



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

3D TIŠTĚNÁ KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ FLÍČKOVÁ ANTÉNA

3D PRINTED CIRCULARLY POLARIZED PATCH ANTENNA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Drápal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Jakub Drápal

ID: 229322

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

3D tištěná kruhově polarizovaná flíčková anténa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s kruhově polarizovanými flíčkovými anténami realizovanými na nehomogenním substrátu. Po dohodě s vedoucím práce ve vhodném programu modelujte jednobodově napájenou kruhově polarizovanou flíčkovou anténu realizovanou na nehomogenním substrátu, jehož elektrické vlastnosti vhodně upravujte lokálně s cílem dosažení maximální šířky pracovního pásma antény. Diskutujte dosažené výsledky a porovnejte je s jednobodově napájenou kruhově polarizovanou flíčkovou anténou realizovanou na konvenčním mikrovlákném substrátu.

Navrženou anténu realizujte technologií 3D tisku. Anténu změřte a srovnajte dosažené výsledky se simulovanými daty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BALANIS, C., A., Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition, John Wiley and Sons, New Jersey, 2005.
- [2] WANG, S., ZHU, L., WANG, J., WU, W., Circularly Polarised Patch Antenna Using 3D-Printed Asymmetric Substrate, Electronic Letters, 2018, vol. 54, no. 11, p. 674–676.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Bakalářská práce se zabývá kruhově polarizovanými flíčkovými anténami. V této práci je dosaženo kruhové polarizace nehomogenitou substrátu. V první části jsou shrnuty základní teoretické poznatky o flíčkových anténách, tvarech flíčkových antén, způsobech buzení a vzniku kruhové polarizace. V další části je popsán návrh kruhově polarizované flíčkové antény na nehomogenním substrátu, je navrženo několik konceptů antén, které jsou porovnány mezi sebou a s konvenční anténou. V práci je zkoumán vliv tvarování inkluzí a jejich stupňování v substrátu a vložení inkluze do okolí středního vodiče v substrátu. Poslední část se věnuje realizaci navržených antén metodou 3D tisku a porovnání simulací z programu ANSYS HFSS s měřením antén.

Klíčová slova

flíčková anténa, kruhová polarizace, nehomogenní substrát, osový poměr, šířka pásma osového poměru, impedanční šířka pásma, impedanční přizpůsobení, inkluze

Abstract

The bachelor thesis deals with circularly polarized patch antennas. In this work, circular polarization is achieved by inhomogeneous substrate. The first part summarizes the basic theoretical knowledge about the patch antennas, the shapes of the patch antennas, the excitation methods and the generation of circular polarization. In the next section, the design of a circularly polarized patch antenna on an inhomogeneous substrate is described, and several antenna concepts are proposed and compared with each other and with a conventional antenna. The effect of shaping the inclusions and their gradation in the substrate and the insertion of the inclusions around the centre conductor in the substrate is investigated. The last section is devoted to the realization of the designed antennas by 3D printing method and comparison of simulations from ANSYS HFSS software with measurements of the antennas.

Keywords

patch antenna, circular polarization, inhomogeneous substrate, axial ratio, axial ratio bandwidth, impedance bandwidth, impedance matching, inclusion

Bibliografická citace

DRÁPAL, Jakub. *3D tištěná kruhově polarizovaná flíčková anténa* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151692>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Jaroslav Láčík.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Jakub Drápal*

VUT ID studenta: *229322*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2022/23*

Téma závěrečné práce: *3D tištěná kruhově polarizovaná fličková anténa*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 29. května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jaroslavu Láčíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne: 29. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. FLÍČKOVÉ ANTÉNY.....	12
1.1 STRUKTURA A VLASTNOSTI FLÍČKOVÝCH ANTÉN	12
1.2 VÝHODY A NEVÝHODY FLÍČKOVÝCH ANTÉN.....	13
1.3 KRUHOVÁ POLARIZACE U FLÍČKOVÝCH ANTÉN.....	13
1.3.1 <i>Kruhově polarizovaná flíčková anténa s useknutými rohy.....</i>	<i>14</i>
1.3.2 <i>Kruhově polarizovaná anténa se slotem v úhlopříčce.....</i>	<i>14</i>
1.3.3 <i>Kruhově polarizovaná téměř čtvercová flíčková anténa</i>	<i>15</i>
1.3.4 <i>Kruhově polarizované antény na nehomogenním substrátu</i>	<i>16</i>
2. NÁVRH A SIMULACE FLÍČKOVÝCH ANTÉN.....	19
2.1 ZKOUMÁNÍ VLIVU TVARU INKLUZE NA ŠÍŘKU PÁSMU.....	21
2.1.1 <i>Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí ve tvaru trojúhelníka</i>	<i>21</i>
2.1.2 <i>Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu</i>	<i>25</i>
2.1.3 <i>Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí ve tvaru kruhu</i>	<i>28</i>
2.1.4 <i>Kruhově polarizovaná flíčková anténa se stupňovanou inkluzí</i>	<i>31</i>
2.2 KONVENČNÍ ANTÉNA.....	32
2.2.1 <i>Návrh a simulace konvenční antény se zkrácenými rohy</i>	<i>32</i>
2.3 POROVNÁNÍ ANTÉN NA NEHOMOGENNÍM SUBSTRÁTU S KONVENČNÍ ANTÉNOU	35
2.4 ZLEPŠENÍ IMPEDANČNÍHO PŘIZPŮSOBNÍ VLOŽENÍM INKLUZE DO OBLASTI NAPÁJENÍ.....	37
2.4.1 <i>Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí v okolí středního vodiče</i>	<i>38</i>
2.5 POROVNÁNÍ ANTÉN S INKLUZÍ V OKOLÍ STŘEDNÍHO VODIČE A BEZ INKLUZE.....	41
3. REALIZACE A MĚŘENÍ ANTÉN.....	42
3.1 TVORBA ANTÉNY	42
3.2 SKUTEČNÁ HODNOTA RELATIVNÍ PERMITIVITY SUBSTRÁTU.....	44
3.3 MĚŘENÍ ANTÉN	45
3.3.1 <i>Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí ve tvaru kruhu bez inkluze v okolí středního vodiče</i>	<i>45</i>
3.3.2 <i>Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí ve tvaru kruhu s inkluzí v okolí středního vodiče</i>	<i>48</i>
3.4 SROVNÁNÍ ANTÉN	50
4. ZÁVĚR.....	52
LITERATURA.....	53
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Struktura flíčkové (mikropáskové) antény [1].....	12
1.2	Tvary flíčkových antén [1].....	13
1.3	Kruhově polarizovaná flíčková anténa se zkrácenými rohy [1]	14
1.4	Kruhově polarizovaná flíčková anténa se slotem v jedné diagonále. (RHCP) [1]	15
1.5	Kruhově polarizovaná flíčková anténa se slotem v druhé diagonále. (LHCP) [1]	15
1.6	Kruhově polarizovaná téměř čtvercová flíčková vlevo LHCP, vpravo RHCP [1]	16
1.7	Kruhově polarizovaná flíčková anténa se vzduchovou inzercí ve tvaru trojúhelníka	17
1.8	Koncept substrátu z tenkých pásů [5].....	17
1.9	Koncept substrátu ve tvaru mřížky [7]	18
2.1	Optimalizovaný model LP flíčkové antény	20
2.2	Navržený model KP flíčkové antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka	22
2.3	Model KP flíčkové antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka v ANSYS HFSS.....	22
2.4	Osový poměr KP antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka	23
2.5	Činitel odrazu KP antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka.....	24
2.6	Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře	24
2.7	Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře	25
2.8	Model KP flíčkové antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu v ANSYS HFSS	25
2.9	Osový poměr KP antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu.....	26
2.10	Činitel odrazu KP antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu	27
2.11	Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře	27
2.12	Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře	28
2.13	Model KP flíčkové antény s inkluzí ve tvaru kruhu v ANSYS HFSS	29
2.14	Osový poměr KP antény s inkluzí ve tvaru kruhu.....	30
2.15	Činitel odrazu KP antény s inkluzí ve tvaru kruhu.....	30
2.16	Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru kruhu v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře	31
2.17	Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru kruhu v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře	31
2.18	Navržený model KP konvenční flíčkové antény	32
2.19	Osový poměr konvenční antény	33
2.20	Činitel odrazu konvenční antény	34
2.21	Souhlasná a křížová složka KP konvenční antény v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře	34
2.22	Souhlasná a křížová složka KP konvenční antény v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře	35
2.23	Srovnání činitele odrazu antén na nehomogenním substrátu červená – trojúhelník, zelená – čtvrtkruh, modrá – kruh, hnědá - konvenční	36
2.24	Srovnání osového poměru antén na nehomogenním substrátu červená – trojúhelník, zelená – čtvrtkruh, modrá – kruh, hnědá - konvenční	37
2.25	Model KP flíčkové antény s inkluzí v okolí středního vodiče v ANSYS HFSS	38
2.26	Osový poměr KP flíčkové antény s inkluzí v okolí středního vodiče	39
2.27	Činitel odrazu KP flíčkové antény s inkluzí v okolí středního vodiče	39
2.28	Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí v okolí středního vodiče v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře	40

2.29	Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí v okolí středního vodiče v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře	40
2.30	Činitel odrazu KP flíčkových antén – bez inkluze červeně, s inkluzí modře	41
3.1	Zhotovená anténa s kruhovými vzduchovými inkluzemi bez inkluze v okolí středního vodiče	43
3.2	Zhotovená anténa s kruhovými vzduchovými inkluzemi s inkluzí v okolí středního vodiče	43
3.3	Zobrazený frekvenční posun u antény bez inkluze u středního vodiče, červená – simulace, modrá - měření.....	44
3.4	Zobrazený frekvenční posun u antény s inkluzí u středního vodiče, červená – simulace, modrá - měření.....	45
3.5	Porovnání parametrů S11 simulované a vyrobené antény bez inkluze u středního vodiče, červená – simulace, modrá - měření	46
3.6	Porovnání osového poměru simulované a vyrobené antény bez inkluze u středního vodiče, červená – simulace, modrá - měření	46
3.7	Vyzařovací charakteristiky simulované a vyrobené antény bez inkluze u středního vodiče v rovině XZ	47
3.8	Vyzařovací charakteristiky simulované a vyrobené antény bez inkluze u středního vodiče v rovině YZ	47
3.9	Porovnání parametrů S11 simulované a vyrobené antény s inkluzí u středního vodiče, červená – simulace, hnědá - měření.....	48
3.10	Porovnání osového poměru simulované a vyrobené antény s inkluzí u středního vodiče, červená – simulace, modrá - měření	49
3.11	Vyzařovací charakteristiky simulované a vyrobené antény s inkluzí u středního vodiče v rovině XZ	49
3.12	Vyzařovací charakteristiky simulované a vyrobené antény s inkluzí u středního vodiče v rovině YZ	50

SEZNAM TABULEK

2.1	Simulované hodnoty antény s trojúhelníkovou vzduchovou inkluzí.....	23
2.2	Simulované hodnoty antény se čtvrtkruhovou vzduchovou inkluzí.....	26
2.3	Simulované hodnoty antény s kruhovou vzduchovou inkluzí.....	29
2.4	Simulované výsledky konvenční antény.....	33
2.5	Srovnání simulovaných hodnot antén s tvarováním vzduchové inkluze.....	36
2.6	Srovnání simulovaných hodnot antén s inkluzí u středního vodiče.....	41
3.1	Srovnání simulovaných a změřených hodnot antén.....	51

ÚVOD

Flíčkové (mikropáskové) antény se skládají ze zemní kovové plochy, dielektrického substrátu a samotného flíčku, který je umístěn na dielektrickém substrátu. Flíčkové antény jsou dnes hojně využívány z důvodů jejich výhod. Využívají se například v letadlech, družicích, raketových aplikacích a raketoplánech, dále také v bezdrátové komunikaci, mobilním radiu nebo mobilních telefonech. Hlavními výhodami jsou nízká hmotnost, malé rozměry a nízká cena, která je dána nenáročností výroby. Hlavní nevýhodou flíčkových antén je malá šířka pásma a nízká účinnost vyzařování [1].

