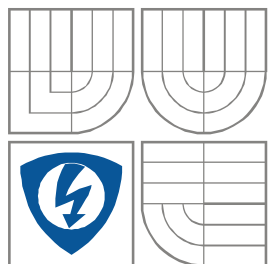


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ IMPLANTOVATELNÝCH ANTÉN

COMPUTER MODELING OF IMPLANTABLE ANTENNAS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

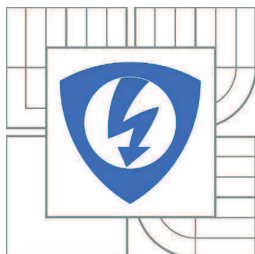
ROMAN DENEŠ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. ZBYNĚK RAIDA

BRNO, 2013



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Roman Deneš
Ročník: 3

ID: 134469
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Počítačové modelování implantovatelných antén

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte ve vhodně zvoleném elektromagnetickém simulátoru modely jednoduchých planárních antén (dipólky, flíčky). Vytvořené antény budou sloužit k bezdrátovému přenosu informace v blízkosti lidského těla. Vypracujte parametrickou studii vlivu těla na změny vlastností antén.

Na základě výsledků parametrické analýzy vyberte vhodný typ antény k realizaci. Anténu optimalizujte podle požadavků vedoucího práce. Anténu vyrobte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] TAI, C. T., COLLIN, R. E. Radiation of a Hertzian dipole immersed in a dissipative medium. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, vol. 48, no. 10, p. 1501–1506.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na návrh planárních antén a jejich použití v blízkosti lidského těla. Cílem práce je parametricky analyzovat různé typy planárních antén a zjistit, která anténa bude mít nejlepší vlastnosti v blízkém okolí lidského těla. Pro návrh a simulace je použit program CST Microwave Studio. V první části práce jsou dané antény navrženy a simulovány. V další části pak vyrobeny a testovány.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fličková anténa, planární monopól, modelování, lidské tělo.

ABSTRACT

The thesis deals with a design of planar antennas and their simulation in the vicinity of a human body. The main goal of this thesis is parametrically analyse different types of planar antennas and find out which one possesses the highest quality in the vicinity of a human body. The design and simulation were made in a software called CST Microwave Studio. Firstly, the attention is paid to the concept of designing and simulation. Further, they are made and tested.

KEYWORDS

Patch antenna, planar monopole, modeling, human body.

DENEŠ, R. *Počítačové modelování implantovatelných antén*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 41 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Počítačové modelování implantovatelných antén 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/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 vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. ing. Zbyňku Raidovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval ing. Petru Všetulovi, za cenné rady při práci s programem CST a pomoc při ověřování vlastností antén v laboratoři UREL.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	viii
Úvod	1
1 Mikropáskové antény	2
1.1 Princip funkce	2
1.1.1 Základní popis funkce	2
1.1.2 Tvary flíčků	3
1.1.3 Napájení	3
1.2 Návrh flíčkové antény	4
1.2.1 Výpočet rozměrů antény	4
1.2.2 Optimalizace antény	6
2 Rozbor parametrů	8
2.1 Činitel odrazu S_{11}	9
2.2 Impedance	10
2.3 Směrové charakteristiky	10
3 Modelování jednotlivých antén	11
3.1 Flíček (2 GHz)	11
3.2 Flíček (4 GHz)	15
3.3 Planární monopól (2 GHz)	17
3.4 Planární monopól (4 GHz)	19
3.5 Srovnání	20
4 Optimalizace	21
5 Realizace	23
6 Experimentální ověření funkce	24
6.1 Flíček (2 GHz)	24
6.2 Flíček (4 GHz)	27
6.3 Planární monopól (2 GHz)	30

6.4	Planární monopol (4 GHz).....	33
7	Závěr	35
	Literatura	37
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	37
	Seznam příloh	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Mikropásková anténa. a) napájená mikropáskovým vedením. b) napájená koaxiální sondou.	2
Obr. 1.1.2 Tvary flíčků [2]	3
Obr. 1.3 Rozmítání délky flíčku	6
Obr. 1.4 Závislost činitele odrazu na poloze koaxiální sondy	7
Obr. 1.5 Nastavení diskretizační mřížky.....	8
Obr. 2.1 Znázornění modelované situace	9
Obr. 3.1 Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti flíčkové antény (2 GHz) od těla.	12
Obr. 3.2 Reální a imaginární složka impedance flíčku (2 GHz).....	13
Obr. 3.3 Závislost imaginární složky impedance na vzdálenosti od lidského těla pro flíčkovou anténu (2 GHz)	13
Obr. 3.4 Směrové charakteristiky flíčkové antény (2 GHz) ve volném prostoru	14
Obr. 3.5 Směrové charakteristiky flíčkové antény (2 GHz) vzdálené 15 mm od těla ...	14
Obr. 3.6 Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti flíčkové antény (4 GHz) od těla.	15
Obr. 3.7 Reální a imaginární složka impedance flíčku (4 GHz).....	16
Obr. 3.8 Směrové charakteristiky flíčkové antény (4 GHz) ve volném prostoru.	16
Obr. 3.9 Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti planárního monopólu (2 GHz) od těla.....	17
Obr. 3.10 Mezní frekvence a šířka pásma pro planární monopól na frekvenci 2 GHz	18
Obr. 3.11 Směrové charakteristiky planárního monopólu (2 GHz) vzdáleného 15 mm od těla.....	19
Obr. 3.12 Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti planárního monopólu (4 GHz) od těla.....	19
Obr. 3.13 Směrové charakteristiky planárního monopólu (4 GHz) ve volném prostoru.	20
Obr. 4.1 Frekvenční závislost činitele odrazu pro anténu ve volném prostoru.....	22
Obr. 4.2 Frekvenční závislost činitele odrazu pro anténu vzdálenou 12 mm od lidského těla.....	22
Obr. 5.1 Ukázka realizace flíčkové antény	23
Obr. 5.2 Ukázka realizace planárního monopólu.....	23

Obr. 6.1 Naměřená frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti flíčkové antény (2 GHz) od těla.	25
Obr. 6.2 Měřená a simulovaná reálná složka impedance flíčku (2 GHz)	26
Obr. 6.3 Měřená a simulovaná imaginární složka impedance flíčku (2 GHz)	26
Obr. 6.4 Naměřené směrové charakteristiky flíčku (2 GHz) ve volném prostoru.	27
Obr. 6.5 Naměřená frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti flíčkové antény (4 GHz) od těla.	28
Obr. 6.6 Měřená a simulovaná reálná složka impedance flíčku (4 GHz)	29
Obr. 6.7 Měřená a simulovaná imaginární složka impedance flíčku (4 GHz)	29
Obr. 6.8 Naměřené směrové charakteristiky flíčku (4 GHz) ve volném prostoru.	30
Obr. 6.9 Naměřená frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti planárního monopólu (2 GHz) od těla.	30
Obr. 6.10 Naměřené směrové charakteristiky planárního monopólu (2 GHz) ve volném prostoru.	31
Obr. 6.11 Naměřené směrové charakteristiky planárního monopólu (2 GHz) vzdáleného 15 mm od těla.....	32
Obr. 6.12 Naměřené směrové charakteristiky planárního monopólu (2 GHz) vzdáleného 15 mm od těla.....	32
Obr. 6.13 Naměřená frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti planárního monopólu (4 GHz) od těla.	33
Obr. 6.14 Naměřené směrové charakteristiky planárního monopólu (4 GHz) ve volném prostoru	34
Obr. 7.1 Flíčková anténa (2 GHz).....	40
Obr. 7.2 Flíčková anténa (superstrát).....	41
Obr. 7.3 Planární monopól.....	41

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Mezní frekvence a šířka pásma pro flíčkovou anténu naladěnou na frekvenci 2 GHz	12
Tab. 3.2 Mezní frekvence a šířka pásma pro flíčkovou anténu naladěnou na frekvenci 2 GHz	15
Tab. 3.3 Mezní frekvence a šířka pásma pro planární monopol na frekvenci 2 GHz	18
Tab. 3.4 Mezní frekvence a šířka pásma pro planární monopol na frekvenci 4 GHz	20
Tab. 6.1 Měřené hodnoty mezní frekvence a šířky pásma pro flíček (2 GHz)	25
Tab. 6.2 Měřené hodnoty mezní frekvence a šířky pásma pro flíček (4 GHz)	28
Tab. 6.3 Měřené hodnoty mezní frekvence a šířky pásma pro monopol (2 GHz)	31
Tab. 6.4 Měřené hodnoty mezní frekvence a šířky pásma pro monopol (4 GHz)	33
Tab. 7.1 Parametry flíčku na frekvenci 2 GHz	39
Tab. 7.2 Parametry flíčku na frekvenci 4 GHz	39
Tab. 7.3 Parametry planárního monopolu na 2 GHz	40
Tab. 7.4 Parametry planárního monopolu na 4 GHz	40

ÚVOD

S pojmem mikropásková anténa se setkáváme již téměř 70 let. Počátkem 50. let se v literatuře začaly objevovat první zmínky o této technologii. Hlavní oblastní tehdejšího využití byla, tak jako u spousty nových technologií, armáda. Díky svým vlastnostem a fyzikálním rozměrům bylo možné tyto antény implementovat přímo do různých typů zařízení (zařízení s malými rozměry, povrch letadel, apod.). Postupně došlo k rozšíření i do ostatních oblastí mimo armádní aplikace. Postupem času začaly tyto antény nabývat na důležitosti. Největší průlom nastal v 90. letech s příchodem mobilních telefonů (možnost umístit anténu do zadního krytu telefonu, a tím výrazně snížit výsledné rozměry) [1]. Obliba tohoto typu antény se samozřejmě netýkala pouze telefonů, ale i spousty dalších mobilních zařízení. Vzhledem k neustálé miniaturizaci veškerého zařízení je využití těchto antén naprostou nezbytností u velké části dnešních elektronických přístrojů.

Největší přednosti mikropáskových antén oproti klasickým dipólovým anténám jsme již zmínili (rozměry, snadná integrace). Další výhodou je vlastní výroba. Ta probíhá obdobně jako výroba tištěných spojů. Je tedy velmi levná a snadno reprodukovatelná. Abychom nezmiňovali pouze výhody, je třeba uvést, že tato technologie má hned několik slabých míst. Většinu těchto nedostatků je možné nějakým způsobem alespoň částečně kompenzovat.

Mezi hlavní nedostatek flíčkových antén se řadí velmi malá šířka pásma, standardně 2 až 3%. Tento problém lze částečně ovlivnit např. šterbinovým buzením, avšak ani tak nedosáhneme šířky pásma více než 6% [1]. V tomto parametru vykazují dipóly mnohem lepší vlastnosti. Vzhledem k tomu, že realizace planární verze dipólu je stejně snadná jako u flíčkové antény, je možno tento typ antény využít jako vhodnou náhradu flíčkové antény v aplikacích vyžadujících větší šířku pásma.

I přes těchto několik nedostatků je evidentní, že rozsah využitelnosti mikropáskových antén v budoucnu poroste. Dnešní trend miniaturizace a zmenšování rozměrů (především tloušťky) nám v tomto směru nedává jinou možnost.

1 MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY

V následujícím textu jsou představeny základní vlastnosti mikropáskových antén, princip funkce, možnosti napájení a samotný návrh vybrané flíčkové antény. V české literatuře se pro pojem „mikropásková anténa“ vžil spíše pojem flíčková anténa. Pojem flíček vychází z jeho anglického pojmenování (patch).

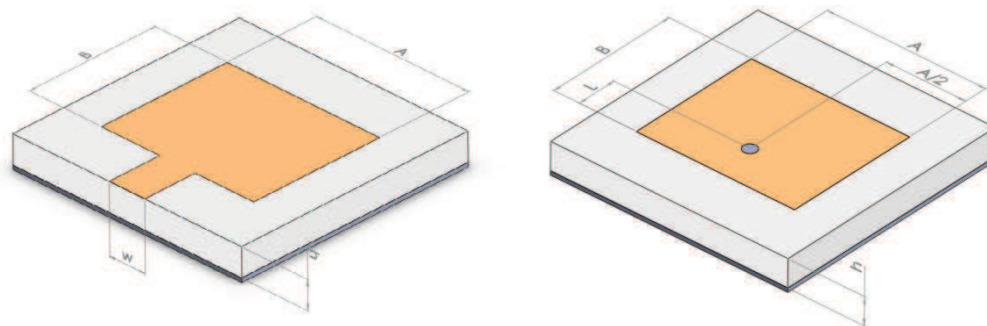
1.1 Princip funkce

Základní vlastnosti flíčkové antény již byly zmíněny v úvodním textu. Mezi výhody lze zařadit rozměry, integrovatelnost a snadnou výrobu. Nelze však opomenout největší slabinu a tou je její úzkopásmovost. Tento nedostatek lze řešit využitím planární verze dipólu či monopólu. Z technologického pohledu se jedná v podstatě o flíčkovou anténu se speciálním tvarem flíčku a s částečným dolním pokovením. Princip funkce planárního monólu je obdobný jako u klasického monopólu, proto se při popisu funkce zaměříme především na flíčkovou anténu.

1.1.1 Základní popis funkce

Základ antény tvoří nosný substrát, na jehož povrchu je pokovená vrstva. Spodní část substrátu zaujímá plocha vodivého materiálu, označovaná jako zemní deska. Pokud na plochu pokovené vrstvy (flíčku) přivedeme pomocí vhodného napájení elektromagnetickou vlnu, vznikne na flíčku stojatá vlna proudu, která je zdrojem vyzařování do prostoru. Zemní deska v tomto případě funguje jako reflektor: anténa dominantně září ve směru od reflektoru.

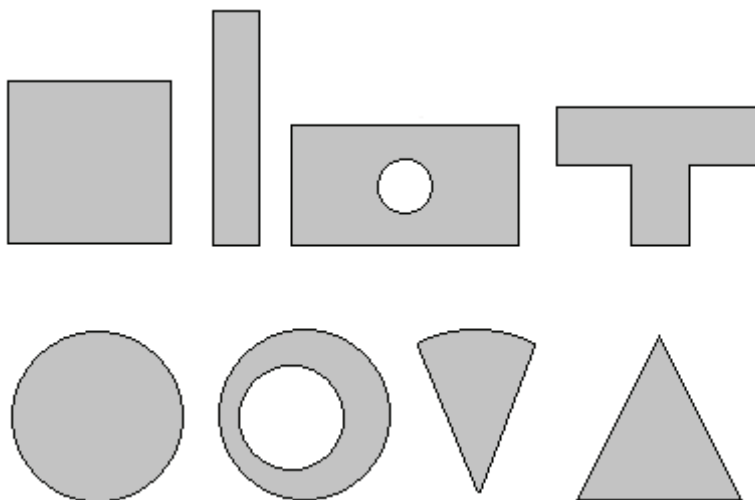
Na obr. 1.1 jsou vyobrazeny dva typy flíčkové antény, které se liší zvoleným napájením. Antény jsou definované parametry A , B , h , w , L a několika dalšími, jejichž význam bude podrobně vysvětlen při návrhu.



Obr. 1.1 Mikropásková anténa. a) napájená mikropáskovým vedením. b) napájená koaxiální sondou.

1.1.2 Tvary flíčků

Nejběžnějším tvarem flíčku je obdélník o rozměrech $A \times B$. Samozřejmě existuje celá řada jiných tvarů (čtverce, kruhy, kruhové výseče apod.), které jsou znázorněny na obr. 1.2 [2]. Tato práce je však zaměřena pouze na využití klasického obdélníkového flíčku a planárního dipólu.



Obr. 1.1.2 Tvary flíčků [2]

1.1.3 Napájení

Mezi základní způsoby napájení se řadí mikropáskové vedení (obr. 1.1a) a koaxiální sonda (obr. 1.1b). Výhodou mikropáskového napájení je zachování planárnosti antény, avšak toto může mít negativní vliv na vyzařovací charakteristiku. Při realizaci mikropáskového napájení je třeba vhodně volit šířku vedení, aby jeho charakteristická impedance odpovídala charakteristické impedanci konektoru. Zanořením vedení do flíčku zajistíme, aby byla impedance na konci napájecího vedení (tj. na vstupu antény) stejná jako charakteristická impedance vedení.

Rovněž při využití koaxiálního kabelu, který má definovanou charakteristickou impedanci, je nutno volit místo připojení. Tímto způsobem lze relativně snadno impedančně přizpůsobit vedení. Anténu připojíme v místě, kde vykazuje stejnou impedanci jako koaxiální sonda. Bod připojení lze určit výpočtem či simulací za použití vhodného simulačního programu, například CST Microwave Studio.

Napájení planárního dipólu je poměrně snadné. Koaxiální kabel je přiveden k okraji antény a zde je připojen k pokovení, které realizuje samotný monopól. Odpadá tím nutnost řešit impedanční přizpůsobení a volbu vhodného bodu k připojení.

1.2 Návrh flíčkové antény

Tato podkapitola se věnuje samotnému návrhu flíčkové antény, konkrétně verze pracující na frekvenci 2 GHz. První část je věnována výpočtu teoretických hodnot, za pomoci vztahů převzatých z [3]. Další část práce se zabývá optimalizací navržené antény v programu CST Microwave Studio. Použitím parametrické analýzy lze určit přesné rozměry s ohledem na všechny zadané parametry (rozměry, materiál).

Navrhovaná anténa má pracovat na kmitočtu 2 GHz. Použitý substrát je CuClad 217 ($\epsilon_r = 2.17$), výška substrátu je 1,524 mm.

1.2.1 Výpočet rozměrů antény

Jako první parametr je třeba navrhnout šířku flíčku W , jelikož tato hodnota bude použita při výpočtu dalších neznámých. Šířka flíčku určuje především výslednou impedanci antény. Definuje ji následující vztah, převzatý z [3]

$$W = \frac{c}{2 \times f \times \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1.1.)$$

kde f je požadovaná rezonanční frekvence, ϵ_r je relativní permitivita substrátu a konstanta c odpovídá rychlosti světla.

Nyní je třeba dopočítat efektivní permitivitu [3]. Vypočítaná hodnota bude použita k výpočtu délky flíčku. Efektivní permitivitu ovlivňuje především zvolený substrát

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12 \times h}{W}}} \quad (1.2.)$$

kde parametr h je tloušťka substrátu. Ta je udávána výrobcem a zpravidla je možné volit z několika hodnot.

