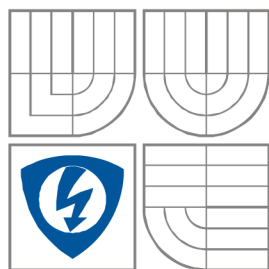


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VLIV UŽIVATELE NA MINIATURNÍ ANTÉNY V MOBILNÍCH APLIKACÍCH

USER INFLUENCE ON MINIATURE ANTENNAS IN MOBILE APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

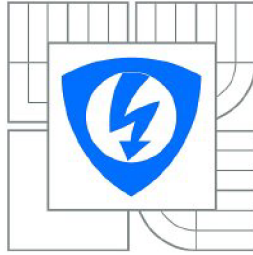
Bc. Radek Vehovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Pokorný, PhD.

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Radek Vehovský
Ročník: 2

ID: 115307
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Vliv uživatele na miniaturní antény v mobilních aplikacích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami zmenšování fyzických rozměrů mikropáskových antén a s konstrukcí antén typu PIFA. Navrhněte dvoupásmovou PIFA anténu pro kmitočtová pásma systému GSM900 a GSM1800. Ve vhodném simulátoru EM pole ověřte její vlastnosti. Vyšetřete vliv uživatele na vlastnosti antény v datovém režimu mobilního zařízení. Navrhněte a implementujte do numerického modelu antény vhodný ladící obvod, který kompenzuje vliv uživatele a zajistí správnou funkci antény. Anténu včetně ladícího obvodu realizujte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, A. C. Antenna Theory: Analysis and Design, 2/E. New York: J. Wiley & Sons, 1996.

[2] MAK, A.C.K., ROWELL, C.R., MURCH, R.D., MAK, C.L. Reconfigurable multiband antenna designs for wireless communication devices, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, vol. 55, no. 7, p.1919-1928.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Michal Pokorný, Ph.D.

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 diplomová práce se zabývá vlivem uživatele na vlastnosti miniaturních antén v mobilních aplikacích. V teoretické části jsou představeny elektricky malé antény, jejich základní parametry a omezení. Tato část se dále zabývá mikropáskovými anténami a jejich běžnými typy. Hlavní důraz je kladen na antény typu PIFA, jejich typické konstrukce a metody zmenšování fyzických rozměrů. V praktické části je pomocí simulátoru elektromagnetického pole CST Microwave Studio navržena dvoupásmová PIFA anténa pro kmitočtová pásma systémů GSM900 a GSM1800. U této antény je dále zkoumán vliv uživatele na její impedanční přizpůsobení a vyzařovací vlastnosti v datovém režimu (psaní textových zpráv či prohlížení webových stránek) mobilního zařízení. Tento vliv je změřen na fantomu, shodného tvaru s vlastní rukou, který je vyroben z materiálu na bázi agaru. Pro typickou pozici vlastní ruky vůči anténě je navržen přizpůsobovací obvod, který vliv uživatele eliminuje a zajistí správnou funkci antény.

Klíčová slova

Planární anténa, dvoupásmová anténa, PIFA, GSM, vliv uživatele, lidská tkáň, fantom ruky, přizpůsobovací obvod.

Abstract

This master's thesis deals with user influence on miniature antennas in mobile application. Electrically small antennas including fundamental performance properties and limitations are introduced in the theoretical section of this thesis. This section also deals with microstrip antennas and their common types. The accent is on PIFA antennas, their typical constructions and methods of miniaturization. In the practical section, dual-band PIFA antenna for operation at frequencies of systems GSM900 and GSM1800 is designed with the assistance of electromagnetic field simulator CST Microwave Studio. On this type of antenna, the user influence on impedance matching and radiation pattern in data mode (the user is typing message or browsing with the phone) is investigated. For this purpose the hand phantom, corresponding to author's right hand, was made from agar based material. For typical position of human hand is designed matching network, which eliminate the user influence and ensure correct function of antenna.

Keywords

Planar antenna, dual-band antenna, PIFA, GSM, user influence, human tissue, hand phantom, impedance matching.

VEHOVSKÝ, R. *Vliv uživatele na miniaturní antény v mobilních aplikacích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Pokorný, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vliv uživatele na miniaturní antény v mobilních aplikacích 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/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 24. května 2013

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalovi Pokornému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Rovněž děkuji Ing. Kamilovi Pítrovi a Ing. Petrovi Všetulovi za pomoc při výrobě fantomu, Ing. Jaroslavovi Láčkovvi, PhD. za změření parametrů výsledné směsi, za jejich ochotu a vstřícnost.

V Brně dne 24. května 2013

.....
podpis autora

Výzkum realizovaný v rámci této diplomové práce byl finančně podpořen projektem CZ.1.07/2.3.00/20.0007 **Wireless Communication Teams** operačního programu **Vzdělávání pro konkurenceschopnost**.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Finanční podpora byla poskytnuta Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Obsah

ÚVOD.....	12
1 ELEKTRICKY MALÉ ANTÉNY	14
1.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY ANTÉN	14
1.2 ZÁKLADNÍ OMEZENÍ MALÝCH ANTÉN	17
2 MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY	18
2.1 TYPY MIKROPÁSKOVÝCH ANTÉN.....	18
2.1.1 Flíčkové antény.....	18
2.1.2 Úzkoprofilové monopóly	19
2.1.3 Štěrbínové antény.....	19
2.1.4 Fraktální antény	20
2.2 NAPÁJENÍ MIKROPÁSKOVÝCH ANTÉN	21
2.3 ANALÝZA MIKROPÁSKOVÝCH ANTÉN	21
3 ANTÉNY PIFA.....	22
3.1 TECHNIKY PRO REDUKCI ROZMĚRŮ	24
3.1.1 Zkratování hran antény.....	24
3.1.2 Použití zkratovacího pinu.....	24
3.1.3 Kapacitní zátěž	25
3.1.4 Substrát s vysokou permitivitou.....	25
3.2 TECHNIKY PRO ZVĚTŠENÍ ŠÍŘKY PÁSMO	26
3.3 VÍCEPÁSMOVÉ ANTÉNY	27
3.3.1 Anténa se štěrbinami	27
3.3.2 Anténa s oddělenými větvemi.....	27
3.3.3 Anténa s parazitním elementem	28
4 NÁVRH A REALIZACE DVOUPÁSMOVÉ PIFA ANTÉNY	29
4.1 VÝCHOZÍ KONSTRUKCE ANTÉNY.....	29
4.2 VÝLEDNÁ GEOMETRIE ANTÉNY	30
4.3 PARAMETRY ANTÉNY	31
5 SIMULACE VLIVU UŽIVATELE NA VLASTNOSTI PIFA ANTÉNY	35
5.1 MODEL RUKY	35
5.1.1 Vrstvový model prstu	36
5.1.2 Homogenní model ruky	37
5.2 POROVNÁNÍ VRSTVOVÉHO A HOMOGENNÍHO MODELU PRSTU	38
5.3 VLIV HOMOGENNÍHO MODELU RUKY NA VLASTNOSTI PIFA ANTÉNY	40
6 VYŠETŘENÍ VLIVU VLASTNÍ RUKY NA VLASTNOSTI PIFA ANTÉNY.....	42
6.1 VÝROBA FANTOMU RUKY	42
6.2 VYTVOŘENÍ 3D MODELU	44
6.3 VLIV VLASTNÍ RUKY NA IMPEDANČNÍ PŘÍZPŮSOBENÍ	45
6.4 VLIV VLASTNÍ RUKY NA VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY	46
7 NÁVRH KOMPENZAČNÍHO OBVODU.....	48
7.1 ROZBOR ŘEŠENÍ POMOCÍ IDEÁLNÍCH SOUČÁSTEK	48
7.1.1 Úsek vedení + paralelní indukčnost.....	49

7.1.2	<i>L článek</i>	50
7.1.3	<i>T článek</i>	51
7.2	REÁLNÁ IMPLEMENTACE VYBRANÉHO NÁVRHU.....	51
	ZÁVĚR	54
	SEZNAM LITERATURY	56
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	58
	SEZNAM PŘÍLOH	60

Seznam obrázků

OBR. 1.1	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ PARAMETRU A U ELEKTRICKY MALÉ ANTÉNY.	14
OBR. 2.1	MIKROPÁSKOVÁ FLÍČKOVÁ ANTÉNA NAPÁJENÁ MIKROPÁSKOVÝM VEDENÍM.....	18
OBR. 2.2	GEOMETRIE DVOUFREKVENČNÍHO PLANÁRNÍHO MONOPÓLU TIŠTĚNÉHO NA SUBSTRÁTU, [4].....	19
OBR. 2.3	STRUKTURA ŠTĚRBINOVITÉHO DIPÓLU.	20
OBR. 2.4	PRINCIP GENERACE SIERPINSKÉHO MONOPÓLU.	20
OBR. 3.1	TYPICKÁ KONSTRUKCE JEDNOPÁSMOVÉ ANTÉNY PIFA, [4].....	22
OBR. 3.2	ANTÉNY PIFA: A) ZEMNÍ ROVINA POD ZÁŘIČEM, B) ZÁŘIČ MIMO ZEMNÍ ROVINU.	23
OBR. 3.3	ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POLE MEZI FLÍČKEM A ZEMNÍ ROVINOU.....	24
OBR. 3.4	KONSTRUKCE KAPACITNÍ ZÁTĚŽE NA PIFA ANTÉNĚ, [11].....	25
OBR. 3.5	Vliv H a E_r SUBSTRÁTU NA ŠÍŘKU PÁSMO (VZTAŽENO K $PSV < 2$) A ÚČINNOST ANTÉNY, [6].....	26
OBR. 3.6	DVOUPÁSMOVÁ PIFA ANTÉNA SE ŠTĚRBINOU, [1].	27
OBR. 3.7	DVOUPÁSMOVÉ ANTÉNY: A) S ODDĚLENÝMI VĚTVEMI, B) S PARAZITNÍM ELEMENTEM, [1].....	28
OBR. 4.1	PŘÍČNÝ ŘEZ VÝCHOZÍ KONSTRUKCÍ.....	30
OBR. 4.2	ROZMĚRY VÝSLEDNÉHO ZÁŘIČE [MM].....	31
OBR. 4.3	ZÁVISLOST PSV NA FREKVENCI U PIFA ANTÉNY.	31
OBR. 4.4	ROZLOŽENÍ PROUDU NA PIFA ANTÉNĚ: A) 925 MHz, B) 1795 MHz.....	32
OBR. 4.5	VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY PIFA ANTÉNY VE 3D ZOBRAZENÍ.....	33
OBR. 4.6	VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY PIFA ANTÉNY V ROVINĚ XY.....	34
OBR. 5.1	VÝCHOZÍ UMÍSTĚNÍ VRSTVOVÉHO MODELU PRSTU VŮČI ANTÉNĚ ($Z_{PRSTU} = 0$).	36
OBR. 5.2	TYPICKÁ POZICE RUKY VŮČI ANTÉNĚ V DATOVÉM REŽIMU MOBILNÍHO ZAŘÍZENÍ ($Z_{RUKY} = 0$).....	37
OBR. 5.3	ZÁVISLOST PSV NA FREKVENCI PIFA ANTÉNY V BLÍZKOSTI LIDSKÉ TKÁNĚ (MODEL Y PRSTŮ UMÍSTĚNÝ NAD STŘEDEM ZÁŘIČE ANTÉNY, $Z = 20$ MM).	38
OBR. 5.4	ZÁVISLOST REZONANČNÍCH FREKVENCÍ ANTÉNY PIFA NA POSUNU PRSTU VE SMĚRU OSY Z , POBLÍŽ ZÁŘIČE ANTÉNY.	39
OBR. 5.5	ZMĚNA IMPEDANČNÍHO PŘÍZPŮSOBNÍ PIFA ANTÉNY PŘI TYPICKÉ POZICI RUKY V DATOVÉM REŽIMU MOBILNÍHO ZAŘÍZENÍ ($Z = 0$ MM).	40
OBR. 5.6	ZÁVISLOST REZONANČNÍCH FREKVENCÍ ANTÉNY PIFA NA POSUNU RUKY VE SMĚRU OSY Z	41
OBR. 6.1	MODEL VLASTNÍ RUKY V TYPICKÉ POZICI PRO DATOVÝ REŽIM MOBILNÍHO ZAŘÍZENÍ.	44
OBR. 6.2	ZMĚNA IMPEDANČNÍHO PŘÍZPŮSOBNÍ PIFA ANTÉNY PŘI TYPICKÉ POZICI VLASTNÍ RUKY V DATOVÉM REŽIMU MOBILNÍHO ZAŘÍZENÍ.	45
OBR. 6.3	Vliv VLASTNÍ RUKY NA VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY ANTÉNY V ROVINĚ XY.....	47
OBR. 7.1	VÝCHOZÍ BOD PRO NÁVRH PŘÍZPŮSOBOVACÍHO OBVODU.....	49
OBR. 7.2	ZOBRAZENÍ PRVNÍHO PŘÍZPŮSOBOVACÍHO OBVODU NA SMITHOVĚ DIAGRAMU.	50
OBR. 7.3	ZOBRAZENÍ DRUHÉHO PŘÍZPŮSOBOVACÍHO OBVODU NA SMITHOVĚ DIAGRAMU.....	50
OBR. 7.4	ZOBRAZENÍ TŘETÍHO PŘÍZPŮSOBOVACÍHO OBVODU NA SMITHOVĚ DIAGRAMU.	51
OBR. 7.5	ROZMĚRY NAVRŽENÉHO PŘÍZPŮSOBOVACÍHO OBVODU [MM].	52
OBR. 7.6	SCHÉMA ZAPOJENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PŘÍZPŮSOBOVACÍHO OBVODU.	52
OBR. 7.7	MĚŘENÍ ROZPTYLOVÝCH PARAMETRŮ PŘÍZPŮSOBOVACÍHO OBVODU.	53
OBR. 7.8	ZMĚŘENÁ KOMPENZACE VLIVU VLASTNÍ RUKY Z AGARU NA PIFA ANTÉNU.....	53

Seznam tabulek

TAB. 4.1 KMITOČTOVÉ ROZSAHY PÁSEM GSM, [12].	29
TAB. 5.1 TYPICKÉ HODNOTY PARAMETRŮ LIDSKÉ TKÁNĚ, [2],[16],[17].	37
TAB. 6.1 DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ POUŽITÝCH K VÝROBĚ FANTOMU RUKY, [21].	43

Úvod

Zařízení pro bezdrátovou komunikaci jsou v dnešní době téměř všudypřítomné. Jejich prostřednictvím dochází k přenosu různých typů signálů, např. rádiového, televizního či mobilního. Díky moderním elektronickým součástkám dochází k neustálému zmenšování rozměrů těchto zařízení a podobné požadavky jsou kladeny také na jejich antény. Návrhem antény vhodné pro mobilní aplikace se zabývá tato práce.

První ruční mobilní telefon pro použití v buňkových systémech byl Motorola Dyna TAC 8000X, představen v roce 1983. Jako anténa byl použit půlvlnný rukávový dipól, což je výkonná anténa, nicméně její délka (176 mm pro frekvenci 850 MHz) je značně nevyhovující, [1].

Se značným rozvojem buňkových systémů vzrůstal také počet uživatelů mobilních telefonů. Došlo k poklesu cen zařízení a díky hustému pokrytí území základnovými stanicemi již nebyly požadavky na výkon antén mobilních telefonů tak obrovské.

Postupně se začaly na trhu objevovat bičíkové monopóly s poloviční délkou, které se vyráběly rovněž v teleskopické verzi. Dalším používaným typem antén jsou pahýlové antény. Jejich délka je v jednotkách centimetrů a jako zářič jsou použity dráty zatočené do spirály. Na konci minulého století pahýlové antény trhu mobilních telefonů dominovaly, [1].

Dalším typem antén, které vstoupily na trh koncem 20. století, byly antény interní. Dosahují podobných výkonů jako pahýlové, jsou však vhodnější především z mechanického hlediska (zabudovány uvnitř, odolné nárazům). Oproti předchozím typům mají nevýhodu těsné blízkosti ruky či hlavy uživatele, kterou je třeba při návrhu brát v úvahu. Používají se například mikropáskové antény typu PIFA, ale také skládané monopóly či smyčkové antény. Na poli mobilních telefonů se dnes výhradně používají právě různé typy interních antén.

Přítomnost uživatele je třeba zkoumat při návrhu antén ze dvou důvodů. Jedním z nich je vliv na výkon antény. Uživatel představuje velké dielektrické a ztrátové tělo, které ovlivňuje parametry antény (impedanci, vyzařování a účinnost). Druhým hlediskem je vliv elektromagnetického záření na uživatele. Pohlcení elektromagnetické energie lidským tělem se vyčísluje pomocí měrného absorbovaného výkonu (SAR). O parametru SAR se často kriticky veřejně diskutuje, jako o potenciálním zdravotním nebezpečí. Výrobci mobilních telefonů musí splnit určitou maximální přípustnou úroveň SAR, [2].

Cílem této práce je seznámit se s metodami zmenšování fyzických rozměrů mikropáskových antén, zejména s anténami typu PIFA. Dvoupásmovou PIFA anténu

navrhnout v simulátoru elektromagnetického pole, následně vyrobit a její vlastnosti ověřit měřením. Dále pak zkoumat vliv uživatele na vlastnosti navržené a vyrobené antény v datovém režimu mobilního zařízení. Na základě získaných poznatků poté tento vliv eliminovat použitím vhodného přizpůsobovacího obvodu.

1 Elektricky malé antény

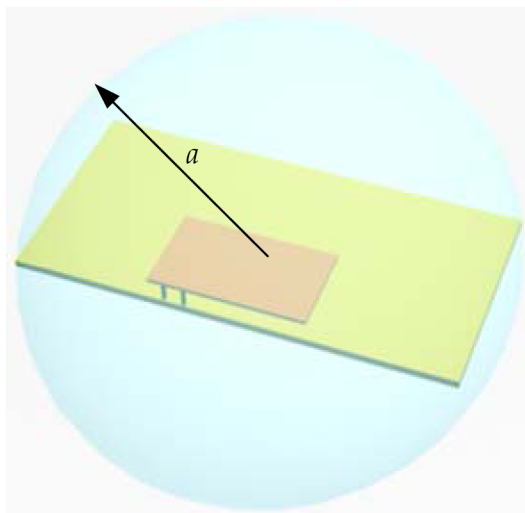
Trend požadavku na malou velikost bezdrátových zařízení a jejich antén neustále pokračuje. Vzhledem k výkonovým omezením a limitům u malých antén je však potřebné rozlišovat mezi fyzicky malými a elektricky malými anténami.

Při frekvencích vyšších než 2 nebo 3 GHz, kde fyzicky malé antény mají potřebnou elektrickou délku a snadno tedy splňují výkonové požadavky, nejsou elektricky malé antény potřeba. V nižších kmitočtových pásmech, s vlnovou délkou od cca 15 cm do několika metrů (nebo větší), je často typický rozměr $\lambda/2$ či $\lambda/4$ příliš velký, tudíž nevhodný pro mobilní zařízení a mnoho dalších aplikací.

Pro rozlišení mezi fyzickou a elektrickou velikostí antény je definována elektrická velikost antény z hlediska zabraného objemu vztaženého k pracovní vlnové délce. Elektricky malá anténa je definována podmínkou [2]

$$k \cdot a \leq 0,5 , \quad (1.1)$$

kde k je vlnové číslo volného prostoru ($2\pi/\lambda$) a a je poloměr koule ohraničující maximální rozměr antény (viz obr. 1.1). Hodnota $k \cdot a = 0,5$ tedy reprezentuje objem koule, který je roven hodnotě $\lambda^3/48\pi^2$.



Obr. 1.1 Grafické znázornění parametru a u elektricky malé antény.

1.1 Základní parametry antén

Impedance, zisk a šířka pásma patří mezi nejdůležitější parametry, které nás zajímají při návrhu malých antén. V mnoha aplikacích jsou důležité rovněž vyzařovací a polarizační vlastnosti. Návrh těchto parametrů je však, díky typickému vícecestnému šíření signálu a nemožnosti předpovědi v jaké poloze bude bezdrátové

zařízení koncovým uživatelem drženo, u malých antén obtížný a není na něj kladen velký důraz.

Vstupní impedance antény je definována

$$Z_A(\omega) = R_A(\omega) + jX_A(\omega) , \quad (1.2)$$

kde $R_A(\omega)$ je frekvenčně závislý vstupní odpor, který se skládá z vyzařovacího odporu $R_r(\omega)$ a ztrátového odporu antény $R_l(\omega)$, $X_A(\omega)$ je frekvenčně závislá reaktance záření.

Účinnost záření antény, $\eta_r(\omega)$, je definována jako poměr vyzařovacího odporu k celkovému vstupnímu odporu

$$\eta_r(\omega) = \frac{R_r(\omega)}{R_A(\omega)} = \frac{R_r(\omega)}{R_r(\omega) + R_l(\omega)} . \quad (1.3)$$

Poměr stojatých vln (PSV) je používán k vyjádření míry impedančního přizpůsobení mezi anténou, přenosovým vedením a vysílačem/přijímačem. PSV je dán vztahem

$$\text{PSV}(\omega) = \frac{1 + |\Gamma(\omega)|}{1 - |\Gamma(\omega)|} , \quad (1.4)$$

kde $\Gamma(\omega)$ je činitel odrazu

$$\Gamma(\omega) = \frac{Z_A(\omega) - Z_{CH}}{Z_A(\omega) + Z_{CH}} \quad (1.5)$$

a Z_{CH} je charakteristická impedance přenosového vedení připojeného k anténě. Impedance Z_{CH} je považována za čistě reálnou, ve většině případů nabývá hodnoty 50 Ω . Činitel odrazu je shodný s rozptylovým parametrem S_{11} a často je používán v decibelovém vyjádření

$$S_{11}(\omega)[\text{dB}] = \Gamma(\omega)[\text{dB}] = 20 \cdot \log_{10} |\Gamma(\omega)| . \quad (1.6)$$

Ideální impedanční přizpůsobení nastává pro hodnoty $\text{PSV} = 1$, $\Gamma = 0$. Pro hodnocení kvality přizpůsobení je možné použít tyto hodnoty [3]:

- velmi dobré přizpůsobení $\text{PSV} < 1,1$ (např. televizní vysílače),
- dobré přizpůsobení $\text{PSV} < 1,5$ až 2 (běžná zařízení),
- vyhovující přizpůsobení $\text{PSV} < 3$ až 5 (nenáročná zařízení).

