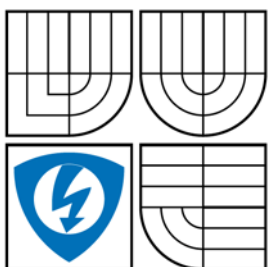


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANTÉNY PRO RFID (RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION)

TITLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VLADIMÍR STARÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. Dr. Ing. ZBYNĚK RAIDA

BRNO 2007

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Vladimír Starý

Bytem: Radlín 11, Heřmanův Městec 538 03

Narozen/a (datum a místo): 17.ledna 1985 v Chrudimi

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida,

předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

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

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Antény pro RFID (Radio Frequency Identification)
Vedoucí/ školitel VŠKP:	Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Ústav:	Radioelektroniky
Datum obhajoby VŠKP:	

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v* :

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

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracování díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Cílem práce bylo navrhnout a realizovat vhodnou anténu pro radiofrekvenční identifikaci (RFID) v pásmu 866 až 869 MHz. V první části bakalářské práce jsou souhrnné zpracovány všeobecné poznatky o anténách pro RFID, je popsáno jejich modelování ve vhodném komerčním programu a je vybrána nejvhodnější anténa pro realizaci. Druhá část práce se zabývá vybranou anténou, její optimalizací, toleranční analýzou, výrobou a experimentálním ověřením jejích parametru.

Radiofrekvenční identifikace, meandrová anténa, flíčková anténa, aperturově vázaná anténa.

ABSTRACT

The thesis is aimed to the design and the realization of an antenna for the radiofrequency identification (RFID) in the frequency band from 866 to 869 MHz. In the first part of the thesis, general knowledge about RFID antennas is reviewed, computer modeling of RFID antennas in suitable commercial programs is described, and a suitable RFID antenna is selected. The second part of the thesis deals with the selected antenna, its optimization, tolerant analysis, fabrication and experimental verification of its parameters.

Radio frequency identification, meander antenna, patch antenna, aperture coupling antenna.

Bibliografická citace mé práce:

STARÝ, V. *Antény pro RFID (Radio Frequency Identification)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Antény pro RFID(Radio Frequency identification)“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi, za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné připomínky, jimiž mne vedl ke zdárnému napsání této práce, a kterých si velmi vážím. Můj další dík patří Ing. Zbyňku Lukešovi, Ph.D. a Ing. Jaroslavu Láčíkovi, Ph.D. za cenné rady při práci s programy IE3D a CST. Také děkuji Ing. Jiřímu Horákovi a Ing. Vítězslavu Krčmáři, zaměstnanci firmy ERA, za změření směrových charakteristik antény v bezodrazové komoře.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

1 Úvod	7
2 Teoretická část	8
2.1 Výkonnostní kritéria	8
2.2 Požadavky na návrh	9
Frekvenční pásmo	9
Velikost a tvar	9
Dosah	9
Aplikace s pohyblivostí	9
Cena	9
Spolehlivost	10
3 Výběr antény pro realizaci	10
3.1 Obecné vlastnosti	10
3.2 Druhy antén a jejich konfigurace	10
Anténa tvořená meandrem	10
Planární anténa s U-štěrbinou	11
Aperturově vázaná planární anténa s duální polarizací	12
Planární anténa s kruhovým flíčkem (patch)	12
4 Návrh antén	13
4.1 Anténa tvořená meandrem	13
4.2 Planární anténa s U-štěrbinou	17
4.3 Planární anténa s kruhovým flíčkem	21
4.4 Aperturově vázaná planární anténa s duální polarizací	24
5 Praktické ověření parametrů antény	27
5.1 Měření směrových charakteristik	27
6 Výsledky měření	29
6.1 Naměřené hodnoty aperturově vázané antény	29
6.2 Shrnutí naměřených hodnot	31
7 Závěr	32
Literatura	33
Seznam použitých zkratk a symbolů	33

1 Úvod

Počátky vývoje technologie RFID (*Radio Frequency Identification*) sahají hluboko do druhé poloviny minulého století. S globalizací ekonomiky se zvýšil tlak na evidenci přepravovaného materiálu a jeho skladování. Rozvoj informačních technologií dal lidstvu do ruky nástroje, jak tyto problémy efektivně řešit. Ale jak získané informace nelépe do nových informačních systémů dopravit? Prvním, dnes už všeobecně rozšířeným způsobem identifikace, byl čárový kód.

První myšlenka, která dala vzniknout jeho konkurentu, čipu, se objevila v roce 1969 (Američan Mario Cardullo). Patent získal v roce 1973. V sedmdesátých letech se na vývoji podílela řada firem, mimo jiné IBM, ComServ a FairChild. V devadesátých letech s vytvořením prvních standardů nastaly podmínky pro mezinárodní využívání RFID. Samotná technologie existuje již od 20. let minulého století, z roku 1939 pochází podobná technologie IFF, používaná za války k odlišení vlastních a nepřátelských letadel.

Nové obzory otevřely ovšem této technologii bezdrátové sítě. Nyní čím dál více firem zvažuje používání čipů nebo SmartTagů. Nejde již o pouhou identifikaci a rychlou logistiku, ale také o to, aby si výrobky mezi sebou "rozuměly". Je zde i vize inteligentní domácnosti.

V poslední době se v odborném tisku objevila řada informací o technologii RFID a jejím využívání v oblasti automatického sběru dat a jejich elektronické komunikace v souvislosti s maloobchodním sektorem a řízením zásobovacího řetězce. Řada z nich předpovídá brzký konec současné "klasice" v tomto oboru, totiž snímání čárových kódů systému EAN·UCC.

Fenoménem, který bezesporu akceleroval zájem o RFID technologii, je elektronická identifikace zboží, tzv. EPC (*Electronic Product Code*). Jinými slovy jde o využití technologie RFID nejenom pro přenos dat, ale i přímo pro identifikaci zboží.

Stejně jako systém EAN·UCC také EPC je mezinárodně standardizovaným identifikačním systémem. Rovněž jeho filozofie je v principu shodná, protože k identifikaci využívá unikátní, nevýznačné číslo, které na sebe váže další údaje o identifikované položce. Tento jednoznačný klíčový údaj pak umožňuje ukládání, vyhledávání a komunikaci příslušných dat na principu Internetové technologie v rámci globální zabezpečené sítě (*EPC Global Network*).

EPC je označováno jako nová generace identifikačního systému především pro jeho obrovskou kapacitu, která umožňuje identifikovat každou konkrétní položku v zásobovacím řetězci.

Jako nosiče EPC identifikace jsou využívány RFID tagy, které se skládají z mikročipu obsahujícího identifikační „číslo“ a antény, která zajišťuje přenos informace z čipu do čtecího zařízení. Tagy mohou mít různou kapacitu a „inteligenci“¹.

Hlavní výhodou RFID je bezkontaktní povaha technologie, která nevyžaduje pro svoji činnost přesné polohování jako je tomu u infračerveného přenosu dat. Přenosu dat z čipu nebrání ani špatné optické či atmosférické podmínky, kdy snímače čárových kódů naráží na limity optických zařízení. Přínosem je i rychlost čtení, pohybující se většinou

¹ Převzato z: <http://www.ean.cz/EAG-22-a189550-X-rfid/index.php>

v časech pod 100 milisekund. Aktivní čipy pak přinášejí nové možnosti interakce identifikačního procesu.

Základní systém sestává ze tří komponent: antény, přijímače/vysílače a nosiče informace – elektronicky programovatelného čipu.

Vysílač/přijímač vysílá prostřednictvím antény rádiové signály aktivující čip a provádí zápis a čtení jeho dat. Čtečky (přijímače integrované s anténami) jsou dostupné v širokém spektru tvarů a velikostí; mohou být instalovány ve dveřním rámu stejně jako v příručním zařízení. Jejich dosah se pak pohybuje od jednotek centimetrů po desítky až stovky metrů v závislosti na energetickém výkonu a použité rádiové frekvenci. Čtečka dekóduje data z čipu a předává je řídicímu počítači ke zpracování.

Čipy se dělí na aktivní a pasivní podle toho, zda je možné informace z nich nejen číst (pasivní), ale i do nich zapisovat (aktivní). Aktivní jednotky pak musí disponovat vlastním zdrojem energie. Ten obstarává miniaturní baterie. Jejich paměť pro zápis může dosahovat až 1 MB.

Systémy RFID dále rozlišuje použitá frekvence. Nízkofrekvenční systémy (od 30 kHz do 500 kHz) mají nižší pracovní dosah. Typicky jsou používány pro bezpečnost či sledování majetku a identifikaci zvířat. Vysokofrekvenční systémy (od 850 MHz do 950 MHz a od 2,4 GHz do 5,5 GHz) nabízejí větší dosah (nad 90 metrů) a vysoké rychlosti čtení. Používají se například při převozu automobilů po železnici či při sestavování výrobků na automatické lince.

Každá země má pro RFID vlastní frekvenční pásmo. Např. pro Evropu je vyhrazeno pásmo od 866 MHz do 869 MHz, pro Ameriku pásmo od 902 MHz do 928 MHz a pro Japonsko a jiné asijské země pásmo od 950 MHz do 956 MHz [3].

V této práci se budu zabývat základními požadavky kladenými na antény pro rádiovou identifikaci a postupem návrhu a realizace těchto antén. Vyberu vhodného zástupce antén pro RFID a vytvořím jeho model ve vhodném komerčním programu. Anténa bude optimalizována, bude provedena její toleranční analýza.

2 Teoretická část

2.1 Výkonnostní kritéria

Nejdůležitějším kritériem pro návrh antény RFID tagu je maximální vzdálenost (dosah), v níž je čtečka schopna ještě detekovat odezvu nosiče dat (tagu). Odezva je způsob komunikace mezi pasivním tagem a čtečkou RFID. Tag přijme signál (energii) a její část použije pro odeslání dat zpět ke čtečce na stejné nosné frekvenci. Protože citlivost čtečky je typicky větší v porovnání s tagem, dosah je definován napět'ovou odezvou tagu. Dosah dále závisí na orientaci, materiálu, na němž je tag umístěn, a na prostředí, ve kterém pracuje.

Dosah (*read range*) r se vypočítá podle následujícího vztahu [3]

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \tau}{P_{th}}}, \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka, P_t je výkon dodávaný čtečkou tagu, G_t je zisk vysílací antény čtečky, G_r je zisk přijímací antény RFID tagu, P_{th} je minimální výkon dodaný anténou, nutný k napájení čipu a τ je přenosový koeficient daný vztahem [3]

$$\tau = \frac{4 \cdot R_c \cdot R_a}{|Z_c + Z_a|}, 0 \leq r \leq 1 \quad (2)$$

kde $Z_c = R_c + jX_c$ je impedance čipu a $Z_a = R_a + jX_a$ je impedance antény.

2.2 Požadavky na návrh

Požadavky na návrh RFID tagů lze shrnout do následujících bodů:

Frekvenční pásmo

Požadované frekvenční pásmo, ve kterém bude anténa pracovat, závisí na nařízení země, kde bude tag použit.

Velikost a tvar

Velikost a tvar tagu musí být takový, aby mohl být vložen nebo připevněn k označovanému předmětu (např. lepenková krabice, věšáčka, identifikační karta apod.).