Dále je třeba určit hodnotu efektivního prodloužení Δ [3]. Tu lze získat dosazením do vzorce

$$\Delta = 0.412 \times h \times \frac{\epsilon_{eff} + 0.300}{\epsilon_{eff} - 0.258} \times \frac{\frac{W}{h} + 0.262}{\frac{W}{h} - 0.813} \quad (1.3.)$$

kde Δ délka efektivního prodloužení flíčku, ϵ_{eff} efektivní permitivita, W šířka flíčku, h tloušťka substrátu.

Vliv na výslednou frekvenci, na které bude anténa rezonovat, má především délka flíčku L . Délka ve vakuu by měla být přibližně $(0.48 \div 0.49) \lambda/2$ [1], na substrátu se pak délka zkracuje s odmocninou ϵ_{eff}

$$L = \frac{c}{2 \times f \times \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2 \times \Delta \quad (1.4.)$$

Jelikož bude flíček napájen koaxiální sondou, je třeba vypočítat rozměry sondy tak, aby její charakteristická impedance odpovídala 50Ω . K výpočtu je použit vztah převzatý z [4]

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \ln \frac{D}{d} \quad (1.5.)$$

kde Z_0 je charakteristická impedance, ϵ_r je relativní permitivita koaxiálního kabelu, d je vnitřní rozměr koaxiálního vedení, D je vnější průměr koaxiálního vedení.

Všechny potřebné vzorce již byly prezentovány, je tedy nutné dosadit příslušné hodnoty.

Dosazením do vzorce 1.1 získáme šířku flíčku

$$A = \frac{299\,792\,458}{2 \times 2 \times 10^9 \times \sqrt{\frac{2.17 + 1}{2}}} = 59.53 \text{ mm}$$

Dle vzorce 1.2 určíme efektivní permitivitu

$$\epsilon_{eff} = \frac{2.17 + 1}{2} + \frac{2.17 - 1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12 \times 1.54}{59.53}}} = 2.096$$

Efektivní prodloužení délky je vypočítáno dosazením do vzorce 1.3

$$\Delta = 0.412 \times 1.54 \times \frac{2.096 + 0.300}{2.096 - 0.258} \times \frac{\frac{59.53}{1.54} + 0.262}{\frac{59.53}{1.54} - 0.813} = 0.851 \text{ mm}$$

Délku flíčku určíme ze vzorce 1.4

$$B = \frac{299\,792\,458}{2 \times 2 \times 10^9 \times \sqrt{2.096}} - 2 \times 0.851 \times 10^{-3} = 50.066 \text{ mm}$$

Ze vzorce 1.5 určíme požadovaný rozměr D . Hodnotu ϵ_r volíme 2.1, což odpovídá teflonu. Vnitřní rozměr koaxiální sondy je 1.27 mm

$$D = e^{\frac{50 \times \sqrt{2.1}}{60}} \times 1.27 = 4.2487 \text{ mm}$$

přičemž takto definovaný kabel odpovídá reálnému kabelu, který bude k napájení použit při praktické realizaci.

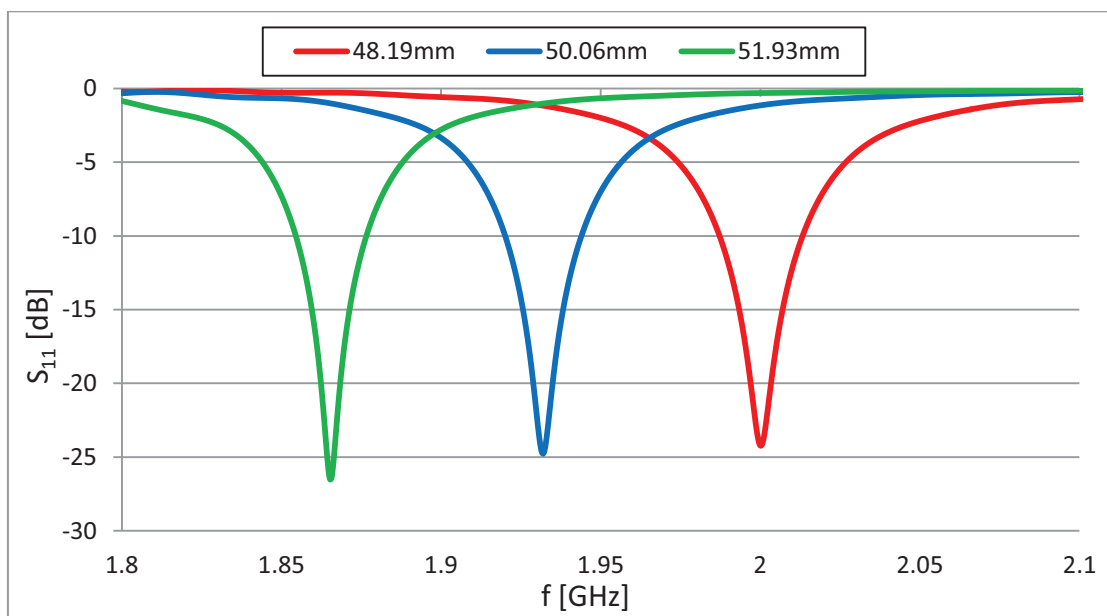
Nyní jsou známy veškeré parametry k realizaci vybrané flíčkové antény. Pro otestování navržené antény je nutné provést simulaci ve vhodném simulačním programu. K tomuto účelu byl vybrán program CST Microwave Studio.

1.2.2 Optimalizace antény

Úkolem této části práce je ověřit přesnost návrhu simulací v programu CST Microwave Studio. Při modelování byla využita analýza „Time Domain Solver“. Nastavení diskretizační mřížky na hodnotu 20 buněk na vlnovou délku (původní nastavení pro modelování na detailním modelu lidského těla). Dále byl nastaven frekvenční rozsah 1.8 – 2.2 GHz. Využitím funkce „Parameter sweep“ byly rozmítány potřebné parametry.

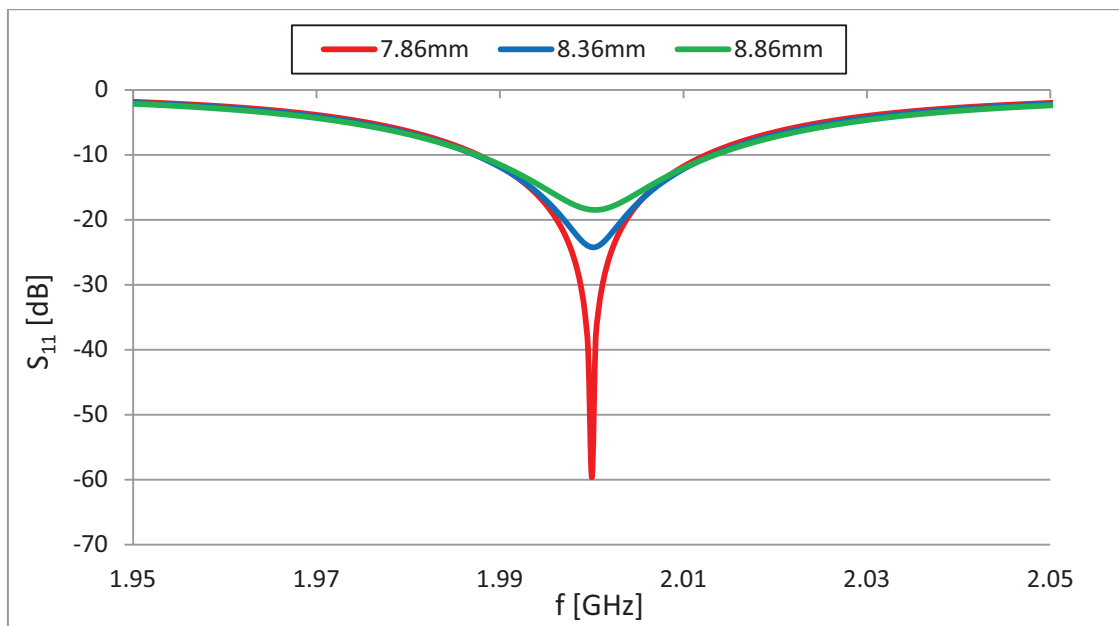
Volba parametrů A , B odpovídá vypočítaným hodnotám. Velikost plochy substrátu a zemní desky je třeba volit s dostatečnou rezervou (v ideálním případě by zemní deska měla být nekonečná). Rozměry koaxiálního vedení (d , D) jsou určeny tak, aby model představoval reálný koaxiální kabel, kterým bude flíček napájen při konstrukci. Tloušťka pokovení a substrátu odpovídá parametrům výrobce dodávaného materiálu. Parametr Y , čili vzdálenost koaxiálního napájení od okraje, se volí přibližně v $1/3$ délky flíčku. Tloušťka zemní plochy H se volí tak, aby fungovala coby dokonalá odrazná plocha. Případně se jí v reálné aplikaci alespoň blížila.

Po dokončení první simulace bylo zjištěno, že vypočítané parametry nejsou zcela přesné a je potřebná jejich mírná korekce. To lze přičíst na vrub toho, že se zpravidla počítá se zjednodušenými vztahy, které nezahrnují všechny možné fyzikální jevy. Modelovaná anténa rezonuje přibližně na kmitočtu 1.932 GHz. Je tedy vhodné pomocí parametrické analýzy určit přesnou hodnotu délky flíčku (B). Na obr 1.3 je vyobrazen graf závislosti činitele odrazu na délce navrhovaného flíčku. S rostoucí délkou rezonanční kmitočet klesá. Napájecí koaxiální vedení je v tomto případě vzdáleno 16,67mm od okraje flíčku.



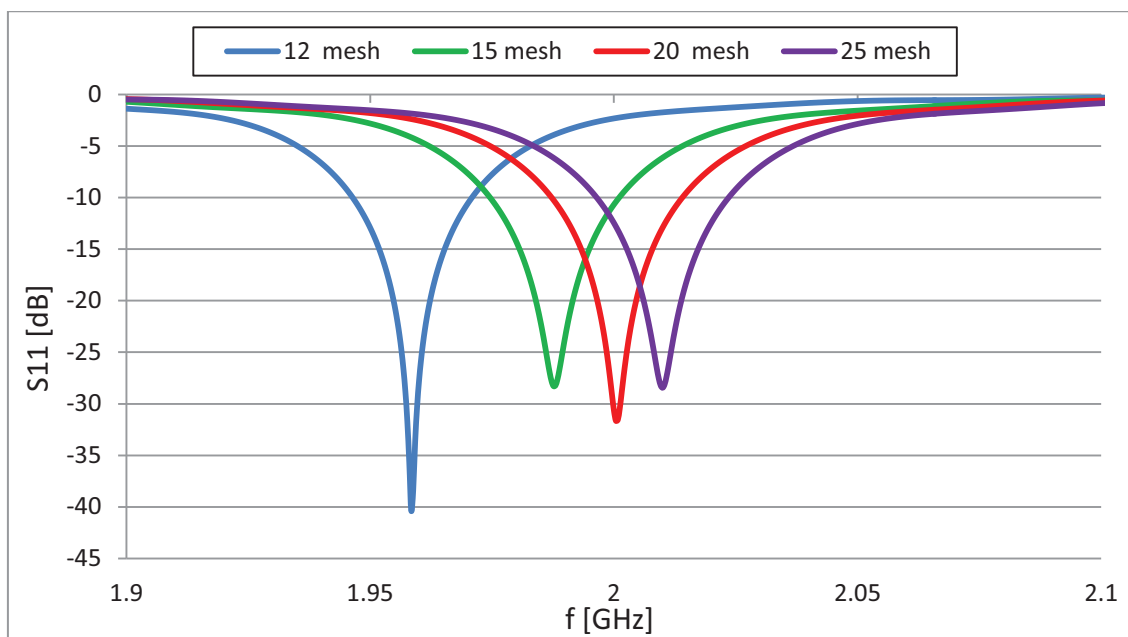
Obr. 1.3 Rozmítání délky flíčku

Při délce flíčku $B = 48,19$ mm je anténa naladěna přesně na frekvenci 2 GHz. Nyní je třeba určit nejvhodnější polohu pro připojení koaxiálního kabelu. Na obr. 1.4 lze pozorovat závislost činitele odrazu na vzdálenosti napájení od okraje flíčku. Z grafu je patrné, že ideální poloha pro napájení je 7,86 mm od okraje flíčku.



Obr. 1.4 Závislost činitele odrazu na poloze koaxiální sondy

Pro simulaci 2 GHz flíčku na detailním modelu lidského těla byla zvolena diskretizační mřížka s 20 buňkami na vlnovou délku. Pro zjednodušený model lidského těla byla tato hodnota zvýšena na 35 buněk na vlnovou délku. Tato hodnota je plně dostačující pro porovnání výsledků. Na obr. 1.5 je navrhnutá anténa simulovaná při různém nastavení diskretizační mřížky. V této jednoduché simulaci dochází v podstatě jen k frekvenčnímu posuvu, avšak v dalších simulacích v blízkosti lidského těla může nízká hustota diskretizační mřížky negativně ovlivnit výsledné hodnoty.



Obr. 1.5 Nastavení diskretizační mřížky

2 ROZBOR PARAMETRŮ

Tato kapitola se věnuje popisu modelové situace a rozboru jednotlivých zkoumaných parametrů. Jako model lidského těla nám v první fázi posloužil detailní model vytvořený na zahraniční universitě. Vzhledem k jeho složitosti nebylo možné využít detailnější nastavení diskretizační mřížky, což byl jeden z faktorů, který výrazně ovlivňoval simulované veličiny, zejména pak činitel odrazu. Další nevýhodou byla jeho nehomogenita, která se plně projevila při prvních měření reálně vyrobené antény. Po vyhodnocení výsledků z měření činitele odrazu na reálném lidském těle bylo zjištěno, že nehomogenita těla do měření vnáší poměrně velkou nejistotu a reprodukovatelnost měření je též velmi špatná. Vlastnosti reálného lidského těla byly v každém okamžiku měření mírně pozměněny, vzhledem k aktuální poloze antény u těla a fázi nádechu či výdechu (změna permitivity). Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že detailní model lidského těla bude pro případ zkoumání činitele odrazu zaměněn za zjednodušený model sestávající z krychle materiálu o definovaných vlastnostech. Tato záměna vedla ke zlepšení porovnatelnosti simulované a reálně vyrobené antény. Nutno podotknout, že pro simulaci směrových charakteristik byl použit původní detailní model.

Vytvořený model lidského těla měl tloušťku 20 mm a šířku i délku 30 cm (větší rozměr nemá vliv na hodnotu činitele odrazu). Vzhledem k tomu, že k ověření vlastností modelovaných antén slouží jednovrstvý model s definovatelnou permitivitou, byl použit model sestávající pouze z jediné vrstvy materiálu, který představoval lidské tělo. Relativní permitivita tohoto materiálu byla $\epsilon_r = 47$ a vodivost $G = 1.3 \text{ S/m}$. Tato vodivost je velmi blízko reálné hodnotě vodivosti lidské kůže. Hodnota byla převzata z detailního modelu lidského těla. Relativní permitivita byla určena jako průměrná relativní permitivita lidského těla, dle doporučení pracovníků školy.

V rámci simulace bude model posouván od minimální vzdálenosti (několik milimetrů od lidského těla) až po vzdálenost několika metrů. V blízké vzdálenosti je ovlivňován zejména parametr S_{11} . S dalším posuvem dochází ke směnám ve směrových charakteristikách. Vzdálenost bude ohraničena bodem, kdy ještě dochází k nějaké postřehnutelné změně parametrů. Modelovaná anténa v tomto případě míří přímo na model lidského těla, což znázorňuje obr. 2.1. Pro názornější zobrazení je na daném obrázku znázorněn detailní model lidského těla, který je využit až při simulaci směrových charakteristik.



Obr. 2.1 Znázornění modelované situace

Při tomto modelování je nutné sledovat několik parametrů, které danou anténu charakterizují. Prvním parametrem je činitel odrazu S_{11} , který byl zmiňován již dříve. Dalším sledovaným parametrem je vyzařovací charakteristika ve dvou rovinách (E, H). Alternativou k zjištění rezonanční frekvence antény je sledování její impedance v reálné a imaginární podobě. Vliv změny parametrů bude pozorován na dvou frekvencích a to 2 GHz a 4 GHz pro flíčkovou anténu i planární monopól. Parametry všech použitých antén lze nalézt souhrnně v příloze A.

2.1 Činitel odrazu S_{11}

Činitel odrazu definuje poměr výkonu, který se vyzáří ven z antény, vzhledem k výkonu, který se odrazí zpět [5]. Hodnota 0 dB udává, že veškerý vyzářený výkon se odrazil od vstupu antény zpět ke generátoru, anténa tedy na dané frekvenci nevyzařuje žádný výkon. Pracovním kmitočtem zvolíme frekvenci, kde má parametr S_{11} nejnižší

hodnotu (respektive nejvyšší zápornou hodnotu). Vzhledem k vysokému činiteli jakosti mikropáskových antén je rozsah pracovních frekvencí velmi malý; antény mají tedy velmi úzké frekvenční pásmo. Opakem k úzkopásmovým flíčkovým anténám je planární monopól, který má výrazně větší šířku pásma.

Při simulaci všech antén lze v určité vzdálenosti, různé pro každou anténu, nalézt minimum činitele odrazu S_{11} . To lze vysvětlit tím, že anténa spolu s blízkým tělem tvoří anténní soustavu. Lidské tělo tvoří jeden prvek anténní soustavy a anténa pak druhý. Změnou polohy antény vůči tělu se mění jejich vzájemná impedance [6]. Výslednou impedanci na vstupu antény je pak součet vlastní impedance antény a vzájemné impedance anténa – tělo. Změnou vstupní impedance dochází ke změně činitele odrazu S_{11} .

2.2 Impedance

Sledováním reálné a imaginární složky impedance na vstupu mikropáskové antény lze taktéž zjistit rezonanční frekvenci a její případný posuv. Napájení mikropáskových antén je realizováno koaxiálním kabelem o charakteristické impedanci 50Ω . Tato impedance by při rezonanci měla být čistě reálná. Rezonanční kmitočet zjištěný zkoumáním činitele odrazu S_{11} nemusí za všech okolností přesně odpovídat frekvenci, která je definovaná průchodem imaginární složky impedance nulovou hodnotou. Ve skutečnosti se mohou tyto frekvence mírně lišit, což je důkladně popsáno v následující části této práce.

