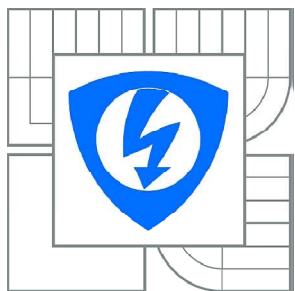


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ŠIROKOPÁSMOVÁ OBDELNÍKOVÁ FLÍČKOVÁ ANTÉNA

WIDEBAND RECTANGULAR PATCH ANTENNA

BAKALÁRSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

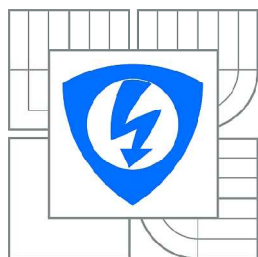
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš Teplý

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UCENÍ
TECHNICKÉ V BRNE

Fakulta elektrotechniky
komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Elektronika a sdělovací technika

Student: Tomáš Teplý
Rocník: 3

ID: 77997
Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Širokopásmová obdelníková flícková anténa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s různými způsoby napájení flíckových antén. Svou pozornost zaměřte hlavně na varianty napájení, které jsou schopny zvýšit šířku pásma flíckových antén. Po dohodě s vedoucím práce vybraný typ napájení modelujte v programu CST Microwave Studio. Zkoumejte vliv geometrického uspořádání na vstupní impedanci a vyzarování antény.

Ze získaných poznatků navrhnete obdelníkovou flíckovou anténu s maximální šířkou pásma na střední kmitočtu 2,5 GHz. Experimentálně ověřte obdržené výsledky.

DOPORUCENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, C., A. Antenna theory analysis and design, New York: John Wiley & Sons, 1997.

[2] MAK, C. L., LUK, K. M., LEE, K. F., CHOW, Y. L., Experimental study of microstrip patch antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, vol. 48, no. 5, p. 777 - 783.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 28.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Lácík, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbynek Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNENÍ:

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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh mikropáskové antény s maximální šířkou pásma. Nejprve jsou diskutovány standardní typy napájení těchto antén s hlavní pozorností na koaxiální napájení (napájení sondou) a L-sondu. Dále jsou vlastnosti těchto typů napájení zkoumány v programu CST Microwave Studio. Obdržené výsledky jsou využity pro návrh obdélníkové flíčkové antény s maximální šířkou pásma. Navržená anténa je modelována v programu CST Microwave Studio a pak realizována. Výsledkem této práce je mikropásková anténa, jejíž impedanční šířka pásma je 32,14%.

KLÍČOVÁSLOVA

Mikropásková, flíčková anténa, L-sonda

ABSTRACT

This thesis focuses on the design microstrip antennas with a maximum bandwidth. First discussed are the standard types of supply of these antennas with main attention to the coaxial power supply (power probe) and L-probe. Furthermore, the properties of these types of power examined in the program CST Microwave Studio. The results obtained are used for the design of rectangular Patch Antenna with a maximum bandwidth. The proposed antenna is modeled in CST Microwave Studio program and then implemented. The result of this work is a microstrip antenna, the impedance bandwidth is 32,14%.

KEYWORDS

Microstrip antenna, L-probe

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Širokopásmová obdélníková flíčková 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/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 semestrálního projektu Ing. Jaroslavu Láčíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

TEPLÝ, T. *Širokopásmová obdélníková flíčková anténa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

SEZNAM OBRÁZKŮ	6
1 ÚVOD	7
2 MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY	8
2.1 Princip mikropáskové antény.....	8
2.2 Napájení mikropáskových antén.....	9
2.3 Tvary flíčků.....	11
2.4 Zlepšení vlastností flíčkových antén.....	12
2.5 Výpočet rozměrů motivu.....	13
3 FLÍČKOVÁ ANTÉNA NAPÁJENÁ KOAXIÁLNÍM VEDENÍM	15
3.1 Analýza navržené flíčkové antény.....	16
4 ŠIROKOPÁSMOVÉ NAPÁJENÍ	21
4.1 Dosažené výsledky modelování koaxiálního napájení pomocí L-sondy.....	22
4.2 Porovnání výsledků.....	27
5 VLASTNÍ REALIZACE	29
5.1 Výsledky měření antény.....	31
6 ZÁVĚR	33
LITERATURA	34
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	35

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1:	Jednoduchá mikropásková anténa.....	8
Obr. 2.2:	Rozložení intenzity el. pole mezi motivem a zemnicí plochou.....	8
Obr. 2.3:	Napájení pomocí mikropáskového vedení.....	9
Obr. 2.4:	Mikropásková anténa s napájením pomocí koaxiální sondy.....	10
Obr. 2.5:	Systém napájení antény blízkého pásku.....	11
Obr. 2.6:	Možnosti tvarů vyzářovacího motivu.....	11
Obr. 2.7:	Závislost šířky pásma na šířce substrátu (převzato z [3]).....	12
Obr. 2.8:	Horizontální parazitický pár flíčků.....	13
Obr. 3.1:	Navržená anténa pro frekvenci 2,4 GHz průřez a pohled shora.....	16
Obr. 3.2:	Průřez namodelovanou anténou.....	16
Obr.3.3:	Budící impuls a odezva antény.....	17
Obr. 3.4:	Frekvenční průběh S _{1,1} parametru.....	17
Obr. 3.5:	Směrový diagram flíčkové antény v E rovině a H rovině	18
Obr. 3.6:	Vliv změny délky motivu.....	18
Obr. 3.7:	Vliv změny šířky flíčku.....	19
Obr. 3.8:	Vliv změny pozice napájecího vodiče.....	19
Obr. 3.9:	Vliv změny šířky substrátu.....	20
Obr. 4.1:	Napájení pomocí L-sondy: průřez a pohled shora.....	21
Obr. 4.2:	Schéma napájení koaxiální sondou a napájení koaxiální L-sondou.....	21
Obr. 4.3:	Průřez flíčkovou anténou napájenou pomocí L-sondy.....	23
Obr. 4.4:	Srovnání napájení pomocí koaxiální a L sondy.....	23
Obr. 4.5:	Průběh S _{1,1} parametru pro zvolenou anténu s napájením pomocí L-sondy.....	24
Obr. 4.6:	Moment průběhu povrchového proudu na flíčku při frekvenci 2,0 GHz.....	24
Obr. 4.7:	Moment průběhu povrchového proudu na flíčku při frekvenci 2,4 GHz.....	25
Obr. 4.8:	Smithův diagram mikropáskové antény napájené pomocí L-sondy.....	25
Obr. 4.9:	Vyzářovací charakter antény s L-sondou v E rovině a H rovině.....	26
Obr. 4.10:	Analýza vlivu přesahu L-sondy.....	26
Obr. 4.11:	Vliv přesahu napájení L-sondy k pozici motivu.....	27
Obr. 4.12:	Porovnání teoretické a dosažené šířky pásma.....	28
Obr. 4.13:	Porovnání vyzářovacího charakteru antén v E rovině a H rovině.....	28
Obr. 5.1:	Půdorys a bokorys vyrobené antény.....	29
Obr. 5.2:	Uchycení motivu k zemnicí desce.....	29
Obr. 5.3:	Realizovaná anténa s napájením pomocí L-sondy.....	30
Obr. 5.4:	Rohde & Schwarz ZVL6 Vector Network Analyzer.....	31
Obr. 5.5:	Změřené a simulované průběhy pro modul a fázi S _{1,1} parametru.....	31
Obr. 5.6:	Směrová charakteristika rovin E a H pro změřenou a simulovanou anténu.....	32

1 ÚVOD

Je to překvapivé, ale mikropáskové antény v blízkých letech oslaví již své 40. narozeniny. Od 70. let minulého století vznikaly první projekty, které zaznamenaly vyzářovací vlastnosti napájeného motivu v blízkosti zemnicí plochy. Samozřejmě za dobu jejich působení prošly velkým pokrokem a změnami, ve kterých je můžeme znát teď. 90. léta byla pro tento typ antény velmi důležitá, protože to byla doba, kdy začala revoluce mobilních telefonů i trend potřeby zmenšování a zvyšování nároků na jakékoliv mobilní zařízení. Samozřejmě tento trend se netýkal výhradně mobilních telefonů. Velké výhody těchto antén se časem projeví i v oblastech bezdrátového propojení, navigace, vesmírných projektů nebo v oblasti vojenské techniky. Jejich přednostmi oproti klasické dipólové anténě jsou totiž minimální rozměry, následná snazší integrace do přenosného zařízení, jednoduchost výroby apři použití vhodných materiálů i možnost kopírovat válcový tvar. Právě schopnost pružnosti je velká výhoda v oblastech letectví, armády a vesmírných projektů. Mikropáskovou anténu lze totiž připevnit na aerodynamické tělo prostředků, aniž by byla porušena jejich samotná aerodynamická vlastnost. Přesnější popis struktury flíčkové antény si detailněji ukážeme v kapitole 2, kde se i dozvíme opodstatnění výše zmíněných výhod. Aby ale nevznikl dojem, že mikropáskové antény dokážou snadno nahradit dipól, je třeba uvést i jejich velké a zároveň důležité nevýhody: velká směrovost a velice malá šířka pásma. Tyto antény totiž mohou v základním provedení pracovat jen s 1-2% jejich pracovní frekvence, což je v mnoha ohledech znatelný nedostatek. Vývoj sice dokázal tyto nevýhody různými metodami zmírnit, ale zatím se v tomto ohledu klasickým dipólům nevyrovnají (více detailů opět v kapitole 2). Jedna z možností, jak právě zmíněnou šířku pásma zlepšit, je i téma této práce a to hlavně v kapitole 3. a 4.

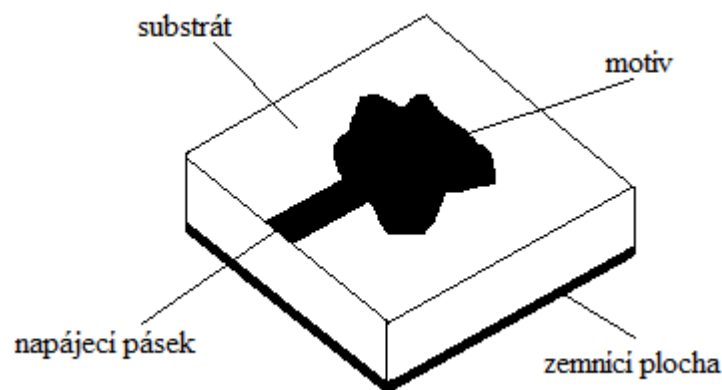
I když jsou tyto antény dnes už neodmyslitelnou součástí některých zařízení, stále existují zatvrzelí odpůrci, kteří poukazují na jejich hlavní nedostatky a stále tvrdohlavě vyzdvihují dipóly. Cílem této práce není čtenáři vsugerovat myšlenku suverenity mikropáskových antén, ale poukázat na jednu z metod, jak flíčkovým anténám zlepšit vlastnosti a tím pomoci při variabilitě použití. Opomíjet již zmíněné výhody antén by bylo zbytečné, protože je to odvětví, které s novými technologiemi nabírá stále více a více výhod nejen pro odborníky, ale ve výsledné podobě i pro širokou veřejnost.

2 MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY

Tyto antény se někdy nazývají flíčkové antény. Je to z důvodu tvaru vyzářovacího motivu, která připomíná flíček (z anglického výrazu „patch“). Jednoduchý příklad tohoto typu antény můžeme vidět na **obr.2.1**. V této kapitole si nejprve vysvětlíme její základní princip, pak si ukážeme základní typy napájení a v poslední části této kapitoly si přiblížíme několik nejpoužívanějších metod pro zlepšení vlastností.

2.1 Princip flíčkové antény

Nosnou částí této antény je dielektrický substrát, na kterém je z jedné strany vytvořen vodivý motiv antény (flíček) a z druhé strany je substrát kompletně pokoven (tato strana tvoří zemní desku antény). Pro ideální funkci by měla zemní plocha představovat nekonečně velkou rovinu, ale z praxe je známo, že při překročení určité velikosti je další vliv na flíček minimální (viz [4]), takže zemní dle **obr. 2.2** (viz [3]).



Obr. 2.1: Jednoduchá mikropásková anténa.

deska má konečnou velikost. Připojením zářiče ke zdroji dojde k vybuzení el. pole pod flíčkem



Obr. 2.2: Rozložení intenzity el. pole mezi motivem a zemní plochou.

Nejdůležitějším prvkem těchto antén jsou jejich hrany. Vlna šířící se podél napájecího mikropáskového vedení, která narazí na takovou hranu, přenesou svůj výkon do blízkého prostoru a tím vznikne záření. Pokud tedy přivedeme podél napájecího vedení vlnu, která se šíří podél vedení, tak se nic neděje. Avšak jak dorazí k motivu antény, kde se poprvé setká s nehomogenitou ve formě hrany antény, dojde k vyzáření energie do prostoru. Energie je dále vedena podél flíčku, jehož délka obvykle odpovídá polovině vlnové délky (tj. $\lambda_g/2$), až dorazí ke druhé hraně. Tam se vyzáří další část energie, vlna se otočí a putuje zpět směrem k první hraně. Pokud je délka flíčku $\lambda_g/2$, tak anténa je v rezonanci a vyzáruje ve směru kolmém k flíčku lineárně polarizovanou vlnu. Velice důležité pro správnou funkci

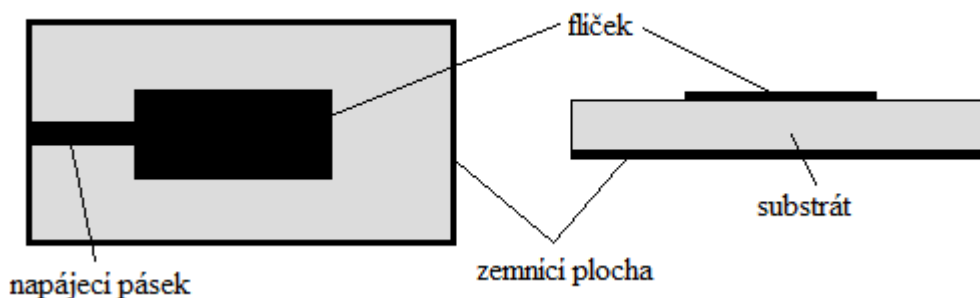
antény jsou její rozměry. Délka flíčku musí být striktně dodržena v $\lambda_g/2$ budící vlny. Při nedodržení rozměru délky antény není v rezonanci a je jí pak obtížné impedančně přizpůsobit.

Šířka flíčku ovlivňuje hlavně vstupní impedanci antény. Právě na šířce totiž závisí šíření vln podél motivu. Pokud bude vzniklé pole mít nutnost se „mačkat“ na malém prostoru, zmíněná impedance poroste. Impedanční přizpůsobení je velice důležitá vlastnost antény. Pokud impedance antény nebude stejná jako impedance zdroje, tak vznikne ve vedení odražená vlna a tím klesne celková účinnost antény.

2.2 Napájení mikropáskových antén

Nejčastější a nejpoužívanější jsou v tomto případě dva základní typy napájení těchto antén. Je to napájení mikropáskem a napájení koaxiální sondou. Oba typy mají jak své výhody, tak nevýhody. Samozřejmě typů napájení je více, ale jsou to prakticky už jen různým způsobem upravené nebo zkombinované dvě hlavní metody.

Napájení pomocí **mikropáskového vedení** je znázorněno na **obr.2.3**. Je topásek vodivé vrstvy, který je na substrátu propojený s vyzářovacím motivem. Hned nás tedy může napadnout hlavní výhoda této metody napájení - velice jednoduchá výroba. Toto vedení se může realizovat zároveň s tvorbou flíčku (například při leptání na substrát) a tím odpadne obtížné propojení vedení s motivem. Avšak tento způsob napájení není odolný vůči rušení od okolních zdrojů. Další nevýhodou je i narušení principu postupu vlny po odrazu právě v místě připojení na flíček samotný. Přivedená energie na anténu se v místě spoje nepřenese do vyzářování, ale zamíří zpět proti směru napájení a tím se sníží úroveň vyzářování antény. Ovšem výhody jednoduchosti výroby jsou značné. Tuto anténu lze vyrábět efektivně a rychle a tento fakt se také výrazně projeví v položce, která zajímá jak vedení výrobního procesu, tak finálního zákazníka – výrobní / prodejní cena.