Dosah

Minimální požadovaný dosah bývá předepsán různě:

1. Efektivní všesměrově vyzářený výkon (EIRP) je určen místními předpisy.
2. Předmět. Provedení tagu závisí na předmětu, na něž má být umístěn (lepenková krabice s různým obsahem). Anténa tagu by měla být navržena buď pro optimální výkonnost na určitém předmětu nebo nesmí být citlivá na předmět, na kterém je tag umístěn.
3. Směrnost. Dosah závisí na směrovosti antény. Některé aplikace požadují, aby tagy vyzářovaly všesměrově v celém prostoru nebo alespoň v jednom poloprostoru.

Aplikace s pohyblivostí

RFID tagy mohou být použity v situacích, kdy označené předměty jako palety nebo krabice putují po dopravním pásu rychlostí až 10 km/h. Tím pádem tag stráví méně času v čtecím poli RFID čtečky, což klade požadavek na relativně velkou rychlost čtení. V takových případech musí být RFID systém pečlivě navržen, aby byla zajištěna dostatečná spolehlivost identifikace tagu.

Cena

RFID tag musí být co nejlevnější. Tuto podmínku je třeba brát v potaz jak při návrhu anténní struktury tak při výběru materiálu, ze kterého bude tag zhotoven. Typickými materiály ke zhotovení tagu jsou měď, hliník a stříbro. Dielektrikum je tvořeno pružným polyesterem a tuhým substrátem jako např. FR4.

Spolehlivost

RFID tagy musejí být spolehlivými zařízeními, které pracují nezávisle na proměnlivosti teplot, vlhkosti a dalších klimatických podmínek. RFID tagy musejí bezpodmínečně vydržet procesy jako připevnění štítku, tisknutí a laminaci.

3 Výběr antény pro realizaci

3.1 Obecné vlastnosti

Pro realizaci antén RFID tagů můžeme použít několik typů zářičů. Při výběru se musíme především zaměřit na některé důležité parametry.

Z pohledu frekvence se tagy dělí na dva základní typy – nízkofrekvenční (NF) a vysokofrekvenční (VF). Nízkofrekvenční systémy pracují na principu indukční vazby, jsou pomalejší, pracovní vzdálenost je menší (do asi jednoho metru) a jsou levnější. Vysokofrekvenční systémy používají radiofrekvenční vazbu pro přenos informací, jsou rychlejší, pracovní vzdálenosti jsou mnohem větší a jsou dražší.

Pokud srovnáme rozměry NF a VF antén, se vzrůstajícím kmitočtem rozměry klesají. Teoreticky by šlo vytvořit anténu, která by pracovala na vyšších kmitočtech, než se dosud v praxi používají. Narážíme však na problém nákladného zhotovení takové antény.

Z pohledu zápisu informací na paměťový prvek mohou být tagy určeny pouze pro čtení nebo pro čtení a zápis.

Radiofrekvenční signál je vyzařován efektivně, jestliže vlnová délka na pracovní frekvenci je srovnatelná s rozměry antény. Pro kmitočty např. 13,56 MHz (typické pro nízkofrekvenční systémy) je vlnová délka 22,12 metrů, a vyrobit takovou anténu by bylo nemožné. Místo toho však lze vytvořit obvod s malou smyčkou (cívkou) a kondenzátorem, který tvoří rezonanční obvod naladěný na pracovní frekvenci. Přenos napětí mezi dvěma cívkami (čtecím zařízením a nosičem) je docílen induktivní vazbou. Účinnost přenosu je možné zvýšit zvětšením činitele jakosti rezonančního obvodu.

Pro vysokofrekvenční systémy např. 868 MHz je vlnová délka 34,56 cm. Pro takové frekvence už můžeme anténu pro přenos pomocí radiových vln realizovat.

3.2 Druhy antén a jejich konfigurace

Pro zhotovení antény vysokofrekvenčního RFID nosiče budu vybírat ze tří typů. První z nich je anténa tvořená meandrem, druhou planární anténa s U-štěrbinou (mikropásek) a poslední aperturově vázaná planární anténa s duální polarizací.

Anténa tvořená meandrem

Motiv antény tvořené meandrem je zobrazen na obr. 1². Meandr dovoluje anténě být kompaktní a dokáže poskytnout všesměrový výkon v rovině kolmé k ose meandru. Anténa sestává z jedné vrstvy substrátu. Na spodní straně není zemní deska, která by tvořila reflektor, a proto anténa vyzařuje všesměrově. Meandr je na vrchní straně

² Převzato z: LAM, S. F., NIKITIN, P. V., RAO, K. V. S.: „*Antenna design for UHF RFID Tags: A review and a practical application*,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol 53, no. 12, p. 3874, Dec. 2005

Mikropáskové antény se od sebe odlišují tvarem anténního prvku (obdélníkový, kruhový), polarizací, způsobem napájení (mikropáskové a koaxiální). V nejjednodušší formě se mikropásková anténa skládá ze dvou paralelních vodivých vrstev oddělených tenkým dielektrickým substrátem. Spodní vodič funguje jako zemní deska, horní jako substrát s anténou.

Klasický příklad mikropáskové antény je zobrazen na obr. 2³. Anténa sestává z jedné vrstvy substrátu. Na vrchní straně je flíček tvaru obdélníku a v něm je odleptaná štěrbinu ve tvaru písmene U. Napájení je koaxiálním vedením, kde střední vodič je připojen provrtaným substrátem k flíčku. Vnější vodič kabelu je připojen ke spodní straně substrátu, kterou tvoří pokovená deska. Ta tvoří reflektor, díky němuž je většina energie elektromagnetického pole soustředěna do poloprostoru nad anténou.

Aperturově vázaná planární anténa s duální polarizací

Příklad takové antény je zobrazen na obr. 3⁴. Anténa používá speciální konfiguraci symetrické a nesymetrické vazby štěrbin.

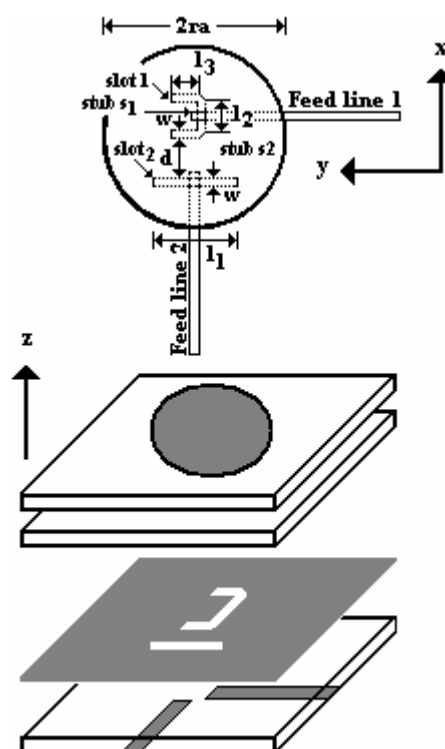
Tento model antény dosahuje nejvyššího zisku 7,6 dBi, šířky hlavního laloku pro pokles o 3 dB 70°, úrovně křížové polarizace -25 dB a izolace mezi dvěma porty -28 dB [1].

Anténa sestává ze tří desek substrátů. Na vrchní desce substrátu je kruhový flíček, který vyzářuje elektromagnetickou energii do okolního prostoru. Mezi prostřední a spodní deskou substrátu je měděná deska, která tvoří reflektor. Aby mohl flíček vyzářovat, jsou v této měděné desce štěrbin, přes které je prostřednictvím mikropáskového vedení, umístěného na spodní straně dielektrického substrátu, flíček buzen.

Planární anténa s kruhovým flíčkem (patch)

Tato anténa je obdobou planární antény s U-štěrbinou. Rozdíl je pouze v tom, že anténa sestává ze dvou desek substrátů.

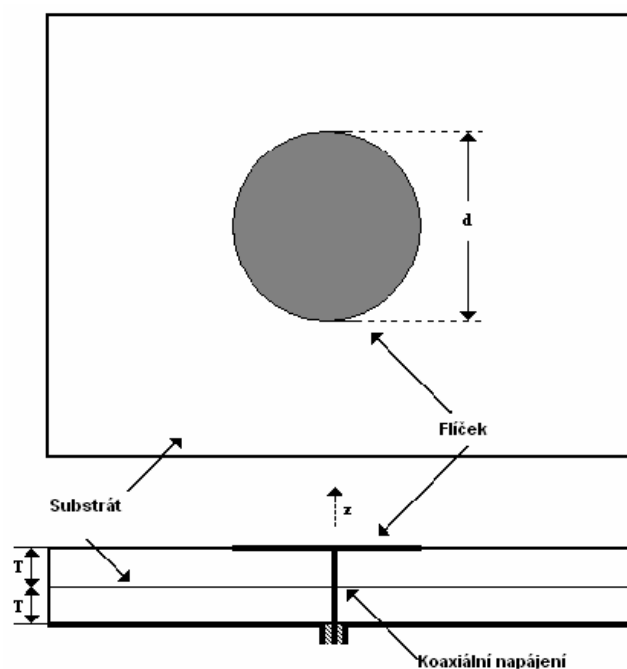
Konfigurace planární antény s kruhovým flíčkem je zobrazena na obr. 4. Anténa sestává ze dvou vrstev substrátu, které jsou na sobě těsně nalepeny. Jejich tloušťka je označena písmenem T. Na vrchní straně je flíček kruhového tvaru, který vyzářuje. Spodní strana slepeného substrátu je zcela pokovená. Napájení je opět koaxiální – střední vodič je připojen provrtaným substrátem k flíčku. Vnější vodič kabelu je připojen ke spodní straně substrátu, kterou tvoří pokovená deska. Ta tvoří reflektor, díky němuž anténa září jen do poloprostoru.



Obr. 3. Konfigurace aperturově vázané planární antény s duální polarizací

³ Převzato z: BERNARD, J. T., HUFF, G. H., PAN, K. H., WEIGAND, S.: „Analysis and design of broad-band single-layer rectangular U-slot microstrip patch antennas,“ IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 51, no. 3, p. 458

⁴ Převzato z: ADITYA, S., KARMAKAR, N. C., LAW, C. L., PADHI, S. K.: „A dual polarized aperture coupled circular patch antenna using a C-shaped coupling slot,“ IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 51, no. 12, p. 3295, Dec. 2003



Obr. 4. Motiv planární antény s kruhovým fličkem

4 Návrh antén

4.1 Anténa tvořená meandrem

Pro návrh byl použit program IE3D. Uvažován byl oboustranně pokovený dielektrický substrát Cuclad 217 GY ($\epsilon_r = 2,17$; $\tan \delta = 0,0009$) tlustý 1,575 mm. Napájení je zde tvořeno symetrickým vedením.

V **tab. 1** jsou uvedeny hodnoty parametrů, které byly upravovány tak, aby rezonanční kmitočet byl v pásmu mezi 866 MHz až 869 MHz. Anténa je vyladěna přesně na kmitočet 867 MHz.