2.3 Směrové charakteristiky

Další důležitý parametr antény, který je ovlivňován přítomností lidského těla, je vyzařovací charakteristika. Jelikož je flíček na spodní straně opatřen zemní plochou, většina vyzařované energie míří opačným směrem. V modelovém případě je to směr k modelu lidského těla. U planárního monopólu je energie vyzařována rovnoměrně okolo celého monopólu. Anténa je tedy téměř všesměrová, vyjma spodního a horního konce monopólu, do kterého není vyzařována žádná energie. Jelikož se nejedná o standardní monopól, ale o jeho planární alternativu, lze zde předpokládat, že směrové charakteristiky budou mírně ovlivněny použitým substrátem. Charakteristika je sledována ve dvou rovinách (E, H), čili pohledem z boční strany a shora. Charakteristiky jsou sledovány pro dvě různé frekvence. Při vyobrazení charakteristik byla zvolena kartézské soustava, jelikož toto zobrazení poskytne lepší porovnatelnost mezi měřeními a simulovanými charakteristikami.

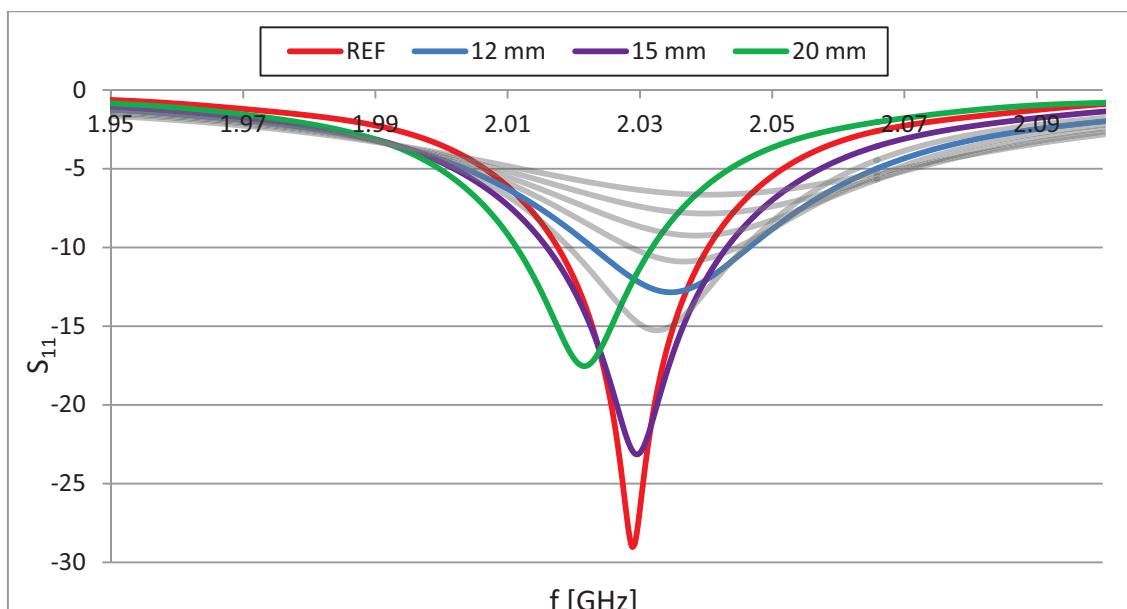
3 MODELOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ANTÉN

Simulace antén probíhají v programu CST microwave studio, který byl pro tento účet zvolen jako nejvhodnější. Byla zde využita analýza „Time Domain Solver“. Nastavení diskretizační mřížky na hodnotu 35 buněk na vlnovou délku (pro sledování kmitočtových závislostí parametru S_{11}) a 20 buněk na vlnovou délku (pro simulaci směrových charakteristik). Jako typ diskretizační mřížky byl zvolen „Hexahedral“, Frekvenční rozsah u flíčkových antén byl volen jako rezonanční frekvence $\pm 10 \%$ (např. pro flíček naladěný na frekvenci 2 GHz byl rozsah nastaven na hodnotu 1.8 – 2.2 GHz). U planárních monopólů byl rozsah větší, viz příslušné grafy. Sledovaná frekvence se vždy volila jako ta referenční (Solve - Field Monitors). Využitím funkce „Parameter sweep“ byla rozmítána vzdálenost od lidského těla. Před rozmítáním bylo třeba zadat požadované výsledky (Results watch – add results). Sledovanými parametry byly: Činitel odrazu S_{11} , směrové charakteristiky v rovině E ($\theta = 90^\circ$) a H ($\phi = 90^\circ$), reálná a imaginární složka impedance. U planárních monopólů v těsné blízkosti lidského těla byla zhuštěna diskretizační mřížka za pomoci funkce „Local mesh properties“. Parametry „edge / volume refinement factor“ byly nastavovány hodnotu 2-3.

3.1 Flíček (2 GHz)

První simulovanou anténou je flíček rezonující na frekvenci 2 GHz při nastavení diskretizační mřížky na hodnotu 20 buněk na vlnovou délku. Nastavení diskretizační mřížky bylo z důvodu simulací na detailním modelu voleno menší. Při následné simulaci na zjednodušeném modelu bylo možné zvýšit nastavení diskretizační mřížky na hodnotu 35 buněk na vlnovou délku. Rezonanční frekvence antény je mírně posunuta na hodnotu 2.03 GHz. Činitel odrazu S_{11} na volném prostředí dosahuje hodnoty -28 dB.

Následující graf (obr. 2.2) znázorňuje vliv lidského těla na anténu ve vzdálenosti od 8 mm až po 20 mm. Z grafu je patrné, že vliv lidského těla roste s klesající vzdáleností. Je možné zde pozorovat v podstatě dva jevy. Prvním jevem je změna rezonančního kmitočtu. V těsné blízkosti těla se rezonanční kmitočet mírně zvyšuje, naopak ve vzdálenosti větší než 20 mm je rezonanční kmitočet nižší. Při vzdálenosti 12 mm anténa dosahuje hodnoty činitele odrazu pouze -13 dB. Pokud se s anténou přiblížíme až těsně k lidskému tělu, anténa téměř vše odrazí od svého vstupu zpět ke generátoru. Minimální hodnotu činitele odrazu S_{11} nalezneme při vzdálenosti 15 mm, což odpovídá jedné desetině vlnové délky. Poté hodnota činitele odrazu S_{11} opět klesá až v okolí poloviny vlnové délky (75 mm) nalézá své další minimum. Šedě zbarvené křivky vyplňují mezery mezi mezními hodnotami vzdáleností, které jsou zde zmiňovány. Z těchto křivek je jasně patrné chování antény zejména v těsné blízkosti u těla.



Obr. 3.1 Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti flíčkové antény (2 GHz) od těla.

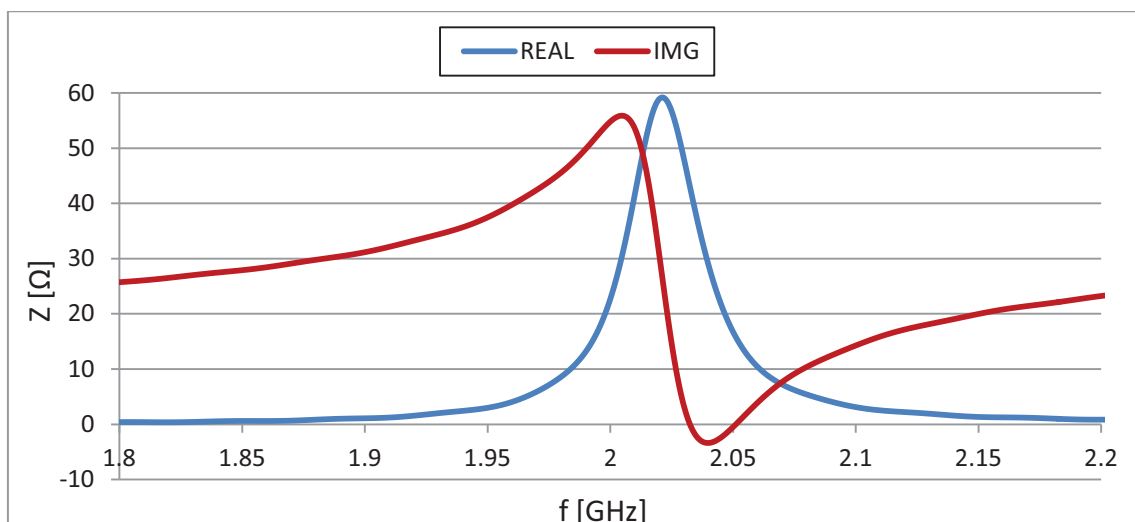
Minimální akceptovatelná hodnota činitele odrazu je -10 dB. Pro tuto hranici jsou v tab 3.1 uvedeny hodnoty mezní frekvence a šířky pásma pro vybrané vzdálenosti.

l [mm]	f_{MIN} [GHz]	f_{MAX} [GHz]	BW [GHz]	BW [%]
Ref	2.017	2.040	0.023	1.15
12	2.023	2.046	0.023	1.15
15	2.016	2.043	0.027	1.35
20	2.012	2.032	0.02	1

Tab. 3.1 Mezní frekvence a šířka pásma pro flíčkovou anténu naladěnou na frekvenci 2 GHz

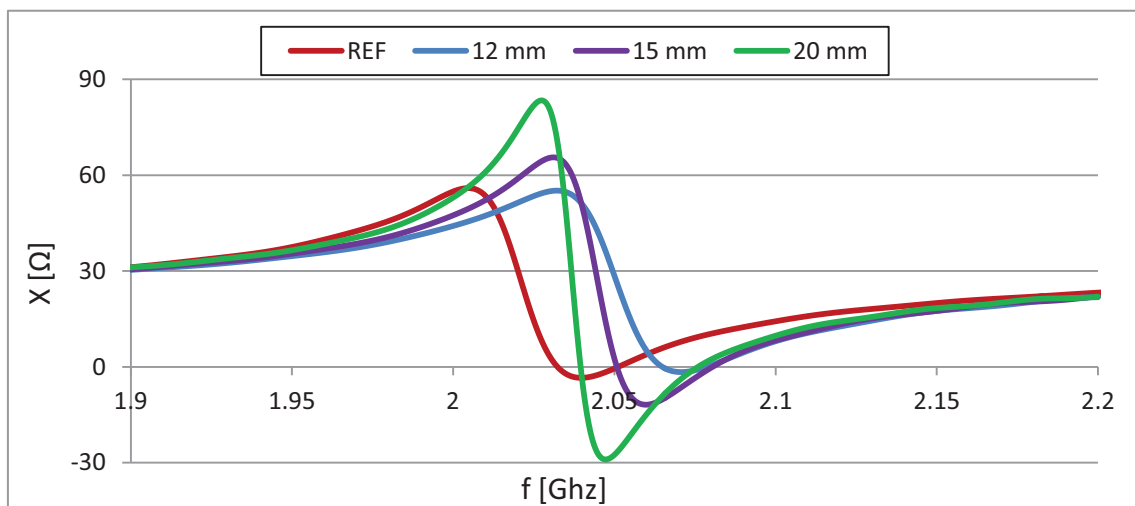
Hodnota činitele odrazu se při různých vzdálenostech mění. To je dáno různou polohou minim a maxim stojatého vlnění mezi lidským tělem a anténou a také jejich vzájemnou vazbou (vzájemná impedance, viz výše). Největší výkyv z pohledu stojatého vlnění nastane při vzdálenosti v okolo poloviny vlnové délky.

Rezonanční frekvence flíčkové antény je dle výsledků simulace činitele odrazu S_{11} rovna 2.03 GHz. Pro tuto frekvenci má však anténa impedanci $(48 + 3j) \Omega$. Z hlediska reálné části je téměř ideálně přizpůsobena. Imaginární část má však hodnotu $3j \Omega$, čili rezonanční frekvence daná touto křivkou je nepatrně větší. V zásadě však lze výsledky považovat za uspokojivé.



Obr. 3.2 Reální a imaginární složka impedance flíčku (2 GHz)

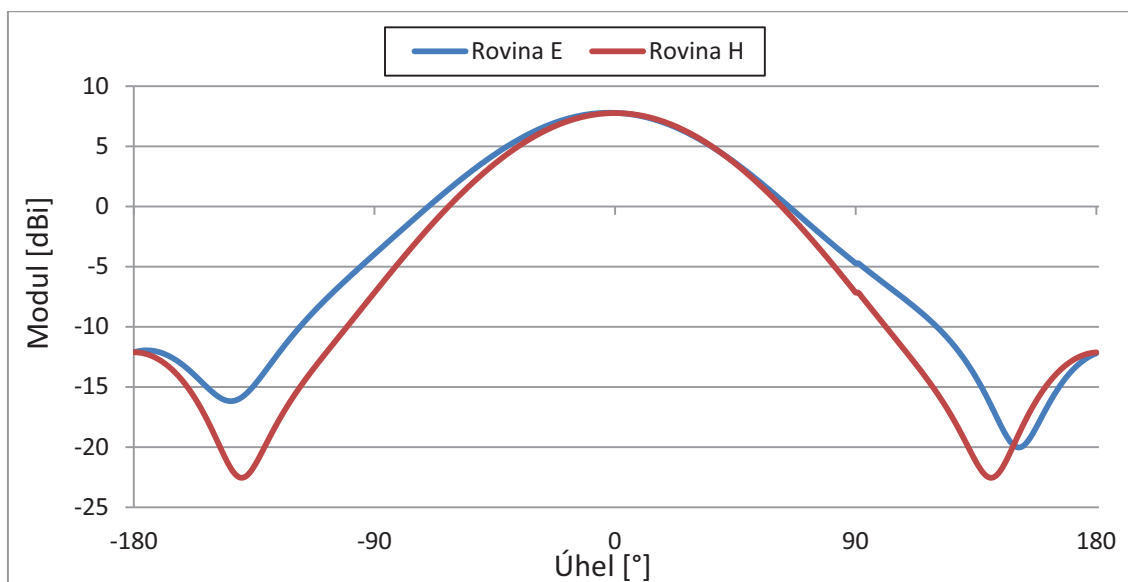
Alternativou k pozorování činitele odrazu S_{11} je sledování imaginární části impedance. Na obr. 3.3 je zobrazena závislost imaginární složky impedance na vzdálenosti antény od lidského těla. Z obrázku je patrné, jak se rezonance antény mění v závislosti na vzdálenosti od těla. Stejně tak jako při pozorování činitele odrazu je maximální přípustná vzdálenost pro dosažení rezonance 12 mm od těla.



Obr. 3.3 Závislost imaginární složky impedance na vzdálenosti od lidského těla pro flíčkovou anténu (2 GHz)

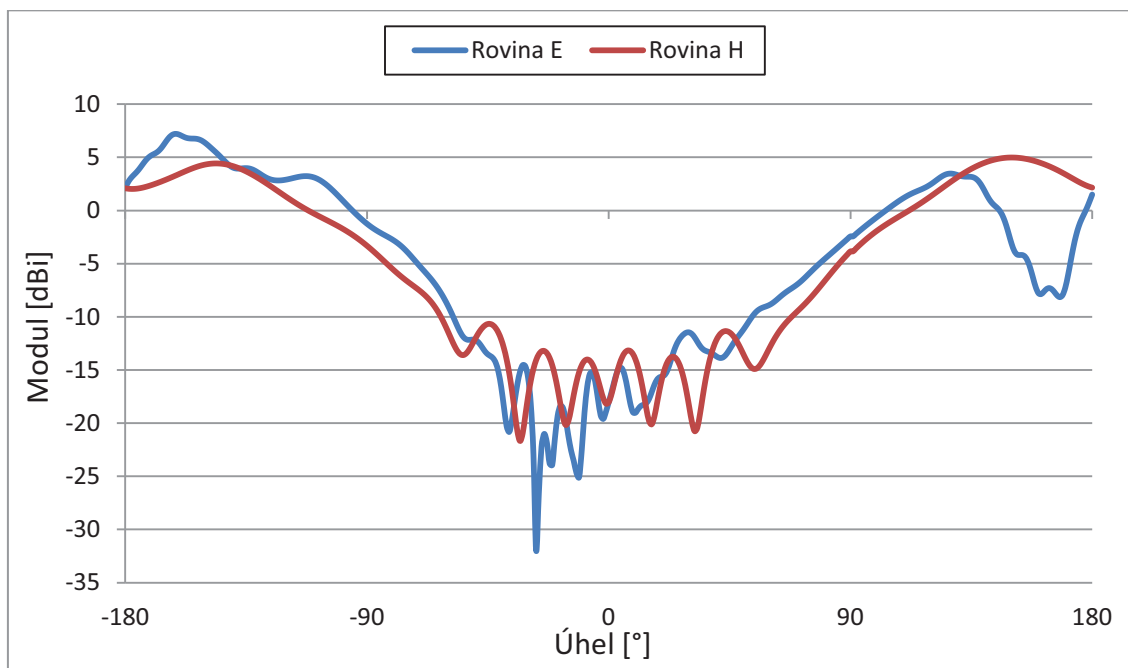
Z důvodu lepšího porovnání mezní frekvence a šířky pásma byla pro další simulace zvolena metoda sledování činitele odrazu S_{11} jako vhodnější.

Na obr. 3.4 jsou zobrazeny směrové charakteristiky ve volném prostoru. V rovině H je anténa dokonale symetrické. V rovině E je charakteristika mírně ovlivněna připojeným napájením, které z důvodu impedančního přizpůsobení není přesně ve středu flíčku. Dle předpokladu září anténa primárně v přímém směru. V opačném směru má anténa pouze malý lalok.



Obr. 3.4 Směrové charakteristiky flíčkové antény (2 GHz) ve volném prostoru

V případě umístění lidského těla přímo před anténu (obr. 3.5), byl téměř všechen vyzařovaný výkon odražen zpět od těla. Při úhlu okolo $+180^\circ$ je patrný pokles v rovině E. Ten je dán nesymetrií koaxiálního napájení.