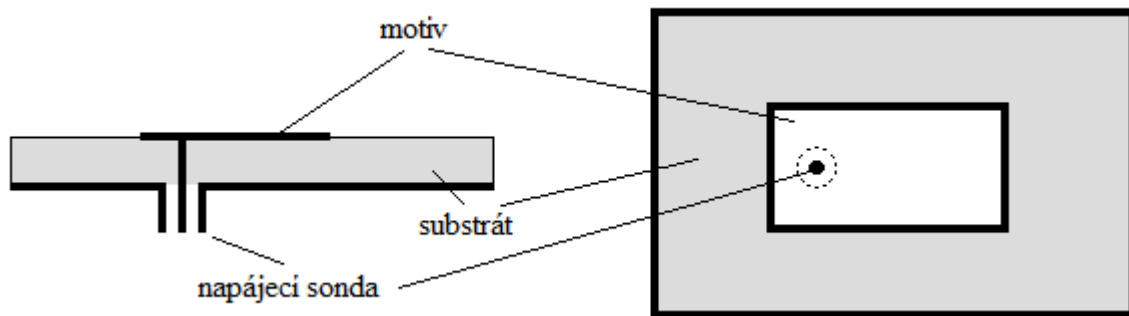


Obr. 2.3: Napájení pomocí mikropáskového vedení.

Z takovýchto antén s mikropáskovou metodou napájení se dají jednoduše vytvořit anténní soustavy, které dokážou velmi zlepšit jejich vlastnosti (viz kapitola 2.4). Na závěr určitě ještě stojí za zmínku, že takto napájenou anténu lze lehce integrovat do tenkého těla nejen mobilních telefonů.

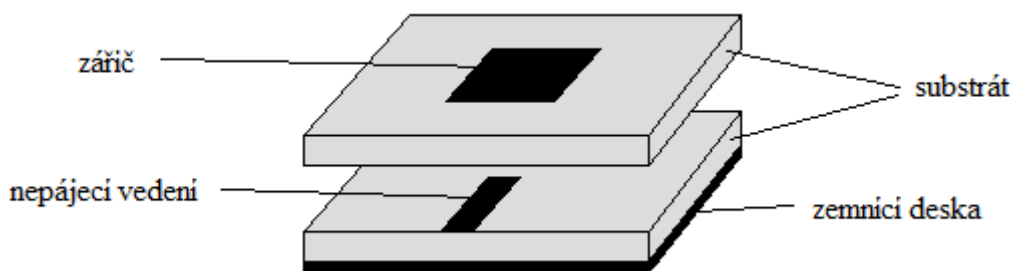
Další nejčastější typ napájení je pomocí **koaxiální sondy**. Jak může takováto anténa vypadat nám přiblíží **obr.2.4**. Princip funkce je podobný jako při napájení mikropáskovým vedením, jen je zde použito koaxiální vedení pro přívod budící vlny. Stínící vrstva koaxiálního napáječe je zde připojena na zemní plochu antény a střední vodič bezkontaktně veden skrze otvor v „zemi“ až na vyzářovací motiv. Pokud se tedy středním vodičem dostane na flíček vlna, pokračuje dál směrem k hraně, kde

dojde k vyzáření. Postupná vlna se odrazí a putuje zpět podél motivu k protější hraně. Výhodou tohoto napájení je, že pokud umístíme napájení do středu motivu, vynutíme tak motiv zářit na všech čtyřech hranách a vznikne nám tím křížově polarizovaná vlna. Tento efekt lze vytvořit i pro mikropáskové vedení, ale je potřeba vést na motiv dvě napájecí vedení. U koaxiálního napájení se využívá také toho, že jedna hrana je navržena nepatrně kratší a tím se nám prakticky dvě velmi blízké pracovní frekvence promítnou do jedné, která je o poznání širší. Pokud tedy umístíme napájecí sondu někam na diagonální směr motivu, zajistíme možnost duální vyzařovací pracovní frekvence. Sice tím vzniknou dvě pracovní frekvence, ale budou k sobě kolmé jejich polarizace a může být vybudena kruhově polarizovaná vlna. Tento typ napájení má ještě jednu výhodu. Předpokládáme totiž ideální koaxiální vedení, které je ve své podstatě demonstrace úplného oddělení vln, šířících se podél středního vodiče, od nepříznivých vnějších vlivů (nehomogenita vedení, silné rušení, atd.). Příliš dlouhé mikropáskové vedení je totiž proti těmto vlivům nechráněno a tak se může stát, že se na vedení indukuje napětí vlivem působení cizího magnetického pole (jak vlivem působení potenciálu el. pole přímo v těle přístroje, tak vysílání komerčních sítí). Skutečnost nenáchylnosti koaxiálního vedení na parazitní vlivy je natolik významná, že se vyplatí zkombinovat oba dva tyto představené typy a to tak, že koaxiální napájení vede k substrátu, kde je střední vodič připojen k mikropáskovému vedení a stínící vrstva připojená na zemnicí plochu.



Obr. 2.4: Mikropásková anténa s napájením pomocí koaxiální sondy.

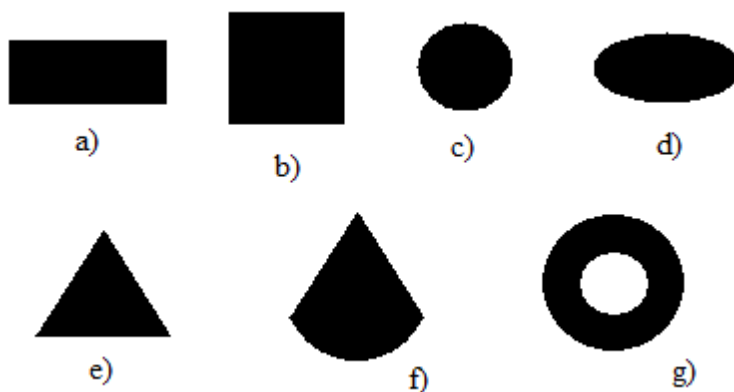
Napájení pomocí mikropáskového vedení a pomocí koaxiální sondy jsou dvě nejstarší a nejjednodušší formy napájení těchto antén. Samozřejmě existují i další metody, jako například dvojice blízkých pásků. Příklad realizace si můžeme prohlédnout na **obr.2.5**. Důležité a zároveň zajímavé je, že anténa nepotřebuje v místě napájení být přímo propojená s vyzařovacím motivem. Pro správnou funkci je možné vsunout mezi napájecí vedení a flíček tenkou vrstvou substrátu a tím je také od sebe oddělit. Na spodní části antény je připojena zemnicí plocha, nad ní vrstva substrátu, která od ní odděluje mikropáskové vedení a nad vedením je další vrstva substrátu, která odděluje od vedení zářící motiv. Klíčová myšlenka tohoto zapojení je fakt, že tímto dostane anténa vyšší indukci a daleko větší kapacitní charakter, než vykazovala v předešlých typech napájení. Tato kapacita ji pomůže rozšířit šířku pásma antény a tím zlepšit jednu z její záporné vlastnosti. Toto zapojení také nabízí výhodu, která byla už vysvětlena v části zabývající se napájením koaxiální sondou a to je skutečnost, že zde mohou jednoduše vzniknout dvě pracovní frekvence. Také se tu totiž dá volit místo případného „propojení“ s vyzařovacím motivem a tím splnit podmínku velikostí flíčku $\lambda_g/2$.



Obr. 2.5: Systém napájení antény blízkého pásku.

2.3 Tvary flíčků

Aby z textu a použitých obrázků nevznikla představa, že tato anténa funguje jen při striktně daných geometrických tvarech, je třeba uvést i ostatní možné typy tvarů flíčků, které fungují téměř na stejné úrovni jako nejčastější čtyřhranný (viz [4]). Nejčastější tvary můžeme sledovat na **obr. 2.6**.

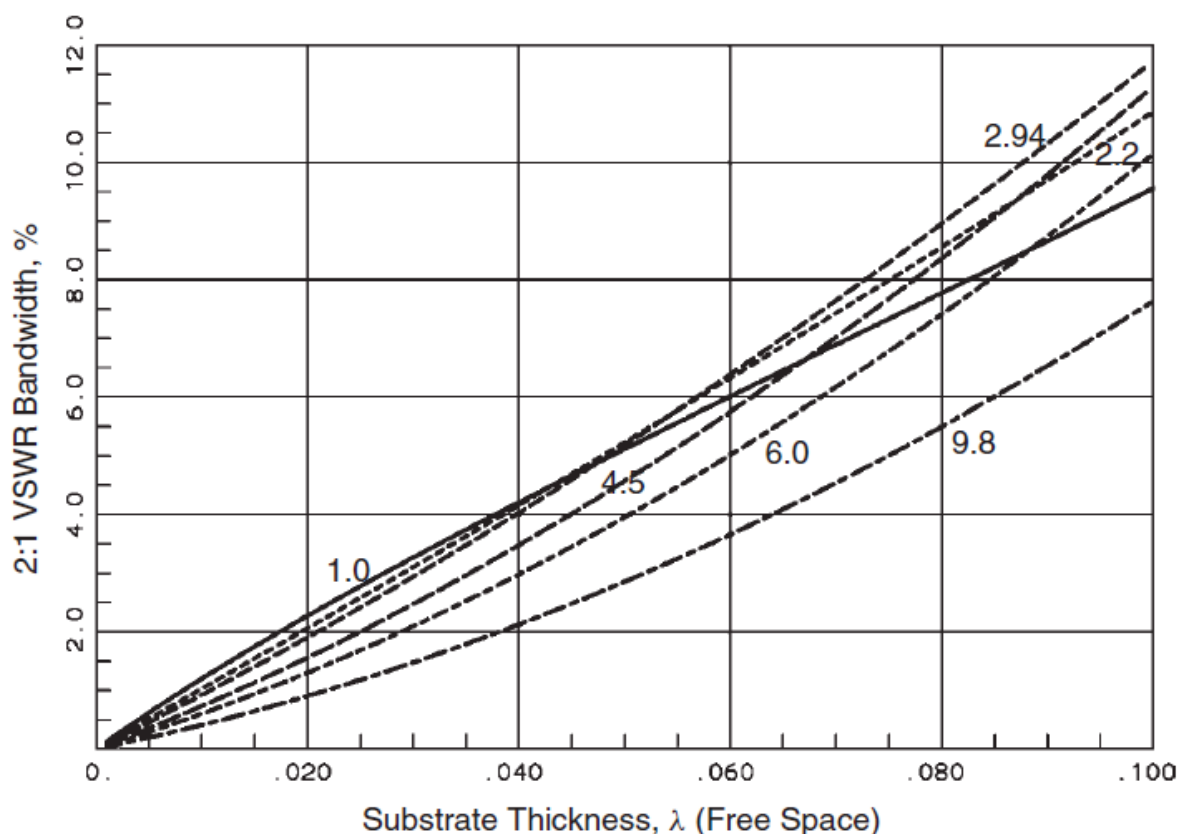


Obr. 2.6: Možnosti tvarů vyzařovacího motivu.

Námi už známé tvary vidíme v případě **obr.2.6 a)** a **b)**. Dosahují nejlepších dosažených vlastností, které se nám při tvorbě nabízejí. První typ je vhodný pro vytvoření dvou pracovních frekvencí o dvou různých polarizacích, druhý je využíván také pro tvorbu křížové polarizace. Z **obr.2.6 c)** a **d)** je vidět druhý nejčastější způsob a to kruhový, resp. oválný tvar motivu. Tento typ zářiče má nepatrně menší šířku pásma a zisk než u čtyřhranných. Opět zde jde o princip dodržení délky flíčku $\lambda_g/2$. Možnosti použití v ohledu více pracovních frekvencí a typu polarizace jsou velice podobné jako u čtyřhranných představitelů. Větší eliptické zakřivení reguluje i vstupní impedanci zvolené rezonanční frekvence. Třetí geometrickou možností je trojúhelníkovitý tvar, který zobrazuje **obr.2.6 e)** a **f)**. Tento typ může být daleko menší než jejich ekvivalentní čtyřhranné a kruhové náhrady. Ovšem znatelné zmenšení nedojde jen v oblasti rozměrů, bohužel se projeví i na šířce pásma a zisku. Trojúhelníkovitým motivům určuje rezonanční frekvenci úhel rohů. Tento typ flíčků je také vhodný pro tvorbu křížové polarizace. Také lze docílit při nedodržení stejných úhlů dvojitě pracovní frekvence, ale také dvojí různé polarizace, ovšem šířka pásma je vždy velice úzká. **obr.2.6 g)** je příklad prstencového motivu. Tyto motivy jsou ještě menší než trojúhelníkové, ale jejich buzení není jednoduché. Pro tyto typy motivů je běžné, že jejich impedance není 50Ω , ale pohybuje se v rozsahu $150 - 250\Omega$. Tyto motivy také mají ještě užší šířku pásma než tvar trojúhelníkovitý.

2.4 Zlepšení vlastností flíčkových antén

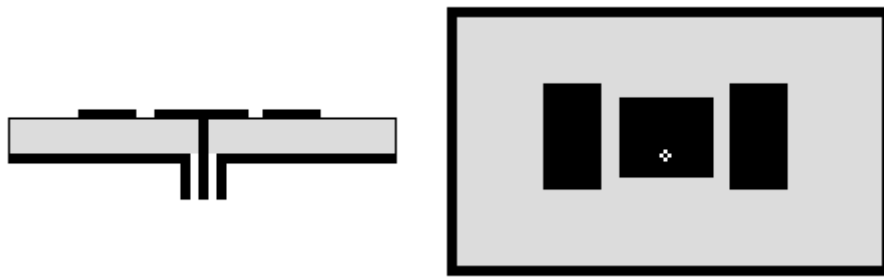
V této kapitole si přiblížíme několik základních způsobů, jak lze zlepšit vlastnosti mikropáskových antén. Jak jsme již zmiňovali výše, tyto antény se vyznačují velice úzkou šířkou pásma. Mnoho metod se snaží tuto největší nevýhodu alespoň částečně eliminovat, avšak ne všechny způsoby vylepšení jsou ideální. Právě ideálním případem je, když dojde k zvětšení šířky pracovní frekvence a nedojde k zhoršení ostatních parametrů, ale ne vždy je toto možné. Pro většinu případů je zlepšení nějaké vlastnosti na úkor zhoršení jiných. Zde si projdeme základní postupy.



Obr. 2.7: Závislost šířky pásma na šířce substrátu (převzato z [3]).

První způsob je **změnit permitivitu substrátu**, který je situován mezi zemnicí plochu a motiv. Na **obr. 2.7** vliv takovéto změny můžeme pozorovat. Pokud si zvolíme konstantní šířku substrátu a postupně budeme přecházet od velmi nízké permitivity vakua, která má hodnotu 1.0, směrem do vyšších hodnot, bude šířka pásma klesat. Pokud tedy za substrát budeme považovat vakuum, šířka pásma bude pro tuto možnost nejlepší.

Další možnost, která je taktéž znázorněna na **obr. 2.7**, je pozvolné oddalování motivu od zemnicí plochy a tím **zvyšování výšky substrátu**. Z obrázku je zřejmé, že tato metoda je schopná až ztrojnásobit šířku pásma mikropáskové antény, ale důležité je připomenout, že zvyšováním šířky substrátu také rapidně klesá zisk. Na **obr. 2.8** můžeme vidět další z metod zlepšování vlastností flíčkových antén. Přidáním **horizontálního páru parazitních flíčků** lze docílit zvětšení šířky pásma až na 20%. Jak lze vidět, flíčky se umístí po stranách hlavního motivu a nejsou samostatně napájené. Metoda vychází z principu, že pokud rezonanční frekvence parazitních motivů je blízká rezonanční frekvenci motivu hlavního, dojde k rozšíření pracovní šířky pásma. Je tedy nutné, aby parazitní motivy měly nepatrně větší délku a šířku. Důležité je i dodržení mezery mezi flíčky.



Obr. 2.8: Horizontální parazitický pár flíčků.

