



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VÍCEPÁSMOVÉ VYŠÍVANÉ ANTÉNY

MULTIBAND EMBROIDERED ANTENNAS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Fraj

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2017



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Lukáš Fraj

ID: 162124

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Vícepásmové vyšívání antény

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s vyšíváním dipólovou anténou popsanou ve [1]. Funkčnost antény ověřte počítačovou simulací ve volném prostoru a v blízkosti živé tkáně. Anténu optimalizujte pro kmitočtová pásma, používaná pro mobilní komunikaci.

Optimalizovanou anténu vyrobte ze samolepící měděné fólie (jako referenční strukturu) a vyšíváním vodivou nití. Vlastnosti vyrobených antén vzájemně porovnejte z hlediska impedančních vlastností, směrových vlastností a účinnosti při použití na různých částech těla.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, C.A. Antenna Theory, Analysis and Design, 3/E, Hoboken: J. Wiley and Sons, 2005.

[2] WANG, Z., LEE, L.Z., PSYCHOUDAKIS, D., VOLAKIS, J.L. Embroidered multiband body-worn antenna for GSM/PCS/WLAN communications, IEEE Transactions on Antennas and Communication, 2014, vol. 62, no. 6, p. 3321-3329.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 30.5.2017

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vyšívanou dipólovou vícepásmovou anténou popsanou v doporučené literatuře. V programu ANSYS HFSS byly vytvořeny numerické modely antény, pracující v pásmech GSM 900 MHz, PCS 1900 MHz a WLAN 2450 MHz. V práci je porovnána simulace antény ve volném prostoru a v blízkosti lidského těla, interpretovaného numerickým modelem. Následně byla optimalizována anténa na 900 MHz, vyrobena a změřena. Všechny dosažené výsledky jsou porovnány s předlohou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vícepásmová anténa, měření odrazu, vliv blízkosti lidského těla, modelování antény

ABSTRACT

This thesis is deals with the embroidered dipole multiband antenna described in literature Numerical models of the antenna, operating at GSM 900 MHz, PCS 1900 MHz and WLAN 2450 MHz bands, were simulated using finite-element ANSYS HFSS software. Simulations of this antenna in the free space and near the human body, interpreted by numerical model, are compared with each other. Afterwards the antenna was optimized for 900 MHz, fabricated and measured. All achieved results are mutually compared.

KEYWORDS

Multiband antenna, measuring the return loss, influence of the human body, designing an antenna

FRAJ, L. *Vícepásmové vyšíváné antény*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 26 s., 1 s. příloh. Semestrální práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Prohlašuji, že svoji semestrální práci na téma Vícepásmové vyšívání antény jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu semestrální práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé semestrální práce.

OBSAH

| | |
|----------------------------------------------|-------------|
| Seznam obrázků | vi |
| Seznam tabulek | viii |
| Úvod | 1 |
| 1 Charakterizace předlohy | 2 |
| 2 Ověření předlohy | 3 |
| 2.1 Parametry antény | 3 |
| 2.2 Model antény v HFSS | 4 |
| 3 Simulace | 5 |
| 3.1 Simulace ve volném prostoru | 5 |
| 3.1.1 Rozložení proudů | 7 |
| 3.2 Simulace na lidské tkáni | 8 |
| 3.2.1 Rozložení proudů | 10 |
| 4 Optimalizace antény | 11 |
| 4.1 Parametry optimalizované antény | 12 |
| 4.2 Model optimalizované antény v HFSS | 12 |
| 4.3 Výpočty | 13 |
| 5 Simulace optimalizované antény | 14 |
| 5.1 Simulace ve volném prostoru | 14 |
| 5.1.1 Rozložení proudů | 15 |
| 5.1.2 Směrové charakteristiky | 16 |
| 5.2 Simulace na lidské tkáni | 18 |
| 5.2.1 Rozložení proudů | 19 |
| 5.2.2 Směrové charakteristiky | 19 |
| 6 Výsledky měření | 20 |
| 7 Závěr | 23 |
| Literatura | 24 |

| | |
|-----------------------------------------|-----------|
| Seznam symbolů, veličin a zkratk | 25 |
| Seznam příloh | 26 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1.1 | <i>Vyšíváný nesymetrický dipól a jeho parametry. Převzato z [1].</i> | 2 |
| Obrázek 1.2 | <i>Vyšíváný nesymetrický dipól na modelu lidské tkáně (vlevo). Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény v závislosti na vzdálenosti antény od fantomu(vpravo). Převzato z [1].</i> | 2 |
| Obrázek 2.1 | <i>Model antény v HFSS ve volném prostoru</i> | 4 |
| Obrázek 2.2 | <i>Detail ohybu středního vodiče koaxiálního vedení</i> | 5 |
| Obrázek 3.1 | <i>Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény ve volném prostoru.</i> | 6 |
| Obrázek 3.2 | <i>Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény ve volném prostoru. Převzato z [1].</i> | 6 |
| Obrázek 3.3 | <i>Rozložení proudů na povrchu antény ve volném prostoru, kmitočet 900 MHz, Vlevo: vlastní model. Vpravo: převzato z [1].</i> | 7 |
| Obrázek 3.4 | <i>Rozložení proudů na povrchu antény ve volném prostoru, kmitočet 1900 MHz, Vlevo: vlastní model. Vpravo: převzato z [1].</i> | 7 |
| Obrázek 3.5 | <i>Rozložení proudů na povrchu antény ve volném prostoru, kmitočet 2450 MHz, Vlevo: vlastní model. Vpravo: převzato z [1].</i> | 8 |
| Obrázek 3.6 | <i>Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény položené na kůži</i> | 9 |
| Obrázek 3.7 | <i>Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény položené na kůži. Převzato z [1].</i> | 9 |
| Obrázek 3.8 | <i>Rozložení proudů na povrchu antény položené na kůži, kmitočet 900 MHz.</i> | 10 |
| Obrázek 3.9 | <i>Rozložení proudů na povrchu antény položené na kůži, kmitočty 1900 MHz a 2450 MHz.</i> | 10 |
| Obrázek 4.1 | <i>Optimalizovaná anténa</i> | 11 |
| Obrázek 4.2 | <i>Detail připojení koaxiálního kabelu</i> | 13 |
| Obrázek 5.1 | <i>Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény pro $n = 83$ mm, anténa ve volném prostoru.</i> | 14 |
| Obrázek 5.2 | <i>Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény pro $n = 134$ mm, anténa ve volném prostoru.</i> | 15 |
| Obrázek 5.3 | <i>Hodnoty proudů na povrchu antény; anténa ve volném prostoru.</i> | 15 |
| Obrázek 5.4 | <i>Rozložení proudů na anténě; anténa ve volném prostoru.</i> | 15 |
| Obrázek 5.5 | <i>Hodnoty zisku antény; anténa ve volném prostoru.</i> | 16 |
| Obrázek 5.6 | <i>3D směrová charakteristika antény; anténa ve volném prostoru.</i> | 16 |
| Obrázek 5.7 | <i>Směrová charakteristika v rovině E; anténa ve volném prostoru.</i> | 16 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 5.8 <i>Směrová charakteristika v rovině E; anténa ve volném prostoru. Převzato z [1].</i> | 17 |
| Obrázek 5.9 <i>Směrová charakteristika v rovině H; anténa ve volném prostoru.</i> | 17 |
| Obrázek 5.10 <i>Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény; anténa na kůži.</i> | 18 |
| Obrázek 5.11 <i>Hodnoty proudů na povrchu antény; anténa na kůži.</i> | 19 |
| Obrázek 5.12 <i>Rozložení proudů na povrchu antény; anténa na kůži.</i> | 19 |
| Obrázek 5.13 <i>Směrová charakteristika v rovině E; anténa na kůži.</i> | 19 |
| Obrázek 5.14 <i>Směrová charakteristika v rovině H; anténa na kůži.</i> | 20 |
| Obrázek 6.1 <i>Změřený kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény ve volném prostoru.</i> | 21 |
| Obrázek 6.2 <i>Změřený kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény; anténa na agaru</i> | 21 |
| Obrázek 6.3 <i>Změřený kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény; anténa na lidském těle</i> | 22 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|----------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 2.1 <i>Rozměry antény</i> | 3 |
| Tabulka 2.2 <i>Parametry použitých materiálů</i> | 4 |
| Tabulka 4.1 <i>Parametry optimalizované antény</i> | 12 |

ÚVOD

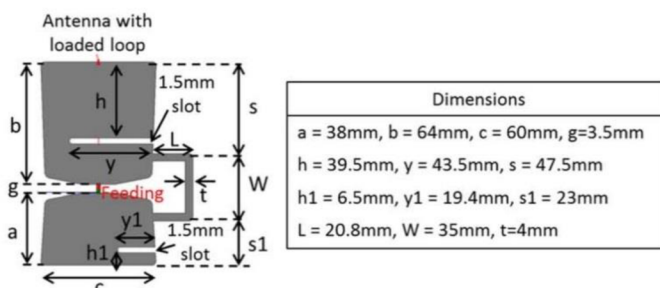
Tato semestrální práce pojednává o vícepásmové dipólové anténě. Projekt zahrnuje stručný popis publikovaného článku o vyšívané anténě, parametry modelované antény, použité materiály, model antény, výsledky simulací a měření.

Hlavním cílem této práce je ověřit pravdivost článku a optimalizovat anténu pro pásmo mobilních komunikací, následně ji vyrobit a změřit. K uskutečnění těchto cílů je použit program metody konečných prvků ANSYS HFSS.

Semestrální práce je rozdělena na 6 částí. V první části je charakterizován publikovaný článek o vyšívané anténě. Druhá část představuje modelování předlohy v programu ANSYS HFSS a třetí kapitola je věnována ověření publikovaných výsledků ve volném prostoru a na lidské kůži. Čtvrtá kapitola se zabývá optimalizací antény na 900 MHz a v páté kapitole jsou uvedeny výsledky simulací v prostoru a na lidské kůži. Šestá kapitola se věnuje výsledkům měření antény z měděné fólie nalepené na textilu Softshell.