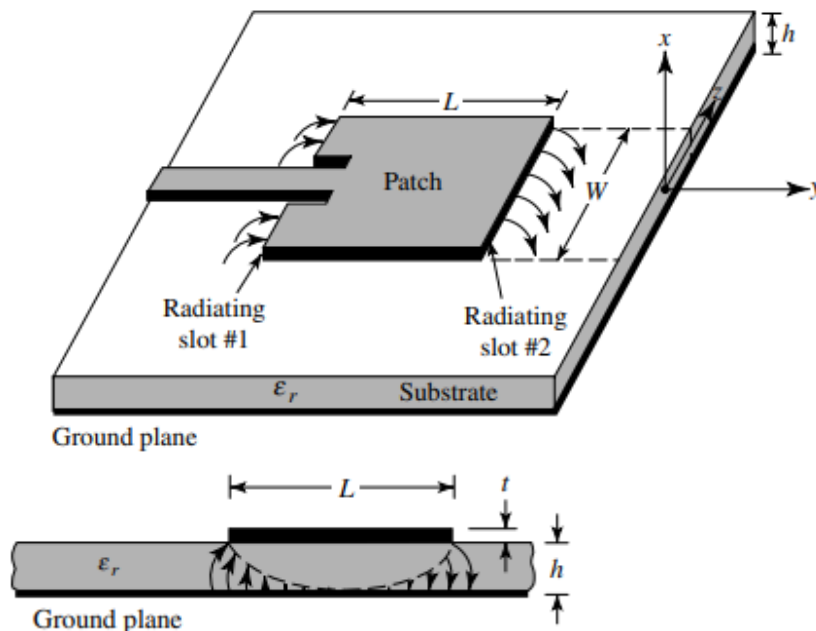
Hlavním cílem této práce je navrhnutí kruhově polarizovaných flíčkových antén na substrátu s různým rozložením relativní permitivity substrátu následné simulování těchto antén v programu ANSYS HFSS a prozkoumání, zda je možné získat větší šířku pásma osového poměru či impedanční šířku pásma. Získané výsledky ze simulací jsou následně porovnány s konvenční kruhově polarizovanou anténou.

Vybrané koncepty antén byly vyrobeny, změřeny a porovnány se simulovanými výsledky.

1. FLÍČKOVÉ ANTÉNY

1.1 Struktura a vlastnosti flíčkových antén

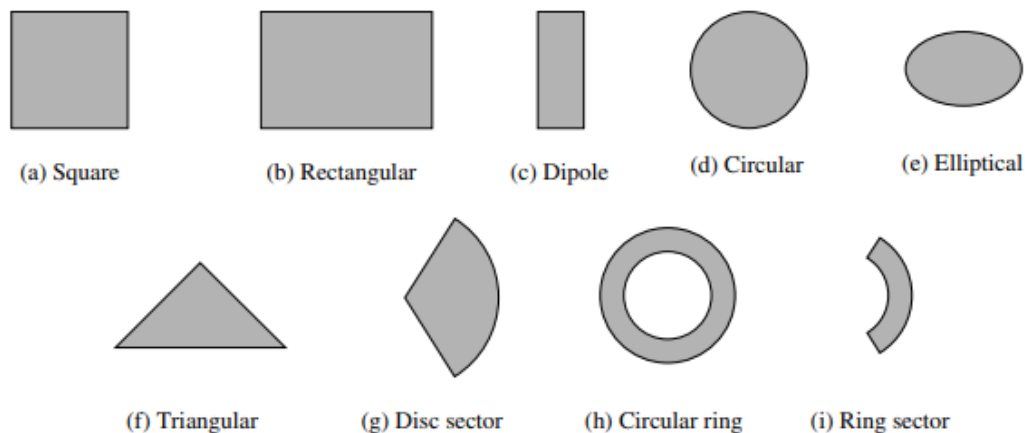
Flíčkové antény mají jednoduchou strukturu. Jsou složeny z vodivého flíčku, který slouží k vyzařování vlny do prostoru. Tento flíček je umístěn na vrchní straně dielektrického substrátu, pod spodní stranou substrátu se nachází zemní plocha [1].



Obrázek 1.1 Struktura flíčkové (mikropáskové) antény [1]

Jako dielektrický substrát se obvykle používá mikrovlnný substrát nebo materiál pro 3D tisk s dielektrickou konstantou v rozmezí $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Ideální substrát pro flíčkovou anténu má hodnotu dielektrické konstanty blízkou hodnotě 2,2 a větší tloušťku substrátu. Splněním těchto požadavků na substrát lze získat větší šířku pásma a vyšší účinnost vyzařování, rozměry antény ale vzrostou. Naopak použitím substrátu s vysokou hodnotou relativní permitivity dojde ke zmenšení rozměrů antény, ale kvůli vyšším ztrátám v dielektriku se zmenší šířka pásma a sníží se i účinnost [1].

Vyzařovaná vlna do prostoru z antény závisí na rozložení proudu na flíčku. Vyzařovací tvar flíčkových antén může být rozmanitý. Mezi nejčastější tvary flíčkových antén patří čtverec, obdélník, dipól, kruh, elipsa, trojúhelník a další, jak lze vidět na obrázku 1.2 [1].



Obrázek 1.2 Tvary flíčkových antén [1]

1.2 Výhody a nevýhody flíčkových antén

Oproti běžným anténám mají flíčkové antény hned několik výhod [2]:

- Jsou lehké, malé a tenké
- Mají nízké náklady na výrobu
- Snadné získat kruhovou nebo lineární polarizaci
- Snadné propojení s mikrovlňnými obvody

Avšak mají také své nevýhody [2]:

- Jsou úzkopásmové
- Mají nízký zisk

1.3 Kruhová polarizace u flíčkových antén

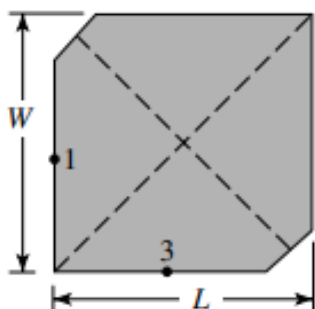
Kruhovou polarizaci lze získat, jestliže dva pravoúhlé módy jsou buzeny se stejnou amplitudou a fázovým posuvem 90° mezi sebou [1].

Zásadní veličinou kruhově polarizovaných antén je osový poměr. Tento poměr udává poměr dvou poloos polarizační elipsy [1].

Způsobů, jak získat kruhovou polarizaci u flíčkové antény, je několik. Kruhovou polarizaci lze získat napájením flíčku ve dvou bodech, případně při napájení antény v jednom bodě získáme kruhovou polarizaci defektem na flíčku nebo narušením dielektrika. Podle toho, jaký má polarizovaná vlna směr otáčení, ji dělíme na pravotočivou kruhovou polarizaci (RHCP) nebo levotočivou kruhovou polarizaci (LHCP) [1].

1.3.1 Kruhově polarizovaná flíčková anténa s useknutými rohy

U tohoto typu antén jsou zkráceny dva rohy ležící vzájemně v úhlopříčce a anténa je napájena na kraji flíčku, jako je znázorněno na obrázku 1.3 body 1 a 3. Zavedením správné asymetrie vznikne kruhová polarizace. Zkrácení rohů způsobí zvýšení rezonančního kmitočtu módu v úhlopříčce s useknutými rohy oproti módu v úhlopříčce s neuseknutými rohy. Je-li anténa napájena v bodě 1 podle obrázku 1.3, pak bude vybudena pravotočivě polarizovaná vlna (RHCP), napájením antény v bodě 3 bude naopak vybudena levotočivě polarizovaná vlna (LHCP) [3] [4].



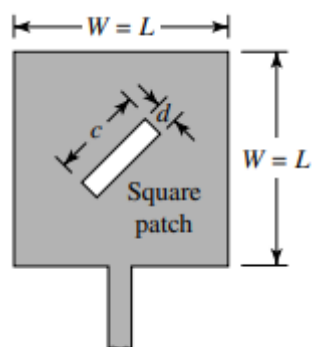
Obrázek 1.3 Kruhově polarizovaná flíčková anténa se zkrácenými rohy [1]

1.3.2 Kruhově polarizovaná anténa se slotem v úhlopříčce

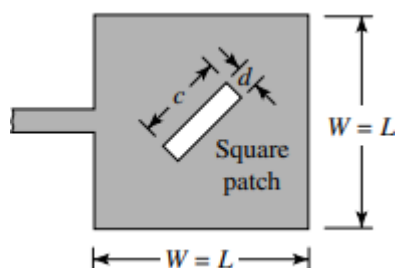
U této antény je rozdíl kmitočtů způsoben obdélníkovým slotem vyleptaným do čtvercového flíčku. Tento slot ruší víc jeden diagonální mód než druhý diagonální mód. V tomto případě záleží i na tom, v jaké úhlopříčce je slot umístěn. Je-li slot na flíčku umístěn jako na obrázku 1.4, pak bude tato anténa budit pravotočivou kruhovou polarizaci (RHCP). Naopak, bude-li slot umístěn na flíčku jako je znázorněno na obrázku 1.5, pak bude tento flíček budit levotočivou kruhovou polarizaci (LHCP). V obou případech se pro čtvercovou flíčkovou anténu volí rozměry slotu c a d podle vzorců 1.1 a 1.2 jako [1] [3]

$$c = \frac{L}{2,72} = \frac{W}{2,72}, \quad (1.1)$$

$$d = \frac{c}{10} = \frac{L}{27,2} = \frac{W}{27,2}. \quad (1.2)$$



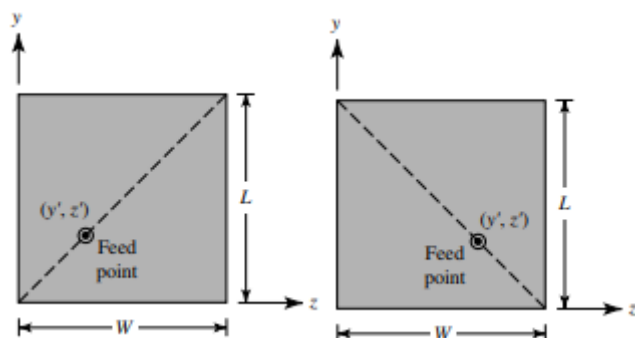
Obrázek 1.4 Kruhově polarizovaná flíčková anténa se slotem v jedné diagonále. (RHCP) [1]



Obrázek 1.5 Kruhově polarizovaná flíčková anténa se slotem v druhé diagonále. (LHCP) [1]

1.3.3 Kruhově polarizovaná téměř čtvercová flíčková anténa

Téměř čtvercová flíčková anténa se řadí mezi konvenční antény stejně jako již dva zmíněné typy antén. U této antény není buzení kruhově polarizované vlny způsobeno deformací flíčku jako v předešlých případech, nýbrž umístěním napájení do jedné z diagonál, jako je znázorněno na obrázku 1.6. Leží-li napájení na diagonále z levého spodního rohu do pravého horního rohu, pak bude vybudena levotočivě polarizovaná vlna (obrázek 1.6 vlevo). Bude-li napájení umístěno v diagonále z pravého spodního rohu do levého horního rohu, pak anténa vybudí pravotočivě polarizovanou vlnu (obrázek 1.6 vpravo) [1].