Realizovatelný zisk, G , malých antén je funkcí účinnosti záření, činitele odrazu a směrovosti, D . Lze jej vyjádřit vztahem¹ [2]

$$G(\omega) = \eta_r(\omega) \cdot (1 - |\Gamma(\omega)|^2) \cdot D(\omega) , \quad (1.7)$$

¹ Vztah (1.7) předpokládá, že nedochází ke ztrátám vlivem špatné polarizace.

kde výraz $(1-|\Gamma(\omega)|^2)$ udává ztráty nepřizpůsobením mezi anténou a vysílačem. První dva výrazy ve vztahu (1.7) vyjadřují celkovou účinnost antény, $\eta_o(\omega) = \eta_r(\omega) \cdot (1-|\Gamma(\omega)|^2)$. Realizovatelný zisk se často vyjadřuje v logaritmickém vyjádření

$$G(\omega)[\text{dBi}] = 10 \cdot \log_{10} G(\omega) \quad (1.8)$$

vůči izotropnímu zářiči, případně vůči půlvlnnému dipólu. Pro přepočítání platí vztah

$$G(\omega)[\text{dBd}] = G(\omega)[\text{dBi}] - 2,15 . \quad (1.9)$$

Každou malou anténu lze impedančně přizpůsobit k určité frekvenci. Přizpůsobovací obvod může být obsažen již ve struktuře antény nebo také vytvořen pomocí externího prvku. Impedanční přizpůsobení ovšem často přináší přídavné ztráty, které snižují celkovou účinnost antény.

Dalším problémem nízkých hodnot $k \cdot a$ u antén je úzká pracovní šířka pásma. Malé antény s vysokou účinností a úzkou šířkou pásma jsou velmi náchylné k frekvenčnímu rozladění od nedalekých objektů. Pouze malá změna rezonanční frekvence pak znamená značné zvýšení PSV na požadované frekvenci, tudíž také snížení realizovatelného zisku antény.

Vzhledem k tomu, že definice šířky pásma je víceznačná, používá se často k její vyjádření u malých antén činitel jakosti (Q). Šířka pásma i Q jsou definovány pro přizpůsobenou anténu, jejíž vstupní reaktance je rovna nule na frekvenci ω_0 . Činitel jakosti Q přizpůsobené antény je definován jako poměr reaktanční energie (W) k přijatému výkonu (P_A) jako [2]

$$Q(\omega_0) = \frac{\omega_0 \cdot W(\omega_0)}{P_A(\omega_0)} . \quad (1.10)$$

Při definici šířky pásma je využito skutečnosti, že Q a šířka pásma jsou nepřímo úměrné v celém frekvenčním rozsahu. Je zavedena frakční šířka pásma, $FBW_V(\omega_0)$, jako [2]

$$FBW_V(\omega_0) = \frac{\omega_+ - \omega_-}{\omega_0} , \quad (1.11)$$

kde ω_+ a ω_- jsou frekvence nad a pod ω_0 , kde PSV je rovno určené libovolné hodnotě označené s . Mezi frakční šířkou pásma a činitelem jakosti platí vztah [2]

$$Q(\omega_0) = \frac{2\sqrt{\beta}}{FBW_V(\omega_0)} , \quad \sqrt{\beta} = \frac{s-1}{2\sqrt{s}} \leq 1 . \quad (1.12)$$

Pomocí fyzikální veličiny SAR se vyjadřuje množství energie absorbované živou tkání, která je vystavena elektromagnetickému poli. Určí se pomocí vztahu [2]

$$\text{SAR} = \frac{\sigma}{2\rho} \cdot |\mathbf{E}|^2 , \quad (1.13)$$

kde σ je měrná elektrická vodivost tkáně a ρ je hustota tkáně. Jedná se o důležitý parametr při diskuzi o zdravotních rizicích spojovaných s absorpcí elektromagnetické energie. Jednotkou je W/kg. Evropský limit činí 2,0 W/kg v deseti gramech hlavy a trupu. V USA a Austrálii je hodnota 1,6 W/kg, kdy hodnota je udávána na jeden gram tkáně, [1].

1.2 Základní omezení malých antén

Dosažitelný zisk u elektricky malých antén není teoreticky omezen s výjimkou faktu, že nemůže převýšit směrovost antény. Prakticky realizovatelný zisk je však limitován mnoha faktory. K dosažení maximálního zisku je potřeba správné impedanční přizpůsobení včetně minimalizace ztrát na přizpůsobovacích obvodech, dosažení maximální možné účinnosti záření volbou vhodných materiálů, minimalizací možnosti rozladění okolím antény a zajištěním vyzařování veškerého dostupného výkonu s určenou polarizací.

Činitel jakosti má svou minimální teoretickou mez, která je funkcí velikosti malé antény vztahované k pracovní vlnové délce. Vzhledem k tomu, že Q a šířka pásma jsou nepřímo úměrné, existuje odpovídající maximální šířka pásma, kterou lze dosáhnout pomocí malých antén.

Běžně používaný vztah pro vyjádření spodní meze činitele jakosti malých antén byl definován fyzikem Chu v roce 1948 (Chuův teorém) jako [2]

$$Q_{lb} = \eta_r \cdot \left(\frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka} \right). \quad (1.14)$$

Uvedený vztah ukazuje také, že pomocí ztrátové antény můžeme dosáhnout nižší Q , a tedy větší šířku pásma, než s jejím bezeztrátovým ekvivalentem.

Použitím vztahů (1.12) a (1.14), lze pro horní mez frakční šířky pásma napsat

$$FBW_{vub} = \frac{1}{\eta_r} \cdot \frac{(ka)^3}{1 + (ka)^2} \cdot \frac{s - 1}{\sqrt{s}}. \quad (1.15)$$

2 Mikropáskové antény

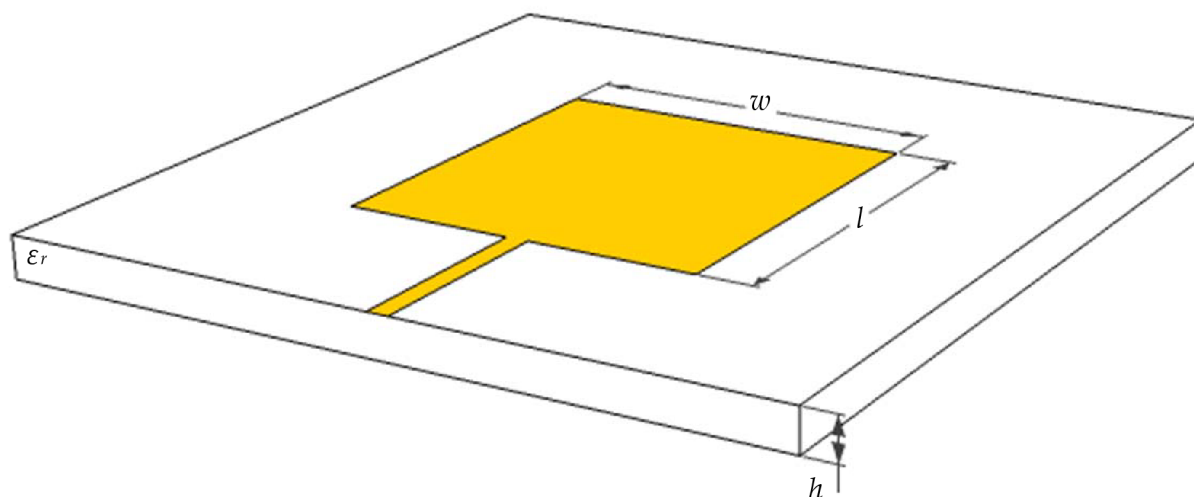
Mikropáskové (planární) antény se staly v poslední době velice rozšířeným druhem antén. Jsou to antény s nízkým profilem, které využívají záření elementární plošky, Huygensův princip. Kromě rozsáhlého využití v mobilních zařízeních, se také používají v letecké a radarové technice, či v satelitní komunikaci.

Mezi velké výhody mikropáskových antén patří zejména malé rozměry, nízká hmotnost a díky stejné výrobní technologii s plošnými spoji také nízká cena a dobrá reprodukovatelnost. Nevýhoda těchto antén spočívá v nízké efektivitě vyzařování, malé výkonové zatížitelnosti, či úzkém pracovním pásmu. Rovněž může docházet k parazitnímu vyzařování napájení a tím k deformaci směrové charakteristiky antény.

2.1 Typy mikropáskových antén

2.1.1 Flíčkové antény

Flíčkové (patchové) antény jsou nejjednoduššími a nejčastěji používanými mikropáskovými anténami. Typický příklad těchto antén je uveden na obr. 2.1. Skládají se z vodivého flíčku (anglicky *patch*) o rozměrech $w \times l$, které jsou přibližně $\lambda/2$. Flíček je nanesený na dielektrickém substrátu s relativní permitivitou ϵ_r a výškou h . Druhá strana substrátu je celá z vodivého motivu a tvoří zemnicí desku. Zemnicí plocha má funkci reflektoru, díky kterému září anténa jedním směrem a do opačného směru je záření naopak potlačeno.

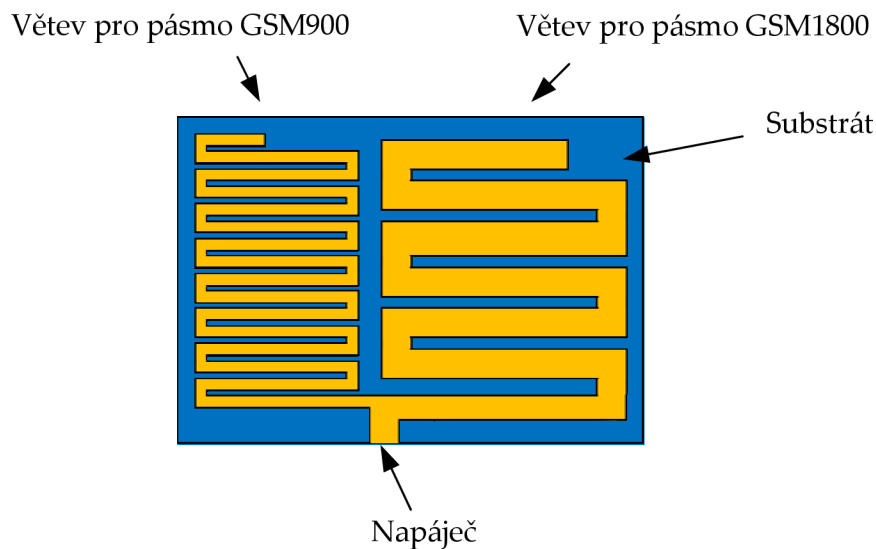


Obr. 2.1 Mikropásková flíčková anténa napájená mikropáskovým vedením.

2.1.2 Úzkoprofilové monopóly

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, pracují klasické monopólové antény s délkou $\lambda/4$. Vzhledem k této délce je není možné integrovat dovnitř zařízení. Řešení spočívá v ohybu monopólů a tím zmenšení jejich rozměrů. Ohnutý tvar může mít přímo drát nebo jej lze provést vyleptáním do substrátu.

Na obr. 2.2 je zobrazen příklad možné konstrukce dvoufrekvenčního planárního dipólu tištěného na substrátu, který byl uveden v [4]. Anténa je tvořena dvěma pásky, které jsou meandrově tvarované a vodivě spojené v místě napájení. Levý pásek je delší a užší, navržen pro frekvenci 900 MHz. Pravá větev je kratší a širší, rezonuje na frekvenci 1800 MHz. Motiv antény je natištěn na dielektrickém substrátu.



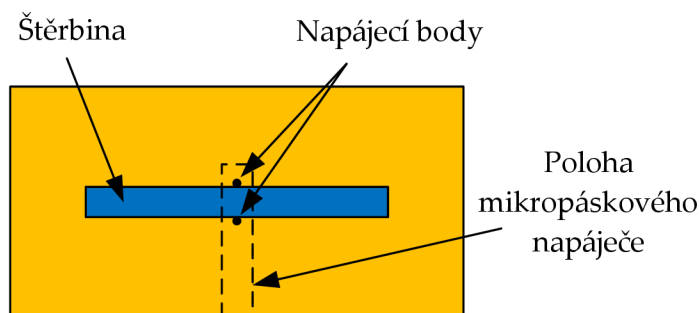
Obr. 2.2 Geometrie dvoufrekvenčního planárního monopólu tištěného na substrátu, [4].

Výhodou meandrových antén jsou malé rozměry a jednoduchost výroby, problémem pak malá šířka pásma. Rovněž zisk a vyzařovací účinnost nejsou velké, pro dnešní dobu však dostačující. Tyto antény se v praxi používají často složené z více větví pro více pásem. Tyto větve lze prostorově skládat, např. do kvádrů, pro snadnou integraci do pouzdra přístroje. Dochází však k vzájemnému ovlivňování a návrh je pak obtížný.

2.1.3 Štěrbínové antény

Tyto antény se skládají ze štěrbin vyříznuté do vodivé desky. Na obr. 2.3 je zobrazen příklad štěrbinovitého dipólu. Vyzařovací charakteristika antény je shodná s charakteristikou klasického dipólu stejné délky, orientace vektorů intenzit \mathbf{E} a \mathbf{H} je však opačná.

V případě napájení mikropáskovým vedením je napáječ umístěn z druhé strany substrátu, kolmo na štěrbinu. Pole mikropáskového vedení vybuduje štěrbinu. Pro dokonalé vybudování je pásek zkratován přes dielektrický substrát k jednomu napájecímu bodu, [5].

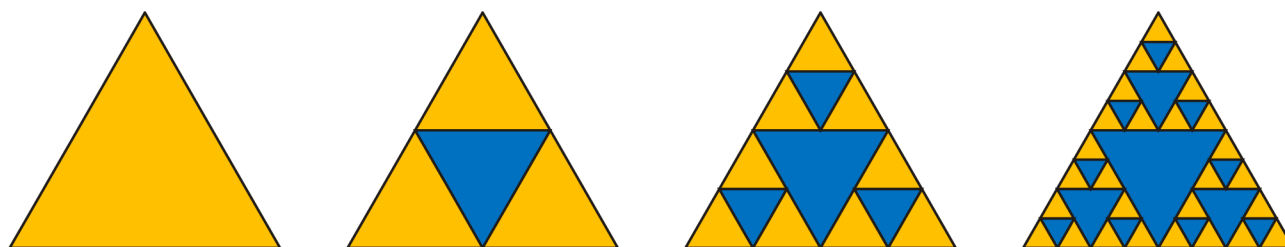


Obr. 2.3 Struktura štěrbinovitého dipólu.

2.1.4 Fraktální antény

Fraktální antény patří mezi typické zástupce miniaturních antén. Jsou založeny na fraktálech, které představují útvary složené z velkého počtu menších útvarů podobného tvaru. Fraktály mohou být nejlépe popsány a generovány pomocí iteračních procesů, které vedou ke vzniku soběpodobných a soběpříbuzných struktur. Tyto útvary se rovněž vyskytují hojně v přírodě. Jejich geometrií lze modelovat mnoho přírodních útvarů, například hory, mraky, sněhové vločky, řeky či stromy, [6].

Na obr. 2.4 je znázorněn typický příklad fraktální antény – Sierpinského monopól. Vlevo je zobrazen rovnostranný trojúhelník jako výchozí útvar a dále pak první tři iterace generace této antény. Jedná se o vícepásmovou planární anténu, u které počet frekvenčních pásem závisí na počtu iterací fraktálu. Anténa je napájena v jednom ze svých vrcholů, [5].



Obr. 2.4 Princip generace Sierpinského monopólu.

2.2 Napájení mikropáskových antén

Přenos signálu ze svorek antény na vstup přijímače je zprostředkován vysokofrekvenčním vedením zvaným napáječ. Napájení mikropáskových antén se dělí do dvou základních kategorií podle typu buzení na kontaktní (galvanické) a bezkontaktní (pomocí elektromagnetické vazby).

Konktakním napájením je myšleno vodivé spojení mikropáskového vedení na okraji flíčku nebo buzení prostřednictvím koaxiální sondy. Jedná se o nejčastěji používané způsoby. U napájení elektromagnetickou vazbou je typické buzení vazební štěrbinou či otevřeným koncem vedení. Uvedené způsoby lze kombinovat. Typicky používaná charakteristická impedance napáječů je 50Ω .

2.3 Analýza mikropáskových antén

V dnešní době výkonných počítačů hrají v oblasti elektromagnetismu hlavní roli numerické metody. Jedna z možností klasifikace těchto metod je, zda vycházejí z diferenciálního nebo integrálního tvaru Maxwellových rovnic. Pro řešení diferenciálních rovnic se používá metoda konečných diferencí (finite difference method, FDM) nebo metoda konečných prvků (finite element method, FEM). Integrální tvar Maxwellových rovnic se řeší nejčastěji pomocí metody momentů (method of moments, MoM).

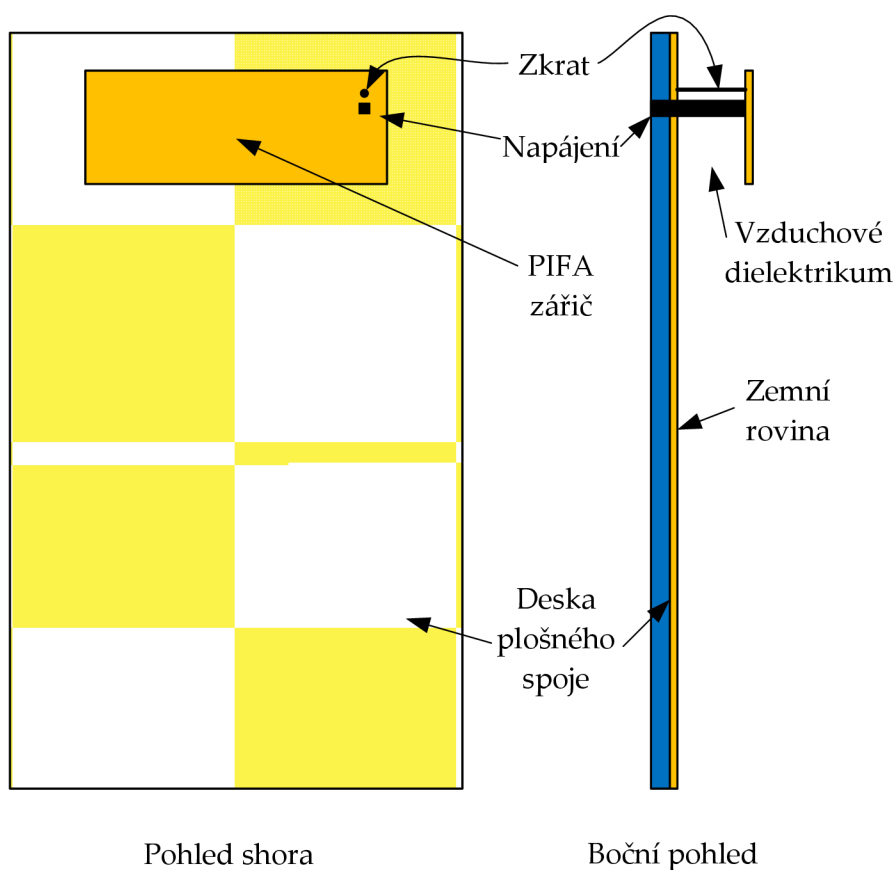
Pokud se Maxwellovy rovnice řeší ve frekvenční oblasti (Frequency Domain, FD), tak je anténní struktura analyzována na jednotlivých kmitočtech a výstupem je pouze harmonicky ustálený stav. Při řešení v časové oblasti (Time Domain, TD) je struktura vybudena širokopásmovým pulzem a následná analýza odezvy umožňuje získat širokopásmovou odezvu antény na jeden běh.

V současné době je k dispozici řada komerčních sofistikovaných simulátorů elektromagnetického pole. Jedním z nich je program CST Microwave Studio, u kterého je nejčastěji využívána metoda konečných integrálů (finite integration technique, FIT), použitá v transient solveru, [7]. Metoda FIT je velmi podobná metodě konečných diferencí v časové oblasti (finite difference time domain, FDTD), diskretizuje však Maxwellovy rovnice v integrální formě.

3 Antény PIFA

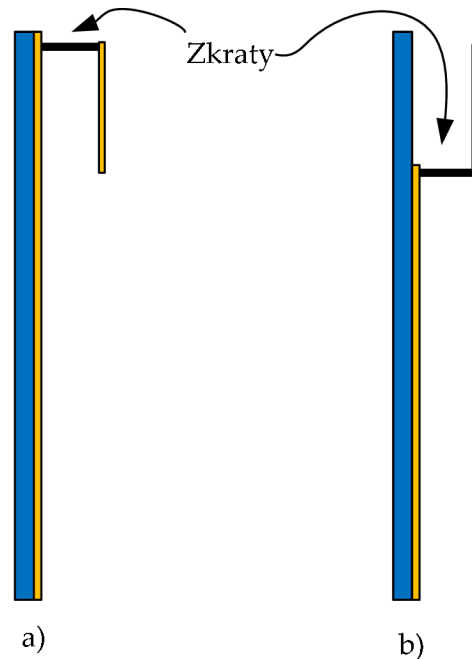
Planární antény typu obrácené F, známé pod zkratkou PIFA (*Planar Inverted-F Antenna*) se řadí v dnešní době mezi nejpoužívanější vícepásmové antény. Díky svým malým rozměrům a snadnému způsobu dosažení vícepásmovosti jsou vhodné pro montáž do celé řady mobilních zařízení. Tyto antény pracují také s dvojitou polarizací. Bez větších polarizačních ztrát je tedy možný příjem signálu v libovolné poloze zařízení.