1 CHARAKTERIZACE PŘEDLOHY

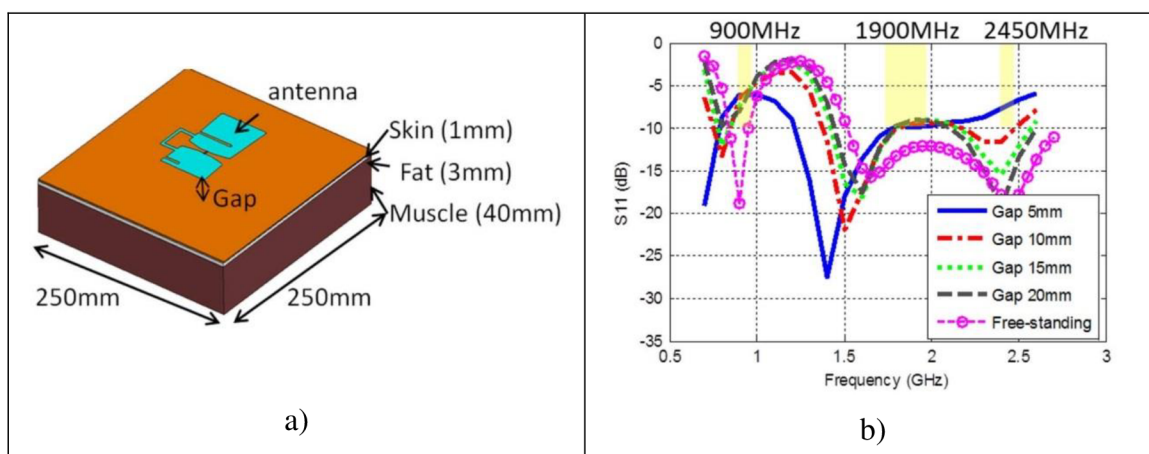
Základem pro tuto práci je již navržená vícepásmová dipólová anténa [1] (viz obr. 1.1), sestávající ze dvou asymetrických ramen se šterbinami, smyčky a napájení mezi rameny. Navržená anténa je přizpůsobená pro pásma GSM (*Global System for Mobile Communication*) 900 MHz, PCS (*Personal Communication Services*) 1900 MHz a WLAN (*Wireless Local-Area Network*) 2450 MHz.



Obrázek 1.1 Vyšivaný nesymetrický dipól a jeho parametry. Převzato z [1].

V této studii byla anténa vyšita elektricky vodivými vlákny (e-vlákny). Motiv antény (obr. 1.1) byl vyšit e-vlákny do nevodivého textilního povrchu [2]. Délky šterbin v obou ramenech a délka smyčky byly použity na vyladění rezonancí ve všech pásmech. Pro pásmo GSM byla použita délka horní šterbiny y , pro pásmo PCS délka dolní šterbiny $y1$ a pro WLAN délka ramen smyčky L .

Následně byla anténa simulována v programu ANSYS HFSS. Nejdříve jsme simulovali ve volném prostoru, a posléze v blízkosti lidského těla. Lidské tělo má díky své vysoké permitivitě a ztrátám vysoký vliv na účinnost antény a na rozladění rezonanční frekvence (viz obr. 1.2b). Jako model lidského těla byl použit třívrstvý substrát, složený z kůže, tuku a svalů (viz obr. 1.2a) s rozměry 250mm x 250 mm x 44 mm.



Obrázek 1.2 Vyšivaný nesymetrický dipól na modelu lidské tkáně (vlevo). Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény v závislosti na vzdálenosti antény od fantomu (vpravo). Převzato z [1].

2 OVĚŘENÍ PŘEDLOHY

2.1 Parametry antény

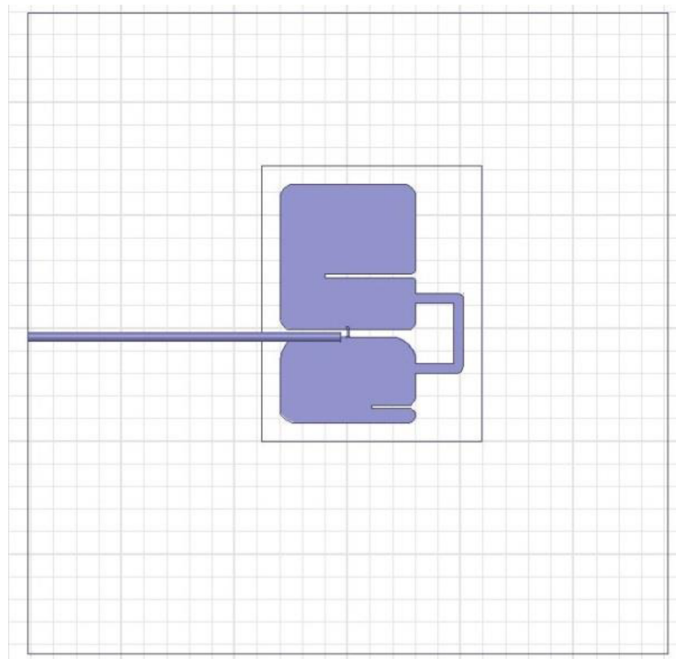
| <i>Parametr</i> | <i>Hodnota</i> |
|-----------------|--------------------|
| b | 64,0 mm |
| d | 3,5 mm |
| c | 60,0 mm |
| h | 39,5 mm |
| y | 40,0 mm |
| i | 1,5 mm |
| a | 38,0 mm |
| h1 | 6,5 mm |
| y1 | 19,4 mm |
| W | 35,0 mm |
| t | 4,0 mm |
| L | 20,8 mm |
| lam4 | 8,3 mm |
| e | 35,0 μm |
| r1 | 4,3 mm |
| r2 | 1,3 mm |
| s | 47,5 mm |
| s1 | 23,0 mm |

Tabulka 2.1 Rozměry antény

| <i>Materiál</i> | ϵ_r [-] | σ [S/m] | $\tan \delta$ [-] |
|-----------------|------------------|----------------|-------------------|
| PDMS | 3,00 | 0 | 0,01 |
| Kůže | 43,75 | 0,76 | 0,42 |
| Tuk | 5,52 | 0,04 | 0,19 |
| Sval | 56,01 | 0,85 | 0,34 |

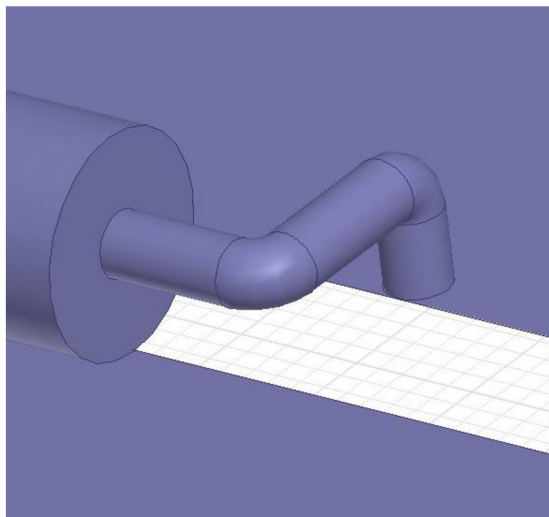
2.2 Model antény v HFSS

Anténa byla v prvním kroku modelována ve volném prostoru (Obr. 2.1). Tvar antény je podobný předloze [1], nicméně ne zcela přesný. Oříznutí po stranách a zaoblení rohů v publikované verzi není popsán, takže bylo oříznutí vynecháno a zaoblení rohů provedeno experimentálně. Z rozměrů je změněna pouze délka horní šterbiny y , jelikož simulace poté byla podobnější publikovaným výsledkům [1]. Anténa je v simulaci považována za perfektní vodič. Anténa leží na substrátu z PDMS [2] (Tab. 2.2) o rozměrech $(b+d+a+2 \times \text{lam}4) \times (c+L+2 \times \text{lam}4) \times h$ (Tab. 2.1). Okolo antény je vakuový box, o rozměrech $(250\text{mm}+4 \times \text{lam}4) \times (250\text{mm}+4 \times \text{lam}4) \times (44\text{mm}+4 \times \text{lam}4+r1 \times 2)$ (Tab. 2.1). Tento box má všechny strany nastavené na Radiation. Hodnoty, které nejsou zadané parametricky, jsou v boxu z důvodu pozdějšího přidání modelu lidské tkáně o rozměrech 250 x 250 x 44 mm.



Obrázek 2.1 *Model antény v HFSS ve volném prostoru*

Anténa je napájena koaxiálním kabelem o průměru vnitřního vodiče [6] r_1 a průměru vnějšího vodiče r_2 (Tab. 2.1). Je zvolen koaxiální kabel s impedancí 50Ω . Jeho vnější plášť se dotýká spodní části antény a vnitřní vodič je veden do horní části antény. Jelikož je nutné zařídit, aby se vnější plášť dotýkal pouze spodní části antény, a průměr zvoleného koaxiálního vedení [6] je větší než mezera mezi oběma rameny antény, je napájení vedeno po horním povrchu antény a vnitřní vodič následně 2x ohnut (Obr. 2.2), aby mohl být připojen na horní rameno antény.



