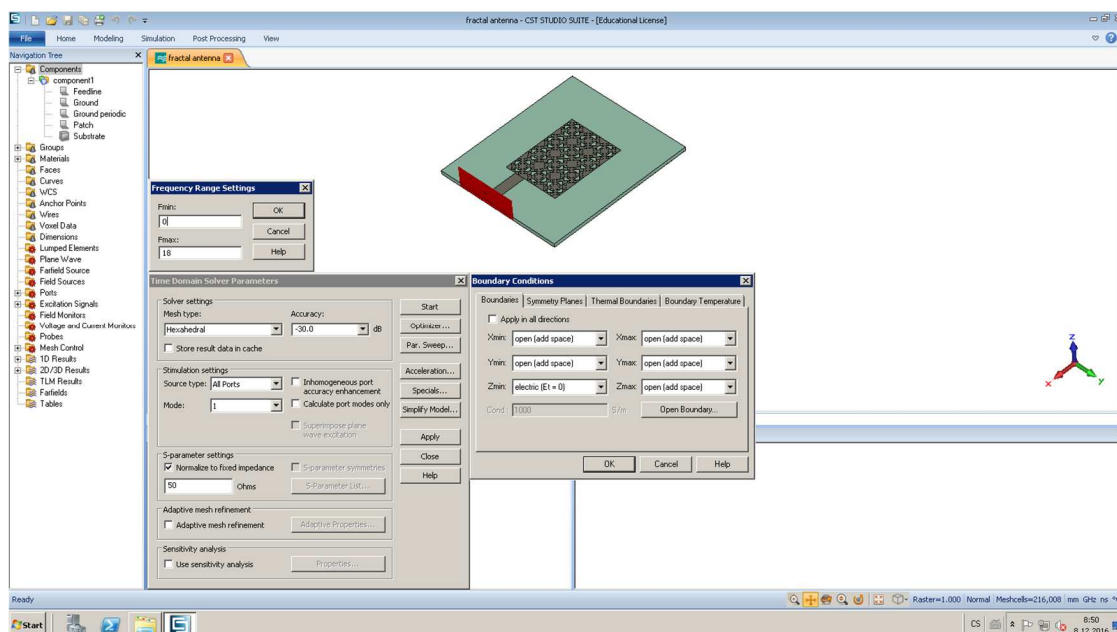
Samotné nastavení simulace bylo ponecháno na výchozích hodnotách. Frekvenční rozmítání bylo zvolené v rozsahu od 0 GHz do 18 GHz s šířkou kroku 0,01 GHz. Po získání rezonančního kmitočtu byl poté tento kmitočet použit pro simulaci rozložení proudu.

3.3.2 CST Microwave Studio

Program CST Microwave Studio je součástí balíku návrhového softwaru CST Studio Suite určeného pro řešení problémů z oblasti elektromagnetických polí. Od programu HFSS se liší možností volby z různých řešičů (solverů) a uspořádáním uživatelského rozhraní.

Princip modelování objektů se od programu HFSS téměř neliší a lze využít i možnosti importu uživatelských modelů z programu HFSS a dalších (záložka *Modeling* → *Import/Export*). Oproti HFSS také není nutné definovat okolní prostředí modelováním krychle z vakua, je pouze nutné nastavit okolní podmínky v záložce *Simulation* pod položkou *Boundaries*. Všechny roviny byly nastaveny na *Open (add space)*, pouze rovina, ve které ležela zemní plocha (*Zmin*), byla nastavena okrajová podmínka na *electric ($E_t = 0$)*.

Napájení bylo stejně jako v předchozím případě pomocí vlnového portu o stejných rozměrech. Pro simulace byl volen automaticky zvolený řešič *Time Domain Solver* s nastavením impedance $50\ \Omega$ a frekvenční rozmítání v rozsahu od 0 GHz do 18 GHz. Z programu CST byly získány také dále uvedené směrové charakteristiky antény.



Obrázek 3.4 Nastavení simulace v programu CST

3.3.3 Ansoft Designer

Prostředí programu Ansoft Designer je velmi podobné HFSS. Po vytvoření nového projektu a vložení návrhu volbou *Insert EM Design* je následně vybrána mikropásková technologie *MS – RT_duroid 5880*. Poté je ještě nutné pod položkou *Layers* zkontrolovat, případně upravit tloušťku dielektrické vrstvy na hodnotu 0,787 mm. Samotné rozhraní programu pro modelování je oproti předchozím částečně omezené a zaměřené na modelování planárních struktur v 2D. Rozdílné je také přiřazení vlnového portu, které je pod položkou *Port* a přiřazuje se pouze na zvolenou hranu napájecího mikropásku.

Velkou výhodou tohoto programu je intuitivní vestavěný kalkulátor pro určení parametrů navrhovaných planárních struktur. Pro potřeby této simulace byla v programu ověřena správnost rozměrů jednoduché flíčkové antény, které byly určeny v [9] a které byly i ručně spočítány v předchozí kapitole, kde lze nalézt i vypočtené hodnoty. Tuto možnost lze nalézt pod volbou *EMDesign* → *Estimate*, kde zvolíme položku *Printed Antennas* a *Rectangular Patch*.

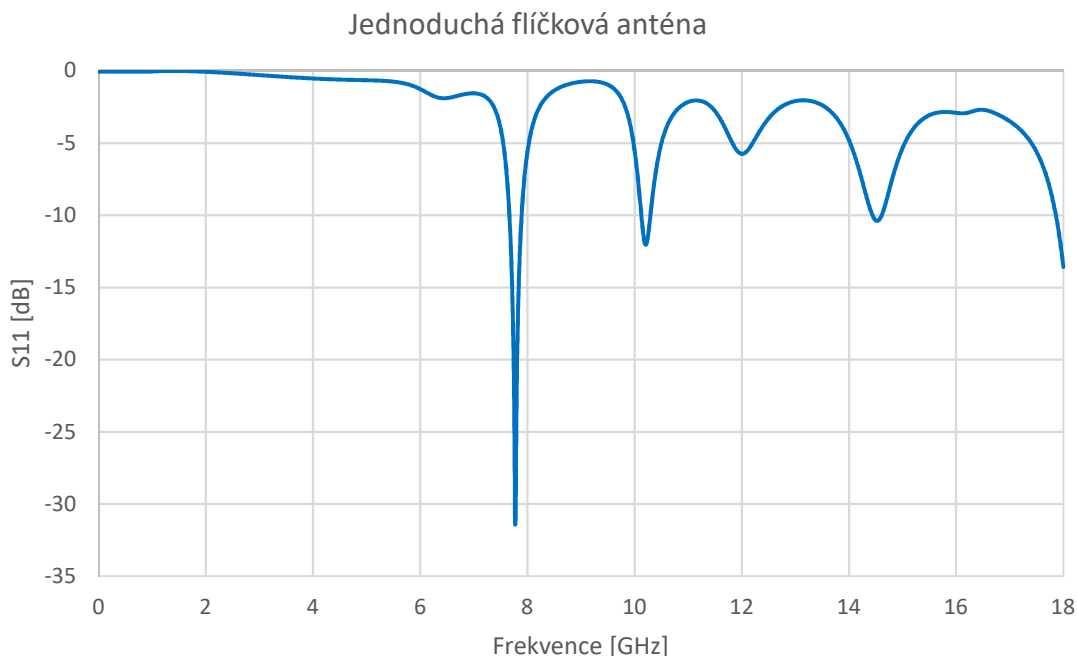
Nastavení simulace pod volbou *Analysis* bylo ponecháno na výchozích hodnotách. Frekvenční rozmítání bylo nastaveno od 0 GHz do 18 GHz s lineární frekvenčním krokem 0,01 GHz.

Je nutné i zmínit, že program pracuje pouze s nekonečnou spojitou zemní plochou, tudíž zde nebylo možné simulovat v další kapitole navrhnutou periodicky strukturovanou zemní plochu.

4 VÝSLEDKY SIERPINSKÉHO ANTÉNY ZÍSKANÉ SIMULACEMI

4.1 Anténa s obdélníkovým flíčkem

Po návrhu jednoduché flíčkové antény byla tato anténa simulována ve výše zmiňovaných simulačních programech. Výsledná simulace v programu HFSS ukázala, jak lze vidět z obrázku 4.1, že rezonanční kmitočet má hodnotu zhruba 7,77 GHz při hodnotě činitele odrazu -31,3 dB. Výsledky z ostatních simulátorů tyto hodnoty potvrdily s odchylkami v rámci jednotek decibelů. Jak lze vidět, tato simulace plně odpovídá očekávanému průběhu z [9], který je uveden v příloze.



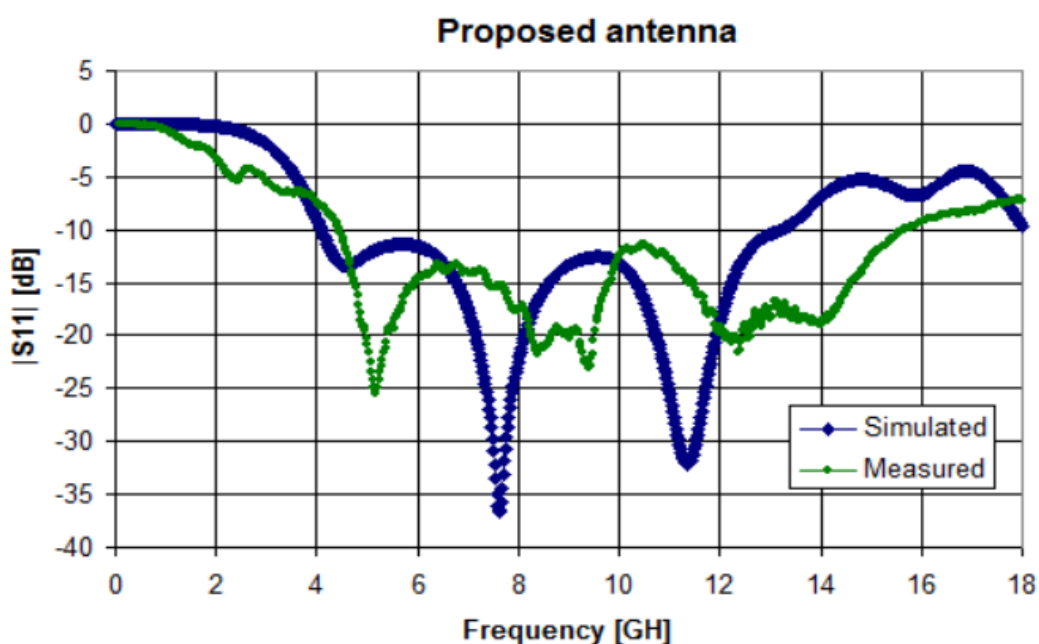
Obrázek 4.1 Průběh parametru S11 pro jednoduchou flíčkovou anténu

Z tohoto průběhu lze i vidět typicky velmi malou šířku pásma. Pro *PSV* v rozsahu od 1 do 2 vychází maximální hodnota parametru S11 zhruba -10 dB. Frekvenční šířka pásma je v tomto případě $BW = 0,24$ GHz, což reprezentuje procentuální šířku pásma $BW = 3,1$ % odpovídajícím teoretickým předpokladům z kapitoly 2.

4.2 Sierpinského anténa

Pro lepší představu o vlivu zemní plochy s periodickým motivem a fraktálového motivu na vrchní straně antény byla tato anténa simulována v provedení se spojitou zemní plochou a se zemní plochou s periodickým motivem, tj. s porušenou zemní plochou (dále jako DGS). Výsledky pak byly porovnávány s hodnotami z [9], které lze vidět níže.

Z obrázku 4.2 je dobře patrná očekávaná výhoda fraktálové struktury s periodickou zemní plochou. Ze simulovaných hodnot určený první rezonanční kmitočet odpovídá předchozí flíčkové anténě, zároveň je zde rezonanční kmitočet 11,3 GHz. Frekvenční šířka pásma pro pokles o 10 dB je zhruba 9 GHz, což odpovídá šířce pásma 105 %.



Obrázek 4.2 Očekávané hodnoty navrhované antény [8]

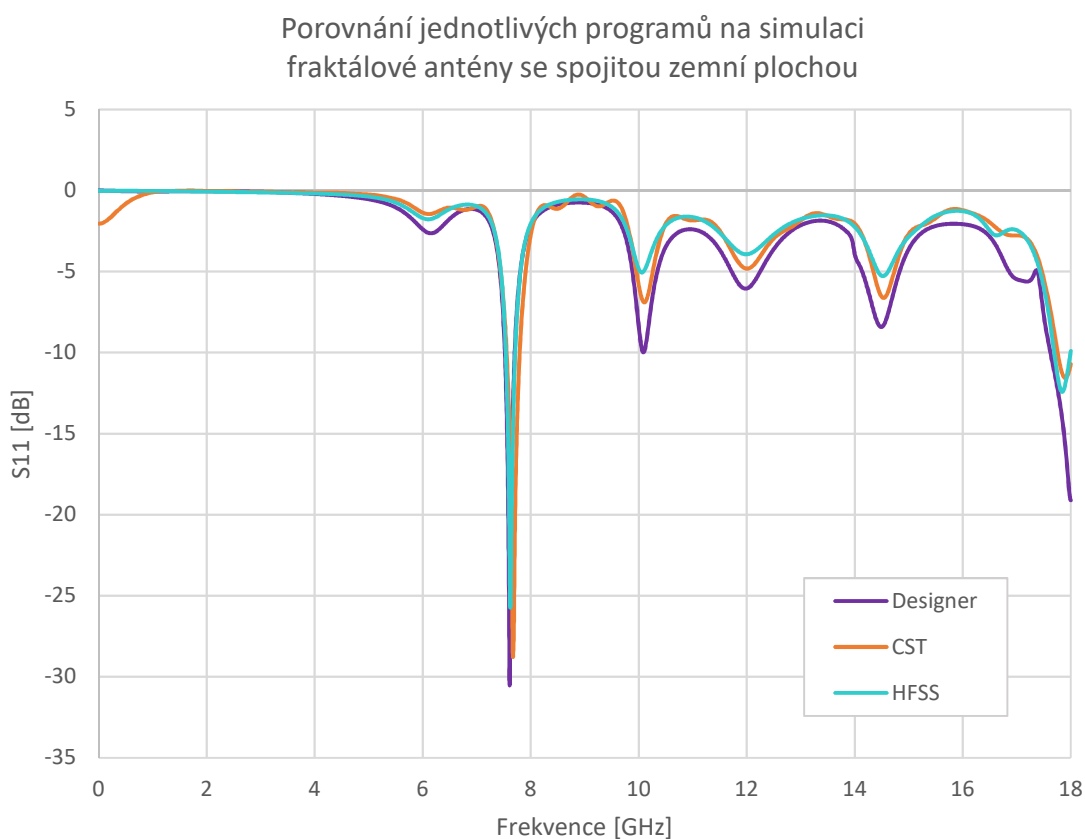
Způsob vyhotovení zemní plochy by dle [9] měl mít pozitivní vliv na hodnoty činitele odrazu.