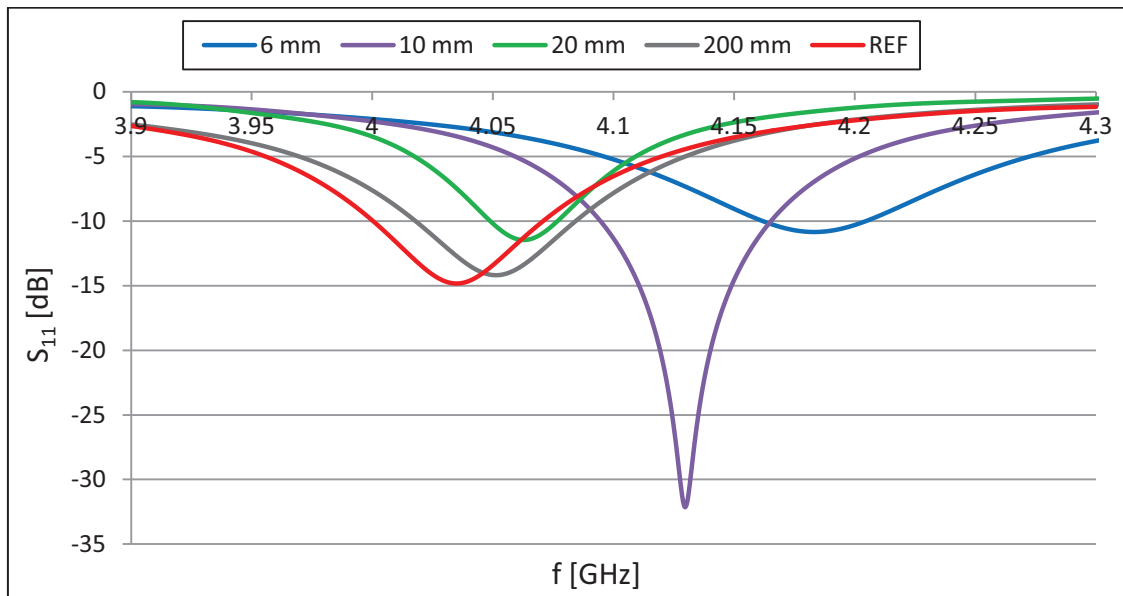
Obr. 3.5 Směrové charakteristiky flíčkové antény (2 GHz) vzdálené 15 mm od těla

Při umístění antény dále od těla (např. 1 a 3 m) byly charakteristiky velice podobné jako ve volném prostoru. Samozřejmě byl v přímém směru (úhel 0°) patrný pokles vyzařování, avšak zabíral poměrně malý úhel výsledné charakteristiky. Z důvodu přehlednosti budou dále uváděny pouze charakteristiky ve volném prostoru a pro antény naladěné na frekvenci 2 GHz také v těsnější vzdálenosti u těla (15 mm).

3.2 Flíček (4 GHz)

Jisté srovnání vlivu vzdálenosti přinese graf frekvenční závislosti flíčkové antény pracující na frekvenci 4 GHz (obr. 3.6). Z grafu lze mimo jiné vyčíst jisté zlepšení v šířce pásma.

Minimální vzdálenost se snížila z 12 mm na 6 mm. Zajímavé také je, že ve vzdálenosti okolo 20 mm dochází k výraznému útlumu. Pro další skutečnosti platí obdobné závěry jako u předchozí antény. Ve vzdálenosti 200 mm anténa září téměř stejně jako při absenci lidského těla.



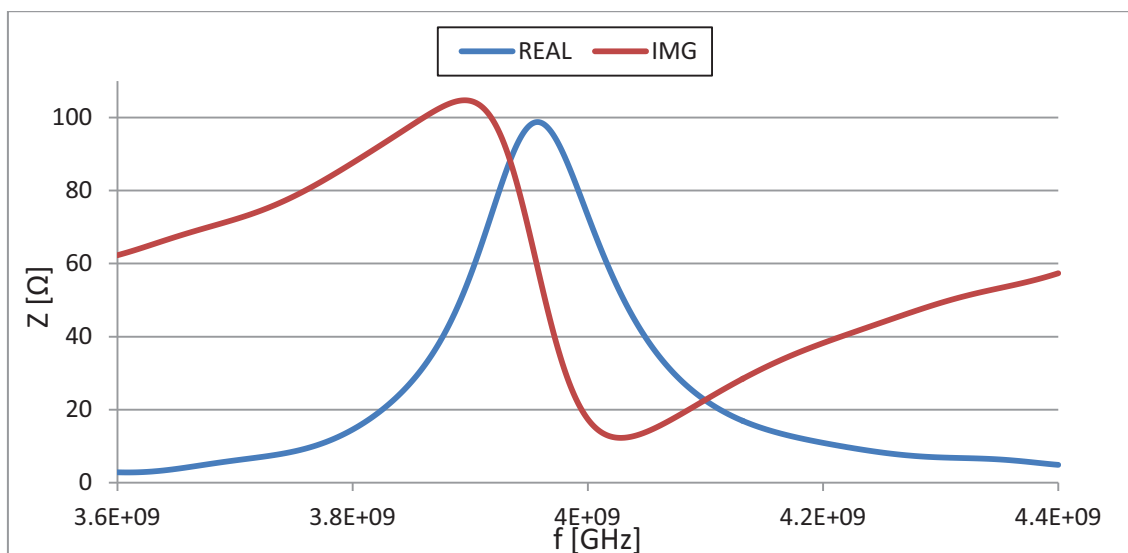
Obr. 3.6 Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti flíčkové antény (4 GHz) od těla.

V tab. 3.2 jsou uvedeny mezní frekvence a šířky pásma. Za povšimnutí stojí především vzdálenost 20 mm, která jen těsně plní podmínku vyzařování -10 dB a má velmi malou šířku pásma.

l [mm]	f_{MIN} [GHz]	f_{MAX} [GHz]	BW [GHz]	BW [%]
Ref	4	4.07	0.07	1.75
6	4.163	4.207	0.044	1.1
10	4.095	4.168	0.073	1.83
20	4.048	4.075	0.027	0.68
200	4.018	4.085	0.067	1.68

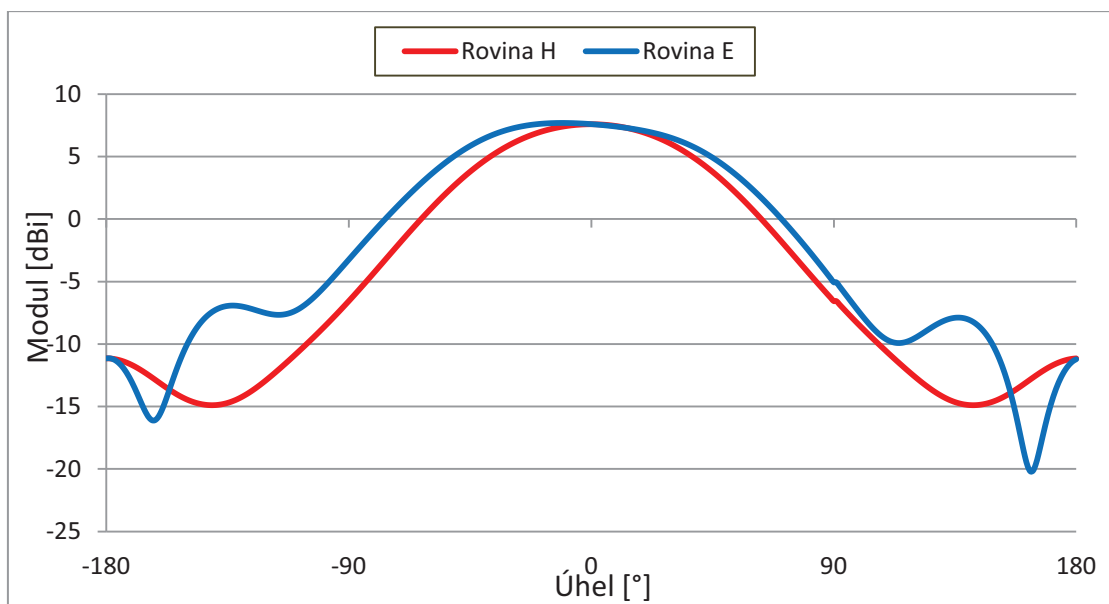
Tab. 3.2 Mezní frekvence a šířka pásma pro flíčkovou anténu naladěnou na frekvenci 2 GHz

Na obr. 3.7 je vyobrazena reálná a imaginární složka impedance antény ve volném prostoru. Pro rezonanční frekvenci $f = 4.04$ GHz, stanovené z činitele odrazu S_{11} , má anténa impedanci $(44.4 + 12.8j) \Omega$. Jak je však na obrázku zřetelné, imaginární část impedance nedosahuje nulové hodnoty v při žádné frekvenci, čili anténa nedosahuje rezonance.



Obr. 3.7 Reální a imaginární složka impedance flíčku (4 GHz)

Směrové charakteristiky flíčkové antény na frekvenci 4 GHz (obr. 3.8) jsou obdobné jako u výše uvedené flíčkové antény naladěné na 2 GHz. Rovina H je opět dokonale symetrická. Rovina E je ve zpětném směru více ovlivněna polohou napájecího vedení.

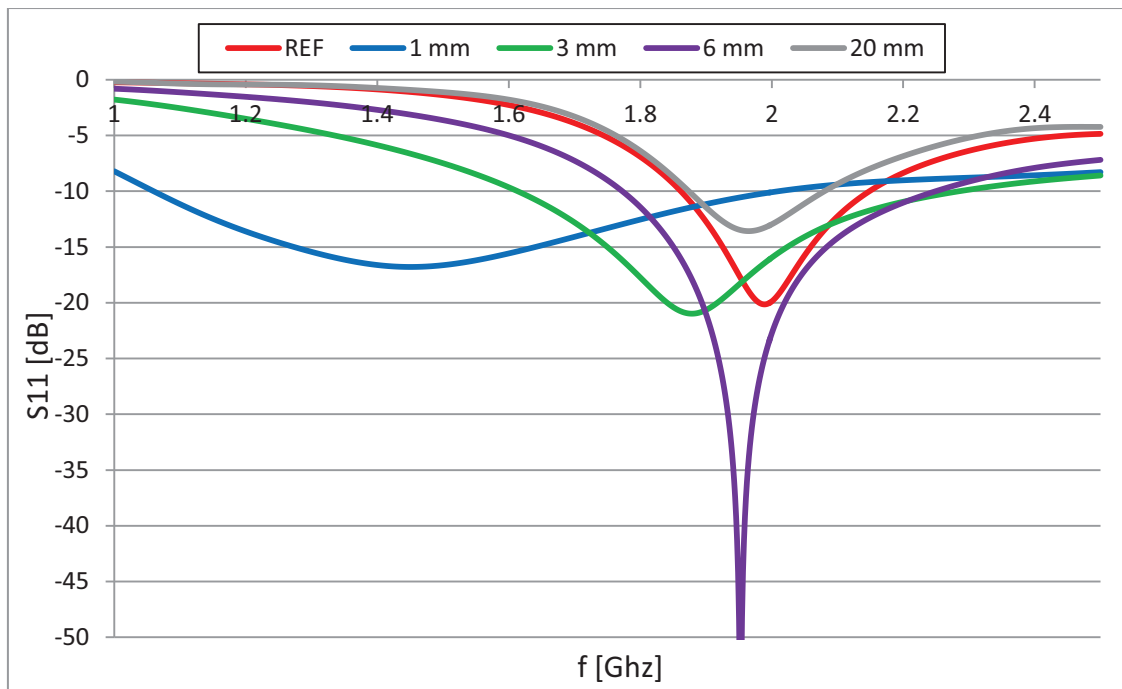


Obr. 3.8 Směrové charakteristiky flíčkové antény (4 GHz) ve volném prostoru.

3.3 Planární monopól (2 GHz)

Dalšími simulovanou anténou je planární monopól na frekvenci 2 GHz. Vzhledem k typu antény je zde předpoklad, že ovlivnění lidským tělem bude menší a šířka pásma antény naopak výrazně větší.

Planární monopól na frekvenci 2 GHz funguje s dostatečnou šířkou pásma i v těsné blízkosti lidského těla (viz obr. 3.9). Anténu lze k lidskému tělu přiblížit na vzdálenost menší než 1 mm. Nevýhodou velmi těsného přiblížení je výrazné rozladění rezonanční frekvence. Při vzdálenosti 1 mm je rezonanční frekvence antény přibližně 1.45 GHz. Dalším jevem při velmi nízké vzdálenosti je zvětšená šířka pásma. Zvětšení šířky pásma může být tak výrazné, že i při rezonanční frekvenci okolo 1.45 GHz má činitel odrazu S_{11} na referenční frekvenci (2 GHz) hodnotu přibližně -10 dB, takže anténa je na dané frekvenci stále funkční. Z praktického hlediska však může tato vlastnost rozsah použitelnosti antény spíše snížit, jelikož zabraná šířka pásma je příliš velká a daná anténa by mohla rušit ostatní vysílání. Stejně tak jako u flíčkových antén nalézá planární monopól v určité vzdálenosti své minimum činitele odrazu S_{11} . Tato vzdálenost je rovna 6 mm. Při této vzdálenosti je již rozladění antény vzhledem k šířce pásma nepatrné. S dalším posunem monopólu směrem od těla nastává pokles S_{11} až po vzdálenost přibližně 20 mm, kde je dokonce menší než referenční hodnota (ve volném prostoru). Ve vzdálenosti větší než 200 mm je vliv těla na činitel odrazu S_{11} již zanedbatelný.



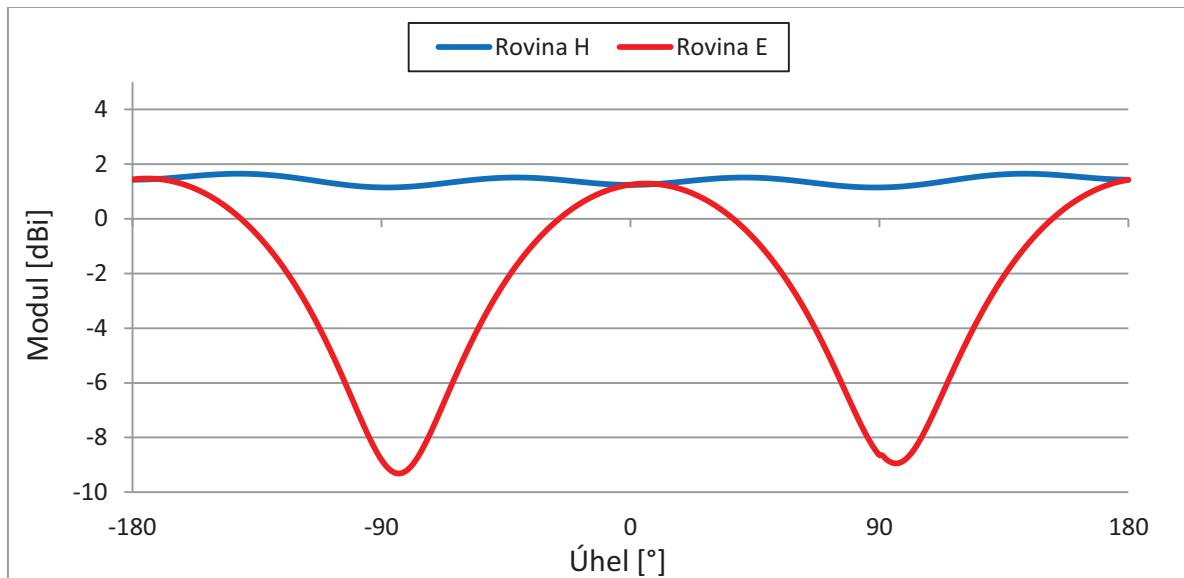
Obr. 3.9 Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti planárního monopólu (2 GHz) od těla.

V tab. 3.3 jsou uvedeny mezní frekvence a šířky pásma. Za povšimnutí stojí především těsná vzdálenost od lidského těla, kde dochází k nejvýraznějšímu rozladění a nárůstu šířky pásma.

l [mm]	f_{MIN} [GHz]	f_{MAX} [GHz]	BW [GHz]	BW [%]
REF	1.86	2.15	0.29	14.5
1	1.06	2	0.94	47
3	1.61	2.28	0.67	33.5
6	1.77	2.25	0.48	24
20	1.87	2.08	0.21	10.5

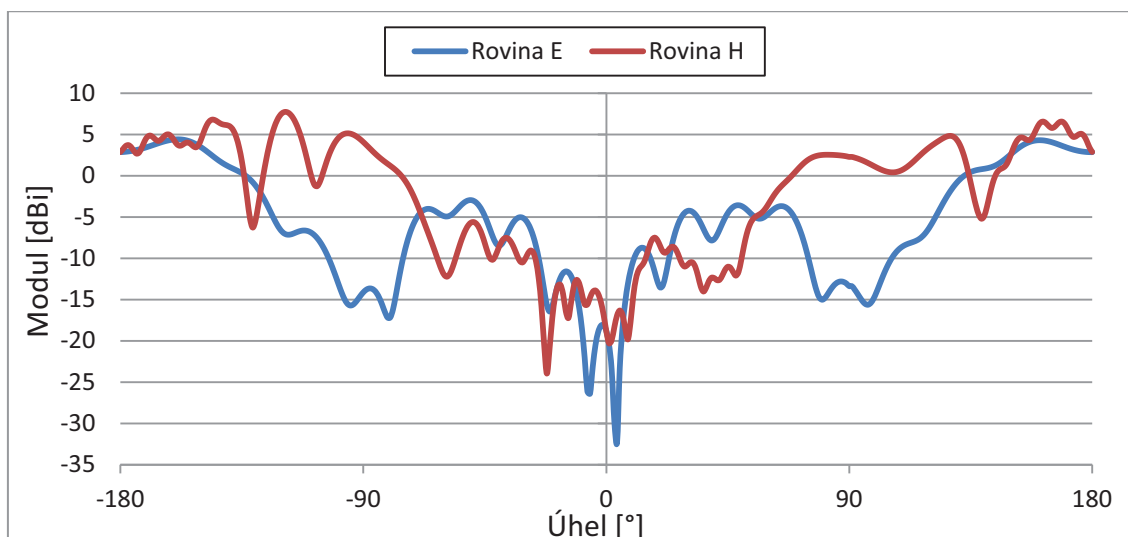
Tab. 3.3 Mezní frekvence a šířka pásma pro planární monopol na frekvenci 2 GHz

Oproti flíčkovým anténám, které mají směrové charakteristiky v rovině E a H velmi podobné, jsou směrové charakteristiky monopolu (obr. 3.10) výrazně rozdílné. V rovině H je planární monopol v podstatě všesměrový a má konstantní hodnotu vyzařované energie. V rovině E však nalezneme při úhlu -90° a $+90^\circ$ minima, do kterých anténa téměř nezáří. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o planární verzi monopolu je možné si všimnout, že ani směrová charakteristika v rovině H není úplně konstantní. Jistý vliv na výslednou charakteristiku má i zvolený substrát.