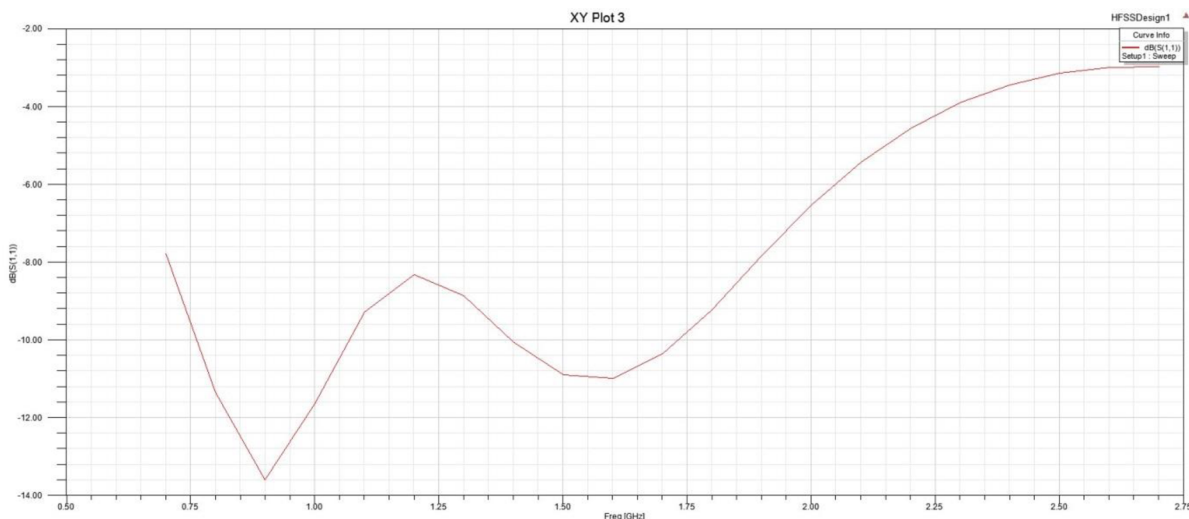
Obrázek 2.2 *Detail ohybu středního vodiče koaxiálního vedení*

3 SIMULACE

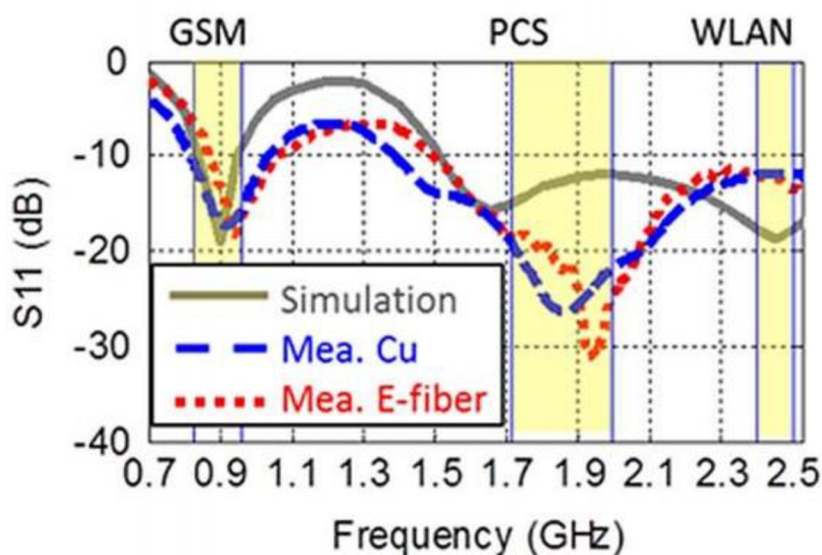
Veškeré simulace jsou prováděny pomocí simulačního programu ANSYS HFSS 15.0 (dále jen HFSS). V prvním kroku je anténa simulována ve volném prostoru a ve druhém kroku je pod ni vložen model lidské tkáně. Obě simulace jsou následně porovnány s publikovanými výsledky [1]. Většina rozměrů antény je zadávána parametricky, aby se posléze daly při optimalizaci rozměry jednoduše měnit a nebylo potřeba anténu vytvářet znovu.

3.1 Simulace ve volném prostoru

Nejdříve byla anténa simulována ve volném prostoru. Simulace byly provedeny pro kmitočty 900, 1900 a 2450 MHz. Zahrnují odraz S_{11} v závislosti na frekvenci a poté rozložení proudů na anténě.



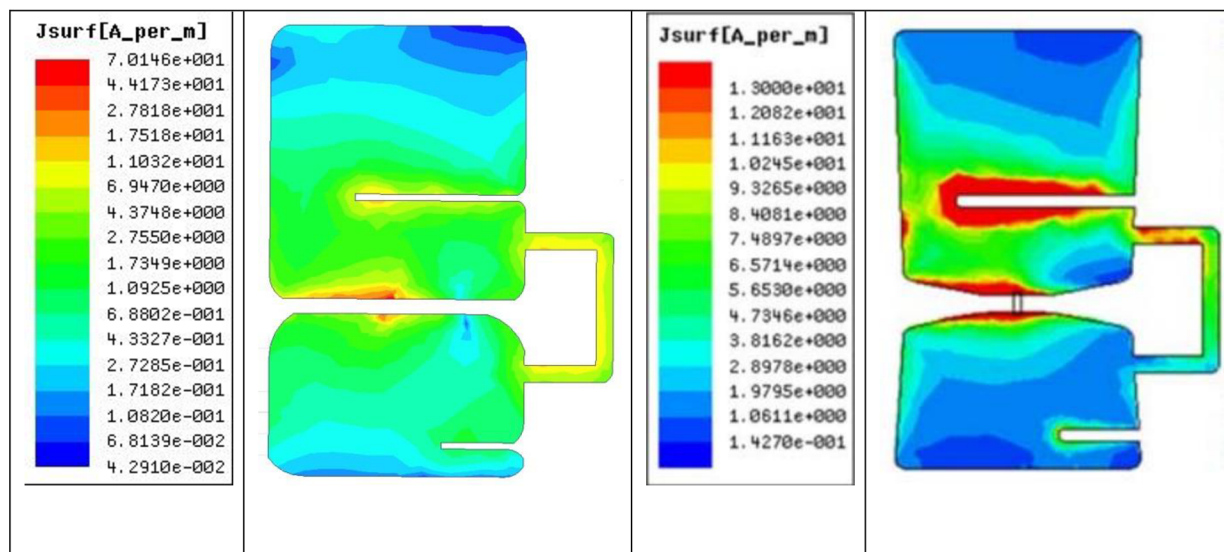
Obrázek 3.1 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény ve volném prostoru.



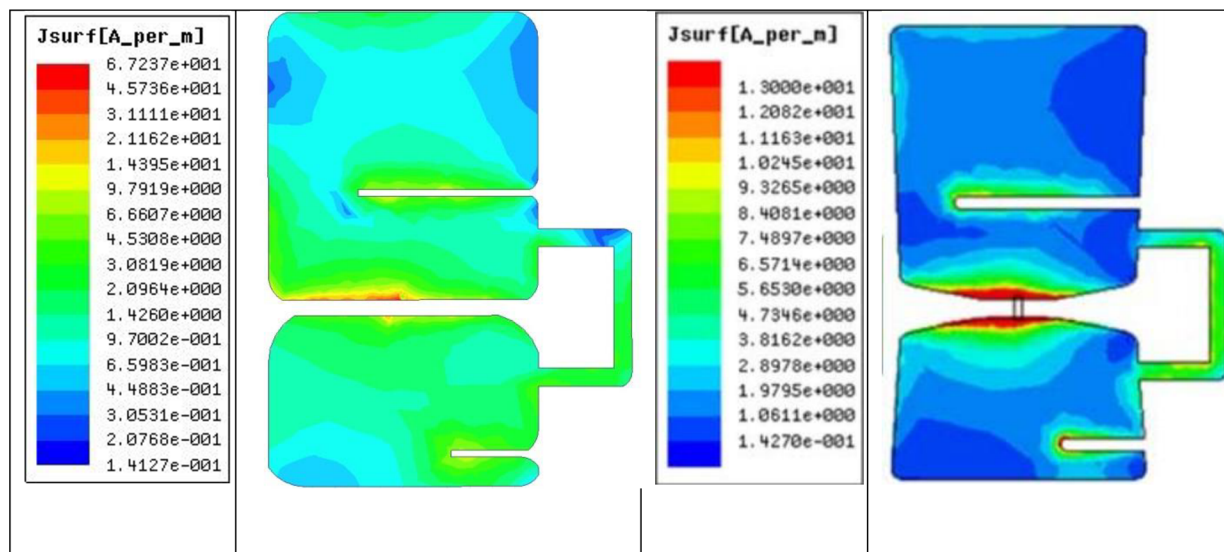
Obrázek 3.2 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény ve volném prostoru.
Převzato z [1].

Lze vidět, že simulací se povedlo dosáhnout rezonance na 900 MHz na přijatelné úrovni, což je důležitým cílem celé práce. Pro ostatní dva kmitočty jsou bohužel výsledky naprosto odlišné a odraz nedosahuje ani -10 dB. Je to způsobeno nedokonalým napodobením antény z předlohy.

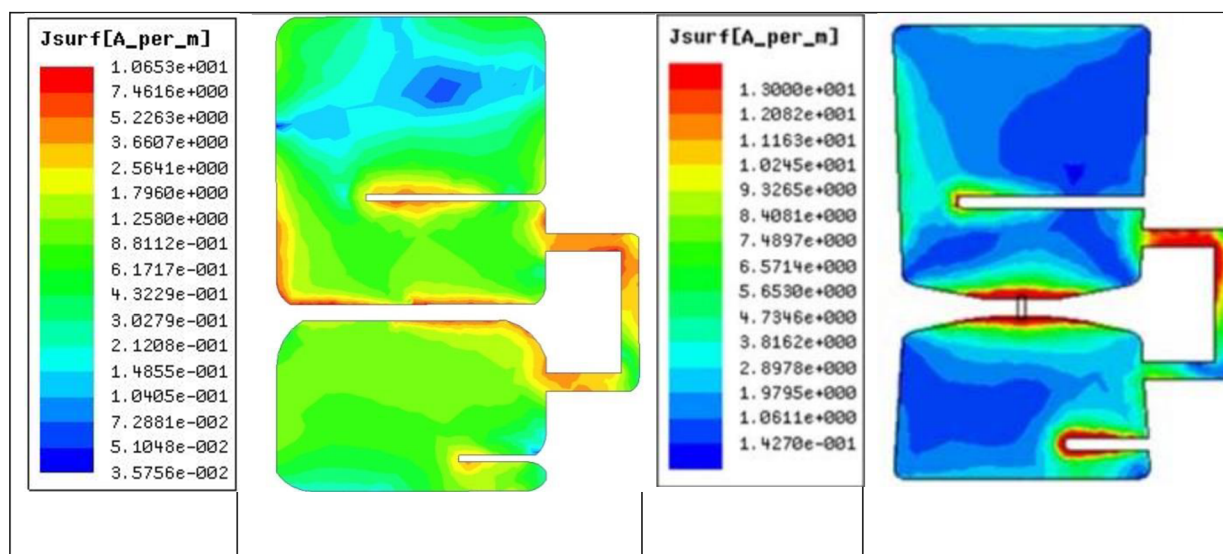
3.1.1 Rozložení proudů



Obrázek 3.3 Rozložení proudů na povrchu antény ve volném prostoru, kmitočet 900 MHz, Vlevo: vlastní model. Vpravo: převzato z [1].