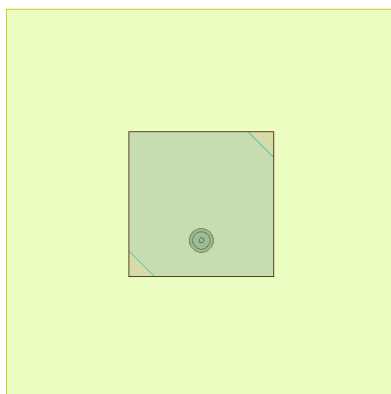
Obrázek 1.6 Kruhově polarizovaná téměř čtvercová flíčková vlevo LHCP, vpravo RHCP [1]

1.3.4 Kruhově polarizované antény na nehomogenním substrátu

U tohoto typu antén není kruhová polarizace buzena defektem na flíčku, jako bylo ukázáno v kapitolách 1.3.1, 1.3.2 a 1.3.3, nýbrž asymetričností substrátu. V této kapitole jsou znázorněny 3 antény na nehomogenním substrátu, které budí kruhově polarizovanou vlnu [5] [6]. Buzení kruhově polarizované vlny na nehomogenním substrátu je založeno na principu, že ve dvou na sobě kolmých směrech jsou různé hodnoty relativní permitivity dielektrika. Různou hodnotu relativní permitivity ve dvou směrech lze získat vložením inkluze do substrátu. Inkluze může být buď vzduchová, jako je ukázáno v této práci či z jiného materiálu [5].

Čtvercová anténa se vzduchovými inkluzemi ve tvaru trojúhelníka

Pod dvěma navzájem diagonálními rohy jsou umístěny vzduchové inkluze, které posunou rezonanční kmitočet módu v jedné úhlopříčce. Přiložená literatura uvádí tuto anténu se slotem umístěným ve flíčku rovnoběžně s jednou ze stran flíčku. Tento slot ovšem neslouží pro buzení kruhově polarizované vlny, ale pro lepší impedanční přizpůsobení. To, že lze vybudit kruhově polarizovanou vlnu tímto typem antény bez slotu je ukázáno v kapitole 2.1.1. Po dohodě s vedoucím práce byl pro návrh vybrán tento koncept antény. Tento koncept substrátu byl vybrán kvůli možnostem při zvětšování šířky pásma [6].



Obrázek 1.7 Kruhově polarizovaná flíčková anténa se vzduchovou inzercí ve tvaru trojúhelníka

Anténa na substrátu z tenkých pásů

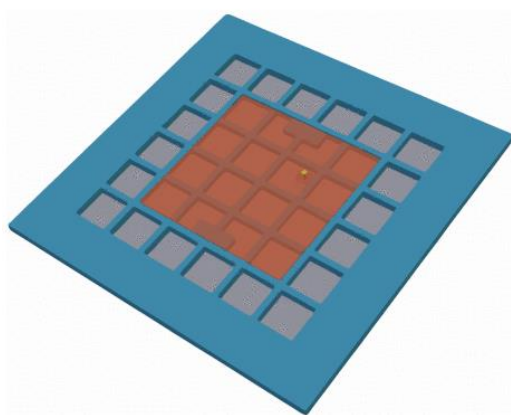
U tohoto konceptu substrátu se střídají pruhy ze dvou různých materiálů. Tenké pruhy jsou natočeny o 45° vzhledem k anténě, aby bylo dosaženo fázového posuvu o 90° . V přiložené literatuře bylo dokázáno, že tímto konceptem substrátu lze dosáhnout kruhové polarizace a zvýšením rozdílu permitivity substrátů lze zmenšit výšku substrátu [5].



Obrázek 1.8 Koncept substrátu z tenkých pásů [5]

Anténa na substrátu ve tvaru mřížky

Tento koncept substrátu je složen z mřížky, která má v sobě umístěny dvě vložky ve tvaru obdélníku uprostřed dvou protilehlých stran flíčku. Tyto vložky způsobují nehomogenitu substrátu a tím i vznik kruhové polarizace. V přiložené literatuře je dokázáno, že tímto konceptem substrátu lze dosáhnout kruhové polarizace a šířky svazku až 120° [7][8].



Obrázek 1.9 Koncept substrátu ve tvaru mřížky [7]

2. NÁVRH A SIMULACE FLÍČKOVÝCH ANTÉN

V druhé kapitole je znázorněn postup při návrhu kruhově polarizované flíčkové antény s asymetrickým substrátem. Nejprve je navržena lineárně polarizovaná čtvercová flíčková anténa, v dalším kroku je do substrátu vložena vzduchová inkluze, která způsobí kruhovou polarizaci. Pro zjištění velikosti inkluze do substrátu neexistují vzorce, proto je tato velikost určena experimentálně za pomoci simulace. Každá anténa je optimalizována pro dosažení co nejlepšího výsledku za pomoci simulací v počítačovém programu ANSYS HFSS.

Vedoucím bylo zadáno navrhnout anténu pro pásmo ISM s pracovním kmitočtem 2,45GHz, což přímo nevyplývá ze zadání a dále byl s vedoucím domluven substrát pro 3D tisk PLA s $\epsilon_r = 2,71$, činitelem ztrát 0,017 [9] a výškou $h = 1,524\text{mm}$.

Jelikož je čtverec speciálním typem obdélníku, tak byly při návrhu použity vzorce pro návrh obdélníkového flíčku na homogenním substrátu z literatury [1]. Vypočtené hodnoty sloužily pro přibližné určení rozměrů antén na nehomogenním substrátu.

Jako první je při návrhu flíčkové antény nutné vypočíst její šířku, tu určíme podle vztahu (2.1)

$$W = \frac{c}{2f_r} \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}. \quad (2.1)$$

V tomto vztahu c udává rychlost světla ve vakuu, f_r rezonanční kmitočet a ϵ_r relativní permitivitu dielektrika. Dosazením zadaných hodnot do vztahu 2.1 získáme šířku flíčku

$$W = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,45 \cdot 10^9} \cdot \sqrt{\frac{2}{2,71+1}} = 45 \text{ mm}.$$

V dalším kroku je vypočtena efektivní relativní permitivita dielektrika podle vztahu (2.2)

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (2.2)$$

Ve vztahu (2.2) značí ϵ_r relativní permitivitu dielektrika, h tloušťku substrátu a W šířku flíčku. Tímto získáme hodnotu

$$\epsilon_{reff} = \frac{2,71 + 1}{2} + \frac{2,71 - 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \frac{1,524}{45}\right)^{-\frac{1}{2}} = 2,566.$$

Než bude vypočtena konečná délka flíčku, je nutné určit hodnotu rozšíření flíčku

$$\Delta L = 0,412h \cdot \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)}. \quad (2.3)$$

Zde značí ϵ_{reff} efektivní relativní permitivitu dielektrika, W šířku flíčku a h výšku substrátu.

	Hodnota	rozšíření	flíčku	vychází
--	---------	-----------	--------	---------

$$\Delta L = 0,412h \cdot \frac{(2,566 + 0,3) \cdot \left(\frac{45}{1,524} + 0,264\right)}{(2,566 - 0,258) \cdot \left(\frac{45}{1,524} + 0,8\right)} = 0,767 \text{ mm} .$$

Jako poslední krok při návrhu flíčku je výpočet skutečné délky flíčku

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} - 2\Delta L , \quad (2.4)$$

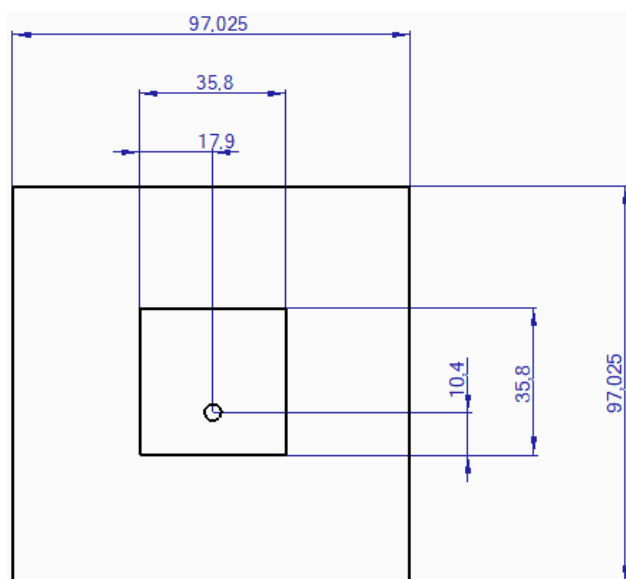
kde ε_0 je permitivita vakua a μ_0 je permeabilita vakua, f_r znamená rezonanční kmitočet, $\varepsilon_{\text{reff}}$ efektivní relativní permitivitu dielektrika a ΔL rozšíření flíčku. Číselně délka flíčku vychází

$$L = \frac{1}{2 \cdot 2,45 \cdot 10^9 \sqrt{2,566} \sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}} - 2 \cdot 0,767 = 36,7 \text{ mm} .$$

Délka flíčku L je stranou navržené antény, protože délka flíčku udává rezonanční frekvenci. Délka strany substrátu je zvolena tak, že z každé strany substrát přečnává flíček o čtvrtinu vlnové délky.

Napájení je namodelováno tak, že vnější vodič koaxiálního vedení má průměr 6 mm, a střední vodič má průměr 1,26 mm. Dielektrikem mezi vodiči je teflon s průměrem 4,3 mm a relativní permitivitou 2,1.

Po prvotní simulaci musela být upravena délka flíčku L na hodnotu $L = 35,8$ mm pro posunutí rezonančního kmitočtu na frekvenci 2,45 GHz. Napájení flíčku koaxiálním kabelem se nachází na ose x ve vzdálenosti 7,5 mm od středu antény. V tomto bodě bylo zjištěno za pomoci simulace v programu ANSYS HFSS nejlepší impedanční přizpůsobení lineárně polarizované antény.



Obrázek 2.1 Optimalizovaný model LP flíčkové antény

2.1 Zkoumání vlivu tvaru inkluze na šířku pásma

V této části je zkoumáno, zda má tvarování inkluze v substrátu vliv na šířku pásma.

Kruhová polarizace je tvořena asymetričností substrátu, jako je znázorněno na obrázku 1.7 a popsáno v kapitole 1.3.4. U tohoto konceptu antén, zda bude buzena LHCP či RHCP vlna, závisí na umístění inkluzí do substrátu. Napájením antény v bodě jako je znázorněno na obrázku 2.5 a umístěním inkluzí v diagonále od levého spodního rohu flíčku do pravého horního rohu flíčku bude vybuzena LHCP, tedy pravotočivě polarizovaná vlna. Pokud by se inkluze nacházely ve druhé diagonále, pak by došlo k vybuzení RHCP vlny.

Jelikož neexistuje v literatuře vzorec pro určení velikosti inkluze, tak byla správná velikost inkluzí hledána experimentálně pomocí simulací v programu ANSYS HFSS tak, aby osový poměr dosáhl co nejlepšího výsledku, tedy se co nejvíce blížil hodnotě 0 dB.

