



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SÍŤ PRO VYSOFREKVENČNÍ KOMUNIKACI NA LIDSKÉM TĚLE

NETWORK FOR HIGH-FREQUENCY ON-BODY COMMUNICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Halas

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Kokolia

BRNO 2018

Bakalářská práce

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

Student: David Halas

ID: 158580

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Síť pro vysokofrekvenční komunikaci na lidském těle

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se základními problémy, které je třeba vzít v úvahu při bezdrátové přenosu informace v blízkosti lidského těla. Vyberte nejvhodnější anténu, případně vlnovod a topologii sítě a výběr zdůvodněte. Provedte detailní simulaci spoje na povrchu lidského těla.

Na základě získaných znalostí navrhnete komunikační síť pro spojení na různých částech těla, síť vyrobte, provedte kompletní měření a posuďte vliv přítomnosti lidského těla.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GURALIUC, A.; SERRA, A.; NEPA, P.; MANARA, G; Path gain models for on-body communication systems at 2.4 and 5.8 GHz; Annals of telecommunications - annales des télécommunications 66:205-212

[2] HALL, P. S.; YANG, H.; Antennas and propagation for body-centric wireless communication; Boston: Artech House, 2012; xiii; 387 p.; ISBN: 978-1-60807-376-4

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 24. 5. 2018

Vedoucí práce: Ing. Martin Kokolia


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



UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na návrh sítě pro vysokofrekvenční komunikaci na lidském těle. Práce je zaměřena na návrh antén pracujících ve dvou pásmech, a to konkrétně na kmitočtech 2,4 GHz a 5,8 GHz. Anténa je integrována do textilu a pracuje v blízkosti lidského těla. V úvodu je popsán problém šíření elektromagnetických vln podél lidského těla. Dále se práce zabývá použitelností různých typů antén pro integraci na textilní substrát. Na základě provedených simulací je zvolena vhodná anténa pro dané účely. Použitým simulačním programem je CST Microwave Studio. V závěru byly antény optimalizovány, následně vyrobeny a bylo provedeno měření jejich parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Anténa, permitivita, textilie, lidské tělo, CST Microwave Studio, PIFA, Patch anténa, vlnovod, Trychtýřová anténa, SIW

ABSTRACT

This work focuses on the design of a network for high-frequency communication on the human body. The thesis is focused on the design of two-band antennas, namely 2.4 GHz and 5.8 GHz. The antenna is integrated into the textile and works close to the human body. The introduction describes the problem of spreading electromagnetic waves along the human body. Further, the thesis deals with the applicability of different types of antennas for integration on the textile substrate. Based on the simulations performed, a suitable antenna is selected for the purpose. The simulation program used is the CST Microwave Studio. In the end, the antennas were optimized, subsequently manufactured and their parameters measured.

KEYWORDS

Antenna, permittivity, textile, human body, CST Microwave Studio, PIFA, Patch antenna, waveguide, Horn antenna, SIW

HALAS, D. *Sít' pro vysokofrekvenční komunikaci na lidském těle*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 58 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Kokolia.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Sít' pro vysokofrekvenční komunikaci na lidském těle jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Martinovi Kokolia za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, dále za odborné vedení, konzultace a další cenné a podmětné rady při vedení mé bakalářské práce.

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	xi
1 Úvod	1
2 Vliv lidského těla na anténu	2
2.1 Šíření elektromagnetických vln podél lidského těla	3
2.1.1 Povrchová vlna	3
2.1.2 Plazivá vlna.....	4
2.2 Fantomy	4
2.3 Specifická míra absorpce (SAR).....	5
3 Textilní Substrát	6
3.1 Základní vlastnosti	6
3.2 Aplikace antén na textilní substrát.....	6
4 Měření dieletrických parametrů	7
4.1 Měření relativní permitivity.....	7
4.2 Měření ztrátového činitele	10
5 Planární antény	12
5.1 Patch anténa	12
5.1.1 Vícepásmová Patch anténa	13
5.2 PIFA.....	13
5.3 Vlnovod	14
5.3.1 Provedení SIW/CSIW	15
5.4 Trychtýřová anténa	16
5.4.1 Provedení SIW	16
5.4.2 Provedení CSIW	17
5.5 Štěrbinová anténa.....	18
6 Napájení planárních antén	19
6.1 Napájení koaxiální sondou.....	19
6.2 Napájení mikropáskovým vedením	20

6.3	Napájení blízkým vedením	20
6.4	Porovnání způsobů napájení	21
7	Návrh a simulace antén	22
7.1	Zjednodušený model lidské ruky	22
7.2	Návrh vlnovodu	24
7.2.1	Vlnovod CSIW	25
7.3	Návrh Patch antény	27
7.3.1	Dvoupásmová Patch anténa	28
7.4	PIFA	30
7.5	Trychtýřová anténa SIW/CSIW	34
7.6	Štěrbinová anténa	39
8	Výroba a měření antén	41
8.1	Patch anténa dvoupásmová	41
8.2	PIFA	42
8.3	Trychtýřová anténa SIW a CSIW	44
8.4	Štěrbinová anténa	46
8.5	Vlnovod CSIW	47
8.6	Měření přenosu vyrobených antén	48
9	Závěr	54
	Literatura	56
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 4.1:	Anténa pro měření relativní permitivity na frekvenci 2,4 GHz (vlevo) a na frekvenci 5,8 GHz (vpravo)	8
Obrázek 4.2:	Činitel odrazu anténního vzorku pro frekvenci 2,4 GHz.....	8
Obrázek 4.3:	Činitel odrazu anténního vzorku pro frekvenci 5,8 GHz.....	9
Obrázek 4.4:	Struktury použitých mikropáskových vedení [10]: vlevo) struktura LINE, vpravo) struktura THRU	10
Obrázek 5.1:	Rozložení klasické patch antény napájené mikropáskem [18]	12
Obrázek 5.2:	Typická konstrukce jednopásmové antény v provedení PIFA [2].....	13
Obrázek 5.3:	Ukázka různých provedení vlnovodu: a) konvenční, b) SIW, c) CSIW. 15	
Obrázek 5.4:	Základní typy trychtýřů [14].....	16
Obrázek 5.5:	Model trychtýřové antény se sktrukturou CSIW napájené SMA konektorem	17
Obrázek 5.6:	Model štěrbinové antény napájené SMA konektorem.....	18
Obrázek 6.1:	Napájení koaxiální sondou [12].....	19
Obrázek 6.2:	Princip napájení blízkým vedením [18].....	21
Obrázek 7.1:	Vytvořený zjednodušený model lidské ruky	22
Obrázek 7.2:	Umístění antén na zjednodušeném modelu lidské ruky.....	23
Obrázek 7.3:	Umístění antén na zjednodušeném modelu lidské ruky ohnuté o 90°	23
Obrázek 7.4:	Vlnovod CSIW: a) navržený model vlnovodu, b) vlnovod přizpůsobený tvaru modelu lidské ruky, c) optimalizovaný model vlnovodu	26
Obrázek 7.5:	Činitel přenosu pro planární vlnovod navrhnutý metodou CSIW	26
Obrázek 7.6:	Činitel přenosu vlnovodu CSIW pro různou délku vlnovodu	27
Obrázek 7.7:	Modely dvoupásmových patch antén: a) navržený model antény, b) 1. optimalizovaný model antény, c) 2. optimalizovaný model antény	28
Obrázek 7.8:	Činitel odrazu dvoupásmových patch antén	28
Obrázek 7.9:	Vyzařovací diagram dvoupásmové patch antény v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) na frekvenci 2,4 GHz.....	29
Obrázek 7.10:	Vyzařovací diagram dvoupásmové patch antény v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) na frekvenci 5,8 GHz.....	30
Obrázek 7.11:	Model navržené (vlevo) a optimalizované (vpravo) antény typu PIFA .	31
Obrázek 7.12:	Činitel odrazu antény typu PIFA	31
Obrázek 7.13:	Vyzařovací diagram antény typu PIFA na frekvenci 2,45 GHz v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo).....	32

Obrázek 7.14: Vyzařovací diagram antény typu PIFA na frekvenci 5,8 GHz v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo).....	32
Obrázek 7.15: Závislost činitele odrazu PIFA na velikosti mezery mezi anténou a živou tkání pro frekvenční pásmo 2,4 GHz	33
Obrázek 7.16: Závislost činitele odrazu PIFA na velikosti mezery mezi anténou a živou tkání pro frekvenční pásmo 5,8 GHz	33
Obrázek 7.17: Ukázka přechodu mikropásek – SIW [16].....	35
Obrázek 7.18: Geometrické rozložení ústí trychtýřové antény [16]	35
Obrázek 7.19: Model navržené (vlevo) a optimalizované (vpravo) trychtýřové antény SIW	36
Obrázek 7.20: Model navržené (vlevo) a optimalizované (vpravo) trychtýřové antény CSIW	36
Obrázek 7.21: Trychtýřová anténa přizpůsobená tvaru modelu lidské ruky v provedení SIW (vlevo) a CSIW (vpravo)	36
Obrázek 7.22: Činitel odrazu trychtýřové antény SIW	37
Obrázek 7.23: Činitel odrazu trychtýřové antény CSIW	37
Obrázek 7.24: Vyzařovací diagram trychtýřové antény CSIW v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) pro frekvenci 5,8 GHz	38
Obrázek 7.25: Vyzařovací diagram trychtýřové antény SIW v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) pro frekvenci 5,8 GHz	38
Obrázek 7.26: Model šěrbinové antény.....	39
Obrázek 7.27: Vyzařovací diagram pro 1. model šěrbinové antény v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) pro frekvenci 5,8 GHz	40
Obrázek 7.28: Vyzařovací diagram pro 2. model šěrbinové antény v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) pro frekvenci 5,8 GHz	40
Obrázek 8.1: Dvoupásmová patch anténa vyrobena z měděné fólie (vlevo) a vodivé textilie včetně použitého N-konektoru (vpravo).....	42
Obrázek 8.2: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu dvoupásmových patch antén.....	42
Obrázek 8.3: PIFA vyrobena z měděné fólie (vlevo) a vodivé textilie včetně použitého N-konektoru (vpravo) se zkratem vytvořeným pomocí nitě z vodivých vláken.....	43
Obrázek 8.4: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu antény PIFA.....	43
Obrázek 8.5: Trychtýřová anténa SIW vyrobena z měděné fólie (vlevo) a vodivé textilie (vpravo) včetně použitého N-konektoru	44
Obrázek 8.6: Trychtýřová anténa CSIW vyrobena z měděné fólie (vlevo) a vodivé textilie (vpravo) včetně použitého N-konektoru.....	45
Obrázek 8.7: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu	

trychtýřové antény SIW	45
Obrázek 8.8: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu trychtýřové antény CSIW	46
Obrázek 8.9: Štěrbínová anténa vyrobená z měděné fólie: 1. model (vlevo) a 2. model (vpravo).....	46
Obrázek 8.10: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu štěrbinových antén	47
Obrázek 8.11: Vlnovod CSIW vyroben z měděné fólie (horní) a vodivé textilie (dolní)	48
Obrázek 8.12: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu vlnovodu CSIW	48
Obrázek 8.13: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi patch anténami a anténou typu PIFA.....	49
Obrázek 8.14: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi patch anténou a trychtýřovými anténami.....	50
Obrázek 8.15: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi patch anténou a trychtýřovými anténami.....	50
Obrázek 8.16: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu pro přenos mezi patch anténou a PIFA a mezi trychtýřovými anténami	51
Obrázek 8.17: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi patch anténou a štěrbinovou anténou.....	52
Obrázek 8.18: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi trychtýřovou anténou a štěrbinovou anténou.....	52
Obrázek 8.19: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků pro přenos mezi 1. modelem a 2. modelem štěrbinové antény.....	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Elektrické parametry lidské tkáně [1].....	2
Tabulka 7.1: Rozměry zjednodušeného modelu lidské ruky odpovídající Obr. 7.1	22

1 ÚVOD

Bezdrátový přenos informace je v dnešní době všudypřítomným standardem. Prostřednictvím bezdrátové technologie se přenáší různé signály, například rádiový, televizní, mobilní, či satelitní přenos informace. Veškerá komunikace na větší vzdálenosti probíhá v dnešní době bezdrátově. Tyto antény mohou mít různou velikost i parametry. Kladou se stále vyšší nároky na miniaturizaci antén, proto se využívají pro komunikaci stále vyšší frekvence.

Mikrovlnné systémy integrovány do textilních substrátů se v dnešní době těší stále větší oblibě. Tyto komponenty se hojně využívají v oblasti inteligentního oblečení, vojenské techniky a ve zdravotnictví. Efektivní použití těchto komponentů spočívá v monitoringu zdravotního stavu pacienta, nebo jako součást inteligentní výzbroje ve vojenské technice. Tyto technologie se využívají z důvodu kompaktnosti, malé hmotnosti a ohebnosti, což značně zvyšuje komfort uživatele.

Tato práce je zaměřena na komponenty využívající integraci mikrovlnných systémů do textilních substrátů, měření dielektrických vlastností textilních látek, návrh antén a uvážení jejich funkčnosti v blízkosti živé tkáně, optimalizaci návrhu vybraných antén a následnému měření parametrů antén, jejich přenosu a vlivu přítomnosti lidského těla.

Antény jsou navrhovány a optimalizovány v simulačním prostředí CST Microwave studio. Veškeré antény jsou navrhovány na vybraný textilní substrát, tedy fleece. Dielektrické parametry substrátu byly změřeny a získané hodnoty následně použity při návrhu a simulaci antén.

2 VLIV LIDSKÉHO TĚLA NA ANTÉNU

Tato kapitola je zaměřena na problematiku použití antén v blízkosti živé tkáně. Lidské tělo může ovlivňovat nejen fyzické vlastnosti a parametry antén, ale i vyzářovací charakteristiky a celkové přizpůsobení antény.

Dalším, v dnešní době velmi zkoumaným, parametrem je specifický absorbovaný výkon, který udává míru ozařování lidské tkáně a absorbování vyzářené energie lidskou tkání. Velké množství vyzářené energie, které se absorbuje do živé tkáně, může mít negativní vliv na zdraví člověka, proto je třeba uvažovat míru ozáření při návrhu nositelných antén. [1]

Lidská tkáň se chová jako dielektrický ztrátový materiál s proměnou tloušťkou. Dielektrické vlastnosti lidské kůže jsou závislé na vlhkosti tkáně. Jelikož každý člověk má jinou stavbu těla, tloušťku jednotlivých vrstev, složení krevního oběhu (obsahované minerály mohou drobně ovlivňovat šíření elektromagnetické vlny) a stavbu kostí, není možné vytvořit realistický model lidského těla.

Obecně uznávané parametry lidské tkáně používané při návrhu a simulacích antén jsou uvedeny v Tab. 2.1. [1]

Při modelování antén se používají zjednodušené modely lidských tkání, kdy jsou použity různě přesné metody a modely pro simulaci živých tkání. Při simulacích se používá jednovrstvý model, kdy se uvažuje pouze vrstva kůže, třívrstvý model a pětivrstvý model, který zahrnuje i kosti. Pro simulaci je nejpřesnější takzvaný voxelový model těla, který je tvořen různými materiály, které simulují různé tkáně těla. Tento model má přesnost závislou na přesnosti modelování, tedy velikosti jednotlivých buněk modelu a na použité předloze pro tento model. [1].

Při měření antén se používají takzvané fantomy, což jsou modelované vrstvy gelových materiálů podobných jako při balistických testech. Pro měření antén se nejčastěji používá agarový fantom, který věrohodně nahrazuje vlastnosti lidské tkáně s dostatečnou přesností pro vysokofrekvenční techniku. [1]

Fantomy jsou důležitou součástí při měření vzorků antén. Díky přesně definovanému složení fantomů je možné tyto experimenty opakovat, což je v případě měření na lidském těle obtížné. Navíc je více volnosti při experimentování, protože není nutné dodržovat přísná pravidla, která jsou přesně stanoveny při experimentech s lidmi a zvířaty. [1]

Tabulka 2.1: Elektrické parametry lidské tkáně [1]

$f = 2,4 \text{ GHz}$	$\epsilon_r [-]$	$\sigma [\text{S/m}]$
Kůže (suchá)	38,063	1,441
Tuk	5,285	0,102
Sval	52,791	1,705

$f = 5,8 \text{ GHz}$	$\epsilon_r [-]$	$\sigma [\text{S/m}]$
Kůže (suchá)	35,114	3,717
Tuk	4,955	0,293
Sval	48,485	4,962

2.1 Šíření elektromagnetických vln podél lidského těla

Při analýze šíření centimetrových vln (3–30 GHz) podél lidského těla je možné použít analogii s šířením rádiových vln ve volném prostředí. Šíření elektromagnetických vln je závislé na poměru vlnové délky k nerovnostem na povrchu prostředí, velikost překážek (nerovností) musí být mnohonásobně menší než vlnová délka pro správný přenos energie. Nerovnosti na povrchu lidského těla lze tedy přirovnat k nerovnostem krajiny (kopce, stromy) při šíření dlouhých vln.

Při návrhu komunikačních sítí v blízkosti lidského těla je předpoklad umístění vysílací i přijímací antény v blízkosti živé tkáně. Interakce mezi zdrojovými proudy na natěně a přenosovým médiem (rozhraní mezi vzduchem a živou tkání) mají za následek změnu vyzařovací charakteristiky a impedančního přizpůsobení. Lidské tkáně představují ztrátové dielektrikum charakterizované komplexní permitivitou, kterou tvoří relativní permitivita a měrná vodivost tkáně. [1].

Při aplikaci antén v blízkosti živé tkáně se vychází z modelů šíření povrchových a plazivých vln. Povrchová vlna se šíří pouze po rovné ploše, proto ji lze uvažovat pouze v případě komunikace podél rovných ploch (podél zad, břicha, stehen atd.). Pokud komunikace probíhá po zakřiveném povrchu (ze zad na břicho, mezi zápěstím a ramenem atd.), pak se energie přenáší primárně difrakcí (ohybem) na zakřiveném povrchu těla. Vlna, která je vedena zakřiveným rozhraním se nazývá plazivá vlna. [1]

2.1.1 Povrchová vlna

Při analýze šíření vln podél plochých částí živých tkání je možné vycházet z představy povrchové a prostorové vlny. Nejprve je nutné živou tkáň aproximovat ztrátovým dielektrikem, které vyplňuje celý prostor pod kůží. Ztrátové dielektrikum je popsáno komplexní permitivitou dle vztahu [2]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - j \varepsilon_r'') \quad (2.1)$$

kde ε_0 značí permitivitu vakua, ε_r značí relativní permitivitu, σ je měrná vodivost, ω je úhlový kmitočet a ε_r'' je imaginární část komplexní relativní permitivity.

Při odvození rovnic pro intenzitu elektrického pole \mathbf{E} ve vzdálené oblasti antény (viz [3]) bylo zjištěno, že obě složky vektoru \mathbf{E} jsou nenulové. Z toho lze odvodit, že na rozhraní mezi vzduchem a lidským tělem je intenzita prostorové vlny nulová, proto zde existuje pouze vlna povrchová, která je buzena při komunikaci v blízkosti lidského těla. Z těchto rovnic lze odvodit, že vlnoplochy v místě rozhraní nejsou k rozhraní kolmé, jak by tomu bylo u dokonale vodivé plochy, proto tento materiál lze považovat za ztrátové dielektrikum. [1]

2.1.2 Plazivá vlna

Díky plazivým vlnám se může vlnění šířit i do oblastí rádiového stínu, tedy do oblastí bez přímého kontaktu s trajektorií šíření elektromagnetické vlny. Důležitým jevem, který umožňuje existenci plazivé vlny, a tedy i šíření vlnění mimo směr vyzařování je difrakce na zakřiveném povrchu. [1]

Při dopadu elektromagnetické vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k částečnému odrazu energie (odražená vlna) a částečnému vniknutí vlny do druhého prostředí. Množství energie, která se odrazí, nebo vnikne do druhého prostředí, závisí na elektromagnetických vlastnostech obou prostředí a úhlu dopadu dané vlny. Množství energie, která vnikne do druhého prostředí je dána hloubkou vniku, která udává minimální tloušťku materiálu pro utlumení vniknutého vlnění. [4]

Při šíření plazivé vlny podél lidského těla dochází k odrazům od některých částí těla (rukou, nohou atd.), výsledná intenzita v místě přijímací antény je tedy dána superpozicí plazivých a odražených vln. [5]

Plazivou vlnu lze reprezentovat jako druh povrchové vlny šířící se podél rozhraní vzduchu a dielektrického válce (obecně eliptického tvaru) ve směru kolmém na osu válce. Eliptický válec je dostatečně přesný pro aproximaci skutečného tvaru částí lidského těla. Podmínkou pro šíření plazivé vlny je dodržet stejnou výšku umístění vysílací i přijímací antény. Při nedodržení této podmínky je nutné uvažovat kombinaci plazivé a povrchové vlny. Při šíření plazivé vlny dochází v každém bodě šíření k vyzařování rovinných elektromagnetických vln ve směru tečném k povrchu. Díky tomu dochází k exponenciálnímu úbytku energie vedené podél povrchu. [1]

2.2 Fantomy

Celá tato kapitola čerpá informace z [1] a je věnována různým typům fantomů pro měření antén na lidském těle.

Tekutinové fantomy jsou tvořeny tenkostěnnou nádobou, která je vyrobena z materiálu o nízké relativní permitivitě a vodivosti. Nádoba je plněna tekutinou, která má velmi blízké elektrické vlastnosti modelované tkáni.

Pevné fantomy jsou vyráběny ze směsí keramických a grafitových prášků, nebo ze silikonové pryže smíchané s karbonovými vlákny. Výhodou těchto fantomů jsou dobré mechanické a dielektrické vlastnosti, které se s časem nemění, protože neobsahují žádnou vodu. Bohužel je potřeba pro jejich výrobu speciální vybavení, které je drahé.

Gelové fantomy mohou být použity v různých kmitočtových pásmech pro experimenty zabývající se šířením vln v blízkosti lidského těla. Základem těchto fantomů je deionizovaná voda doplněná vhodným želatinovým prvkem. Tyto fantomy je možné použít pouze pro vytvoření ekvivalentních modelů tkání s velkým obsahem vody, například sval, mozek, nebo kůže.

Gelové fantomy se skládají z několika základních složek, které ovlivňují výsledné vlastnosti fantomu. Hlavní složky těchto fantomů jsou:

- Deionizovaná voda je hlavní složkou všech fantomů.
- Agar umožňuje formovat fantom do požadovaného tvaru
- Polyetylénový prášek nastavuje relativní permitivitu fantomu
- Chlorid sodný nastavuje vodivost fantomu
- TX-151 se užívá pro zvýšení viskozity
- Konzervant pro prodloužení životnosti fantomu (nejčastěji se používá azid sodný, který je vysoce toxický, a proto je často nahrazován jinou látkou)

Tyto fantomy jsou velmi snadné na výrobu. Kvůli zamezení odpařování vody jsou tyto fantomy zabaleny do tenké fólie. V následující tabulce je ukázáno porovnání hmotnosti jednotlivých složek gelového fantomu pro dvě různá kmitočtová pásma.

2.3 Specifická míra absorpce (SAR)

Specifická míra absorpce, též známá jako specifický absorbovaný výkon vyjadřuje míru elektromagnetické energie, kterou pohltí lidská tkáň při vystavení elektromagnetickému záření. Tato absorpce se udává jako výkon na jednotku hmotnosti, tedy W/kg. SAR vyjadřuje veškerou energii, která je pohlcena celou strukturou lidské tkáně, která představuje ztrátový materiál. Maximální přípustné hodnoty jsou dány normou, která udává [6]:

- USA a Kanada: **1,6 W/kg** (zprůměrováno na 1 g hmoty)
- EU, Japonsko a Brazílie: **2,0 W/kg** (zprůměrováno na 10 g hmoty)

Specifická míra absorpce je dána následujícím vztahem [6]:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot E^2}{2 \cdot \rho} = \frac{J^2}{2 \cdot \rho \cdot \sigma}, \quad (2.2)$$

kde σ je elektrická vodivost, E je intenzita elektrického pole, ρ je hustota a J je proudová hustota.

3 TEXTILNÍ SUBSTRÁT

Pro aplikaci antén v blízkosti těla se jako nejvhodnější substrát jeví materiál, který má velmi dobré mechanické vlastnosti. Při integraci antén do nositelných oděvů je pro praktické účely nejvhodnější použití textilního materiálu.

3.1 Základní vlastnosti

Mikrovlnné komponenty na textilním substrátu jsou v dnešní době značně perspektivní. Využívají se zejména v inteligentních oblecích pro vojenské a lékařské aplikace, ale mají i spoustu jiných využití jak pro vládní, tak i pro civilní sektor. [7]

Při návrhu textilních struktur je třeba vzít v úvahu mnoho parametrů, například hustotu a pevnost zvoleného materiálu. Tyto parametry mohou mít vliv nejen na mechanické vlastnosti, ale mohou ovlivnit i činitel jakosti výsledného obvodu. [7].

Textilní materiál je, na rozdíl od klasických materiálů, mechanicky velmi ohebný a poddajný, což je velmi žádoucí vlastností při nositelných aplikacích. [7]

V textilních mikrovlnných systémech se textilie využívá jako dielektrikum, což je poněkud nevhodné použití, protože textilie může měnit své elektrické i mechanické vlastnosti, což může mít za následek změnu parametrů antén. Dalším problémem je savost vlhkosti textilie, která mění permitivitu daného materiálu. Jelikož je relativní permitivita důležitým parametrem při návrhu antény, může být její změna zásadní, a proto je savost materiálu velmi nežádoucí. [7]

3.2 Aplikace antén na textilní substrát

Jako vodivý materiál je možno použít měděnou fólii, která se na textil nalepí, nebo elektricky vodivé barvy, které se na textil tisknou obdobně jako klasický inkoust. [8].

Vodivé fólie mají velmi dobré elektrické vlastnosti, ale bohužel mají horší mechanické vlastnosti. Nejsou příliš poddajné při ohybu. Při deformaci se fólie nikdy nevrátí do původního tvaru, na rozdíl od textilie, která se může ohýbat téměř bez jakékoli trvalejší deformace. Dále je u vodivé fólie důležité být pečlivý při nanášení, jelikož fólie mají tendenci se kroutit a také lepidlo, které tuto fólii drží, by se nemělo používat opakovaně, což znamená, že fólie musí být nalepena na první pokus. [7] [8] [9]

Elektricky vodivé barvy jsou často nanášeny pomocí sítotisku. Při výběru těchto barev je třeba brát v úvahu jejich flexibilita a odolnost vůči sloupávání barvy, aby se anténa během používání nezhodnotila, případně nezměnila své vlastnosti vlivem nekvalitní barvy. Dále je třeba vzít v úvahu možnost vsáknutí barvy do textilu, což by mohlo způsobit nerovnoměrný povrch antény a následně změnu rozměrů navržené antény. Do jaké hloubky materiálu dokáže barva prosáknout určuje její viskozita, proto je tato vlastnost velmi důležitá při výběru barvy. [7] [8] [9]

4 MĚŘENÍ DIELETRICKÝCH PARAMETRŮ

Tato kapitola je věnována měření relativní permitivity a ztrátového činitele zvoleného textilního materiálu, tedy materiálu Fleece s tloušťkou 1,5 mm.