Obrázek 3.4 Rozložení proudů na povrchu antény ve volném prostoru, kmitočet 1900 MHz, Vlevo: vlastní model. Vpravo: převzato z [1].

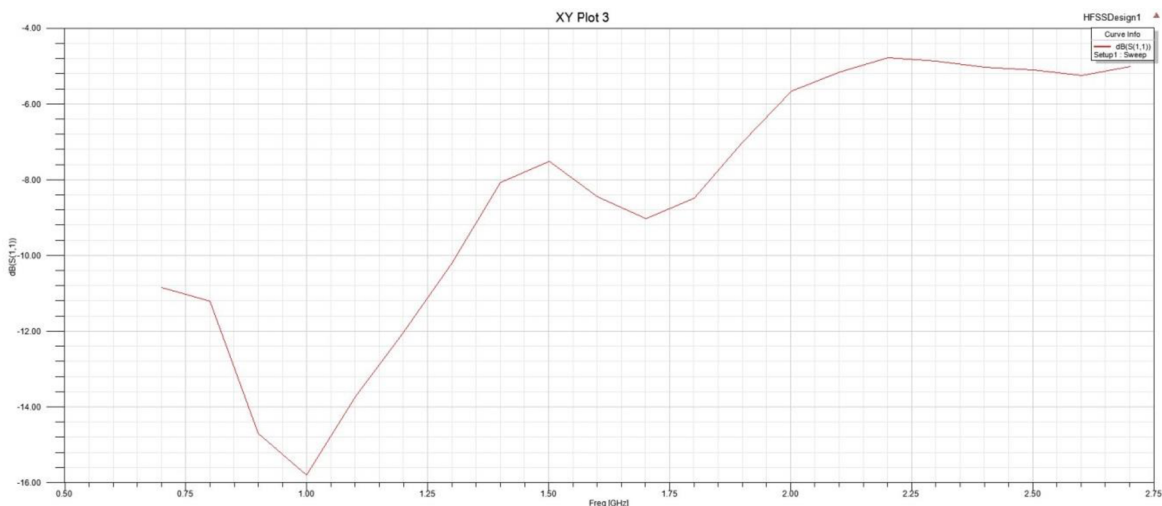


Obrázek 3.5 Rozložení proudů na povrchu antény ve volném prostoru, kmitočet 2450 MHz, Vlevo: vlastní model. Vpravo: převzato z [1].

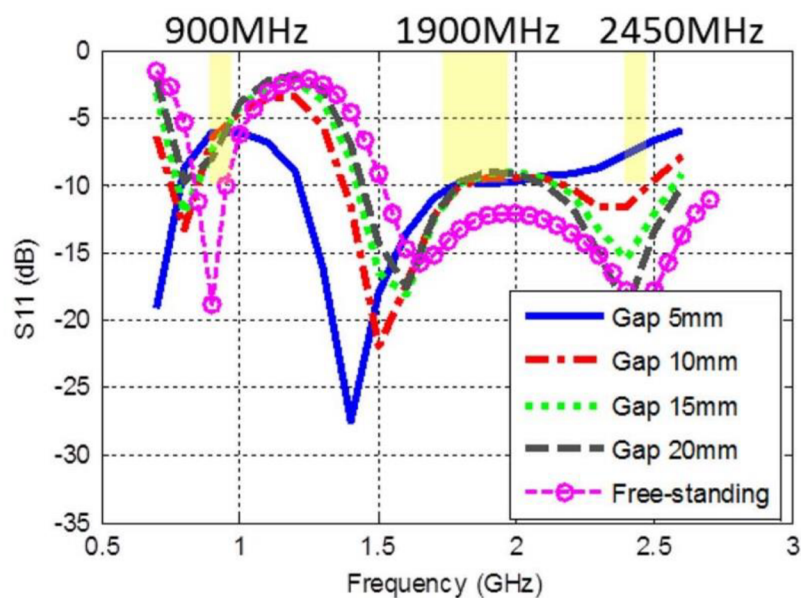
Z rozložení proudů lze vidět, že distribuce skoro neodpovídá předloze. Nicméně v důležitých částech, kde jsou štěrbiny, napájení a smyčka, lze vidět, že aspoň částečně se výsledkům blíží. Nedokonalost je způsobena neznalostí parametrů ořezu, tzn. úplným vynecháním ořezů, a experimentálním zaoblením rohů.

3.2 Simulace na lidské tkáni

Pod anténu byl vložen model lidské tkáně o rozměrech 250 mm x 250 mm x 44 mm, složený z kůže, tuku a svalů. Parametry modelu, získané z [3], jsou uvedeny v tabulce 2.2. Tyto parametry jsou spočítané pro kmitočet 900 MHz, na ostatních dvou kmitočtech jsou trochu rozdílné, což by mohlo lehce ovlivnit výsledky simulací.



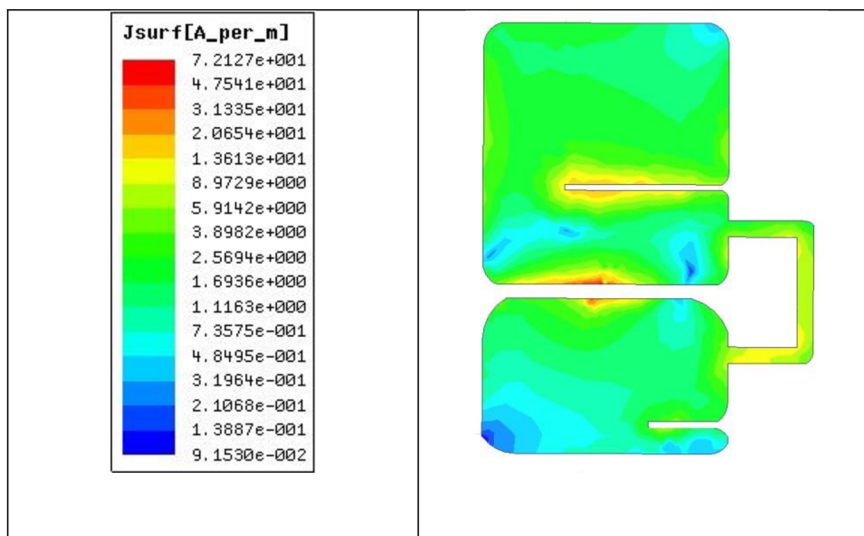
Obrázek 3.6 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény položené na kůži



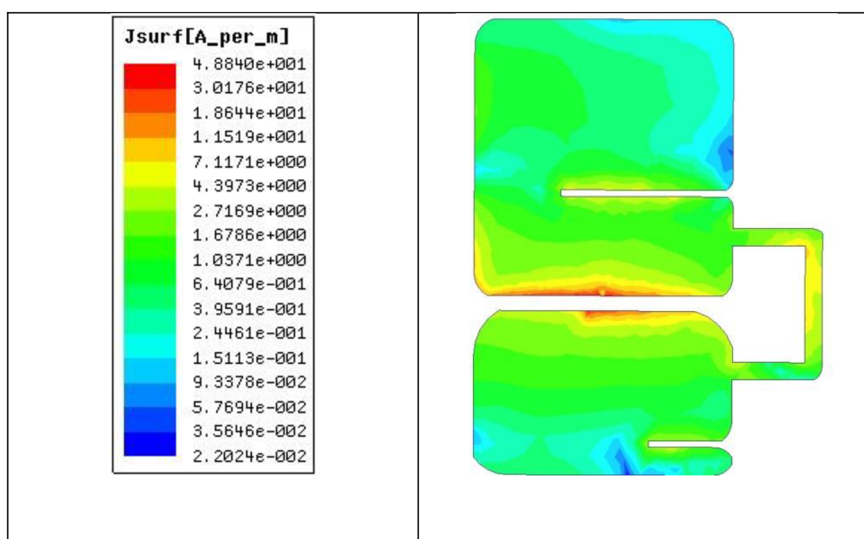
Obrázek 3.7 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény položené na kůži. Převzato z [1].

Vzhledem k tomu, že je anténa položená přímo na lidské kůži, tak jsou výsledky nepřesné. Lze ovšem jasně vidět, že se vlivem blízkosti lidského těla posunula rezonanční frekvence na 1 GHz a zároveň se odraz snížil o další 2 dB na první rezonanci. Hodnoty odrazu na 1900 MHz a 2450 MHz se naopak zvýšily markantním způsobem o několik dB.

3.2.1 Rozložení proudů



Obrázek 3.8 Rozložení proudů na povrchu antény položené na kůži, kmitočet 900 MHz.