2.5 Výpočet rozměrů antény

Pro náš příklad se pokusíme navrhnout anténu, která bude pracovat na frekvenci 2.4 GHz. Zvolíme čtvercový motiv a jako substrát budeme uvažovat vakuum, které lze považovat jako prostředí velmi blízké vzduchu. Permittivita tedy bude rovna 1. Pro námi požadované funkce antény je potřeba dodržet všechny rozměry, které získáme výpočtem převzatým z [3]. Vzorec (2-5-1) představuje

$$W = \frac{c}{2 \times f \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-5-1)$$

výpočet šířky flíčku W , který odpovídá polovině délky vlny. ϵ_r zde představuje permitivitu substrátu, f požadovanou rezonanční frekvenci a konstanta c je rychlost světla. Pro náš případ můžeme

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left(1 + \frac{10 \times H}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2-5-2)$$

uvažovat, že okolní prostředí antény bude shodné s prostředím substrátu, proto lze dosadit do vzorce (2-5-1) pouze relativní permitivitu. Pokud by materiál substrátu nebyl shodný s prostředím (což je obvyklý případ pro tenké mikropáskové antény), je nutné dopočítat změnu postupu vlny při průchodu odlišného prostředí substrátu od okolního vzorcem (2-5-2). Výsledek efektivní permitivity pak lze dosadit na místo permitivity relativní při dalších výpočtech. Pro výpočet šířky motivu je nejprve

$$\frac{\Delta}{H} = 0,412 \times \frac{\epsilon_{eff} + 0,300}{\epsilon_{eff} - 0,258} \times \frac{\frac{W}{H} + 0,262}{\frac{W}{H} - 0,813} \quad (2-5-3)$$

potřeba určit možné efektivní zkrácení hran Δ . Jedna z možností pro takovýto výpočet je ukázána na vzorci (2-5-3). H zde představuje výšku substrátu. Δ poté dosadíme do výsledného výpočtu délky

$$L = \frac{c}{2 \times f \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2 \times \Delta \quad (2-5-4)$$

motivů podle vzorce (2-5-4). Další potřebný výpočet je určení vodivosti antény, kterou vypočítáme

$$G = \frac{\pi \times W}{\mu \times \lambda_0} \times \left[1 - \frac{(k \times H)^2}{24}\right] \quad (2-5-5)$$

$$R = \frac{1}{2 \times G} \quad (2-5-6)$$

podle vzorce (2-5-5). λ_0 zde představuje délku vlny ve vakuu. Vypočítanou vodivost poté dosadíme do vzorce (2-5-6) pro výpočet odporu antény. Z důvodu výběru napájení antény koaxiální sondou je nutné vypočítat pozici sondy pro impedanční přizpůsobení. Způsob výpočtu je navržený vzorcem (2-5-7). R_i zde představuje požadovanou přizpůsobenou impedanci, R_e celkovou impedanci antény.

$$x = \frac{L}{\pi} \times \sin^{-1} \sqrt{\frac{R_i}{R_e}} \quad (2-5-7)$$

Uvedeny tedy jsou všechny důležité části návrhu a lze přistoupit k vlastnímu výpočtu požadované antény.

3

FLÍČKOVÁ ANTÉNA NAPÁJENÁ KOAXIÁLNÍM VEDENÍM

Jak je uvedeno výše, zvolili jsme možnost čtvercového vyzařovacího motivu antény. Požadovanou rezonanční frekvenci zvolíme 2,4 GHz a jako substrát budeme uvažovat vzduch, tedy $\epsilon_r = 1,00054$. Protože permitivita vzduchu je velmi blízká permitivitě vakua, budeme při výpočtu pro jednoduchost uvažovat pouze hodnotu 1. Podle vzorce (2-5-1) nejprve určíme šířku motivu:

$$W = \frac{299\,792\,458}{2 \times 2,4 \times 10^9 \times \sqrt{1}} = 62,44 .$$

Poté je třeba vypočítat efektivní permitivitu prostředí mezi motivem a zemí, kterou získáme dosazením do vzorce (2-5-2):

$$\epsilon_{eff} = \frac{1+1}{2} + \frac{1-1}{2} \times \left(1 + \frac{10 \times 4}{62,44}\right)^{\frac{1}{2}} = 1 .$$

Z výpočtu je zřejmé, že je pro vakuum zbytečný. Vzduch se svojí permitivitou od vakua příliš neliší, proto by byl výsledek téměř identický. Důležitost tohoto výpočtu ale vznikne při použití substrátu s vyšší permitivitou. Další částí návrhu je výpočet efektivního zkrácení délky flíčky podle vzorce (2-5-3):

$$\frac{\Delta}{H} = 0,412 \times \frac{1+0,300}{1-0,258} \times \frac{\frac{62,44}{4} + 0,262}{\frac{62,44}{4} + 0,813} \Rightarrow \Delta = 2,79 \text{ mm} .$$

Nyní už lze vypočítat podle vzorce (2-5-4) zkrácenou délku motivu, která nám bude určovat rezonanční kmitočet:

$$L = \frac{299\,792\,458}{2 \times 2,4 \times 10^9 \times \sqrt{1}} - 2 \times 2,79 = 56,86 \text{ mm} .$$

Další částí je výpočet vodivosti dle vzorce (2-5-5):

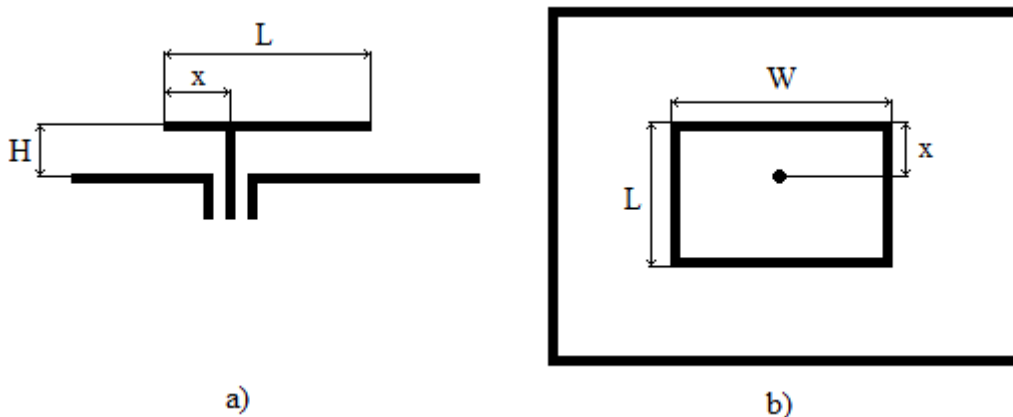
$$G = \frac{62,44}{120 \times 100} \times \left\{1 - \frac{\left(\frac{2\pi \times 4}{100}\right)^2}{24}\right\} = 5,19 \text{ mS} .$$

Z vodivosti určíme odpor takto navrhované antény ze vzorce (2-5-6):

$$R = \frac{1}{2 \times 5,19 \times 10^{-3}} = 96,35 \Omega .$$

A z důvodu nejčastěji používaného zdroje s impedancí 50 Ω bude potřeba anténu impedančně přizpůsobit na stejnou hodnotu. Proto výpočtem ze vzorce (2-5-7) určíme pozici sondy, kterou umístíme na osu šířky motivu:

$$x = \frac{56,86}{\pi} \times \sin^{-1} \sqrt{\frac{50}{96,35}} = 14,56 \text{ mm} .$$



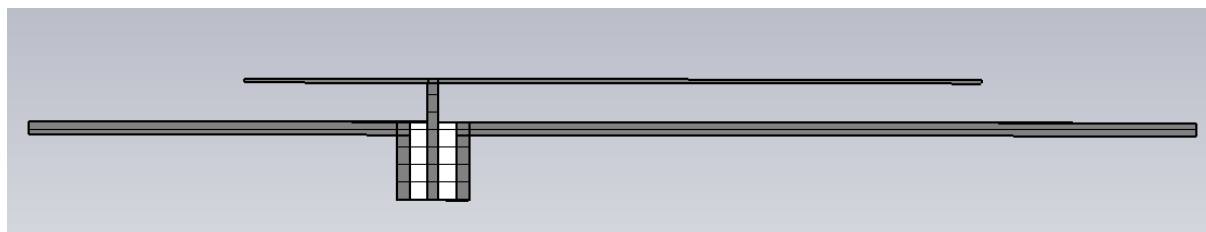
Obr. 3.1: Navržená anténa pro frekvenci 2,4 GHz a) průřez b) pohled shora.

Průřez a pohled shora této právě navržené antény můžeme vidět na **obr. 3.1**. Rozměry budou tedy:

$W = 62,44 \text{ mm}$ ($0,5 \lambda_g$), $L = 56,86 \text{ mm}$ ($0,45\lambda_g$), $H = 4 \text{ mm}$ ($0,03\lambda_g$), $x = 14,56 \text{ mm}$ a zemnicí plochu zvolíme $80 \times 80 \text{ mm}$ ($0,64 \times 0,64\lambda_g$).

3.1 Analýza navržené flíčkové antény

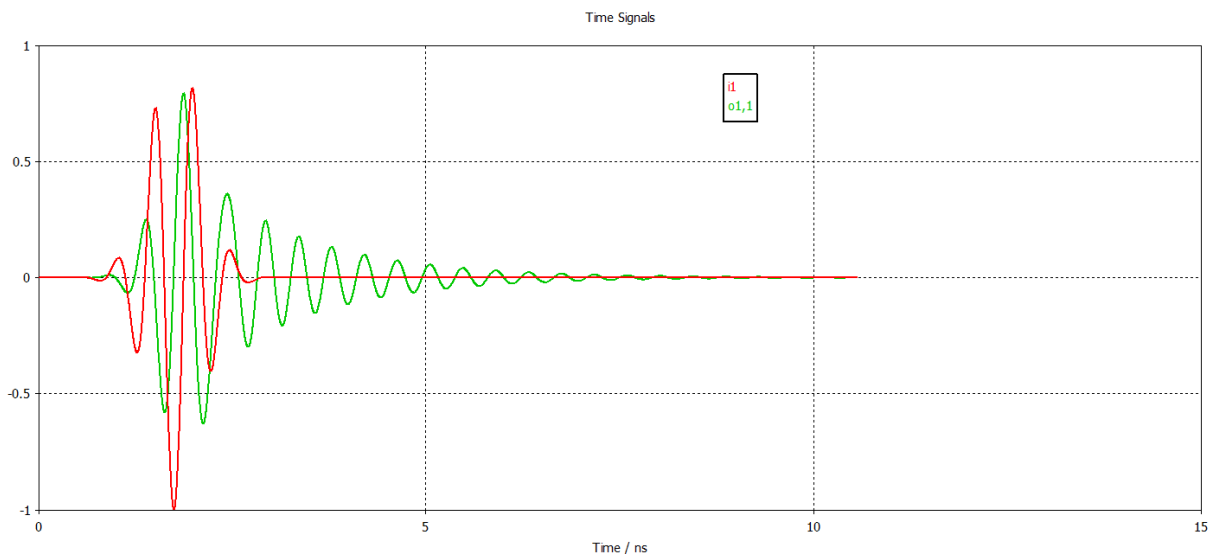
Na **obr. 3.2** je zobrazen průřez namodelované antény v programu CST Microwave Studio. Vodivý materiál, ze kterého je motiv, zemnicí deska, střední vodič a ochranná vrstva koaxiálního napájení, je uvažován jako ideální vodič. Výplň koaxiálního vedení je tvořena PTFE (Teflon), který má permitivitu 2,08. Motiv je vysoký 0,3 mm, zemnicí deska 1mm. Napájecí sonda má průměr 0,8 mm, výplň koaxiálního vedení je široký 1,4 mm a odrušovací vrstva vedení je široká 1 mm.



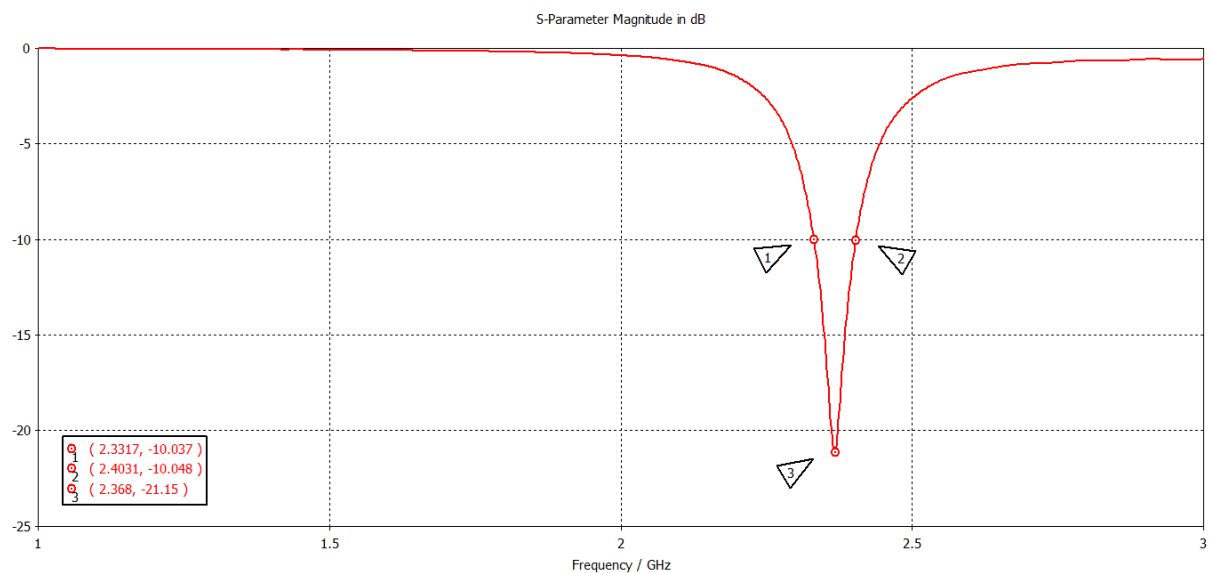
Obr. 3.2: Průřez namodelovanou anténou.

Na **obr. 3.3** můžeme sledovat časové průběhy reakce antény na napájení. Červená křivka zobrazuje budicí impuls, zelená poté odezvu antény. Na **obr. 3.4** je zobrazen činitel odrazu antény $S_{1,1}$. Z obrázku je zřejmé, že navržená anténa nefunguje optimálně. Činitel odrazu dosahuje nejvyšších hodnot kolem frekvence 2,37 GHz (na obrázku značka č. 3). Největším důvodem rozdílu numerické metody od analýzy programem CST je, že výpočet proběhl pro nekonečně velkou zemnicí desku. V našem případě je zemnicí rovina nahrazená konečnou plochou, která dokáže znatelně ovlivnit vlastnosti antény. Dalším vlivem je i to, že návrh proběhl pro reálné prostředí, ve kterém anténu obklopuje vzduch. Simulace proběhla pro ideální prostředí ve vakuu. V neposlední řadě jedležitě zmínit vliv přepočítané sítě, kterou si program vytvoří pro možnost analýzy. V našem případě bylo z časových a výpočetně náročných důvodů zvoleno detailní rozdělení, což se opět dokáže podílet na vzniklé nepřesnosti. Ovšem protože rozdíl nabývá hodnoty pouhých 1,25%, lze jej z uvedených důvodů vzniku nepřesností zanedbat. Ba právě naopak je tento výpočet dobrou

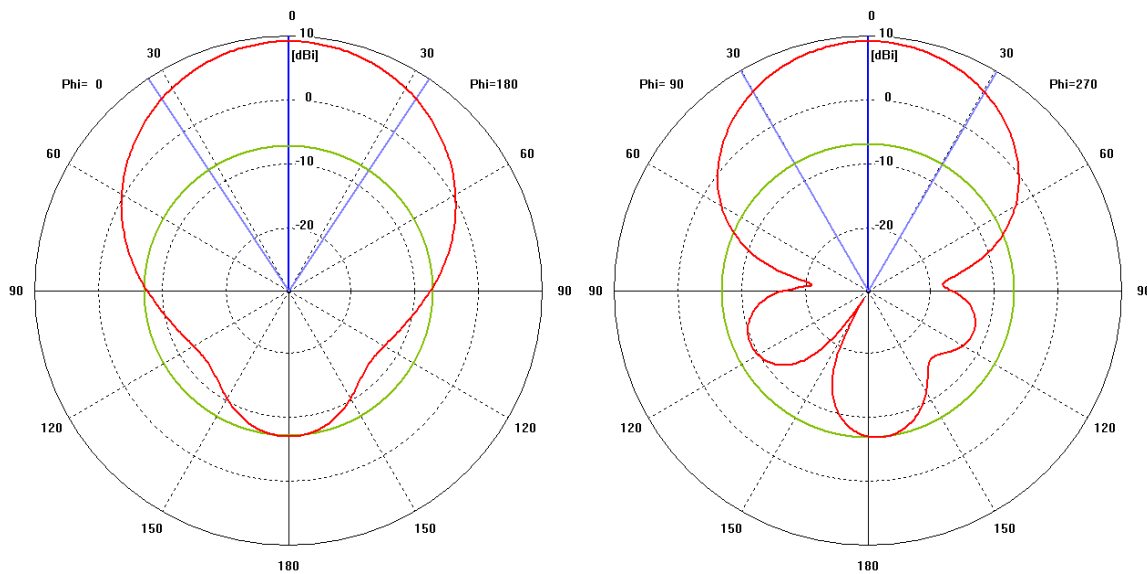
demonstrací toho, že tyto numerické metody lze účinně používat při návrhu antény se stejným charakterem, jaký je v našem případě. Důležité na tomto obrázku pro pozdější porovnání je i rozmezí hodnot značek č. 1 a 2. Tyto body nám určují šířku pásma. Jako pracovní frekvenci antény můžeme považovat hodnoty menší nebo rovné -10 dB činitele odrazu, které jsou ekvivalentní hodnotám VSWR větším nebo rovným 2. Zde je tedy šířka pásma o něco větší než 70 MHz, která je v procentuálním přepočtu rovna 3%. Tím jsme tedy ověřili tvrzení, že flíčkové antény mají šířku pásma 1-4%. Další obrázek nám potvrdí další tvrzení, že flíčkové antény jsou velmi směrové. Příklad směrového diagramu je zobrazen na **obr. 3.5**. Zde si můžeme všimnout dominantního hlavního laloku s částečným vyzářováním do postranního prostoru. Velikost postranního vyzářování je způsobena nedostatečně velkým rozměrem zemnicí desky. V rovině H je ještě zřejmý patrný vliv napájení koaxiální sondou, který způsobil parazitní vyzářování pod úhlem 120°.



