



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

SAMOLEPICÍ ANTÉNY PRO KOMUNIKACI PO LIDSKÉM TĚLE

SELF-ADHESIVE ANTENNAS FOR ON-BODY COMMUNICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Punar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Jan Punar

ID: 186562

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Samolepicí antény pro komunikaci po lidském těle

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Porovnejte možné varianty štěrbinové smyčkové antény vhodné pro bezdrátovou komunikaci po lidském těle v ISM pásmu 5,8 GHz. Vlastnosti antén ověřte počítačovou simulací ve volném prostoru a na povrchu třívrstvého fantomu. Referenční anténu navrhnete pro vybraný konvenční substrát (ARLON CuClad 217LX, ARLON 25N).

Strukturu referenční antény modifikujte tak, aby mohl být konvenční substrát nahrazen samolepicí fólií. Anténu optimalizujte a vyrobte její prototyp. Funkčnost antény ověřte při bezdrátové komunikaci po lidském těle a po povrchu osobního automobilu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] YU-JEN CHI; FU-CHIARNG CHEN On-body adhesive-bandage-like antenna for wireless medical telemetry service, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, vol. 62, no. 5, p. 2472-2480, DOI: 10.1109/TAP.2014.2308918

[2] HALL, P.S., HAO, Y. Antennas and Propagation for Body-centric Wireless Communications, 2/E, Norwood: Artech House, 2012. ISBN: 978-1-60807-376-4

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 24.5.2018

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na planární antény pro komunikaci po lidském těle (*on body*). Práce vychází z konceptu samolepicí antény, který byl publikován v [1]. Práce obsahuje výsledky simulací navržené antény a následné porovnání s výsledky uváděnými v [1]. Práce se dále zabývá přepočtem antén pro pracovní frekvenci 5,8 GHz pro substrát Arlon 25N a následným přepočtem antény na tenký substrát FR4. Práce se dále zabývá anténami nejen pro komunikaci *on body*, ale také pro komunikaci mezi lidským tělem a vzdálenou jednotkou (*off body*). V neposlední řadě práce obsahuje výsledky měření referenční antény na substrátu Arlon 25N.

KLÍČOVÁ SLOVA

Planární anténa, šterbinová smyčková anténa, *on body* komunikace, *off body* komunikace

ABSTRACT

This project is focused on planar antennas for *on body* communication. Project follows the concept of a self-adhesive antenna, which was published in [1]. The included report contains simulation results of the designed antenna, and compares them with results given in [1]. It describes the redesign of the antenna to the operation frequency 5.8 GHz for substrate Arlon 25N followed by subsequent conversion to the thin substrate FR4. The thesis also deals with antennas not only for *on body* communication but also for communication between the human body and the remote unit. Finally, the work contains measurement results of the reference antenna on the Arlon 25N substrate.

KEYWORDS

Planar antenna, planar slot loop antenna, *on body* communication, *off body* communication

Bibliografická citace:

PUNAR, J. Samolepicí antény pro komunikaci po lidském těle. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 43s.
Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Samolepicí antény pro komunikaci po lidském těle jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **21. května 201**

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za cenné odborné rady, za ochotu a čas který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Miroslavu Cupalovi za praktické rady při výrobě antény. V neposlední řadě patří dík panu doc. Ing. Jaroslavu Láčíkovi Ph.D za pomoc při měření antény.

V Brně dne: **21. května 2018**

.....

podpis autora

OBSAH

Úvod	1
1 TEORETICKÝ ROZBOR	2
1.1 Planární anténa.....	2
1.2 Polarizace.....	2
1.3 Odstínění tkáně	2
1.4 Substrát	3
1.5 Komunikace on body/off body	4
2 ŠTĚRBINOVÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA	4
2.1 Teorie.....	4
2.2 Simulace.....	5
2.2.1 CST Studio Suite	5
2.2.2 Navržená štěrbínová smyčková anténa.....	6
3 ŠTĚRBINOVÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA SE ZEMNÍ DESKOU	7
3.1 Navržená anténa na pracovní frekvenci 1,43 GHz	7
3.2 Výsledky simulací.....	8
3.3 Publikovaná anténa	9
3.4 Porovnání výsledků.....	10
4 REFERENČNÍ ANTÉNA NA SUBSTRÁTU ARLON 25N, PRACOVNÍ FREKVENCE 5,8 GHZ	11
4.1 Simulace.....	11
4.2 Výroba	14
4.3 Měření antény	16
4.3.1 Výsledky měření S11 a Z11, anténa s rozlitím mědi 5mm kolem štěrbin.....	16
4.3.2 Výsledky měření S11 a Z11 pro přesně sestřiženou anténu	18
4.3.3 Změřená vyzařovací charakteristika	19
5 VLIV TKÁNĚ	20
6 OPTIMALIZACE ANTÉNY PRO OHEBNÝ SUBSTRÁT	22
6.1 Přehled substrátů.....	22
6.1.1 FR4.....	22
6.1.2 Panasonic R-1577	22

6.1.3	Arlon 25N	22
6.2	Výběr substrátu	22
6.3	Návrh antény	22
6.3.1	Anténa pro komunikaci off body	23
6.3.2	Anténa pro komunikaci on body.....	25
7	ZÁVĚR	28
	Literatura	29
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	30
	Seznam příloh	31

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Závislost účinnosti a šířky pásma antény na tloušťce a efektivní permitivitě substrátu, převzato z [5]	3
Obrázek 1.2	Závislost činitele odrazu na vstupu na tloušťce substrátu h	4
Obrázek 2.1	Rozložení proudu na štěrbinové anténě bez zemní desky tvaru obdélníkového prstence	5
Obrázek 2.2	Štěrbinová smyčková anténa 1,43GHz bez zemní desky	6
Obrázek 2.3	Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S_{11} (vlevo) a poměru stojatých vln VSWR (vpravo) na vstupu smyčkové antény pro pracovní kmitočet 1,43 GHz, bez zemní desky	6
Obrázek 2.4	Vliv tkáně na vlastnosti antény (zelená: anténa ve volném prostoru, červená: anténa na modelu tkáně). Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S_{11} (vlevo) a poměru stojatých vln VSWR (vpravo) na vstupu smyčkové antény pro pracovní kmitočet 1,43 GHz.....	7
Obrázek 3.1	Model navržené antény ze shora.....	8
Obrázek 3.2	Simulovaný kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S_{11} (vlevo) a vstupní reaktance (vpravo) pro anténu s prokvy.....	8
Obrázek 3.3	Závislost velikosti činitele odrazu S_{11} na změně šířky w (vlevo) a délky b (vpravo) štěrbinové smyčky.....	9
Obrázek 3.4	Závislost velikosti činitele odrazu S_{11} na umístění napájecího bodu	9
Obrázek 3.5	Porovnání kmitočtového průběhu S_{11} na simulované anténě (vlevo) a anténě ze článku [1] (vpravo)	10
Obrázek 3.6	Vyzařovací diagramy antény publikované v článku [1]	10
Obrázek 3.7	Vyzařovací diagramy simulované antény (kmitočet 1,43 GHz, rovina X-Z vlevo, rovina Y-Z vpravo).....	11
Obrázek 4.1	Rozměry antény na substrátu Arlon 25N, pracovní frekvence 5,8 GHz	12
Obrázek 4.2	Činitel odrazu na vstupu pro anténu na substrátu Arlon 25N.....	12
Obrázek 4.3	Vyzařovací charakteristika antény na substrátu Arlon 25N, na frekvenci 5,8 GHz (rovina X-Z)	13
Obrázek 4.4	Vyzařovací charakteristika antény na substrátu Arlon 25N, na frekvenci 5,8 GHz (rovina Y-Z)	13
Obrázek 4.5	Příklad gerber dat pro vrchní stranu antény	14
Obrázek 4.6	Příklad gerber dat pro spodní stranu antény	15
Obrázek 4.8	Foto antény s rozlitím	15
Obrázek 4.10	Foto přesně zastřižené.....	15
Obrázek 4.7	Foto antény s rozlitím mědi 5 mm ze spodu.....	15

Obrázek 4.9	Foto přesně zastřižené antény ze spodu	15
Obrázek 4.11	Změřený činitel odrazu na vstupu, anténa s rozlitím mědi 5mm kolem štěrbiny.....	16
Obrázek 4.12	Změřená vstupní impedance antény s rozlitím mědi 5mm kolem štěrbiny	17
Obrázek 4.13	Změřený činitel odrazu na vstupu pro přesně sestřiženou anténu	18
Obrázek 4.14	Změřená vstupní impedance pro přesně sestřiženou anténu.....	18
Obrázek 4.15	Vyzařovací charakteristika referenční antény, (rovina X-Z)	19
Obrázek 4.16	Vyzařovací charakteristika referenční antény, (rovina Y-Z)	19
Obrázek 4.17	Vyzařovací charakteristika referenční antény, (rovina Y-Z)	20
Obrázek 5.1	Vliv tkáně na činitel odrazu na vstupu.....	21
Obrázek 5.2	Vliv tkáně na vstupní impedanci antény.....	21
Obrázek 6.1	Charakteristické rozložení proudu pro vid TE_{11}	23
Obrázek 6.2	Charakteristické rozložení proudu pro vid TE_{21}	23
Obrázek 6.3	Rozměry antény pro komunikaci off body	24
Obrázek 6.4	Činitel odrazu na vstupu, anténa pro komunikaci off body	24
Obrázek 6.5	Vyzařovací charakteristika antény pro komunikaci off body (rovina X-Z)	25
Obrázek 6.6	Vyzařovací charakteristika antény pro komunikaci off body (rovina Y-Z)	25
Obrázek 6.7	Rozměry antény pro komunikaci on body	26
Obrázek 6.8	Činitel odrazu na vstupu, anténa pro komunikaci on body.....	26
Obrázek 6.9	Vyzařovací charakteristika antény pro komunikaci on body, (rovina X-Z)	27
Obrázek 6.10	Vyzařovací charakteristika antény pro komunikaci on body, (rovina Y-Z)	27

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1	Rozměry antény [mm] navržené pro pracovní kmitočet 1,43 GHz.....	6
Tabulka 3.1	Rozměry antény se zemní deskou [mm], pracovní kmitočet 1,43 GHz ...	8

ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem antén pro komunikaci po lidském těle. Tyto antény nalézají perspektivní uplatnění například v lékařství pro bezdrátové propojení senzorů pro měření teploty, krevního tlaku, senzory pro EEG a EKG a podobně.

Cílem práce je návrh těchto antén, následná simulace a samotná výroba. Pro simulaci byl použit program CST Microwave studio. Byl vytvořen model antény pro dva různé substráty, pro materiál Arlon 25N a pro materiál FR4. Tyto substráty mají různé elektrické a mechanické vlastnosti. Referenční anténa byla simulována a následně vyrobena na substrátu Arlon 25N o tloušťce 0,8 mm. Anténa pro substrát FR4 tloušťky 0,1 mm byla pouze simulována.

V první fázi práce byla simulována anténa bez zemní desky pracující na frekvenci 1,43 GHz. Následně byly zkoumány vlivy lidské tkáně na vlastnosti antény. Poté byla anténa upravena na anténu se zemní deskou. Výsledky těchto simulací byly porovnány s výsledky uváděnými v [1].

V druhé fázi se práce zaměřuje na štěrbinovou smyčkovou anténu se zemní deskou. Anténa byla simulována pro substrát Arlon 25N a optimalizována pro pracovní frekvenci v pásmu 5,8 GHz.

Anténa byla simulována v různých módech. Antény pro různé módy mají různé vlastnosti. Anténa v módu TE_{11} byla použita pro komunikaci od lidského těla ke vzdálené jednotce (*off body*) a v módu TE_{21} pro komunikaci po lidském těle (*on body*).

1 TEORETICKÝ ROZBOR

1.1 Planární anténa

Pro komunikaci po lidském těle by měla být zvolena taková anténa, která má malé rozměry a nízký profil. Proto je třeba použít planární anténu. Tyto antény vzniknou nanesením vodivého materiálu na dielektrický substrát. Z tohoto vodivého materiálu je pak vhodnou technologií vytvořen vodivý motiv antény.

Planární antény mají celou řadu výhod. Hlavní výhody jsou nízký profil, snadná výroba a možnost anténu nanést na libovolný substrát. Planární antény ovšem mají i spoustu nevýhod, se kterými je třeba počítat, jako je například nízká vyzařovací účinnost, nízký zisk, úzká impedanční šířka pásma a další.

Planární antény se používají až od vyšších kmitočtů (typicky 1 GHz až 50 GHz), kdy jsou jejich rozměry přípustné. Pro nižší kmitočty by byly tyto antény příliš velké a pro vyšší naopak moc malé, tudíž by bylo obtížné splnit požadavky na přesnost výroby.