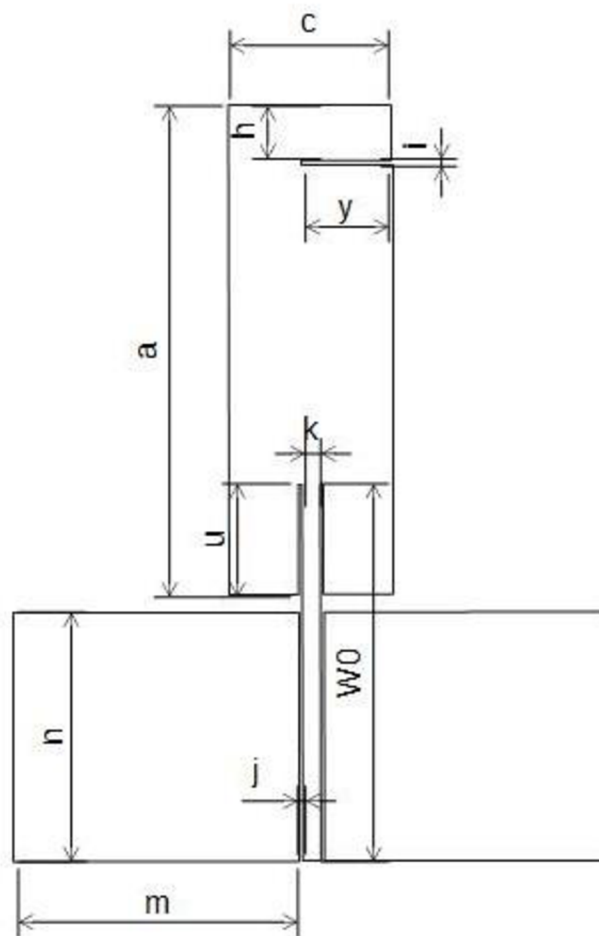


Obrázek 3.9 Rozložení proudů na povrchu antény položené na kůži, kmitočty 1900 MHz a 2450 MHz.

Proudy jsou na anténě rozloženy rovnoměrněji než oproti předloze a na 900 MHz lze pozorovat zlepšení v oblasti horní šterbiny. Rozložení proudů pro 1900 a 2450 MHz je nezměněné. Pro 1900 MHz to znamená viditelné zlepšení v oblasti napájení a smyčky, v oblasti šterbin zůstává velmi podobné. Naopak na 2450 MHz lze vidět, že proudy jsou razantně horší ve všech důležitých oblastech krom napájení, kde je poměrně dobré.

4 OPTIMALIZACE ANTÉNY

Vzhledem k nerealizovatelnému ohybu koaxiálního kabelu a nevyhovujícím výsledkům bylo rozhodnuto anténu namodelovat jinak. Dipól byl nahrazen monopolem se zapuštěným mikropáskem a koplanárním vedením. Na mikropásek je připojen vnitřní vodič koaxiálního kabelu a na vedení je připojen vnější plášť. Hlavním cílem bylo získat co nejlepší přizpůsobení na 900 MHz.



Obrázek 4.1 *Optimalizovaná anténa*

4.1 Parametry optimalizované antény

| <i>Parametr</i> | <i>Hodnota</i> |
|-----------------|----------------|
| a | 134,0 mm |
| c | 45,0 mm |
| u | 30,0 mm |
| h | 15,0 mm |
| y | 25,0 mm |
| i | 1,5 mm |
| j | 1,0 mm |
| k | 5,0 mm |
| m | 78,3 mm |
| n | 68,3 mm |
| W0 | 103,0 mm |
| e | 1,3 mm |

Tabulka 4.1 *Parametry optimalizované antény*

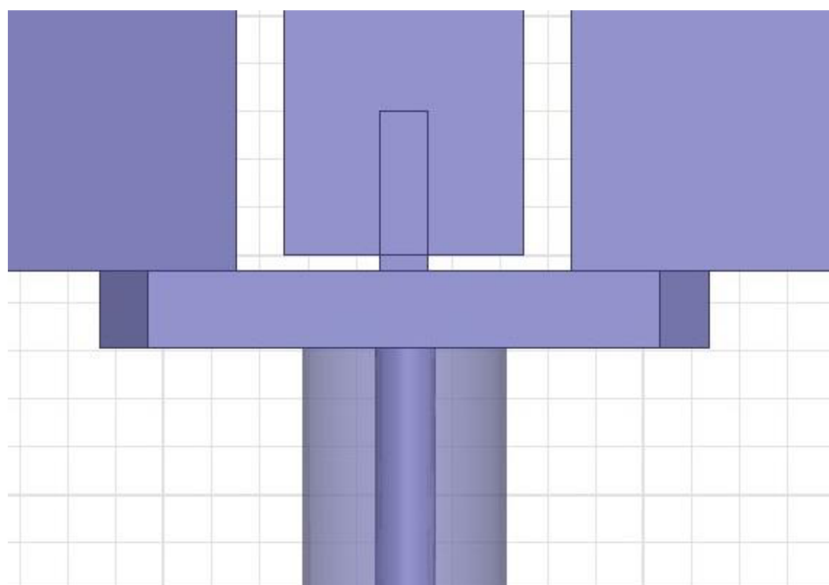
Cílem semestrální práce bylo ověřit funkčnost antény z předlohy. Ta byla položená na substrátu PDMS. Abychom však mohli anténu vyrobit z dostupných prostředků, jako materiál byl použit Softshell s permitivitou 1,3 a tloušťkou 1,3 mm.

4.2 Model optimalizované antény v HFSS

Jak již bylo řečeno, původní model dipólu byl zavrhnut z důvodu nemožné realizace. Místo toho byl zvolen monopol s vloženým mikropáskem a koplanárním vedením. Byla vyvinuta snaha zachovat co nejvíce z původního modelu, ale učinit ho realizovatelným a zlepšit přizpůsobení na 900 MHz. Byl odebrán slot ze spodní části antény, jehož funkce byla zlepšovat přizpůsobení na 1900 MHz, což je v současné situaci, kdy se tato práce zabývá přizpůsobením na 900 MHz, zbytečné. Horní slot antény byl naopak z těchto důvodů zachován.

Šířka mikropásku a jeho vzdálenost od země byly určeny za pomoci internetové kalkulačky[8]. Výsledky byly ověřeny pomocí vztahů uvedených v kapitole 4.3. Podle vzorce převzatého z [9] byla určena hloubka zanoření mikropásku (1).

Anténa je napájena koaxiálním kabelem stejným, jak již bylo avizováno v kapitole 2. Vnitřní vodič kabelu je připojen na mikropásek a vnější plášť je připojen na zem (Obr. 4.2).



Obrázek 4.2 Detail připojení koaxiálního kabelu

Jak lze vidět, do modelu je přidán i konektor [6], který bude použit při výrobě antény. Pásek, který je připojen na mikropásek, je zároveň napojen na vnitřní vodič koaxiálního kabelu a vnější plášť kabelu je připojen ke zbytku konektoru a skrze něj na obě zemnicí plochy.

4.3 Výpočty

Hloubku zanoření mikropásku určíme pomocí vzorce

$$y_0 = 10^{-4} \{ 0.001699 \varepsilon_r^7 + 0.13761 \varepsilon_r^6 - 6.1783 \varepsilon_r^5 + 93.189 \varepsilon_r^4 - 682.69 \varepsilon_r^3 + 2561.9 \varepsilon_r^2 - 4043 \varepsilon_r + 6697 \} \frac{L}{2}, \quad (1)$$

kde y_0 je hloubka zanoření, ε_r relativní permitivita dielektrika a L délka mikropásku.

Šířka mikropásku a jeho vzdálenost od země byla určena za pomoci následujících vztahů

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \frac{1}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(kl)}{K(kl')}} \quad (2)$$

$$k = \frac{a}{b} \quad (3)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (4)$$

$$kl = \frac{\tanh\left(\frac{\pi a}{4h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi b}{4h}\right)} \quad (5)$$

$$kl' = \sqrt{1 - kl^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1 + \varepsilon_r \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(kl)}{K(kl')}}{1 + \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(kl)}{K(kl')}} \quad (7)$$

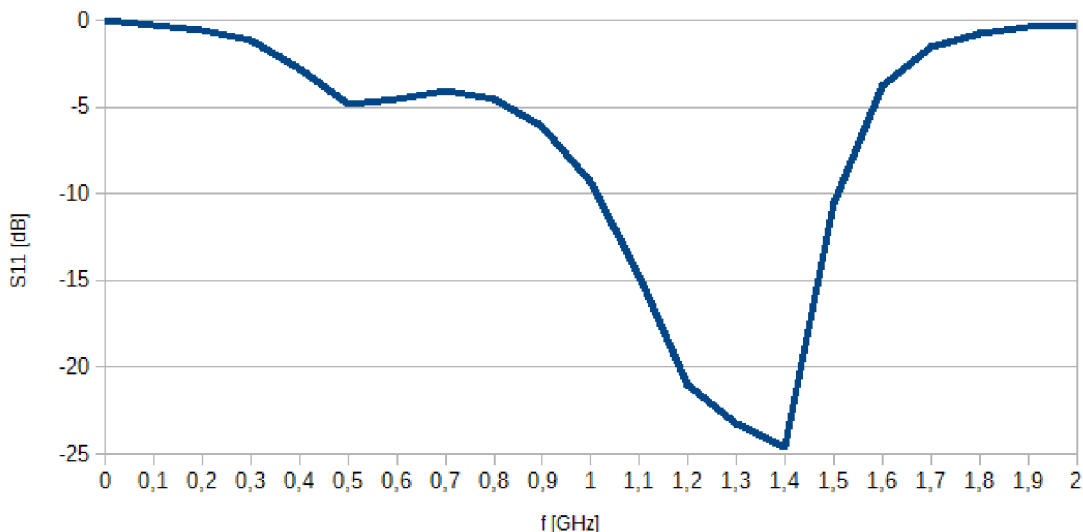
kde a je šířka mikropásku, b součtem šířky mikropásku a vzdáleností od země na obou stranách, h tloušťka dielektrika a ε_r relativní permitivita dielektrika.