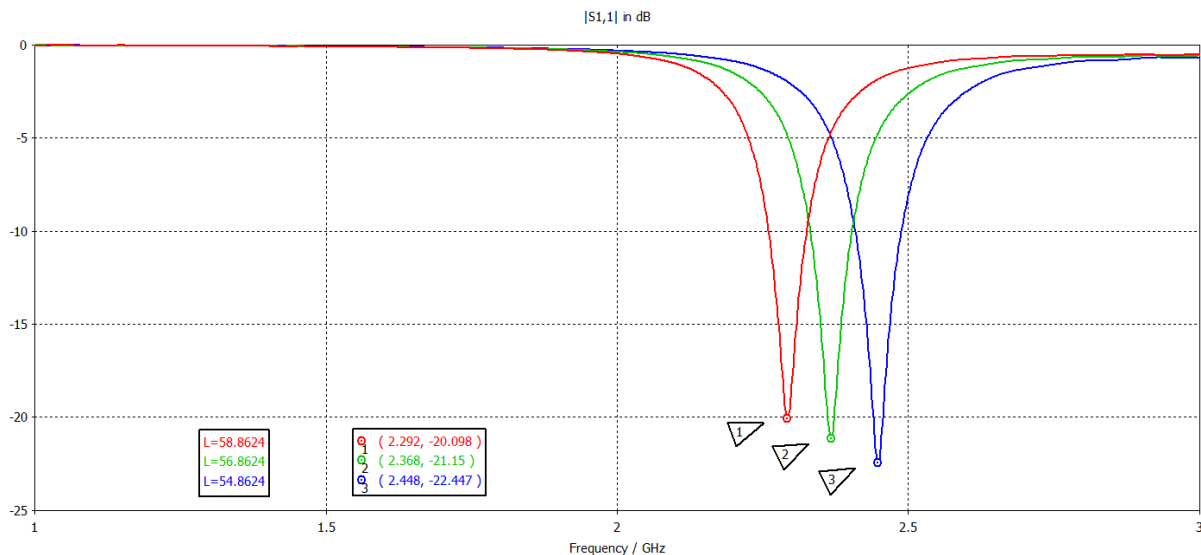
Obr.3.3: Budící impuls a odezva antény.



Obr. 3.4: Frekvenční průběh S_{1,1} parametru.



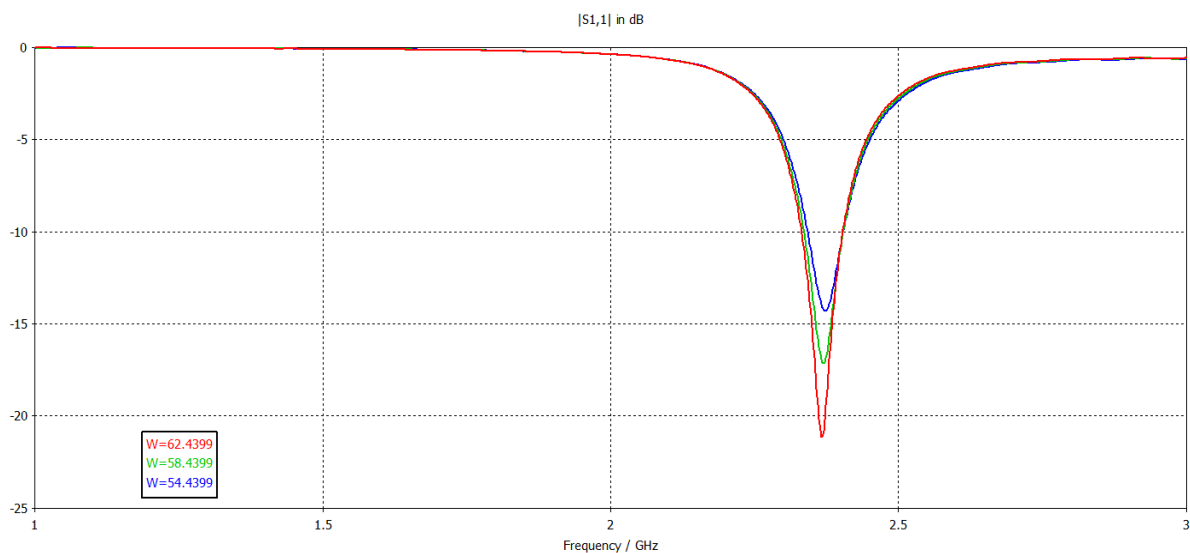
Obr. 3.5: Směrový diagram flíčkové antény v E rovině (vlevo) a H rovině (vpravo).



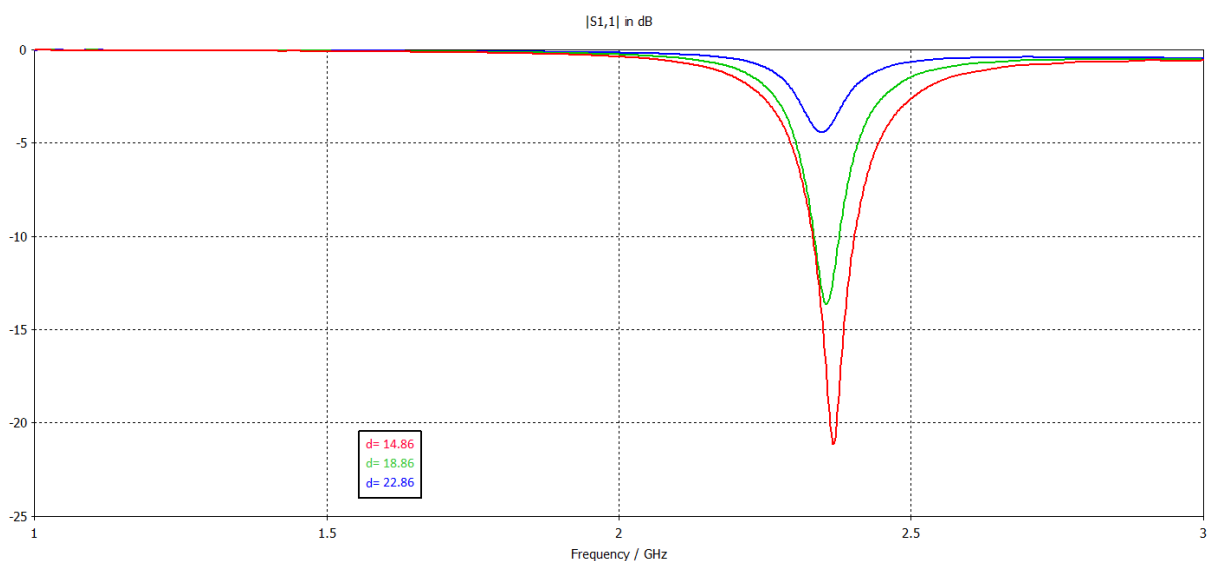
Obr. 3.6: Vliv změny délky motivu.

Na namodelované anténě si ukážeme vliv různých změn parametrů a tím si ověříme správnost některých tvrzení uvedených výše. Jako první budeme měnit délku flíčku L , která by měla určovat rezonanční kmitočet antény. Jako výchozí hodnotu použijeme vypočítaných $56,86$ mm a tu poté změníme o 2 mm směrem nahoru i dolů (tím dostaneme hodnoty $54,86$ mm a $58,86$ mm). Vypočítané křivky $S_{1,1}$ parametru můžeme vidět na **obr.3.6**. Zelená křivka (2) tedy vyjadřuje vypočítanou hodnotu, červená (1) hodnotu zvětšenou a modrá (3) zmenšenou. Podle značek na rezonančním kmitočtu křivek můžeme odečíst, že změna délky flíčku o 2 mm změní rezonanční frekvenci antény přibližně o 80 MHz. Z obrázku také vyplývá, že vlivem změny délky motivu $S_{1,1}$ parametr v minimu poklesne vždy zhruba o 1 dB. To je způsobené také tím, že se mění původně vypočítané přizpůsobení antény na výchozí hodnotu pozice napájecí sondy. Šířka pásma zde ovšem pro všechny tři průběhy zůstává stejná. Pro další zkoumání vlivu změny různých parametrů upravíme šířku motivu W . Ta podle teoretického předpokladu mění odpor antény. Výchozí hodnotu opět zvolíme vypočítaných $62,44$ mm a tu budeme ve dvou krocích snižovat vždy o 4 mm a tím získáme hodnoty $58,44$ mm a $54,44$ mm.

Předchozí tvrzení zde říká, že s rostoucí šířkou flíčku se bude měnit impedanční přizpůsobení. Vliv této změny můžeme pozorovat na **obr. 3.7**, kde opravdu můžeme sledovat zhoršení průběhu $S_{1,1}$ charakteristiky (námi vypočítaná hodnota je značena červeně). Poklesem minima o zhruba 3dB se projevil vliv nedokonalého impedančního přizpůsobení, protože námi vypočítaná pozice napájecí sondy byla určena pro výchozí hodnotu. Výpočtem z rovnice (2-5-5) a následně (2-5-6) zjistíme, že opravdu impedance antény roste a dá se tedy očekávat, že vyzařovací schopnosti antény se zmenšující šířkou flíčku (a zároveň s rostoucí impedancí) budou klesat. Dalším zkoumaným vlivem na vlastnosti antény bude změna pozice napájecí sondy. Jako výchozí hodnotu zvolíme opět hodnotu vypočítanou, tedy 14,56 mm a budeme ji postupně oddalovat od hrany flíčku ve dvou krocích po 4 mm tak, že analyzované hodnoty budou 18,56 mm a 22,56 mm. Průběhy křivek můžeme pozorovat na **obr. 3.8**. Z této analýzy jsme mohli předpokládat velice podobný charakter změn křivek jako předtím. Také když porovnáme **obr. 3.7** a **obr. 3.8** tak je zřejmá podobnost, jen v případě **obr. 3.8** je zvolený krok razantnější. Červená křivka zde značí původní hodnotu, zelená hodnotu vzdálenou o 4 mm a modrá o 8mm. První posun napájecí sondy vyvolal nepatrnou změnu rezonanční frekvence

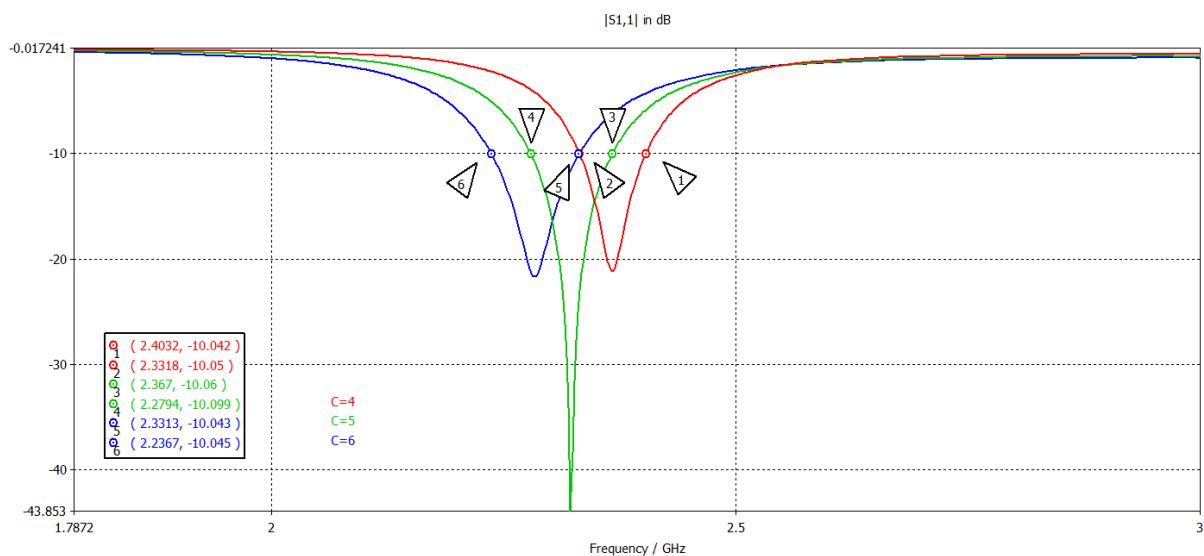


Obr. 3.7: Vliv změny šířky flíčku.



Obr. 3.8: Vliv změny pozice napájecího vodiče.

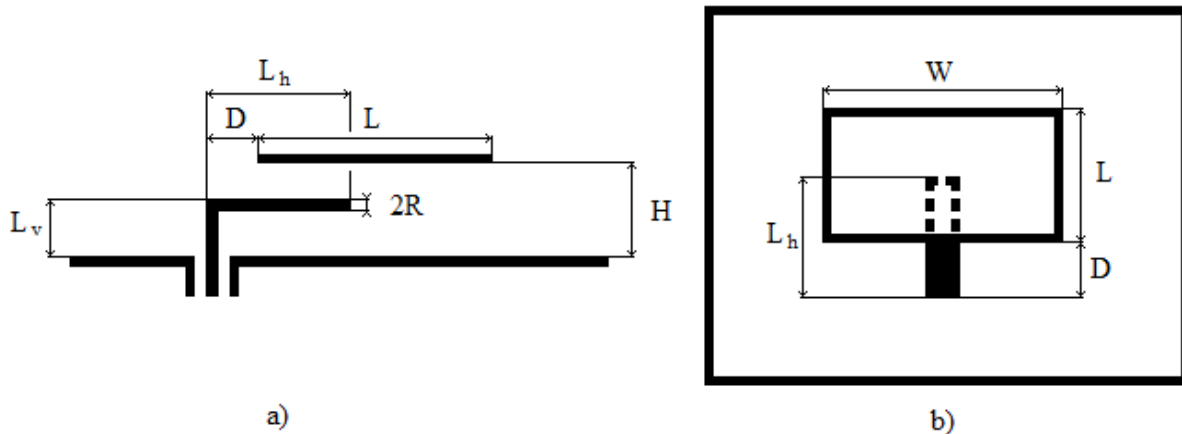
a hlavně pokles křivky S1,1 o 4 dB. Druhá změna má stejný posun frekvence k předchozí hodnotě jako ta předešlá, ovšem výraznou změnu zde zaznamenalo minimum S1,1, které nedosahuje ani 5 dB. Zde už by anténa své vyzařovací schopnosti ztratila. V obou změnách parametru x došlo i k nepatrnému zúžení šířky pásma. Posledním zkoumaným vlivem na vlastnosti antény je změna výšky substrátu. V kapitole 2.4 je tvrzení, že výška substrátu dokáže rozšířit šířku pásma pracovní frekvence. Na **obr. 3.9** je výřez původního obrázku průběhů pro lepší a detailnější demonstraci vlivu. Pro náš návrh jsme zvolili vzdálenost motivu od zemnicí desky 4 mm. Výpočet proběhl pro tuto a dále pro další dvě hodnoty zvětšující se postupně o 1 mm. Červená opět zobrazuje původní zvolenou hodnotu, zelená změnu o první 1 mm a modrá o další. Z obrázku je zřejmé, že naše volba vzdálenosti právě 4 mm nebyla z hlediska vlastností antény nejlepší, ovšem pro demonstraci vlivu změn různých parametrů zcela postačuje. Již první změna vykazuje výrazné snížení činitele odrazu o přibližně 20 dB. Šířka pásma se z původních 70 MHz (značka 1 a 2) zvětšila na 88 MHz (značka 3 a 4), tedy z 3% na 3,7%. Další zvětšení této vzdálenosti se už promítnul na nepřizpůsobení antény a vrací se zpět na původní hodnoty S1,1 parametru. Dojde ovšem k dalšímu rozšíření šířky pásma o dalších 7 MHz (značka 5 a 6), která by vzhledem k původní frekvenci 2,4 GHz byla 4%. Došlo zde tedy nejen ke zvětšení šířky pásma a zmenšení S1,1 parametru, ale patrnou změnu zaznamenala i pracovní frekvence. Důvodem je závislost výšky substrátu na výpočtu délky motivu, který (jak bylo už několikrát zmíněno) zajišťuje právě rezonanční kmitočet. Tuto závislost můžeme vidět ve vztahu (2-5-3) který následně ovlivní vztah (2-5-4). Tento poslední obrázek tedy demonstruje jednu z metod, jak docílit zvětšení šířky pásma pracovní frekvence flíčkových antén.



