



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra biomedicínské techniky

**Návrh a realizace planárního štěrbinového
anténního elementu pro mikrovlnný
zobrazovací systém**

**Design and manufacture of planar slot
antenna element for microwave imaging
system**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Autor bakalářské práce: Jan Rédr

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Dr.-Ing. Jan Vrba, M.Sc.

Kladno 2018

Z a d á n í b a k a l á ř s k é p r á c e

Student: **Jan Rédr**
Obor: Biomedicínský technik
Téma: **Návrh a realizace planárního štěrbinového anténního elementu pro mikrovlnný zobrazovací systém**
Téma anglicky: Design and manufacture of planar slot antenna element for microwave imaging system

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V programu COMSOL Multiphysics vytvořte parametricky zadaný numerický model planárního štěrbinového anténního elementu se zemnicí rovinou pro mikrovlnný zobrazovací systém. Úpravou geometrie nastavte rezonanční frekvenci elementu na 1 GHz a na této frekvenci amplitudu koeficientu odrazu na hodnotu nižší než -10 dB. Studujte symetrii intenzity elektrického pole před aperturou antény. Vytvořte přizpůsobovací kapalinu a její dielektrické parametry změřte systémem DAK. Dále anténní element realizujte a změřte jeho koeficient odrazu při vyzařování do přizpůsobovací kapaliny. Porovnejte výsledky numerické simulace a měření.

Seznam odborné literatury:

- [1] C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics, ed. Solution Manual, Wiley, 1989, Chapter 2, ISBN 0471621943
[2] Xuyang Li, Body Matched Antennas for Microwave Medical Applications, 2014, 194 s., Ph.D. Thesis, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT). KIT Scientific Publishing.

Zadání platné do: 20.09.2019
Vedoucí: doc. Dr.-Ing. Jan Vrba, M.Sc.
Konzultant: doc. Ing. David Vrba, Ph.D.

.....
vedoucí katedry / pracoviště

.....
děkan

V Kladně dne 18.05.2018

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Návrh a realizace planárního šterbinového anténního elementu pro mikrovlnný zobrazovací systém“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně dne

.....

Jan Rédr

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval doc. Dr.-Ing. Janovi Vrbovi, M.Sc. za odborné vedení této bakalářské práce a rady k vypracování. Velké díky patří též těmto lidem: doc. Ing. Davidovi Vrbovi, Ph.D., Ing. Janovi Tesaříkovi a v neposlední řadě Ing. Ondřejovi Fišerovi za jejich cenné rady a připomínky.

Dále bych rád poděkoval svým rodičům za podporu, bez níž by tato práce nevznikla.

ABSTRAKT

Návrh a realizace planárního štěrbinového anténního elementu pro mikrovlnný zobrazovací systém

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací planárního štěrbinového anténního elementu pro mikrovlnný zobrazovací systém. V programu COMSOL Multiphysics byl anténní element navržen a následně byly jeho geometrické parametry upraveny tak, aby vypočítané vlastnosti splňovaly technické požadavky dané zadáním práce. Pracovní frekvenční pásmo, kdy koeficient odrazu poklesne pod -10 dB, je od 835 MHz do 1,2 GHz. Anténní element byl následně realizován a jeho koeficient odrazu byl změřen pomocí vektorového analyzátoru obvodů. Výsledek simulace byl porovnán s výsledkem měření.

Klíčová slova

Mikrovlnné zobrazování, štěrbinová anténa, koeficient odrazu

ABSTRACT

Design and manufacture of planar slot antenna element for microwave imaging system

This bachelor's thesis deals with the design and manufacturing of a planar slot antenna element for microwave imaging system. Antenna was both designed and simulated in computer simulation software COMSOL Multiphysics. Frequency of the operational band for reflection coefficient reaching below -10 dB level is from 835 MHz to 1,2 GHz. The antenna element was then manufactured and its reflection coefficient was measured by a vector network analyzer. Results of the simulation and measurement were compared.

Keywords

Microwave imaging, slot antenna, reflection coefficient

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	7
1 Úvod	8
1.1 Přehled současného stavu	8
1.2 Cíle práce	10
2 Anténní element pro zobrazovací systém	12
2.1 Pojem anténa.....	12
2.2 Typy antén	12
2.3 Vybrané anténní parametry.....	15
2.3.1 Charakteristika vyzařovaného EM pole	15
2.3.2 Impedanční přizpůsobení	16
2.3.3 Koeficient odrazu.....	17
2.3.4 Šířka pásma.....	18
2.4 On-body matched zobrazovací antény	20
3 Využití mikrovlnného zobrazování v medicíně	21
3.1 Účinky EM pole na biologickou tkáň.....	21
3.1.1 Tepelné účinky.....	21
3.1.2 Netepelné účinky	21
3.2 Mikrovlnné zobrazování.....	22
4 Návrh a simulace planární šterbinové antény	25
4.1 Převzatý anténní element	26
4.2 Návrh geometrie	26
4.3 Nastavení materiálů a materiálových konstant	36
4.4 Nastavení fyziky.....	37
4.5 Diskretizační mřížka.....	43
4.6 Výsledky simulací.....	44
4.6.1 Změny velikosti substrátu (l, w)	45
4.6.2 Změny šířky šterbiny.....	46
4.6.3 Změna rozměrů $ds1$ a $ds2$	47
4.6.4 Změna rozměrů ds	48

4.6.5	Frekvenční závislost koeficientu odrazu finálního anténního elementu	49
5	Realizace anténního elementu	51
5.1	Realizace vyleptání a prokovení substrátů	51
5.2	Zpracování anténního elementu	52
6	Výsledky měření	57
6.1	Měření dielektrických vlastností kapalného fantomu mozku	57
6.2	Měření koeficientu odrazu anténního elementu	59
6.3	Porovnání naměřeného a simulovaného průběhu koeficientu odrazu	61
7	Diskuze	64
8	Závěr	67
	Seznam literatury	68
	Seznam obrázků	70
	Seznam příloh	72

Seznam symbolů a zkratk

Zkratka	Význam
CMP	Cévní mozková příhoda
MRI	Zobrazování magnetickou rezonancí
CT	Počítačová tomografie
EM	Elektromagnetický
MWI	Mikrovlnné zobrazování
S_{11}	Koeficient odrazu
DAK	Souprava na měření dielektrických vlastností
VLF	Velmi nízké frekvence
LF	Nízké frekvence
MF	Střední frekvence
HF	Vysoké frekvence
VHF	Velmi vysoké frekvence
UHF	Ultra vysoké frekvence
SHF	Super vysoké frekvence
EHF	Extrémně vysoké frekvence
Z_S	Impedance zdroje (Ω)
Z_L	Impedance zátěže (Ω)
Z_G	Impedance generátoru (Ω)
Z_A	Impedance antény (Ω)
dB	Decibel
SAR	Specifická míra absorpce
SMA	Sub-miniatur A (typ koaxiálního konektoru)
PEC	Perfektní elektrický vodič
E	Intenzita elektrického pole (V/m)
DPS	Deska plošných spojů
DWG	Nativní formát souborů AutoCAD
PVC	Polyvinylchlorid
ϵ_r	Relativní permitivita (-)
σ	Měrná elektrická vodivost ($S \cdot m^{-1}$)
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací planárního šterbinového anténního elementu, který by mohl být poté implementován do experimentálního zobrazovacího systému, kterým disponuje vědecký tým bio-elektromagnetismu při Fakultě biomedicínského inženýrství Českého vysokého učení technického v Praze, a na kterém se momentálně provádí výzkum včasné a správné detekce cévní mozkové příhody (CMP).

Motivací k výzkumu v oblasti mikrovlnného zobrazování je například zdoluhavá diagnostika cévní mozkové příhody. CMP postihne celosvětově 15 milionu lidí ročně, z nichž 5 milionů na toto onemocnění umře. [1] Dále se usuzuje, že počet postižených lidí touto kardiovaskulární chorobou bude v následujících letech prudce narůstat. Další oblastí zájmu je vyvinutí bezpečnější zobrazovací metody, která by oprostila pacienty od radiační zátěže, a jejíž pořizovací a provozní náklady by byly levnější.

1.1 Přehled současného stavu

Mezi konvenční zobrazovací metody, které se používají v medicínské praxi, patří například MRI (*Magnetic Resonance Imaging*), CT (*Computed Tomography*), Sonografie (zobrazení pomocí ultrazvuku), mamografie atd. Každá z těchto konvenčních metod je dostatečně přesná a citlivá pro své spektrum používání, nicméně každá z těchto výše uvedených metod má i svá úskalí.

Magnetická rezonance, například, je šetrná k pacientovi, jelikož k zobrazování je použito výhradně EM pole, které nezatěžuje pacienta radiační zátěží ionizujícího záření. Problémy této metody leží hlavně ve velkých pořizovacích nákladech spojených s počáteční koupí magnetické rezonance, vybudování ekvivalentního zázemí pro magnetickou rezonanci a ve finanční náročnosti jejího následného provozu. Magnetickou rezonanci můžeme tedy nalézt pouze ve špičkových nemocničních zařízeních v České Republice. CT a ostatní přístroje, které zobrazují na bázi ionizujícího záření, jsou sice cenově

dostupnější a v nemocničních zařízeních je nalezneme běžně, ale pacienti jsou vystavováni nadbytečné radiační zátěži. Radiačně bezpečná zobrazovací metoda je bezesporu Sonografie, jejímuž vývoji a zlepšování je vynakládáno čím dál tím větší množství prostředků, má atributy bezpečného zobrazovacího fyzikálního principu a je i cenově dostupná, každopádně ultrazvuk se ve velké míře odráží od určitých tkání (například kostní tkáně) a tím vzniká tzv. akustický stín.

Mikrovlnné zobrazování (MWI) je relativně mladá diagnostická zobrazovací metoda, která používá elektromagnetické vlnění z mikrovlnné části spektra. K zobrazování se využívá rozdílných dielektrických vlastností (permitivity a vodivosti) různých druhů tkání a tkáňových struktur. Tato metoda je zatím v experimentálním stádiu, ale již byly podniknuty pokusy tento zobrazovací systém aplikovat do praxe.

Používání mikrovlnného zobrazování problémy a rizika spojená s konvenčními typy zobrazovacích metod úplně nebo částečně eliminuje. Mikrovlnné systémy v klinické praxi nepoužívají ionizující záření a vyšetření mikrovlnami je pro pacienty snesitelnější daleko více než vyšetření pomocí CT, mamografie či MRI. Další velká výhoda MWI je, že zobrazovací zařízení může být velice mobilní s malými rozměry.

Mnoho vědeckých týmů, které se zabývají MWI, se soustředí na ranou diagnostiku karcinomu prsu. Současná metoda, *mamografie*, používá k zobrazení ionizující záření a je tím pádem nebezpečná, nehledě na fakt, že samotné vyšetření může být pro některé pacienty bolestivé.

Další zajímavý výzkum velké části vědeckých týmů spočívá ve včasné a správné diagnostice CMP a intrakraniálního krvácení. Hlavním aspektem tohoto výzkumu je vytvoření mobilního zobrazovacího systému, který by byl součástí výbavy sanitky, a který by uměl sám detekovat a klasifikovat CMP na základě vyhodnocení naměřených dat.

Prvotní návrh anténního elementu byl převzat z disertační práce [2].

1.2 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je vytvoření parametricky zadaného numerického modelu anténního elementu v programu COMSOL Multiphysics, a následně úpravou geometrie naladit rezonanční frekvenci anténního elementu na 1 GHz. Koeficient odrazu S_{11} má při této rezonanční frekvenci být nižší než -10 dB. Dále je nutné vytvořit přizpůsobovací kapalinu, jejíž dielektrické parametry budou změřeny systémem DAK. Anténní element je nutné realizovat, změřit jeho koeficient odrazu při vyzařování do fantomu mozkové tkáně a porovnat výsledky měření s výsledky simulace.

Teoretická část

2 Anténní element pro zobrazovací systém

2.1 Pojem anténa

Anténních definic je nepřehledné množství. Anténou můžeme nazývat jakýkoliv převodní člen, který převádí EM vlny na elektrickou energii a naopak. Nezákladnější dělení antén je dle výše uvedené definice na antény vysílací a přijímací. Vysílací anténa převádí elektrický signál na EM vlny a vyzařuje je do okolí. Přijímací anténa je založena na přesně opačném principu, převádí přijaté EM vlny na elektrický signál. Důležité je zmínit, že jeden anténní element může být zároveň vysílací i přijímací zařízení. [3]

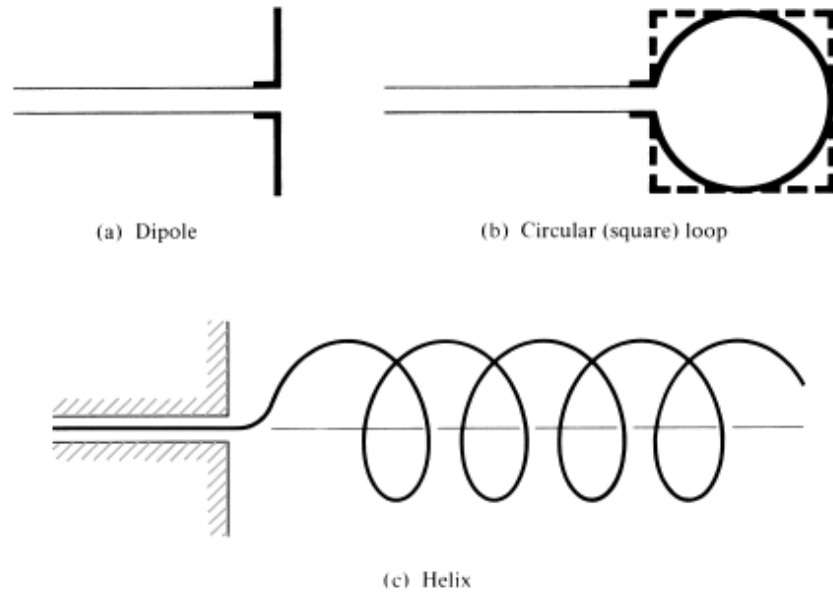
2.2 Typy antén

Obecné rozdělení antén je dáno na základě dvou hlavních parametrů:

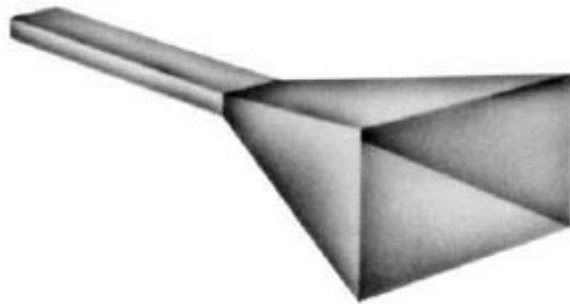
- fyzická struktura antény.
- operační frekvence antény.

Podle fyzické struktury dělíme antény na:

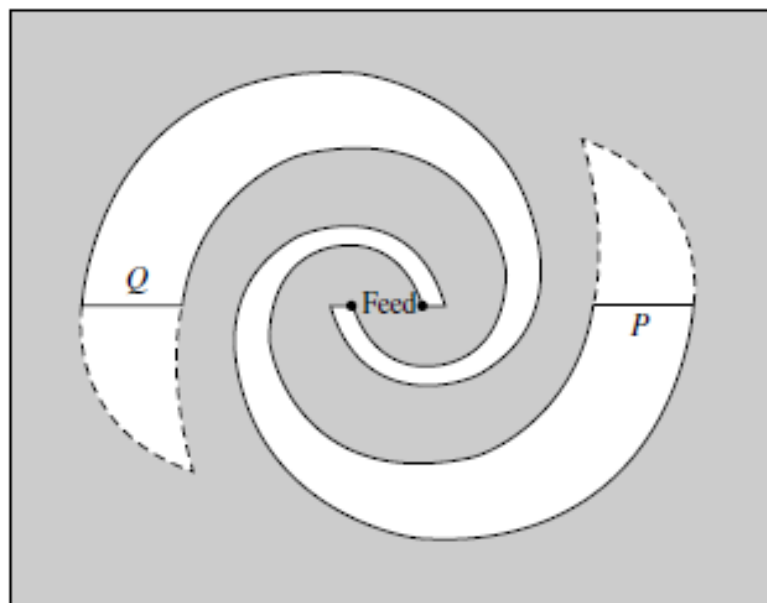
- drátové antény (*wire antennas*).
- vlnovodné antény (*aperture antennas*).
- flíčkové antény (*patch antennas*).
- reflektorové (*reflector antennas*).
- anténní čočky (*lens antennas*).
- mikropáskové antény (*microstrip antennas*) a mnoho dalších. [3]



Obr. 2.1 Různé typy drátových antén. (a) dipólová anténa, (b) kruhová anténa, (c) anténa tvaru šroubovice. [4]



Obr. 2.2 Vlnovodná anténa. [4]



Obr. 2.3 Spirální štěrbinová anténa. [4]

Podle pracovních frekvencí dělíme antény dle tabulky 2.1.

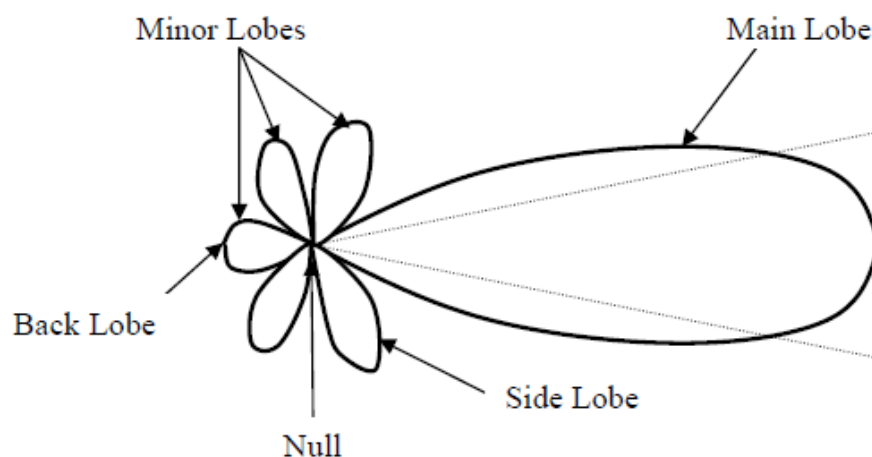
Tab. 2.1 Rozdělení antén dle operační frekvence. [6]

Kmitočtový rozsah	Anglický název	Zkratka
3 - 30 kHz	Very Low Frequency	VLF
30 - 300 kHz	Low Frequency	LF
0,3 - 3 MHz	Medium Frequency	MF
3 - 30 MHz	High Frequency	HF
30 - 300 MHz	Very High Frequency	VHF
0,3 - 3 GHz	Ultra High Frequency	UHF
3 - 30 GHz	Super High Frequency	SHF
30 - 300 GHz	Extremely High Frequency	EHF
0,3 - 3 THz		

2.3 Vybrané anténní parametry

2.3.1 Charakteristika vyzařovaného EM pole

Pokud je anténa ve vyzařovacím módu, vyzařuje nějaké charakteristické EM pole, které můžeme popsat matematickou funkcí nebo lépe, může být graficky znázorněno jako funkce směrových souřadnic. Jestliže chceme znát intenzitu EM pole, které je vyzařováno, mluvíme o tzv. *field pattern* charakteristice, která je obecně zobrazena na obrázku 2.4.



Obr. 2.4 Field pattern. Zdroj: https://www.researchgate.net/figure/Field-pattern-of-a-directional-antenna57_fig3_316106468

Field pattern charakteristika reprezentuje velikost elektrického či magnetického pole.