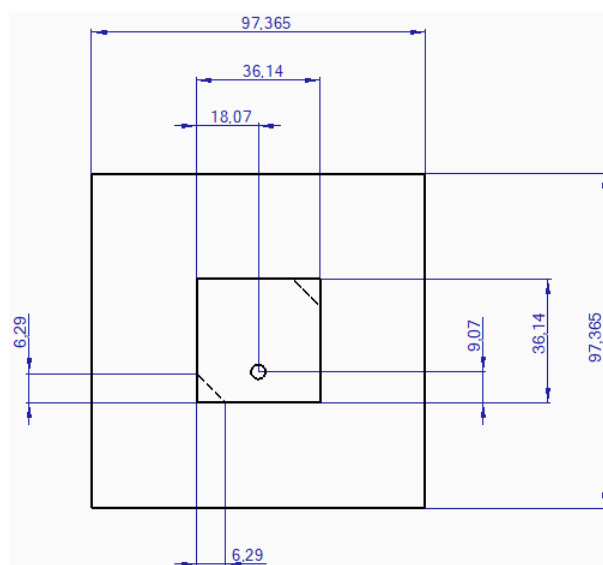
U takového konceptu antén má na osový poměr zásadní vliv velikost inkluze v substrátu, ovšem změna velikosti inkluze způsobí zároveň i malý frekvenční posun. Použitím inkluze s nižší relativní permitivitou než je relativní permitivita substrátu dojde při zvětšení inkluze ke zvýšení kmitočtu, při zmenšení takové inkluze kmitočet klesne. Naopak při použití inkluze s vyšší relativní permitivitou než je relativní permitivita substrátu dojde při zvětšení inkluze ke snížení kmitočtu a při zmenšení inkluze kmitočet vzroste.

U všech navrhovaných antén je jako materiál inkluze volen vzduch pro následnou jednodušší realizaci a substrát je prodloužen o $\lambda/4$ z každé strany flíčku. Impedanční přizpůsobení je řešeno napájením antény koaxiálním vedením v místě, kde je impedance 50Ω .

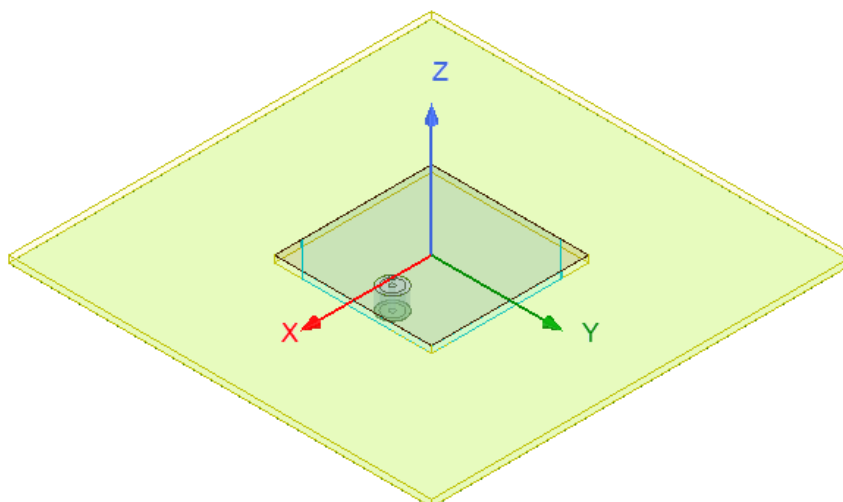
Při návrhu kruhově polarizovaných antén na nehomogenním substrátu byly nejprve použity rozměry vypočtené v kapitole 2. Tyto rozměry následně byly upraveny pro dosažení pracovního kmitočtu 2,45 GHz.

2.1.1 Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí ve tvaru trojúhelníka

Při návrhu byly nejprve do substrátu LP antény z kapitoly 2 vloženy vzduchové inkluze ve tvaru pravoúhlého trojúhelníka pod 2 rohy flíčku nacházejících se navzájem v diagonále. Zavedením inkluzí vzrostl pracovní kmitočet antény, proto bylo nutné zvětšit rozměry flíčku. Pro dosažení pracovního kmitočtu 2,45 GHz bylo parametrizací zjištěno, že flíček musí mít délku strany $L = 36,14$ mm a odvěsny trojúhelníků musí mít 6,29 mm. Pro správné impedanční přizpůsobení je anténa napájena koaxiálním vedením 9,07 mm od strany flíčku na ose x, jako je znázorněno na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2 Navržený model KP flíčkové antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka



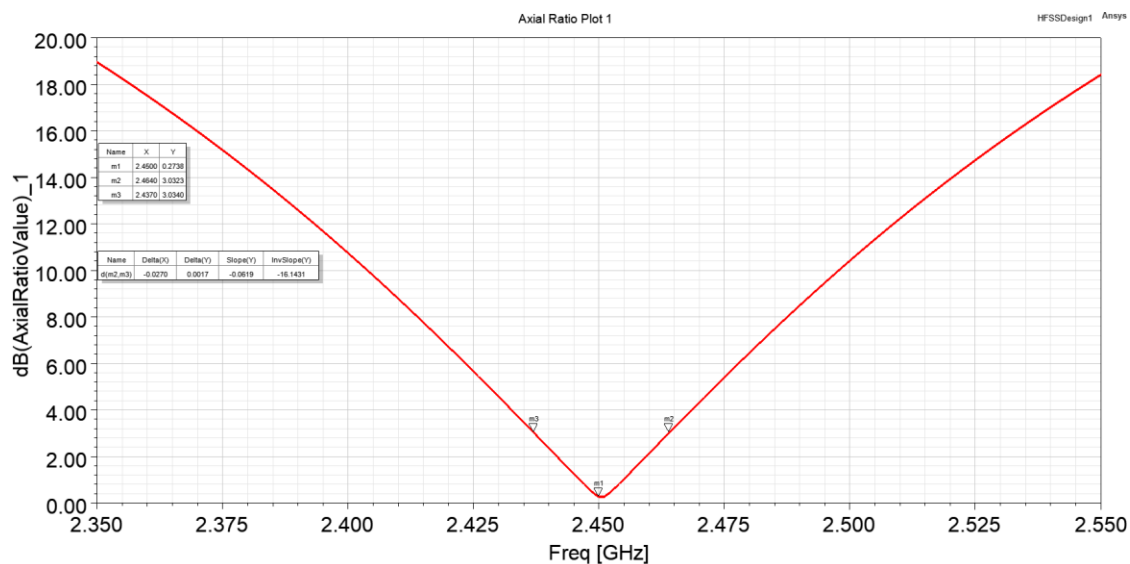
Obrázek 2.3 Model KP flíčkové antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka v ANSYS HFSS

Simulací kruhově polarizované antény bylo dosaženo osového poměru $AR = 0,27$ dB na frekvenci 2,45 GHz. Šířka pásma kruhově polarizovaných antén je dána šířkou pásma osového poměru. Šířkou pásma osového poměru se rozumí interval frekvence, ve kterém je splněna podmínka $AR < 3$ dB. U této antény je šířka pásma osového poměru 27 MHz, což je 1,10 %. Impedanční šířka pásma je 108 MHz, což je 4,41 %. U kruhově polarizovaných antén je ovšem důležitější šířka pásma osového poměru. Zisk navržené antény je 5 dBi. Z vyzařovacího diagramu je zřejmé, že je buzena RHCP vlna, která je

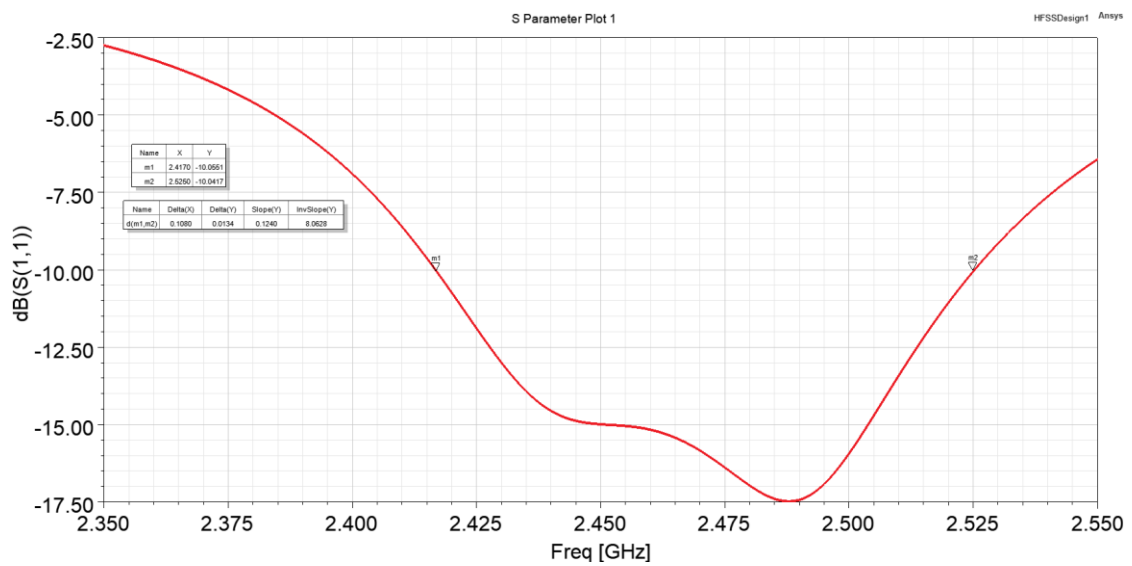
v diagramu znázorněna červenou barvou. Naopak křížovou složkou je LHCP vlna, která je v diagramu znázorněna modrou barvou.

Tabulka 2.1 Simulované hodnoty antény s trojúhelníkovou vzduchovou inkluzí

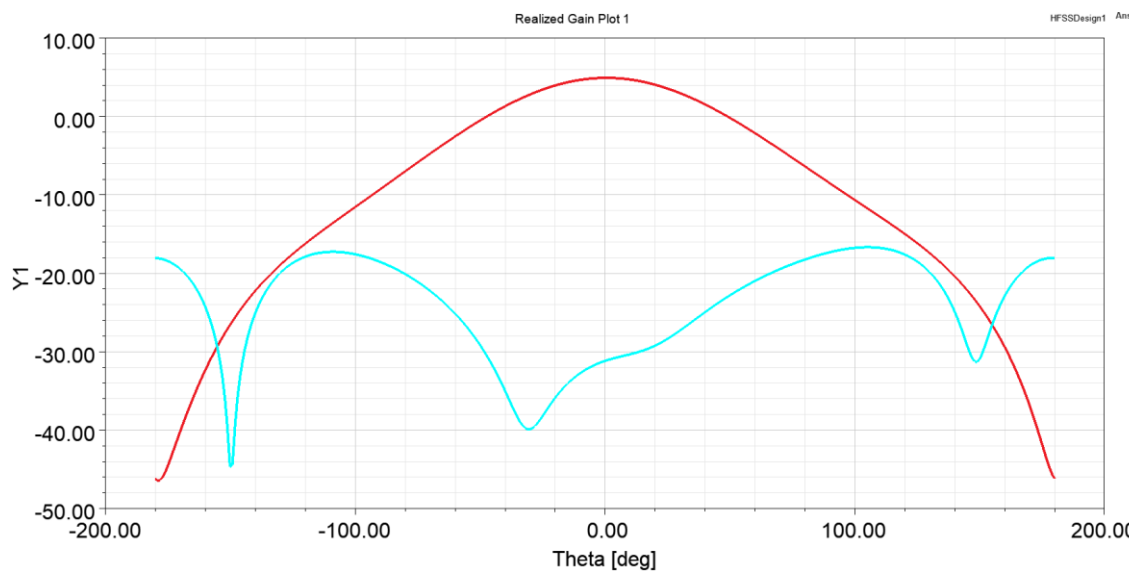
Impedanční šířka pásma [MHz]	Relativní impedanční šířka pásma [%]	Šířka pásma osového poměru [MHz]	Relativní šířka pásma osového poměru [%]	Zisk [dBi]	Osový poměr na 2,45 GHz [dB]	S11 na 2,45 GHz [dB]
108,0	4,41	27,0	1,10	5,0	0,27	-14,9