Na obr. 3.1 je ukázka typické konstrukce jednopásmové antény PIFA s vyzařovací plochou umístěnou nad zemní rovinou. Boční pohled na anténu připomíná tvar písmene F (odtud název). Konstrukce této antény je podobná klasické flíčkové anténě, napájené koaxiální sondou. Klasická flíčková anténa byla popsána v kapitole 2.1.1. Zde jsou použity některé techniky umožňující redukci rozměrů výchozí antény, především použití zkratovacího pinu mezi patchem a zemní plochou.



Obr. 3.1 Typická konstrukce jednopásmové antény PIFA, [4].

I když slovo PIFA znamená „planární anténa typu obrácené F“, často jsou tuto zkratkou označovány všechny antény, které obsahují napájecí a zkratovací pin, vyrobený z plochého vodiče. Kromě typické konstrukce uvedené na obr. 3.1 se používá uspořádání se zářičem umístěným také paralelně se zemní rovinou, avšak pod zářičem se již zemní plocha nenachází. Tento typ antény je také označován PIFA, i když jde spíše o úzkoprofilový monopól, zkratovací pin ovlivňuje pouze impedanční přizpůsobení, [8].



Obr. 3.2 Antény PIFA: a) zemní rovina pod zářičem, b) zářič mimo zemní rovinu.

Anténa se zářičem mimo zemní rovinu (obr. 3.2b) skýtá několik výhod oproti typické konstrukci. Anténa je jednodušší na výrobu. Zářič lze umístit do stejné roviny jako zemní plochu a tím vše umístit na jeden substrát [9]. Celkové provedení zabírá méně prostoru, proto lze vyrábět velmi tenké zařízení.

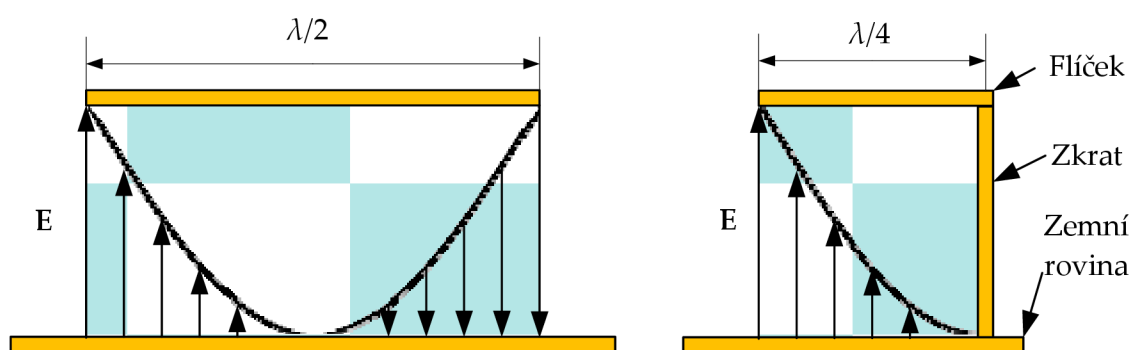
Pokud v blízkosti antény z obr. 3.2b umístíme kovový či dielektrický předmět, dojde k jejímu rozladění, které je markantnější než u typické konstrukce PIFA. Problém pak nastává s návrhem vhodného krytu zařízení, rovněž při držení rukou či v blízkosti hlavy. Dalším problémem je dodržení nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu (SAR), kvůli absenci stínění. SAR směrem k hlavě lze omezit umístěním antény do spodní části zařízení. Anténa zde sice nepřijde do kontaktu s hlavou, avšak je obkloповána rukou uživatele a dochází k degradaci její účinnosti [1]. Aby anténa správně pracovala v přítomnosti rukou či hlavy a zároveň byly splněny hygienické limity, je vhodnější použít anténu se zemní rovinou pod zářičem.

3.1 Techniky pro redukci rozměrů

Již v úvodní kapitole bylo zmíněno, že v elektronice jsou neustálé požadavky na zmenšování rozměrů elektronických součástek a zařízení, a ani antény nejsou výjimkou. Flíčková anténa má rozměry patche $\lambda/2 \times \lambda/2$, což znamená pro frekvenční rozsah systému GSM900 rozměry přibližně $16 \times 16 \text{ cm}^2$. Tyto hodnoty jsou pro kapesní zařízení nepřijatelné, proto je potřeba rozměry antén eliminovat, ale zároveň výrazně neovlivnit jejich výkon. V následujících kapitolách jsou uvedeny některé techniky pro miniaturizaci antén.

3.1.1 Zkratování hran antény

Značné redukce rozměrů antény dosáhneme přechodem z $\lambda/2$ struktury na $\lambda/4$ strukturu. Toho docílíme díky znalosti rozložení intenzity elektrického pole v dielektriku mezi flíčkem a zemní rovinnou antény. Rozložení elektrického pole u $\lambda/2$ struktury (viz obr. 3.3) má průběh poloviny periody funkce kosinus. Uprostřed patche se nachází minimální hodnota intenzity (nulová intenzita). V tomto bodě lze tedy vložit zkrat, aniž by došlo k narušení rozložení elektrického pole a tím také rezonančního kmitočtu celé struktury. Můžeme proto polovinu struktury odstranit a tím zmenšit velikost flíčku o polovinu, na délku $\lambda/4$, [10].



Obr. 3.3 Rozložení elektrického pole mezi flíčkem a zemní rovinnou.

3.1.2 Použití zkratovacího pinu

U předchozího způsobu napájení jsme zkratovali flíček se zemní rovinnou podél celé jeho šířky (zkratovací stěna). Pokud budeme tuto šířku zkratu zmenšovat, bude docházet k rezonanci antény na stále nižší frekvenci. Limitní případ zkrácení se nazývá zkratovací pin.

Pokud je zkrat proveden pomocí zkratovacího pinu, první rezonanční frekvence antény je $0,38 \cdot f_{01}$, kde f_{01} odpovídá půlvlnné flíčkové anténě popsané v kapitole 2.1.1. Při použití zkratovací stěny je tato frekvence $0,5 \cdot f_{01}$. Velikost flíčku se dá spočítat z přibližného vztahu, [10]

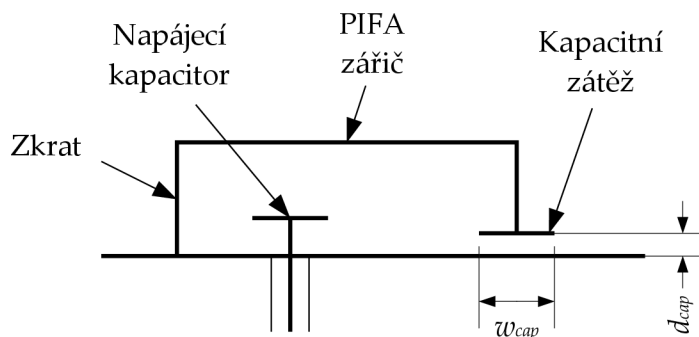
$$w + l \approx \frac{\lambda}{4}. \quad (3.1)$$

Z výše uvedeného vzorce je patrné, že rezonanční frekvence závisí spíše na obvodu flíčku, než na jeho délce.

Při použití zkracovacích technik existuje souvislost mezi vhodnou pozicí napáječe vůči zkratu. Umístěním zkratu mezi flíček a zemní plochu se výrazně mění proudová distribuce antény. V blízkosti zkratu jsou proudy nejvyšší a směrem od něj se zmenšují. Jestliže vstupní odpor definujeme jako poměr napětí a proudu v místě napáječe, bude nejnižší v blízkosti zkratu a se vzdáleností od něj bude stoupat. Napáječ je proto nutné umístit blízko zkratu, kde bude dosaženo přizpůsobení poměrně nízké impedanci 50Ω , [10].

3.1.3 Kapacitní zátěž

Další možností zmenšení rozměrů PIFA antén je zapojení kapacitní zátěže. Kapacitní zátěž lze realizovat přeložením otevřeného konce flíčku kolmo k zemní rovině a přidáním kapacitoru paralelně. Zvětšováním kapacity zátěže se snižuje rezonanční kmitočet antény, zhoršuje se však také impedanční přizpůsobení. Boční schématický pohled na konstrukci je uveden na obr. 3.4. Hodnota kapacitní zátěže, a tím i rezonanční frekvence struktury se doladuje úpravou rozměrů d_{cap} a w_{cap} , [11].



Obr. 3.4 Konstrukce kapacitní zátěže na PIFA anténě, [11].

3.1.4 Substrát s vysokou permitivitou

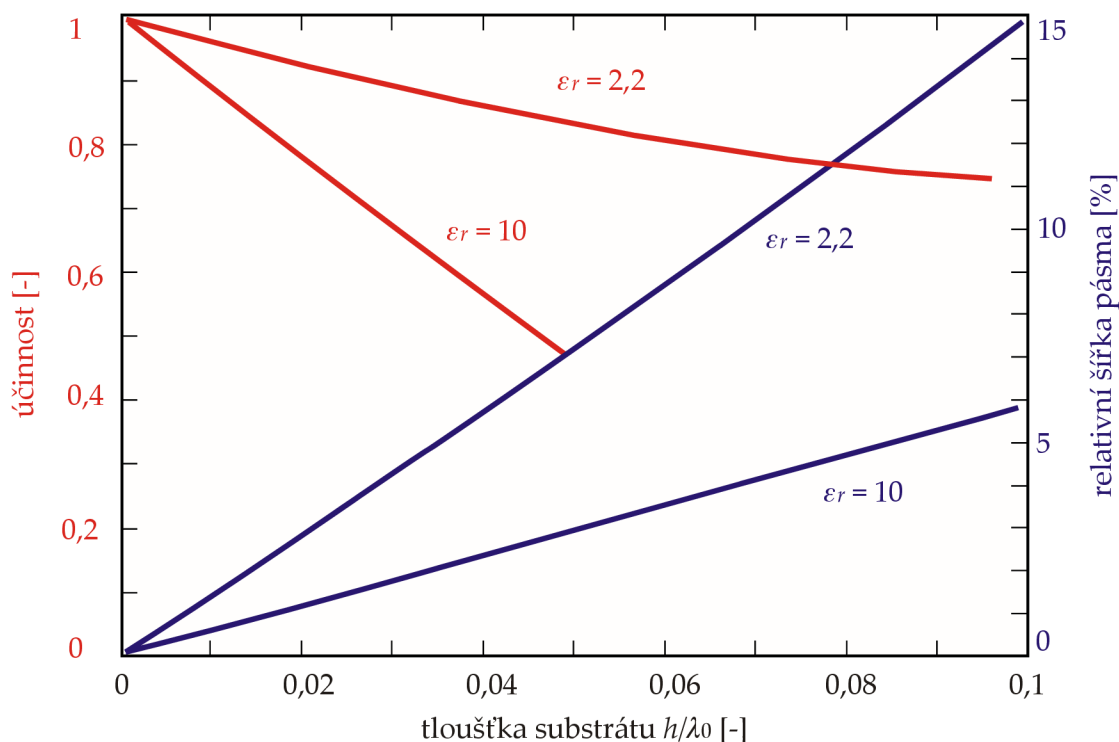
Zmenšení rozměrů antény lze docílit rovněž použitím substrátu s vysokou permitivitou. Vlnová délka v substrátu je nepřímě úměrná odmocnině permitivity ϵ_r . Pokud bude mezi flíčkem a zemní rovinou použit substrát s vysokou permitivitou namísto vzduchu, vlnová délka se ztratně zkrátí. V důsledku toho se zhorší vlastnosti antény, zvýší se také její cena, proto se tato technika v praxi moc nevyužívá.

3.2 Techniky pro zvětšení šířky pásma

Šířka pásma antény B je dle (1.12) nepřímo úměrná k činiteli jakosti Q , který je pro obecný rezonátor definován vztahem [10]

$$Q = \frac{\text{energie uložena}}{\text{energetické ztráty}} \quad (3.2)$$

Na flíčkovou anténu lze pohlížet jako na ztrátový kondenzátor s dielektrikem o vysoké ϵ_r . To má za následek vysoký činitel jakosti Q . Rovněž je známo, že substrát s vysokým ϵ_r má tendenci spíše zadržovat energii, než ji vyzařovat, což značně snižuje šířku pásma. Zvětšení šířky pásma docílíme zvětšením tloušťky substrátu. Snižuje se tak kapacita kondenzátoru (flíčkové antény), což má za následek snížení energie uložené a podle (3.2) také snížení Q . Uvedené poznatky jsou shrnuty na obr. 3.5, který znázorňuje jak se mění permitivita ϵ_r , účinnost a šířka pásma v závislosti na tloušťce dielektrika h . Hodnoty v grafu jsou vztaženy k hodnotě $PSV < 2$. Z grafu je zřejmé, že při rostoucí tloušťce h se zvyšuje šířka pásma a s rostoucí permitivitou ϵ_r naopak B klesá. Účinnost antény se však při růstu h snižuje. V praxi se problémy s šířkou pásma a účinností obvykle řeší použitím vzduchového dielektrika, kde $\epsilon_r \approx 1$. U tloušťky substrátu je pak potřeba zvolit vhodný kompromis mezi potřebnou šířkou pásma a rozumnou účinností záření.



Obr. 3.5 Vliv h a ϵ_r substrátu na šířku pásma (vztaženo k $PSV < 2$) a účinnost antény, [6].

3.3 Vícepásmové antény

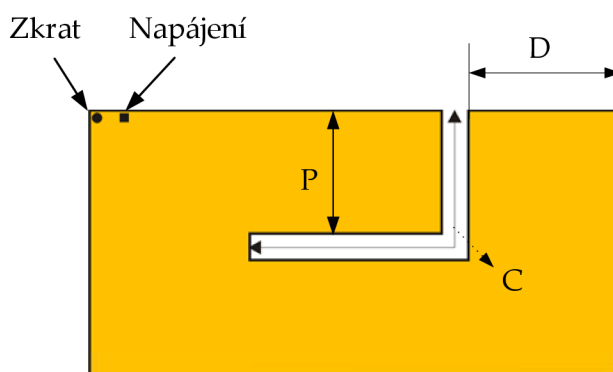
V dnešní době existuje mnoho bezdrátových systémů, které pracují v různých frekvenčních pásmech. Pro každý z těchto systémů je však použití vlastní antény značně neefektivní. Realizace antény pracující ve více pásmech zároveň je proto nezbytná. Pro návrh vícepásmových PIFA antén existuje několik typických způsobů.

3.3.1 Anténa se štěrbinami

Nejpoužívanějším způsobem realizace vícepásmové PIFA antény je vyříznutí štěrbin do flíčku, jak je znázorněno na obr. 3.6. Díky této úpravě pak rezonuje menší plocha ohraničená flíčkem pro vyšší frekvenční pásmo a celý flíček pro pásmo nižší. Anténa obsahuje, podobně jako u jednopásmové PIFA antény, zkratovací a napájecí pásek.

Největší vliv na vlastnosti antény mají dva kritické rozměry D a C . Rozměr P udává štěrbině tvar a nijak výrazně neovlivňuje funkční vlastnosti antény. Vliv kritických rozměrů je následující [1]:

- Vzdálenost D může ovlivnit rezonanční frekvenci nižšího i vyššího frekvenčního pásma a vždy posunuje pásma do protějších směrů. Pokud snížíme D , rezonanční frekvence nižšího pásma vzroste, zatímco vyšší pásmo bude rezonovat na nižší rezonanční frekvenci.
- Délka štěrbin C má vliv pouze na vyšší pásmo. S vzrůstající délkou štěrbin rezonanční frekvence vyššího pásma klesá.



Obr. 3.6 Dvoupásmová PIFA anténa se štěrbinou, [1].

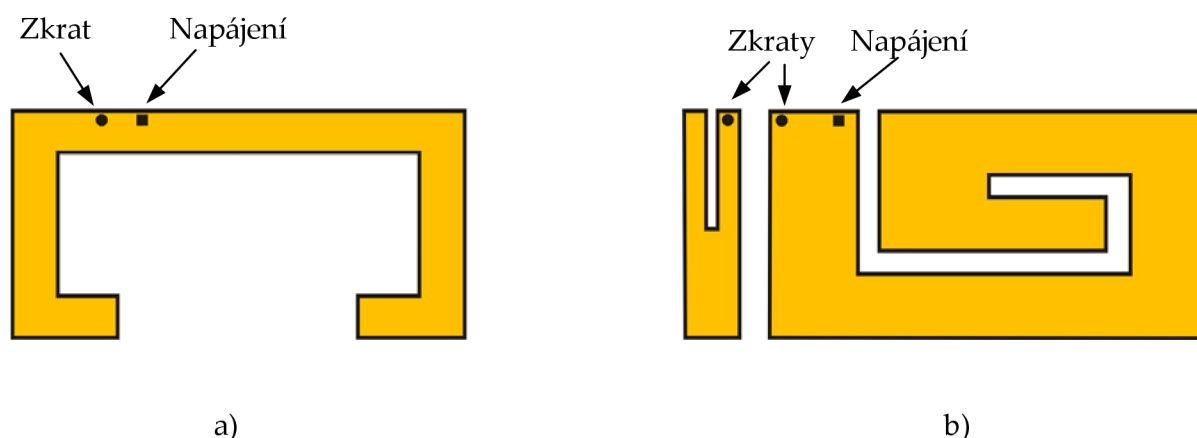
3.3.2 Anténa s oddělenými větvemi

Je-li plocha antény dostatečně velká, je vhodnější použít dvě nezávislé větve k pokrytí nižšího a vyššího kmitočtového pásma odděleně. Příklad takovéto antény je uveden na obr. 3.7a. Anténa je rozdělena do dvou větví pomocí zkratu, napájení je umístěno na delší větvi.

Návrh této antény je jednoduchý. Nejprve je nutné přizpůsobit délku obou větví pro dosažení rezonance v požadovaných pásmech. Následně vyladěním vzdálenosti mezi napájením a zkratem je dosaženo přizpůsobení v nižším frekvenčním pásmu. Pro dosažení přizpůsobení ve vyšším pásmu lze navrhnout jednoduchý přizpůsobovací obvod, [1].

3.3.3 Anténa s parazitním elementem

Pokud je při návrhu antény se štěrbinami (kap. 3.3.1) dosaženo malé šířky pásma, lze ji rozšířit pomocí přídavného parazitního elementu. Na obr. 3.7b je zobrazeno jedno z možných řešení. Parazitní element je elektricky připojen k zemní ploše pomocí zkratovacího drátu. Přímé spojení mezi hlavním a parazitním zářičem zde není, nicméně jsou na sebe vázány elektromagneticky.



Obr. 3.7 Dvoupásmové antény: a) s oddělenými větvemi, b) s parazitním elementem, [1].

I když lze parazitní element použít k „dokrytí“ nižšího pásma, používá se většinou pro pásma vyšší. Vyšší frekvence znamená menší parazitní zářič, návrh je proto jednodušší. Díky přítomnosti parazitního elementu může klesat účinnost hlavního zářiče až o několik dB. Pokud však rezonuje parazitní element na vyšším kmitočtu, je tento nepříznivý efekt pro nižší pásmo zmírněn, [1].

4 Návrh a realizace dvoupásmové PIFA antény

Cílem této části práce je návrh a realizace dvoupásmové PIFA antény pro použití v mobilních pásmech GSM900 a GSM1800. Kmitočtové rozsahy těchto pásem jsou uvedeny v tab. 4.1

Tab. 4.1 Kmitočtové rozsahy pásem GSM, [12].

Název pásma	Frekvenční rozsah - vysílání	Frekvenční rozsah - příjem
GSM900	(890 ÷ 915) MHz	(935 ÷ 960) MHz
GSM1800	(1710 ÷ 1785) MHz	(1805 ÷ 1880) MHz

Pro návrh PIFA antény budou použity techniky popsané v předešlých kapitolách, zejména použití efektivní techniky pro redukci rozměrů - zkracovacího pinu. Pro zachování co nejmenších rozměrů výsledné antény bude dvoupásmovosti dosaženo pomocí jednoduché štěrbiny ve flíčku.

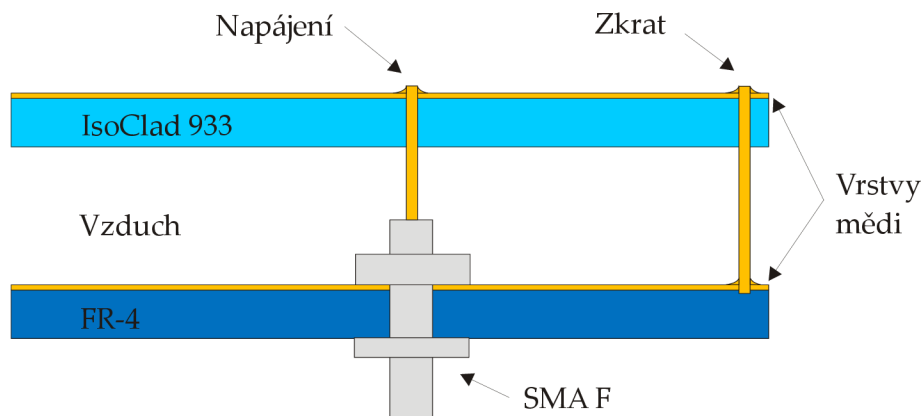
Jelikož neumíme žádnými analytickými vztahy přesně popsat vlastnosti výsledné konstrukce, bude pro analýzu využit simulátor elektromagnetického pole. Jako simulátor elektromagnetického pole byl vybrán komerční produkt CST Microwave Studio a jeho flexibilní nástroj transient solver.

4.1 Výchozí konstrukce antény

Prvním krokem návrhu je určení počátečních rozměrů základního flíčku pro nižší frekvenční pásmo. Rozměry lze určit pomocí vztahu (3.1), ze kterého plyne, že součet délky a šířky flíčku by měl být přibližně $\lambda/4$. Následným krokem je počáteční odhad rozměrů štěrbiny podle obr. 3.6.

Navržený flíček lze vyrobit například z plechu. Toto řešení, zejména řezání štěrbin, klade velmi vysoké nároky na přesnost výroby antény. Z grafu na obr. 3.5 je zřejmé, že nejlepších vlastností dosahuje anténa, pokud je mezi flíčkem a zemní rovinou co nejnižší permitivita. Pokud bude motiv vyleptán na substrát s velmi nízkou permitivitou, dojde pouze k drobnému poklesu účinnosti a šířky pásma, avšak výroba bude jednodušší a přesnější. Flíček bude umístěn na substrátu IsoClad933 ($\epsilon_r = 2,33$, $tg\delta = 0,0016$, $h = 1,524$ mm).