4.2.1 Fraktálový motiv se spojitou zemní plochou

Nejprve byla vymodelována fraktálová struktura na substrátu se spojitou zemní plochou, díky čemuž mohl být využit pro kontrolu výsledků i program Ansoft Designer.

Jako výsledek byla očekávána anténa vykazující popsané širokopásmové vlastnosti, pouze s jinými hodnotami maximálního poklesu činitele odrazu způsobenými vynecháním periodického motivu zemní plochy.

Výsledná anténa ale vykazuje parametry velmi podobné s předchozí jednoduchou flíčkovou anténou. Rezonanční kmitočet mírně poklesl na hodnotu 7,6 GHz, šířka pásma byla 2,5 %. Samostatné výsledky této simulace jsou ve formě přímého výstupu z návrhového softwaru uvedeny v příloze.



Obrázek 4.3 Průběhy parametru S11 z jednotlivých programů

V této části mohly být využity všechny tři simulační programy díky použití spojitě zemní plochy, a to zejména pro minimalizaci chyb a také pro pozorování rozdílů mezi jednotlivými solvery. Jednotlivé průběhy jsou zobrazeny na obrázku 4.3. Z nich je jasně patrné, že získané výsledky ze všech tří programů jsou srovnatelné, drobné rozdíly jsou způsobeny rozdílným přístupem k řešení zadaných úloh.

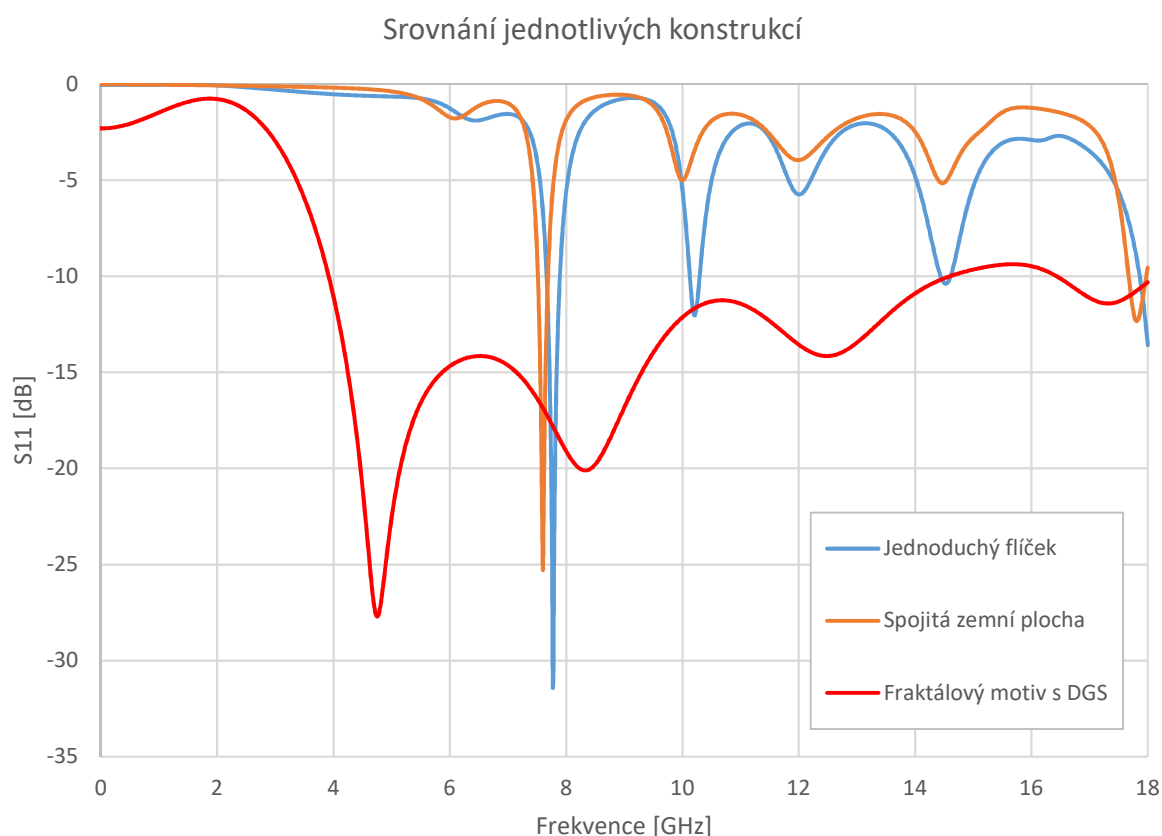
4.2.2 Sierpinského motiv s DGS

Posledním krokem v rámci návrhu antény se Sierpinského motivem byla simulace fraktálové struktury spolu s periodickým motivem zemní plochy. Bylo očekáváno dosažení parametrů srovnatelných s parametry uvedenými v [9], předně mělo být dosaženo větší šířky pásma než u jednoduché flíčkové antény.

Vlastnosti této antény jsou spolu s průběhy předchozích antén ukázány na obrázku 4.4. Hodnoty všech tří simulovaných antén jsou z programu HFSS. Zde je dobře patrné, že rozdíl mezi planární anténou s jednoduchým flíčkem a anténou pouze s motivem Sierpinského trojúhelníku je ohledně rezonančního kmitočtu a šířky pásma naprosto zanedbatelný.

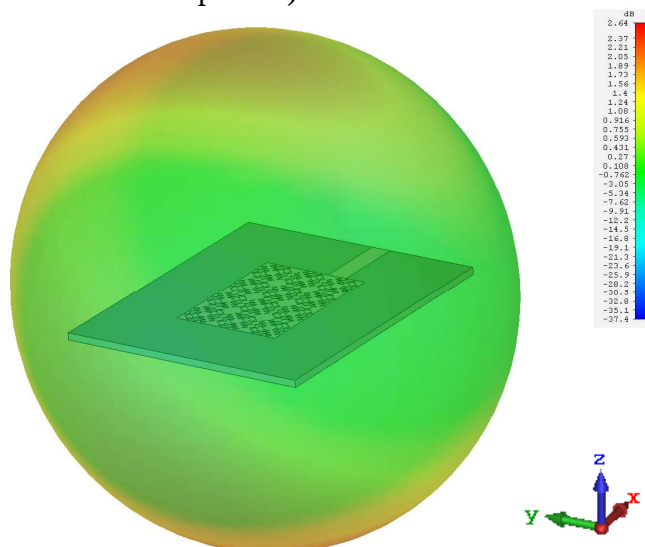
U antény kombinující fraktálový motiv a DGS lze pozorovat očekávaný rapidní nárůst šířky pásma pro pokles o 10 dB. V porovnání s ostatními výsledky lze ale konstatovat, že tohoto bylo docíleno především způsobem vyhotovení zemní plochy.

Oproti očekávaným hodnotám z předlohy pozorujeme rezonance na kmitočtech 4,75 GHz, 8,31 GHz a 12,5 GHz. Prostřední kmitočet lze považovat za původní rezonanční kmitočet obdélníkového flíčku, další kmitočty jsou tvořeny rezonancemi zapříčiněnými porušenou zemní plochou. Šířka pásma s hodnotou 10,7 GHz, odpovídající šířce 113 %, je také znatelně vyšší, než jaká byla očekávána.



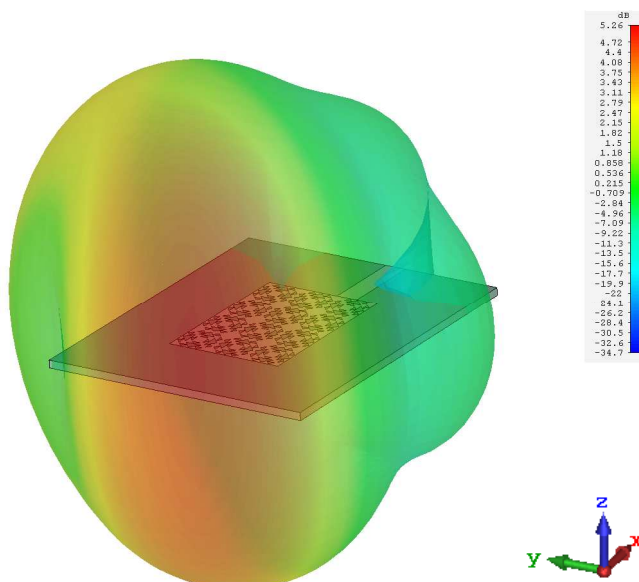
Obrázek 4.4 Porovnání vlastností jednotlivých konstrukcí

Z vyzařovacích charakteristik modelované antény je dobře patrná značná deformace vyzařovací charakteristiky navrhované Sierpinského antény oproti vyzařovací charakteristice flíčkové antény s fraktálovým motivem a spojitou zemní plochou (pro porovnání uvedeno v příloze).



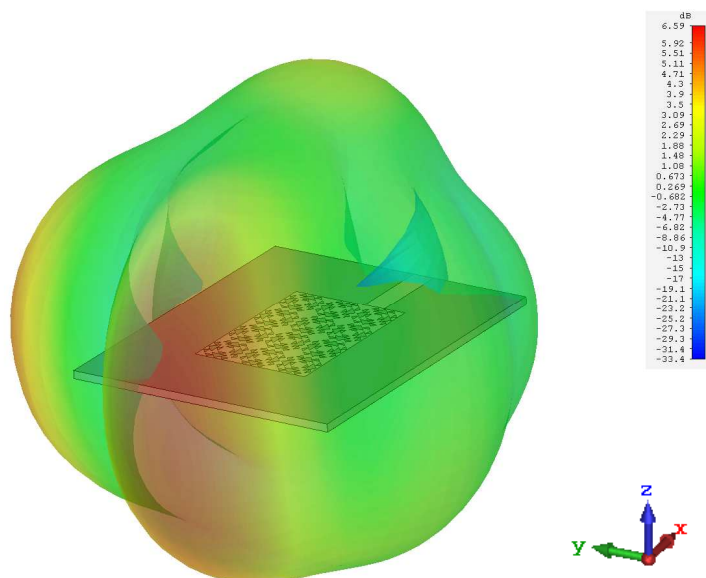
Obrázek 4.5 Vyzařovací diagram Sierpinského antény na 4,75 GHz

Z obrázku 4.5 je zřetelné parazitní vyzařování na kmitočtu 4,75 GHz ve směru zemní plochy. Maximální hodnoty realizovaného zisku v kladném i záporném směru osy z má hodnotu přibližně 2,6 dB.



Obrázek 4.6 Vyzařovací diagram Sierpinského antény na 8,31 GHz

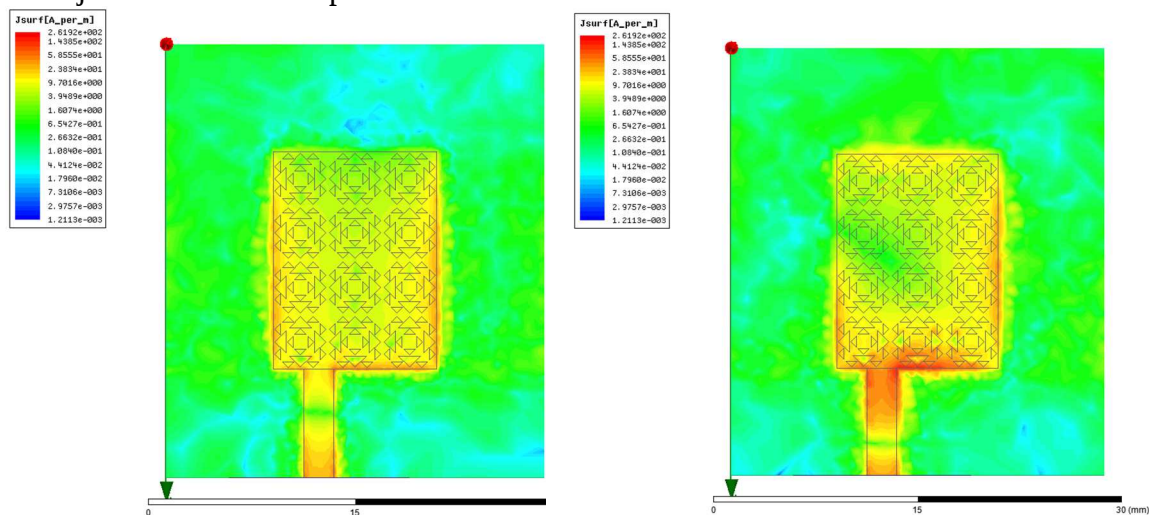
Na rezonančním kmitočtu 8,31 GHz je vyzařovací charakteristika oproti původní značně zdeformovaná. Maximum vyzařování se nachází v ose napájecího mikropásku a objevují se také znatelné postranní laloky. Maximální zisk se pohybuje kolem 5,2 dB.



Obrázek 4.7 Vyzařovací diagram Sierpinského antény na 12,5 GHz

Na nejvyšším rezonančním kmitočtu dochází ke zvýraznění postranních laloků. Maximum vyzařování stále leží v záporném směru osy x s hodnotou téměř 6,6 dB.

Na obrázku 4.8 je zobrazeno plošné rozložení proudu na rezonančních kmitočtech 4,75 GHz a 8,31 GHz v logaritmickém měřítku. V porovnání s jednoduchou flíčkovou anténou (uvedeno v příloze) lze vidět nerovnoměrné rozložení maximální intenzity, které je také soustředěna podél delších stran flíčky



Obrázek 4.8 Plošné rozložení proudu na dvou rezonančních kmitočtech

5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIERPINSKÉHO ANTÉNY

Cílem této části bakalářské práce bylo seznámit se s konceptem předložené flíčkové antény s fraktálním motivem Sierpinského trojúhelníku, provést pomocí numerického modelu porovnání s konvenční flíčkovou anténou a určit výhody použitého fraktálového motivu.

Získané výsledky byly vždy ověřeny několika simulacemi, porovnány s výsledky ostatních programů a také průběžně srovnávány s výsledky práce, která sloužila jako předloha tomuto návrhu antény s fraktálním motivem.

Bohužel, získané výsledky nepotvrdily předložené výhody použitého fraktálního motivu spojeného s flíčkovou anténou. V předloze popisovaných širokopásmových vlastností bylo dosaženo použitím periodického motivu zemní plochy, díky kterému bylo možné dosáhnout očekávaných výsledků. V příloze lze nalézt také průběh parametru S_{11} pro jednoduchou flíčkovou anténu spojenou s tímto motivem zemní plochy. Z tohoto je vidět, že těchto vlastností lze dosáhnout i při vynechání fraktálového motivu.

Jedním z důvodů zanedbatelného vlivu fraktálového motivu lze spatřovat v malých rozměrech motivu, kdy jednotlivé prvky motivu jsou velikostně zanedbatelné v porovnání s vlnovou délkou na kmitočtu blízkém 8 GHz. Plocha flíčku s motivem se poté pro elektromagnetickou vlnu chová jako téměř spojitá plocha. Rozdíl v chování lze pozorovat na plošném rozložení proudu, kdy plocha flíčku narušená fraktálovým motivem vykazuje nerovnoměrné rozložení oproti jednoduchému flíčku.