Vzhledem k tomu, že textilní materiál je vyráběn výhradně jako materiál pro oděvní průmysl, nejsou při expedici uváděny žádné dielektrické vlastnosti. Tyto vlastnosti se také vždy mění v závislosti na výrobcí a konkrétním materiálu použitém při výrobě. Proto je nutné zvolený materiál změřit, pro následné uvážení potřebných parametrů při návrhu anténních komponentů.

Na měření dielektrických vlastností existuje spousta metod, mezi nejpoužívanější patří například [8]:

- metoda paralelních desek,
- metoda využívající vlnovodu s otevřeným koncem,
- metoda využívající sondu s otevřeným koncem,
- metoda ve volném prostoru,
- porovnávací metoda.

Pro naši aplikaci byla zvolena metoda porovnávací, kdy se změří vyrobené vzorky a výsledky jsou porovnány s výsledky získanými simulacemi pro stejné rozměry.

4.1 Měření relativní permitivity

Jako dielektrický substrát byl zvolen běžný materiál fleece s tloušťkou $h = 1,5$ mm a na něj byla nalepena vyrobená anténa z měděné fólie o tloušťce $t = 35\mu\text{m}$.

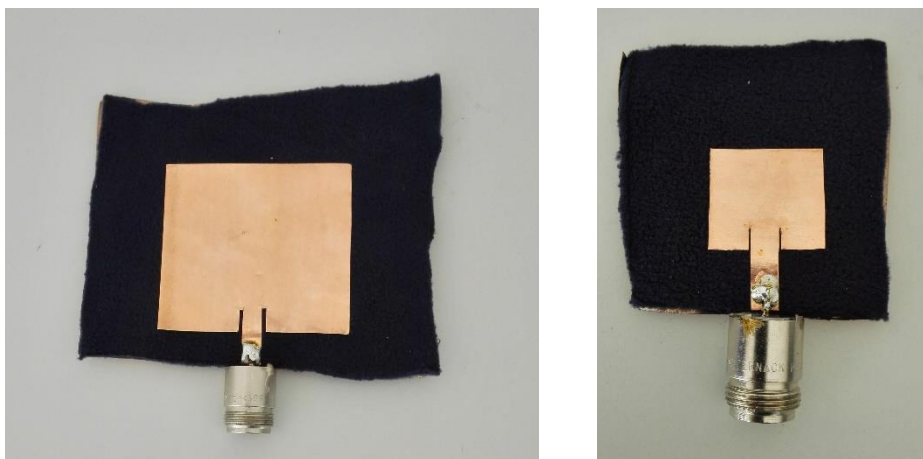
Tento materiál je velmi ohebný, měkký a tvárný, což může být výhodné i nevýhodné. Stlačením lze změnit jeho tloušťku, tedy výšku dielektrika. Fleece je složen z „načechrané“ tkaniny, která plní zejména izolační funkci a je přilepena na tenkou vrstvu tkaniny, která tvoří vnější vrstvu. [8]

Pro výrobu měřících vzorků byla zvolena odhadovaná relativní permitivita $\epsilon_r = 1,2$ a výška substrátu udávanou výrobcem textilie $h = 1,5$ mm.

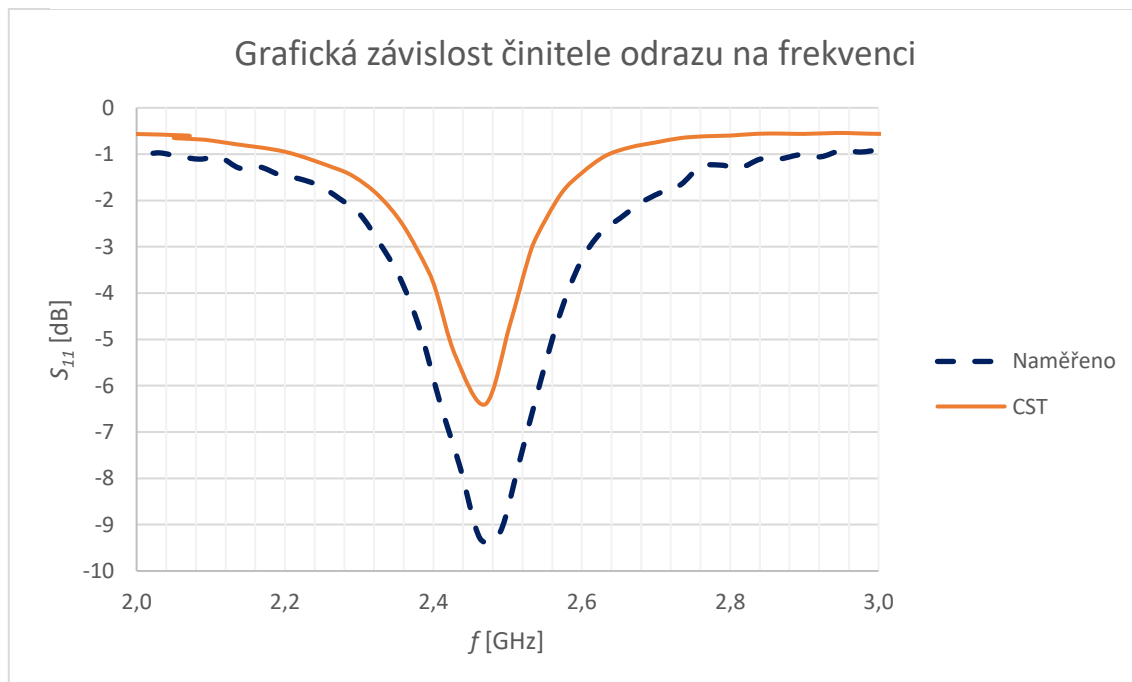
Byly vyrobeny 2 vzorky patch antény. Rozměry antény byly zvoleny tak, aby jedna anténa rezonovala na frekvenci 2,4 GHz a druhá na frekvenci 5,8 GHz. Vzhledem k tomu, že antény byly vyráběny ručně pomocí nůžek, nebylo možné dodržet přesnost vypočtených rozměrů, proto jsou tyto hodnoty pouze orientační. Dále byla vypočtena šířka mikropáskového vedení, který tuto anténu napájí a byla určena šterbina pro impedanční přizpůsobení na šířku 1 mm. Postup návrhu patch antén je blíže popsán v kapitole 7.3 a návrh mikropáskového vedení je popsán v kapitole 6.2. Výsledné rozměry jsou shrnuty v Tab. 4.1.

Anténa je napájena pomocí zapuštěného mikropáskového vedení. Délka zapuštění byla zvolena odhadem na 8 mm pro anténu na frekvenci 2,4 GHz a 5 mm pro anténu na frekvenci 5,8 GHz.

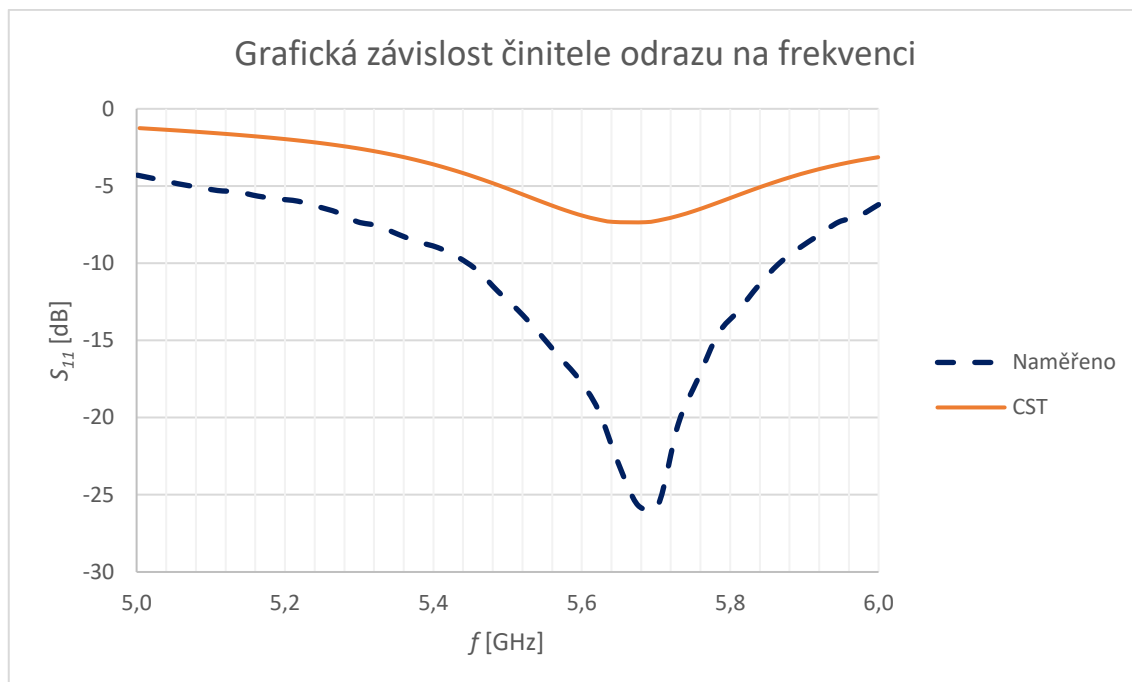
Dle příslušných vzorců byly vypočteny rozměry antén, které byly vyrobeny a změřeny. Poté byly tyto antény se skutečnými rozměry simulovány v simulačním programu CST MWS a simulované hodnoty byly porovnány se změřenými hodnotami a následně byla určena relativní permitivita textilního materiálu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.1. Srovnání naměřených a simulovaných hodnot činitele odrazu je ukázáno na Obr. 4.2 a Obr. 4.3.



Obrázek 4.1: Anténa pro měření relativní permitivity na frekvenci 2,4 GHz (vlevo) a na frekvenci 5,8 GHz (vpravo)



Obrázek 4.2: Činitel odrazu anténního vzorku pro frekvenci 2,4 GHz



Obrázek 4.3: Činitel odrazu anténního vzorku pro frekvenci 5,8 GHz

Pro změření činitele odrazu těchto anténních vzorků bylo použito jednoportové měření pomocí vektorového obvodového analyzátoru Rohde & Schwarz. Měřené anténní vzorky jsou ukázány na Obr. 4.1.

Z naměřených hodnot byla vypočtena relativní permitivita použité textilie. Pro určení permitivity byl použit vztah (7.14) a simulační program CST. Hodnota permitivity vypočtená pomocí vzorce byla přesnější pro nižší kmitočty, avšak s přesností na jedno desetinné místo byly hodnoty získané programem CST v podstatě totožné s hodnotami vypočtenými. Veškeré hodnoty vypočteny v rámci této kapitoly jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 4.1: Zjištěné hodnoty pro určení relativní permitivity

f_r		W [mm]	L [mm]	Wm [mm]	f [GHz]	S_{11} [dB]	ϵ_r (výpočet)	ϵ_r (CST)
2,4 GHz	Naměřeno	59,3	55,1	6,2	2,463	-9,301	/	/
	Vypočteno	59,55	55,36	6,67	2,4625	-6,5155	1,1095	1,10
5,8 GHz	Naměřeno	24,9	22,5	6,2	5,676	-25,695	/	/
	Vypočteno	29,64	21,91	6,67	5,664	-7,3916	1,2528	1,23

4.2 Měření ztrátového činitele

Pro měření ztrátového činitele byla použita metoda přenosového vedení. Tato metoda spočívá v měření dvou stejných vedení s různými parametry, konkrétně délkou. V tomto případě bylo použito mikropáskové vedení. Výhoda tohoto vedení spočívá v jednoduchosti provedení. Mikropásková vedení stačí osadit konektory a propojit je kabelem s vektorovým obvodovým analyzátozem. [8].

Pro měření je vhodné vyrobit 2 mikropásková vedení o dvou různých délkách pro vyrušení chyb způsobených konektory a samotným vedením. [10].

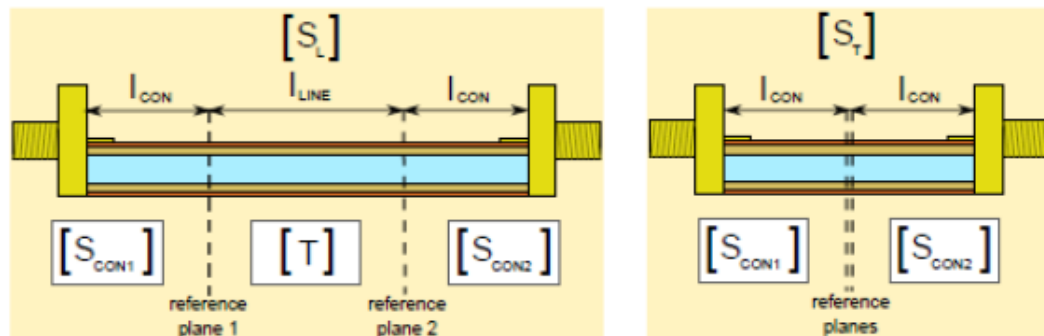
Struktury těchto vedení jsou zobrazeny na Obr. 4.4.

Kratší vedení bylo označeno jako THRU s S-parametry $[S_T]$ a skládá se ze dvou částí označených jako l_{CON} , které reprezentují chyby na konektorech a vedení. [8]

Delší vedení bylo označeno, jako LINE s S-parametry $[S_L]$ a skládá se ze dvou částí, označených jako l_{CON} , stejně jako tomu je u kratšího vedení. Toto vedení je navíc rozšířeno o úsek označený jako l_{LINE} , na kterém je provedeno měření s eliminací chyb. [8]

Délky vedení $l_{CON} = 60$ mm a $l_{LINE} = 15$ mm byly zvoleny tak, aby se uprostřed vedení vybudila pouze vlna Q-TEM. [8]

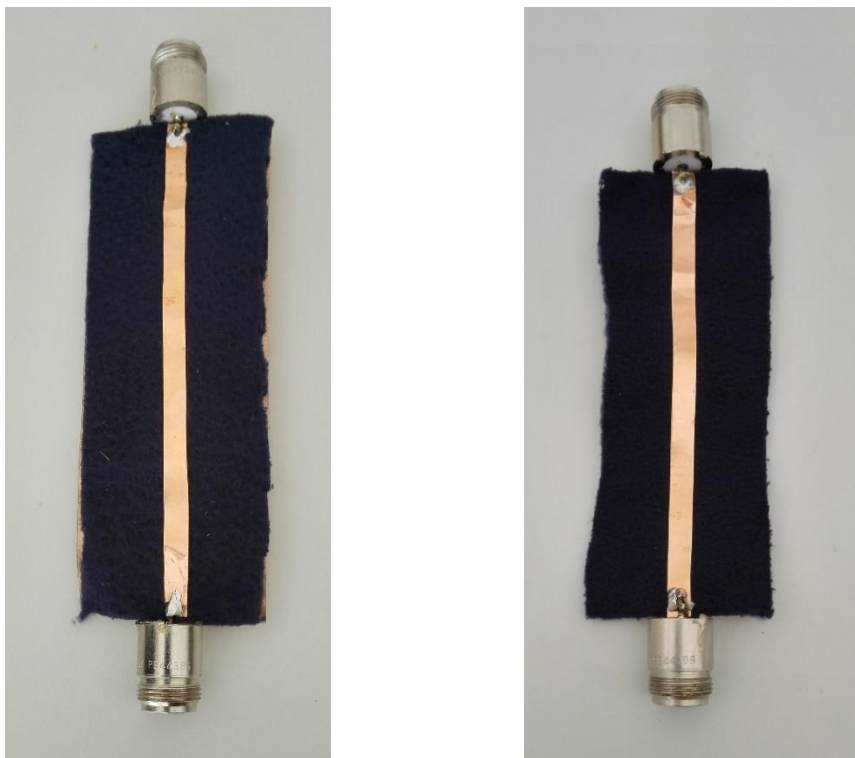
Šířky těchto vedení byly vypočteny pomocí online kalkulátoru [11] pro výšku substrátu $h = 1,5$ mm, odhadovanou relativní permitivitu $\epsilon_r = 1,2$ a charakteristickou impedanci 50Ω .



Obrázek 4.4: Struktury použitých mikropáskových vedení [10]: vlevo) struktura LINE, vpravo) struktura THRU

Vedení bylo zhotoveno z měděné fólie s tloušťkou $t = 35 \mu\text{m}$ a pomocí SMA konektorů bylo přivedeno na vektorový obvodový analyzátor Rohde & Schwarz ZLV, pomocí kterého bylo provedeno měření. Z naměřených hodnot byl vypočítán ztrátový činitel, který je uveden v Tab. 4.2. Zhotovené měřené mikropáskové vedení je ukázáno na Obr. 4.4.

Výpočet byl proveden podle matematických vzorců, které byly převzaty z [8].



Obrázek 4.4: Mikropáskové vedení pro měření ztrátového činitele: vlevo) vedení LINE, vpravo) vedené THRU

Tabulka 4.2: Zjištěné hodnoty při měření ztrátového činitele

vedení:		L [mm]	W [mm]	f [GHz]	S_{11} [dB]	$\tan(\delta)$ [-]
LINE	Vypočteno	135	6,8	1,951	-19,62	0,0317
	Naměřeno	135	6	1,95	-11,132	
THRU	Vypočteno	120	6,8	1,977	-25,28	
	Naměřeno	120	6	1,98	-9,662	

V rámci této kapitoly byly změřeny vlastnosti textilního materiálu fleecy, které jsou uvedeny v Tab. 4.2. Byl změřen ztrátový činitel $\tan(\delta)$. Teoretický předpoklad ztrátového činitele byl 0,02. Naměřená hodnota je vyšší než teoretická hodnota, ale vzhledem k tomu, že fleecový materiál není vytvořen pro účely použití jako dielektrického materiálu a každá výrobní série se liší, je možné považovat naměřenou hodnotu za správnou. Mechanické výhody tohoto materiálu převyšují nevýhody a ztrátovost dielektrických vlastností.

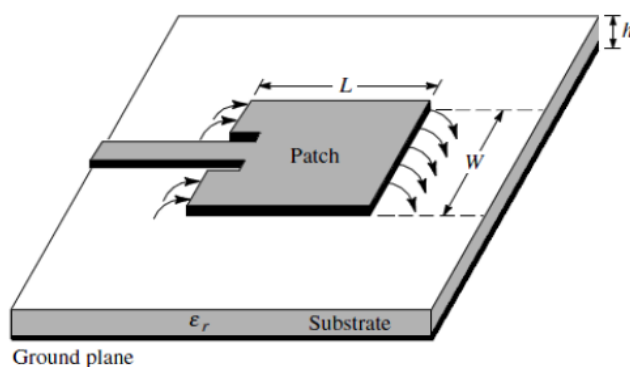
5 PLANÁRNÍ ANTÉNY

Planární antény jsou používány v mnoha aplikacích již více než 60 let po celém světě. Hlavní výhodou těchto antén je možnost miniaturizace a široké spektrum použití v moderních technologiích. Tyto antény vznikly na základě požadavků na antény, které by měly malé rozměry a dobře by kopírovaly povrch letadel, vojenské techniky a jiných nosných komponent. Díky svým malým rozměrům a jednoduchosti výroby jsou tyto antény v dnešní době hojně využívány nejen ve vojenství ale i v civilních aplikacích. Jelikož rezonanční frekvence těchto antén je závislá na rozměrech antény, jsou planární anténní systémy užívány ve frekvenčních pásmech vyšších než stovky MHz. [12]

5.1 Patch anténa

Tyto antény jsou nejčastěji nazývány jako patch antény, flíčkové antény, nebo mikropáskové antény. Skládají se z vodivého vyzařujícího flíčku umístěného na jedné straně dielektrického substrátu. Po spodní straně substrátu je rozprostřena zemnicí deska, což často bývá rozlita měď po celé ploše dielektrika. Základní rozložení patch antény napájené mikropáskovým vedením je ukázáno na Obr. 5.1.

Nejdůležitějšími parametry patch antén jsou šířka flíčku (ovlivňuje impedanci antény) a délka flíčku (ovlivňuje rezonanční kmitočet antény), relativní permitivita dielektrika a tloušťka použitého dielektrika. Tyto antény mohou být vyrobeny na různých substrátech a mohou mít různé tvary. Nejčastěji používanými tvary jsou antény čtvercové, obdélníkové a kruhové. [6]



Obrázek 5.1: Rozložení klasické patch antény napájené mikropáskem [18]

Výhodami těchto antén jsou například: nízká hmotnost, malé rozměry, snadná výroba (možnost sériové výroby), možnost snadného spojení s mikrovlnnými obvody. Nevýhodami těchto antén jsou například: úzká šířka pásma, nižší zisk a vyzařování v půlprostoru. [12]

5.1.1 Vícepásmová Patch anténa

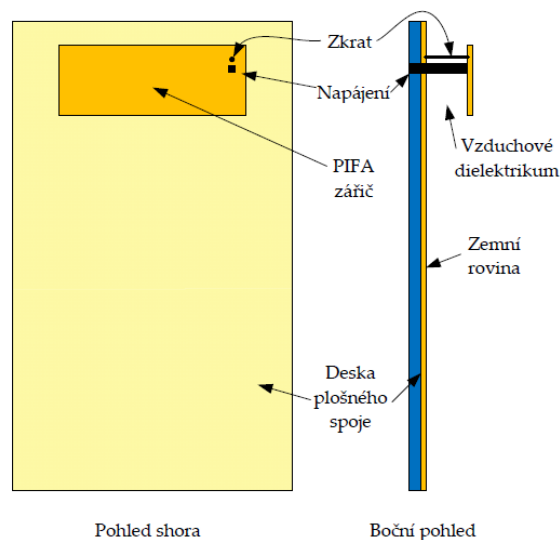
Existuje několik způsobů, jak vytvořit vícepásmovou patch anténu. U jednovrstvého provedení lze vícepásmové antény dosáhnout například pomocí vhodně umístěné štěrbin, případně více štěrbin (výřezů), nebo pomocí zkratovacích kolíků, čímž se změní rozložení proudů na povrchu flíčku. [12].

V případě použití zkratovacího kolíku se jedná o anténu, která nese označení PIFA, tato anténa bude blíže popsána v následující kapitole.

U vícevrstvých provedení lze použít několik různě velkých flíčků umístěných do jednotlivých vrstev substrátu. Nejjednodušší způsob provedení dvoupásmové patch antény je jednovrstvá anténa s vyřezanými štěrbinami. Tyto štěrbiny mohou mít různý tvar, například štěrbina tvaru U, dvě štěrbinu tvaru L, schodovité štěrbinu, nebo zahnuté štěrbinu. [12]

5.2 PIFA

Tato anténa je obdobou klasické flíčkové antény s úpravou pro zmenšení rozměrů. Touto technikou lze dosáhnout poloviční velikosti, neboť mezi anténou a zemnicí plochou je zkratovací kolík, či zkratovací deska. Tímto zkratem je délka vlny rozložena mezi tyto dvě části. Patch anténa plní funkci půlvlnného dipólu a pomocí zkratu zemnicí deska převezme polovinu funkce. Tím zemnicí deska zpracovává čtvrtinu vlnové délky a druhou čtvrtinu zpracovává flíčková anténa. Klasické rozložení antény PIFA je zobrazeno na Obr. 5.2. Pro dvoupásmové provedení je nutno zářič antény opatřit výřezy, které rozdělí anténu na dva rezonátory. První frekvenční pásmo je dáno rozměry antény a druhé pásmo je dáno výřezem. V praxi se používají výřezy tvaru L, tvaru U, šnekového tvaru a dalších speciálních tvarů.



Obrázek 5.2: Typická konstrukce jednopásmové antény v provedení PIFA [2]

5.3 Vlnovod

Vlnovod je úsek vedení, v němž se šíří elektromagnetická vlna o frekvenci větší než kritická frekvence f_c . Vlnovod může mít libovolný tvar průřezu, avšak typ průřezu se volí dle požadovaných vlastností vlnovodu. Nejčastěji používaným vlnovodem je vlnovod s obdélníkovým průřezem. Rozměry vlnovodu udávají minimální frekvenci, pro kterou je možné vlnovod využít jako vedení. V praxi se vlnovody používají ve frekvenčních pásmech od 1 GHz výše.

Rozložení elektromagnetického pole je dáno okrajovými podmínkami na vodivém plášti vlnovodu a je charakterizováno vidy (módy). Ve vlnovodu se obecně mohou šířit 2 typy vln [13]:

- **TE** (transverzálně elektrický) – vektor **E** nemá žádnou složku ve směru šíření vlny, tj. vektor **E** je orientován pouze v příčném řezu vlnovodem
- **TM** (transverzálně magnetický) – vektor **H** nemá žádnou složku ve směru šíření vlny, tj. vektor **H** je orientován pouze v příčném řezu vlnovodem

Každý vid je charakterizován svojí frekvencí. Vid se vlnovodem může šířit pouze tehdy, má-li vyšší frekvenci než charakteristická (kritická) frekvence. Tyto vidy jsou popsány vidovými čísly m, n, \dots TE_{mn} a TM_{mn} . [14]

Délka vlny ve vlnovodu je delší než délka vlny ve volném prostoru, protože fázová rychlost vlny je vyšší než rychlost světla. Vlnová délka ve vlnovodu se počítá podle [14]:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}, \quad (5.1)$$

kde λ_g je vlnová délka ve vlnovodu, λ_c je mezní vlnová délka vidu a λ je délka vlny ve volném prostoru.

Ztráty ve vlnovodu vznikají vlivem vysokofrekvenčního odporu vodivých stěn [14]:

$$R_S = \frac{1}{h \cdot \sigma}, \quad (5.2)$$

kde R_S je vysokofrekvenční odpor a h je hloubka vniku [14]:

$$h = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}}, \quad (5.3)$$

kde ω je úhlová frekvence, μ je permeabilita a σ je vodivost materiálu stěn.