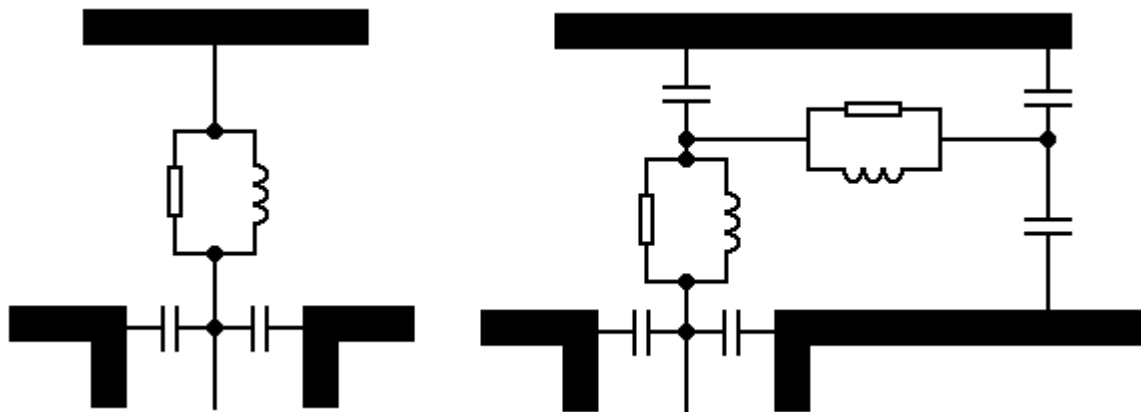
Obr. 3.9: Vliv změny šířky substrátu.

4 ŠIROKOPÁSMOVÉNAPÁJENÍ

V kapitole 2.4 jsme si ukázali některé z možností zlepšení vlastností flíčkových antén. V této kapitole na toto téma navážeme a detailněji si rozebereme jeden způsob napájení, který by měl úzkou šířku pásma zlepšit. Jedná se zde o typ koaxiálního napájení, ovšem střední vodič není připojen až na motiv, ale je zahnut do písmene L rovnoběžného s plochou motivu. Vzhled tohoto napájení můžeme vidět na **obr. 4.1**, kde L je délka a W šířka motivu, L_v výška sondy, L_h délka sondy, H určuje vzdálenost motivu od zemnicí desky (šířka substrátu) a R je poloměr vodiče.



Obr. 4.1: Napájení pomocí L-sondy a) průřez b) pohled shora.



Obr. 4.2: Schéma napájení koaxiální sondou (vlevo) a napájení koaxiální L-sondou (vpravo)

Podstatou tohoto typu napájení je potlačit dominantní vodivostní charakter napájení koaxiální sondou a nahradit ho daleko silnějším charakterem kapacitním. Pokud tedy se pokusíme jednoduše překreslit schéma základního koaxiálního napájení, dostaneme schéma uvedené na **obr. 4.2**(vlevo). Je zde zřejmý odpor středního vodiče a jeho indukce. Malá kapacita se zde také vyskytuje mezi středním vodičem a ochrannou vrstvou, ale je oproti indukci středního vodiče zanedbatelná. **Obr.4.2**(vpravo) zobrazuje možnost překreslení L-sondy. Původní odpor středního vodiče i jeho indukce zde zůstává, ovšem nabývá menších hodnot z důvodu neukončeného vedení až do místa propojujícího se s motivem, avšak tímto právě zde vzniká první silná kapacita. Ohybem a

prodloužením sondy se odpor i indukce zvětší, ale daleko většího nárůstu zaznamená právě kapacitní charakter. Ještě zde přibude další kapacita mezi L-sondou a zemnicí deskou, avšak z důvodu velké vzdálenosti sondy od desky není pro funkci tolik důležitá.

Významnou roli zde opět hrají délka a šířka motivu (funkce těchto rozměrů jsou totožné s příkladem jednoduché antény), avšak důležitou roli zde hrají výška a délka L-sondy. Vzdálenost motivu od zemnicí desky nám zde ve skutečnosti uvádí i vzdálenost L-sondy od motivu. Poměr středního vodiče nám pomůže získat vzdálenost sondy od zemnicí desky a přesah napájení přes motiv zase impedanční přizpůsobení. Délka zakřivené sondy (L_h+L_v) rovnoběžné s motivem musí být striktně daná $\lambda_g/4$ pro ideální vybuzení antény.

4.1 Dosažené výsledky modelování koaxiálního napájení pomocí L-sondy

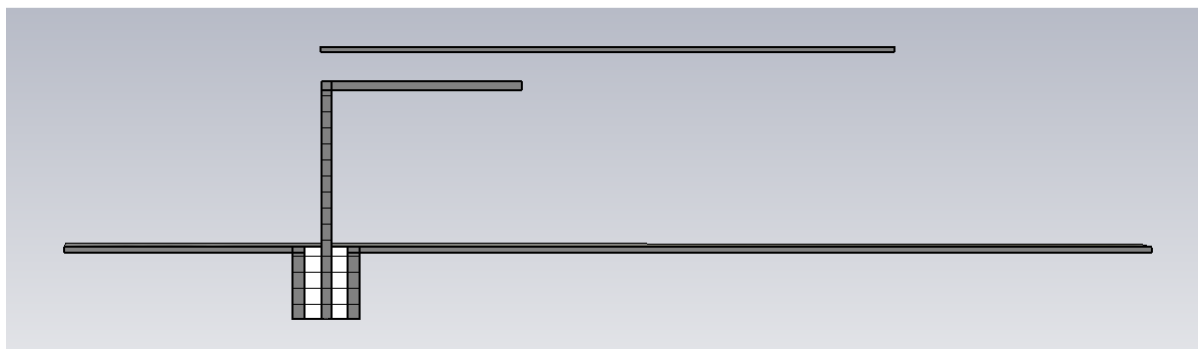
Na **obr. 4.3** můžeme vidět řez modelem antény s L-sondou modelovanou opět v programu CST Microwave Studio. Rozměry zemnicí desky a koaxiálního napájení zůstávají stejné. Zakřivení L-sondy musí celkově nabývat délky $\lambda_g/4$, tedy 31,23 mm. Pro další postup se pokusíme analyzovat vliv výšky substrátu a poměr délky částí L-sondy. V **tab. 4.1** jsou uvedeny výsledky simulací pro postupně zvyšující výšku substrátu pravidelně po hodnotě 1% λ_g .

H		B	L_h [mm]		L_v [mm]	
[mm]	$[\lambda_0]$	[%]	[mm]	$[\lambda_0]$	[mm]	$[\lambda_0]$
7,50	0,06	10,22	25,0	0,20	6,2	0,05
8,74	0,07	13,61	24,0	0,19	7,2	0,06
9,99	0,08	17,44	23,0	0,18	8,2	0,07
11,24	0,09	21,72	22,0	0,18	9,2	0,07
12,49	0,10	26,33	20,5	0,16	10,7	0,09
13,74	0,11	29,83	19,0	0,15	12,2	0,10
14,99	0,12	31,97	18,0	0,14	13,2	0,11
16,24	0,13	33,73	16,5	0,13	14,7	0,12
17,49	0,14	33,84	15,5	0,12	15,7	0,13
18,74	0,15	33,42	15,0	0,12	16,2	0,13
19,99	0,16	33,32	14,5	0,12	16,7	0,13
21,24	0,17	32,97	12,5	0,10	18,7	0,15
22,48	0,18	32,25	11,5	0,09	19,7	0,16
23,73	0,19	32,10	10,0	0,08	21,2	0,17
24,98	0,20	31,79	8,0	0,06	23,2	0,19

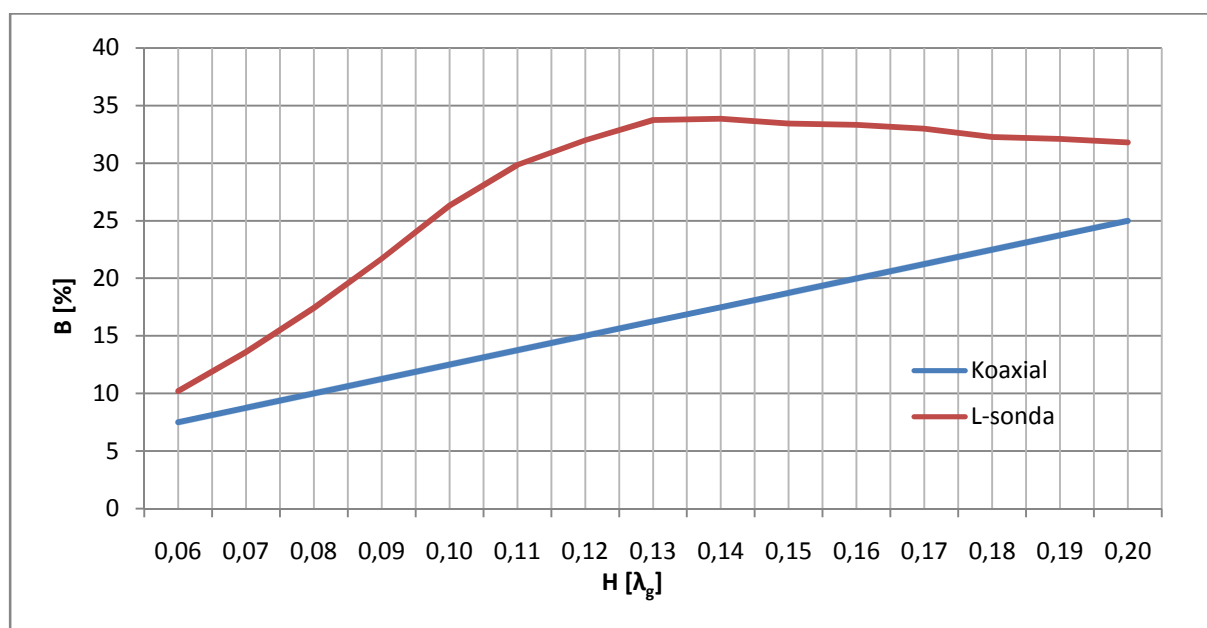
Tab. 4.1: Tabulka vlivu výšky substrátu na šířce pásma antény.

V tabulce si můžeme prohlédnout parametry antény při nejlepším výsledku pro danou šířku substrátu. Pro lepší představu je zde uvedena i výška (L_v) a délka (L_h) L-sondy. Vždy ovšem musí být součet roven $0,25\lambda_g$. V tabulce můžeme pozorovat rychlý nárůst šířky pásma v intervalu do 0,12 λ_g , poté se relativně ustálil na hodnotě blízké 34%. Z kapitoly 2.4 jsme se již seznámili s průběhy vylepšení šířky pásma metodou zvětšení výšky substrátu. Protože se zde jedná o substrát vzduchový, porovnáme naše výsledky s průběhem z **obr. 2.7** pro hodnotu 1,0 a vyneseme přímé porovnání

teoretické hodnoty a hodnoty naměřené simulací do společného grafu. Toto grafické srovnání můžeme vidět na **obr. 4.4**. Na tomto grafu je zřejmé, že tato úprava napájení opravdu přinese znatelné zvětšení šířky pásma. Ale zde i sledovat jeho omezené pole použitelnosti. Jak již bylo uvedeno, po překročení výšky substrátu $0,12 \lambda_g$ dojde k relativnímu ustálení hodnoty šířky pracovní frekvence, která po několika dalších procentech začne dokonce klesat a blížit se zpět k původnímu průběhu pro běžné koaxiální napájení. Důležité je ještě se zmínit o závislosti délky motivu na výšce substrátu. Dle vzorců (2-5-2), (2-5-3) a následně (2-5-4) byla nutnost během simulací pravidelně měnit parametr L .

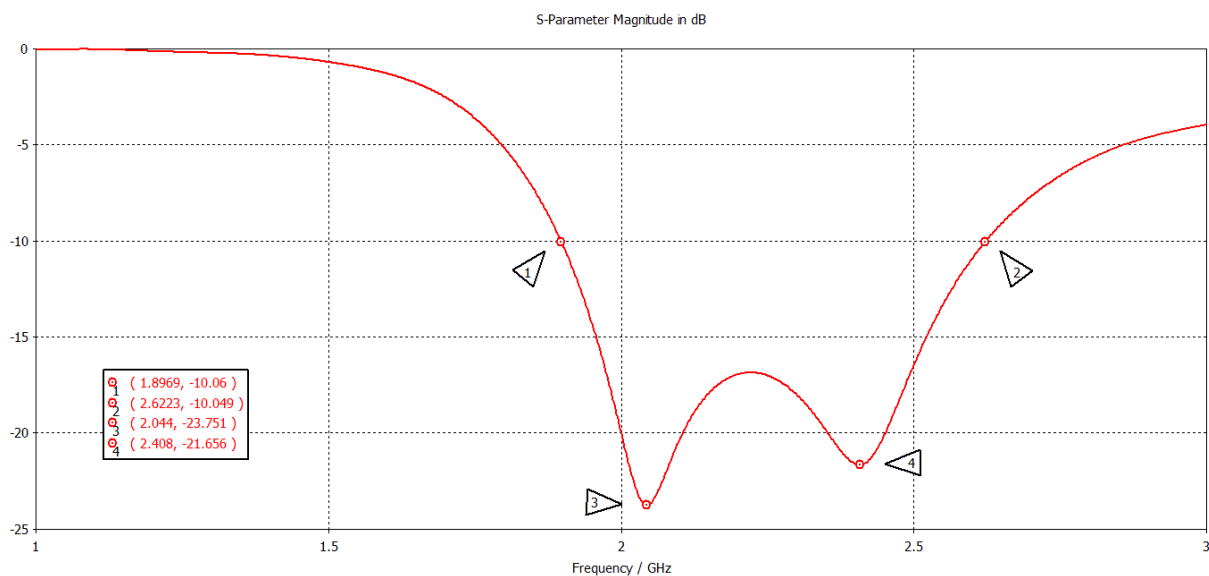


Obr. 4.3: Průřez flíčkovou anténou napájenou pomocí L-sondy.