Z obrázku 2.4 je zřejmé, že *field pattern* můžeme dále specifikovat na hlavní, postranní a zadní laloky (*main, side a back lobes*). [4]

2.3.2 Impedanční přizpůsobení

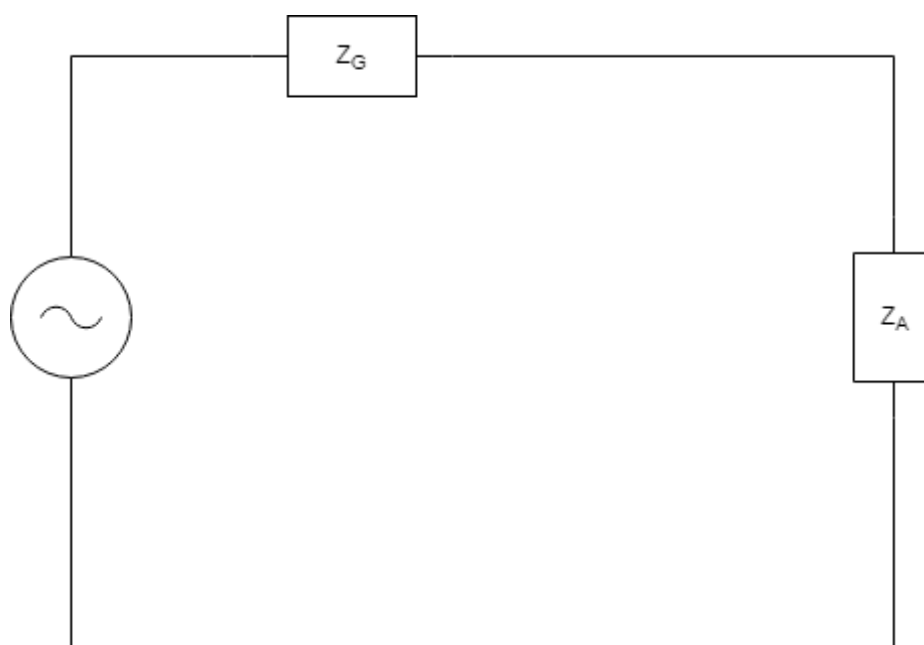
Impedančním přizpůsobením se nazývá proces, při kterém se snažíme o to, aby impedance zdroje byla co nejvíce shodná s impedancí zátěže. V situaci, kdy se impedance shodují, dosahujeme nejvyššího možného výkonu, který se přenese ze zdroje do zátěže.

$$Z_S = Z_L, \quad (2.1)$$

kde Z_S je impedance zdroje a Z_L je impedance zátěže.

Impedanční přizpůsobení je velice důležité při návrhu antén, jelikož v případě, že není provedeno správně, dochází k odražení části výkonu EM vlny od antény a ta se pak vrací zpět do generátoru. Ztracený výkon znamená snížení efektivity přístroje a v případě používání vyšších výkonů může vyústit až ve zničení generátoru.

V anténní teorii se míra impedančního přizpůsobení jedné antény může vyjádřit takzvaným koeficientem odrazu, respektive S_{11} parametrem. [6, 7]



Obr. 2.5 Schéma obvodu s vyznačenou impedancí generátoru (Z_G) a impedancí antény (Z_A). Zdroj: autor.

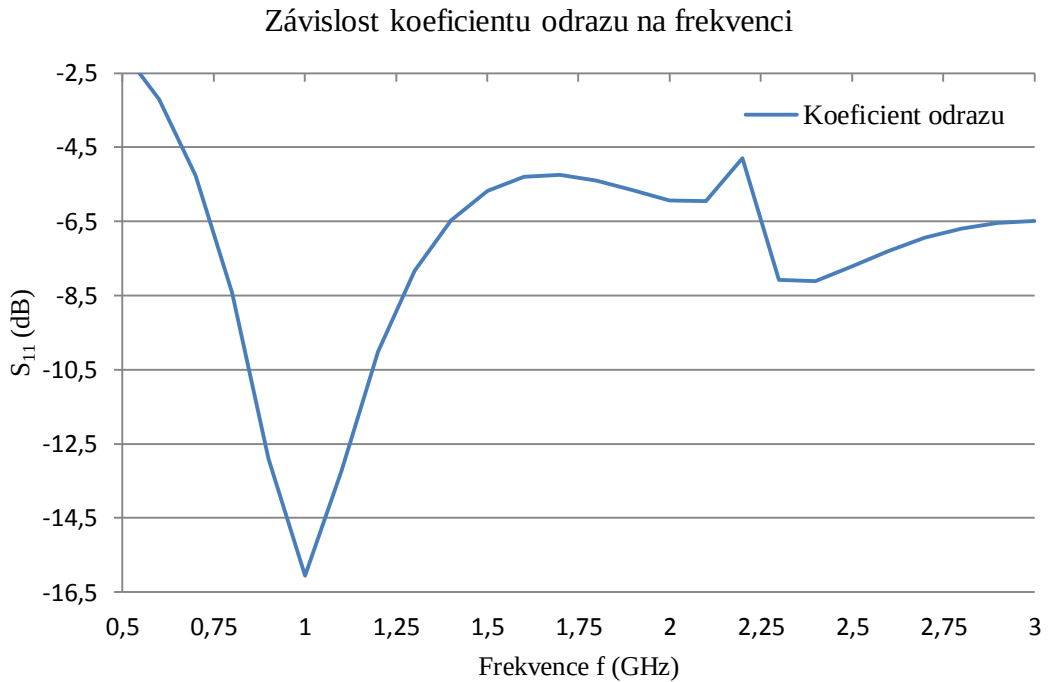
V případě špatně impedančně přizpůsobeného obvodu dochází k těmto problémům [4, 6]:

- vzniku stojatých vln mezi generátorem a anténou.
- snížení vyzářeného výkonu.
- riziku poškození generátoru.

2.3.3 Koeficient odrazu

Koeficient odrazu, též S_{11} parametr, je veličina daná poměrem veličina dána poměrem komplexních amplitud odražené a dopadající napěťové vlny, která značí, jaká část dopadajícího výkonu na anténu se odrazí zpět ke generátoru a s jakým fázovým posuvem. Velmi často se S_{11} parametr vyjadřuje v jednotkách dB (informace pouze o poměru amplitud) a je záhodno, aby byl co nejnižší. Cílem této bakalářské práce je navrhnout a realizovat anténní element, který má na frekvenci 1 GHz koeficient odrazu nižší než -10 dB, což znamená, že pokud na anténu z generátoru dopadne výkon 1 W, odrazí se méně než 0,1 W. [7]

Obecně se koeficient odrazu vynáší do grafu v závislosti na frekvenci, jelikož anténa může pracovat nejen na jedné izolované frekvenci nýbrž v určitém frekvenčním pásu resp. určitých frekvenčních pásmech. [2]



Obr. 2.6 Závislost koeficientu odrazu na frekvenci. Zdroj: autor.

Hodnoty koeficientu odrazu jsou provázány s tím, jak je daný anténní obvod dobře nebo špatně impedančně přizpůsoben. Toto shrnutí je uvedeno v tabulce 2.2.

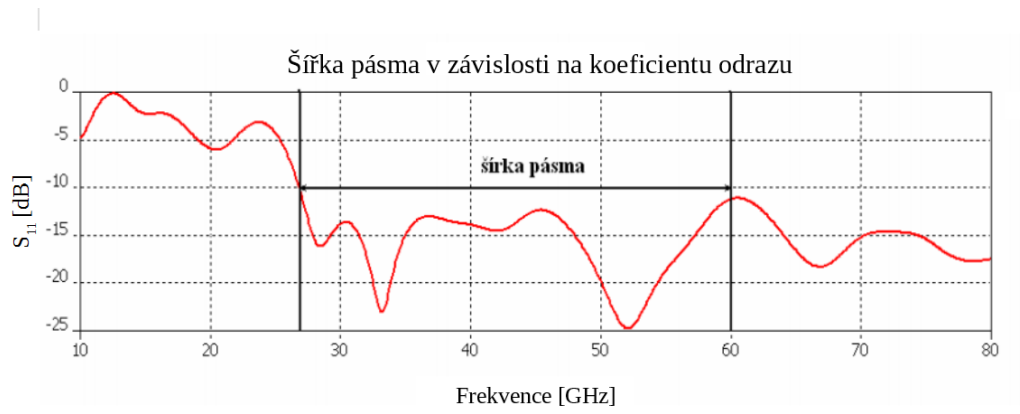
Tab. 2.2 Třídy impedančního přizpůsobení pro různé koeficienty odrazu. [8]

Koeficient odrazu [dB]	Impedanční přizpůsobení
-6	Okrajové
-10	Dobré
-14	Vynikající
-20	Excelentní

2.3.4 Šířka pásma

Šířka pásma (*bandwidth*) je charakteristika antény, která určuje interval frekvencí, na kterých anténa vykazuje určité vlastnosti. Šířku pásma lze obecně určit v závislosti na mnoha parametrech (například koeficient odrazu či tvarová změna vyzařovaného EM pole v daném pásmu frekvencí). V této práci se určuje šířka pásma dle koeficientu odrazu. Pro šířku pásma tedy platí, že se jedná

o pásmo frekvencí, kdy koeficient odrazu poklesne pod -10 dB, a kdy je anténní obvod dobře impedančně přizpůsoben, dle tabulky 2.2, a nedochází k nežádoucím událostem, které jsou s impedančně nepřizpůsobeným obvodem spojeny. [4]



Obr. 2.7 Šírka pásma definovaná pomocí koeficientu odrazu v závislosti na frekvenci. [9]

2.4 On-body matched zobrazovací antény

Anténní element pro mikrovlnný zobrazovací systém musí splňovat určité parametry. Jedním z nich je tvar, který by měl být planární, aby mohl být co největší plochou umístěn na povrch (kůži) pacienta, čímž docílíme přímého vyzářování do těla pacienta a dopravíme do těla více energie, čímž získáváme silnější signál. [2]

Dalšími parametry, které musí splňovat anténní element, aby byl vhodný pro mikrovlnné zobrazování, jsou: [2]

- **Operační frekvence**

Pro mikrovlnný zobrazovací systém, který se využívá na Fakultě biomedicínského inženýrství Českého vysokého učení technického v Praze, byla zvolena operační frekvence 1 GHz, což je kompromis mezi rozlišovací schopností zobrazovacího systému a hloubkou vniku EM vln. K zobrazování mozku je lepší i nižší frekvence než 1 GHz.

- **Šířka pásma**

Šířka pásma by měla být co možná největší, aby bylo možné korigovat rozlišovací schopnost zobrazovacího systému a hloubku průniku EM vln.

- **Koeficient odrazu**

O koeficientu odrazu se zmiňuje kapitola 2.3.3.

3 Využití mikrovlnného zobrazování v medicíně

3.1 Účinky EM pole na biologickou tkáň

Fyziologické účinky EM pole nejsou dodnes zcela objasněny a závisí nejen na fyzikálních parametrech pole, ale také na vlastnostech organismu. Obecně můžeme projevy EM pole na organismus rozdělit na dva hlavní projevy, tepelné a netepelné. [10]

3.1.1 Tepelné účinky

Tepelné účinky se odvíjí od absorbované energie a na hloubce vniku EM pole. Platí, že čím vyšší je pracovní frekvence, tím je menší hloubka vniku EM pole do tkáně. Výsledný vznik tepla je také závislý na rozměru ozařované struktury a na možnostech ochlazování těchto struktur (průtokem krve). Tohoto efektu se využívá hlavně v mikrovlnné hypertermii. [10, 11]

3.1.2 Netepelné účinky

Netepelnými účinky rozumíme přímé účinky EM pole, kdy EM indukci vznikají v ozařovaných tkáních iontové proudy. Tyto iontové proudy ovlivňují některé vlastnosti buněčných membrán, membránovou permeabilitu a dráždivost.

V dnešní době jsou ustanoveny hygienické normy měrného absorbovaného výkonu SAR. Nutno podotknout, že zatím nebyly prokázány škodlivé účinky EM pole na biologickou tkáň. [10, 11]

3.2 Mikrovlnné zobrazování

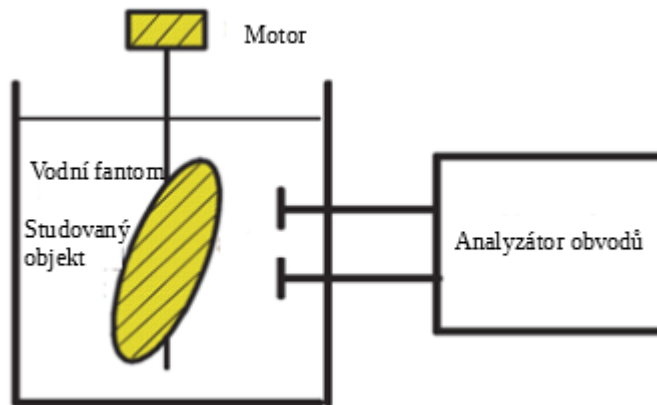
Mikrovlnné zobrazování je velmi perspektivní diagnostická metoda, která se momentálně nachází ve stádiu experimentálního vývoje. Tato metoda zobrazování je založena na aplikaci neionizujícího EM záření z mikrovlnné části spektra. Samotný princip zobrazování využívá rozdíly dielektrických vlastností, jako je relativní permitivita ϵ_r (-) a měrná elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$) mezi rozdílnými biologickými strukturami, což ovlivní i šíření EM vln těmito odlišnými prostředími. Nejenom, že můžeme určit dielektrické vlastnosti jednotlivých biologických struktur, ale i samotné hodnoty dielektrických vlastností mohou poukázat na různé specifické patologie (maligní a zdravá tkáň). [12]

Momentálně je kladen velký důraz na výzkum mikrovlnného zobrazování v oblastech detekce karcinomu prsu a včasného a správného vyhodnocení CMP. Mamografie jako dnes běžná metoda vyšetřování karcinomu prsu je nevhodná, protože je to metoda založená na aplikaci ionizujícího záření, není příliš přesná a je i nepříjemná z hlediska pohodlí pacienta. V této oblasti výzkumu již bylo publikováno mnoho studií, které ukázaly, že takováto diagnostika karcinomu prsu přes mikrovlnný zobrazovací systém je velice slibnou náhradou mamografie.

Momentální rychlost detekce CMP je neuspokojivá, proto je snaha vyvinout zobrazovací systém menších rozměrů, který by mohl být součástí sanitních vozů, a se kterým by mohli zasahující záchranáři provést vyšetření přímo na místě. V tomto případě je nutné, aby přístroj uměl sám vyhodnotit příčinu CMP a na základě poskytnutých informací by záchranář mohl zvolit adekvátní léčbu. [2]

Výzkumem v oblasti včasného a správného vyhodnocení CMP se zabýváme i v rámci vědeckého týmu Bio-elektromagnetismu na Fakultě biomedicínského inženýrství Českého vysokého učení technického v Praze.

Obecné uspořádání soustavy pro MWI je zobrazeno na obrázku 3.1. Soustava je tvořena sledovanou strukturou, která je ponořena do vodního fantomu, vysílací a přijímací anténou a motorem, který může otáčet sledovaným objektem nebo vysílací anténou. Přijímací anténa se otáčí okolo sledovaného objektu a zachytává odražené EM vlny sledovanou strukturou. [13]



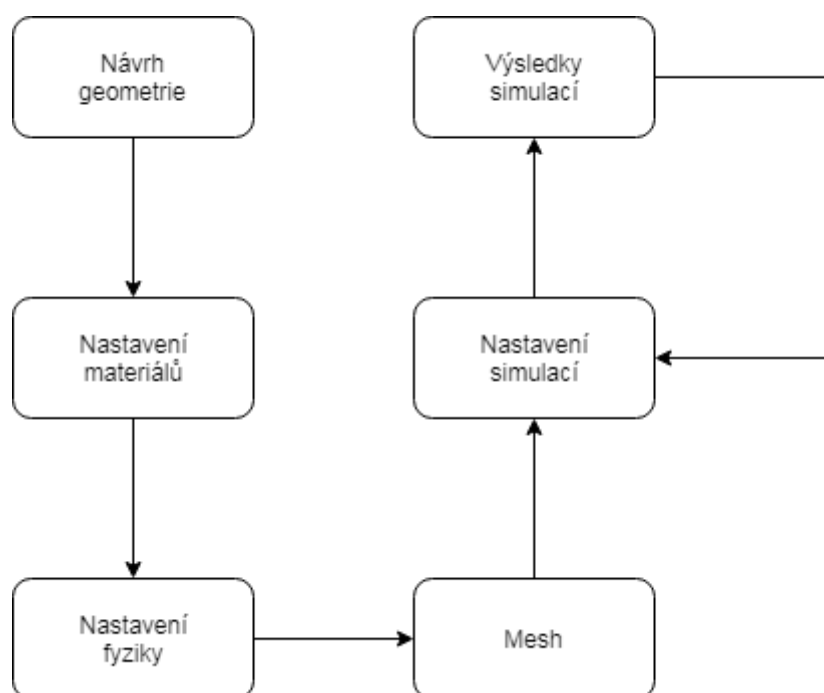
Obr. 3.1 Obecné uspořádání soustavy pro MWI. [11]

Praktická část

4 Návrh a simulace planární šěrbinové antény

Veškerá práce, od namodelování anténního elementu až po jednotlivé simulace, byla prováděna v prostředí COMSOL Multiphysics verze 5.1. Průběh návrhu anténního elementu může být rozdělen do několika podkategorií:

- 1) Návrh geometrie antény
- 2) Nastavení materiálu a materiálových konstant
- 3) Nastavení fyzikálních parametrů, které se podílí na šíření EM vln
- 4) Mesh anténní geometrie
- 5) Nastavení simulací
- 6) Vyhodnocení simulací



Obr. 4.1 Obecný vývojový diagram návrhu a optimalizace struktury šěrbinového anténního elementu v numerickém simulátoru. Zdroj: autor.

4.1 Převzatý anténní element

Předloha pro modelovaný anténní element pochází z [2]. Jedná se o motýlkovou štěrbinovou anténu, jež je tvořena jedním substrátem, mikropáskovým vedením aperutou antény a kapacitní vazbou mezi mikropáskovým vedením a aperтурой.

Převzatý model byl modifikován přidáním jedné vrstvy substrátu, zemnicí roviny, nahrazením kapacitní vazby dvěma prokvy. Mikropáskové vedení bylo změněno na symetrické páskové vedení.

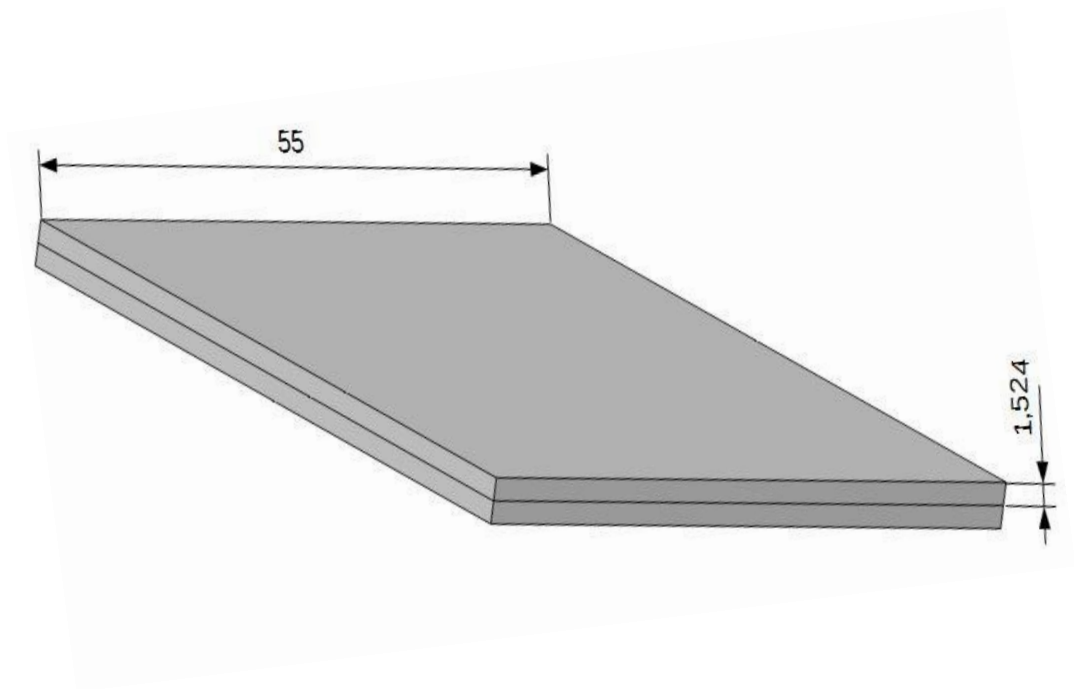
4.2 Návrh geometrie

Návrh geometrie anténního elementu byl započat nakreslením dvou čtvercových substrátových jednotek, které byly symetricky uloženy na sebe.