Vlnovod se obvykle používá v pásmu jednovidovosti, které leží mezi kritickou frekvencí prvního a druhého vidu, tj. v pásmu, kde se šíří takzvaný dominantní vid. Pokud se vlnovodem šíří signál více vidy, dochází k interferencím vlivem různé fázové rychlosti šíření jednotlivých vidů a tím i ke zhoršení kvality signálu. [14]

Mezní (kritický) kmitočet vlnovodu je dán vztahem [14]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\varepsilon\mu}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (5.4)$$

kde ε je permitivita, μ je permeabilita, a je šířka vlnovodu, b je výška vlnovodu, m a n jsou vidová čísla.

U vidů TE může být nejvýše jedno vidové číslo nulové a nejnižší vid má označení TE₁₀. U vidů TM platí totéž a nejnižší vid má označení TM₁₁. [14]

Na Obr. 5.3 je ukázáno porovnání konvenčního vlnovodu a vlnovodu integrovaného do substrátu v provedení SIW a provedení CSIW.

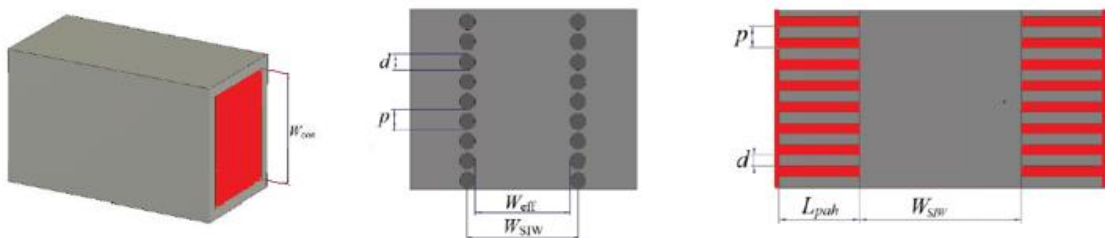
Pro obdélníkový vlnovod se nejčastěji volí rozměr $a = 2b$ (kompromis mezi ztrátami a šířkou pásma). Nejnižší vid je TE₁₀, další vid je TE₂₀, pásmo jednovidovosti je tedy dáno podmínkou $f_c(TE_{10}) < f < f_c(TE_{20})$ pro určení frekvence těchto dvou vidů lze použít zjednodušený vztah [13]:

$$f_c(TE_{10}) = \frac{c}{2a}, \quad f_c(TE_{20}) = \frac{c}{a}, \quad (5.5)$$

kde f_c je kritický kmitočet daných vidů, a je šířka vlnovodu a c je rychlost světla. Pro praktické použití se volí pásmo jednovidovosti v rozmezí $1,6a$ až $1,1a$.

5.3.1 Provedení SIW/CSIW

Metoda SIW se zabývá integrací vlnovodu do substrátu. Základem této technologie je konstantní tloušťka substrátu. Šířka SIW vlnovodu je obdobná jako u konvenčního vlnovodu, pouze výška je dána substrátem, který bývá často tenký, čímž je vlnovod omezen na vedení pouze vlny TE. Boční strany vlnovodu jsou nahrazeny buď prokovy (metoda SIW), nebo čtvrtvlnnými pahýly (metoda CSIW). Tyto provedení jsou ukázány na Obr. 5.3 a rozměry uvedené na tomto obrázku korespondují s kapitolou 7.2, kde je popsán návrh vlnovodu. Výhodou techniky SIW je snadné vázání na planární obvody a možnost použití stejné výrobní technologie jako pro planární antény. Nevýhodami techniky SIW jsou horší vlastnosti oproti klasickému vlnovodu, zejména větší útlum a malé vyzařování mezi prokvy.



Obrázek 5.3: Ukázka různých provedení vlnovodu: a) konvenční, b) SIW, c) CSIW

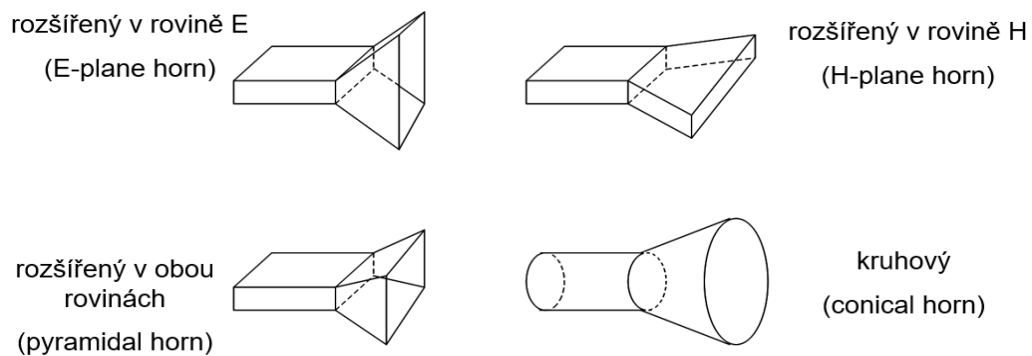
5.4 Trychtýřová anténa

Trychtýřová anténa v klasickém (konvenčním) provedení je známá a hojně používaná. V takovémto provedení lze pomocí vhodně zvolených rozměrů vyrobit anténu pro různou šířku pásma, různou frekvenci i požadovaný zisk. [14].

Základem trychtýřové antény je konvenční vlnovod, který se dále postupně rozšiřuje v ústí antény, které slouží jako transformátor dané vlny pro přechod mezi vlnovodem a přenosovým médiem, které bývá obvykle tvořeno okolním vzduchem. [15]

Délka trychtýře určuje zisk dané antény, proto se volí kompromis mezi rozměry a ziskem dané antény. Existuje několik typů trychtýřů, podle požadované směrovosti se trychtýř antény rozšiřuje v dané rovině. Nejčastěji používané rozšíření trychtýřů je zobrazeno na Obr. 5.3. [14].

Trychtýřová anténa se nejčastěji budí koaxiální sondou, kdy se sonda umísťuje stejně jako v přechodu mezi koaxiálem a vlnovodem, tj. do maxima elektrického pole, což bývá čtvrtina vlnové délky od zkratovaného konce vlnovodu. Vzdálenost koaxiální sondy od otevřeného ústí vlnovodu musí být alespoň jedna vlnová délka. [14]



Obrázek 5.4: Základní typy trychtýřů [14]

5.4.1 Provedení SIW

Metoda SIW se užívá při integraci elektromagnetických struktur jako je třeba vlnovod, nebo trychtýřová anténa do planárního provedení. Značnou nevýhodou planárních antén oproti konvenčnímu provedení je konstantní výška vlnovodu, která je dána tloušťkou substrátu. Dalším faktorem, který ovlivňuje tuto strukturu, je relativní permitivita dielektrika. [15]

Běžně se v planárních strukturách používá nosný materiál jako dielektrikum s vlastní relativní permitivitou, kdežto konvenční vlnovod je vyplněn vzduchem, což odpovídá dielektriku s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1$.

Výhodou této metody je možnost použití jednoduché výrobní technologie a snadné vázání na planární obvody. Nevýhodou je větší útlum v porovnání s klasickým

vlnovodem vyplněným vzduchem. Další nevýhodou je malá výška substrátu, což má za následek to, že se zde mohou šířit pouze vidy TE_{m0} , dále konečná vodivost stěn a malé vyzařování mezi prokovy. [16].

Jelikož na hraně trychtýřové antény dochází k častému odražení vlny zpět do prostoru vlnovodu vlivem rozdílné impedance je vhodné ústí antény opatřit tvarovacími elementy. Vhodným tvarovacím elementem se jeví planární rezonátor, který je umístěn před ústí antény. Tyto rezonátory se využívají v planárních trychtýřových anténách s tloušťkou substrátu menší než desetina vlnové délky pro úpravu a přizpůsobení směrových charakteristik. [16]

Existuje mnoho typů těchto rezonátorů, nejčastěji používané jsou rezonátory obdélníkového tvaru, kdy se umísťují dva rezonátory za sebe.

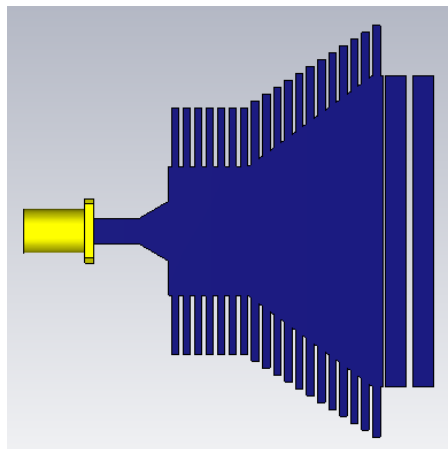
Základní rozměry rezonátoru jsou délka, šířka a mezera mezi nimi. Šířka rezonátoru je určena šířkou antény. Vazební mezera mezi anténou a rezonátorem určuje velikost vazby mezi rezonátory a jsou voleny $s \ll l_r$. Délka rezonátoru je závislá na frekvenci proto se volí dle vztahu [16]:

$$f_r = \frac{c}{2 \cdot l_r \cdot \left(1 + 0,7 \cdot \frac{h}{l_r}\right) \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (5.6)$$

kde f_r je rezonanční kmitočet rezonátoru, c je rychlost světla ve vakuu, l_r je délka rezonátoru, h je tloušťka substrátu a ϵ_r je relativní permitivita použitého materiálu.

5.4.2 Provedení CSIW

Struktura CSIW je obdobou více používané struktury SIW, kde prokovy jsou nahrazeny pahýly o délce rovné čtvrtině vlnové délky, jak je ukázáno na Obr. 5.5. Tato metoda je snadnější na výrobu, jelikož odpadá nutnost výroby prokovů a anténa může být vytištěna i s pahýly jako jednolitý kus mědi. Touto anténou lze dosáhnout vyšší přesnosti rozměrů vyrobené antény a lze ji použít pro sériovou výrobu. Nevýhodou této struktury je složitější návrh a horší vlastnosti zejména při návrhu vlnovodu touto technikou. [15] [16]



Obrázek 5.5: Model trychtýřové antény se sktrukturou CSIW napájené SMA konektorem

5.5 Štěrbínová anténa

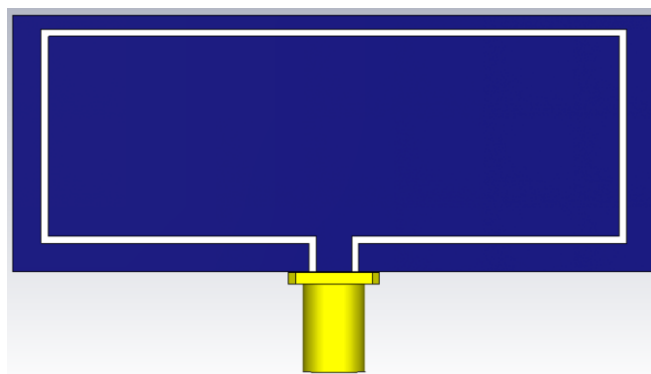
Štěrbínová anténa je založena na principu štěrbiny obdélníkového tvaru vytvořené na kovovém povrchu. Tyto antény mohou být napájeny vlnovodem tak, že do horní strany vlnovodu je vyříznuta 1 nebo více štěrbin, kdy rozměry štěrbin a jejich vzájemná pozice ovlivňuje vyzařovací charakteristiku i rezonanční frekvenci těchto antén. [17].

Dalším způsobem vytvoření štěrbínové antény je vložení patch antény do vodivé plochy, kdy tuto anténu odděluje od okolní vodivé plochy štěrbina určité šířky. [17].

Anténa vytvořena tímto způsobem je ukázána na Obr. 5.6, kde modrá barva představuje vodivou plochu a bílá barva představuje štěrbinu, která odděluje anténu od okolní vodivé plochy představující zemnicí desku.

Simulací byla ověřena závislost rezonanční frekvence na šířce vložené patch antény do vodivé plochy a přesahu vodivé plochy nad anténou. Délka napájecího mikropáskového vedení ovlivňuje impedanční přizpůsobení této antény.

Štěrbínové antény se často využívají v radarových systémech pro svoji lineární polarizaci a všesměrovou vyzařovací charakteristiku. Výhodami těchto antén je snadná výroba, jednoduchý design, široké frekvenční pásmo a jednovrstvé provedení (anténa nepotřebuje zemní desku). Nevýhodou je mnoho parazitních rezonančních kmitočtů při špatném návrhu této antény. [17]



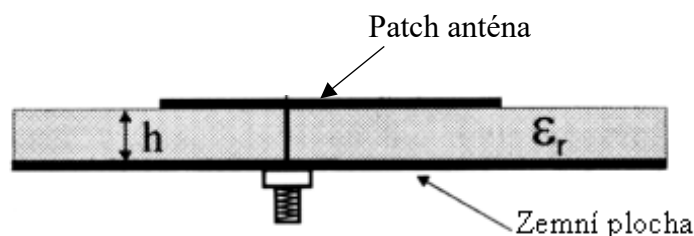
Obrázek 5.6: Model štěrbínové antény napájené SMA konektorem

6 NAPÁJENÍ PLANÁRNÍCH ANTÉN

V této kapitole jsou shrnuty různé možné způsoby napájení planárních antén. Existuje několik způsobů, jak lze napájet planární antény. Každý typ napájecího systému má své kladné, ale i nežádoucí vlastnosti. V praxi se nejčastěji používají tyto čtyři možnosti napájení: napájení koaxiálním kabelem, napájení mikropáskovým vedením, napájení blízkým vedením a napájení pomocí vazební štěrbin.

6.1 Napájení koaxiální sondou

Napájení koaxiálním kabelem patří mezi nejpoužívanější způsoby napájení nejen planárních antén, ale také zejména vlnovodů a mnoha dalších anténních systémů. Koaxiální kabel se přivádí ze spodní strany antény a je umístěn kolmo k zemní desce antény a je umístěn kolmo k zemní desce antény. Vnější vodič koaxiálního kabelu je připojen na zemní desku antény a vnitřní vodič je veden skrze otvor v dielektrickém substrátu a je připojen přímo k vyzařující anténě. Tento způsob napájení je zobrazen na Obr. 6.1. Koaxiální vedení je nesymetrické a převážně bývá přizpůsobeno na 50Ω , je tedy nutné na tuto impedanci přizpůsobit i anténu. U běžných antén lze najít oblasti s různou impedancí a je tedy nutné zvolit napájecí bod tak, aby byla anténa správně impedančně přizpůsobena. [12] [14]



Obrázek 6.1: Napájení koaxiální sondou [12]

Hlavním parametrem koaxiálního vedení je charakteristická impedance, která je dána permitivitou použitého dielektrika a vlastními rozměry kabelu. Lze tedy snadno určit impedanci kabelu, která je dána vztahem [14]:

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right), \quad (6.1)$$

kde Z_0 je charakteristická impedance vedení, μ_0 je permeabilita vakua, μ_r je relativní permeabilita, ϵ_0 je permitivita vakua, ϵ_r je relativní permitivita dielektrika, D je vnější průměr kabelu a d je vnitřní průměr kabelu.

6.2 Napájení mikropáskovým vedením

Napájení vloženým mikropáskovým vedením je nejjednodušší varianta napájení a používá se často pro experimentální účely použití antén a také v simulačních programech jako jednodušší způsob napájení.

Při tomto typu napájení se využívá vlastnosti impedančních vlastností flíčkových antén, tedy toho, že anténa má nejvyšší impedanci na okraji flíčku (až stovky ohmů) a postupně se impedance snižuje směrem ke středu flíčku. V praxi se přizpůsobuje velikostí vnoření mikropásku do antény, tedy posunutí bodu napájení ke středu do vzdálenosti, kde impedance antény je rovna impedanci mikropáskového vedení. [14]

Důležitými parametry při tomto druhu napájení jsou: požadovaná charakteristická impedance, relativní permitivita použitého materiálu a tomu odpovídající šířka mikropáskového vedení. Pokud je splněna podmínka velikosti, tedy podíl šířky mikropásku a výšky substrátu je větší než 1, jsou platné vztahy (6.2) a (6.3). [11] [12]

Šířka mikropásku je určena pro impedanci 50Ω dle následujících vztahů [11]:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{W}}} + 0,04 \cdot \left(1 - \frac{W}{h}\right)^2 \right], \quad (6.2)$$

kde ε_{eff} je efektivní permitivita mikropásku, ε_r je relativní permitivita dielektrika, h je výška dielektrika a W je šířka mikropásku,

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \cdot \ln \left(8 \cdot \frac{h}{W} + 0,25 \cdot \frac{W}{h} \right), \quad (6.3)$$

kde Z_0 je charakteristická impedance.

6.3 Napájení blízkým vedením

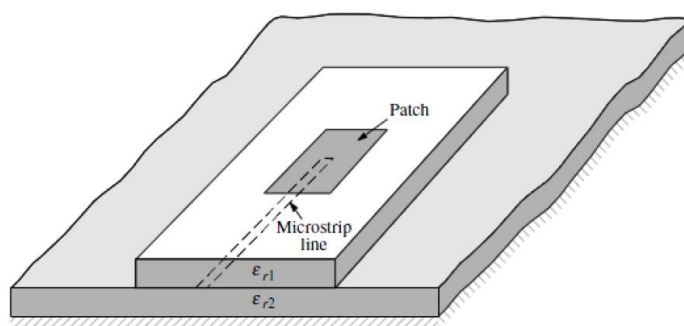
Tento typ napájení se řadí do elektromagneticky vázaných druhů napájení. Z toho plyne několik výhod [12]:

- Neexistuje přímé spojení mezi napájecím vedením a vyzařovací anténou
- Má nižší parazitní vyzařování
- Větší potlačení vyšších módů
- Vhodné pro vytváření anténních polí

Tyto výhody sebou nesou i nevýhody, nejdůležitější je náročnost a přesnost výroby.

Pro napájení blízkým vedením je třeba využít dvouvrstvé dielektrikum, kde každá vrstva má danou výšku a relativní permitivitu. Napájecí vedení je vytvořeno na spodní vrstvě substrátu s požadovanou charakteristickou impedancí. Na horní vrstvě substrátu je vytvořena vyzařovací anténa. Princip tohoto dvouvrstvého napájení je ukázán na Obr. 6.2. Délka napájecího vedení je úměrná velikosti antény. Nejčastěji se vedení umísťuje v okolí středu flíčkové antény. [12]

Obvykle jsou substráty zvoleny tak, aby spodní vrstva substrátu měla stejnou, nebo menší tloušťku dielektrika než horní vrstva substrátu. Permitivita se volí opačným principem, tedy permitivita spodní vrstvy substrátu by měla být stejná, nebo vyšší než relativní permitivita horní vrstvy substrátu. Takto navrženým způsobem je možné minimalizovat vyzařování mikropáskového vedení. [12]



Obrázek 6.2: Princip napájení blízkým vedením [18]

6.4 Porovnání způsobů napájení

Napájení koaxiální sondou je snadno realizovatelné a často používané, ale pro aplikaci antén integrovaných do nositelných oděvů je tento způsob napájení nevhodný. Koaxiální napájení je tedy vhodné pouze pro usnadnění návrhu antén na textilním substrátu.

Mikropáskové vedení má stejnou účinnost jako blízké vedení, ale má vyšší vlastní vyzařování a přímou vazbu s anténou.

Blízké vedení je obtížnější na výrobu, protože vyžaduje vícevrstvé dielektrikum, tedy substrát složený z alespoň 2 vrstev.

Při použití jednovrstvého textilního substrátu jako dielektrikum se jako nejvhodnější jeví napájení pomocí mikropáskového vedení.

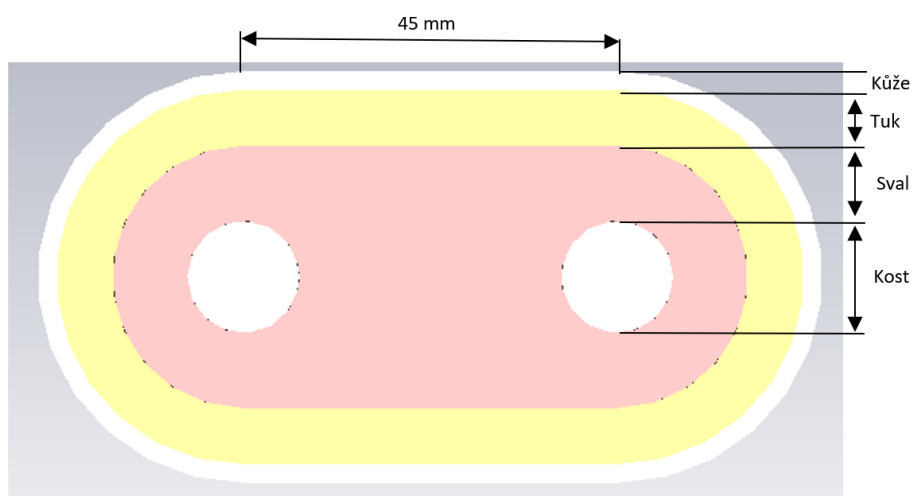
7 NÁVRH A SIMULACE ANTÉN

Tato kapitola je věnována praktickým postupům při návrhu různých antén. Cílem této práce bylo navrhnout více typů planárních antén pro ISM pásma 2,4 GHz a 5,8 GHz. V rámci této práce bylo navrženo několik jednopásmových a několik dvoupásmových antén. K návrhu a simulaci jednotlivých antén byl využit simulační program CST Microwave Studio.

V rámci této práce bylo navrženo, modelováno a simulováno několik antén. Pro tyto antény byly výpočtem navrženy rozměrové parametry, které byly optimalizovány pomocí simulovaných výsledků v programu CST. Každá anténa byla následně umístěna na zjednodušený model lidské ruky a byla podrobena simulaci. Výsledky těchto simulací byly porovnány a na základě zjištěných rozdílů byla provedena další optimalizace antény na požadované parametry s uvážením umístění v blízkosti lidské tkáně.

7.1 Zjednodušený model lidské ruky

Jako model lidské ruky byl vyhotoven zjednodušený model pomocí materiálů integrovaných v programu CST s definovanými vlastnostmi. Byl zhotoven válcový model zápěstí, který obsahuje 3 vrstvy lidských tkání a 2 kosti kulatého průřezu. Tento zjednodušený model je ukázán na Obr. 7.1 a vrstvy tkání jsou ukázány v Tab. 7.1.



Obrázek 7.1: Vytvořený zjednodušený model lidské ruky

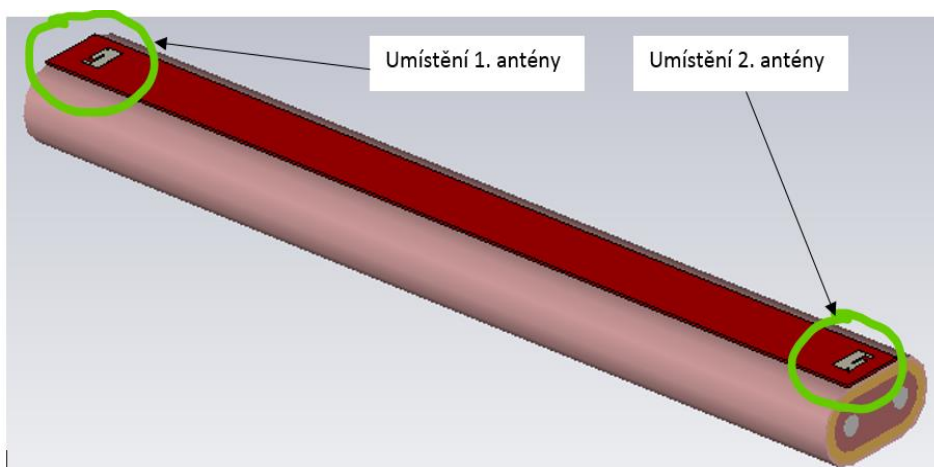
Tabulka 7.1: Rozměry zjednodušeného modelu lidské ruky odpovídající Obr. 7.1

Vrstva	Tloušťka [mm]
Kůže	2
Tuk	6
Sval	14
Kost	12

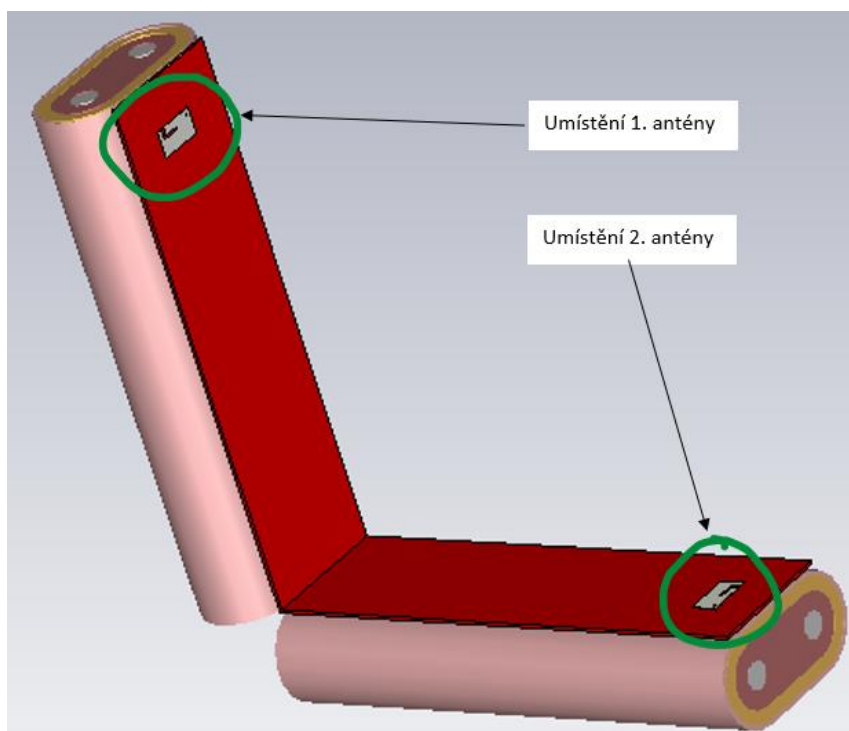
Na Obr. 7.2 je ukázán zjednodušený model lidské ruky vytvořený v programu CST pomocí integrovaných knihoven pro dielektrické vlastnosti lidských tkání. Délka tohoto modelu je 25 cm, tedy délka odpovídající vzdálenosti mezi zápěstím a loktem.

Na Obr. 7.3 je ukázán zjednodušený model lidské ruky ohnutý o 90° a umístění antén na tomto modelu. V tomto modelu je předpoklad umístění antén na zápěstí a rameno uživatele.

Pro názornost jsou na tomto modelu umístěny dvě antény, které spojuje vrstva dielektrika. V reálných podmínkách by tento dielektrický substrát obepínal celou ruku, avšak pro účely simulace je takovéto provedení dostačující.



