

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

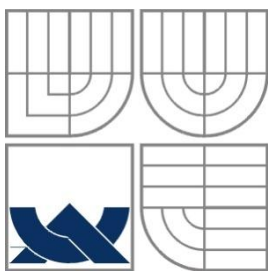
REKONFIGUROVATELNÁ VÍCEPÁSMOVÁ ANTÉNA

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

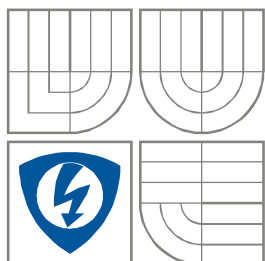
Bc. RADOMIL HAVLÍN

BRNO 2011



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

REKONFIGUROVATELNÁ VÍCEPÁSMOVÁ ANTÉNA

THE RECONFIGURABLE MULTIBAND ANTENNA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

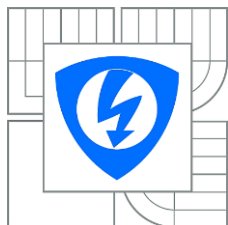
Bc. Radomil Havlín

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO, 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Radomil Havlín
Ročník: 2

ID: 70165
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Rekonfigurovatelná vícepásmová anténa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s konceptem "Planar Inverted F" antény, která umožňuje elektronicky přepínat mezi pracovními pásmy komunikačních služeb GSM, DCS, PCS, UMTS, Bluetooth a WLAN. Jako přepínací prvky mohou sloužit PIN diody nebo FET tranzistory. Koncept antény namodelujte ve vhodně zvoleném programu.

Model antény, vytvořený ve vybraném programu, transformujte pro mikrovlnný substrát, zadaný vedoucím práce. Výslednou anténu optimalizujte.

Navrženou anténu vyrobte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MAK, A.C.K., ROWELL, C.R., MURCH, R.D., MAK, C.L. Reconfigurable multiband antenna designs for wireless communication devices. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, vol. 55, no. 7, p. 1919-1929.

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

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá modelováním a výrobou rekonfigurovatelných vícepásmových planárních antén, které umožňují elektrické přepínání pracovních pásem. Po nasimulování antén s PIN diodou a FET přepínačem v komerčním programu CST MW následovala optimalizace antén pro zadaný substrát. Následně bylo přistoupeno k realizaci antén. Dalším krokem bylo porovnání výsledků simulací s hodnotami měření na experimentálních anténách.

Klíčová slova

Rekonfigurovatelná vícepásmová planární anténa, aktivní prvky, PIN dioda, GaAs FET přepínač, MEMs přepínač, přepínání pracovních pásem, modelování.

Abstract

This thesis deals with modeling and produce of reconfigurable multi-band planar antennas, which allow electrical shifting of frequency band. After antennas simulation with PIN diode and FET switch in a commercial program CST MW, another step is to optimize the antenna for a new substrate. The next step was to produce antennas. Finally, the optimized antennas are compared with the measurement on experimental antennas.

Keywords

Reconfigurable multi-band planar antenna, active devices, PIN diode, GaAs FET switch, MEMs switch, shifting bands, modeling.

Bibliografická citace

HAVLÍN, R. *Rekonfigurovatelná vícepásmová anténa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 63 s. Vedoucí diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

Prohlášení

Jako autor diplomové práce na téma Rekonfigurovatelná vícepásmová anténa dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 20. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne 20. května 2011

.....
podpis autora

OBSAH

| | |
|---|------------|
| Obsah | iii |
| Úvod | 1 |
| 1 Flíčkové planární antény | 3 |
| 1.1 Ladění frekvenčních pásem planárních antén | 3 |
| 1.1.1 Ladění změnou struktury | 4 |
| 1.1.2 Ladění přidáním aktivních prvků | 4 |
| 1.2 Planární invertovaná F-anténa | 5 |
| 2 Rekonfigurovatelná vícepásmová anténa pro mobilní zařízení | 6 |
| 2.1 Frekvenční pásma antén | 6 |
| 2.1.1 GSM 850 / GSM 900 | 6 |
| 2.1.2 GPS | 7 |
| 2.1.3 DCS / PCS | 7 |
| 2.1.4 UMTS | 7 |
| 2.1.5 WLAN | 7 |
| 2.1.6 Bluetooth | 7 |
| 2.2 Model založený na přepínání napájení | 8 |
| 2.3 Model založený na připínání zemní plochy | 13 |
| 3 Aktivní prvky pro přepínání | 17 |
| 3.1 PIN dioda | 17 |
| 3.2 GaAs FET přepínač | 18 |
| 3.3 MEMS přepínač | 19 |
| 4 Optimalizace | 20 |
| 4.1 Optimalizace antény PN | 20 |
| 4.2 Optimalizace antény PZ | 26 |
| 5 Výroba a měření | 34 |
| 5.1 Výroba | 34 |
| 5.2 Princip ověření přizpůsobení antén | 37 |
| 5.3 Princip ověření směrových charakteristik | 37 |
| 5.4 Výsledky měření | 39 |
| 5.4.1 Anténa s přepínáním napájení | 39 |
| 5.4.2 Anténa s připínáním zemní plochy | 41 |

| | | |
|----------------------------------|--|-----------|
| 5.5 | Srovnání simulace a měření | 42 |
| 5.5.1 | Anténa s přepínáním napájení | 42 |
| 5.5.2 | Anténa s připínáním zemní plochy | 43 |
| Závěr | | 46 |
| Seznam obrázků | | 48 |
| Seznam tabulek | | 50 |
| Seznam použité literatury | | 51 |
| Seznam zkratk a symbolů | | 53 |
| Seznam příloh | | 54 |

ÚVOD

Anténu můžeme jednoduše definovat jako zařízení, sloužící k vysílání a přijímání radiových vln, které efektivně převádí elektrickou energii na elektromagnetické vlny při vysílání a naopak při přijímání. Uvnitř anténní struktury se šíří střídavý proud, který má za následek elektromagnetické vlny.

Planární antény svoji jednoduchostí a využitelností patří dnes mezi nejpoužívanější typy antén. V dnešní době si uživatel mobilního zařízení nevystačí pouze s komunikací v telefonním pásmu GSM, ve velkém se také rozvíjejí datové přenosy. Proto vznikají PIFA antény, které umožní zařízení pracovat ve více frekvenčních pásmech. Tato práce se právě takovými anténami zabývá. Konkrétně simulací dvou rekonfigurovatelných vícepásmových antén, využívajících moderní techniky přepínání aktivního frekvenčního pásma. Tyto antény nacházejí využití hlavně v mobilních zařízeních, která vyžadují vícepásmové použití a také minimální rozměry antén. S tím související mobilita zařízení. Konkrétně půjde o simulaci dvou antén využívajících přepínání napájení do různých míst zářiče, pomocí PIN diody a připojení nebo rozpojení zemnicí plochy pomocí FET přepínače. Při samotné realizaci antén je možné přepínací aktivní prvky kombinovat. Při realizaci bude zvolen jako aktivní prvek GaAs FET přepínač, který vyžaduje pouze připojení ovládacího napětí na patřičné piny.

Jako programové vybavení pro simulace posloužil komerčně dostupný software CST (Computer Simulation Technology). Konkrétně pak jeho podprogram CST Microwave studio založený na ACIS modelovacím jádře, umožňující modelování planárních mikrovlnných struktur. CST MW nabízí oproti své konkurenci řadu výhod. Jednou z nich může být parametrické modelování, kdy pouhou změnou jednoho parametru dochází k přepočtu a překreslení celé struktury. Otestován byl i program ANSOFT designer, ovšem výsledky byly nedostačující. V tomto programu se jednoduchým způsobem nepovedlo namodelovat části antény (flíček i zemnicí plocha), nacházející se na jedné straně dielektrické podložky. Vyzkoušena byla také možnost, kdy se zářič antény nacházel na jedné straně substrátu a zemní plocha na straně druhé. Výsledky však byly naprosto odlišné.

Práce je rozdělena do několika hlavních kapitol, ve kterých se čtenář seznámí se základní strukturou flíčkových planárních antén a způsobu, jakým mohou být tyto antény napájeny. Dále s možnostmi ladění frekvenční charakteristiky a zmíněny budou hlavně ty, které samotné vypracování vyžaduje. Seznámení se s vlastnostmi PIFA antén, jaké jsou jejich výhody a nevýhody společně s typickým modelem těchto antén. V další kapitole budou zobrazeny a diskutovány výsledky jednotlivých simulací, řešení jednotlivých problémů při simulaci apod. Následuje kapitola o popisu využití aktivních prvků, využívaných k elektrickému přepínání vlastností antény a tím i změna využitelného pásma antény.

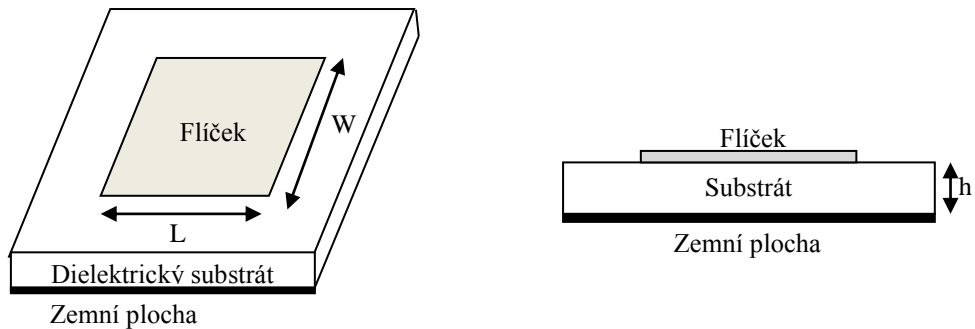
Další kapitola je věnována optimalizaci antén pro nově zadaný substrát, kde bude nutné nalézt optimální rozměry antén tak, aby se co nejvíce přiblížily vlastnostem antén původních. K tomu lze využít např. optimalizaci nebo parametrickou analýzou

programu CST MW. K tomu bude využito rozložení elektrického pole v anténní struktuře, odkud bude zřejmé, který parametr měnit. Tato možnost se jeví jako nejefektivnější, protože ne každý disponuje kvalitním výpočetním výkonem (v závislosti na počtu dílků na vlnovou délku, čím vyšší počet tím přesnější výpočet), který je při optimalizaci využíván v programu vyžadován. Při optimalizaci bude zjištěn fakt, že pouhou změnou materiálu o větší tloušťce dochází k zeslabení a posunutí frekvenčních pásem a tím i účinnosti antén společně s využitelností na potřebných pásmech.

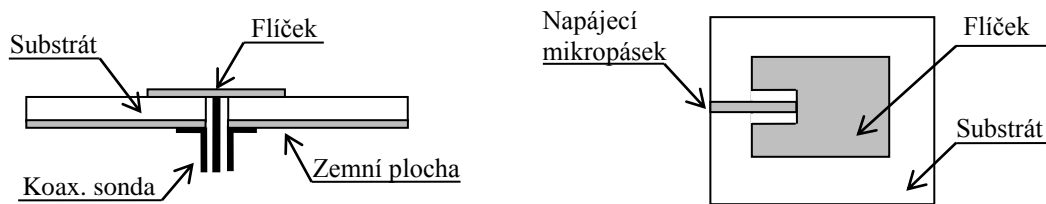
V poslední části práce je nutno se zabývat samotnou výrobou simulovaných antén a provést jejich dostupná měření, která ověří simulované hodnoty. Toto ověření bude provedeno na charakteristice modulu činitele odrazu na vstupu antény a směrových vyzařovacích diagramech. Dále jsou součástí výsledky měření na experimentálních anténách a jejich diskuse. Následně jsou tyto výsledky srovnány s měřením a provedena diskuse možnosti způsobených odchylek.

1 FLÍČKOVÉ PLANÁRNÍ ANTÉNY

Počátek planárních antén je znám již od roku 1953. Antény jsou vyráběny formou tištěného spoje na tenkém dielektrickém substrátu o tloušťce h , tyto antény jsou též známy pod názvem mikropáskové. Rozměr flíčku je zpravidla volen $\lambda/2 \times \lambda/2$ až také $\lambda/3 \times \lambda/3$. Permittivita používaných substrátů se pohybuje v rozmezí $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Na jedné straně substrátu, se nachází pokovená část antény tzv. flíček, na straně druhé pokovená plocha, která funguje jako zemnicí a slouží jako reflektor. Na obr. 1.1 je zobrazena planární anténa a pohled na ní z boku. Nevýhodou těchto antén je jejich použitelnost v limitovaném pásmu. Napájení antén může být realizováno koaxiální sondou, mikropáskovým vedením nebo napájením aperturovým. Nejpoužívanější typy napájení jsou uvedeny na obr. 1.2, jedná se o napájení koaxiální sondou a mikropáskovým vedením.



Obr. 1.1 Flíčková planární anténa s bočním pohledem [5].



Obr. 1.2 a) Napájení koaxiálním kabelem

b) napájení pomocí mikropásku [5].

1.1 Ladění frekvenčních pásem planárních antén

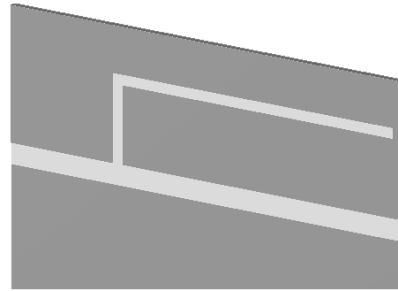
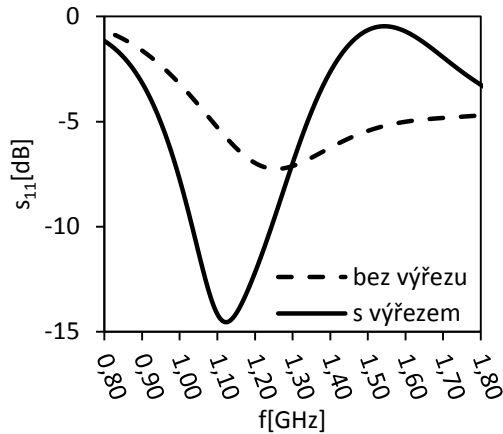
U planárních antén lze úzkopásmovost a velikost rezonanční frekvence vylepšit následujícími základními ladícími technikami.

1.1.1 Ladění změnou struktury

Přidáním pahýlů – flíček je na okrajích doplněn o malé výstupky.

Zkratováním – zářič zkratujeme se zemní plochou pomocí pinů. Polohou a velikostí ladíme výslednou charakteristiku.

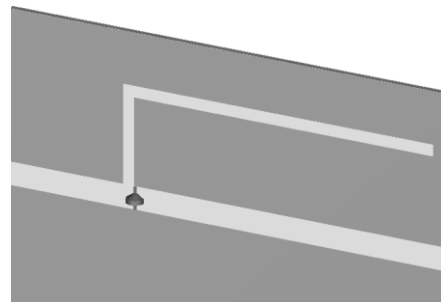
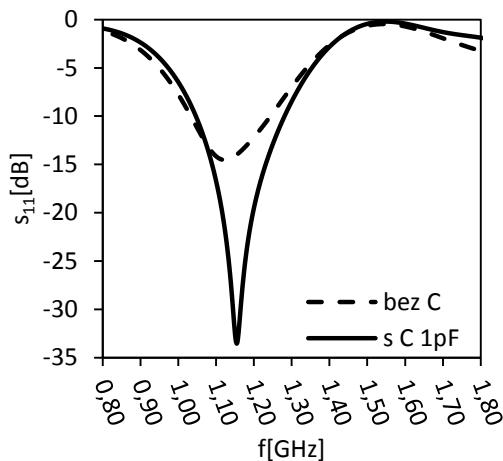
Výřezem – tvarem a velikostí výřezu.



Obr. 1.3 Přizpůsobení charakteristiky výřezem tvaru L ve flíčku. Modelováno v CST.

Vzduchovou mezerou – mezi zemní plochou a zářičem vytvoříme vzduchovou mezeru.

Přidáním parazitních prvků – přidáním přizpůsobovací kapacity můžeme výrazně ovlivnit použitelné pásmo antény a velikost modulu činitele odrazu.



Obr. 1.4 Přizpůsobení přidáním parazitních prvků, umístění kapacity 1 pF mezi zemní plochu a flíček. Modelováno v CST.

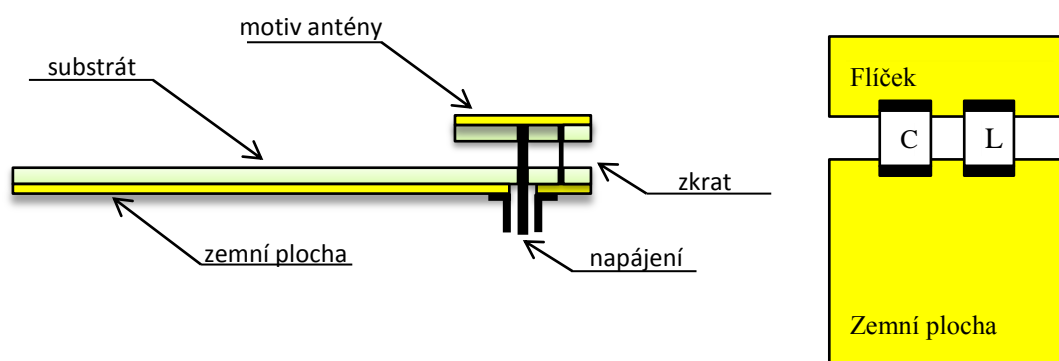
1.1.2 Ladění přidáním aktivních prvků

Zařazením PIN diody – PIN dioda přepíná napájení do různých míst zářiče, využití je možné také při přepínání polarizace.

FET přepínač – k zářiči připojíme další části antény.

1.2 Planární invertovaná F-anténa

Planární invertovaná F-anténa, dále PIFA, je speciálním druhem planárních antén, kdy je anténní prvek flíček, obvykle tvaru obdélníku vyvýšen nad zemní plochou. Výřez tvaru L přizpůsobuje tvar frekvenční charakteristiky a její rezonanční frekvence. Anténa je zpravidla napájena koaxiální sondou připojenou na napájecí pin, který spojuje flíček se zemní plochou. Aby PIFA antény nedosahovaly velkých rozměrů, je jejich fyzická délka prodloužena pomocí zkratovacích pinů, které jsou v určitých místech flíčku spojeny se zemí. Hlavní výhody PIFA antén, kvůli kterým se vyrábějí, jsou velmi nízké náklady. Nejdražším materiálem je samotný dielektrický substrát. Další výhodou těchto antén je jejich vícepásmové použití, kdy anténa zpravidla rezonuje na více než jednom kmitočtu. Toho je dosaženo vhodným výběrem pozice zkratovacích pinů, výřezem nebo také přidáním parazitních prvků. Antény jsou vhodné pro kmitočtová pásma od stovek megahertzů po desítky gigahertzů. PIFA antény se hojně využívají v mobilních zařízeních, kde jsou tato pásma požadována. Typický model PIFA antény je na obr. 1.5a, kde je pokovena spodní část substrátu, která zde plní funkci zemní plochy antény. Nad základnou PIFA antény je vyvýšen samotný flíček antény, který se stejně jako zemní plocha nachází na dielektrické podložce. Prostor mezi zemní plochou a samotným zářičem obklopuje vzduchový dielektrický prostor. Na obr. 1.5b je pak zobrazena struktura PIFA antény využívající SMD čipy ve formě kapacity a indukce.

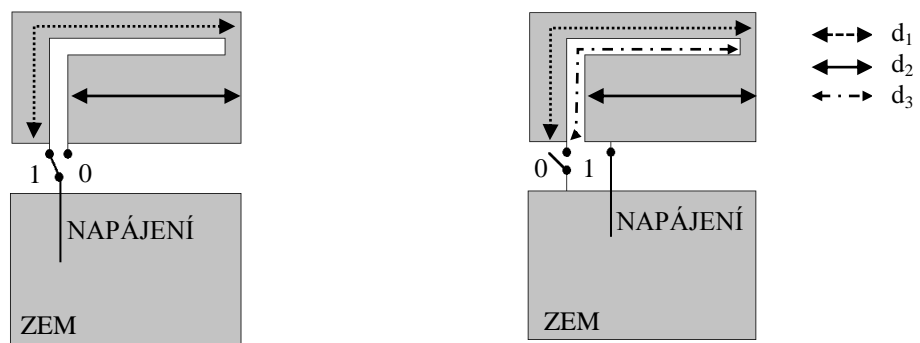


Obr. 1.5 a) Typická realizace PIFA antén, b) realizace pomocí SMD čipů [5].

| | |
|--|---|
| Výhody: <ul style="list-style-type: none">▪ malé rozměry▪ snadná výroba▪ jednoduché napájení▪ možnosti přizpůsobení▪ použití ve více pásmech▪ cena | Nevýhody: <ul style="list-style-type: none">▪ složitý návrh▪ malá výkonová zatížitelnost▪ vyzařovací charakteristika▪ malý zisk |
|--|---|

2 REKONFIGUROVATELNÁ VÍCEPÁSMOVÁ ANTÉNA PRO MOBILNÍ ZAŘÍZENÍ

Při konstrukci antén pro mobilní zařízení je kladen důraz hlavně na její rozměry, náklady a použitelnost v různých kmitočtových pásmech. Planární invertovaná F-anténa splňuje tyto požadavky, proto se hojně v těchto zařízeních využívá. Malých rozměrů antény je dosaženo použitím parazitních prvků, které prodlužují fyzickou délku PIFA antény. Přidáním parazitních prvků vytváříme také rezonanci na jistém kmitočtu, čímž splňujeme další z požadavků. Abychom mohli anténu využívat ve více pásmech, využívá se tzv. elektrického přepínání. První technika spočívá ve změně efektivní délky antény pomocí PIN diody, která je umístěna mezi dvěma vyzařujícími prvky ve flíčku. Použitím PIN diody tak měníme pozici napájení zářiče a tím dochází ke změně použitelného pásma. Další z používaných technik je připojení nebo odpojení jiných anténních prvků. V našem případě půjde o připojení nebo rozpojení plochy zemní desky od anténního prvku pomocí GaAs FET nebo MEMS přepínače. Jistou nevýhodou PIFA antén může být již zmiňovaný malý zisk. Simulovaná anténa je napájena koaxiálním kabelem, kdy je vnitřní vodič přiveden na flíček samotné antény a vnější vodič kabelu připojen k zemní ploše. Způsob, kterým je řešeno napájení, je nutný proto, že se flíček i zem nacházejí na stejné straně substrátu. Odpadá tak vedení napájení skrz substrát (s tím spojené vrtání substrátu) a tím dosáhneme i menších rozměrů. Princip obou modelů je schematicky znázorněn na obr. 2.1a, kde se využívá PIN dioda a na obr. 2.1b, kde je využit FET přepínač. Funkci PIN diody lze nahradit FET přepínačem a naopak.



Obr. 2.1 a) Přepínání napájení

b) Připojení, rozpojení země [3].

2.1 Frekvenční pásma antén

2.1.1 GSM 850 / GSM 900

Globální Systém Mobilní komunikace dnes, hojně využívaný pro digitální přenos hovorových služeb, společně se signalizačními službami. GSM kanál může být doplněn o datový přenos. Zásadní rozdíl mezi GSM 850 a GSM 900 spočívá v použité frekvenci, evropské státy používají systém GSM 900. Většina moderních mobilních přístrojů je schopna přijímat i vysílat na GSM 850 / GSM 900.