5 SIMULACE OPTIMALIZOVANÉ ANTÉNY

Tentokrát byla simulace provedena pouze ve volném prostoru, na lidské kůži bude pouze změřena. Rozměry antény jsou zadané parametricky, takže s nimi lze dle potřeby hýbat a upravovat např. rezonanční frekvenci či přizpůsobení antény.

5.1 Simulace ve volném prostoru

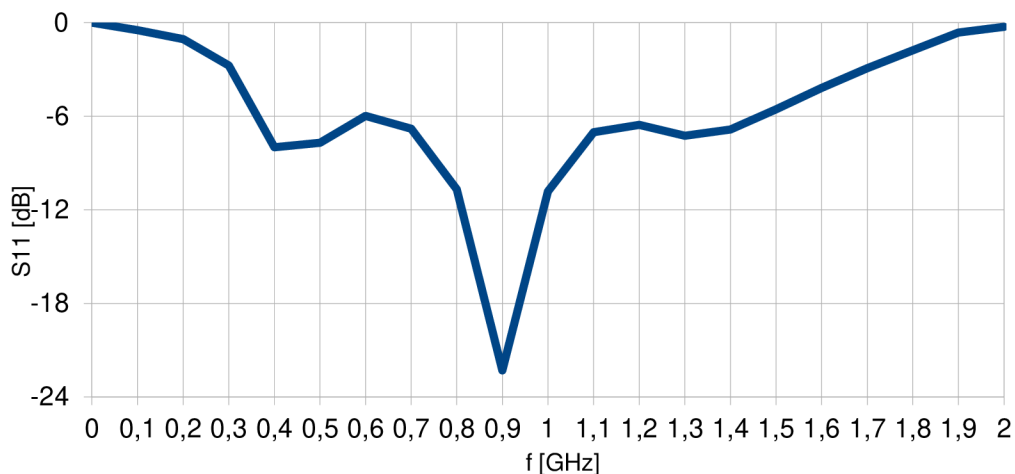
Simulace byla provedena pro kmitočty 900 MHz. Rozměry antény jsou určeny experimentálně. Monopol by měl mít výšku rovnou čtvrtině vlnové délky, nicméně na této výšce byla rezonanční frekvence 1,3 GHz (Obr. 5.1), což nesouhlasí s cílem této práce.



Obrázek 5.1 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény pro $n = 83$ mm, anténa ve volném prostoru.

Parametrickou analýzou bylo zjištěno, že požadované rezonanční frekvenci vyhovuje výška antény 134 mm (Obr. 5.2). Oproti původní předloze (Obr. 3.2) se

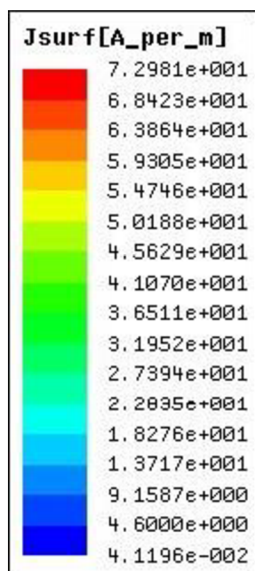
podářilo dosáhnout o něco lepšího odrazu.



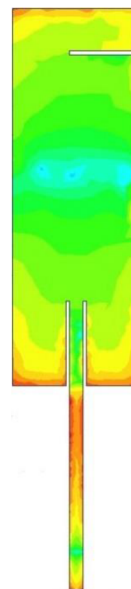
Obrázek 5.2 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény pro $n = 134$ mm, anténa ve volném prostoru.

Z obrázku 5.2 lze vidět, že simulovaná anténa dosáhla na 900 MHz velmi dobrého impedančního přizpůsobení ($S_{11} < -10$ dB) cca -22,5 dB.

5.1.1 Rozložení proudů



Obrázek 5.3 Hodnoty proudů na povrchu antény; anténa ve volném prostoru.

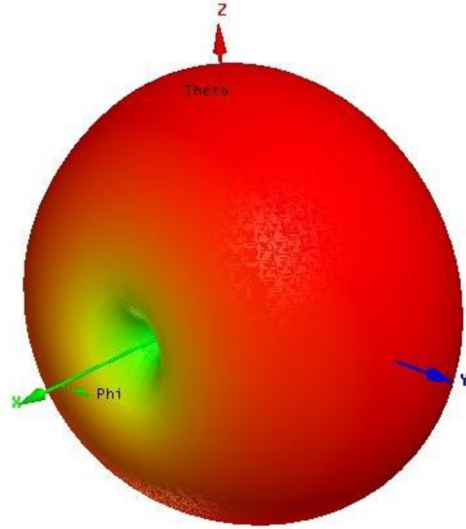
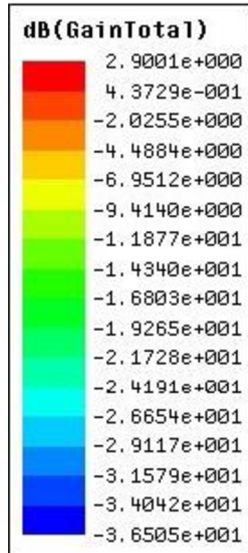


Obrázek 5.4 Rozložení proudů na anténě; anténa ve volném prostoru.

Z rozložení proudů lze vidět, že nejlepší přizpůsobení je v oblasti mikropásku a jeho

zapuštění. Dle předpokladu ve středu antény jsou nejmenší proudy a směrem k okrajům se zvětšují. Lze vidět, že štěrbinina má vliv na proudy okolo ní.

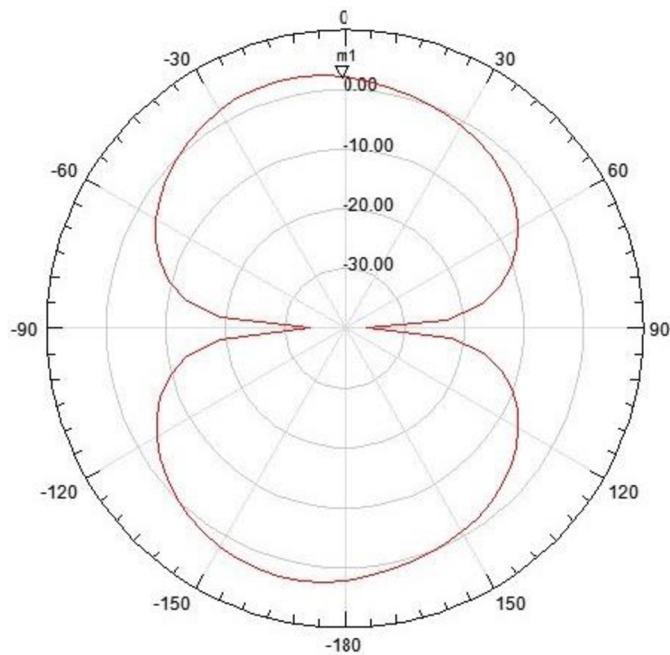
5.1.2 Směrové charakteristiky



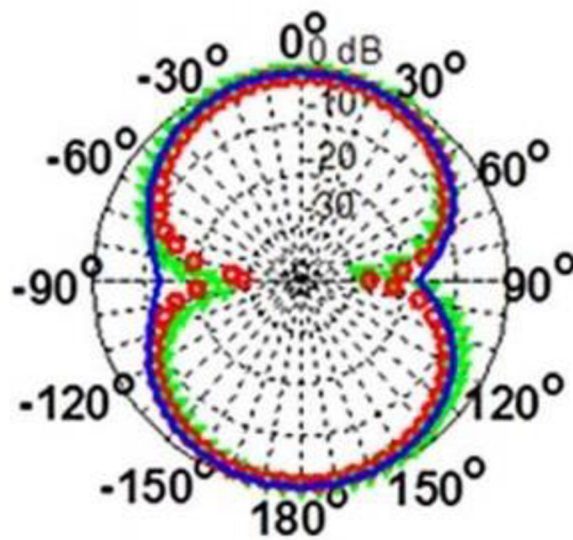
Obrázek 5.5 Hodnoty zisku antény; anténa ve volném prostoru.

Obrázek 5.6 3D směrová charakteristika antény; anténa ve volném prostoru.

Tato směrová charakteristika (Obr. 5.6) potvrzuje, že jde opravdu o monopol, jelikož nezáří v ose X. Největší zisk antény je cca 2,9 dB.

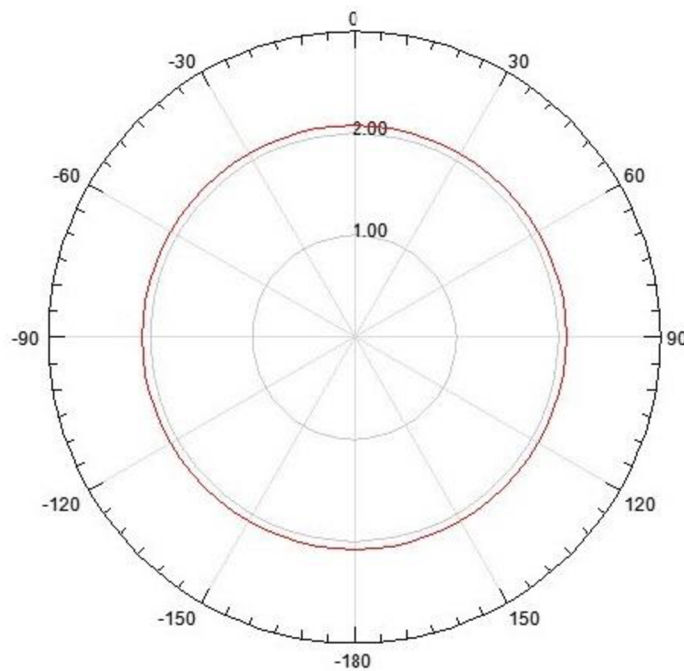


Obrázek 5.7 Směrová charakteristika v rovině E; anténa ve volném prostoru.



Obrázek 5.8 Směrová charakteristika v rovině E; anténa ve volném prostoru. Převzato z [1].