Zemní plocha bude pro jednoduché připojení konektoru realizována rovněž na substrátu. Vzhledem k minimálnímu vlivu substrátu zemní plochy na vlastnosti antény bude použit běžný FR-4 ($\epsilon_r = 4,1$, $tg\delta = 0,02$, $h = 1,58$ mm). Vzdálenost mezi flíčkem a zemní rovinnou je dle obr. 3.5 potřeba zvolit jako kompromis mezi účinností záření a šířkou pásma. Jako vhodná volba se jeví velikost vzduchové mezery 1 cm, neboť použité distanční kroužky využívané při výrobě měří právě 1 cm. Napájecí konektor bude použit SMA female, zkratovací drát z mědi o průměru 1 mm. Jejich výchozí vzájemná vzdálenost bude rovněž simulací upřesněna. Příčný řez výchozí konstrukcí antény je uveden na obr. 4.1. Šířka zemní plochy bude korespondovat s délkou zářiče, její délka je zvolena 120 mm. Délka zemní plochy přibližně odpovídá rozměrům typického mobilního zařízení. Je žádoucí, aby byla co největší, neboť právě větší zemní plocha má pozitivní vliv na výsledné parametry antény, [1].



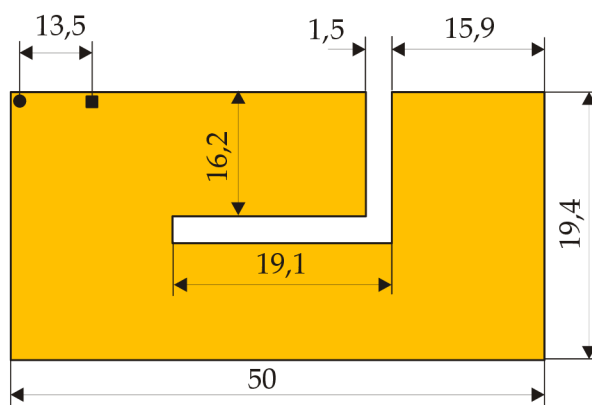
Obr. 4.1 Příčný řez výchozí konstrukcí.

4.2 Výsledná geometrie antény

V simulátoru elektromagnetického pole byl vytvořen detailní 3D model pomocí všech poznatků z předešlé kapitoly. S využitím parametrického rozmítání byly zkoumány změny jednotlivých parametrů (které nejsou pevně určeny) na výsledné elektrické vlastnosti antény. Na základě zjištěných informací byl model postupně upravován. Ve finální fázi byla použita také lokální optimalizace (Trust Region Framework) pro vylepšení navržených hodnot.

Použití vhodné diskretizační sítě k řešení úlohy bylo ověřeno pomocí adaptivního síťování. Při zvětšování diskretizační sítě byly parametry antény pořád shodné a tím zaručeno dostatečně husté nastavení sítě.

Výsledné rozměry zářiče jsou uvedeny na obr. 4.2. Rozměry zemní plochy jsou 50×120 mm².

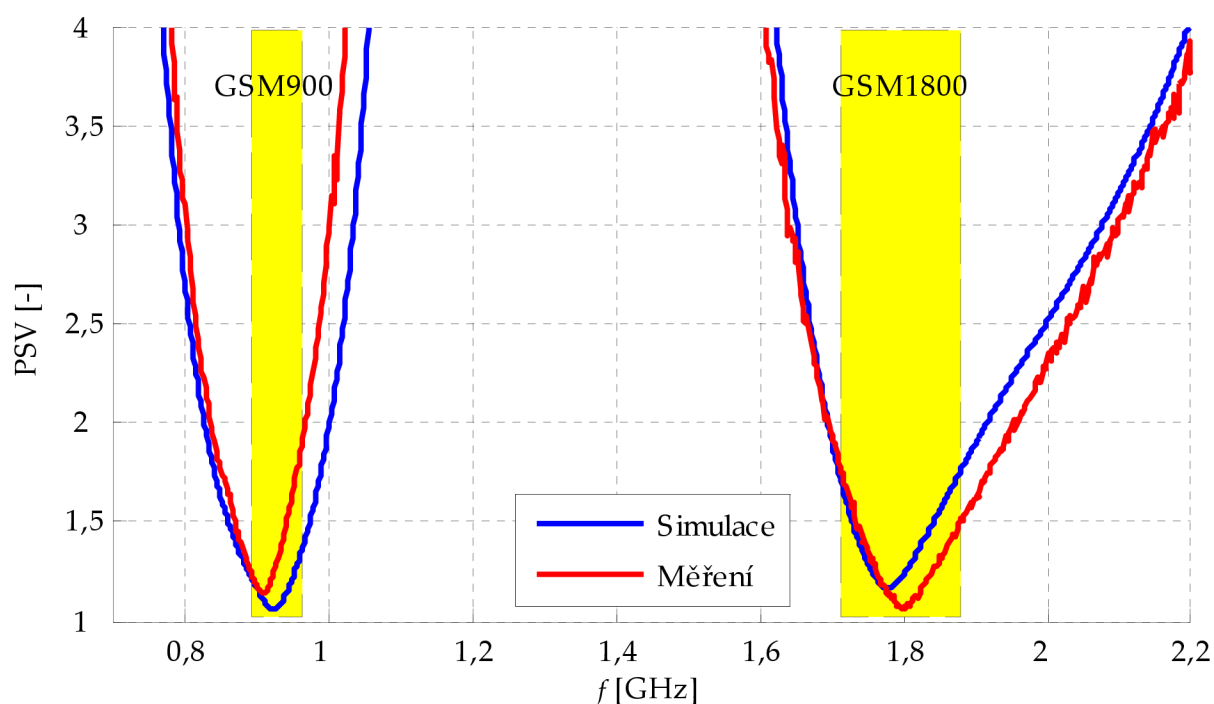


Obr. 4.2 Rozměry výsledného zářiče [mm].

4.3 Parametry antény

Popsaná anténa z předešlé kapitoly byla následně vyrobena. Předlohy desek plošných spojů pro její výrobu jsou uvedeny v příloze A. Její fotografie je pak zobrazena v příloze B.

Měření impedančního přizpůsobení bylo provedeno ve školní laboratoři antén pomocí vektorového obvodového analyzátoru firmy Rohde & Schwarz (R&S ZVL3). Před zahájením měření byl analyzátor včetně připojeného kabelu k měření zkalibrován. K eliminaci asymetrických proudů po plášti koaxiálního kabelu byly na napájecím kabelu v průběhu měření připevněny feritové kroužky. K zamezení vlivu okolních předmětů na měřený průběh směřovala anténa do volného prostoru. Frekvenční závislost PSV je uvedena na obr. 4.3.

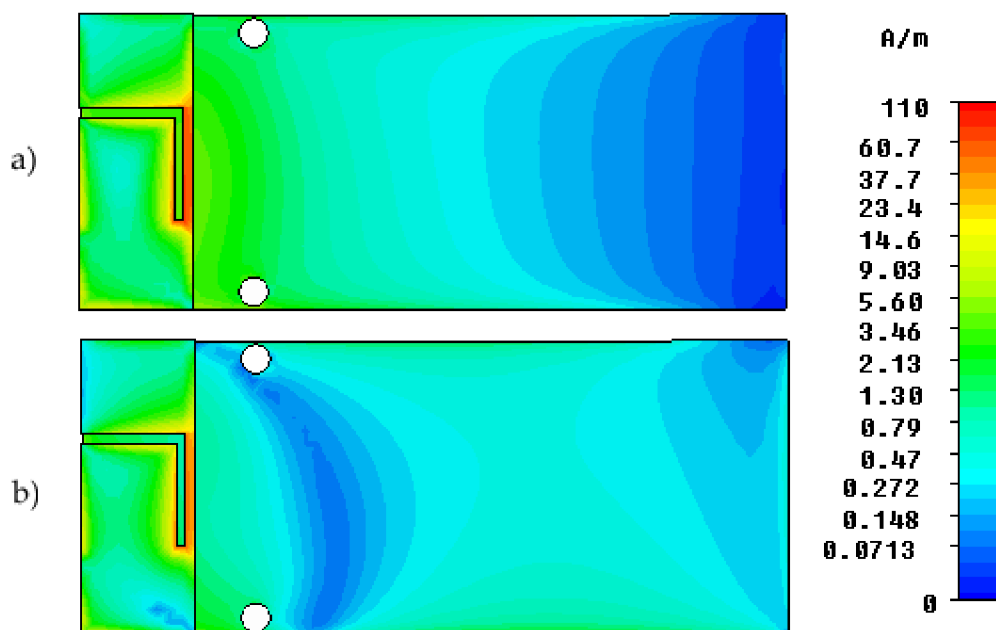


Obr. 4.3 Závislost PSV na frekvenci u PIFA antény.

Z výše uvedené závislosti je vidět, že hodnota $PSV < 2$ u obou zvýrazněných pásem. Dle kap. 1.1 splňují tyto hodnoty podmínku dobrého impedančního přizpůsobení v celém požadovaném frekvenčním rozsahu.

Mezi simulovanými a změřenými hodnotami je poměrně dobrá shoda. U pásma GSM900 je mírný posun k nižšímu rezonančnímu kmitočtu oproti simulaci, u pásma GSM1800 naopak k frekvenci vyšší. Frekvenční posuny mohly nastat nepřesností při výrobě. Podobným nepřesnostem odpovídá zvýšení parametru D dle kap. 3.3.1. Dalšího rozporu se simulací mohlo být dosaženo nepřesným připájením konektoru nebo zkratu k zářiči.

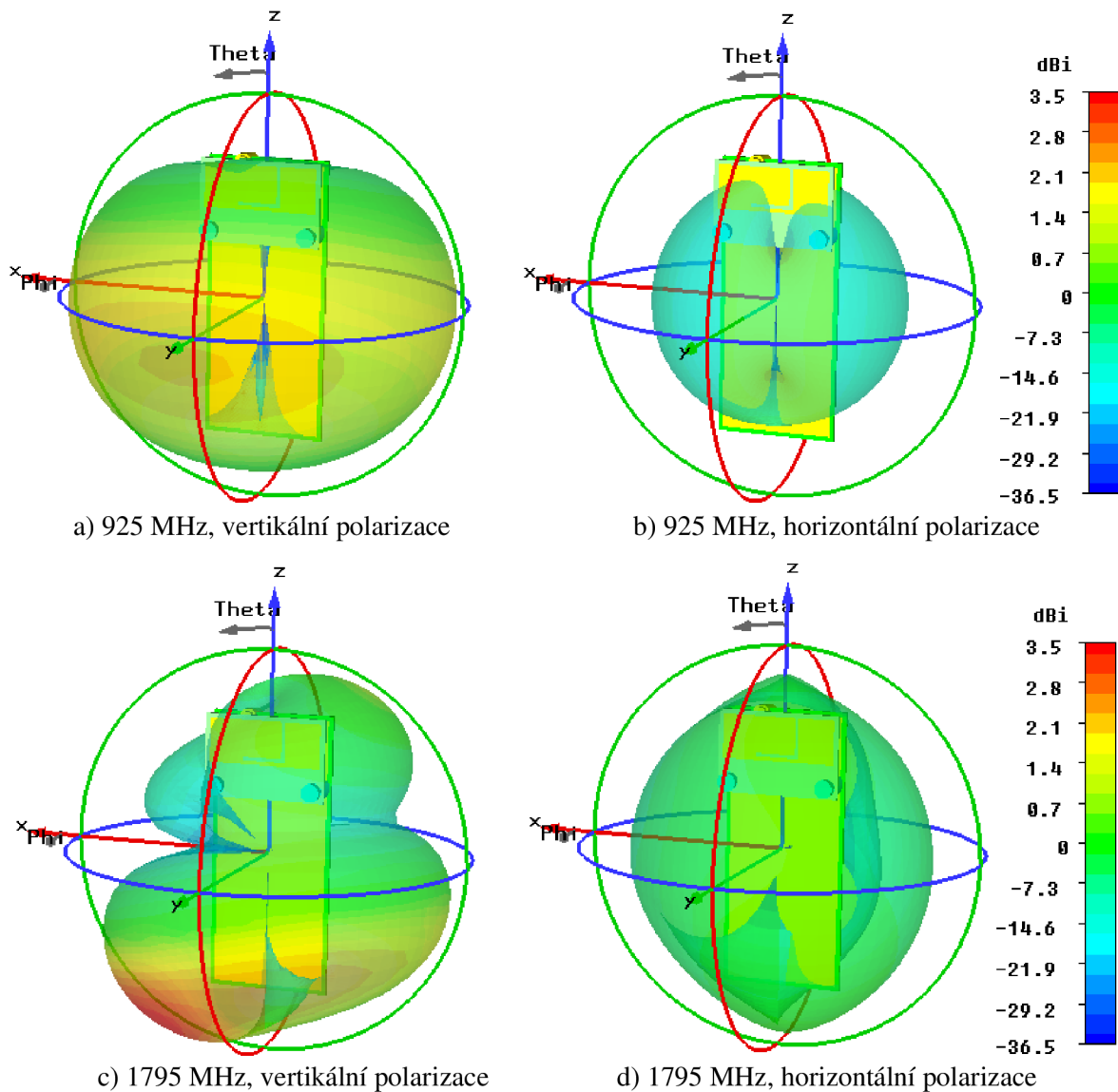
Na obr. 4.4 je zobrazena simulace rozložení proudu na PIFA anténě (zářiči a zemní ploše) pro střední frekvence pásem GSM900 a GSM 1800. Z obrázku je patrné, že největší koncentrace proudů je u obou pásem v blízkosti hran antény, které tak mají největší podíl na výsledné vyzařovací charakteristice. Proudové tečny převažně zářičem antény, ale také po její zemní ploše. Obzvláště u frekvence 925 MHz lze pozorovat poměrně velkou koncentraci proudů na zemní ploše antény.



Obr. 4.4 Rozložení proudu na PIFA anténě: a) 925 MHz, b) 1795 MHz.

Vyzařovací charakteristiky PIFA antény ve 3D zobrazení jsou uvedeny na obr. 4.5. Jedná se o simulované hodnoty pro vertikálně a horizontálně polarizované vlny na středních hodnotách frekvenčních pásem GSM900 a GSM1800.

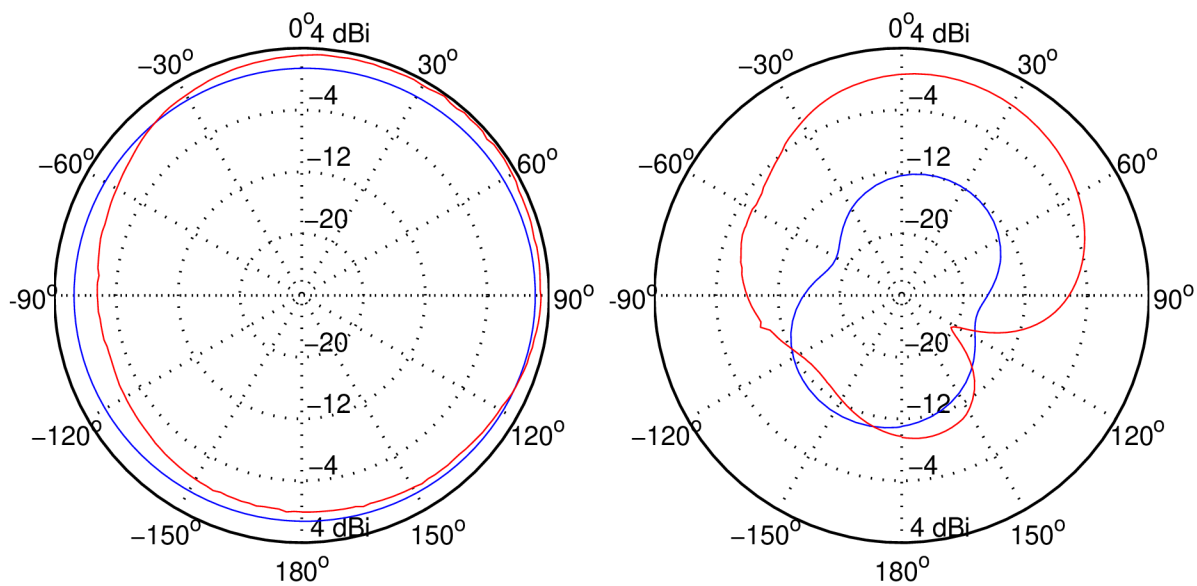
Na nižším frekvenčním pásmu (925 MHz) je vyzařovací charakteristika podobná charakteristice dipólu. Značný vliv na záření mají proudy, které tečou podél hrany zemní roviny. Při umístění antény podle obrázku je dominantní vertikálně polarizovaná vlna.



Obr. 4.5 Vyzařovací charakteristiky PIFA antény ve 3D zobrazení.

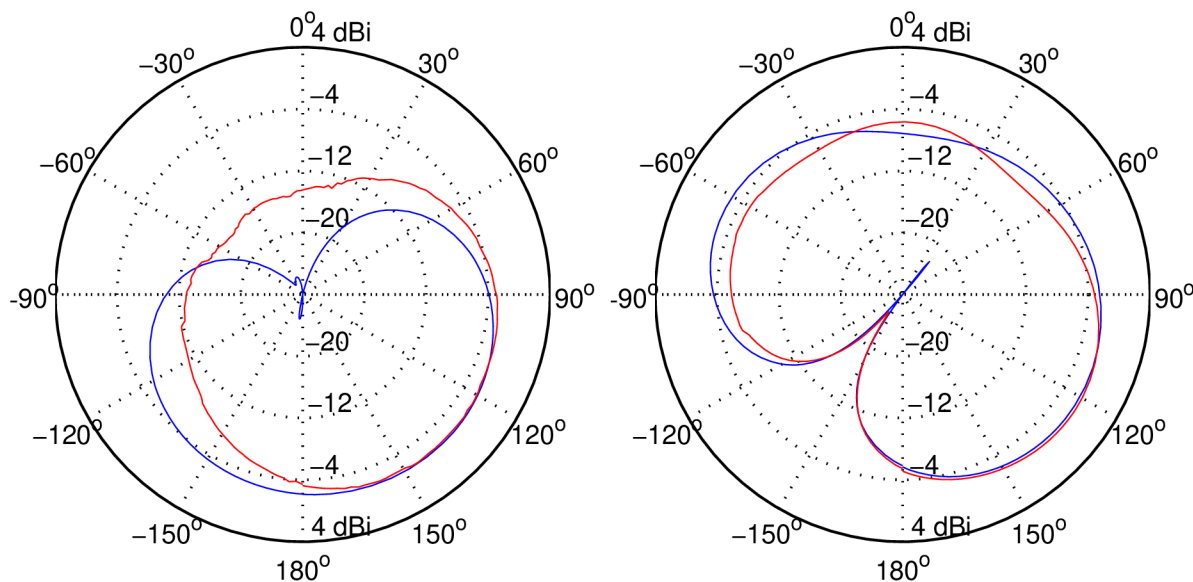
U vyššího frekvenčního pásma (1795 MHz) není již žádná orientace vektoru elektrického pole dominantní. Pro obě orientace se pohybuje zisk v podobných hodnotách. U vertikálně orientované složky směřuje maximum záření do spodní části antény, minimum je pak v rovině xy . Pro horizontální orientaci složky elektrického pole je vyzařovací charakteristika, s drobnými odchylkami, všesměrová. I u pásma GSM1800 lze konstatovat, že na vyzařovací charakteristiku mají vliv proudy tekoucí kromě zářiče i zemní plochou.

Vyzařovací charakteristiky v rovině xy byly proměřeny v bezodrazové komoře školní laboratoře antén a elektromagnetického pole. Pro eliminaci asymetrických proudů byly rovněž při měření použity feritové kroužky. Vzájemné porovnání naměřených hodnot se simulací je uvedeno na obr. 4.6. Svislá osa vyjadřuje zisk antény vůči izotropnímu zářiči. Zisk byl určen pomocí referenčního měření s anténou známých paramterů. Úhel natočení odpovídá úhlu Φ z obr. 4.5. Osa x antény tudíž směřuje od středu vyzařovacího diagramu do úhlu 0° , osa y pak do úhlu 90° .



a) 925 MHz, vertikální polarizace

b) 925 MHz, horizontální polarizace



c) 1795 MHz, vertikální polarizace

d) 1795 MHz, horizontální polarizace

— Simulace — Měření

Obr. 4.6 Vyzařovací charakteristiky PIFA antény v rovině xy.

Dá se říci, že naměřené vyzařovací charakteristiky, včetně zisku, celkem odpovídají simulovaným hodnotám. Velká odchylka je však u horizontálně polarizované vlny při frekvenci 925 MHz. Dle simulací by mělo být záření velmi potlačeno ve všech směrech, avšak při úhlu přibližně 0° je zisk poměrně velký. Neshoda při této frekvenci je pravděpodobně způsobena nedostatečným potlačením asymetrických proudů feritovými kroužky.

5 Simulace vlivu uživatele na vlastnosti PIFA antény

Úkolem této kapitoly je vyšetřit vliv uživatele na vlastnosti navržené dvoupásmové PIFA antény v datovém režimu mobilního zařízení². Důraz je kladen především na impedanční přizpůsobení typických pozic antény ve vztahu s uživatelskou rukou. Vliv na impedanční přizpůsobení je velmi důležitý, neboť může vést ke snížení vyzářeného výkonu a tedy i k poklesu komunikačního dosahu. Tento pokles lze sice kompenzovat zvýšením vstupního výkonu, dochází pak ale k vyšší energetické spotřebě zařízení.

5.1 Model ruky

Pro softwarové vyšetření vlivu uživatelské ruky na anténu je potřeba model ruky, který co nejpřesněji odpovídá jejím reálným vlastnostem. Základem lidské ruky je lidská kostra. Ruka se skládá z kostí zápěstních (8 kostí), zápěstních (5 kostí) a článků prstů (14 kostí),[13]. Tyto kosti vytváří pevnou, pasivně pohyblivou oporu těla, na niž se upínají svaly. Svaly umožňují aktivní pohyb celé ruky. Na povrchu celé ruky se nachází kůže, jež odděluje vnitřní prostředí organismu od vnějšího.