1.2 Polarizace

Přenos signálu je ovlivňován elektrickými vlastnostmi lidského těla a vlastnostmi antény. Lidská tkáň je z elektromagnetického hlediska charakterizována jako ztrátové dielektrikum. Elektromagnetická vlna šířící se na rozhraní vzduchu a tkáně je tlumena tkání. Vlastnosti tkáně jsou silně závislé na frekvenci. Horizontálně polarizovaná vlna je tlumena podstatně více než vlna polarizovaná vertikálně, proto je třeba použít anténu s vertikální polarizací, a tudíž vektor intenzity elektrického pole musí být kolmý k povrchu těla. Vertikálně polarizovaná vlna vybudí na povrchu těla povrchovou vlnu. Tato vlna se šíří na rozhraní tkáně a vzduchu, může se šířit i po mírně zakřiveném povrchu. Pro ideální buzení vlny by mělo být maximum vyzařovací charakteristiky antény rovnoběžné s povrchem těla. Toto neplatí pouze pro lidskou tkáň, ale i pro jakýkoliv jiný vodivý materiál. Lze použít elektrickou anténu s vertikální polarizací nebo magnetickou anténu s horizontální polarizací; viz [2].

1.3 Odstínění tkáně

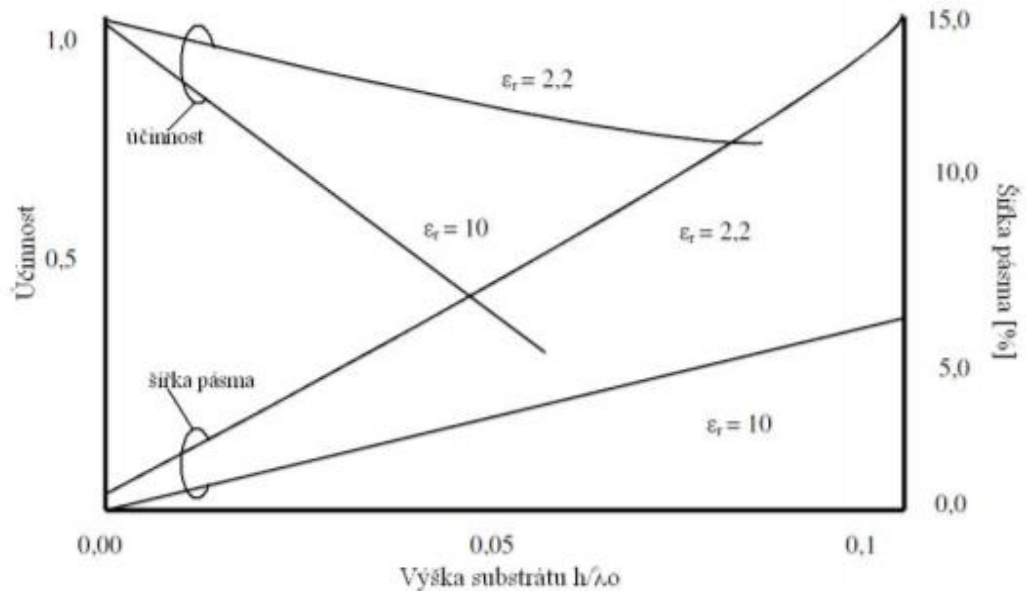
Vlastnosti antény jsou silně ovlivňovány elektrickými vlastnostmi lidských tkání. Lidská tkáň představuje dielektrikum o určité permitivitě. Při kontaktu substrátu s tkání se substrátem stává také tkáň. Tím se celková permitivita substrátu změní, čímž se změní také vlastnosti antény, jako jsou rezonanční frekvence, zisk, vyzařovací charakteristika a jiné. Přidáním zemní desky na spodní stranu substrátu minimalizujeme vliv tkáně na vlastnosti antény a zároveň snížíme tzv. SAR (specific absorption rate). SAR udává kolik energie je vstřebáno tkání, je třeba minimalizovat.

1.4 Substrát

Volba substrátu je důležitou součástí při návrhu antény. Elektrické vlastnosti substrátu ovlivňují vlastnosti antény. Hlavní parametr substrátu je jeho relativní permitivita ϵ_r , relativní permitivita ovlivňuje délku vlny v substrátu a tím má vliv na impedanční přizpůsobení. Délku vlny v substrátu lze vypočítat pomocí tohoto vztahu:

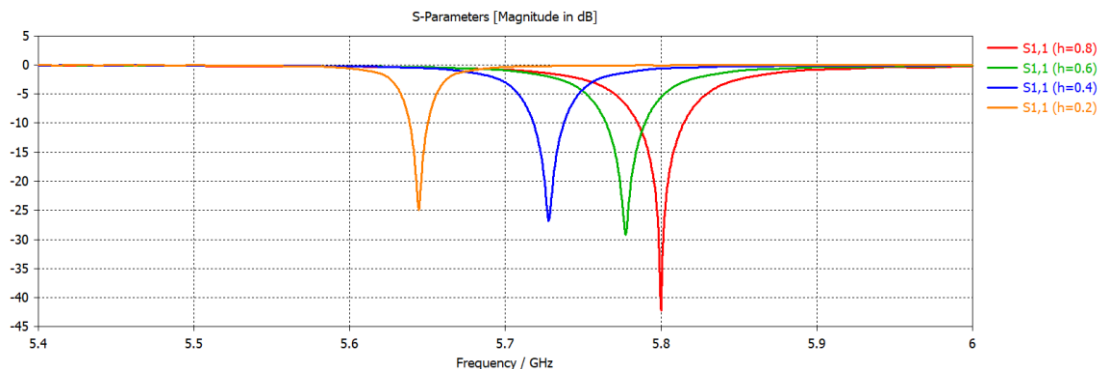
$$\lambda_D = \frac{c}{f \sqrt{0,5 \cdot (\epsilon_r + 1)}} \quad (1)$$

Zde c je rychlost světla, f je požadovaná pracovní frekvence a ϵ_r je relativní permitivita substrátu. Dále je třeba zvolit vhodnou tloušťku materiálu - h , tloušťka materiálu také zásadním způsobem ovlivňuje vlastnosti antény.



Obrázek 1.1 Závislost účinnosti a šířky pásma antény na tloušťce a efektivní permitivitě substrátu, převzato z [5]

Z obrázku 1.1 lze vyčíst, že tloušťka materiálu ovlivňuje účinnost a šířku pásma antény. Je patrné, že čím je menší tloušťka materiálu, tím má anténa vyšší účinnost a menší šířku pásma. Anténa pro komunikaci po lidském těle nepotřebuje velkou šířku pásma, větší účinnost je naopak výhodná, proto jsou tyto vlastnosti pro danou problematiku vhodné. Tloušťka materiálu ovlivňuje také rezonanční frekvenci a impedanční přizpůsobení antény. To zobrazuje obrázek 1.2.



Obrázek 1.2 Závislost činitele odrazu na vstupu na tloušťce substrátu h

1.5 Komunikace on body/off body

Komunikace on body je komunikace mezi systémy umístěnými přímo na lidském těle. Pro komunikaci on body je třeba, aby co největší výkon antény byl vyzářen ideálně rovnoběžně s rovinou těla z důvodu vybuzení povrchové vlny. Čím více energie bude vyzářeno do roviny těla, tím více energie bude použito pro vybuzení povrchové vlny.

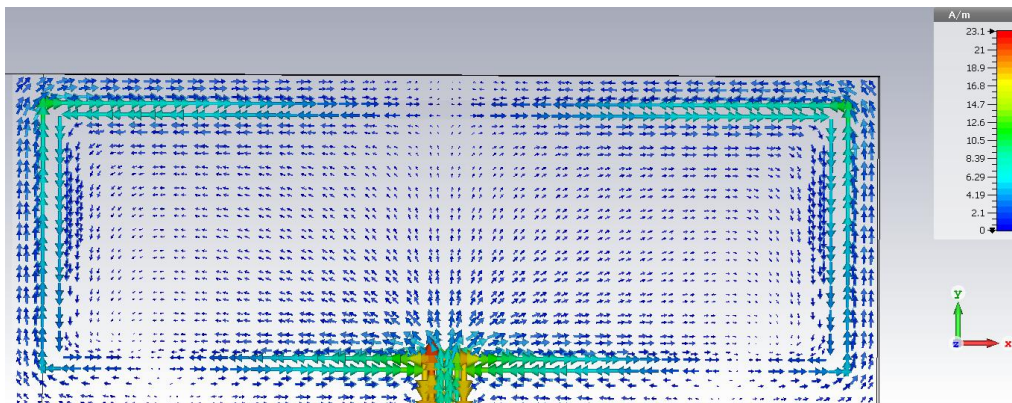
Komunikace off body je komunikace systému umístěného na lidském těle se vzdálenou jednotkou umístěnou v dostatečné vzdálenosti od těla. Proto je třeba, aby maximum vyzářování bylo kolmé k rovině těla.

2 ŠTĚRBINOVÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA

2.1 Teorie

Štěrbínovou anténu můžeme popsat jako plochu z vodivého materiálu, ve které je vytvořena štěrbina. Štěrbina může být libovolného průřezu. V praxi se používají některé základní tvary: obdélníková štěrbina, obdélníkový prstenec, kruhová štěrbina, kruhový prstenec, kuželová štěrbina, případně fraktální tvary.

Princip antény spočívá v šíření magnetického proudu štěrbínou. Tento magnetický proud na základě indukčního zákona vybudí na vodivých okrajích štěrbiny proud elektrický.



Obrázek 2.1 Rozložení proudu na štěrbinové anténě bez zemní desky tvaru obdélníkového prstence

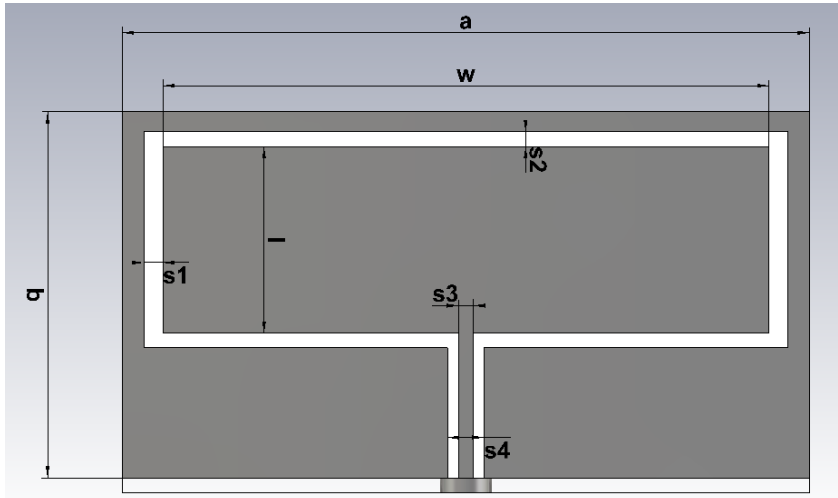
Z obrázku 2.1 je patrné, že proud se šíří po okrajích štěrbiny a přes vodivou plochu se téměř nešíří. Anténa je napájena koplanárním vlnovodem. Rozměry antény souvisejí s vlnovou délkou, obvod štěrbiny přibližně odpovídá vlnové délce v použitém substrátu.

2.2 Simulace

2.2.1 CST Studio Suite

Pro simulace byl použit program CST Microwave Studio, který je součástí CST Studio Suite. Je to nástroj pro 3D modelování vysokofrekvenčních zařízení a následnou časovou nebo frekvenční simulaci. Umožňuje rychlou a přesnou analýzu antén a mikrovlnných obvodů. Přesnost simulací závisí na počtu buněk v diskretizační síti. V CST je možné nastavit počet buněk na vlnovou délku, což ovlivní celkový počet buněk, tedy i celkovou přesnost simulace. Volně dostupná verze CST Studio Suite dovoluje pouze 30 000 buněk v diskretizační síti, což je dostačující pouze pro ověření vlastností antény nebo pro přibližný návrh. Pro výrobu je třeba použít simulaci s větší přesností, tedy s větším počtem výpočetních buněk.

2.2.2 Navržená šěrbinová smyčková anténa



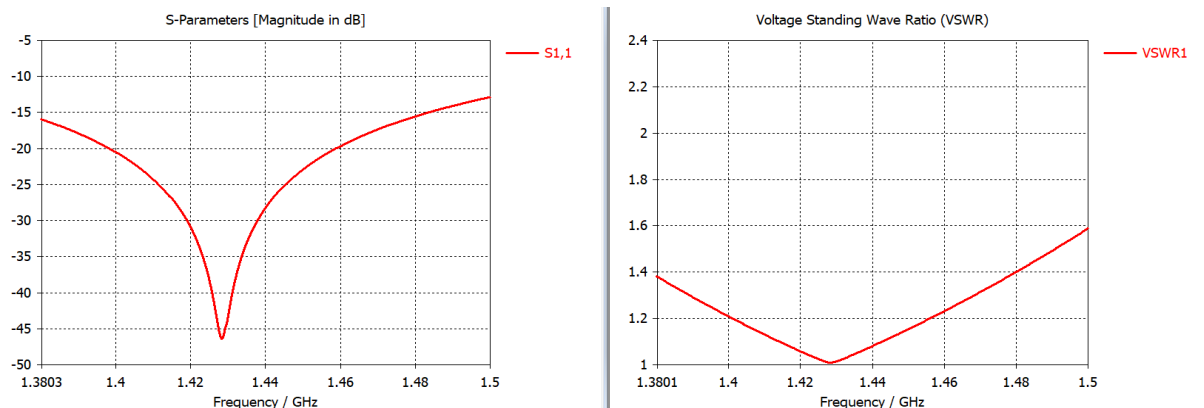
Obrázek 2.2 Šěrbinová smyčková anténa 1,43GHz bez zemní desky

Na obrázku 2.2 je navržená smyčková anténa bez zemní desky. Anténa byla navržená pro pracovní kmitočet 1,43 GHz. Rozměry antény jsou uvedeny v tabulce 2.1. Byl použit substrát ARLON Cu 217LX, výška substrátu je $h = 0,8$ mm a tloušťka kovové vrstvy je $t = 0,017$ mm.