Rozměry substrátu jsou uvedeny v tabulce 4.1 a následně znázorněny na obrázku 4.2.

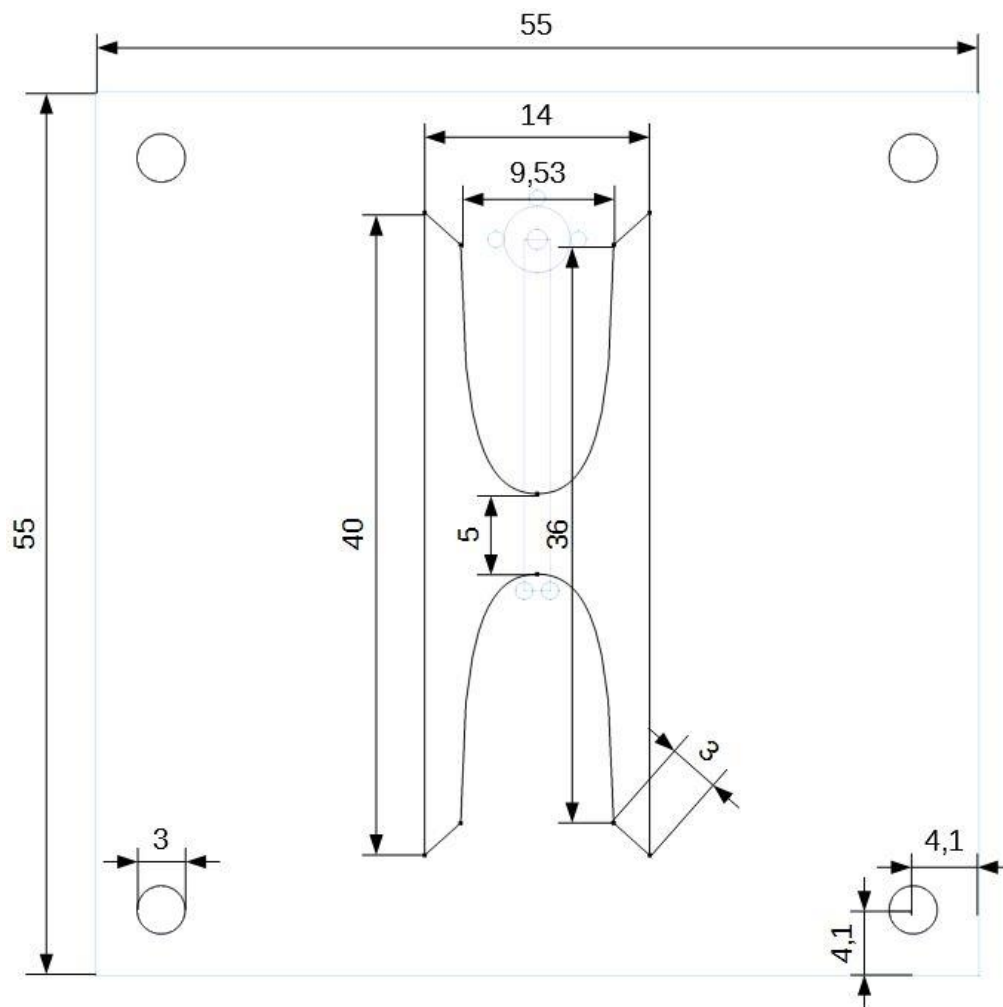
Tab. 4.1 Rozměry substrátových jednotek

Rozměry substrátu	
výška (mm)	1,524
délka strany a (mm)	55



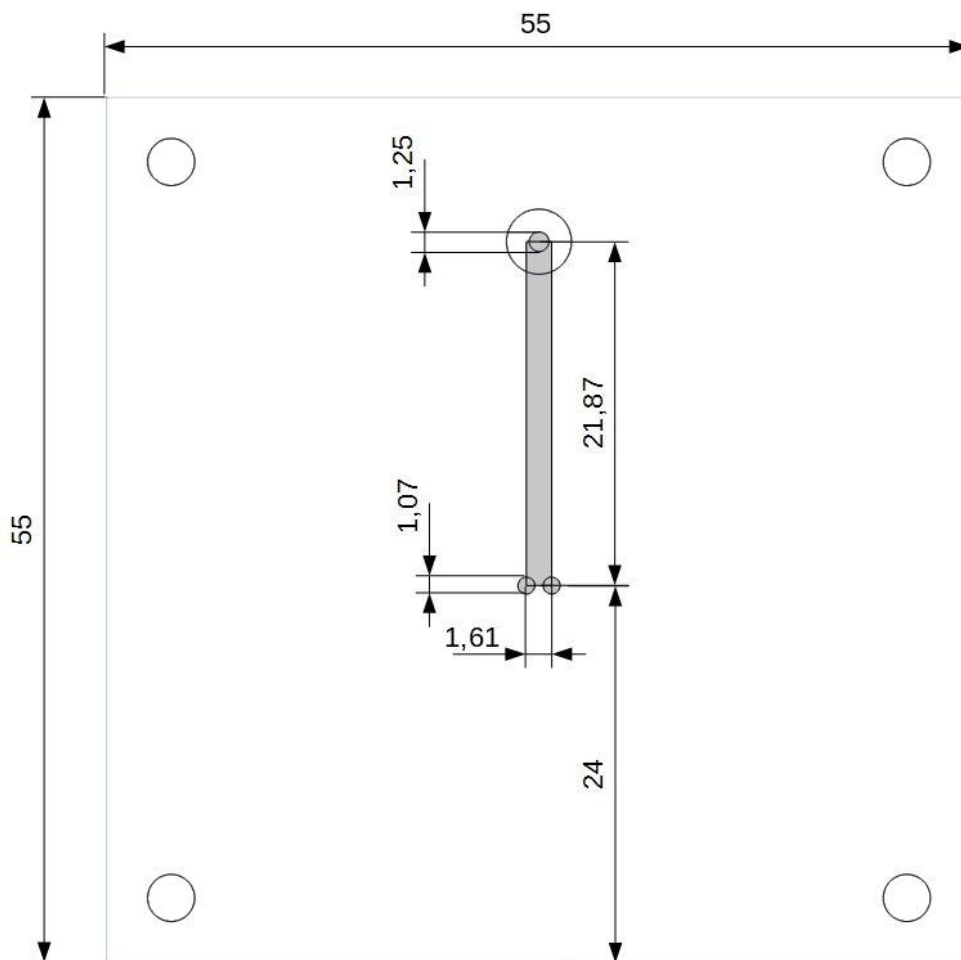
Obr. 4.2 Rozměry substrátů. Zdroj: autor.

Následně byla nakreslena vrchní vyzařovací rovina anténního elementu, prvotní rozměry geometrie jsou převzaty z [2], na obrázku 4.3 je již finální podoba vyzařovací roviny anténního elementu, která byla zaslána do výroby.



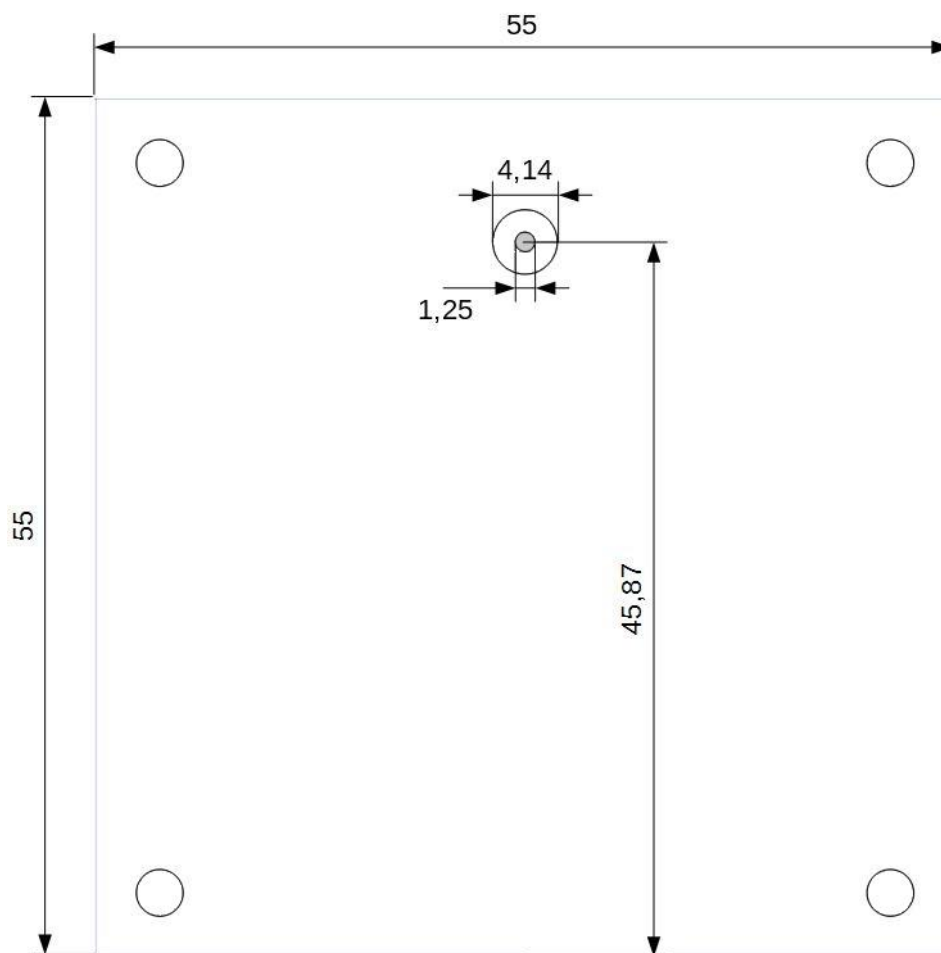
Obr. 4.3 Vyzařovací rovina anténního elementu. Zdroj: autor.

Posléze bylo do roviny mezi substráty vykresleno symetrické páskové vedení o charakteristické impedanci 50Ω , reprezentováno na obrázku 4.4.



Obr. 4.4 Rovina mezi substráty se symetrickým páskovým vedením. Zdroj: autor.

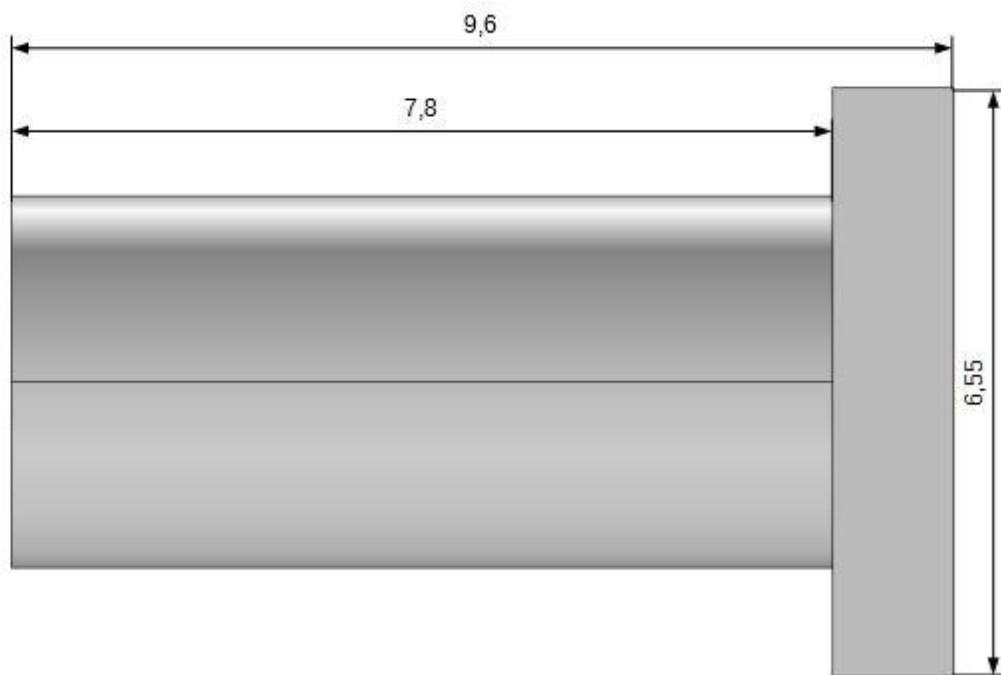
Jako poslední byla vykreslena zemnicí rovina, na kterou byl následně připojen koaxiální konektor.



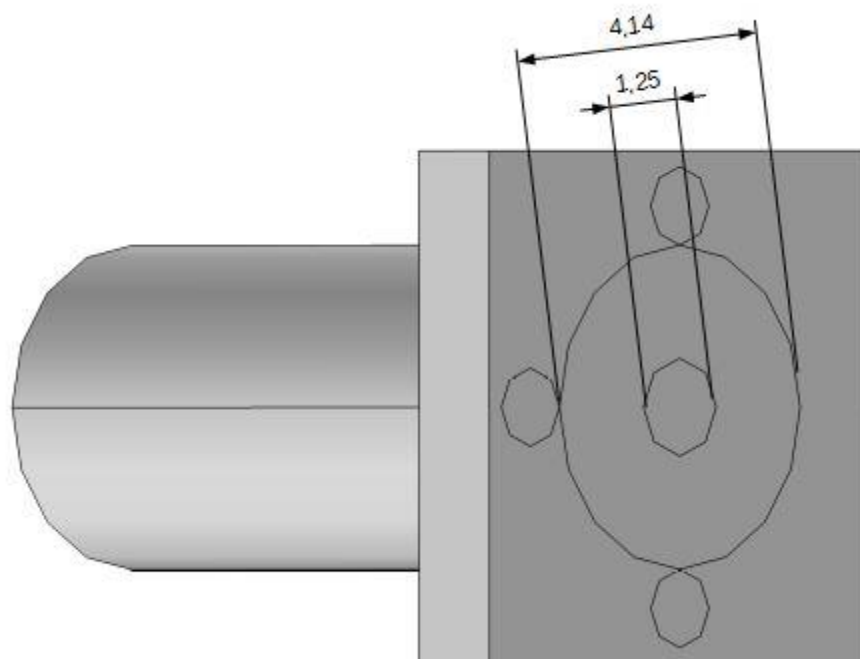
Obr. 4.5 Spodní zemnicí rovina anténního elementu. Zdroj: autor.

Vyobrazená a okótovaná kružnice na obrázku 4.5 značí místo připojení koaxiálního konektoru.

Posléze byl vytvořen model koaxiálního konektoru, kterým se uskutečňuje napájení anténního elementu. Podoba konektoru odpovídá koaxiálnímu konektoru SMA, kde poloměr vnitřního vodiče je 0,625 mm, poloměr vnějšího vodiče je 2,07 mm, celková výška konektoru je 9,6 mm a výška konektorové hlavičky je 1,35 mm. Impedance tohoto koaxiálního konektoru je $Z_{\text{koax}} = 50 \Omega$.



Obr. 4.6 Koaxiální konektor, pohled z boku. Zdroj: autor.

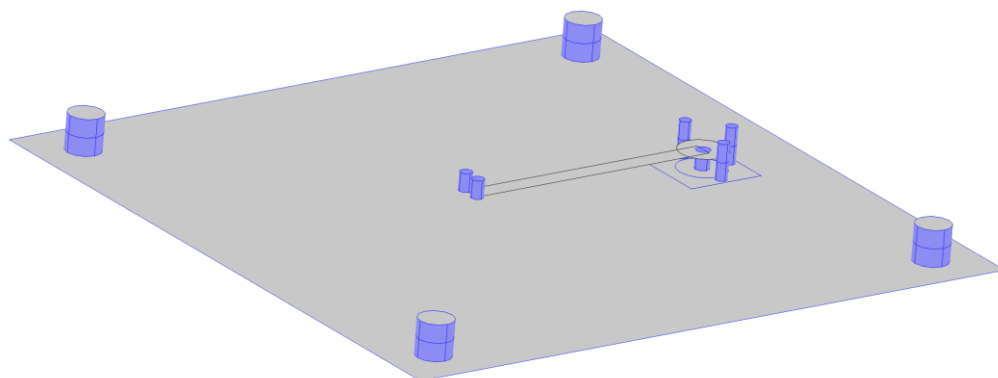


Obr. 4.7 Koaxiální konektor, natočený profil. Zdroj: autor.

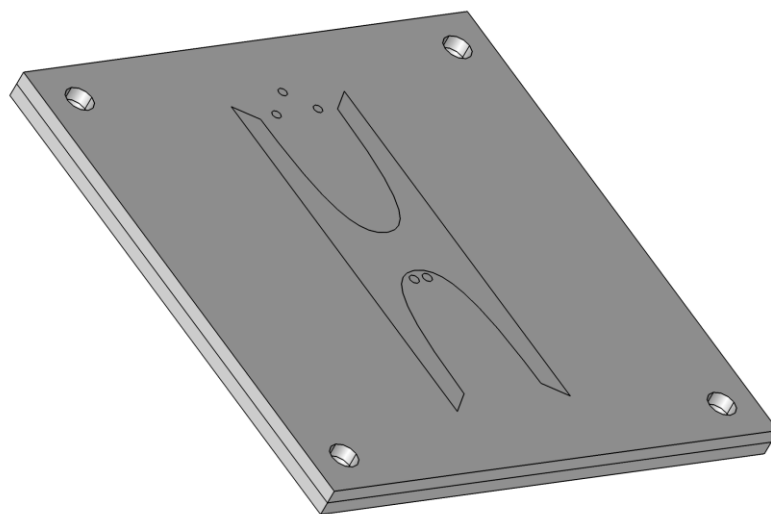
Nakonec byly do geometrického modelu přidány prokovy. 4 prokovy, které penetrují oba substráty, byly umístěny do krajů substrátů. Tyto prokovy jsou plně přístupné a plní funkci otvorů pro šrouby. Umožňují fixaci anténního elementu do mikrovlnného zobrazovacího systému. Další 3 prokovy byly rozmístěny okolo koaxiálního portu, penetrují opět oba dva substráty, ale jejich vývod na vyzařovací rovinu antény byl zakryt. 2 prokovy byly umístěny na konec symetrického páskového vedení tak, aby penetrovali pouze horní substrát, a jejich vývod na vyzařovací rovinu antény je opět zakryt. Posledním prokovem je spojka mezi zemnicí a mezisubstrátovou rovinou. Tento prokov šíří EM vlnu z koaxiálního konektoru na symetrické páskové vedení, penetruje pouze spodní substrát a jeho spodní vývod je zakryt a nasedá na něj vnitřní vodič koaxiálního konektoru. Rozměry jednotlivých prokovů jsou uvedeny v tabulce 4.2 a umístění jednotlivých prokovů na obrázku 4.8.

Tab. 4.2 Rozměry jednotlivých druhů prokovů

Rozměr prokovů		
Prokov	poloměr (mm)	výška (mm)
koaxiální prokov	0,5	3,048
mikropáskový prokov	0,537	1,524
substrátový prokov	1,5	3,048



Obr. 4.8 Rozložení proků uvnitř anténního elementu, modře vyznačené části jsou proky. Zdroj: autor.