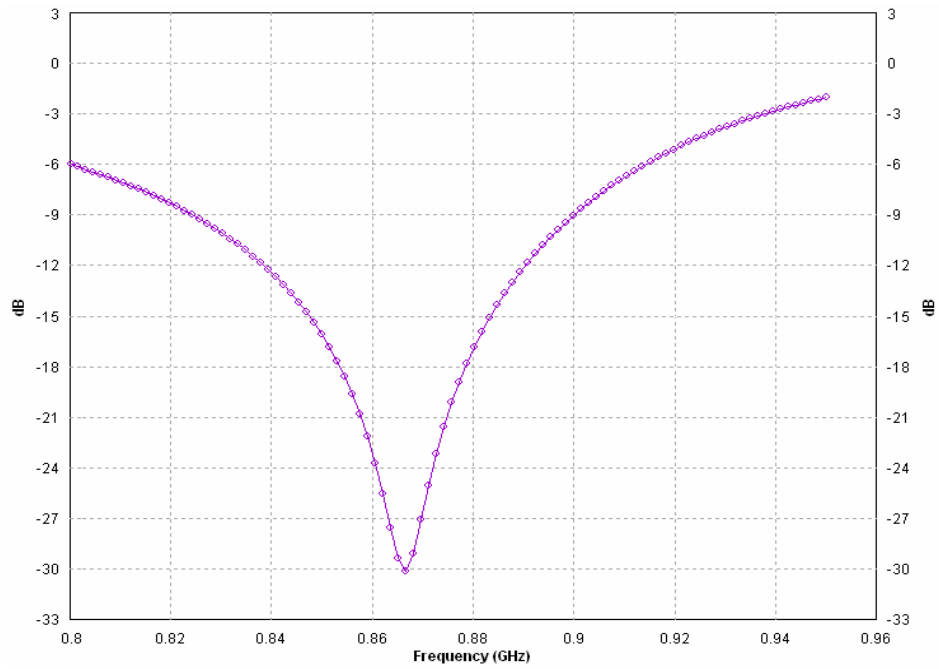
Tab. 1 Parametry antény tvořené meandrem (význam symbolů je vysvětlen v obr. 1).

Parametry	l	w	s	d	a	b
Hodnoty [mm]	133	0,7	0,7	24	6,0	15

Program Zeland IE3D vykresluje kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu antény s_{11} do kartézského grafu nebo do Smithova diagramu. Směrové charakteristiky lze zobrazit v rovinách E a H v kartézských a polárních souřadnicích a v trojrozměrném (3D) prostoru. V **Tab. 2** jsou uvedeny výsledky pro kmitočet 867 MHz.

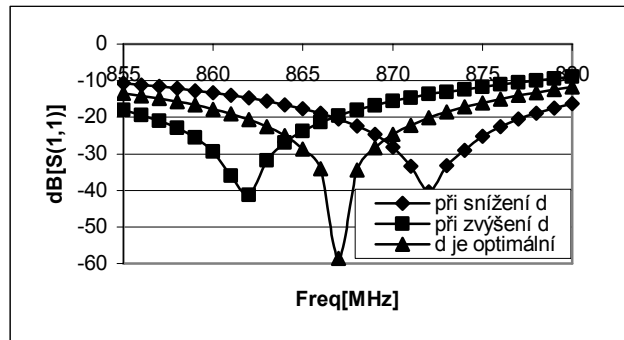
Tab. 2 Výsledné hodnoty parametrů pro anténu pracující na kmitočet 867MHz.

f [MHz]	$s_{1,1}$ [dB]	Z [Ω]	PSV [-]
867	-30	53,25	1,065

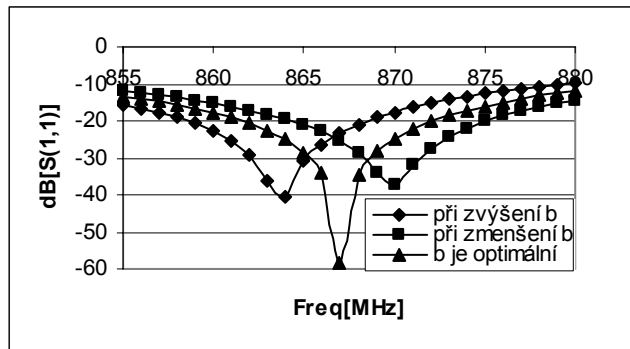


Obr. 5 Kmitočtový průběh modulu činitele odrazu na vstupu antény.

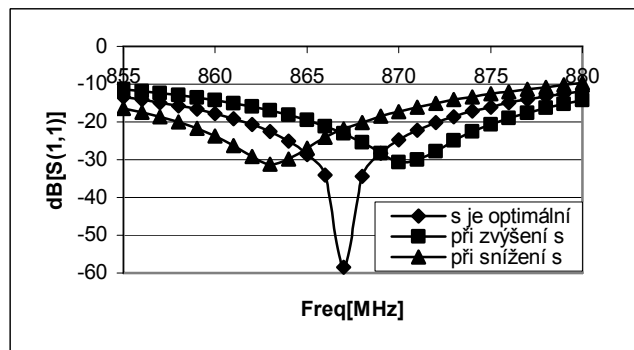
Při návrhu antény byly měněny všechny parametry d , b , s , a , w , l (význam symbolů je vysvětlen v obr. 1). Tím docházelo k výraznému ovlivňování charakteristik. Závislosti vynesené níže jsou uvedeny pouze pro parametry d , b , s . Změna mezery a měla hlavní vliv na posun charakteristiky do požadovaného frekvenčního pásma. Čím větší byla mezera a mezi jednotlivými smyčkami meandru, tím se posouvala charakteristika na nižší kmitočty. Vynesené grafy jsou z programu Excel, data jsou použita ze simulace v programu IE3D.



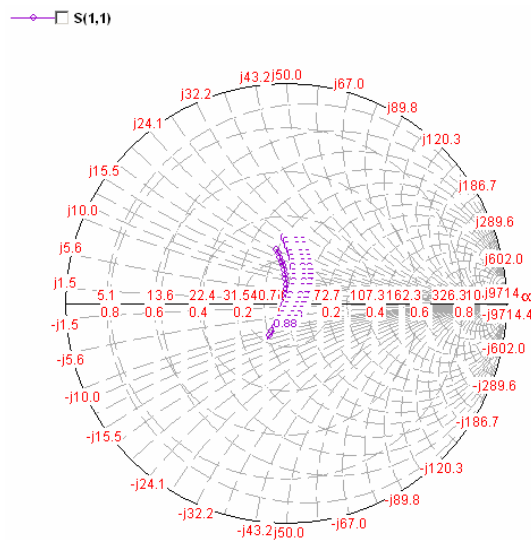
Obr. 6 Kmitočtový průběh modulu činitele odrazu při změně parametru d .



Obr. 7 Kmitočtový průběh modulu činitele odrazu při změně parametru b .

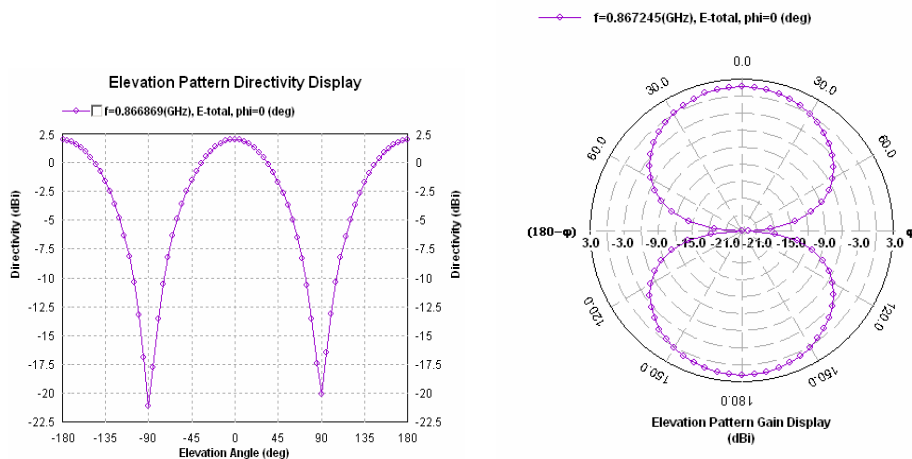


Obr. 8 Kmitočtový průběh modulu činitele odrazu při změně parametru s .

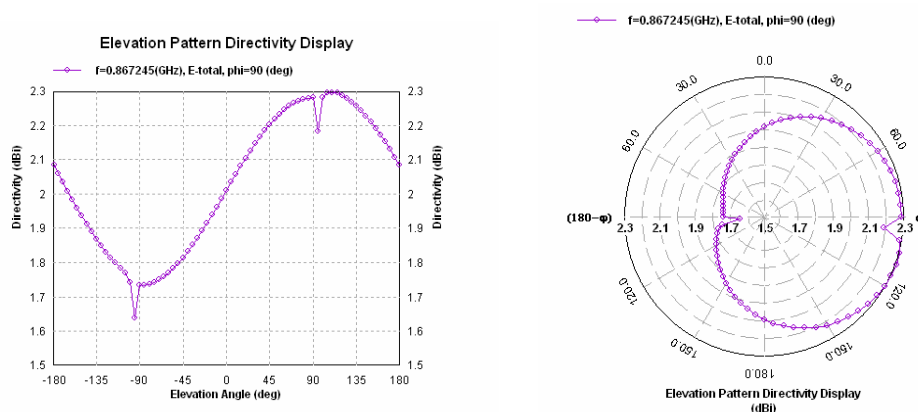


Obr. 9 Kmitočtový průběh modulu činitele odrazu zobrazený ve Smithově diagramu.

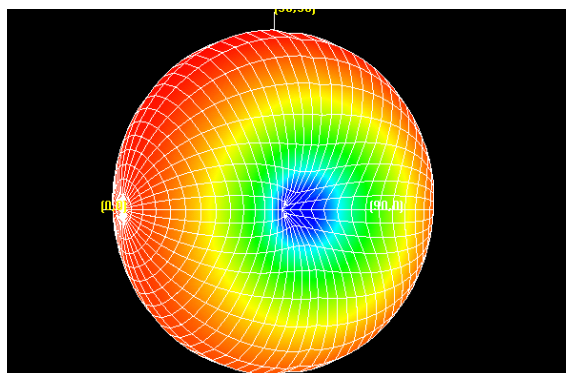
Ze směrové charakteristiky byl odečten zisk antény cca 2,5 dBi.



Obr. 10 Směrové charakteristiky v E rovině pro kmitočt 867 MHz z programu IE3D
 a) v kartézských souřadnicích b) v polárních souřadnicích



Obr. 11 Směrové charakteristiky v H rovině pro kmitočt 867 MHz z programu IE3D
 a) v kartézských souřadnicích b) v polárních souřadnicích



Obr. 12 Směrová charakteristika v 3D prostoru pro kmitočt 867 MHz z programu IE3D

Anténa je vyladěna do rezonance. Výrazné zadní laloky jsou způsobeny tím, že anténa nemá žádný reflektor. V rovině E jsou hlavní a zadní laloky totožné. V rovině H je situace o trochu lepší, zadní lalok se tolik neprojevil. V této rovině je v důsledku absence reflektoru nepatrné vychýlení záření z osy. Při elevačním úhlu 90° je vykreslení charakteristiky odlišné od předpokládaného. To je způsobeno nedokonalým zobrazením programu IE3D. Anténa dosahuje zisku cca 2,5dBi.