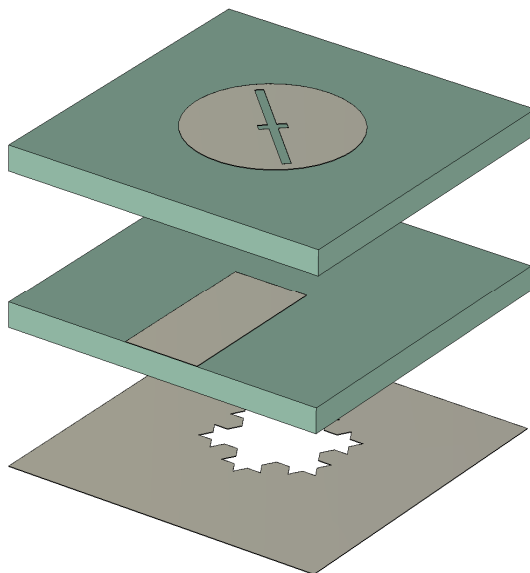
Dle zdrojové literatury byla také ověřena polarizace antény. Bylo očekáváno dosažení levotočivé kruhové polarizace. Výsledek je spolu s dalšími průběhy ve formátu přímého výstupu z programu CST Microwave uveden v příloze. Z výsledků osového poměru lze vidět, že anténa disponuje eliptickou polarizací s nejnižší hodnotou 3,8 dB na kmitočtu 8,35 GHz ve směru normály plochy flíčku.

Ačkoliv navržená anténa vykazuje širokopásmové vlastnosti, ze získaných výsledků lze vidět nevhodné tvary vyzařovacích charakteristik, kdy se s rostoucím kmitočtem objevují postranní laloky a mění se také směr maximálního vyzařování. Z tohoto důvodu bylo pro další práci rozhodnuto věnovat se konstrukci antény využívající fraktálový motiv v rovině zemní plochy.

6 NÁVRH ANTÉNY S MOTIVEM KOCHOVY VLOČKY

Na základě předchozích výsledků, které neprokázaly zásadní vliv použitého fraktálového motivu na vlastnosti navrhované antény, byla pro další zkoumání a závěrečnou realizaci zvolena anténa konstrukčně vycházející z návrhu kruhově polarizované antény publikované v [11].

Jako hlavní anténní prvek zde slouží kruhový flíček vyžadující menší plochu než srovnatelný obdélníkový flíček a napájený vnořeným, tzv. embedded, mikropáskem. Vnoření je realizováno zhotovením antény na dvě stejné destičky substrátu. Jednotlivé části antény jsou znázorněny na obrázku 6.1. Zemní plocha je narušená fraktálním motivem Kochovy vločky v druhé iteraci za účelem snížení plochy flíčku pro požadovaný rezonanční kmitočet.



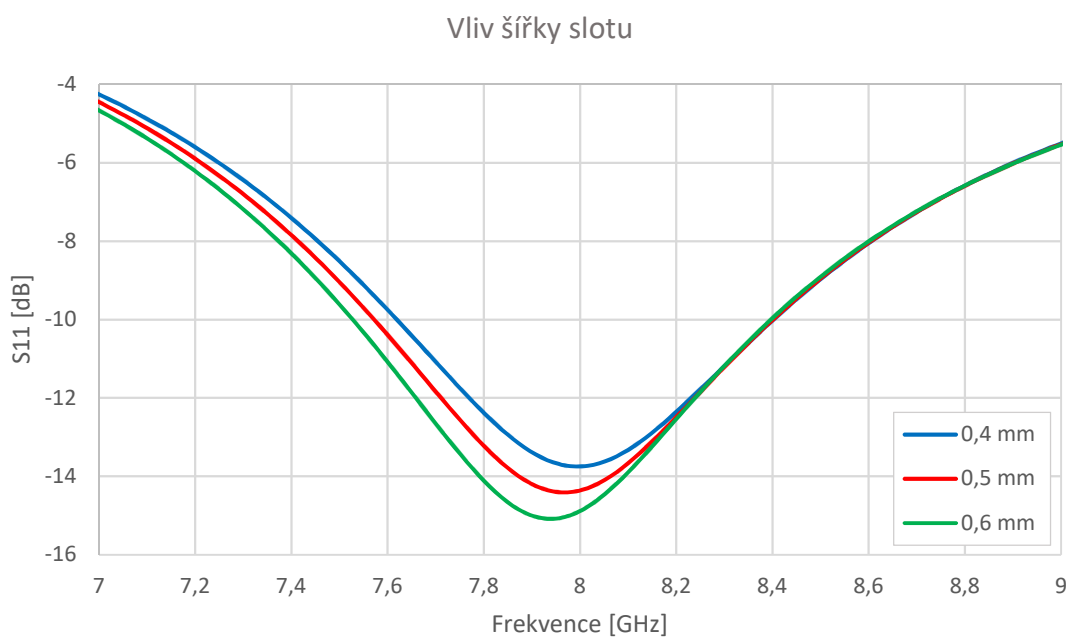
Obrázek 6.1 Navrhovaná anténa s motivem Kochovy vločky

Pro dosažení kruhové polarizace je plocha flíčku, jak je znázorněno na obrázku výše, narušena dvěma štěrbinami (sloty) o různých délkách a stejných šířkách vzájemně natočenými o 90° . Tyto nesymetrické sloty mají za cíl generování dvou ortogonálních módů se stejnou amplitudou a fázovým posuvem téměř o 90° , což je základní podmínkou pro dosažení kruhově polarizovaného vyzařování antény.

Anténa byla navržena na substrátu Arlon CuClad 217 s dielektrickou konstantou $\epsilon_r = 2,2$ a tloušťkou $h = 1,54$ mm pro pracovní kmitočet v pásmu 8 GHz. Numerické modely byly vytvořeny v programech CST Microwave Studio a ANSYS HFSS.

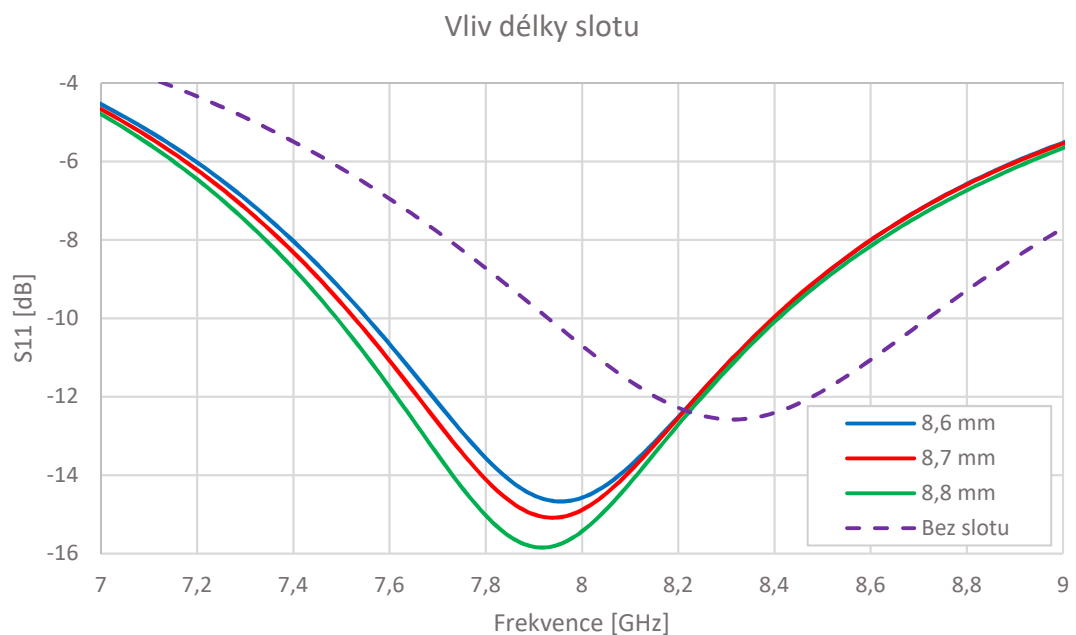
Pro odhad počátečního poloměru kruhového flíčku byly použity vztahy (2.6) a (2.7) uvedené v teoretické části této práce. Dle tohoto byl počáteční poloměr zvolen s hodnotou $a = 6,3$ mm, který byl dále parametricky upravován pro dosažení požadované rezonanční frekvence. Rozměry obou substrátů byly zvoleny s ohledem na zkoumaný motiv Kochovy vločky v zemní ploše jako $20,00 \times 20,00 \times 1,54$ mm. Napájecí mikropásek se vstupní impedancí 50Ω a délkou 10,00 mm zarovnaný na střed substrátu měl šířku 4,65 mm získanou z volně dostupného kalkulátoru v [10].

Délky a šířky štěrbin v ploše flíčku byly získány poměrovým zmenšením rozměrů v původním návrhu antény v [11] a dále pomocí parametrické analýzy doladěny. Stejným způsobem byly navrženy také rozměry motivu Kochovy vločky. Počáteční hodnota parametru P , kterým byla označena délka hrany trojúhelníku základní nulté iterace Kochovy vločky, byla zvolena jako $P = 6,4$ mm. V původním návrhu antény byl střed motivu Kochovy vločky posunut podél osy napájecího mikropásku směrem dál od jeho konce. Velikost posunutí v návrhu antény pro pásmo 8 GHz byla zvolena na základě parametrické analýzy. Výsledky jednotlivých analýz parametrů jsou přiloženy v grafech níže. Pro lepší názornost je zvolen frekvenční rozsah pouze od 7 GHz do 9 GHz.



Obrázek 6.2 Analýza vlivu šířky slotu na parametr S11

Z obrázku 6.2 je patrný velmi malý vliv šířky slotu na parametr S11. Rozdíl hodnot se pohybuje zhruba v intervalu 100 MHz a 1 dB u nejširšího a nejužšího slotu. Velmi podobných výsledků bylo dosaženo při zkoumání vlivu délky primárního slotu. Rozdíly mezi nejdelším a nejkratším navrženým slotem byly kolem 1 dB a 50 MHz jak je ukázáno na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3 Analýza vlivu délky slotu na parametr S11

Z výše uvedeného grafu lze také vidět, nakolik použití štěrbin v ploše flíčku ovlivňuje rezonanční frekvenci oproti flíčku s nenarušenou plochou. Zde je rozdíl téměř 400 MHz a je tedy jasné, že počáteční odhad poloměru kruhového flíčku je nutné zredukovat. Lepších hodnot činitele odrazu by bylo možné dosáhnout přizpůsobením rozměrů napájecího mikropáskového vedení pro získání vstupní impedance 50Ω na dané frekvenci. V příloze je také uveden graf zobrazující vliv délky slotu na osový poměr. Při délce slotu 7 mm byla hodnota osového poměru o 10 dB nižší, než u délky slotu 5 mm.

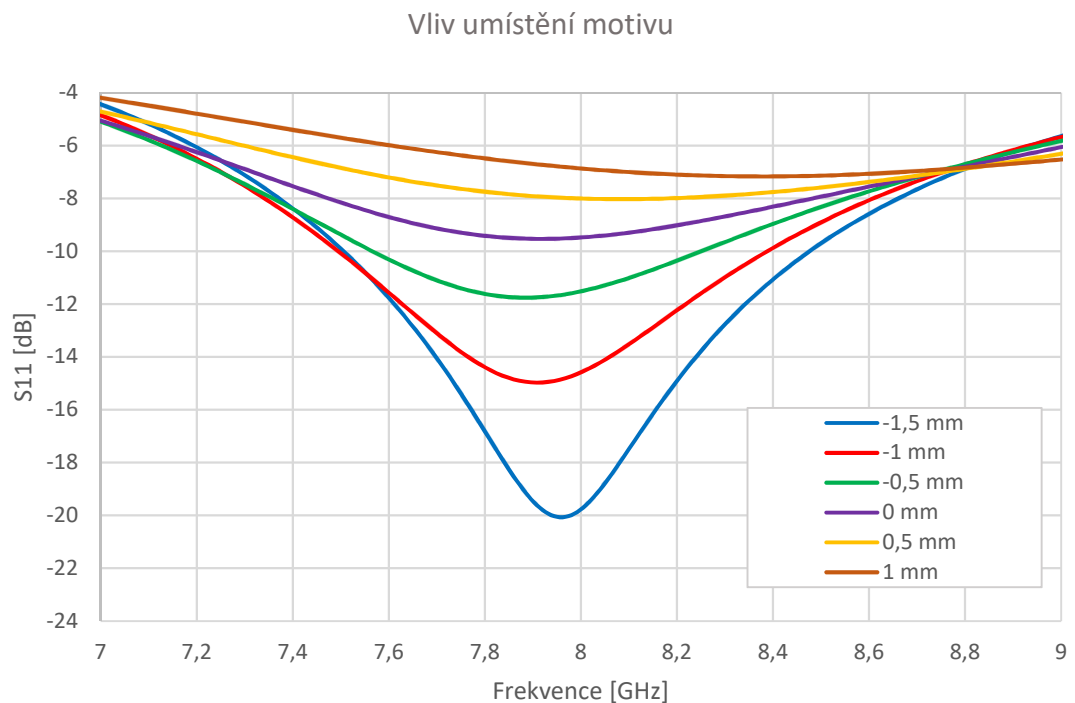
6.1 Spojitá zemní plocha

Na základě provedených parametrických analýz byl zvolen poloměr kruhového flíčku o hodnotě $a = 6,00$ mm pro dosažení pracovního kmitočtu v pásmu 8 GHz. Dále byla zvolena šířka štěrbin v ploše flíčku s hodnotou 0,50 mm a jejich délky 8,7 mm a 1,6 mm.

6.2 Porušená zemní plocha s Kochovou vložkou

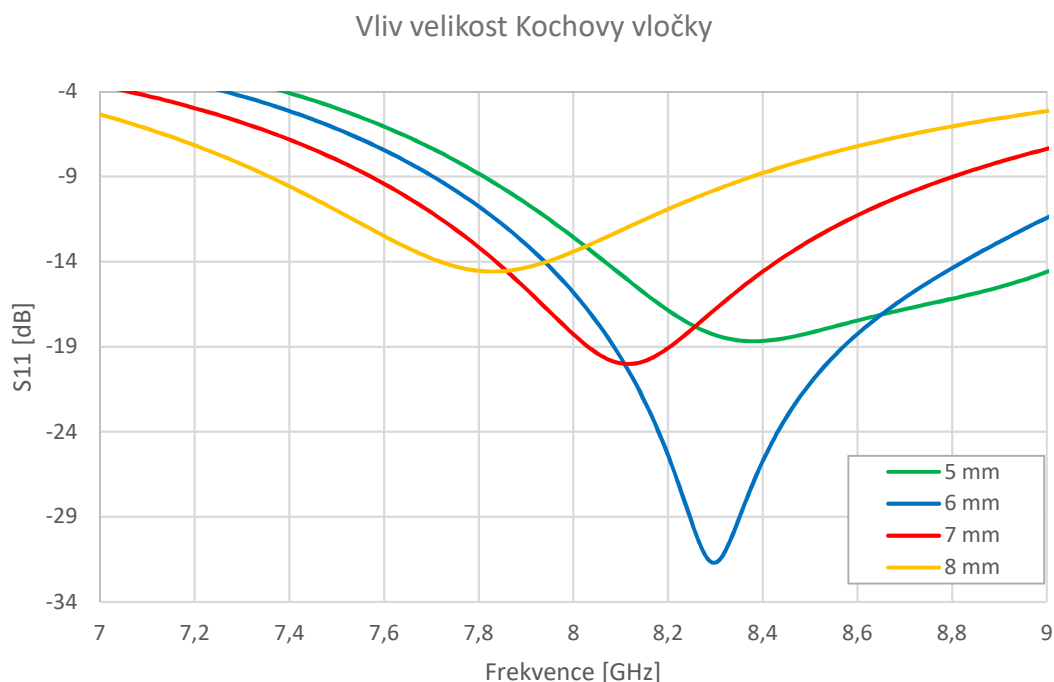
Použití DGS má za cíl primárně snížení celkové plochy flíčku při zachování stejné rezonanční frekvence. Rozdíl v ploše flíčku při stejné rezonanční frekvenci deklarovaný v [11] by měl činit až 44 % ve prospěch konstrukce s využitím motivu Kochovy vložky. Fraktální struktura ležící pod plochou flíčku má za cíl snížení činitele jakosti navrhované antény a potlačení parazitních rezonancí mezi plochou flíčku a zemní plochou.