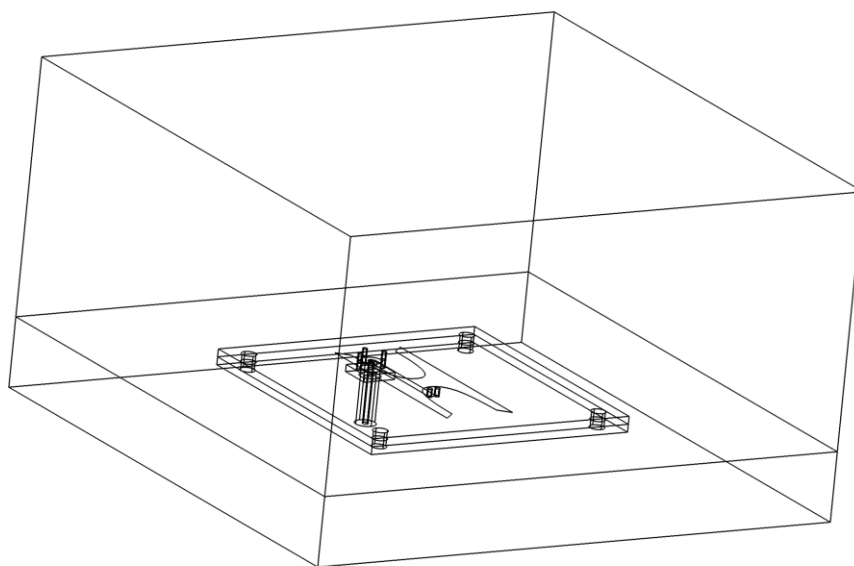


Obr. 4.9 Celý anténní element, pohled shora. Zdroj: autor.



Obr. 4.10 Celý anténní element, pohled z boku. Zdroj: autor

Celý anténní element byl následně obklopen fantomem biologické tkáně nad aperturou antény a vzduchovým fantomem, který se nachází pod anténním elementem a obklopuje koaxiální napájení. Celá situace je poté vyobrazena na obrázku 4.11.



Obr. 4.11 Celý model anténního elementu i s fantomy tkáně (v obrázku nad anténním elementem) a vzduchu (v obrázku pod anténním elementem).

Zdroj: autor.

4.3 Nastavení materiálů a materiálových konstant

Poté, co byl anténní element nakreslen, bylo nutné jednotlivým částem modelu přiřadit materiálové vlastnosti. Materiály musíme charakterizovat dielektrickými vlastnostmi, které ve větší či menší míře ovlivňují šíření EM vlny. Mezi tyto vlastnosti patří relativní permitivita ϵ_r (-), relativní permeabilita μ_r (-) a elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$). Tabulka 4.3 shrnuje všechny použité materiály a jejich materiálové konstanty.

Tab. 4.3 Nastavené dielektrické vlastnosti materiálů

Tkáň [13]	relativní permitivita ϵ_r (-)	41
	relativní permeabilita μ_r (-)	1
	elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$)	1
Substrát Rogers 4003C [14]	relativní permitivita ϵ_r (-)	3,4
	relativní permeabilita μ_r (-)	1
	elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$)	0
Vzduch	relativní permitivita ϵ_r (-)	1
	relativní permeabilita μ_r (-)	1
	elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$)	0
Dielektrikum typu PTFE	relativní permitivita ϵ_r (-)	2,1
	relativní permeabilita μ_r (-)	1
	elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$)	0

Materiály tkáň a vzduch byly přiřazeny jednotlivým fantomům, které se nacházejí pod a nad vyzářovací rovinou anténního elementu. Materiál dielektrikum byl přiřazen prostoru mezi vnitřním a vnějším vodičem koaxiálního kabelu.

4.4 Nastavení fyziky

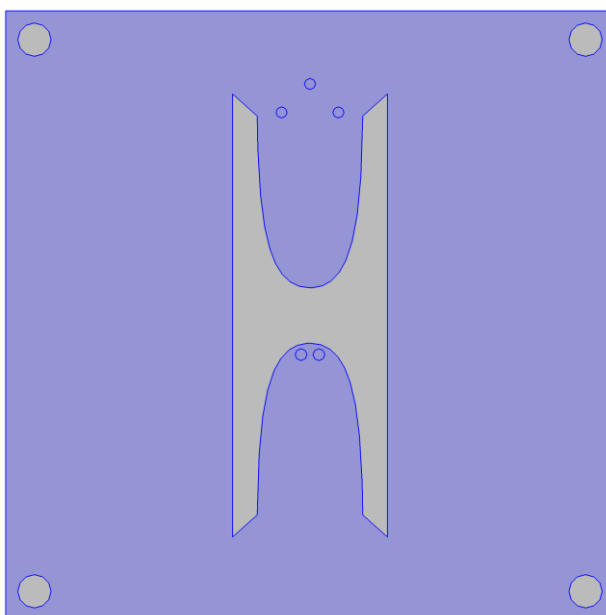
Nastavení fyzikálních parametrů modelu je jedním z klíčových procesů před spuštěním simulace. Všechny domény, ve kterých se v reálné anténě bude nalézat vodič (měď) byly z výpočetní oblasti úmyslně vynechány. Na jejich povrchu byla nastavena okrajová podmínka ideálního elektrického vodiče (*PEC – perfect electric conductor*), což se na dané frekvenci dělá z důvodů velmi malé hloubky vniku elektromagnetických vln do vodičů. Dále na mezikruží konce koaxiálního portu byla nastavena okrajová podmínka *port* a na celý další povrch výpočetní oblasti byla nastavena okrajová podmínka *scattering boundary*, čímž jednoznačně ohraničíme oblast výpočtu simulace.

V celkovém důsledku musíme nastavit tyto parametry:

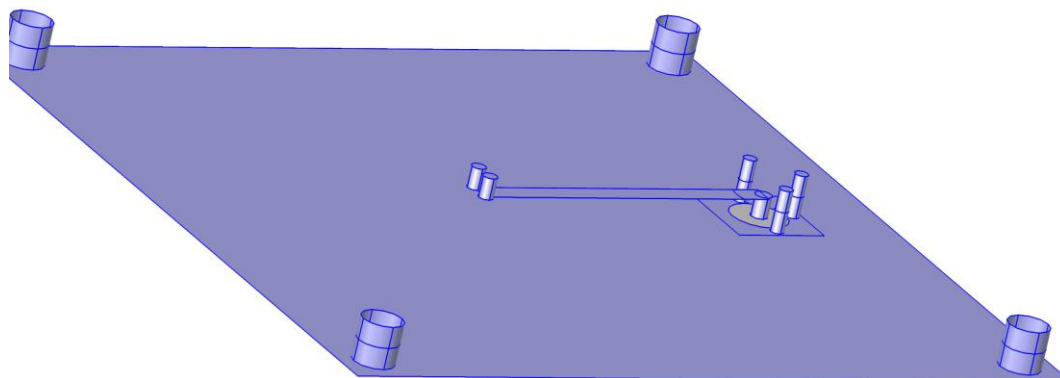
- *Wave equation* (vlnová rovnice)
- *Perfect electric conductor* (perfektní vodič)
- *Initial values* (počáteční hodnoty)
- *Port*
- *Scattering boundary condition* (rozptylová hranice)

Do nastavení *Wave equation* byly označeny všechny části modelu, které mají co dočinění s šířením EM vlny. Zahrnuty tedy byly oba fantomy, celý koaxiální konektor i s jeho přídatnými částmi, všechny prokovy, oba substráty a vyzářovací rovina anténního elementu.

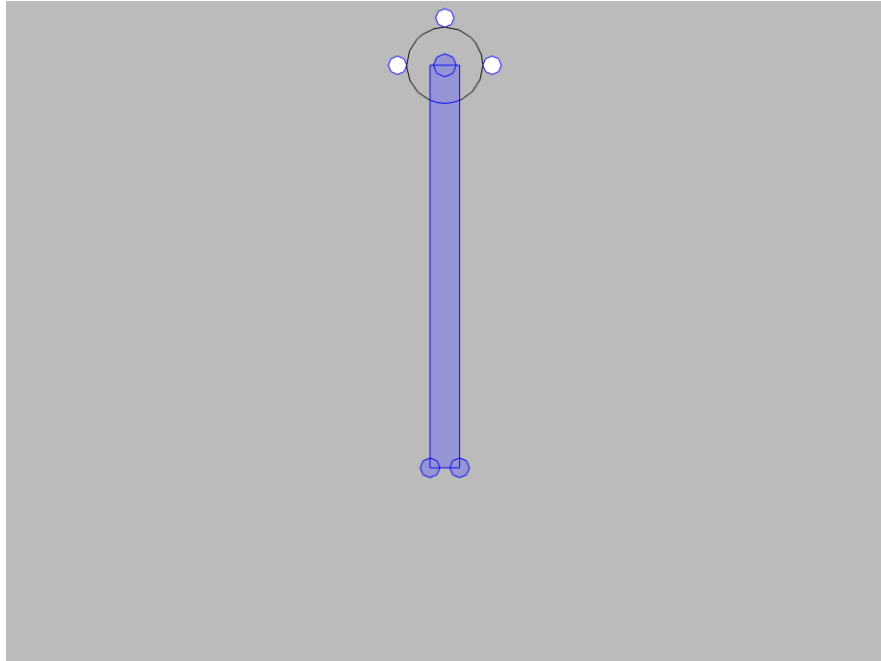
Nastavení *Perfect electric conductor* bylo značně obtížnější, jelikož bylo nutné označit všechny kovové části anténního elementu. Na obrázku 4.12 – 4.16 jsou modře vyznačeny kovové plochy.



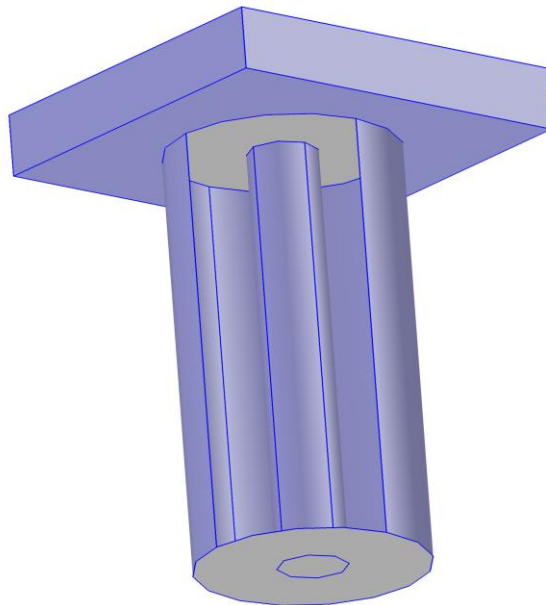
Obr. 4.12 Vrchní vyzařovací rovina anténního elementu, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.



Obr. 4.13 Vnitřek anténního elementu, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.

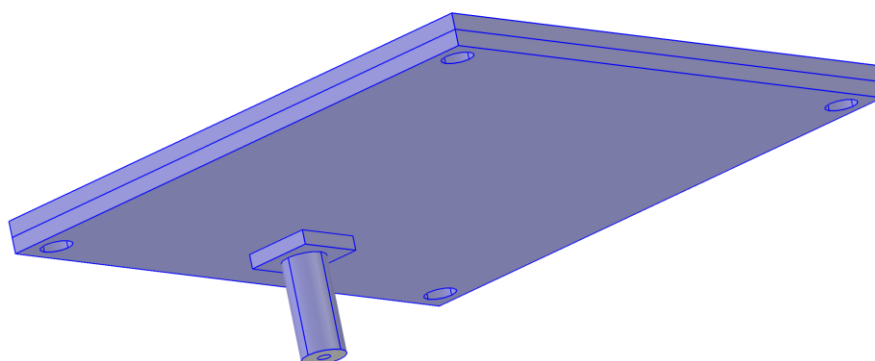


Obr. 4.14 Mezisubstrátová rovina se symetrickým mikropáskovým vedením, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.



Obr. 4.15 Koaxiální konektor, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.

Jako PEC byla označena celá plocha vnitřního i vnějšího vodiče koaxiálního konektoru, na obrázku 4.15 byla z hlediska názornosti vyjmuta část vnějšího vodiče.



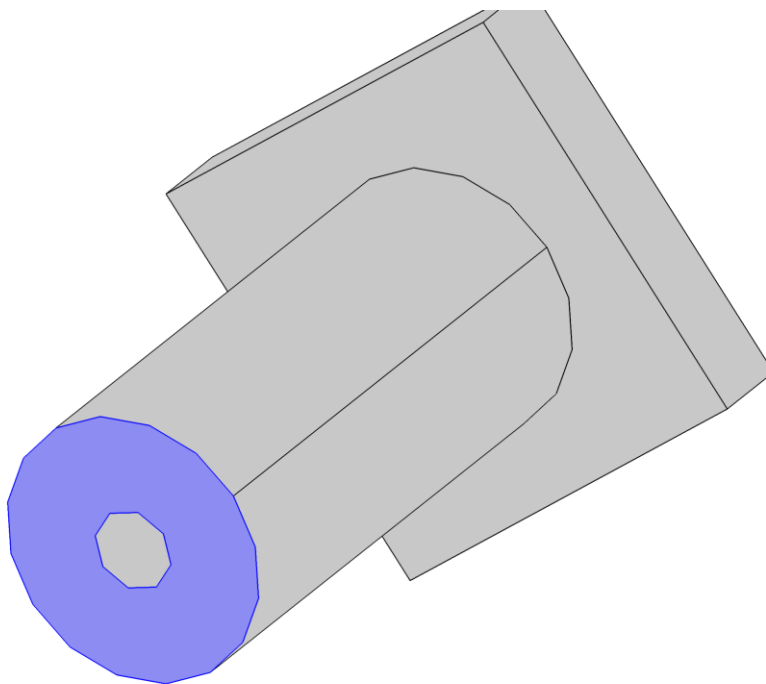
Obr. 4.16 Celý anténní element s koaxiálním konektorem, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.

Do nastavení oblastí *Initial values* jsou zakomponované stejné domény jako u nastavení *Wave equation*. Počáteční podmínky jsou nulové. Jejich nastavení je uvedeno v tabulce 4.4.

Tab. 4.4 Nastavené počáteční hodnoty intenzity elektrického pole

E (V/m)	x	0
	y	0
	z	0

Jako *Port* byla nastavena oblast, ze které vchází EM vlna do koaxiálního portu. Na obrázku 4.17 je modře vyznačena vybraná oblast, která byla zahrnuta do nastavení *Port*.



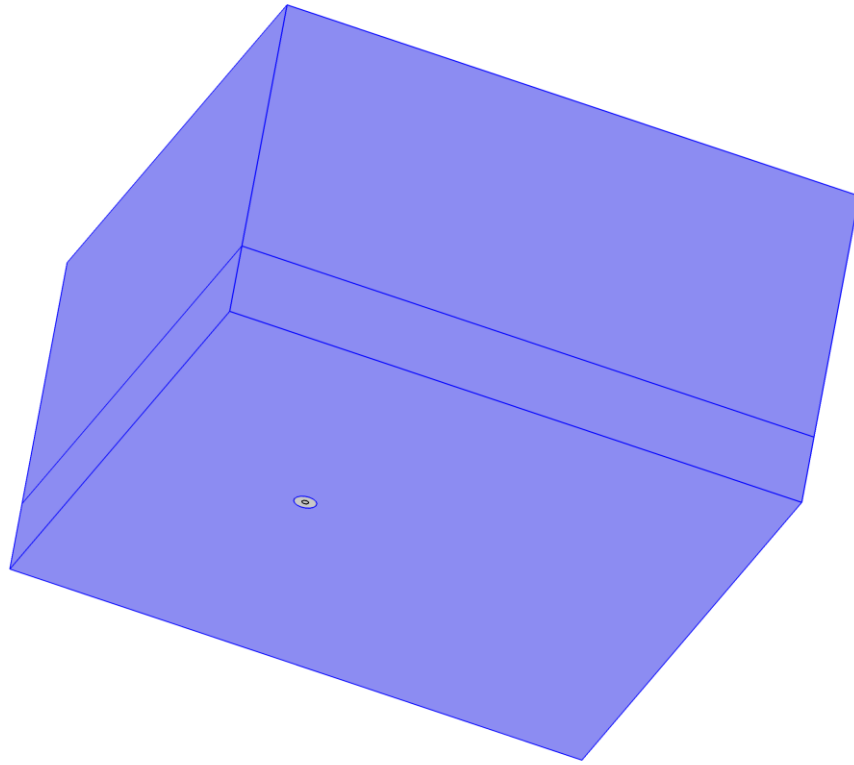
Obr. 4.17 Nastavení portu. Zdroj: autor.

Vstupní výkon portu byl nastaven na 1 W a fázový posun na 0°, dle tabulky 4.5.

Tab. 4.5 Nastavení vstupního výkonu a fázového posunu

Port	
Vstupní výkon (W)	0
Fázový posuv (°)	0

V nastavení Scattering boundary condition jsme již určili výpočetní oblast jako hraniční plochy fantomů vzduchu a tkáně, do kterých je uzavřen anténní element, vyjma oblasti pro port. Na obrázku 4.18 jsou modře vyznačené vybrané oblasti, které byly zahrnuty do nastavení Scattering boundary condition.

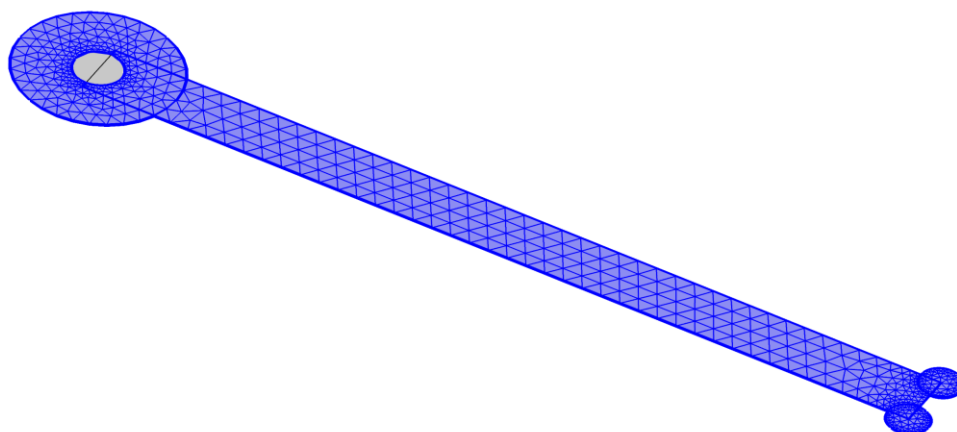


Obr. 4.18 Nastavení Scattering boundary condition. Zdroj: autor.

4.5 Diskretizační mřížka

Pro nastavení diskretizační mřížky (mesh) bylo ve velké míře využito vestavěných možností v programu COMSOL, speciální „meshování“ bylo použito pouze pro symetrické páskové vedení a prokovy.

Pro symetrické páskové vedení byla použita trojúhelníková síť. Postupným doladováním nastavení bylo dosaženo větší hustoty na povrchu pásku, kde je podle teorie největší hustota elektrického proudu.



Obr. 4.19 Detail nameshovaného symetrického páskového vedení. Zdroj: autor.

Tab. 4.6 Nastavené parametry diskretizační mřížky pro symetrické páskové vedení.