Obr. 3.10 Mezní frekvence a šířka pásma pro planární monopol na frekvenci 2 GHz

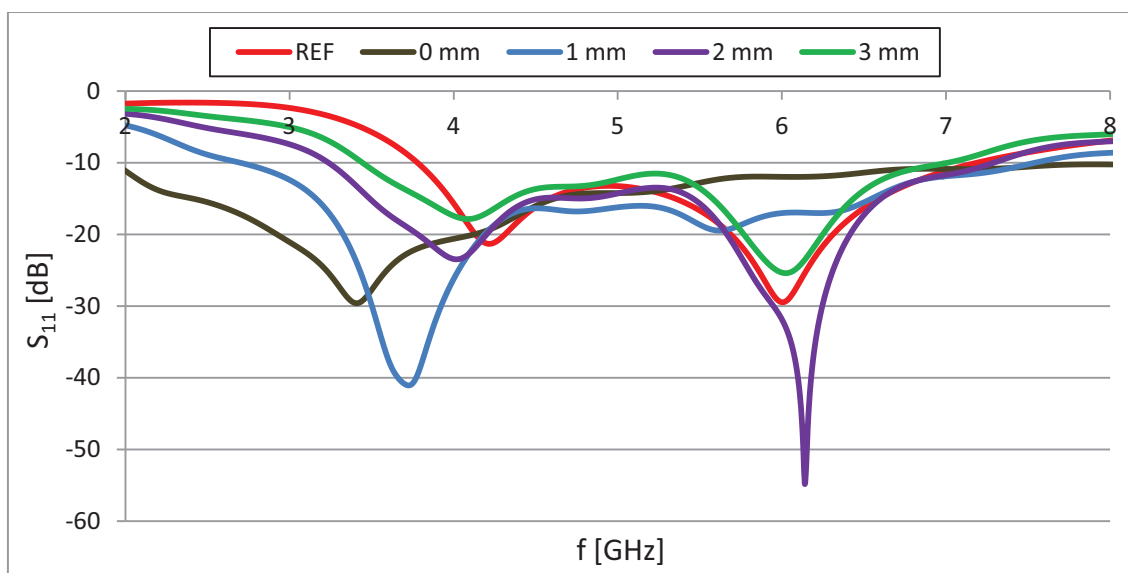
Na obr. 3.11 lze pozorovat planární monopol vzdálený 15 mm od lidského těla. V rovině H je při úhlu 0° vidět výrazný pokles. Veškerá vyzářená energie v okolí tohoto pásma se odrazí zpět. V rovině E má charakteristika obdobný průběh. Kromě minim při úhlu -90° a $+90^\circ$ vykazuje anténa další minimum vlivem umístění lidského těla.



Obr. 3.11 Směrové charakteristiky planárního monopólu (2 GHz) vzdáleného 15 mm od těla

3.4 Planární monopól (4 GHz)

Poslední zkoumanou anténou je planární monopól naladěný na frekvenci 4 GHz. Jak je patrné z obr. 3.12, je tato anténa schopna fungovat v podstatě téměř na těle. Vzdálenost 0 mm byla reálně modelovaná několik desetin milimetru od těla. Stejně tak jako u výše zmíněného monopólu je těsná vzdálenost od těla charakterizována výrazným frekvenčním rozladěním a zvětšenou šířkou pásma. Minimální hodnotu nabývá činitel odrazu S_{11} při vzdálenosti 1 mm. Při dalším zvětšování vzdálenosti hodnota činitele odrazu klesá a rozladění antény je méně zřetelné. Po překročení hranice 3 mm je anténa opět na rezonančním kmitočtu. Stejně tak jako u monopólu naladěného na frekvenci 2 GHz je zde při blízké vzdálenosti od těla výrazně snížen činitel odrazu. Toto se týká především nejbližšího okolí, přibližně do 5 mm od těla.



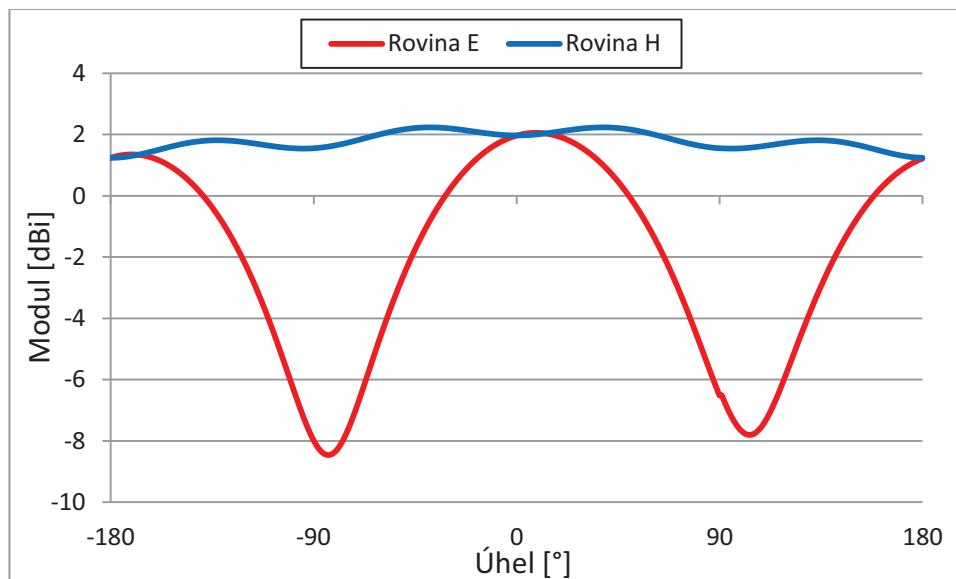
Obr. 3.12 Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti planárního monopólu (4 GHz) od těla.

Konkrétní údaje o mezních frekvencích a šířkách pásma jsou uvedeny v tab 3.4. Jak je patrné z výše uvedeného grafu, je planární monopól výrazně širokopásmový. Pro frekvenci okolo 6 GHz nalézá další (parazitní) rezonanci. Z toho důvodu je jeho horní mezní frekvence v okolí 7 GHz a relativní šířka pásma přesahuje hodnotu 100%.

l [mm]	f_{MIN} [GHz]	f_{MAX} [GHz]	BW [GHz]	BW [%]
REF	3.77	7.2	3.43	85.75
0	2	9.1	7.1	177.5
1	2.70	7.58	4.88	122
2	3.23	7.32	4.09	102.3
3	3.44	7.03	3.59	89.75

Tab. 3.4 Mezní frekvence a šířka pásma pro planární monopól na frekvenci 4 GHz

Směrové charakteristiky planárního monopólu na frekvenci 4 GHz jsou téměř identického jako směrové charakteristiky jeho ekvivalentu naladěného na frekvenci 2 GHz. V rovině E monopól září na jednu stranu přibližně o 1 dB více. V rovině H má naopak mírně oslabeno záření směrem dozadu (vůči měřicí anténě).



Obr. 3.13 Směrové charakteristiky planárního monopólu (4 GHz) ve volném prostoru.

3.5 Srovnání

V této kapitole byly prezentovány výsledky simulací pro klasický flíček a planární monopól na dvou různých frekvencích. Bylo zjištěno, že s rostoucím kmitočtem se zmenšuje použitelná vzdálenost od lidského těla a roste šířka pásma. Je to dáno výrazným růstem útlumu elektromagnetické vlny v lidském těle. U planárních monopólů je navíc v těsné blízkosti lidského těla patrný pokles (nárůst záporné hodnoty) činitele odrazu až pod hranici referenčních hodnot, měřených ve volném

prostoru. Daní za tento zvýšený rozsah je výrazné rozladění rezonanční frekvence směrem dolů.

Šířka pásma flíčkových antén se dle předpokladu pohybovala v rozmezí 0.5 – 2 %. Šířka pásma planárních monopolů byla výrazně větší. Pro monopol naladěný na 2 GHz se pohybovala v rozmezí 10 – 50 %. Pro monopol naladěný na 4 GHz byla šířka pásma ještě výraznější a to od 85 % pro referenční hodnotu až po téměř 180 % pro nejtěsnější přiblížení k tělu.

Minimální vzdálenost, která byla definovaná mezní hodnotou činitele odrazu, byla výrazně menší pro planární monopol. Z pohledu frekvence pak nejlépe vyšly antény na vyšší frekvenci.

Směrové charakteristiky splnily teoretické předpoklady. Planární monopóly by však v rovině E měli mít v ose monopolu (úhel -90° , $+90^\circ$) větší pokles.

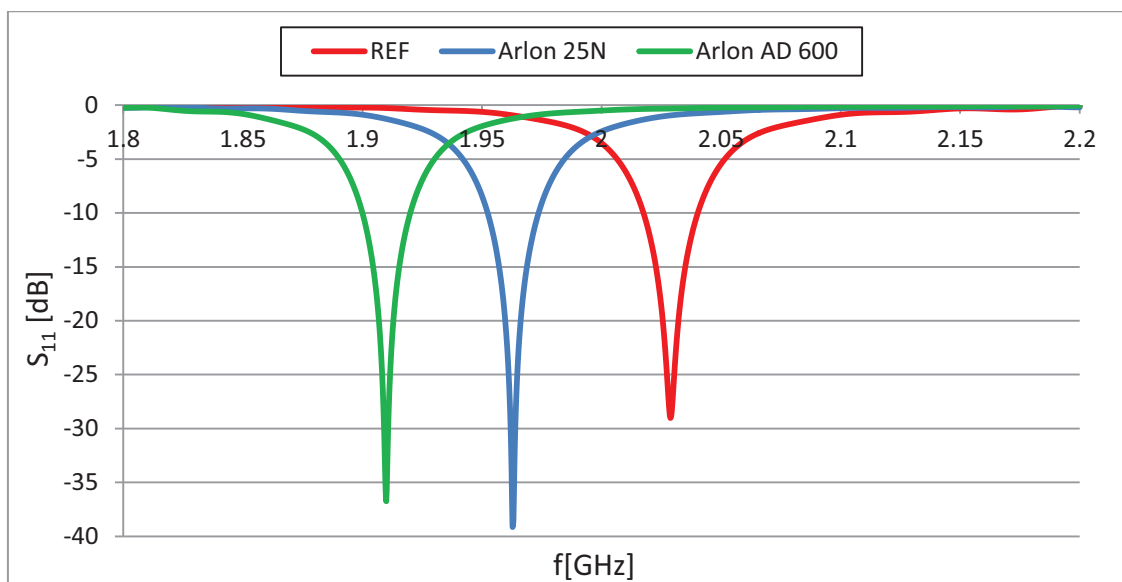
4 OPTIMALIZACE

Optimalizace flíčkových antén má za úkol zmenšit vliv lidského těla na parametry sledované antény. K omezení tohoto byla použita vrstva superstrátu. Tato technika spočívá v tom, že se na již hotový flíček nanese další vrstva substrátu. Tím by mělo dojít ke zvýšení odolnosti proti lidskému tělu. Nanesením dalšího substrátu samozřejmě dojde k rozladění antén vlivem změny efektivní permitivity antény. Pro lepší ilustraci vlivu superstrátu byly antény ponechány bez dodatečné úpravy parametrů.

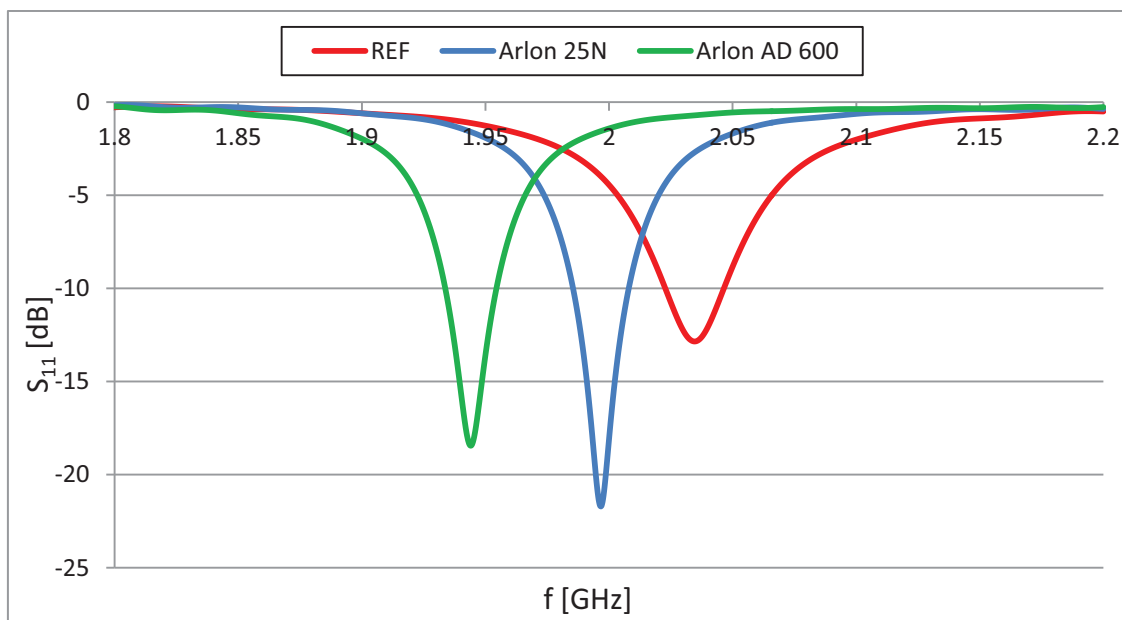
Jako horní substrát volíme Arlon 25N ($\epsilon_r = 3.38$, $h = 1,524\text{mm}$), v další verzi pak Arlon AD 600 ($\epsilon = 6.15$, $h = 1,524\text{mm}$).

Na prvním obrázku (obr. 4.1) je zobrazena kmitočtová závislost činitele odrazu antény ve volném prostoru pro tři různé varianty: Referenční, čili bez superstrátu; dále pak s využitím dvou výše zmíněných superstrátů. Přidáním další vrstvy substrátu byla rezonanční frekvence antény posunuta. Substrát s vyšší relativní permitivitou má větší vliv na změnu rezonanční frekvence. Dodatečná vrstva substrátu také upravila přizpůsobení antény, takže činitel odrazu nabývá menších hodnot.

Ve vzdálenosti 12 mm od lidského těla se vlastnosti antény taktéž výrazně zlepšily (viz obr. 4.2). Činitel odrazu zde nabývá výrazně nižších hodnot. To je částečně způsobeno zlepšeným přizpůsobením, které bylo možné pozorovat již u antény ve volném prostoru. Porovnáme-li však poměr mezi amplitudou modulu činitele odrazu antény ve volném prostoru a ve vzdálenosti 12 mm od lidského těla, zjistíme, že relativní pokles je u verze se superstrátem menší. U antény bez superstrátu poklesne S_{11} o 55.2%. S použitím Arlonu 25N a Arlonu AD 600 je pokles 43.7 % a 51.3%. Ačkoliv zlepšení není nijak extrémní, je stále vcelku dobře pozorovatelné.



Obr. 4.1 Frekvenční závislost činitele odrazu pro anténu ve volném prostoru



Obr. 4.2 Frekvenční závislost činitele odrazu pro anténu vzdálenou 12 mm od lidského těla

Obecně se superstrát hodí spíše k anténám modelovaným přímo v lidském těle, jelikož výrazně ovlivní efektivní permitivitu blízkého okolí. Anténu je tak i uvnitř lidského těla možno naladit na požadovanou frekvenci.

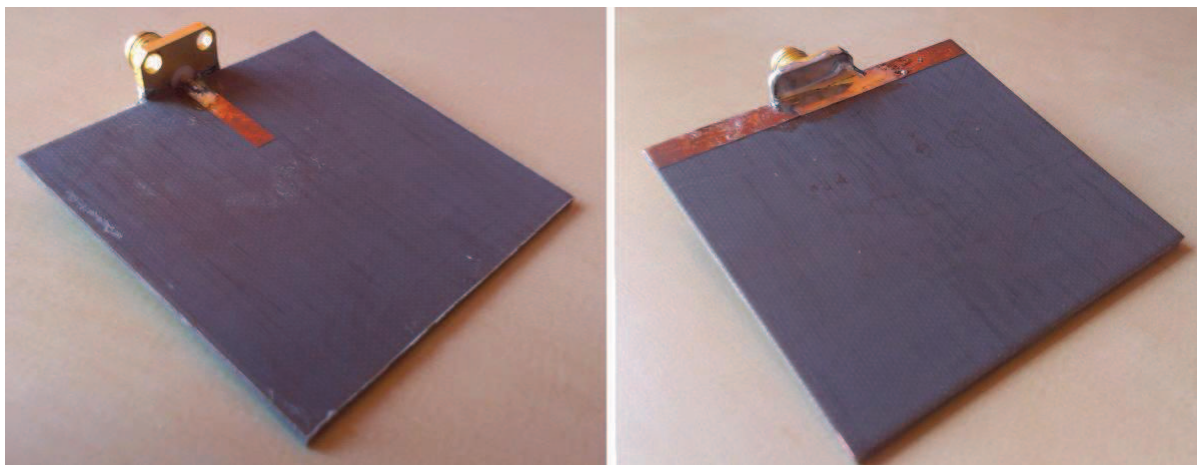
5 REALIZACE

Všechny čtyři realizované antény byly vyrobeny v dílně UREL. Jako podklad pro realizaci sloužil soubor ve formátu gerber vyexportovaný z programu CST microwave studio za pomoci funkce export (File – Export – Gerber). Po vyleptání požadovaného motivu byl do flíčkových antén vyvrtán otvor pro vsunutí napájecího konektoru. Ten byl následně v laboratoři tvůrčí činnosti připájen. Napájení planárních monopolů je realizováno na okraji substrátu.

Jako substrát byl použit materiál CuClad 217 ($\epsilon_r = 2.17$), výška substrátu je 1,524 mm.



Obr. 5.1 Ukázka realizace flíčkové antény



Obr. 5.2 Ukázka realizace planárního monopolu

Realizované antény byly foceny až po posledním měření. Z toho důvodu na nich lze nalézt jisté známky opotřebení. Povrch flíčkových antén musel být přeleštěn, jelikož nesl viditelné stopy po doteku lidské ruky (působení agresivního potu na pokovení).

6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKCE

Experimentální ověření funkce všech antén bylo provedeno v laboratoři UREL č. 727. Měření činitele odrazu S_{11} a impedance bylo provedeno na vektorovém obvodovém analyzátoru Rohde & Schwarz ZVL. K měření směrových charakteristik byla dále využita bezodrazová komora. U všech měřících úkonů byl jako dozor přítomen Ing. Petr Všetula.