4.2 Planární anténa s U-štěrbínou

Jedná se o flíčkovou anténu napájenou koaxiálním kabelem. Pro výpočet rozměrů flíčku bylo použito následujících vztahů. Šířka flíčku W se vypočítá podle [6]

$$W = \sqrt{h \cdot \lambda_d} \cdot \left[\ln \left(\frac{\lambda_d}{h} - 1 \right) \right], \quad (3)$$

kde h je tloušťka substrátu a λ_d značí vlnovou délku. Vlnová délka se vypočítá podle [6]

$$\lambda_d = \frac{c}{f_r \cdot \sqrt{\varepsilon_r}}, \quad (4)$$

kde c je rychlost světla, f_r rezonanční frekvence antény a ε_r relativní permitivita substrátu. Délku flíčku L určíme podle [6]

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_r \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef}}}, \quad (5)$$

kde ε_{ef} je efektivní permitivita, kterou spočítáme podle [6]

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{W}}} \quad \text{pro } W/h \geq 1. \quad (6)$$

Po vypočítání číselných hodnot výše uvedených parametrů byl flíček délky L a šířky W doplněn o štěrbinu ve tvaru U (rozměry štěrbiny byly odvozeny od antény zveřejněné v [2]) a celá anténa byla numericky namodelována. Jelikož anténa nebyla dostatečně impedančně přizpůsobena a také nerezonovala v požadovaném pracovním pásmu, musely být její rozměry upravovány, dokud se rezonanční kmitočet nerovnal 867 MHz a činitel odrazu byl co nejmenší. Výsledné rozměry flíčku jsou uvedeny v **tab. 3**, význam symbolů je vysvětlen v obr. 2. V **tab. 4** jsou uvedeny výsledné hodnoty vybraných parametrů.

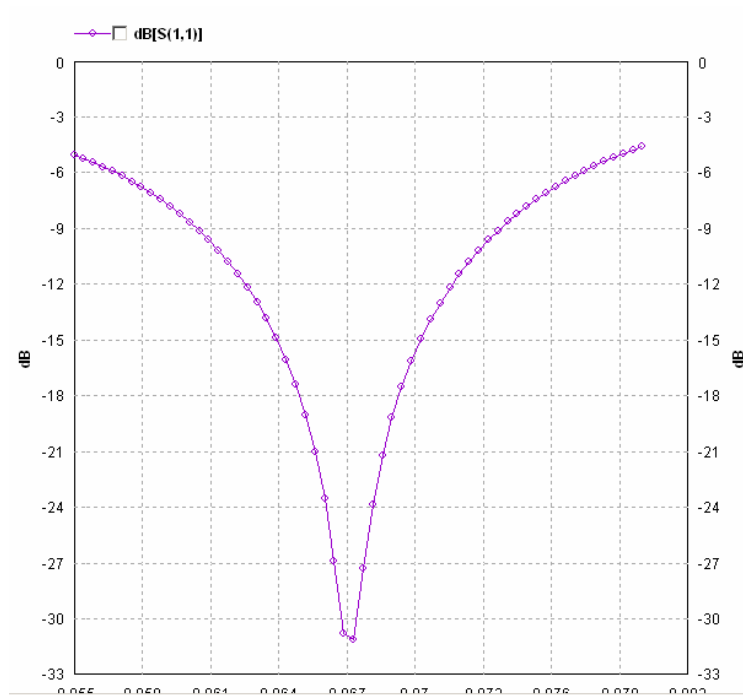
Tab. 3 Parametry antény se štěrbínou ve tvaru U (význam symbolů je vysvětlen v obr. 2).

Parametry	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
[mm]	103	137	55	43	5,6	6,8	29,5

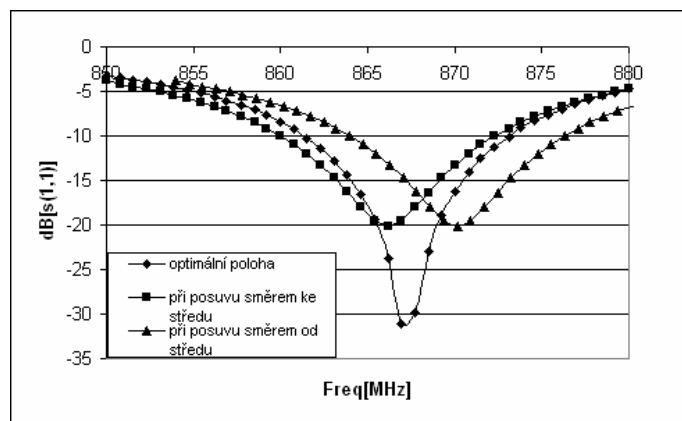
Tab. 4 Výsledné hodnoty parametrů pro anténu pracující na kmitočtu 867 MHz

f [MHz]	$s_{1,1}$ [dB]	Z [Ω]	PSV [-]
867	-31,13	52,85	1,057

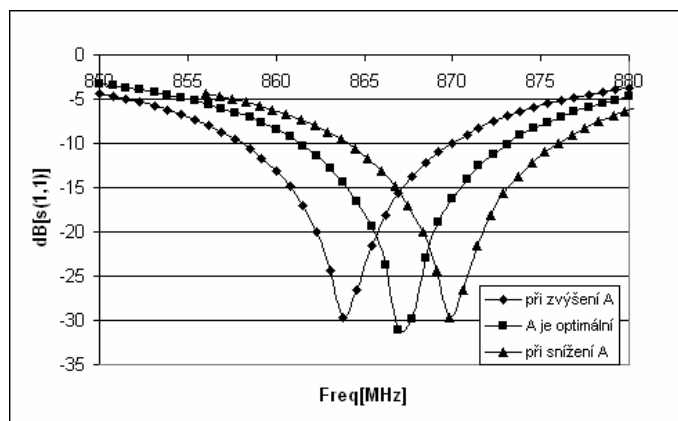
Při ladění antény na požadovanou pracovní frekvenci musely být změněny rozměry flíčku. S rostoucími rozměry klesala charakteristika směrem k nižším kmitočtům a naopak. Aby bylo zajištěno impedanční přizpůsobení, bylo nutné hýbat umístěním napájení. Závislosti jednotlivých parametrů jsou zobrazeny níže a to pro změnu polohy napájení a pro parametry A , D , F . Vynesené grafy jsou z programu Excel, data jsou použita ze simulace v programu IE3D.



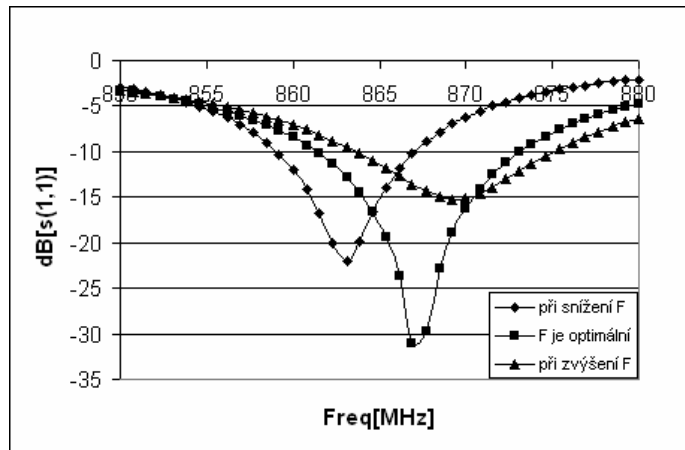
Obr. 13 Kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu antény $s_{1,1}$.



Obr. 14 Kmitočtový průběh modulu činitele odrazu při změně polohy napájení.



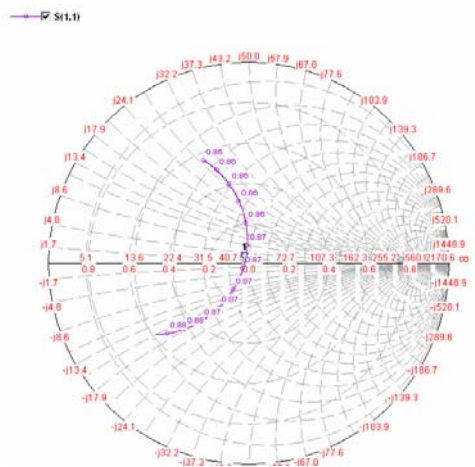
Obr. 15 Kmitočtový průběh modulu činitele odrazu při změně parametru A.



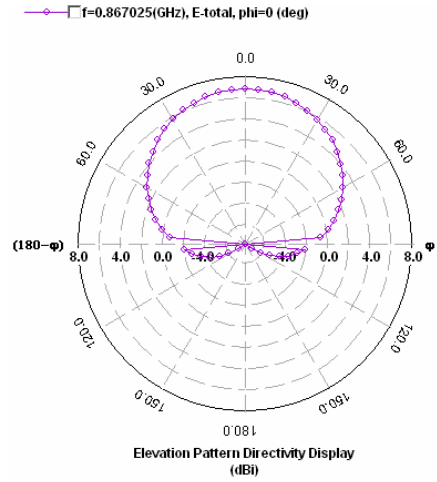
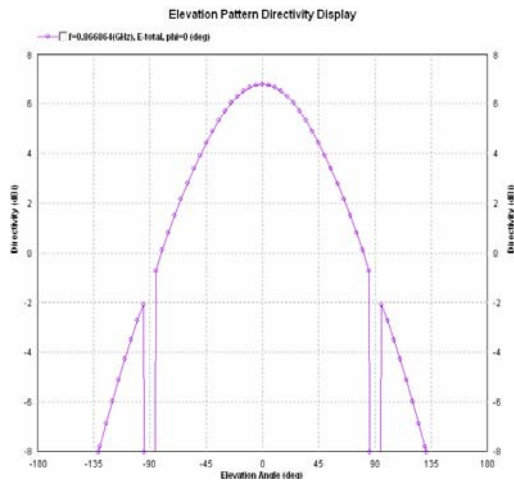
Obr. 16 Kmitočtový průběh modulu činitele odrazu při změně parametru F.

Pro analýzu byl použit oboustranně pokovený dielektrický materiál Cuclad 217 GY ($\epsilon_r = 2,17$; $\tan \delta = 0,0009$), který má tloušťku 1,575 mm.

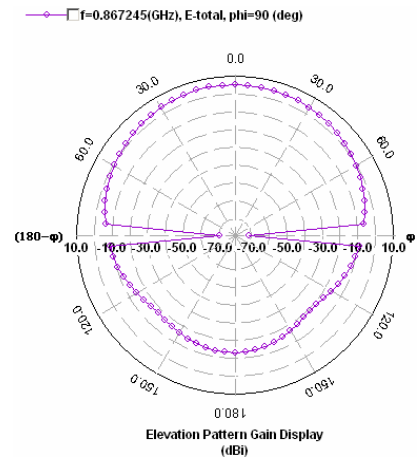
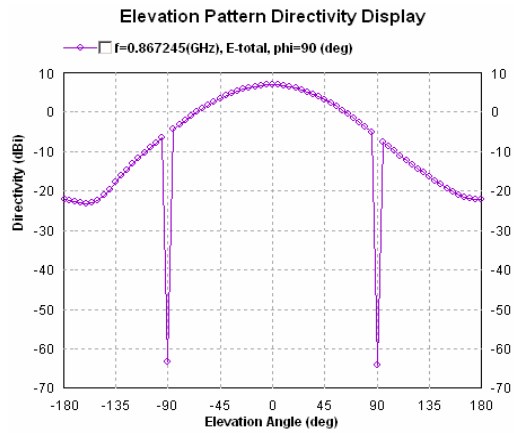
Jako v předchozím případě analýzy antény tvořené meandrem je i zde použito programu IE3D. Počítáme kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu $s_{1,1}$, zisk a směrové charakteristiky v kartézských a polárních souřadnicích. Kmitočtový průběh činitele odrazu je pro názornost zobrazen také ve Smithově diagramu a směrová charakteristika v 3D prostoru. Zisk antény je přibližně 6,8 dBi.



