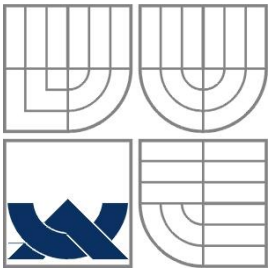
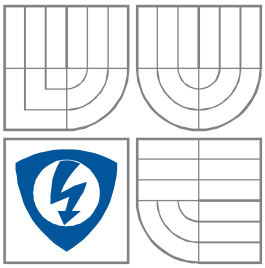


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

EXPERIMENTÁLNÍ TAGY PRO UHF RFID APLIKACE

EXPERIMENTAL TAGS FOR UHF RFID APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Vladimír Pacholík

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO, 2012

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student:	Bc. Vladimír Pacholík	***ID:***	106687
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální tagy pro UHF RFID aplikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s vlastnostmi systému RFID a s typy antén tagů používaných v pásmu UHF. Pro seznámení se simulačním nástrojem CST Microwave Studio využijte knihovnu příkladů a tutoriálů dodávaných s programem.

Navrhněte antény tagů pro speciální aplikace (umístění na kovu). Vytvořte jejich 3D modely v programu CST Microwave Studio a proveďte simulace jejich funkčnosti.

Vyrobte antény tagů, ověřte jejich vlastnosti a pomocí RFID čtečky ověřte možnosti čtení na různé vzdálenosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DOBKIN, D. M. The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice, Newnes, Burlington, MA, 2008.
[2] BALANIS, A. C. Antenna Theory: Analysis and Design, 2/E. New York: J. Wiley & Sons, 1996.

Termín zadání:	6.2.2012	***Termín odevzdání:***	18.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.
Konzultanti diplomové práce:

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 návrhem antén RFID tagů. Obsahuje seznámení s technologií RFID, přičemž se soustřeďuje na pasivní tagy v pásmu UHF. Návrhové simulace byly prováděny v programu CST Microwave studio. Podle těchto simulací vyrobené tagy jsou podrobeny měřením parametrů - činitel odrazu, minimální výkon potřebný pro zapnutí tagu, maximální čtecí vzdálenost. Dále je vyšetřen vliv blízkosti kovových a dalších materiálů na funkci tagů.

KLÍČOVÁ SLOVA

RFID, tag, UHF, CST Microwave studio, meandrová anténa

ABSTRACT

This thesis deals with RFID tags design. It comprises an overview of the RDIF technology while focusing upon the passive tags in UHF band. The CST Microwave studio software has been used for draft simulations. The resulting tags have been subjected to parameter measuring – the reflection coefficient, the minimum capacity needed to switch on the tag, the maximum reading distance. The influence of the proximity of metal objects and other materials has also been examined.

KEYWORDS

RFID, tag, UHF, CST Microwave studio, meander antenna

PACHOLÍK, V. Experimentální tagy pro UHF RFID aplikace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 39 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou na téma experimentální tagy pro UHF RFID aplikace jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Zbyňku Lukešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Duškovi za další rady při vypracování a pomoc při měření. V neposlední řadě bych také rád poděkoval spolužákům a kamarádům za to, že byli a jsou.

V Brně dne ....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků **viii**

Seznam tabulek **x**

Úvod **1**

1 Technologie RFID **2**

1.1 Základní principy RFID ... 2

1.1.1 RFID tag ... 2

1.1.2 RFID čtečka ... 3

1.1.3 Backscattering ... 4

1.1.4 Rozdělení tagů dle frekvenčního rozsahu ... 5

1.1.5 Rozdělení tagů dle způsobu napájení ... 6

1.2 Požadavky a parametry tagů ... 7

1.2.1 Činitel odrazu, impedanční přizpůsobení s_{11} ... 7

1.2.2 Maximální čtecí vzdálenost ... 7

1.2.3 ERP ... 11

1.3 Vzájemná poloha čtečky a tagu ... 11

2 Přizpůsobovací obvod **12**

2.1 Přizpůsobení pomocí mikropáskového vedení ... 12

2.2 Přizpůsobení pomocí koaxiálního vedení ... 14

3 Návrh antén **17**

3.1 Vlastnosti navrhované antény ... 17

3.2 Buzení ... 18

3.3 Meandrování ... 19

3.4 Přizpůsobení čipu a antény ... 20

3.5 Umístění antény na různých površích ... 20

3.5.1 Vliv umístění na kovové materiály ... 21

3.6 Měřicí přístroje ... 21

4 Modely antén **24**

4.1.1 Anténa pro hodnotu 50 Ω ... 24

4.1.2 Meandrová anténa s pasivním prvkem 25
4.1.3 Anténa tvaru S 30
4.1.4 Dvoukruhová anténa 33
4.1.5 Prototypová anténa 36
4.2 Měření čtecí vzdálenosti tagů 38
4.3 Shrnutí dosažených výsledků měření a vlivů materiálů 38
5 Závěr **39**
Literatura **40**
Seznam symbolů, veličin a zkratek **41**
Seznam příloh **42**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Blokové schéma tagu 3
Obr. 2: Blokové schéma čtečky – převzato z [3] 3
Obr. 3: Backscattering (zpětné vyzařování) - převzato z [3] 4
Obr. 4: Rozdělení tagů na aktivní, semipasivní, aktivní – převzato z [2] 6
Obr. 5: Diagram výkonů vzhledem ke vzdálenosti od tagu - převzato z [2] 9
Obr. 6: Rozdělení UHF RFID pásem - převzato z [2] 11
Obr. 7: Impedanční přizpůsobení mikropáskovým vedením 13
Obr. 8: Návrh přizpůsobení pomocí mikropáskového vedení 13
Obr. 9: Praktická realizace mikropáskového přizpůsobení 14
Obr. 10: Impedanční přizpůsobení koaxiálním pahýlem 15
Obr. 11: Přizpůsobení pomocí koaxiálního vedení 16
Obr. 12: Měřené přizpůsobovací vedení 16
Obr. 13: Schematické zobrazení buzení v programu CST u dipólové antény 18
Obr. 14: Ukázka hodnot reálné a imaginární části odporu antény 18
Obr. 15: Srovnání přímé dipólové a meandrovité antény - převzato z [7] 19
Obr. 16: Proud v sousedních ramenech meandrové struktury 20
Obr. 17: Software pro měření čtecí vzdálenosti 22
Obr. 18: Softwarové vybavení měřícího systému RFID Xplorer® 22
Obr. 19: Motiv meandrové antény přizpůsobené na hodnotu 50 Ω 24
Obr. 20: Přizpůsobení antény pro hodnotu 50 Ω 25
Obr. 21: Motiv meandrové antény s pasivním prvkem 25
Obr. 22: Vertikální (a) a horizontální (b) charakteristika antény ve volném prostoru 26
Obr. 23: Vertikální (a) a horizontální (b) směrová charakteristika antény umístěné na kovu 26
Obr. 24: Naměřené a simulované hodnoty činitele odrazu 27
Obr. 25: Srovnání měření vnějších vlivů na anténu 28
Obr. 26: Naměřená reálná a imaginární hodnota odporu 29
Obr. 27: Výkon nutný pro zapnutí meandrového tagu 29
Obr. 28: Výkon odražený meandrovým tagem 30
Obr. 29: Motiv meandrové antény 30

Obr. 30: Směrová charakteristika S-antény ve vertikální (a) a horizontální (b) rovině.. 31
Obr. 31: Závislost činitele odrazu na frekvenci 31
Obr. 32: Výkon nutný pro zapnutí tagu 32
Obr. 33: Výkon odražený tagem 32
Obr. 34: Motiv antény 33
Obr. 35: Závislost činitele odrazu na frekvenci 34
Obr. 36: Směrová charakteristika kruhové antény ve vertikální (a) a horizontální (b) rovině 34
Obr. 37: Výkon nutný pro zapnutí tagu 35
Obr. 38: Výkon odražený tagem 35
Obr. 39: Srovnání zapínacích výkonů u prototypové antény 37
Obr. 40: Srovnání odražených výkonů tagů pro prototypovou anténu 37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Přehled délek pahýlu nakrátko a naprázdno 15
Tab. 2: Srovnání čtecích vzdáleností jednotlivých tagů 38

ÚVOD

Bezdrátové technologie se v dnešní době stávají stále oblíbenějšími. Jedním z odvětví je systém založený na principu čtečka/tag. Jedná se o RFID, rádiově frekvenční identifikaci. Díky své spolehlivosti, nízké ceně a snadnému použití se jí využívá stále více. Výzkum se v tomto ohledu zaměřuje hlavně na návrh antény tagu – na její malé rozměry a co nejvyšší účinnost. Využití nachází hlavně v odvětví logistiky. Lze tak například identifikovat a sledovat zboží (EPC), pohyb osob a vozidel, využít ho při ochraně majetku, apod. Podle způsobu využití lze rozdělit systém RFID do oblastí využívaných frekvencí, čtecí vzdálenosti, výkonových poměrů, způsobu přenosu dat mezi čtečkou a tagem atd. Pokud bychom měli shrnout hlavní výhody a nevýhody - ve srovnání s čárovým kódem odpadá nutnost přímé viditelnosti mezi snímačem a tagem, možnost získávat při čtení relativně velké množství dat, opakované použití některých tagů a s tím spojená redukce nákladů. Tagy jsou také zpravidla konstrukčně jednoduché, levné na výrobu a mají zanedbatelné rozměry a hmotnost. Naopak jako nevýhody se jeví útlum signálu při průchodu některými materiály nebo ztráty v substrátu, na kterém je anténa připevněna, značná úzkopásmovost, nižší zisk, možnost prolomení technologie a tím pádem neautorizovaného čtení kódů a počáteční náklady na zavedení technologie.

První část této práce se zabývá seznámením s technologií RFID. Obsahuje základní informace o tagu a specifikacích RFID.

Druhá část práce je zaměřena na návrh přizpůsobení, potřebného pro měření parametrů antén tagů.

Poslední část je rozdělena podle jednotlivých vyrobených antén, resp. tagů. Obsahuje informace o rozměrech tagů, výsledky simulací a měření (charakteristiky zisku, činitele odrazu, směrové charakteristiky a další). Případně je pro porovnání obsaženo více charakteristik v jednom grafu při vyšetřování vlivu kovových a jiných materiálů v různé vzdálenosti apod. Toho lze výhodně využít při dolaďování charakteristik.

1 TECHNOLOGIE RFID

1.1 Základní principy RFID

Cílem této práce je nejdříve návrh a poté i následná výroba antén, resp. tagů pracujících v UHF pásmu technologie RFID. Tato kapitola je věnovaná úvodu do problematiky RFID a soustřeďuje se tedy především na (rozbor) rozdělení tagů a čteček podle různých hledisek. Dále obsahuje popis činnosti (čtení tagu), včetně blokových schémat.

Systém RFID se skládá ze dvou částí:

- tagu, který se nalézá na objektu, který má být identifikován,
- čtečky tagů

1.1.1 RFID tag

Tag je složen z antény a čipu. Tagy využívají dva typy antén. Jedním typem je LC rezonanční obvod (pro frekvence menší jak 100 MHz), využívá se u nich induktivní vazby. Druhým je dipólová anténa (pro frekvence vyšší jak 100 MHz), u těch se využívá přenos elektromagnetickou vlnou.

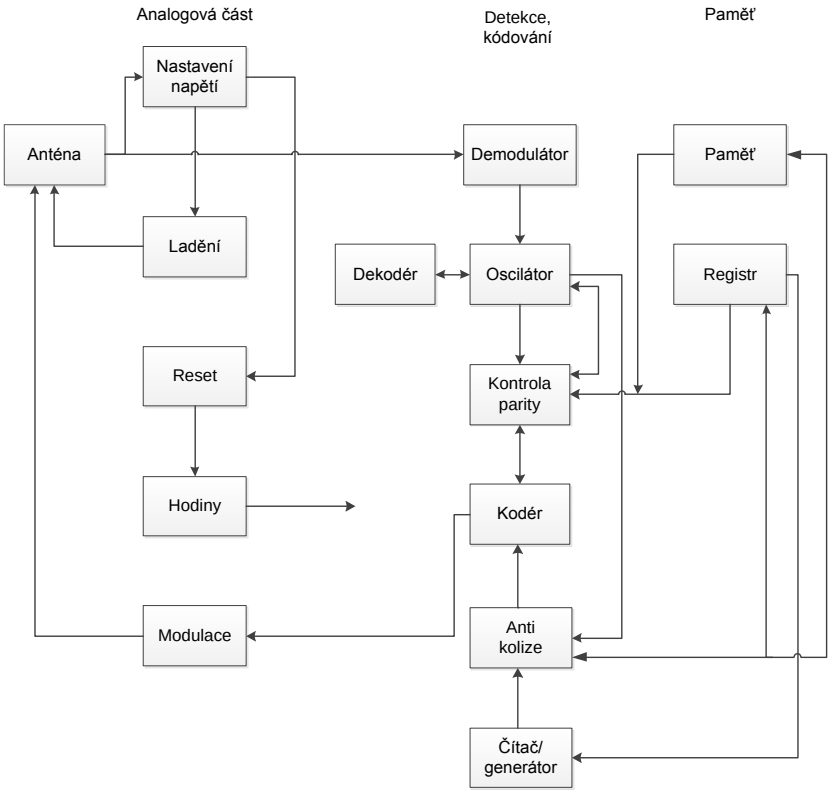
Oba typy antén používají odlišný způsob přenosu dat. Tagy s induktivní vazbou samy generují a vysílají ke čtečce modulovaný signál. Tag druhého typu, na který se soustřeďuje tato práce, pracuje na principu backscatteringu (se zpětným vyzařováním), tj. mění některý z parametrů antény a ovlivňuje tak odražený signál. V rozdílu mezi odeslaným a odraženým signálem, je zakódovaná informace ve formě bitů.

Čip je integrovaný obvod složený z bloků, které slouží ke zpracování přijaté energie. Výkon absorbovaný čipem tagu (P_{chip}) lze vyjádřit jako

$$P_{chip} = P_{reader} \cdot \rho \cdot C \cdot \tau \,, \tag{1}$$

kde P_{reader} je výstupní výkon čtečky, ρ hodnota impedančního přizpůsobení mezi čtečkou a její anténou, C je činitel vazby mezi anténou čtečky a tagu a τ výkonový přenosový koeficient. [1]

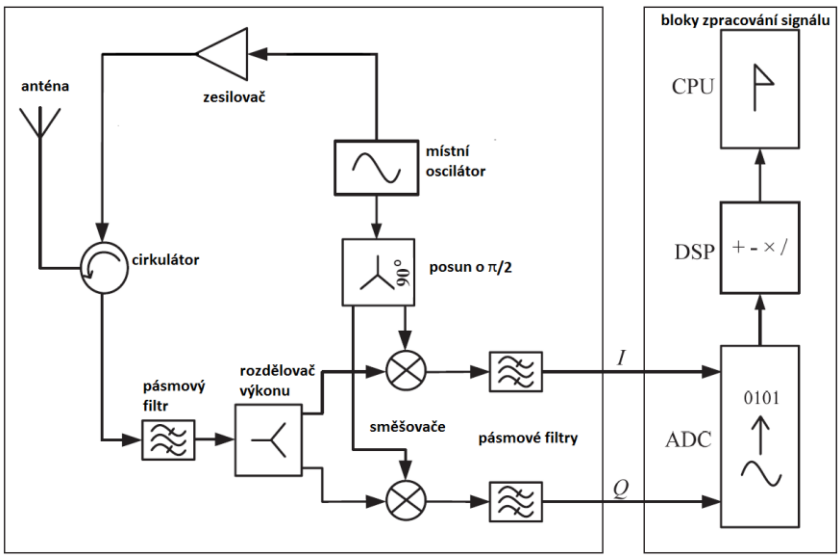
Principiální schéma tagu je na Obr. 1. Anténní část se skládá z modulátoru, stabilizátoru napětí a samotného připojení k vnější anténě. Vnitřní logika zahrnuje kontrolu parity/kontrolu CRC, dekodér, antikolizní systém a ovládání dekodéru.



Obr. 1: Blokové schéma tagu

1.1.2 RFID čtečka

Čtečka je složena z vysílače (vyslání signálu pro tag) a přijímače, který zachycuje signál vyslaný tagem. Čtečka může být vybavena rozhraním pro práci s PC pro další zpracování dat uložených na tagu.



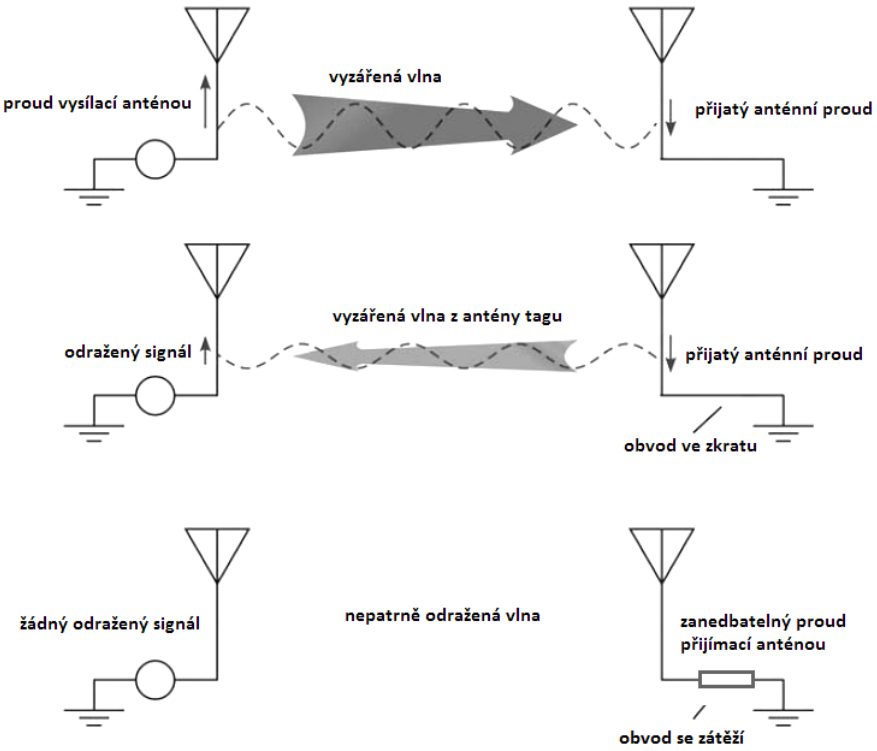
Obr. 2: Blokové schéma čtečky – převzato z [3]

Na Obr. 2 je blokové schéma čtečky. Modulace se zpětným vyzařováním probíhá přepínáním mezi dvěma hodnotami impedance. Tak vzniká impedanční přizpůsobení, resp. nepřizpůsobení mezi čipem, resp. anténou tagu. Tím pádem se signál buď absorbuje, nebo odrazí. Čtečka musí tuto modulaci (napěťový skok) zachytit. Jedná se o rozdíl asi 60 dB, mezi signálem vyslaným čtečkou a jeho následně zachyceným odrazem.

Základní funkcí RFID systému je obousměrná komunikace modulovanou nosnou frekvencí. Princip je následující: čtečka vysílá nepřetržitě sinusový signál (nemodulovanou nosnou). Přitom sleduje, jestli nedetekuje modulovaný signál. Signál je přijat anténou tagu. Jakmile má tag dostatek energie, čip signál demoduluje a zpracuje ho, případně vyšle zpět odpověď. Ta obsahuje unikátní identifikační číslo (modulovaná nosná), které čtečka přijme.