Pro simulaci byly využity modely lidského těla z rozsáhlých knihoven programu Poser. Tento program je určený pro sestavování 3D scény z předem připravených 3D modelů (postav, budov, zařízení, předmětů, apod.). S jeho distribucí je dodávána také knihovna hotových 3D modelů postav, oblečení a rekvizit, které jsou připraveny k okamžitému použití při tvorbě scény. Velké množství dalšího materiálu do Poseru lze získat pomocí internetu, [14]. Mezi výhody programu patří také skutečnost, že modely lze exportovat do jiných formátů včetně tzv. virtuálních kostí. V oblasti 3D modelování slouží kostra především k pohybu modelu. Je tedy žádoucí mít u virtuální kostry jen počet kostí potřebných k pohybu, proto tento počet neodpovídá počtu lidských kostí.

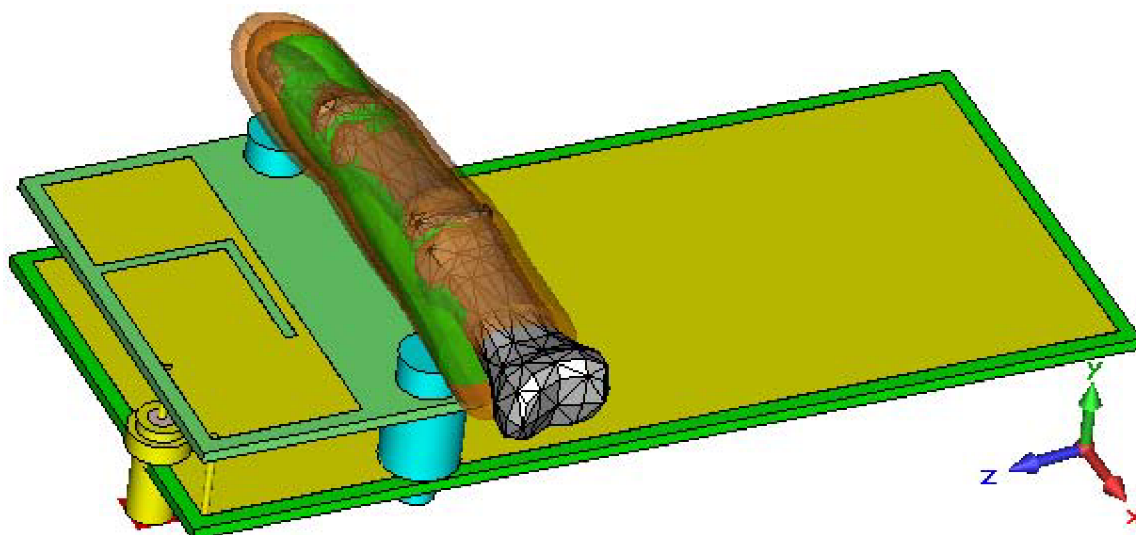
Z knihovny programu Poser byla načtena postava Ryana a také Ryanova anatomická kosterní soustava. Dále byly oba modely včetně svých virtuálních kostí exportovány do programu Autodesk 3ds Max k dalšímu zpracování. Exportovány byly pouze vrstvy pravé Ryanovy ruky, prostřednictvím pluginu OpenCOLLADA. Autodesk 3ds Max je program pro 3D grafiku, vizualizace a animace. Jeho výhodou je možnost exportu do souboru SAT, nativního pro import v programu CST Microwave Studio.

² Datovým režimem rozumíme činnost, při které má dominantní vliv na anténu uživatelská ruka. Jedná se například o psaní textových zpráv, či prohlížení webových stránek.

5.1.1 Vrstvový model prstu

V programu CST Microwave Studio byl pomocí booleovských operací s importovanými modely ruky a kostí ruky vytvořen vrstvý model ukazováčku pravé ruky. Právě ukazováček se v datovém režimu zařízení nachází v těsné blízkosti zářiče antény a má na ni značný vliv. Tento prst byl proto použit jako reference k porovnání rozdílu vlivu homogenního a vrstvého modelu lidské tkáně na anténu.

Model prstu se skládá ze čtyř vrstev. Vnější vrstva je kůže, vytvořena průnikem importovaného modelu ruky s jeho zmenšenou kopií. Tloušťka kůže je 1,5 mm. Další vrstvou je tuk tloušťky 3 mm. Mezeru mezi importovaným modelem kostí a vrstvou tuku vyplňují svaly. Použité rozměry vrstev byly převzaty z [15]. Délka prstu je 7 cm, což odpovídá vlastnímu měření. Výchozí umístění modelu prstu vůči anténě je zobrazeno na obr. 5.1. Vzdálenost mezi spodní částí prstu a zářičem antény byla zvolena 5 mm.



Obr. 5.1 Výchozí umístění vrstvého modelu prstu vůči anténě ($z_{\text{prstu}} = 0$).

Elektrické parametry jednotlivých částí použitých v modelu jsou uvedeny v tab. 5.1. Pro celý frekvenční rozsah byly materiálové vlastnosti definovány pomocí lineárního rozložení mezi známými hodnotami na frekvencích 900 MHz a 1800 MHz. Hodnoty permitivity a ztrát bylo potřeba definovat v simulátoru pomocí složek komplexní relativní permitivity $\hat{\epsilon}_r$. Pro přepočítání platí vztah [3]

$$\hat{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r = \epsilon_r - j \cdot 60 \cdot \lambda_0 \cdot \sigma \quad (5.1)$$

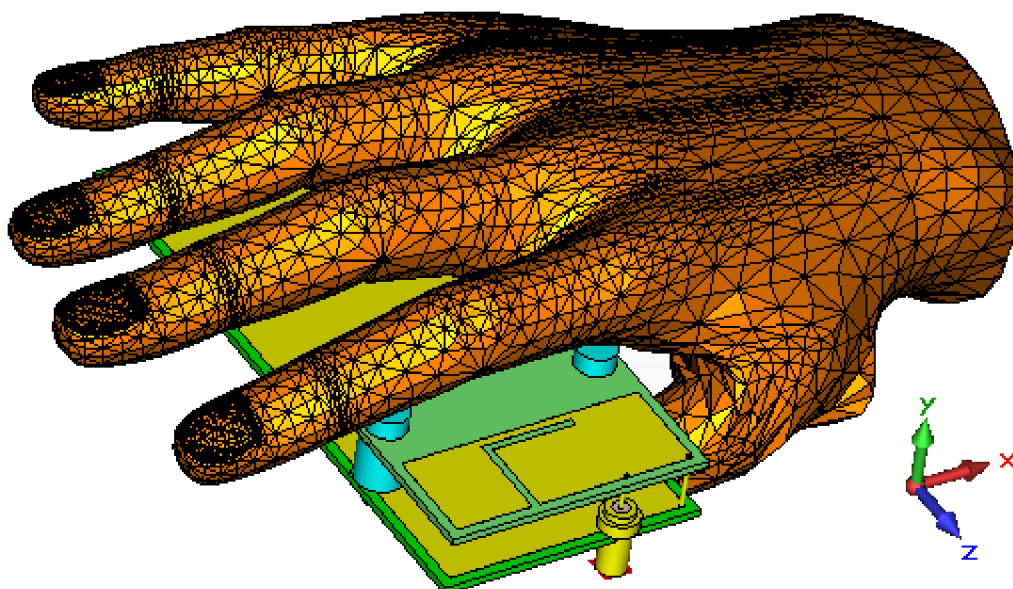
Tab. 5.1 Typické hodnoty parametrů lidské tkáně, [2],[16],[17].

Tkáň	900 MHz			1800 MHz		
	ϵ_r [-]	σ [S/m]	ϵ_r'' [-]	ϵ_r [-]	σ [S/m]	ϵ_r'' [-]
Kost	16,62	0,242	4,84	15,56	0,432	4,32
Sval	55,95	0,969	19,38	54,44	1,389	13,89
Tuk	5,47	0,051	1,02	5,35	0,078	0,78
Kůže	41,4	0,867	17,34	38,87	1,184	11,84
Homogenní model	36,2	0,79	15,8	32,6	1,26	12,6

5.1.2 Homogenní model ruky

Prostřednictvím programu 3ds Max byl k modelu ruky přidán model antény z kapitoly 4. Pomocí virtuálních kostí byla ruka nastavena do typické pozice pro použití mobilního zařízení v datovém režimu, která je zobrazena na obr. 5.2. Umístění prstů je 5 mm nad zářičem antény, respektive 17 mm nad zemní plochou.

Vlastnosti materiálu použitého u homogenního modelu jsou uvedeny v tab. 4.1 a byly převzaty ze studie [17]. Data v této studii byla získána měřením na různých typech rukou, věkových kategorií od 25 do 50 let. Vlastní ověření výsledků studie na modelu prstu je uvedeno v kapitole 5.2 .



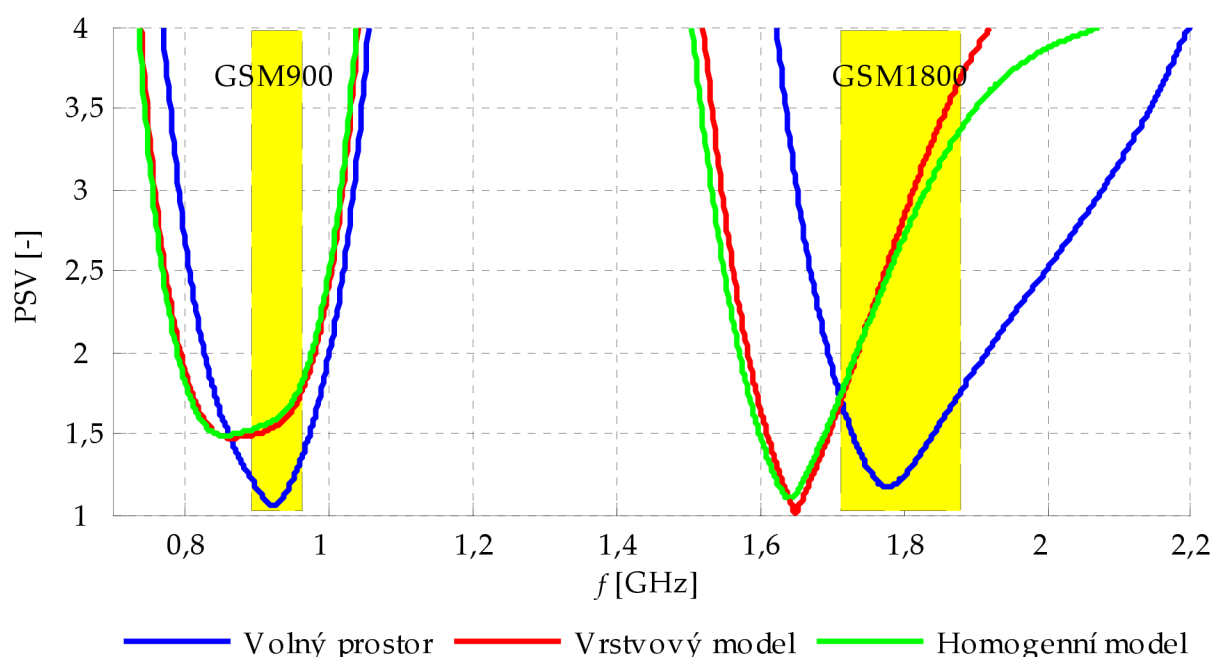
Obr. 5.2 Typická pozice ruky vůči anténě v datovém režimu mobilního zařízení ($z_{ruky} = 0$).

5.2 Porovnání vrstvého a homogenního modelu prstu

Modely rukou, často nazývané také fantomy, se používají od počátku 90. let 20. století. Zpočátku byly využívány nejčastěji vrstvé modely složené z pokožky, svalů a kostí. Koncem 90. let však začaly převládat více praktické homogenní modely, jejichž vlastnosti přibližně odpovídají modelům vrstvovým, [17]. Cílem této kapitoly je porovnání vlastností vrstvého a homogenního modelu lidského prstu.

Pro porovnání byl použit model prstu popsáný v kapitole 5.1.1 a geometricky totožný homogenní model s parametry převzatými ze studie [17], uvedenými v tab. 5.1. Byl zkoumán vliv posunu prstu ve směru osy z vůči referenční hodnotě zobrazené na obr. 5.1.

Pro posun $z = 20$ mm se nachází prst uprostřed zářiče a změna vlastností vůči anténě umístěné ve volném prostoru je nejvýraznější. Tomuto případu odpovídá závislost poměru stojatých vln na kmitočtu uvedená na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Závislost PSV na frekvenci PIFA antény v blízkosti lidské tkáně (modely prstů umístěny nad středem zářiče antény, $z = 20$ mm).

Z výše uvedené závislosti je zřejmé, že přítomnost lidské tkáně posunuje obě rezonanční frekvence směrem k nižším hodnotám. Pro pásmo GSM900 je tento posun 66 MHz, pro pásmo GSM1800 137 MHz.

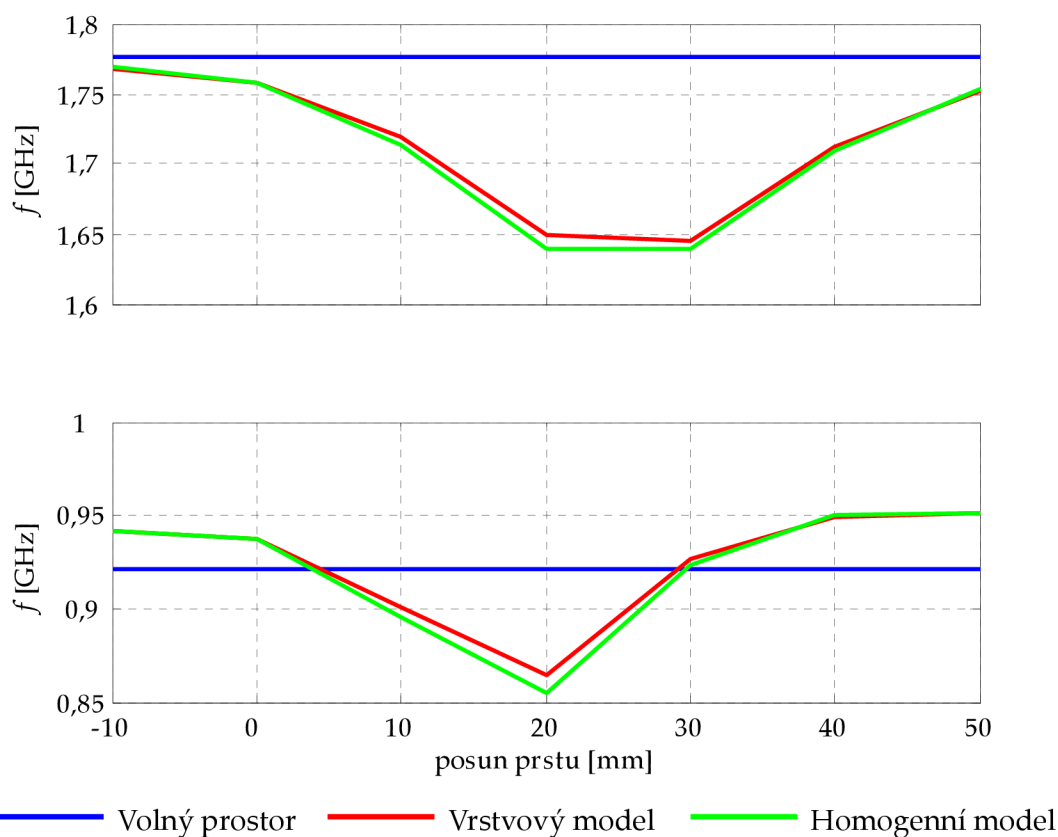
U pásma GSM900 se impedanční přizpůsobení na rezonanční frekvenci zhoršilo oproti anténě ve volném prostoru, avšak anténa má větší šířku pásma a $PSV < 2$ v celém požadovaném rozsahu. Pro pásmo GSM1800 je díky lidské tkáni impedanční

přizpůsobení lepší na rezonanční frekvenci, avšak šířka pásma antény se zmenšila a frekvenční posun je značně velký.

Shoda v impedančním přizpůsobení je pro vrstvý a homogenní model prstu poměrně dobrá, především pro nižší kmitočty. U pásma GSM900 lze vidět, že se charakteristiky skoro překrývají. Pásmo GSM1800 vykazuje větší odchylky mezi modely, především pro kmitočty vyšší než 1,8 GHz je homogenní model lépe přizpůsoben než model vrstvý.

Závislost rezonančních frekvencí antény PIFA na posunu prstu ve směru osy z (viz obr. 5.1) je uvedena pro oba modely na obr. 5.4. Tato závislost rovněž potvrzuje dobrou shodu mezi vrstvovým a homogenním modelem. Odchylka mezi průběhy je pochopitelně největší, pokud se prst nachází nad středem zářiče a má největší vliv na vlastnosti antény.

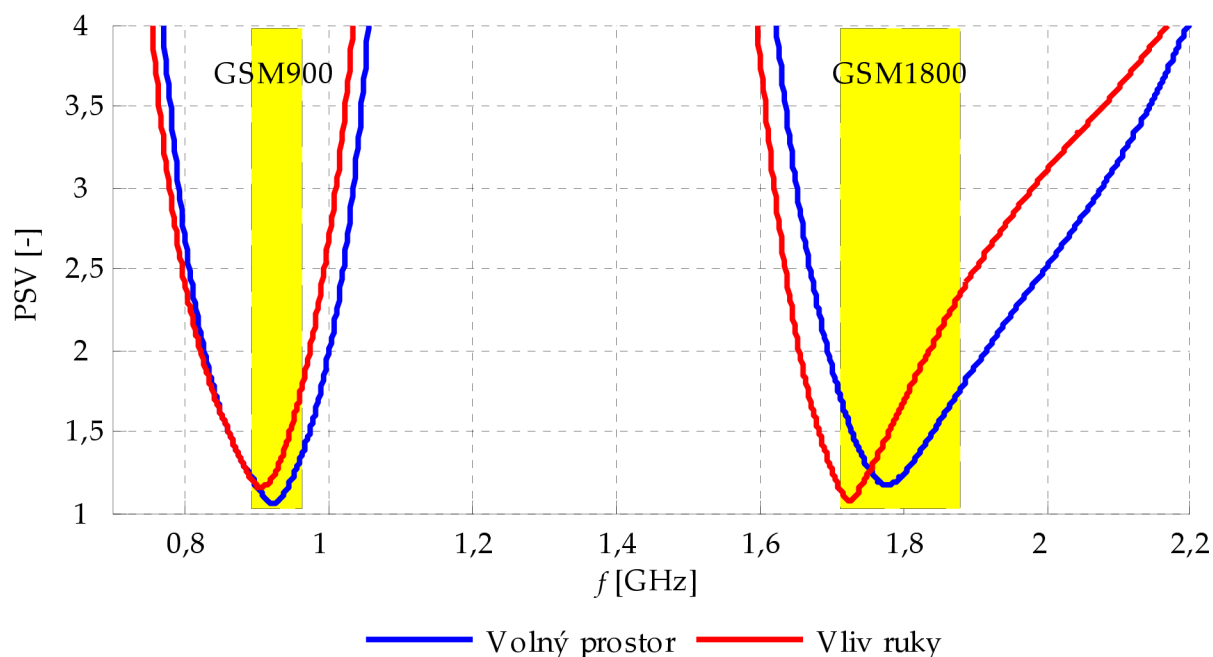
Z grafu je dále zřejmé, že díky přítomnosti lidské tkáně dochází ve velké většině případů k poklesu rezonanční frekvence antény. Pouze v pásmu GSM 900 a při vzdálenostech delších než 10 mm od zářiče antény byla rezonanční frekvence antény mírně vyšší.



Obr. 5.4 Závislost rezonančních frekvencí antény PIFA na posunu prstu ve směru osy z, poblíž zářiče antény.

5.3 Vliv homogenního modelu ruky na vlastnosti PIFA antény

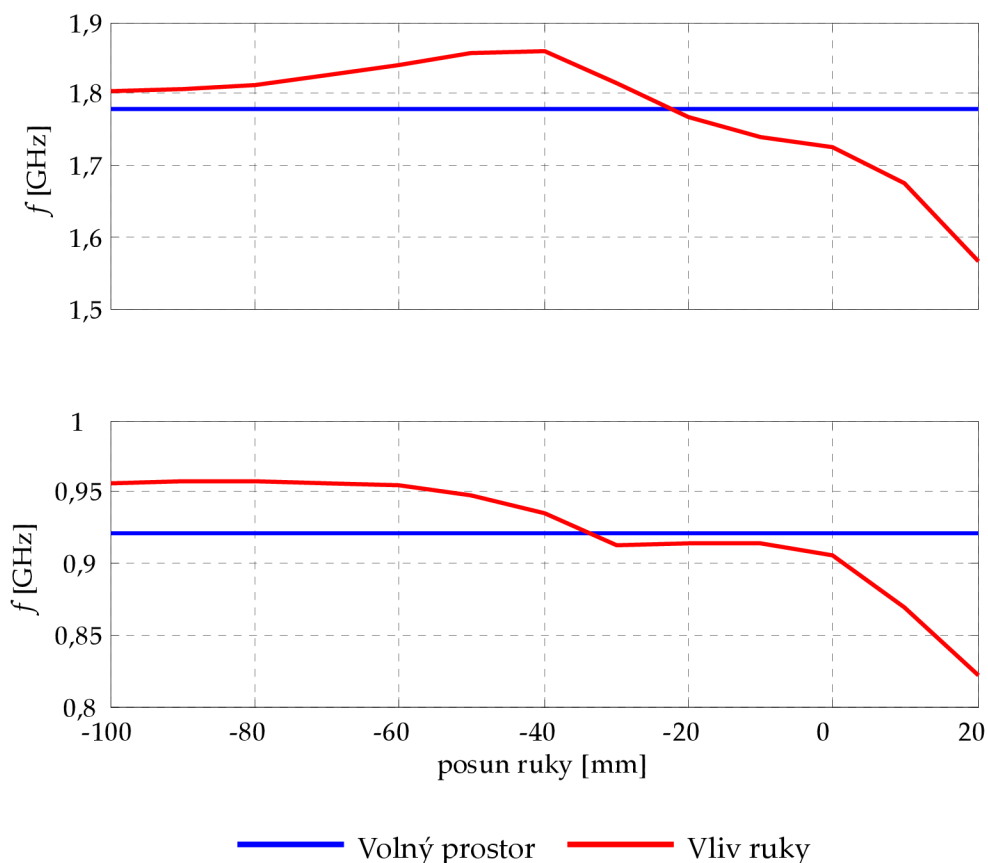
Na základě poznatků z předchozí kapitoly byl k dalšímu rozboru vybrán model lidské ruky s homogenním rozložením permitivity v celém objemu. Frekvenční závislost poměru stojatých vln pro model popsáný v kapitole 5.1.2 je uvedena na obr. 5.5. Jedná se o zvolenou typickou pozici ruky vůči anténě v datovém režimu mobilního zařízení s referenční hodnotou osy $z = 0$. Graf obsahuje rovněž porovnání s anténou umístěnou ve volném prostoru, bez přítomnosti lidské tkáně.