Tabulka 2.1 Rozměry antény [mm] navržené pro pracovní kmitočet 1,43 GHz

a	b	w	l	$s1$	$s2$	$s3$	$s4$
93,8	50,0	82,7	25,5	2,6	2,0	2,0	5,0

Anténa s uvedenými rozměry byla na pracovním kmitočtu dobře impedančně přizpůsobená a její vlastnosti ve volném prostoru vyhovovaly běžným požadavkům, viz obrázek 2.3.



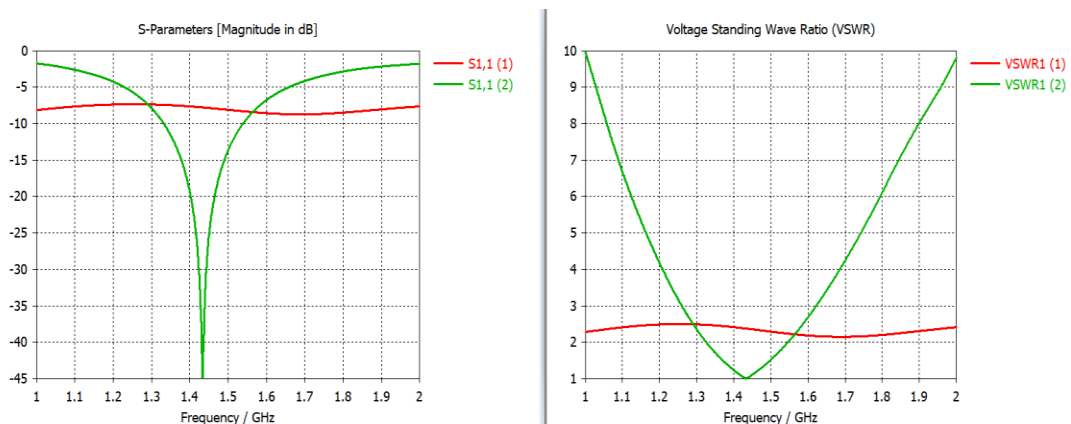
Obrázek 2.3 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S_{11} (vlevo) a poměru stojatých vln VSWR (vpravo) na vstupu smyčkové antény pro pracovní kmitočet 1,43 GHz, bez zemní desky

Nicméně po přiložení antény k lidskému tělu je anténa silně ovlivňována elektrickými vlastnostmi lidské tkáně, a tedy tuto anténu bez zemní desky nelze pro komunikaci na povrchu těla použít. Na obrázku 2.4 je znázorněn vliv tkáně na

vlastnosti antény.

Lidská tkáň je poměrně složitá na modelování (každý člověk je stavbou těla unikátní, na různých místech těla je různá tloušťka kůže, tuku i svalů). Proto při simulaci musíme vyjít z přibližného modelu.

Existují různé druhy modelů. V našem případě byl použit nejjednodušší vrstvený model. Tento model lze použít při vyšších frekvencích, protože hloubka vniku na vysokých frekvencích je velice malá. Pro analýzu na nižších frekvencích se používají tzv. voxelové (*volume pixel*) modely, které jsou velmi složité, ale přesné. Byly použity tři vrstvy představující kůži, tuk a sval. Pro kůži byla použita tloušťka 1 mm, relativní permitivita $\epsilon_r = 38,063$ a měrná elektrická vodivost $\sigma = 1,441$ S/m. Pro tuk byla použita vrstva silná 3 mm s relativní permitivitou $\epsilon_r = 5,285$ a měrnou elektrickou vodivostí $\sigma = 0,102$ S/m. Pro sval byla použita vrstva silná 5 mm s relativní permitivitou $\epsilon_r = 52,791$ a měrnou elektrickou vodivostí $\sigma = 1.705$ S/m.



Obrázek 2.4 Vliv tkáně na vlastnosti antény (zelená: anténa ve volném prostoru, červená: anténa na modelu tkáně). Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11 (vlevo) a poměru stojatých vln VSWR (vpravo) na vstupu smyčkové antény pro pracovní kmitočet 1,43 GHz

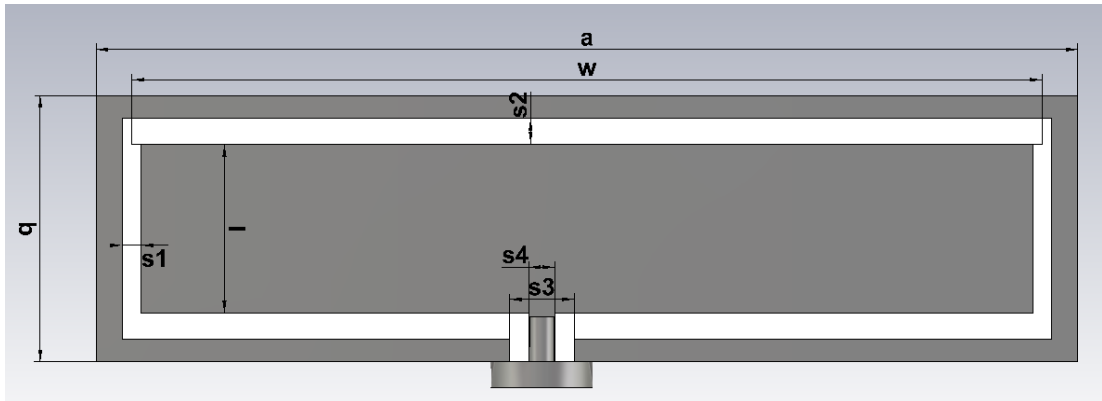
Na obrázku 2.4 je zelenou barvou znázorněn kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11 a poměru stojatých vln VSWR pro anténu ve volném prostoru a červenou barvou pro anténu přiloženou na model lidské tkáně. Z obrázku 2.4 je tedy patrné, že vliv tkáně na anténu je tak velký, že anténu bez zemní desky nelze použít. Proto v následující kapitole bude diskutován návrh antény se zemní deskou. Tento návrh bude porovnán s výsledky uvedenými v [1].

3 ŠTĚRBINOVÁ SMYČKOVÁ ANTÉNA SE ZEMNÍ DESKOU

3.1 Navržená anténa na pracovní frekvenci 1,43 GHz

Pro ověření funkčnosti antény byla anténa nejprve navržena na pracovní frekvenci 1.43 GHz, aby mohly být výsledky porovnány s výsledky uváděnými v doporučené

literatuře [1]. Cílem bylo dosáhnout podobných výsledků.



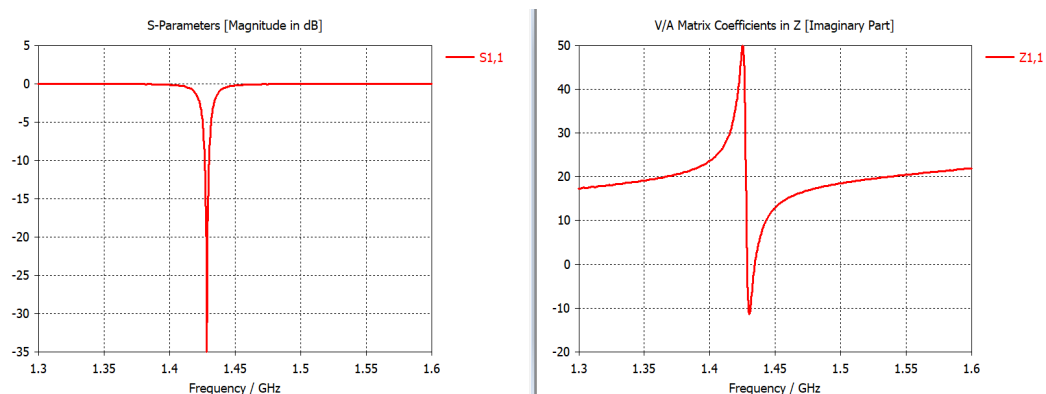
Obrázek 3.1 Model navržené antény ze shora

Na obrázku 3.1 je zobrazena anténa vlastního návrhu se zemní deskou. Zemní deska je spojena s vnějším vodivým prstencem, tento spoj je realizován vodivými stěnami vzdálenými 0.5 mm od štěrbin. Pracovní kmitočet antény je 1,43 GHz, jako substrát je použit ARLON Cu 217LX s relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,2$ a ztrátovým činitelem $\text{tg } \delta = 0,0009$. Substrát má výšku $h = 0,8$ mm a vodivé vrstvy (měděná fólie) mají tloušťku $t = 0,017$ mm. V simulaci je použit pro zemní desku, motiv a prokovy perfektní elektrický vodič (PEC), který lze v simulaci použít místo mědi, což pro simulaci nepředstavuje velký rozdíl ve vlastnostech. Rozměry antény jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 Rozměry antény se zemní deskou [mm], pracovní kmitočet 1,43 GHz

a	b	w	l	$s1$	$s2$	$s3$	$s4$
78,42	22,50	72,92	14,60	1,50	2,00	1,50	4,50

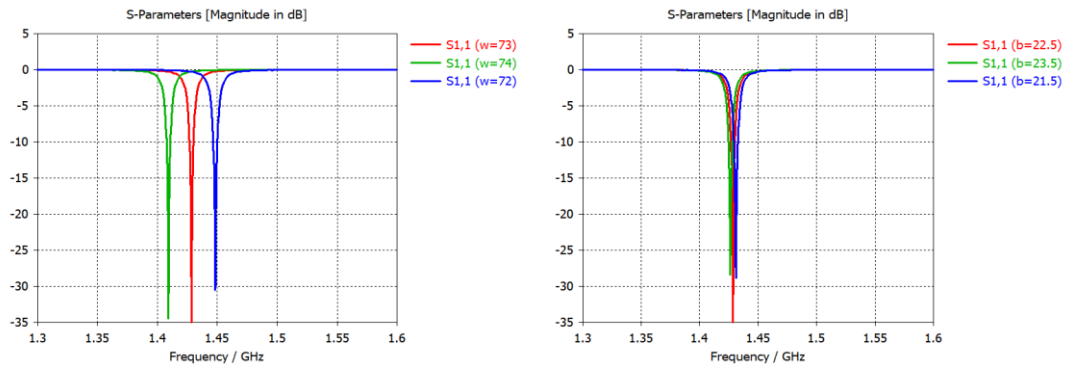
3.2 Výsledky simulací



Obrázek 3.2 Simulovaný kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S_{11} (vlevo) a vstupní reaktance (vpravo) pro anténu s prokovy

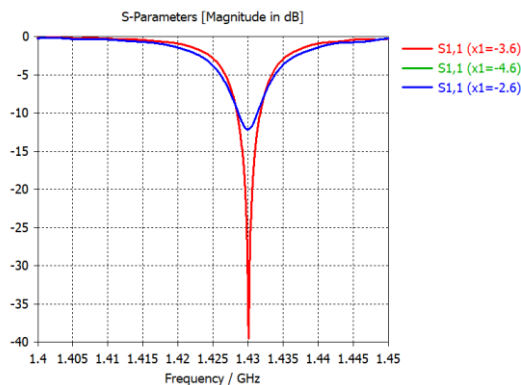
Při návrhu byl vypočítán vliv změny rozměrů štěrbinové smyčky na

vlastnosti antény. Na obrázku 3.3 a 3.4 je zobrazen vliv některých rozměrů na velikost činitele odrazu S_{11} .



Obrázek 3.3 Závislost velikosti činitele odrazu S_{11} na změně šířky w (vlevo) a délky b (vpravo) štěrbinové smyčky

Z obrázku 3.3 je vidět, že se vzrůstající šířkou smyčky klesá rezonanční kmitočet a naopak. Z obrázku 3.3 je patrné, že změna délky antény ovlivňuje impedanci, tudíž i přizpůsobení antény.



Obrázek 3.4 Závislost velikosti činitele odrazu S_{11} na umístění napájecího bodu

Na obrázku 3.4 udává x_1 posunutí napájení od středu. Z obrázku 3.4 je patrné, že umístění napájecího bodu ovlivňuje impedanci, a je tedy velmi důležité toto umístění správně zvolit, aby bylo dosaženo co nejlepšího impedančního přizpůsobení. Dále je vidět, že při posunu o milimetr na jednu nebo na druhou stranu je impedance stejná, tudíž nezáleží na tom, na jakou stranu bude napájecí bod posunut.