Zkoumaným parametrem bylo v tomto návrhu také posunutí středu motivu Kochovy vložky v rovině zemní plochy a jeho vliv na frekvenční charakteristiky antény. Bylo zkoumáno posunutí v záporném směru osy x (směr k napájecímu konektoru) a v kladném směru osy x (směr od napájecímu konektoru), případně zarovnání středu motivu Kochovy vložky se středem kruhového flíčku. Z průběhů na obrázku 6.4 lze vidět zvyšování parametru S_{11} přibližováním motivu směrem k napájecímu konektoru. Při zarovnání motivu na střed, případně při dalším posouvání, již není u antény pozorovatelný rezonanční kmitočet. Naopak při hodnotě posunutí o 1,5 mm v záporném směru docházelo ke změně směru, ve kterém anténa vykazovala nejvyšší zisk. Na základě analýzy chování byla jako konečná hodnota posunutí zvolena hodnota -1,1 mm, při kterém nedocházelo k výše popsané deformaci vyzářovací charakteristiky antény.



Obrázek 6.4 Analýza vlivu umístění motivu Kochovy vložky na parametr S_{11}

Poslední parametrem, který bylo při návrhu nutné určit, byla délka hrany trojúhelníku v nulté iteraci Kochovy vložky, jejímž zmenšením na třetinu původní délky dochází ke generování vyšších iterací tohoto motivu. Výsledky analýzy jsou uvedeny na obrázku 6.5. Změnou tohoto rozměru dochází k znatelnému ovlivnění hodnot parametru S_{11} a také k nepřímě úměrné změně rezonančního kmitočtu. Při délkách základní hrany 8 mm a vyšších ovšem docházelo ke vzniku postranních laloků ve vyzářovacím diagramu antény v záporném směru osy z , proto byla jako hraniční hodnota použita délka hrany 7,7 mm.



Obrázek 6.5 Analýza vlivu velikosti Kochovy vločky na parametr S11

Pro úplnost je třeba ještě dodat, že na základě vlivu fraktálového motivu v zemní ploše na rezonanční kmitočet byl postupnou analýzou zvolen poloměr flíčku 5 mm. Jak bylo naznačeno výše, rezonanční kmitočet je ovlivňován také rozměry štěrbin v ploše flíčku, a tak pro možnost porovnání jednotlivých konstrukcí zůstaly rozměry těchto štěrbin u antény s DGS shodné s anténou se spojitou zemní plochou.

Zkoumaným prvkem byl i vliv řádu (iterace) použitého fraktálového motivu na navrhovanou anténu. V příloze lze vidět průběhy parametru S11 při třech různých iteracích motivu Kochovy vločky. Je dobře patrný vliv řádu motivu na rezonanční kmitočet, kdy s každou vyšší iterací dojde ke snížení rezonančního kmitočtu při zachování rozměru flíčku.

6.3 Kochova anténa v návrhovém softwaru

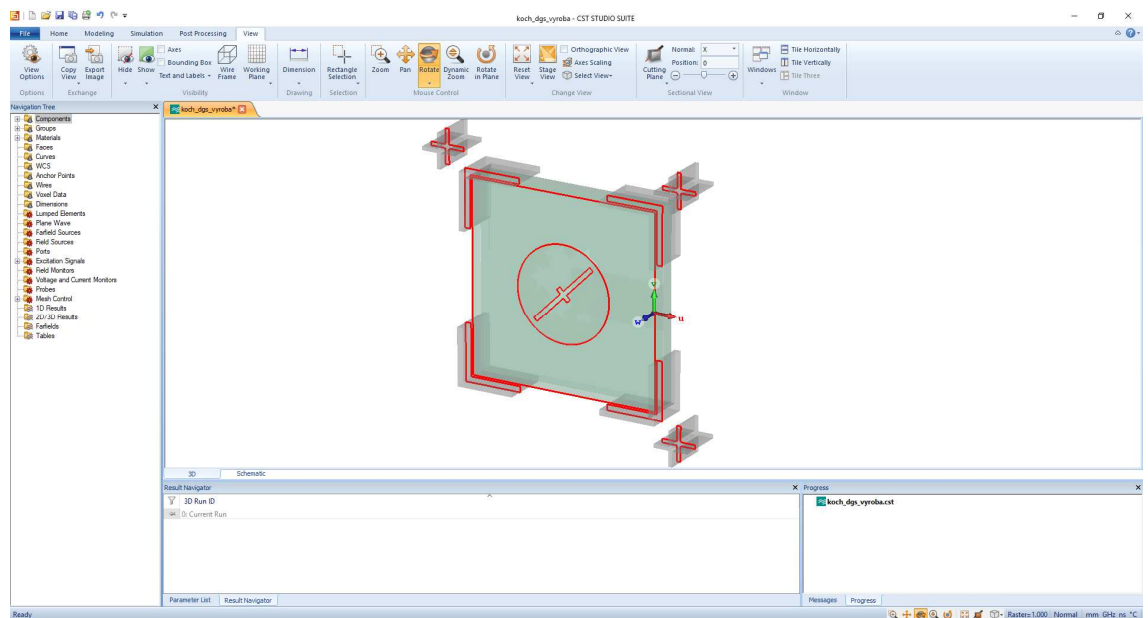
6.3.1 ANSYS HFSS

Při návrhu této antény byl software ANSYS HFSS používán téměř výhradně jen pro ověření výsledků získaných v programu CST Microwave, ve kterém byly i všechny modely vytvořeny, a pro porovnání směrových charakteristik antény. Jednotlivé modely antén byly do programu HFSS importovány ve standardním souborovém formátu SAT verze 19.0.

Pro analýzu antén bylo použito frekvenční rozmítání v rozsahu 1 GHz až 12 GHz s frekvenčním krokem 0,01 GHz. Veškeré ostatní parametry byly nastaveny na výchozí hodnoty. Vyzařovací charakteristiky antén byly simulovány v prostoru 0° až 360° pro úhly Φ i Θ s krokem po 1° . Směrové charakteristiky byly následně získány ze samostatných analýz na diskretních rezonančních kmitočtech.

6.3.2 CST Microwave Studio

V programu CST Microwave byly vytvořeny veškeré modely navrhované Kochovy antény, a to zejména z důvodu subjektivně lepší práce při modelování fraktálové struktury. Jednotlivé modely byly následně exportovány do formátu SAT přes záložku *Modeling* → *Import/Export* a vloženy do programu HFSS. Zde také byly generovány soubory ve formátu Gerber potřebné pro realizaci navrhovaných antén na substrát včetně vytvoření potřebných ořezových značek a záměrných křížů s využitím uživatelského souřadnicového systému pro vytvoření řezů jednotlivými vrstvami, jak je zobrazeno na obrázku 6.6.



Obrázek 6.6 Export výrobních dat v programu CST

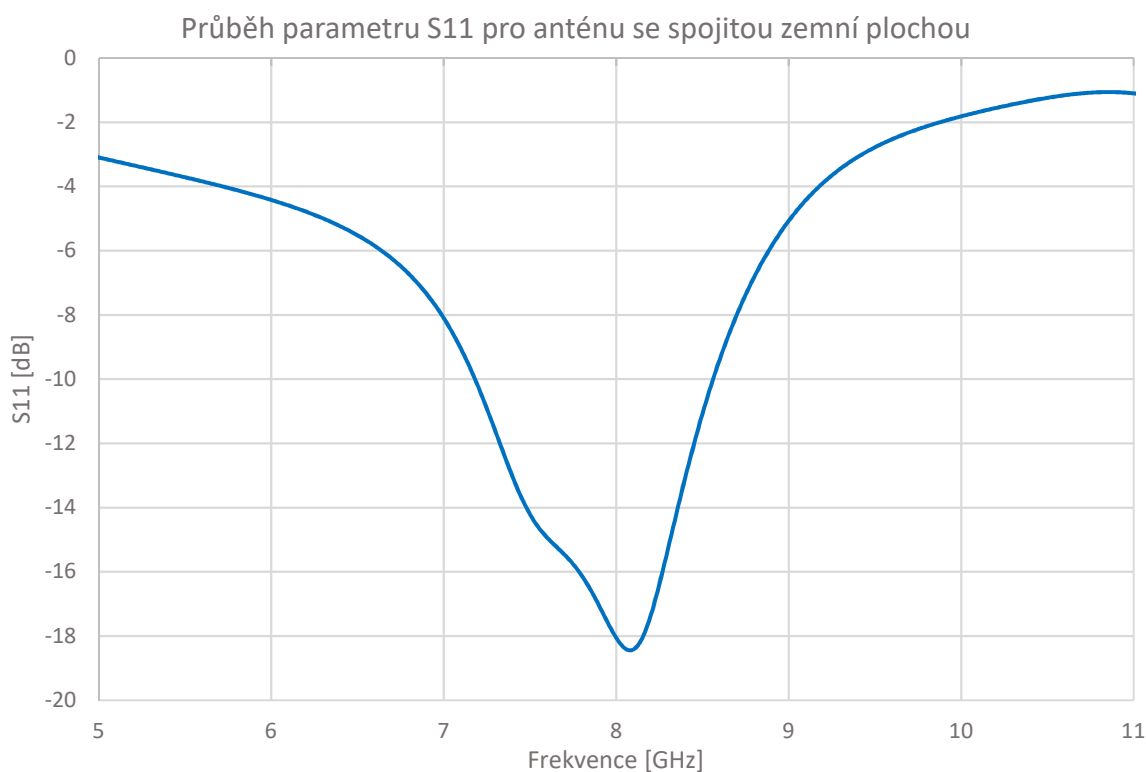
Pro simulace byl volen automaticky zvolený řešič *Time Domain Solver* s nastavením impedance 50Ω a frekvenční rozmítání v rozsahu od 0 GHz do 12 GHz.

7 VÝSLEDKY KOCHOVY ANTÉNY ZÍSKANÉ SIMULACEMI

7.1 Anténa se spojitou zemní plochou

Pro ověření funkčnosti navržené antény byla nejprve simulována anténa se spojitou zemní plochou. Kvůli použití štěrbin v ploše kruhového flíčku, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, bylo nutné zmenšit hodnotu poloměru flíčku z počáteční hodnoty 6,3 mm na konečnou hodnotu 6 mm pro zachování rezonanční frekvence 8 GHz.

Průběh parametru S_{11} lze vidět na obrázku 7.1, ze kterého je dobře patrné naladění antény na kmitočet blízký 8 GHz a také šířku pásma pro pokles o 10 dB zhruba 1,4 GHz, což představuje 17 %. Jde tedy o několikanásobně vyšší hodnotu, než jaké bylo dosaženo u předchozí jednoduché flíčkové antény. V průběhu je pozorovatelný i náznak parazitní rezonance na kmitočtu kolem 7,5 GHz. Z dále uvedených výsledků je patrné, že tato rezonance je přítomna také u antény vyrobené. Při použití motivu Kochovy vložky žádná parazitní rezonance pozorovatelná není, lze tedy usuzovat že jde o rezonanci mezi plochou flíčku a zemní plochou, které mají být právě využitím DGS potlačeny.

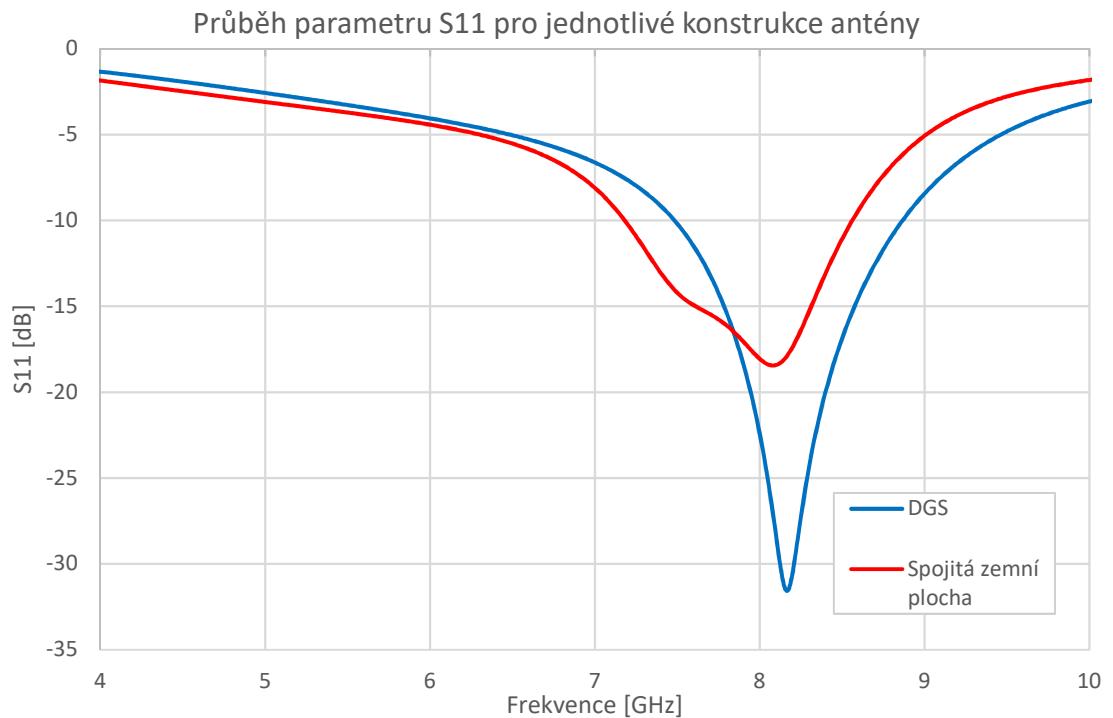


Obrázek 7.1 Ověření frekvenčních vlastností antény se spojitou zemní plochou

7.2 Kochova anténa

Očekávaným výsledkem při simulaci Kochovy antény bylo dosažení stejné rezonanční frekvence jako u předchozí antény při zmenšení potřebných rozměrů flíčku, nebo analogicky při zachování rozměrů flíčku dosažení nižší rezonanční frekvence. Výsledky získané pouze přidáním motivu Kochovy vložky a při zachování rozměrů flíčku lze vidět ve formátu přímého výstupu z programu CST v příloze (příloha 10). Pozorováno je snížení rezonanční frekvence na hodnotu 7 GHz, tudíž zhruba o 12 %.