Obr. 5.5 Změna impedančního přizpůsobení PIFA antény při typické pozici ruky v datovém režimu mobilního zařízení ($z = 0$ mm).

Z výše uvedeného grafu je zřejmé, že impedanční přizpůsobení na rezonanční frekvenci se nijak výrazně nemění oproti anténě ve volném prostoru, avšak díky přítomnosti lidské tkáně dochází k nezanedbatelnému frekvenčnímu posuvu směrem k nižší frekvenci na obou pásmech.

Vzhledem k tomu, že uživatel může držet mobilní přístroj v různých pozicích, byla dále zkoumána závislost rezonančních frekvencí na různém posuvu ruky ve směru osy z . Tato závislost je pro obě frekvenční pásma zobrazena na obr. 5.6. Posun ruky je v rozmezí $z = (-100 \div 20)$ mm, což odpovídá posuvu ukazováčku od spodní hrany zemní plochy až nad zářič antény. Při umístění ruky dále směrem k zářiči je již impedanční přizpůsobení poměrně špatné, avšak nejedná se o běžný dotyk v datovém režimu mobilního zařízení.



Obr. 5.6 Závislost rezonančních frekvencí antény PIFA na posunu ruky ve směru osy z.

Na základě simulovaných hodnot zobrazených na obr. 5.6 lze konstatovat, že zářič PIFA a zemní plocha mají na rezonanční frekvenci antény opačný vliv. Pokud se nachází ruka v blízkosti zářiče, dochází k razantnímu poklesu rezonanční frekvence. Zemní plocha naopak rezonanční frekvenci antény zvyšuje. Jestliže je poloha ruky přibližně $z = -30$ mm, nastává kompenzace vlivu obou složek a anténa je dobře impedančně přizpůsobena i bez nutnosti přizpůsobovacího obvodu.

6 Vyšetření vlivu vlastní ruky na vlastnosti PIFA antény

Tato část práce se zabývá ověřením simulovaných hodnot z předchozí kapitoly na autorově vlastní ruce. Zda splňuje měrný absorbovaný výkon v lidské tkáni normou stanovené maximální přípustné hodnoty však nelze předem s jistotou říci. Z tohoto důvodu není měření prováděno přímo na vlastní ruce, nýbrž na fantomu shodného tvaru a vlastností.

6.1 Výroba fantomu ruky

Pro výrobu fantomu ruky je zapotřebí vytvořit formu, do které se ruka odlije z materiálu, jenž má vlastnosti podobné lidské tkáni. Rovněž je žádoucí, aby byla forma použitelná vícekrát a tudíž nebyla zničena již při prvním odlití fantomu.

Výchozím modelem byla zvolena vlastní autorova pravá ruka. Z této ruky byla vytvořena forma pomocí formovací hmoty Efkocea od firmy Efkoart, s.r.o. [18]. Jedná se práškovitou odlitkovou hmotu s velmi krátkou dobou tvrdnutí. Velkou výhodou této hmoty je její pružnost. Ruku lze tedy po několika minutách bez problémů vytáhnout, aniž by byl model poškozený. Po zaschnutí byla do připravené formy nalita směs prášku Efkolín (od stejné firmy) a vody. Byl vytvořen výchozí model ruky, jejíž tvar odpovídá typické pozici ruky vůči anténě v datovém režimu použití mobilního zařízení. Pro vytažení zaschlého modelu musela být forma z materiálu Efkocea zničena. Fotografie modelu z materiálu Efkolín je uvedena v příloze C.

Jelikož formu z materiálu Efkocea nelze využít pro vícenásobné použití, bylo dále přistoupeno k realizaci formy nové, kterou lze libovolně rozebírat, aniž by byla forma nebo odlitý model poškozeny. Jedná se o 7dílnou formu, která je příčně rozdělena do 7 vrstev. Jednotlivé vrstvy jsou vyrobeny smícháním silikonového kaučuku Lukopren N Super s Lukopren Katalyzátorem. Pro přípravu odlité formy byl model ruky nalakován a přilepen ke dnu vytvořené nádoby z plexiskla. Model, vnitřní stěny nádoby a tyče udržující přesnou pozici vrstev byly naseparovány Lukopren Separátorem. Vždy po odlití jednotlivých vrstev bylo zapotřebí plochu důkladně naseparovat Lukopren Parafínovým Separátorem, aby šly jednotlivé vrstvy od sebe oddělit. Pro přehlednost se střídají modrá a bílá barva jednotlivých, po sobě jdoucích, vrstev. Použité silikonové kaučuky a pomocné přípravky k nim vyrábí firma Lučební závody a. s. Kolín [19]. Fotografie hotové formy i její výroba jsou rovněž uvedeny v příloze C.

Již výše bylo zmíněno, že výsledný fantom by měl mít dielektrické vlastnosti podobné lidské ruce. Jeden z používaných a dostupných materiálů pro tyto účely je agar. Jedná se o přírodní polysacharid, který se vyrábí z červených mořských řas. Jeho relativní permitivita je velmi podobná lidské svalovině, vodivost se však mírně odlišuje, převážně na nižších frekvencích,[20]. Pokud se agar smíchá ve vhodném poměru s vodou, dojde ke snížení vodivosti a jeho vlastnosti se ještě lépe podobají lidské tkáni. Objemový poměr směsi agaru a destilované vody byl zvolen 3:4.

Výsledný materiál na bázi agaru obsahuje velký podíl vody a tudíž není schopný po odlití dobře zachovat svůj tvar. Je proto potřeba vyrobit nosnou konstrukci, která model zpevní. Jako vhodný materiál pro výrobu nosné konstrukce bylo zvoleno smrkové dřevo, které má dielektrické parametry velmi podobné lidským kostem (viz tab. 5.1, tab 6.1). Nosná kostra byla vytvořena postupným slepením smrkových nosníků různých tloušťek vteřinovým lepidlem. Dielektrické vlastnosti použitých materiálů jsou uvedeny v tab. 6.1. Vlastnosti materiálu na bázi agaru byly změřeny na školním měřicím přípravku. Především na frekvenci 900 MHz jsou naměřené hodnoty orientační a můžou být zatíženy chybou.

Tab. 6.1 Dielektrické vlastnosti materiálů použitých k výrobě fantomu ruky, [21].

Materiál	900 MHz			1800 MHz		
	ϵ_r [-]	σ [S/m]	ϵ_r'' [-]	ϵ_r [-]	σ [S/m]	ϵ_r'' [-]
Agar : voda (3:4)	50	0,4	8	50	1,0	10
Smrkové dřevo	17,5	0,23	4,6	16,4	0,42	4,2

Porovnáním vlastností materiálů tab. 6.1. s homogenním modelem použitým v předchozí kapitole lze dojít k závěru, že parametry vyrobeného fantomu nejsou přesně shodné. Vliv rozdílných materiálů na impedanční přizpůsobení PIFA antény lze však pozorovat na obr. 6.2. Na grafu lze vidět poměrně dobrou shodu mezi oběma modely. Experimentálně bylo rovněž zjištěno, že mnohem zásadnější vliv (než materiál) má na impedanci antény tvar a umístění ruky.

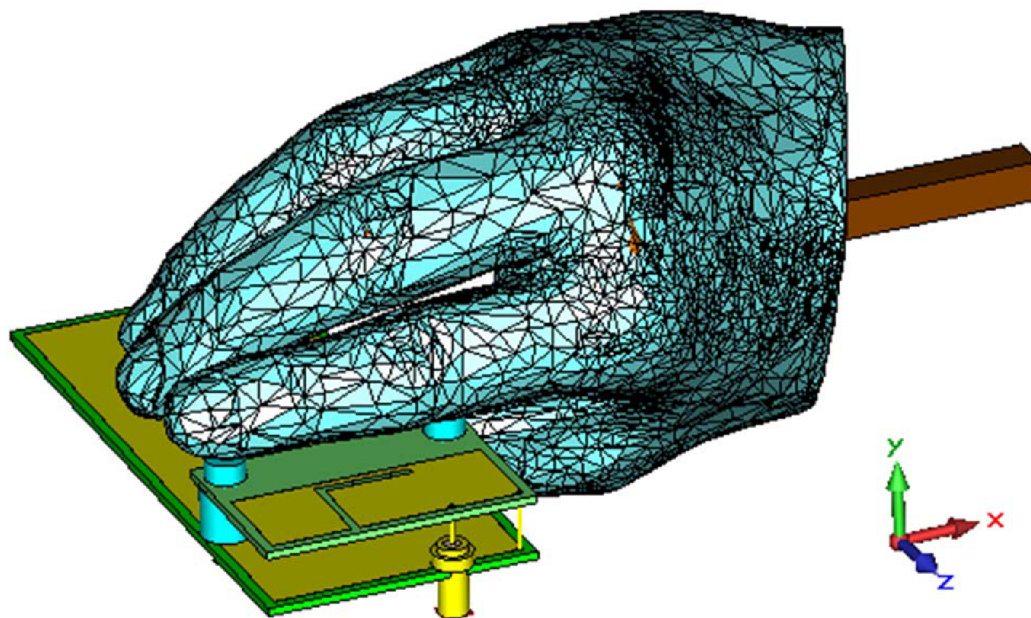
Před zalitím formy byl agar roztaven v hrnci a roztavený smíchán s destilovanou vodou v odpovídajícím poměru. K zajištění přesného umístění dřevěné kostry uprostřed prstů byly nejprve dva prsty vystuženy molitanem a zbývající tři zality. Přibližně za hodinu byl molitan vytažen a fantom zalit celý. Fotografie způsobu lití agaru do formy a vyrobeného fantomu jsou uvedeny v příloze C.

6.2 Vytvoření 3D modelu

Pro následné numerické ověření naměřených hodnot je potřeba k modelu antény implementovat do simulátoru elektromagnetického pole model vytvořeného fantomu. Jak již bylo uvedeno, tvar ruky má velký vliv na vlastnosti antény. Je tedy vhodné použít model, který věrně fantomu odpovídá.

K vytvoření velmi přesného modelu bylo využito 3D skeneru, který se nachází v Ústavu automobilního a dopravního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT. Na model ruky z materiálu Efkolín byla promítána a následně snímána kamerou přesně definována mřížka. Na základě deformace mřížky byl softwarově vypočítán a rekonstruován povrch objektu a byl uložen do souboru STL.

Z důvodu vysokých výpočetních nároků bylo potřeba pro export do souboru SAT zmenšit rozlišení modelu. Pomocí programu Autodesk 3ds MAX byl zmenšen počet trojúhelníků, ze kterých se skládá model, na cca 10 tisíc. Výsledný tvar je pořád věrně zachován a výpočetní nároky jsou mnohem menší. V programu CST Microwave Studio byl poté importovaný model umístěn do požadované pozice vůči anténě, typické pro datový režim mobilního zařízení. K modelu byl rovněž doplněn zjednodušený tvar kostry ze smrkového dřeva podobného tvaru, jaký byl vyroben. Bylo dokázáno, že toto dřevo nemá na výsledné impedanční přizpůsobení antény nikterak výrazný vliv. Výsledný model je zobrazen na obr. 6.1.

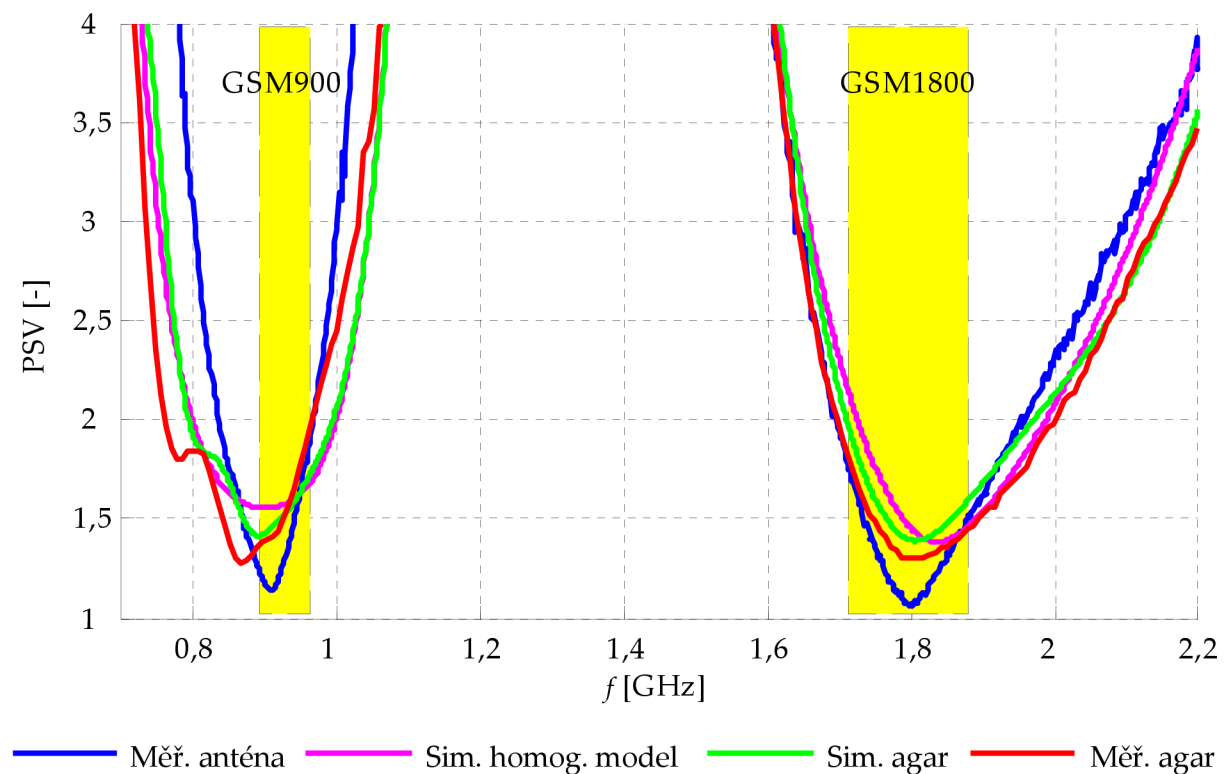


Obr. 6.1 Model vlastní ruky v typické pozici pro datový režim mobilního zařízení.

6.3 Vliv vlastní ruky na impedanční přizpůsobení

Měření vlivu vlastní ruky na impedanční přizpůsobení dvoupásmové PIFA antény probíhalo pomocí vyrobeného fantomu z materiálu na bázi agaru. Fantom byl umístěn do typické pozice vůči anténě pro datový režim mobilního zařízení. Fotografie této pozice při měření je uvedena v příloze C. Na fotografii bohužel nejsou znázorněny feritové kroužky, které byly rovněž při měření použity k potlačení asymetrických proudů na koaxiálním kabelu.

Změřená frekvenční závislost poměru stojatých vln vlivu fantomu z agaru na anténu je uvedena na obr. 6.2. Na stejném grafu je závislost porovnána se simulovaným modelem z obr. 6.1. Simulace jsou provedeny jak pro změřený použitý materiál na bázi agaru z tab. 6.1, tak také pro ověřený homogenní model z tab. 5.1. Čtvrtý průběh zobrazený na obr. 6.1 platí pro samostatnou anténu, měřenou ve volném prostoru.



Obr. 6.2 Změna impedančního přizpůsobení PIFA antény při typické pozici vlastní ruky v datovém režimu mobilního zařízení.

Z výše uvedeného grafu lze vidět, že díky přítomnosti fantomu z agaru dochází k mírnému zhoršení impedančního přizpůsobení pro obě uvažovaná pásma. U pásma GSM900 dochází rovněž k posunu rezonanční frekvence směrem k nižší hodnotě, u vyššího pásma se rezonanční frekvence prakticky nemění. Je zřejmé, že vliv tohoto modelu na impedanční přizpůsobení je odlišný oproti modelu popsaného v kapitole 5.1, u kterého byl dominantní posuv vyššího frekvenčního pásma.

Na obr. 6.2 lze také vidět poměrně dobrá shoda mezi simulovanými modely. Tímto faktem lze potvrdit, že použitá směs agaru s vodou je vhodnou náhražkou lidské tkáně.

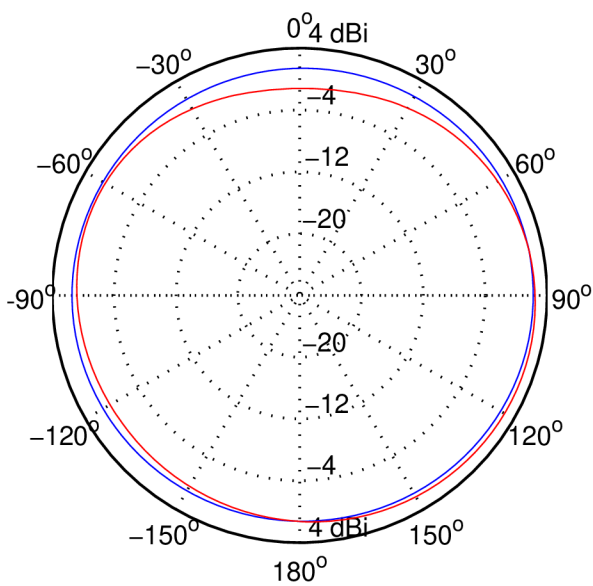
Shoda mezi měřeným fantomem z agaru a jeho modelem je v pásmu GSM1800 velmi dobrá. U pásma GSM900 je již drobná odchylka mezi průběhy. Tato odchylka je pravděpodobně způsobena nepřesně nastaveným materiálem v simulaci. Metoda měření materiálu při této frekvenci byla zatížena poměrně velkou chybou oproti vyšším frekvencím.

6.4 Vliv vlastní ruky na vyzařovací charakteristiky

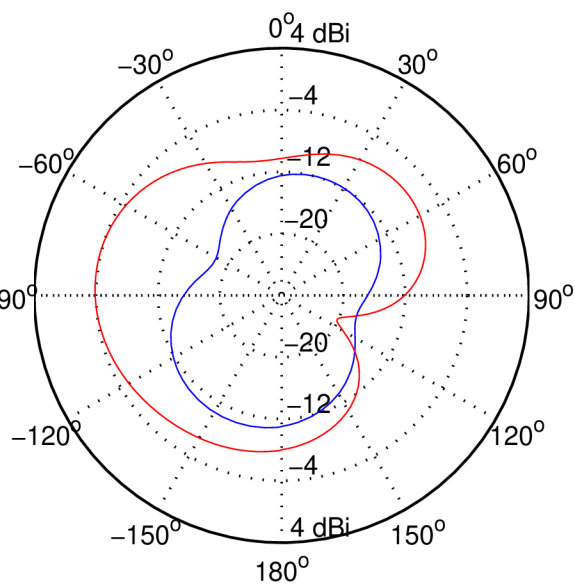
Na obr. 6.3 jsou porovnány vypočtené vyzařovací charakteristiky PIFA antény v rovině xy s charakteristikami simulovanými za přítomnosti vlastní ruky, v typické pozici pro datový režim mobilního zařízení. Úhel natočení odpovídá úhlu Φ z obr. 4.5. Osa x antény tudíž směřuje od středu vyzařovacího diagramu do úhlu 0° , osa y pak do úhlu 90° . Prsty ruky jsou umístěny v záporné ose x, míří tedy do úhlu 180° .

Pro vertikálně polarizovanou vlnu lze u frekvence 925 MHz dobře pozorovat útlum vlivem přítomnosti ruky ve směru osy x. V tomto směru je anténa obklopena dlaní, která část záření pohltí. U frekvence 1795 MHz je ve směru osy x naopak zisk větší.

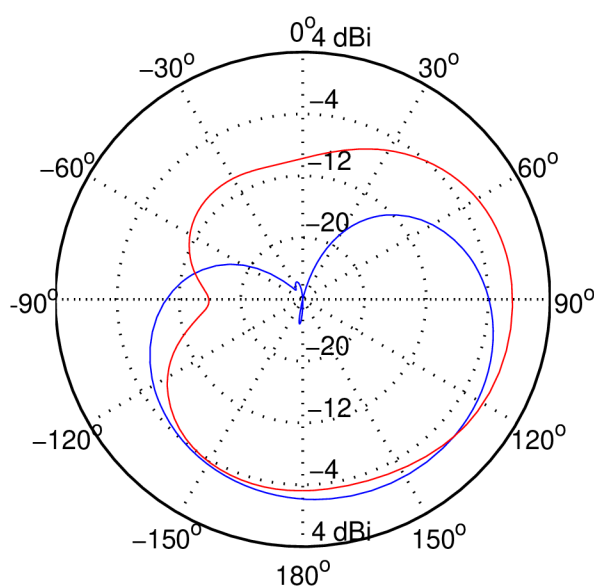
Horizontálně polarizovaná vlna není již při frekvenci 925 MHz tak silně potlačena, jako ve volném prostoru. U frekvence 1795 MHz lze také pozorovat útlum ve směru lidské dlaně.