3.3 Publikovaná anténa

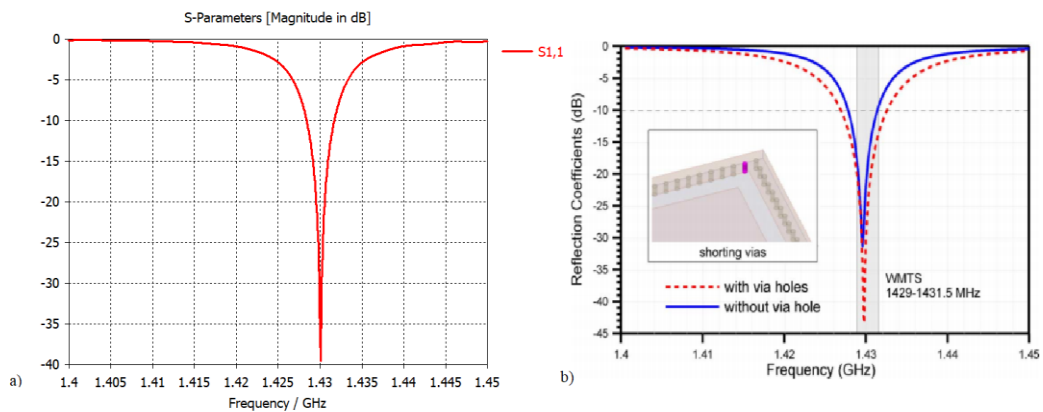
Anténa z [1] byla navržena pro pracovní kmitočet 1,43 GHz. Anténa se skládá z obdélníkového flíčku ohraničeného obdélníkovým prstencem. Jako substrát je použit materiál Duroid RT5880 s výškou $h = 0,8$ mm a relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,2$. Šířka vnitřního obdélníkového flíčku $w = 71$ mm a délka flíčku $l = 13$ mm. Délka je 5,46 krát menší než šířka. Anténa má strukturu planární štěrbinové smyčky, napájecí bod je umístěn na širší straně a zároveň mimo střed antény (posun o

$\Delta = 5$ mm od středu). Tento způsob napájení umožňuje dosáhnout dobrého impedančního přizpůsobení.

Anténa má na spodní straně substrátu umístěnou zemní desku. Zemní deska je spojena s vnějším obdélníkovým prstencem na horní straně substrátu. Spojení je realizováno prokovy o průměru $d = 0,42$ mm, tyto prokovy jsou od sebe vzdáleny o vzdálenost $\delta = 1$ mm.

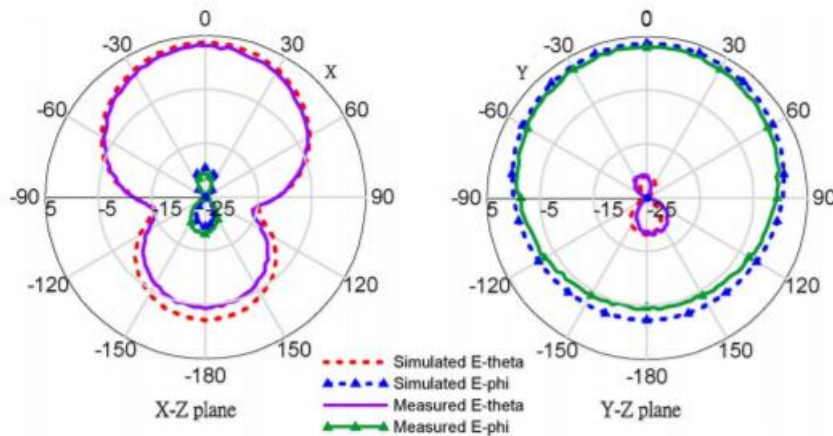
3.4 Porovnání výsledků

Po porovnání výsledků bylo zjištěno, že výsledky jsou velmi podobné jako výsledky uváděné v článku [1].

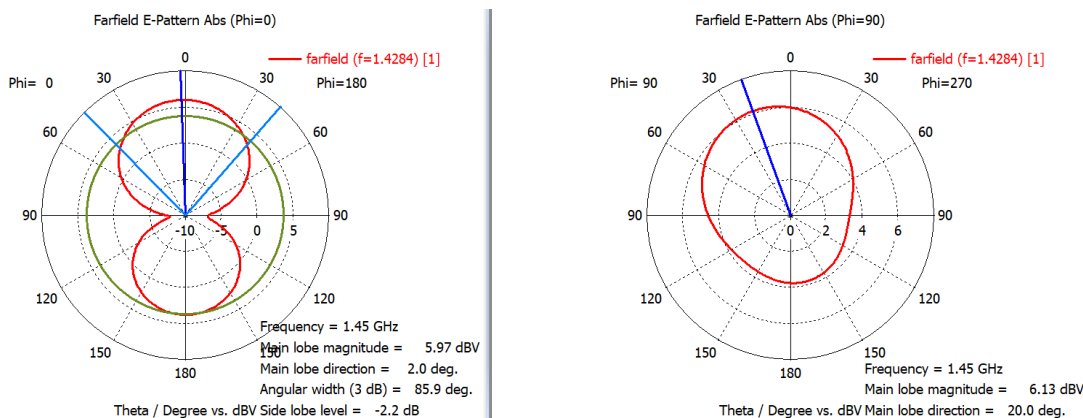


Obrázek 3.5 Porovnání kmitočtového průběhu S11 na simulované anténě (vlevo) a anténě ze článku [1] (vpravo)

Z obrázku 3.5 je patrné, že impedanční charakteristika simulované antény je srovnatelná s anténou z článku [1].



Obrázek 3.6 Vyzařovací diagramy antény publikované v článku [1]



Obrázek 3.7 Vyzařovací diagramy simulované antény (kmitočet 1,43 GHz, rovina X-Z vlevo, rovina Y-Z vpravo)

Vyzařovací diagram navržené antény je znázorněn na obrázku 3.7. Porovnání s obrázkem 3.6 ukazuje, že jsou si tyto vyzařovací charakteristiky podobné.

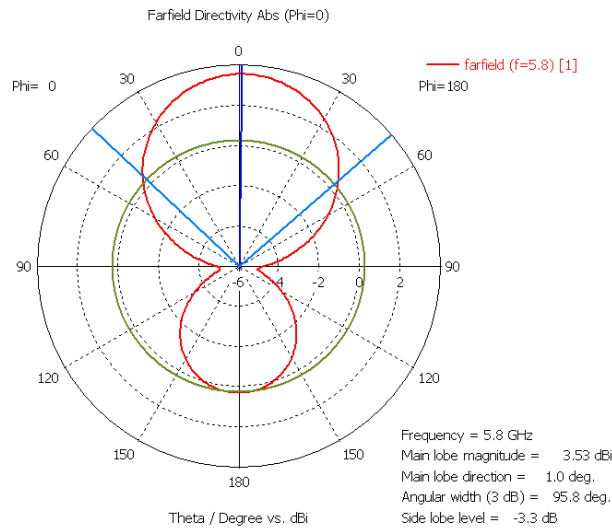
4 REFERENČNÍ ANTÉNA NA SUBSTRÁTU ARLON 25N, PRACOVNÍ FREKVENCE 5,8 GHz

4.1 Simulace

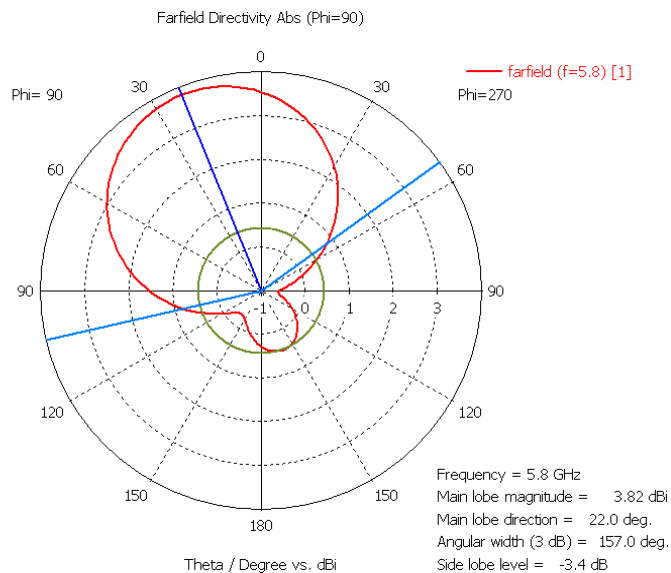
Simulace byla prováděna v plné verzi programu CST Microwave studio, bylo použito 20 buněk na vlnovou délku, aby bylo dosaženo co možná nejlepšího poměru přesnosti a výpočetního času. Výpočty jsou velmi náročné na strojový čas, proto není vhodné simulovat anténu pro zbytečně velký počet buněk v diskretizační síti. Simulace pro 20 buněk na vlnovou délku má dostatečnou přesnost.

Referenční anténa byla vyrobena pro zjištění rozdílů mezi simulací a skutečnou anténou. Pro umístění na lidskou tkáň tato anténa není zcela vhodná z důvodu pevného vysokého neohebného substrátu. Anténa je vytvořena na substrátu Arlon 25N o tloušťce $h=0,8$ mm s relativní permitivitou $\epsilon_r = 3,38$ a ztrátovým činitelem $\text{tg } \delta = 0,0025$.

Při návrhu antény bylo postupováno stejně jako v případě antény na frekvenci 1.43GHz. Byla spočítána délka vlny v substrátu a této délce se musí přibližně rovnat obvod šterbiny. Délka vlny v substrátu pro frekvenci 5,8 GHz byla vypočítána z rovnice (1), výsledkem je $\lambda_D = 34,93$ mm. Anténa byla navržena na vstupní impedanci 50Ω , to znamená, že i napájecí bod musí mít také impedanci 50Ω , jinak by došlo k odrazu vlny a na vedení by vznikla stojatá vlna. Anténa je napájena koplánárním vlnovodem. Následně byly rozměry antény doladěny experimentálně tak, aby anténa měla co nejlepší vlastnosti, tedy aby byla co nejlépe impedančně přizpůsobená a měla požadovanou vyzařovací charakteristiku.



Obrázek 4.3 Vyzařovací charakteristika antény na substrátu Arlon 25N, na frekvenci 5,8 GHz (rovina X-Z)



Obrázek 4.4 Vyzařovací charakteristika antény na substrátu Arlon 25N, na frekvenci 5,8 GHz (rovina Y-Z)

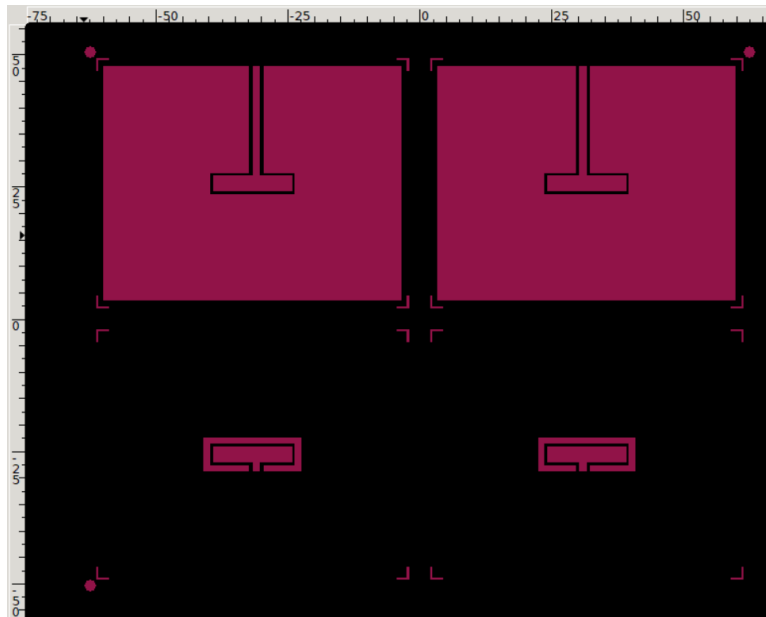
Z obrázku 4.2 můžeme soudit, že anténa je na pracovní frekvenci 5,8 GHz dobře impedančně přizpůsobená. Z vyzařovací charakteristiky na obrázku 4.3 a 4.4 je zřejmé, že maximum vyzařování je kolmé k rovině antény, tudíž anténa je vhodná pro komunikaci mezi tělem a vzdálenou jednotkou (*off body*). Deformace vyzařovací charakteristiky v rovině Y-Z je způsobena napájením antény ve formě úseku koaxiálního vedení.

4.2 Výroba

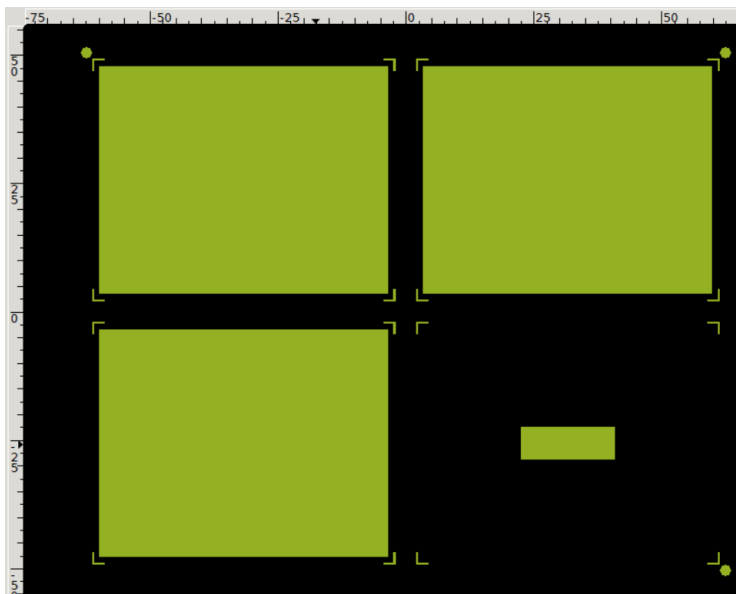
Výroba antény probíhá vyleptáním motivu do vodivé plochy. Prototyp antény byl vyroben ve školní dílně, kde nároky na přesnost nejsou velké. Je tedy třeba počítat s možnou odchylkou rozměrů.