Následnou změnou poloměru flíčku až na hodnotu 5 mm byla získána rezonanční frekvence antény blízká původní rezonanční frekvenci, jak je ukázáno na obrázku

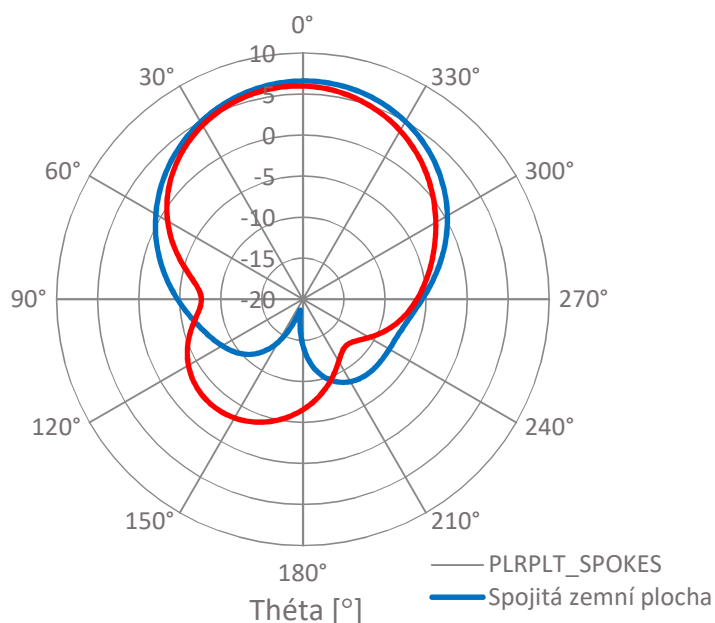


Obrázek 7.2 Průběh parametru S11 Kochovy antény

V průběhu můžeme tedy pozorovat jak zachování rezonanční frekvence antény, tak také pokles parametru S11 téměř o 15 dB. Jak již bylo zmíněno, došlo také k potlačení parazitní rezonance na kmitočtu 7 GHz. Při uvážení rozměrů slotu je povrch flíčku antény se spojitou zemní plochou 109 mm² a u antény s motivem Kochovy vložky je povrch 78 mm². Procentuálně jde tedy o snížení plochy o 28 %.

Mimo dále uvedených výsledků lze v příloze najít další simulované průběhy Kochovy antény, včetně zobrazení rozložení proudu ve dvou různých fázích (0° a 180°).

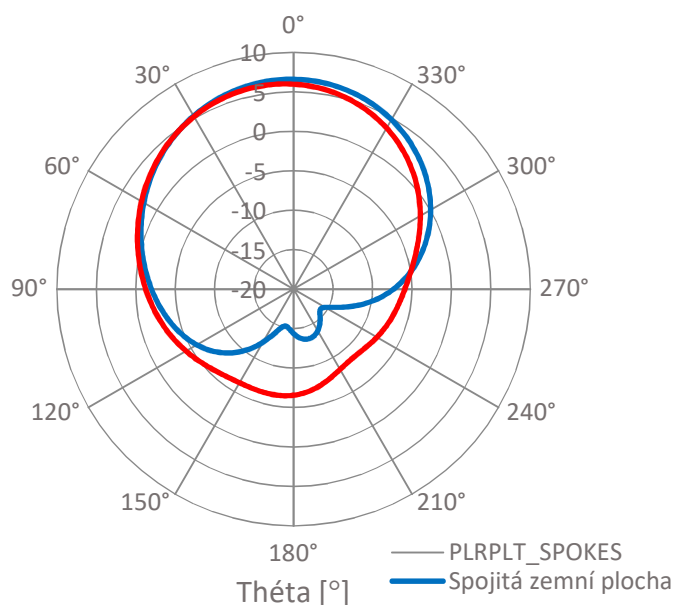
Simulovaný zisk [dB] antén v rovině E ($\Phi = 0^\circ$)



Obrázek 7.3 Simulovaný zisk antén v rovině E

Simulované směrové charakteristiky jak pro rovinu E (obrázek 7.3), tak pro rovinu H (obrázek 7.4) ukazují z velké části zachování tvaru vyzařovací charakteristiky v hlavním směru, také zachování maximálního zisku a zvýšení vyzařování ve směru zemní plochy, které je ovlivněno, jak již bylo zmíněno, velikostí použité Kochovy vložky.

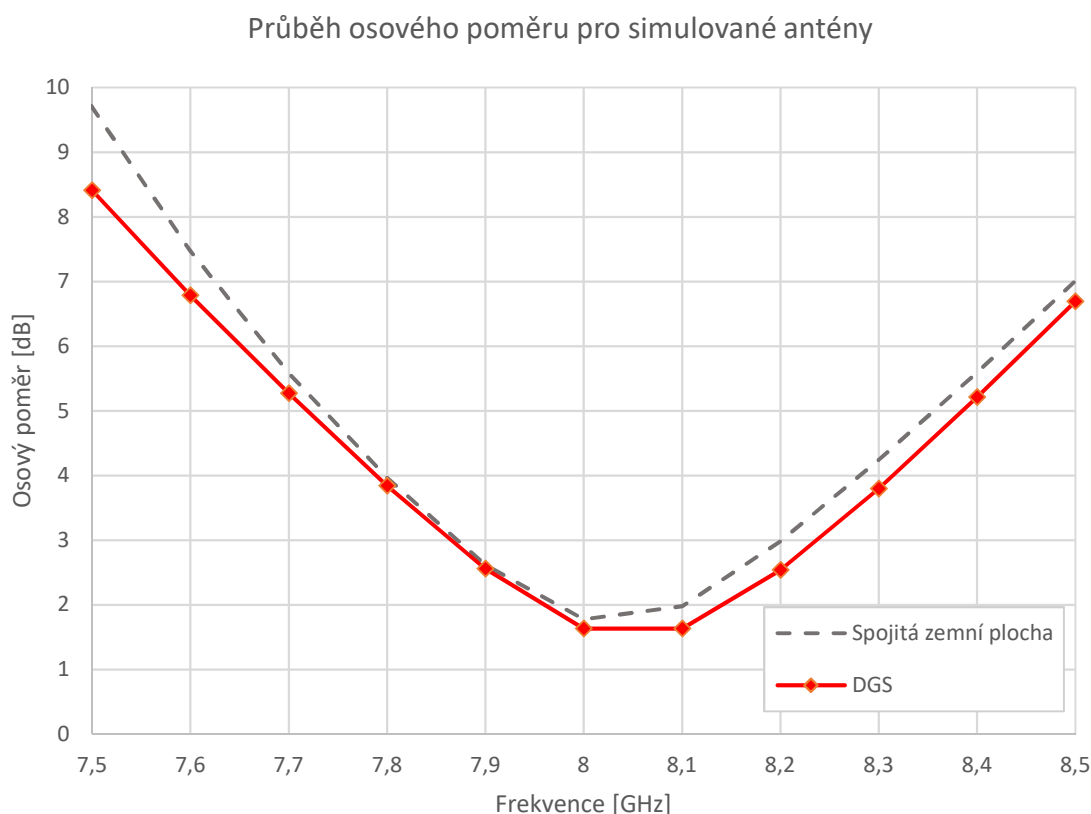
Simulovaný zisk [dB] antén v rovině H ($\Phi = 90^\circ$)



Obrázek 7.4 Simulovaný zisk antén v rovině H

Posledním zkoumaným parametrem, který by měl být ovlivněný použitím fraktálového motivu Kochovy vločky, je osový poměr, tj. parametr udávající, zda jde o anténu s polarizací kruhovou, eliptickou nebo lineární. Konkrétně bylo dle předlohy [11] očekáváno rozšíření šířky 3 dB pásma, ve které je polarizace antény určena jako kruhová.

Simulace proběhla s frekvenčním krokem 0,1 GHz a ve směru normály plochy flíčku (směr $\Phi = 0^\circ$ a $\Theta = 0^\circ$).



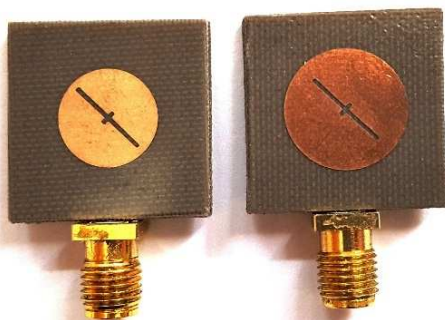
Obrázek 7.5 Průběh osového poměru pro simulované antény

Z obrázku 7.5 je patrné, že u antény s porušenou zemní plochou bylo dosaženo na rezonančním kmitočtu kruhové polarizace s hodnotou zhruba 1,6 dB. Šířka 3 dB pásma pro kruhovou polarizaci je v tomto případě 374 MHz. Pro porovnání, u antény se spojitou zemní plochou je šířka pásma 326 MHz, jde tedy u antény s fraktálním motivem o 48 MHz větší šířku pásma.

8 REALIZOVANÁ KOCHOVA ANTÉNA A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Po ověření funkčnosti základního principu této antény bylo přistoupeno k fyzické realizaci antény na substrát Arlon CuClad 217 s využitím leptací technologie výroby dostupné na Ústavu radioelektroniky FEKT VUT. Napájení bylo vyřešeno pomocí standardního *female* SMA konektoru v provedení pro montáž do DPS.

Z důvodu umístění mikropáskového vedení mezi dvě desky substrátu byl použit konektor s tenkým vnitřním vodičem, který byl napájen přímo na mikropáskové vedení. Pro zajištění přesného dosednutí obou desek substrátu bylo nutné do protější desky substrátu vytvořit zářez pomocí frézky o velmi malém průměru. Díky velmi tenkému vnitřnímu vodiči konektoru byla frézovaná drážka velmi malé hloubky, čímž by mělo dojít k minimalizaci vlivu na změřené parametry. Způsob napájení je ukázán v příloze 10. Bohužel došlo k drobnému vychýlení konektoru směrem od desky substrátu na obou vyhotovených anténách. Tato chyba má vliv na dále uvedené získané směrové charakteristiky.



Obrázek 8.1 Vyhotovené antény – plocha flíčku

Byly vyhotoveny celkem dvě v předchozí kapitole popsané antény v provedení se spojitou zemní plochou a s motivem Kochovy vločky. Obě realizované antény lze vidět na obrázcích 8.1 a 8.2.

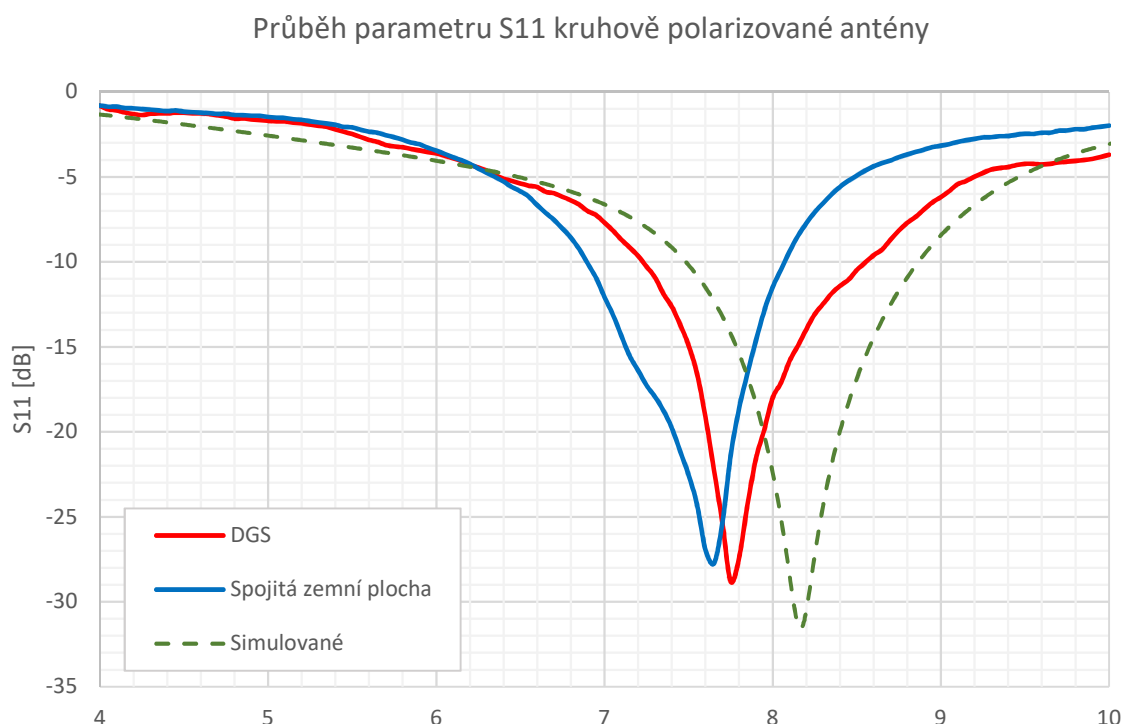


Obrázek 8.2 Vyhotovené antény – zemní plocha

8.1 Výsledky měření

Měření antén probíhalo v laboratořích Ústavu radioelektroniky. Měření parametru S_{11} bylo provedeno za použití vektorového analyzátoru Rohde & Schwarz ZVL s frekvenčním rozsahem od 9 kHz do 13,6 GHz a měřících kabelů R&S ZV-Z192.

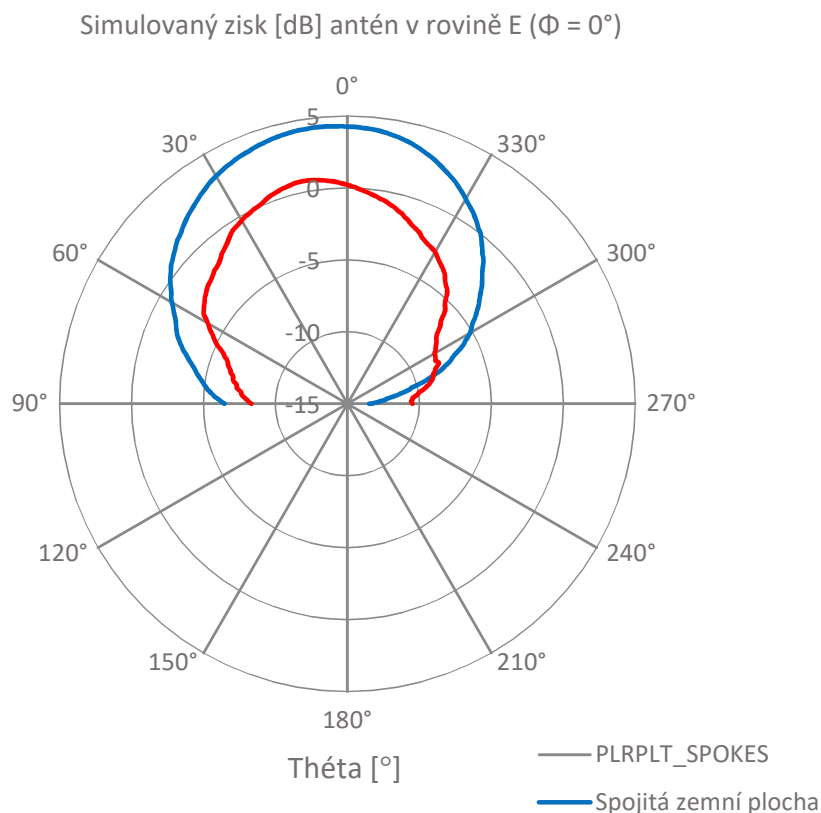
Měření směrových charakteristik antény proběhlo v bezodrazové komoře Ústavu radioelektroniky. Jako měřicí anténa byla použita širokopásmová trychtýřová anténa, měřícím zařízením byl vektorový analyzátor Rohde & Schwarz ZVA s frekvenčním rozsahem 10 MHz až 67 GHz a data byla zpracována měřícím systémem NVS2000.