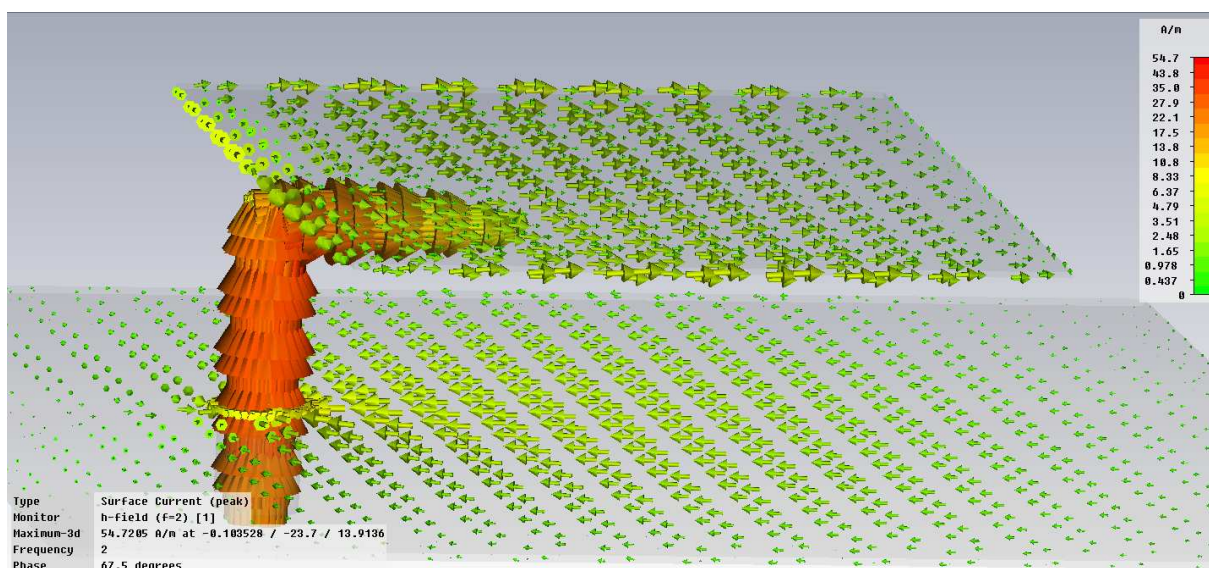


Obr. 4.4: Srovnání napájení pomocí koaxiální a L-sondy.

Z důvodu možnosti reálné výroby mikropáskové antény s L-sondou (bude blíže představena v kapitole 5) a následného porovnání se simulací jsme vybrali šířku substrátu $H = 16,9 \text{ mm}$ ($0,135 \lambda_g$). Dle výpočtů byla upravena délka flíčku na $L = 47,5 \text{ mm}$, šířka flíčku zůstane beze změny, $L_v = 15 \text{ mm}$ ($0,12 \lambda_g$), $L_h = 17,2 \text{ mm}$ ($0,138 \lambda_g$). Podíváme se tedy, jak vypadá odsimulovaný průběh $S_{1,1}$ parametru pro takto zvolené rozměry antény (**obr. 4.5**). Z průběhu je hned zřejmý velký nárůst šířky pásma. Právě tuto hodnotu určují v obrázku značky 1 a 2. Z legendy můžeme zjistit, že šířka pásma je zde 725 MHz, tedy 32,14%. Není to maximální hodnota, které jsme v měření dosáhli, ale pro praktickou výrobu prototypu antény by přesná čísla na setiny a tisícin milimetru neměla význam.



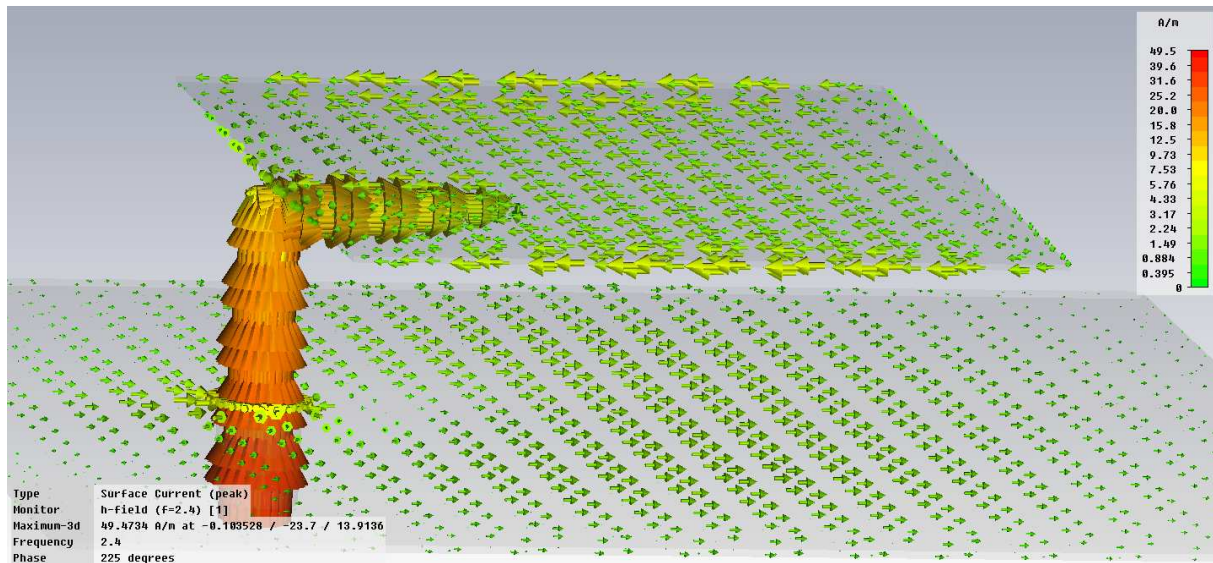
Obr. 4.5: Průběh $S_{1,1}$ parametru pro zvolenou anténu s napájením pomocí L-sondy.



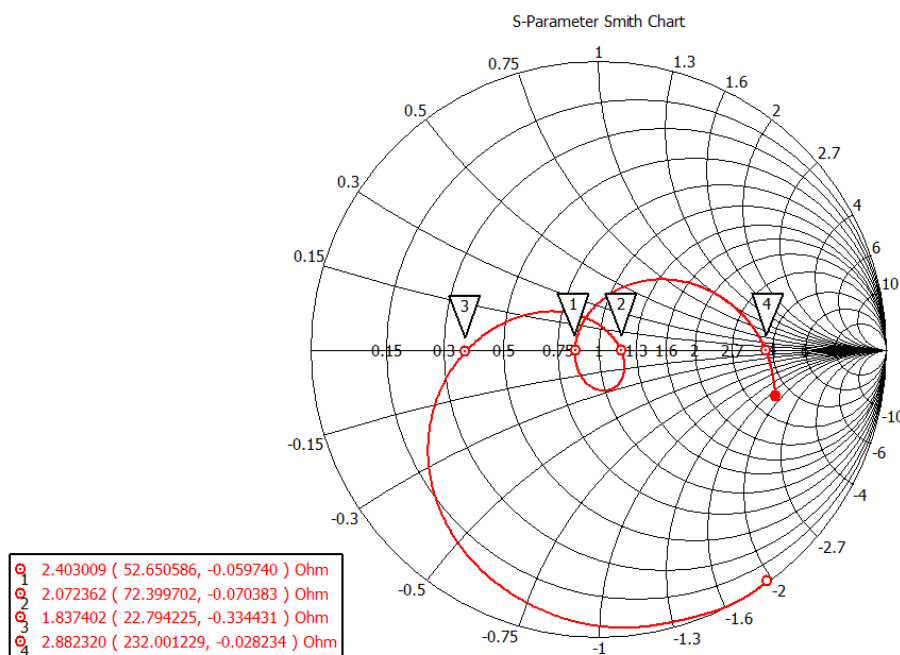
Obr. 4.6: Moment průběhu povrchového proudu na flíčku při frekvenci 2,0 GHz.

Ve stejném obrázku jsou ještě zřejmá dvě minima (značky 3 a 4) na frekvencích 2,0 a 2,4 GHz. V tuto chvíli by mohla vzniknout logická otázka, zda se nám do průběhu nedostala rezonanční frekvence dalšího rozměru antény – tedy šířky motivu W . Provedeme tedy na těchto frekvencích analýzu průtoku proudu flíčkem. **Obr.4.6 a4.7** ukazují právě nejvýraznější části povrchového průběhu proudu. Z pozorování směru šipek buzení flíčku můžeme vyčíst, že je zde vše v pořádku, tedy buzená je jen délka flíčku L . Pojdme tedy prohlédnout vlastnosti antény do Smithova diagramu. Ten můžeme nalézt na **obr. 4.8**. Značky 3 a 4 zde nehrají až takovou roli, sice by byla anténa v rezonanci, ale pro tento kmitočet už není přizpůsobená, tak se v průběhu činitele odrazu výrazně neprojeví. To, co by nás zde mělo zajímat, jsou značky 1 a 2, které odpovídají téměř přesně frekvencím největšího poklesu z **obr. 4.5**. Pokud se tedy zaměříme jen na rezonanční šířku pásma a v tomto intervalu budeme sledovat chování antény ve Smithově diagramu, tak začneme někde v blízkosti 3. značky, kde nám pokles $S_{1,1}$ parametru překoná -10 dB. Zde je anténa právě ve zmiňovaném induktivním charakteru, který je charakteristický pro běžné flíčkové antény. V této části diagramu anténa setrvává až do rezonanční frekvence 2,0 GHz, kde mění svůj charakter na kapacitní. V této části vznikne vzrůstající

tendence S1,1 křivky, která se zpět do klesající mění při přibližování další rezonanční frekvence 2,4 GHz. Zde opět anténa mění svůj charakter z kapacitního zpět do charakteru induktivního. Vložený kapacitní charakter L-sondou tedy zapříčiní posunutí křivky ve Smithově diagramu a vytvoření dvou rezonančních frekvencí při buzení jednoho rozměru antény.



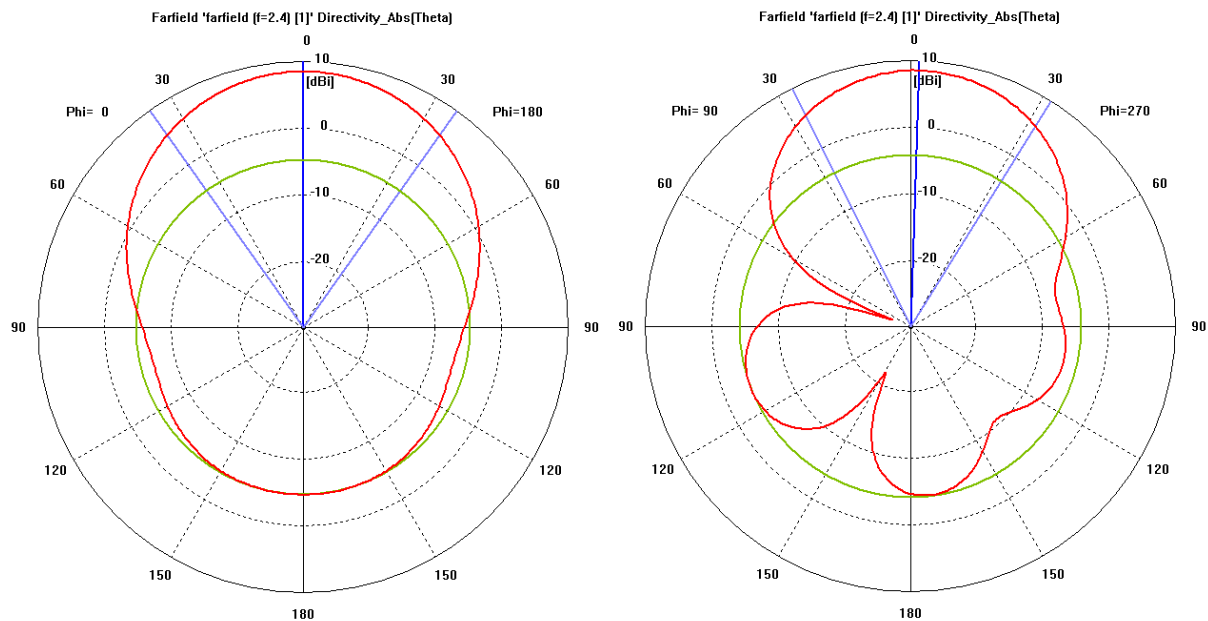
Obr. 4.7: Moment průběhu povrchového proudu na flíčku sledované při frekvenci 2,4 GHz.



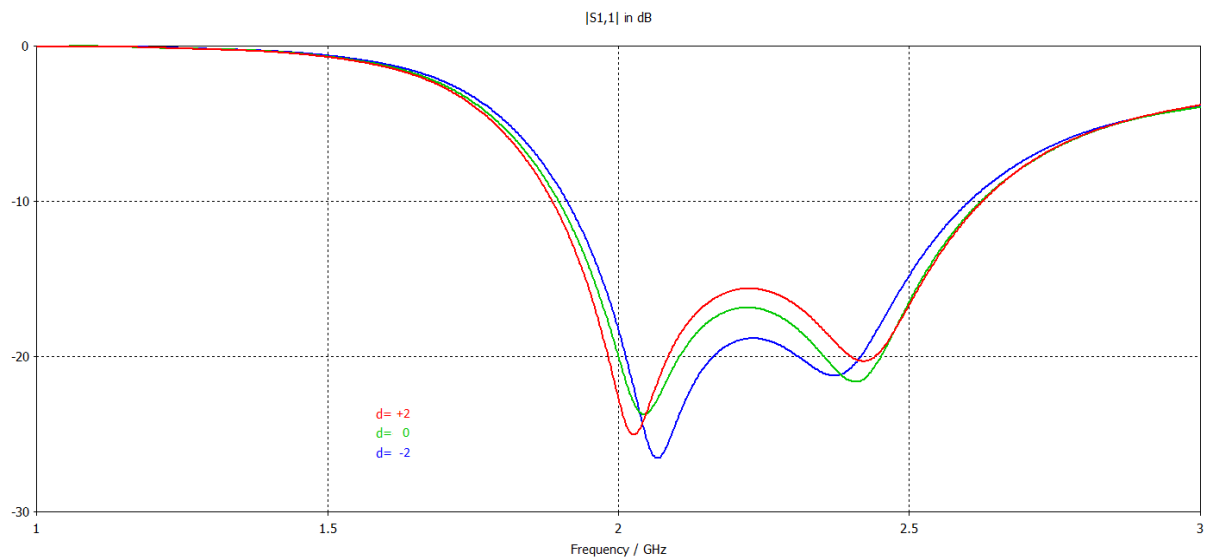
Obr. 4.8: Smithův diagram mikropáskové antény napájené pomocí L-sondy.

Další vlastnost, kterou bychom si zde měli u upravené antény představit, je její vyzářovací diagram. Ten můžeme najít na **obr. 4.9**. Z diagramů pro obě roviny můžeme vyčíst, že vliv oddálení flíčku od zemnicí plochy velmi ovlivní vyzářování do prostoru. V rovině E se pozvolna ztrácí hlavní lalok, který je pro mikropáskové antény charakteristický. Anténa tedy v této rovině značně vyzářuje do všech stran. V rovině H je to podobné, až na velký nárůst postranního laloku vlivem zahnuté napájecí sondy, který trochu vychýlil směr vyzářování. Tyto vlastnosti tedy zrovna oslnivé nejsou, avšak jejich vylepšení bychom zajisté dosáhli použitím větší zemnicí plochy. V našem příkladu je použitá plocha

jen nepatrně větší než flíček, což se značně podepsalo nejen na vyzářovacích vlastnostech, ale na druhou stranu použité rozměry zanechaly anténě relativně kompaktní velikost.



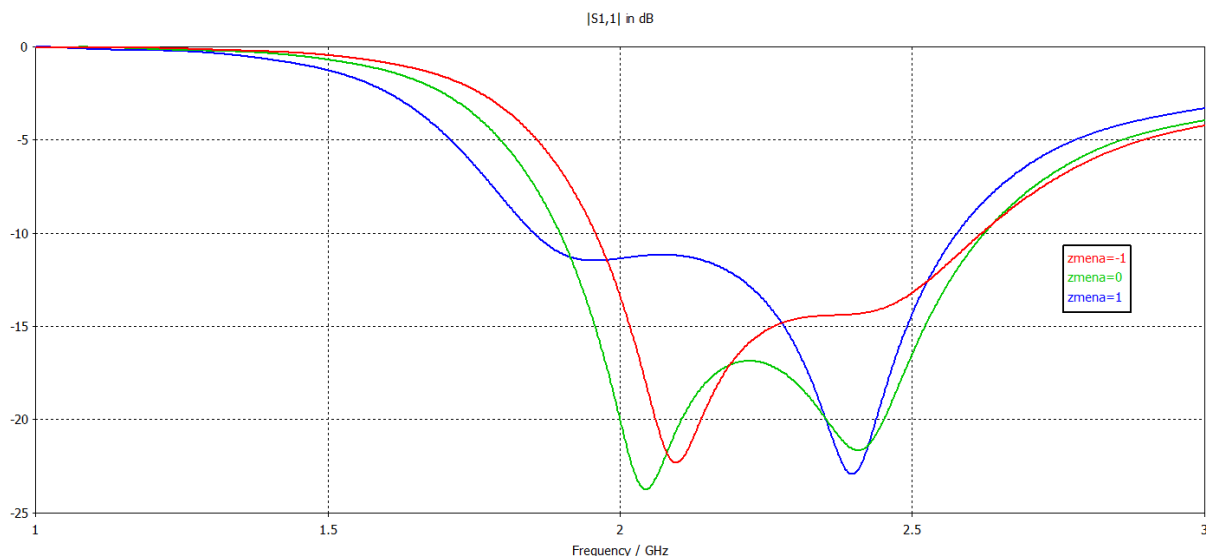
Obr. 4.9: Vyzářovací charakter antény s L-sondou v E rovině (vlevo) a H rovině (vpravo).