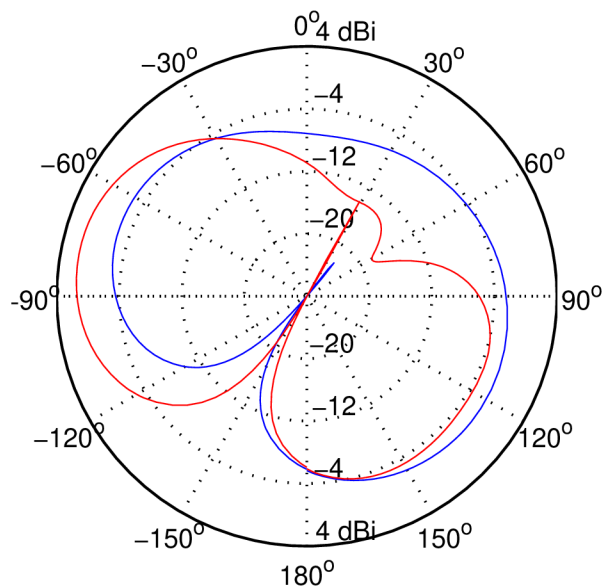
a) 925 MHz, vertikální polarizace



b) 925 MHz, horizontální polarizace



c) 1795 MHz, vertikální polarizace



d) 1795 MHz, horizontální polarizace

— Volný prostor — Vliv ruky

Obr. 6.3 Vliv vlastní ruky na vyzařovací charakteristiky antény v rovině XY.

7 Návrh kompenzačního obvodu

Tato kapitola si klade za cíl navrhnout přizpůsobovací obvod, který kompenzuje vliv uživatelské ruky na anténu a zajistí její správnou funkci. Existuje více způsobů, jak lze přizpůsobovací obvod zkonstruovat. Základním způsobem je návrh obvodu pro jednu specifickou pozici lidské ruky pomocí statických obvodových součástek. Pro vyšetření více impedančních posunů je vhodné použití některých součástek proměnných, s možností přepínání jejich hodnoty dle aktuální pozice lidské ruky. Ideální možností je pak použití automatického přizpůsobovacího systému (např. [22]), který na základě neustálé analýzy vstupní impedance automaticky nastavuje hodnotu proměnných součástek a zaručuje vždy impedanci na vstupu rovnou charakteristické impedanci napáječe.

Účelem antény v mobilních zařízeních je vysílání a příjem energie, proto je její dobrá účinnost velmi žádanou vlastností. Aby nedocházelo u přizpůsobovacího obvodu ke zbytečným ztrátám energie, je potřeba se při návrhu vyvarovat ztrátovým součástkám, například rezistorům. Nejčastěji používanými prvky přizpůsobovacích obvodů jsou proto kondenzátory či cívky, [1]. Vhodnou a názornou pomůckou pro návrh přizpůsobovacích obvodů je Smithův diagram.

7.1 Rozbor řešení pomocí ideálních součástek

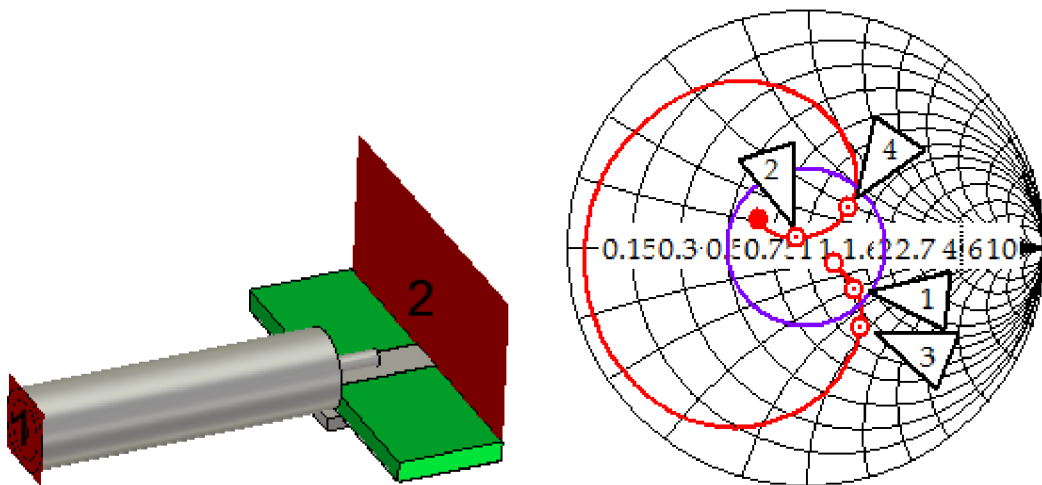
K přizpůsobení byla vybrána anténa PIFA rozladěná fantomem ruky z agaru v datovém režimu mobilního zařízení. Změřená frekvenční závislost poměru stojatých vln této antény je zobrazena na obr. 7.8³. Ze závislosti je patrné, že k většímu rozladění došlo v pásmu GSM900, proto je přizpůsobení tohoto pásma prioritou. Pro vyladění bude použit základní přizpůsobovací obvod, složený ze statických obvodových součástek, přičemž musí být zaručeno dobré impedanční přizpůsobení v blízkosti lidské ruky a rovněž také ve volném prostoru.

Vzhledem k tomu, že dochází k ladění nižšího frekvenčního pásma, je vhodné zapojovat kapacitory sériově a induktory paralelně. Tímto zapojením je vytvořen filtr typu horní propust, který ovlivňuje především nižší kmitočty a na vyšší nemá velký vliv. Není žádoucí, aby bylo vyšší frekvenční pásmo, které je dobře přizpůsobené, zbytečně přizpůsobovacím obvodem rozladěno.

Přizpůsobovací obvod bude navržen na vlastní desce plošného spoje, která bude osazena vstupním a výstupním konektorem SMA typu „samice“. K anténě bude připojen pomocí koaxiální spojky SMA „samec/samec“. Výchozí bod pro návrh přizpůsobovacího obvodu bude za přechodem koaxiální konektor – nesymetrický mikropásek, 8 mm od začátku substrátu. Na obr. 7.1 znázorňuje tento bod vlnovodný

³ Změřený průběh se mírně liší od obr. 6.2, neboť se jedná o starší měření v lehce odlišné pozici.

port číslo 2. Koaxiální vedení představuje SMA konektor včetně SMA koaxiální spojky. Ke druhému portu (číslo 1) je připojena rozladěná anténa vlivem uživatele, včetně konektoru. Na obrázku obr. 7.1 je rovněž zobrazena pomocí Smithova diagramu impedance v tomto bodě. Bod 1 označuje střední frekvenci pásma GSM900, bod 2 představuje střední frekvenci pásma GSM1800, zbývající body pak hraniční kmitočty obou pásem. Modrá kružnice znázorňuje požadovanou minimální hodnotu přizpůsobení v uvažovaných pásmech, $PSV = 2$.



Obr. 7.1 Výchozí bod pro návrh přizpůsobovacího obvodu.

Existuje více způsobů, jak lze přizpůsobovací obvod navrhnout. Některé základní z nich jsou uvedeny v následujících kapitolách.

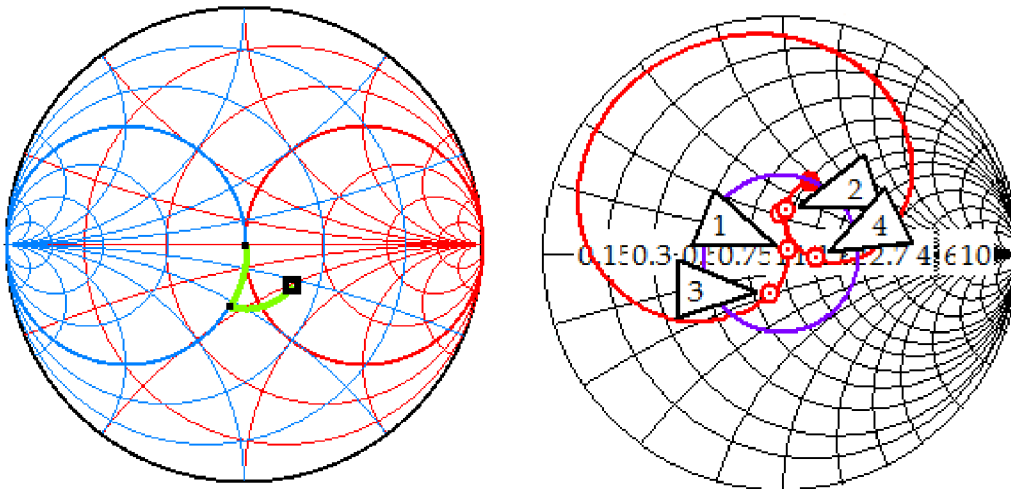
7.1.1 Úsek vedení + paralelní indukčnost

Nejjednodušší volbou jak transformovat střední frekvenci pásma GSM900 do středu Smithova diagramu je pomocí úseku vedení a paralelní indukčnosti. Střední frekvence pásma GSM900 se nachází v blízkosti (směrem ke zdroji) kružnice konstantní konduktance hodnoty $0,02 \text{ S}$. Pomocí relativně krátkého úseku mikropáskového vedení o fyzické délce $14,5 \text{ mm}$ lze na tuto kružnici impedanci transformovat. Pomocí paralelní indukčnosti $15,5 \text{ nH}$, jež ovlivňuje především nižší kmitočty, je dále impedance transformována na hodnotu 50Ω .

Druhou možností je transformace počáteční impedance vedením na kružnici konstantní rezistence 50Ω a následné vyladění sériovým kapacitorem. Díky relativně dlouhé vlnové délce pásma GSM900 však není tato možnost příliš vhodná. Mikropáskové vedení by muselo být prodlouženo o 62 mm a přizpůsobovací obvod by zabíral zbytečně mnoho prostoru.

Navržený přizpůsobovací obvod je zobrazen na obr. 7.2. Na levém Smithově diagramu je zobrazen impedanční posuv střední frekvence pásma GSM900. Vpravo

Ize pak vidět výslednou impedanci obou frekvenčních pásem, přičemž značení významných bodů je shodné s obr. 7.1.

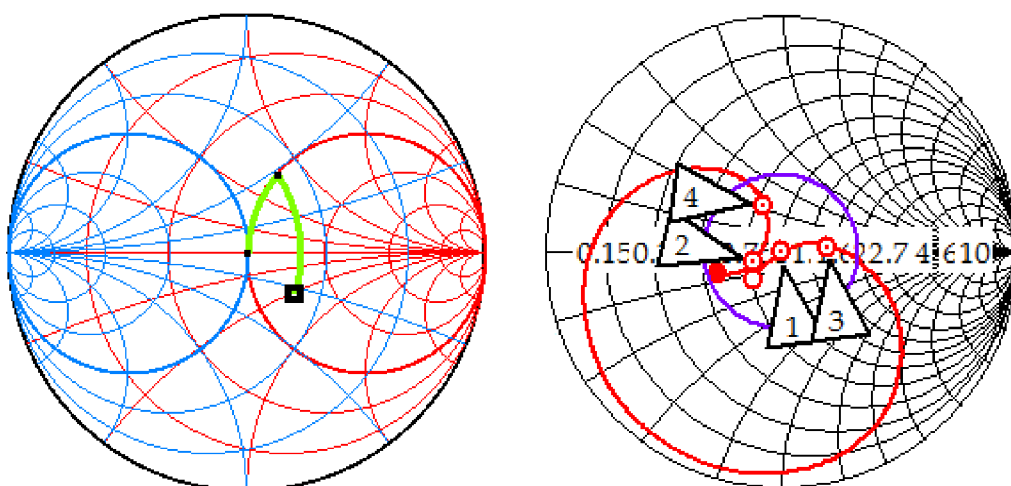


Obr. 7.2 Zobrazení prvního přizpůsobovacího obvodu na Smithově diagramu.

7.1.2 L článek

L články jsou jednoduchým a často používaným typem přizpůsobovacích obvodů. Skládají se ze dvou obvodových prvků přičemž jeden je zapojený sériově a druhý paralelně. Podle zapojení lze sestavit více různých typů těchto článků, žádný však nepokryje celou plochu impedancí. Při podmínce chování článku jako horní propusti, lze pro pozici výchozí impedance použít jediné zapojení – paralelní induktor blíže k zátěži, následovaný sériovým kapacitorem.

Pro konkrétní případ je hodnota paralelní indukčnosti 12 nH, následovaná sériovým kapacitorem o kapacitě 4,4 pF. Navržený přizpůsobovací obvod je zobrazen na obr. 7.3.

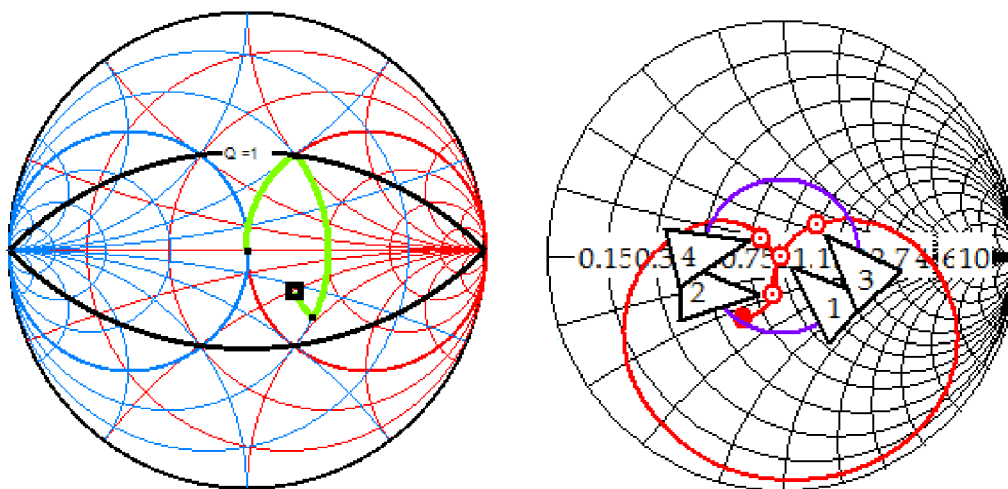


Obr. 7.3 Zobrazení druhého přizpůsobovacího obvodu na Smithově diagramu.

7.1.3 T člunek

Žádný z L člunků nedokáže pokrýt celou plochu Smithova diagramu. Nelze tedy použít konkrétní člunek pro přizpůsobení libovolné impedance. Rovněž šířka pásma těchto člunků není velká. Univerzální přizpůsobovací obvod lze navrhnout pomocí T nebo Π člunků, [23]. K rozboru byl vybrán T člunek, neboť obsahuje pouze jeden paralelní prvek připojený k zemi a lze ho snáze vyrobit.

Při návrhu T člunku je potřeba hlídat, aby nebyl překročen vysoký činitel provozního Q . Při překročení vysokého Q dochází k velkým ztrátám v přizpůsobovacím obvodu, [23]. Maximální ztráta při návrhu byla stanovena $Q = 1$. Navržený přizpůsobovací obvod se skládá ze sériového kapacitoru 8,6 pF, paralelního induktoru 10,3 nH a druhého sériového kapacitoru 3,4 pF. Výsledný T člunek je zobrazen na obr. 7.4.



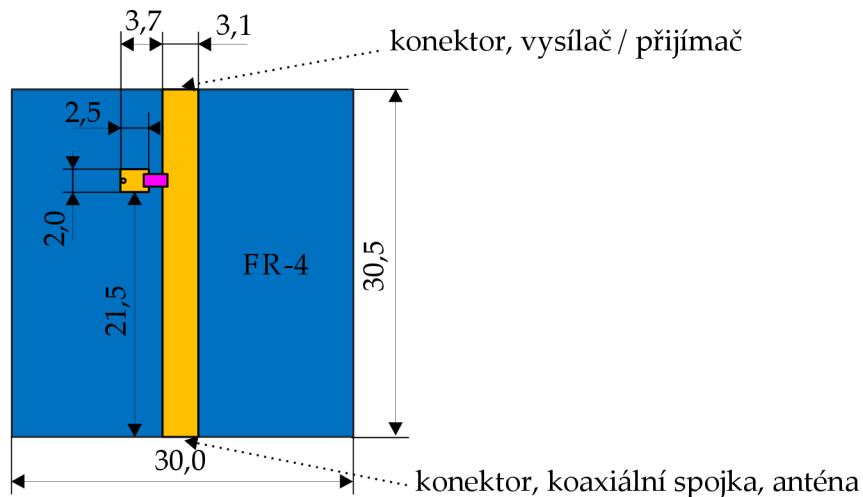
Obr. 7.4 Zobrazení třetího přizpůsobovacího obvodu na Smithově diagramu.

7.2 Reálná implementace vybraného návrhu

Impedanční průběhy jednotlivých přizpůsobovacích obvodů zobrazených na Smithově diagramu jsou poměrně shodné. Byť došlo k mírnému zhoršení impedančního přizpůsobení pásma GSM1800, podmínka $PSV < 2$ je splněna u všech přizpůsobovacích obvodů.

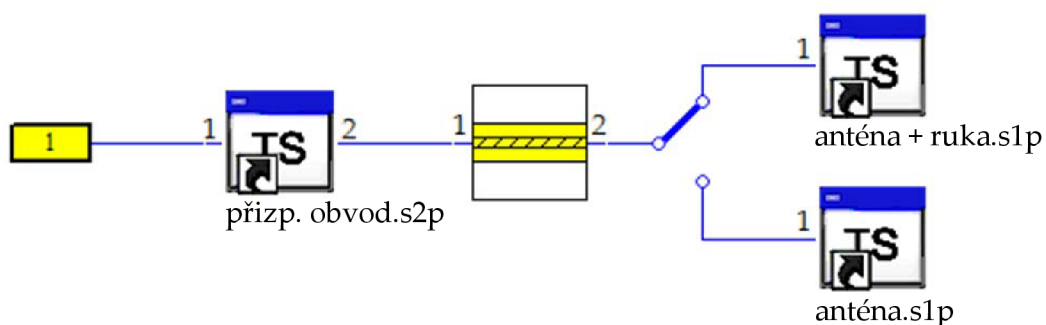
Všechny přizpůsobovací obvody jsou použitelné. K reálné implementaci byl vybrán první přizpůsobovací obvod. Obsahuje pouze jeden obvodový prvek a tudíž také nízkou ztrátu energie od zdroje k zátěži. Rovněž parazitní vlastnosti reálného připojení součástek nebudou velké. V neposlední řadě můžou u složitějších obvodů způsobit tolerance jednotlivých obvodových prvků značné odchylky od simulací s přesnými hodnotami.

Reálná implementace přizpůsobovacího obvodu je mírně odlišná od teoretického návrhu, ve kterém nejsou uvažovány např. pájecí plocha pro induktor, či axiální přechod na druhý konektor. Přizpůsobovací obvod je navržen na substrátu FR-4 ($\epsilon_r = 4,1$, $tg\delta = 0,02$, $h = 1,58$ mm). Jeho rozměry jsou uvedeny na obr. 7.5. Zkrat k zemní ploše je proveden pomocí měděného drátu o průměru 0,5 mm. Paralelní induktor o nominální hodnotě 27 nH je realizován jako SMD tlumivka s pouzdrem 0805 ($2 \times 1,25$ mm²), její výrobce je firma Hitano. Tlumivka má hodnotu SRF 2,6 GHz. Fotografie vyrobeného přizpůsobovacího obvodu je zobrazena v příloze B.



Obr. 7.5 Rozměry navrženého přizpůsobovacího obvodu [mm].

Pomocí vektorového obvodového analyzátoru Rohde & Schwarz ZVL3 byly změřeny a uloženy do Touchstone souboru rozptylové parametry vyrobeného přizpůsobovacího obvodu. Poté byly prostřednictvím aplikace CST Design Studio, pomocí potřebných Touchstone souborů, vygenerovány požadované frekvenční závislosti. Schéma zapojení naměřených souborů je uvedeno na obr. 7.6. Ve schématu se nachází přídatné koaxiální vedení se záporným rozměrem (-9 mm), neboť u uvedeného vektorového obvodového analyzátoru nebyla k dispozici kalibrační sada pro konektor kabelu typu SMA „samice“. Vektorový analyzátor byl proto zkalibrován pro oba kabely s konektorem typu „samec“ (viz obr. 7.7) a připojená koaxiální spojka je eliminována její inverzní délkou.



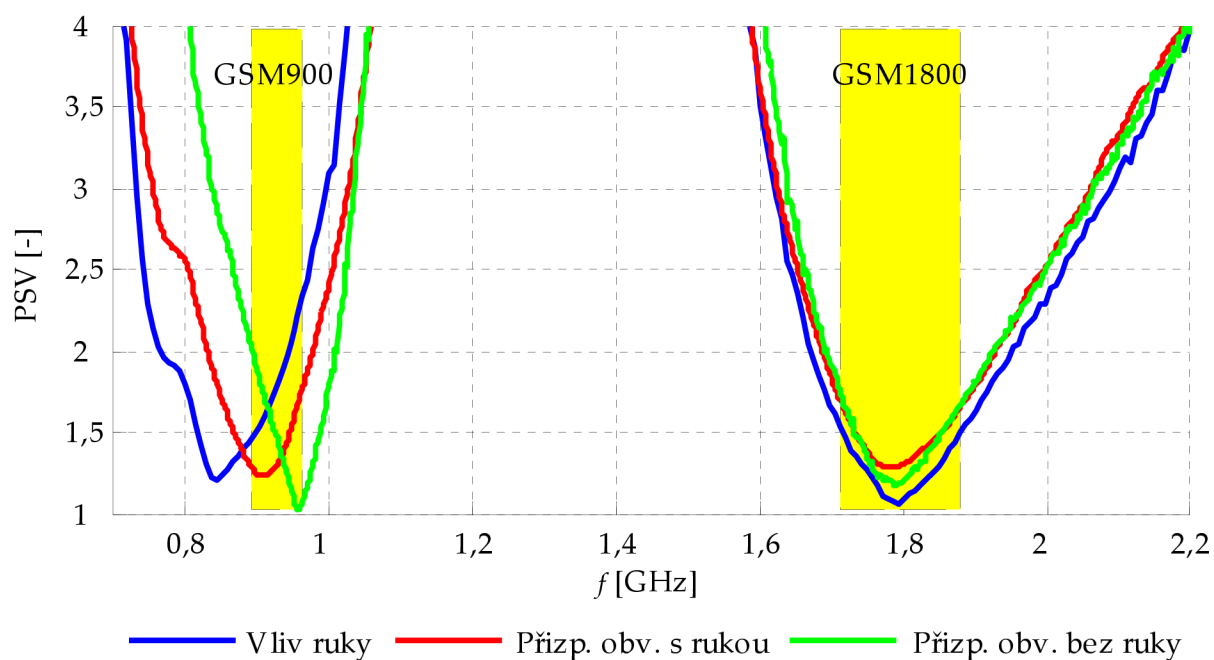
Obr. 7.6 Schéma zapojení naměřených hodnot přizpůsobovacího obvodu.