1.1.3 Backscattering

Signál ze čtečky se tedy buď odrazí, nebo absorbuje. Na Obr. 3 jsou vyobrazeny jednotlivé případy.



Obr. 3: Backscattering (zpětné vyzařování) - převzato z [3]

Na horním nákresu je zobrazeno vyslání vlny čtečkou, kterou tag přijme. Pokud je anténa připojena k zátěži, která představuje malý odpor k toku proudu, na přijímací straně se naindukuje anténní proud.

Na prostředním nákresu je případ, kdy přepínač (FET tranzistor), způsobuje v anténě tagu nepřizpůsobení. Toto nepřizpůsobení vede k absorpci malé části energie (jedná se přibližně asi o 10%). Zbytek (90%) je vyzářen anténou zpět. Tento přepínač

ovládaný vstupním tokem dat, rovněž označovaný jako modulátor způsobí, že data tagu budou namodulována na nosnou vlnu a vyzářena zpět - anténa je uzemněna a dovoluje proudu protékat. Signál se odrazí. [2]

Na spodním nákresu je situace opačná. Tranzistor je vypnut, což odpovídá (téměř) rozpojenému obvodu, pracujícímu jako zátěž. Anténou protéká minimální proud a signál se neodrazí.

Platí princip reciprocity – anténa, která přijímá signál, může zároveň signál vysílat. Vysílaná vlna může být vyslána zpátky pomocí zpětného vyzařování. Pokud však bude mezi anténou a zemí vysoká impedance, bude výsledkem téměř nulový proud a anténa tagu zářit nebude. [3]

1.1.4 Rozdělení tagů dle frekvenčního rozsahu

Technologii RFID lze rozdělit do několika rozdílných frekvenčních pásem:

- nízkofrekvenční (LF) – pásmo 30 až 300 kHz
- vysokofrekvenční (HF) – pásmo 3 až 30 MHz
- velmi vysokofrekvenční (UHF) – pásmo 300 MHz až 3 GHz
- mikrovlnné – pásmo vyšší jak 3 GHz

Použití těchto různých frekvenčních rozsahů závisí na konkrétní aplikaci – výsledkem jsou různé vyzařovací charakteristiky tagů, výsledná velikost antény tagu, jeho čtecí vzdálenost, schopnost signálu pronikat různými materiály.

Nižší frekvence (LF) mají omezený dosah a malou rychlost čtení, ale lepší prostupnost materiály a to včetně kapalin. Tagy na těchto frekvencích obsahují indukční obvody. K dostatečnému zajištění napájení je nutný relativně velký počet závitů, v řádu stovek, protože s počtem závitů se úměrně mění i indukované napětí.

Vysokofrekvenční systémy (HF) mají oproti LF větší dosah i vyšší přenosovou rychlost. Schopnost signálu pronikat překážkami je ale menší. Toto pásmo je považováno za standardizované, ovšem značně zarušené. Tento rozsah i tak patří v současnosti mezi nejpoužívanější. Tagy na těchto frekvencích jsou zpravidla zpracovány v podobě kreditní karty se závity v řádu jednotek.

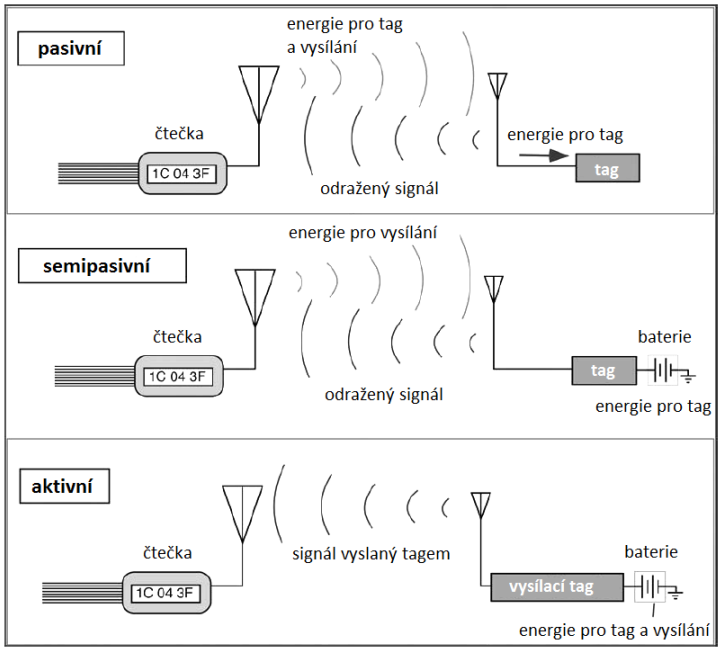
Avšak stále využívanějšími jsou frekvence v mikrovlnném a UHF pásmu. Tagy na těchto frekvencích mají klasickou dipólovou strukturu. Velkou výhodou je již značný čtecí dosah v řádech metrů. Mezi nevýhody UHF patří rozdělení pásma v Evropě na 866 – 869 MHz a v USA na frekvence 902 - 928 MHz. RFID tagy určené pro Spojené státy tedy nelze číst v Evropě a naopak. V dalších zemích a regionech se používají opět odlišné frekvence. To je způsobeno tím, že RFID je relativně nová technologie a v různých částech světa nebylo možné zajistit jednotné kmitočtové pásmo.

U mikrovln se využívá pásem okolo kmitočtů 2,45 a 5,8 GHz. Z pohledu návrhu, kdy se s rostoucí nosnou frekvencí zmenšuje minimální potřebná velikost antény, by se zdálo výhodné využívat převážně tyto vysoké frekvence. Ovšem výrazně se zde projevuje nejen elektromagnetické rušení, ale i veškeré překážky – kov, voda, apod. Ty buď komunikaci zcela znemožňují, nebo výrazně snižují dosah. Také výrobní náklady tagů v tomto pásmu jsou o něco vyšší, což zabraňuje výraznějšímu uplatnění. [1]

1.1.5 Rozdělení tagů dle způsobu napájení

Tagy lze rozdělit z hlediska napájení do několika kategorií, ilustračně na Obr. 4:

- pasivní
- aktivní
- semiaktivní
- semipasivní



Obr. 4: Rozdělení tagů na aktivní, semipasivní, aktivní – převzato z [2]

Pasivní tag nemá vlastní zdroj napájení. Pro svou funkci získává energii z elektromagnetického pole nemodulovaného signálu vysílaného čtečkou (Obr. 4 nahoře). Využívá se backscatteringu. Napájení se naindukuje v obvodu čipu. Vysokofrekvenční napětí na svorkách antény je usměrněno usměrňovačem a je jím nabíjen kondenzátor. Kondenzátor se zenerovou diodou v závěrném směru tvoří napěťový zdroj. Pokud má tag dostatek energie, signál se demoduluje a zpracují se příkazy ze čtečky. Naproti tomu pokud se nenalézá v oblasti čtečky, je zcela nečinný. Čtecí vzdálenost silně závisí na rozložení anténního obvodu a jeho velikosti. U pasivních tagů lze tak dosáhnout čtecí vzdálenosti v řádu nízkých jednotek metrů. To je způsobeno velmi omezenou přijatou energií, kterou tag disponuje. Tato energie zpravidla stačí pouze na vyslání identifikačního čísla. Pro delší čtecí vzdálenosti se proto využívá aktivních tagů.

Aktivní tagy mají vlastní zdroj energie, obvykle ve formě baterie (Obr. 4 dole). Ta sice zkracuje životnost celého zařízení, ale aktivní tagy díky tomu mají větší vysílací výkon, komunikace je spolehlivější a vzrůstá i jejich maximální čtecí vzdálenost přesahující i 100 m. Jsou větší a dražší, mohou ale uchovat větší množství dat. Oproti pasivním tagům mají také možnost uchovat data vyslaná čtečkou ve své paměti. Občas také bývají doplněny měřícími senzory, vstupně/výstupními zařízeními, mikroprocesory apod.

Semiaktivní tagy jsou založené na stejném principu jako aktivní. Rozdílem je, že nejsou aktivní do té doby, než obdrží signál od čtečky. Pak využívají zdroj energie ke komunikaci se čtečkou. Tím je prodloužena životnost baterie.

Semipasivní tagy jsou podobné pasivním tagům (Obr. 4 uprostřed). Mají ale zdroj energie, který využívají k napájení vnitřních obvodů, ale nikoliv ke komunikaci se čtečkou.

1.2 Požadavky a parametry tagů

Na tagy jsou kladeny tyto požadavky:

- Frekvenční – frekvenční pásmo tagu záleží na místě použití. To zahrnuje zemi, ve které se bude tag používat. Případně to závisí na konkrétní aplikaci, které pásmo bude nejvýhodnější (určité frekvence pronikají některými materiály lépe, apod.)
- Tvarové – tvar je důležitý z důvodu nutnosti připevnit tag na určitý předmět. Podle toho jsou vytvořeny požadované velikosti a tvary antény (ampule, karty, apod.)
- Dosah – tento parametr je popsán dále v kapitole maximální čtecí vzdálenosti. Závisí na vlastnostech použité antény tagu.
- Pohyblivost – tagy lze použít v aplikacích, kde dochází k pohybu zařízení. Pro bezpečnou identifikaci zboží, osoby, nebo i vozidla je tedy nutná jistá rychlost čtení, aby tag nezmizel z pole čtečky dříve, než dojde k přečtení informace.
- Cena – tag musí být kvůli ekonomickému hledisku co nejlevnější. Proto se bere ohled na materiál, ze kterého je zařízení vyrobeno.
- Spolehlivost – předpokladem pro správnou funkci je nezávislost na změnách vlhkosti a teploty a jistá mechanická odolnost. [4]

1.2.1 Činitel odrazu, impedanční přizpůsobení s_{11}

Činitel odrazu udává poměr, jaké množství energie projde a kolik se od vstupu antény odrazí zpět ke zdroji. Určuje tedy, jak dobré je impedanční přizpůsobení. Menší hodnota činitele odrazu odpovídá lepšímu impedanční přizpůsobení. Počítá se ze vstupní impedance antény a impedance napájecího zdroje. Kvalita antény tagu silně závisí na komplexní impedanci čipu. Velikost této impedance se navíc mění s frekvencí. [5][6]

1.2.2 Maximální čtecí vzdálenost

Dosah čtení tagu je největší ve směru maximálního zisku. Dosažitelná vzdálenost čtení se pohybuje od několika milimetrů až do řádů desítek metrů. Aby mohl být parametr čtecí vzdálenosti splněn, je pro spolehlivou komunikaci mezi čtečkou a tagem nutno zajistit dvě podmínky.

První je, že tag musí mít dostatek energie, aby se mohl aktivovat. Druhá podmínka zahrnuje nutnost dostatečné síly signálu, který vyslal tag, aby bylo možné bez chyb zachytit vyslaná data.

Běžná čtecí vzdálenost při použití frekvencí v pásmu mezi 800 MHz a 900 MHz je okolo 1 metru (pro pasivní tagy). Největším problémem těchto systémů je nízká účinnost při zachování malých rozměrů.

Maximální čtecí vzdálenost závisí na několika faktorech:

- citlivosti tagu,
- vzájemné poloze, orientaci a polarizaci antén čtečky a tagu,
- vzdálenosti mezi čtečkou a tagem,
- rychlosti pohybu tagu v oblasti čtení.
- použité frekvenci nosné
- aktuálních podmínkách (šum, více tagů vedle sebe, překážky,…)

Vzdálenost, do které je RFID čtečka schopna detekovat pasivní zpětné vyzařování od tagu je definována radiokomunikační rovnicí pro volný prostor

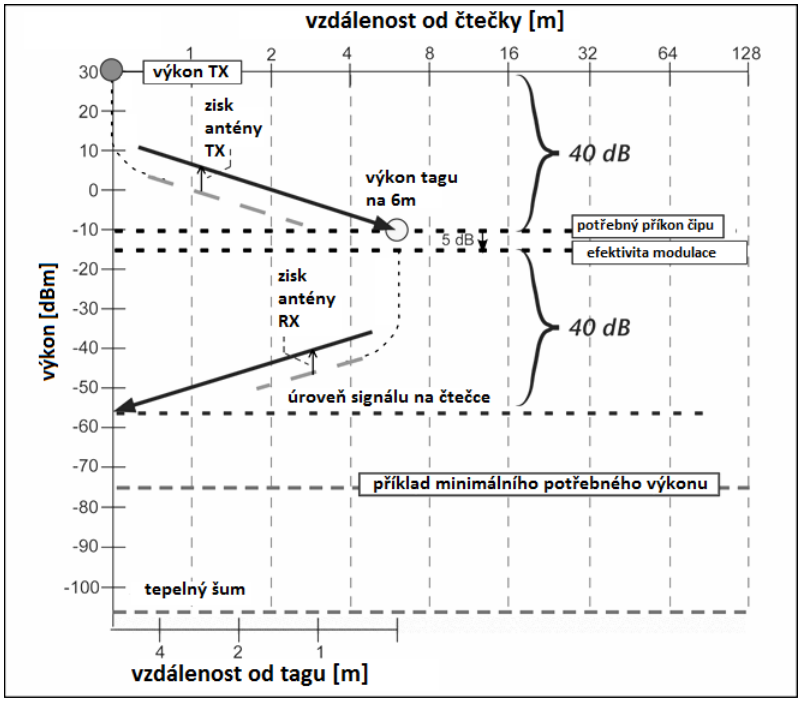
$$r = \frac{\lambda}{4\pi}\sqrt{\frac{P_{TX,reader} \cdot G_{reader} \cdot G_{tag} \cdot \tau}{P_{th}}}, \tag{2}$$

kde λ je vlnová délka, $P_{TX,reader}$ je vysílací výkon čtečky, G_{reader} zisk vysílací antény čtečky, G_{tag} zisk antény tagu a P_{th} minimální výkon potřebný pro napájení tagu. Pozn.: V tomto případě neuvažujeme polarizační ztráty.

Výkonový koeficient τ je dán

$$\tau = \frac{4R_c \cdot R_a}{\left|Z_c + Z_a\right|^2}, 0 \le \tau \le 1, \tag{3}$$

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



Obr. 5: Diagram výkonů vzhledem ke vzdálenosti od tagu - převzato z [2]

Na Obr. 5 je možné pozorovat příklady výkonových úrovní při komunikaci čtečky a tagu. Výkon přijatý tagem je

$$P_{TX,tag} = P_{TX,reader} \cdot G_{reader} \cdot G_{tag} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \cdot T_b \tag{4}$$

a úroveň přijatá zpět na čtečku, z výkonu, kterou tag odrazí je

$$P_{RX,reader} = P_{TX,tag} \cdot G_{tag} \cdot G_{reader} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2, \tag{5}$$

kde $P_{TX,reader}$ je výkon vysílaný čtečkou, G_{reader} zisk antény čtečky, G_{tag} zisk antény tagu, r vzdálenost mezi anténou tagu a čtečky, T_b ztráty na tagu a P_{TX} vysílací výkon tagu

Přijatý výkon je potom roven převracené hodnotě čtvrté mocniny vzdálenosti

$$P_{RX,reader} = P_{TX,reader} \cdot T_b \cdot G_{reader}^2 \cdot G_{tag}^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r}\right)^4. \tag{6}$$

Z těchto rovnic lze následně zjistit teoretický výkon odražený od tagu, přijatého čtečkou.

Vlnová délka je

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{867 \cdot 10^6} = 0{,}346m\,. \tag{7}$$

Nejdříve vypočítáme vyzářený výkon čtečky

$$EIRP = P_{TX,reader} + G_{TX,reader} = 20 + 7 = 27dBm. \tag{8}$$

Výkon přijatý zpět na čtečku je potom dle (5) roven

$$P_{RX,reader} = P_{TX,reader} + G_{TX,reader} + G_{tag} - L_{feed} + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r}\right), \tag{9}$$

kde L_{feed} je útlum napaječe.

Výkon přijatý tagem je tedy

$$P_{RX} = 20 + 7 + 2 - 2 + 20 \cdot \log\left(\frac{0{,}346}{4\pi \cdot 0{,}6}\right) = \underline{\underline{0{,}43dBm}} \tag{10}$$

a výkon přijatý zpět na čtečku je

$$P_{RX,reader} = P_{TX,reader} + T_b + 2G_{TX,reader} + 2G_{tag} - 2L_{feed} + 10 \cdot \log\left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r}\right)^4, \tag{11}$$

což odpovídá hodnotě

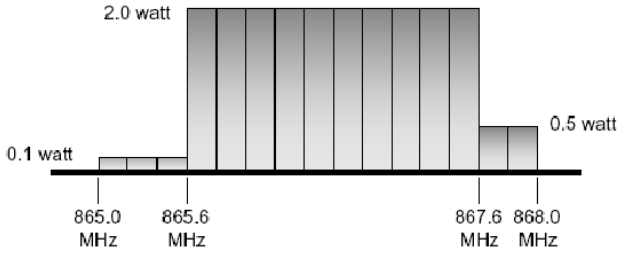
$$P_{RX,reader} = 20 - 5 + 2 \cdot 7 + 2 \cdot 2 - 2 \cdot 2 + 10 \cdot \log\left(\frac{0{,}346}{4\pi \cdot 0{,}6}\right)^4 = \underline{\underline{-24{,}5dBm.}} \tag{12}$$

Hodnota -24,5 dBm je tedy výkon, který čtečka teoreticky přijme. Tato hodnota platí pro vzdálenost 0,6 m a zisk antény tagu 2 dBi.

Samotné měření čtecí vzdálenosti musí být v praxi provedeno pokud možno za ideálních podmínek. Bez vícenásobných odrazů a blízkých objektů, které by mohly ovlivnit měření.

1.2.3 ERP

Pro UHF pásmo se používá vyjádření ERP. V Evropě je mu přiděleno pásmo 865 – 868 MHz (Obr. 6). To se dělí na 15 kanálů, které mají šířku 200 kHz. Krajních 5 pásem je výkonově omezeno – slouží jako ochranná pásma. Maximální výkon čtečky je omezen na 2 W ERP nebo 3,2 W EIRP (Evropa). Oproti tomu v mikrovlnné technologii (okolo 2,4 GHz) se využívá EIRP. [8]



Obr. 6: Rozdělení UHF RFID pásem - převzato z [2]

1.3 Vzájemná poloha čtečky a tagu

Při některých kombinacích polarizace a orientace tagu čtení možné bude a při některých se tag naopak stane pro čtečku velmi špatně čitelný, v krajním případě až zcela nečitelný i z velmi krátké vzdálenosti. Důsledkem toho anténa tagu musí být orientována tak, aby došlo ke spolehlivému čtení. Toho může být dosaženo několika způsoby:

Zajištěním prostorové orientace: uvažujeme-li vektor intenzity elektrického pole, tak směr tohoto vektoru určuje polarizaci vlny. Jestliže nemění svou orientaci, jde o lineární polarizaci. Lineárně polarizovaná anténa může být použita za předpokladu, že orientace antény tagu bude stále stejná – ve směru kolmém na osu antény tagu. Tento způsob je velmi jednoduchý, ovšem ne vždy praktický.