2.1.2 GPS

Globální Poziční Systém, umožňující navigaci pomocí majáků (pozemní) nebo družic. Komunikace probíhá mezi družicí – radiovým GPS přijímačem, kdy GPS přijímač na základě přijatých signálů z družice (3 družice pro určení polohy, 1 měření vzdálenosti družice – přijímač, odpadá tak nutnost dokonalé synchronizace času) stanoví polohu. Přesnost polohy závisí na rozmístění družic a záměrně vnášené chybě, která se v dnešní době již nepoužívá.

2.1.3 DCS / PCS

Jsou často označovány jako DCS 1800 a PCS 1900. Jedná se o nadstavby systému GSM. Hlavní výhodou je rozšíření kapacity GSM kanálu. Stejně jako GSM 850 / 900 se v každé zemi používá DCS nebo PCS, v Evropě pak DCS.

2.1.4 UMTS

Mobilní systém třetí generace, který výrazně navyšuje přenosové rychlosti. Je nástupcem sítě GSM. Pro přístup více uživatelů používá kódové dělení CDMA (kdy jednotliví uživatelé jsou odděleni od sebe kódem), společně s CDMA je možno využít kombinaci CDMA + TDMA (časové dělení) a CDMA + FDMA. Mobilní operátoři jej využívají pro velké datové přenosy.

2.1.5 WLAN

Bezdrátový přenos dat v pásmu 2,4 GHz. Dosah sítě WLAN se udává do 1 kilometru. Dle přenosové rychlosti a vysílacího výkonu se WLAN síť dělí do několika pásem. Pro ISM pásmo 2,4 GHz je to pásmo a.

2.1.6 Bluetooth

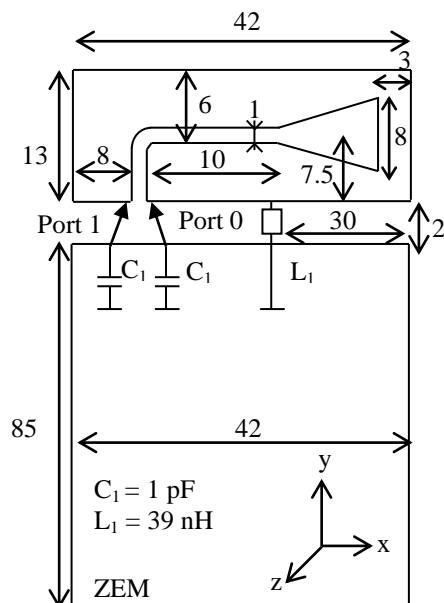
Bezdrátová výměna dat mezi stanicemi na vzdálenosti 1 - 100 metrů. Dosahu 100 metrů má být dosaženo nově vzniklým standardem Bluetooth 4.0, který slibuje přenosové rychlosti více jak 20 Mbps . K přenosu se využívá frekvenčních skoků, což má za následek větší odolnost proti rušení. Komunikace Bluetooth je uskutečňována na stejných frekvencích, jako WLAN. Tab. 2.1 zobrazuje uplink i downlink pro každé pásmo.

| Pásmo | Frekvence [MHz] |
|--------------|------------------------|
| GSM 850 | 824 – 894 |
| GSM 900 | 880 – 960 |
| GPS | 1575 |
| DCS | 1710 – 1880 |
| PCS | 1850 – 1990 |
| UMTS | 1920 – 2170 |
| WLAN | 2400 – 2484 |
| Bluetooth | 2400 – 2484 |

Tab. 2.1 Jednotlivá pásma a frekvence [9].

2.2 Model založený na přepínání napájení

Rekonfigurovatelná anténa založená na principu přepínání napájení je tvořena flíčkem s výřezem ve tvaru L, zemní plochou a aktivním přepínacím prvkem, který přepíná pozici napájení a tím mění efektivní délku antény. Tím se mění i jednotlivá pásma. Anténní prvek o velikosti $42 \times 13 \text{ mm}^2$ je umístěn na substrátu Roger 4003 o relativní permitivitě 3,55 s rozměry $42 \times 100 \times 0,508 \text{ mm}^3$. Detailní rozměry antény jsou uvedeny na obr. 2.2a. Výřez speciálního tvaru je zde pro vyladění charakteristiky. Anténa pracuje ve dvou režimech a výběr režimu se provádí pomocí aktivního prvku, který vybírá mezi dvěma napájecími porty. Je-li aktivní mód 0 tj. napájení je připojeno k portu 0, využitelná pásma jsou GSM 850, GSM 900 a DCS. Naopak, je-li aktivní mód 1, je umožněno pracovat v pásmu GSM 900, PCS a UMTS. Parazitní prvek L_1 je zde použit pro přizpůsobení rezonančních frekvencí, to se děje úpravou impedance antény. Anténa je tedy schopna pracovat v pásmu GSM 850, GSM 900, DCS, PCS a UMTS. Veškeré simulace byly prováděny v programu CST. Na obr. 2.2b je zobrazen simulační model.



Obr. 2.2 a) Rozměry designu PN



b) Simulační model PN

Vztah pro stanovení jednotlivých frekvencí v módu 0 a v módu 1 [3]:

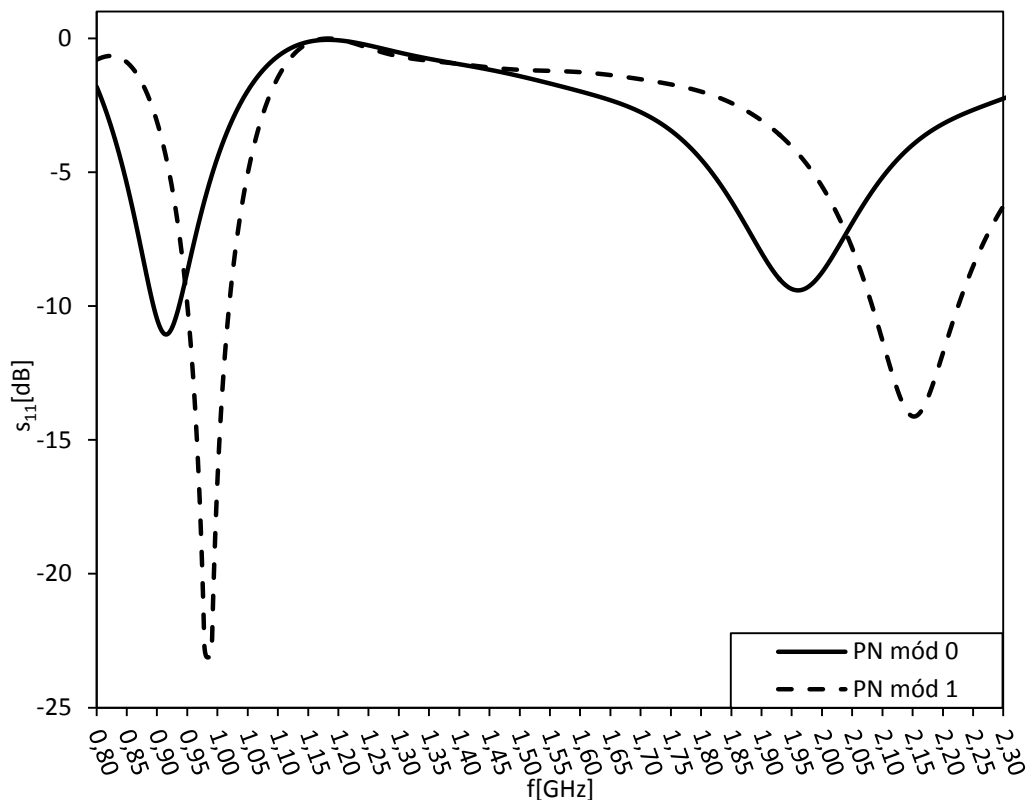
$$f_{1\text{napájení}} = \frac{c}{4 \cdot (d_1 + d_2 + \Delta L_1)} \quad (1)$$

$$f_{2\text{napájení}} = \frac{c}{4 \cdot (d_2 + \Delta L_2)} \quad (2)$$

$$f_{2\text{napájení}} = \frac{c}{4 \cdot (d_1 + d_2 + \Delta L_3)} \quad (3)$$

kde c značí rychlost světla, d_1 a d_2 jsou délky antény v módu 0 nebo 1, ΔL_1 , ΔL_2 a ΔL_3 jsou prodloužené délky pomocí parazitních prvků (kapacita, indukce).

Do simulace není možné v programu CST Studio vkládat aktivní prvky. Při simulaci je proto na místo aktivního přepínacího prvku využito manuálního připojení napájení k portu 0 nebo portu 1, pomocí diskretního portu o impedanci 50Ω . Tuto charakteristickou impedanci volíme z důvodu, aby nedocházelo k odrazům na samotném konektoru, ale až uvnitř anténní struktury. Diskretní port řeší problém anténního prvku a zemní plochy na stejné straně substrátu, kdy není možné jednoduchým způsobem zapojit do simulace napájení - koaxiální sondu. Mezi anténní prvek a zem je kromě napájecího prvku do série zařazena kapacita o velikosti 1 pF. Tato kapacita přizpůsobuje hloubku rezonance a zlepšuje účinnost antény. Tloušťka mědi, která představuje v simulaci pokovení substrátu je zvolena 0,035 mm. U antén je požadován poměr stojatých vln alespoň 2 (-10 dB), jinak má anténa na daném kmitočtu menší účinnost.



Obr. 2.3 Činitel odrazu s_{11} pro model PN v jednotlivých módech. Počítáno v CST.

Na obr. 2.3 je znázorněn průběh činitele odrazu na vstupu v závislosti na frekvenci, simulované grafy se s [3] přibližně shodují. Nepatrné rozdíly mohou být způsobeny samotnou simulací a volbou jemnosti výpočtu. Změna počtu buněk je ovšem lineárně závislá na čase potřebném k výpočtu. Následují směrové charakteristiky antény na daných frekvencích v módu 0 a módu 1, obr. 2.4. Kde θ - *theta* představuje vyzářovací charakteristiku vertikální a φ - *phi* horizontální. Celkové vyzářované pole

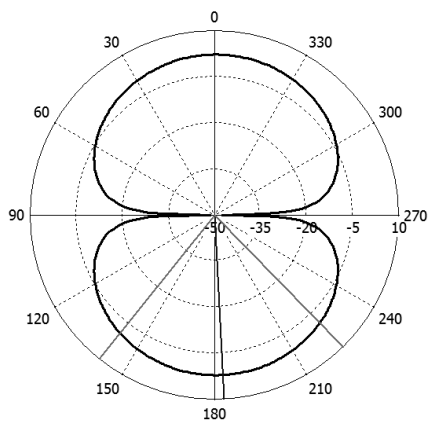
znázorněné 3D grafem je určeno příspěvky všech polarizací (*Theta*, *Phi*, pravotočivé a levotočivé kruhové polarizace). Rovina E je vyjádřena pomocí *Theta* a rovina H pomocí *Phi* charakteristiky. Vyzařovací diagramy jsou zobrazeny v dBi, jednotka dB vztažena k izotropnímu zářiči. Vyzařovací rovina E je v simulacích volena jako y osa motivu a rovina H jako x osa.

Komerčně dostupný program CST Microwave Studio nabízí celou řadu možností nastavení, která ovlivňují samotnou přesnost výsledných charakteristik. Pro veškeré simulace byly zvoleny okrajové podmínky “boundaries” jako otevřené s přidáním prostoru. To značí, že kolem celé antény se nachází další volný prostor. Toto je vhodné hlavně pro výpočet směrových charakteristik antén. Další z parametrů, který výrazně ovlivňuje přesnost simulací, je počet dílků na vlnovou délku a tzv. přesnost vyzáření. Jakmile dojde ke snížení energie uvnitř struktury na zadanou hodnotu, simulace se ukončí a výsledky budou prezentovány. O nastavení jednotlivých parametrů simulací vypovídá tab. 2.2.

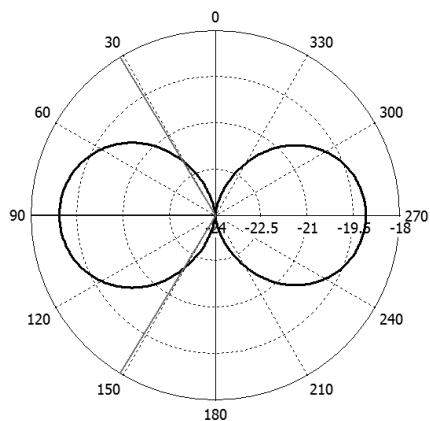
| Parametr | Hodnota |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Typ buzení | Diskrétní port (50 Ω) |
| Okrajové podmínky | Open (add space) |
| Počet dílků na vlnovou délku | 50 dílků |
| Typ sítě buněk | Hexahedral |
| Vyzáření energie uvnitř struktury | -60 dB |

Tab. 2.2 Parametry simulací v programu CST.

Motiv antény je řešen parametricky, čili při jakékoliv změně postačí změnit jednu hodnotu a automaticky dochází k překreslení celého motivu. Jako materiál pozadí antény (volný prostor) je zvolen vzduch o permitivitě 1.



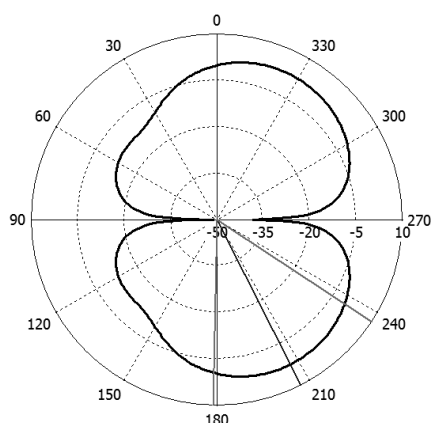
Theta / Degree vs. dBi



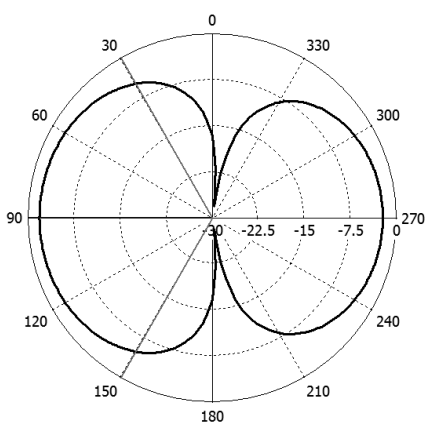
Theta / Degree vs. dBi

$f = 920 \text{ MHz}$ a) E rovina

b) H rovina



Theta / Degree vs. dBi

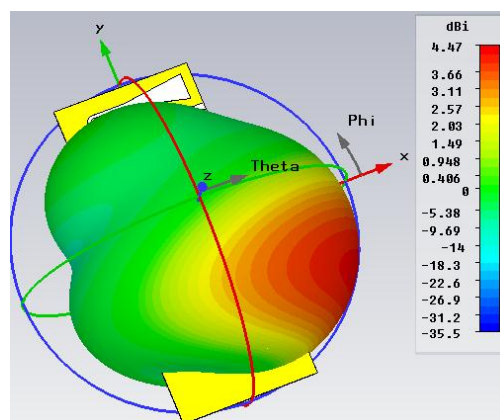
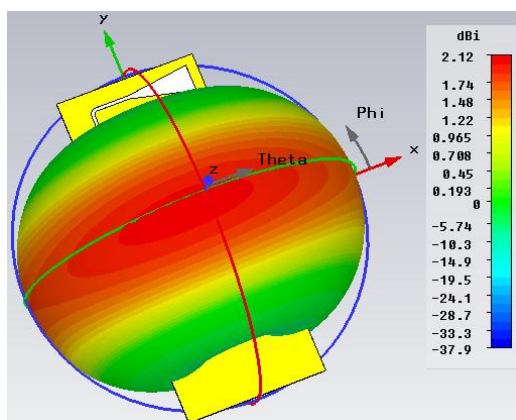


Theta / Degree vs. dBi

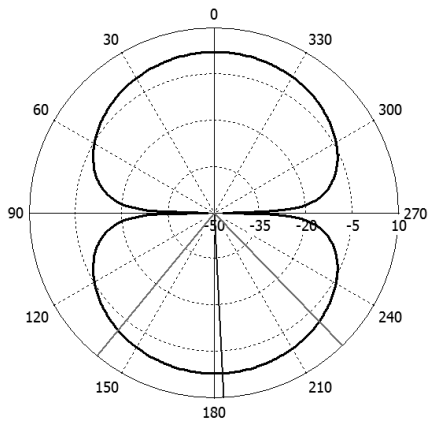
$f = 1800 \text{ MHz}$ c) E rovina

d) H rovina

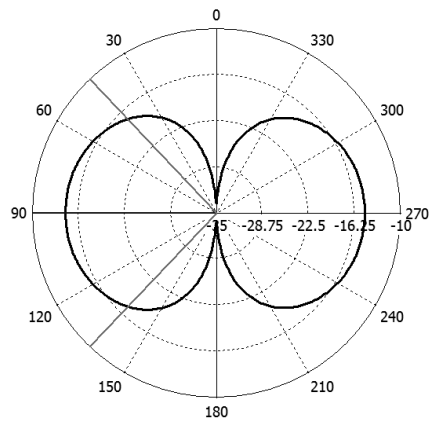
Obr. 2.4 Směrové charakteristiky PN mód 0 v polárním 1D grafu. Počítáno v CST.



Obr. 2.5 3D směrová charakteristika v CST - PN mód 0, a) 920 MHz, b) 1800 MHz.



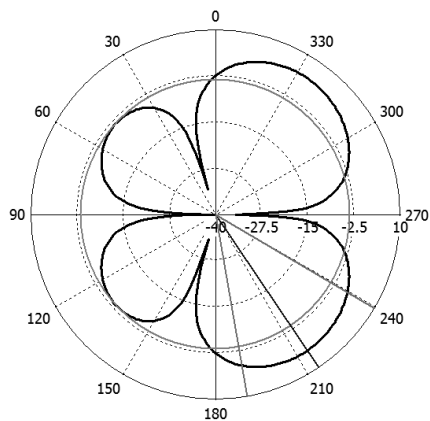
Theta / Degree vs. dBi



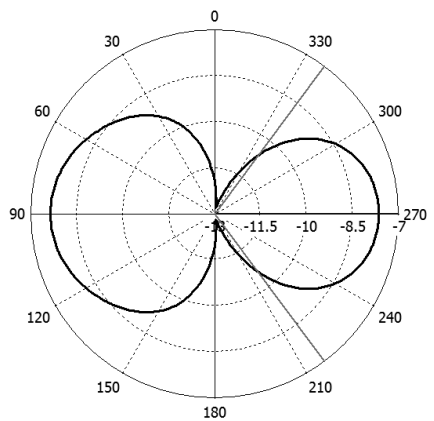
Theta / Degree vs. dBi

$f = 920$ MHz a) E rovina

b) H rovina



Theta / Degree vs. dBi

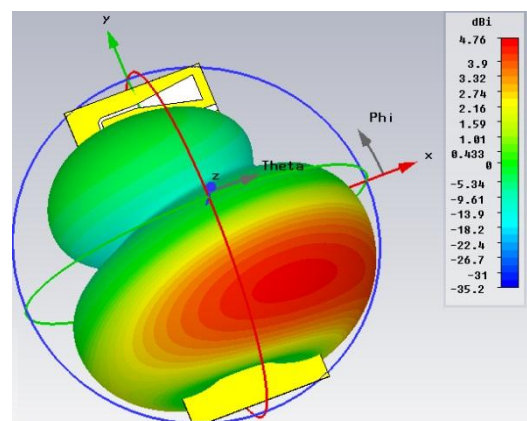
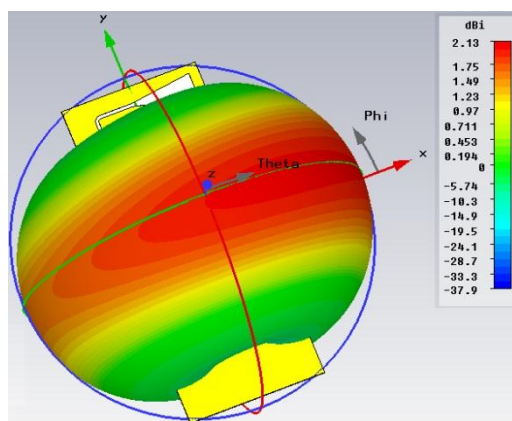


Theta / Degree vs. dBi

$f = 2050$ MHz c) E rovina

d) H rovina

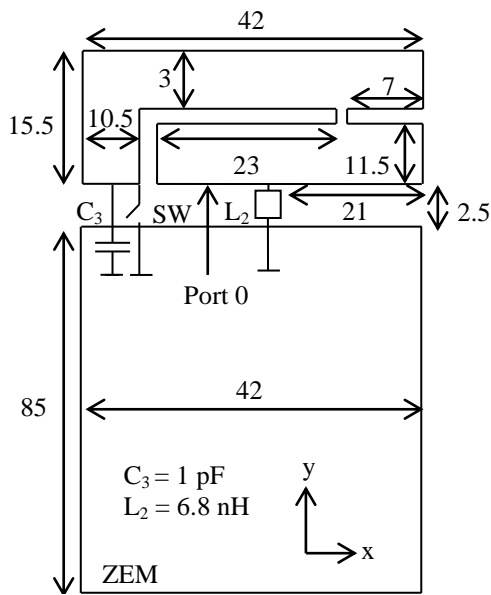
Obr. 2.6 Směrové charakteristiky PN mód 1 v polárním 1D grafu. Počítáno v CST.



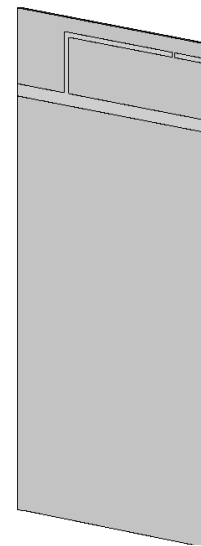
Obr. 2.7 3D směrová charakteristika v CST - PN mód 1, a) 920 MHz, b) 2050 MHz.

2.3 Model založený na připojení zemní plochy

Další z možností, jak měnit aktivní pásmo antény je připojení nebo odpojení plochy k flíčku pomocí aktivního prvku, jako aktivní prvek je zvolen FET přepínač. Anténa se skládá z anténního prvku, zemní plochy a aktivního přepínacího prvku, který provádí patřičné připojení nebo rozpojení. Anténa je umístěna opět na substrátu Roger 4003 o poměrně malých ztrátách. Prvek samotné antény o velikosti 42 x 15,5 mm² je umístěn na substrátu 42 x 103 x 0,508 mm³. Ve flíčku se nachází dva výřezy, které mají za úkol vyladit aktivní pásma antény. Tvar flíčku připomíná písmeno F. Výsledná anténa je schopna pracovat v pásmech GSM 850, GSM 900, DCS, PCS, UMTS a bezdrátové síti (tab. 2.1). Detailní rozměry antény jsou na obr. 2.8a a simulační model v programu CST na obr. 2.8b. Kapacita C_3 simuluje situaci při rozpojení GaAs FET přepínače. V případě, kdy je přepínač sepnut, je anténa zkratována se zemí a pracuje v módu 1, využitelná pásma pak jsou DCS, PCS, UMTS a bezdrátová síť WLAN. Je-li přepínač rozepnut, anténa pracuje v režimu 0, kdy můžeme využít GSM 850, GSM 900, DCS a PCS. V simulaci není možné realizovat aktivní přepínač, zemnicí plocha je proto manuálně připojena nebo rozpojena. Přídavná parazitní indukce doladuje další rezonanci.



Obr. 2.8 a) Rozměry designu PZ



b) Simulační model PZ.