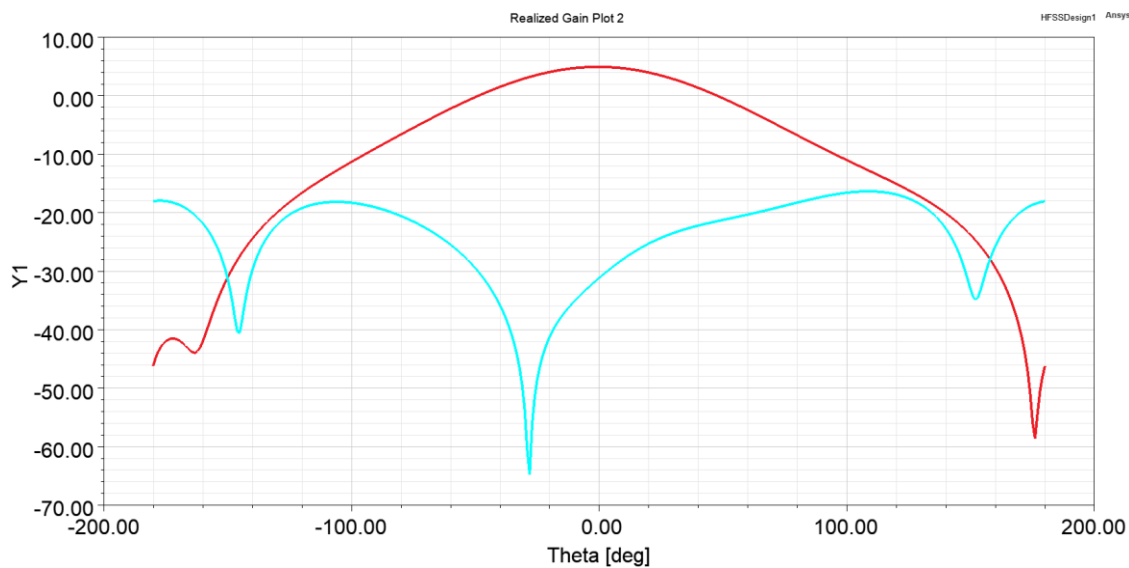
Obrázek 2.4 Osový poměr KP antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka



Obrázek 2.5 Činitel odrazu KP antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka



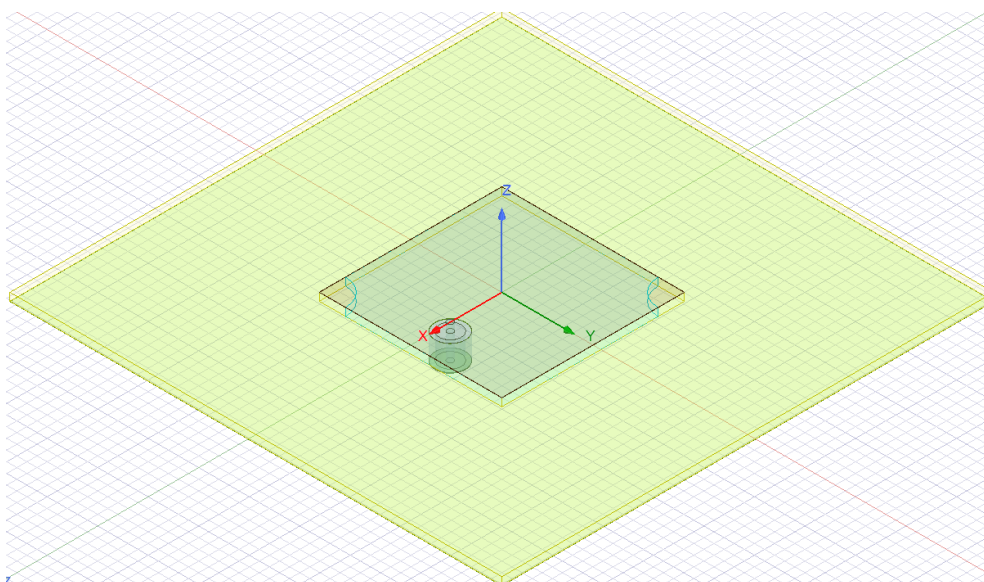
Obrázek 2.6 Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře



Obrázek 2.7 Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru trojúhelníka v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře

2.1.2 Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu

Dalším zkoumaným tvarem inkluze je čtvrtkruh. Čtvrtkruhy jsou v substrátu umístěny tak, že jejich pravé úhly se nacházejí přímo pod rohy flíčku v diagonále. Rozměry antény byly určeny pomocí parametrizace tak, že poloměr čtvrtkruhu je 5,2 mm, délka flíčku $L = 36,14$ mm a bod napájení se nachází 7,87 mm od kraje flíčku na ose x.

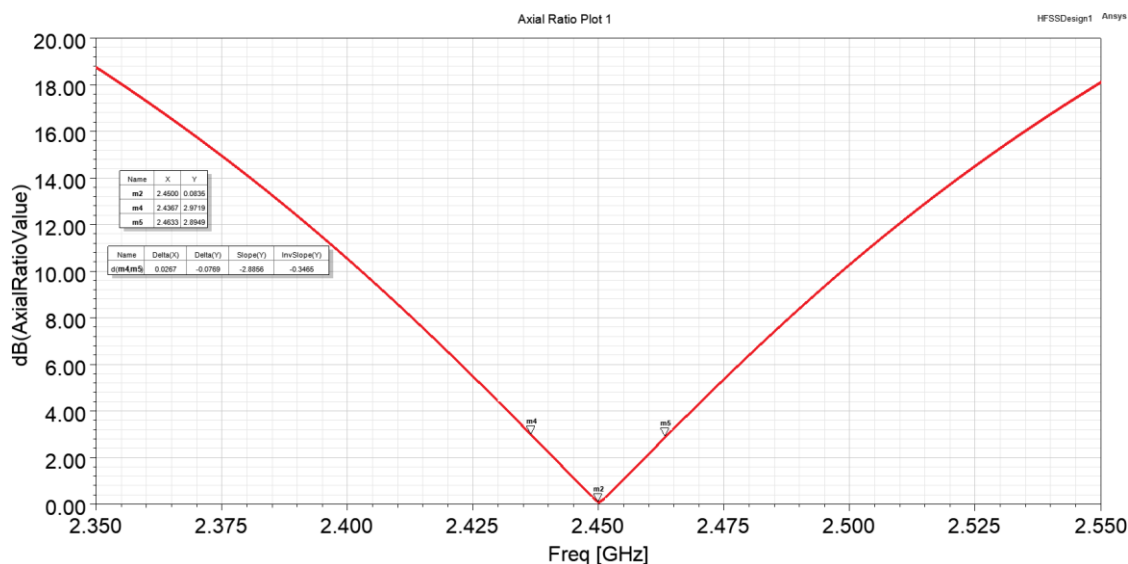


Obrázek 2.8 Model KP flíčkové antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu v ANSYS HFSS

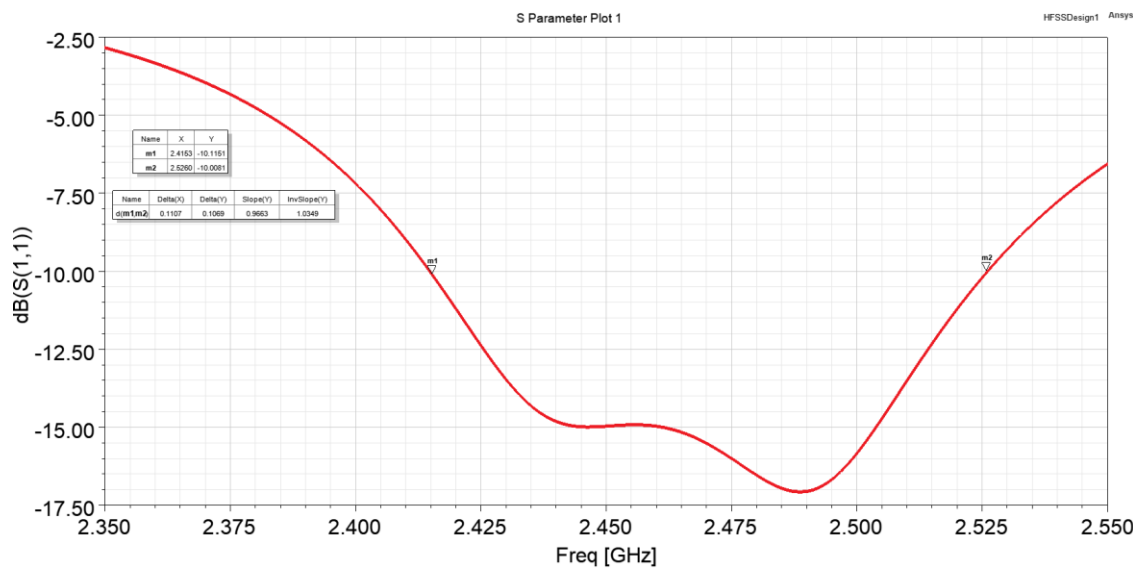
Simulací této antény byl zjištěn na frekvenci 2,45 GHz osový poměr $AR = 0,08$ dB. Šířka pásma osového poměru, kde $AR < 3$ dB vychází 26,7 MHz, tedy 1,09 %. Impedanční šířka pásma, kde $S11 < 10$ dB vychází 110,7 MHz, což odpovídá relativní hodnotě 4,52 %. Zisk této antény je 5 dBi a anténa budí RHCP vlnu.

Tabulka 2.2 Simulované hodnoty antény se čtvrtkruhovou vzduchovou inkluzí

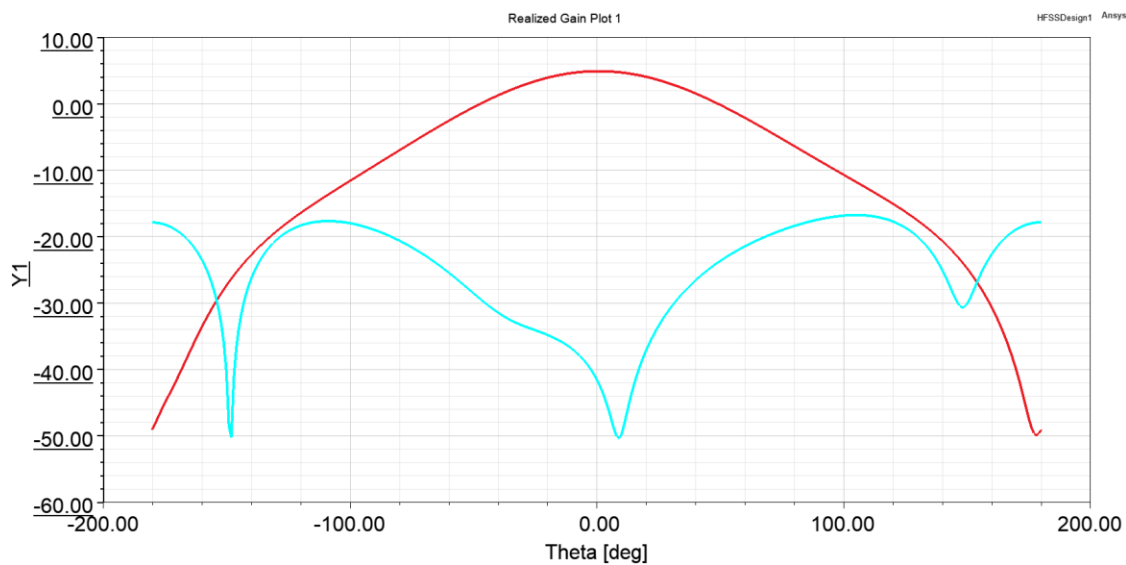
Impedanční šířka pásma [MHz]	Relativní impedanční šířka pásma [%]	Šířka pásma osového poměru [MHz]	Relativní šířka pásma osového poměru [%]	Zisk [dBi]	Osový poměr na 2,45 GHz [dB]	S11 na 2,45 GHz [dB]
110,7	4,52	27,0	1,10	5,0	0,08	-14,9