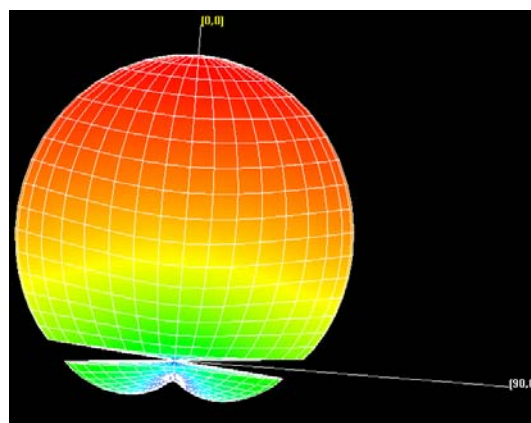
Obr. 17 Kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu antény ve Smithově diagramu.



Obr. 18 Směrové charakteristiky v rovině E pro kmitočet 867 MHz z programu IE3D
 a) v kartézských souřadnicích
 b) v polárních souřadnicích



Obr. 19 Směrové charakteristiky v rovině H pro kmitočet 867 MHz z programu IE3D
 a) v kartézských souřadnicích
 b) v polárních souřadnicích



Obr. 20 Směrová charakteristika v 3D prostoru pro kmitočet 867 MHz z programu IE3D

Jak je vidět ze směrové charakteristiky v rovině E v polárních souřadnicích, je soustředěna elektromagnetická energie hlavně do poloprostoru nad anténou. Za ní vyzářuje anténa jen malou část energie, což je znázorněno malými zadními laloky. V rovině H jsou zadní laloky dosti výrazné. Opět není ale na elevačním úhlu 90°

vykresleno vyzařování antény, což je způsobeno nedokonalým zobrazením programu IE3D. Oproti anténě tvořené meandrem soustřeďuje svou energii, díky reflektoru, do poloprostoru nad anténou, čímž dosahuje většího zisku cca 6,8 dBi.

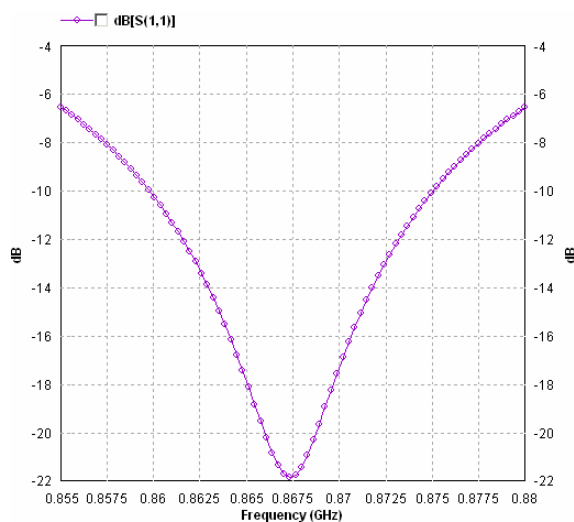
4.3 Planární anténa s kruhovým flíčkem

Pro výpočet rozměru flíčku bylo užito rovnice (3) jako u planární antény s U-štěrbinou. Po simulaci v programu IE3D bylo třeba už jen upravit průměr d flíčku, aby byla zajištěna požadovaná pracovní frekvence. Se zvětšením poloměru pracovní frekvence klesala, a naopak při zmenšení rostla. Pro dosažení lepšího zisku a impedančního přizpůsobení bylo nutné hýbat umístěním napájení.

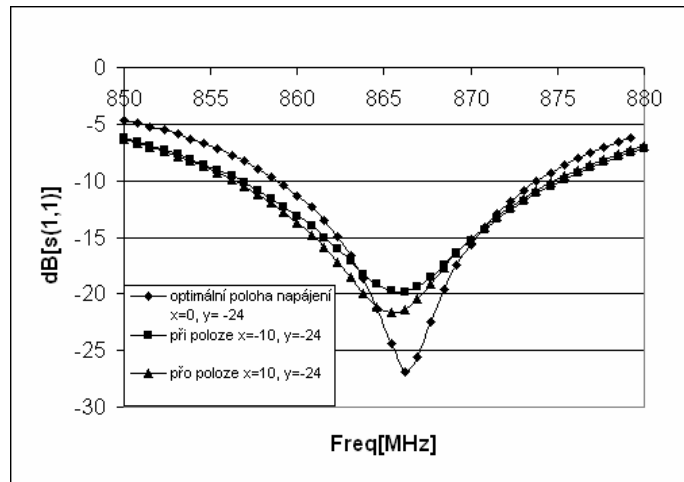
Tab. 5 Výsledné hodnoty parametrů pro anténu pracující na kmitočtu 867MHz.

f [MHz]	$s_{1,1}$ [dB]	Z [Ω]	PSV [-]
867	-22	58,65	1,173

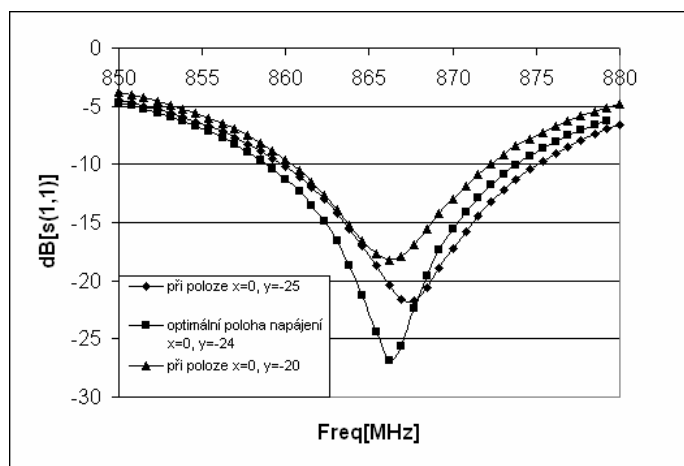
Opět jsou zde ukázány stejné závislosti jako v předchozích případech (kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu v kartézském grafu a Smithově diagramu, směrové charakteristiky v rovinách E a H v kartézských a polárních souřadnicích, 3D zobrazení směrové charakteristiky). Průměr flíčku po optimalizaci na požadovanou pracovní frekvenci 867 MHz vyšel $d = 134$ mm. Zisk antény je cca 7,5 dBi.



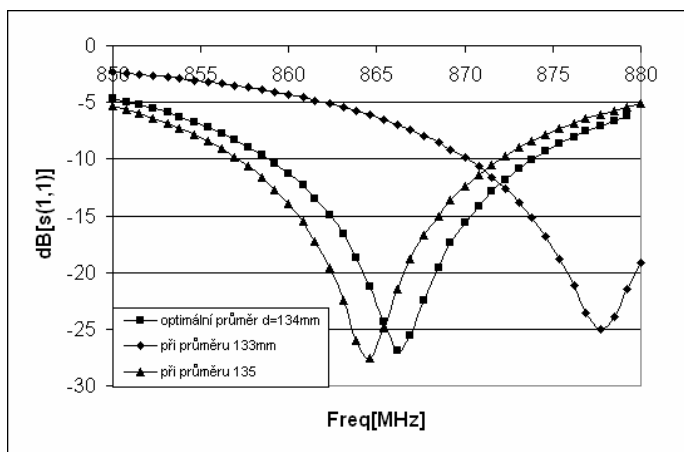
Obr. 21 Kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu antény $s_{1,1}$.



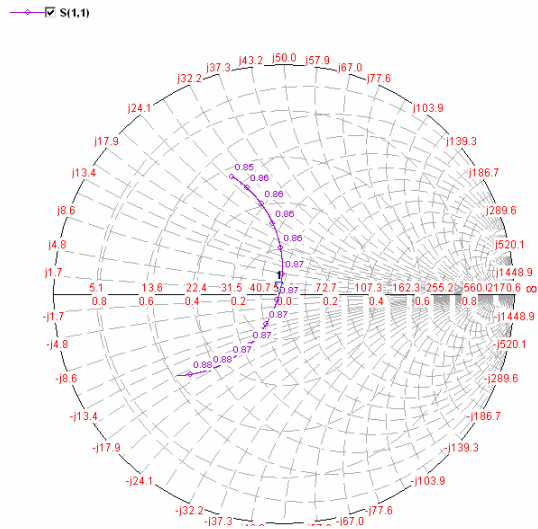
Obr. 22 Kmitočtový průběh činitele odrazu při změně polohy napájení v ose x.



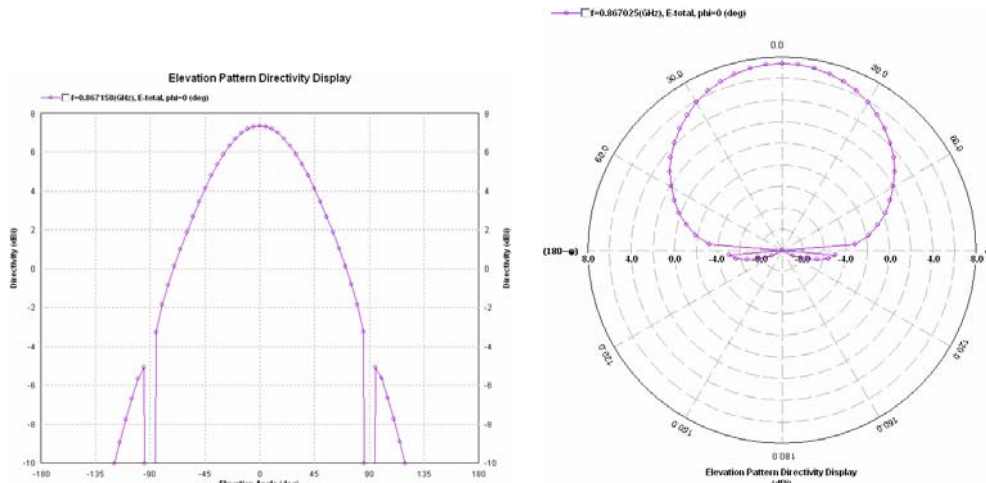
Obr. 23 Kmitočtový průběh činitele odrazu při změně polohy napájení v ose y.



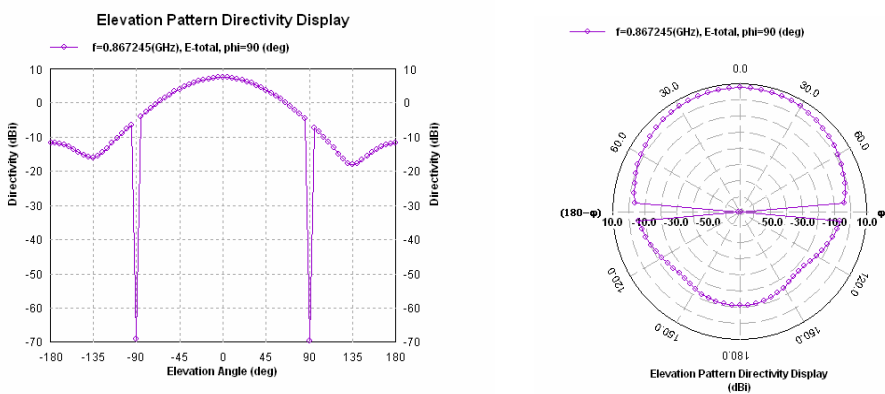
Obr. 24 Kmitočtový průběh činitele odrazu při změně průměru flíčku.