Maximální velikost elementu (mm)	0,5
Minimální velikost elementu (mm)	0,05
Maximální míra zvětšení elementu (mm)	1,3
Faktor zakřivení (mm)	0,2
Rozlišení úzkých ploch (mm)	1

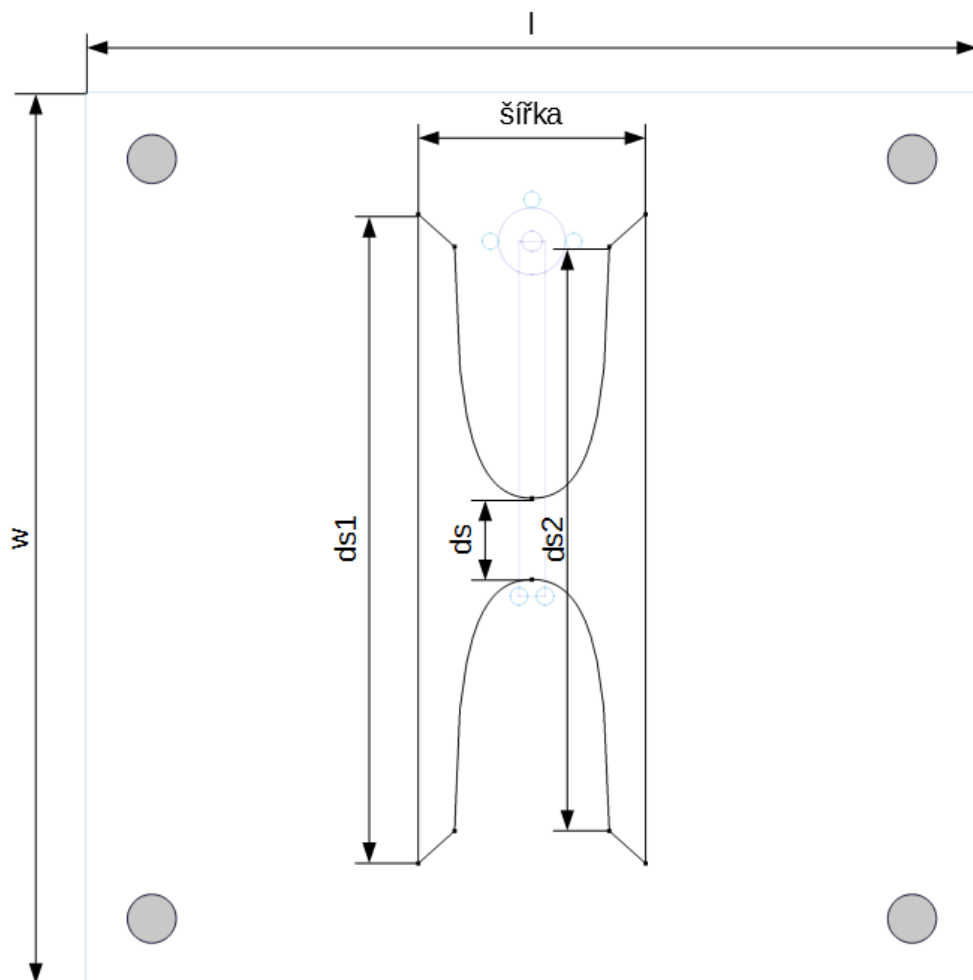
4.6 Výsledky simulací

V této kapitole budou představeny klíčové výsledky parametrických numerických studií, které byly nezbytné k dosažení požadovaných vlastností anténního elementu.

Jednotlivé simulace byly prováděny ve frekvenčním pásmu od 0,5 GHz do 3 GHz s krokem 0,1 GHz. Kromě koeficientu odrazu S_{11} (dB) bylo kontrolováno také rozložení intenzity elektrického pole E ($V \cdot m^{-1}$).

Na obrázku 4.20 jsou znázorněny jednotlivé parametry, které se v simulacích měnily.

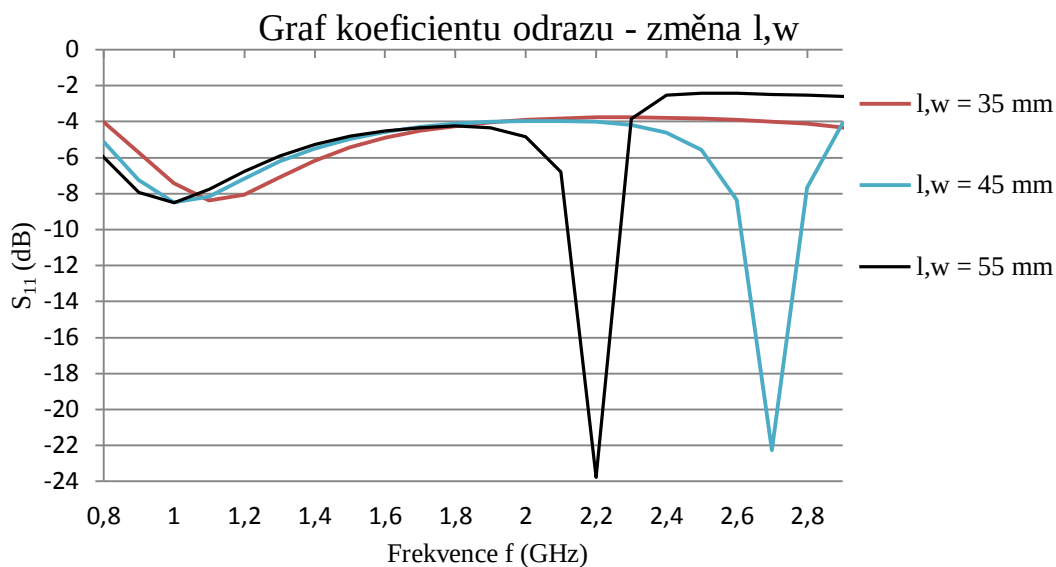
V následujících podkapitolách stručně shrnu výsledky stěžejních simulací, které byly zaměřeny na podstatné geometrické parametry modelu.



Obr. 4.20 Vizualizace měněných parametrů při simulacích. Zdroj: autor.

4.6.1 Změny velikosti substrátu (l,w)

V této simulaci byly měněny rozměry substrátových jednotek tak, aby výsledný anténní element měl čtvercové substráty.



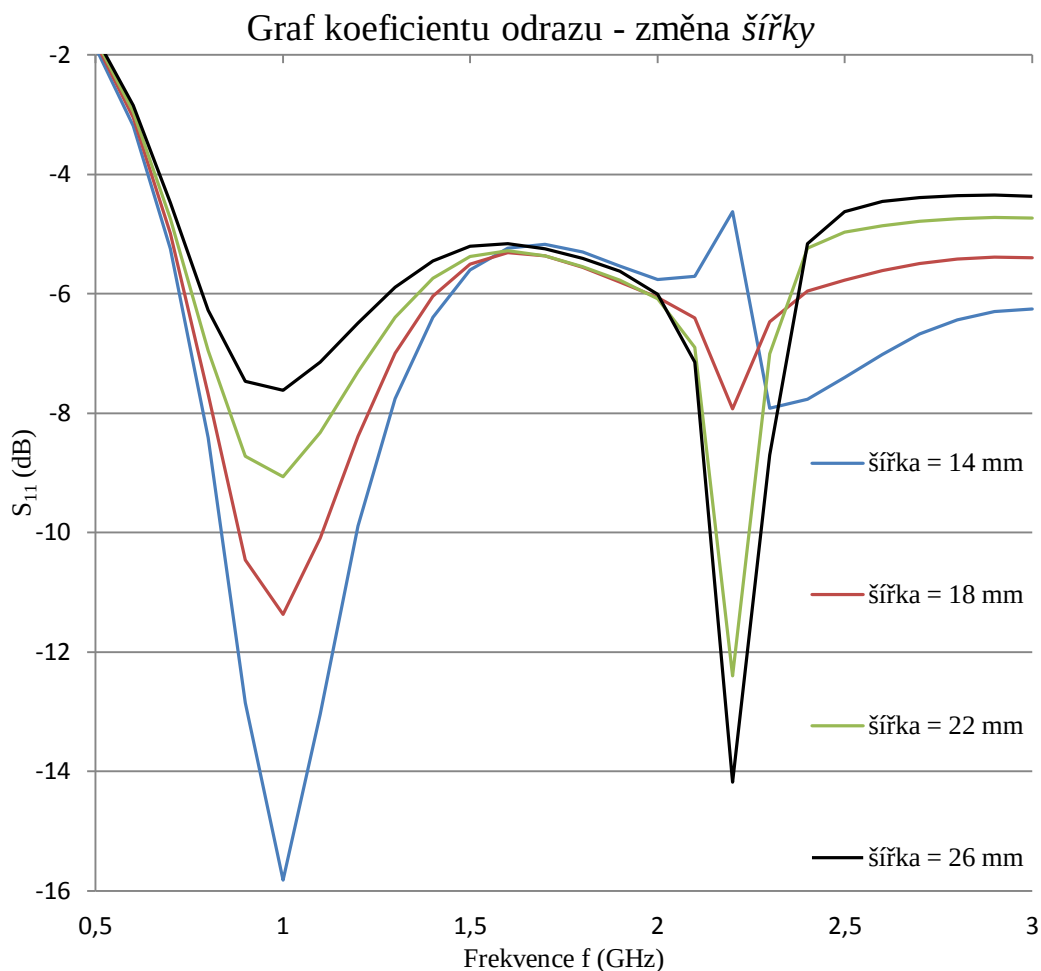
Obr. 4.21 Graf koeficientu odrazu v závislosti na změně rozměru substrátu.

Zdroj: autor.

Z obrázku 4.21 je patrné, že větší rozměry substrátu mají nižší hodnotu minima koeficientu odrazu a amplituda je též frekvenčně posunutá k nižším frekvencím. Na obrázku 4.21 značí druhá minima koeficientu odrazu (na obrázku více vpravo) rezonanční frekvenci kovové dutiny, do které jsou substráty uzavřeny. Pro nejmenší uvažovaný rozměr substrátu toto minimum nastává nad uvažovaným frekvenčním pásmem.

4.6.2 Změny šířky šterbiny

Tato simulace byla zaměřena na změny podélné šířky šterbiny (viz obrázek 4.20).



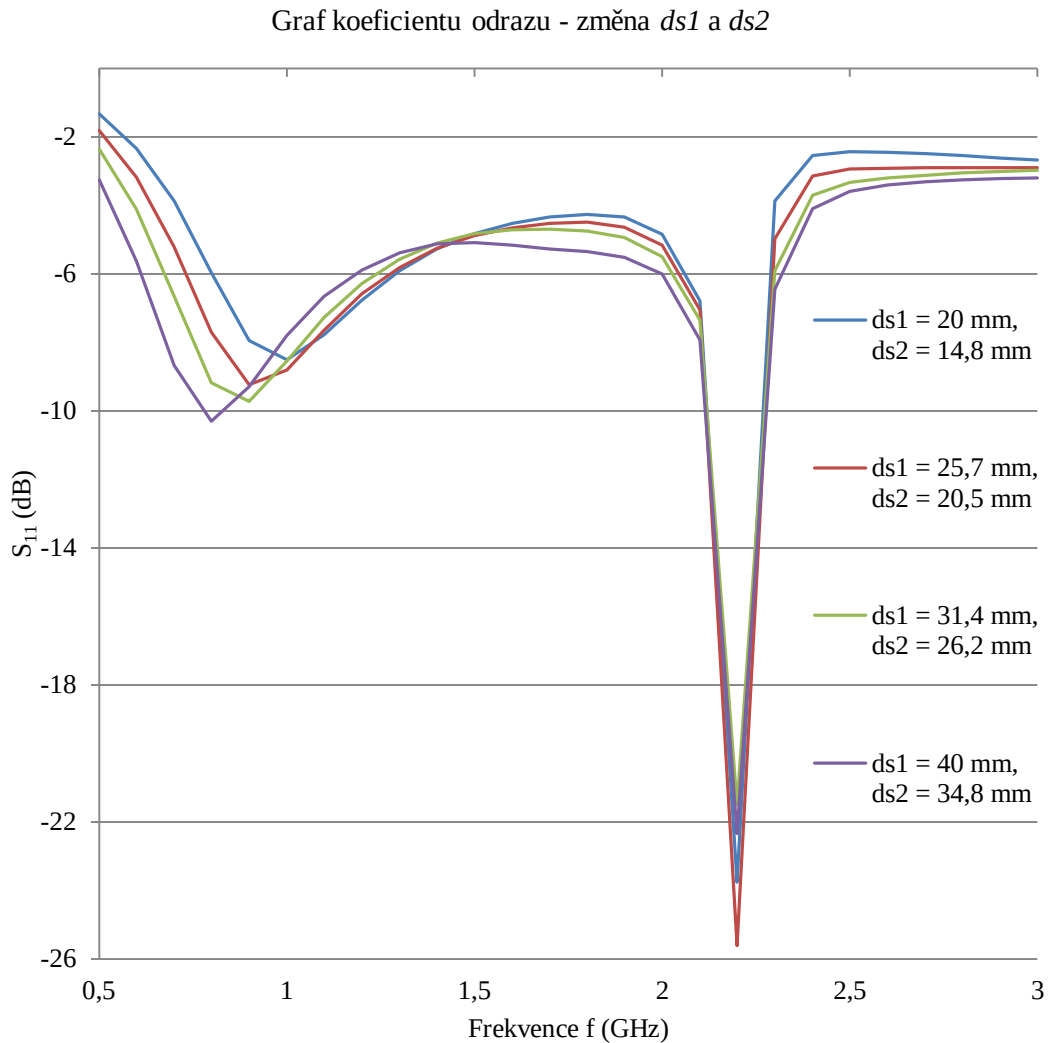
Obr. 4.22 Graf koeficientu odrazu v závislosti na změně šířky šterbiny.

Zdroj: autor.

Z obrázku 4.22 je patrné, že amplituda koeficientu odrazu na frekvenci 1 GHz se markantně zvyšuje se zvětšující se šířkou šterbiny. Z provedených simulací je šířka právě tím parametrem, který se nejvíce podílí na poklesu amplitudy koeficientu odrazu anténního elementu.

4.6.3 Změna rozměrů $ds1$ a $ds2$

Tato simulace byla zaměřena na změny dvou parametrů, které určují výšku šterbiny anténního elementu.



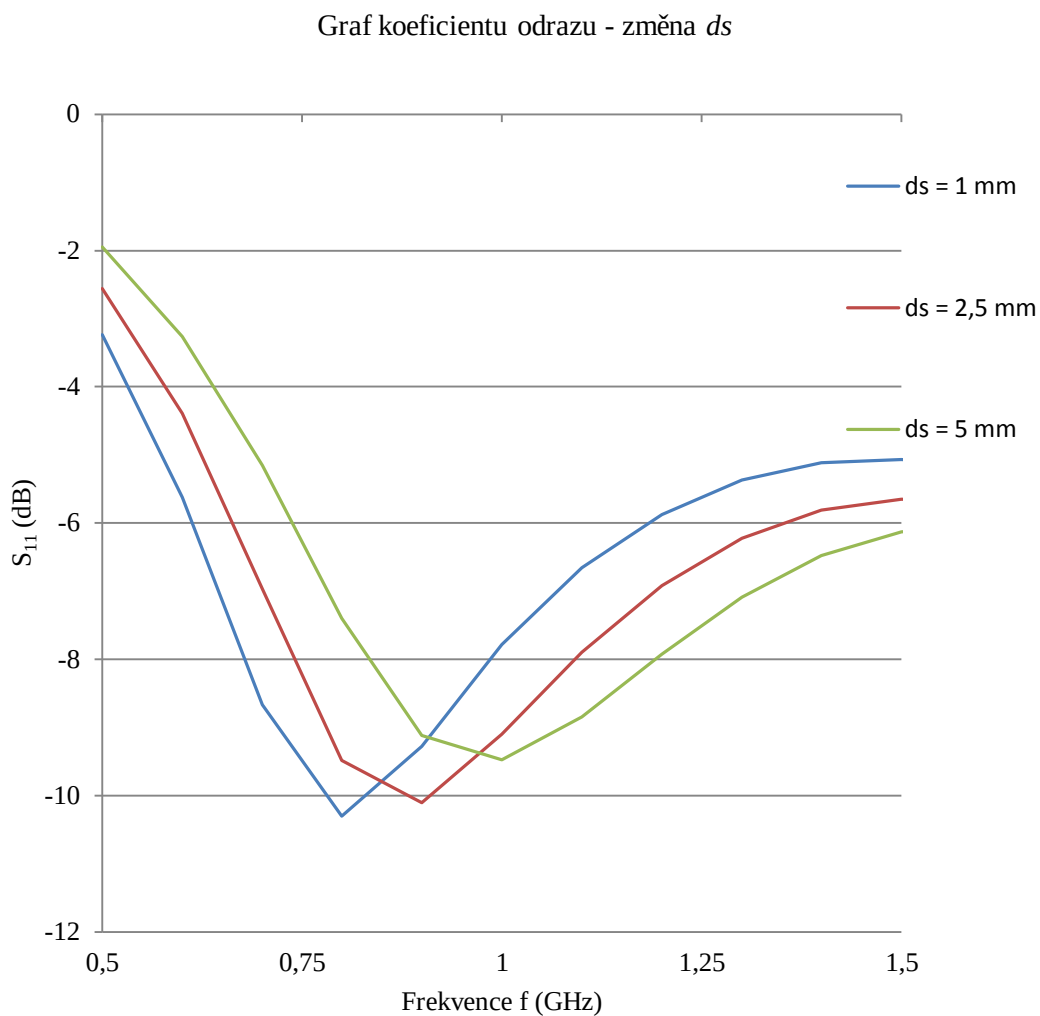
Obr. 4.23 Graf koeficientu odrazu v závislosti na změně $ds1$ a $ds2$.

Zdroj: autor.

Z obrázku 4.23 je patrné, že parametry $ds1$ a $ds2$ jsou důležité pro snižování amplitudy koeficientu odrazu, čím širší je šterbina anténního elementu, tím se amplituda koeficientu odrazu snižuje, ale amplituda se posouvá frekvenčně směrem k nižším frekvencím.

4.6.4 Změna rozměrů ds

Tato simulace byla zaměřena na změnu parametru ds , který určuje šířku nejužšího místa ve středu štěrbinového anténního elementu.



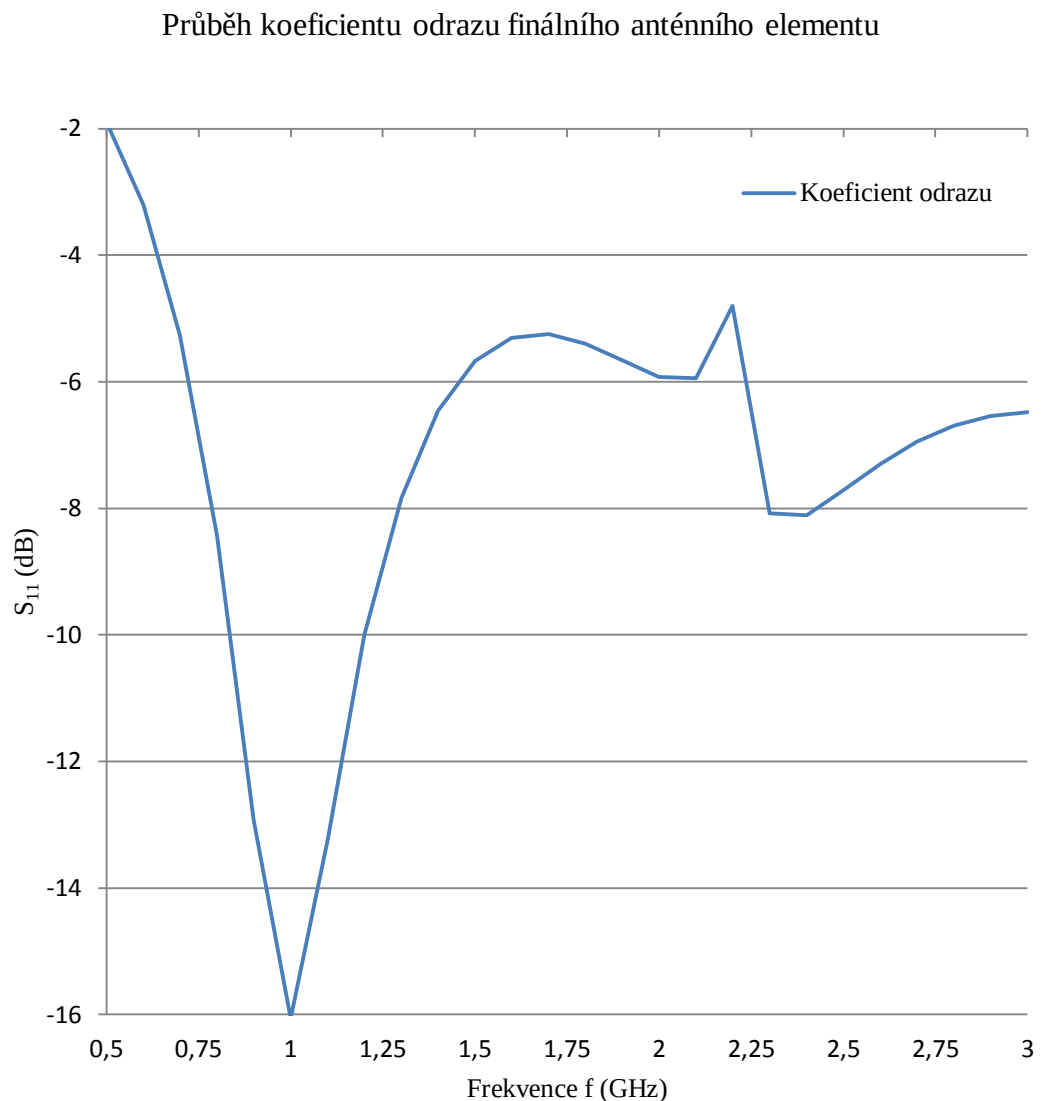
Obr. 4.24 Graf koeficientu odrazu v závislosti na změně ds .