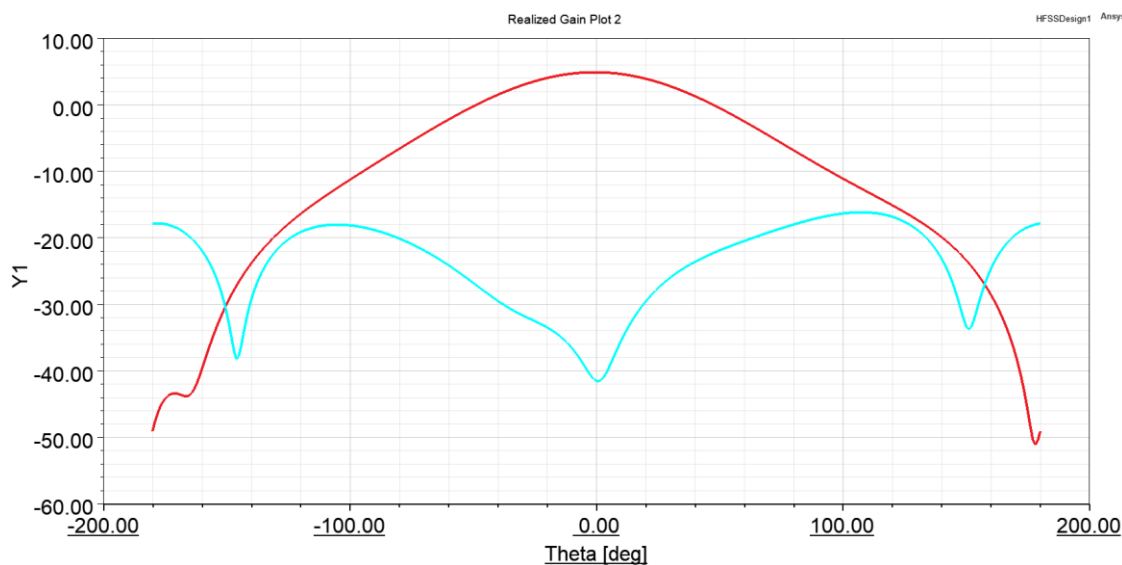
Obrázek 2.9 Osový poměr KP antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu



Obrázek 2.10 Činitel odrazu KP antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu



Obrázek 2.11 Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře

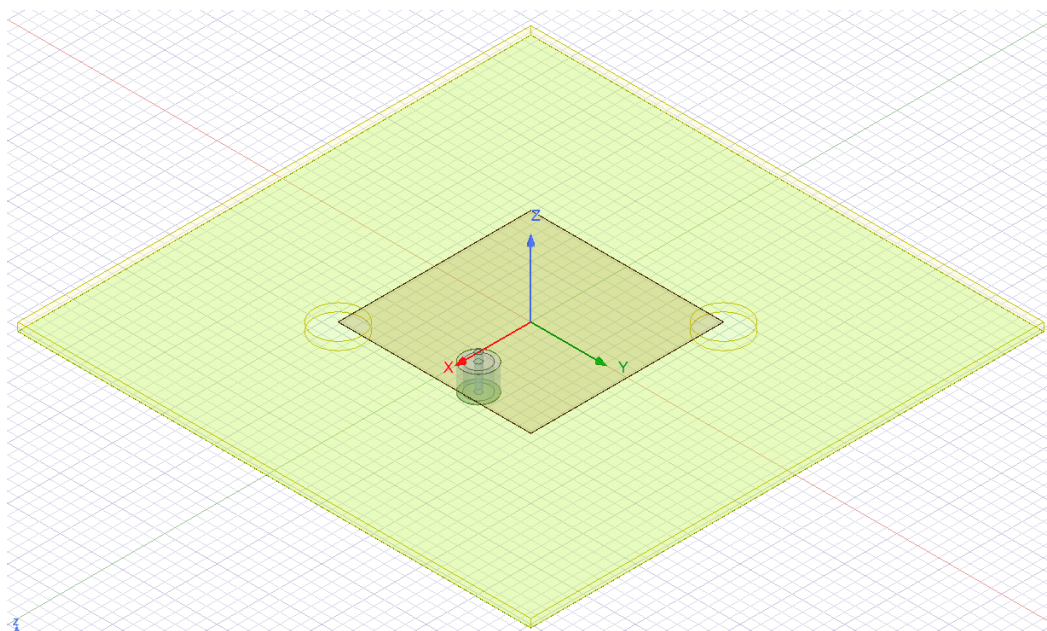


Obrázek 2.12 Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru čtvrtkruhu v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře

2.1.3 Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí ve tvaru kruhu

Tento koncept byl vybrán proto, aby se prozkoumalo či se změní vlastnosti antény, když v okolí celého rohu flíčku, kde dochází k buzení vlny, byla co nejnižší hodnota relativní permitivity dielektrika a nebyl v tomto místě přechod mezi dvěma materiály s různou relativní permitivitou.

Anténa je navržena tak, že v substrátu pod dvěma rohy v diagonále flíčku jsou středy kruhů. Kruhy mají poloměr 4,55 mm, délka strany flíčku $L = 36,18$ mm a anténa je napájena 8,43 mm od okraje flíčku na ose x .

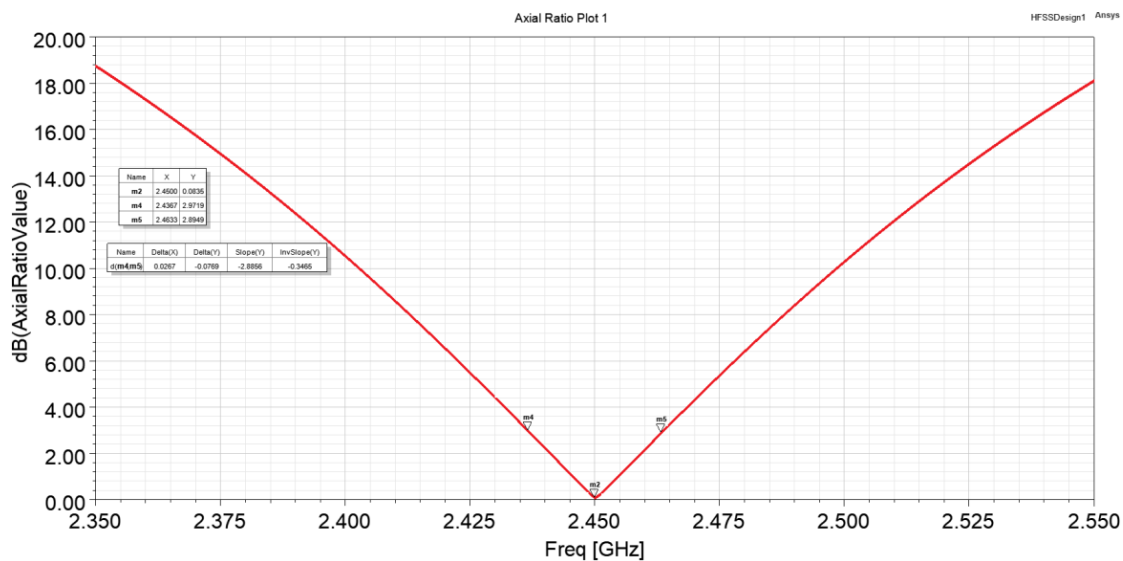


Obrázek 2.13 Model KP flíčkové antény s inkluzí ve tvaru kruhu v ANSYS HFSS

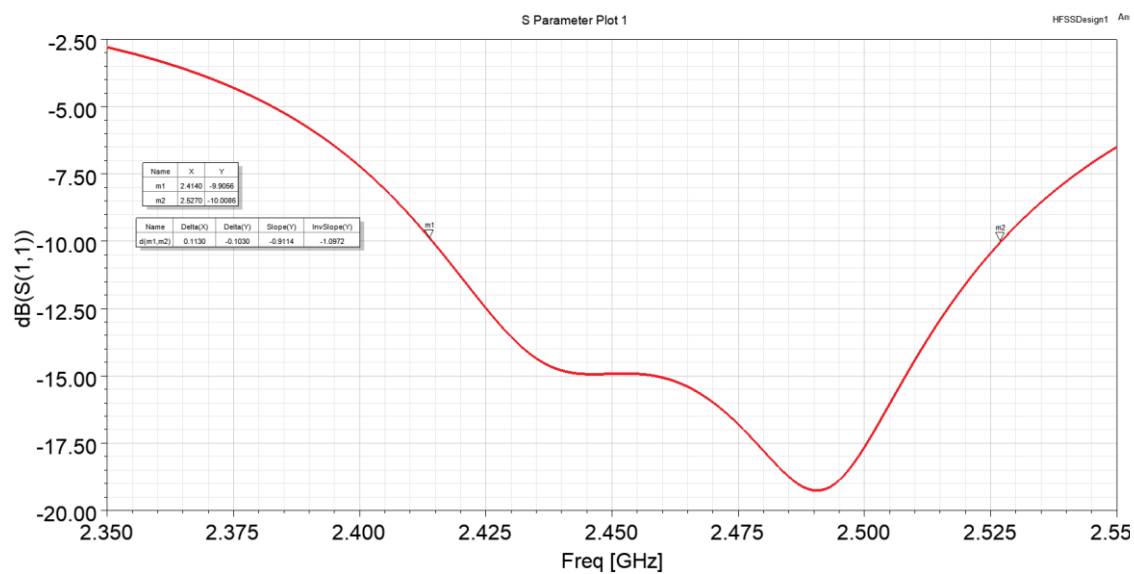
Stejně jako předešlé dvě antény i tato budí RHCP vlnu. Simulovaná hodnota osového poměru na frekvenci 2,45 GHz je 0,09 dB a šířka pásma osového poměru, kde $AR < 3$ dB vychází 27 MHz, to odpovídá 1,10 %. Impedanční šířka pásma této antény je 112 MHz, relativní hodnotou 4,57 %. Zisk antény je 5,1 dB.

Tabulka 2.3 Simulované hodnoty antény s kruhovou vzduchovou inkluzí

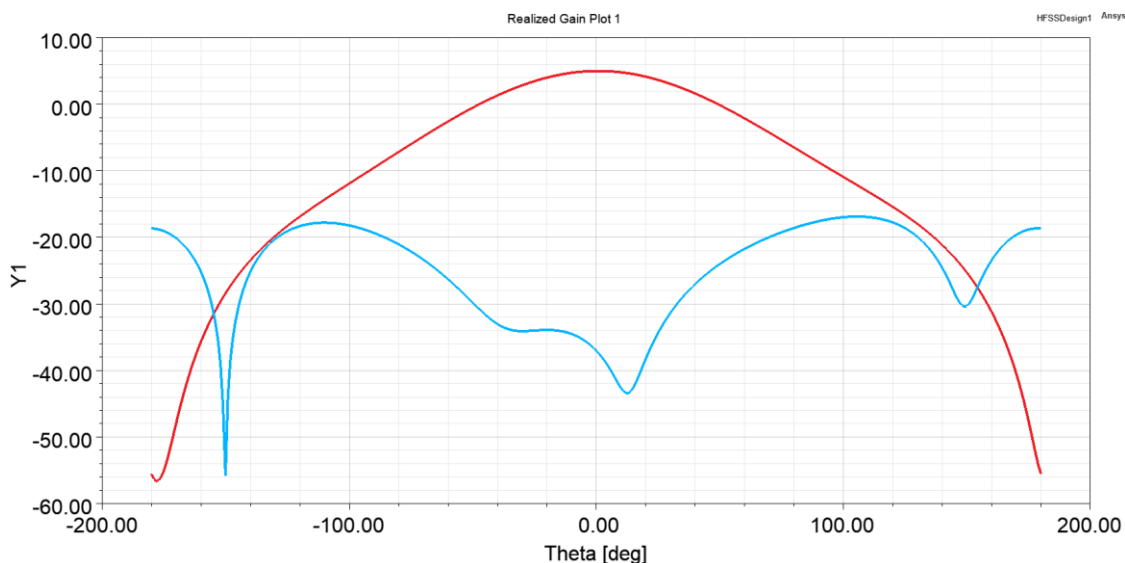
Impedanční šířka pásma [MHz]	Relativní impedanční šířka pásma [%]	Šířka pásma osového poměru [MHz]	Relativní šířka pásma osového poměru [%]	Zisk [dBi]	Osový poměr na 2,45 GHz [dB]	S11 na 2,45 GHz [dB]
112,0	4,57	27,0	1,10	5,1	0,09	-14,9