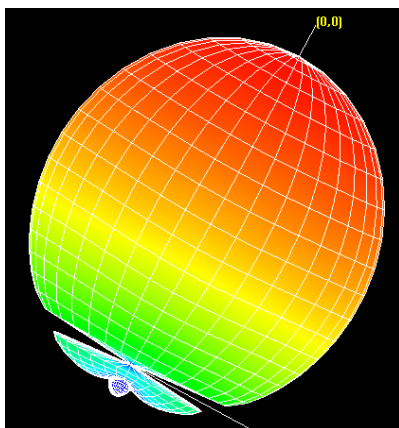
Obr. 25 Kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu antény ve Smithově diagramu.



Obr. 26 Směrové charakteristiky v rovině E pro kmitočt 867 MHz z programu IE3D
 a) v kartézských souřadnicích
 b) v polárních souřadnicích



Obr. 27 Směrové charakteristiky v rovině H pro kmitočt 867 MHz z programu IE3D
 a) v kartézských souřadnicích
 b) v polárních souřadnicích



Obr. 28 Směrová charakteristika v 3D prostoru pro kmitočet 867 MHz z programu IE3D.

Zde je ze směrové charakteristiky v rovině E vidět, že zadní laloky jsou v porovnání se zadními laloky planární antény s U-štěrbínou trochu menší. Tím je energie elektromagnetického pole soustředěna více do poloprostoru nad anténou což dokazuje také větší zisk, který je cca 7,3 dBi. Ve směrových charakteristikách v rovině H je zadní lalok výrazný. V rovině substrátu (elevační úhel 90°) není vykresleno vyzařování antény což je opět způsobeno nedokonalým zobrazením programu IE3D.

4.4 Aperturově vázaná planární anténa s duální polarizací

Uvažován byl oboustranně pokovený dielektrický substrát Cuclad 217 GY ($\epsilon_r = 2,17$; $\tan \delta = 0,0009$), který má tloušťku 1,575 mm. Anténa byla nejdříve vyrobena podle návrhu v programu IE3D. Po změření činitele odrazu na vstupu $s_{1,1}$ byly mezi vypočtenými a změřenými charakteristikami zjištěny významné rozdíly. Proto byla simulace zopakována v programu CST Microwave Studio.

Při překreslování antény do CST jsme zachovali rozměry antény stejné, jaké byly u modelu v IE3D. Anténa tedy byla naladěna na frekvenci 885 MHz namísto požadovaného frekvenčního pásma 866 MHz až 869 MHz. Cílem tohoto postupu bylo dosáhnout shody mezi počítačovým modelem antény a změřenými výsledky. V programu CST se této shody dosáhnout podařilo, a tudíž by bylo možné vyvinutý model použít k optimalizaci antény pro pásmo RFID. Po dohodě s vedoucím práce bylo od této optimalizace upuštěno.

Pro výpočet rozměru flíčku jsme použili (3) jako u planární antény s U-štěrbínou. Napájecí pásy byly navrženy tak, aby na pracovní frekvenci měly charakteristickou impedanci 50Ω . Jejich šířka je 4,89 mm a jsou buzeny proti zemní desce, jež má rozměry 144 x 148 mm. V desce jsou dvě štěrbin, přes které je flíček buzen. Změny rozměrů těchto štěrbin se projevily na zisku antény. Měly také vliv na směrovou charakteristiku. Se zmenšujícími se rozměry štěrbin klesala také energie vyzářená flíčkem do horní poloviny, a naopak víc energie se od reflektoru odráželo zpět směrem k napájecím páskům. Musela se tedy hledat optimální velikost štěrbin. Štěrbiny měly částečně vliv také na rezonanční kmitočet.

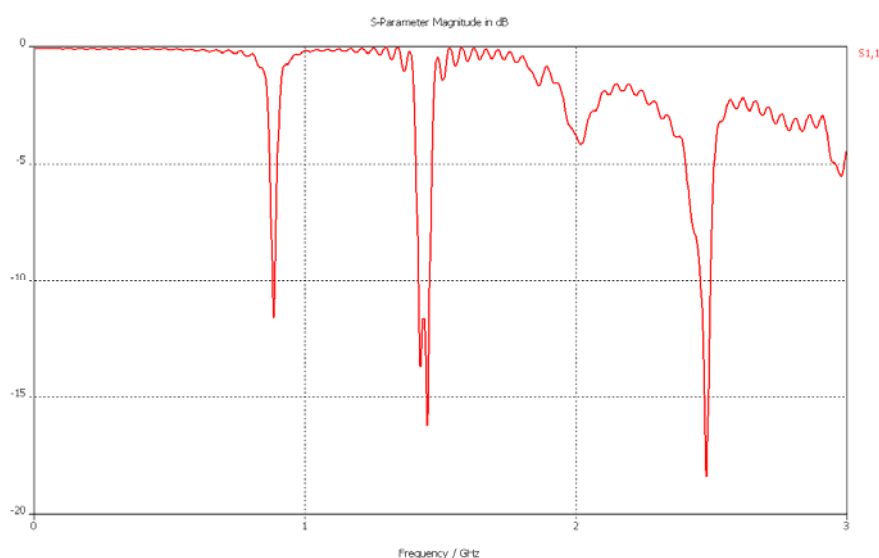
Výsledné rozměry flíčku a štěrbin jsou uvedeny v **tab. 6**, význam symbolů je vysvětlen v obr. 3. V **tab. 7** jsou uvedeny výsledné hodnoty vybraných parametrů.

Tab. 6 Parametry aperturově vázané planární antény s duální polarizací (význam symbolů je vysvětlen v obr. 3).

Parametry	l_1	l_2	l_3	d	$2r_a$	w
[mm]	60	20	15	10	103,6	5

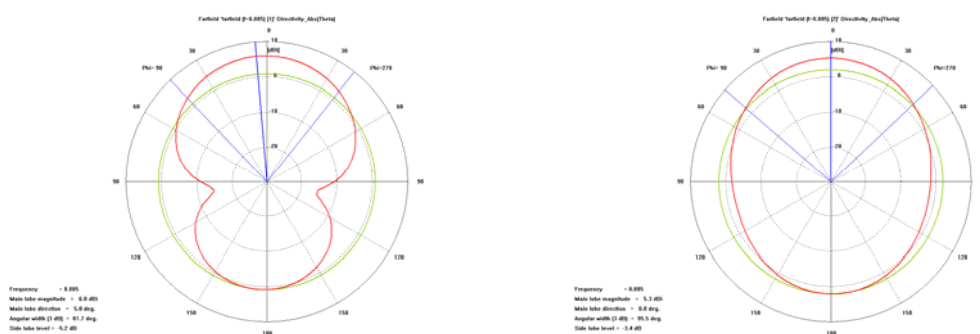
Tab. 7 Výsledné hodnoty parametrů pro anténu pracující na kmitočtu 885 MHz

f [MHz]	$s_{1,1}$ [dB]	Z [Ω]	PSV [-]
885	-11,5	86,25	1,725

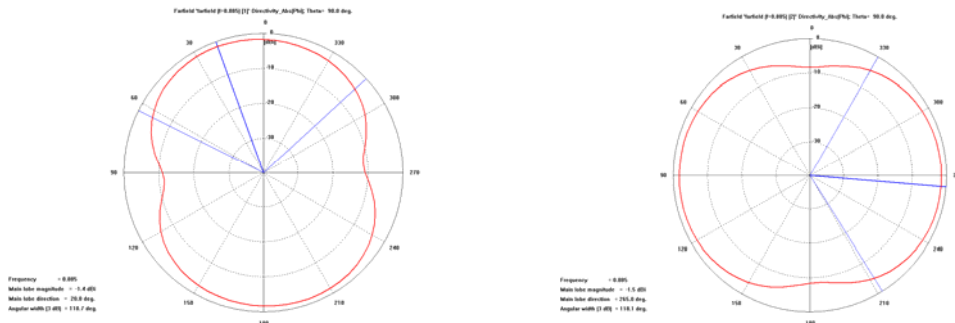


Obr. 29 Kmitočtový průběh činitele odrazu $s_{1,1}$ na vstupu antény (program CST)

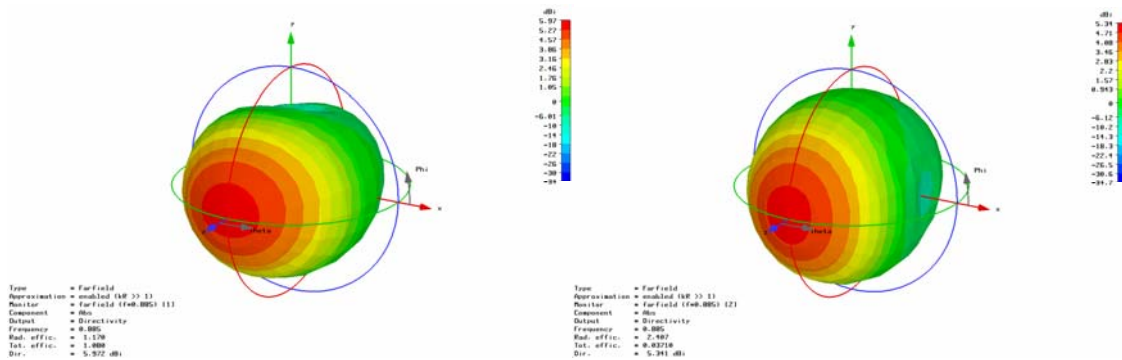
Zobrazení výsledných charakteristik antény pracující na kmitočtu 885 MHz.



Obr. 30 Směrové charakteristiky v rovině E pro kmitočty 885 MHz z programu CST
 a) pro 1.port
 b) pro 2.port



Obr. 31 Směrové charakteristiky v rovině H pro kmitočet 885 MHz z programu CST
a) pro 1.port b) pro 2.port



Obr. 32 Směrová charakteristika v 3D prostoru pro kmitočet 885MHz z programu CST.

a) pro 1.port, $D = 5,97\text{dBi}$

b) pro 2.port, $D = 5,34\text{dBi}$

Ze směrových charakteristik je vidět, že anténa vyzařuje do obou polorovin. V rovině E pro port 1 je zadní lalok trochu menší, u ostatních charakteristik jsou ovšem zadní laloky téměř stejné jako hlavní. V rovině substrátu je vyzařování poměrně značné. Energie elektromagnetického pole je soustředěna přibližně stejně do obou poloprostorů. Směrovost antény při vybuzení portu 1 je 5,97 dBi, pro port 2 pak 5,34 dBi. Z kmitočtové závislosti činitele odrazu na vstupu $s_{1,1}$ je zřejmé, že část energie se odrazí zpět ke zdroji. To je způsobeno tím, že hodnota činitele odrazu $s_{1,1}$ je rovna -11,5dB což odpovídá $\text{PSV} = 1,725$.

Srovnání všech čtyř navržených antén je uvedeno v **tab. 8**

Tab. 8 Výsledné hodnoty antén

Anténa	rozměry x-y-z [mm]	pracovní f [MHz]- CST	$s_{1,1}$ – CST [dB]	PSV [-]	šířka pásmo*– CST [MHz]	zisk [dBi]- CST
meandrová	138x20x1,5	867	-30	1,065	65	2,5
U-slot	130x190x1,5	867	-31,13	1,057	11	6,8
patch	170x170x1,5	867	-22	1,173	15	7,3
aperturově vázaná	148x144x4,7	885	-11,5	1,725	9	5,97

* $s_{1,1} = -10\text{dB}$.