Kruhovou polarizací: pokud vektor intenzity elektrického pole svou orientaci mění (opisuje elipsu), jde o eliptickou polarizaci. Kruhově polarizovaná anténa čtečky/tagu zajistí, že tag bude čitelný i při libovolném úhlu na točení (ve směru osy antény tagu).

Kruhové polarizace se využije v případě, kdy nelze určit přesně typ polarizace nebo není známa vzájemná poloha vysílače a přijímače (např. také u mobilní komunikace, družicových spojů). [3]

Pozn.: Některé tagy (dvoudipólové) při odražení vlny mění směr její polarizace. U jednodipólových se použitím kruhové polarizace snižuje výkon na tagu a tím následně i přijatý čtečkou (vlivem polarizačních ztrát). Výhodou potom však je, že v určitých směrech je tag necitlivý na natočení vzhledem k čtečce.

2 PŘIZPŮSOBOVACÍ OBVOD

Impedanční přizpůsobení antény je nutné kvůli měření parametru činitele odrazu s_{11}. Pro správné měření musí být na vstupu analyzátoru hodnota 50 Ω. Impedance antény se však skládá z malé hodnoty reálné složky (v řádu jednotek až desítek Ω) a značně velké hodnoty imaginární impedance (v řádu stovek Ω). Hlavně imaginární složka způsobuje značné problémy při přizpůsobování. Navíc se tato hodnota mění s frekvencí. Problém přizpůsobení však netkví pouze při měření antény, ale i při jejím návrhu. Velikost induktivní složky antény musí odpovídat kapacitní složce čipu. Dipól má za svojí rezonancí induktivní charakter, to znamená kladnou reaktanci. Ta kompenzuje kapacitní charakter čipu.

Při návrhu a simulacích je jednou z možností přizpůsobení prodloužení meandru až za rezonanční kmitočet. To při zachování dané délky. To je možné zajistit právě dalším meandrováním, které mění kapacitní a induktivní složku antény. Například proužek (pasivní prvek) nad anténou pracuje jako paralelní kapacita, který pomáhá doladit reálnou část impedance.

Druhou možností, jak připojit takovou anténu ke kapacitní zátěži, je přizpůsobovací obvod. Ten se skládá z paralelně a sériově sestavených cívek, realizovaných ve formě mikropáskového vedení, připojeného k čipu. To je pak přímo součástí antény.

Při měření je úpravu na potřebnou hodnotu možné provést několika způsoby - například obvodem se soustředěnými parametry nebo pomocí vedení, případně diskrétními součástkami. Vedení je možné použít buď koaxiální nebo mikropásková. Vyřeší se tak dva zásadní problémy, popsané níže.

První problém, kompenzace komplexní impedance, je nutno řešit kvůli akurátnosti měření. Vektorový analyzátor by při hodnotě odlišné od 50 + j0 Ω ukazoval zkreslené hodnoty. Docházelo by totiž k odrazu vlny na vedení vlivem nepřizpůsobení.

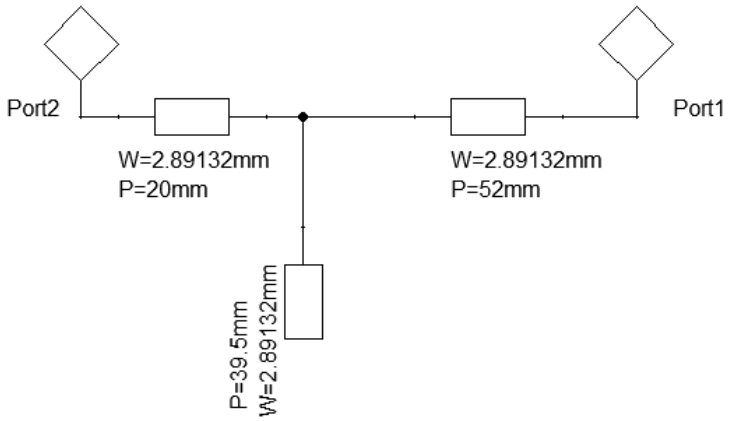
Druhý problém je nutnost symetrizace vedení. Používáme totiž souosý koaxiální kabel. Pokud totiž propojíme nesymetrický koaxiální kabel přímo k symetrické anténě (dipólu), dochází ke vzniku nesymetrických proudů a zkreslení výsledků měření. Část proudu z vnitřní strany vnějšího vodiče prochází totiž po vnějším povrchu. To má za následek nepříznivé vyzařování a změnu směrové charakteristiky dipólu, což je pro jakékoliv měření nežádoucí.

Je nutné si také uvědomit, že přizpůsobení má obecně značně úzkopásmový charakter. Měření má tedy svou váhu pouze v pásmu kmitočtů, na kterou je přizpůsobení navrženo a vyrobeno. [6]

2.1 Přizpůsobení pomocí mikropáskového vedení

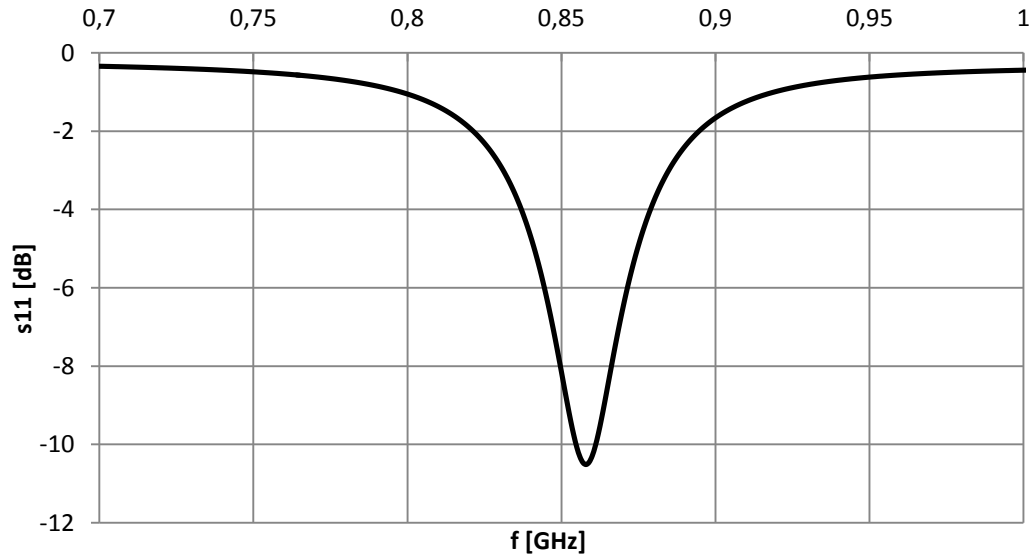
Jako první možnost bylo zvoleno přizpůsobení z mikropáskového vedení. Jeho výhodou je velmi snadná výroba, resp. případná snadná reprodukovatelnost. Obvod byl navržen v programu Ansoft Designer a byl realizován jako měděný tištěný spoj. Substrátem posloužil materiál FR4 o tloušťce 1,5 mm. Návrh je schematicky uveden na Obr. 7, včetně rozměrů (L1 = 52 mm, L2 = 39,5 mm). Pokud nebude anténa připojena přímo

k mikropáskovému přizpůsobovacímu obvodu, je nutné také počítat s délkou přechodů – SMA konektorů apod. Směrem od pahýlu k VA už není délka rozhodující, jedná se o přizpůsobené 50 Ω vedení.



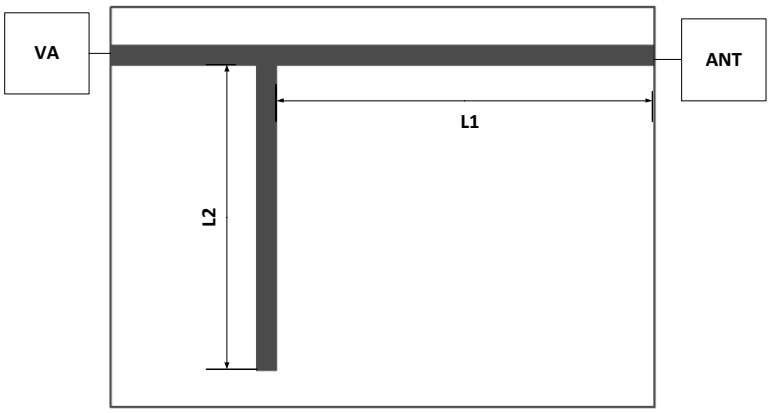
Obr. 7: Impedanční přizpůsobení mikropáskovým vedením

Jak je vidět na Obr. 8, je toto řešení teoreticky o něco širokopásmovější než dále uvedené, realizované pomocí kabelu RG58. Pahýl naprázdno, který je umístěn na vstupu antény, pracuje jako paralelní kondenzátor, který mění koeficient odrazu. Změna jeho délky od 0 do λ/4 mění kapacitu od 0 do nekonečna. Lze tak nastavit jakoukoliv požadovanou hodnotu modulu impedance. Fáze se nastavuje 50 Ω vedením, zapojeným do série. Jeho délka se nastavuje změnou umístění pahýlu naprázdno. Jeho hodnota může být mezi 0 a λ/2, což je jedno otočení na smithově diagramu.



Obr. 8: Návrh přizpůsobení pomocí mikropáskového vedení

Mikropáskové přizpůsobení bylo následně realizováno. Ilustrační fotografie je uvedena v příloze. Jak vypadala měřící soustava, je ukázáno na Obr. 9.



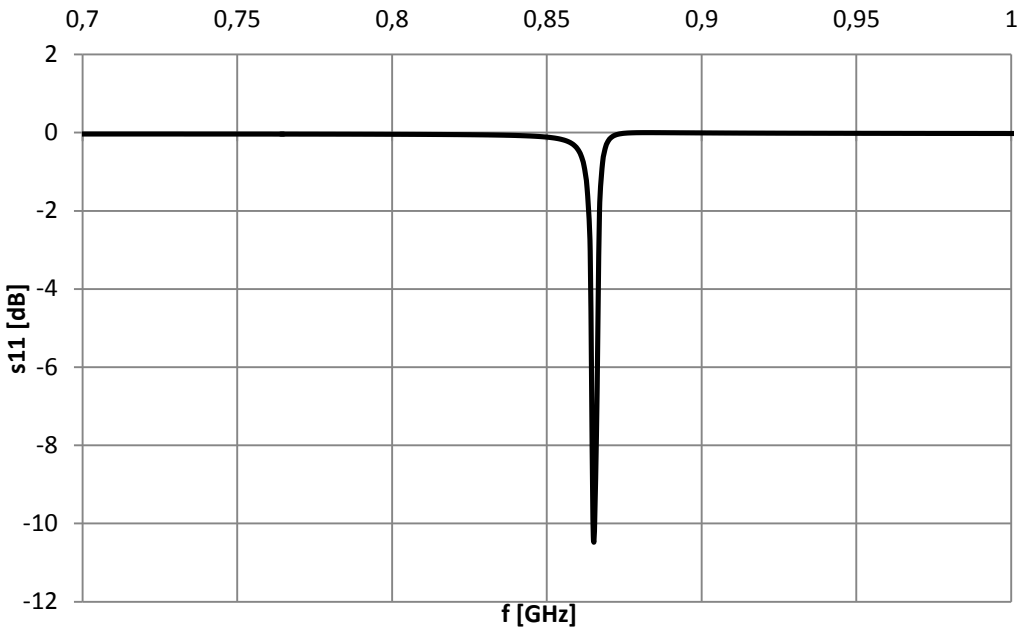
Obr. 9: Praktická realizace mikropáskového přizpůsobení

Výsledky měření s tímto pahýlem však nebyly uspokojivé. Připojená anténa nevykazovala známky přizpůsobení a minima činitele odrazu vůbec neodpovídala teoretickým předpokladům.

Původní návrh byl při výrobě pro jistotu rozměrově o několik milimetrů větší, proto se přistoupilo k částečnému odstraňování motivu, tj. zkracování délky pahýlu, následně i vedení směrem k analyzátoru. Ani tak se nepodařilo dosáhnout kýžených výsledků. Tento mikropáskový pahýl tedy nepracoval správně – nepřizpůsoboval potřebnou impedanci na impedanci vektorového analyzátoru. Na vině mohla být buď systematická chyba při návrhu v programu Ansoft Designer, případně vliv přechodů na SMA konektory.

2.2 Přizpůsobení pomocí koaxiálního vedení

Jako další bylo realizováno přizpůsobení vyrobené z koaxiálního vedení. Pro svou snadnou dostupnost byl vybrán koaxiální kabel RG58C. Jeho charakteristická impedance je 50 Ω a činitel zkrácení 0,66. Hodnoty délek vedení byly spočítány pomocí programu 4nec a následně ověřeny v programu Ansoft Designer. Pomocí obou programů se došlo ke stejným výsledkům. Oproti později navrženému mikropáskovému přizpůsobení má úzkopásmovější charakter, viz Obr. 10.



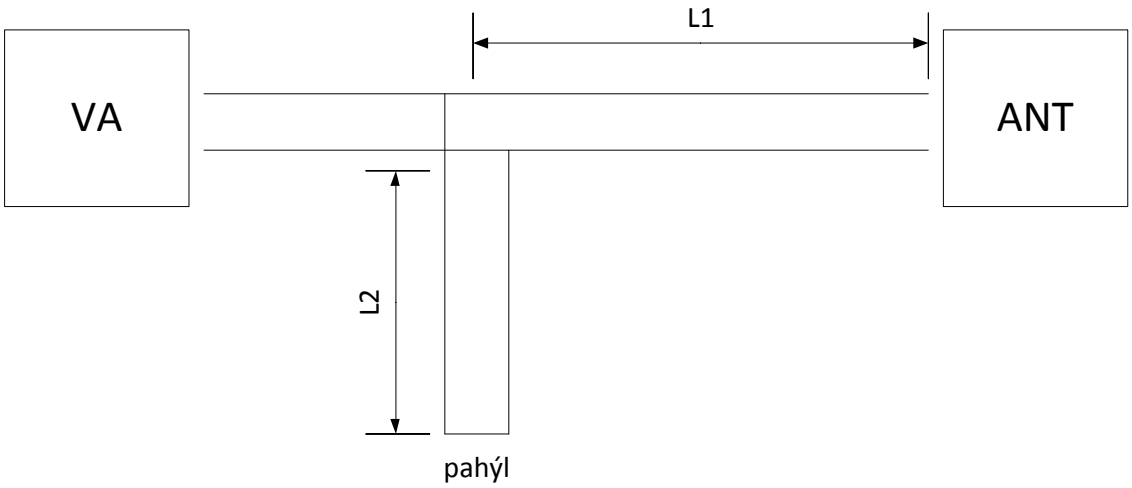
Obr. 10: Impedanční přizpůsobení koaxiálním pahýlem

Délky koaxiálního kabelu, vypočítané programem 4nec, jsou uvedeny v Tab. 1. V tomto případě je zajímavé sledovat změny, které probíhají při případné změně komplexní impedance. Délky koaxiálních kabelů nemají kritický vliv na impedanci, kterou přizpůsobujeme. Na druhou stranu mají tyto délky značný vliv na přizpůsobovanou frekvenci. Je tedy nutné při výrobě precizně dodržovat vypočítané rozměry, a to s přesností, kdy odchylka není větší než 0,5 mm.

Varianta	Délka vedení L1 [mm]	Délka vedení L2 [mm]	
		Naprázdno	Nakrátko
A	51,1	58,3	1,3
B	55	55,7	112,7

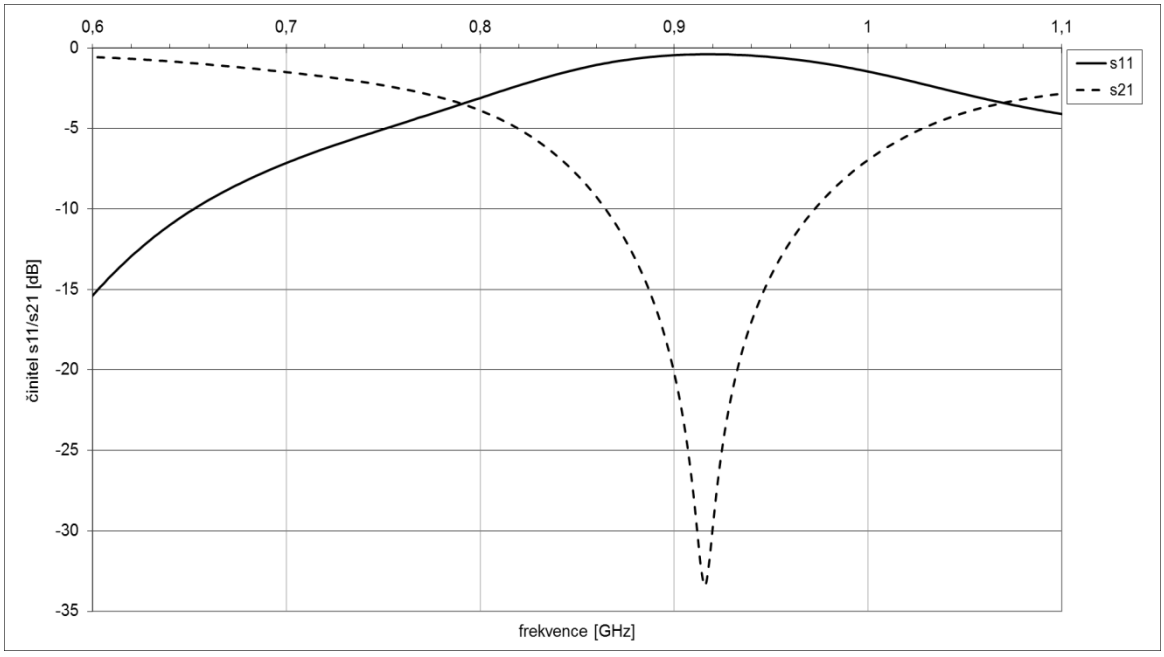
Tab. 1: Přehled délek pahýlu nakrátko a naprázdno

Vybráno bylo přizpůsobení uspořádání paralelního pahýlu, zakončeného nakrátko. Pro danou možnost jsou k dispozici vždy dvě řešení. V tomto případě jde o pahýl varianty B – nakrátko. Délky vedení jsou tedy (ANT) L1 = 55 mm a pahýl L2 = 112,7 mm. Hodnota 1,3mm pro variantu A je díky své délce velmi obtížně realizovatelná. Pahýl, včetně délek, je na ilustračním Obr. 11. V grafu na Obr. 12 jsou následně změřeny parametry pahýlu s_{11} a s_{21}. Realizovaný pahýl je taktéž uveden fotografií v příloze.



Obr. 11: Přizpůsobení pomocí koaxiálního vedení

Toto řešení se ukázalo jako funkční, ač s drobnými odchylkami od očekávaných frekvencí a hodnot přizpůsobení. To však může být dáno opět přechody SMA konektorů a samotnou realizací – hlavně spoje přímého vodiče a samotného pahýlu.



Obr. 12: Měřené přizpůsobovací vedení

3 NÁVRH ANTÉN

Pro návrh antén existuje mnoho simulačních programů. Pro tuto práci byl zvolen návrh tagů v programu CST MICROWAVE STUDIO (dále jen CST). V úvodu se pouze krátce seznámíme s použitou metodou simulace.

Simulace se provádí v časové oblasti. Její výhodou je získání širokopásmové odezvy během jednoho běhu simulátoru. Z odezvy lze získat takovou informaci, která odpovídá těm kmitočtům, které obsahoval vstupní impulz. Tento vstupní impulz má určitý časový průběh. Může se jednat například o Gaussovský pulz.