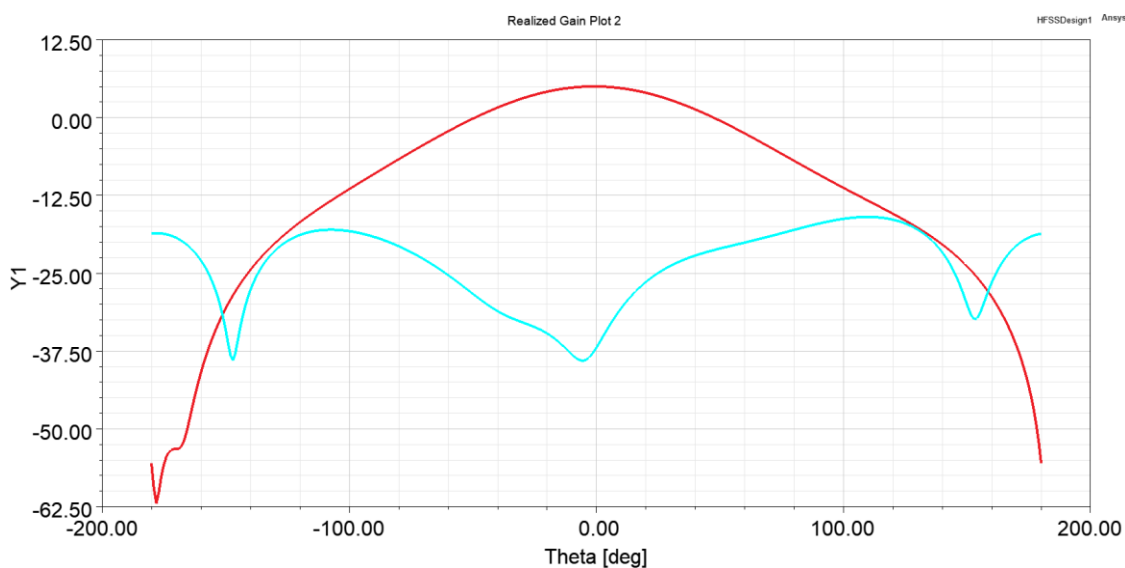
Obrázek 2.14 Osový poměr KP antény s inkluzí ve tvaru kruhu



Obrázek 2.15 Činitel odrazu KP antény s inkluzí ve tvaru kruhu



Obrázek 2.16 Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru kruhu v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře



Obrázek 2.17 Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí ve tvaru kruhu v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře

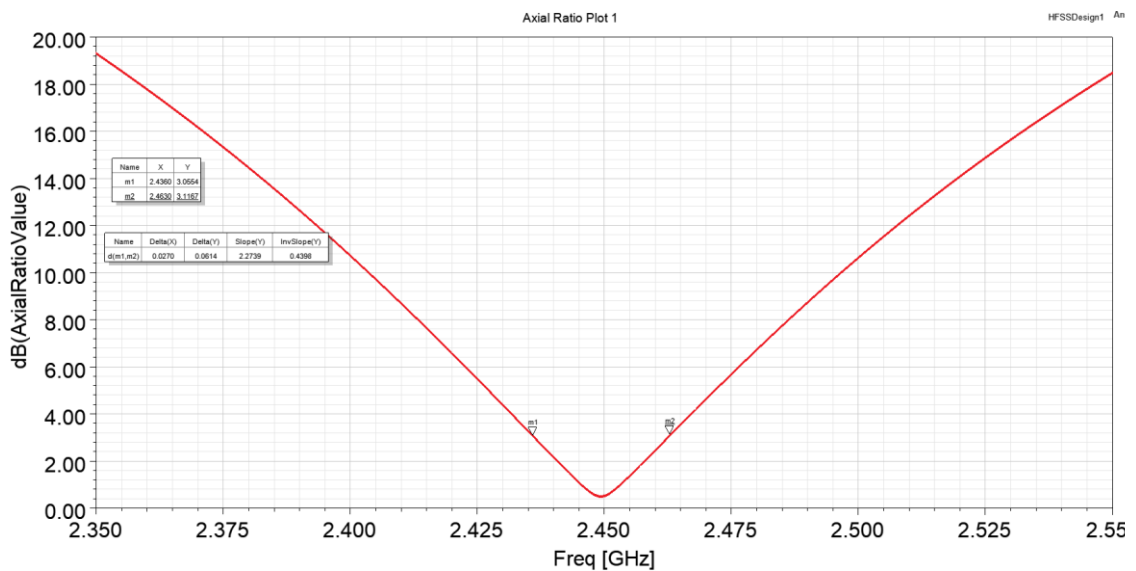
2.1.4 Kruhově polarizovaná fličková anténa se stupňovanou inkluzí

V programu ANSYS HFSS byly simulovány koncepty antén se stupňovanou inkluzí stejných tvarů, jako v kapitolách 2.1.1 a 2.1.3 – trojúhelník a kruh. Na základě simulovaných antén bylo zjištěno, že stupňování inkluze nemá vliv na šířku pásma,

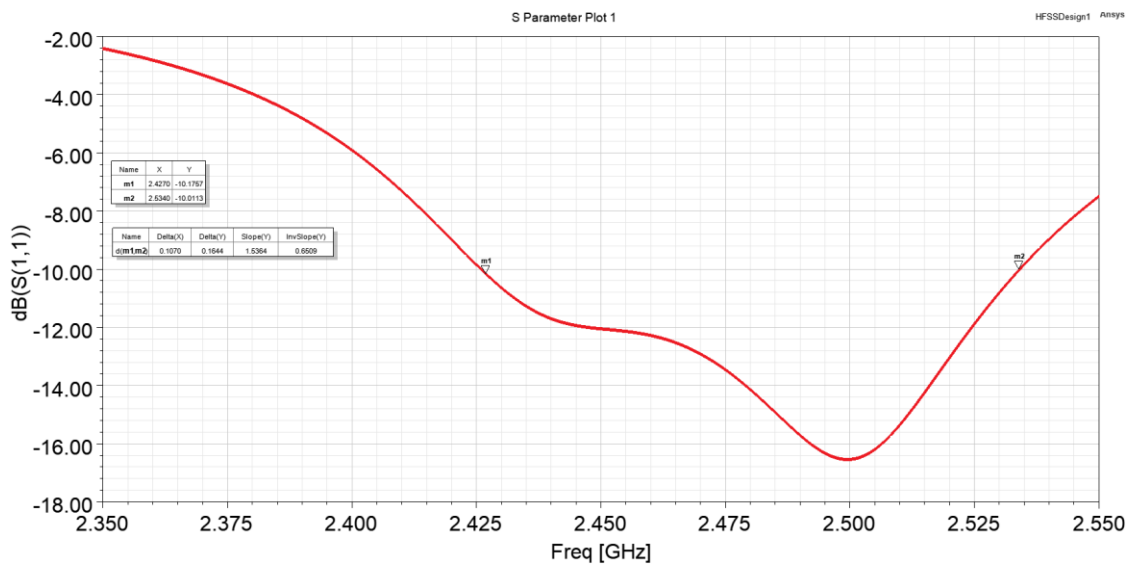
1,10 %. Impedanční šířka pásma je 107 MHz, což je 4,37 %. Zisk konvenční antény je 4,9 dBi.

Tabulka 2.4 Simulované výsledky konvenční antény

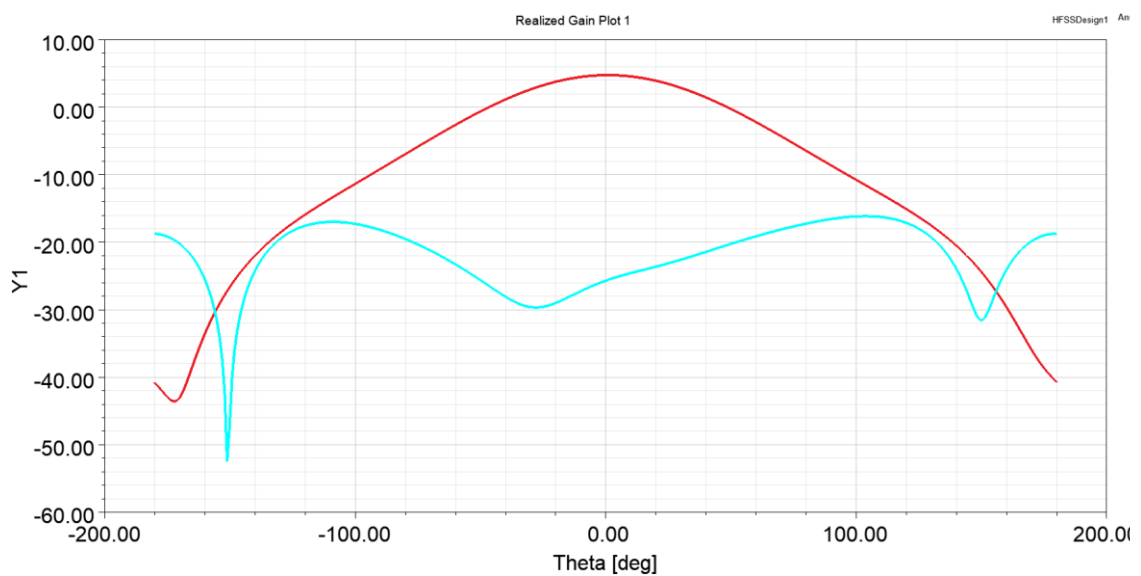
Impedanční šířka pásma [MHz]	Relativní impedanční šířka pásma [%]	Šířka pásma osového poměru [MHz]	Relativní šířka pásma osového poměru [%]	Zisk [dBi]	Osový poměr na 2,45 GHz [dB]	S11 na 2,45 GHz [dB]
107,0	4,37	27,0	1,10	4,9	0,506	-11,9



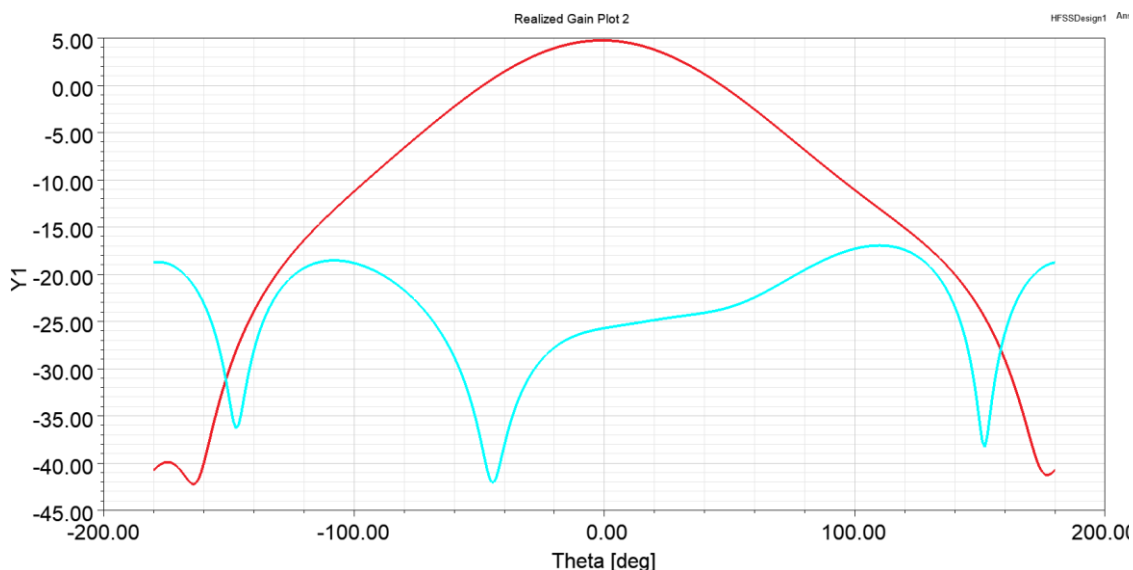
Obrázek 2.19 Osový poměr konvenční antény