Obr. 7.7 Měření rozptylových parametrů přizpůsobovacího obvodu.

Frekvenční závislost poměru stojatých vln pro přizpůsobovací obvod je znázorněna na obr. 7.8. Z grafu je zřejmé, že díky přítomnosti přizpůsobovacího obvodu dochází k korekčnímu posunu rezonanční frekvence pásma GSM900 a platí $PSV < 2$ v celém pásmu. Rezonanční frekvence pásma GSM1800 se prakticky nemění, pouze dochází k mírnému zhoršení impedančního přizpůsobení.

Pokud není anténa za přítomnosti přizpůsobovacího obvodu ovlivněna lidskou rukou, bude rovněž správně impedančně přizpůsobena. Nejhoršího poměru stojatých vln $PSV = 2,04$ je dosaženo na frekvenci 890 MHz.



Obr. 7.8 Změřená kompenzace vlivu vlastní ruky z agaru na PIFA anténu.

Závěr

Jedním z cílů práce bylo seznámení se s metodami zmenšování fyzických rozměrů mikropáskových antén, zejména s anténami typu PIFA. V úvodní kapitole jsou definovány elektricky malé antény, včetně vysvětlení rozdílu oproti fyzicky malým anténám. Jsou zde popsány také základní parametry a omezení elektricky malých antén.

Následující kapitola se týká mikropáskových antén, jejich výhod a nevýhod. Jedná se o flíčkové antény, které jsou základem mnoha dalších antén, či o úzkoprofilové monopóly, které se často používají v mobilních komunikacích. Zmíněny jsou rovněž štěrbinové a frakální antény. Popsány jsou možnosti napájení a analýzy těchto antén.

V třetí kapitole je rozebrán jeden z nejčastěji používaných typů antén v mobilních komunikacích – anténa PIFA. Pod tímto názvem se označují antény, které většinou mají, ale nemusí mít zemní rovinu pod zářičem. Tyto dvě varianty byly porovnány. Pro další rozbor byl vybrán vhodnější typ se zemní rovinou pod zářičem. V práci jsou uvedeny různé techniky pro redukci rozměrů, možnosti zvětšení šířky pásma a dosažení vícepásmovosti těchto antén.

Další kapitola se již zabývá samotným návrhem dvoupásmové PIFA antény pro systémy GSM900 a GSM1800. Dvoupásmovosti je dosaženo vyřezáním štěrbin do zářiče antény. Pomocí simulátoru elektromagnetického pole CST Microwave Studio byla anténa navržena a následně vyrobena. Poměr stojatých vln nepřesahuje v požadovaných pásmech hodnotu 2. Změřené impedanční přizpůsobení je v dobré shodě se simulací. V práci jsou rovněž popsány vyzařovací charakteristiky pro dvě lineárně polarizované vlny a proudové rozložení na PIFA anténě.

Již z názvu práce je patrný stěžejní cíl práce: vyšetření vlivu uživatele na vlastnosti miniaturních antén. Výzkumu byla podrobena navržená dvoupásmová PIFA anténa v rámci datového režimu mobilního zařízení. Pro porovnání homogenních a vrstevných dielektrických parametrů lidské ruky byl použit anatomicky přesný model ukazováčku. Oba přístupy vykazují velmi podobné výsledky, proto je dále pro lidskou ruku používán jednodušší, homogenní model. Z výsledků je patrné, že vliv ruky na vlastnosti antény je odlišný při různých jejích polohách. Pokud je ruka v blízkosti zářiče, dochází k poklesu rezonančních frekvencí, při dominantním vlivu zemní plochy naopak rezonanční frekvence antény stoupají.

Vliv uživatele byl vyšetřen rovněž na fantomu, shodného tvaru s vlastní rukou, který byl vyroben z materiálu na bázi agaru. Nejprve byla vyrobena kopie vlastní ruky z licí hmoty, pomocí ní poté 7místná forma pro vícenásobné použití, do které

byl výsledný materiál nalit. Byl prokázán dobrý soulad použitého materiálu s ověřeným homogenním modelem. Numerický model ruky byl získán skenováním odlitku ruky pomocí 3D skeneru. Bylo zjištěno, že fantom v typické poloze pro datový režim mobilního zařízení, má vliv především na pásmo GSM900, u kterého posouvá rezonanční frekvenci k nižším hodnotám. Numerické výsledky poměrně dobře odpovídají měření. V práci je rovněž uveden vliv fantomu na vyzařovací charakteristiky antény.

Poslední kapitola se zabývá návrhem vhodného přizpůsobovacího obvodu pro typickou pozici ruky vůči anténě v datovém režimu mobilního zařízení. Pomocí Smithova diagramu jsou popsány možné varianty návrhu z diskrétních obvodových součástek. Navržen, vyroben a úspěšně měřením ověřen byl přizpůsobovací obvod složený z úseku vedení a paralelní indukčnosti.

Z práce je zřejmé, že vliv uživatele na miniaturní antény v mobilních aplikacích závisí především na pozici lidské tkáně vůči anténě, na jejím tvaru a méně již na přesných dielektrických vlastnostech. Nejvíce destruktivní případ nastává, pokud je celý zářič obklopen lidskou tkání. Tento případ však při běžném použití v praxi nenastane, neboť jsou tyto antény umísťovány především v horní části přístroje. Při typickém dotyku lidské ruky není vliv na anténu nikterak velký a lze jej eliminovat jednoduchým přizpůsobovacím obvodem.

Tato práce se zabývá vlivem na jednu konkrétní anténu. Postupy zde uplatněné, modely rukou, či vyrobený fantom však můžou dobře posloužit při návrhu a testování jakékoli antény.

Seznam literatury

- [1] ZHANG, Zhijun. *Antenna Design for Mobile Devices*, 1st. ed. Singapore: John Wiley & Sons (Asia), 2011. 280 p. ISBN 978-0-470-82446-7.
- [2] BALANIS, A. C. *Modern Antenna Handbook*. New York: John Wiley & Sons, 2008. 1680 p. ISBN 978-0-470-03634-1.
- [3] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006. 143 s.
- [4] WONG, Kin-Lu. *Planar Antennas for Wireless Communications*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 301 p. ISBN 0-471-26611-6.
- [5] GUHA, Debatosh; ANTAR, Yahia. *Microstrip and Printed Antennas*, 1st. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 506 p. ISBN 9780470973387.
- [6] BALANIS, A. C. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd. ed. New Jersey: J. Wiley & Sons, 2005. 1073 p. ISBN 0-471-66782-X.
- [7] CST Microwave Studio 2011 – *Workflow and Solver Overview*.
- [8] THORPE, Robert. How to avoid hand effect and head effect problems in handsets. *The Black Art* [online]. 2010 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://robertthorpeconsulting.com/wordpress/?p=176>
- [9] MAK, A. C. K. et al. Reconfigurable multiband antenna designs for wireless communication devices. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007, vol. 55, no. 7.
- [10] HARIDAS, Sayuj; LEE, Jay. K. *Quad-band Pifa for Mobile Phones*. Syracuse University, 2004. 29 p.
- [11] ROWELL, C. R.; MURCH, R. D. A capacitively loaded PIFA for compact mobile telephone handsets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1997, vol. 45, no. 5.
- [12] BÍLÝ, Vladimír. Frekvenční přiděl na pásmech GSM, DCS v ČR. *GSMweb* [online]. 2012 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.gsmweb.cz/clanky/freq2.htm>
- [13] Kostra ruky [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpbk/kompendium/anatomie/hk_ruka_kostr.a.php

- [14] What is Poser [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://poser.smithmicro.com/poser.html>
- [15] GOMEZ-TAMES, Jose et al. Influence of subcutaneous fat thickness upon the activation volume transcutaneous electrical stimulation to a thigh simulation model. *16th Annual Conference of the International Functional Electrical Stimulation Society*, 2011.
- [16] Dielectric properties of body tissues. *Italian National Research Council* [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.htm>
- [17] GABRIEL, C. Tissue equivalent material for hand phantoms. *Physics in Medicine and Biology*. 2007, vol. 52, pp. 4205-4210.
- [18] Efkoart, s.r.o. - kontakt [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.efkoart.cz/index.php?name=kontakty&page=10>
- [19] Lučební závody a.s. Kolín – kontakt [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.lucebni.cz/Adresar>
- [20] ZAJÍČEK, Radim; OPPL Ladislav; VRBA Jan. Broadband measurement of complex permittivity using reflection method and coaxial probes. *Radioengineering*. 2008, vol.17, no. 1, pp.14-19.
- [21] FRANCHOIS, Ann; LANG, Robert. Microwave permittivity measurements of two conifers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998, vol. 36, no. 5.
- [22] CHAN WAI PO, F. et al. A novel method for synthesizing an automatic matching network and its control unit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 2011, vol. 58, no. 9.
- [23] REINHOLD, Ludwih; BRETCHKO, Pavel. RF Circuit Design: Theory and Applications. New Jersey: Prentice-Hall, 2000. 642 p. ISBN 0-13-095323-7.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

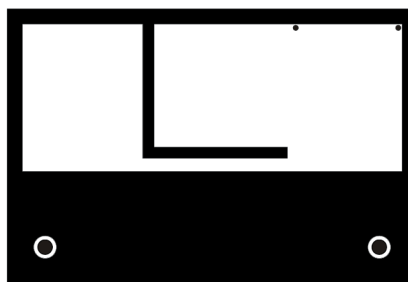
CST	Computer Simulation Technology
GSM	Global System for Mobile Communications, globální systém pro mobilní komunikaci
PIFA	Planar Inverted-F Antenna, planární anténa typu obrácené F
SAR	Specific Absorption Rate, měrný absorbovaný výkon
SMD	Surface Mount Device, zařízení pro povrchovou montáž
SRF	Self-Resonant Frequency, frekvence vlastní rezonance
PSV	Poměr stojatých vln
a	Poloměr koule ohraničující maximální rozměr antény
B	Šířka pásma
D	Činitel směrovosti antény
\mathbf{E}	Vektor intenzity elektrického pole
f_0	Rezonanční frekvence
FBW_v	Fractional matched bandwidth, frakční šířka pásma
G	Realizovatelný zisk
\mathbf{H}	Vektor intenzity magnetického pole
h	Výška substrátu
k	Vlnové číslo
P_A	Přijatý výkon
Q	Činitel jakosti
R_A	Vstupní odpor antény
R_l	Ztrátový odpor
S_{11}	Činitel odrazu
W	Reaktanční energie
X_A	Reaktance záření
Z_A	Vstupní impedance antény
Z_C	Charakteristická impedance kapacitoru tvořeného vedením
Z_{CH}	Charakteristická impedance napáječe
Z_O	Charakteristická impedance vedení
Γ	Činitel odrazu
ϵ_r	Relativní permitivita
ϵ_r''	Imaginární složka komplexní relativní permitivity
η_r	Účinnost záření antény
λ	Vlnová délka

λ_g	Vlnová délka ve vedení
ω_0	Úhlová rezonanční frekvence
σ	Měrná elektrická vodivost
ρ	Hustota
$tg\delta$	Ztrátový činitel

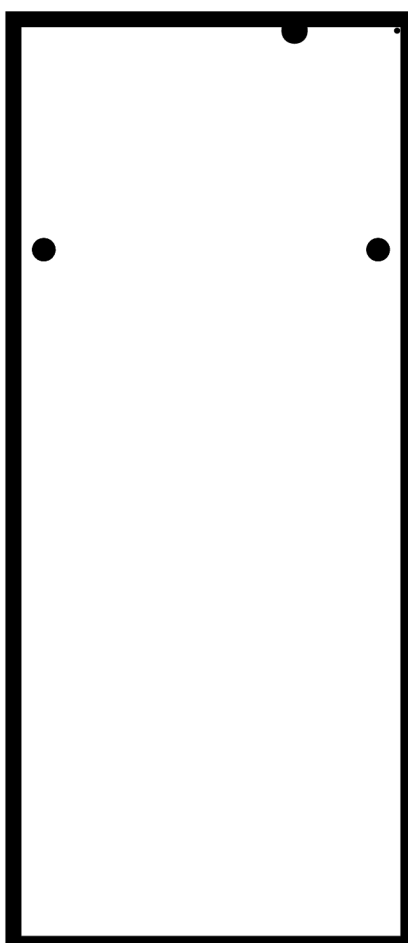
Seznam příloh

A.	Výkresy desek plošných spojů.....	61
B.	Fotografie vyrobené PIFA antény a přizpůsobovacího obvodu.....	62
C.	Postup výroby fantomu vlastní ruky.....	63
D.	Fotografie fantomu při měření impedančního přizpůsobení.....	65
E.	Obsah přiloženého CD.....	66

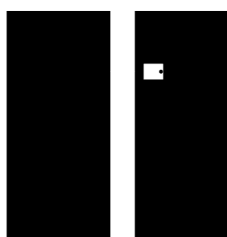
A. Výkresy desek plošných spojů



Obr. A.1 Předloha pro realizaci zářiče PIFA antény, IsoClad933, M 1:1.

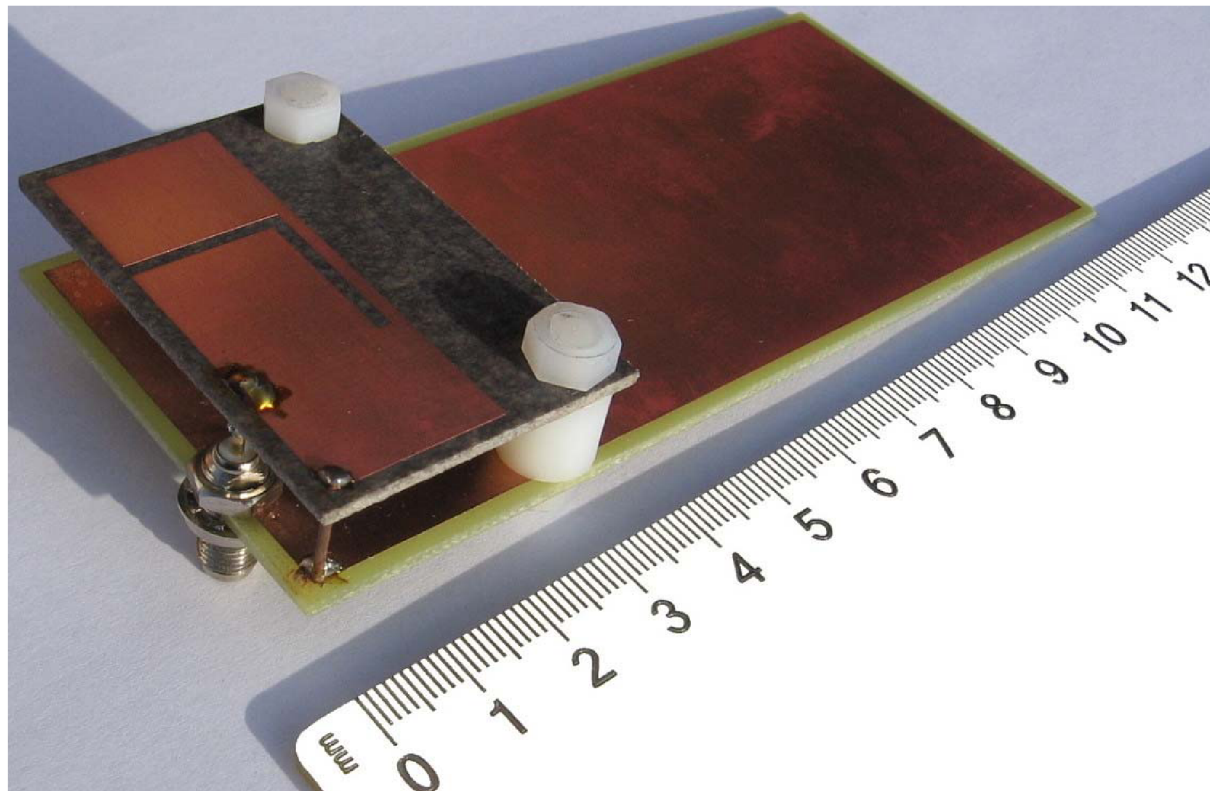


Obr. A.2 Předloha pro realizaci zemní plochy PIFA antény, FR4, M 1:1.

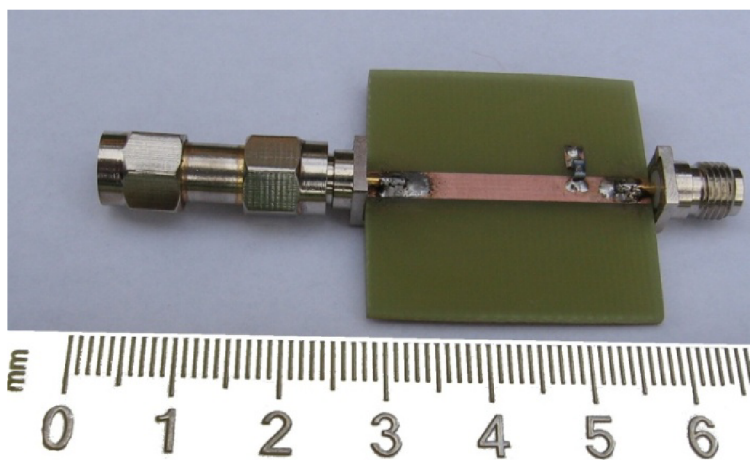


Obr. A.3 Předloha pro realizaci přizpůsobovacího obvodu, FR4, M 1:1

B. Fotografie vyrobené PIFA antény a přizpůsobovacího obvodu



Obr. B.1 Fotografie vyrobené dvoupásmové PIFA antény.

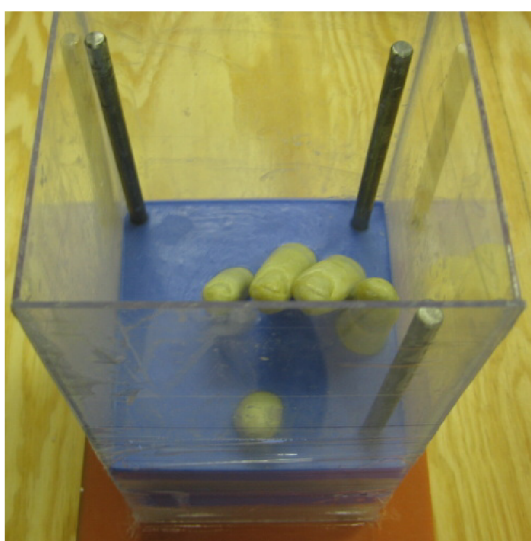


Obr. B.2 Fotografie vyrobeného přizpůsobovacího obvodu.

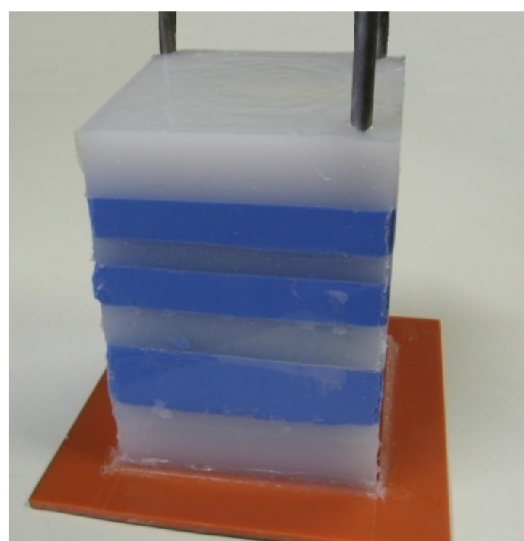
C. Postup výroby fantomu vlastní ruky



Obr. C.1 Fotografie odlitku vlastní ruky vyrobené z odlévací hmoty Efkolín.

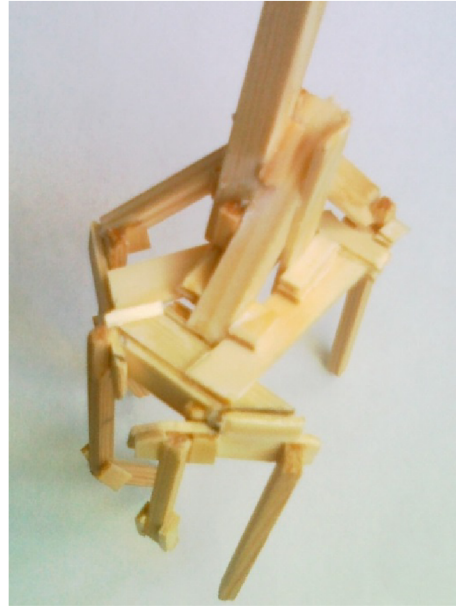


a)



b)

Obr. C.2 Fotografie výroby 7dílné formy: a) odlité 4 vrstvy, b) hotová forma.



Obr. C.3 Fotografie nosné kostry fantomu vyrobené ze smrkového dřeva.



Obr. C.4 Fotografie lití agaru do formy a výsledného fantomu.

D. Fotografie fantomu při měření impedančního přizpůsobení



Obr. D.1 Fotografie fantomu vlastní ruky při měření impedančního přizpůsobení.

E. Obsah příloženého CD

Součástí výtisku práce je CD, jehož obsah je následující:

- DP_Vehovsky.pdf

CST

- 1_PIFA.cst
- 2_prst.cst
- 3_ruka.cst
- 4_fantom.cst
- 5_prizp_obvod.cst

3D skener

- ruka_scan.stl
- navod_export.pdf

Predlohy

- PIFA_bottom.dxf
- PIFA_top.dxf
- prizp_obvod.dxf