Jednotlivá pracovní pásma jsou dána rovnicemi [3]:

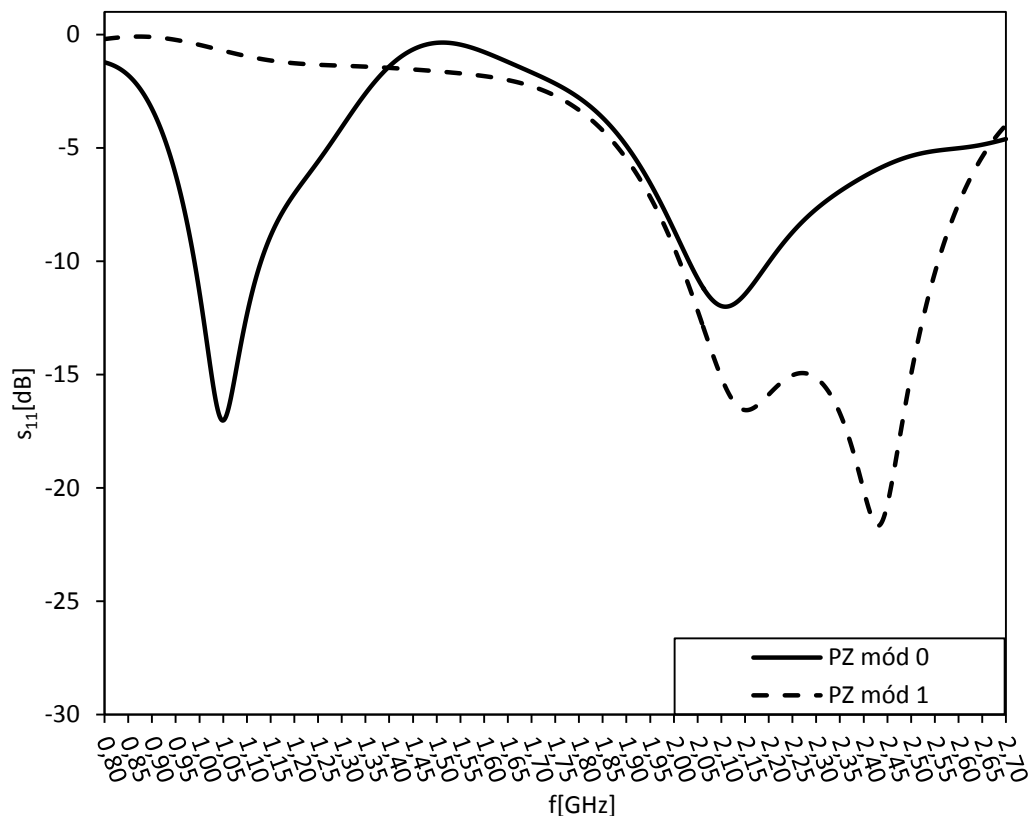
$$f_{1zem} = \frac{c}{4 \cdot (d_1 + d_2 + \Delta L_1)} \quad (4)$$

$$f_{2zem} = \frac{c}{4 \cdot (d_2 + \Delta L_2)} \quad (5)$$

$$f_{3zem} = \frac{c}{4 \cdot (d_3 + \Delta L_3)} \quad (6)$$

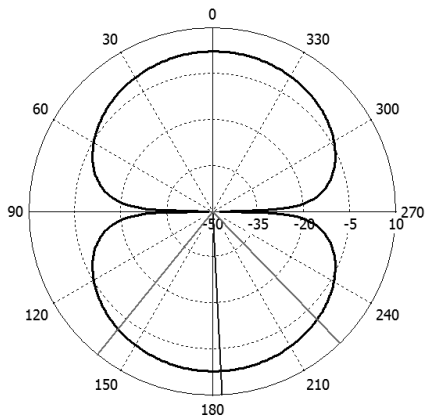
kde c značí rychlost světla, d_1 a d_2 jsou délky antény v módu 0 nebo 1, d_3 je délka výřezu, ΔL_1 , ΔL_2 a ΔL_3 jsou prodloužené délky pomocí parazitních prvků.

Napájení antény zajišťuje diskretní port s impedancí 50Ω , který je připojen mezi zemnicí desku a anténní prvek.

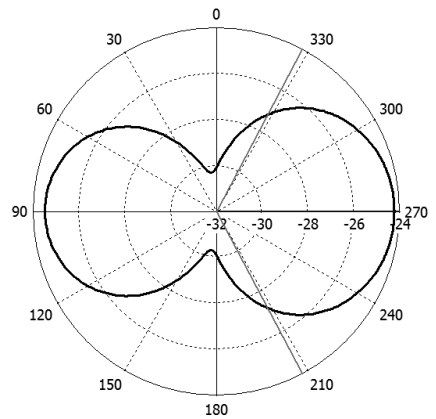


Obr. 2.9 Činitel odrazu s_{11} pro PZ v jednotlivých módech. Počítáno v CST.

Na obr. 2.9 je znázorněn průběh činitele odrazu na vstupu antény. Simulace v módu 1 se shoduje s [3], ovšem mód 0 má druhé pracovní pásmo mírně posunutě a činitel odrazu zde dosahuje vyšších hodnot. Na obr. 2.10 a obr. 2.12 následují vyzařovací charakteristiky antény v horizontálním (φ) a vertikálním (θ) směru. Celkově pak obr. 2.11, obr. 2.13 ve 3D grafu.



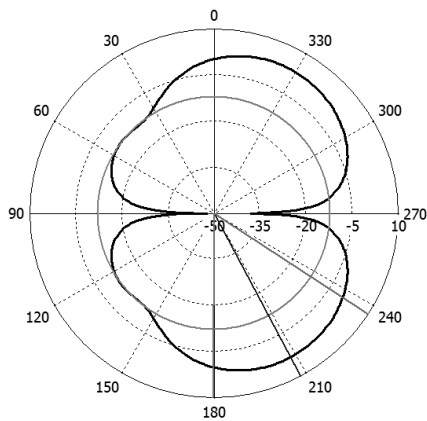
Theta / Degree vs. dBi



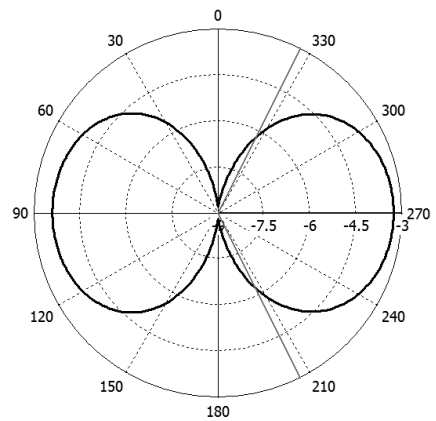
Theta / Degree vs. dBi

$f = 920$ MHz a) E rovina

b) H rovina



Theta / Degree vs. dBi

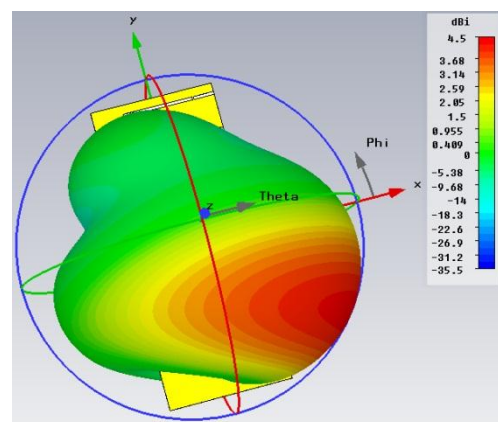
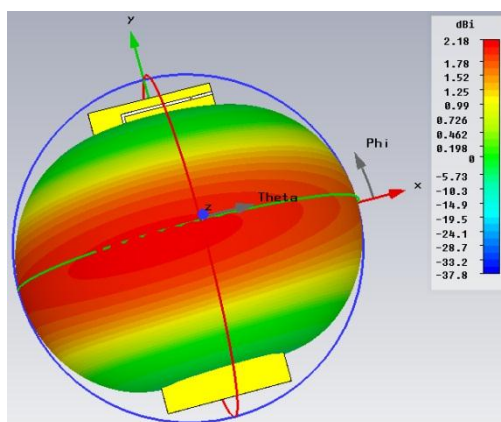


Theta / Degree vs. dBi

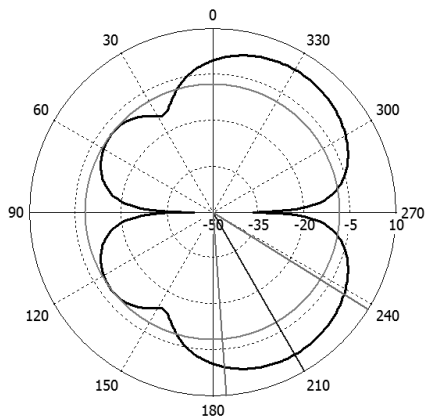
$f = 1800$ MHz c) E rovina

d) H rovina

Obr. 2.10 Směrové charakteristiky PZ mód 0 v polárním 1D grafu. Počítáno v CST.

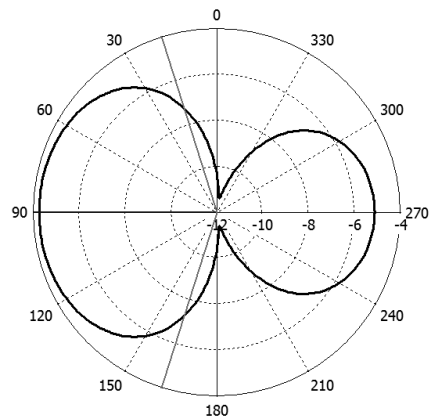


Obr. 2.11 3D směrová charakteristika v CST - PZ mód 0, a) 920 MHz, b) 1800 MHz.



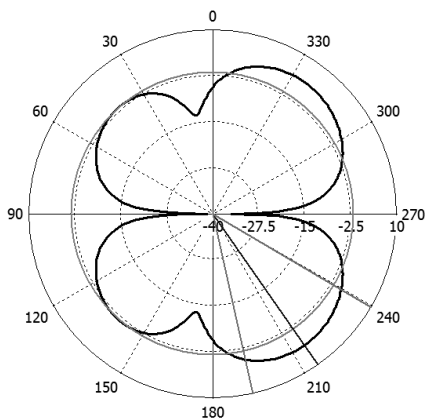
Theta / Degree vs. dBi

$f = 1900$ MHz a) E rovina



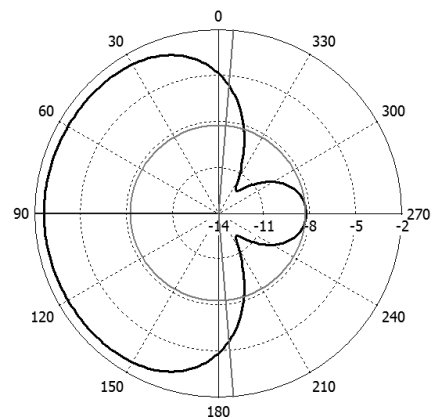
Theta / Degree vs. dBi

b) H rovina



Theta / Degree vs. dBi

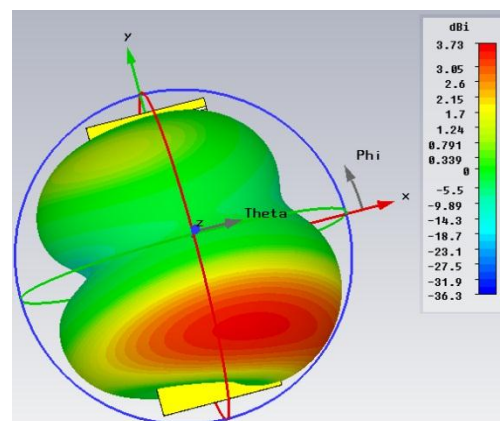
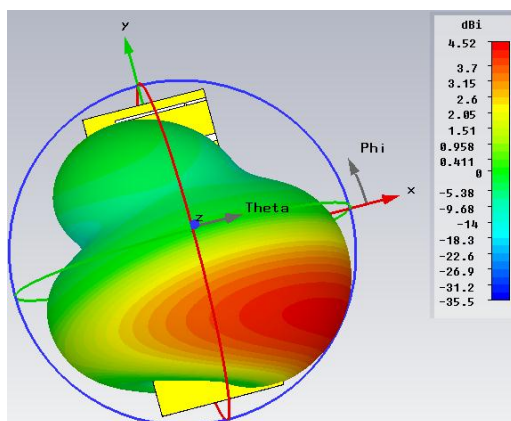
$f = 2300$ MHz c) E rovina



Theta / Degree vs. dBi

d) H rovina

Obr. 2.12 Směrové charakteristiky PZ mód 1 v polárním 1D grafu. Počítáno v CST.



Obr. 2.13 3D směrová charakteristika v CST - PZ mód 1, a) 1900 MHz, b) 2300 MHz.

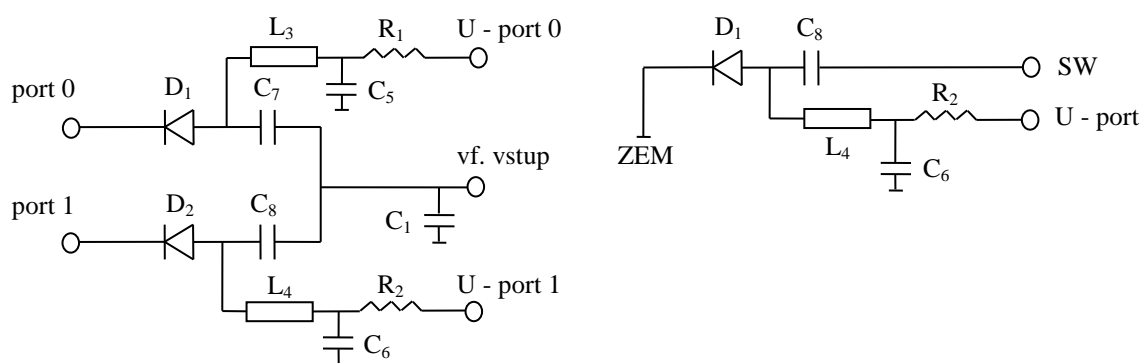
3 AKTIVNÍ PRVKY PRO PŘEPÍNÁNÍ

Používají se pro elektrické přepínání vlastností antény. Jejich vhodným umístěním a připojením lze dosáhnout více pracovních pásem antény. Níže jsou uvedeny tři základní způsoby přepínání pomocí aktivních prvků. Při konečné realizaci antén bude využito pouze PIN diody nebo GaAs FET přepínače.

- 1) PIN dioda (MPP4203 Microsemi)
- 2) GaAs FET přepínač (uPG2155TB NEC Semiconductor)
- 3) MEMS přepínač (TT712-68CSP TERA VICTA)

3.1 PIN dioda

PIN dioda má velmi malé pořizovací náklady a v simulaci ji můžeme nahradit soustředěnými prvky. Nevýhodou je skutečnost, že k fungování vyžaduje vlastní napájecí obvod. Schéma takového obvodu s přepínačem je zobrazeno na obr. 3.1 (vlevo pro zapojení PN, vpravo PZ).



Obr. 3.1 PIN dioda v zapojení PN a PZ [3].

Implementace PIN diody pro přepínání napájení je velice snadná. Pokud přivedeme na diodu kladné napětí z přídavného napájecího obvodu 3,3 V na U – port 0 a na U – port 1 bude 0 V, bude napájení propojeno na port 0, anténa tak bude pracovat na frekvencích módu 0. Naopak přivedeme-li na U – port 1 z obvodu o napětí 3,3 V a na U – port 0 napětí 0 V, dojde k propojení vysokofrekvenčního vstupu s portem 1 a anténa změní pracovní pásma na mód 1. Kapacity C_7 a C_8 jsou zde použity jako blokovací, jsou-li využity oddělovací kapacity C_5 a C_6 . Rezistory jsou zde, pro řízení napájení. D_1 a D_2 jsou již zmiňované diody firmy Microsemi. Kapacita C_1 ladí charakteristiku činitele odrazu na vstupu antény.

Při modelu připojení a rozpojení země závisí změna charakteristiky na napětí U – port. Bude-li na U – port přivedeno ovládací napětí z obvodu o velikosti 3,3 V bude SW zkratován se zemí, dojde tím tak k připojení zemní plochy k anténnímu prvku.

Bude-li toto napětí U – port rovno 0 V bude SW rozpojen. Kapacita C_8 blokuje stejnosměrnou složku při použití C_6 .

3.2 GaAs FET přepínač

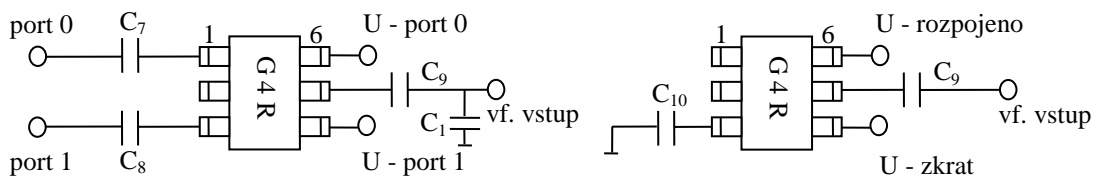
Jedná se o SPDT (Single Pole, Double Throw – jeden vstup a dva možné výstupy) přepínač, řízený elektrickým polem, který je vyroben ze sloučeniny Arsenid Galia. Hlavní výhodou polovodičů vyrobených z tohoto materiálu je zachování velmi malých rozměrů a využití na vysokých kmitočtech, možnost pracovat v pásmu milimetrových vln. Mezi největší nevýhody patří tepelně závislé parametry, drahý výchozí materiál Galium a s tím související drahá a složitá výroba polovodičových součástek. Oproti PIN diodě nevyžaduje GaAs FET přepínač speciální napájecí obvod. Stejně jako diodu můžeme i obvod s přepínačem snadno realizovat při simulaci, kdy manuálně zařadíme propojení při sepnutí. Opět využijeme soustředěných prvků pro emulaci aktivního prvku. Uvedený GaAs FET přepínač μ PG2155TB od firmy Renesas je speciálně vyroben pro užití v mobilních zařízeních. Pracuje v pásmu 500 MHz – 2,5 GHz s vysokou linearitou a malým vložitelným útlumem. Na frekvenci 1 GHz je vložitelný útlum udávaný výrobcem 0,35 dB a na 2 GHz pak 0,40 dB. Rozměry šesti pinového zařízení jsou 2,1 x 2,0 mm. Maximální možné napětí přivedené na ovládací piny součástky nesmí přesáhnout 5 V, hrozilo by zničení, neboť tyto součástky vydrží velmi malé napětí.

| Ovládací napětí | | Propojení | |
|-----------------|----------|-----------|-----------|
| U port 0 | U port 1 | RF1 - RF2 | RF1 - RF3 |
| H | L | ON | OFF |
| L | H | OFF | ON |

Tab. 3.1 Rozhodovací úrovně FET přepínače [3].

H – ovládací napětí 3,3 V,

L – ovládací napětí 0 V.



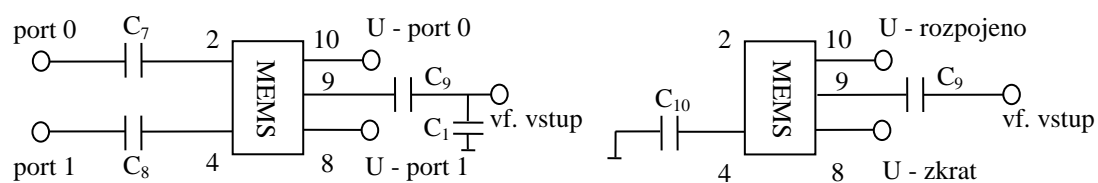
Obr. 3.2 GaAS FET přepínač v zapojení PN a PZ [3].

Na obr. 3.2 je FET přepínač zobrazen při využití v přepínání napájení vlevo a připojení zemní plochy vpravo. Princip je obdobný jako u PIN diody. Je-li na U-port 0 přivedena vyšší úroveň napětí, dojde ke změně napájecího místa na port 0. Řídící napětí je 3,3 V a 0 V. Pokud bude hodnota napětí U – rozpojeno vyšší úroveň napětí a U -zkrat nižší dochází k rozpojení přepínače a naopak. Kapacity na používaných pinech součástky,

slouží pro odstranění stejnosměrných proudů, které ovlivňují funkci antény, kde se vyskytují pouze proudy střídavé.

3.3 MEMS přepínač

Oproti PIN diodě a FET přepínači má MEMS přepínač velmi malé ztráty, pracuje ve velkém frekvenčním rozsahu a nevyžaduje speciální napájecí obvod. Nevýhodou je jeho cena. MEMS přepínač funguje na stejném principu jako FET přepínač. Ovládací napětí pro spínání je 68 V.



Obr. 3.3 MEMS přepínač v zapojení PN a PZ[3].

4 OPTIMALIZACE

Optimalizací rozumíme změnu stavových veličin (rozměrů) tak, abychom se co nejvíce přiblížili původním vlastnostem antény nebo je navíc zlepšili. Cílem optimalizace je přizpůsobit rozměry antény pro zadaný substrát Arlon 25N s hloubkou 1,54 mm. Rozdíly mezi substráty jsou následující:

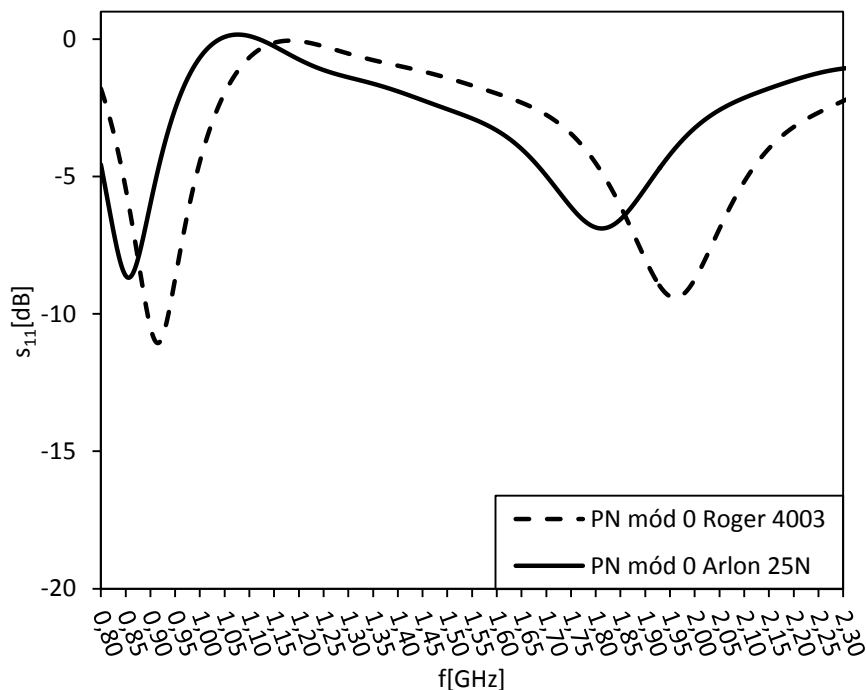
| Parametr | Typ | ϵ_r [-] | h [mm] | Rozptyl [-] |
|----------|------------|------------------|--------|-------------|
| Substrát | Roger 4003 | 3,38 | 0,508 | 0,0027 |
| | Arlon 25N | 3,38 | 1,54 | 0,0025 |

Tab. 4.1 Srovnání substrátů.