Jak lze vidět v porovnání obrázků 5.7 a 5.8, navržená anténa je ve volném prostoru podobná simulované anténě v předloze co se týče charakteristik v rovině E. Na obrázku 5.8 představuje modrá linka simulovanou charakteristiku. Nejlepší citlivosti dosahuje v cca 60° rozmezí.

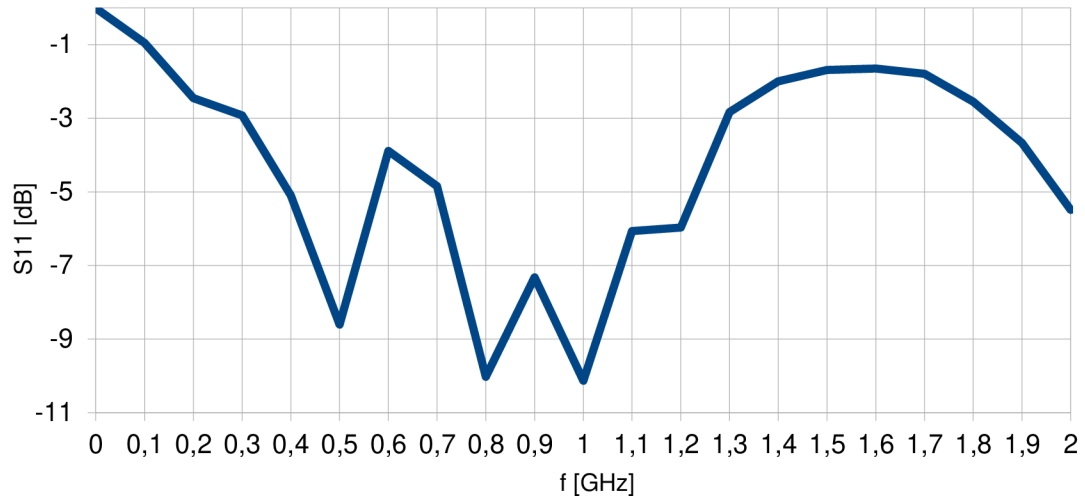


Obrázek 5.9 Směrová charakteristika v rovině H; anténa ve volném prostoru.

Dle předpokladu je anténa v rovině H všesměrová a dosahuje dobrého zisku 2 dB.

5.2 Simulace na lidské tkáni

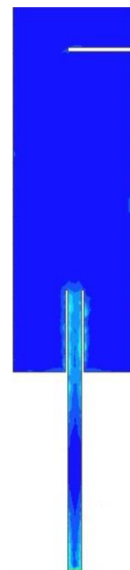
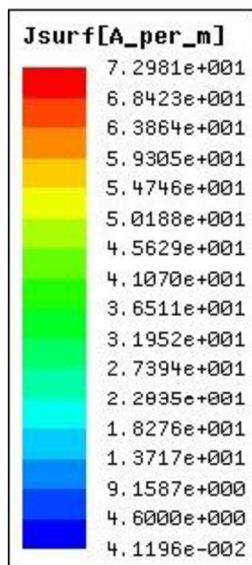
Pod navrženou anténu byla vložena kostka lidské tkáně složená ze tří vrstev (kůže, tuk, sval), stejně jako v kapitole 2.



Obrázek 5.10 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény; anténa na kůži.

Vlivem blízkosti lidského těla se změnily rezonanční frekvence a posunulo se přizpůsobení. Lze předpokládat, že anténa nebude v blízkosti lidského těla použitelná. Na 900 MHz nerezonuje a má nevyhovující odraz -8 dB.

5.2.1 Rozložení proudů

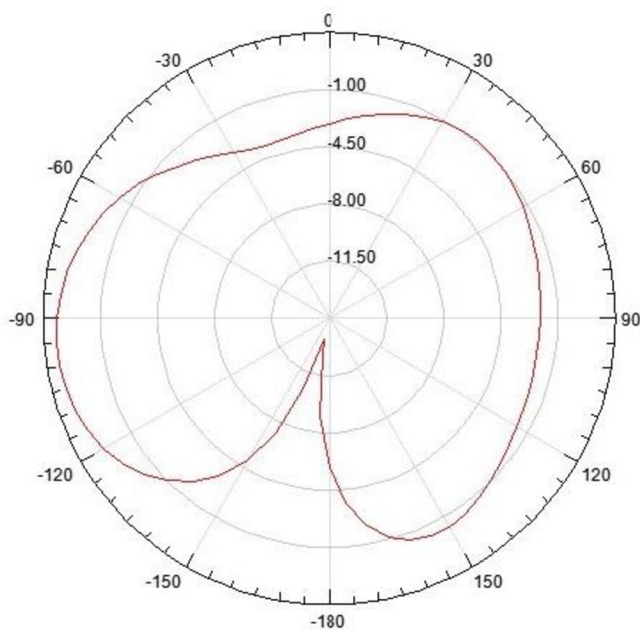


Obrázek 5.11 Hodnoty proudů na povrchu antény; anténa na kůži.

Obrázek 5.12 Rozložení proudů na povrchu antény; anténa na kůži.

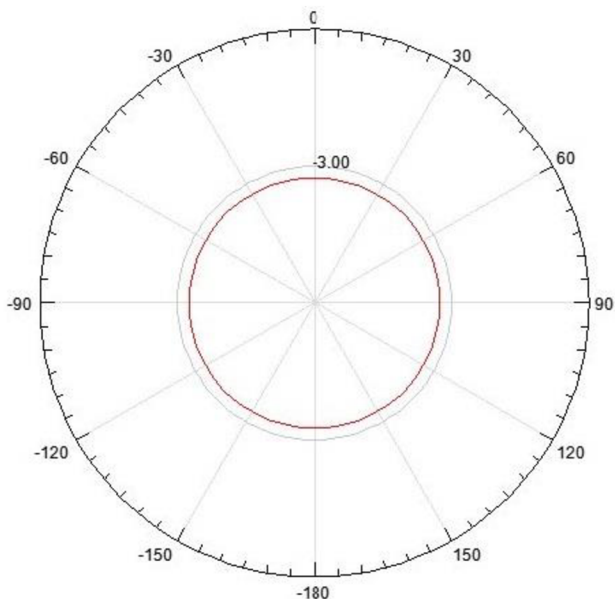
Vlivem proudů probíhajících v lidském těle jsou povrchové proudy na anténě velmi malé (obr. 5.12). Jistou podobnost lze vidět v oblasti mikropásku a jeho zapuštění, kde jsou stejně jako při simulaci ve volném prostoru proudy nejvyšší z celé antény.

5.2.2 Směrové charakteristiky



Obrázek 5.13 Směrová charakteristika v rovině E; anténa na kůži.

Vlivem lidské tkáně se směrová charakteristika v rovině E (obr. 5.13) velmi změnila. Nejvyšší citlivost má ve směru kolmo k lidské tkáni.

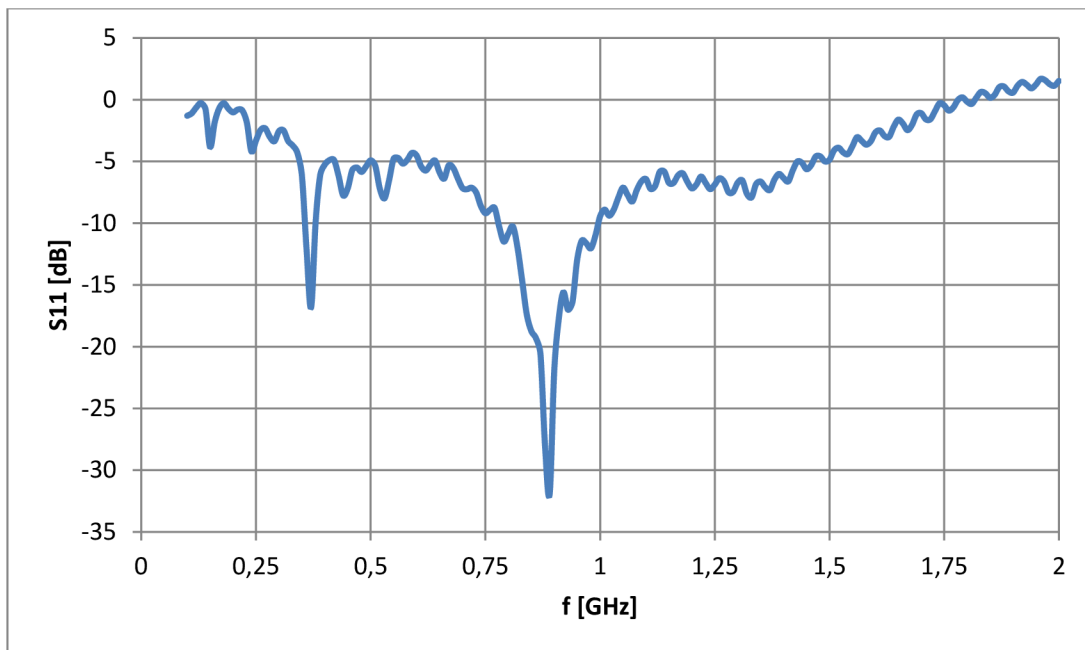


Obrázek 5.14 Směrová charakteristika v rovině H; anténa na kůži.

Směrová charakteristika v rovině H (obr. 5.14) je stále všesměrová, nicméně zisk antény se vlivem proudů v lidském těle rapidně snížil a anténa je ztrátová.