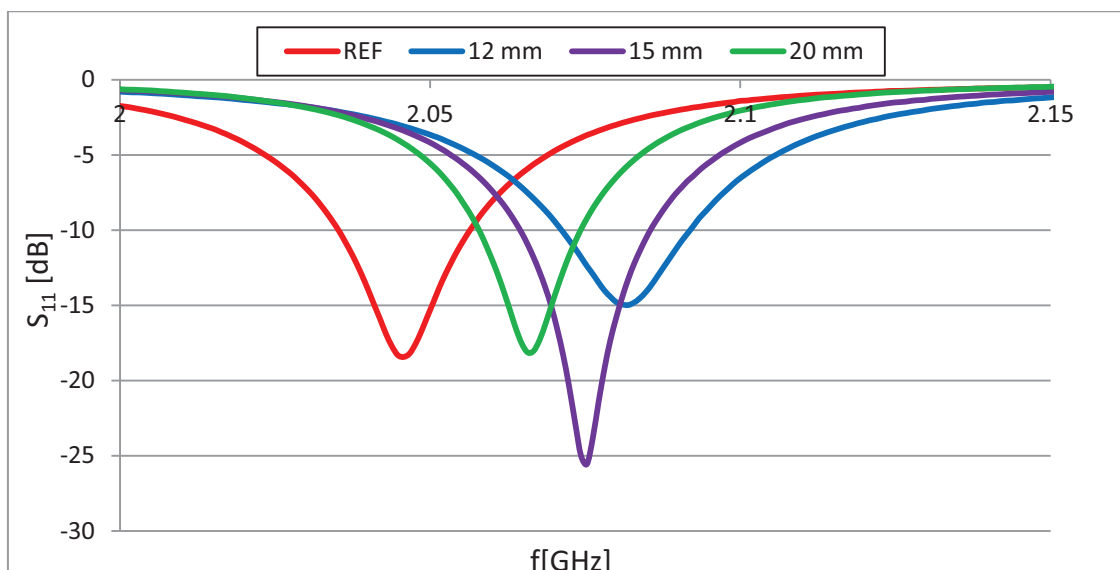
V následujících odstavcích jsou detailně analyzovány parametry realizovaných antén. Jako model lidského těla zde posloužila agarová hmota. Jedná se o hmotu, která mění relativní permitivitu v závislosti na množství vody. Vhodnou příměsí vody byla nastavena relativní permitivita $\epsilon_r = 47$. Nevýhodou tohoto modelu je poměrně velká vodivost $G = 8 \text{ S/m}$. Reálné lidské tělo má výrazně nižší vodivost (přibližně 1.3 S/m). Tuto nesrovnalost lze korigovat dalšími aditivy, které vodivost sníží, ty však nebyly k dispozici.

U každé z realizovaných antén je nejdříve porovnán činitel odrazu S_{11} a směrové charakteristiky ve volném prostoru. U flíčkové antény a planárního monopólu na frekvenci 2 GHz jsou k dispozici i směrové charakteristiky ovlivněné blízkým okolím lidského těla. Měření pro větší rozestup tělo – anténa nebylo z technických důvodů realizovatelné. Pro flíčkové antény jsou dále ověřovány obě složky impedance.

6.1 Flíček (2 GHz)

Porovnáním naměřených hodnot činitele odrazu S_{11} (obr. 6.1) s hodnotami simulovanými v programu CST microwave studio (obr. 3.1) bylo zjištěno, že křivky mají velmi podobný charakter. Naměřené hodnoty jsou však více frekvenčně posunuty, což znemožňuje efektivní porovnání všech křivek v jednom grafu.

Referenční hodnota činitele odrazu je oproti simulaci posunuta o 20 MHz směrem nahoru. Dále je pak přibližně o 10 dB menší. Ostatní hodnoty jsou frekvenčně posunuty ještě výrazněji – přibližně o 50 MHz. Modul činitele odrazu má zhruba stejné hodnoty ($\pm 3 \text{ dB}$).



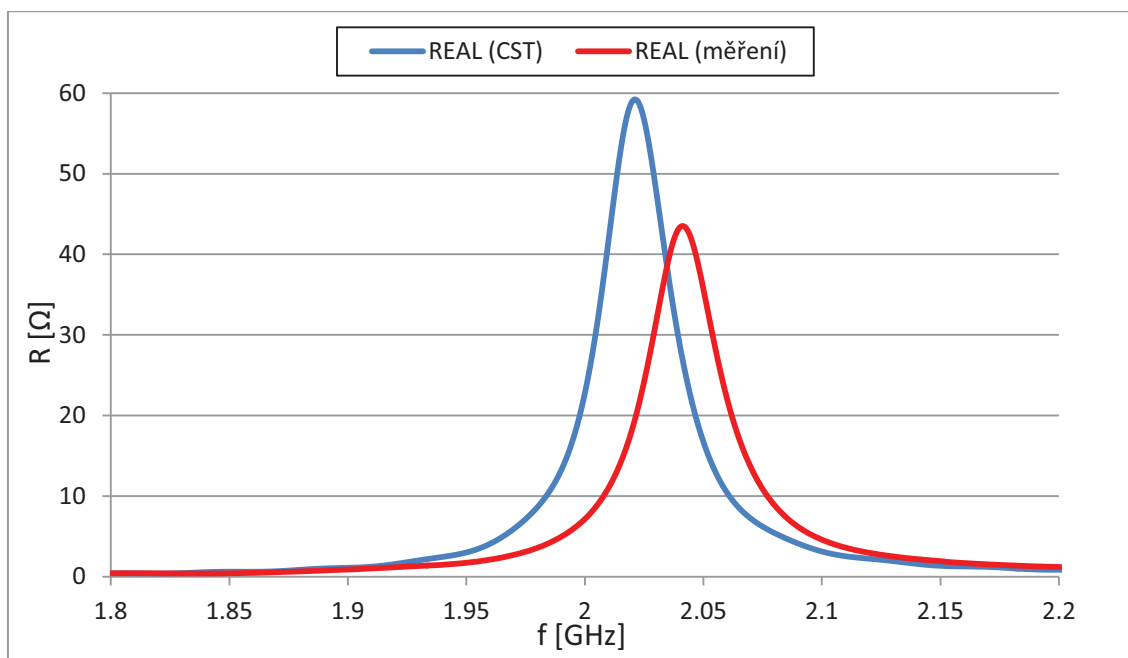
Obr. 6.1 Naměřená frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti flíčkové antény (2 GHz) od těla.

Další srovnání lze nalézt při sledování šířky pásma antény (tab. 6.1). Dle absolutních hodnot má simulovaná anténa mírně větší šířku pásma.

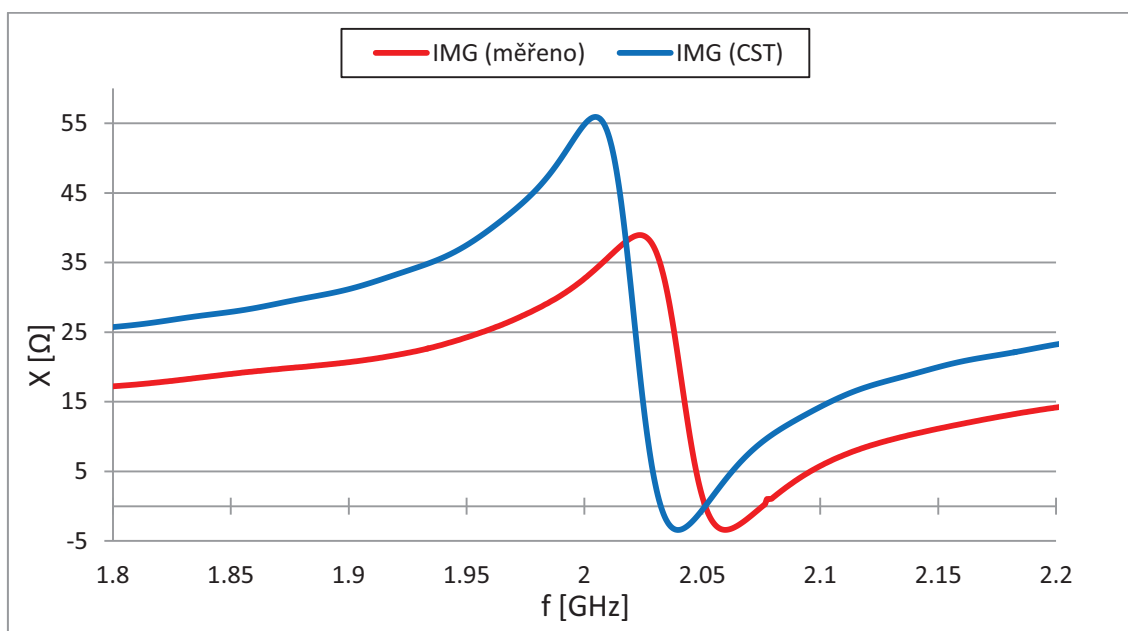
l [mm]	f_{MIN} [GHz]	f_{MAX} [GHz]	BW [GHz]	BW [%]
Ref	2.035	2.057	0.022	1.1
12	2.072	2.092	0.020	1
15	2.068	2.086	0.018	0.9
20	2.058	2.074	0.016	0.8

Tab. 6.1 Měřené hodnoty mezní frekvence a šířky pásma pro flíček (2 GHz)

Z porovnání měřené a simulované impedance (obr. 6.2, obr. 6.3) vyplývá, že měřená rezonanční frekvence flíčku byla přibližně o 20 MHz vyšší. Simulovaný flíček měl při rezonanci ($f = 2.032$ GHz) impedanci 47Ω . Oproti tomu měřená hodnota při rezonanci ($f = 2.051$ GHz) byla pouze 35Ω . Z toho lze usoudit, že reálné přizpůsobení nebylo dokonalé.

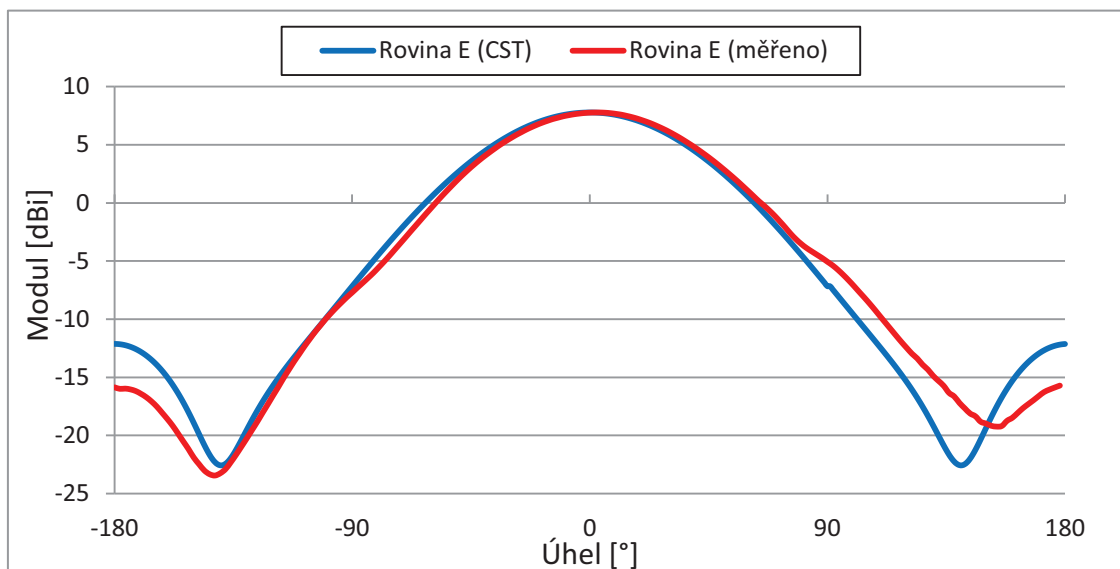


Obr. 6.2 Měřená a simulovaná reálná složka impedance flíčku (2 GHz)



Obr. 6.3 Měřená a simulovaná imaginární složka impedance flíčku (2 GHz)

Oproti simulacím byly směrové charakteristiky flíčkové antény ve volném prostoru měřeny pouze v jedné rovině. S ohledem na podobnost obou rovin (E, H) je zjednodušení přijatelné. Na obr. 6.4 jsou k dispozici naměřené i nasimulované směrové charakteristiky v rovině E. Z důvodu lepší porovnatelnosti byly charakteristiky normovány na stejnou maximální hodnotu. Měřené i simulované charakteristiky jsou obdobné, nejvýraznější rozdíly jsou v záření směrem za zemní desku.

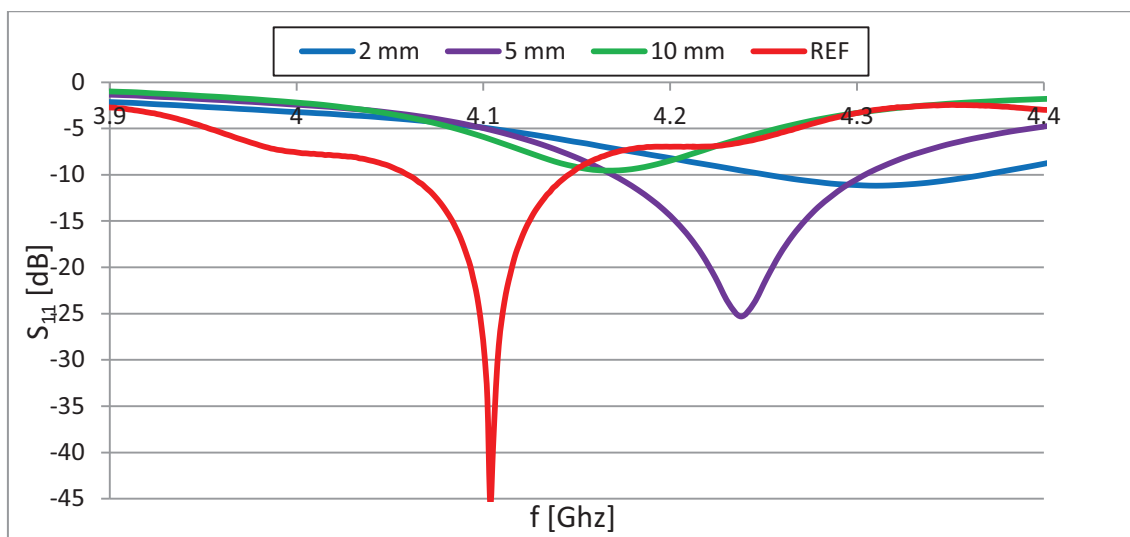


Obr. 6.4 Naměřené směrové charakteristiky flíčku (2 GHz) ve volném prostoru.

Kromě měření směrových charakteristik ve volném prostoru byly změřeny také charakteristiky flíčku vzdáleného 15 mm od modelu lidského těla. Charakteristiky vykazovaly výrazný útlum směrem k lidskému tělu, avšak jejich charakter byl jiný oproti simulacím. Pravděpodobně byla agarová vrstva tenčí než bylo nutné. Jelikož byl přínos těchto charakteristik minimální, nebyly zde zobrazeny.

6.2 Flíček (4 GHz)

Flíčková anténa naladěna na frekvenci 4 GHz vykazuje nejhorší shodu se simulací ze všech realizovaných antén (viz obr. 6.5). Závislost činitele odrazu na frekvenci má při reálném měření obdobné výsledky, jako při simulaci při dvojnásobné vzdálenosti. Parametrickou změnou modelu lidského těla nedošlo k výraznému zlepšení shody s měřenými hodnotami. Příčinou neshody může být větší vodivost agarové hmoty, která by mohla mít na vyšších frekvencích odlišné parametry než simulovaný model. Za zmínku stojí také fakt, že referenční hodnota činitele odrazu je oproti simulacím výrazně vyšší. Frekvenčně jsou všechny průběhy posunuty o zhruba 100 MHz směrem nahoru.



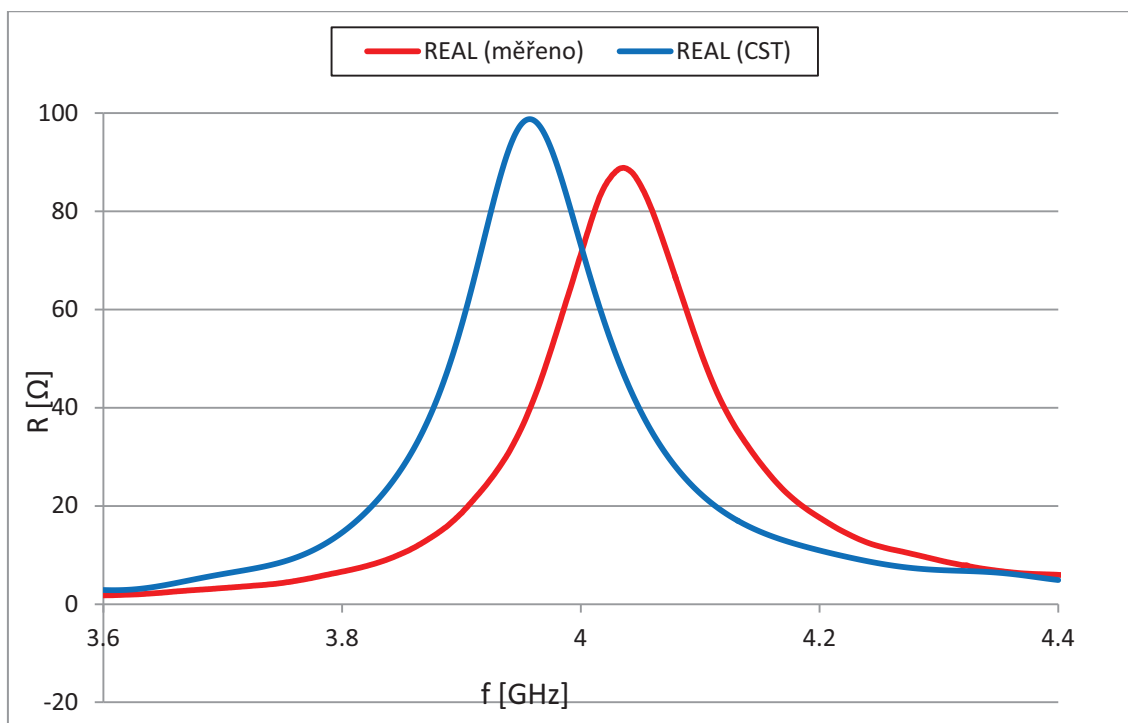
Obr. 6.5 Naměřená frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti flíčkové antény (4 GHz) od těla.

V následující tabulce (tab. 6.2) jsou uvedeny stručné informace o jednotlivých průbězích. Šířka pásma pro jednotlivé křivky je větší než u simulovaných hodnot.