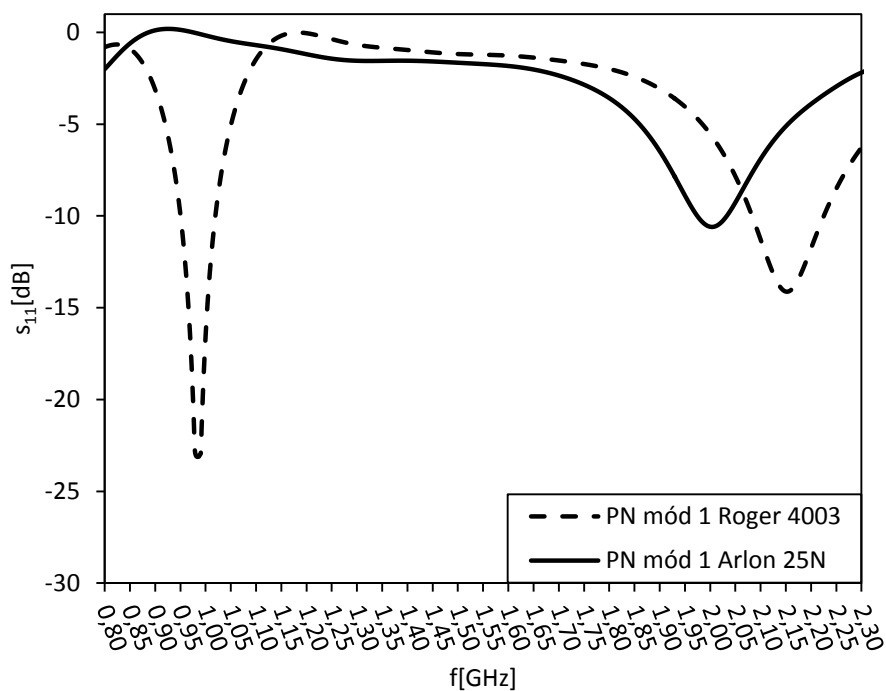
Podle tabulky bude mít na výsledná pásma antény největší vliv hloubka substrátu, která je u nového zhruba trojnásobná oproti předchozímu. Nevýhodou celé optimalizace je vzájemné ovlivňování, změna rozměrů v módu 0 se projeví i v módu 1.

4.1 Optimalizace antény PN

Při záměně substrátu dochází k posunutí jednotlivých pracovních pásem na nižší frekvence. Mění se i velikost činitele odrazu na vstupu antény a s tím spojená účinnost antény pracující v daných pásmech.

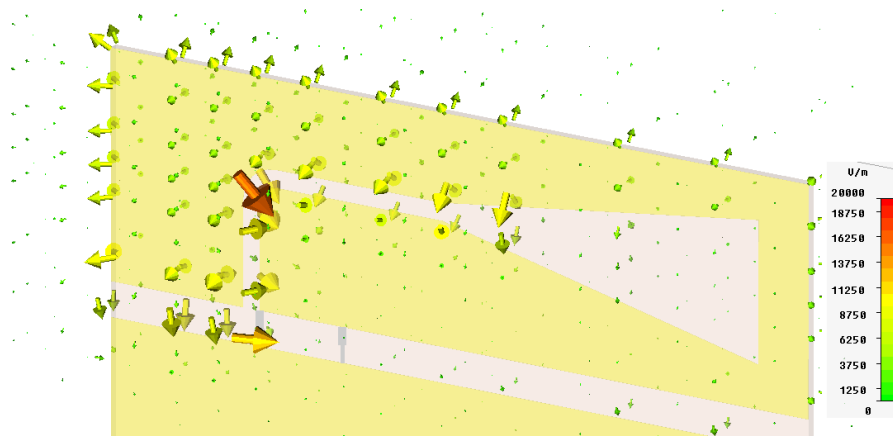


Obr. 4.1 Vliv změny substrátu na pracovní pásma antény PN mód 0. Počítáno v CST.

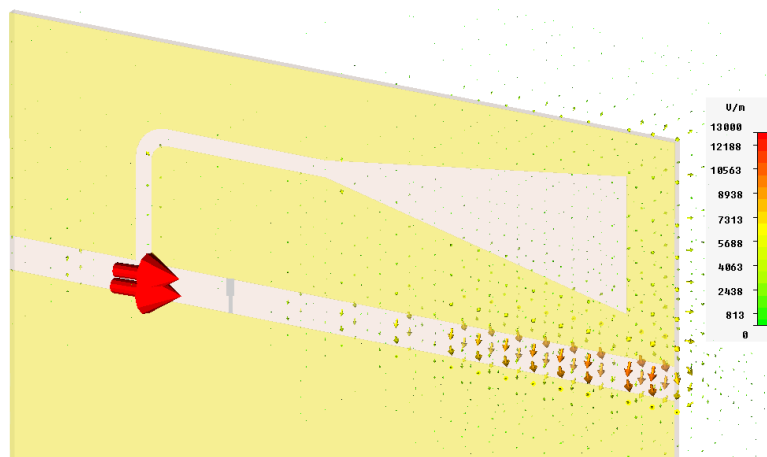


Obr. 4.2 Vliv změny substrátu na pracovní pásma antény PN mód 1. Počítáno v CST.

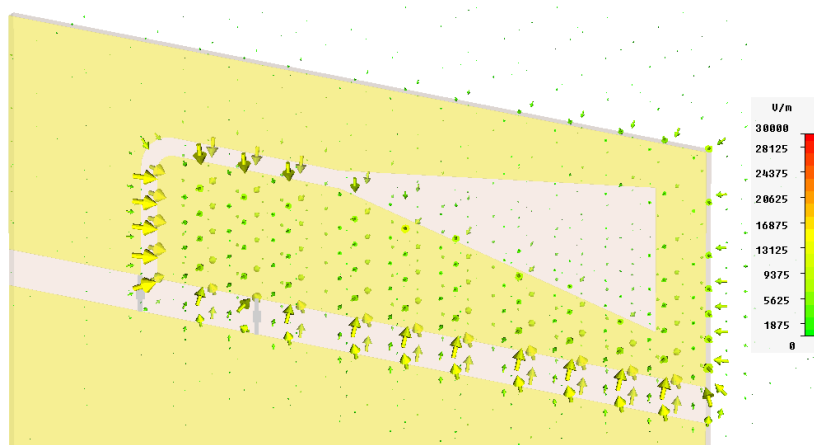
Rozměry antény je třeba v určitých místech zmenšit. Na obr. 4.3 až obr. 4.6 je zobrazeno elektrické pole ve flíčku na jednotlivých frekvencích. Velikost, tvar a pozice výřezu ve flíčku mají největší vliv na optimalizaci antény. Jemné vyladění je dodatečně možné změnou délek d_1 , d_2 (viz. kapitola 2). První rezonanci v módu 0 lze také ovlivnit pozicí indukčnosti, která bude realizována jako čip připojený mezi zemnicí plochou a flíčkem.



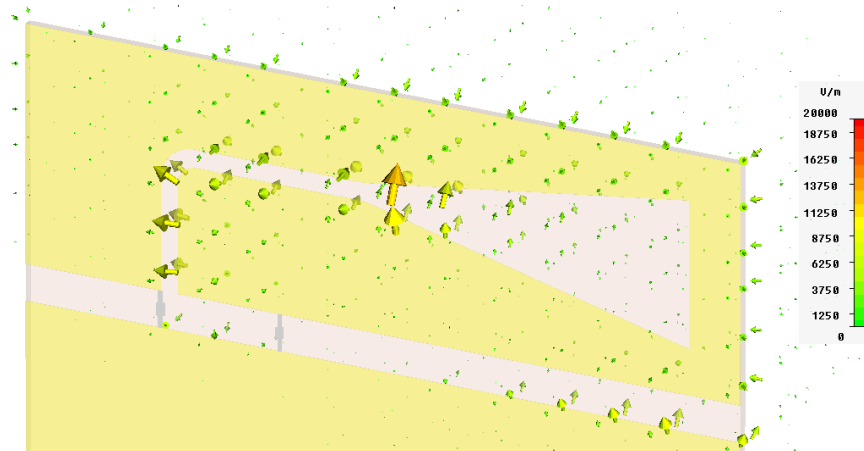
Obr. 4.3 Elektrické pole PN mód 0, frekvence 920 MHz. Počítáno v CST.



Obr. 4.4 Elektrické pole PN mód 0, frekvence 1900 MHz. Počítáno v CST.

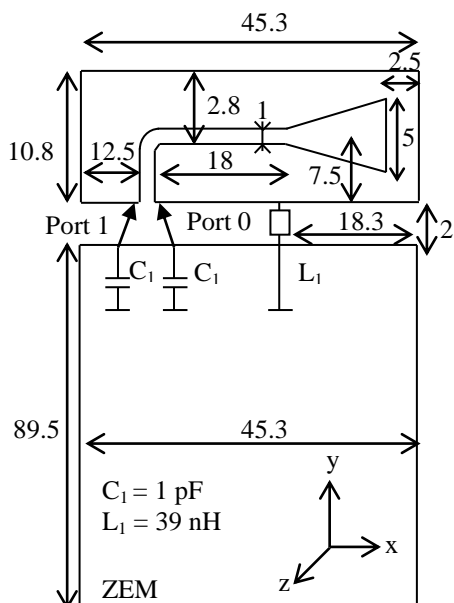


Obr. 4.5 Elektrické pole PN mód 1, frekvence 980 MHz. Počítáno v CST.



Obr. 4.6 Elektrické pole PN mód 1, frekvence 2150 MHz. Počítáno v CST.

Optimalizovaná anténa bude mít rozměry podle obr. 4.7. Šířka zemní plochy se zvětšila z důsledku šířky flíčku a tím i snadného umístění antény do přístrojů. Výsledná anténa je větší na výšku o 2,3 mm a o 3,3 mm na šířku.

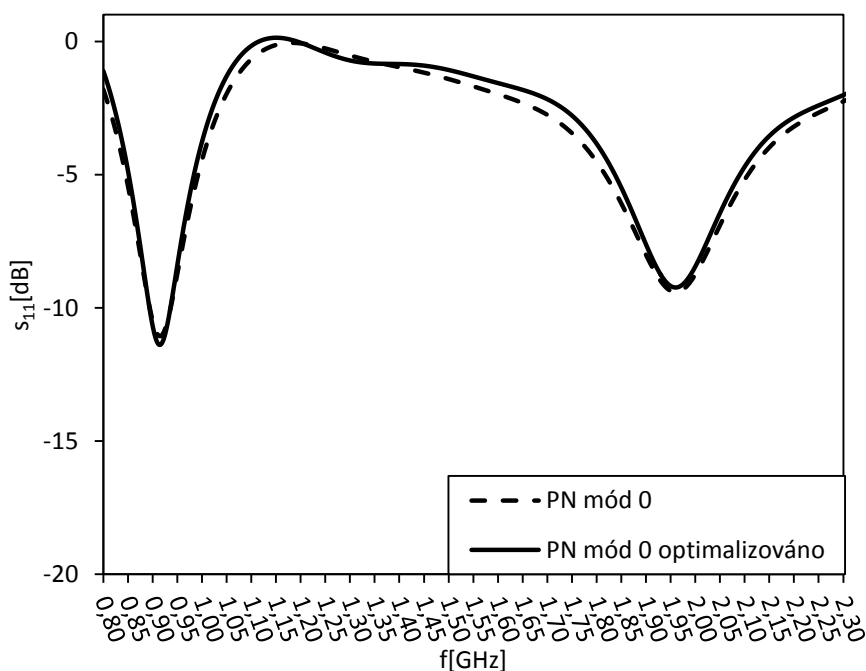


Obr. 4.7 Rozměry opt. designu PN

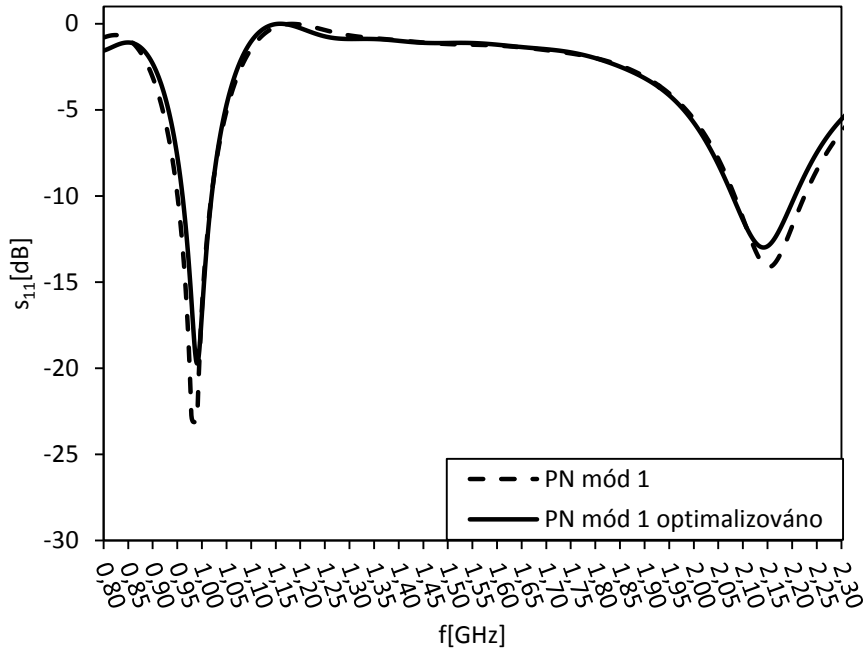


Obr. 4.8 Simulační model opt. PN

Na obr. 4.8 je simulovaný model optimalizované antény. V následujících grafech (obr. 4.9 a obr. 4.10) jsou uvedeny výsledné optimalizované charakteristiky antén.

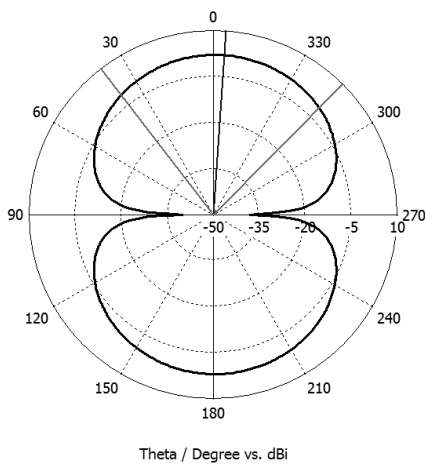


Obr. 4.9 Činitel odrazu s_{11} pro optimalizovaný model PN mód 0. Počítáno v CST.

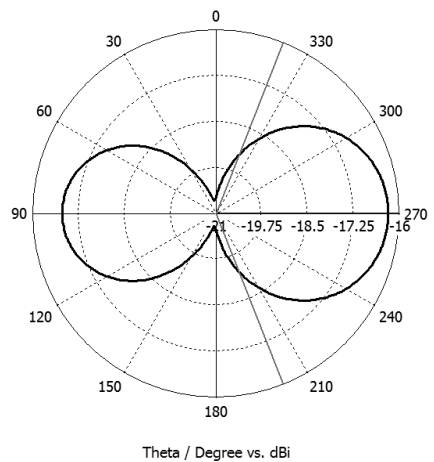


Obr. 4.10 Činitel odrazu s_{11} pro optimalizovaný model PN mód 1. Počítáno v CST.

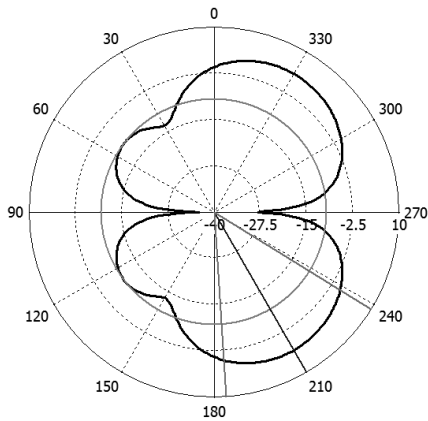
Průběhy změněného substrátu Arlon 25N jsou shodné se simulovanými charakteristikami pro substrát Roger 4003. Anténa je tedy schopna pracovat v požadovaných pásmech dle původní antény na substrátu Roger. Směrové charakteristiky antén není třeba optimalizovat, na daných frekvencích jsou až na malé odchylky shodné s výchozím substrátem. Následují směrové charakteristiky antény v horizontálním a vertikálním směru pro jednotlivé módy, zakončené 3D směrovou charakteristikou.



$f = 920$ MHz a) E rovina

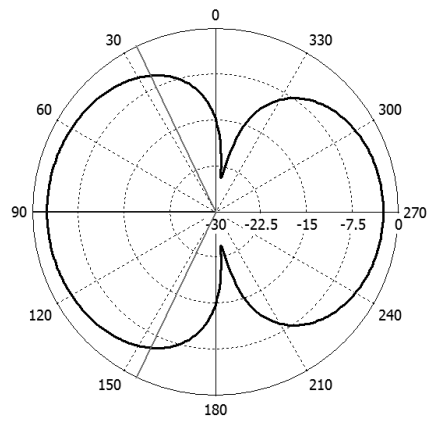


b) H rovina



Theta / Degree vs. dBi

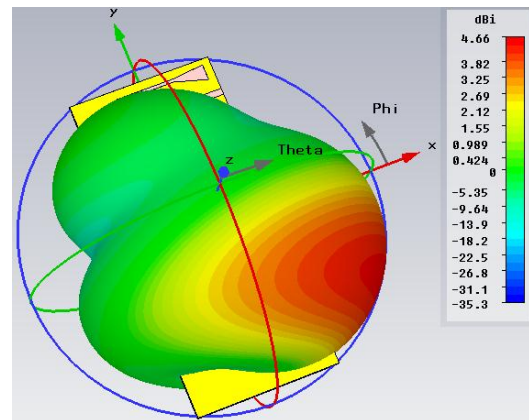
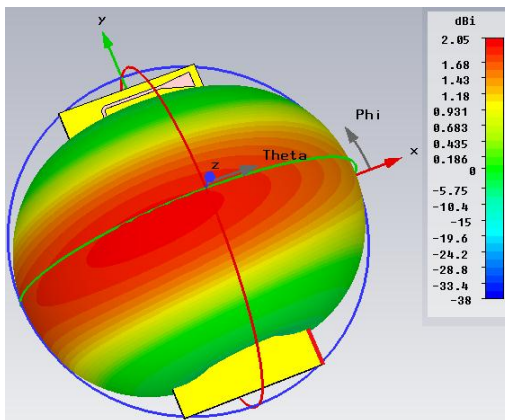
$f = 1800$ MHz c) E rovina



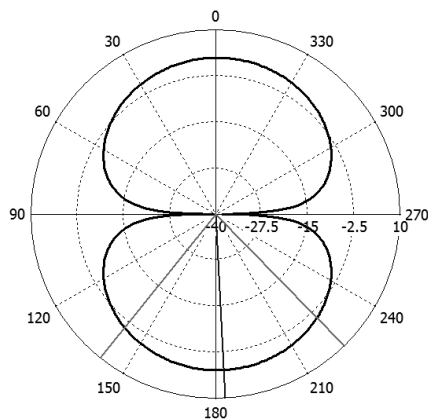
Theta / Degree vs. dBi

d) H rovina

Obr. 4.11 Směrové charakteristiky PN mód 0 v polárním 1D grafu. Počítáno v CST.

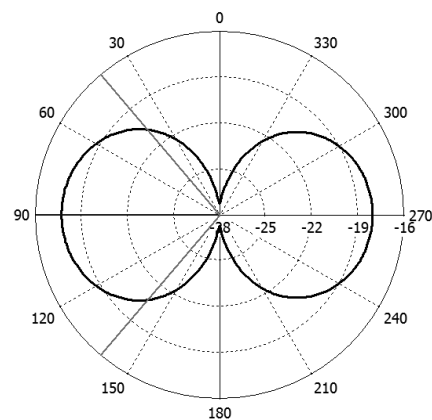


Obr. 4.12 3D směrová charakteristika v CST - PN mód 0, a) 920 MHz b) 1800 MHz.



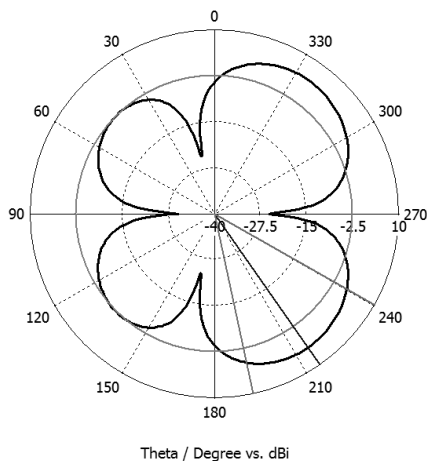
Theta / Degree vs. dBi

$f = 920$ MHz a) Theta

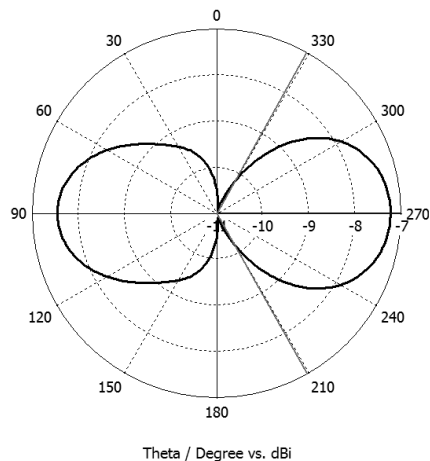


Theta / Degree vs. dBi

b) Phi

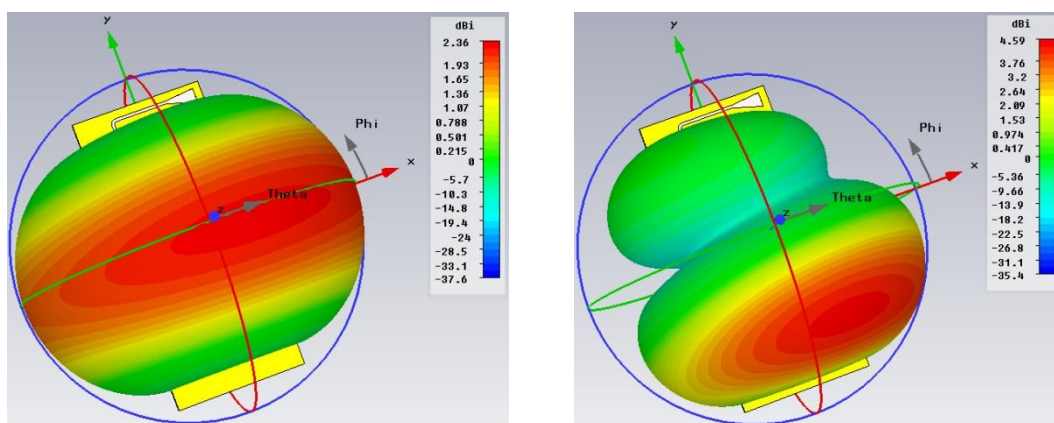


$f = 2050$ MHz c) E rovina



c) H rovina

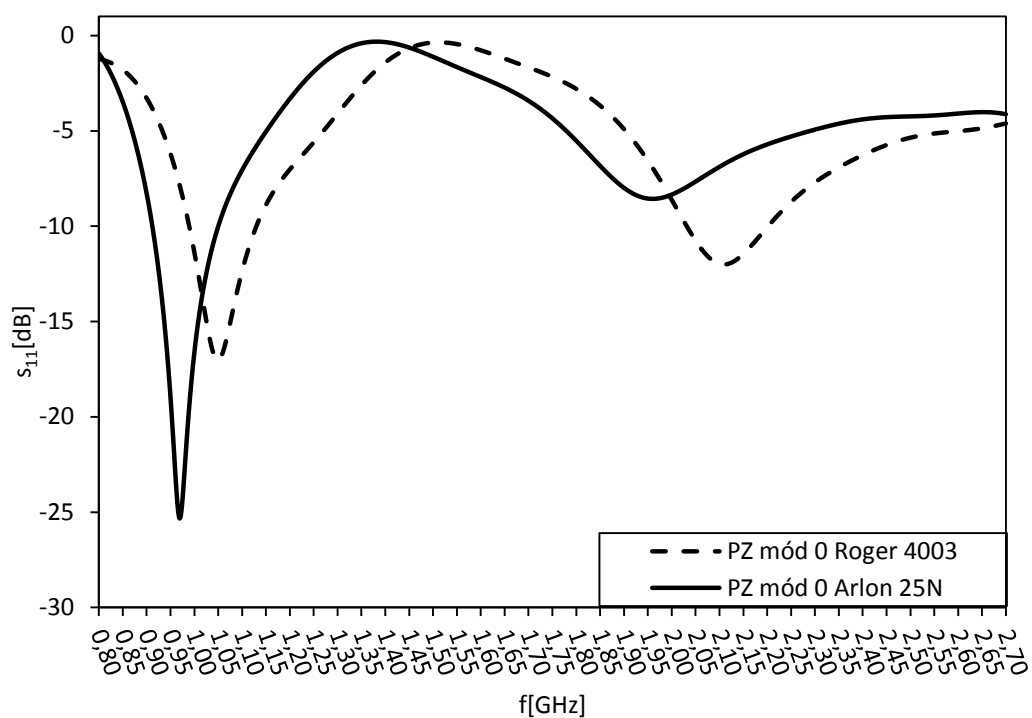
Obr. 4.13 Směrové charakteristiky PN módu 1 v polárním 1D grafu. Počítáno v CST.