Při realizaci prokovů je třeba počítat s tím, že vzdálenost jednotlivých prokovů musí být menší než je čtvrtina délky vlny v substrátu. Únik energie z vlnovodu, který představuje vnitřek antény ohraničený motivem, zemnicí deskou a prokovy, je závislý na frekvenci, proto je nutné se zvyšováním frekvence zmenšovat rozestupy mezi jednotlivými prokovy.

Výrobní data byla exportována přímo z programu CST Microwave studio, který tento export umožňuje. Výstupní data jsou formátu gerber. Pro vrtací data je třeba převést data pro prokovené otvory na formát excellon. To umožňuje jednoduchý program Gerbv. Tyto data ve formátu excellon je třeba ještě dále upravit. Při exportu program neřeší počet míst a u souřadnic se zápornými koordinátami obsahuje souřadnice o jedno číslo méně. Vrtačka poté těmto souřadnicím nerozumí. Proto je nutné doplnit nulu, aby koordináty obsahovaly vždy stejný počet míst. Dále je třeba přepsat průměr vrtaného otvoru na zvolený rozměr. Pro výrobu je důležité přidat k anténě sesazovací značky a značky pro stříhání.

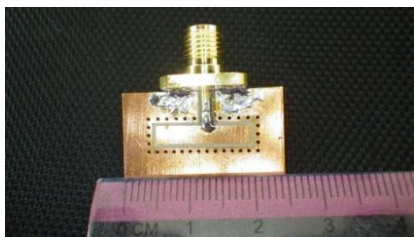


Obrázek 4.5 Příklad gerber dat pro vrchní stranu antény

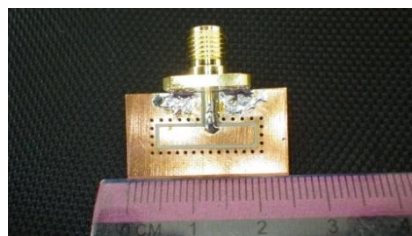


Obrázek 4.6 Příklad gerber dat pro spodní stranu antény

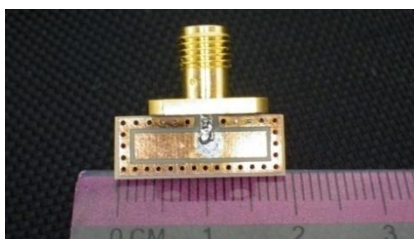
Na obrázku 4.1 a 4.2 jsou zobrazena výrobní data pro referenční anténu. Z důvodu možné odchylky rozměrů od simulované antény a možné chybě při zastřížení byly na jedné desce vyleptány 4 antény ve třech různých verzích, které se od sebe liší velikostí rozlité mědi na spodní a horní straně. K měření byly vyrobeny dvě verze antény. První verze byla přesně zastřížena na rozměry zobrazené na obrázku 4.1 a druhá verze byla sestřížena na rozměry, které odpovídají rozlité mědi v okolí 5 mm kolem štěrbin. Antény byly opatřeny SMA konektorem s impedancí 50Ω .



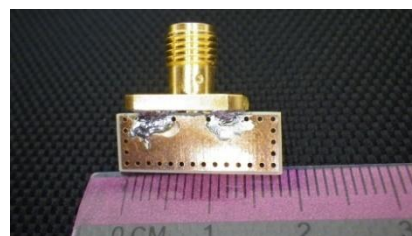
Obrázek 4.8 Foto antény s rozlítím mědi 5 mm ze shora



Obrázek 4.7 Foto antény s rozlítím mědi 5 mm ze spodu



Obrázek 4.10 Foto přesně zastřížené antény ze shora



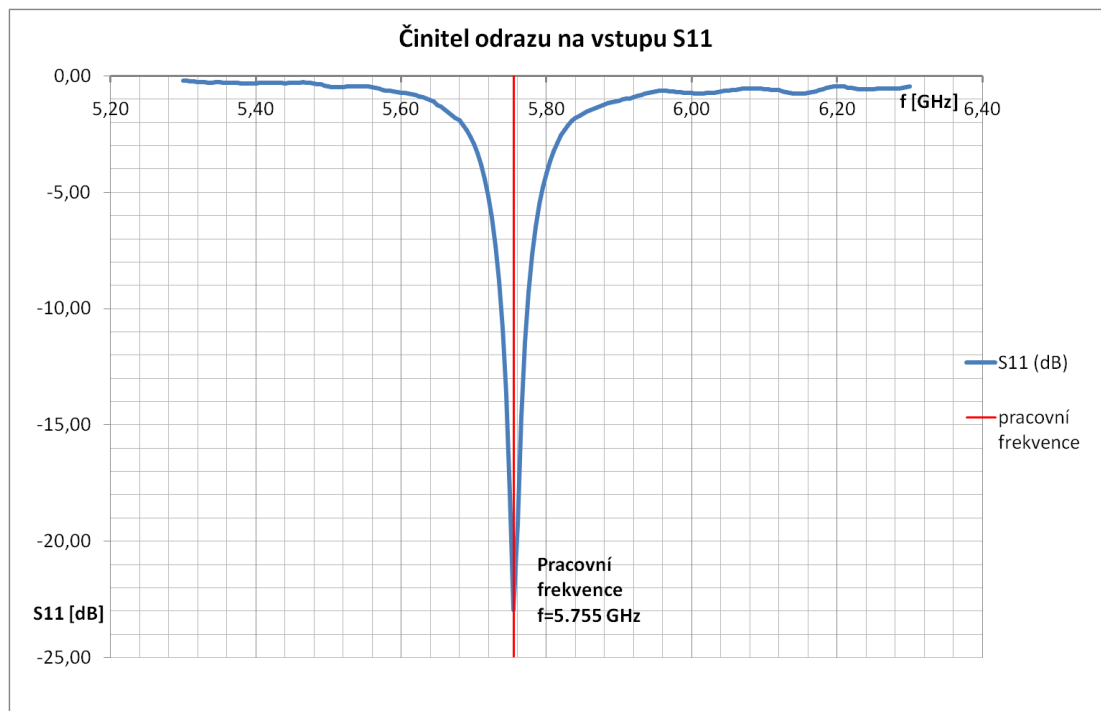
Obrázek 4.9 Foto přesně zastřížené antény ze spodu

4.3 Měření antény

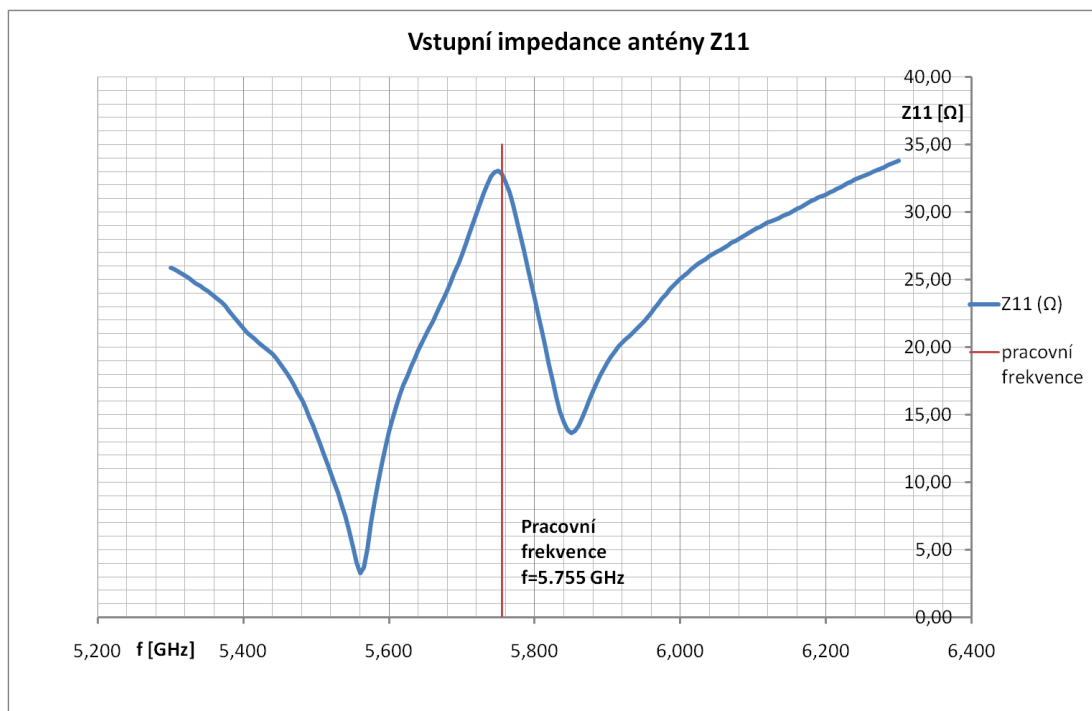
U této antény byl změřen činitel odrazu na vstupu S11 a vstupní impedance. Měření bylo prováděno vektorovým obvodovým analyzátozem Rohde&Schwarz ZVL. Před samotným měřením je třeba přístroj kalibrovat. Kalibrace se provádí pomocí kalibrační sady.

4.3.1 Výsledky měření S11 a Z11, anténa s rozlitím mědi 5mm kolem štěrbin

Výsledky měření jsou staženy z analyzátoru ve formě nikoliv obrázků, ale číselných dat, proto je třeba data dále zpracovat. Byl použit program Microsoft Excel.



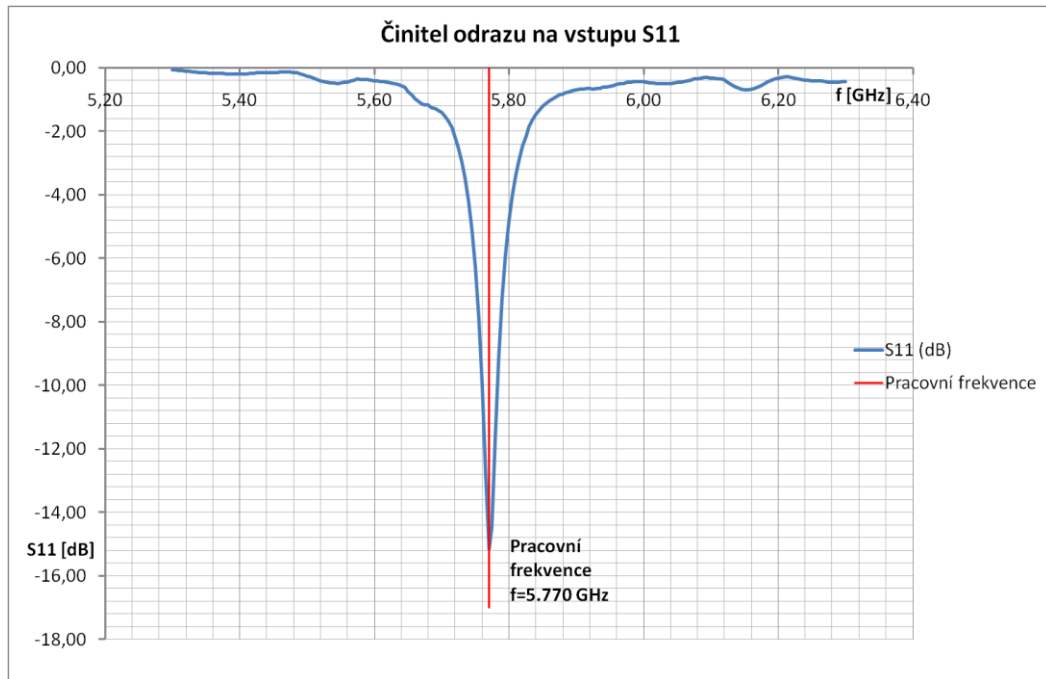
Obrázek 4.11 Změřený činitel odrazu na vstupu, anténa s rozlitím mědi 5mm kolem štěrbin



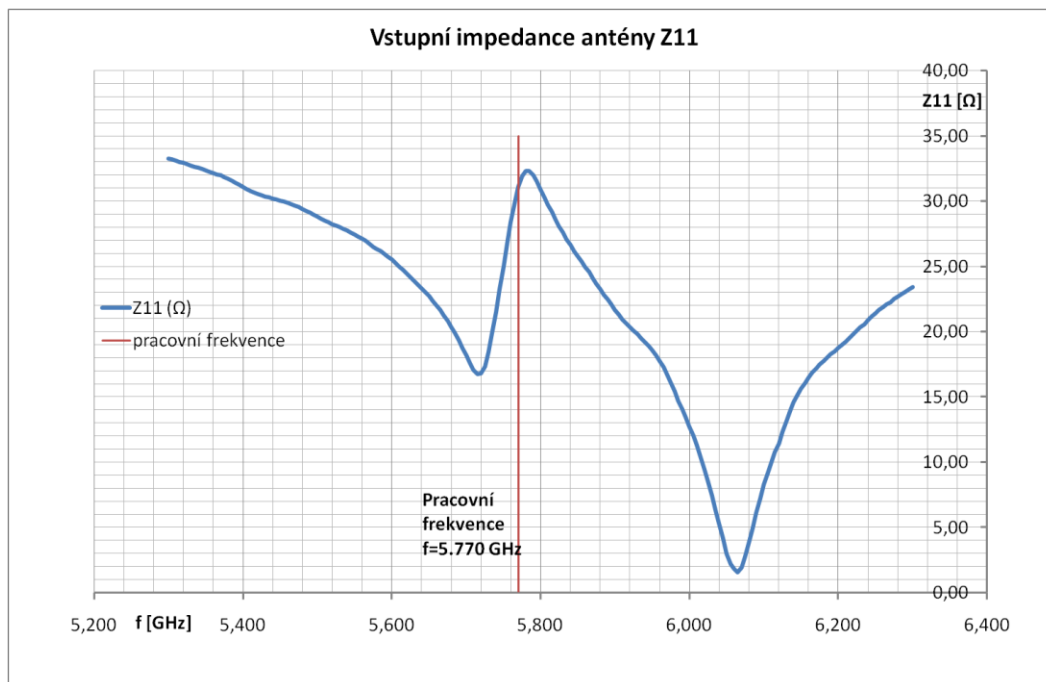
Obrázek 4.12 Změřená vstupní impedance antény s rozlítím mědi 5mm kolem šterbiny

Ze změřených charakteristik je patrné, že došlo k mírnému posuvu pracovní frekvence oproti simulacím. Od simulací se také odchyluje vstupní impedance antény. Posunutí pracovní frekvence může být způsobeno nepřesností výroby. Změna impedance může být způsobena nedokonalým připájením konektoru.