Obrázek 7.2: Umístění antén na zjednodušeném modelu lidské ruky



Obrázek 7.3: Umístění antén na zjednodušeném modelu lidské ruky ohnuté o 90°

7.2 Návrh vlnovodu

Jelikož klasický vlnovod bývá vyplněn vzduchem a SIW vlnovod je vyplněn dielektrikem s vlastními dielektrickými vlastnostmi je třeba nejprve zjistit, jak se změní vlnová délka v použitém materiálu. Určení vlnové délky je možné podle vztahů [15]:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_c}, \quad (7.1)$$

$$\lambda_g = \frac{v_f}{f_c} = \frac{c}{f_c \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (7.2)$$

kde λ_0 je vlnová délka ve vakuu, λ_g je vlnová délka v dielektriku, c je rychlost světla, f_c je mezní kmitočet pro vid TE_{10} , v_f je fázová rychlost vlny v substrátu a ϵ_r je relativní permitivita substrátu.

Dále je třeba zjistit příslušnou šířku vlnovodu podle vztahu [15]:

$$W_{CON} = \frac{c}{2 \cdot f_c \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (7.3)$$

kde W_{CON} je šířka konvenčního vlnovodu.

V dalším kroku je třeba určit šířku planárního vlnovodu s prokvy o průměru d , kdy jednotlivé prokvy jsou od sebe vzdáleny o velikost p . Tyto rozměry se volí tak, aby splňovaly podmínky (7.11), (7.12), (7.13). Tuto šířku určíme dle vzorců [15]:

$$W_{SIW} = W_{CON} + \frac{d^2}{0,95 \cdot p}, \quad (7.4)$$

$$W_{eff} = W_{SIW} - 2 \cdot \frac{d}{2}, \quad (7.5)$$

kde W_{SIW} je šířka vlnovodu integrovaného do substrátu, W_{CON} je šířka konvenčního vlnovodu, W_{eff} , d je průměr prokůvů a p je rozteč prokůvů.

Modifikací obecného vztahu pro rezonanční frekvenci je možná zpětná kontrola frekvence podle nově vypočtených rozměrů [15]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{W_{SIW}}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{h}\right)^2}, \quad (7.6)$$

kde h je výška substrátu, $m = 1, 2$ a $n = 0$ jsou vidová čísla.

Na závěr je třeba provést kontrolu zjištěných rozměrů, zda navržený vlnovod odpovídá pásmu jednovidovosti. Tuto kontrolu lze provést dosazením do následujících nerovnic [15]:

$$\lambda_m^{TE_{10}} < \lambda_{prac} < \lambda_m^{TE_{20}}, \quad (7.7)$$

$$W_{SIW} < \lambda_{prac} < 2 \cdot W_{SIW}, \quad (7.8)$$

kde λ_m je mezní vlnová délka pro daný vid, λ_{prac} je vlnová délka pro pracovní frekvenci.

V praxi se často využívá užší pásmo, proto se zavádí korekce pro danou podmínku dle nerovnice [15]:

$$1,1 \cdot W_{SIW} < \lambda_{prac} < 1,6 \cdot W_{SIW} , \quad (7.9)$$

V případě použití metody CSIW jsou prokovy nahrazeny pahýly, které plní funkci čtvrtvlnného transformátoru. Tyto pahýly mají šířku d , rozteč p a délku závislou na vlnové délce. Délka pahýlu se vypočítá podle vztahu [15]:

$$L_{pah} = \frac{\lambda_g}{4} , \quad (7.10)$$

Na závěr je třeba ověřit podmínky pro návrh vlnovodů SIW [15]:

$$0,04 < \frac{p}{\lambda_g} < 0,25 , \quad (7.11)$$

$$\frac{d}{W_{SIW}} < \frac{1}{8} , \quad (7.12)$$

$$\frac{p}{d} \leq 2 . \quad (7.13)$$

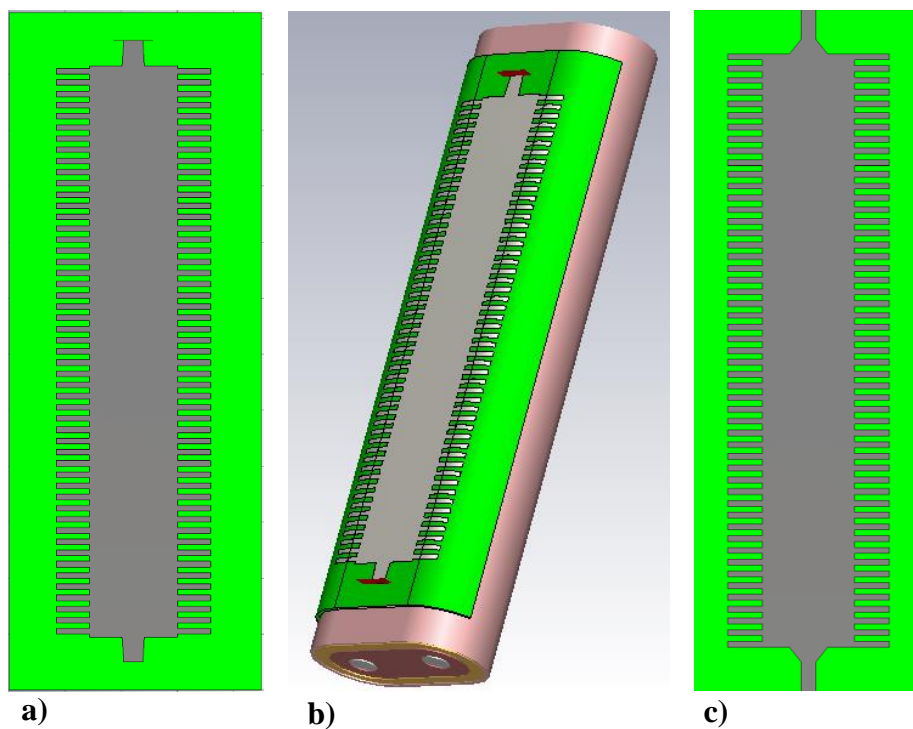
Podle těchto vzorců byly vypočteny rozměry SIW a CSIW vlnovodů na textilní substrát. Jelikož pro frekvenci 2,4 GHz byl vlnovod příliš široký, nebylo by možné jej umístit na lidské tělo, a proto byl zavrhnut. Vlnovod pro 5,8 GHz měl šířku méně než 8 cm, což je také velmi široký vlnovod, ale v případě, že by se vlnovod přizpůsobil tvaru lidské ruky, byl by použitelný pro naše aplikace.

Byl navržen vlnovod s použitím metody SIW a po provedení korektních simulací byl tento vlnovod vyhodnocen jako nevhodný, proto byl dále optimalizován pouze vlnovod navržen metodou CSIW.

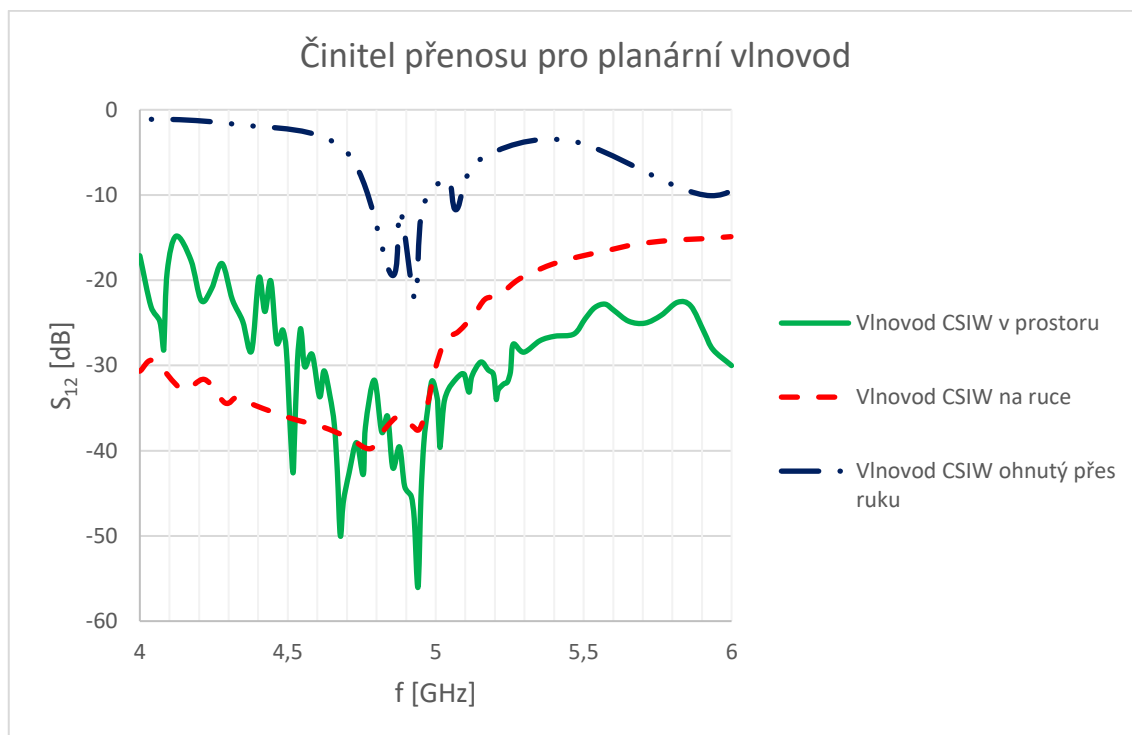
7.2.1 Vlnovod CSIW

V rámci této kapitoly byl navrhnout vlnovod integrovaný do textilního substrátu metodou CSIW. Boční stěny vlnovodu jsou nahrazeny pahýly o délce čtvrtiny vlnové délky a šířce stejné jako průměr prokovů u metody SIW. Geometrické rozložení tohoto vlnovodu je ukázáno na Obr. 7.4. Vlnovod byl navržen a simulován v programu CST, výsledky simulací jsou ukázány na Obr. 7.5. Dále byl tento vlnovod optimalizován a opět byly provedeny simulace tohoto vlnovodu. Výsledný model vlnovodu je napájen mikropáskovým vedením a je k vlnovodu připojen pomocí impedančního transformátoru.

Vlnovod byl optimalizován přímo na modelu lidské tkáně. Při reálných aplikacích planárního vlnovodu integrovaného do oděvu může být vzdálenost vlnovodu od kůže proměnná, proto byla simulací ověřena závislost přítomnosti lidské tkáně na přenos vlnovodem. Činitel přenosu je ve frekvenčním pásmu 5,8 GHz téměř neměnný v závislosti na vzdálenosti od lidské tkáně. Dále byla v simulačním programu CST vypočtena hodnota SAR, která byla 0,04 W/kg. Tento vlnovod tedy neovlivňuje živou tkáň podle platných norem.

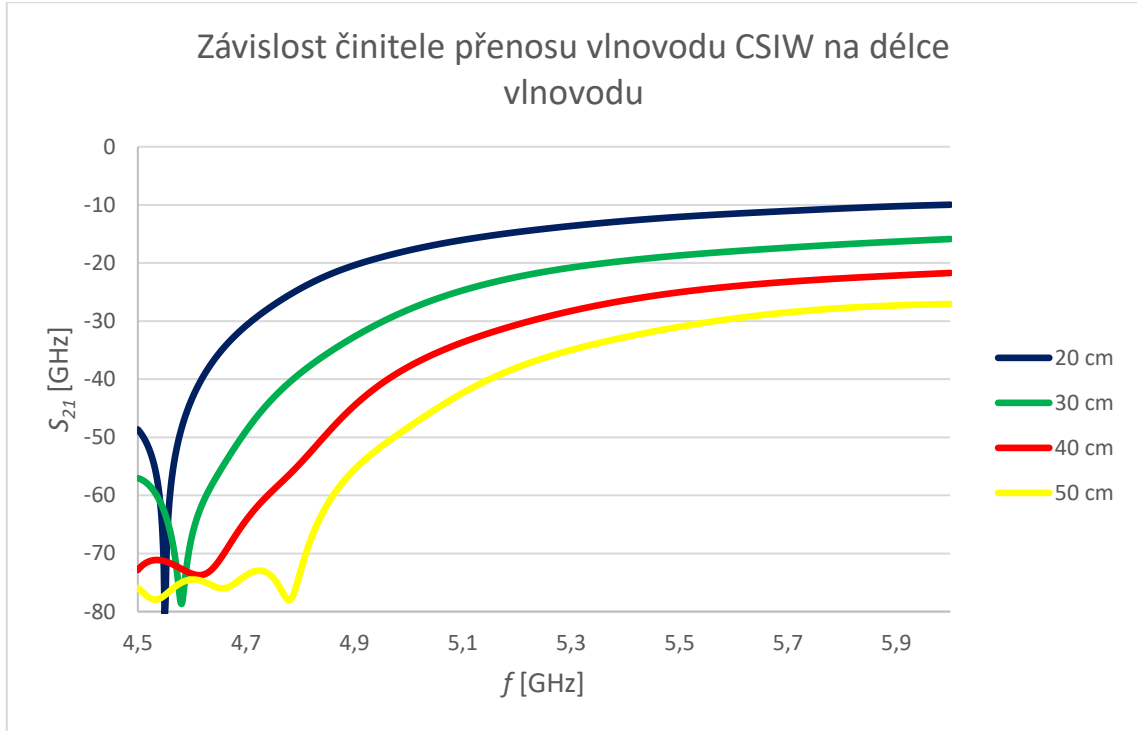


Obrázek 7.4: Vlnovod CSIW: a) navržený model vlnovodu, b) vlnovod přizpůsobený tvaru modelu lidské ruky, c) optimalizovaný model vlnovodu



Obrázek 7.5: Činitel přenosu pro planární vlnovod navrhnutý metodou CSIW

Použité dielektrikum je ztrátový materiál, proto je šíření a celkový útlum vedení tímto vlnovodem závislý na jeho délce. Závislost přenosu na délce vlnovodu je ukázána na Obr. 7.6. Velký vliv na přenos energie má mechanická deformace, například ohyb, nebo nerovnosti povrchu, například pomačkaný povrch, trhlinka apod.



Obrázek 7.6: Činitel přenosu vlnovodu CSIW pro různou délku vlnovodu

7.3 Návrh Patch antény

Pro návrh patch antény je třeba znát relativní permitivitu a výšku dielektrika, tedy materiálové vlastnosti použitého substrátu. Dále je nutno znát požadovanou rezonanční frekvenci, pro kterou anténu navrhujeme.

Rozměry fličkových antén lze vypočítat podle následujících vztahů [13]:

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_r} \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (7.14)$$

kde W je šířka fličku, f_r je rezonanční frekvence a ϵ_r je relativní permitivita dielektrika,

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{W}}}, \quad (7.15)$$

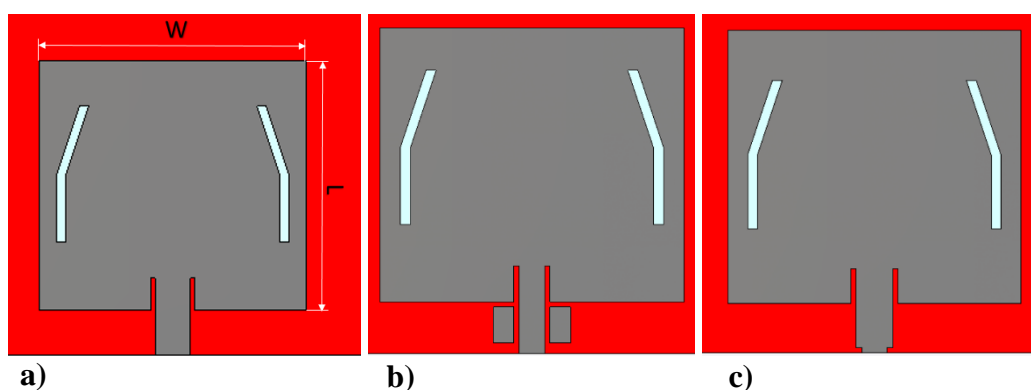
kde ϵ_{reff} je relativní efektivní permitivita fličku a h je výška substrátu,

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_r \cdot \sqrt{\epsilon_r}} - 0,824 \cdot h \cdot \left[\frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \cdot \left(\frac{W}{h} - 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)} \right], \quad (7.16)$$

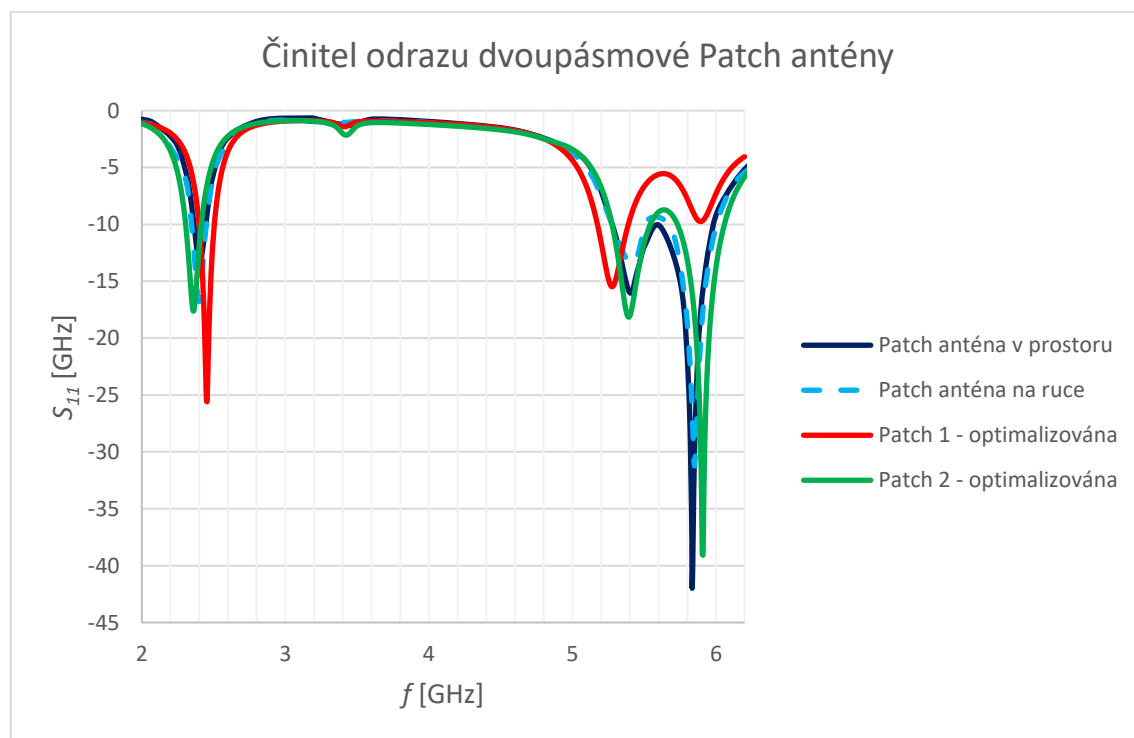
kde L je délka fličku.

7.3.1 Dvoupásmová Patch anténa

Při návrhu těchto antén je stejný postup jako pro klasické patch antény. Do klasické patch antény jsou přidány výřezy různých tvarů, které zajistí rezonanci na druhé frekvenci. Tvar, šířka a délka šterbiny slouží k nastavení požadované rezonanční frekvence a impedančnímu přizpůsobení. Délka není příliš důležitá, a proto ji lze zvolit libovolně, šířkou šterbiny lze druhou rezonanční frekvenci přizpůsobit a umístění šterbiny ovlivňuje frekvenci rezonance. Na Obr. 7.7 je ukázán design navržené dvoupásmové patch antény a 2 modely, které byly po provedení korektních simulací navrženého modelu vytvořeny optimalizací pomocí programu CST. Činitel těchto antén je ukázán na Obr. 7.8.



Obrázek 7.7: Modely dvoupásmových patch antén: a) navržený model antény, b) 1. optimalizovaný model antény, c) 2. optimalizovaný model antény



Obrázek 7.8: Činitel odrazu dvoupásmových patch antén

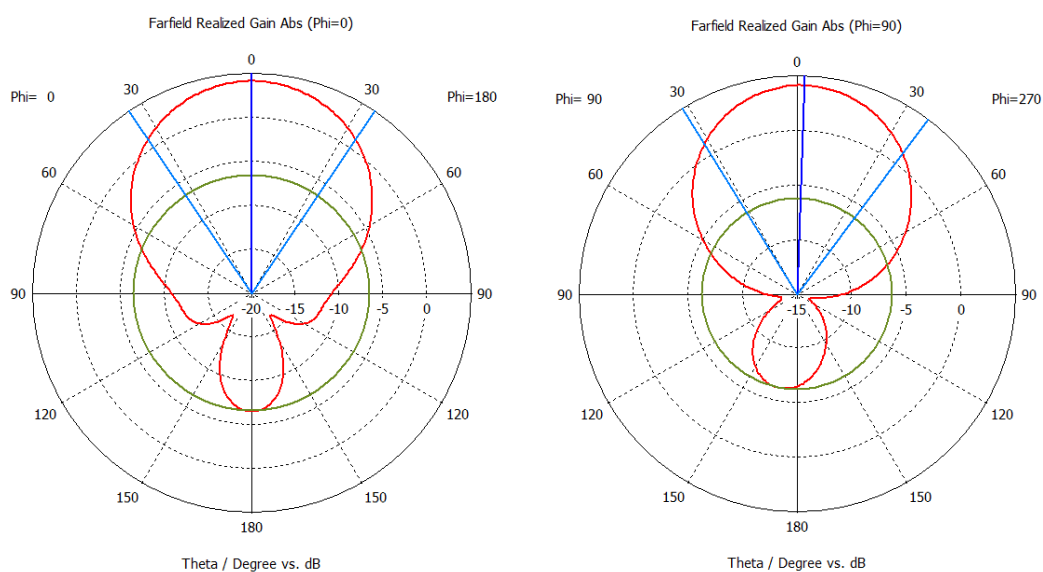
Navržená anténa byla umístěna na třívrstvý model lidské tkáně a byly upraveny její rozměry pro dosažení lepšího přizpůsobení antény za účelem dosažení vyšší účinnosti antény a lepšího zisku ve směru vyzařování. Výsledný model bylo nutné upravit tak, aby bylo možné anténu připojit k N-konektoru za účelem měření této antény.

Byly vytvořeny 2 modely dvoupásmové Patch antény. U prvního modelu bylo zúženo mikropáskové napájecí vedení na 5 mm a byly přidány rezonátory v podobě vodivých plošek pro usměrnění energie přenášené mikropáskem do antény. Druhý model je napájen mikropáskovým vedením o šířce 7 mm, které je v bodě připojení koaxiálního konektoru schodově zúženo na 5 mm pomocí zářezů 1 mm. V případě obou těchto modelů byla zemnicí deska upravena na šířku antény a délka byla rozšířena s přesahem přes anténu o 20 mm pro správné přizpůsobení antény. Obě tyto antény jsou taktéž ukázány na Obr. 7.7. Výsledná šířka antény W je 59,3 mm a šířka L je 53,2 mm. Štěrbiny jsou široké 2 mm a jsou vzdáleny 4 mm od kraje antény.

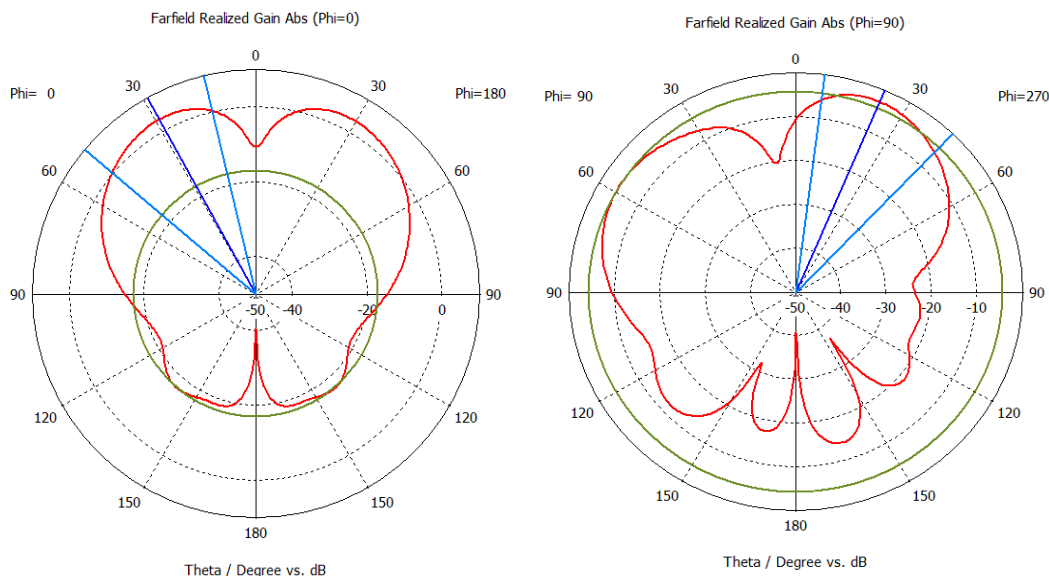
Model antény byl vytvořen v těsné blízkosti živé tkáně, tedy s nulovou mezerou mezi zemní plochou antény a lidské kůže. Při běžném použití antény integrované do nositelného oděvu je mezera mezi anténou (oděvem) a kůží uživatele proměnná. Z toho důvodu byl simulací zjištěn vliv vzdálenosti antény od živé tkáně. Přítomnost živé tkáně má vliv pouze na impedanční přizpůsobení antény, rezonanční frekvence je neovlivněna.

Vyzařovací charakteristika obou vytvořených antén je na frekvenci 2,4 GHz totožná a na frekvenci 5,8 GHz se liší pouze nepatrně. Z toho důvodu jsou na Obr. 7.9 a Obr. 7.10 ukázány vyzařovací charakteristiky 1. optimalizovaného modelu, tedy patch antény s mikropáskovým vedením o šířce 5 mm.

Patch anténa se šířkou mikropásku 5 mm vyzařuje s maximálním ziskem 3,98 dB na frekvenci 2,45 GHz a 4,53 dB na frekvenci 5,8 GHz. Patch anténa se šířkou mikropásku 7 mm vyzařuje s maximálním ziskem 3,64 dB na frekvenci 2,4 GHz a 6,39 dB na frekvenci 5,8 GHz.