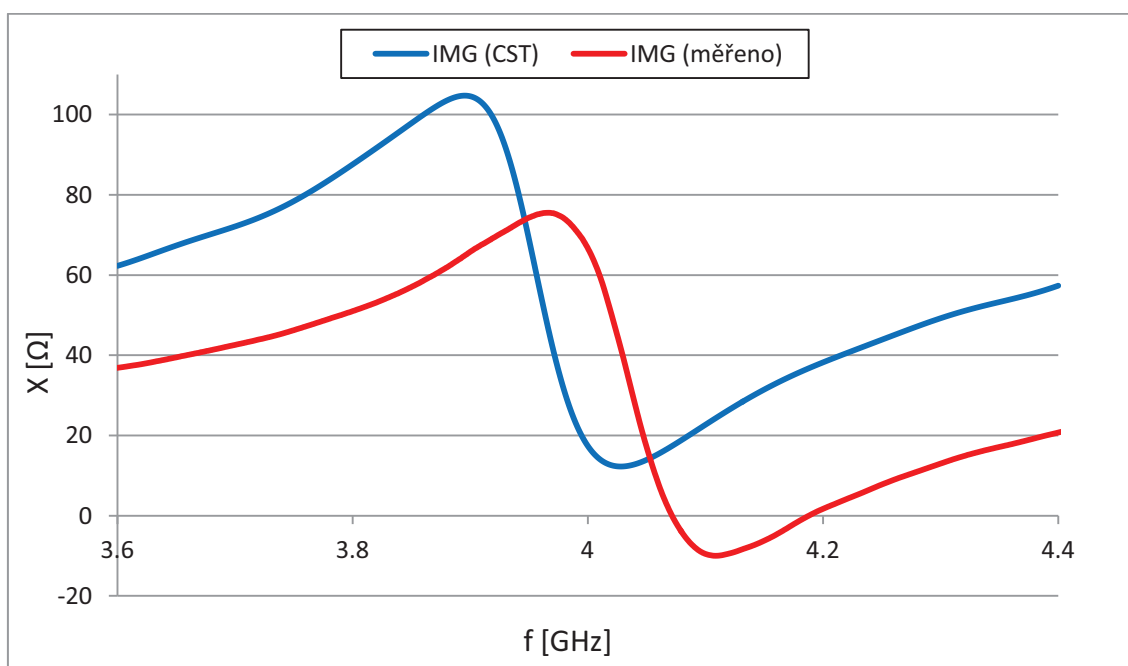
l [mm]	f_{MIN} [GHz]	f_{MAX} [GHz]	BW [GHz]	BW [%]
REF	4.06	4.15	0.09	2.25
2	4.25	4.37	0.12	3
5	4.17	4.30	0.13	3.25

Tab. 6.2 Měřené hodnoty mezní frekvence a šířky pásma pro flíček (4 GHz)

Měřené hodnoty impedance (obr. 6.6, obr. 6.7) jsou opět frekvenčně posunuty. Rezonance u měřeného flíčku nastává při frekvenci 4,072 GHz. Impedance má v tomto bodě hodnotu 72,5 Ω , přizpůsobení tedy není ideální. Simulovaný průběh se nejvíce blíží rezonanci při frekvenci 4.028 GHz. Impedance má na této frekvenci hodnotu (52 + 12.3j) Ω .

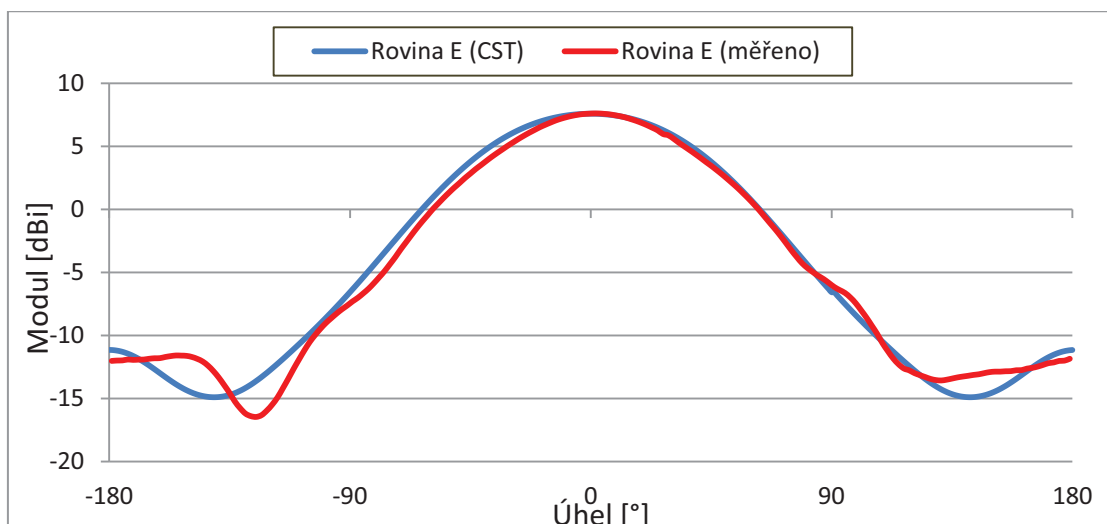


Obr. 6.6 Měřená a simulovaná reálná složka impedance flíčku (4 GHz)



Obr. 6.7 Měřená a simulovaná imaginární složka impedance flíčku (4 GHz)

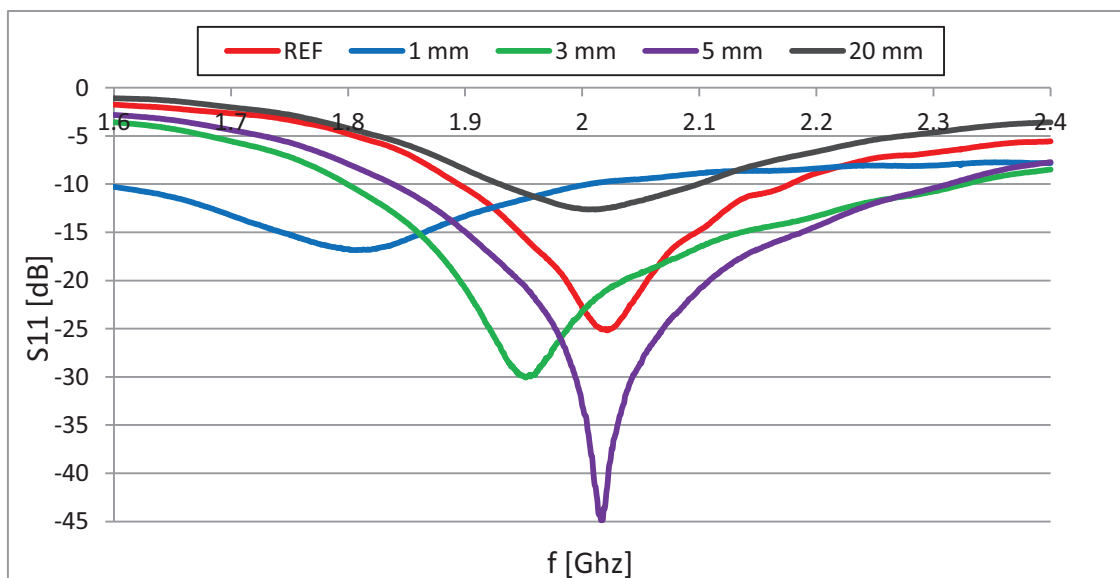
Pro směrové charakteristiky flíčkové antény na frekvenci 4 GHz (obr. 6.8) platí obdobné závěry jako u její alternativy na frekvenci 2 GHz. Maximální naměřený zisk antény je roven 8.5 dB.



Obr. 6.8 Naměřené směrové charakteristiky flíčku (4 GHz) ve volném prostoru.

6.3 Planární monopól (2 GHz)

Měřené hodnoty činitele odrazu S_{11} (obr. 6.9) vychází velmi podobně jako při simulaci. Největší odchylku amplitudy modulu S_{11} má anténa při vzdálenosti 3 mm od modelu lidského těla (9 dB). Tento výkyv může být zapříčiněn vznikem asymetrických proudů, které se šíří po kabelu a ovlivňují měření. Vznik asymetrických proudů je zapříčiněn poměrně malou plochou zemní desky. Tento jev byl do určité míry eliminován použitím feritových jader na měřicím kabelu. Největší frekvenční rozdíl lze nalézt při nejbližší vzdálenosti. Při simulaci byla rezonanční frekvence antény vzdálené 1 mm od modelu lidského těla menší téměř o 0.35 GHz. Ostatní rozdíly jsou vzhledem k velké šířce pásma zanedbatelné. Za povšimnutí stojí též fakt, že minimální hodnota modulu činitele odrazu je naměřena ve vzdálenosti 5 mm, což je o 1 mm méně oproti simulaci.



Obr. 6.9 Naměřená frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti planárního monopólu (2 GHz) od těla.

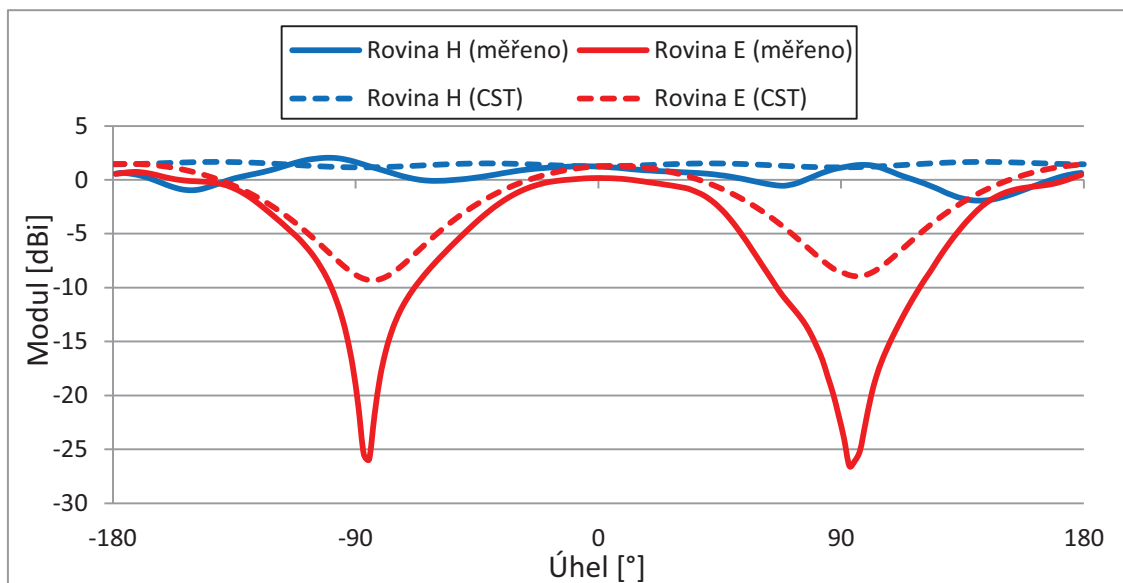
V tab 6.3 jsou k dispozici změřené mezní frekvence a šířky pásma pro planární monopól na frekvenci 2 GHz. Šířka pásma pro většinu hodnot je téměř shodná se simulací. Při velmi blízké vzdálenosti od lidského těla (1, 3 mm) však nenastává tak extrémní nárůst šířky pásma, jako v simulaci. Jedná se především o vzdálenost 1 mm, pro kterou je měřená šířka pásma přibližně poloviční než při simulaci.

l [mm]	f_{MIN} [GHz]	f_{MAX} [GHz]	BW [GHz]	BW [%]
REF	1.89	2.18	0.29	14.5
1	1.60	2.02	0.42	21
3	1.79	2.32	0.53	26.5
5	1.83	2.31	0.48	24
20	1.93	2.10	0.17	8.5

Tab. 6.3 Měřené hodnoty mezní frekvence a šířky pásma pro monopól (2 GHz)

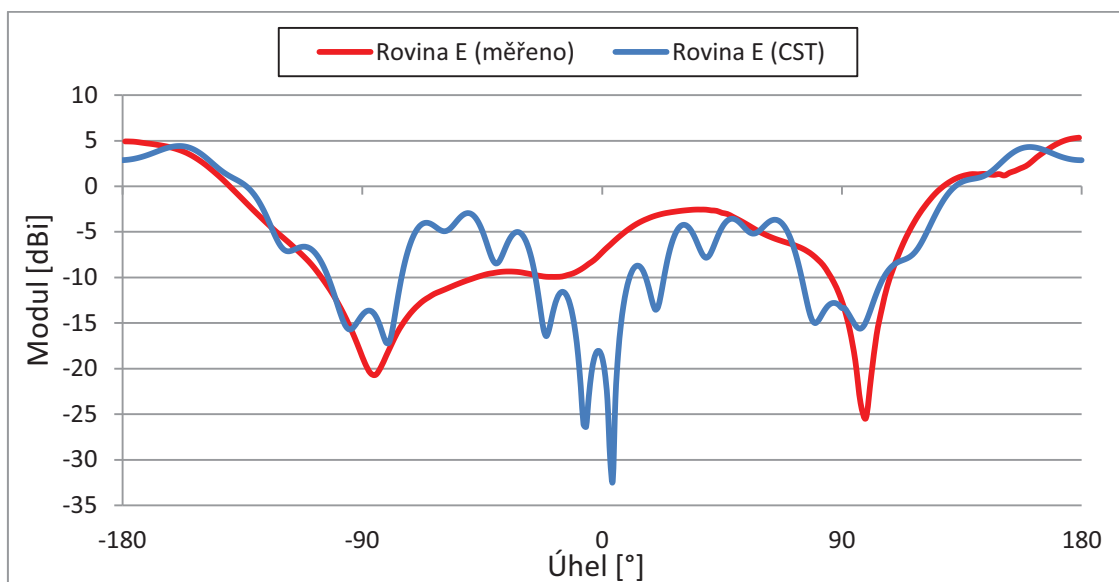
Směrové charakteristiky planárního monopólu jsou měřeny v obou rovinách (E, H). Měřené a simulované charakteristiky jsou opět normovány na stejnou maximální hodnotu. Zisk antény je přibližně 14 dB. Vzhledem k výrazné odlišnosti rovin E a H bylo možné všechny čtyři charakteristiky umístit do stejného grafu (obr. 6.10).

V rovině H září planární monopól přibližně stejně na všechny strany. Simulované hodnoty mají konstantnější průběh. U naměřených hodnot lze pozorovat jisté výkyvy, které jsou pravděpodobně způsobeny tím, že monopól není přímo ve vzduchu, ale je umístěn na substrátu. V rovině E anténa při úhlu -90° a $+90^\circ$ téměř nezáří. U naměřených hodnot lze pozorovat výrazně menší vyzařování v těchto bodech oproti simulaci. Naměřené hodnoty se tedy více blíží teoretickému předpokladu, než hodnoty simulované v programu CST.

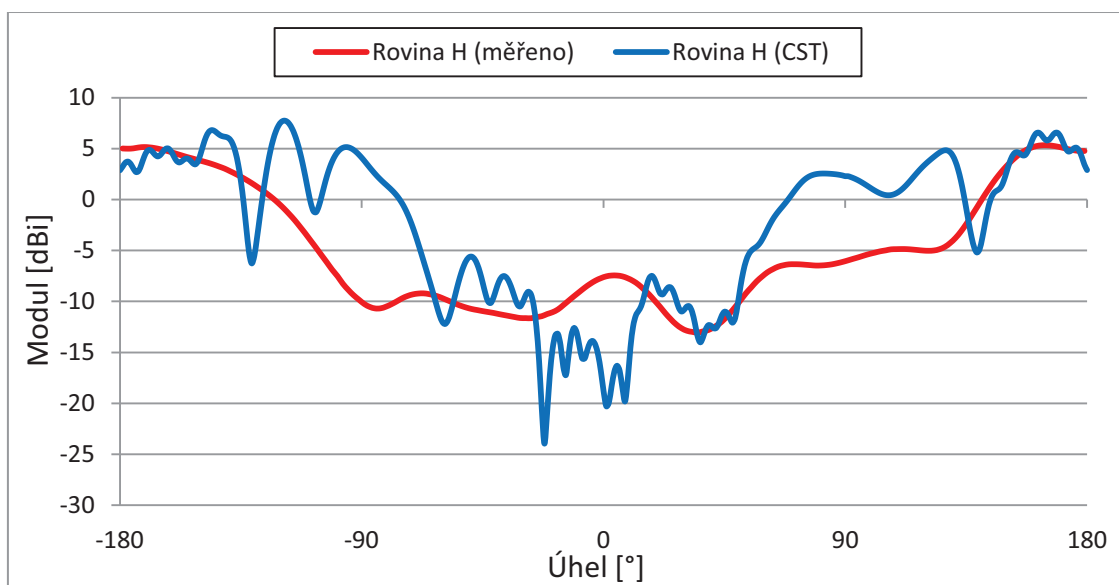


Obr. 6.10 Naměřené směrové charakteristiky planárního monopólu (2 GHz) ve volném prostoru

Měřené směrové charakteristiky antény vzdálené 15 mm od těla (obr. 6.11, obr. 6.12) vykazují oproti simulacím patrné rozdíly, ačkoliv jejich celkový charakter zůstal zachován. V rovině E je směrem k tělu znatelný pokles, avšak není tak výrazný jako při simulaci. V rovině H jsou měřené charakteristiky stálejší oproti simulaci. Průměrná hodnota je velmi podobná, avšak při simulaci je průběh proměnný a fluktuuje okolo hodnot získaných měření.