4.3.2 Výsledky měření S11 a Z11 pro přesně sestřiženou anténu



Obrázek 4.13 Změřený činitel odrazu na vstupu pro přesně sestřiženou anténu

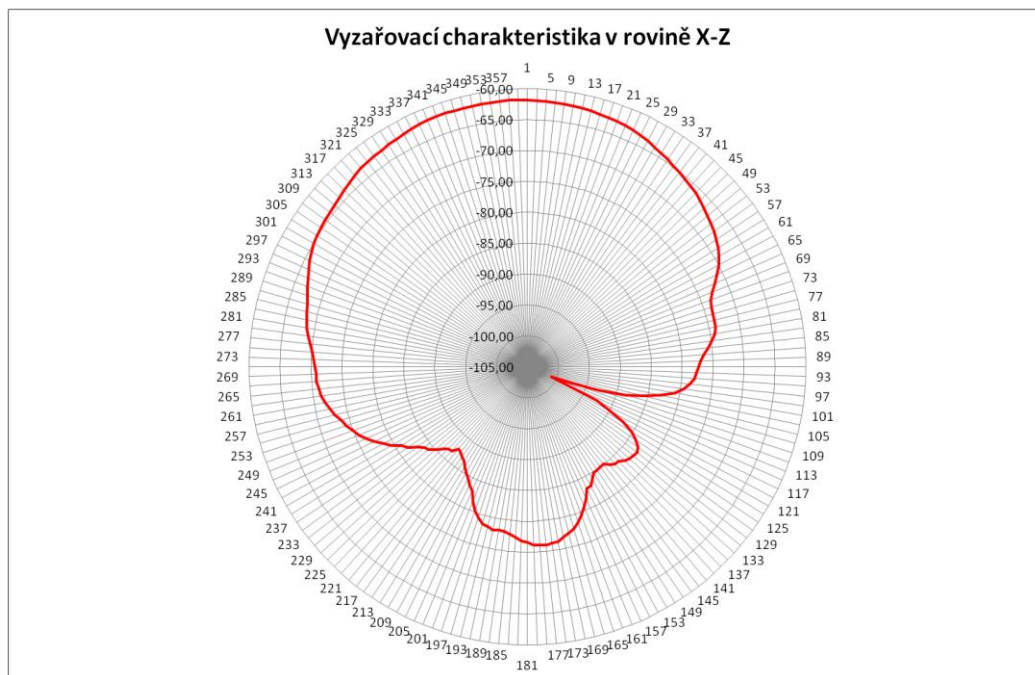


Obrázek 4.14 Změřená vstupní impedance pro přesně sestřiženou anténu

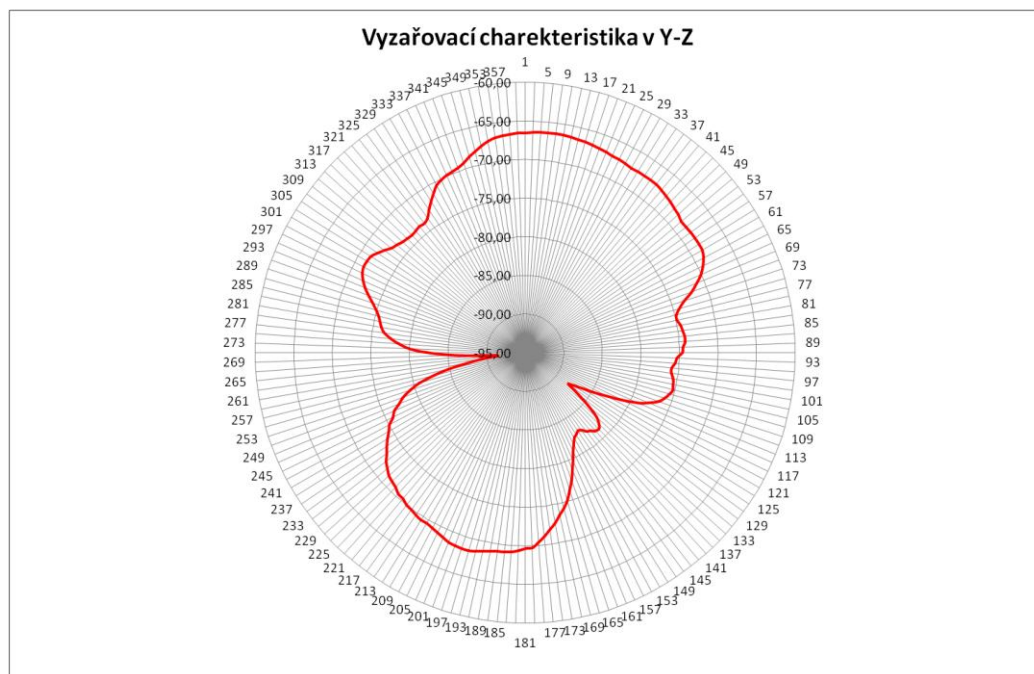
Z naměřených závislostí je patrné, že stejně jako u předešlé verze antény došlo k mírnému posuvu pracovní frekvence a změně vstupní impedance. Důvody můžou být stejné. Dále můžeme říci, že pro přesně sestřiženou anténu je tento posuv menší, ale tato anténa je podstatně hůře impedance přizpůsobená.

4.3.3 Změřená vyzařovací charakteristika

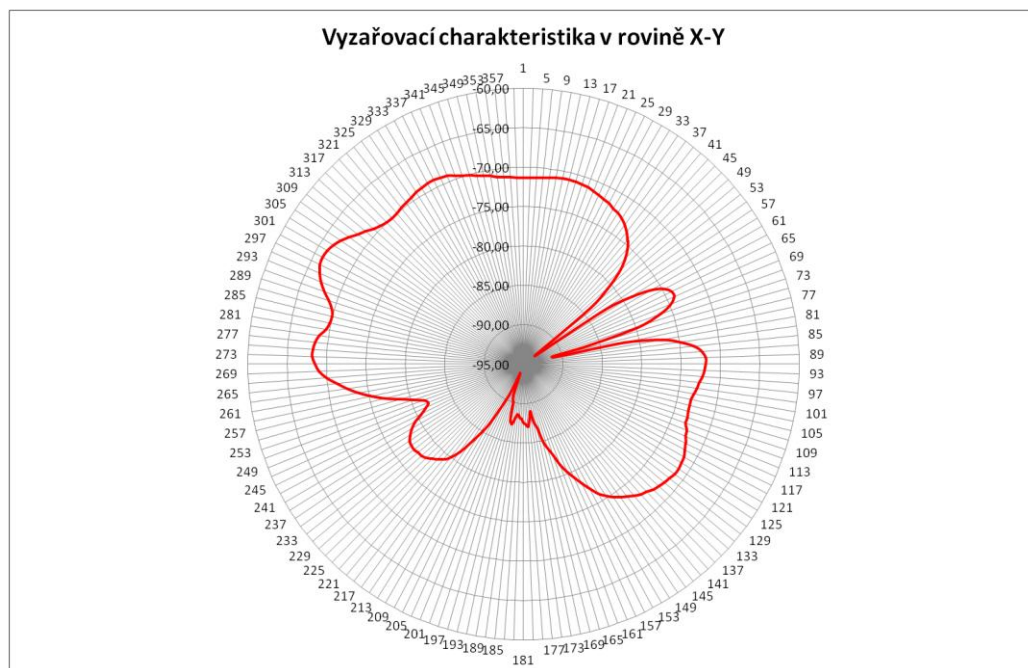
Vyzařovací charakteristika byla změřena pro anténu s rozlitím mědi 5 mm okolo štěrbin. Měření bylo prováděno v bezodrazové komoře.



Obrázek 4.15 Vyzařovací charakteristika referenční antény, (rovina X-Z)



Obrázek 4.16 Vyzařovací charakteristika referenční antény, (rovina Y-Z)

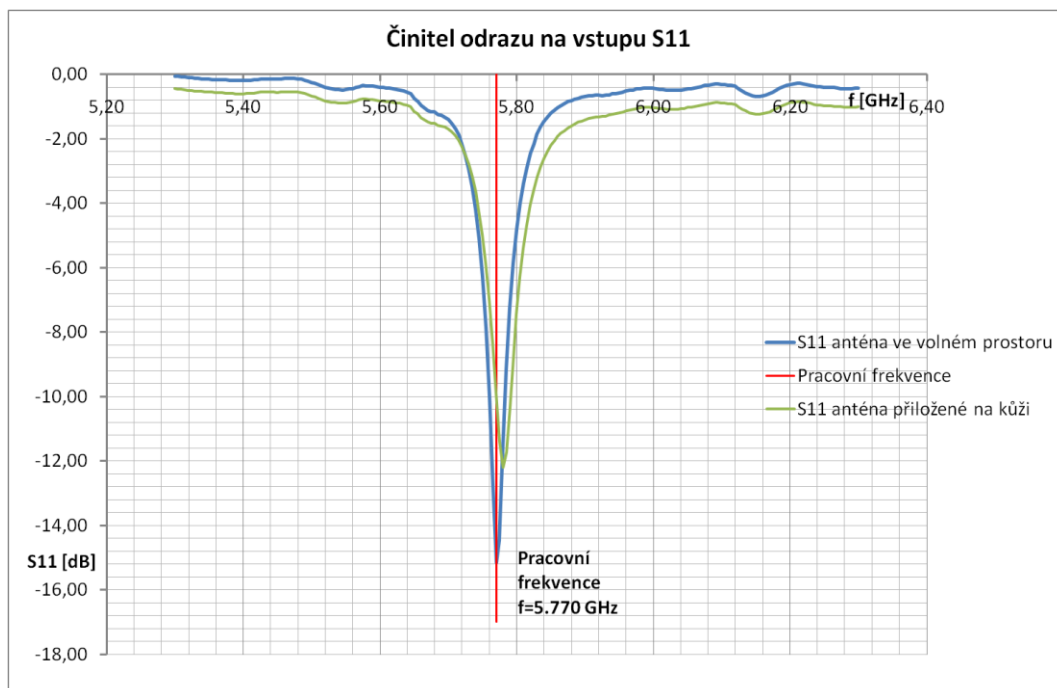


Obrázek 4.17 Vyzařovací charakteristika referenční antény, (rovina Y-Z)

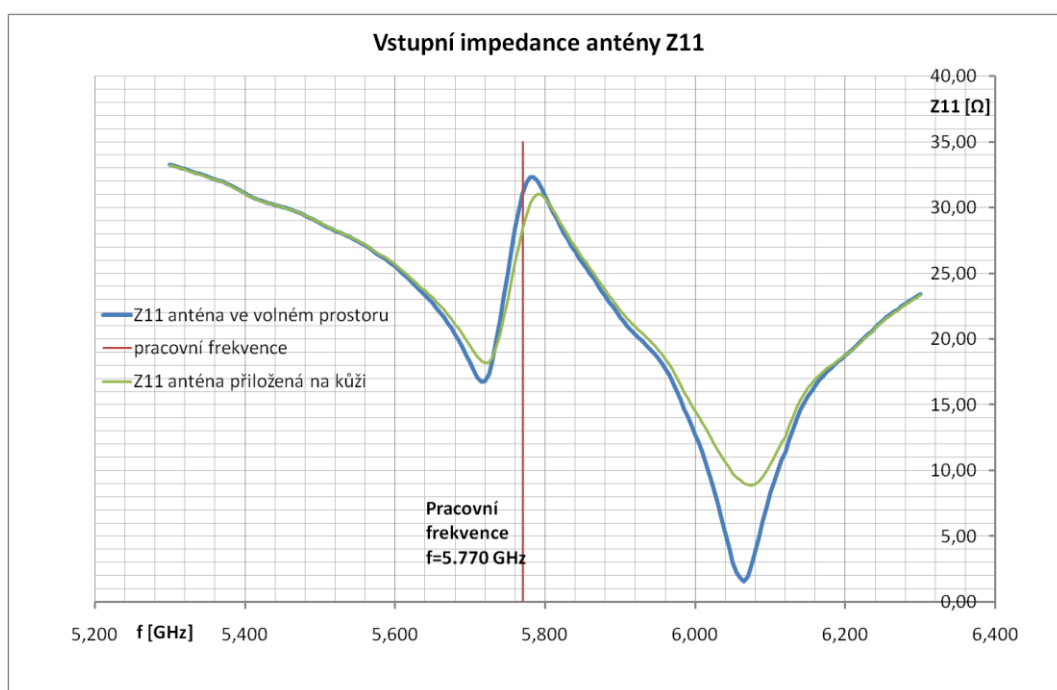
Z obrázků 4.15, 4.16 a 4.17 je vidět, že vyzařovací charakteristiky jsou značně deformované oproti simulacím. To je způsobeno neideálními reálnými podmínkami měření. Velký vliv na vyzařovací charakteristiku má taky napájecí SMA konektor, který představuje také anténu a deformuje vyzařovací charakteristiku. Při velmi malých rozměrech antény je vliv SMA konektoru výrazný. Tento vliv byl ověřen simulací, kdy byl vytvořen model antény napájené SMA konektorem. Simulace vykazovala podobné zkreslení. Další možný důvod deformace je nedokonalost při výrobě prokovených otvorů. V otvorech se může vytvořit bublinka a poté otvor není dokonale prokoven. Na místě tohoto vadného prokovu může docházet k úniku energie.