Zdroj: autor.

Z obrázku 4.24 je patrné, že parametr ds je velmi důležitý při posouvání amplitudy koeficientu odrazu vzhledem k frekvenci, jelikož změna rozměru ds se neprojevuje výraznou změnou amplitudy koeficientu odrazu. Na druhou stranu můžeme vidět výrazný frekvenční posuv amplitudy směrem do vyšších frekvencí.

4.6.5 Frekvenční závislost koeficientu odrazu finálního anténního elementu

Pro finální verzi anténního elementu, jehož návrhu se věnuje kapitola 4, byla provedena simulace o frekvenčním rozsahu od 0,5 GHz do 3 GHz s krokem 0,1 GHz. Výsledek simulace jako závislost koeficientu odrazu S_{11} (dB) na frekvenci (GHz) je uvedena na obrázku 4.25.



Obr. 4.25 Graf průběhu koeficientu odrazu finálního anténního elementu (0,5 GHz - 3 GHz). Zdroj: autor.

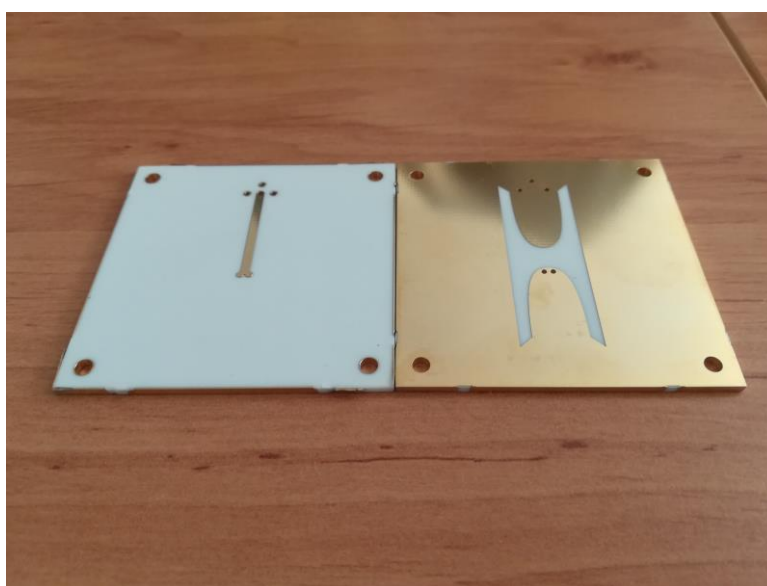
Z obrázku 4.25 můžeme vidět, že amplituda koeficientu odrazu na frekvenci 1 GHz je -16 dB, čímž bylo docíleno splnění podmínek ze zadání. Šířka pásma frekvencí, ve kterých koeficient odrazu poklesne pod -10 dB je od 835 MHz do 1,2 GHz.

5 Realizace anténního elementu

V této kapitole bude shrnuta realizace anténního elementu. Výroba desek plošných spojů probíhala externě, ve firmě, která se zabývá návrhem a realizací DPS, a následné lepení a další úpravy byly provedeny v laboratorních podmínkách na Fakultě elektrotechnické Českého vysokého učení technického v Praze.

5.1 Realizace vyleptání a prokovení substrátů

Leptáním a prokovením substrátů byla pověřena externí firma formou zakázky. Data pro výrobu byla poskytnuta ve formě textového dokumentu s obrázkovými přílohami, ve kterém byla popsána geometrie anténního elementu (obrázky 4.2 - 4.5, 4.8) a označeny kovové a vyleptané plochy (obrázky 4.12 – 4.14, 4.16). Dále byly firmě poskytnuty DWG soubory pro jednotlivé roviny znázorněné na obrázcích 4.3 – 4.5. Dodatečné informace byly diskutovány prostřednictvím emailové a telefonické komunikace. Bohužel firma nebyla schopna takto dva vyrobené substráty spojit k sobě (obrázek 4.2) a bylo nutné tuto úpravu provést až následně po vyhotovení.



Obr. 5.1 Vyhotovené substrátové desky. Zdroj: autor.

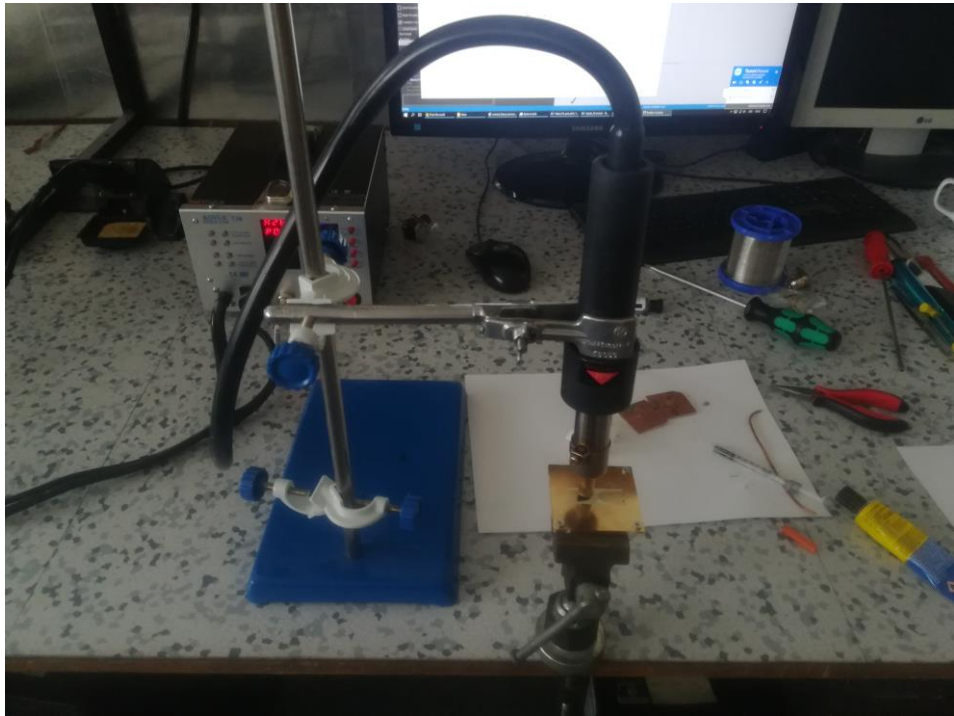
5.2 Zpracování anténního elementu

Z takto vytvořených desek (obrázek 5.1) musela být vytvořena finální podoba anténního elementu. Nejprve bylo nutné slepit jednotlivé substráty k sobě pomocí lepidla na PVC. Vzniklá struktura poté byla zafixována, aby lepidlo dobře zaschlo.



Obr. 5.2 Fixace slepených substrátů. Zdroj: autor.

Následně byly všechny prokovy, kromě koaxiálního prokovu, postupně vyplněny cínovou pastou a umístěny pod horkovzdušnou pistoli, která cínovou pastu vytvrdila.



Obr. 5.3 Zahřívání cínové pasty pomocí horkovzdušné pistole. Zdroj: autor.



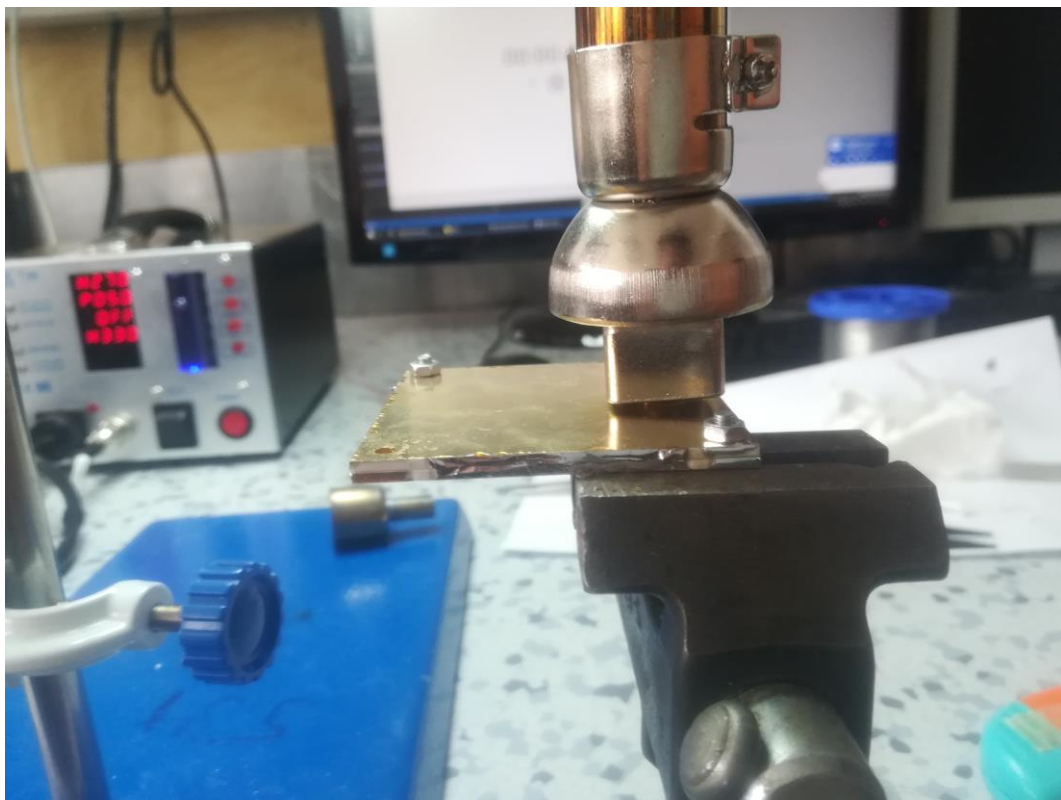
Obr. 5.4 Nastavené parametry pro horkovzdušnou pistoli. Zdroj: autor.

Nastavené parametry od shora: teplota vyfukovaného vzduchu (270 °C), tlak vyfukovaného vzduchu (50 kPa), časovač (vypnut), teplota páječky (vypnuto).

Koaxiální prokov byl špatně realizován z výroby, kdy prokov nebyl vodivě vyplněn. Prokov byl vyplněn cínovou pastou a do prokovu byl následně vsunut kousek obnaženého měděného drátu pro lepší kontakt koaxiálního kabelu a symetrického mikropáskového vedení. Takto zaplněný koaxiální prokov byl opět prohříván horkovzdušnou pistolí.

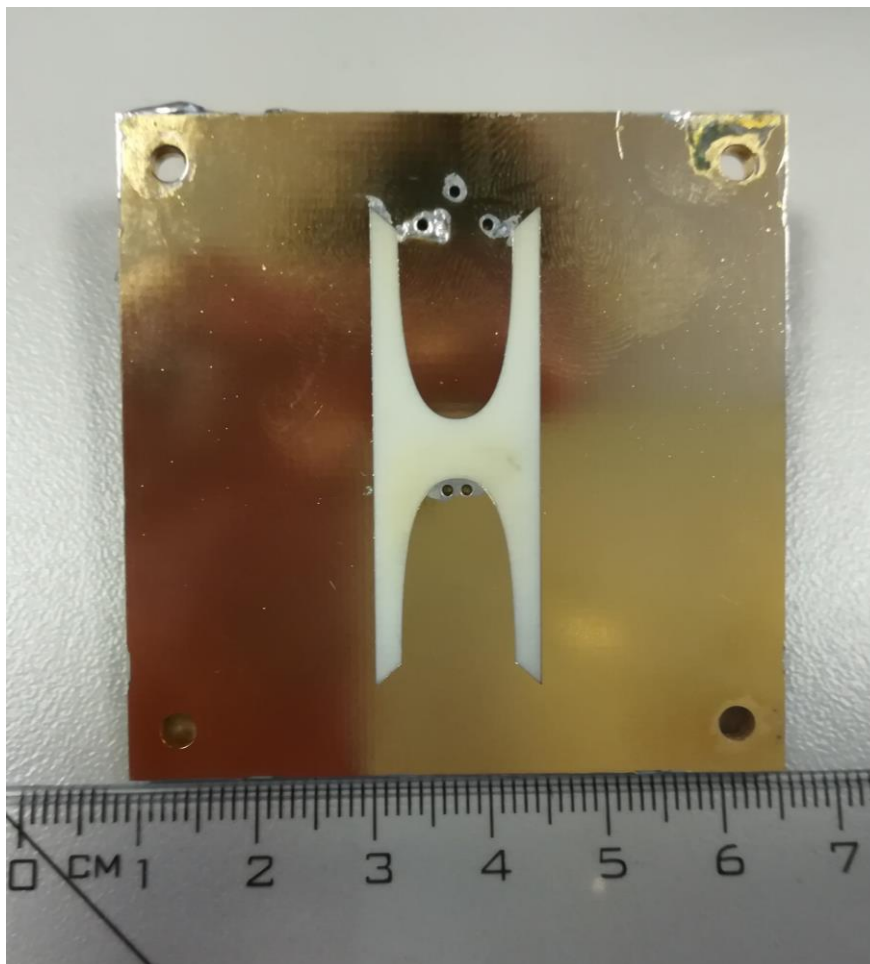
Každý prokov byl takto zahříván zhruba 6 minut, aby bylo zajištěno dokonalé ztvrdnutí pasty.

Poté byl připájen koaxiální konektor. Na všechny čtyři piny koaxiálního konektoru byla nanesena malá vrstva cínové pasty, koaxiální konektor byl umístěn na vývod zaplněného koaxiálního prokovu a byl opět zahříván, dokud pasta nevytvrdla.

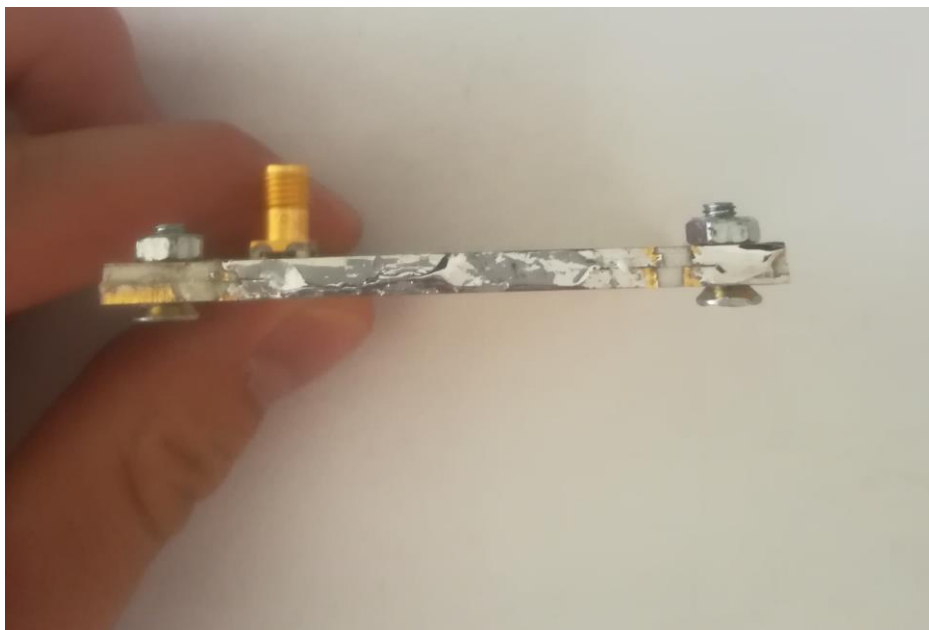


Obr. 5.5 Pájení koaxiálního konektoru pomocí horkovzdušné pistole. Koaxiální konektor je zakrytý a nachází se uvnitř hlavice pistole pro lepší fokusaci tepla. Zdroj: autor.

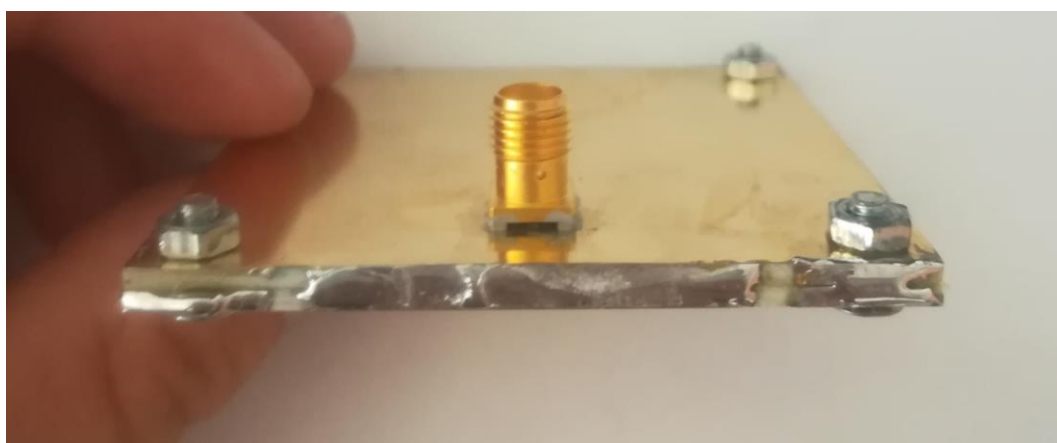
Finálně byla pomocí pájky a páječky nanášena vrstva cínu na boky substrátů, aby se co možná nejvíce zacemento odštíplé či jinak narušené pozlacené pokovení boků substrátu. Výsledný anténní element, který byl následně proměřen, je na obrázcích 5.6 - 5.8.



Obr. 5.6 Anténní element, pohled shora. Zdroj: autor.



Obr. 5.7 Anténní element, pohled z boku. Zdroj: autor.

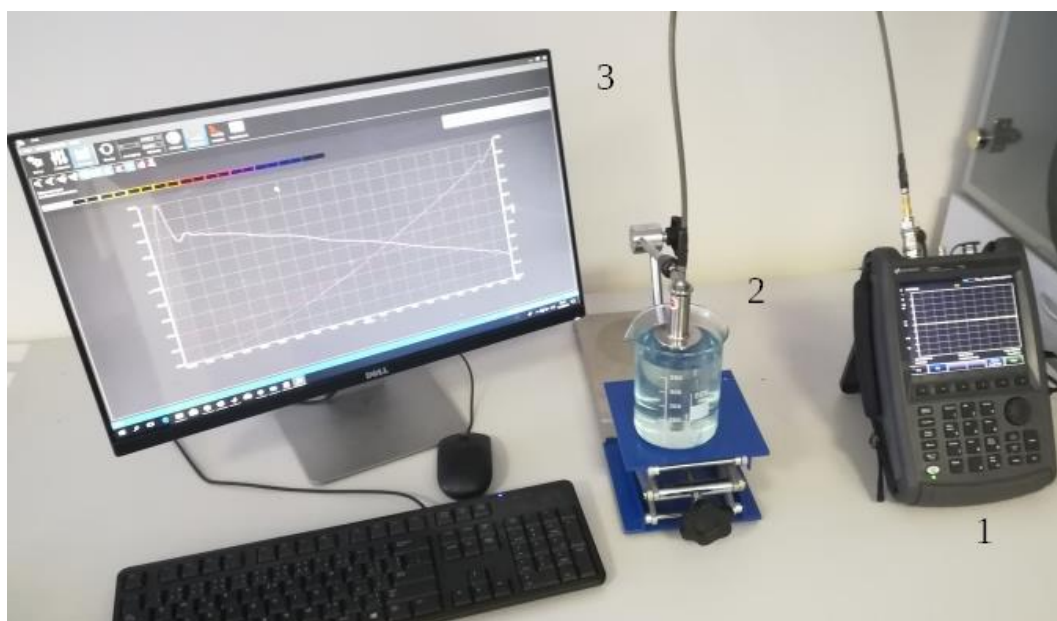


Obr. 5.8 Anténní element, pohled z boku. Zdroj: autor.