Obrázek 8.3 Průběh parametru S_{11} vyhotovených antén

Nejprve tedy byly ověřeny frekvenční vlastnosti antény. Z výše uvedeného obrázku 8.3 je patrné, že u obou vyhotovených antén došlo k poklesu rezonančního kmitočtu oproti původní simulované anténě, které je pro porovnání také znázorněna. U antény se spojitou zemní plochou lze stále pozorovat náznak parazitního rezonančního kmitočtu poblíž 7 GHz, zároveň tato anténa vykazuje lepší hodnoty činitele odrazu než původní simulovaná anténa. Šířka pásma se pohybuje kolem hodnoty 1,3 GHz, což je v souladu s původní simulovanou hodnotou. Následné měření směrových charakteristik probíhalo na zjištěných rezonančních kmitočtech, které měly hodnotu 7,75 GHz u antény s DGS a 7,65 GHz u antény se spojitou zemní plochou.

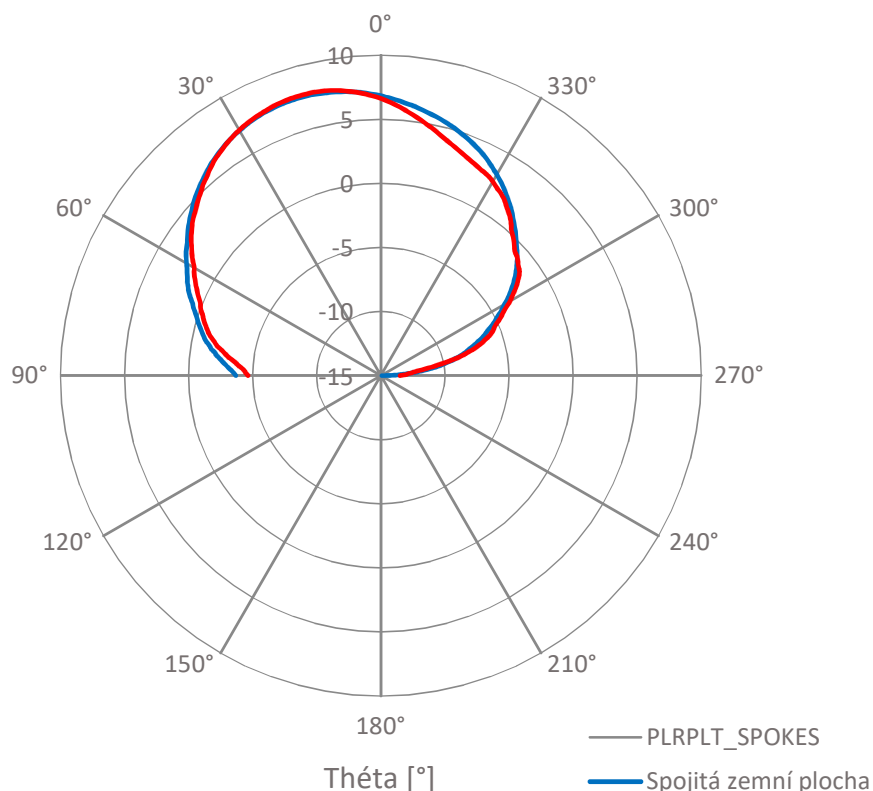
Kvůli způsobu umístění antény ve skeneru v bezodrazové komoře byla u obou antén měřena pouze jedna polovina v rozsahu od -90° do 90° . Nebylo tedy ověřováno případné parazitní vyzařování ve směru zemní plochy.



Obrázek 8.4 Měřený zisk antén v rovině E

V rovině E (obrázek 8.4) lze pozorovat značný rozdíl v maximálním zisku mezi anténou se spojitou zemní plochou a s porušenou zemní plochou (DGS). Anténa s DGS má také oproti druhé měřené celkem deformovaný tvar vyzařovací charakteristiky, zatímco anténa se spojitou zemní plochou se velmi blíží simulovaným hodnotám. Na vině může být výše zmíněná chyba, kdy osa konektoru nebyla rovnoběžná s osou antény, kvůli čemuž nebylo možné dosáhnout přesného sesouhlasení proti měřící anténě. Tato chyba je na obou vyhotovených anténách, u antény s porušenou zemní plochou je bohužel více patrná. Velmi důležitým faktorem zde je, že ani u jedné měřené antény nejsou ve vyzařovací charakteristice patrné žádné postranní laloky.

Simulovaný zisk [dB] antén v rovině H ($\Phi = 90^\circ$)



Obrázek 8.5 Měřený zisk antén v rovině H

Výsledky získané v rovině H již u obou antén více odpovídají hodnotám získaným simulacemi. Průběhy obou antén se téměř shodují, také zde nejsou pozorované žádné postranní laloky. Je tedy dobře vidět, že chyba týkající se umístění napájecího konektoru antény se při různých úhlech natočení proti měřicí anténě projevuje jinak.

V příloze 11 a 12 lze také pro lepší názornost nalézt přímé porovnání měřených a simulovaných hodnot zisku pro anténu využívající porušenou zemní plochu.

9 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ KOCHOVY ANTÉNY

Cílem této části bakalářské práce bylo seznámit se s konceptem předložené flíčkové antény s fraktálním motivem Sierpinského trojúhelníku, provést pomocí numerického modelu porovnání s konvenční flíčkovou anténou a určit výhody použitého fraktálového motivu.

V předchozích dvou kapitolách byl představen koncept flíčkové antény využívající principu porušené zemní plochy, ve které byl využit fraktálový motiv Kochovy, vločky a tato anténa byla následně navržena pro pracovní kmitočet 8 GHz a vyhotovena vhodnou dostupnou technologií.

Teoretické hodnoty byly souběžně získávány ze dvou návrhových softwarů a vzájemně porovnávány pro odhalení případné chyby v nastavení simulace, zároveň také byly konzultovány a porovnány s výsledky předloženými ve zdrojové literatuře.

Na základě kladných výsledků simulací bylo rozhodnuto o realizaci této antény na substrát Arlon CuClad 217, aby mohly být teoretické výsledky potvrzeny v praxi provedeným měřením. Na základě měření lze potvrdit platnost předpokladu o využití fraktálových motivů v konstrukci porušené zemní plochy. Taková anténa vykazovala při stejných rozměrech nižší rezonanční kmitočty, což vedlo k možnosti zmenšení celkových rozměrů flíčku. Ačkoliv úspora plochy flíčku kolem 28 % neodpovídá výsledkům referenčního návrhu [11], stále se jedná o nezanedbatelnou hodnotu.

Bohužel, vyhotovené antény pracovaly na nižším kmitočtu, než jaký byl očekáván. Je možné to přisuzovat nepřesnosti výroby, která by se měla pohybovat v rozsahu $\pm 0,2$ mm, což je již zásadní při výrobě navržené struktury Kochovy vločky nebo šterbin v ploše flíčku. Na základě parametrické analýzy bylo ukázáno, že i drobné změny parametrů těchto struktur mohou zapříčinit změnu rezonančního kmitočtu.

Nezanedbatelným faktorem při přesnosti výroby je také sesouhlasení obou desek substrátu, kdy nebylo v danou chvíli technicky realizovatelné zajistit dokonale přesné oříznutí obou desek substrátu a následné přesné slepení pomocí oboustranné lepicí pásky.

Z důvodu nepřesnosti při uchycení konektoru k anténě a následným odchylkám při měření směrových charakteristik nebylo možné potvrdit kruhovou polarizaci antény. Při měření v bezodrazové komoře byla orientačním měřením zjištěna hodnota osového poměru zhruba 8 dB odpovídající eliptické polarizaci antény, ne kruhové. Ze simulovaných hodnot osového poměru bylo ale zjištěno, že by antény měly být kruhově polarizované s hodnotou osového poměru kolem 2 dB.

10 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s konceptem flíčkových antén využívajících fraktálových a periodických struktur, porovnat jejich vlastnosti s konvenčními flíčkovými anténami a na základě získaných poznatků navrhnout anténu pro fyzickou realizaci vhodnou výrobní metodou.

V prvních dvou kapitolách, které sloužily jako teoretické, došlo k seznámení se s podstatou fraktálových motivů, jejich generací a také s principem fungování planárních antén. Zvláštní pozornost byla věnována Sierpinského fraktálovému motivu a motivu Kochovy vložky. Poznatky z obou těchto částí byly poté využity při zkoumání a návrhu antén dle předlohy v [9] a [11]. Výsledky simulací a měření jsou samostatně shrnuty na konci každé kapitoly věnované jednotlivým konstrukcím.

V kapitole 3 byla navrhována a zkoumána flíčková anténa využívající Sierpinského motivu v ploše flíčku a porušené zemní plochy. Jako výsledek byl očekáván širokopásmový charakter antény díky využití fraktálového motivu. Ze získaných hodnot lze vyvodit, že větší šířky pásma bylo dosaženo použitím porušené zemní plochy, vliv použitého fraktálového motivu byl velmi malý. Z důvodu neuspokojivých vyzařovacích charakteristik antény bylo rozhodnuto zaměřit se na jiné využití fraktálové struktury. Při vyhotovení dále navrhované antény na substrát bylo rozhodnuto využít zbylý materiál na pokusnou realizaci této Sierpinského antény pro ověření vhodnosti dostupné výrobní technologie pro leptání drobné struktury, jakou je navržený fraktálový motiv. Z vyrobeného vzorku lze usoudit, že tato leptací technologie využívající tisk předlohy na fotoplotteru je pro výrobu takovýchto jemných struktur nevyhovující. Jak v ploše flíčku, tak v zemní ploše byla pozorována ztráta základního trojúhelníkového motivu. Orientačním měřením S_{11} parametru bylo zjištěno, že vlivem použití jiného substrátu došlo ke změně rezonančních kmitočtů, ale velikost šířky pásma zůstala zachována.

V kapitole 4 byla pozornost přesunuta k anténě využívající motivu Kochovy vložky v rovině zemní plochy. Využitím motivu bylo očekáváno snížení nutných rozměrů flíčku při zachování rezonančního kmitočtu. Následně měla být anténa realizovaná na substrátu Arlon CuClad 217. Výsledky získané analýzami z návrhového softwaru potvrdily předpoklady, kdy byl pozorován vliv použitého fraktálového motivu na změnu rezonančního kmitočtu včetně vlivu řádu motivu. Anténa tedy byla realizována a simulované hodnoty ověřeny měřeními. Frekvenční charakteristiky byly ve shodě se simulovanými hodnotami, směrové charakteristiky byly bohužel vlivem nepřesností při výrobě zatíženy značnou chybou a nepotvrdily zcela teoretické předpoklady. Možností, jak se těmto chybám vyvarovat, by mohlo být využití přesnější technologie výroby pro lepší zachování tvarů fraktálového motivu a také lepší sesouhlasení obou desek substrátu. Problém způsobený vychýleným napájecím konektorem by bylo možné eliminovat jinak navrženým napájením, kdy by nebylo nutné zapuštění vnitřního vodiče konektoru mezi obě desky substrátu. Pro ověření zkoumaného vlivu fraktálového motivu ale nebylo nezbytně nutné návrh antény dodatečně měnit, teoretické předpoklady byly z velké části potvrzeny i s touto chybou v návrhu.

LITERATURA

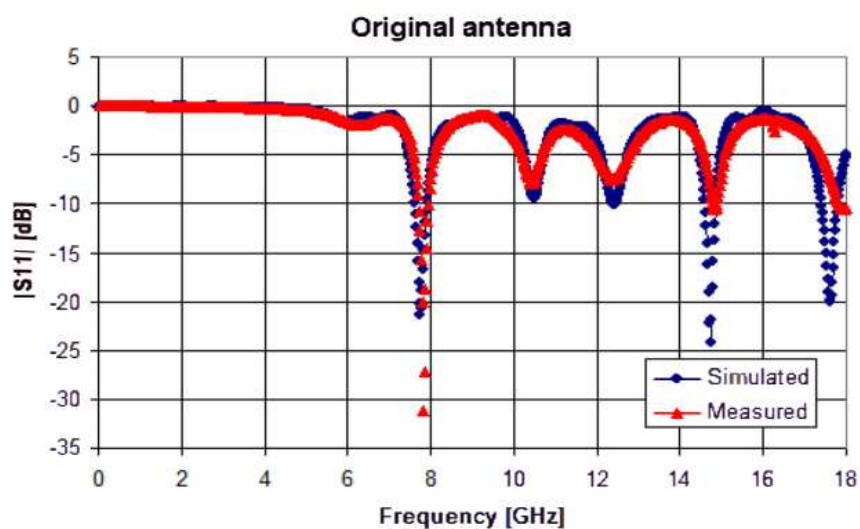
- [1] HEINÍK, Jan. *Fraktály v počítačové grafice* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií, 2007 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/54006>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií. Ústav počítačové grafiky a multimédií. Vedoucí práce Adam Herout.
- [2] KUDLIČKA, Martin. *Kochův dipól*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2003.
- [3] TIŠNOVSKÝ, Pavel. *Fraktály* [online]. In: . Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií, 2000 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/fract/clanky/1.htm>
- [4] SAINATI, Robert. *CAD of microstrip antennas for wireless applications*. Boston: Artech House, 1996. ISBN 08-900-6562-4.
- [5] ČERNOHORSKÝ, Dušan, Zbyněk RAIDA, Zbyněk ŠKVOR a Zdeněk NOVÁČEK. *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur*. 1. vyd. Brno: VUTUM, 1999. ISBN 80-214-1512-6.
- [6] GARG, Ramesh. *Microstrip antenna design handbook*. Boston, MA: Artech House, 2001. ISBN 0890065136.
- [7] RAMLY, Athirah Mohd, Norun Abdul MALEK, Sarah Yasmin MOHAMAD a Masturah Ahamad SUKOR. Design of a Circular Patch Antenna for 3D Printing. *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)* [online]. IEEE, 2016, , 406-410 [cit. 2017-05-22]. DOI: 10.1109/ICCCE.2016.92. ISBN 978-1-5090-2427-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7808350/>
- [8] Sierpinski gasket antenna. *AntennaMagus* [online]. b.r. [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: http://www.antennamagus.com/database/antennas/antenna_page.php?id=122
- [9] KUBACKI, Roman, Salim LAMARI a Karol RUDYK. The dispersion diagram used for periodic patterned microstrip antenna analysis. *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*. IEEE, 2016, , 1-4. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492065. ISBN 978-1-5090-2214-4. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7492065/>