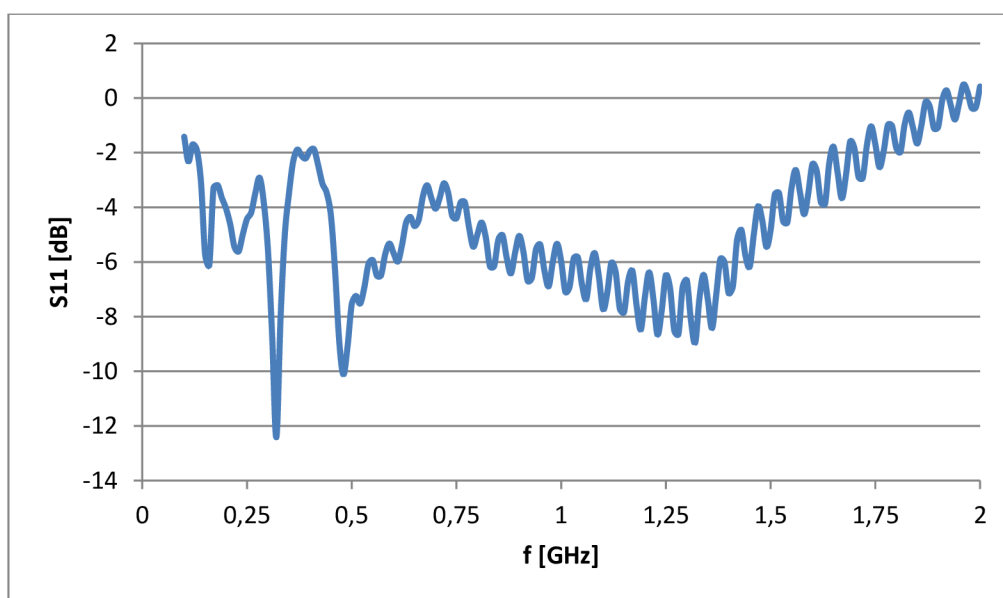
6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Anténa byla vyrobena z měděné lepicí fólie přilepené na textil. Měření bylo provedeno v laboratoři mikrovlnných technik nejdříve položené na polystyrenu (který simuloval volný prostor), poté na agaru s podobnými parametry jako má lidské tělo a nakonec nalepené v oblasti břicha.



Obrázek 6.1 Změřený kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény ve volném prostoru.

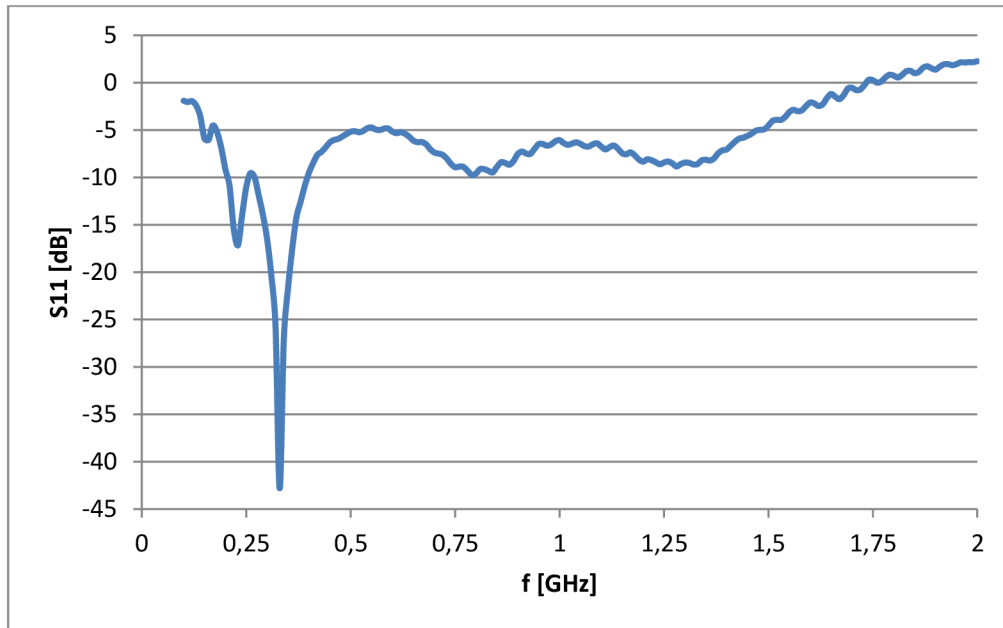
Z obr. 6.1 lze vidět, že anténa dosáhla velmi dobrého přizpůsobení cca -32 dB, čímž předčila simulaci asi o 10 dB. Rezonance je na 890 MHz místo simulovaných 900 MHz, nicméně je pořád v pásmu GSM, kterého jsme chtěli dosáhnout.



Obrázek 6.2 Změřený kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény; anténa na agaru

Dle předpokladu má anténa v blízkosti lidského těla diametrálně odlišné výsledky.

Přizpůsobení se snížilo na -12,5 dB. To by ještě spadalo do podmínky $S_{11} < -10\text{dB}$, ale rezonance se posunula na 320 MHz, což je nevyhovující.



Obrázek 6.3 Změřený kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény; anténa na lidském těle

Hodnotami odrazu krom rezonance jsou výsledky měření na lidském těle velmi podobné měření na agaru. Ovšem rezonance, která je tentokrát na 330 MHz, má mnohonásobně lepší přizpůsobení než agar, cca -43 dB.

7 ZÁVĚR

V programu ANSYS HFSS byla ověřena a následně navrhnutá anténa optimalizovaná na 900 MHz. U ověřené i optimalizované antény byly zaznamenány výsledky simulací odrazu a u optimalizované i výsledky směrových charakteristik.

Původní model dipólu s ramenem byl nahrazen monopolem se zapuštěným mikropáskem a koplanárním vedením. Byla ponechána štěrbina upravující odraz na 900 MHz.

Výsledky optimalizované antény jsou, co se týče simulací ve volném prostoru, podobné publikovaným výsledkům, ovšem simulace na lidské kůži je diametrálně odlišná.

Naměřené výsledky ve volném prostoru odpovídají simulacím, pouze je posunuta rezonanční frekvence na 890 MHz a zlepšen odraz. Bylo dosaženo odpovídajícího zisku 2 dB.

Naopak naměřené výsledky na agaru a lidské kůži jsou odlišné. Rezonanční frekvence se posunuly na 320 a 330 MHz. Na agaru je odraz dostačující, v blízkosti lidské kůže je odraz mnohonásobně lepší.

LITERATURA

- [1] WANG, Z., LEE, L.Z., PSYCHOUDAKIS, D., VOLAKIS, J.L. *Embroidered multiband body-worn antenna for GSM/PCS/WLAN communications*, IEEE Transactions on Antennas and Communication, 2014, vol. 62, no. 6, p. 3321-3329.
- [2] WANG, Z., ZHANG, L., BAYRAM, Y., and VOLAKIS, J.L. *Embroidered conductive fibers on polymer composite for conformal antennas*, IEEE Trans. Antennas Propag., 2012, vol. 60, no. 9, pp. 4141–4147.
- [3] Inst. of Appl. Phys., Italian Nat. Res. Council, *Calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz–100 GHz*, . Florence, Italy. [Online]. Dostupné z: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>.
- [4] BALANIS, C.A. *Antenna Theory, Analysis and Design*, 3/E, Hoboken: J. Wiley and Sons, 2005.
- [5] CHRIST, A., KLINGENBOCK, A.,SAMARAS, T.,GOICEANU, C., and KUSTER, N., *The dependence of electromagnetic far-field absorption on body tissue composition in the frequency range from 300 MHz to 6 GHz*, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2006, vol. 54, no. 5, pp. 2188–2195.
- [6] Rosenberger, *32K441-500L5*[online]. 2004. [citováno 13. prosince 2016]. Dostupné z: <http://rosenberger.de/ok/images/documents/db/32K441-500L5.pdf>
- [7] Microwavetools, *Inset Fed Microstrip Patch Antenna* [online]. [citováno 24. Dubna 2017]. Dostupné z: <http://www.microwavetools.com/inset-fed-microstrip-patch-antenna/>
- [8] Chemandy, *Coplanar Waveguide With Ground Characteristic Impedance Calculator* [online]. [citováno 24. dubna 2017]. Dostupné z: <http://chemandy.com/calculators/coplanar-waveguide-with-ground-calculator.htm>
- [9] Journal of Microwaves and Optoelectronics, *Design Formula for Inset Fed Microstrip Patch Antenna* [online]. 2003 [cit. 2017-05-24]. ISSN 1516-7399. Dostupné z: <http://www.jmoe.org/index.php/jmoe/article/viewFile/87/78>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|-----------------|------------------------------------------------------------|
| ε_r | Relativní permitivita |
| σ | Elektrická vodivost |
| $\tan \delta$ | Ztrátový činitel |
| b | Délka horní části antény |
| d | Vzdálenost horní části antény od spodní |
| c | Šířka antény |
| h | Vzdálenost šterbiny y od horního okraje |
| y | Délka horní šterbiny |
| i | Šířka šterbin |
| a | Délka horní části antény |
| $h1$ | Vzdálenost šterbiny $y1$ od horního okraje antény |
| $y1$ | Délka spodní šterbiny |
| W | Délka prostřední části smyčky |
| t | Šířka ramen smyčky |
| L | Délka ramen smyčky |
| $\lambda/4$ | Čtvrtina vlnové délky |
| e | Tloušťka substrátu |
| $r1$ | Průměr vnějšího vodiče koaxiálního kabelu |
| $r2$ | Průměr vnitřního vodiče koaxiálního kabelu |
| s | Vzdálenost horního okraje smyčky od horního okraje antény |
| $s1$ | Vzdálenost dolního okraje smyčky od spodního okraje antény |
| <i>PDMS</i> | Polydimethylsiloxane |
| S_{11} | Odraz antény |
| f | Frekvence |
| $W0$ | Délka mikropásku |
| u | Hloubka zanoření mikropásku |
| k | Šířka mikropásku |
| j | Šířka šterbiny mezi zemí a mikropáskem |

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Obr. I <i>Pohled na vyrobenou anténu</i> | 27 |
| Obr. II <i>Měření odrazu antény položené na agaru</i> | 27 |



Obr. I *Pohled na vyrobenou anténu*



Obr. II *Měření odrazu antény položené na agaru*