Obr. 4.10: Analýza vlivu přesahu L-sondy.

Na závěr simulací si ještě ukážeme vliv několika změn parametrů, které má tato anténa navíc oproti běžné koaxiálně napájené anténě. Nejprve vliv přesahu L-sondy přes motiv (na **obr. 4.1** označený písmenem *D*). Kladné znaménko zde znamená, že sonda není motivem plně zakrytá. Právě tento stav (přesněji o 2 mm) značí červený průběh. Zelený průběh zde znamená, že je L-sonda v pozici přesně pod hranou motivu a naproti tomu modrý průběh značí, že je napájecí sonda o 2 mm „schovaná“ pod motivem. Z průběhů tedy můžeme poznat, že pozice sondy vůči motivu v činiteli odrazu nehraje až takovou roli. Překrytý a z části odkrytý (modrý a červený) průběh se liší jen v nepatrném rozdílu rezonančních frekvencí, které se zakrytím k sobě přiblíží a tím dojde k malému

zúžení šířky pásma. Vliv na $S_{1,1}$ parametr tedy není až tak velký, ale určitě se pozice sondy promítne ve vyzařovacím diagramu, kde přesah ještě více vychýlí hlavní lalok.

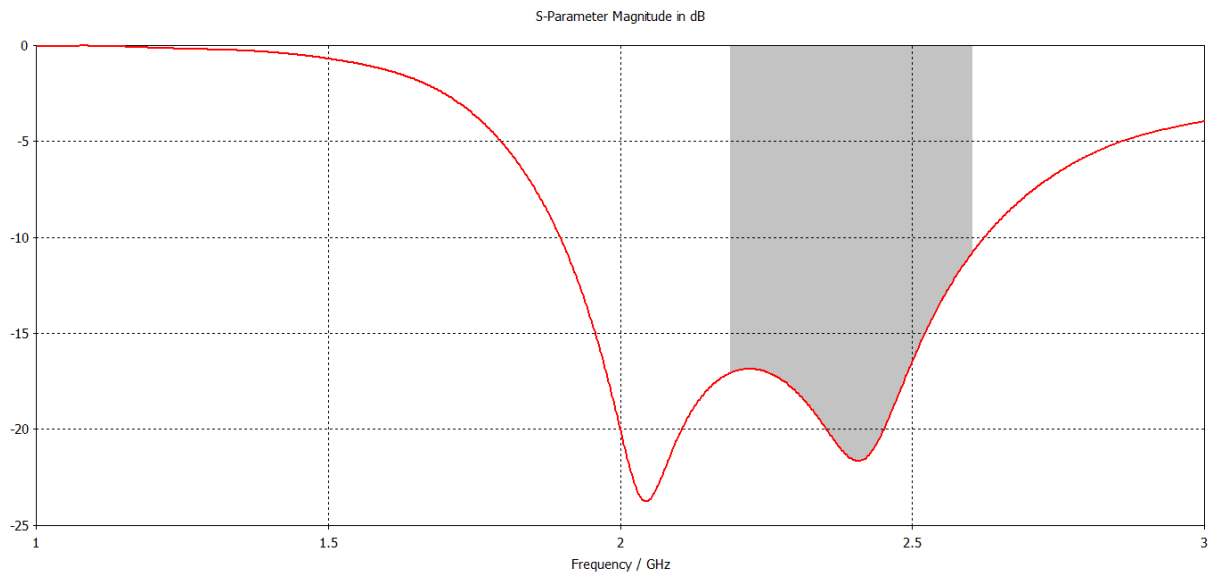


Obr. 4.11: Vliv přesahu napájení L-sondy k pozici motivu.

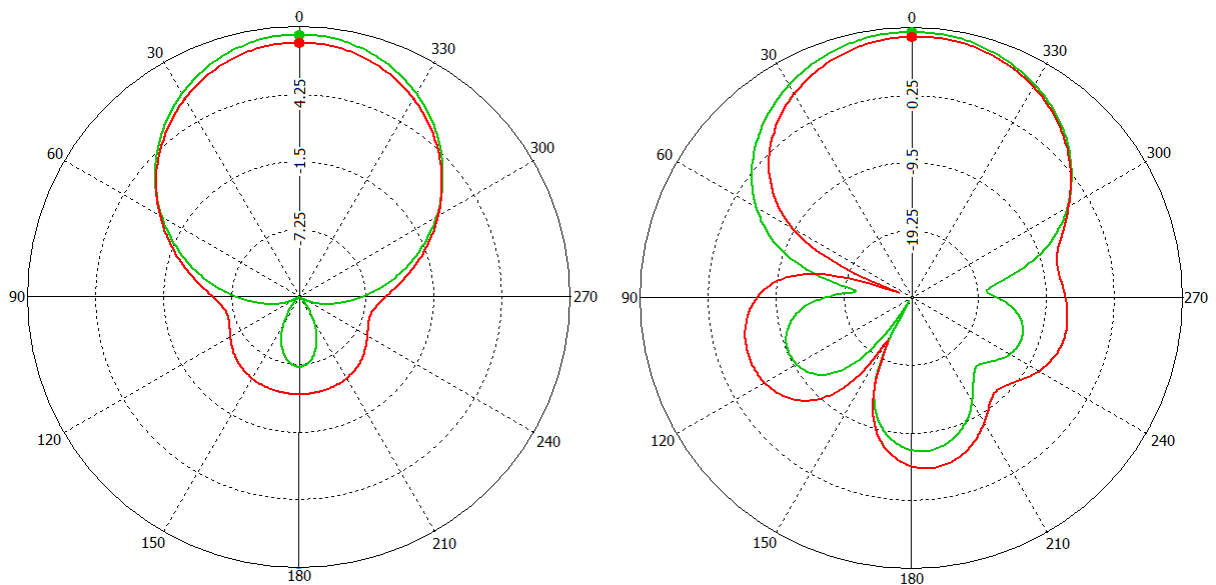
Dalším zkoumaným vlivem bude opět pozice sondy, ovšem tentokrát z pohledu blízkosti L-zahnutí k motivu. Tři takovéto pozice máme naznačené na **obr. 4.11**. Zelený průběh zde značí námi zvolené parametry, modrý zvýšení L_v a zároveň zkrácení L_h o 1 mm a červený zkrácení obou o 1 mm oproti zvoleným rozměrům. Přiblížení sondy tedy znatelně upraví rezonanční frekvence antény. Sice by nám obě úpravy jen pohnuly intervalem šířky pásma na námi zvolených -10 dB, ale pro lepší přizpůsobení antény na všech frekvencích je vhodné ponechat zelený průběh. Ten i zaručí, že drobné odchylky ve výrobě na kteroukoliv stranu hned neporuší chtěnou šířku pásma.

4.2 Porovnání výsledků

Nejprve se podívejme na přímé porovnání dosažených výsledků šířky pásma L-sondy oproti teoretickým vlastnostem běžného napájení pomocí koaxiálního napájení. Z **obr. 2.7** zjistíme, že pro naši šířku substrátu 16,9 mm ($0,135\lambda_g$) odpovídá přibližná šířka pásma 17%, tedy $0,17\lambda_g = 408$ MHz. Naší simulací se podařilo dosáhnout šířky pásma 725 MHz, tedy 32,14 %. Pokud tedy vyjádříme procentuální nárůst šířky pásma, dostaneme číslo 189,1 %. V **obr. 4.12** máme už dříve použitý průběh $S_{1,1}$ parametru antény napájené L-sondou a šedá zóna pod křivkou značí teoretickou šířku pásma pro anténu napájenou koaxiálně.



Obr. 4.12: Porovnání teoretické a dosažené šířky pásma.

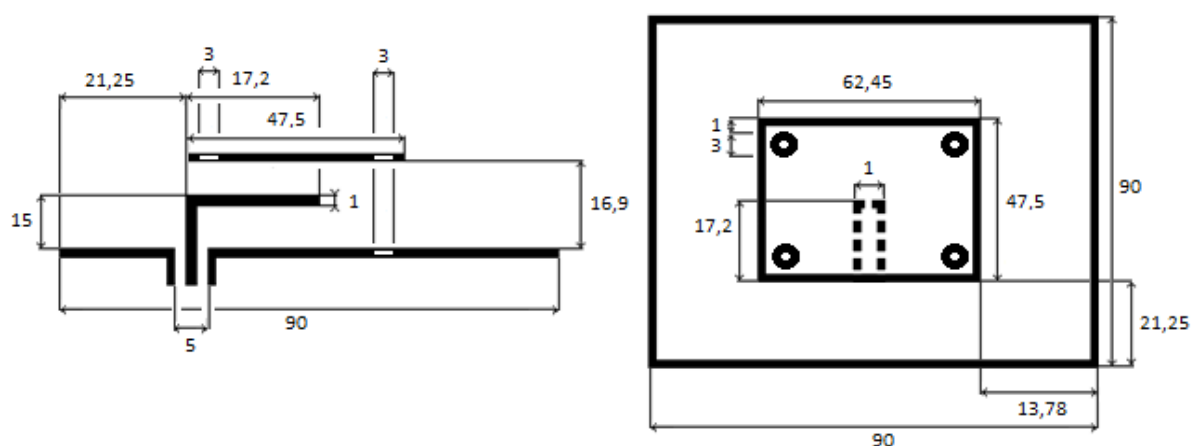


Obr. 4.13: Porovnání vyzařovacího charakteru antén E rovině (vlevo) a H rovině (vpravo)

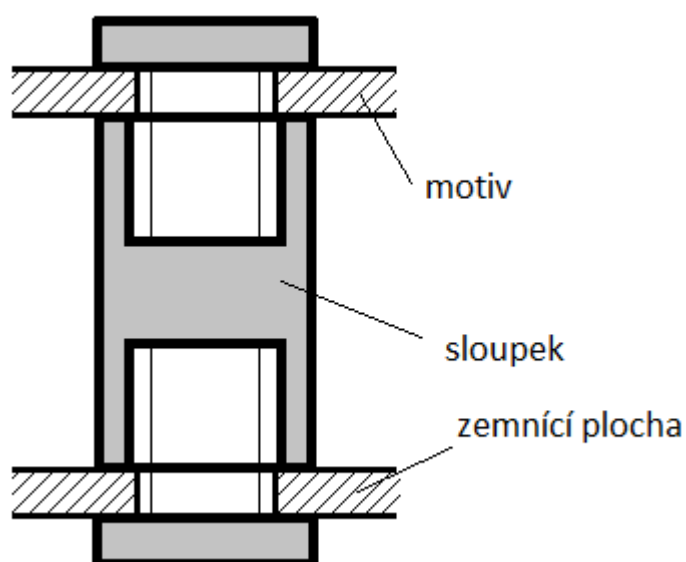
Další určitě zajímavé srovnání bude v oblasti vyzařování antény. Pokud tedy oba průběhy (**obr. 3.5 a 4.9**) vložíme za pomoci programu CST Microwave Studio, získáme Obr. 4.13. Běžné koaxiální napájení s nízkou výškou substrátu (popsané v kapitole 3) je zde naznačené zeleně, L-sonda má barvu červenou. Z obrázku je tedy zřejmý nárůst vyzařování hlavně směrem zpět k zemní ploše, ale hlavní lalok zde zůstal přibližně stejný, jen mírně vychýlený v rovině H vlivem oddálení motivu a zahnuté sondy. Ovšem takovýto výsledek byl více než pravděpodobný.

5 VLASTNÍ REALIZACE

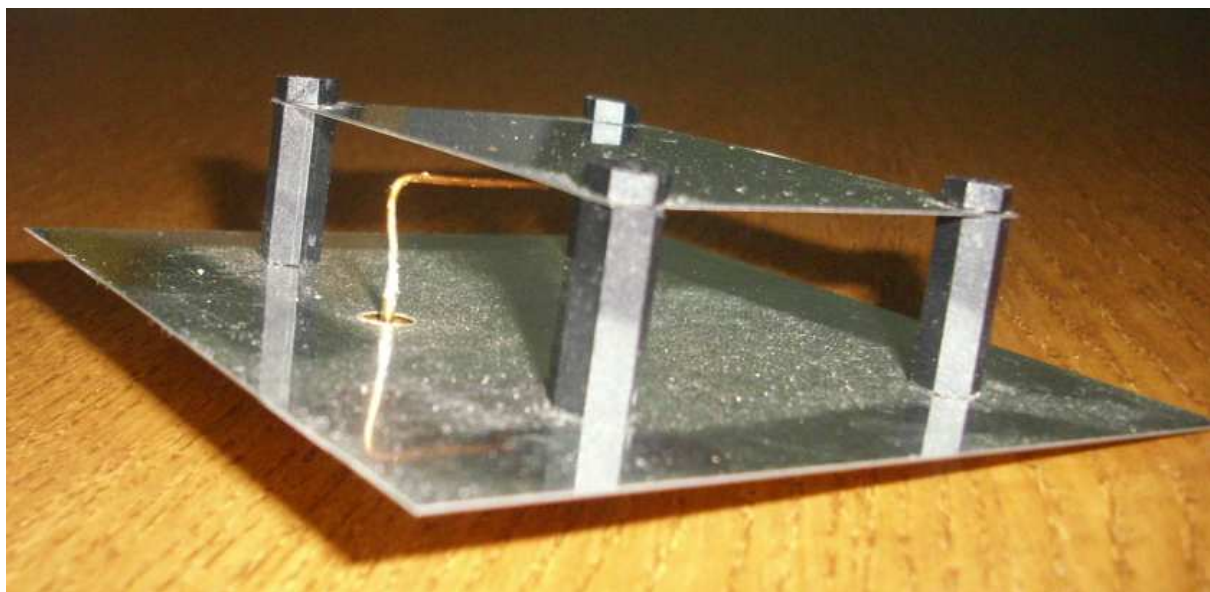
Pro vlastní výrobu antény jsem zvolil pocínovaný plech o síle 0,3 mm. Rozměry jsou stejné, jako zvolená modelovaná anténa v kapitole 4. Obrázek s přesnými rozměry si můžeme prohlédnout na **obr. 5.1**. Problém oproti simulaci je zde umístění vyzařovacího motivu. V simulacích je umístěný „do prostoru“, což v praxi samozřejmě nejde. Pro uchycení flíček jsme se rozhodli pro volbu upevnění přes distanční sloupky, které budou mechanicky flíček držet v dané pozici. Flíček i zemní plochu bylo tedy nutné na čtyřech místech proděravět, aby vznikla možnost přišroubování. Upevnění zemní desky je nakresleno na **obr. 5.2**. Distanční sloupek byl zhotoven z polyamidu a upraven na přesnou délku 16,9 mm. Pro uchycení vlastní napájecí sondy byl použit SMA konektor s napájeným kouskem Cu drátku zahnutým do L o průměru 1 mm. Konektor byl poté po svém obvodu připájen na spodní stranu zemní desky v místě, kde byl předem profříznut otvor pro napájecí sondu. Výsledek výroby si můžeme prohlédnout na **obr. 5.3a), b) a c)**.