Pro buzení lze použít dva druhy portů. Buď diskrétní, nebo vlnový. Diskrétní port patří mezi nejjednodušší možnost, jak zavést buzení, vhodné obzvláště pro drátové struktury. Port je vymodelován prvkem se soustředěnými parametry. Obsahuje výkonový zdroj s definovanou vnitřní impedancí, který je schopen budit a pohlcovat výkon. Dodává tak vstupní výkon, resp. je schopen měřit napětí na portu a proud portem. Z budícího a odraženého signálu je také možné určit „s“ parametry. V této práci se využívá právě tohoto diskrétního portu – je totiž vhodný pro struktury buzené pouze jednou složkou pole, jako jsou dipóly nebo obecně tenké drátové antény.

Vlnový port je používán k vybuzení vidu elektromagnetického pole. Je možné si ho představit jako vlnovodné vedení připojené ke struktuře. Je výhodnější ho použít, pokud se struktura simuluje včetně připojeného SMA konektoru.

Volbou diskretizační sítě měníme množství bodů, ve kterých se budou zadané parametry počítat. Čím více těchto bodů bude, tím bude výsledek přesnější a bude více odpovídat realitě. Samozřejmě je nutné zvolit vhodný kompromis mezi množstvím bodů diskretizační sítě a dobou výpočtu. Čím více bodů bude, tím bude výpočet trvat déle, avšak bude přesnější. Meshovací síť je proto nutné nastavit ve vhodném poměru mezi strojovým časem a přesností, kterou od návrhu vyžadujeme. [10]

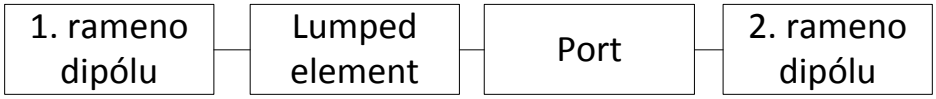
3.1 Vlastnosti navrhované antény

Cílem tohoto návrhu je mikropásková anténa planárního typu. Půjde o dipól, který je zkrácen meandrováním. Tvoří ji kovový pásek na dielektrickém substrátu. Napájena bude v jednom bodě. Bude tedy budit vlnění s lineární polarizací. Antény se navrhují pro kmitočet 867 MHz. Substrátem pro základ je FR4 – vybrán byl kvůli snadné dostupnosti a nízké ceně. Jeho permitivita je $\varepsilon_r = 4{,}2$ a ztrátový činitel $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}03$. Běžná tloušťka je 1,5 mm. Díky tomu, že je anténa umístěna na dielektrikum, je nutné započítat i činitel zkrácení. To znamená, že rameno antény bude o něco kratší, v substrátu se vlnová délka zmenšuje. Tím se snižuje účinnost antény. Délka vlny v substrátu je totiž nepřímo úměrná $\sqrt{\varepsilon_r}$. Při simulaci se okolo antény předpokládá volné prostředí (ukončené plochou s úplnou absorpcí signálu).

Mezi výhodné vlastnosti tohoto typu antén patří velmi jednoduchá laditelnost, přibližně všesměrové vyzařování výkonu, nízká cena, nízká hmotnost a malé rozměry. Naopak jako nevýhodné se jeví možnost použití pouze pro menší výkony, menší zisk, úzkopásmovost daná vysokým činitelem jakosti.

3.2 Buzení

Buzení struktury probíhá pomocí diskrétního portu, doplněného o element dovolující zajistit komplexní impedanci (discrete port + lumped element), viz obrázek Obr. 13. Discrete port zajišťuje reálnou složku impedance, lumped element imaginární složku impedance. Výsledkem je imitace čipu, který má malou reálnou složku impedance a velkou imaginární složku kapacitního charakteru. Na příslušném kmitočtu pak dochází k přizpůsobení antény, kdy se imaginární složka čipu a antény kompenzují. Velikost hodnoty komplexní impedance byla zjištěna z katalogového listu a přepočítána na kapacitu podle vzorce níže.



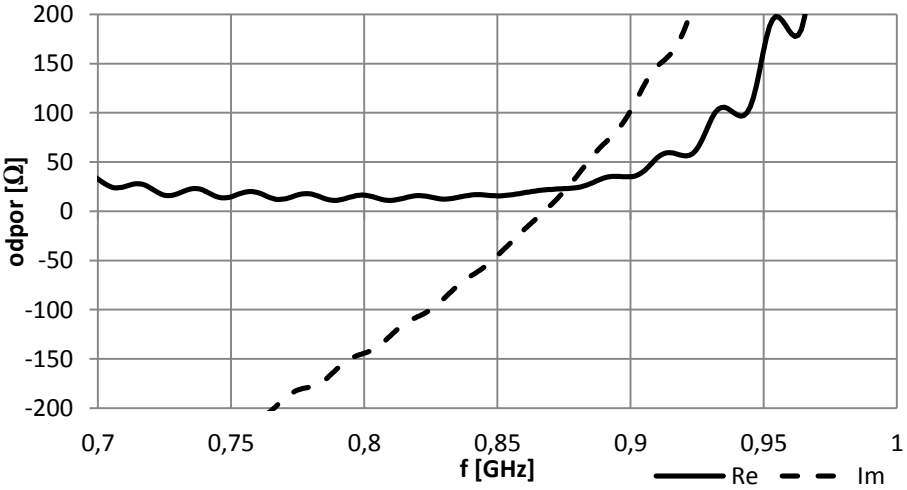
Obr. 13: Schematické zobrazení buzení v programu CST u dipólové antény

Kapacita lumped elementu se stanoví jako

$$C = -\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_c} \tag{13}$$

kde f je frekvence, na které bude anténa rezonovat a X_c reaktance čipu. Stejně jako u přizpůsobení, které je řešeno dále, je tento návrh značně úzkopásmový a platí pouze v okolí rezonančního kmitočtu.

Jestli opravdu dochází ke kompenzaci, lze v CST zjistit snadno. Pomocí nástroje výpočtu impedance je možné zjistit velikost složek na různých frekvencích. Na ilustračním grafu (Obr. 14) je možné vidět průběh reálné a imaginární složky pro jednu z antén. Reálná složka by se měla pohybovat v řádu jednotek, nebo nízkých desítek Ω, imaginární složka by na druhou stranu měla být nulová (dochází ke kompenzaci).



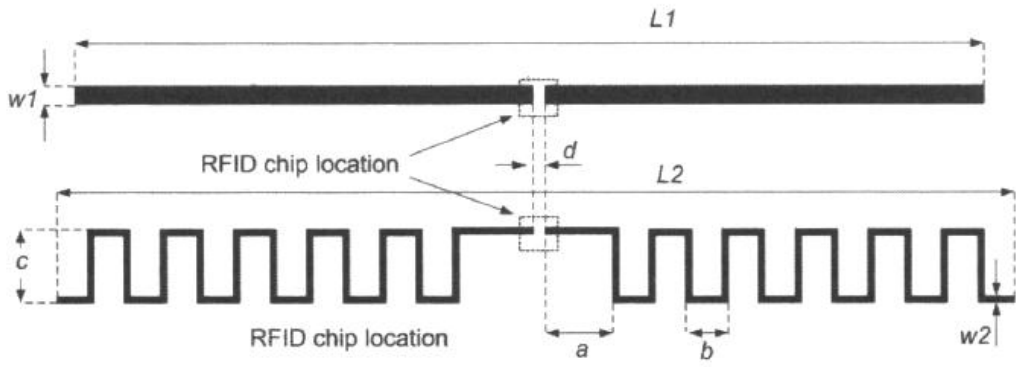
Obr. 14: Ukázka hodnot reálné a imaginární části odporu antény

Pro návrh byl původně použit čip SL3S30 01 FTT [14] s impedancí 12,7 - j457 Ω. Z neznámých důvodů byl však po připojení k anténě pro čtečku zcela nečitelný, resp. jevil se jako nefunkční. Proto se přistoupilo k tomu, že se použilo čipů z komerčně vyráběných běžně dostupných tagů SL3ICS1002 [15]. Z katalogového listu bylo opět možné zjistit, že na dané frekvenci má tento čip impedanci 22 – j195 Ω, což odpovídá vstupní kapacitě 0,88 pF. Tyto hodnoty je možné získat z příslušného datasheetu, tak i v příloze této práce. Antény proto bylo nutné přepočítat na tuto hodnotu. Následná realizace probíhala tak, že čip byl z komerčního tagu vystřihnut (jednalo se o nalepovací tagy) a připájen k vyrobené anténě. Toto řešení se osvědčilo a ukázalo se jako zcela bezproblémové a funkční.

3.3 Meandrování

V práci již padla zmínka o meandrování. Meandrování je u RFID antén klíčový proces, kdy u dané antény měníme její tvar a velikost, snažíme se dosáhnout menší prostorové náročnosti antény. Většina tagů jsou variacemi na dipól. Dipól (na frekvenci 867 MHz) by totiž byl při rezonanci příliš veliký pro použití a neposkytoval by dobré přizpůsobení k čipu.

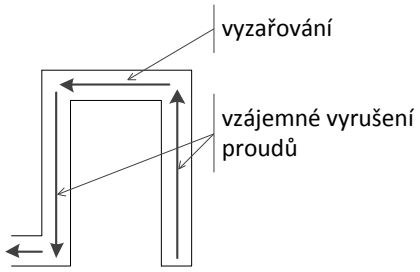
Taktéž se mění rezonance antény – je jí dosaženo na nižší frekvenci, než v případě přímého dipólu stejné délky, za cenu užšího pásma a nižší účinnosti. Meandrový dipól má tedy vyšší rezonanční kmitočet při stejné délce odpovídající přímému dipólu. Pro dosažení odpovídající frekvence 867 MHz je potřeba větší délky než při použití přímého dipólu. Ilustrační srovnání meandrovité a dipólové antény je na Obr. 15. [3]



Obr. 15: Srovnání přímé dipólové a meandrovité antény - převzato z [7]

Meandrování dipólu má jisté následky. Meandrováním se mění kapacita i indukčnost antény. Meandrováním proud v sousedních ramenech prochází ve vzájemné inverzi. Dochází k vyrušení těchto proudů (Obr. 16) a anténa nevyzařuje, resp. vyzařuje pouze částmi ve směru původního dipólu. Čím více budou meandry nahuštěny do menšího prostoru, tím více bude vyrušení proudů patrné. Pro hustě meandrovou anténu bude těmito částmi dán i odpor antény. [7]

Vodorovné linie mají vliv hlavně na odpor, svislé linie na ztráty. Tvar zákrutů je ve většině případů periodický, ovšem v případě potřeby jiné impedance se může tvar značně měnit.



Obr. 16: Proud v sousedních ramenech meandrové struktury

Pro hustě meandrovou anténu lze tedy předpokládat, že vyzařovat budou pouze ty části antény, které jsou natočeny ve směru originálního dipólu. U meandrové antény se tak díky vyrušení proudů oproti dipólu indukčnost snižuje. [3]

3.4 Přizpůsobení čipu a antény

Jeden z parametrů, který ovlivňuje indukčnost/kapacitu meandrové antény je vzdálenost meandrů mezi sebou. Při snížení vzdálenosti meandrů mezi sebou dojde ke snížení reaktance, rezonanční frekvence vzroste, a to při zachování celkové délky zmeandrovaného dipólu.

Přizpůsobení antény ke kapacitnímu charakteru čipu lze také provést přizpůsobovacím vedením. Indukčností, která je realizována určitou délkou vedení připojenou mezi anténu a čip. Cílem je přizpůsobit impedanci antény ke komplexní impedanci čipu.

Další způsob přizpůsobení impedance na žádanou hodnotu je rozšířit konec antény do větší struktury. To zvýší kapacitu antény.

Změnou tloušťky meandrovitého dipólu se taktéž mění reaktance. Při použití menší šířky je anténa širokopásmovější. Vzrůstá totiž kapacitance a snižuje se induktance, při zachování rezonanční frekvence. [3]

Anténa může být rozladěna, pokud bude umístěna na dielektrických materiálech (jako je například sklo a kovy apod.). Umístění ke kapalinám a kovům snižuje elektrické pole antény k nule nebo na velmi malou hodnotu. Tyto materiály mají totiž značně vysokou permitivitu. Dochází ke změně impedančního přizpůsobení. Každá změna impedance vede ke snížení množství energie pro čip. Pasivní tag tak získá méně energie pro aktivaci a pro aktivní tag se zhorší poměr signál šum. Tím pádem se sníží čtecí vzdálenost. [7]

3.5 Umístění antény na různých površích

Jak už bylo zmíněno, na funkci antén má taktéž značný vliv, kde bude daná anténa umístěna. Různé materiály budou mít různě velký vliv na parametry antény.

Pro antény umístěné na určitém povrchu, aniž by to mělo vliv na jejich funkci, musí být učiněna určitá opatření. Kromě rozladění dochází také ke změně impedance – anténa není přizpůsobena k čipu. Tagy jsou proto zpravidla umístěny na materiálech,

pro které byly konkrétně vyrobeny. Pokud například tag určený pro použití na papírové či dřevěné krabici umístíme na kovový předmět, dochází zpravidla k takovému zhoršení parametrů, že tag přestane být funkční.

Jednou z možností je oddělit anténu od povrchu kovu dielektrickým materiálem (nejlépe vzduchem), a to alespoň několik milimetrů. Alespoň částečně je tak omezen vliv kovové plochy. Druhou možností je u antény použití reflektoru. Ten taktéž alespoň zmírní účinky kovové plochy.

Například dielektrická konstanta papíru (podle druhu) se pohybuje okolo $\varepsilon_r = 3$. Oproti volnému prostoru se tak zvyšuje kapacitní charakter antény. To má zásadní vliv na posun rezonanční frekvence, kromě antén s velkým Q (které mají malý vyzařovací odpor).

Sklo má typickou hodnotu dielektrické konstanty $\varepsilon_r = 6$. Umístěním na sklo se výrazně zvyšuje kapacitní charakter antény. Navržením přizpůsobovacího členu jsou tedy tagy použitelné na skle, ovšem na druhou stranu zhorší se jejich vlastnosti ve volném prostředí a na materiálech s nižší relativní permitivitou.

3.5.1 Vliv umístění na kovové materiály

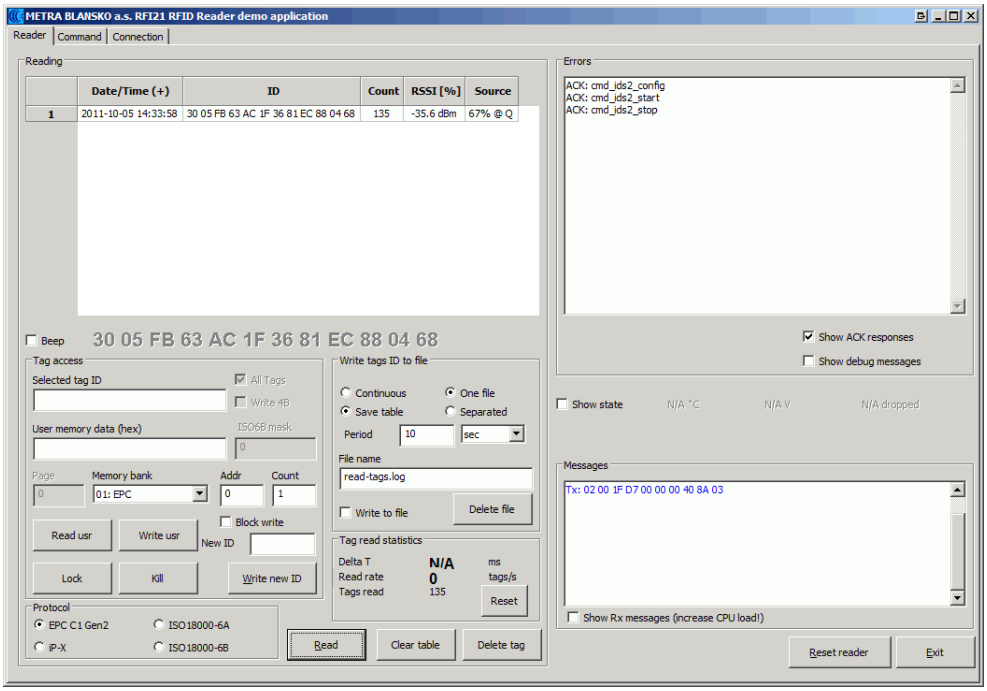
V této kapitole je uvedeno pouze obecné shrnutí vlivu kovových materiálů na funkci tagů. Konkrétní účinky jsou uvedeny vždy u konkrétních antén a ve shrnutí.

Voda a kovové materiály jsou totiž jedním z nejhorších případů pro vyzařování tagů. Voda má relativní permitivitu přibližně $\varepsilon_r = 80$. Ta je způsobena snahou molekul vody zrušit jakékoliv elektrické pole. Funguje tak jako výborný reflektor a absorbér (útlum až 40 dB/m pro frekvence okolo 900 MHz). Absorpce se výrazně zvyšuje se zvyšující se frekvencí. Ještě kritičtější je umístění tagu na kovovém povrchu. Elektrické pole v kovu je za těchto okolností prakticky nulové. Odražená vlna má ideálně stejnou velikost, jako vyslaná – vzniká stojaté vlnění. Kovový materiál je tím pádem taktéž velmi vhodný jako reflektor. Tag ovšem musí být předurčen pro fungování na kovovém materiálu. V opačném případě je značně omezeno či znemožněno jeho fungování.

3.6 Měřicí přístroje

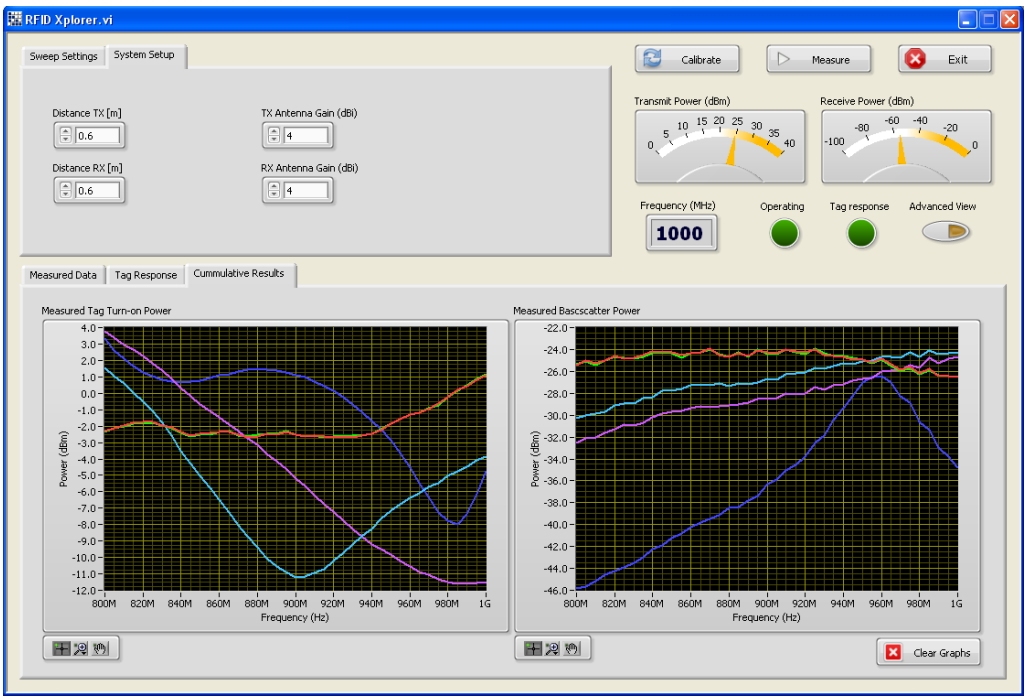
Měření prováděná v této diplomové práci byla prováděna na několika měřících přístrojích. V případě charakteristik činitele odrazu a impedance jde o vektorový analyzátor R&S®ZVL3. Pokud jde o měření charakteristiky pahýlu, jednalo se o R&S®ZVA67.