Z tabulky je vidět, že z hlediska impedančního přizpůsobení má nejlepší vlastnosti planární anténa s U-šterbinou. Ostatní antény až na aperturově vázanou mají impedanční přizpůsobení také dobré. Aperturově vázaná planární anténa s duální polarizací má hodnotu PSV 1,725 a tím přizpůsobení horší. Při výrobě je tedy nutné použít vhodných kompenzačních obvodů, které zajistí impedanční přizpůsobení 50Ω , aby nedocházelo k odrazu energie v místě připojení kabelu s anténou. Z pohledu směrovosti antén vyzařují meandrová a aperturově vázaná planární anténa do obou poloprostorů nad i pod anténu. To je způsobeno absencí zemní desky-reflektoru, který by odrážel vyzařovanou energii. U aperturově vázané antény sice zemní deska je, tvoří ji horní pokovená vrstva substrátu napájecího přívodu, ovšem vlivem vazebních šterbin a způsobem uspořádáním celé antény neplní úplně funkci reflektoru, nýbrž protipól buzení napájecích pásků. Vyzařování energie do nežádaného poloprostoru můžeme redukovat přidáním zemní desky umístěné ve vzdálenosti $\lambda_0 / 4$ [1]. U planárních antén s U-šterbinou a s kruhovým flíčkem tvoří reflektor zemní deska, která je vodivě spojena s vnějším pláštěm koaxiálního kabelu. Tím je energie elektromagnetického pole soustředěna do jednoho poloprostoru. Srovnáním antén podle zisku, by měla mít podle simulace největší zisk planární anténa s kruhovým flíčkem a to 7,3dBi. Šířku pásma má největší anténa meandrová a to 65 MHz. Tato hodnota je však pouze teoretická a vztažená k referenční hladině $s_{1,1} = -10\text{dB}$.

5 Praktické ověření parametrů antény

Pro výrobu antény jsme využili export z programu IE3D do formátu *.dxf (CAD).

Použitý materiál:

Cuclad GY 217, výška $h = 1,575\text{mm}$,
 $\epsilon_r = 2,17$ -1MHz(10GHz),
 $\tan \delta = 0,0009$ -1MHz(10GHz)

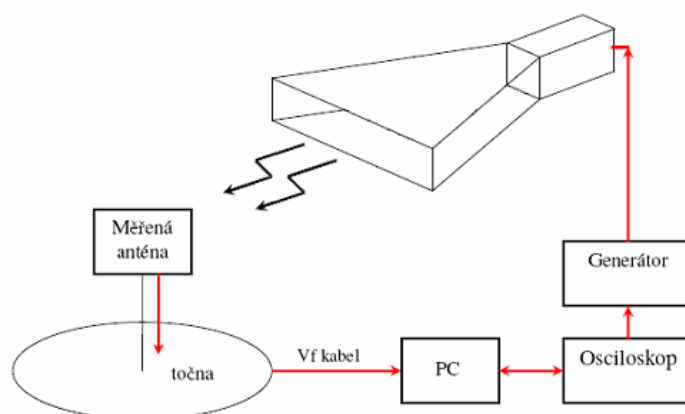
Místo měření: VUT Brno laboratoř č.818, měření provedl: Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

5.1 Měření směrových charakteristik

Místo měření: ERA a.s. Pardubice, měření provedl: Ing. Vítězslav Krčmář



Obr. 33 Měření směrových charakteristik antén, ERA a.s. Pardubice



Obr. 34 Schéma zapojení pracoviště - měření směrových charakteristik

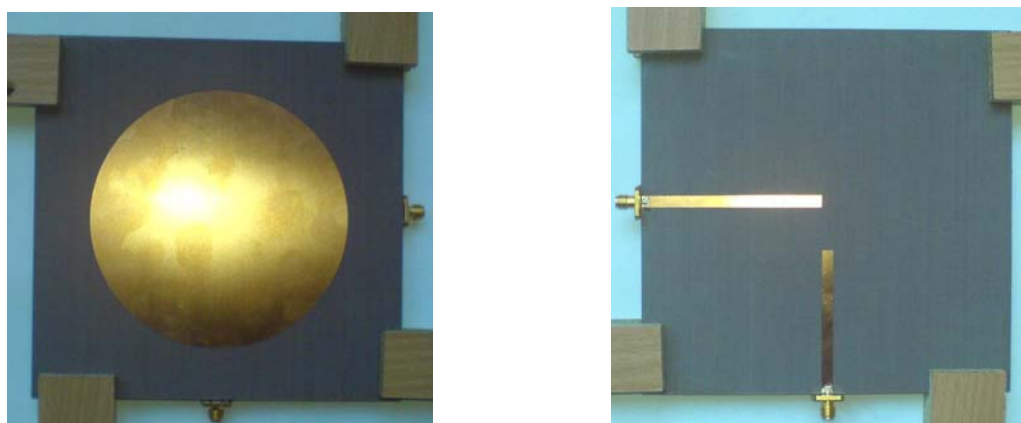
Firma ERA a.s. se zabývá radiolokací v blízkém okolí letištních ploch. Ke svému vývoji využívá bezodrazovou komoru, kde jsme měli možnost měřit směrové charakteristiky navrhnutých antén. Postup měření: anténu jsme umístili na točnu a pomocí trychtýřové antény ji ozařovali. Směrové charakteristiky byly měřeny od 0°-360°. Přibližnou hodnotu zisku lze určit ze směrových charakteristik pomocí úhlové šířky hlavního laloku. Úhlová šířka hlavního laloku $2\Theta_{0,7}$ je úhel mezi směry, ve kterých záření antény klesá o 3 dB (na 0,707) vzhledem k úrovni maxima. Číselné hodnoty šířky hlavního laloku v rovině E ($2\Theta_{0,7E}$) a v rovině H ($2\Theta_{0,7H}$) jsou obecně různé.

Činitel směrovosti D_{max} udává kolikrát větší hustotu výkonu ve směru maxima záření vytvoří měřená anténa ve srovnání s všesměrovým zářičem napájeným stejným výkonem. Zisk antény G_{max} je decibelovým vyjádřením veličiny D_{max} podle vztahu

$$G_{max} = 10 \log(D_{max})$$

Přímé měření činitele směrovosti D_{max} (respektive G_{max}) je poměrně složité. Má-li však měřená anténa výrazný hlavní lalok směrové charakteristiky „doutníkového“ tvaru a nevelké boční laloky, platí pro činitel směrovosti přibližný vztah

$$D_{max} \cong \frac{35000}{2\Theta_E 2\Theta_H}$$



Obr. 35 Realizovaná anténa, vlevo-seshora flíček, vpravo-napájecí pásy ze spoda

6 Výsledky měření

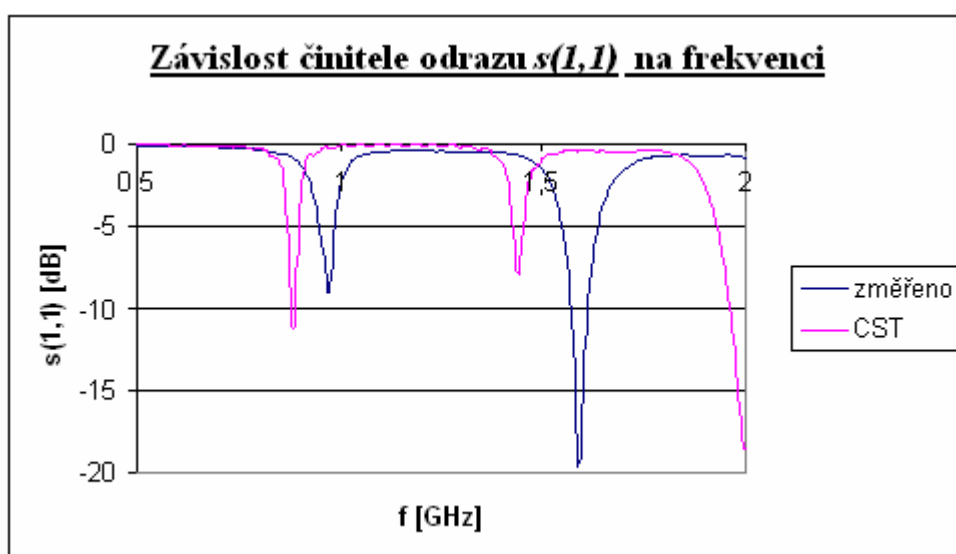
6.1 Naměřené hodnoty aperturově vázané antény

Aperturově vázaná planární anténa s duální polarizací je navržena na frekvenci 885 MHz. V tomto případě míří do jednoho směru pouze jedna anténa, jejíž vnitřek ale umožňuje vyzařování ve dvou polarizačních rovinách. Měření ukázalo, že rezonanční frekvence se posunula na 971,5 MHz. Pro horizontální rovinu je zobrazena směrová charakteristika při vybuzení portu 1 (C-slot) na **obr. 37**, pro vertikální rovinu při vybuzení portu 2 (lineární slot) na **obr. 38**. Dále byly změřeny a jsou zobrazeny na **obr. 39** směrové charakteristiky v horizontální a vertikální rovině při křížové polarizaci. Ty nejsou bohužel nijak srovnány se simulovanými charakteristikami, protože by to bylo v programu CST velmi obtížné. Se simulovanými změřené směrové charakteristiky dobře souhlasí. Šířka hlavního laloku směrové charakteristiky v horizontální rovině pro port 1 je pro pokles o 3 dB rovna $82,6^\circ$. Pro směrovou charakteristiku ve vertikální rovině pro port 2 pak při poklesu o 3 dB $76,6^\circ$. Protože jsem hodnoty parametru $s_{1,1}$ získal optimalizací na PC a zároveň jej měřil, použil jsem jako referenční hladinu $s_{1,1} = -7$ dB (0,446) pro určení šířky pásma antény. Tomu odpovídá $PSV=2,61$. To je poměrně špatný výsledek, jde však pouze o porovnání zmiňované šířky pásma mezi simulací a měřením. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v **tab. 9**.