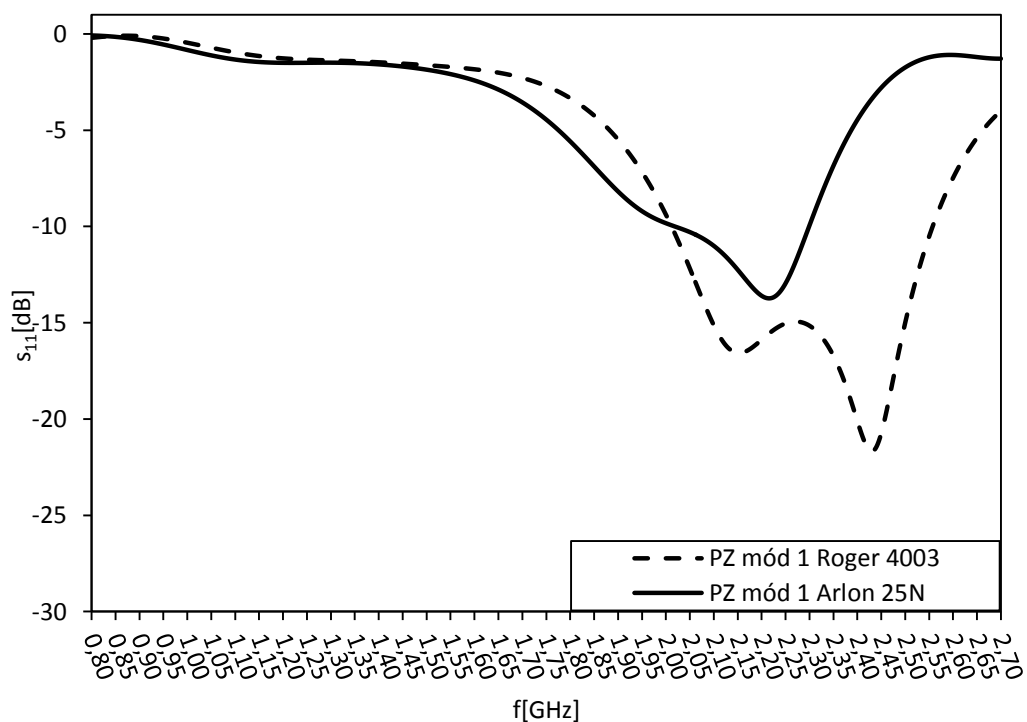
Obr. 4.14 3D směrová charakteristika v CST - PN módu 1, a) 920 MHz, b) 2050 MHz.

4.2 Optimalizace antény PZ

Změnou substrátu na Arlon 25N dochází stejně jako u PN k posunu na nižší frekvence. Jednotlivá pracovní pásma jsou zeslabena kromě módu 0, kde je modul činitele odrazu s_{11} na nižší frekvenci naopak zesílen. Při optimalizaci je proto nutné s_{11} posunout na správné pracovní frekvence a zesílením dosáhnout vyšších hodnot. Detailní vlivy na modul činitele odrazu způsobené změnou substrátu jsou uvedeny na obr. 4.15 a obr. 4.16. Následuje rozložení elektrického pole v kovu (ve flíčku) v jednotlivých módech na požadovaných frekvencích. Změnou rozměrů dochází k ovlivňování rozměru jak v módu 0 tak i módu 1.

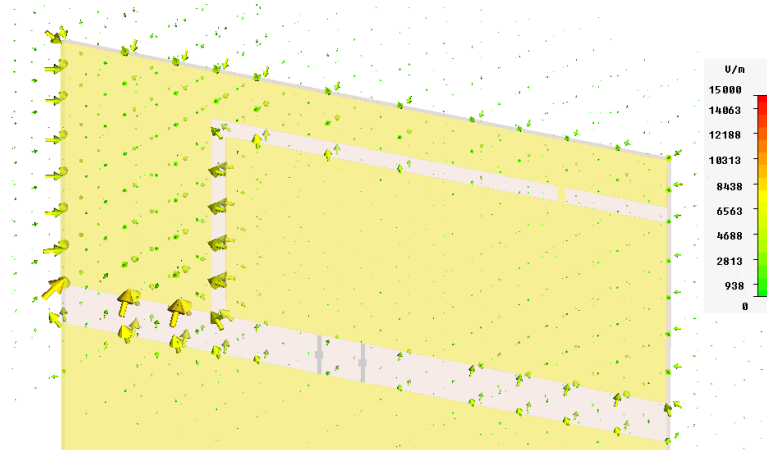


Obr. 4.15 Vliv změny substrátu na pracovní pásma antény PZ mód 0. Počítáno v CST.

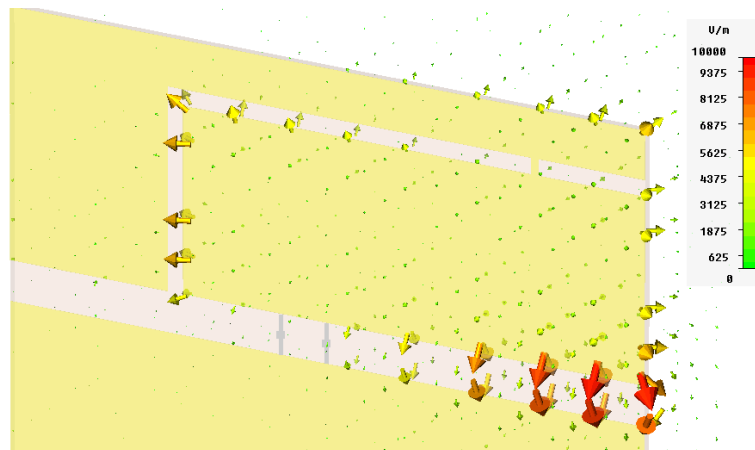


Obr. 4.16 Vliv změny substrátu na pracovní pásma antény PZ mód 1. Počítáno v CST.

Podle rozložení elektrického pole ve flíčku lze stanovit, které rozměry je třeba změnit, aby optimalizace byla co nejbližší anténě na substrátu Roger 4003. Pro mód 0 (obr. 4.17 a obr. 4.18) je velikost modulu činitele odrazu na nižší frekvenci ovlivněna délkou d_1 , s tím související délkou i šířkou flíčku. Činitel odrazu na vyšší frekvenci je nejvíce podle červených šipek ovlivněn v mezeře mezi flíčkem a plochou, označenou jako zem. Konkrétně se pak jedná o změnu pozice napájení flíčku a vzdálenosti indukčního čipu od napájecího koaxiálního kabelu.

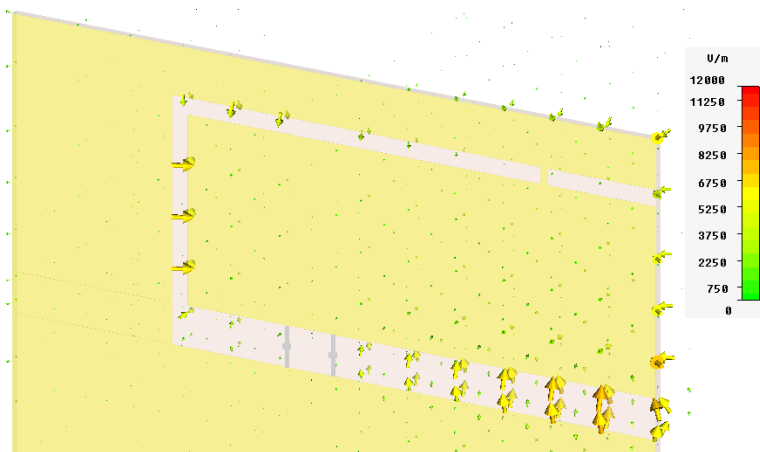


Obr. 4.17 Elektrické pole PZ mód 0, frekvence 1000 MHz. Počítáno v CST.

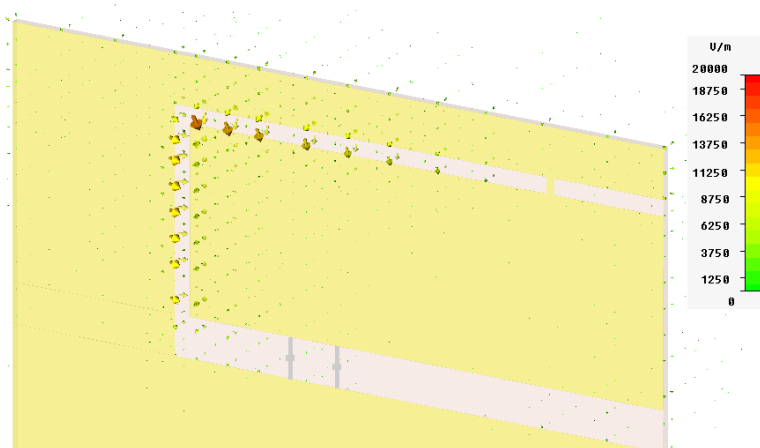


Obr. 4.18 Elektrické pole PZ mód 0, frekvence 2100 MHz. Počítáno v CST.

V módu 1 (obr. 4.19 a obr. 4.20) je pak modul činitele odrazu na nižší frekvenci ovlivněn pozicí napájecího portu a s tím související i vzdáleností indukčního čipu. Činitel odrazu na vyšší frekvenci lze přizpůsobit tvarem výřezu, jeho pozicí a délkou. Část kovu mezi jednotlivými výřezy ovlivňuje širokopásmovost antény v módu 1. Jejím zúžením se také zúží šířka pásma ve kterém anténa pracuje.

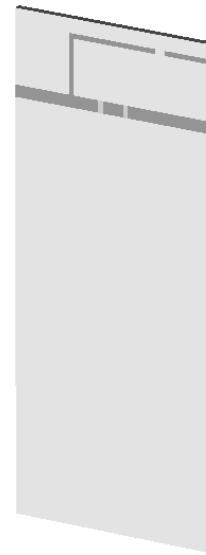
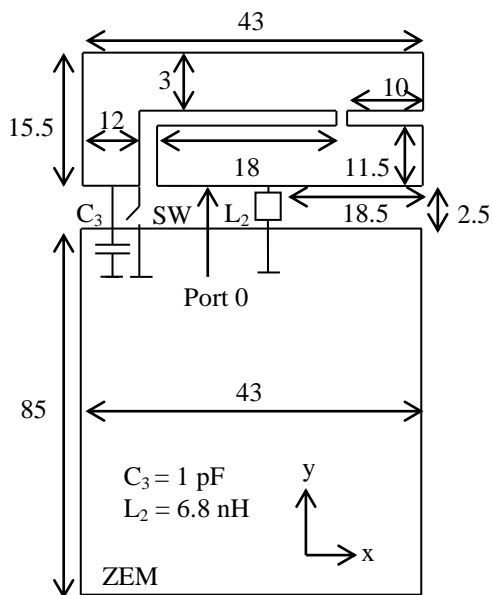


Obr. 4.19 Elektrické pole PZ mód 0, frekvence 2100 MHz. Počítáno v CST.



Obr. 4.20 Elektrické pole PZ mód 0, frekvence 2400 MHz. Počítáno v CST.

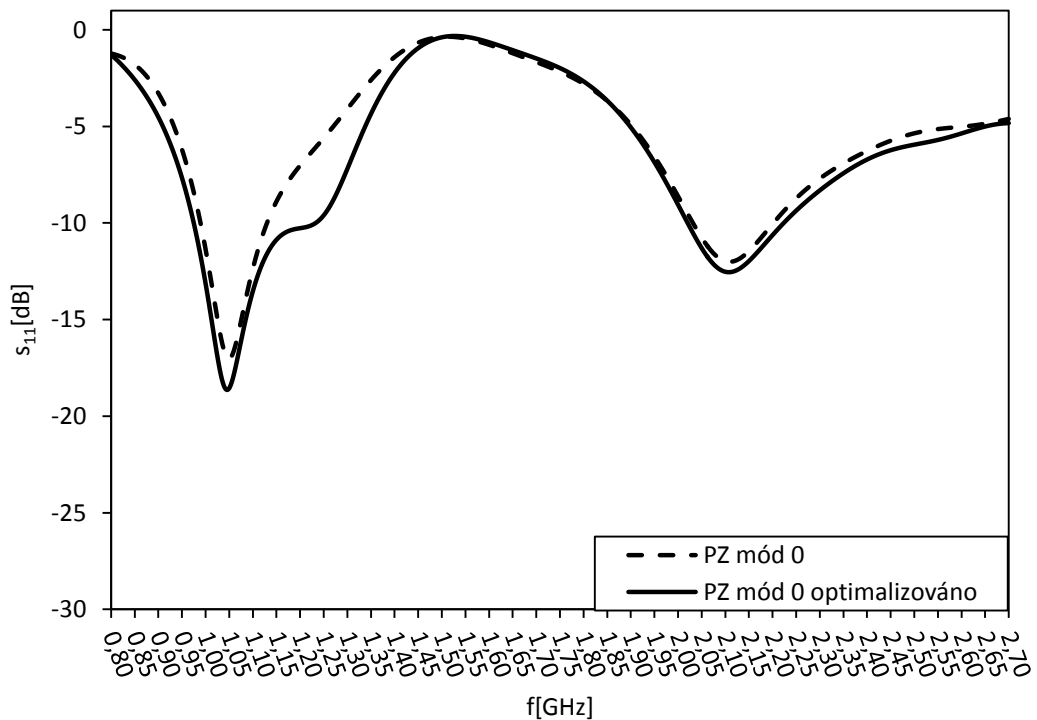
Výsledná optimalizovaná anténa bude mít rozměry podle Obr. 4.21a. Celková výška antény zůstala nezměněna, změnila se pouze šířka flíčku o 1 mm. Šířka zemnicí plochy se přizpůsobila šířce flíčku, kvůli snadnému umístění antény do přístrojů zachováním stejných rozměrů. Veškeré změny rozměrů jsou spíše ve flíčku, pomocí změny výřezu a pozice indukčního čipu. Pozice napájení optimalizované antény zůstává shodná s anténou na substrátu Roger. Na obr. 4.21b je simulační model optimalizované antény.



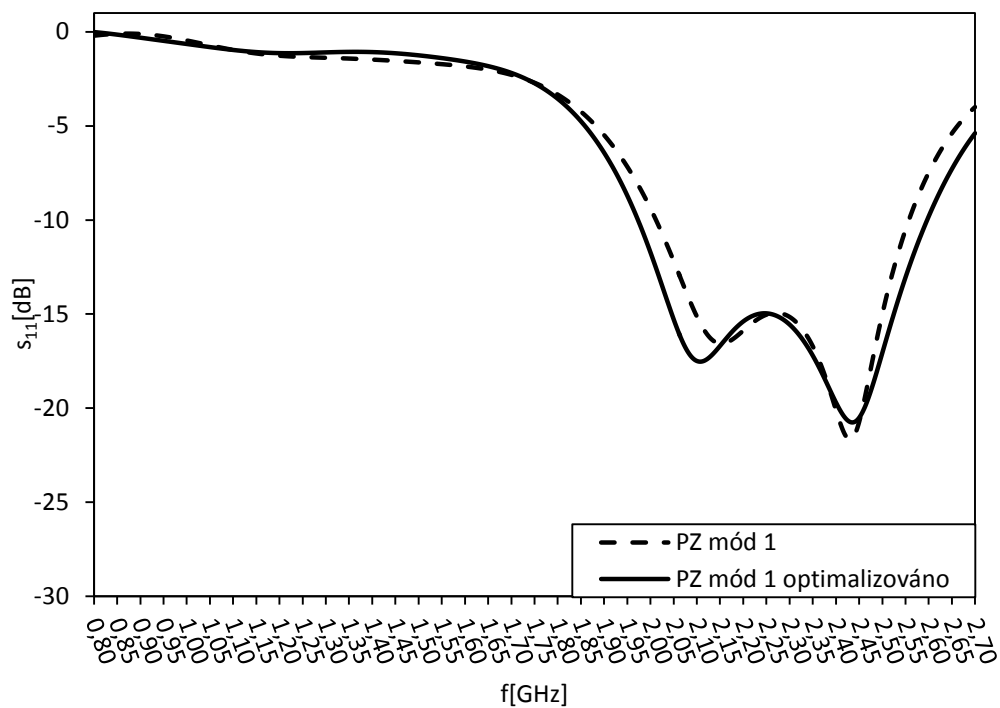
Obr. 4.21 a) Rozměry opt. designu PZ,

b) Simulační model opt. PZ.

Průběhy modulu činitele odrazu nového substrátu Arlon 25N jsou až na malé odchylky shodné se simulovanými charakteristikami pro substrát Roger 4003. Anténa je tedy schopna pracovat v pásmech stejných jako anténa původní na substrátu Roger. Směrové charakteristiky antén není třeba optimalizovat, na daných frekvencích jsou shodné s výchozím substrátem.

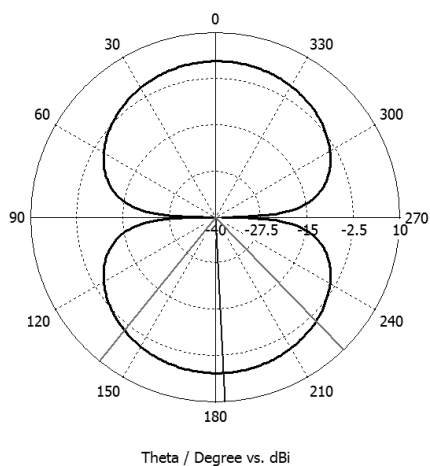


Obr. 4.22 Činitel odrazu s_{11} pro optimalizovaný model PZ mód 0. Počítáno v CST.

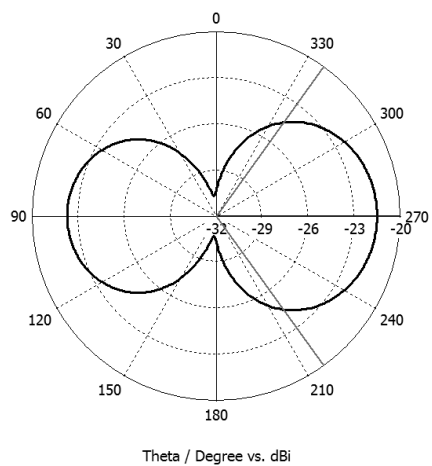


Obr. 4.23 Činitel odrazu s_{11} pro optimalizovaný model PZ mód 1. Počítáno v CST.

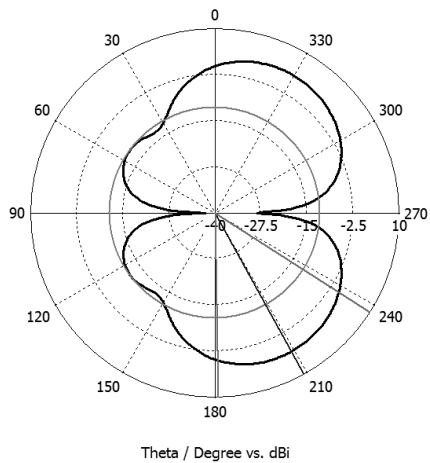
Následují směrové charakteristiky antény v horizontálním a vertikálním směru pro jednotlivé módy, zakončené 3D směrovou charakteristikou.



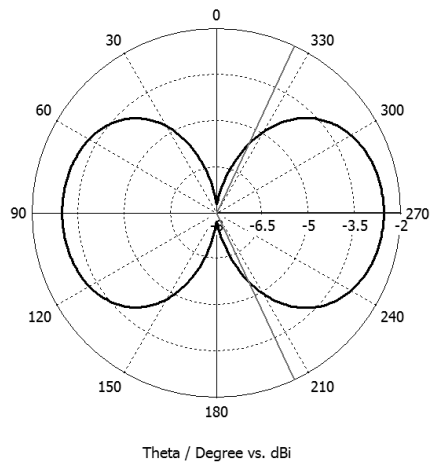
$f = 920$ MHz a) E rovina



b) H rovina

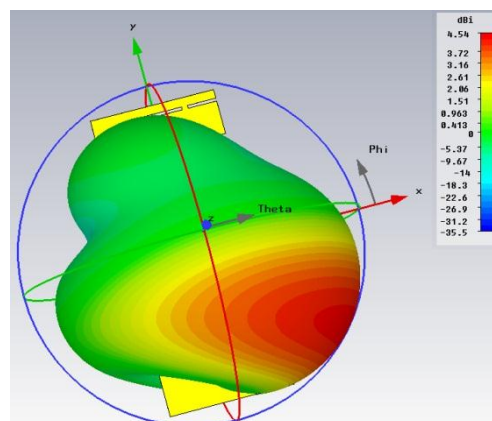
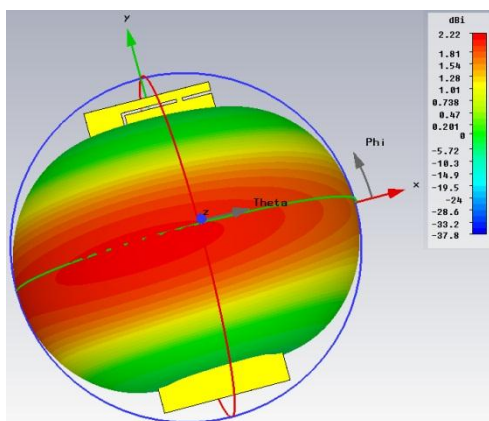


$f = 1800$ MHz c) E rovina

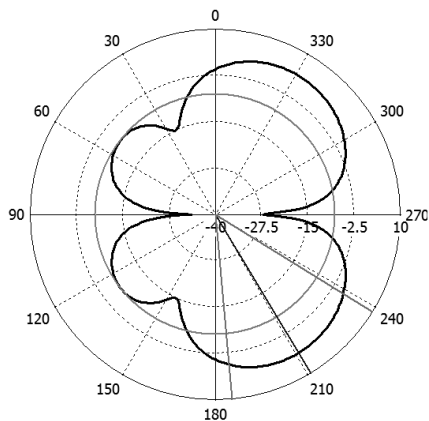


d) H rovina

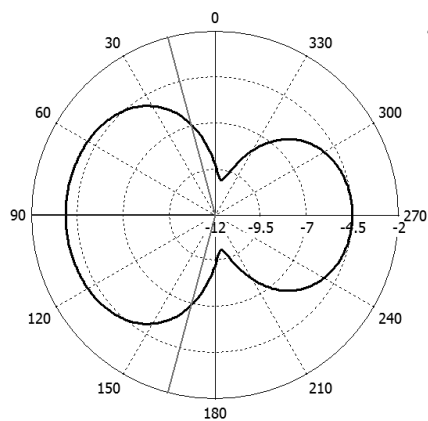
Obr. 4.24 Směrové charakteristiky opt. PN mód 0 v polárním 1D grafu. Počítáno v CST.