5 VLIV TKÁNĚ

Pro přesně sestříženou anténu byly zkoumány vlivy tkáně na její vlastnosti. Anténa byla při měření přiložena na kůži a byly pozorovány změny.



Obrázek 5.1 Vliv tkáně na činitel odrazu na vstupu



Obrázek 5.2 Vliv tkáně na vstupní impedanci antény

Z naměřených hodnot je patrné, že odstínění antény od tkáně plní svůj význam. Vliv na vlastnosti antény není nulový, ale je akceptovatelný. Nedochází k posuvu pracovní frekvence, a změna vstupní impedance je velmi malá, tudíž je anténu možné umístit na lidské tělo.

6 OPTIMALIZACE ANTÉNY PRO OHEBNÝ SUBSTRÁT

6.1 Přehled substrátů

6.1.1 FR4

Materiál má uváděnou relativní permitivitu $\epsilon_r = 4.4$ a ztrátový činitel $\text{tg } \delta = 0,022$. Hlavní výhodou tohoto materiálu je jeho nízká cena a dostupnost. Nevýhodou však je jeho frekvenční závislost relativní permitivity a ztrátového činitele.

6.1.2 Panasonic R-1577

Materiál má uváděnou relativní permitivitu $\epsilon_r = 4.1$ a ztrátový činitel $\text{tg } \delta = 0.010$. Tento materiál má hlavní výhodu v tom, že jeho relativní permitivita se v závislosti na frekvenci mění jen velmi málo oproti FR4. Nevýhodou je však cena, tento materiál je dražší a méně dostupný.

6.1.3 Arlon 25N

Tento materiál má nízkou relativní permitivitu a nízké ztráty v dielektriku. Jeho hlavní výhodou je stálost elektrických vlastností v závislosti na frekvenci a teplotě. Tento materiál se používá výhradně na výrobu desek plošných spojů.

6.2 Výběr substrátu

Pro výrobu antény, která má být umístěna na lidském těle, je třeba zvolit takový substrát, který je dostatečně tenký a zároveň je ohebný. Proto substrát Arlon 25N musí být nahrazen substrátem tenčím s lepšími mechanickými vlastnostmi. Vzhledem k malým rozměrům antény není při vhodném umístění nutné, aby ohyb byl příliš velký. Substrát FR4 s tloušťkou $h=0,1\text{mm}$ snese opakovaný ohyb do 90° na poloměru 50 mm, což je zcela dostačující. Vzhledem k elektrickým vlastnostem substrátů by byl však díky své stálosti relativní permitivity v závislosti na frekvenci vhodnější substrát Panasonic R-1577, avšak z důvodu ceny a mechanických vlastností byl zvolen substrát FR4. Další podmínkou pro volbu ohebného substrátu je možnost prokovení, což substrát FR4 s tloušťkou $h=0,1\text{mm}$ umožňuje. Proto byl zvolen právě tento substrát. Díky menší tloušťce materiálu bude mít anténa vyšší účinnost, avšak nižší šířku pásma.

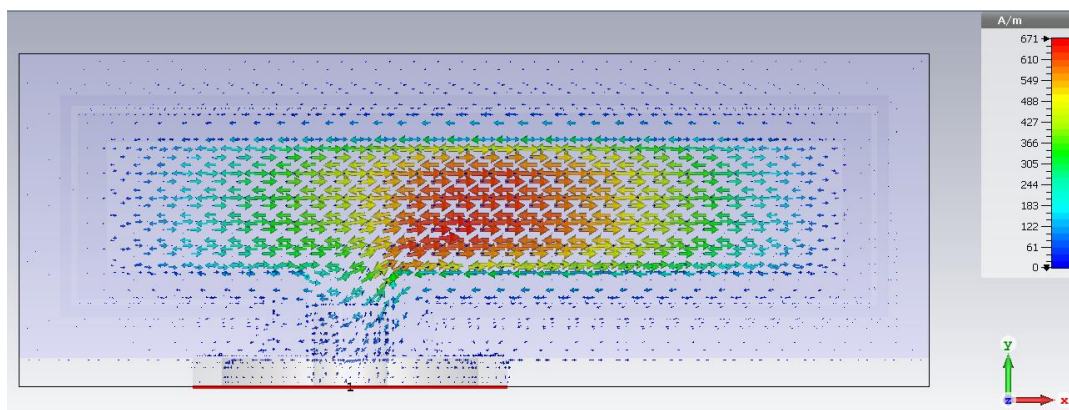
6.3 Návrh antény

V tomto případě byly navrženy dvě verze antény. Anténa pro komunikaci on body a komunikaci off body. Rozdíl mezi těmito dvěma verzemi je v pracovním módu antény. Obdélník ohraničený štěrbinou představuje obdélníkový deskový rezonátor.

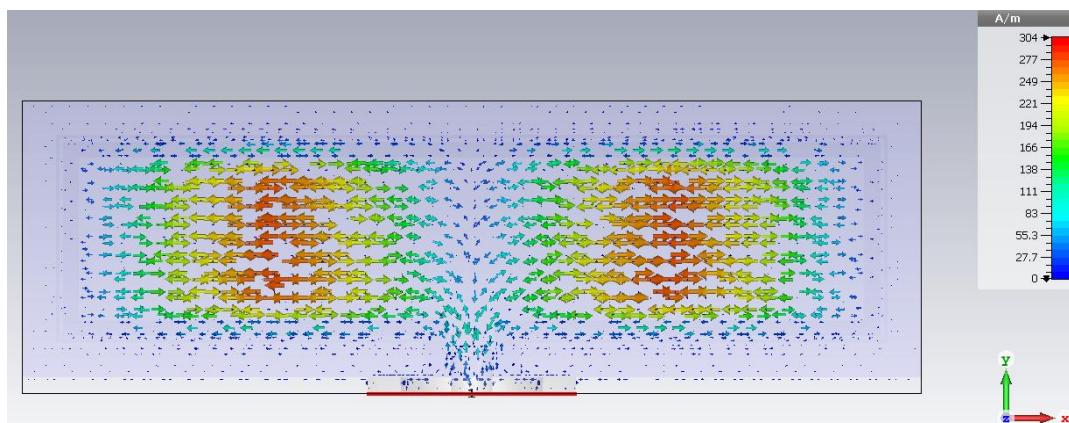
Na tomto rezonátoru vznikají různé módy (vidy). V případě, že šířka a délka tohoto obdélníkového rezonátoru je mnohem větší než výška substrátu, vznikají zde vidy označované TE_{m0p} , přičemž prostřední nulový index je v dalším popisu vynechán.

Tyto vidy ovlivňují vyzářovací vlastnosti antény. Anténa pracující s videm TE_{21} musí mít přibližně dvakrát větší rozměry než anténa pracující s videm TE_{11} .

Pro komunikaci off body byl použit vid TE_{11} a pro komunikaci on body byl použit vid TE_{21} .



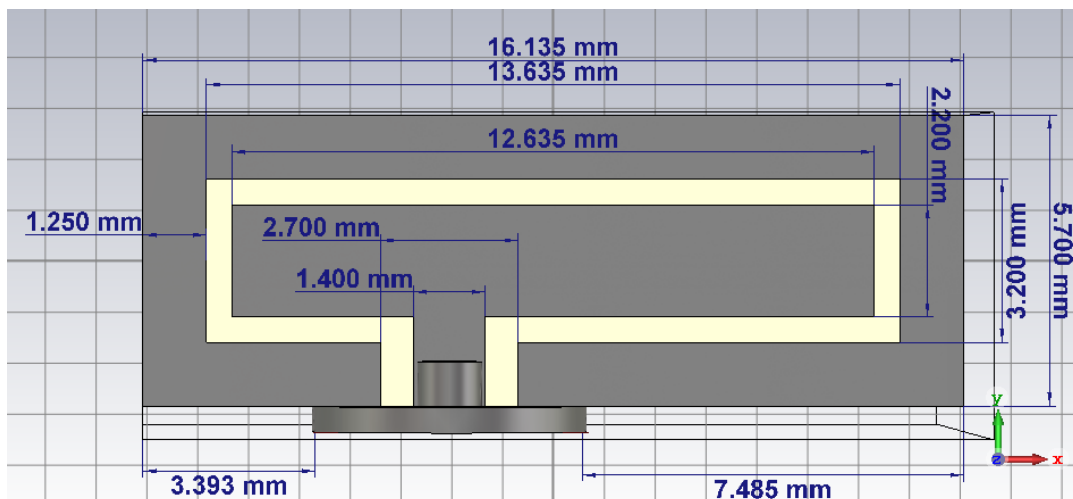
Obrázek 6.1 Charakteristické rozložení proudu pro vid TE_{11}



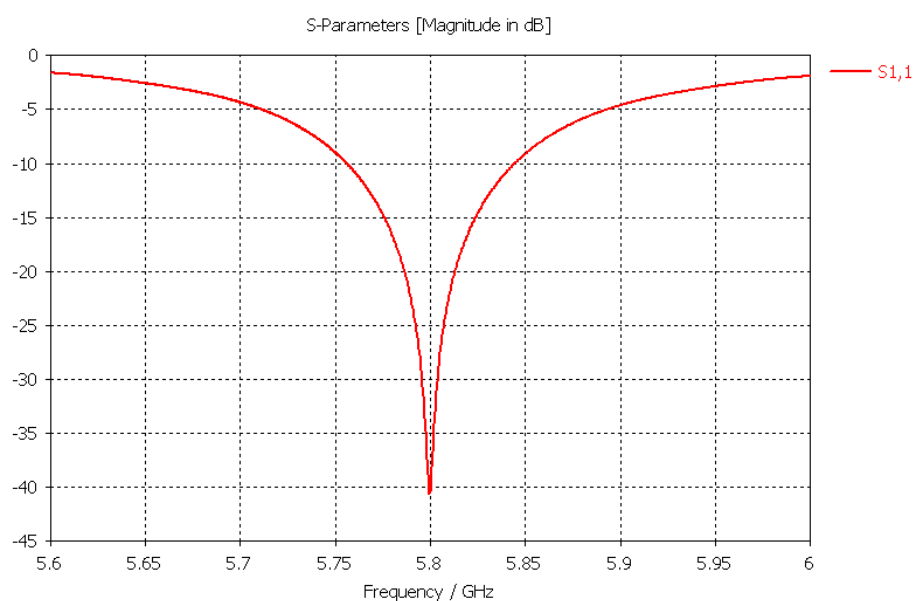
Obrázek 6.2 Charakteristické rozložení proudu pro vid TE_{21}

6.3.1 Anténa pro komunikaci off body

Anténa byla navržena pro substrát FR4 o tloušťce 0,1 mm, byla přizpůsobena pro vid TE_{11} na pracovní frekvenci 5,8 GHz, při tomto vidu má vhodné vlastnosti pro toto použití. Anténa vyzářuje vertikálně polarizovanou vlnu, tudíž vektor intenzity elektrického pole je kolmý k tělu. Maximum vyzářování je kolmé k rovině těla.