Orientační měření čtecí vzdálenosti byla prováděna na měřící soustavě UHF RFID čtečce Metra RFI21.1 a anténě Metra RFA01 s ovládacím softwarem RFI21 RFID Reader demo application. Ilustrační obrázek softwaru aplikace je na Obr. 17.



Obr. 17: Software pro měření čtecí vzdálenosti

Měření minimálního potřebného výkonu pro aktivaci tagu a výkonu odraženého (vysílaného) tagem bylo provedeno pomocí měřicího systému RFID Xplorer®. Tento systém umožňuje změřit minimální výkon potřebný pro funkci tagu a jeho odezvu v pásmu 800 MHz až 1 GHz. Více informací o tomto systému je uvedeno na stránkách výrobce CISC Semiconductor GmbH [11].



Obr. 18: Softwarové vybavení měřícího systému RFID Xplorer®

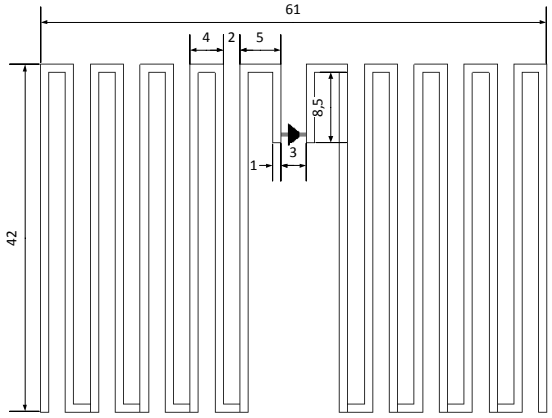
Uživatelské rozhraní tohoto systému je na Obr. 18. Levá horní část ukazuje část nastavení. V tomto případě se jedná o nastavení vzdálenosti vysílací antény a tagu, resp. přijímací antény a tagu. Na levém grafu je závislost potřebného výkonu pro zapnutí tagu na frekvenci. V pravém grafu je přepočítaný výkon, který tag vysílá zpět. Pro ukázku je změřeno několik tagů. Modré a fialový průběh jsou charakteristiky komerčních tagů. Pro minimální výkon pro zapnutí vykazují různá minima. Červeně je označen prototypový tag, viz dále – ten potřebuje řádově větší výkon pro zapnutí. Ovšem na druhou stranu je jeho odražený výkon zcela srovnatelný, dalo by se říci, že i lepší (větší) než u zkoumaných komerčních tagů.

4 MODELY ANTÉN

V této kapitole jsou uvedeny antény, které se podařilo úspěšně realizovat a případně proměřit jejich parametry.

4.1.1 Anténa pro hodnotu 50 Ω

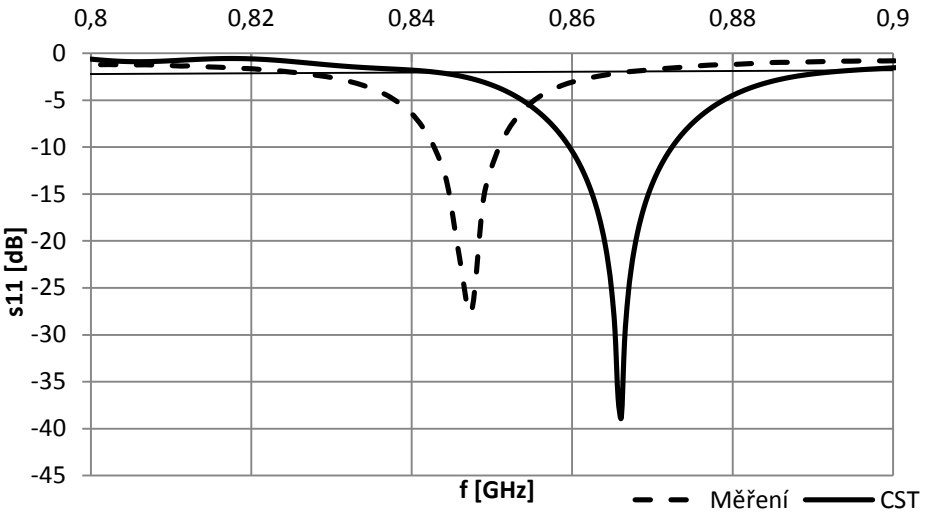
Jako první bylo navrhnuto nejjednodušší možné provedení meandrové antény. Anténa je tedy modelována na hodnotu 50 + j0 Ω, při frekvenci 867 MHz. Tím by se ověřila vůbec správnost návrhu a vyloučení systematické chyby při práci s programem CST. Anténa byla navržena na substrátu FR4 o tloušťce 1,5 mm. Motiv této antény je uveden na Obr. 19.



Obr. 19: Motiv meandrové antény přizpůsobené na hodnotu 50 Ω

Následně vyrobená anténa byla měřena na vektorovém analyzátoru. Pro tuto anténu není třeba použití navrhovaného přizpůsobovacího členu. Z výsledků na Obr. 20 je vidět, že pro frekvenci 867 MHz je anténa přizpůsobena při simulacích v CST hodnotou činitele odrazu s_{11} -39 dB. Na dané frekvenci byla v CST impedance 50 Ω reálné složky. Následně naměřená hodnota činitele odrazu antény byla -27 dB, ovšem na kmitočtu 847 MHz. Došlo tedy k posunu rezonanční frekvence o 20 MHz. V případě této antény tedy došlo k jistým nesrovnalostem. Při měření impedance na vektorovém analyzátoru se také ukázalo, že hodnota reálné složky se pohybuje opravdu okolo hodnoty 50 Ω, s odchylkou v řádu jednotek Ω. Samozřejmě na frekvenci 847 MHz, která odpovídá minimu činitele odrazu vyrobené antény. Oproti tomu imaginární složka byla prakticky nulová, opět na kmitočtu 847 MHz.

Z obrázku je patrné posunutí rezonančního kmitočtu na hodnotu nižší, než je potřebný rezonanční kmitočet (867 MHz). Řešením by bylo odstranění části motivu antény, tj. zkrácení délky antény. Tím by se posunulo minimum směrem k vyšším kmitočtům. Pro názornost a ukázku toho, že simulace a realita mohou být od sebe odchýleny, jsou uvedeny původní výsledky měření činitele odrazu. Pro meandrovou anténu, která je určena pro přizpůsobení s čipem, se již přistoupilo k ladění (viz další kapitoly).

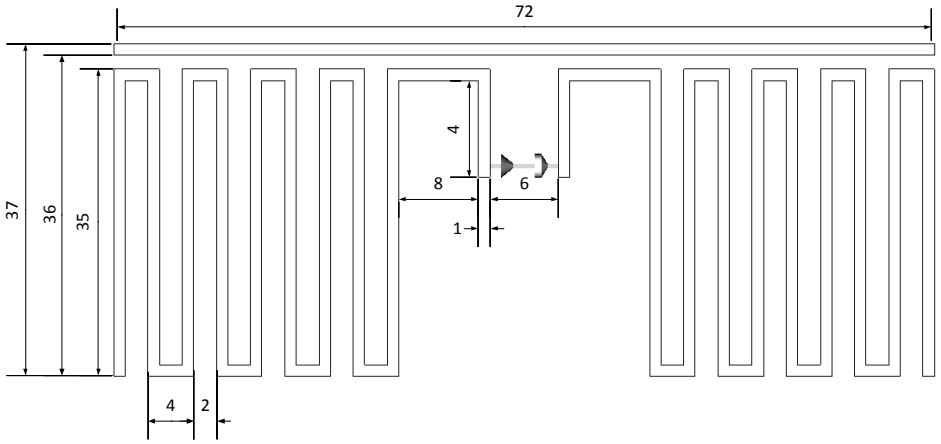


Obr. 20: Přizpůsobení antény pro hodnotu 50 Ω

Základní předpoklad výroby tento antény byl ovšem splněn. Teoreticky simulované výsledky odpovídají výsledkům naměřeným, avšak s určitými odchylkami simulace od reality.

4.1.2 Meandrová anténa s pasivním prvkem

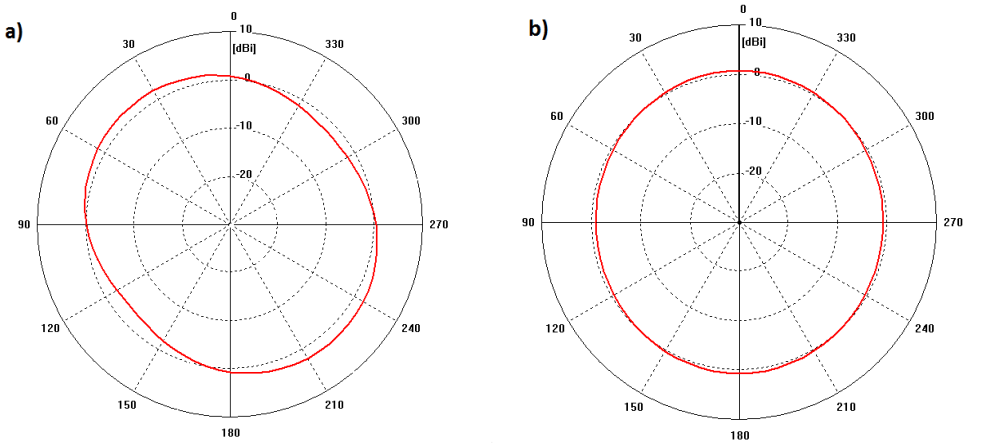
Tato anténa je již navrhována pro přizpůsobení na hodnotu impedance čipu. Její motiv je na Obr. 21. Jde o tvarem podobnou anténu, jako pro přizpůsobení na hodnotu 50 Ω, uvedenou v minulé kapitole. Ovšem u této antény bylo samozřejmě nutné mírně upravit rozměry, aby byla přizpůsobena na hodnotu čipu. Také navíc obsahuje pasivní prvek (mikropásek nad meandrem), který má vliv hlavně na hodnotu přizpůsobení. Jeho vzdálenost od meandru byla při simulacích experimentálně měněna. Její vliv spočívá hlavně v úpravě hodnoty imaginární složky impedance.



Obr. 21: Motiv meandrové antény s pasivním prvkem

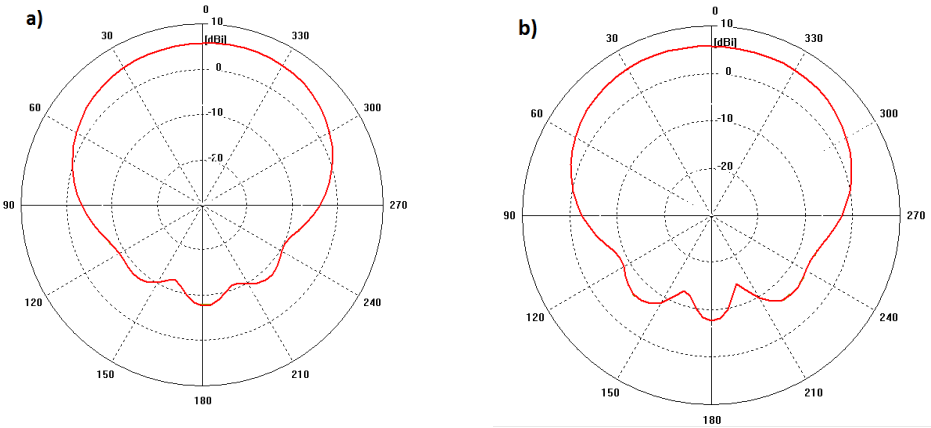
Mezi další zajímavé pozorované jevy při modifikaci motivu antény patří první meandr. Změna jeho rozměrů má zásadní vliv na velikost rezonančního minima. Tímto způsobem je možné změnit rezonanční minimum zpravidla v řádu jednotek, výjimečně i desítek, dB. Naproti tomu výška meandrů má samozřejmě zásadní vliv na rezonanční kmitočet, značně se totiž mění délka antény. Tento parametr je vhodné měnit, pokud je rezonanční kmitočet posunut. Zároveň tento parametr nemá až tak zásadní vliv na hodnotu přizpůsobení. Šířka meandru (tloušťka cesty) není kritická ani pro rezonanční kmitočet ani pro hodnotu přizpůsobení. Stejně tak je tomu pro tloušťku motivu (defaultních 0,035 mm). Toho je využito u prototypové antény, viz dále.

Na Obr. 22 jsou ukázány směrové charakteristiky meandrové antény pro volný prostor, a to jak v horizontální, tak vertikální rovině. Maximální zisk byl stanoven na 2,55 dBi. Jak je vidět z horizontální roviny, anténa září (z pohledu zepředu kolmo na anténu) mírně směrem nahoru. To je dáno nesymetrií antény a pasivním prvkem.



Obr. 22: Vertikální (a) a horizontální (b) charakteristika antény ve volném prostoru

Dále, na Obr. 23, je ukázán vliv umístění meandrové antény na kovovou plochu. Jak vidno, zadní lalok antény je značně potlačen. Pokud by plocha byla dostatečně velká (až do nekonečna), zadní lalok by byl až zcela potlačen.



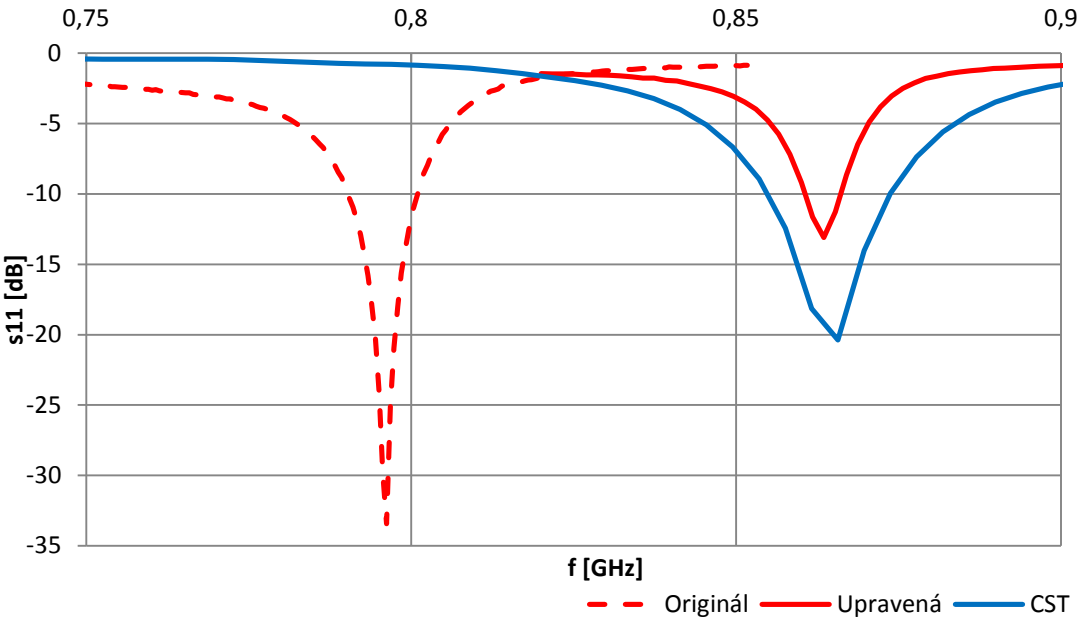
Obr. 23: Vertikální (a) a horizontální (b) směrová charakteristika antény umístěné na kovu

V grafu na Obr. 24 je závislost činitele odrazu na frekvenci pro tři různé případy. Prvním z nich je teoretický výpočet pomocí CST, označený modře. Druhý případ je originál vyrobené antény, který je vyobrazen červeně a čárkovaně. Hodnota jeho přizpůsobení je značně vyšší (-33dB), ovšem zcela mimo požadovaný kmitočet. Proto se přistoupilo k úpravě antény. Tato úprava spočívala v postupném odstraňování motivu antény (směrem od konce antény). Tímto způsobem byla anténa vyladěna až na potřebných 867 MHz. Charakteristika takto upravené antény je označen červeně, nepřerušovaně. Oproti simulovaným výsledkům je činitel odrazu vyšší (změna z -20 na -13 dB).

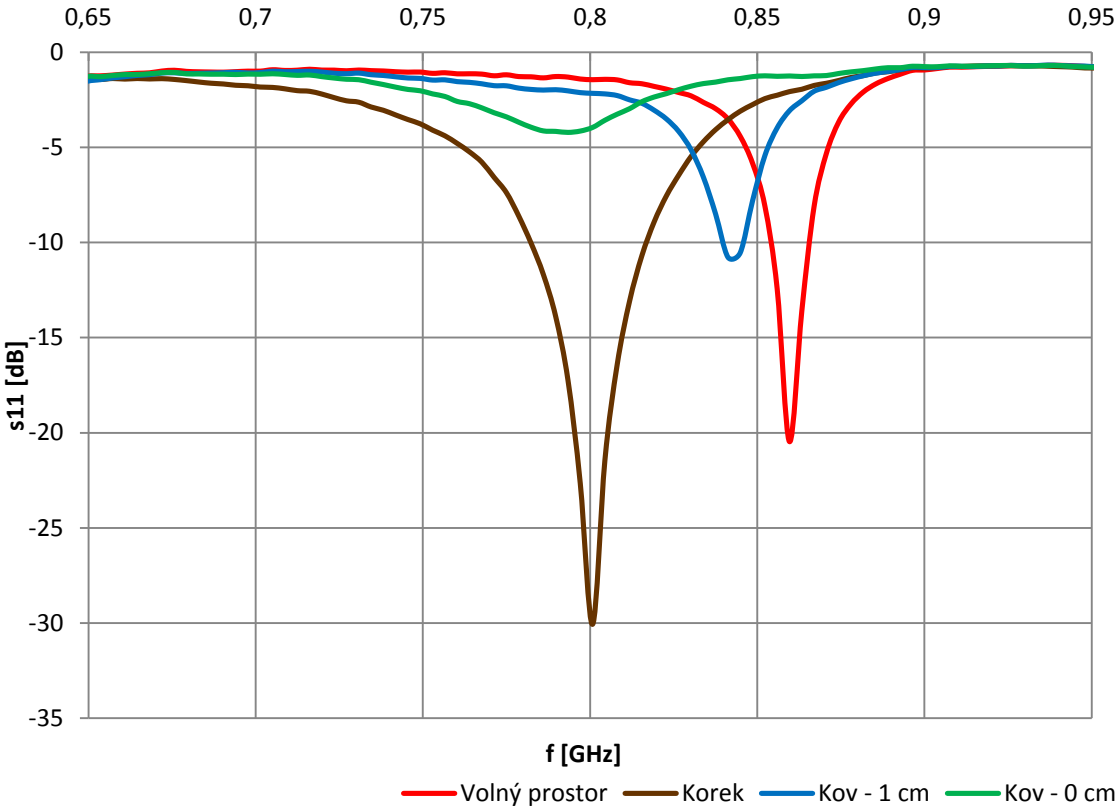
Vyšetření vlivu kovové plochy a dalších vnějších vlivů je v grafu na Obr. 25. Červeně je označena situace, kdy je anténa umístěna ve volném prostoru a nepůsobí na ni žádný zásadní vnější vliv, který by ovlivňoval její parametry či charakteristiky.