6 Výsledky měření

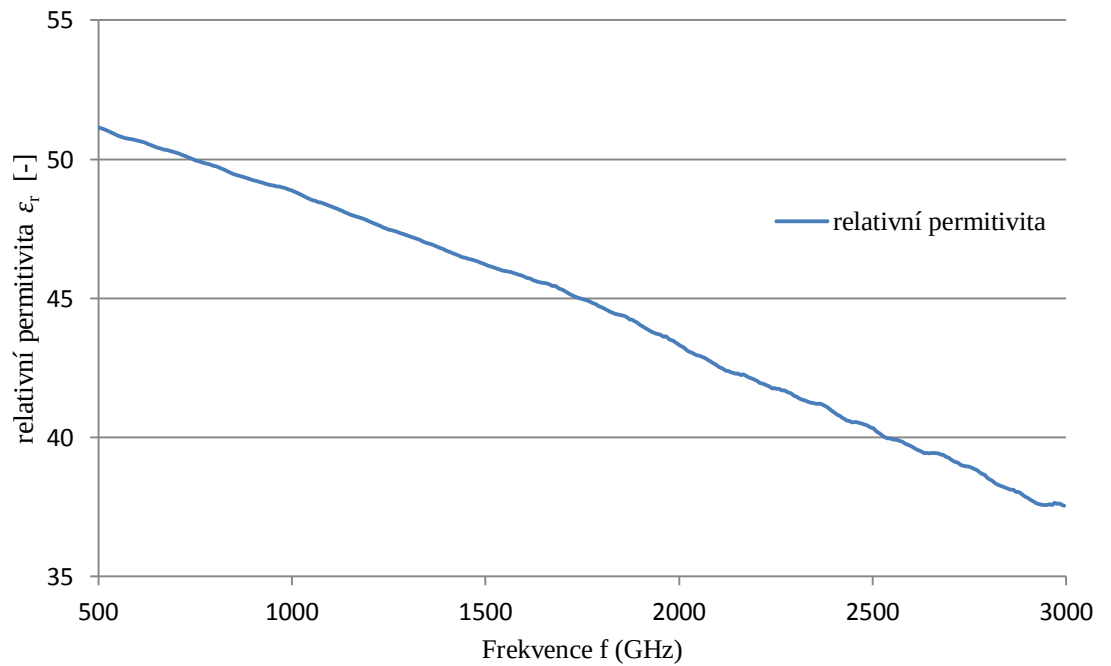
6.1 Měření dielektrických vlastností kapalného fantomu mozku

Po realizaci bylo provedeno měření. Nejprve byly proměřeny dielektrické vlastnosti použitého kapalného fantomu mozku [16] pomocí Dielectric Assessment Kit (DAK), SPEAG A.G., Švýcarsko a sondy DAK12 a vektorového analyzátoru obvodů FieldFox N9923A, Keysight Technologies, USA. Proměřovány byly relativní permitivita ϵ_r (-) a měrná elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$).



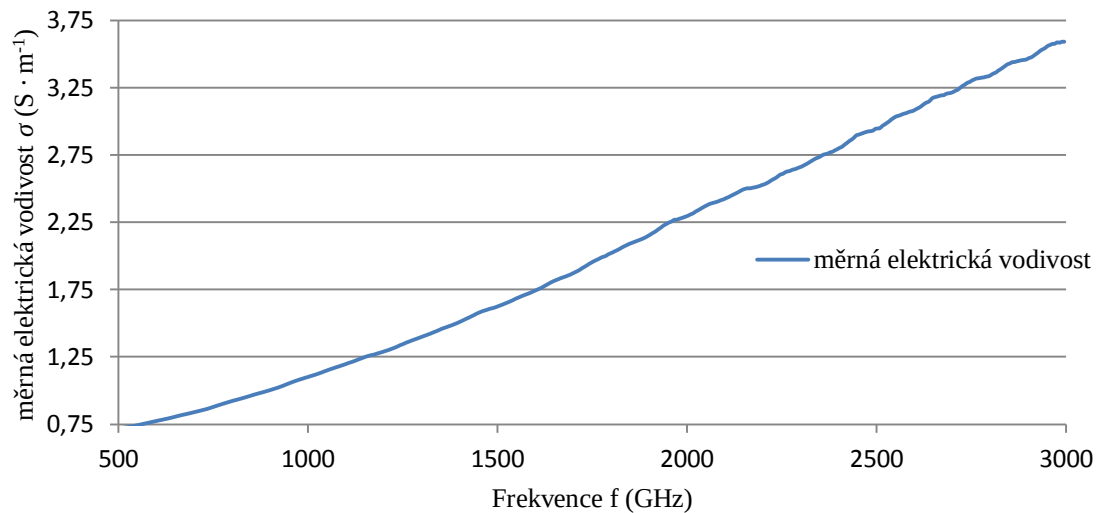
Obr. 6.1 Měření relativní permitivity a měrné elektrické vodivosti pomocí systému DAK, který je připojen k vektorovému analyzátoru obvodů. 1 - vektorový analyzátor obvodů, 2 – Sonda DAK12 ponořená do fantomu mozkové tkáně, 3 - připojený PC. Zdroj: auor.

Graf naměřené frekvenční závislosti relativní permitivity ϵ_r (-) fantomu mozkové tkáně



Obr. 6.2 Graf naměřené frekvenční závislosti relativní permitivity ϵ_r (-) fantomu mozkové tkáně. Zdroj: autor

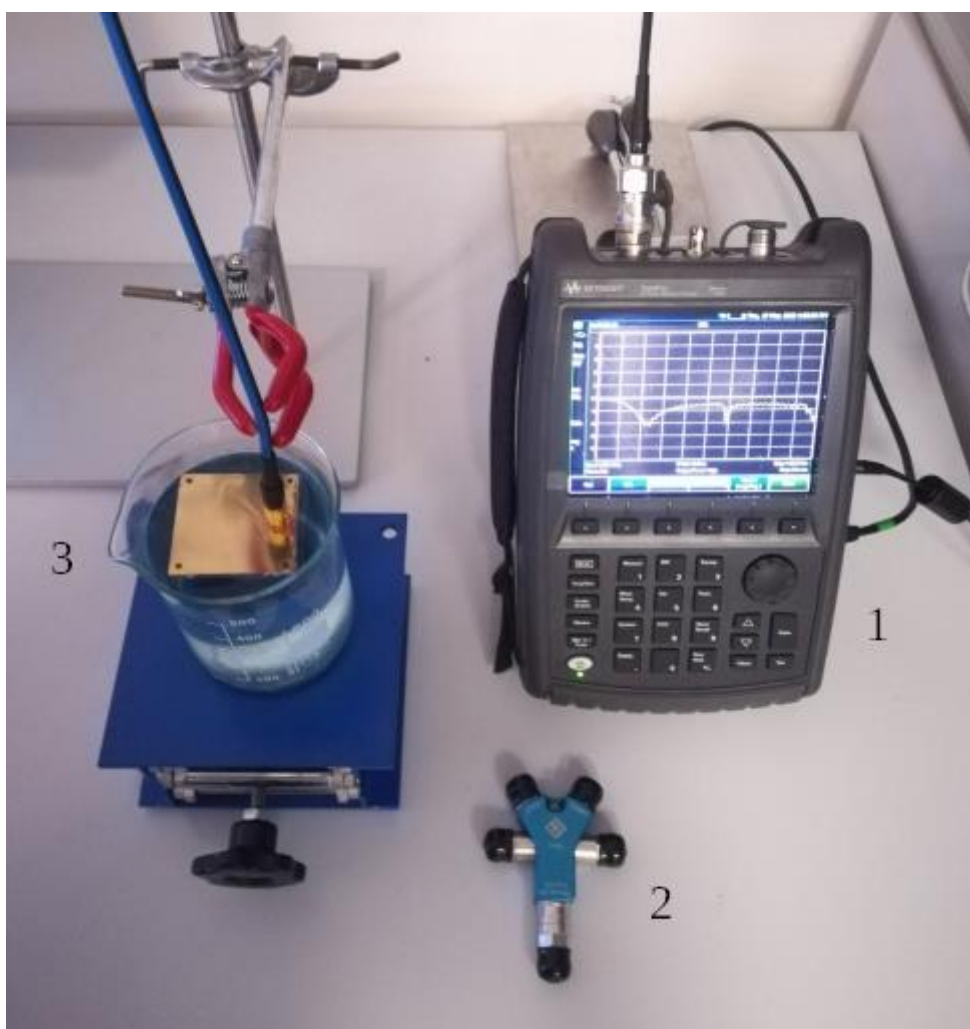
Graf naměřené frekvenční závislosti měrné elektrické vodivosti σ ($S \cdot m^{-1}$) fantomu mozkové tkáně



Obr. 6.3 Graf naměřené frekvenční závislosti měrné elektrické vodivosti σ ($S \cdot m^{-1}$) fantomu mozkové tkáně. Zdroj: autor.

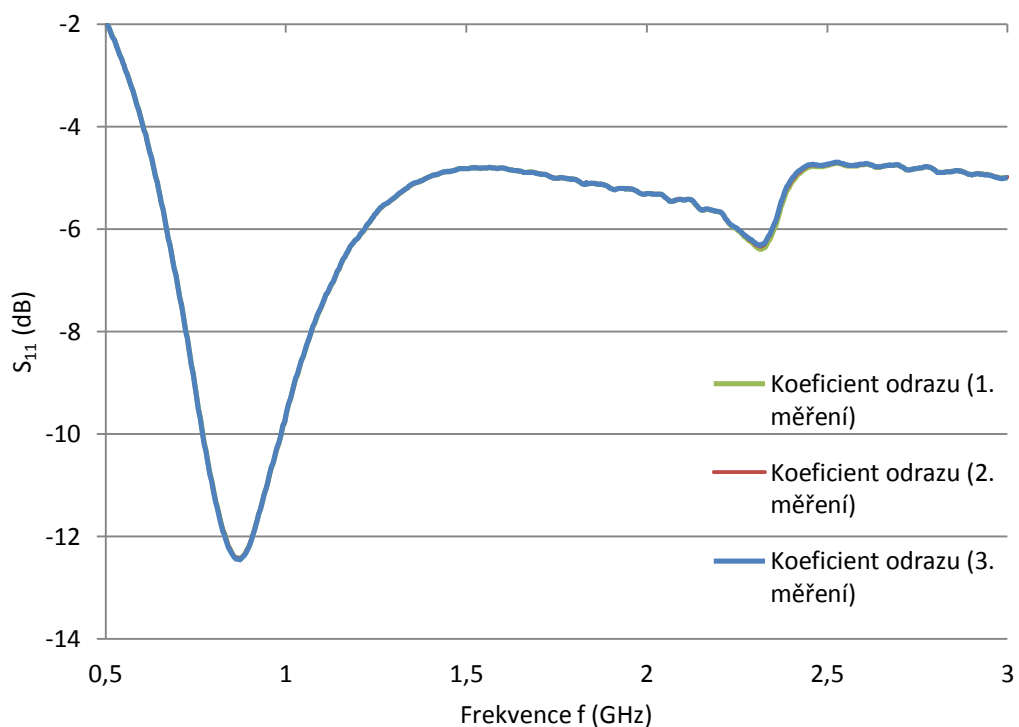
6.2 Měření koeficientu odrazu anténního elementu

Pro proměření koeficientu odrazu byl použit vektorový analyzátor obvodů FieldFox N9923A, Keysight Technologies, USA. Měření bylo zahájeno dvouportovou kalibrací vektorového analyzátoru obvodů, kdy byl k vektorovému analyzátoru obvodů připojen kalibrační člen. Kalibrační proces sestával z několika dílčích kroků, ve kterých byly kalibrovány postupně oba dva porty kalibračním standardem. Po skončení kalibrace bylo možné změřit koeficient odrazu. Anténní element byl upevněn tak, aby se apertura anténního elementu dotýkala hladiny kapalného fantomu hlavy a výsledek měření byl uložen do paměti přístroje. Byla provedena celkem 3 měření.



Obr. 6.4 Měřicí aparatura pro měření koeficientu odrazu anténního elementu.
1 - vektorový analyzátor obvodů, 2 - kalibrační člen, 3 - anténní element ponořený do fantomu mozkové tkáně. Zdroj: autor.

Naměřený průběh koeficientu odrazu



Obr. 6.5 Graf naměřených průběhů koeficientů odrazu pro všechna měření.

Zdroj: autor.

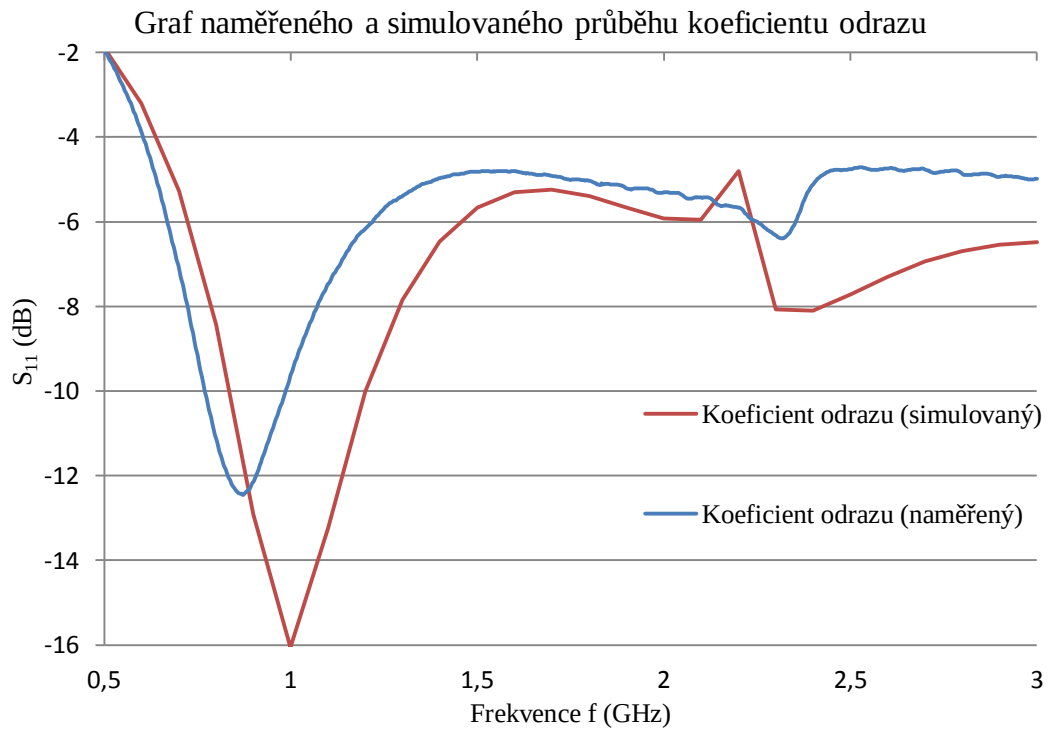
Z obrázku 6.5 je patrné, že se měření téměř neliší. Tyto tři signály byly zprůměrovány (na obrázku 6.6 modře). Amplituda koeficientu odrazu je -12,46 dB na frekvenci 0,873 GHz. Šířka pásma frekvence, ve kterých koeficient odrazu poklesne pod -10 dB je od 0,77 GHz do 0,988 GHz. Na 1 GHz je hodnota koeficientu odrazu -9,6 dB.

6.3 Porovnání naměřeného a simulovaného průběhu koeficientu odrazu

Pro porovnání naměřeného a simulovaného průběhu koeficientu odrazu byla zvolena relativní odchylka. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.1 a na obrázku 6.6.

Tab. 6.1 Relativní odchylka pro šířky pásma, koeficienty odrazu na frekvenci 1 GHz, frekvence amplitudy koeficientu odrazu a amplitudy koeficientu odrazu pro simulovaný a naměřený průběh koeficientu odrazu. Zdroj: autor.

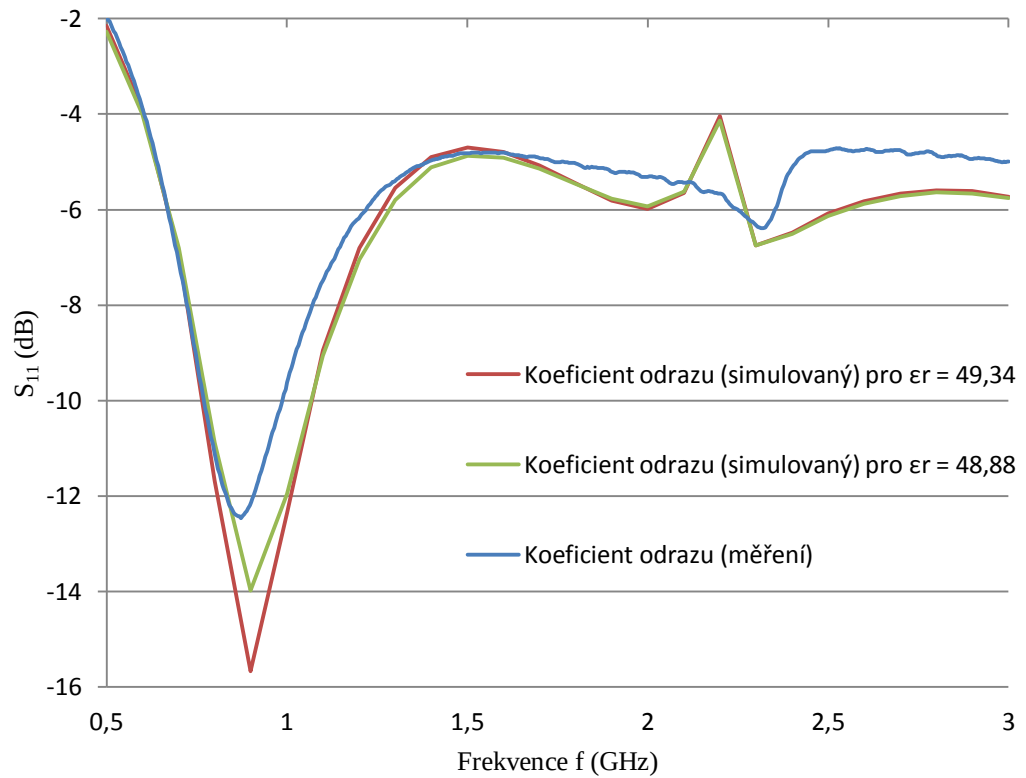
Průběh koeficientu odrazu	Simulovaný	Naměřený	Relativní odchylka [%]
šířka pásma [MHz]	365	218	40,27
koeficient odrazu na 1 GHz [dB]	-16	-9,6	40
Frekvence amplitudy koeficientu odrazu [MHz]	1000	873	12,7
Amplituda koeficientu odrazu [dB]	-16	-12,46	22,13



Obr. 6.6 Graf naměřeného a simulovaného průběhu koeficientu odrazu pro frekvenčně konstantní dielektrické parametry dle [14].

Zdroj: autor.

Graf naměřeného a dvou simulovaných koeficientů odrazu pro různě nastavené relativní permitivity ϵ_r tekutého fantomu hlavy



Obr. 6.7 Graf naměřeného koeficientu odrazu v porovnání se dvěma simulacemi pro frekvenčně konstantní dielektrické parametry z měření dielektrických vlastností tekutého fantomu hlavy (obrázek 6.2 a 6.3) na frekvenci 874 a 1000 MHz. Zdroj: autor.

Tab. 6.2 Nastavené dielektrické vlastnosti fantomu hlavy dle obrázku 6.2 a 6.3.

Frekvence (MHz)	relativní permitivita ϵ_r (-)	relativní permeabilita μ_r (-)	elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$)
874	49,34	1	0,98
1000	48,88	1	1,1

7 Diskuze

Čtvrtá kapitola této bakalářské práce se zabývá detailním popisem návrhu geometrie anténního elementu, nastavováním fyzikálních parametrů a výsledky simulací, které sledují čtyři odlišné geometrické parametry a vliv jejich změn na průběhu koeficientu odrazu. Následující kapitola je věnována realizaci anténního elementu a měření koeficientu odrazu pomocí vektorového analyzátoru obvodů.