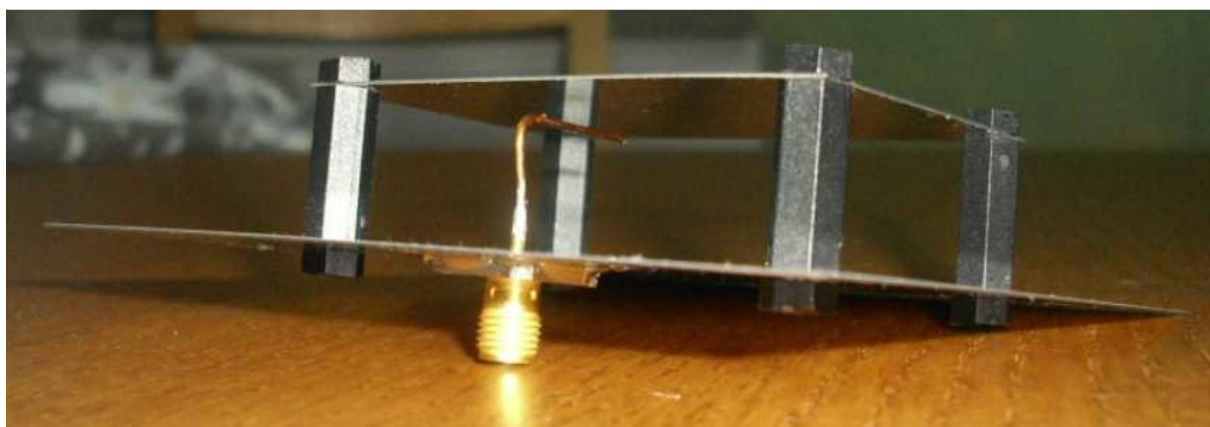
Obr. 5.1: Půdorys a bokorys vyrobené antény.



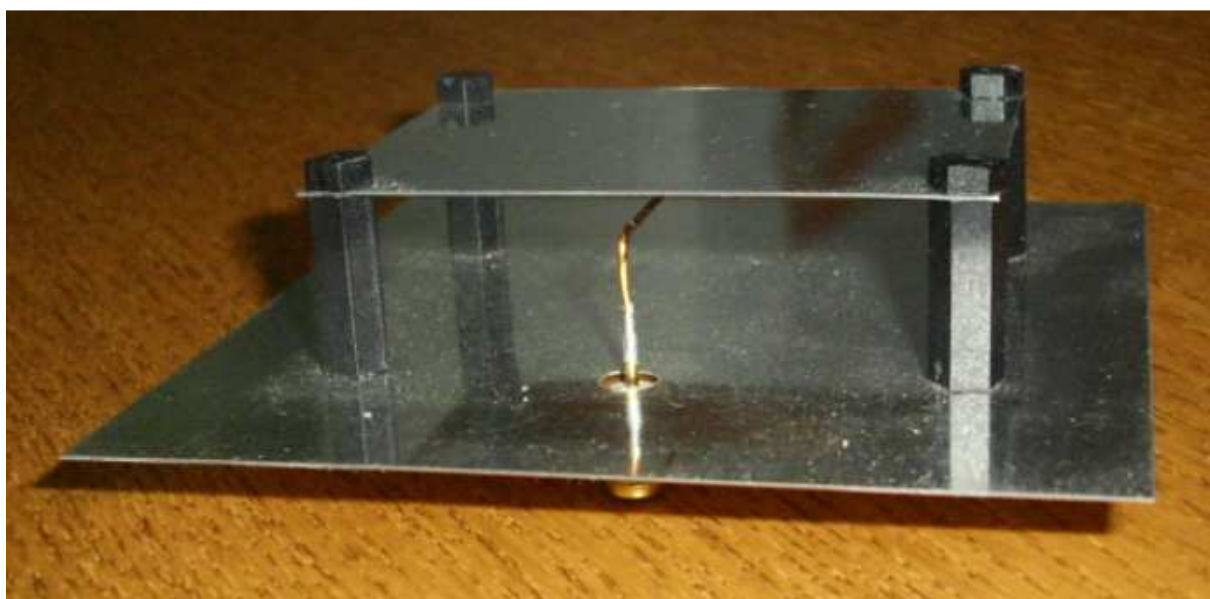
Obr. 5.2: Uchycení motivu k zemní desce.



a)



b)



c)

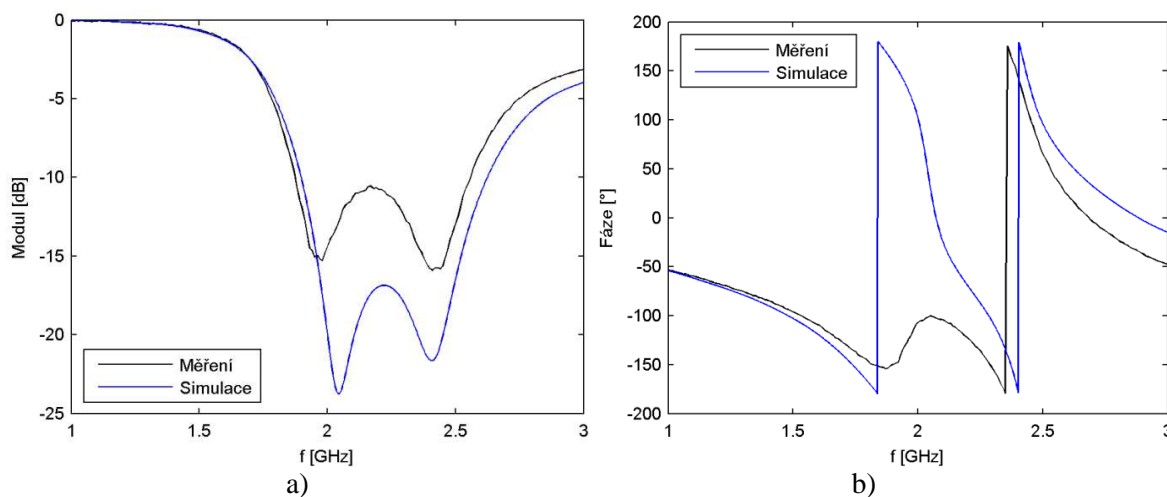
Obr. 5.3: Realizovaná anténa s napájením pomocí L-sondy.

5.1 Výsledky měření antény

Samotnou realizovanou anténu jsme proměřili za pomoci přístroje od firmy Rohde & Schwarz s modelem ZVL6 Vector Network Analyzer. Výsledky jsme za pomoci matematického programu Matlab vynesli spolu s odsimulovaným průběhem do jednoho grafu. Srovnání si můžeme prohlédnoutna **obr. 5.5**. Simulace je zde značená modře, změřené výsledky černě. Na první pohled jsou zde některé odlišnosti. Modul $S_{1,1}$ parametru zde nedosahuje tak dobrých výsledků jako v simulaci, ale pásmo pod oběma rezonančními frekvencemi leží pod hodnotou -10 dB, tedy vyhovuje. Šířka pásma se trochu zmenšila, ale to bych přisuzoval právě tomu celkovému drobnému zhoršení průběhu. Důležité zde je, že zůstaly zachovány rezonanční frekvence. Pokud si prohlédneme srovnání průběhu fáze, můžeme pozorovat rozdíl v překlopení u přibližné hodnoty $1,8$ GHz. Modrá odsimulovaná křivka zde podle teoretických předpokladů změní znaménko z -180° na 180° , ovšem naměřená hodnota setrvává v záporných hodnotách fáze a překlopí se až v druhé rezonanční frekvenci. Přesnou příčinu tohoto jevu se nám nepodařilo určit, ale závažný vliv na funkci antény nemá.



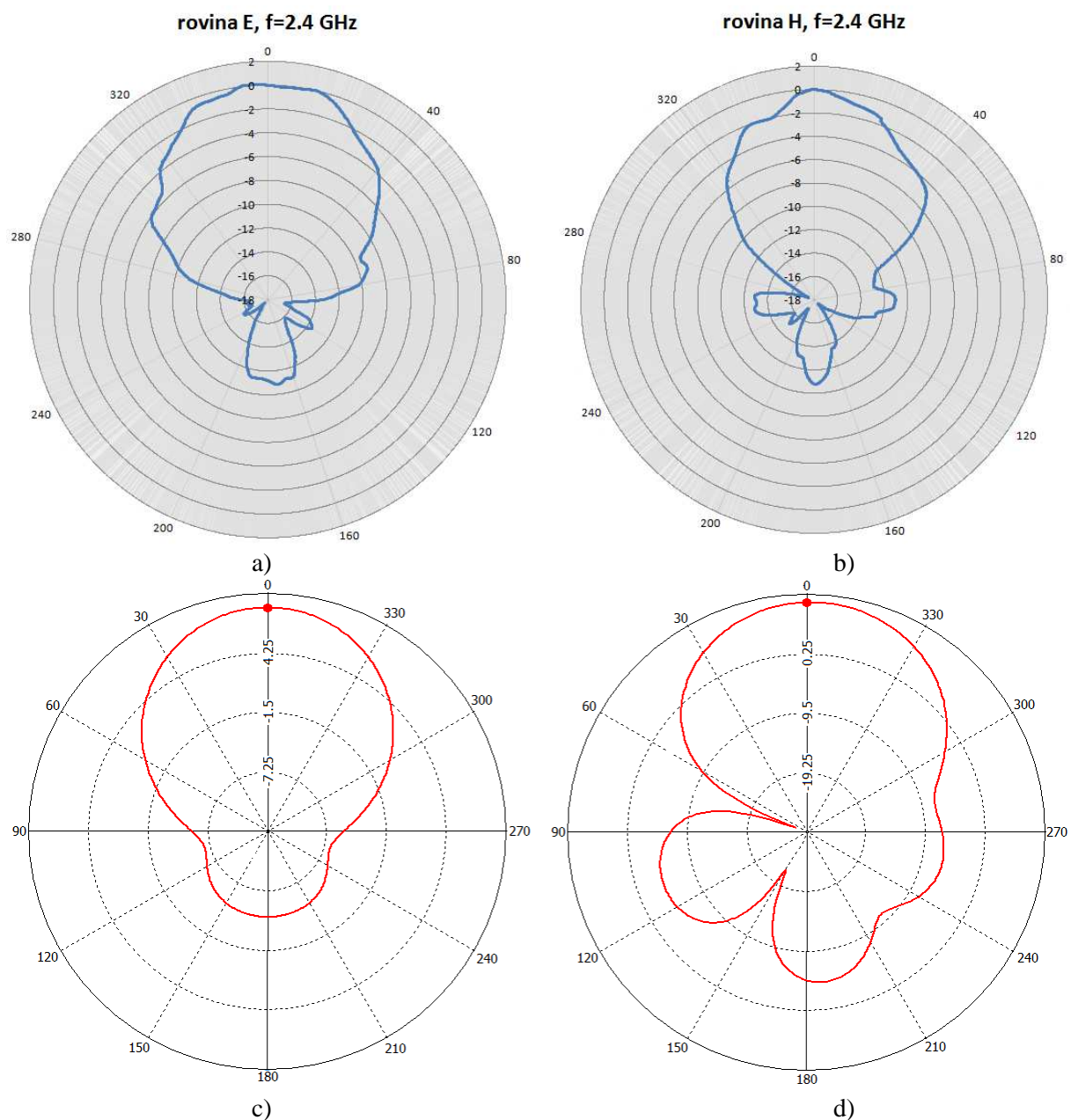
Obr. 5.4: Rohde & Schwarz ZVL6 Vector Network Analyzer.



Obr. 5.5: Změřené a simulované průběhy pro a) modul b) fázi $S_{1,1}$ parametru.

Jako hlavní důvod zhoršení průběhu od teoretického se nabízí nepřesné rozměry vyrobené antény. Ovšem svoji roli zde sehrály také díry v motivu a včlenění distančních sloupků pro jeho podporu. Tyto sloupky znamenají změnu permitivity substrátu a tím na určitých místech jiné podmínky pro šíření vln pod motivem, ovšem pro podporu flíčku jsou nutné. V neposlední řadě je zde také skutečnost, že měření probíhalo v laboratoři nechráněné od vnějších vlivů. I přes tyto problémy jsou to ale výsledky uspokojivé.

Dále se zde podíváme na výsledek měření směrové charakteristiky, kterou můžeme najít na **obr. 5.6**. Pro lepší porovnání obsahuje již jednou demonstrované teoretické výsledky z **obr. 4.9**.



Obr. 5.6: Směrová charakteristika rovin E a H pro změřenou (nahore) a simulovanou (dole) anténu

Na první pohled je zřejmé, že anténě důležité vlastnosti výrobou zůstaly. V rovině E se vyskytuje jak dominantní hlavní lalok, tak mírné vyzařování zpět. Pro rovinu H znatelné zmenšení v měřeném diagramu zaznamenal vedlejší lalok vytvořený vyzařováním ze sondy. Celkově ovšem zůstal charakter stejný. Důležité je ještě zmínit, že v naměřeném grafu jsou obě osy jen orientační. Maximální naměřená hodnota je v grafu nasměrována na 0° a ostatní hodnoty jsou k této největší vztaženy.

Měřením se nám tedy podařilo potvrdit odsimulovaný charakter antény jak pro průběh $S_{1,1}$ parametru, tak pro vyzařovací charakteristiku.

6 ZÁVĚR

V této práci jsme si představili mikropáskovou anténu napájenou pomocí L-sondy. Anténa dle zadání měla být navržena na střední frekvenci 2,5 GHz, od které jsme se v průběhu práce odklonili, ovšem pro pozorování vlastností a vlivu změn antény odklon od původní frekvence nemá nejmenší vliv. Jak jsme během simulací zjistili, anténa je velice závislá na zvolené vzdálenosti motivu od zemní desky. Modelováním v programu CST Microwave Studio jsme zjistili, že v určitém intervalu dokáže použitý typ napájení razantně zlepšit vlastnosti antény oproti použití běžného koaxiálního napájení. Ovšem tento interval má rostoucí tendenci jen do hodnoty $0,13\lambda_g$, kde se jeho tendence ustálila a pozvolna se začala vracet do původního lineárního průběhu. Ovšem je potřeba podotknout, že po celém měřeném intervalu ($0,06\lambda_g - 0,20\lambda_g$) byly získané výsledky vždy lepší, než by byla schopná dosáhnout běžná koaxiálně napájená anténa. Na zvolené „výšce substrátu“ jsme se pokusili pro potvrzení pravosti teoretických výsledků anténu vyrobit. Z naměřených hodnot nám nakonec vyšlo, že anténa i v neideálních podmínkách výroby i měření vykazuje uspokojivé výsledky. Relativní zhoršení naměřených vlastností by šlo zajisté vylepšit přesným výrobním procesem. V neposlední řadě se zde nabízí i další vylepšení vlastností, jako například vložení slotu do vyzářovacího motivu nebo zhotovení skupiny propojených antén. Stávající rozsah pracovní frekvence je tedy přibližných 1,75 – 2,60 GHz. V tomto pásmu funguje část vrchní frekvence dobíhající sítě mobilních telefonů GSM a nově nastoupené sítě UMTS, technologie bezšňůrových telefonů DECT a spadá sem celý kmitočtový rozsah pro bezdrátové sítě spojené standardem 802.11 (Wi-Fi) i 802.15 (Bluetooth) 2,4 – 2,48 GHz. Tato anténa tedy představuje dobrý způsob využití na celkem široké škále možností při svých kompaktních rozměrech.

LITERATURA

- [1] Mak, C. L., Luk, K. M., Lee, K. F., Chow, Y. L., *Experimental study of microstrip patch antennas*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, May 2000, vol. 48, no. 5, p. 777 – 783.
- [2] Guo, Y. X., Mak, C. L., Luk, K. M., Lee, K. F., *Analysis and Design of L-Probe Proximity Fed-Patch Antennas*, February 2001, vol. 49, no. 2 p. 145 – 149.
- [3] Milligan, T. A., *Modern antenna design*, New Jersey: John Willey & Sons, 2005.
- [4] Waterhouse, R. B., *Microstrip patch antennas*, Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [5] Hazdra, P., Mazánek, M., Čermák, J., *Wideband Rectangular Microstrip Patch Antenna Using L-Probe Feeding System*, Radioengineering, September 2007, vol. 16, no. 3.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

λ_g	- vlnová délka
R	- elektrický odpor
Ω	- jednotka elektrického odporu
W	- šířka motivu
L	- délka motivu
H	- výška substrátu
c	- rychlost světla
f	- frekvence
ε_r	- relativní permitivita
ε_{eff}	- efektivní permitivita
Δ	- efektivní zkrácení hran
G	- elektrická vodivost
S	- jednotka elektrické vodivosti
R_i	- přizpůsobená impedance
R_e	- celková impedance motivu
x	- pozice sondy
L_v	- výška sondy
L_h	- délka sondy
mm	- jednotka délky
Hz	- jednotka frekvence
$S_{1,1}$	- činitel odrazu
SWR	- poměr stojatých vln
dB	- logaritmičká jednotka
D	- přesah sondy přes motiv
B	- šířka pásma