- [10] Microstrip Patch Antenna Calculator. *Pasternack* [online]. b.r. [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx>
- [11] KARTIKEYAN, Machavaram Venkata, Pravin Ratilal PRAJAPATI, Gannavarapu Gopala Krishna MURTHY a Amalendu PATNAIK. Design and testing of a compact circularly polarised microstrip antenna with fractal defected ground structure for L-band applications. *IET Microwaves, Antennas* [online]. 2015, **9**(11), 1179-1185 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1049/iet-map.2014.0596. ISSN 1751-8725. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-map.2014.0596>

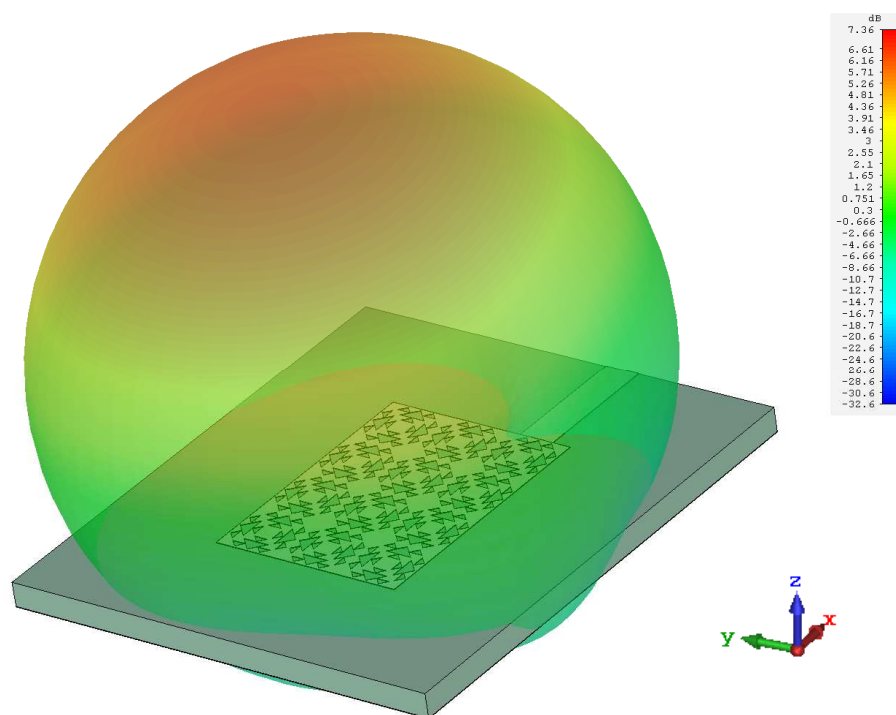
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

PSV	Poměr stojatých vln
A	Délka flíčku
B	Šířka flíčku
h	Výška substrátu
ϵ_r	Relativní permitivita
w	Šířka napájecího mikropásku
f_r	Rezonanční kmitočet
μ_0	Permeabilita vakua
ϵ_{ref}	Efektivní permitivita antény
ΔB	Zdánlivé prodloužení flíčku
a	Poloměr kruhového flíčku
P	Délkový parametr Kochovy vložky
GHz	Giga Hertz
Ω	Ohm
Θ	Úhel théta
Φ	Úhel fi
ω	Úhlová rychlost
dB	Decibel
S11	Činitel odrazu
BW	Šířka pásma
DGS	Porušená zemní plocha
DPS	Deska plošného spoje

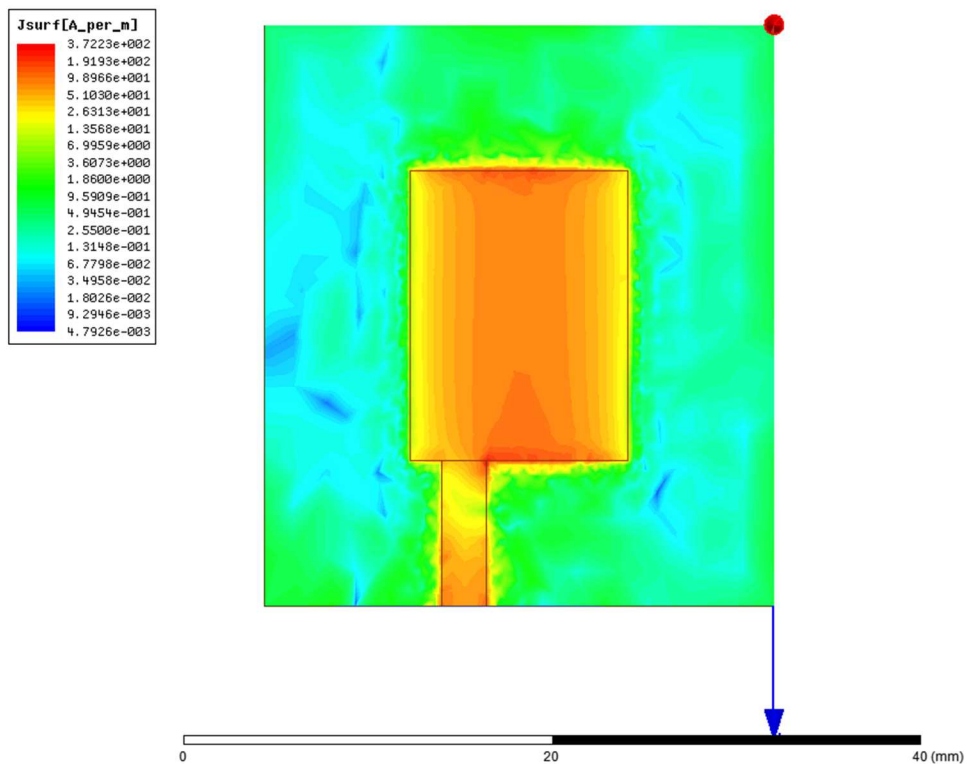
PŘÍLOHY



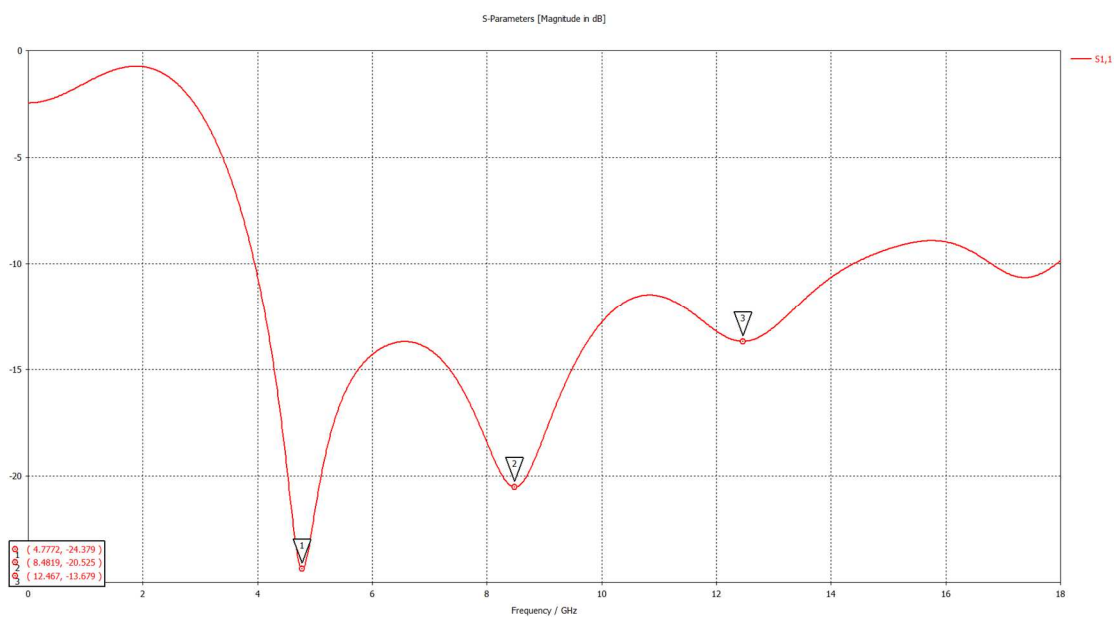
Příloha 1 Očekávané výsledky jednoduché flíčkové antény



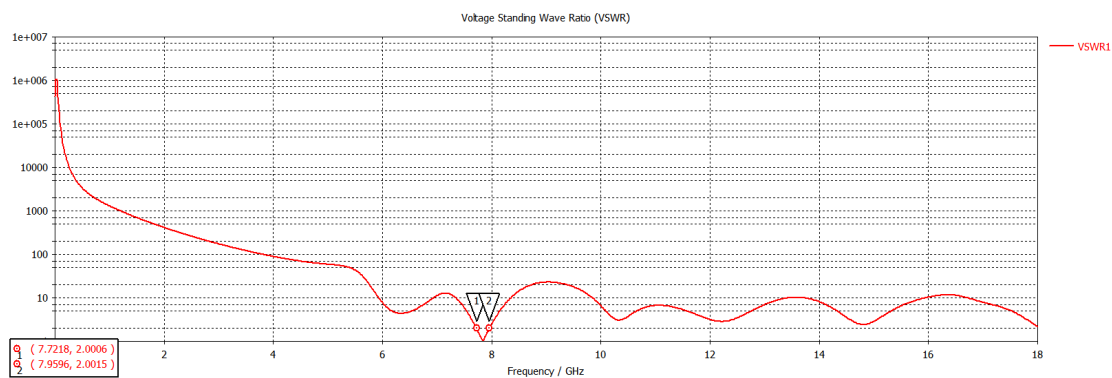
Příloha 2 Vyzařovací diagram antény se spojitou zemní plochou



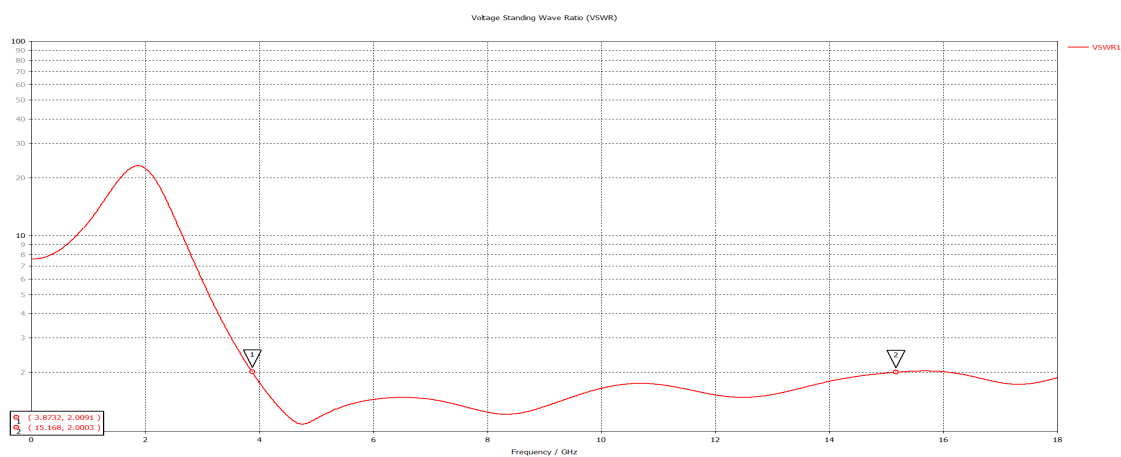
Příloha 3 Znáornění rozložení proudu jednoduché flíčkové antény



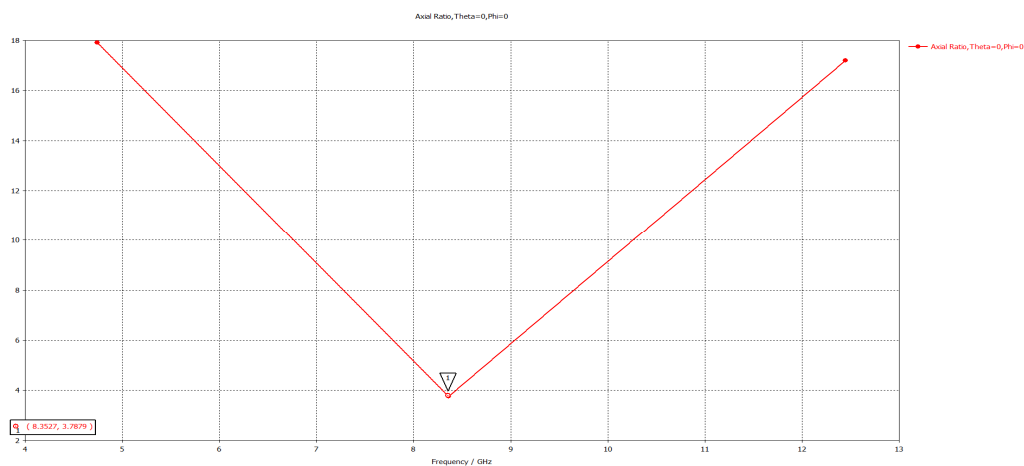
Příloha 4 Průběh parametru S11 pro jednoduchou flíčkovou anténu s DGS



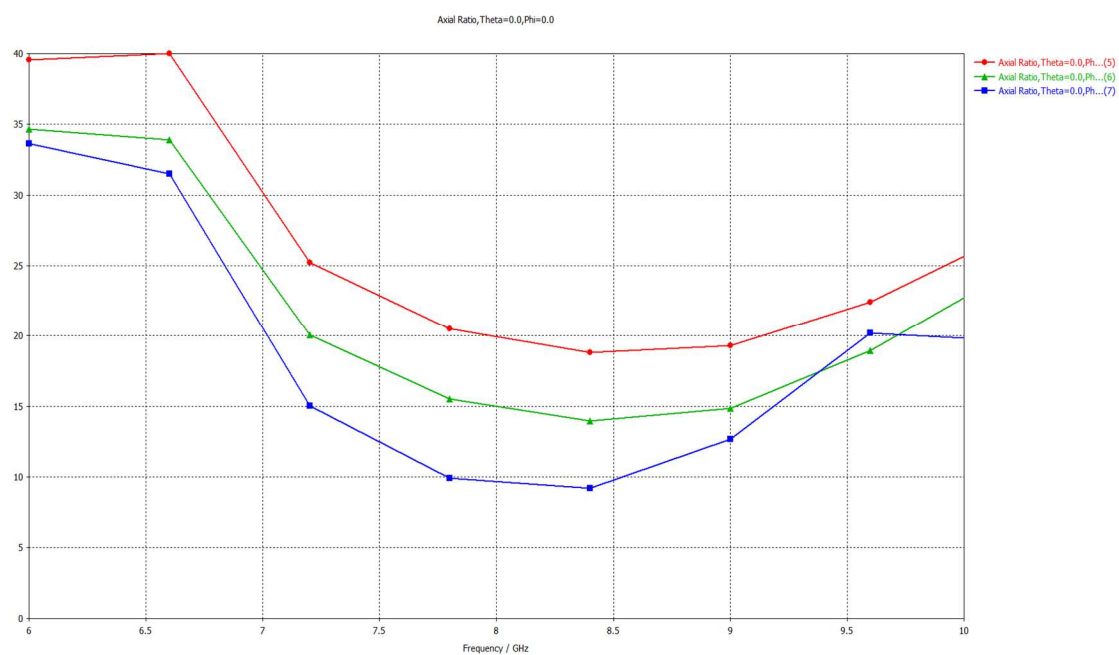
Příloha 5 Průběh PSV jednoduché flíčkové antény