Obrázek 7.9: Vyzařovací diagram dvoupásmové patch antény v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) na frekvenci 2,4 GHz



Obrázek 7.10: Vyzařovací diagram dvoupásmové patch antény v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) na frekvenci 5,8 GHz

7.4 PIFA

Při návrhu antény typu PIFA se postupuje obdobně jako při návrhu patch antény. Základními parametry jsou délka L a šířka flíčku W , výška substrátu h , šířka zkratovací stěny a vzdálenost napájecího bodu od stěny. Tyto rozměry se volí s ohledem na podmínku [19]:

$$(L + W + h) \cdot \sqrt{\epsilon_r} \approx \frac{\lambda}{4}, \quad (7.17)$$

V dalším kroku je třeba určit efektivní permitivitu struktury antény ϵ_{eff} dle vztahu [5]:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_{air} \cdot (h_s + h_{air})}{\epsilon_r \cdot h_{air} + h_s \cdot \epsilon_{air}}, \quad (7.18)$$

kde ϵ_r je relativní permitivita dielektrika, ϵ_{air} je permitivita vzduchu mezi vrstvami, h_s je tloušťka dielektrika a h_{air} je tloušťka vzduchové mezery. V případě aplikace PIFA na dielektrickém substrátu, tedy bez vzduchové mezery, je $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$.

Dále je třeba ověřit rezonanční frekvence navržené antény dle vztahů [19]:

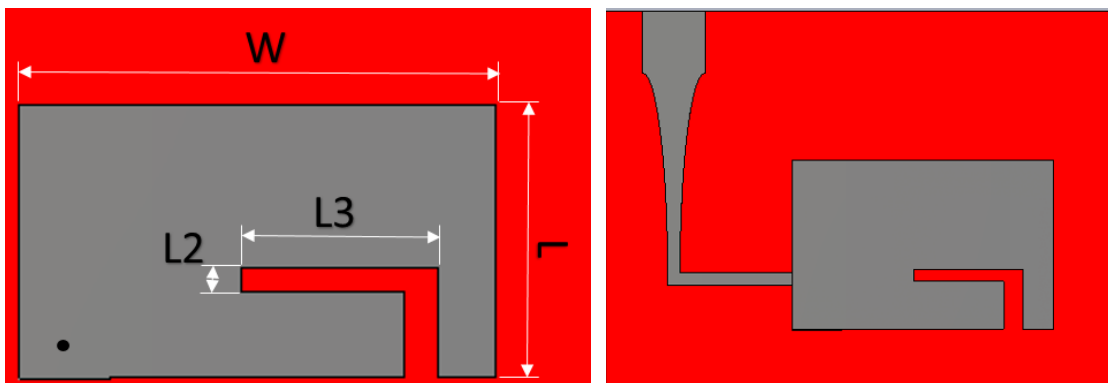
$$f_L [GHz] \approx \frac{300}{4 \cdot (L[mm] + W[mm] + h[mm]) \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}}, \quad (7.19)$$

$$f_H [GHz] \approx \frac{300}{4 \cdot (L_2[mm] + L_3[mm]) \cdot \sqrt{\epsilon_{eff}}}, \quad (7.20)$$

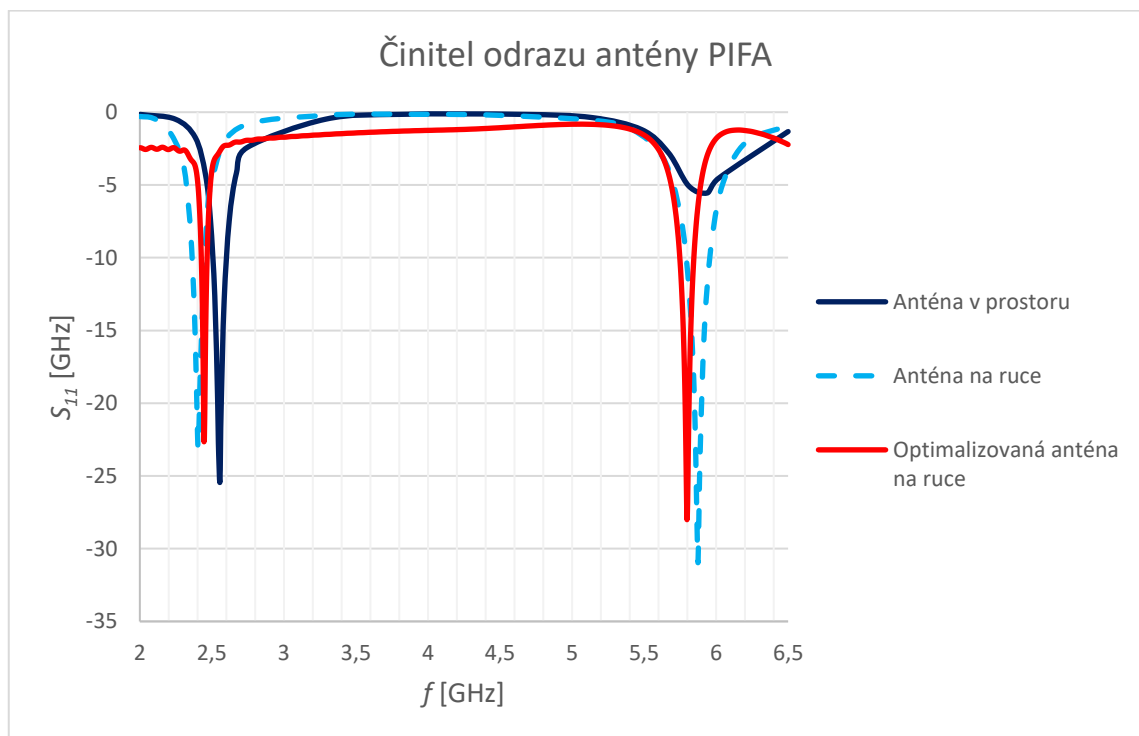
kde f_L je rezonanční frekvence nižšího pásma, f_H je rezonanční frekvence vyššího pásma, L je délka flíčku, W je šířka flíčku, h je výška substrátu, L_2 je hloubka prvního výřezu a L_3 je hloubka druhého výřezu (viz Obr. 7.11).

Podle uvedených výpočetních vztahů byla navržnuta dvoupásmová anténa v provedení PIFA. Pro zjednodušení návrhu antény bylo zvoleno napájení pomocí koaxiální sondy, které se běžně používá při realizaci PIFA. V průběhu optimalizace bylo nutné způsob napájení upravit tak, aby bylo možné tuto anténu realizovat na tenkém substrátu integrovanou do nositelného oděvu.

Jako nejvhodnější bylo vyhodnoceno napájení pomocí mikropáskového vedení šířky 1 mm, které bylo z důvodu velké délky zahnuto a pro lepší přechod mezi různými impedancemi bylo toto vedení opatřeno impedančním transformátorem s exponenciálním přechodem, které transformuje mikropáskové vedení ze šířky 5 mm v bodě připojení konektoru na šířku 1 mm. Oba tyto modely jsou ukázány na Obr. 7.11.



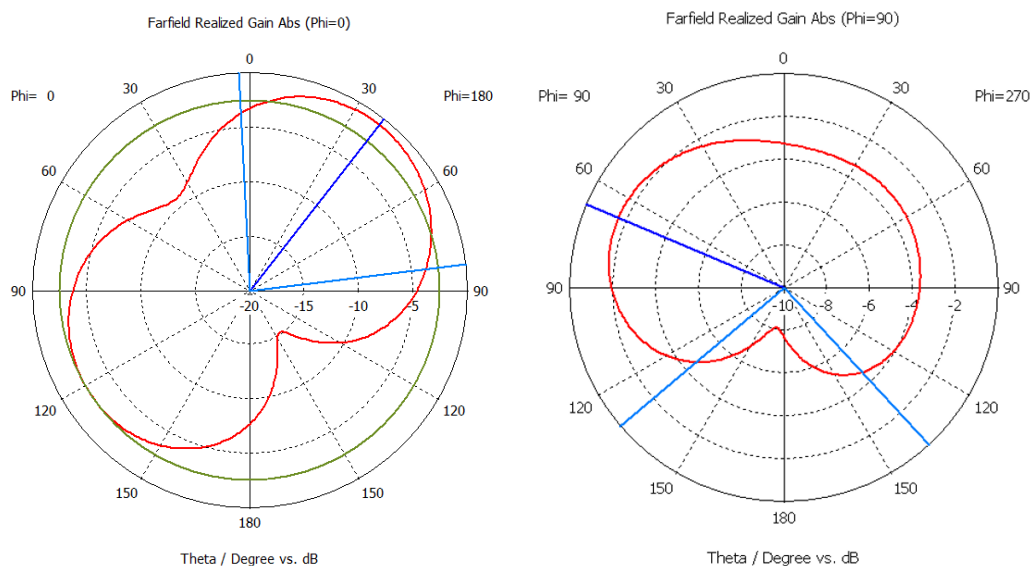
Obrázek 7.11: Model navržené (vlevo) a optimalizované (vpravo) antény typu PIFA



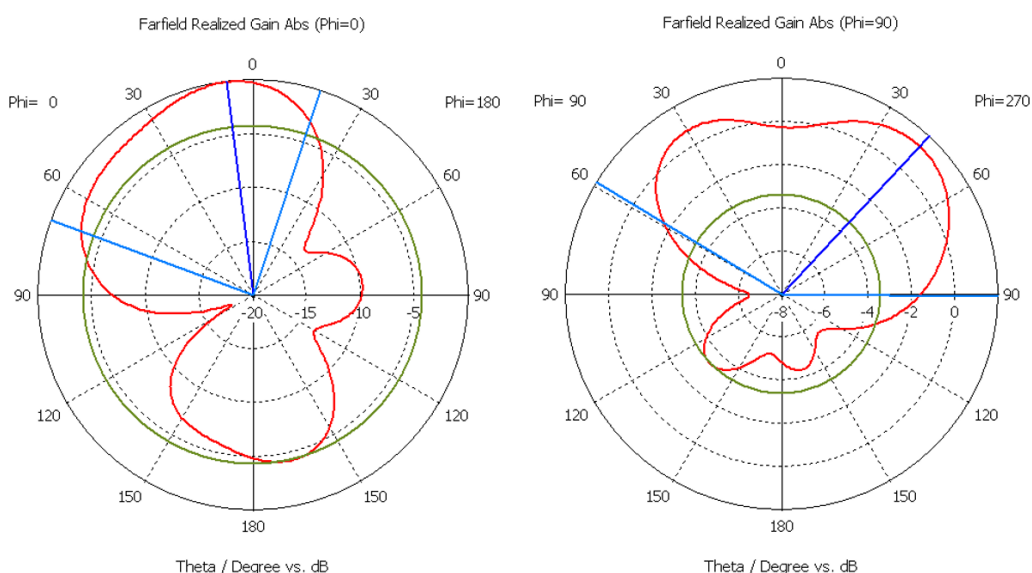
Obrázek 7.12: Činitel odrazu antény typu PIFA

Porovnání vlastností navržené i optimalizované antény je ukázáno na Obr. 7.12. velký rozdíl je zejména na druhé rezonanční frekvenci v porovnání antény na těle a v prostoru.

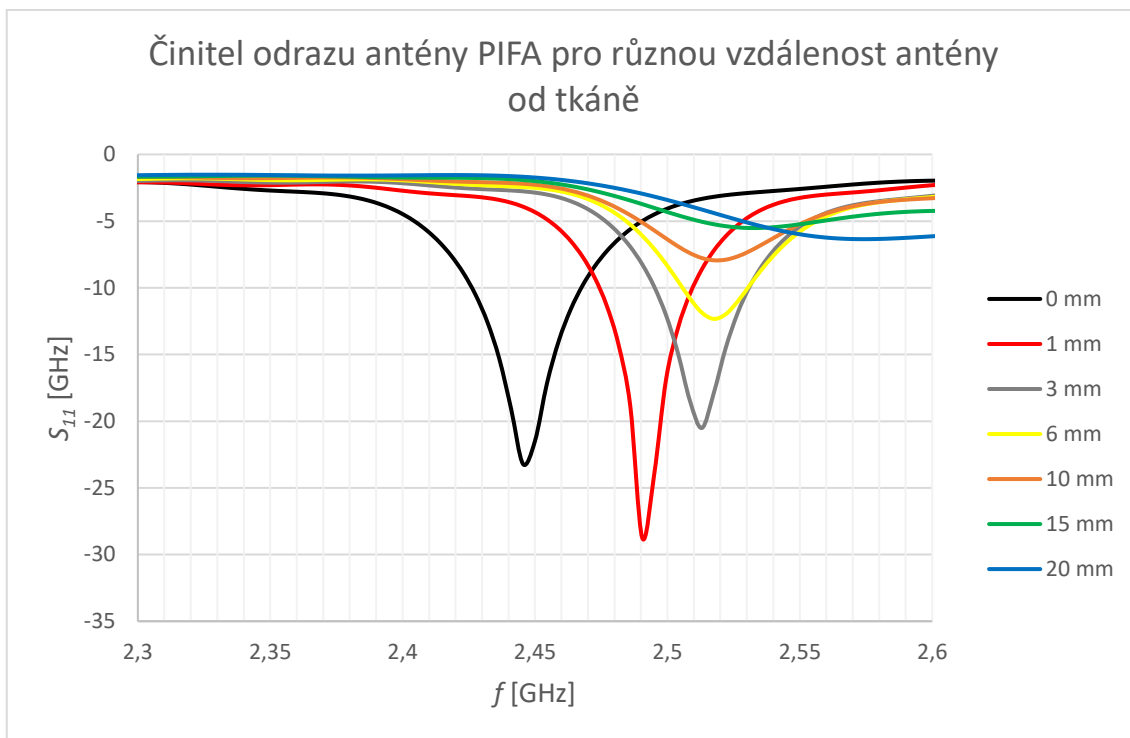
Na Obr. 7.13 a Obr. 7.14 jsou ukázány vyzářovací charakteristiky optimalizované antény. Z vyzářovacích diagramů je patrný rozdíl ve směru vyzářování v porovnání obou frekvenčním pásem. PIFA má nízkou účinnost rostoucí s frekvencí, proto vyzářuje s maximálním ziskem -0,6 dB na frekvenci 2,45 GHz a maximálním ziskem 1,47 dB na frekvenci 5,8 GHz.



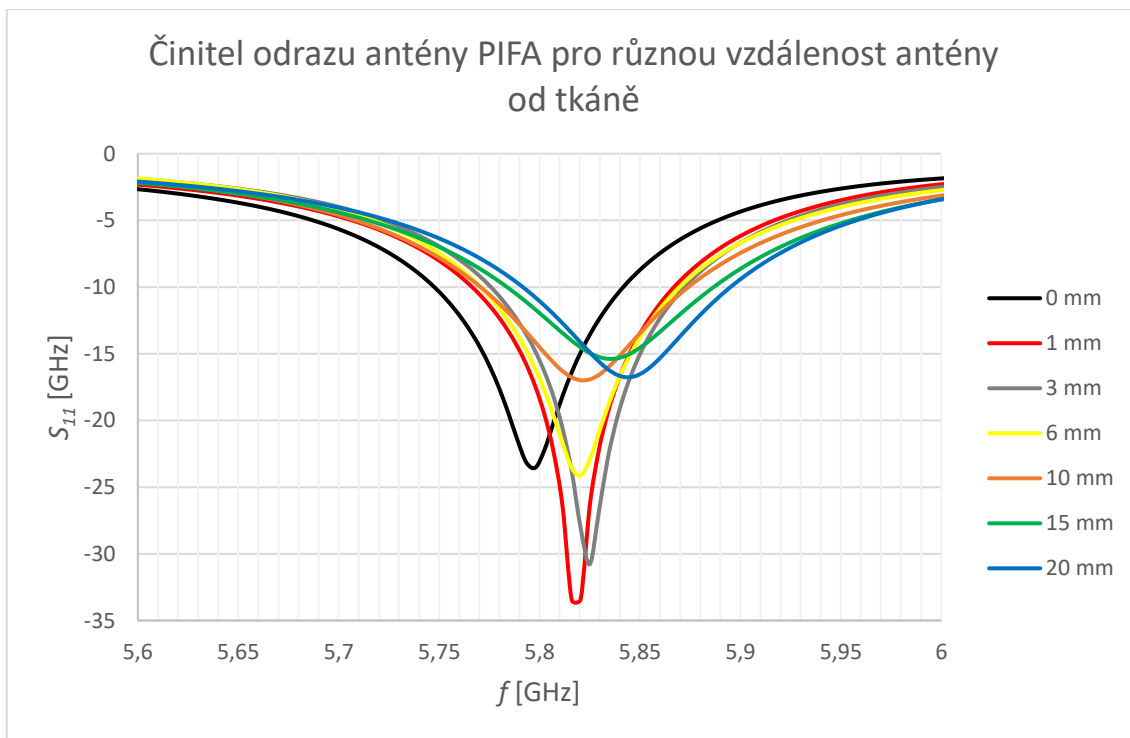
Obrázek 7.13: Vyzářovací diagram antény typu PIFA na frekvenci 2,45 GHz v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo)



Obrázek 7.14: Vyzářovací diagram antény typu PIFA na frekvenci 5,8 GHz v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo)



Obrázek 7.15: Závislost činitele odrazu PIFA na velikosti mezery mezi anténou a živou tkání pro frekvenční pásmo 2,4 GHz



Obrázek 7.16: Závislost činitele odrazu PIFA na velikosti mezery mezi anténou a živou tkání pro frekvenční pásmo 5,8 GHz

Tato anténa byla navrhována v těsné blízkosti lidské tkáně, což je podmínka, kterou nelze splnit při reálných aplikacích. PIFA je značně závislá na přítomnosti lidské tkáně, která svojí vodivostí a vysokofrekvenčními vlastnostmi ovlivňuje elektromagnetickou energii vedenou v anténě. Na Obr. 7.15 a Obr. 7.16 je ukázána závislost přizpůsobení antény na vzdálenosti antény od živé tkáně. Lidské tělo ovlivňuje nejen impedanční přizpůsobení antény PIFA integrované do nositelných oděvů, ale také rezonanční frekvenci této antény, zejména v nižším frekvenčním pásmu.

7.5 Trychtýřová anténa SIW/CSIW

Jelikož je anténa tvořena planární strukturou, je nutné tomu přizpůsobit i napájení takovéto antény. Napájení se skládá ze 3 částí. První část tvoří mikropáskové vedení o charakteristické impedanci 50Ω . Druhou část napájení tvoří takzvaný transformátor, tedy přechod mezi mikropáskovým vedením a vlnovodem integrovaným do substrátu, jak je vidět na Obr. 7.17. Třetí částí je vlnovod integrovaný do substrátu, který přechází v trychtýřovou anténu. [19].

Pro výpočet šířky transformátoru byl použit vztah [16]:

$$W_t = \frac{\eta \cdot h \cdot \left[\frac{W_m}{h} + 1,393 + 0,667 \cdot \ln\left(\frac{W_m}{h} + 1,444\right) \right]}{120\pi}, \quad (7.21)$$

kde W_t je šířka transformátoru při ústí vlnovodu, W_m je šířka mikropásku vypočtena podle vztahu (7.22) pro charakteristickou impedanci 50Ω , η je charakteristická impedance volného prostoru a h je tloušťka substrátu.

Šířka mikropáskového napáječe se vypočte dle vztahů [11]:

$$W_m = \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2 \cdot \varepsilon_r} \cdot \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right] \right\}, \quad (7.22)$$

kde W_m je šířka mikropásku, ε_r je relativní permitivita substrátu a B je dáno [15]:

$$B = \frac{\eta \cdot \pi}{2 \cdot Z_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_r}}, \quad (7.23)$$

kde η je charakteristická impedance volného prostoru a Z_0 je charakteristická impedance.

Základní částí trychtýřové antény je vlnovod, který se rozšiřuje v anténu. Parametry vlnovodu jsou blíže popsány v kapitole 7.2 a ústí antény, ukázané na Obr. 7.18, je vypočteno dle následujících vztahů [16]:

$$W = \sqrt{3 \cdot \lambda \cdot R_0}, \quad (7.24)$$

kde W je velikost vyústění trychtýře, λ je vlnová délka ve vakuu a R_0 je vzdálenost od středu napáječe ke středu vyústění antény. Tento vztah zaručuje správné směrové vlastnosti antény.

Dalším krokem návrhu je určení délky pomyslného trojúhelníku, který je tvořen středem vyústění antény, středem napájecího vlnovodu a krajem trychtýřové antény [16]:

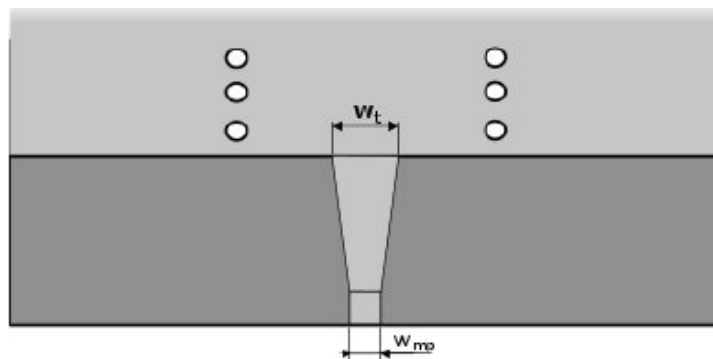
$$l_h = \sqrt{R_0^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2}, \quad (7.25)$$

kde l_h je délka strany pomyslného trojúhelníku a R_0 je vzdálenost od středu napáječe ke středu vyústění antény.

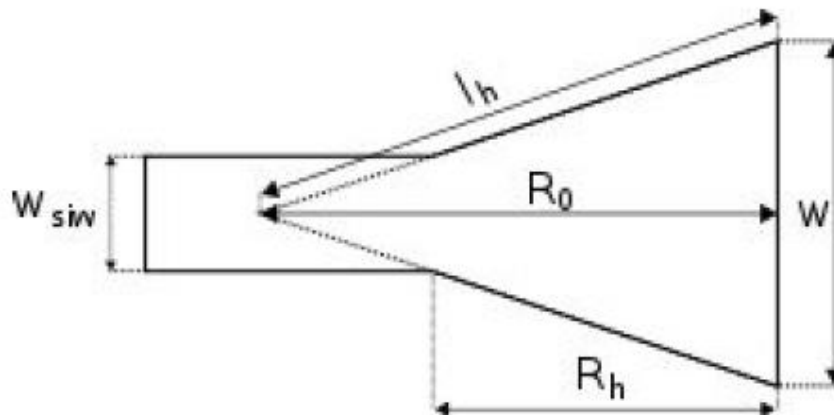
Pro konstrukci antény je potřebnější délka trychtýře, která je dána vztahem [16]:

$$R_h = (W - W_{siw}) \cdot \sqrt{\frac{l_h}{W} - \frac{1}{4}}, \quad (7.26)$$

kde R_h je vzdálenost od konce vlnovodu po konec trychtýře, W je šířka ústí antény a W_{siw} je příčný rozměr vlnovodu vypočtený podle (7.4).



Obrázek 7.17: Ukázka přechodu mikropásek – SIW [16]

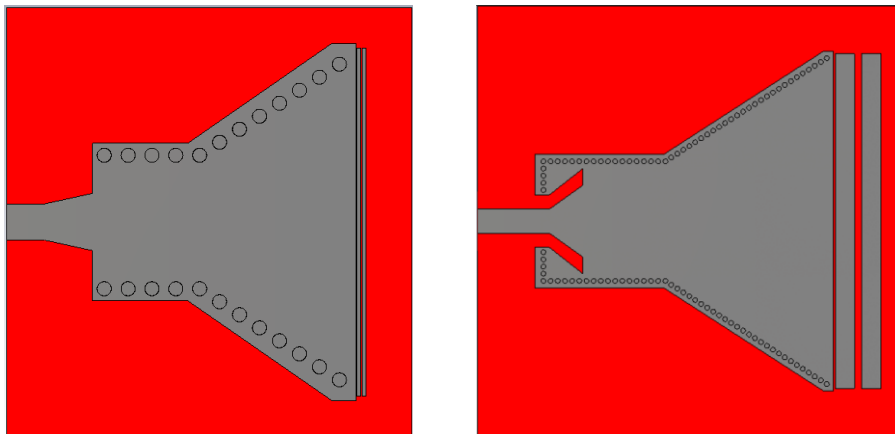


Obrázek 7.18: Geometrické rozložení ústí trychtýřové antény [16]

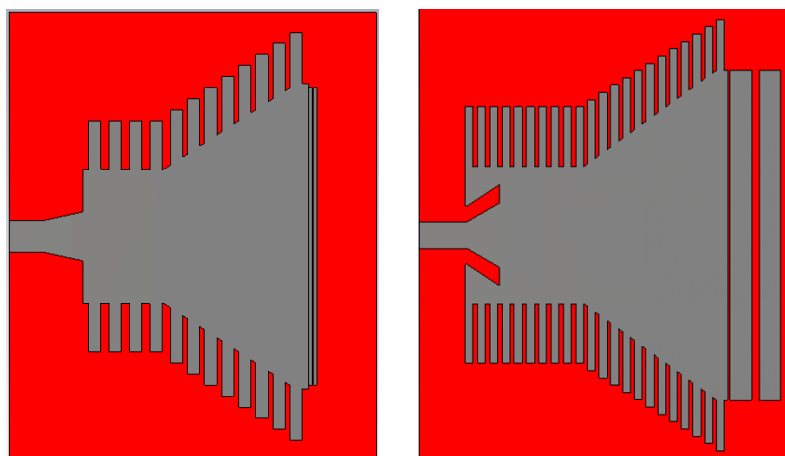
Dle výše uvedeného postupu byla navrhována trychtýřová anténa integrovaná do textilního substrátu metodou SIW, která byla poté modifikována pro návrh trychtýřové antény metodou CSIW. Postup návrh obou těchto antén je identický, avšak metoda CSIW pro náhradu bočních stěn používá čtvrtvlnné pahýly, kdežto metoda SIW používá prokovy. Šířka pahýlů je vypočtena podle vzorce pro průměr použitých prokovů.

Na Obr. 7.19, Obr. 7.20 a Obr. 7.21 jsou ukázány navržené i optimalizované modely

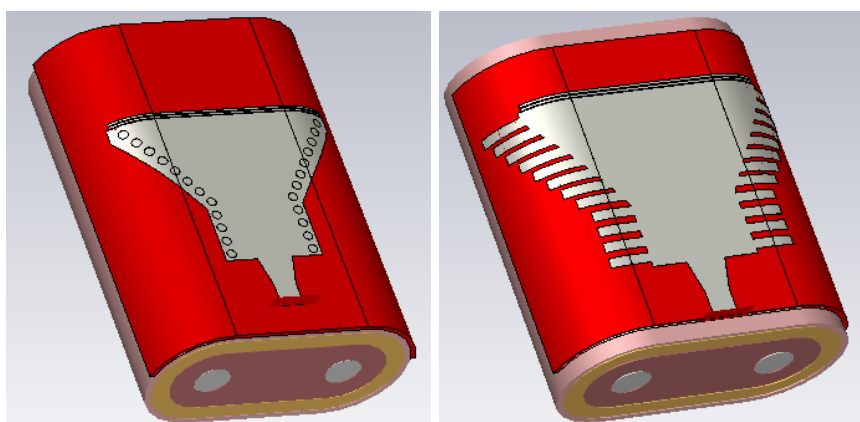
trychtýřových antén a jim odpovídající činitel přenosu na Obr. 7.22 a Obr. 7.23. při optimalizaci těchto antén bylo napájecí mikropáskové vedení společně s impedančním transformátorem zapuštěno do vlnovodu antény, který tvoří hlavní část trychtýřových antén. Pro snadnější výrobu bylo nutné prokovení zmenšit na průměr 1 mm, proto bylo nutné upravit celkové rozměry antény.