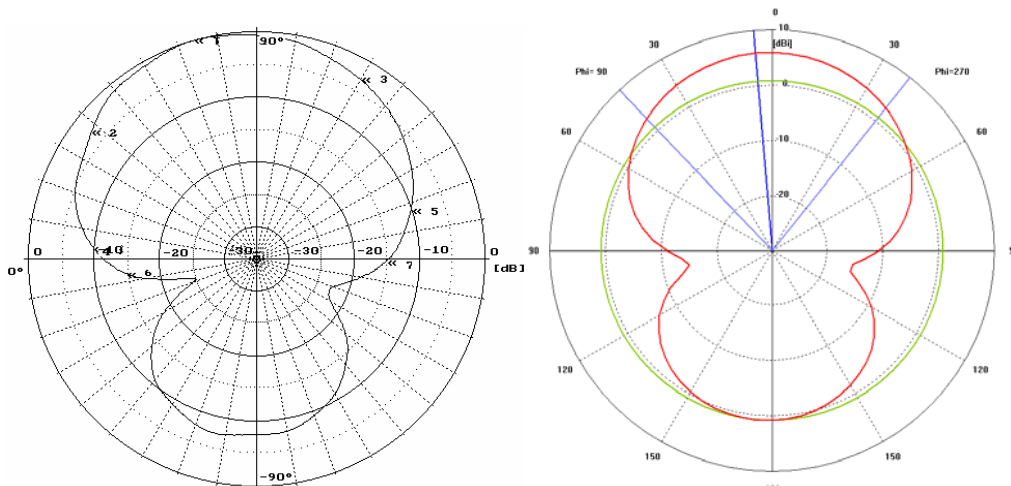
Tab. 9 - parametry antény

Anténa	rozměry x-y-z [mm]	pracovní f [MHz]- CST	pracovní f [MHz]- změřeno VUT	$s_{1,1}$ - CST [dB]	$s_{1,1}$ - změřeno VUT [dB]	šířka pásma* - CST [MHz]	šířka pásma* - změřeno [MHz]	zisk [dBi]- CST
Aperturově vázaná	148x144 x4,7	885	971,5	-11,5	-9,1	21	15	5,97

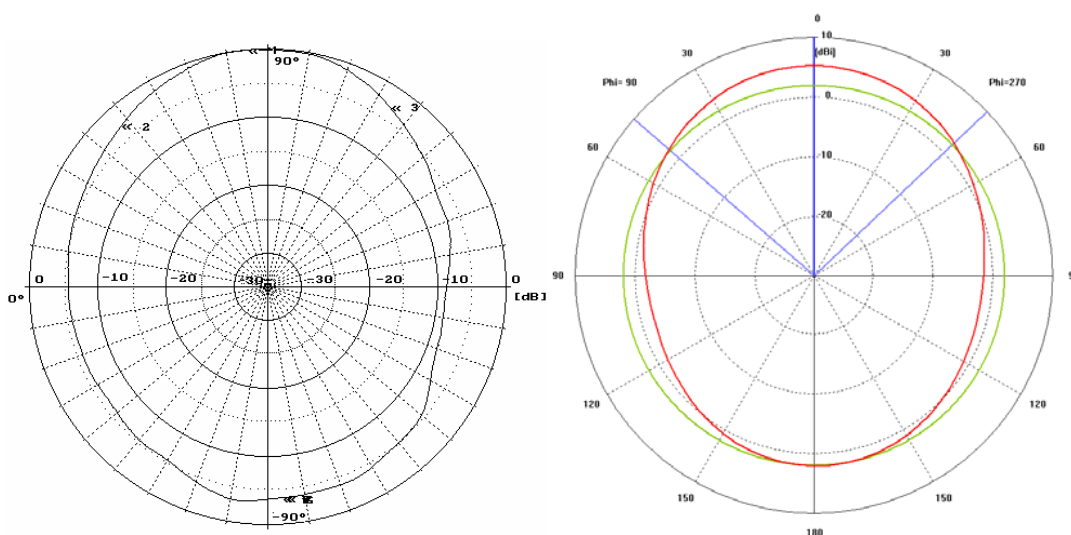
* pro $s_{1,1} = -7$ dB



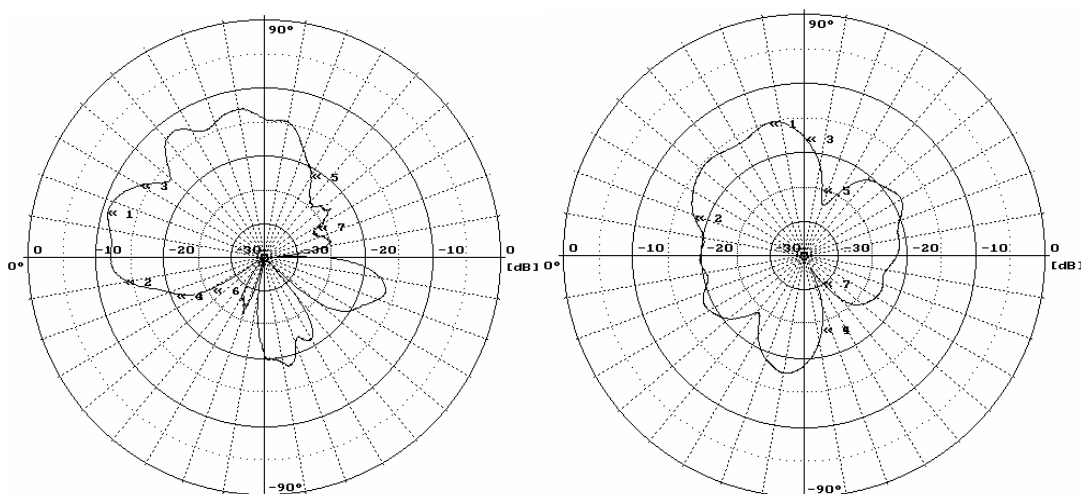
Obr. 36 Kmitočtový průběh činitele odrazu $s_{1,1}$ pro 1. port



Obr. 37 Směrové charakteristiky v horizontální rovině pro port 1
 a) měření $f = 971,5\text{MHz}$ b) simulace $f = 885\text{MHz}$



Obr. 38 Směrové charakteristiky ve vertikální rovině pro port 2
 a) měření $f = 971,5\text{MHz}$ b) simulace $f = 885\text{MHz}$



Obr. 39 Směrové charakteristiky při křížové polarizaci na frekvenci 971,5 MHz
 a) při vybuzení portu 1, horizontální rovina b) při vybuzení portu 2, vertikální rovina

6.2 Shrnutí naměřených hodnot

Provedené simulace a optimalizace antén byly provedeny v programech IE3D Zéland Software a v CST Studio Suite 2006. Provedený počet optimalizací byl určitě v řádu stovek. Výpočetní nároky kladené na PC jsou celkem velké, takže je vhodné používat výkonný počítač zejména s velkou RAM pamětí. Simulaci v programu IE3D jsem prováděl na svém PC, kde mám studentskou verzi programu IE3D, simulaci v CST jsem prováděl ve škole. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v **tab. 10**.

Tab. 10 Výsledné hodnoty simulace a měření

	1.rezonance	2.rezonance	$S_{1,1}$ 1.rezonance	PSV
simulace v CST	885MHz	1,44GHz	-11,5dB	1,725
měření	971,5MHz	1,59GHz	-9,11dB	2,078

Z tabulky je vidět, že se změřené rezonance liší přibližně o 10% od simulací. Tyto odlišnosti v rezonancích lze odůvodnit např.: nepřesnou dílenskou výrobou, nepřesným umístěním jednotlivých vrstev přesně na sebe, vzduchovou mezerou mezi těmito vrstvami neúplným přitlačáním či letováním napájecích konektorů. Součtem všech výše uvedených okolností se proto nepodařilo anténu naladit na původní rezonanční frekvenci 885 MHz. Hodnota PSV vyšla na rezonančním kmitočtu 971,5 MHz u změřené antény 2,078 což lze v praxi použít pro nenáročná zařízení.

7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat vhodnou anténu pro radiofrekvenční identifikaci (RFID) v pásmu 866 až 869 MHz. V první části bakalářské práce jsou souhrnné zpracovány všeobecné poznatky o anténách pro RFID, je popsáno jejich modelování ve vhodném komerčním programu a je vybrána nejvhodnější anténa pro realizaci. Druhá část práce se zabývá vybranou anténou, její optimalizací, toleranční analýzou, výrobou a experimentálním ověřením jejich parametru.

V rámci projektu byly simulovány a analyzovány čtyři typy antén – anténa tvořená meandrem, planární anténa se štěrbinou ve tvaru U, planární anténa s kruhovým flíčkem a aperturově vázaná planární anténa s duální polarizací. Jako substrát jsme pro návrh antén uvažovali Cuclad 217 GY ($\epsilon_r = 2,17$; $\tan \delta = 0,0009$), který má tloušťku 1,575 mm. Všechny antény byly analyzovány programem IE3D a aperturově vázaná pak ještě programem CST. Mohli jsme tak názorně porovnat jejich chování v pracovním pásmu RFID aplikací 866 MHz až 869 MHz.

Anténa tvořená meandrem má z hlediska činitele odrazu na vstupu nejlepší vlastnosti; jeho velikost je 0,03. Tato hodnota je však pouze teoretická. Oproti tomu nejhůře vyšel činitel odrazu u změřené aperturově vázané antény a to 0,35.

Hlavní rozdíl mezi meandrovou, aperturově vázanou anténou a oběma anténami planárními je ve směrové charakteristice. Zatímco zkoumané planární antény výrazně vyzařují jen do poloprostoru nad substrátem, anténa tvořená meandrem spolu s aperturově vázanou vyzařují do obou poloprostorů. To je způsobeno absencí zemní desky, která brání elektromagnetické vlně v šíření pod substrát.

Ve směrových charakteristikách antén jsou průběhy při elevačním úhlu 90° přerušeny. To je způsobeno nedokonalým zobrazením programu IE3D.

Nevýhodou meandrové antény je poměrně malý zisk, který dosahuje cca 2,5 dBi. U planární antény s kruhovým flíčkem dosahujeme zisku 7,5 dBi, u mikropáskové antény se štěrbinou ve tvaru U vyšel zisk cca 6,8 dBi a u aperturově vázané cca 5,97 dB. Je to dáno tím, že mikropáskové antény soustřeďují vyzářenou energii pouze do jednoho poloprostoru. Závěrem lze říci, že se podařilo navrhnout podle zadání projektu zástupce tří antén, které by svou šířkou pásma byly použitelné pro pásmo RFID 866-869MHz. Dále se zdařilo navrhnout a změřit anténu na kmitočtu 971,5 MHz, která má šířku pásma 15MHz, čímž by byla pro pásmo RFID po úpravě také realizovatelná.

Literatura

- [1] ADITYA, S., KARMAKAR, N. C., LAW, C. L., PADHI, S. K. A dual polarized aperture coupled circular patch antenna using a C-shaped coupling slot. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2003, vol. 51, no. 12, p. 3295–3298.
- [2] BERNARD, J. T., HUFF, G. H., PAN, K. H., WEIGAND, S. Analysis and design of broad-band single-layer rectangular U-slot microstrip patch antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2003, vol. 51, no. 3, p. 457–467.
- [3] LAM, S. F., NIKITIN, P. V., RAO, K. V. S. Antenna design for UHF RFID Tags: A review and a practical application. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2005, vol. 53, no. 12, p. 3870–3876.
- [4] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2002.
- [5] PROCHÁZKA, T. Antény pro systémy RFID. *Elektrorevue – internetový časopis*. <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02022/>
- [6] <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/brks/index.htm>
- [7] <http://www.ean.cz/system-gs1/slovnicek-pojmu/vse/EAA-151-X-index.php>
- [8] <http://rapidttp.com/transponder/>
- [9] <http://www.ean.cz/EAG-22-a189550-X-rfid/index.php>
- [10] <http://www.zeland.com/>

Seznam použitých zkratk a symbolů

EIRP	-	Equivalent isotropically radiated power
EPC	-	Electronic product code
EAN·UCC	-	European article numbering-uniform code council
IFF	-	Identification friend/foe
RFID	-	Radio frequency identification
L	-	Délku flíčku
ϵ_{ef}	-	Efektivní permitivita
Z_a	-	Impedance antény
Z_c	-	Impedance čipu
P_{th}	-	Minimální výkon dodaný anténou, nutný k napájení čipu
τ	-	Přenosový koeficient
ϵ_r	-	Relativní permitivita substrátu
f_r	-	Rezonanční frekvence antény
c	-	Rychlost světla
W	-	Šířka flíčku
h	-	Tloušťka substrátu
λ	-	Vlnová délka
λ_d	-	Vlnovodová délka
P_t	-	Výkon dodávaný čtečkou tagu
G_r	-	Zisk přijímací antény RFID tagu
G_t	-	Zisk vysílací antény čtečky