Obr. 4.25 3D směrová charakteristika v CST - opt. PN mód 0, a) 920 MHz, b) 1800 MHz.



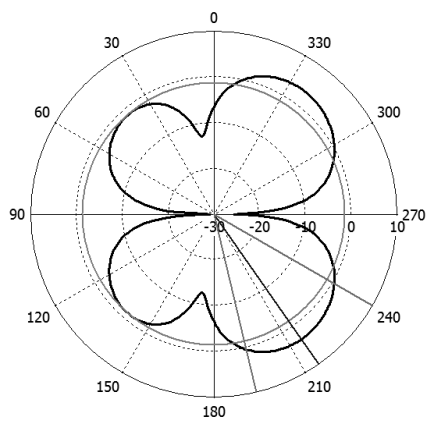
Theta / Degree vs. dBi



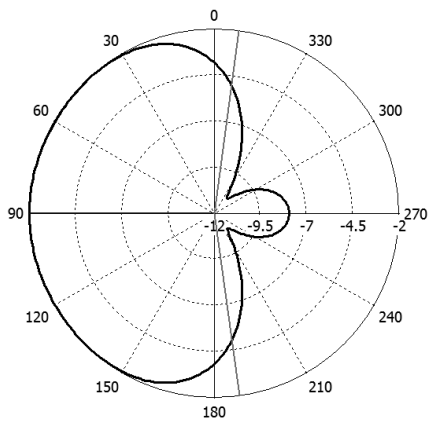
Theta / Degree vs. dBi

$f = 1900$ MHz a) E rovina

b) H rovina



Theta / Degree vs. dBi

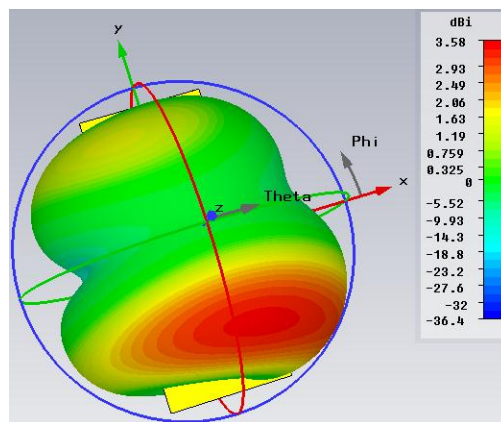
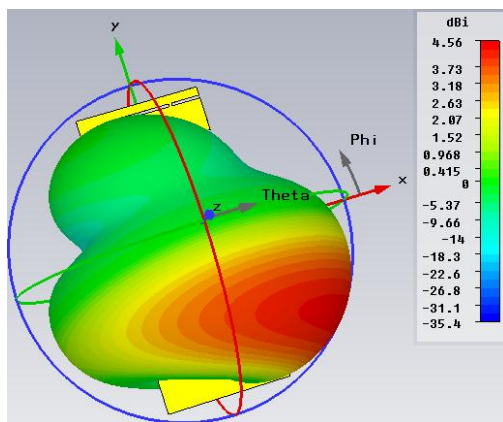


Theta / Degree vs. dBi

$f = 2300$ MHz c) E rovina

d) H rovina

Obr. 4.26 Směrové charakteristiky opt. PN mód 1 v polárním 1D grafu. Počítáno v CST.



Obr. 4.27 3D směrová charakteristika v CST - opt. PN mód 1, a) 1900 MHz, b) 2300 MHz.

5 VÝROBA A MĚŘENÍ

5.1 Výroba

Pro experimentální ověření vlastností antén na substrátu ARLON 25N byla pro výrobu zvolena školní dílna v ústavu UREL Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, kde leptání motivu probíhá klasickou leptací technologií. Substrát (dielektrická podložka) je z obou stran plátovaný tenkou vrstvou mědi, nanesením fotorezistu a expozicí přes masku dochází k odleptání nežádoucí plochy. Tento proces sebou přináší jednu velkou výhodu a to snadnou dostupnost i jednoduchost výroby plošného spoje, na druhou stranu je zde několik nevýhod, které mohou výrazně ovlivnit činnost antén. Dosažitelná přesnost této technologie je 0,05 mm. Při procesu dochází k mírnému odleptání ostrých rohů. Vodivý motiv antény je doplněn o diskrétní prvky, které jsou do motivu usazeny pájením. Vodivá plocha na zadní straně substrátu je odleptána.

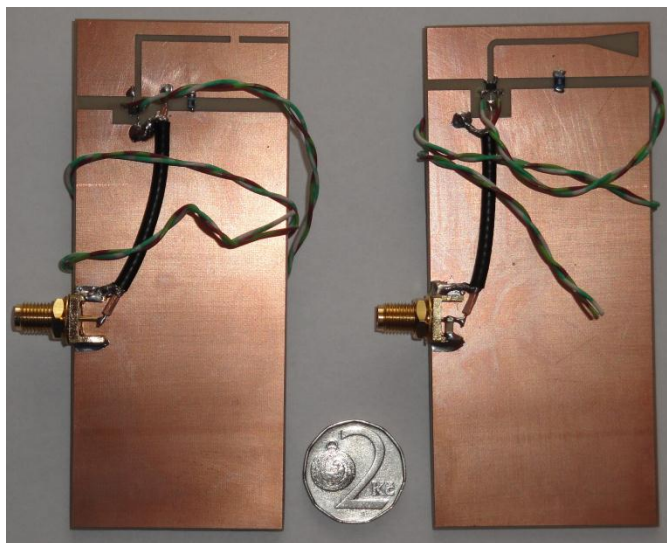
Tab. 5.1 uvádí použité součástky a materiál při výrobě antén. Jako aktivní přepínací prvek byl jak u antény s PN tak i u antény s PZ zvolen GaAs přepínač, který reaguje na změnu přivedeného napětí na řídicí piny.

| Součástka | Označení | Výrobce | Hodnota |
|-------------------|----------------|-----------|---------|
| GaAs FET přepínač | uPG2155TB | Renesas | |
| Indukční čip | CW1008-39 | Ferrocure | 39 nH |
| Indukční čip | CW0603-6.8 | Ferrocure | 6.8 nH |
| Kondenzátor | CL31C010CBCANN | Samsung | 1 pF |
| Koaxiální kabel | RG-174 | | 50 Ω |
| Konektor | SMA-PCB Z | | |
| | SMA-16 | | |

Tab. 5.1 Použité součástky při výrobě

Použité typy konektorů bylo nutné volit z důvodu zařazení kondenzátoru mezi zemní plochu a koaxiální kabel, to je realizováno přímo na konektoru. Dalším důvodem je snazší přivedení signálu od konektoru k samotnému zářiči. K tomuto propojení je využito koaxiálního kabelu s vnějším průměrem 2,8 mm. Tento kabel je výhodné použít pro aplikace W-LAN, GPS a GSM a je vhodný pro krátká a ohybem namáhaná spojení. Střední vodič VF kabelu je připojen k flíčku antény a vodivé opletení (stínění) kabelu je spojeno se zemí antény. V důsledku takto odizolovaného SMA konektoru i koaxiálního kabelu se mohou na patřičných částech indukovat parazitní vlny. Na obr. 5.1 jsou zobrazeny testovací kusy antén s přepínáním napájení a připínáním zemní plochy.

U prvně vyrobeného modelu se nepodařilo zprovoznit aktivní přepínací prvek. Přepínač nereagoval na přivedené hodnoty napětí. Funkci antén tedy nebylo možné žádným dostupným způsobem ověřit.

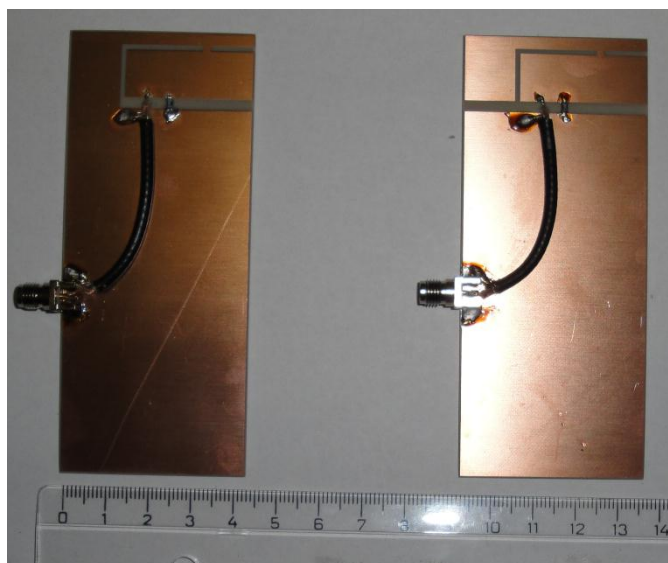


Obr. 5.1 Pohled na vyrobený model antén PZ (vlevo) a PN (vpravo) spolu s napájecími kabely pro přepínač.

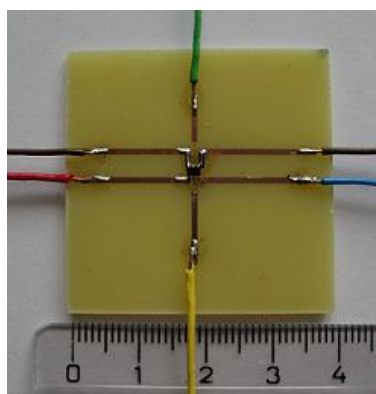
Proto bylo nutné ověřit funkci antén manuálním připojením koaxiálního kabelu do různých míst zářiče v případě PN a odpojit nebo připojit zemní plochu k flíčku v případě PZ. Za tímto účelem byly vyrobeny nové modely antén splňující předešlé požadavky. Funkce přepínače byla otestována na samostatné desce. Na obr. 5.2 je zobrazena anténa PN, kterou zastupují dvě antény, jedna s připojeným koaxiálním kabelem vlevo, druhá vpravo od štěrbin. Na obr. 5.3 je pak vyfocena anténa s PZ bez aktivního přepínacího prvku.



Obr. 5.2 Pohled na vyrobený model antény PN bez aktivního přepínacího prvku, mód 1 vlevo a mód 0 vpravo.



Obr. 5.3 Pohled na vyrobený model antény PZ bez aktivního přepínacího prvku, mód 1 s připojením plochy vlevo a mód 0 rozpojeno vpravo.



Obr. 5.4 Pohled na testovací obvod s FET GaAs přepínačem.

Realizací obvodu s GaAs přepínačem došlo k ověření funkce tohoto přepínače, kdy připojením napětí 3,3 V a 0 V na ovládací piny dochází k sepnutí a tím spojení cesty 1-3. Naopak připojením 0 V a 3,3 V dochází ke spojení 1-2 (viz. aktivní prvky pro přepínání). Ověření probíhalo způsobem vybuzení vstupu a na příslušných výstupech bylo ověřeno, zda je vytvořeno vodivé spojení nebo ne. Samotný přepínač reagoval již na přivedenou hodnotu napětí 2,7 V. Z funkce testovacího obvodu lze usoudit, že kus testovaný s anténou byl vadný nebo poškozen při manipulaci.

5.2 Princip ověření přizpůsobení antén

Měření průběhů modulu činitele odrazu na vstupu antény byla provedena na vektorovém obvodovém analyzátoru R&S ZVL6. Ten je zobrazen na obr. 5.5. Skládá ze čtyř hlavních částí:

- Blok rozdělující vlny, směrová odbočnice odděluje přímou a odraženou vlnu a zároveň rozděluje přímou vlnu na dvě vlny, z nichž jedna je přivedena do referenčního přijímače a druhá přivedena na testované zařízení.
- Generátor signálu, generuje požadovanou dopadající vlnu na testované zařízení.
- Dva přijímače, jeden přijímač je využit pro měření generované dopadající vlny a druhý pro měření vlny odražené. Vektorový obvodový analyzátor měří i fázi mezi těmito vlnami.
- Zpracování, poslední částí takového přístroje je samotný blok pro zpracování naměřených hodnot, většinou bývá integrován počítač uvnitř přístroje, který provádí výpočet požadovaných hodnot, v našem případě poměr odražené vlny a vlny dopadající na testované zařízení.



Obr. 5.5 Vektorový obvodový analyzátor R&S ZVL [14].

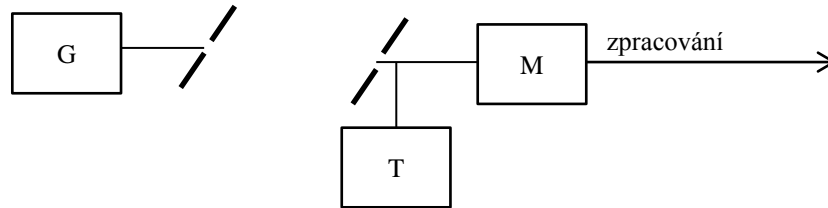
Součástí měření na vektorovém obvodovém analyzátoru je tříbodová kalibrace OSM (open, short, match). Pomocí kalibrační sady připojujeme otevřený konec, zkrat a přizpůsobenou zátěž. Měření na vektorovém obvodovém analyzátoru byla provedena pod dohledem Ing. Tomáše Urbance, Ph.D. a Ing. Jiřího Dřínovského, Ph.D. Výstupem měření jsou pak hodnoty modulu činitele odrazu antény měřené na vstupu konektoru antény.

5.3 Princip ověření směrových charakteristik

Měření směrových charakteristik antén provedl Ing. Michal Pokorný v ústavu UREL Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Vzhledem k dostupnosti technického vybavení laboratoře bylo možné ověření pouze na nejnižších frekvencích a to maximálně 870 MHz. Při měření směrových charakteristik není možné

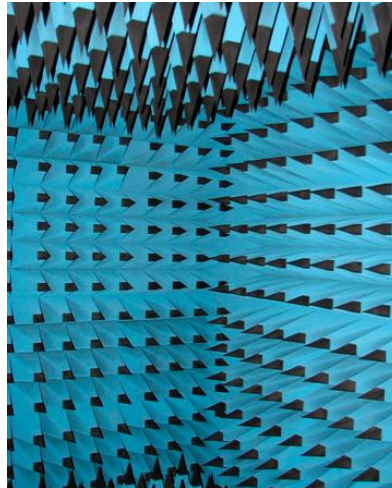
v laboratoři měřit zisk antén. Při měření směrových charakteristik antén byla rovina E zvolena jako y souřadnice motivu antény a rovina H jako souřadnice x. Na výsledné volbě rovin nezáleží, důležité však je, že rovina E musí být kolmá na rovinu H.

Měření směrových charakteristik probíhá podle uspořádání na obr. 5.6 a je doplněno o pomocnou anténu, která je buzena generátorem G o nastavitelné úrovni. Měřená anténa je upevněna na točném T, která se otáčí kolem detektoru M, který měří úroveň.



Obr. 5.6 Uspořádání při měření směrových charakteristik [15].

Půjde spíše o orientační měření a porovnání tvaru výsledných vyzářovacích diagramů v jednotlivých rovinách, než samotných hodnot. Simulované hodnoty v programu CST MW jsou vyjádřeny v decibelech a vztaženy k izotropnímu zářiči. Kvůli tomu, že v laboratoři nelze měřit zisk antén, je nutné simulované i naměřené hodnoty směrových charakteristik normovat. Normování probíhá způsobem, kdy je ve všech hodnotách nalezena hodnota maximální a takovou hodnotou jsou poděleny všechny hodnoty ostatní. Tím dostáváme rozsah hodnot od $0 \div 1$.



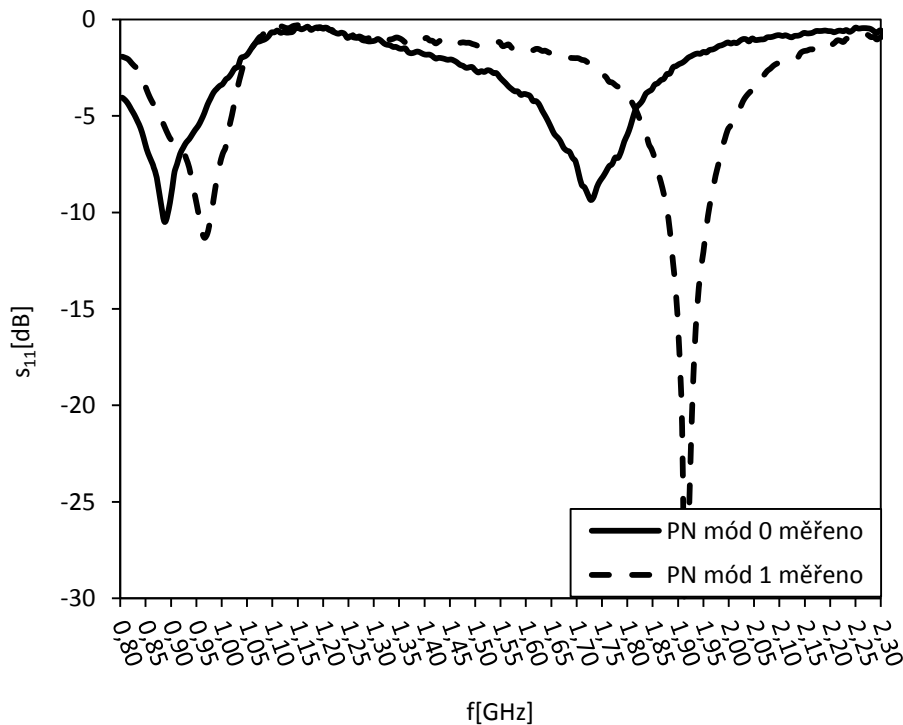
Obr. 5.7 Bezodrazová komora [16].

Veškerá měření směrových charakteristik probíhají v bezodrazové komoře kvůli odrazům vln, které jsou vysílány. Odrazy od nežádoucích objektů mohou výrazně ovlivnit směrové charakteristiky.

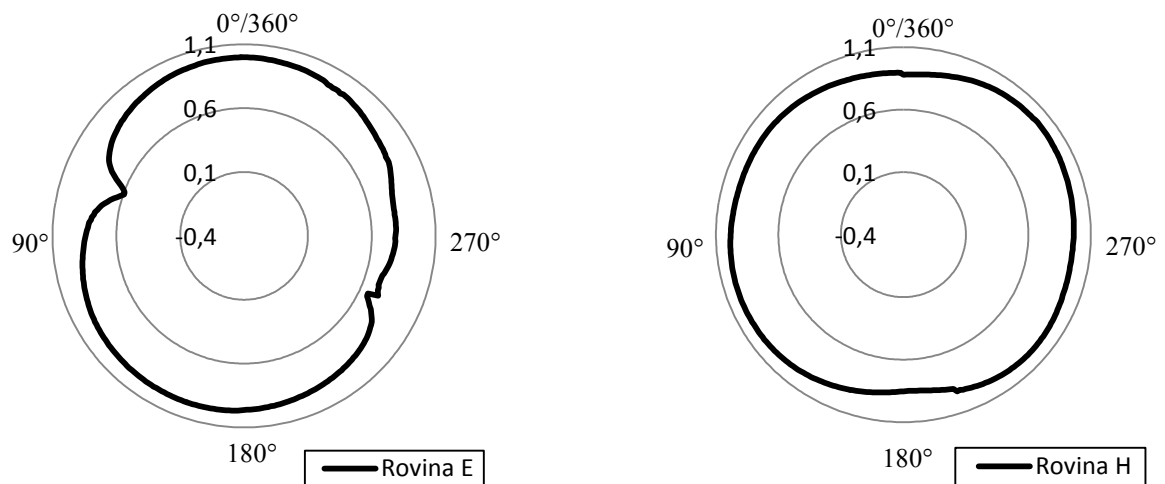
5.4 Výsledky měření

5.4.1 Anténa s přepínáním napájení

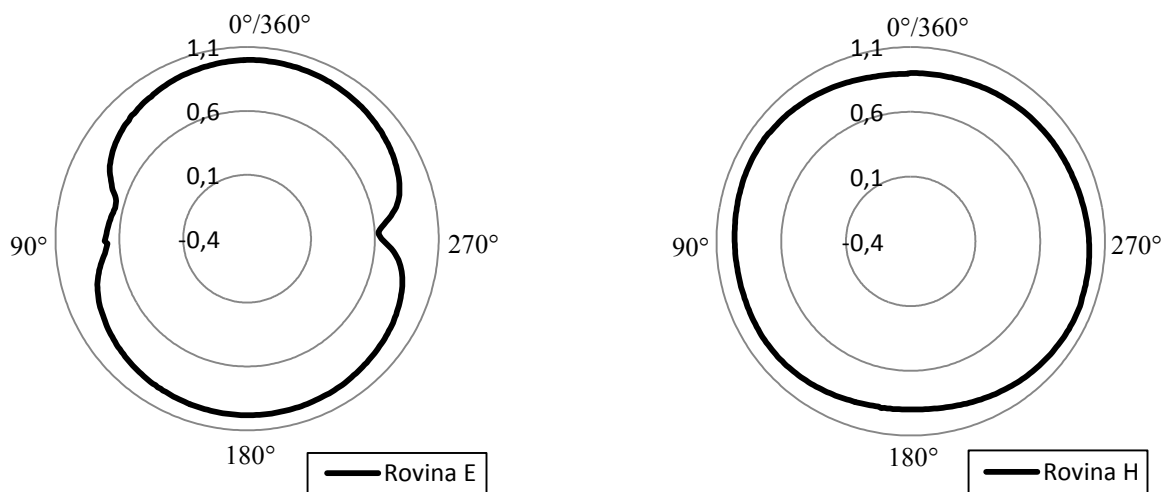
Na obr. 5.8 jsou naměřené hodnoty průběhu s_{11} . Je-li anténa v módu 0, tzn. je připojeno napájení k portu 0 je schopna pracovat v pásmech GSM 850, GSM 900 a DCS. Naopak je-li aktivní mód 1 (napájení port 1), aktivní pásma antény jsou GSM 900, PCS a UMTS. Anténa pracuje v požadovaných pásmech zadání. Činitel odrazu s_{11} dosahuje v prvních rezonancích hodnot -11 dB pro mód 0 a -12 dB pro mód 1. Na druhé rezonanci jsou pak maximální hodnoty -9,5 dB pro napájení portu 0 a -30 dB pro napájení portu 1.



Obr. 5.8 Naměřené hodnoty činitele odrazu na vstupu antény PN (R&S ZVL6).



Obr. 5.9 Normované měřené směrové charakteristiky PN mód 0; 870 MHz. Měřeno v bezodrazové komoře v ústavu radioelektroniky.