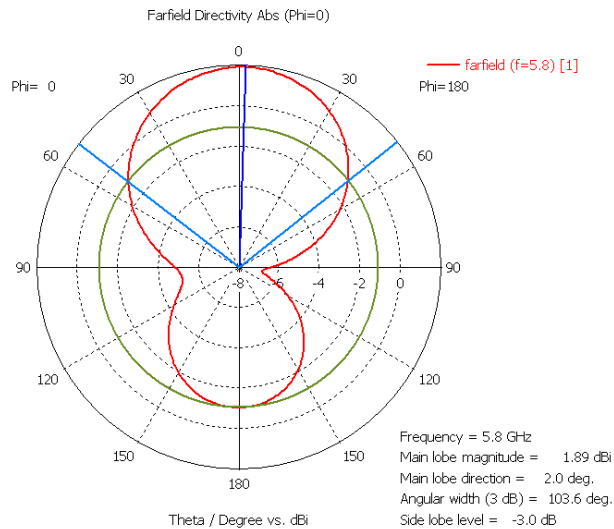


Obrázek 6.3 **Rozměry antény pro komunikaci off body**

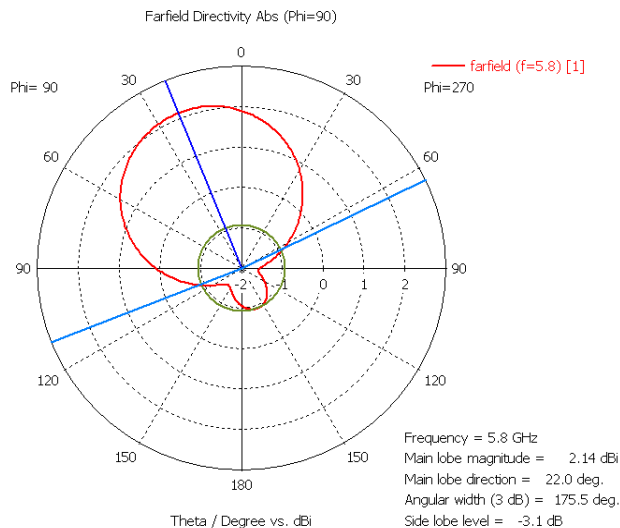


Obrázek 6.4 **Činitel odrazu na vstupu, anténa pro komunikaci off body**

Z obrázku 6.4 je patrné, že anténa je na pracovní frekvenci 5,8 GHz velmi dobře přizpůsobena. Aby napájecí bod měl potřebnou impedanci 50Ω , musel být posunut ze středu antény o 2,046 mm.



Obrázek 6.5 Vyzařovací charakteristika antény pro komunikaci off body (rovina X-Z)



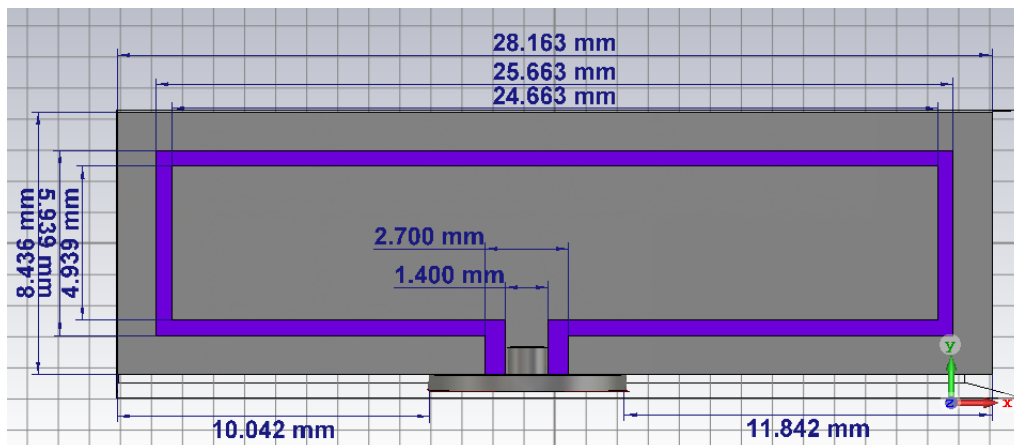
Obrázek 6.6 Vyzařovací charakteristika antény pro komunikaci off body (rovina Y-Z)

Z vyzařovacích charakteristik zobrazených na obrázku 6.5 a 6.6 můžeme usoudit, že anténa je vhodná pro komunikaci off body. Vyzařovací maximum je přibližně kolmé k povrchu antény, tudíž i k povrchu těla. Mírný posun tohoto maxima je v simulaci způsoben použitím napájení ve formě úseku koaxiálního vedení.

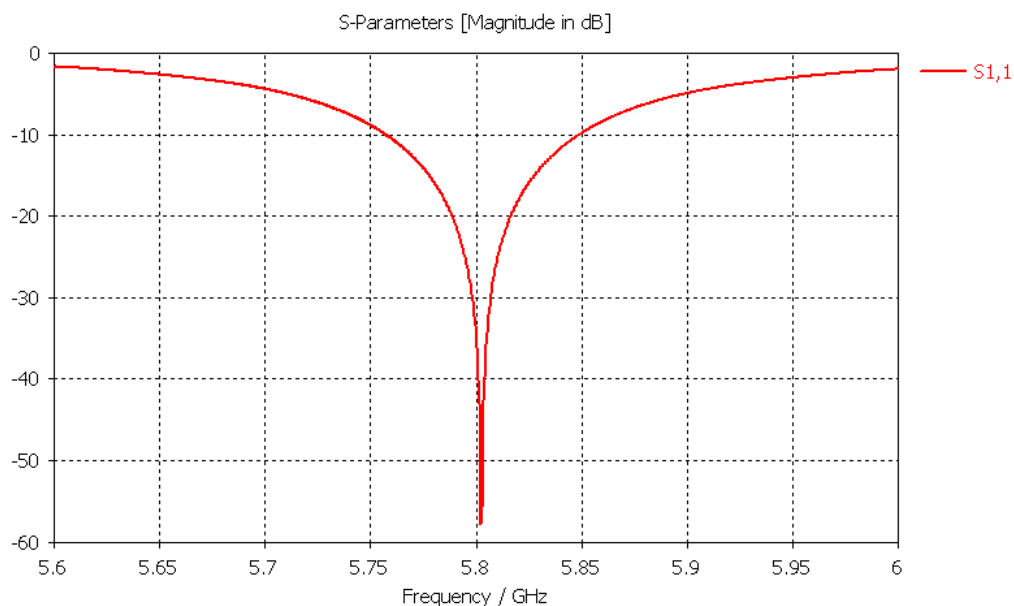
6.3.2 Anténa pro komunikaci on body

Anténa byla navržena pro substrát FR4 o tloušťce 0,1mm. Pro komunikaci on body byla anténa přizpůsobena pro vid TE_{21} . Anténa pracující s tímto videm má pro toto použití lepší vlastnosti, především vyzařovací charakteristiku. Stejně jako u předešlé verze anténa vyzařuje vertikálně polarizovanou vlnu, avšak maximum vyzařování je

blíže k povrchu těla.

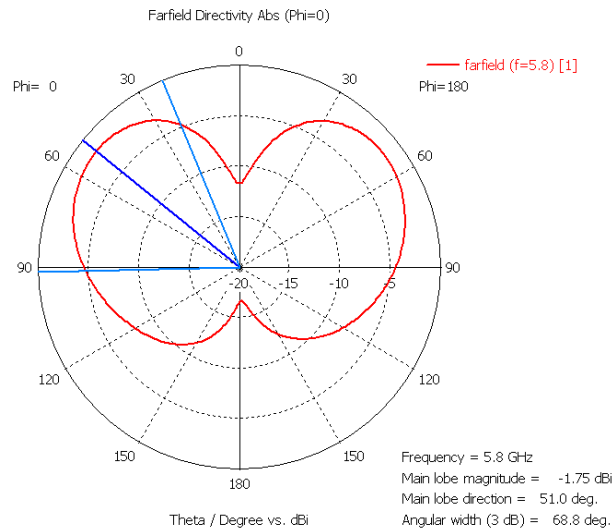


Obrázek 6.7 Rozměry antény pro komunikaci on body

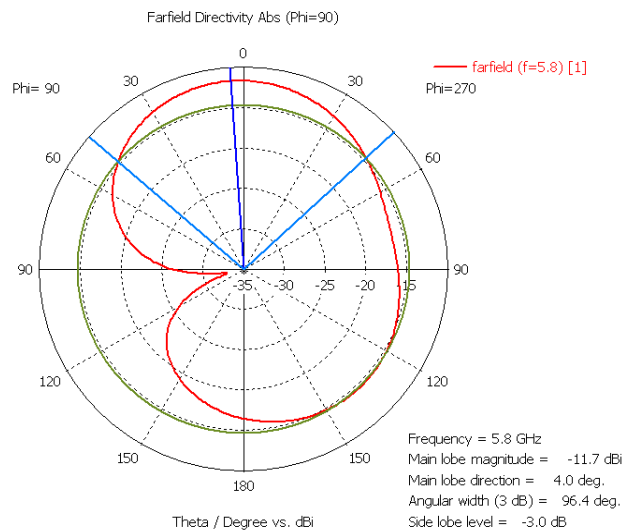


Obrázek 6.8 Činitel odrazu na vstupu, anténa pro komunikaci on body

Z obrázku 6.7 je vidět, že anténa je na pracovní frekvenci 5,8 GHz dobře přizpůsobena. Napájecí bod je z důvodu přizpůsobení posunut ze středu o 0,9 mm. Při porovnání obrázků 6.7 a 6.3 je patrné, že anténa pro komunikaci on body má větší rozměry než anténa pro komunikaci off body.



Obrázek 6.9 Vyzařovací charakteristika antény pro komunikaci on body, (rovina X-Z)



Obrázek 6.10 Vyzařovací charakteristika antény pro komunikaci on body, (rovina Y-Z)

Z obrázku 6.9 je zřejmé, že vyzařovací charakteristika antény v rovině X-Z se rozděluje na dva laloky. Maximum vyzařování již není kolmé k rovině antény. Tudíž větší část energie bude využita pro vybuzení povrchové vlny na rozhraní tkáně a vzduchu. Teoreticky by bylo možné využít ještě vyšších vidů, aby byly vyzařovací charakteristiky v obou rovinách podobné. To by ale zvětšovalo rozměry antény a to je nevhodné. Deformace vyzařovací charakteristiky v rovině Y-Z zobrazená na obrázku 6.10 je v simulaci způsobena použitím napájení ve formě úseku koaxiálního vedení.

7 ZÁVĚR

Pro komunikaci po lidském těle byla zvolena planární anténa, a to díky svému nízkému profilu a možnosti integrace na libovolný substrát. Byla zvolena šterbinová smyčková anténa, která vyzařuje vertikálně polarizovanou vlnu.

V první fázi práce byly zkoumány vlastnosti šterbinové smyčky nejprve bez zemní desky, a následně i se zemní deskou. Výsledkem bylo, že anténa umístěná na lidskou tkáň musí mít zemní desku.

V druhé fázi práce byla anténa přepočítána pro pracovní frekvenci 5,8 GHz. Anténa byla optimalizována a následně experimentálně vyrobena. Měření antény ukázalo velmi podobné vlastnosti jako v případě simulace. Dále byly v práci zkoumány různé pracovní vidy antény. Byly navrženy antény pro dva různé vidy. Tyto antény vykazovaly různé vlastnosti. Verze s videm TE_{11} je vhodná pro komunikaci mezi tělem a vzdálenou jednotkou (*off body*) a verze TE_{21} pro komunikaci po lidském těle (*on body*).

Tyto antény by mohly najít perspektivní uplatnění např. ve zdravotnictví pro bezdrátové propojení senzorů pro měření životních funkcí, ale také v průmyslu pro komunikaci mezi senzory umístěnými například na trupu letadla nebo na karoserii automobilu.

LITERATURA

- [1] YU-JEN CHI; FU-CHIARNG CHEN *On-body adhesive-bandage-like antenna for wireless medical telemetry service*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, vol. 62, no. 5, p. 2472-2480, DOI: 10.1109/TAP.2014.2308918
- [2] 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
- [3] *Multimediální učebnice, dostupná z:*
<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=4-5-A>
- [4] HALL, P.S., HAO, Y. *Antennas and Propagation for Body-centric Wireless Communications*, 2/E, Norwood: Artech House, 2012. ISBN: 978-1-60807-376-4
- [5] HUDLIČKA, M., *Koplanární anténa s vytékající vlnou*. Diplomová práce, Praha 2004.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

f	Rezonanční frekvence antény
c	Rychlost světla ve vakuu
ϵ_r	Relativní permitivita materiálu
λ_D	Délka vlny v substrátu
σ	Měrná elektrická vodivost
$f_0^{\text{TE}m0p}$	Pracovní vid
m, p	Vidová čísla
$\text{tg } \delta$	Ztrátový činitel
VSWR	Voltage standing wave ratio, poměr stojatých vln
S1,1	Činitel odrazu na vstup antény
ISM	industrial, scientific and medici, volné pásmo frekvencí pro průmyslové vědecké a zdravotnické účely
Z1,1	Vstupní impedance antény
WBAN	Wireless body area network, sítě pro komunikaci v blízkosti lidského těla
SAR	Specific absorbtion rate, množství energie pohlcené tkání
SMA	SubMiniature version A, verze koaxiálního konektoru

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Tabulka naměřených hodnot.....	32
Příloha 2 – Naměřené průběhy	32

Příloha 1 - Tabulky naměřených hodnot

Tabulky naměřených hodnot jsou přiloženy v elektronické podobě na CD.

Příloha 2 - Naměřené průběhy

Naměřené průběhy jsou přiloženy v elektronické podobě na CD.