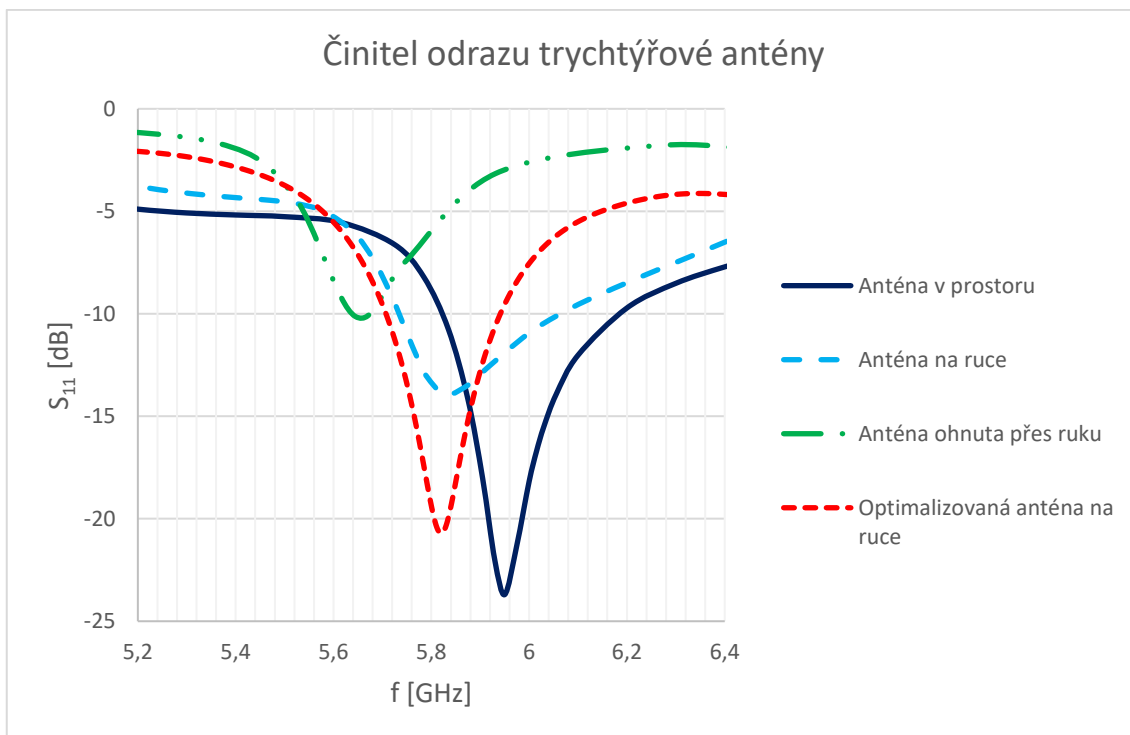
Obrázek 7.19: Model navržené (vlevo) a optimalizované (vpravo) trychtýřové antény SIW



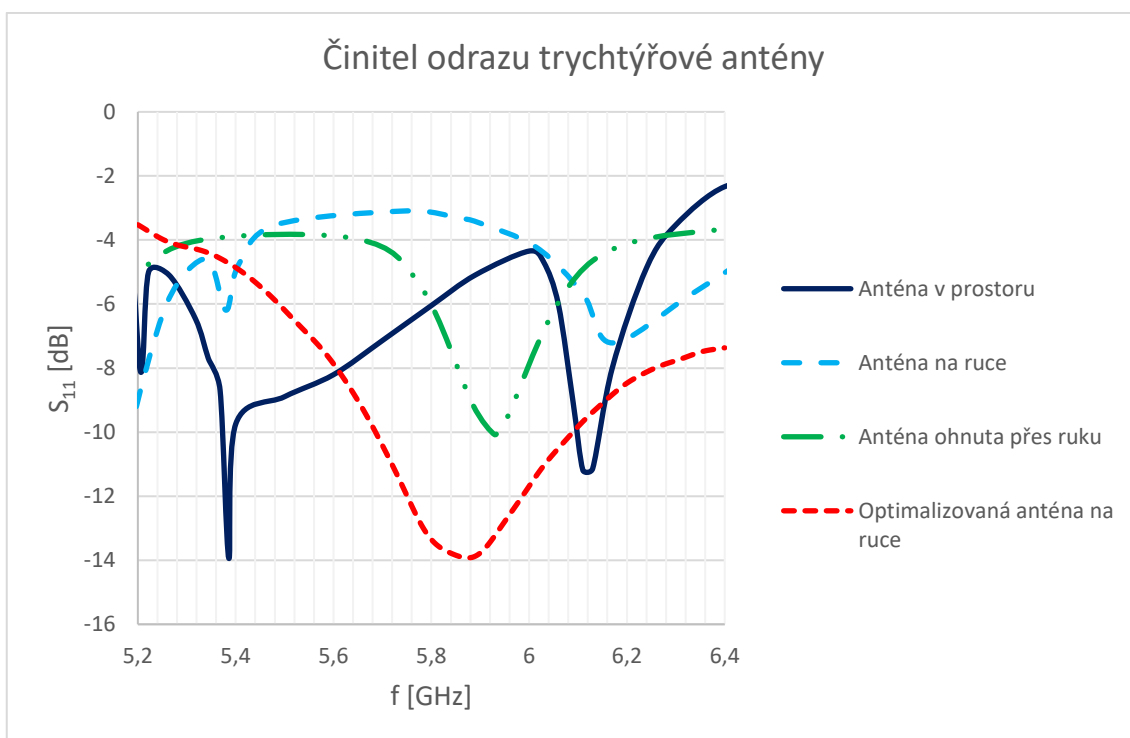
Obrázek 7.20: Model navržené (vlevo) a optimalizované (vpravo) trychtýřové antény CSIW



Obrázek 7.21: Trychtýřová anténa přizpůsobená tvaru modelu lidské ruky v provedení SIW (vlevo) a CSIW (vpravo)



Obrázek 7.22: Činitel odrazu trychtýřové antény SIW

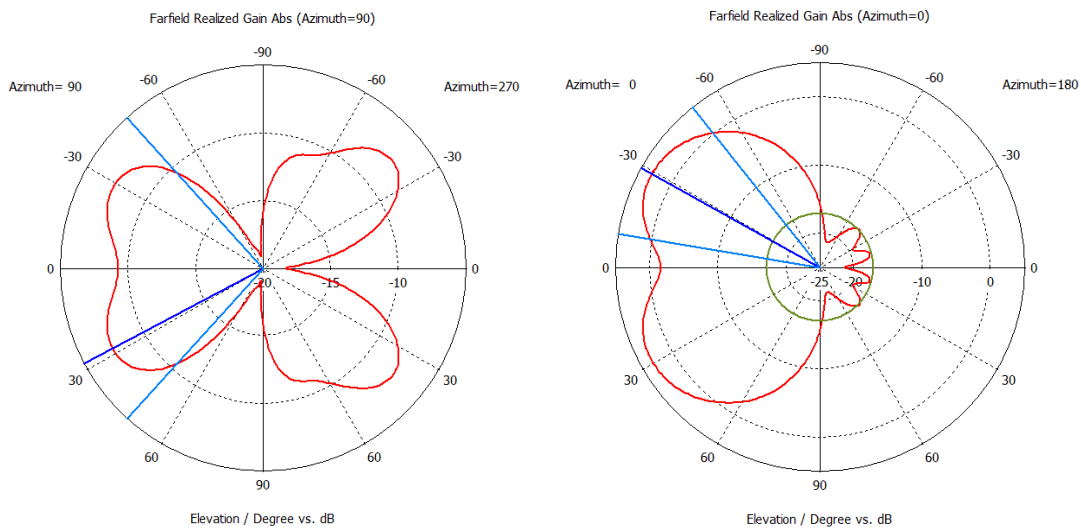


Obrázek 7.23: Činitel odrazu trychtýřové antény CSIW

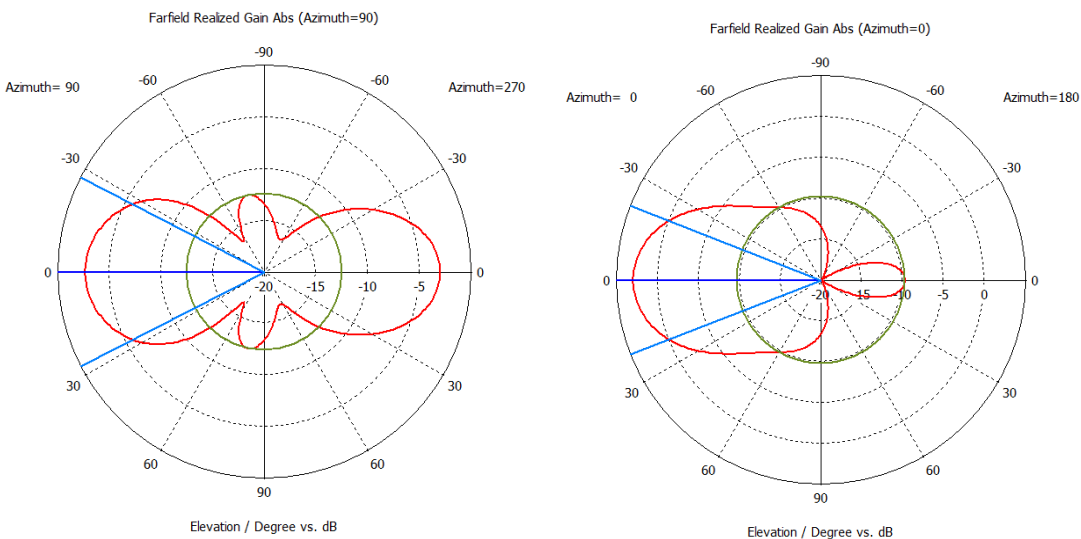
Na Obr. 7.24 a Obr. 7.25 je ukázán směr vyzařování trychtýřových antén v rovině XZ i v rovině YZ. Z těchto diagramů je patrné, že trychtýřové antény nemají hlavní směr vyzařování souběžný s osou antény, tedy podél ruky, ale že směr vyzařování je odkloněn

ve směru osy z. Trychtýřová anténa SIW vyzařuje s maximálním ziskem 3,66 dB na frekvenci 5,8 GHz a trychtýřová anténa CSIW vyzařuje s maximálním ziskem 3,53 dB.

Byly provedeny simulace vlivu přítomnosti živé tkáně na vlastnosti trychtýřových antén. V případě trychtýřové antény SIW byla zjištěna drobná odchylka rezonanční frekvence a značné zhoršení impedančního přizpůsobení antény s rostoucí vzdáleností tkáně od antény. V případě trychtýřové antény CSIW je změna rezonanční frekvence výraznější a při vzdálenosti tkáně od antény větší než 5 mm je činitel přenosu menší než -10 dB a anténa je tedy téměř nepoužitelná.



Obrázek 7.24: Vyzařovací diagram trychtýřové antény CSIW v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) pro frekvenci 5,8 GHz



Obrázek 7.25: Vyzařovací diagram trychtýřové antény SIW v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) pro frekvenci 5,8 GHz

7.6 Štěrbinová anténa

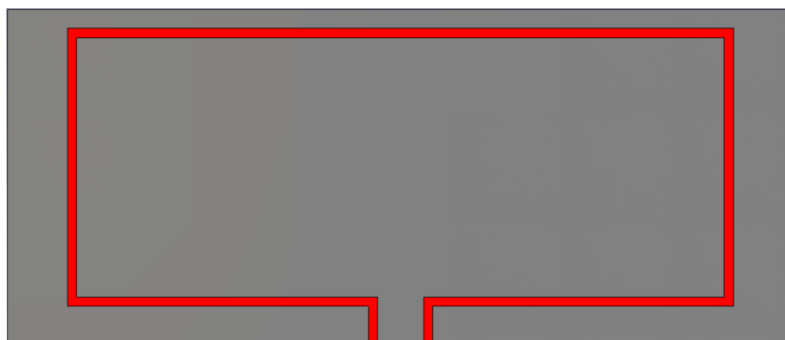
V této části byla navrhnutá štěrbinová anténa pro pásmo 5,8 GHz. Jedná se o patch anténu, která nemá zemní desku, ale výřez obdélníkového tvaru, který celou strukturu rozděluje na 2 části. Vnější část tvoří zemní plocha a vnitřní část tvoří patch anténa oddělena štěrbinou šířky 1 mm. Struktura této antény je ukázána na Obr. 7.26.

Tato anténa byla navrhnutá na modelu lidské tkáně, která díky vlastní vodivosti ovlivňuje vlastnosti antény. Tato anténa má hlavní vyzařovací lalok podél osy Z, proto má přítomnost živé tkáně vliv pouze na přizpůsobení antény, nikoli na rezonanční frekvenci.

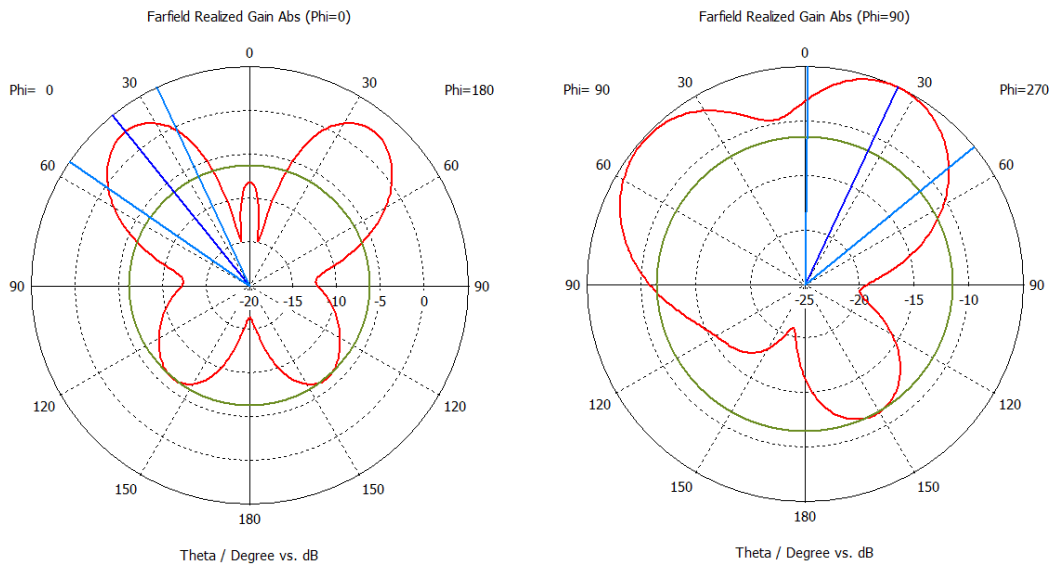
Tato anténa je citlivá na přesnost a poměr jednotlivých rozměrů. Při špatném poměru rozměrů šířky, výšky a mezery se mohou objevit nežádoucí parazitní kmitočty. Proto byly vytvořeny 2 modely této antény a byly porovnávány jejich parametry. Design obou modelů je totožný, liší se pouze v rozměru antén. 1. model má celkovou šířku 85 mm a výšku 36 mm, 2. model má celkovou šířku 90 mm a výšku 36 mm.

Účinnost 1. modelu štěrbinové antény na frekvenci 5,8 GHz je 0,30 a vyzařuje s maximálním ziskem 3 dB. Účinnost 2. modelu štěrbinové antény na stejné frekvenci je 0,44 a vyzařuje s maximálním ziskem 5 dB. Na Obr. 7.27 a Obr. 7.28 je ukázán směr vyzařování obou modelů štěrbinové antény v rovině XZ i v rovině YZ.

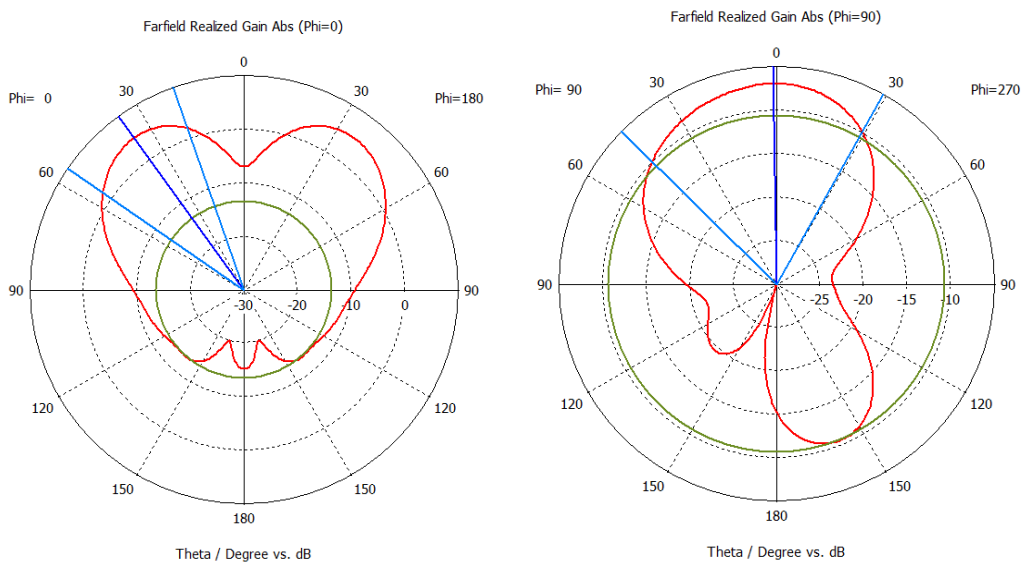
Simulovaný činitel přenosu je ukázán na Obr. 8.10 v porovnání s měřenými parametry vyrobených štěrbinových antén.



Obrázek 7.26: Model štěrbinové antény



Obrázek 7.27: Vyzařovací diagram pro 1. model štěrbinové antény v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) pro frekvenci 5,8 GHz



Obrázek 7.28: Vyzařovací diagram pro 2. model štěrbinové antény v rovině XZ (vlevo) a v rovině YZ (vpravo) pro frekvenci 5,8 GHz

8 VÝROBA A MĚŘENÍ ANTÉN

Tato kapitola je zaměřena na představení vyrobených antén a měření jejich parametrů. Jako dielektrikum byl použit textilní materiál fleecy s tloušťkou 1,5 mm.

Pro výrobu antén byly použity 2 technologie výroby. Antény byly vyrobeny leptáním měděné fólie a na textil byly přilepeny tenkou vrstvou lepidla, které je součástí měděné fólie. Další technologií byla ruční výroba antén, kdy byly antény vyřezány z vodivé textilie a na textil byly nalepeny pomocí běžného kancelářského lepidla. Prokovy byly vytvořeny pomocí vodivé niti.

Přesnost technologie leptání z měděné fólie je značně vyšší než při ruční výrobě, avšak mechanické vlastnosti vodivé textilie jsou značně lepší oproti měděné fólii. Vodivá textilie je vyrobena z vláken, které jsou směsí více materiálů, proto hustota vodivých částic je značně menší než u běžné měděné fólie, což způsobí menší vodivost a tím i horší vlastnosti vyrobených antén.

Pro měření byly použity koaxiální konektory typu N, které nejsou vhodné pro běžné použití planárních antén. Tyto konektory byly zvoleny z důvodu snadného měření pomocí spektrálního analyzátoru, který používá stejný typ konektorů.

8.1 Patch anténa dvoupásmová

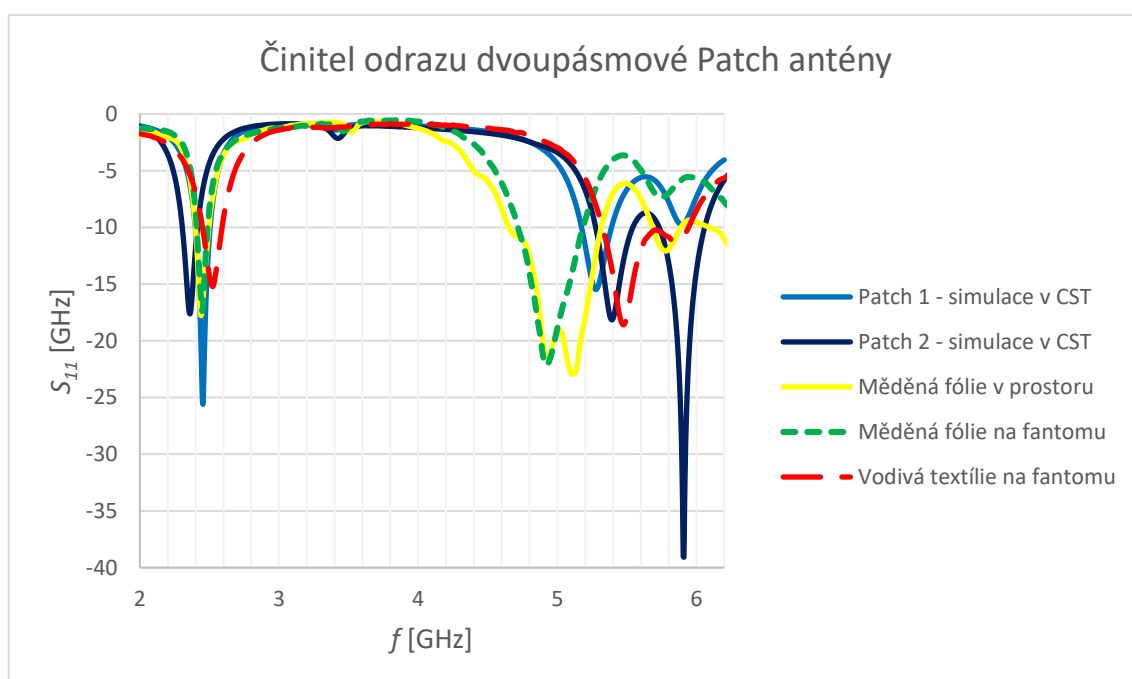
Byly navrženy 2 modely patch antény. Model, u kterého byl mikropásek zúžen na 5 mm pro snadnější měření byl vyroben z měděné fólie. Model, u kterého byla zachována šířka mikropásku 7 mm, byl vyroben z vodivé textilie

Na Obr. 8.1 jsou ukázány vyrobené antény a na Obr. 8.2 je ukázáno srovnání naměřených výsledků s výsledky získanými v simulačním programu CST. U modelu z vodivé textilie je ukázán i použitý N-konektor, který byl k anténě přilepen pomocí vodivého lepidla na bázi stříbra.

Z naměřených výsledků je patrné potlačení požadované rezonanční frekvence. Parazitní rezonanční frekvence v okolí pásma 5 GHz je zvýrazněno a frekvenčně posunuto vlivem mechanických vlastností a přesnosti vyrobené antény. Frekvenční pásmo 2,4 GHz je dáno celkovými rozměry antény, proto se naměřené výsledky shodují s výsledky simulací.



Obrázek 8.1: Dvoupásmová patch anténa vyrobená z měděné fólie (vlevo) a vodivé textilie včetně použitého N-konektoru (vpravo)



Obrázek 8.2: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu dvoupásmových patch antén

8.2 PIFA

Díky velmi malým rozměrům této antény je důležité, aby byla zachována přesnost rozměrů. Mikropásek, který napájí anténu, je tenký pouze 1 mm, proto je náchylný na mechanické poškození. Pro správnou funkci je třeba, aby byl v jedné rovině s anténou. Při připojení konektoru se může mikropásek zkroutit, tím se změní vlastnosti mikropáskového vedení, čímž je ovlivněna funkce antény.

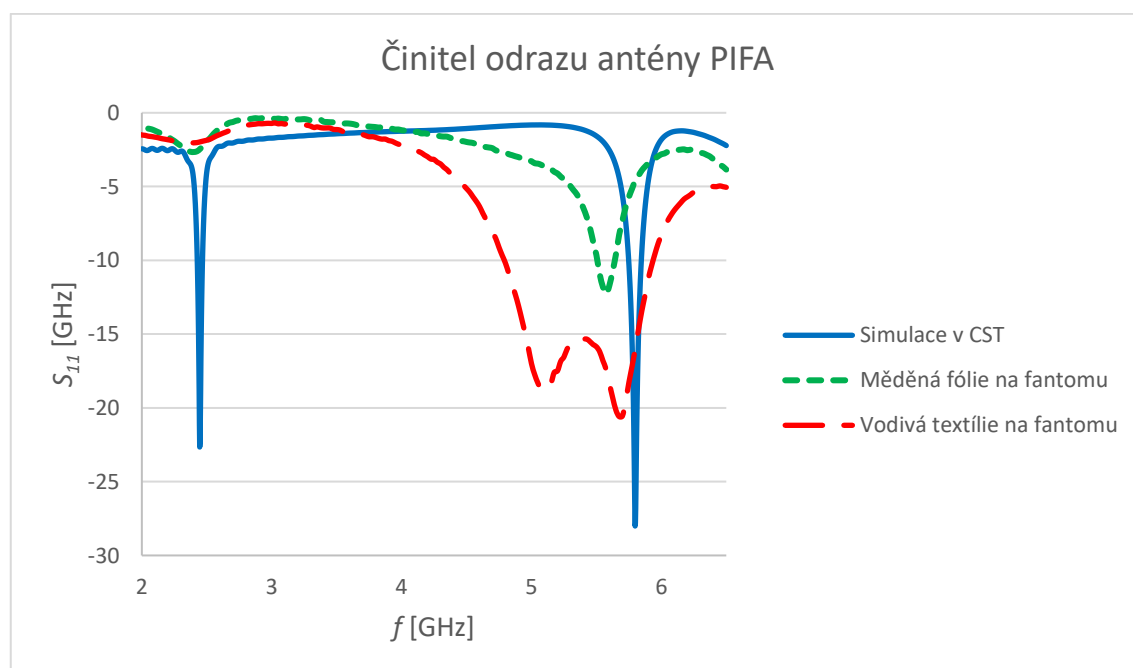
Na Obr. 8.3 jsou ukázány modely antény typu PIFA. Na anténě vyrobené z měděné fólie je patrná mechanická deformace zvlněním povrchu antény. Na druhém obrázku je

ukázána PIFA vyrobena z vodivé textilie, zde je patrné zkroucení mikropáskového napájení, dále je zde ukázáno porovnání velikosti antény s použitým N-konektorem. Zkrat byl vytvořen ručně pomocí vodivé nitě, proto nebylo možné zachovat přesné rozměry.