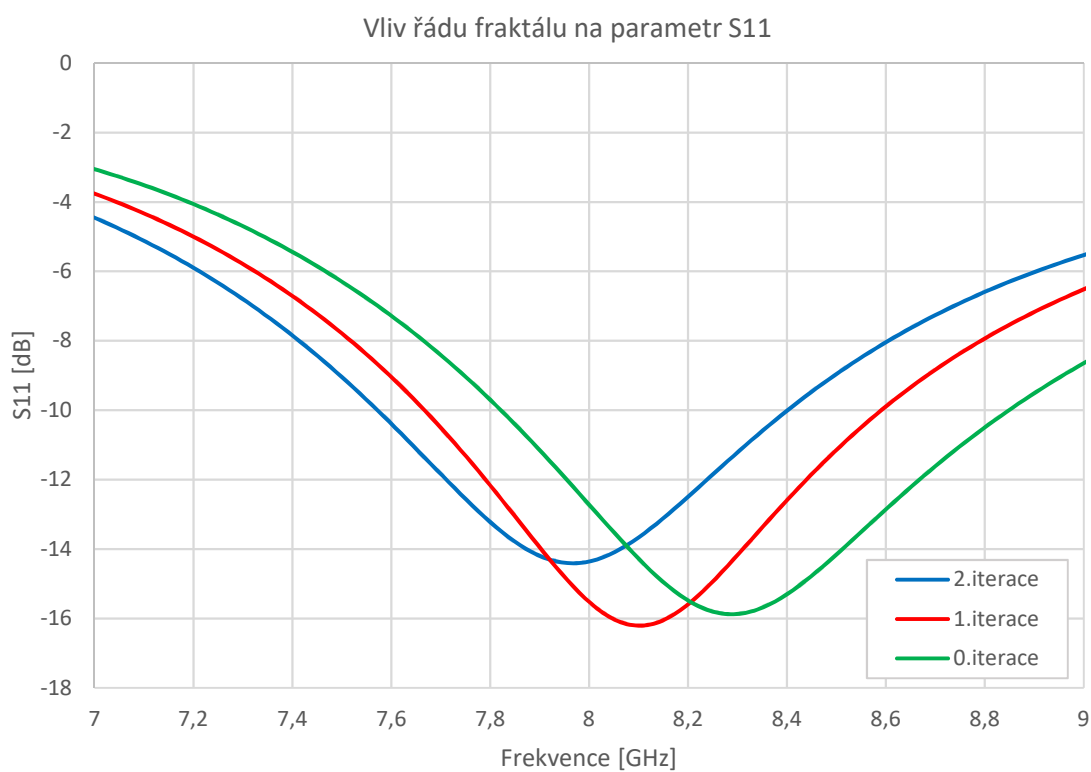
Příloha 6 Průběh PSV fraktálové antény



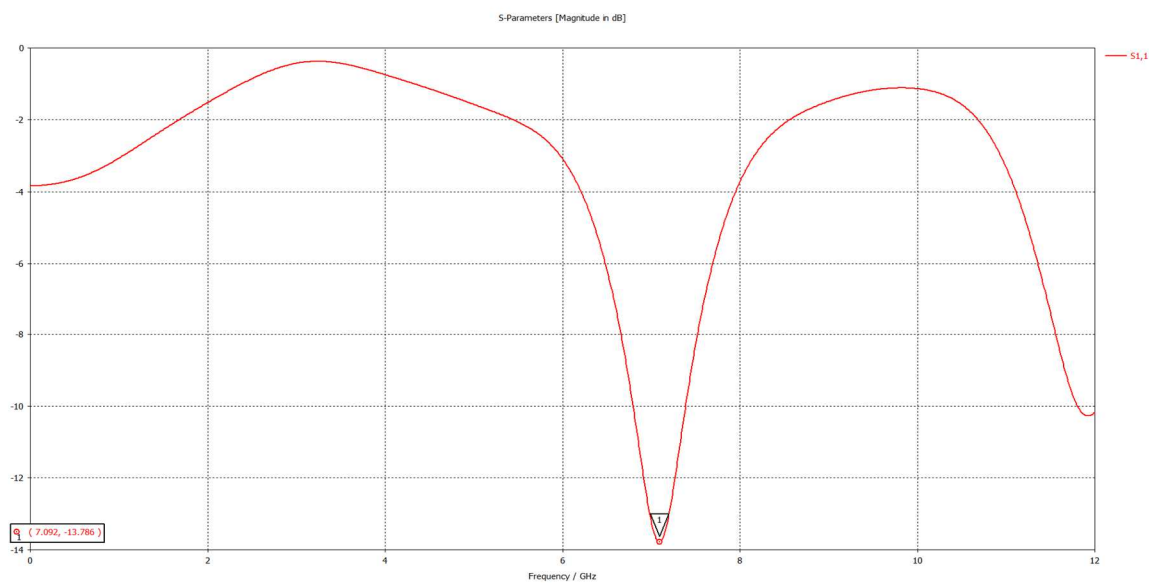
Příloha 7 Osový poměr pro Sierpinského anténu



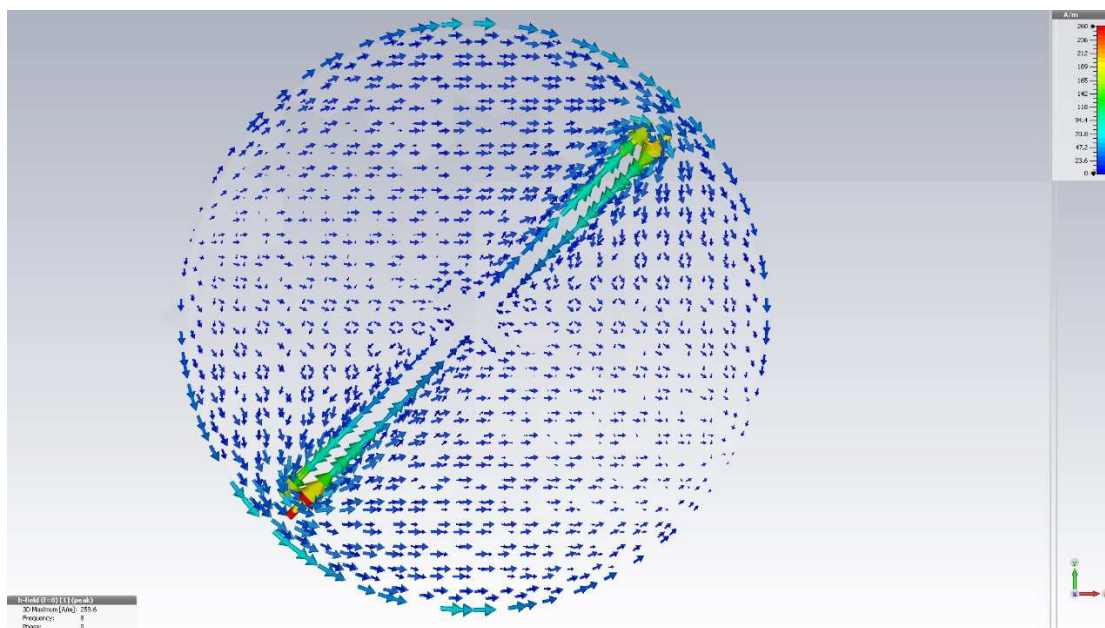
Příloha 8 Vliv délky slotu na osový poměr



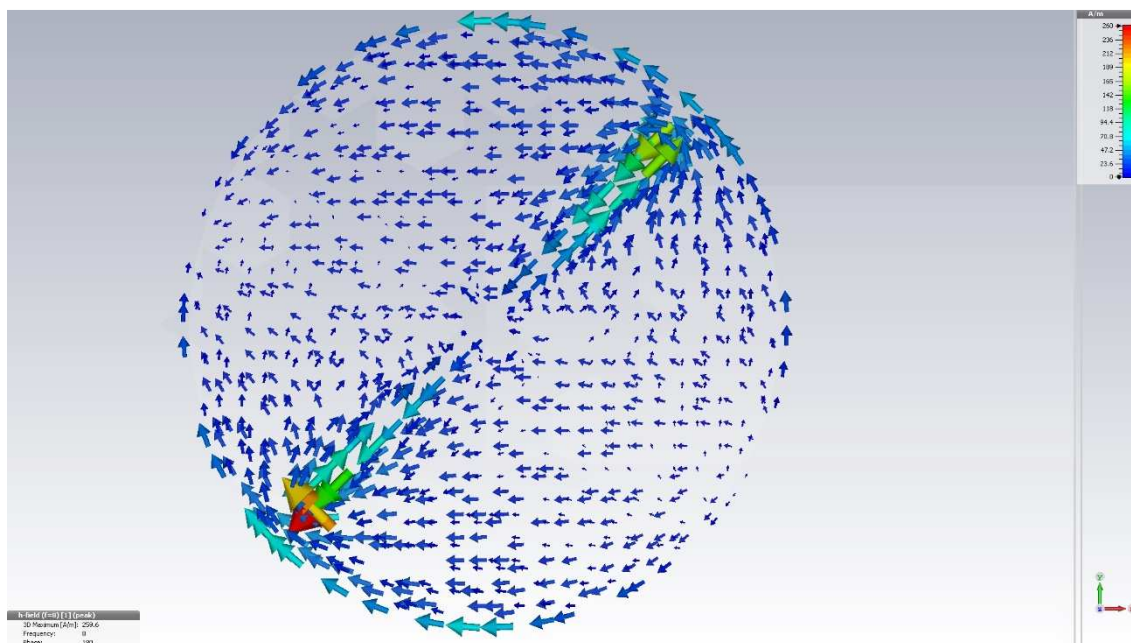
Příloha 9 Vliv použité iterace motivu na parametr S11



Příloha 10 Průběh parametru S11 Kochovy antény s původním rozměrem flíčku



Příloha 11 Rozložení proudu ve fázi $\omega t = 0^\circ$

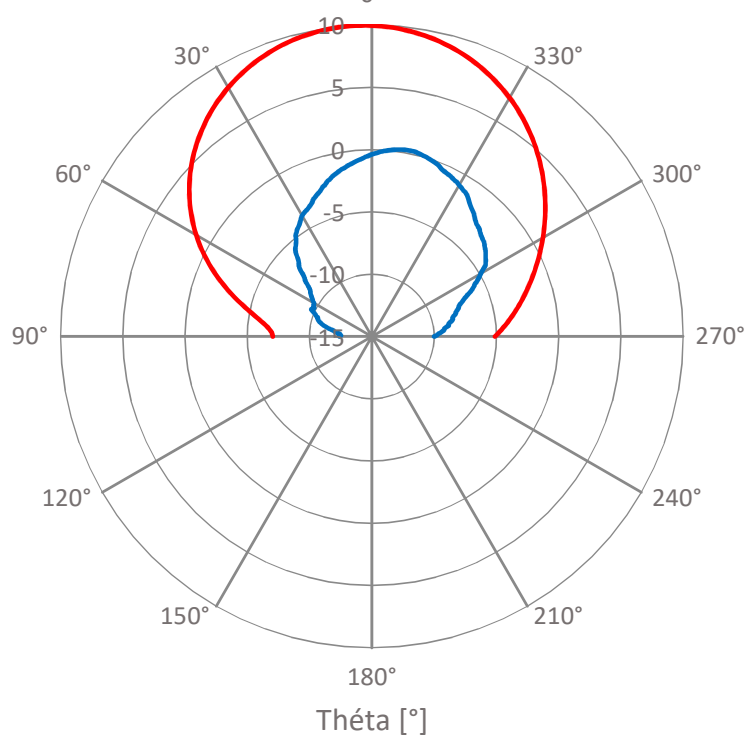


Příloha 12 Příloha 11 Rozložení proudu ve fázi $\omega t = 180^\circ$



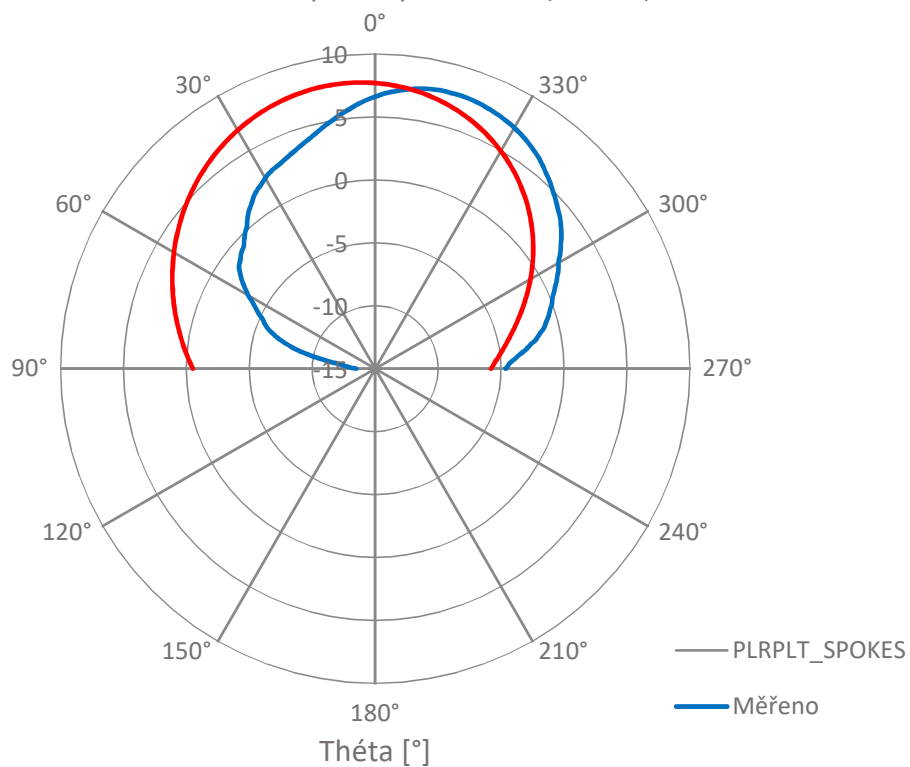
Příloha 13 Napájení navržené antény

Porovnání Kochovy antény v rovině E ($\Phi = 0^\circ$)



Příloha 14 Měřený a simulovaný zisk Kochovy antény v rovině E

Porovnání Kochovy antény v rovině H ($\Phi = 90^\circ$)



Příloha 15 Měřený a simulovaný zisk Kochovy antény v rovině H