Anténní element byl navržen v softwarovém programu COMSOL Multiphysics (obrázky 4.2 – 4.11). Pro potřebné domény byly přiřazeny materiálové dielektrické parametry, kterými jsou relativní permitivita ϵ_r (-), relativní permeabilita μ_r (-) a měrná elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$), tyto parametry jsou shrnuty v tabulce 4.3.

Diskretizační mřížka byla převážně realizována pomocí výchozích nastavení, kterými disponuje COMSOL Multiphysics. Jemněji byla diskretizace provedena pouze u struktury symetrického páskového vedení, aby byla vyšší koncentrace elementů při stranách symetrického páskového vedení, kde je největší proudová hustota. Při nastavování diskretizační mřížky bylo zapotřebí dojít ke kompromisu mezi hustotou mřížky, časem výpočtu simulace a nároky na HW. Hustší diskretizační mřížka vede k přesnějším výsledkům, ale také k prodlužování času výpočtu jednotlivých simulací.

Výsledná simulace anténního elementu (obrázek 4.25) ukázala dobré impedanční přizpůsobení v rozsahu frekvencí od 835 MHz do 1,2 GHz, v tomto frekvenčním rozmezí je hodnota koeficientu odrazu pod -10 dB. Frekvenční krok jednotlivých simulací byl nastaven na 0,1 GHz. Takto zvolený frekvenční krok byl opět kompromis mezi kvalitou výsledků a výpočetním časem simulací, v grafech koeficientu odrazu se občas objevuje situace, kdy se část závislosti koeficientu odrazu na frekvenci jeví jako plato, což značí, že frekvenční krok je příliš velký a „přeskočil“ nějakou signifikantní hodnotu, která by ve svém důsledku změnila plato charakteristiku grafu na očekávané plynulé lokální minimum ve frekvenci. Na obrázcích 4.21 – 4.23 a na obrázku 4.25 můžeme pozorovat vždy dvě lokální minima ve frekvenci. Lokální minima na nižší frekvenci odpovídají rezonanční frekvenci antény, lokální minimum na vyšší frekvenci odpovídají rezonanční frekvenci kovové dutiny anténního elementu.

Tato frekvence kovové dutiny se mění s rozměrem dutiny, jak vyplývá z obrázku 4.21.

Následovala realizace anténního elementu, která byla z důvodu náročnosti na geometrické úpravy vyzařovací roviny se štěrbinou řešena zakázkovou výrobou u externí firmy. Zbylé práce byly provedeny ručně a po uvážení různých dielektrických parametrů kapalného fantomu a modelu vyzařovací oblasti nejvíce vypovídají o vzniklé odchylce změřeného a simulovaného koeficientu odrazu, jelikož ručním slepováním dvou substrátů dohromady nemůžeme nikdy docílit takové dokonalé přesnosti, se kterou byl namodelován anténní element na PC.

Pro proměření anténního elementu byl použit již vytvořený fantom mozkové tkáně [16], jeho dielektrické parametry: relativní permitivita ϵ_r (-) a měrná elektrická vodivost σ ($S \cdot m^{-1}$) byly proměřeny pomocí systému DAK. Z grafu na obrázku 6.2 je patrné, že relativní permitivita je frekvenčně závislá veličina. Z grafu se jeví závislost relativní permitivity na frekvenci jako čistě lineární, což odpovídá výsledkům dle [2]. Z grafu na obrázku 6.3 je patrné, že i měrná elektrická vodivost je lineárně závislá na frekvenci. Dle [2] je závislost měrné elektrické vodivosti na frekvenci exponenciální.

K proměření průběhu koeficientu odrazu byl použit vektorový analyzátor obvodů, ke kterému byl připojen anténní element. Anténní element se dotýkal hladiny kapalného fantomu hlavy a vyzařoval do něj. Výsledky měření jsou uvedeny na obrázku 6.5, porovnání naměřeného a simulovaného koeficientu odrazu je uvedeno na obrázku 6.6. V tabulce 6.1 jsou uvedeny některé parametry naměřeného a simulovaného průběhu koeficientu odrazu a jsou zde uvedeny i relativní chyby těchto parametrů. Vzniklé chyby jsou způsobeny zpracováním anténního elementu v laboratorních podmínkách. Nanesené lepidlo, jímž byly spojeny substráty dohromady, vytvořilo mezi substráty novou vrstvu o odlišných dielektrických vlastnostech, než jaké mají substráty. Plněním prokovů cínovou pastou nebylo jakkoliv narušeno vedení vlny po symetrickém páskovém vedení. Velký dopad na vlastnosti anténního elementu má zejména spojka koaxiálního konektoru na mikropáskové vedení, která byla výrobcem ponechána jako prokov, tudíž nebyla kompatibilní s koaxiálním konektorem. Jako nejjednodušší proveditelné řešení tohoto problému se ukázalo být vyplnění prokovu cínovou pastou a následné zavedení krátkého měděného drátku do dutiny prokovu tak, aby bylo symetrické

páskové vedení dobře nakontaktované. Rizikem této metody bylo roztečení cínu a zkratování okolních prokůvů, čímž by byla zničena celá anténa. Napájení koaxiálního kabelu bylo provedeno „od oka“ podle značek. Naposledy bylo provedeno pocínování bočních stran anténního elementu, aby byl co nejvíce omezen únik vlny skrze okna, která vznikla při výrobě a realizaci anténního elementu. Na konci výrobního procesu byl elektrický kontakt mezi vnitřním vodičem koaxiálního portu a vnějším pláštěm antény ověřen měřením pomocí multimetru. Výsledná naměřená závislost koeficientu odrazu na frekvenci byla porovnána se závislostí koeficientu odrazu na frekvenci, která vzešla z výsledku finální simulace.

Obecně je velmi složité, či téměř nemožné připravit kapalný fantom, který by vykazoval frekvenčně nezávislé dielektrické parametry tak, jak je nastaveno v numerickém modelu. Dielektrické parametry kapalného fantomu hlavy se liší od hodnot uvedených v normě [14]. Proto, z důvodu porovnání výsledků simulace s výsledky měření, byly provedeny dodatečné simulace, kde dielektrické vlastnosti numerického modelu zobrazované oblasti byly zvoleny z výsledků měření na frekvencích 874 a 1000 MHz (obrázek 6.2 a 6.3). Výsledky těchto numerických simulací lze porovnat s výsledky měření jen v okolí frekvence 1 GHz. Pro frekvence jiné než 1 GHz bude simulovaný anténní element virtuálně vyzařovat do média s jinými dielektrickými vlastnostmi než realizovaný anténní element. Z obrázku 6.7 plyne, že lepší shody s naměřeným signálem dostaneme pro dielektrické parametry, které byly nastaveny podle měření na frekvenci 1 GHz.

Hodnota koeficientu odrazu na frekvenci 1 GHz pro realizovaný anténní element vyšla na -9,6 GHz. Relativní odchylka je tedy přesných 40 % od nasimulovaných -16 dB na frekvenci 1 GHz. Relativní odchylka mezi naměřeným a simulovaným koeficientem odrazu je nejvyšší u šířky pásma, kdy vyšlá relativní chyba je 40,27 % a amplituda koeficientu odrazu neleží na námi požadovaném 1 GHz. Posun rezonanční frekvence můžeme vidět na 6.6, kdy naměřená hodnota amplitudy koeficientu odrazu je na 835 MHz, kdežto simulovaný anténní element měl amplitudu koeficientu odrazu na 1 GHz. Relativní odchylka rezonančních frekvencí je 12,7 %. Nasimulovaná anténa má též níže položené minimum koeficientu odrazu, na -16 dB. Realizovaná anténa má minimum koeficientu odrazu položeno na -12,46 dB, což je odchylka 22,13 %.

8 Závěr

Cílem této bakalářské práce byl návrh a realizace anténního elementu pro mikrovlnný zobrazovací systém. Předmětem návrhu anténního elementu bylo vytvoření geometrického modelu anténního elementu, nastavení dielektrických parametrů pro jednotlivé domény modelu a zadávání simulací, to vše v softwarovém prostředí programu COMSOL Multiphysics. Výsledky simulací byly převážně ve formě závislosti koeficientu odrazu ve frekvenčním pásmu 500 MHz až 3 GHz. Výstupem ze simulací byla následná změna geometrie, která splňuje podmínky určené v zadání této bakalářské práce. Tato pozměněná geometrie byla pro potřeby výroby rozpracována do několika geometrických řezů a zaslána externímu výrobcí na zpracování (geometrii zkoumaného anténního elementu je věnovaná velká část této bakalářské práce).

Realizovaný anténní element byl posléze testován při vyzařování do přizpůsobovací kapaliny a byl proměřen koeficient odrazu antény. Následně byl mezi sebou porovnán naměřený koeficient odrazu s koeficientem odrazu získaným pomocí numerické simulace.

Takto navržený anténní element by mohl být součástí experimentálního mikrovlnného zobrazovacího systému, kterým disponuje tým Bio-elektromagnetismu na Fakultě biomedicínského inženýrství při ČVUT v Praze.

Budoucí výzvou ve vývoji tohoto anténního elementu bude bezesporu přizpůsobení tohoto anténního elementu pro potřeby mikrovlnného zobrazovacího systému menších rozměrů, typicky pro měření na fantomu dětské hlavičky.

Seznam literatury

- [1] *Stroke Center* [online]. USA [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<http://www.strokecenter.org/patients/about-stroke/stroke-statistics/>.
- [2] LI, Xuyang. *Body Matched Antennas for Microwave Medical Applications*. Karlsruhe, Baden: KIT Scientific Publishing, 2013. ISBN 9783731501473.
- [3] *Antenna Theory Fundamentals* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_fundamentals.htm.
- [4] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 0-471-66782-x.
- [5] Láččík, J. *Šíření rádiových vln a užití kmitočtového spektra* [VUT Brno]. přednáška č. 1 k předmětu Navrhování rádiových spujů, 28 s. [cit. 2018-5-7].
- [6] *Electronic Design* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<http://www.electronicdesign.com/communications/back-basics-impedance-matching-part-1>.
- [7] *Antenna Theory* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com>
- [8] SCHANTZ, Hans. *The art and science of ultrawideband antennas*. Boston: Artech House, c2005. ISBN 1580538886.
- [9] PÍTRA, Kamil. *Antény pro pásmo milimetrových vln*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT.
- [10] ROZMAN, Jiří. *Elektronické přístroje v lékařství*. Praha: Academia, 2006. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1308-3.
- [11] VRBA, Jan. *Lékařské aplikace mikrovlnné techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02705-8.
- [12] PASTORINO, Matteo. *Microwave imaging*. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2010. Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN 978-0-470-27800-0.

- [13] VRBA, Jan, Ladislav OPPL, Radim ZAJÍČEK, Kateřina NOVOTNÁ a David VRBA. *Medical Imaging and Diagnostics Based on Microwaves* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267246365_Medical_Imaging_and_Diagnostics_Based_on_Microwaves.
- [14] *IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques, IEEE Std 1528-2013 (Revision of IEEE Std 1528-2003)*, s. 1–246, zář. 2013.
- [15] *Rogers RO4000 series data sheet* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.pragoboard.cz/download/ro4350b.pdf>.
- [16] POKORNÝ, Tomáš. *Detekce cévních mozkových příhod pomocí mikrovlnného zobrazovacího systému a SVM*. 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství.

Seznam obrázků

Obr. 2.1	Různé typy drátových antén. (a) dipólová anténa, (b) kruhová anténa, (c) anténa tvaru šroubovice. [4]	13
Obr. 2.2	Vlnovodná anténa. [4]	13
Obr. 2.3	Spirální šterbinová anténa. [4].....	14
Obr. 2.4	Field pattern. Zdroj: https://www.researchgate.net/figure/Field-pattern-of-a-directional-antenna57_fig3_316106468	15
Obr. 2.5	Schéma obvodu s vyznačenou impedancí generátoru (Z_G) a impedancí antény (Z_A). Zdroj: autor.	16
Obr. 2.6	Závislost koeficientu odrazu na frekvenci. Zdroj: autor.	18
Obr. 2.7	Šířka pásma definovaná pomocí koeficientu odrazu v závislosti na frekvenci. [9]	19
Obr. 3.1	Obecné uspořádání soustavy pro MWI. [11].....	23
Obr. 4.1	Obecný vývojový diagram návrhu a optimalizace struktury šterbinového anténního elementu v numerickém simulátoru. Zdroj: autor.....	25
Obr. 4.2	Rozměry substrátů. Zdroj: autor.	27
Obr. 4.3	Vyzařovací rovina anténního elementu. Zdroj: autor.....	28
Obr. 4.4	Rovina mezi substráty se symetrickým páskovým vedením. Zdroj: autor.	29
Obr. 4.5	Spodní zemnicí rovina anténního elementu. Zdroj: autor.	30
Obr. 4.6	Koaxiální konektor, pohled z boku. Zdroj: autor.....	31
Obr. 4.7	Koaxiální konektor, natočený profil. Zdroj: autor.	31
Obr. 4.8	Rozložení prokův uvnitř anténního elementu, modře vyznačené části jsou prokopy. Zdroj: autor.	33
Obr. 4.9	Celý anténní element, pohled shora. Zdroj: autor.....	34
Obr. 4.10	Celý anténní element, pohled z boku. Zdroj: autor.....	34
Obr. 4.11	Celý model anténního elementu i s fantomy tkáně (v obrázku nad anténním elementem) a vzduchu (v obrázku pod anténním elementem). Zdroj: autor.	35
Obr. 4.12	Vrchní vyzařovací rovina anténního elementu, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.	38
Obr. 4.13	Vnitřek anténního elementu, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.	38
Obr. 4.14	Mezisubstrátová rovina se symetrickým mikropáskovým vedením, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.....	39
Obr. 4.15	Koaxiální konektor, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.	39
Obr. 4.16	Celý anténní element s koaxiálním konektorem, modře vyznačené části jsou kovové plochy. Zdroj: autor.	40
Obr. 4.17	Nastavení portu. Zdroj: autor.	41
Obr. 4.18	Nastavení Scattering boundary condition. Zdroj: autor.	42
Obr. 4.19	Detail nameshovaného symetrického páskového vedení. Zdroj: autor.	43

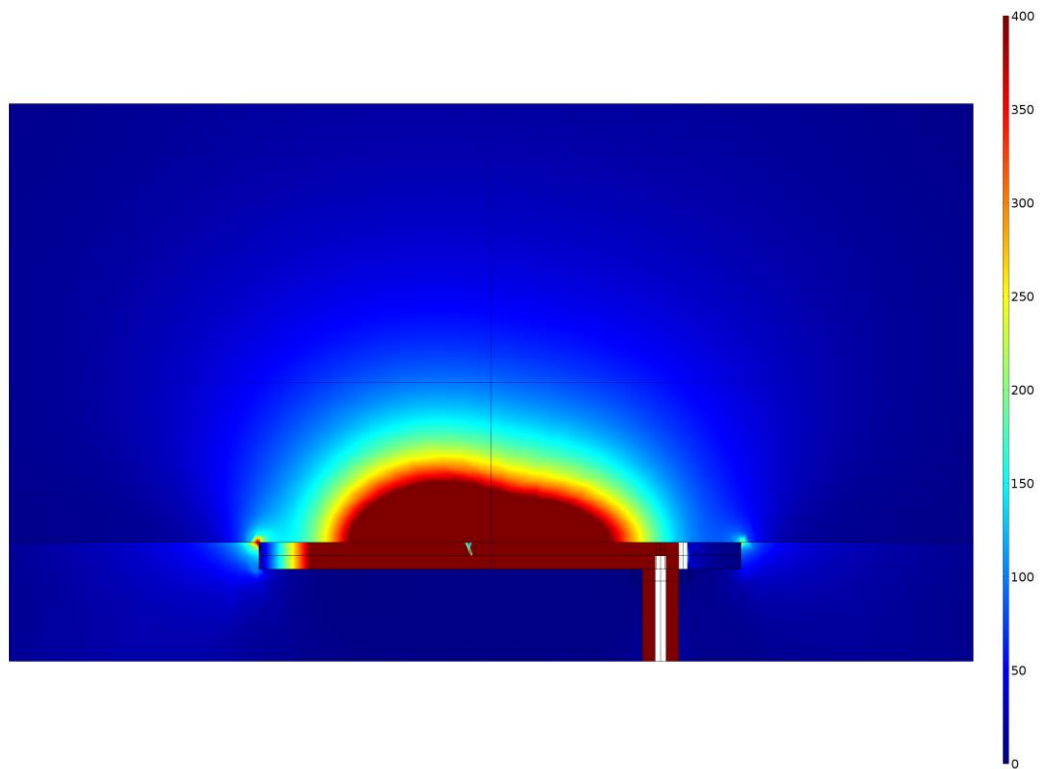
Obr. 4.20	Vizualizace měněných parametrů při simulacích. Zdroj: autor.	44
Obr. 4.21	Graf koeficientu odrazu v závislosti na změně rozměru substrátu. Zdroj: autor.....	45
Obr. 4.22	Graf koeficientu odrazu v závislosti na změně šířky šterbiny. Zdroj: autor.	46
Obr. 4.23	Graf koeficientu odrazu v závislosti na změně $ds1$ a $ds2$. Zdroj: autor.....	47
Obr. 4.24	Graf koeficientu odrazu v závislosti na změně ds . Zdroj: autor.	48
Obr. 4.25	Graf průběhu koeficientu odrazu finálního anténního elementu (0,5 GHz - 3 GHz). Zdroj: autor.	49
Obr. 5.1	Vyhotovené substrátové desky. Zdroj: autor.....	51
Obr. 5.2	Fixace slepených substrátů. Zdroj: autor.....	52
Obr. 5.3	Zahřívání cínové pasty pomocí horkovzdušné pistole. Zdroj: autor.	53
Obr. 5.4	Nastavené parametry pro horkovzdušnou pistoli. Zdroj: autor.....	53
Obr. 5.5	Pájení koaxiálního konektoru pomocí horkovzdušné pistole. Koaxiální konektor je zakrytý a nachází se uvnitř hlavice pistole pro lepší fokusaci tepla. Zdroj: autor.....	54
Obr. 5.6	Anténní element, pohled shora. Zdroj: autor.....	55
Obr. 5.7	Anténní element, pohled z boku. Zdroj: autor.....	56
Obr. 5.8	Anténní element, pohled z boku. Zdroj: autor.....	56
Obr. 6.1	Měření relativní permitivity a měrné elektrické vodivosti pomocí systému DAK, který je připojen k vektorovému analyzátoru obvodů. 1 - vektorový analyzátor obvodů, 2 – Sonda DAK12 ponořená do fantomu mozkové tkáně, 3 - připojený PC. Zdroj: auor.	57
Obr. 6.2	Graf naměřené frekvenční závislosti relativní permitivity ϵ_r (-) fantomu mozkové tkáně. Zdroj: autor	58
Obr. 6.3	Graf naměřené frekvenční závislosti měrné elektrické vodivosti σ ($S \cdot m - 1$) fantomu mozkové tkáně. Zdroj: autor.....	58
Obr. 6.4	Měřicí aparatura pro měření koeficientu odrazu anténního elementu. 1 - vektorový analyzátor obvodů, 2 - kalibrační člen, 3 - anténní element ponořený do fantomu mozkové tkáně. Zdroj: autor.	59
Obr. 6.5	Graf naměřených průběhů koeficientů odrazu pro všechna měření. Zdroj: autor.....	60
Obr. 6.6	Graf naměřeného a simulovaného průběhu koeficientu odrazu pro frekvenčně konstantní dielektrické parametry dle [14]. Zdroj: autor.....	62
Obr. 6.7	Graf naměřeného koeficientu odrazu v porovnání se dvěma simulacemi pro frekvenčně konstantní dielektrické parametry z měření dielektrických vlastností tekutého fantomu hlavy (obrázek 6.2 a 6.3) na frekvenci 874 a 1000 MHz. Zdroj: autor.....	63

Seznam příloh

Příloha A: Prostorové rozložení elektrického pole ve fantomu hlavy pro frekvenci 1 GHz, pohled z boku.

Příloha B: Obsah přiloženého CD.

Příloha A



Příloha B

Abstrakt (Čj i Aj)

Klíčová slova (Čj i Aj)

Zadání

Bakalářskou práci