Obrázek 8.3: PIFA vyrobena z měděné fólie (vlevo) a vodivé textilie včetně použitého N-konektoru (vpravo) se zkratem vytvořeným pomocí nitě z vodivých vláken

Na Obr. 8.4 je ukázán činitel odrazu antény typu PIFA v porovnání naměřených výsledků antén vyrobených oběma technologiemi a výsledků ze simulačního programu CST. Je běžné, že při měření reálné antén je zjištěna větší šířka pásma než při simulaci dané antény. Při měření antény vyrobené z měděné fólie bylo zjištěno širší pásmo na vyšší frekvenci. Anténa rezonuje na nižší frekvenci, což mohlo být způsobeno drobnou odchylkou velikosti mezery. Anténa vyrobená z vodivé textilie má značně širší vyšší frekvenční pásmo, což bylo způsobeno malou přesností ruční výroby této antény.



Obrázek 8.4: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu antény PIFA

Rezonanční frekvence v pásmu 2,4 GHz je dána celkovou velikostí antény, proto je shodná se simulovanou rezonanční frekvencí. Přizpůsobení antény na nižší rezonanční frekvenci je špatné z důvodu velkého poklesu účinnosti antény způsobeným nerovnostmi na povrchu antény a nedostatečně kvalitním zkratem z technologických důvodů.

8.3 Trychtýřová anténa SIW a CSIW

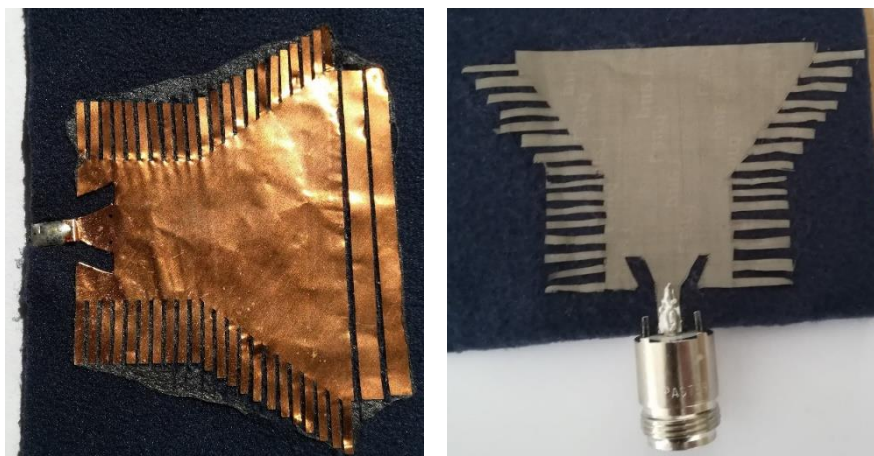
Pro výrobu trychtýřových antén byly použity 2 technologie výroby. Prokovy u trychtýřových antény SIW byly realizovány ručním prošitím vodivou nití o průměru 1 mm. Díky velkému mechanickému namáhání antény při prošívání prokovů došlo ke zvlnění povrchu antény, které mohlo ovlivnit vlastnosti antény.

Rezonanční frekvence je dána šířkou vlnovodu, tedy vzdáleností stěn tvořených prokovy. Rozteč prokovů má také vliv na rezonanční frekvenci, proto je důležitá přesnost těchto parametrů. Při ruční výrobě je zachování přesnosti rozměrů obtížné, proto rezonanční frekvence vyrobené antény je odlišná. Na Obr. 8.5 je ukázána trychtýřová anténa SIW vyrobená z měděné fólie i vodivé textilie, dále je zde ukázáno připojení antény pomocí N-konektoru. Naměřené hodnoty činitele odrazu trychtýřové antény SIW jsou ukázány na Obr. 8.7.

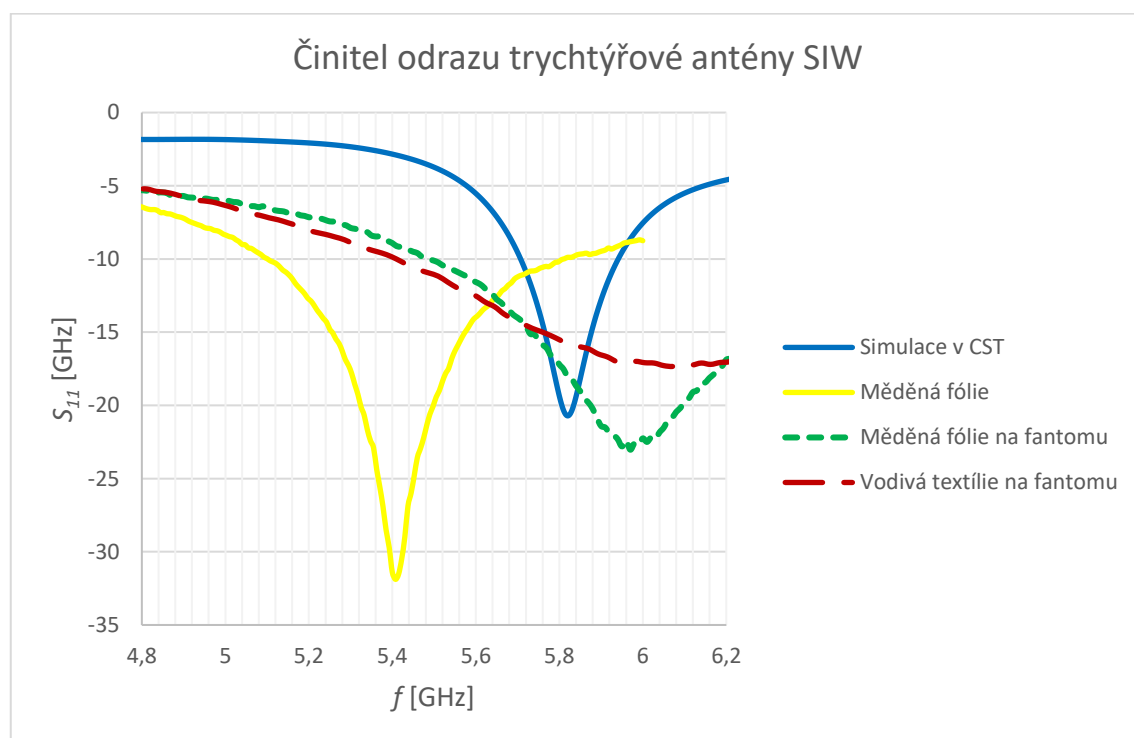
Na Obr. 8.6 je ukázána trychtýřová anténa CSIW vyrobená oběma použitými technologiemi. Pro určení rezonanční frekvence této antény je velmi důležitá délka pahýlů, které nahrazují boční stěny vlnovodu. Měřením bylo zjištěno, že rezonanční frekvence antény je značně ovlivněna přítomností živé tkáně, tedy použitým fantomem při měření. Dále bylo zjištěno, že anténa vyrobená z měděné fólie pracuje obdobně jako anténa vyrobená z vodivé textilie při měření na fantomu. Naměřené výsledky jsou ukázány na Obr. 8.8.



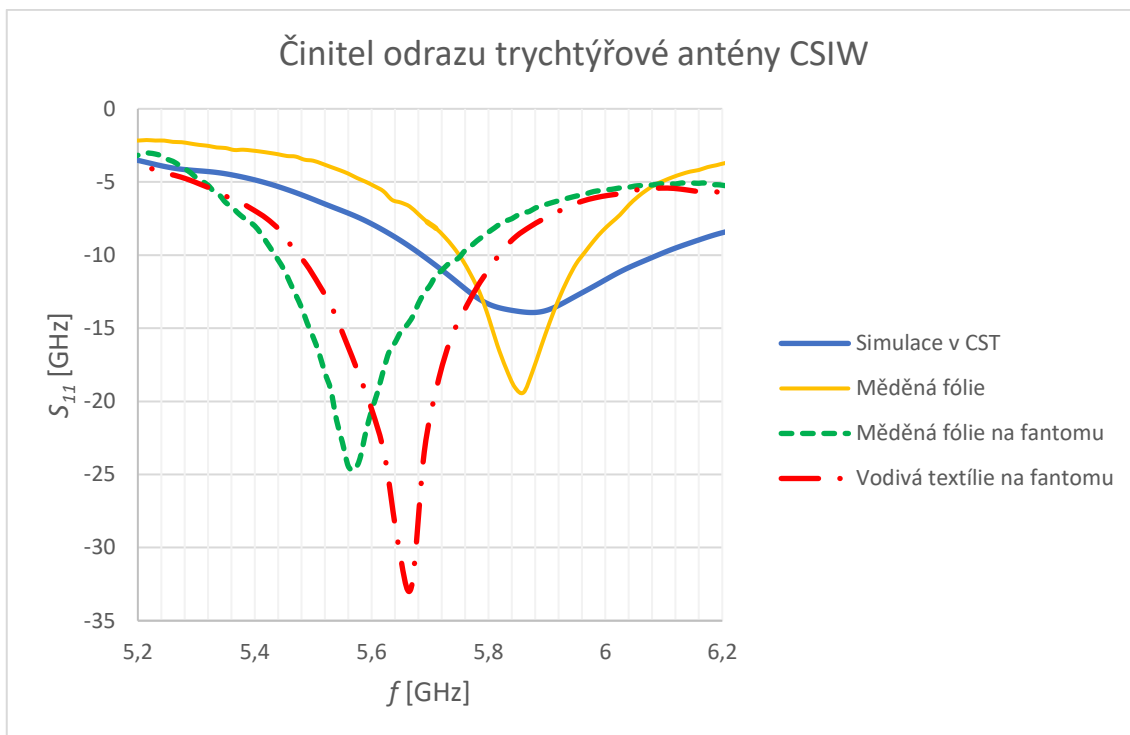
Obrázek 8.5: Trychtýřová anténa SIW vyrobená z měděné fólie (vlevo) a vodivé textilie (vpravo) včetně použitého N-konektoru



Obrázek 8.6: Trychtýřová anténa CSIW vyrobená z měděné fólie (vlevo) a vodivé textilie (vpravo) včetně použitého N-konektoru



Obrázek 8.7: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu trychtýřové antény SIW



Obrázek 8.8: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu trychtýřové antény CSIW

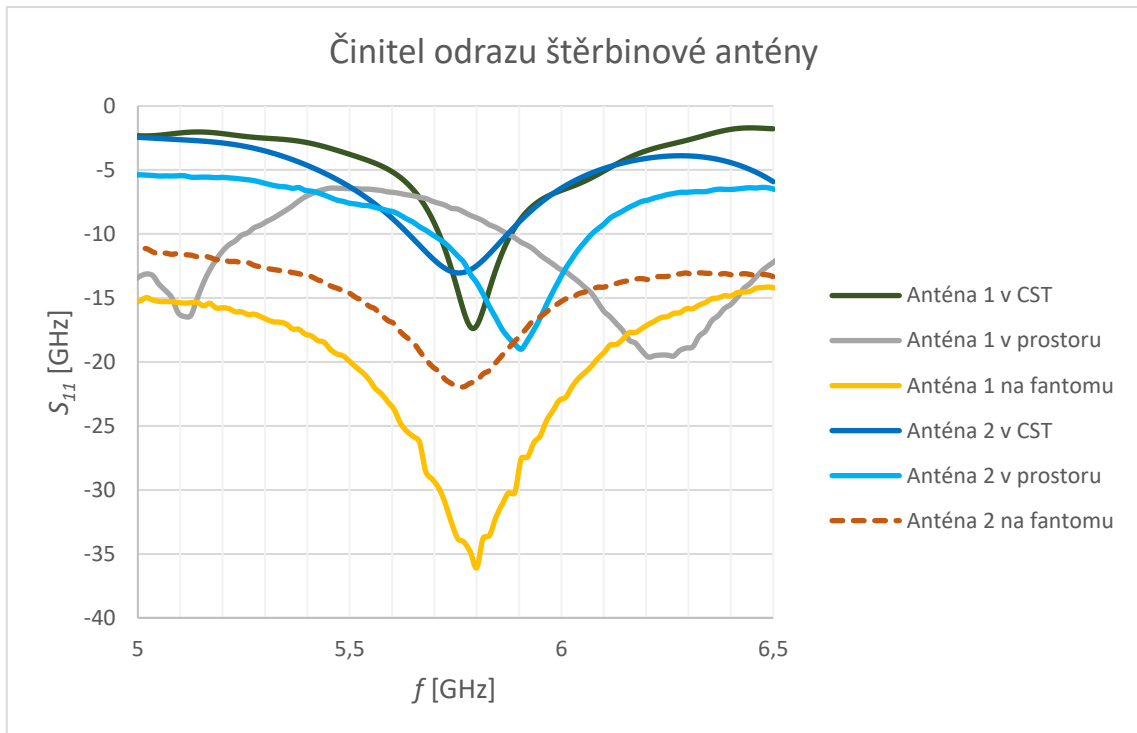
8.4 Štěrbínová anténa

Byly vyrobeny 2 antény ručním vyřezáním z měděné fólie. Obě antény jsou napájeny krátkým mikropáskovým vedením o šířce 5 mm. Vnitřní a vnější část antény odděluje štěrbina o šířce 1 mm u 1. antény a 2 mm u 2. antény. Na Obr. 8.9 jsou porovnány oba vyrobené modely štěrbínové antény.



Obrázek 8.9: Štěrbínová anténa vyrobená z měděné fólie: 1. model (vlevo) a 2. model (vpravo)

Na Obr. 8.10 jsou ukázány naměřené hodnoty štěrbinových antén v porovnání s výsledky získanými pomocí simulačního programu CST. Při měření byl zjištěn vliv fantomu na přizpůsobení antény. Při měření štěrbinových antén ve volném prostoru byla zjištěna odlišná rezonanční frekvence oproti měření na fantomu, kde se naměřená rezonanční frekvence shodovala se simulovanými hodnotami. U 1. modelu štěrbinové antény bylo naměřeno širší frekvenční pásmo a lepší přizpůsobení antén v porovnání s 2. štěrbinovou anténou.

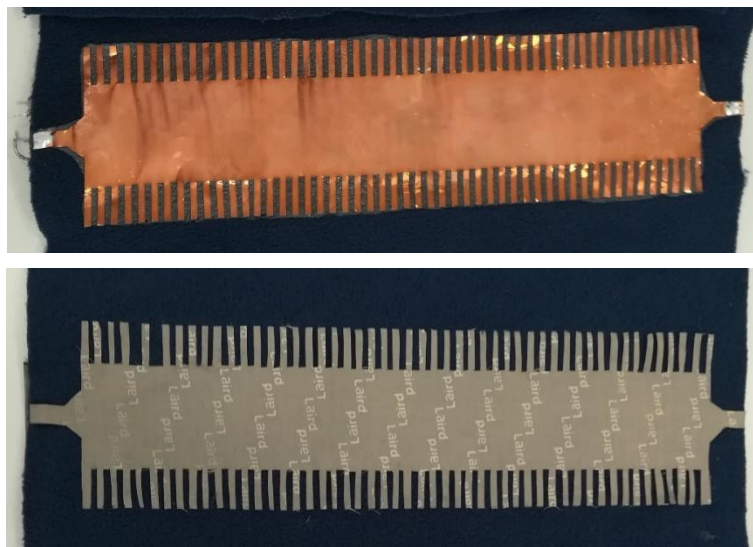


Obrázek 8.10: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele odrazu štěrbinových antén

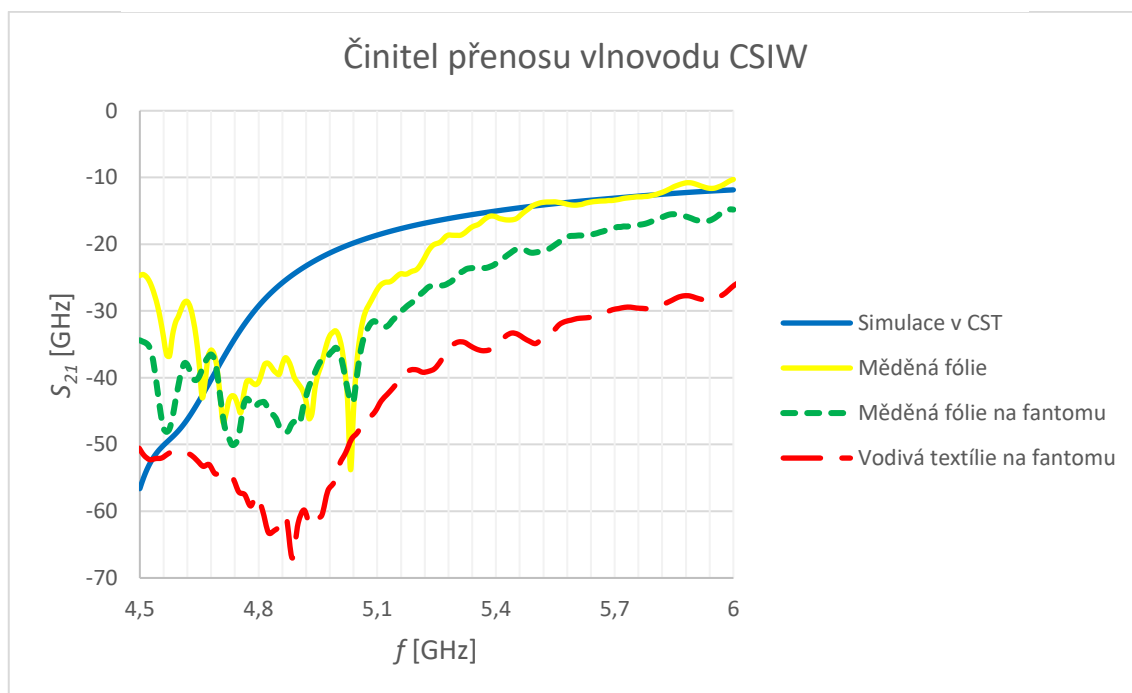
8.5 Vlnovod CSIW

Při výrobě byly použity stejné technologie výroby jako u předešlých antén. Délka vlnovodu byla z technologických důvodů výroby omezena, proto byla určena na 23 cm, což odpovídá počtu 50 pahýlů na délku vlnovodu. Pahýly u vlnovodu nahrazují boční stěny, proto je důležitá jejich délka i rozteč pahýlů.

Vyrobené vlnovody jsou ukázány na Obr. 8.11. Vlnovod je napájen mikropáskovým vedením s impedančním transformátorem. Na Obr. 8.12 jsou ukázány naměřené hodnoty v porovnání se simulovaným činitelem přenosu. Naměřené hodnoty vlnovodu vyrobeného z měděné fólie se v požadovaném frekvenčním pásmu téměř shodují s výsledky simulace. Je patrný vliv fantomu na přenos měřeného vlnovodu. Vlnovod vyroben z vodivé textilie má horší parametry z důvodu malé přesnosti ruční výroby.



Obrázek 8.11: Vlnovod CSIW vyroben z měděné fólie (horní) a vodivé textilie (dolní)



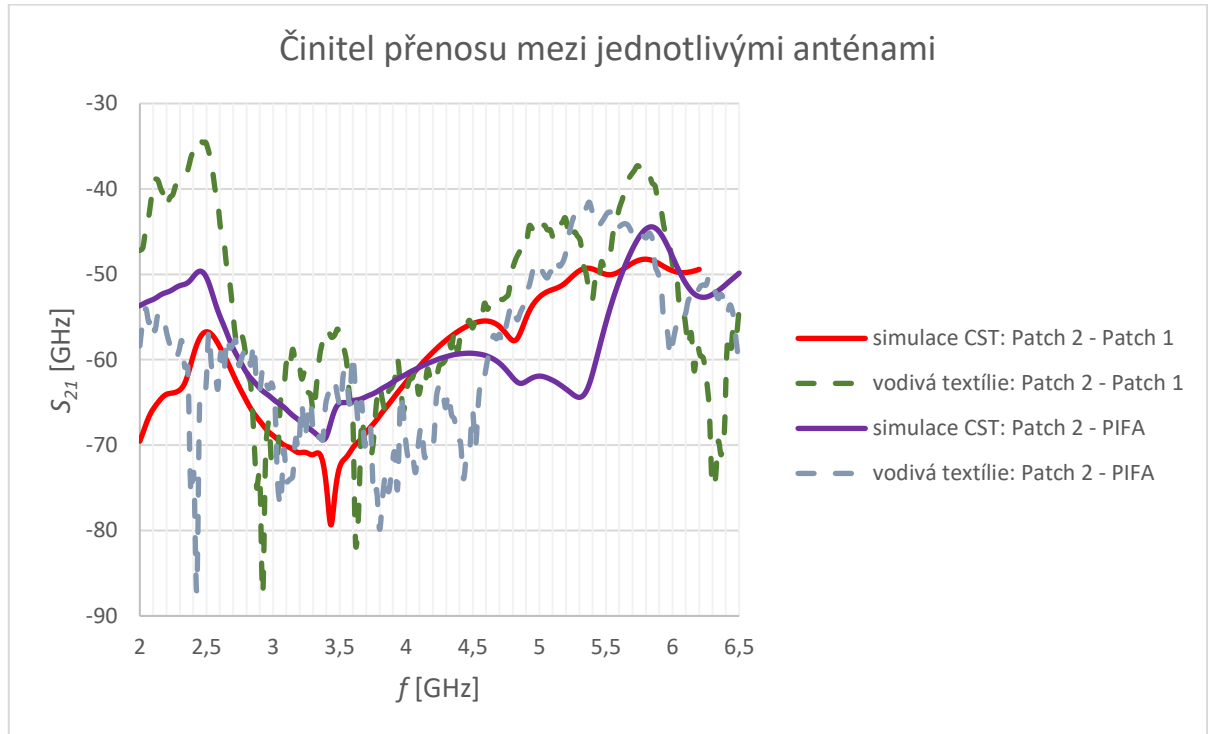
Obrázek 8.12: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu vlnovodu CSIW

8.6 Měření přenosu vyrobených antén

Měření přenosu signálu mezi jednotlivými anténami bylo realizováno na ruce živého člověka, kdy byl měřen přenos z antény umístěné na zápěstí k anténě umístěné v oblasti lokte ve stejné rovině jako první anténa. Aby bylo možné porovnat přenos mezi anténami s vyrobeným vlnovodem byl přenos mezi anténami měřen na vzdálenosti odpovídající délce vlnovodu, tedy 23 cm mezi napájecími porty.

Pro měření byla uvažována patch anténa jako referenční z důvodu dvoupásmového provedení, což umožňuje měření dvoupásmových i jednopásmových antén.

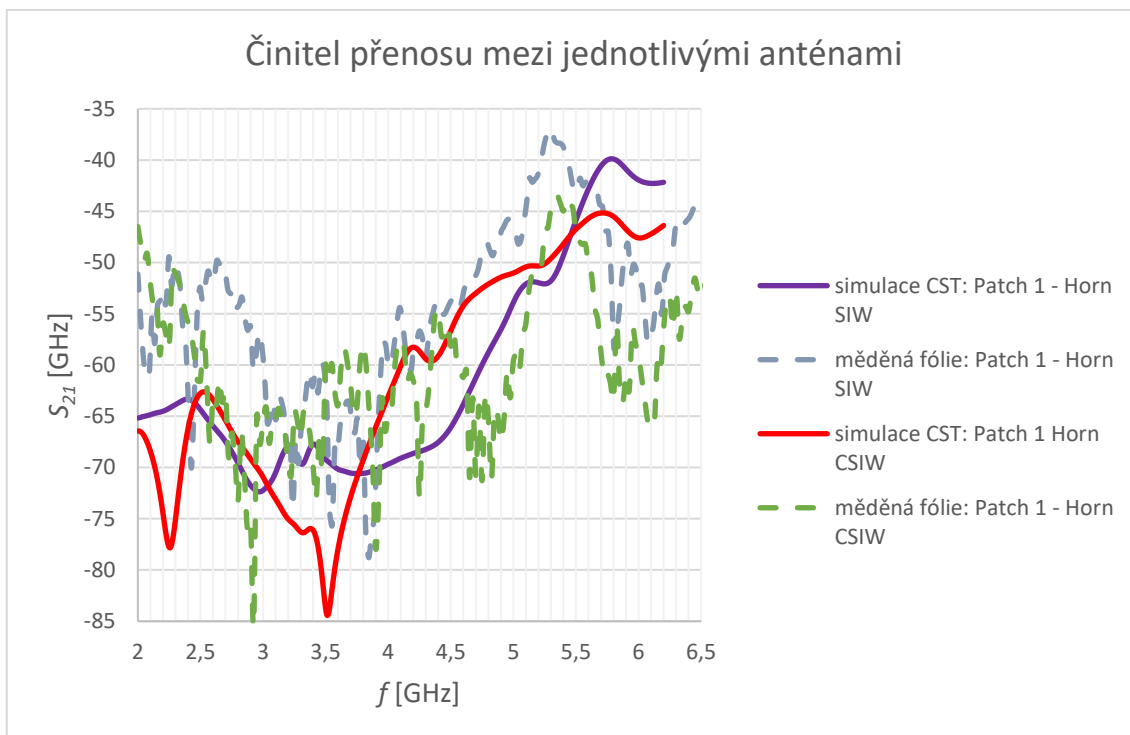
Útlum šířením volného prostoru pro vzdálenost mezi anténami 23 cm na frekvenci 2,4 GHz je 27 dB a na frekvenci 5,8 GHz je útlum 35 dB. S těmito hodnotami jsou porovnávány naměřené výsledky.