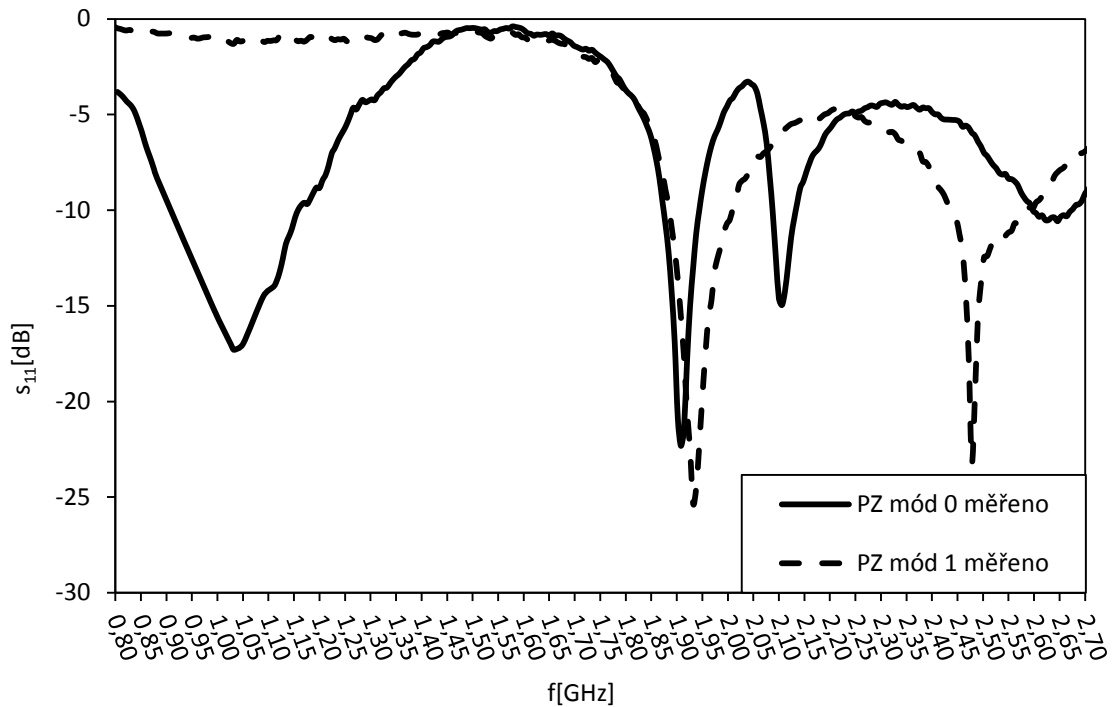


Obr. 5.10 Normované měřené směrové charakteristiky PN mód 1; 870 MHz. Měřeno v bezodrazové komoře v ústavu radioelektroniky.

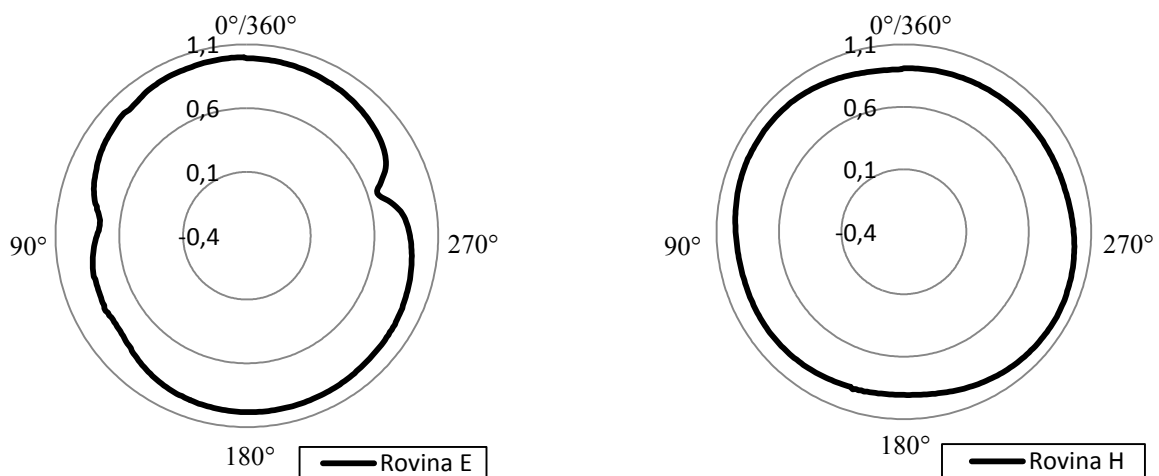
Na obr. 5.12 jsou zobrazeny normované směrové charakteristiky (viz. princip ověření směrových charakteristik) v rovině E a na ní kolmé rovině H. Složením normovaných charakteristik můžeme říci, že anténa je částečně všesměrová, tj. září do všech směrů.

5.4.2 Anténa s připínáním zemní plochy

Vyrobená anténa PZ umožňuje pracovat v pásmech GSM 850, GSM 900, DCS a PCS, je-li aktivní mód 0, tzn. zemní plocha je odpojena od samotného zářiče. V případě připojení zemní plochy k anténnímu flíčku, je anténa v módu 1 a nabízí pásma DCS, PCS, UMTS, LAN (2,4 – 2,5 GHz) a současně Bluetooth pracující na stejných frekvencích, jako LAN. Opět můžeme konstatovat, že anténa odpovídá požadavkům zadání. Obr. 5.11 zobrazuje jednotlivé pracovní frekvence v jednotlivých módech.



Obr. 5.11 Naměřené hodnoty činitele odrazu na vstupu antény PZ (R&S ZVL6).



Obr. 5.12 Normované měřené směrové charakteristiky PZ mód 0; 870 MHz. Měřeno v bezodrazové komoře v ústavu radioelektroniky.

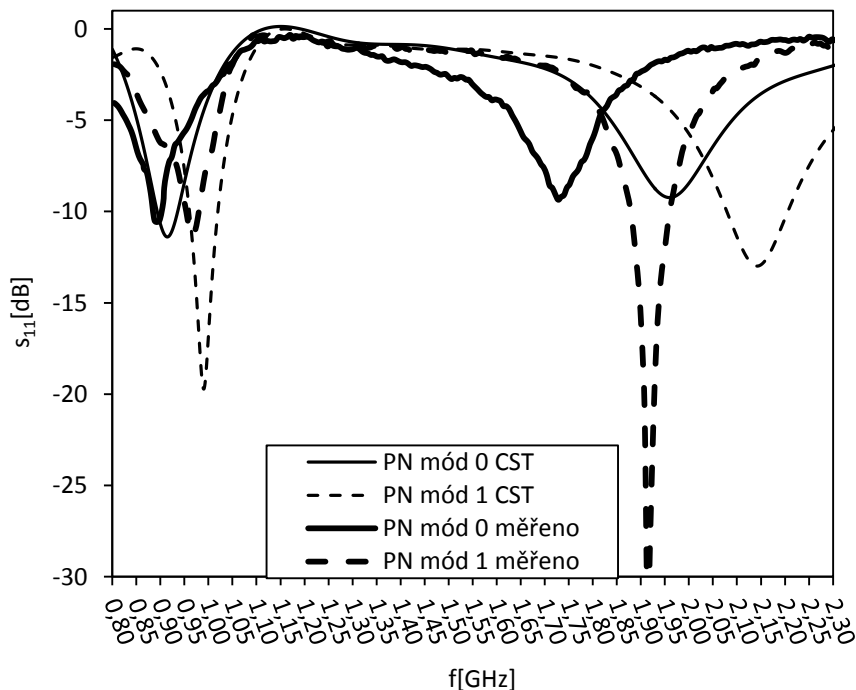
Maximální hodnoty v rezonanci módu 0 jsou -17,3 dB, -22,5 dB a -15 dB pro mód 1 pak -25 dB a -23 dB. Dále jsou zobrazeny normované směrové charakteristiky antény, tentokrát pouze v módu 0. Na ostatních frekvencích nebylo umožněno měřit, kvůli přístrojovému omezení. O anténě na dané frekvenci můžeme říci, že jde opět o všesměrovou anténu.

5.5 Srovnání simulace a měření

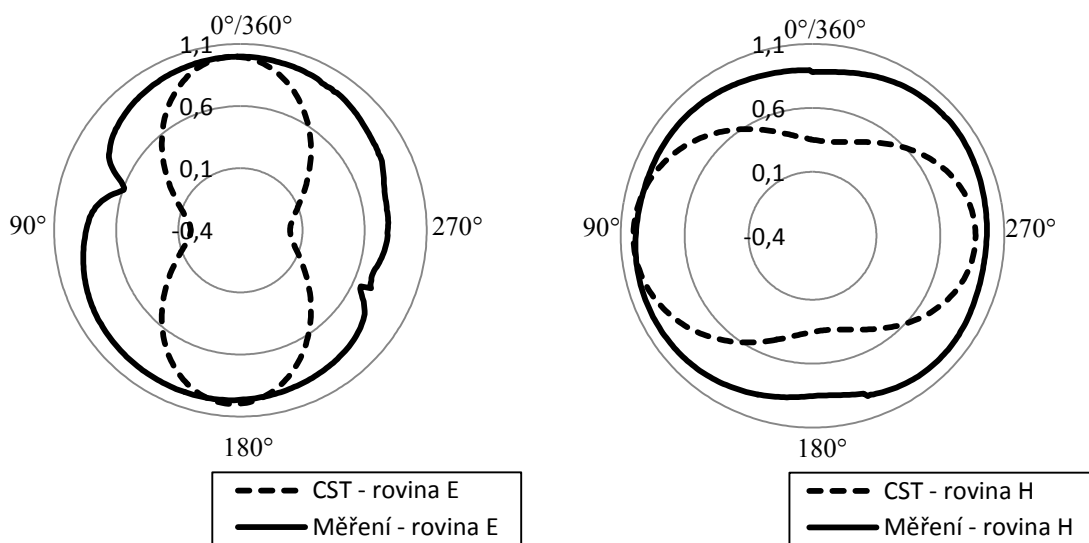
Nyní je nutné srovnat, zda se vyrobené antény alespoň trochu shodují s anténami simulovanými. Srovnání naměřených výsledků bude provedeno na modelech v CST MW a na vyrobených anténách. Konkrétně půjde o porovnání s_{11} a směrových vyzařovacích diagramů.

5.5.1 Anténa s přepínáním napájení

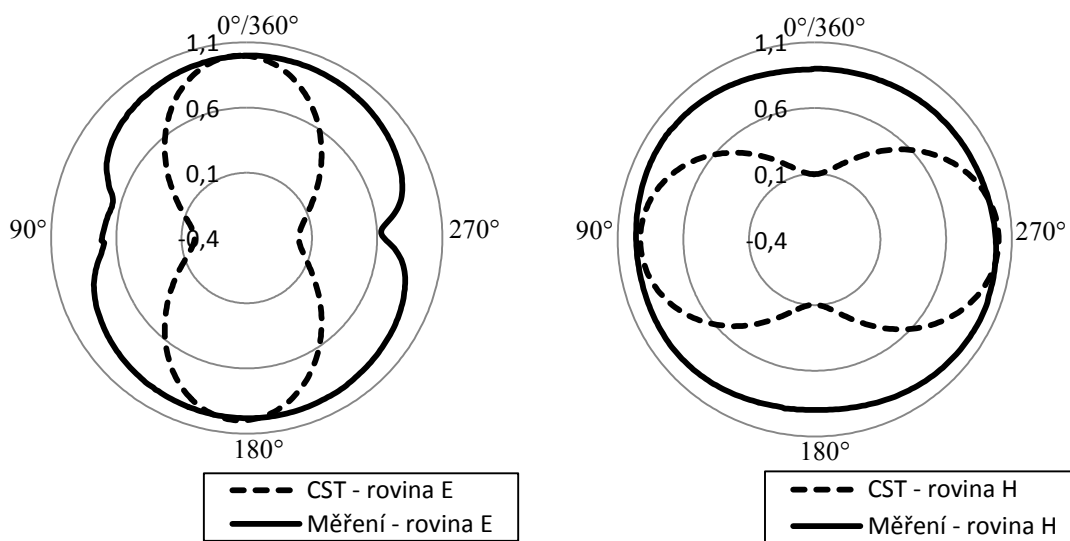
Při srovnání simulované a vyrobené antény využívající přepínání napájení lze pozorovat, že na nízkých frekvencích je průběh s_{11} téměř shodný. Maximální hodnoty v první rezonanci jsou v obou módech zeslabeny, na vině může být reaktance kapacitního charakteru v podobě kapacitního SMD čipu, kterým měníme celkovou impedanci uvnitř antény. Výrobce čipu ovšem nemůže zajistit pokaždé přesnou hodnotu kapacity, udávaná maximální odchylka od nominální hodnoty je $\pm 25\%$. V druhé rezonanci dochází u obou módů k posunu zhruba o 200 MHz, to může být způsobeno nastaveným počtem dílků na vlnovou délku v simulacích, což je ovšem časově i výpočetně náročné. Dalším faktorem, který ovlivňuje rezonance je přesnost leptací technologie, kde desetina milimetru může znamenat drastický posun. V módu 1 je při druhé rezonanci dosaženo dobrého impedančního přizpůsobení.



Obr. 5.13 Porovnání simulovaných a naměřených hodnot antény PN. Počítáno v CST, měřeno na R&S ZVL6.



Obr. 5.14 Normované simulované a měřené směrové charakteristiky PN mód 0; 870 MHz. Počítáno v CST, měřeno v bezodrazové komoře.

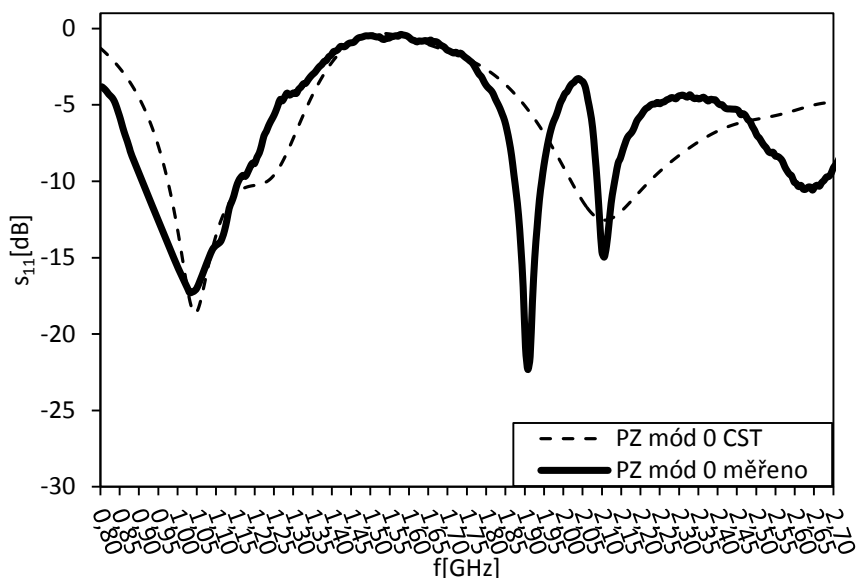


Obr. 5.15 Normované simulované a měřené směrové charakteristiky PN mód 1; 870 MHz. Počítáno v CST, měřeno v bezodrazové komoře.

5.5.2 Anténa s připínáním zemní plochy

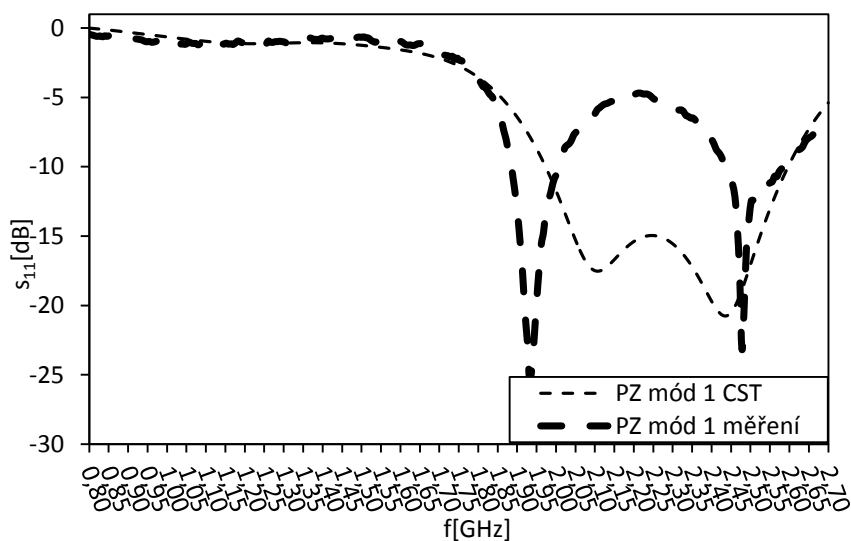
Pro lepší přehlednost naměřených a simulovaných dat jsou oba dva módy rozděleny do dvou grafů. U antény s rozpojenou zemní plochou od flíčku je situace následující. U měřené antény vzniká další rezonance na nižším kmitočtu, toto umožňuje práci v daném pásmu s vyšší účinností antény, ovšem za cenu zmenšení původní šířky

pásma. U této antény nejvíce záleží na pozici napájecího kabelu, pouhou změnou o jednu desetinu milimetru dochází ke změně rezonančních frekvencí. Stejně jako u antény s PN i zde může mít vliv na výsledný průběh přesnost leptací technologie.

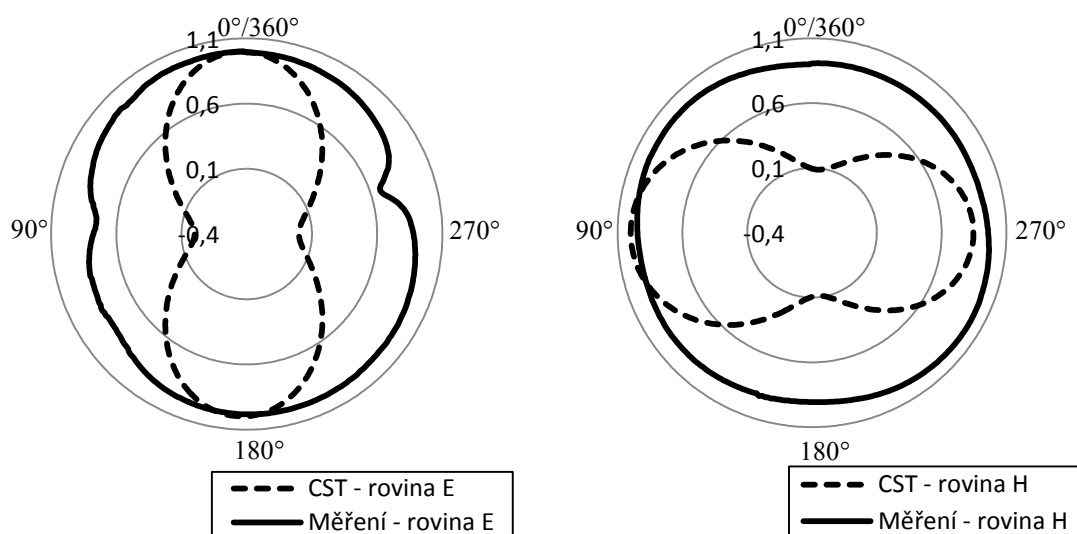


Obr. 5.16 Porovnání simulovaných hodnot a naměřených antény PZ v módu 0. Počítáno v CST, měřeno na R&S ZVL6.

U antény v módu 1 dochází vlivem nepřesného zapojení koaxiálního kabelu k posunu reálných rezonancí od simulovaných. To je také zapříčiněno tím, že v simulacích je tloušťka napájecího portu brána jako nulová, ovšem při experimentálním ověření navržené antény má koaxiální kabel průměr středního vodiče kolem 1 mm. To má za následek, že se jednotlivé rezonanční frekvence od sebe vzdalují a první rezonance dosahuje vyšších hodnot než rezonance druhá.



Obr. 5.17 Porovnání simulovaných hodnot a naměřených antény PZ v módu 0. Počítáno v CST, měřeno na R&S ZVL6.



Obr. 5.18 Normované simulované a měřené směrové charakteristiky PZ mód 0; 870 MHz. Počítáno v CST, měřeno v bezodrazové komoře.

Směrové charakteristiky vyrobených antén odpovídají simulovaným charakteristikám, navíc v některých směrech je dosaženo lepšího vyzařování. Ovšem je nutno brát v potaz, že výsledné charakteristiky jsou normovány, není možné číselné posouzení, ale pouze tvarové.

Dalším parametrem, který můžeme u antén posoudit je zisk, ten ovšem není možný měřit u vyrobených antén, proto se zde nabízí alespoň porovnání teoretické. Porovnání bude provedeno jak na anténách s původním substrátem, tak i na optimalizovaných. K pracovním pásmům je přidáno pásmo měřené, ovšem pouze v simulaci. Pásmo, pro která není anténa určena, jsou v tab. 5.2 vynechána.

| Anténa | Mód | Zisk (dBi) simulace | | | | | |
|---------|-----|---------------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| | | 870 MHz | 920MHz | 1800 MHz | 1900 MHz | 2050 MHz | 2300 MHz |
| PN | 0 | 2,1 | 2,1 | 2,8 | | | |
| | 1 | 2,3 | 2,1 | | | 4,6 | |
| PN opt. | 0 | 2,2 | 2,0 | 3,4 | | | |
| | 1 | 2,4 | 2,3 | | | 4,5 | |
| PZ | 0 | 2,2 | 2,2 | 3,5 | | | |
| | 1 | | | | 3,9 | | 3,6 |
| PZ opt. | 0 | 2,2 | 2,2 | 3,6 | | | |
| | 1 | | | | 3,9 | | 3,5 |

Tab. 5.2 Srovnání zisků jednotlivých simulovaných antén. Počítáno v CST.

ZÁVĚR

Jedním z cílů práce bylo seznámit se s PIFA anténami. Jsou zde uvedeny základy o planárních anténách a dále o anténách PIFA. Společně se základy o planárních anténách bylo také uvedeno několik základních technik pro snadné přizpůsobení charakteristiky činitele odrazu, který nejlépe charakterizuje vlastnosti antény. V práci je využito přizpůsobení pomocí výřezu, kdy jedna anténa využívá speciální výřez tvaru trychtýře a druhá anténa výřez tvaru „L“. Jako další možnost je využito přizpůsobení změnou impedance antény pomocí SMD čipu indukce a kapacity.

Dále jsou uvedeny výsledné simulace antén dle [3], které byly provedeny v simulačním balíku programů CST STUDIO SUITE 2010, konkrétně v jeho součásti CST MW. Anténa využívající k ladění frekvenčních pásem aktivní prvek PIN diodu, která realizuje přepínání napájení do různých míst zářiče, se až na malé odchylky shoduje se simulovanou anténou [3]. Druhá anténa s výřezem tvaru „L“ využívající pro ladění FET přepínač, který k flíčku připojuje a odpojuje kovovou plochu, která zde plní funkci zemnicí plochy, se od simulovaného modelu v [3] liší zhruba o 100 MHz. Činitel odrazu na vstupu antény je ve všech případech vyjádřen v decibelové míře, lineární zobrazení nabývá pouze hodnot od 0 do 1. Průběh činitele odrazu odpovídá spíše vyrobenému modelu. Chyby v simulovaných grafech mohou být způsobeny malým počtem dílků na vlnovou délku, tím je ovlivněn celkový počet buněk pro výpočet, což ovšem ovlivňuje čas výpočtu simulace a také potřebný hardware. Včetně grafů znázorňujících průběh modulu činitele odrazu, jsou také uvedeny směrové charakteristiky jednotlivých antén, jak v horizontální, tak i vertikální rovině na kmitočtech daného standardu. Nechybí ani celková 3D vyzařovací charakteristika, tvořená jednotlivými příspěvky. Směrová charakteristika nejlépe vypovídá o anténě, do kterých směrů nejvíce září.