Obr. 6.11 Naměřené směrové charakteristiky planárního monopólu (2 GHz) vzdáleného 15 mm od těla

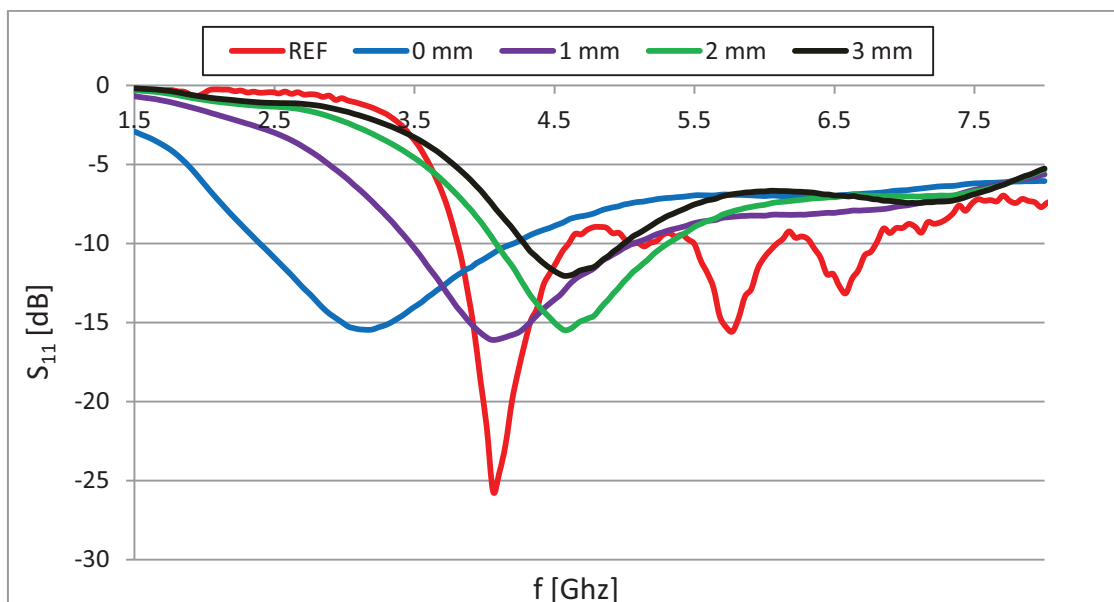


Obr. 6.12 Naměřené směrové charakteristiky planárního monopólu (2 GHz) vzdáleného 15 mm od těla

6.4 Planární monopól (4 GHz)

Poslední ověřovanou anténou je planární monopól naladěný na frekvenci 4 GHz. Oproti simulaci je na první pohled patrné (obr. 6.13), že parazitní rezonance na frekvenci okolo 6 GHz je za přítomnosti lidského těla potlačena. U referenční křivky je tato rezonance stále patrná, avšak v menší míře než při simulaci.

Křivky zde mají obdobný charakter, avšak nevycházejí již tak přesně jako v předchozím měření. Referenční křivka je oproti simulaci přesněji naladěna na frekvenci 4 GHz s hodnotu činitele odrazu o 5 dB nižší. Ostatní křivky jsou též frekvenčně posunuty (až o 0.5 GHz). Při vzdálenosti 2 a 3 mm anténa rezonuje až na frekvenci 4.5 GHz. Amplitudy modulu činitele odrazu jsou zde ještě výrazněji ovlivněny asymetrickými proudy. Zatímco v simulaci se mění až o 10 dB, při měření jsou pro 0, 1 a 2 mm téměř konstantní.



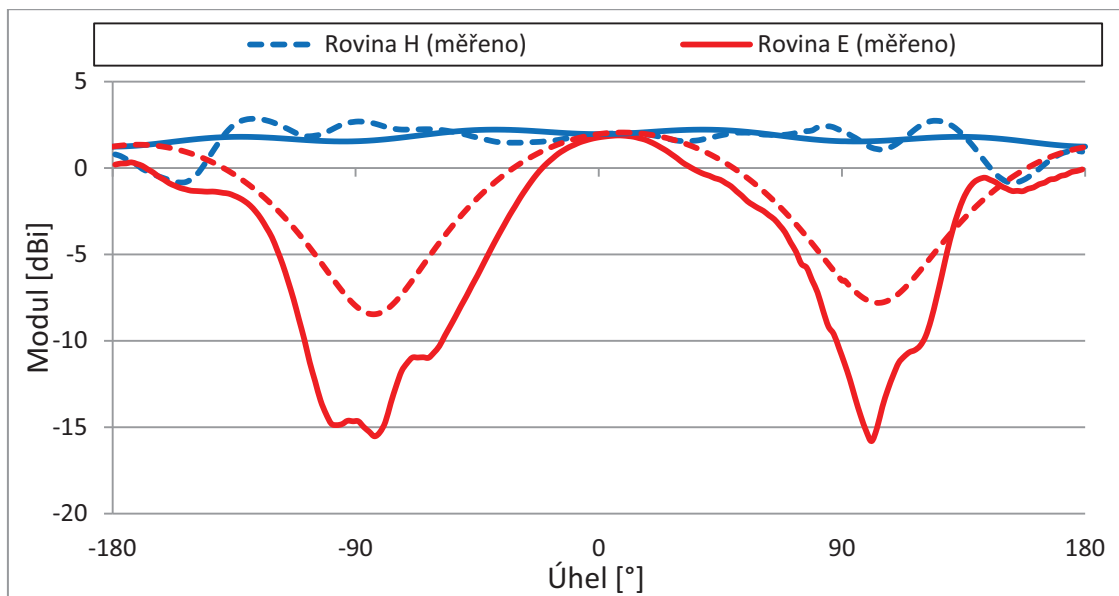
Obr. 6.13 Naměřená frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} na vzdálenosti planárního monopólu (4 GHz) od těla.

V tab 6.4 jsou opět zaznamenány hodnoty mezních frekvencí a šířky pásma. Oproti simulaci mají antény výrazně menší šířku pásma. Výjimku tvoří pouze anténa měřená ve volném prostoru.

l [mm]	f_{MIN} [GHz]	f_{MAX} [GHz]	BW [GHz]	BW [%]
REF	3.80	6.8	3	75
0	2.40	4.21	1.81	45.3
1	3.47	5.05	1.58	39.5
2	4.08	5.31	1.23	30.8
3	4.28	4.98	0.7	17.5

Tab. 6.4 Měřené hodnoty mezní frekvence a šířky pásma pro monopól (4 GHz)

Směrové charakteristiky (obr. 6.14) jsou obdobné jako u planárního monopólu na frekvenci 2 GHz. V rovině H je anténa všesměrová. V rovině E nezáří anténa v ose monopólu. Avšak oproti předchozí anténě je toto záření stále ještě patrné. Reálná antény opět v ose monopólu září výrazně méně, než při simulaci.



Obr. 6.14 Naměřené směrové charakteristiky planárního monopólu (4 GHz) ve volném prostoru

7 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo navrhnout, numericky modelovat a následně experimentálně ověřit různé typy antén v blízkosti lidského těla. V první části práce byly navrženy dvě flíčkové antény a dva planární monopóly. Nejprve byly parametry k realizaci antén spočítány a posléze tyto výsledky optimalizovány v programu CST Microwave Studio. Vliv lidského těla na antény se projevoval především změnou parametru S_{11} (impedanční přizpůsobení, frekvenční rozladění) a také změnou směrových charakteristik.

Jedním z důležitých parametrů, které byly simulací zjištěny, byla minimální možná vzdálenost od lidského těla, při které je anténa ještě schopna pracovat. Flíčková anténa na frekvenci 2 GHz (obr. 3.1) je lidským tělem ovlivňována nejvíce. Po přiblížení blíže než 12 mm je anténa vlivem těla impedančně nepřizpůsobená. Při zvýšení rezonanční frekvence flíčkové antény se tyto vlastnosti zlepšují. Flíček rezonující na frekvenci 4 GHz (obr. 3.6) má minimální možnou vzdálenost 6 mm. S klesající vlnovou délkou je tedy možné provozovat anténu blíže u lidského těla. Výrazné zlepšení nastává při použití planárních monopólů. V principu nejsou monopóly tak závislé na impedanci, jako flíčkové antény. Oba monopóly bylo možné provozovat ve vzdálenosti již přibližně 1 mm od lidského těla (viz obr. 3.9, obr. 3.12). Stejně tak jako flíčkové antény jsou monopóly na vyšší frekvenci méně ovlivněny lidským tělem.

Šířka pásma flíčkových antén se dle předpokladu pohybovala v rozmezí 0.5-2 % (tab. 3.1, tab. 3.2). Planární monopóly měly výrazně větší šířku pásma, především v těsné blízkosti u těla (tab. 3.3, tab. 3.4). Planární monopól naladěný na frekvenci 2 GHz měl šířku pásma 10-47 %. Oproti tomu planární monopól pracující na frekvenci 4 GHz měl vlivem parazitní rezonance v okolí frekvence 6 GHz šířku pásma výrazně větší a to od 85 % do 180 %.

Vzhledem k velké závislosti flíčkových antén na lidském těle byla modelována situace s použitím superstrátu. Výsledné zlepšení celkového impedančního přizpůsobení však bylo maximálně v řádu několika procent. Ačkoliv při porovnání výsledku (obr. 4.2) vypadá výsledné zlepšení lépe, je třeba brát v úvahu, že shodou okolností došlo přidáním superstrátu ke zdokonalení přizpůsobení celé antény (obr. 4.1). Jelikož na počátku práce byly antény simulovány na detailním modelu lidského těla, byly optimalizovány pro nižší hodnotu diskretizační mřížky. Při zvýšení hustoty diskretizační mřížky vykazovaly antény mírně zhoršené impedanční přizpůsobení.

Směrové charakteristiky všech antén splňují teoretické předpoklady. Menší nepřesnost nastává pouze v rovině E planárních monopólů. Zde byl očekáván větší pokles v ose monopólu.

Naměřené hodnoty kmitočtové závislosti činitele odrazu pro všechny (obr. 6.1, obr. 6.9, obr. 6.13), antény vyjma flíčku na frekvenci 4 GHz (obr. 6.5), vyšly ve shodě se simulací. Ačkoliv některé hodnoty byly frekvenčně či amplitudou modulu činitele odrazu mírně posunuty vůči simulaci, stále měly stejný charakter. U flíčkové antény na frekvenci 4 GHz odpovídaly naměřené hodnoty simulovaným hodnotám ve vzdálenosti přibližně 2 krát větší.

Obě flíčkové antény reálně rezonovaly na mírně vyšší frekvenci, než udává

simulace. Šířka pásma pro anténu na frekvenci 2 GHz (tab. 6.1) byla okolo 1 %, pro anténu naleděnou na 4 GHz (tab. 6.2) se šířka pásma oproti simulaci mírně zvětšila na 2 – 3 %. Planární monopóly neměly vzhledem k šířce pásma problémy s rozladěním. Šířka pásma oproti simulacím se poněkud snížila. Monopól na frekvenci 2 GHz (tab. 6.3) má šířku pásma 8.5 – 26.5 %, varianta na 4 GHz (tab. 6.4) pak 17 – 45 % (ve volném prostoru dokonce 75 %).

Směrové charakteristiky ve volném prostoru byly obdobné jako při simulaci. U flíčkových antén (obr. 6.4, obr. 6.8) se v rozmezí úhlu -135° až $+135^{\circ}$ téměř shodovaly. Na okrajích charakteristik (v okolí úhlů -180° a $+180^{\circ}$) pak vykazovaly menší nepřesnosti. Naměřené směrové charakteristiky planárních monopólů (obr. 6.10, obr. 6.14) v rovině H vykazovaly oproti simulacím mírně větší fluktuace. V rovině E se pak více přiblížily teoretickému předpokladu, že v ose monopólu anténa vůbec nezáří. Změřené směrové charakteristiky planárního monopólu na frekvenci 2 GHz vzdáleného 15 mm od lidského těla (obr. 6.11, obr. 6.12) měly obdobný charakter jako simulované charakteristiky. Jejich průběh byl však stabilnější a nevykazoval takové skokové změny jako při simulaci.

Jako nejvýhodnější se tedy ukazuje užití planárního monopólu na vyšší frekvenci, který je nejméně ovlivnitelný lidským tělem. V některých aplikacích však může být jeho širokopásmovost nevýhodou.

LITERATURA

- [1] RAIDA, Zbyněk a kol. *Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny Mikrovlnná technika* [online]. 2007 [cit. 2012-12-06]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>
- [2] Microstrip Patch Antenna. Brunel University LONDON [online]. 2012, s. 3, 06 July 2012 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: <http://www.brunel.ac.uk/sed/ece/research/wnc/microstrip-patch-antenna>
- [3] BALANIS, A. C. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2/E. New York: J. Wiley & Sons, 1996.
- [4] RAIDA, Zbyněk. Modelování flíčkových antén [online]. [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/pc_new/cv05.pdf
- [5] RAIDA, Zbyněk. Slovník pojmů: Koeficient odrazu. In: *Multimediální učebnice* [online]. 2010 [cit. 2012-12-03]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=koeficient_odrazu&bck=2-5-A
- [6] HUI. A new definition of mutual impedance for application in dipole receiving antenna arrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [online]. 2004, vol. 3, issue 1, s. 364-367 [cit. 2013-05-19]. DOI: 10.1109/LAWP.2004.841209. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1373975>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

f	Frekvence
ϵ	Permitivita
ϵ_{eff}	Efektivní permitivita
μ	Permeabilita
S_{11}	Činitel odrazu
G	Vodivost
R	Odpor
X	Reaktance
Z_0	Charakteristická impedance koaxiálního vedení
Δ	Efektivní zkrácení
D	Vnější průměr koaxiálního vedení
d	Vnitřní průměr koaxiálního vedení
A	Šířka pokovení (flíčku)

B	Délka pokovení (flíčku)
h	Tloušťka substrátu
Hg	Tloušťka pokovení

SEZNAM PŘÍLOH

A	Parametry použitých antén	39
A.1	Flíček (2 GHz)	39
A.2	Flíček (4 GHz)	39
A.3	Planární monopól (2 GHz).....	40
A.4	Planární monopól (4 GHz).....	40
B	Ilustrace modelovaných antén	40
B.1	Flíčková anténa (2 GHz).....	40
B.2	Flíčková anténa (2 GHz) se supersubstrátem	41
B.3	Planární monopól.....	41

A PARAMETRY POUŽITÝCH ANTÉN

A.1 Flíček (2 GHz)

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty jednotlivých parametrů při realizaci simulace v programu CST Microwave Studio.

Parametr	Hodnota [mm]	Popis
W	59.53	Šířka pokovení
L	48.19	Délka pokovení
G	100	Velikost čtverce zemnicí plochy / substrátu
D	4.2487	Vnější rozměr koaxiálního vedení
d	1.27	Vnitřní rozměr koaxiálního vedení
h	1.54	Tloušťka substrátu
H_g	0.03	Tloušťka pokovení
Y	16.24	Vzdálenost koaxiálního napájení od okraje flíčku
H	1	Tloušťka zemnicí plochy

Tab. 7.1 Parametry flíčku na frekvenci 2 GHz

A.2 Flíček (4 GHz)

V této a ve všech následujících tabulkách jsou uvedeny pouze rozměry pokovení (W , L), celková velikost desky (G) a vzdálenost koaxiálního napájení od okraje pokovení (Y). Všechny ostatní parametry (D , d , h , H_g , H) zůstávají neměnné pro všechny realizace.

Parametr	Hodnota [mm]	Popis
W	29.786	Šířka pokovení
L	23.22	Délka pokovení
G	80	Velikost čtverce zemnicí plochy / substrátu
Y	7.44	Vzdálenost koaxiálního napájení od okraje flíčku

Tab. 7.2 Parametry flíčku na frekvenci 4 GHz

A.3 Planární monopól (2 GHz)

Parametr	Hodnota [mm]	Popis
W	6	Šířka pokovení
L	42	Délka pokovení
G	100	Velikost čtverce zemnicí substrátu
Gnd	15	Délka zemnicí plochy

Tab. 7.3 Parametry planárního monopólu na 2 GHz

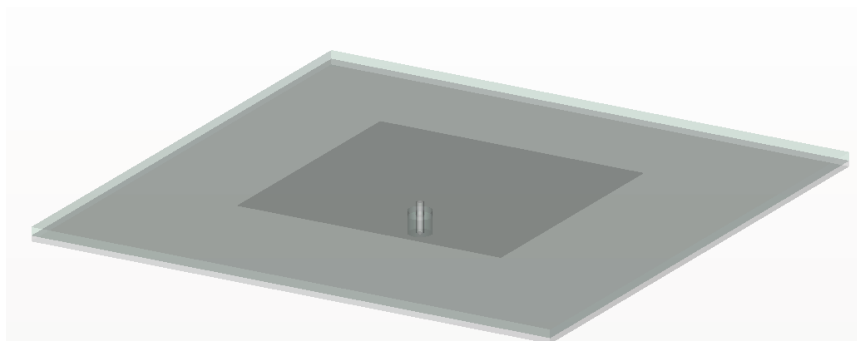
A.4 Planární monopól (4 GHz)

Parametr	Hodnota [mm]	Popis
W	6	Šířka pokovení
L	16.44	Délka pokovení
G	50	Velikost čtverce zemnicí substrátu
Gnd	4.61	Délka zemnicí plochy

Tab. 7.4 Parametry planárního monopóluna 4 GHz

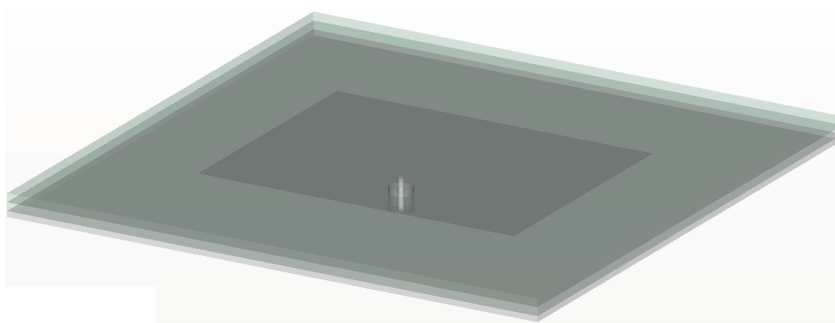
B ILUSTRACE MODELOVANÝCH ANTÉN

B.1 Flíčková anténa (2 GHz)



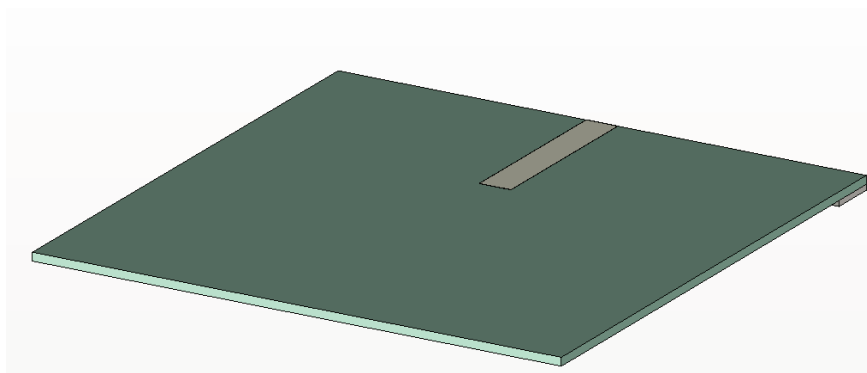
Obr. 7.1 Flíčková anténa (2 GHz)

B.2 Flíčková anténa (2 GHz) se superstrátem



Obr. 7.2 Flíčková anténa (superstrát)

B.3 Planární monopól



Obr. 7.3 Planární monopól