Hnědě je vyobrazen vliv dřevěné desky (korku). Anténa byla v tomto případě položena přímo na desku. Tento materiál měl blahodárný vliv na hodnotu přizpůsobení, ovšem za cenu rozladění na nižší frekvence Toho by se dalo využít při návrhu tagu určeného přímo pro tento materiál. Rezonanční kmitočet takové antény by pak ve volném prostoru byl vyšší, než potřebný, ovšem při umístění na určený materiál by se jeho hodnota snížila na potřebných 867 MHz.

Nyní se dostáváme k vlivu kovového materiálu. Jako kovová plocha posloužila tlustá hliníková fólie. Velikost tagu byla oproti rozměrům fólie zanedbatelná. Do vzdálenosti nízkých jednotek centimetrů nemá tato plocha žádný vliv na fungování tagu, ve směru čtečky. Ve vzdálenosti okolo 1 cm dochází ke značnému snížení hodnoty přizpůsobení s_{11} (až na -11 dB) a rozladění o 20 MHz, jak ukazuje modrý průběh. Čtení výsledného tagu je možné, ovšem z minimální vzdálenosti a s náhodnou pravděpodobností. Při umístění přímo na kovovou plochu (zelený průběh) je anténa zcela rozladěna a její vyzařovací schopnost značně potlačena. Čtení tagu je za takových podmínek zcela vyloučeno.

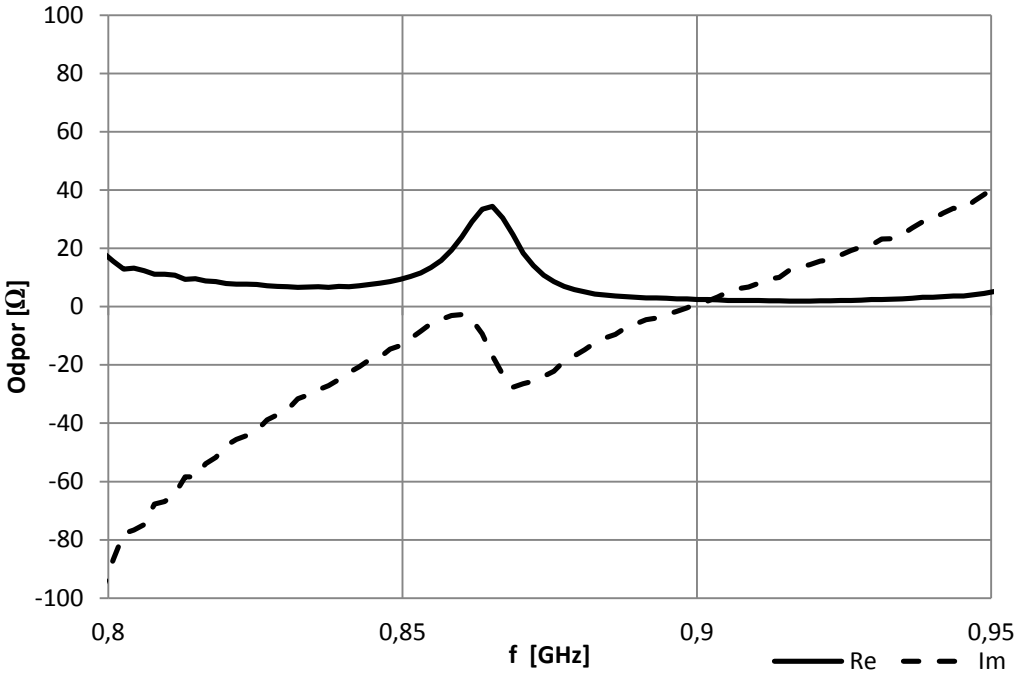


Obr. 24: Naměřené a simulované hodnoty činitele odrazu



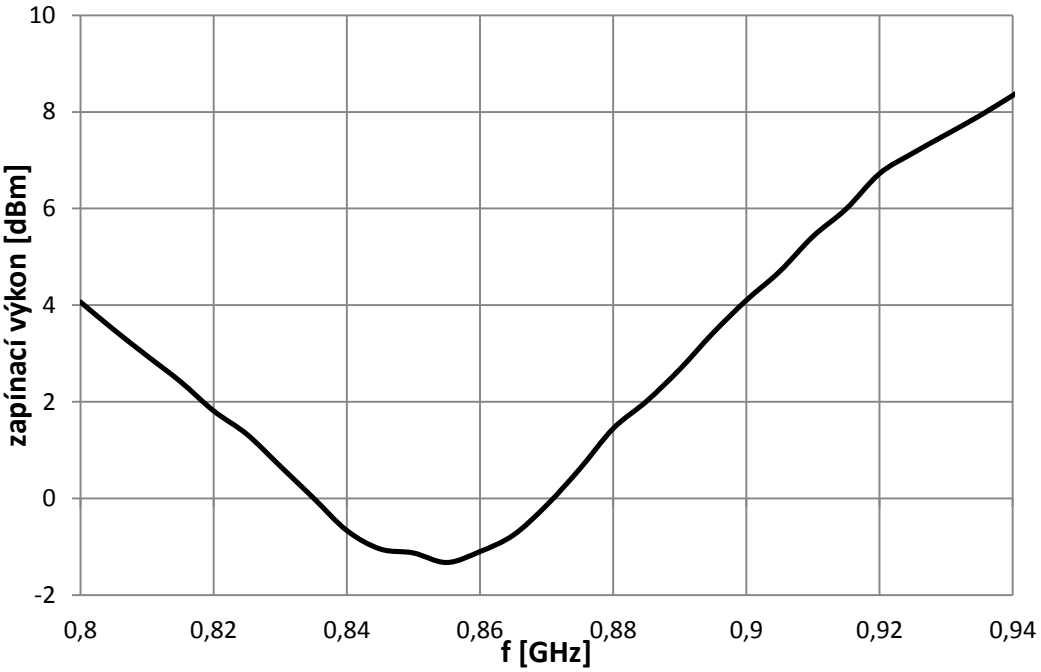
Obr. 25: Srovnání měření vnějších vlivů na anténu

V grafu na Obr. 26 je zobrazena závislost reálné a imaginární složky impedance na frekvenci. Dle teorie – pahýl převede jednu hodnotu impedance na jinou. V tomto případě na 50 Ω reálné složky a 0 Ω imaginární složky. To by mělo platit pro hodnotu na kmitočtu 867 MHz. Z grafu je možné odečíst, že hodnota reálné složky je hodnotě 50 Ω nejbližší na kmitočtu 864 MHz a činí 33,4 Ω. Imaginární složka je nejblíže požadované hodnotě na kmitočtu 858 MHz a činí -j3 Ω. Pahýl tedy není zcela přesně doladěn. Ovšem praktické měření ukázalo, že na očekávaných frekvencích je možné změřit činitel odrazu, který se v praxi potkává se simulacemi. Ilustrativně bylo toto měření provedeno pouze pro tuto jednu vzorovou meandrovou anténu. U dalších antén výsledky okolo požadované frekvence vykazovali podobné hodnoty.

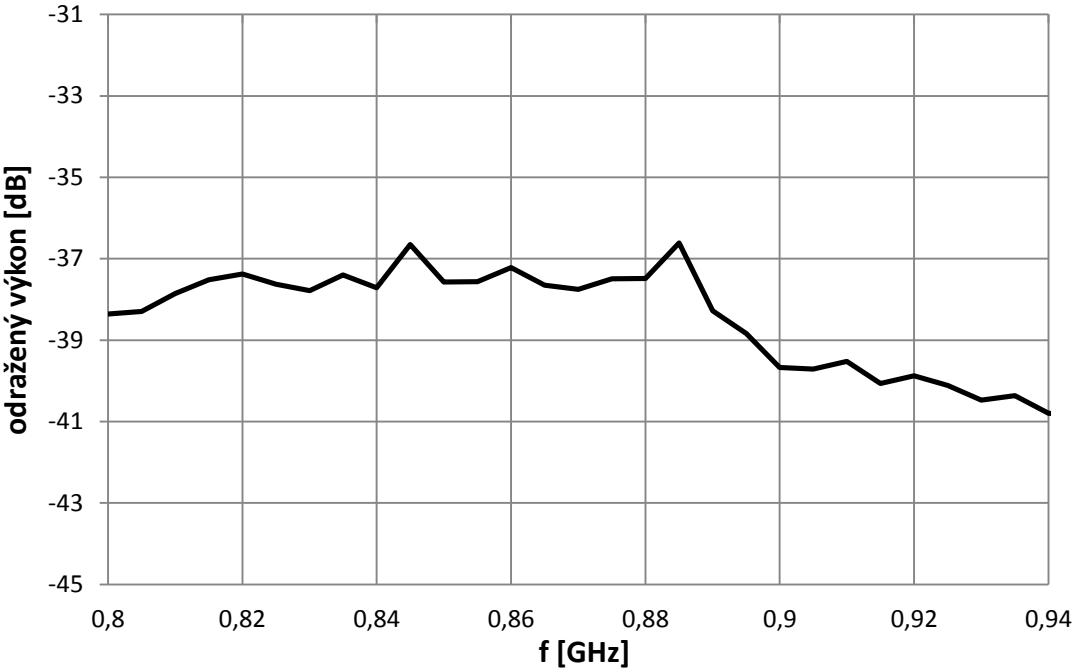


Obr. 26: Naměřená reálná a imaginární hodnota odporu

Na Obr. 27 je závislost minimálního výkonu potřebného pro zanutí tagu vzhledem k frekvenci. Minimum je na frekvenci 850MHz. Výkon potřebný pro zapnutí je relativně vysoký – činí okolo -1dBm. Ovšem tag bylo možné bez problémů číst. Na Obr. 28 je potom minimální potřebný výkon, potřebný pro zapnutí meandrového tagu.



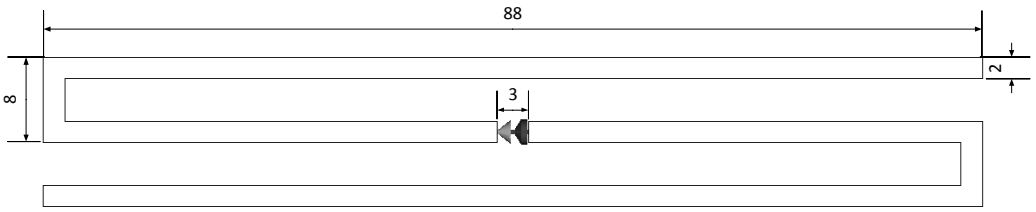
Obr. 27: Výkon nutný pro zapnutí meandrového tagu



Obr. 28: Výkon odražený meandrovým tagem

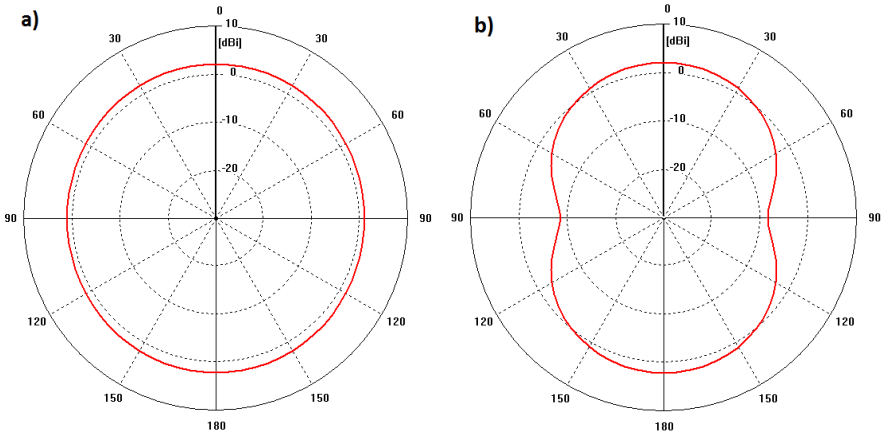
4.1.3 Anténa tvaru S

Jako další vhodná anténa se ukázala meandrová anténa, ovšem pouze s jedním meandrem. Její motiv je na Obr. 29.



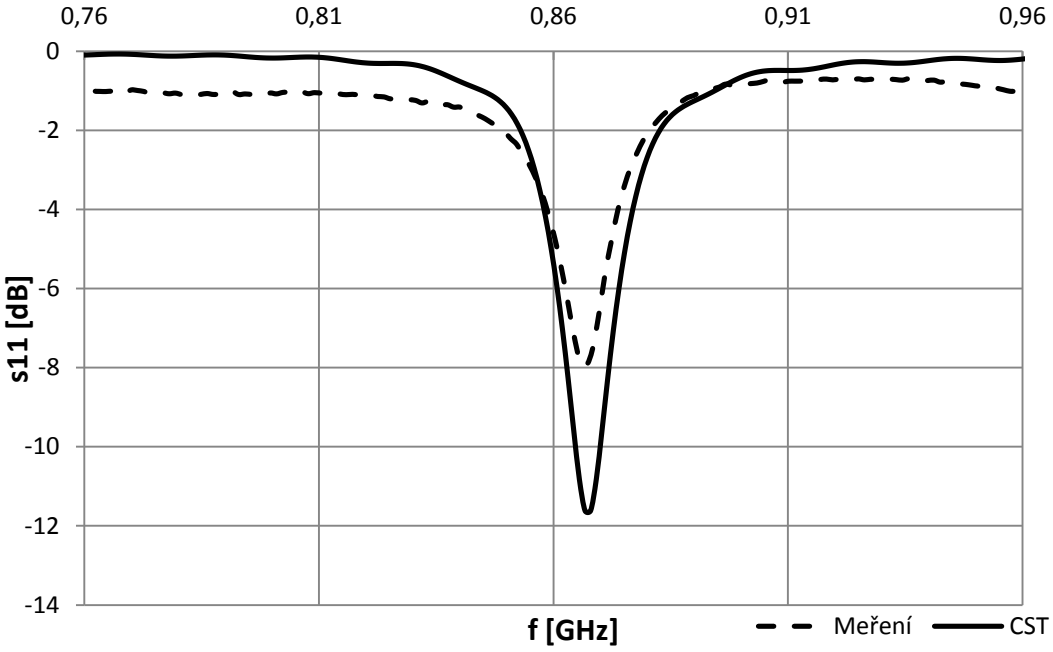
Obr. 29: Motiv meandrové antény

Její rozměr je přibližně 10x2cm. Jak vidno, i meandrová anténa se chová v těchto charakteristikách velmi podobně jako půlvlnný dipól, viz směrové charakteristiky na Obr. 30. Ve vertikální rovině je charakteristika kulová, v horizontální jde o charakteristiku podobnou typické osmičkové charakteristice. Tato anténa nemá reflektor – září tedy na obě strany kolmo k ose – stejně. Zisk antény vztažený k izotropní anténě v tomto případě není velký, je roven 2,19dBi.



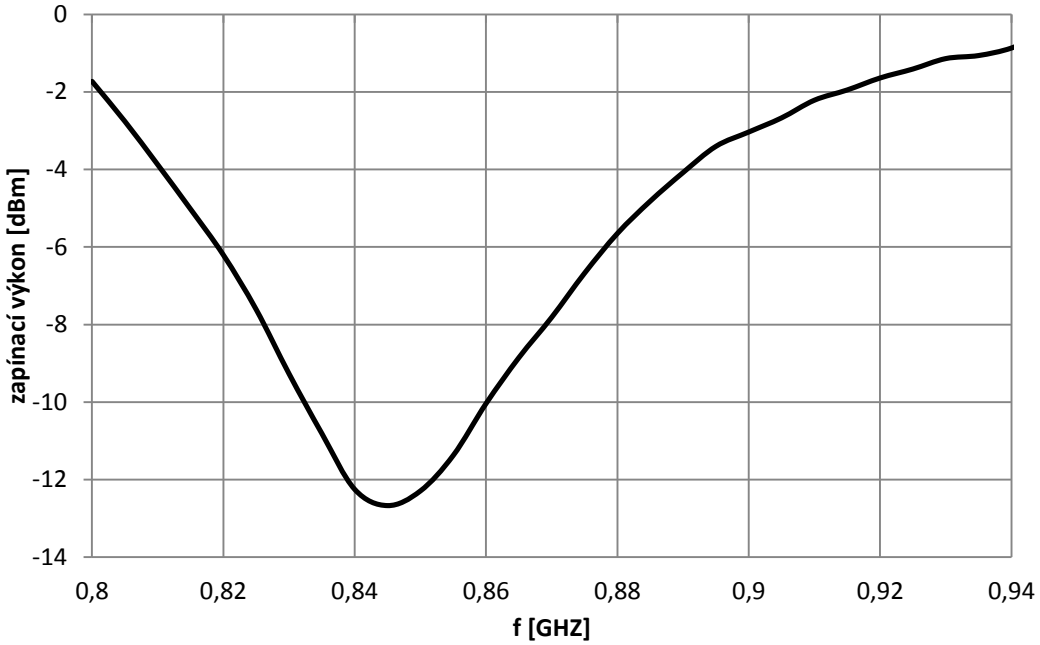
Obr. 30: Směrová charakteristika S-antény ve vertikální (a) a horizontální (b) rovině

Závislost činitele odrazu na frekvenci a její srovnání simulace s měřením pro S anténu je na Obr. 31. Zde se rezonanční frekvence prakticky shodovaly, jediný rozdíl je ve velikosti s_{11}. Při měření byla hodnota přibližně o 4dB horší, než poukazovalo CST.