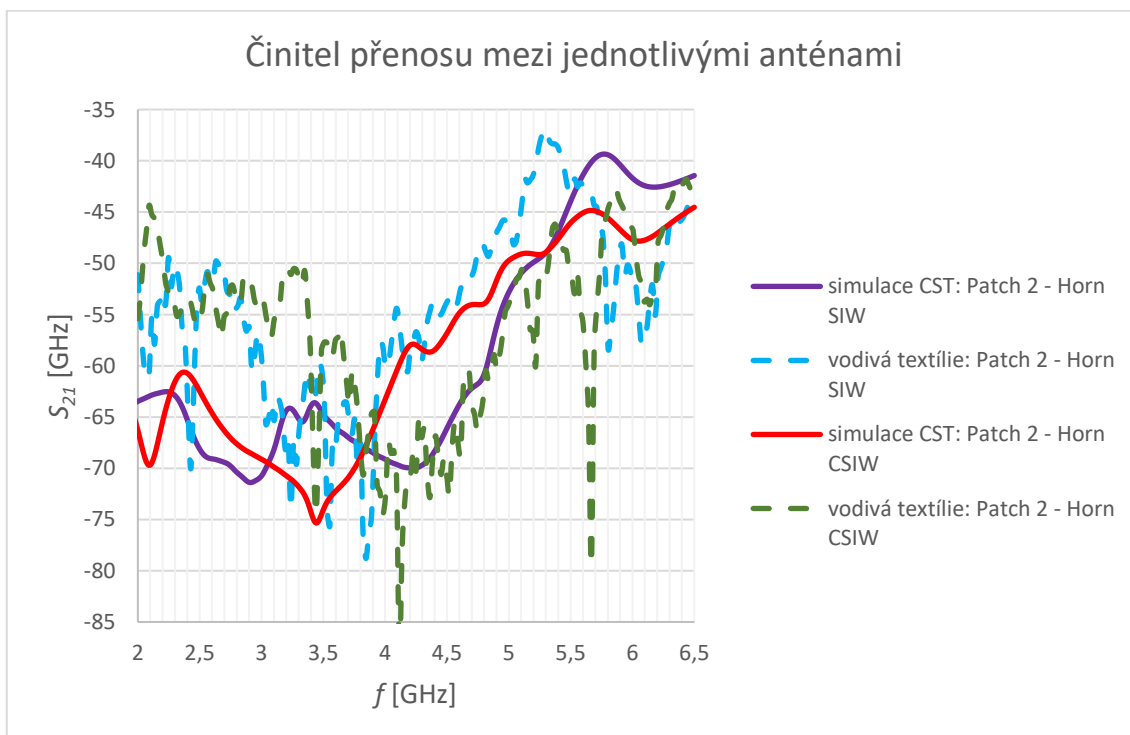
Obrázek 8.13: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi patch anténami a anténou typu PIFA

Pro 1. měření byla vybrána patch anténa s širším mikropáskovým vedením a byl měřen přenos mezi touto anténou a patch anténou s užším mikropáskem a anténou typu PIFA. Tyto antény byly vyrobeny z vodivé textilie a na Obr. 8.13 jsou ukázány naměřené hodnoty v porovnání se simulovaným činitelem přenosu. Pro frekvenční pásmo 2,4 GHz je vhodnější použít 2 patch antény, protože PIFA má špatné přizpůsobení pro toto pásmo.

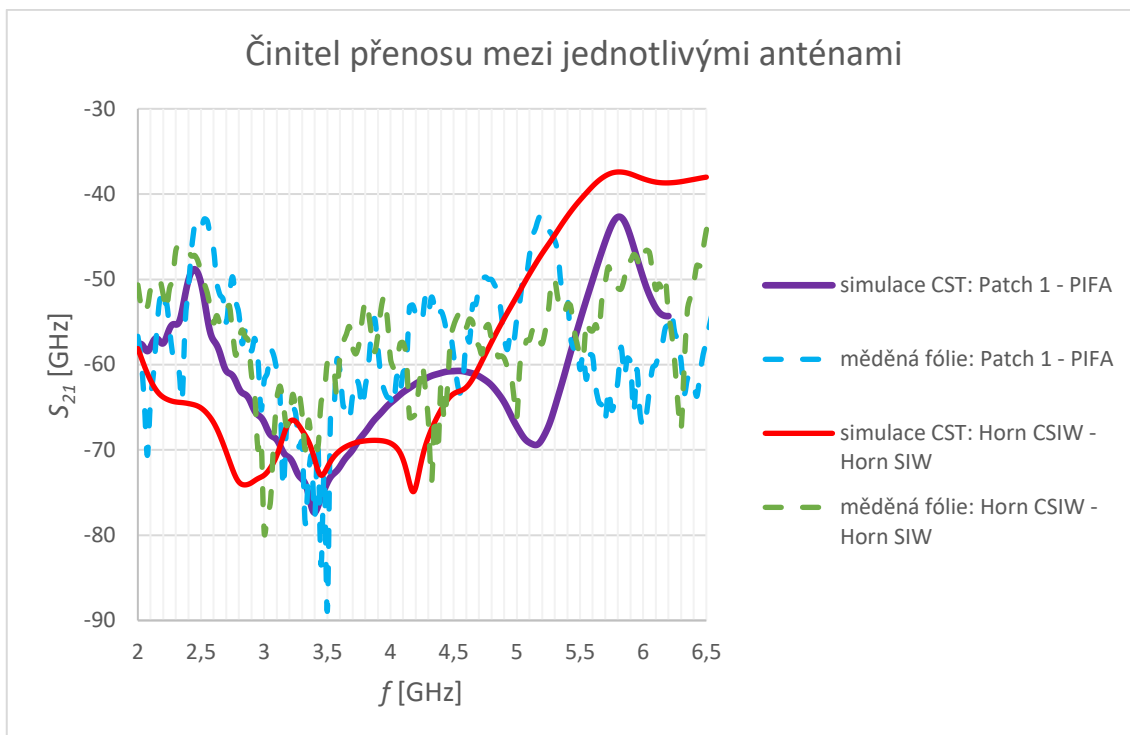
Na Obr. 8.14 je ukázán naměřený přenos mezi patch anténou a trychtýřovou anténou vyrobenou z měděné fólie, na Obr. 8.15 je ukázán přenos mezi patch anténou a trychtýřovou anténou vyrobenou z vodivé textilie. Z důvodu nesprávné rezonanční frekvence patch antény je přenos lepší na nižších frekvencích v pásmu 5,8 GHz. Z naměřených hodnot je patrné, že pro přenos signálu je lepší trychtýřová anténa SIW.



Obrázek 8.14: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi patch anténou a trychtýřovými anténami



Obrázek 8.15: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi patch anténou a trychtýřovými anténami

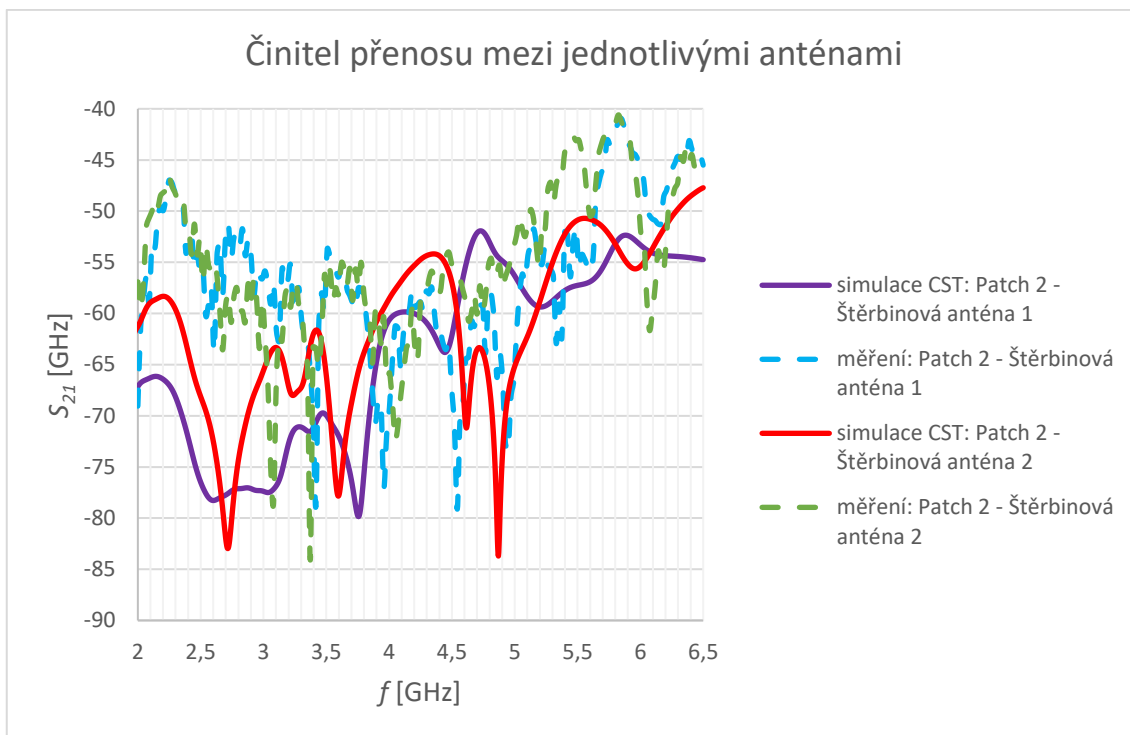


Obrázek 8.16: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu pro přenos mezi patch anténou a PIFA a mezi trychtýřovými anténami

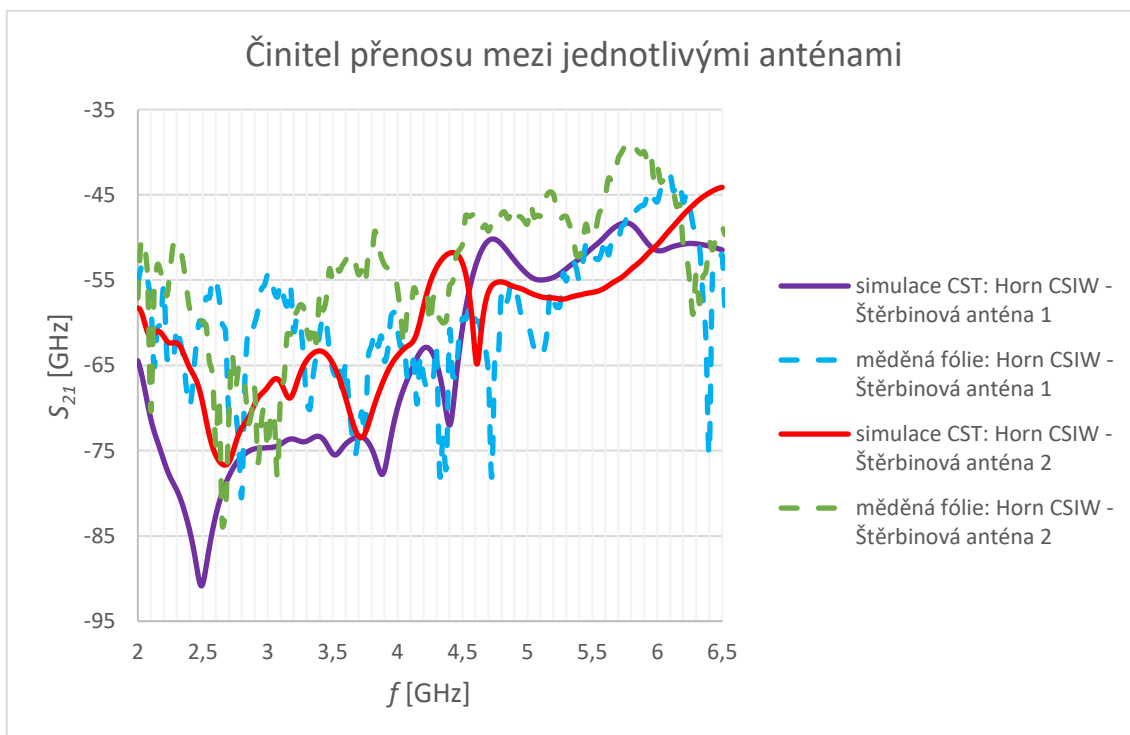
Na Obr. 8.16 je ukázán přenos mezi trychtýřovými anténami vyrobenými z měděné fólie. Ve frekvenčním pásmu 5,8 GHz je přenos okolo -47 dB, což je dostatečná síla signálu pro přenos dat. Přenos na delší vzdálenost by znamenal větší útlum šířením a tím i nižší přijímaný výkon a přijímací anténě.

Na Obr. 8.17 je ukázán přenos mezi patch anténou vyrobenou z vodivé textilie a šterbinovou anténou vyrobenou z měděné fólie. Šterbinové antény jsou navrženy pro frekvenční pásmo 5,8 GHz, ale z naměřených výsledků je patrné, že tyto antény lze použít i pro přenos signálu ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz. Výkon přijatý na přijímací anténě pro přenos 2,4 GHz je o méně než 10 dB nižší.

Na Obr. 8.18 je ukázán přenos mezi trychtýřovou anténou a šterbinovou anténou pro 2 vyrobené modely. Přenos mezi těmito anténami na frekvenci 5,8 GHz je -40 dB, což je dostatečný výkon na přijímací anténě pro přenos dat podél lidské paže.

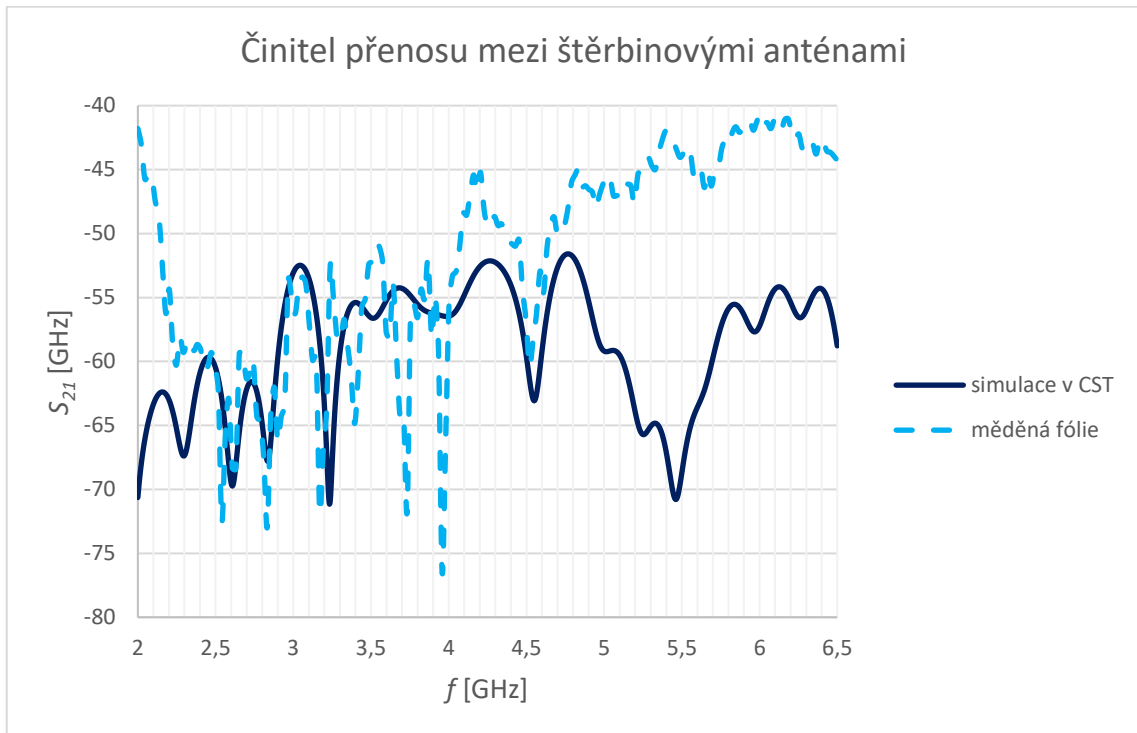


Obrázek 8.17: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi patch anténou a štěrbinovou anténou



Obrázek 8.18: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků činitele přenosu mezi trychtýřovou anténou a štěrbinovou anténou

Posledním provedeným měření bylo měření přenosu mezi 2 štěrbinovými anténami na lidské ruce. Na Obr. 8.19 je ukázán měřený přenos mezi těmito štěrbinovými anténami. Měřený přenos na vyšších frekvencích je výrazně lepší než hodnoty přenosu získané pomocí simulačního programu CST. Při přenosu signálu ve frekvenčním pásmu 5,8 GHz je přijímaný výkon přibližně -42 dB, tedy dostatečný výkon pro přenos dat pomocí těchto antén.



Obrázek 8.19: Porovnání simulovaných a naměřených výsledků pro přenos mezi 1. modelem a 2. modelem štěrbinové antény

9 ZÁVĚR

Cílem této práce byl návrh bezdrátového přenosu informace mezi různými částmi lidského těla. V úvodu bylo nutné analyzovat možnosti přenosu informace pomocí bezdrátového komunikačního kanálu podél částí lidského těla. Na základě zjištěných poznatků byl zvolen, jako nosný substrát, textilní materiál Fleece. Tento materiál byl zvolen pro svoje dobré mechanické vlastnosti a nízkou savost vlhkosti díky výrobě z umělých vláken. Dalším úkolem byl výběr několika typů různých antén a uvážení jejich použití v aplikacích v blízkosti lidského těla.

V rámci této práce jsou objasněny a navrhovány pouze antény, které byly vybrány pro použití v blízkosti lidského těla. Antény, které byly vyhodnoceny jako nevhodné zde popsány nejsou.

V rámci této práce byly navrhovány antény pro frekvenční pásmo 2400–2485 MHz, antény pro pásmo 5,725–5,875 GHz a dvoupásmové antény, které je možné provozovat v obou těchto pásmech.

Po výběru vhodného substrátu bylo nutné zjistit relativní permitivitu a ztrátový činitel vybraného materiálu. Tyto parametry jsou nezbytné pro návrh planárních antén, proto bylo provedeno měření zvoleného materiálu. Byla zjištěna frekvenční závislost relativní permitivity, což může ovlivňovat reálné parametry dvoupásmových antén. Měřením byla zjištěna relativní permitivita $\epsilon_r = 1,10$ na frekvenci 2,4 GHz a $\epsilon_r = 1,24$ na frekvenci 5,8 GHz. Ztrátový činitel použitého materiálu byl naměřen $\tan(\delta) = 0,0317$.

Podle matematických postupů byly vytvořeny základní modely několika planárních antén, které byly modelovány ve volném prostoru. Byl vytvořen zjednodušený model lidské ruky, na který byly umístěny modely navržených antén. Bylo simulováno impedanční přizpůsobení antén vyjádřeno činitelem odrazu S_{11} pro oba případy. Antény umístěny na modelu lidské ruky byly optimalizovány a vyrobeny dvěma technologiemi.

Byly vyrobeny 2 modely patch antény, 1 model PIFA, 2 modely trychtýřové antény, 2 modely šterbinové antény, 1 model vlnovodu.

Z naměřených výsledků činitele odrazu patch antén je zřejmé správné přizpůsobení pro nižší frekvenční pásmo, avšak pro vyšší frekvenční pásmo je anténa špatně přizpůsobena. V případě většího časového limitu by tato chyba byla řešena dalším iteračním krokem, tedy opětovná optimalizace antény na základě naměřených výsledků a výroba nového prototypu této antény.

Při měření antény PIFA bylo nižší frekvenční pásmo nepřizpůsobeno, což bylo způsobeno nižší účinností antény a také určitou mezerou mezi živou tkání a anténou. Druhé frekvenční pásmo bylo značně rozšířeno, což mohlo být způsobeno nepřesnými rozměry vytvořených zářezů a nedostatečně kvalitním provedení zkratu této antény. Z porovnání vyrobených antén byly naměřeny lepší výsledky pro anténu vyrobenou z vodivé textilie.

Při výrobě trychtýřových antén metodou SIW bylo nutné realizovat prokovy ručním prošíváním antény, proto nemohla být zaručena přesnost výroby. Při výrobě metodou CSIW je důležité zachovat rozměry pahýlů, zejména jejich délku. Anténa z vodivé textilie byla vyráběna ručně, proto je přesnost značně nižší než při výrobě leptáním. Z naměřených výsledků vyplývá lepší přizpůsobení trychtýřových antén při měření na fantomu. Rezonanční frekvence vyrobených antén je odlišná oproti simulovaným výsledkům. tento problém by byl řešen optimalizováním rozměrů antén, vyrobením dalšího prototypu a vyšší přesností výroby.

V případě šěrbinové antény byly oba modely realizovány ručním vyřezáním z měděné fólie. Při měření bylo zjištěno lepší přizpůsobení pro 1. model této antény, tedy model s menší šířkou antény. Rezonanční frekvence vyrobené antény byla shodná se simulovanými výsledky, lze tedy tuto anténu považovat za správně navrženou.

Při návrhu vlnovodu byl značný problém s malou výškou substrátu a po provedení prvotních simulací byl vlnovod SIW zavrhnut a dále byl navrhován pouze vlnovod CSIW. S uvážením výrobních omezení byl vlnovod navržen s délkou 23 cm. Tento vlnovod byl realizován ruční výrobou z vodivé textilie i přesnější výrobou leptáním měděné fólie. Měřením byl zjištěn lepší přenos vlnovodu CSIW z měděné fólie, rozdíl mezi měřením vlnovodu ve volném prostoru a na fantomu nebyl výrazný.

Při měření přenosu mezi určitými anténami byla patch anténa brána jako referenční a bylo provedeno měření několika antén na živé lidské ruce při umístění referenční antény na zápěstí a druhé antény v oblasti lokte ve stejné rovině jako referenční anténa. Umístění antén bylo zvoleno pro zachování vzdálenosti 23 cm mezi anténami za účelem adekvátního porovnání přenosu mezi anténami s přenosem pomocí vlnovodu.

V porovnání s hodnotou útlumu šíření ve volném prostoru byl jako vhodný spoj vyhodnocen přenos mezi dvěma patch anténami, mezi 2. modelem patch antény a PIFA, mezi 2. modelem patch antény a šěrbinovou anténou a přenos mezi dvěma šěrbinovými anténami. Přenos mezi těmito anténami je vhodný pouze ve vyšším frekvenčním pásmu, přenos v nižším frekvenčním pásmu byl výrazně horší než teoretický přenos ve volném prostoru. Avšak v porovnání s přenosem pomocí vlnovodu jsou i tyto spoje výrazně horší.

Závěrem lze vyhodnotit jako nejvhodnější komunikační síť pro přenos informace podél lidského těla vlnovod integrovaný do textilního substrátu. Vlnovod není příliš ovlivnitelný přítomností živé tkáně, proto lze očekávat stejně kvalitní spojení u každého uživatele. Tento vlnovod může být náchylný na mechanické namáhání, proto je třeba uvážit potřebu přenosu pro konkrétní umístění na lidském těle a návrh komunikační sítě přizpůsobit konkrétním požadavkům na komunikační síť.

LITERATURA

- [1] RAIDA, Zbyněk, Jaroslav LÁČÍK, Michal MRNKA, Jan PUSKELY, Tomáš MIKULÁŠEK a Petr VAŠINA. *Elektromagnetické struktury v blízkosti živých tkání*. V Brně: Vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-214-5449-1.
- [2] WONG, Kin-Lu. *Planar Antennas for Wireless Communications*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 301 p. ISBN 0-471-26611-6.
- [3] NARAYAN, Ravikiran, Stefan ATAMAN a Marie MATHIAN. A dual-band planar monopole antenna for 2.4 GHz ISM and UWB applications. *2012 IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel* [online]. IEEE, 2012, 1-4 [cit. 2017-12-09]. DOI: 10.1109/EEEI.2012.6376900. ISBN 978-1-4673-4681-8.
- [4] SATO, K. et al., Measurements of reflection and transmission characteristics of interior structures of office building in the 60 GHz band. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1998, vol. 47, no. 2, p. 235-245.
- [5] CHANDRA, R., Johansson, J. An analytical link-loss model for on-body propagation around the body based on elliptical approximation of the torso with arms' influence included. *IEEE antennas and Wireless Propagation Letters*. 2013, **12**, 528-531. DOI: 10.1109/LAWP.2013.2257656.
- [6] Wittig, T. Overview of SAR. UGM 2007. vol. 25.
- [7] KOKOLIA, Bc. Martin. *NOSITELNÁ REKTIFIKAČNÍ ANTÉNA PRO RF SKLÍZENÍ ENERGIE*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.
- [8] HOTOVEC, Jakub. *TEXTILNÍ MIKROVLNNÉ KOMPONENTY*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Petr Vašina.
- [9] PŘÍKAZSKÝ, David. *ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI ANIZOTROPNÍHO DIELEKTRICKÉHO MATERIÁLU*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jan Vélím.
- [10] VÉLIM, Jan. Relative permittivity measurement of 3D-textile. In: Dědková, Jarmila. *Proceedings of the 22nd Conference STUDENT EEICT 2016*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016, s. 584-588. ISBN 978-80-214-5350-0.
- [11] *Microstrip Calculator* [online]. Dostupné z: <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip.aspx>
- [12] ŠEBESTA, Jirí. *VÍCEPÁSMOVÁ FLÍČKOVÁ ANTÉNA*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Petr Všetula.
- [13] *Microstrip Patch Antenna Calculator* [online]. Dostupné z: <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx>
- [14] KADLEC, Petr. *POČÍTAČOVÉ ŘEŠENÍ KOMUNIKAČNÍCH SUBSYSTEMŮ: přednášky* [ppt]. Brno. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

Ústav radioelektroniky, 09-12-2017. Dostupné z URL: www.vutbr.cz.

- [15] JAROŠ, Ondřej. *TRYCHTÝŘOVÁ ANTÉNA INTEGROVANÁ DO TEXTILU*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jan Vělim.
- [16] CUPAL, Miroslav. *BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ENERGIE UVNITŘ AUTOMOBILU*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.
- [17] Tan, Yingying & Yan, Liping & Zhao, Xiang & Liu, Changjun & Huang, Ka-Ma. (2014). *Bandwidth enhancement of a printed slot antenna with a diamond-shaped tuning stub*. Progress In Electromagnetics Research C. 50. 87-93. 10.2528/PIERC14032404.
- [18] BALANIS, A. C. *Antenna Theory: Analysis and Design*, Third Edition, 2/E. New Jersey: John Wiley and Sons, 2005.
- [19] Design of a Dual-Band PIFA for Handset Devices and its SAR Evaluation. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 2016, XVII (2), 169–178. ISSN 1405-7743 FI-UNAM.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

c	rychlost světla ve vakuu
CST	Computer Simulation Technology – Simulační program
d	průměr prokovů SIW, nebo šířka pahýlů CSIW
f	frekvence
G	relativní zisk antény
h	výška substrátu
l_{CON}	délka vedení s chybou konektorů
l_{LINE}	délka vedení s korekcí chyby konektorů
p	rozteč prokovů SIW, nebo rozteč pahýlů CSIW
$PIFA$	Planar inverted F-antenna, Planární anténa se zkratovanou zemnicí deskou
SAR	Specific Absorbtion Rate – Specifická míra absorpce
SIW	Substrate integrated waveguide – Vlnovod integrovaný do substrátu
SMA	SubMiniature version A – koaxiální konektor typu SMA
S_{11}	Činitel odrazu
S_{12}	Činitel přenosu
$\tan \delta$	ztrátový činitel
TE	Transverzálně elektrická vlna
TEM	Transverzálně elektricky-magnetická vlna
TM	Transverzálně magnetická vlna
Z_0	charakteristická impedance
ε_0	permitivita vakua
ε_r	relativní permitivita
μ_0	permeabilita vakua
μ_r	relativní permeabilita
η	účinnost antény
λ	vlnová délka
ω	úhlová rychlost