Jedním z kroků také byla optimalizace antén pro nově zadaný substrát. Požadavkem bylo, aby anténa dokázala fungovat v daných pásmech. Parametr, který nejlépe vystihuje frekvenční využití antény, je průběh činitele odrazu na vstupu antén. Proto bylo nutné jej přizpůsobit pro nový materiál a porovnat jej s anténou na původní dielektrické podložce. Jednotlivé substráty se od sebe lišily pouze samotnou tloušťkou, ostatní parametry byly shodné nebo se lišily nepatrně. Při záměně substrátu, došlo při simulaci u všech antén k zeslabení (snížení účinnosti antény v daném pásmu) a posunutí pracovních pásem na nižší frekvence. Optimalizovaná anténa využívající PIN diody se shoduje se simulovanou anténou. Anténa využívající FET přepínače pro připojení kovové plochy, se taktéž po optimalizaci shoduje se simulovanou anténou a došlo k malému rozšíření pracovního pásma antény. Směrové charakteristiky antény nebylo třeba optimalizovat, odpovídají simulovaným. Optimalizované antény se celkovými rozměry od původních liší pouze minimálně, anténa dosahuje větších rozměrů pouze v šířce. Většina přizpůsobení se realizovala modifikací výřezu, čili změnou struktury anténního flíčku nebo pozicí indukčního SMD čipu.

Dalším krokem bylo pokusit se o experimentální ověření vlastností antén. Za tímto účelem byl jako aktivní prvek u antén vybrán GaAs FET přepínač, který svými

vlastnostmi nijak neovlivňuje frekvenční pásma. Na zadaném rozsahu 0,8 GHz až 2,5 GHz vykazuje malý vložný útlum (max. 0,5 dB). Následně bylo přistoupeno k samotné realizaci antén. Pro návrh desky plošných spojů byl vybrán komerčně dostupný software AutoCAD 2011, kde je umožněno jednoduše modelovat speciální tvary antén, s tím související ohyb a samotný výřez tvaru trychtýře. Vyrobené antény s aktivním prvkem nemohly být bohužel otestovány, na vině byl nefungující aktivní prvek. Po přivedení ovládacího napětí na vymezené piny nedošlo k žádnému sepnutí, tzv. vytvoření vodivé cesty. Proto bylo nutné ověřit funkci antény jiným způsobem. Přistoupeno bylo k ověření funkcí antén bez aktivního prvku, ten antény ovlivňuje minimálním útlumem, proto lze realizaci bez aktivního prvku, kterým byl GaAs FET přepínač srovnávat s realizací s aktivním prvkem. Funkci aktivního prvku v případě PN nahradilo manuální přepínání koaxiálního kabelu do různých míst, tj. byly vyrobeny dvě antény, jedna s napájením portu 0 a druhá portu 1. U antény s PZ byly vyrobeny taktéž dvě antény, první s připojenou plochou k flíčku a druhá s rozpojením, zde můžeme měření bez aktivního prvku srovnávat s realizací s aktivním prvkem. Nestačilo ovšem pouze ověřit funkci antén, ale bylo nutné otestovat taktéž přepínač. K tomuto účelu byl vyroben testovací obvod s touto aktivní součástí. A jeho funkce byla dokázána na vybuzení vstupní brány a následném ověření, zda jsou jednotlivé brány 1-3 nebo 1-2 propojeny. Rozhodovací úrovně pro sepnutí byly stejné jako tab. 3.1. Důvod, proč tento prvek nefungoval již v realizovaných anténách, může být ten, že byly dodány vadné kusy tohoto přepínače nebo špatná manipulace při usazování do desky plošných spojů a s tím spojené pájení.

Po úspěšné výrobě antén bylo přistoupeno k samotnému experimentálnímu ověření vlastností. Při měření průběhu činitele odrazu na vstupu antény bylo nutné nejdříve kalibrovat přístroj a poté již mohlo být uskutečněno samotné měření. Při ověření bylo zjištěno, že u antény s PN došlo na vyšších frekvencích k posunu zhruba o 150 MHz, toto mohlo být zaviněno přesností výroby leptací technologií. Dalo by se říci, že u obou módů antény PN bylo dosaženo v druhé rezonanci lepšího přizpůsobení než u antény simulované. U antény s PZ si průběhy sobě v podstatě tvarově odpovídaly, změna nastala ve výskytu další rezonance u antény v módu 0 na kmitočtu 1,9 GHz, což můžeme brát jako pozitivum, neboť je zde požadované pracovní pásmo antény. Stejně tak v módu 1 došlo k většímu rozestupu rezonančních frekvencí od sebe. To je zapříčiněno nepřesným usazením koaxiálního kabelu na samotnou desku plošných spojů, kdy jedna desetina milimetru, může pro rezonanci znamenat posun o několik MHz. Dále u tohoto modelu došlo k zeslabení na frekvenci 2,20 GHz. Stejně tak jako záleží na přesnosti napájecího kabelu, přesných rozměrech, záleží také na odchylce pasivních součástek, které jsou do desky plošných spojů vloženy pro přizpůsobení impedance antény. Především u kapacity, kde je výrobcem stanovená odchylka 25 %. Výsledkem zhodnocení těchto antén je, že antény dokáží pracovat v zadaných pásmech. Součástí je taktéž srovnání simulované optimalizované antény s anténou vyrobenou. Při měření směrových charakteristik antén, nebylo možné měřit zisk antén, proto jsou ke konci práce uvedeny simulované hodnoty zisku vztažené k izotropnímu zářiči. Měřené a simulované hodnoty je nutné normovat, proto směrové charakteristiky dosahují hodnot od 0 do 1. Směrové charakteristiky není možné srovnávat z hlediska hodnot, jde pouze o orientační srovnání, kde můžeme vidět tvar vyzařovací charakteristiky. Maximální možná frekvence měření směrových charakteristik byla 870 MHz, díky omezení přístrojů.

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1.1 Flíčková planární anténa s bočním pohledem..... | 3 |
| Obr. 1.2 a) Napájení koaxiálním kabelem b) napájení pomocí mikropásku..... | 3 |
| Obr. 1.3 Přizpůsobení charakteristiky výřezem tvaru L ve flíčku..... | 4 |
| Obr. 1.4 Přizpůsobení přidáním parazitních prvků..... | 4 |
| Obr. 1.5 a) Typická realizace PIFA antén, b) realizace pomocí SMD čipů..... | 5 |
| Obr. 2.1 a) Přepínání napájení b) Připojení, rozpojení země..... | 6 |
| Obr. 2.2 a) Rozměry designu PN b) Simulační model PN..... | 8 |
| Obr. 2.3 Činitel odrazu s_{11} pro model PN v jednotlivých módech..... | 9 |
| Obr. 2.4 Směrové charakteristiky PN mód 0 v polárním 1D grafu..... | 11 |
| Obr. 2.5 3D směrová charakteristika v CST - PN mód 0, a) 920 MHz, b) 1800 MHz..... | 11 |
| Obr. 2.6 Směrové charakteristiky PN mód 1 v polárním 1D grafu..... | 12 |
| Obr. 2.7 3D směrová charakteristika v CST - PN mód 1, a) 920 MHz, b) 2050 MHz..... | 12 |
| Obr. 2.8 a) Rozměry designu PZ b) Simulační model PZ..... | 13 |
| Obr. 2.9 Činitel odrazu s_{11} pro PZ v jednotlivých módech..... | 14 |
| Obr. 2.10 Směrové charakteristiky PZ mód 0 v polárním 1D grafu..... | 15 |
| Obr. 2.11 3D směrová charakteristika v CST - PZ mód 0, a) 920 MHz, b) 1800 MHz..... | 15 |
| Obr. 2.12 Směrové charakteristiky PZ mód 1 v polárním 1D grafu..... | 16 |
| Obr. 2.13 3D směrová charakteristika v CST - PZ mód 1, a) 1900 MHz, b) 2300 MHz..... | 16 |
| Obr. 3.1 PIN dioda v zapojení PN a PZ..... | 17 |
| Obr. 3.2 GaAS FET přepínač v zapojení PN a PZ..... | 18 |
| Obr. 3.3 MEMS přepínač v zapojení PN a PZ..... | 19 |
| Obr. 4.1 Vliv změny substrátu na pracovní pásma antény PN mód 0..... | 20 |
| Obr. 4.2 Vliv změny substrátu na pracovní pásma antény PN mód 1..... | 21 |
| Obr. 4.3 Elektrické pole PN mód 0, frekvence 920 MHz..... | 21 |
| Obr. 4.4 Elektrické pole PN mód 0, frekvence 1900 MHz..... | 22 |
| Obr. 4.5 Elektrické pole PN mód 1, frekvence 980 MHz..... | 22 |
| Obr. 4.6 Elektrické pole PN mód 1, frekvence 2150 MHz..... | 22 |
| Obr. 4.7 Rozměry opt. designu PN..... | 23 |
| Obr. 4.8 Simulační model opt. PN..... | 23 |
| Obr. 4.9 Činitel odrazu s_{11} pro optimalizovaný model PN mód 0..... | 23 |
| Obr. 4.10 Činitel odrazu s_{11} pro optimalizovaný model PN mód 1..... | 24 |
| Obr. 4.11 Směrové charakteristiky PN mód 0 v polárním 1D grafu..... | 25 |
| Obr. 4.12 3D směrová charakteristika v CST - PN mód 0, a) 920 MHz b) 1800 MHz..... | 25 |
| Obr. 4.13 Směrové charakteristiky PN módu 1 v polárním 1D grafu..... | 26 |
| Obr. 4.14 3D směrová charakteristika v CST - PN módu 1, a) 920 MHz, b) 2050 MHz..... | 26 |
| Obr. 4.15 Vliv změny substrátu na pracovní pásma antény PZ mód 0..... | 27 |
| Obr. 4.16 Vliv změny substrátu na pracovní pásma antény PZ mód 1..... | 27 |
| Obr. 4.17 Elektrické pole PZ mód 0, frekvence 1000 MHz..... | 28 |
| Obr. 4.18 Elektrické pole PZ mód 0, frekvence 2100 MHz..... | 28 |
| Obr. 4.19 Elektrické pole PZ mód 0, frekvence 2100 MHz..... | 29 |
| Obr. 4.20 Elektrické pole PZ mód 0, frekvence 2400 MHz..... | 29 |
| Obr. 4.21 a) Rozměry opt. designu PZ, b) Simulační model opt. PZ..... | 30 |
| Obr. 4.22 Činitel odrazu s_{11} pro optimalizovaný model PZ mód 0..... | 30 |
| Obr. 4.23 Činitel odrazu s_{11} pro optimalizovaný model PZ mód 1..... | 31 |
| Obr. 4.24 Směrové charakteristiky opt. PN mód 0 v polárním 1D grafu..... | 32 |
| Obr. 4.25 3D směrová charakteristika v CST - opt. PN mód 0, a) 920 MHz, b) 1800 MHz..... | 32 |
| Obr. 4.26 Směrové charakteristiky opt. PN mód 1 v polárním 1D grafu..... | 33 |
| Obr. 4.27 3D směrová charakteristika v CST - opt. PN mód 1, a) 1900 MHz, b) 2300 MHz..... | 33 |
| Obr. 5.1 Pohled na vyrobený model antén PZ a PN spolu s napájecími kabely pro přepínač..... | 35 |
| Obr. 5.2 Pohled na vyrobený model antény PN bez aktivního přepínacího prvku..... | 35 |
| Obr. 5.3 Pohled na vyrobený model antény PZ bez aktivního přepínacího prvku..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Obr. 5.4 Pohled na testovací obvod s FET GaAs přepínačem. | 36 |
| Obr. 5.5 Vektorový obvodový analyzátor R&S ZVL. | 37 |
| Obr. 5.6 Uspořádání při měření směrových charakteristik. | 38 |
| Obr. 5.7 Bezodrazová komora. | 38 |
| Obr. 5.8 Naměřené hodnoty činitele odrazu na vstupu antény PN (R&S ZVL6). | 39 |
| Obr. 5.9 Normované měřené směrové charakteristiky PN mód 0; 870 MHz. | 40 |
| Obr. 5.10 Normované měřené směrové charakteristiky PN mód 1; 870 MHz. | 40 |
| Obr. 5.11 Naměřené hodnoty činitele odrazu na vstupu antény PZ (R&S ZVL6). | 41 |
| Obr. 5.12 Normované měřené směrové charakteristiky PZ mód 0; 870 MHz. | 41 |
| Obr. 5.13 Porovnání simulovaných a naměřených hodnot antény PN. | 42 |
| Obr. 5.14 Normované simulované a měřené směrové charakteristiky PN mód 0; 870 MHz. | 43 |
| Obr. 5.15 Normované simulované a měřené směrové charakteristiky PN mód 1; 870 MHz. | 43 |
| Obr. 5.16 Porovnání simulovaných hodnot a naměřených antény PZ v módu 0. | 44 |
| Obr. 5.17 Porovnání simulovaných hodnot a naměřených antény PZ v módu 0. | 44 |
| Obr. 5.18 Normované simulované a měřené směrové charakteristiky PZ mód 0; 870 MHz. | 45 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 2.1 Jednotlivá pásma a frekvence..... | 7 |
| Tab. 2.2 Parametry simulací v programu CST..... | 10 |
| Tab. 3.1 Rozhodovací úrovně FET přepínače..... | 18 |
| Tab. 4.1 Srovnání substrátů..... | 20 |
| Tab. 5.1 Použité součástky při výrobě | 34 |
| Tab. 5.2 Srovnání zisků jednotlivých simulovaných antén..... | 45 |

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd edition. New York : J. Wiley and Sons, 2005. 1073 s. ISBN 0-471-66782-X.
- [2] ČERNOHORSKÝ, D., RAIDA, Z., ŠKVOR, Z., NOVÁČEK, Z.: *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur*. VUTIUM, Brno 1999. ISBN 80-214,1512-6.
- [3] MAK, A.C.K., ROWELL, C.R., MURCH, R.D., MAK, C.L. „Reconfigurable multiband antenna designs for wireless communication devices.“ *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (IEE Transactions), 2007: vol. 55, no.7, p. 1919-1929.
- [4] POKORNÝ, M. *Vícepásmové planární antény*. Brno, 2007. 69 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] ŠIMEK, R. *Automatizovaný GA/MOM návrh vícepásmových PIFA antén*. Praha, 2008. 84 s. Diplomová práce. České vysoké učení technické.
- [6] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z. *Antény a šíření rádiových vln*. Skripta FEKT VUT, Brno 2003, ISBN 80-86056-47-3.
- [7] Příklady návrhu v programu CST, 20. 4. 2010 dostupné na WWW: <http://www.cst.com>
- [8] Učebnice EM vln a mikrovlnné techniky, 28. 11. 2010 dostupné na WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia>
- [9] PROKEŠ, A., HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace*. Brno: VUTIUM, 2005. 134 s.
- [10] PROKOPEC, J., HANUS, S. *Systémy mobilních komunikací*. Brno: VUTIUM, 2010. 134 s.
- [11] RAIDA, Z.: *Počítačové řešení komunikačních systémů*. Brno: VUTIUM, 2004. 97 s.
- [12] Gabriel K. H. Lui and Ross D. Murch. „Compact Dual-Frequency PIFA Designs Using LC Resonators.“ *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (IEE Transactions). 2001, vol. 49, no.7, p. 1016-1019.
- [13] RAIDA, Z., *Optimalizace v elektrotechnice*. Online učebnice, 12.10.2010 dostupné na WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/optimalizace>.
- [14] Manuál k přístroji R&S ZVL6, 10. 5. 2011 dostupné na WWW: <http://www.rohde-schwarz.cz/product/ZVL6>.

[15] Elektromagnetické vlny, vedení a antény, 14. 5. 2011 dostupné na WWW:
<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/index.htm>

[16] Popis vybavení laboratoře antén, 14. 5. 2011 dostupné na WWW:
<http://www.six.feec.vutbr.cz>.

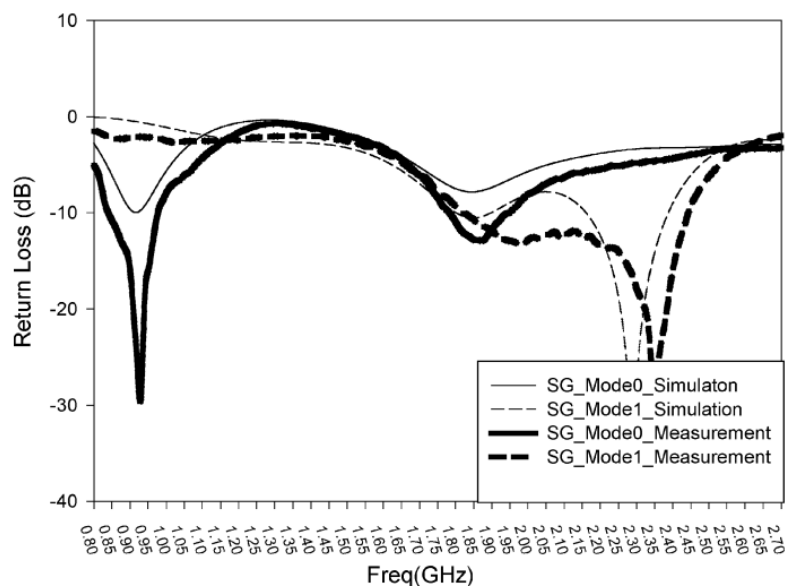
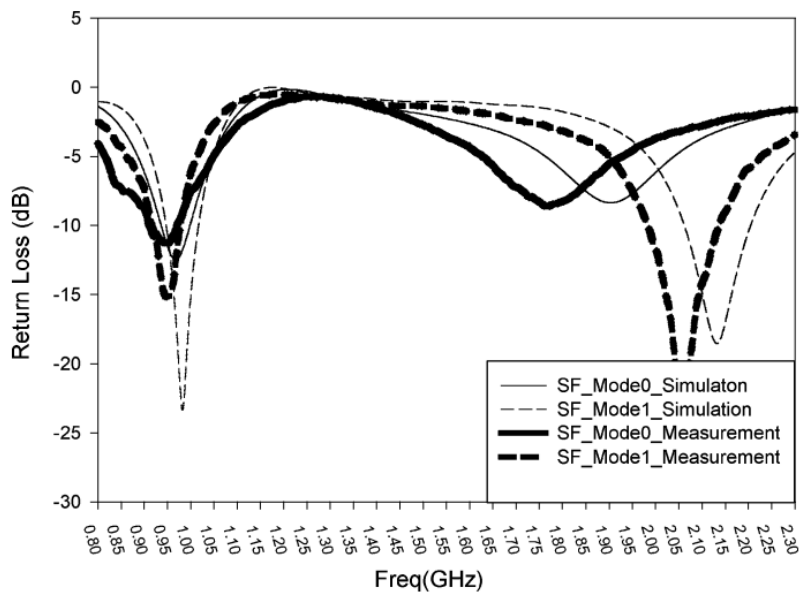
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | | |
|--------------|---|--|
| PN | - | Přepínání napájení |
| PZ | - | Připínání zemní plochy |
| PIFA | - | Planární invertovaná F-anténa |
| S_{11} | - | Modul činitele odrazu [dB] |
| CST | - | Computer Simulation Technology, program používaný k simulaci |
| f | - | Frekvence [GHz] |
| ϵ_r | - | Relativní permitivita prostředí nebo materiálu |
| W | - | Šířka flíčku [mm] |
| L | - | Délka flíčku [mm] |
| GSM | - | Systém mobilní komunikace |
| UMTS | - | Universal Mobile Telecom. System |
| DCS | - | Digital Cellural Systém, rozšíření GSM |
| PCS | - | Personal Communications Service, rozšíření GSM |
| WLAN | - | bezdrátová lokální síť |
| c | - | rychlost světla ve vakuu [m/s] |

SEZNAM PŘÍLOH

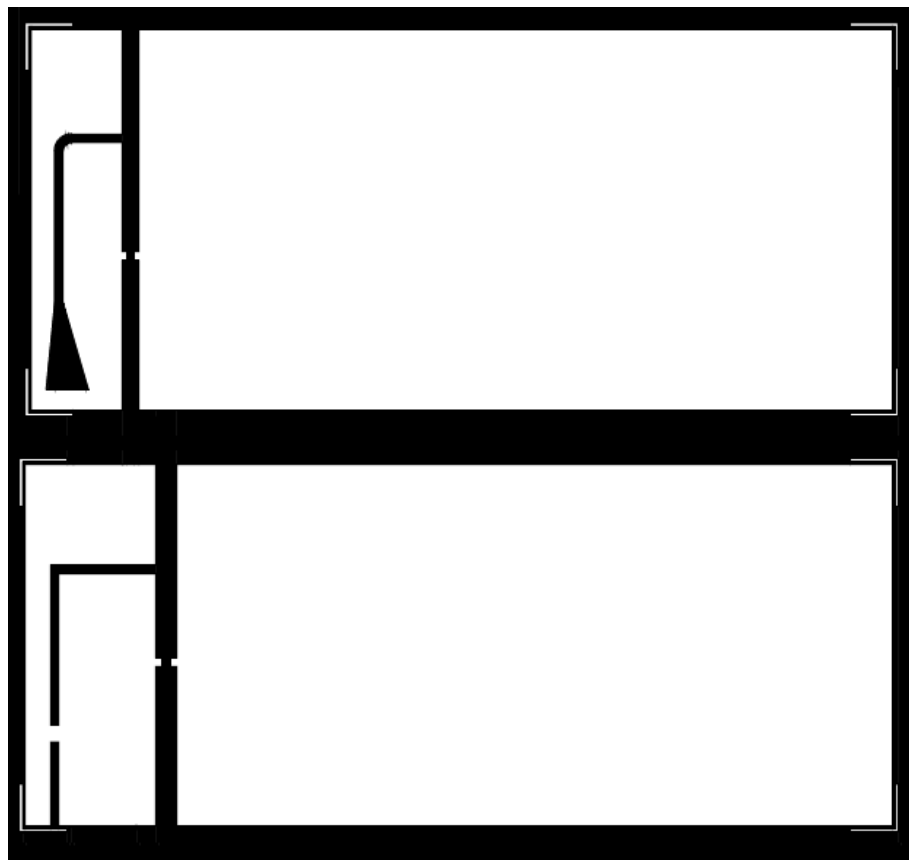
| | |
|---|-----|
| Příloha 1: Simulované i měřené charakteristiky antén z [3]. | I |
| Příloha 2: Navrhnuté optimalizované antény. | II |
| Příloha 3: Testovací obvod pro GaAs FET přepínač. | III |

Příloha 1



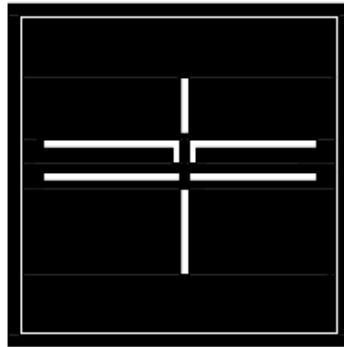
Příloha 1 Simulované i měřené charakteristiky antén z [3].

Příloha 2



Příloha 2 Navrhnuté optimalizované antény. Kresleno v AutoCAD.

Příloha 3



Příloha 3 Testovací obvod pro GaAs FET přepínač. Kresleno v AutoCAD.