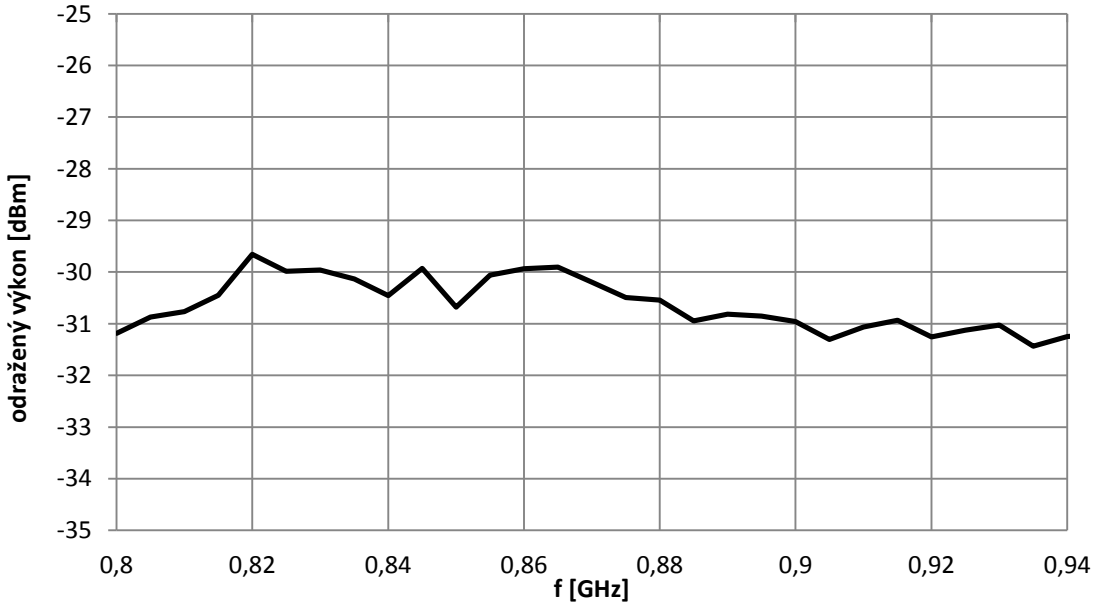
Obr. 31: Závislost činitele odrazu na frekvenci

V grafu na Obr. 32 je průběh závislosti minimální energie, které je potřebná pro zapnutí tagu na frekvenci. Jak vidno, minimální energie potřebná pro zapnutí tagu je při frekvenci 842MHz. Dle tohoto měření tag tedy není zcela přesně naladěn. Pro jeho akurátní funkci by bylo nutné jeho ramena ještě opět mírně upravit, ač výsledky měření činitele s_{11} nic takového nenaznačují. Hodnota minimálního výkonu je však dobrá, ve zmíněném minimu tagu stačí -13dBm pro zapnutí. Tato anténa v tomto parametru snese srovnání s komerčně vyráběnými tagy.



Obr. 32: Výkon nutný pro zapnutí tagu

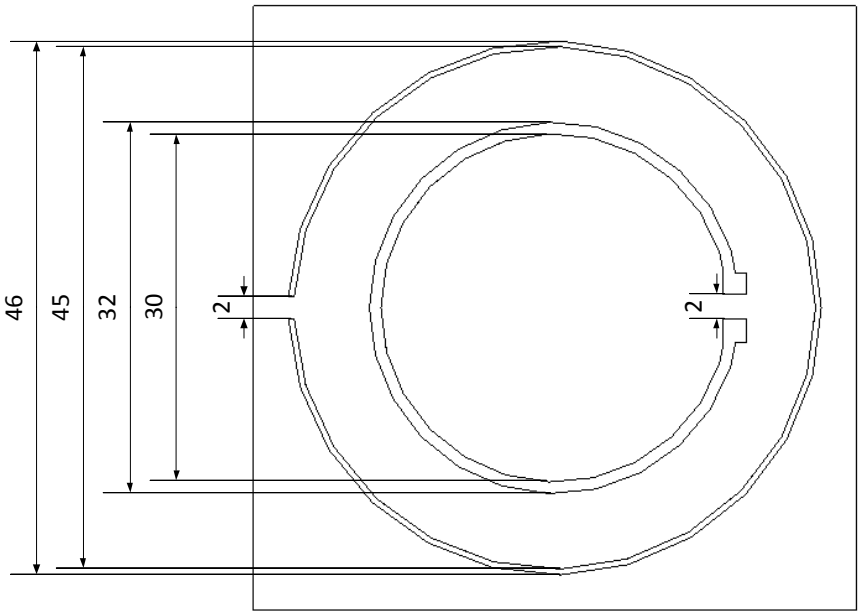
Na Obr. 33 je ukázána závislost odražené energie tagu na frekvenci. Ta je v celém pásmu téměř konstantní – a to okolo hodnoty 30,5dBm. I zde je tato hodnota srovnatelná s tagy běžně vyráběnými.



Obr. 33: Výkon odražený tagem

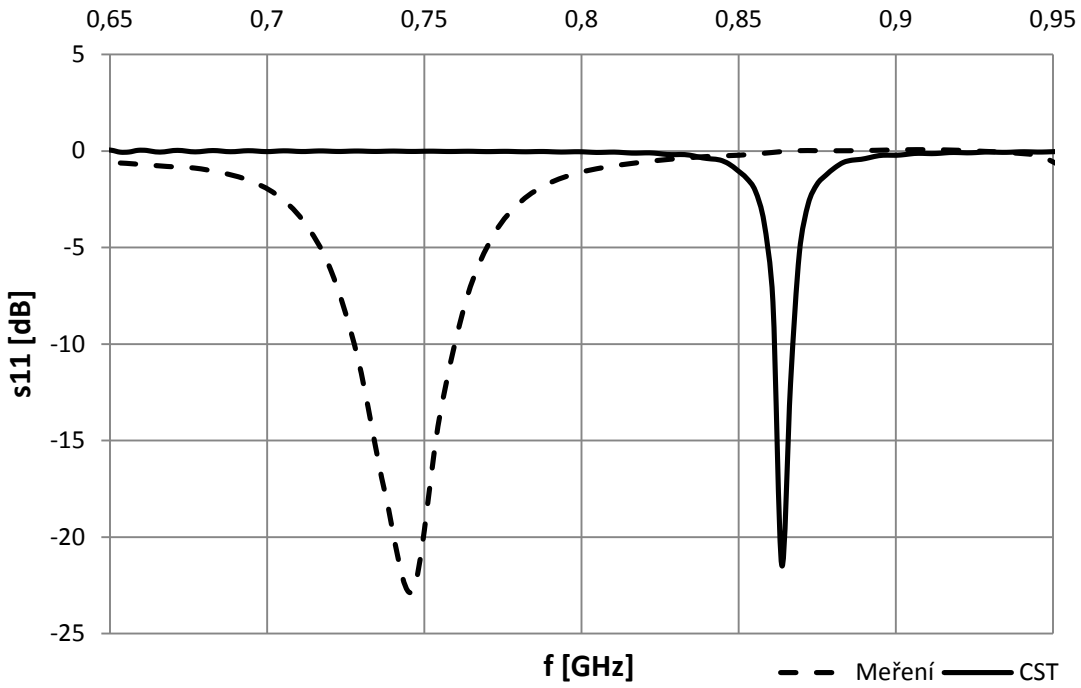
4.1.4 Dvoukruhová anténa

Ramena této antény jsou stočena do kruhu. V tomto návrhu se inspirací vycházelo z antény složenou ze dvou soustředných kruhů. Vnitřní kruh v tomto případě slouží jako napájecí část, obsahující čip. Druhý, vnější kruh, slouží jako vyzařovací část. Dokonce se během návrhu ukázalo, že i parametry jediného kruhu jsou velmi dobré, v některých ohledech dokonce předčící původní myšlenku. A to ačkoliv již anténa nepracovala na principu vzájemné indukčnosti obou soustředných kruhů. Nakonec se však zůstalo u původní myšlenky a výsledkem je dvoukruhová anténa, jak je vidět na Obr. 34. Protékáním proudu ve smyčce proti směru hodinových ručiček vzniká magnetické pole, které uvnitř kruhu prochází směrem k pozorovateli. Naopak ve vnější části kruhu směrem od pozorovatele. Tato anténa má velmi malé rozměry, je tedy ideální pro umístění na malých objektech. [12] [13]



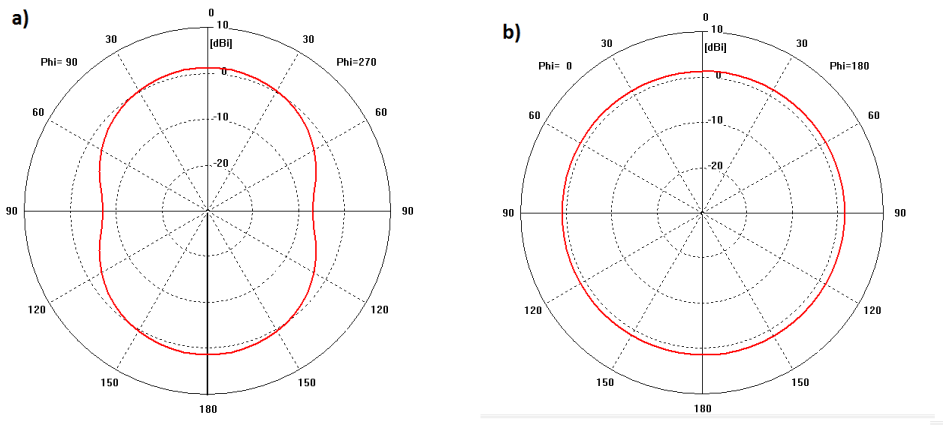
Obr. 34: Motiv antény

Jak vidno na Obr. 35, oproti simulacím v CST jsou naměřené výsledky značně odlišné. Laditelnost této antény je však u vyrobené antény obtížná, neboť rezonanční kmitočet závisí převážně na poloměru, resp. průměru obou soustředných kružnic. Úprava, kdy částečně odstraníme motiv antény, bohužel není proveditelná.



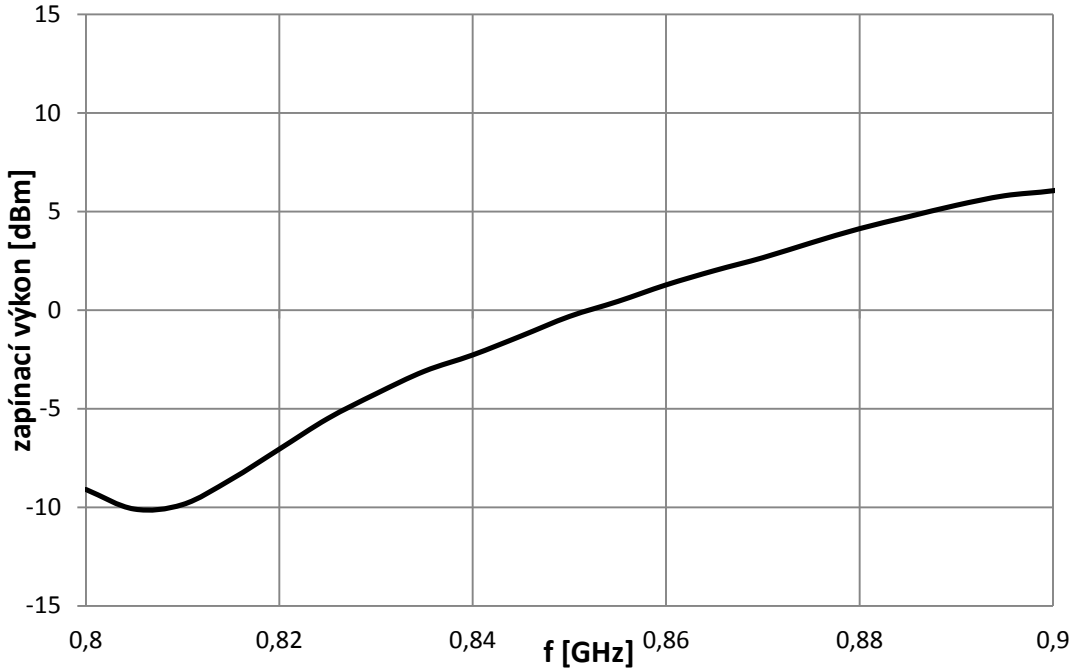
Obr. 35: Závislost činitele odrazu na frekvenci

Směrové charakteristiky jsou podobné předchozím anténám. Maximální zisk byl v tomto případě pouze 1,43 dBi.



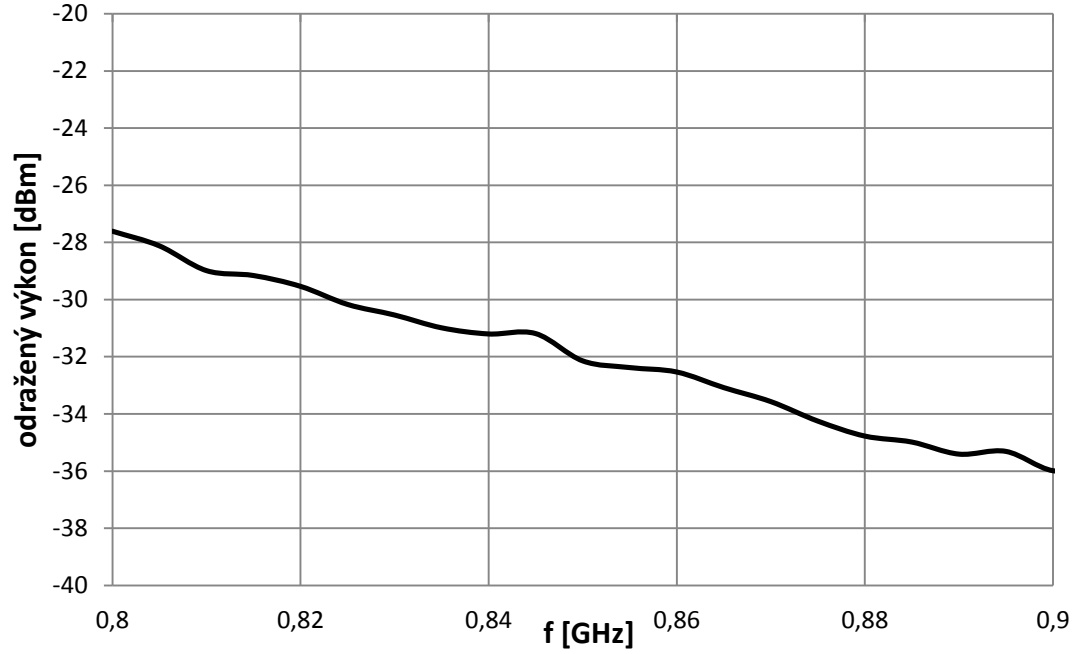
Obr. 36: Směrová charakteristika kruhové antény ve vertikální (a) a horizontální (b) rovině

Jak už bylo řečeno, tato anténa se po vyrobení ladí velmi obtížně. Proto je nejnižší zapínací výkon posunut směrem k nižším frekvencím. Minimální výkon, potřebný pro zapnutí tagu je tedy -10 dBm a to na frekvenci 0,81, jak vidno na Obr. 37. I přesto bylo běžné čtení tagu možné, ovšem při vyladění by se samozřejmě zvýšila pravděpodobnost správného přečtení a zvýšila by se i čtecí vzdálenost.



Obr. 37: Výkon nutný pro zapnutí tagu

Minimálnímu výkonu potřebného pro čtení tagu odpovídá i charakteristika výkonu odraženého tagem, jak je uvedeno na Obr. 38. Pro nejnižší možné měřitelné frekvence je výkon odražený tagem největší. Tato se pak hodnota postupně snižuje – zvětšuje se odchylka vzájemného přizpůsobení čipu a antény.



Obr. 38: Výkon odražený tagem

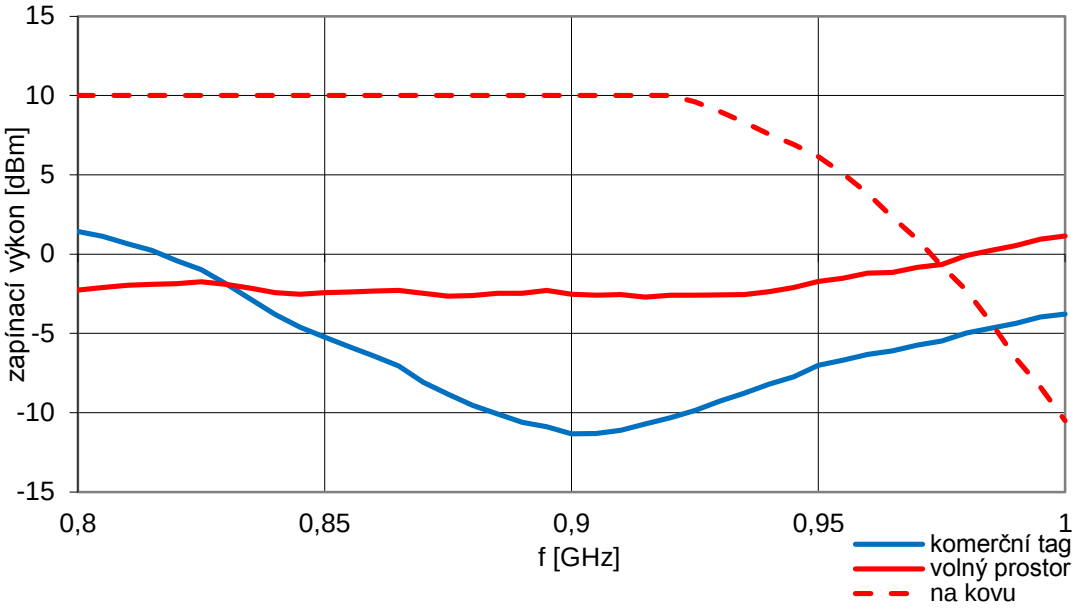
4.1.5 Prototypová anténa

Poslední anténa vznikly z nápadu na experimentální pokus, převedení nabitých znalostí do praxe. Šlo by o tag, který by se dal používat i za běžných podmínek, např. v logistice. Zároveň byl stanoven požadavek v tom, aby byl vyroben z dostupných a pokud možno co nejlevnějších materiálů. Vycházelo se z již zmíněné antény tvaru S. Anténa byla vyrobena z měděných pásků o tloušťce 0,1 mm. Tloušťka měděné vrstvy (0,035 mm oproti 0,1 mm) nemá přílišný vliv na vlastnosti antény (ovlivňuje spíše přizpůsobení, než naladěnou frekvenci). I ostatní rozměry však byly změněny, podle simulace v programu CST.

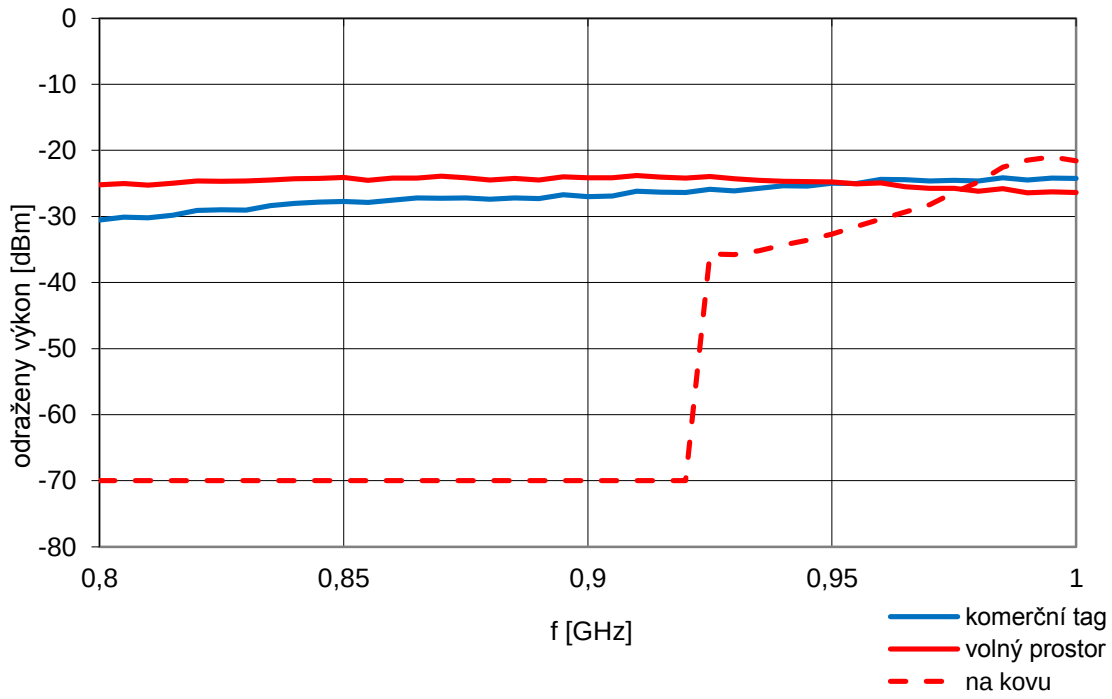
Následně tyto pásky byly spájeny dohromady, jak je vidět na ilustrační fotografii v příloze. Posléze se měřením na vektorovém analyzátoru rozměry doladily tak, aby anténa byla pokud možno přizpůsobena na 867 MHz. Vznikl tak funkční prototyp antény tvaru S. Přičemž podklad pro antény již netvořil substrát, ale lepenkový papír. Ten byl v CST nahrazen dvěma vrstvami tenčího papíru a mezi nimi byla vzduchová mezera. Zkouška probíhala při měření i se simulacemi jak s lepenkou, tak bez lepenky. Bylo zjištěno, že na tuto konkrétní anténu má minimální vliv a lze ho tedy zanedbat.

Tato anténa pracuje tedy velmi dobře ve volném prostoru, resp. na lepenkové krabici. To lze vidět z měření minimálního potřebného výkonu pro zapnutí (Obr. 39). Plnou červenou čarou je označen prototypový tag, který prakticky v celém UHF RFID pásmu potřebuje pro své zapnutí -2dBm. To sice není příliš nízká hodnota, ovšem pro běžné čtení bohatě stačí a tag to vynahrazuje svojí použitelností pro různá pásma. Přerušovanou čarou je označeno srovnání, pokud by byl tag umístěn na kovové ploše. Do 920 MHz je zcela nečitelný – vysílací výkon je omezen na hodnotu 10 dBm. Potom jeho výkon potřebný pro zapnutí prudce klesá. Bohužel minimum výkonu potřebného pro zapnutí tagu se nepodařilo zjistit, nachází se mimo měřící rozsah. Pokus o doladění tohoto tagu určeného pro kovové plochy se bohužel nezdařil, zkracováním antény se zhoršily její další parametry a tag nebyl měřitelný. Modře je v grafu označen komerčně vyráběný tag.

Odpovídající graf odražených výkonů tagů je na Obr. 40. Pro komerční tag a vyrobený tag bez reflektoru je hodnota odraženého výkonu velmi příznivá, pohybujíc se okolo hodnota -25 až -30 dBm. Při umístění na kovu je situace složitější – do frekvence 920 MHz tag neodpovídal, ovšem při vyšších frekvencích již byla jeho funkce bezproblémová.



Obr. 39: Srovnání zapínacích výkonů u prototypové antény



Obr. 40: Srovnání odražených výkonů tagů pro prototypovou anténu

4.2 Měření čtecí vzdálenosti tagů

Měření čtecí vzdálenosti probíhalo pouze orientačně. Nebylo možné vyloučit vliv objektů v místnosti a pohyb měřící osoby. Měření probíhalo za dvou podmínek – ve volném prostoru a na kovové ploše. Pro měření byla použita zmíněná čtečka Metra RFI21.1. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 2. Jak vidno, čtecí vzdálenost se při umístění tagu na kovovou plochu výrazně snižuje.

označení tagu	čtecí vzdálenost ve volném prostoru [cm]	čtecí vzdálenost na kovové ploše [cm]
meandr s pasivním prvkem	80	5
Anténa S	105	10
Dvoukruhová anténa	55	0
Prototypová anténa	90	50
Komerční tag	300	5

Tab. 2: Srovnání čtecích vzdáleností jednotlivých tagů

4.3 Shrnutí dosažených výsledků měření a vlivů materiálů

V souhrnu budeme postupovat od nejhorších případů rozladění a snížení čtecí vzdálenosti k nejmenším změnám pro funkci tagu.

Klíčový vliv kovového materiálu je tedy následující. Pokud tag není zamýšlen a vyroben konkrétně pro umístění na kovovém předmětu, dochází u něj ke značnému rozladění, což má za následek snížení čtecí vzdálenosti. Zpravidla však dojde k úplnému potlačení funkce tagu, tag potom vůbec není schopen odpovědět. Veškerá energie se pohltí kovovým materiálem. Čtecí vzdálenost je prakticky nulová.

Jednou možností řešení je umístění tagu co nejdále od kovového předmětu, což je ovšem zpravidla těžko realizovatelné. V odvětví logistiky se nabízí papír, polystyren a další materiály o nízké permitivitě. Ty by sloužili jako pro oddělení tagu od kovové plochy. Čím bude relativní permitivita oddělovacího materiálu nižší, tím více je možné uvažovat, že se tag nachází ve volném prostoru. Druhou možností je, aby tag určený pro fungování na kovovém materiálu sám o sobě obsahoval reflektor. Kovový předmět, na kterém je tag umístěn, totiž pak funguje jako další, přídavný, reflektor. Vlivy na tag jsou tak značně zmírněny. Čtecí vzdálenost tolik neutrpí.

Pokud vezmeme v potaz další materiály, například vodu v plastikové láhvi. Situace je obdobná jako u kovových předmětů. Dochází k téměř úplnému utlumení odraženého signálu, čtecí vzdálenost je prakticky nulová.

Jak už bylo řečeno, je výhodné použít materiály o nízké permitivitě jako oddělení od kovové plochy. Pokud tady bude tag umístěn na materiálech s nízkým ε_r, není problém s jejich funkcí. Vliv na vyzařování je sice patrný, avšak ne tak omezující jako u kovů.

5 ZÁVĚR

V první části této práce je popsáno krátké seznámení s technologií RFID – rádiové frekvenční identifikace. Shrnuje praktické použití, výhody a nevýhody principu RFID čtečka/tag. Je popsáno rozdělení tagů podle různých parametrů, např. podle frekvenčního pásma (se zaměřením na UHF pásmo). To je výhodné v maximální dosažitelné vzdálenosti v řádu metrů a relativně nízké frekvenci, která stále nemá problém s pronikáním signálu přes některé materiály. Dalším parametrem je typ tagu, v našem případě pasivní. Jeho výhoda spočívá v tom, že není nutný jakýkoliv zdroj napájení tagu, což aktivní tag neumožňuje. Je to ovšem vykoupeno nižší čtecí vzdáleností. Posledním velmi důležitým parametrem je čtecí vzdálenost, která je naprosto zásadní pro tuto technologii.

Dále je popsána výroba přizpůsobení, které bylo potřebné pro měření parametru antén tagů – činitele přizpůsobení s_{11}. Ze dvou navrhovaných řešení mikropáskového a koaxiálního pahýlu bylo vybráno přizpůsobení pomocí koaxiálního pahýlu. Toto řešení se ukázalo jako spolehlivé a funkční.

V další části práce je popsán návrh antén v simulační program CST Microwave studio - jak CST přistupuje k řešení problému, specifika návrhu RFID antén v CST. Následně byly antény simulovány a zjišťovány jejich parametry – hodnota činitele odrazu při dané frekvenci (základním předpokladem je pracovní kmitočet v UHF pásmu, v našem případě 867MHz), směrové charakteristiky, zisk antény, impedance antény na různých kmitočtech. A to jak pro volný prostor, tak pro umístění na kovových plochách a jiných materiálech.

V poslední části byly antény prakticky vyrobeny a spojeny s čipem, vznikl tak plnohodnotný tag. Parametry těchto simulovaných a vyrobených antén, resp. tagů se následně, pokud to bylo možné, prakticky srovnávaly s naměřenými hodnotami. Jednalo se o činitel odrazu - při měření činitele odrazu se muselo zpravidla přistoupit k doladění antény, kvůli odchylkám simulací a reality. Tuto neshodu bylo možné zpravidla kompenzovat částečným, postupným odstraňováním motivu antény. To je samozřejmě možné provádět pouze tehdy, je-li anténa naladěna níže, než je ve výsledku potřeba. Dále se měřil také minimální výkon potřebný pro zapnutí tagu a odražený výkon tagu. Některé tagy v těchto parametrech snesou srovnání i s běžně vyráběnými komerčními tagy. Měřena také byla čtecí vzdálenost. Pro vytvořené tagy se podařilo dosáhnout maximální čtecí vzdálenosti okolo 1,5 metru. Pro spolehlivé čtení byla tato hodnota 1 metr. Všechny tyto parametry jsou klíčové pro správnou funkci tagu. Vyšetření těchto parametrů proběhlo jak pro volný prostor, tak pro umístění na různých, hlavně kovových, materiálech. Celkové shrnutí je uvedeno v kapitole výše. Základním poznatkem však je, že tag, který není primárně určen pro použití na kovovém předmětu, funguje velmi špatně, případně zpravidla je zcela znemožněna jeho činnost. Jeho čtecí vzdálenost je tak prakticky nulová. Je proto nutné přistoupit k jistým opatřením, taktéž uvedeným výše.

Z výsledků měření vyplývá, že v případě antény tvaru S se simulované charakteristiky a chování nejvíce podobají reálným změřeným hodnotám. V ideálním případě je činitel odrazu tohoto tagu -8,5 dB, zapínací výkon -12,5 dBm, odražený výkon -30 dBm. Tato anténa se svými parametry blíží nejvíce komerčním tagům.

LITERATURA

[1] FINKENZELLER, Klaus. *RFID Handbook – Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, Wiley, 2003.

[2] LEHPAMER, Harvey. *RFID Design Principles*, Artech House, 2008.

[3] DOBKIN, Daniel. *The RF in RFID – Passive UHF RFID in Practice*, Elsevier, 2008.

[4] RAO K. V. S.; NITKIN P. V.; LAM S. F. *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.

[5] RAO K. V. S.; NITKIN P. V.; LAM S. F. *Low Cost Silver Ink RFID Antennas*

[6] NOVÁČEK, Zdeněk. Elektromagnetické vlny, antény a vedení Přednášky. Skriptum FEI VUT Brno. MJ servis, s.r.o., Brno, 2001.

[7] MARROCCO, Gaetano. *The Art of UHF RFID Antenna Design: Impedance-Matching and Size-Reduction Techniques*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation

[8] BOLIĆ, M.; SIMPLOT-RYL, D.; STOJMENOVIĆ, I. *RFID Systems – Research Trends and Challenges*, Wiley, 2010.

[9] NXP Semiconductors. [online]. [cit. 2011-12-30]. Dostupné z: www.nxp.com

[10] CST STUDIO SUITE™ Help [online]

[11] CISC SEMICONDUCTOR. RFID Xplorer [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: https://www.cisc.at/products/rfid-xplorer/

[12] IM, Yun-Taek, Jea-Hee KIM a Wee-Sang PARK. Matching Techniques for Miniaturized UHF RFID Loop Antennas. s. 5.

[13] LIM, Sang-Ho, Young-Cheol OH, Ho LIM, Young-Seung LEE a Noh-Hoon MYUNG. Analysis and design a UHF RFID tag antenna with a Split Ring Resonator. s. 4.

[14] Datasheet IC SL3S3001. [online]. s. 9 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/short_data_sheet/SFS069730.pdf

[15] Datasheet pro SL3ICS1002 a 1202. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/short_data_sheet/SL3ICS1002_1202_SDS_157335.pdf

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

C	činitel vazby mezi čtečkou a tagem
CST	simulační program CST Microwave studio
CMOS	technologie obvodů kov-oxid-polovodič
CRC	cyklický redundantní součet
ε_r	relativní permitivita
EEPROM	elektricky mazatelná paměť
EPC	jednoznačný unikátní kód produktu
EIRP	efektivní izotropně vyzářený výkon
ERP	efektivní vyzářený výkon
FR4	materiál substrátu
FET	polem řízený tranzistor
G_{reader}	zisk antény čtečky
G_{tag}	zisk antény tagu
HF	vysoká frekvence - pásmo 3 až 30MHz
LF	nízká frekvence - pásmo 30 až 300kHz
RFID	identifikace na rádiové frekvenci
$P_{TX,reader}$	vysílací výkon čtečky
$P_{TX,tag}$	vysílací výkon tagu
P_{th}	minimální výkon potřebný pro napájení tagu
R	odpor
r	vzdálenost čtečky a tagu
RG58	typ koaxiálního kabelu
T	výkonový přenosový koeficient
UHF	velmi vysoká frekvence - pásmo 300MHz až 3GHz
Z	impedance
λ	vlnová délka
ρ	hodnota impedančního přizpůsobení

SEZNAM PŘÍLOH

A PŘÍLOHA **43**

A.1 Charakteristiky čipu 43

A.2 Fotografie tagů 44

A.3 Fotografie pahýlů 45

A PŘÍLOHA

A.1 Charakteristiky čipu

Wafer characteristics

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Interface characteristics						
P_{tot}	total power dissipation			-	30	mW
f_{oper}	operating frequency		840	-	960	MHz
P_{min}	minimum operating power supply	[1][2]	-	-15	-	dBm
C_i	input capacitance (parallel)	[3]	-	0.88	-	pF
Q	quality factor (Im (Z_{chip}) / Re (Z_{chip}))	[3]	-	9	-	-
Z	impedance (915 MHz)		-	22 - j195	-	Ω
-	modulated jammer suppression ≥1.0 MHz	[4]	-	- 4	-	dB
-	unmodulated jammer suppression ≥1.0 MHz	[4]	-	- 4	-	dB

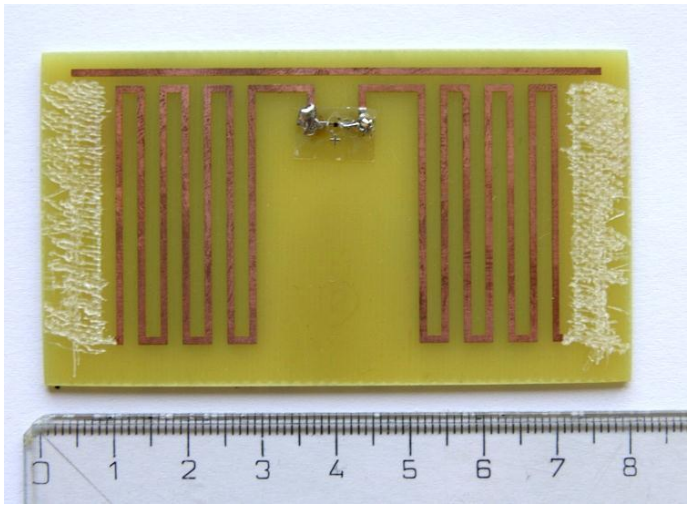
[1] Power to process a Query command

[2] Measured with a 50 Ω source impedance

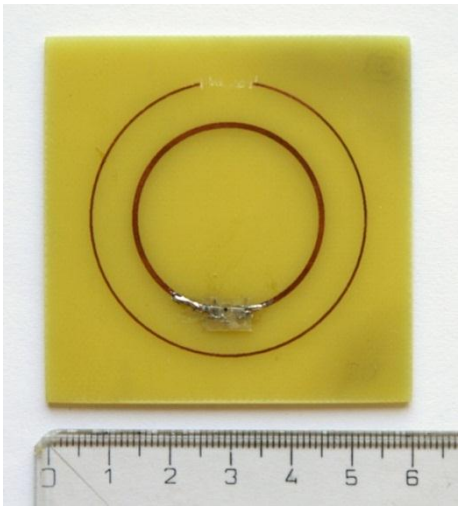
[3] At minimum operating power

[4] Values measured for a 40 kHz phase reserval command under matched conditions

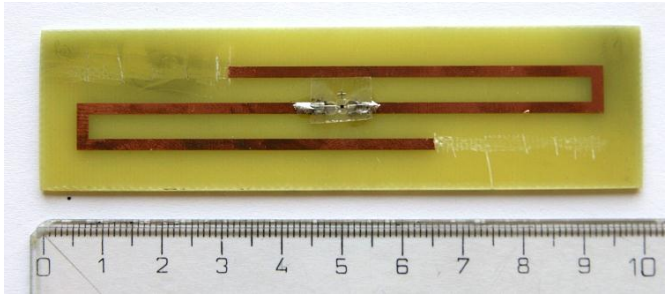
A.2 Fotografie tagů



Meandrová anténa s pasivním prvkem



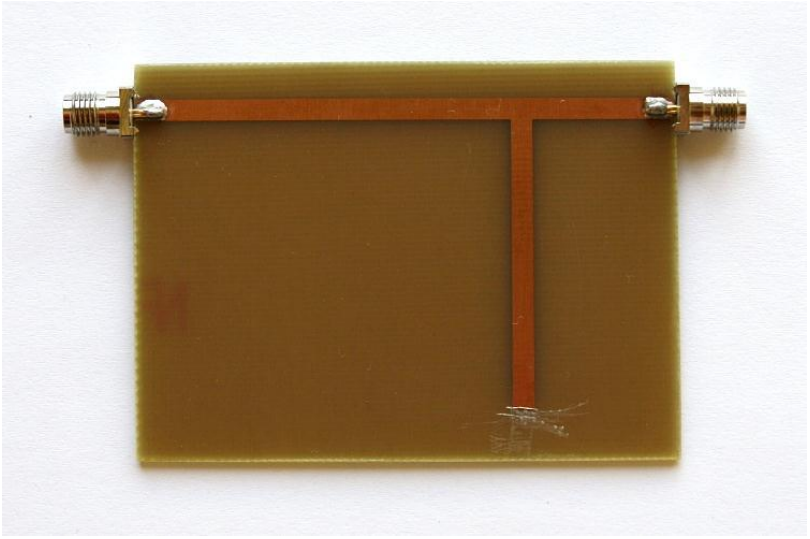
Dvoukruhová anténa



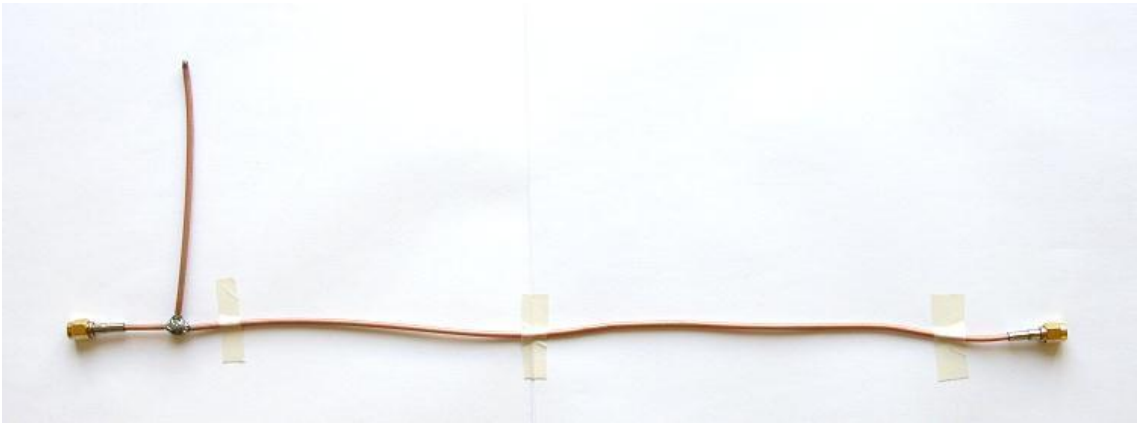
Anténa tvaru S

Prototypová anténa

A.3 Fotografie pahýlů



Mikropáskový pahýl



Pahýl z úseků vedení