Obrázek 2.20 Činitel odrazu konvenční antény



Obrázek 2.21 Souhlasná a křížová složka KP konvenční antény v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře



Obrázek 2.22 Souhlasná a křížová složka KP konvenční antény v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře

2.3 Porovnání antén na nehomogenním substrátu s konvenční anténou

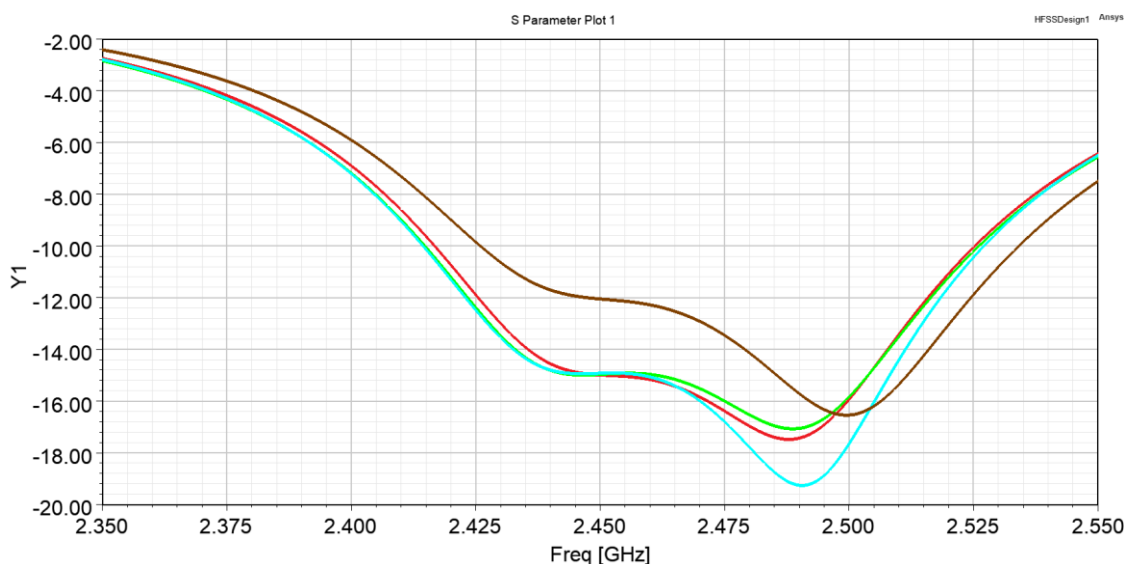
Simulací antén bylo zjištěno, že anténou na nehomogenním substrátu lze dosáhnout větší impedanční šířky pásma a zároveň i lepšího impedančního přizpůsobení na pracovním kmitočtu, to lze pozorovat u všech navržených antén. Největší impedanční šířku pásma z navržených antén má anténa s kruhovou vzduchovou inkluzí. Tato anténa má impedanční šířku pásma 112 MHz, což je o 6 MHz více než u konvenční antény. Relativní impedanční šířka pásma antény s kruhovou inkluzí je 4,57 %, to znamená zvětšení šířky pásma o 0,24 % oproti konvenční anténě. Z tabulky je patrné, že tvarování inkluze má vliv na impedanční šířku pásma.

Šířka pásma osového poměru, kde $AR < 3$ dB, je stejná u všech antén, vychází 27 MHz. U antény s kruhovou inkluzí byla odsimulována také nejvyšší hodnota zisku antény a to 5,1 dBi.

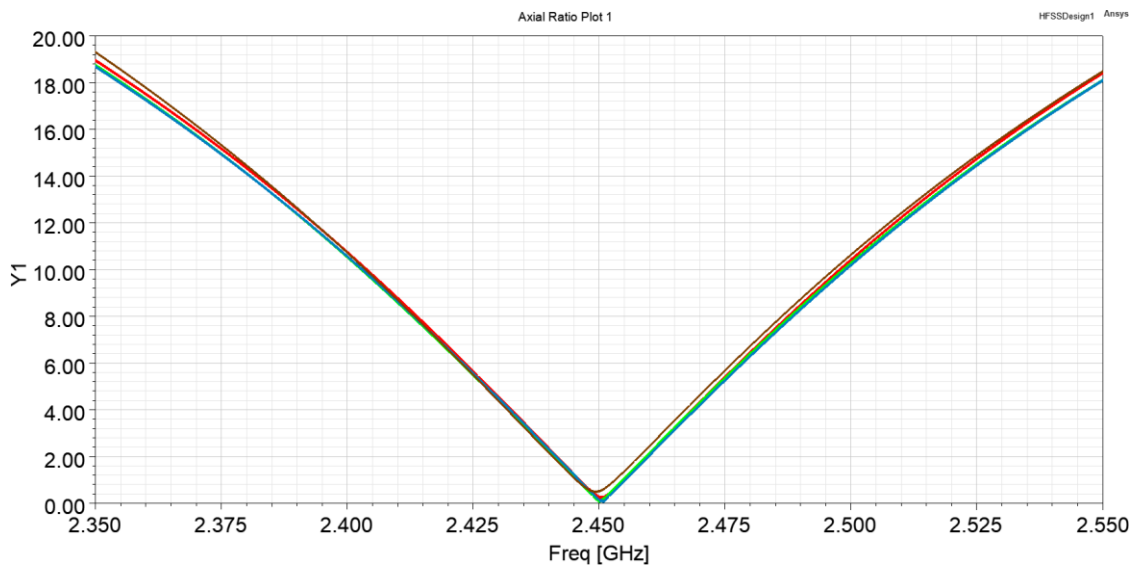
Pro další práci byla vybrána anténa s kruhovou vzduchovou inkluzí, protože je patrné, že u tohoto konceptu nastal největší progres v impedanční šířce pásma.

Tabulka 2.5 Srovnání simulovaných hodnot antén s tvarováním vzduchové inkluze

Typ antény	Impedanční šířka pásma [MHz]	Relativní impedanční šířka pásma [%]	Šířka pásma osového poměru [MHz]	Relativní šířka pásma osového poměru [%]	Zisk [dBi]	Osový poměr na 2,45 GHz [dB]	S11 na 2,45 GHz [dB]
KP anténa - trojúhelník	108,0	4,41	27,0	1,10	5,0	0,27	-14,9
KP anténa - čtvrtkruh	110,7	4,52	27,0	1,10	5,0	0,08	-14,9
KP anténa - kruh	112,0	4,57	27,0	1,10	5,1	0,09	-14,9
KP konvenční anténa	107,0	4,37	27,0	1,10	4,9	0,506	-11,9



Obrázek 2.23 Srovnání činitele odrazu antén na nehomogenním substrátu
červená – trojúhelník, zelená – čtvrtkruh, modrá – kruh,
hnědá - konvenční



Obrázek 2.24 Srovnání osového poměru antén na nehomogenním substrátu
červená – trojúhelník, zelená – čtvrtkruh, modrá – kruh,
hnědá - konvenční

2.4 Zlepšení impedančního přizpůsobení vložení inkluze do oblasti napájení

V této kapitole bude ukázáno, jaký vliv má vložení inkluze do substrátu v okolí středního vodiče. Vložení inkluze do okolí středního vodiče se změní impedance v tomto místě. Kvůli změně impedance je nutné změnit místo napájení antény.

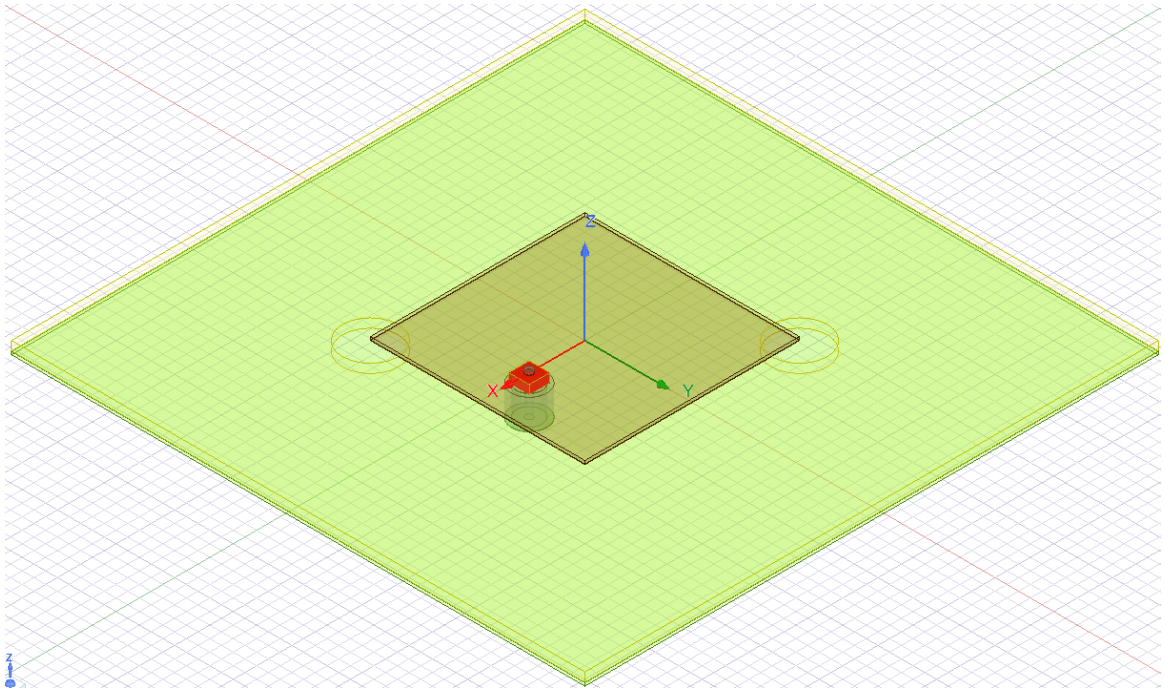
Bude zde prezentována pouze jedna anténa, protože na tvaru inkluze v okolí středního vodiče nezáleží. Tato anténa bude následně porovnána se stejným konceptem antény, ale bez inkluze u středního vodiče.

Při návrhu byl zvolen koncept antény s kruhovou inkluzí z kapitoly 2.1.3. Do okolí vodiče byla vložena kostička, u níž byl měněn materiál a rozměr.

Simulacemi bylo zjištěno, že inkluze nemá vliv na šířku pásma, ale ovlivní činitel odrazu, tedy impedanční přizpůsobení. Pokud je inkluze tvořena materiálem s nižší relativní permitivitou, než je relativní permitivita substrátu, pak se impedanční přizpůsobení zhorší. Pokud je ale inkluze z materiálu s vyšší relativní permitivitou než je relativní permitivita substrátu, pak dojde k lepšímu impedančnímu přizpůsobení. Dále bylo zjištěno, že čím vyšší hodnotu relativní permitivity inkluze má a čím větší tato inkluze je, tím lepšího impedančního přizpůsobení lze dosáhnout.

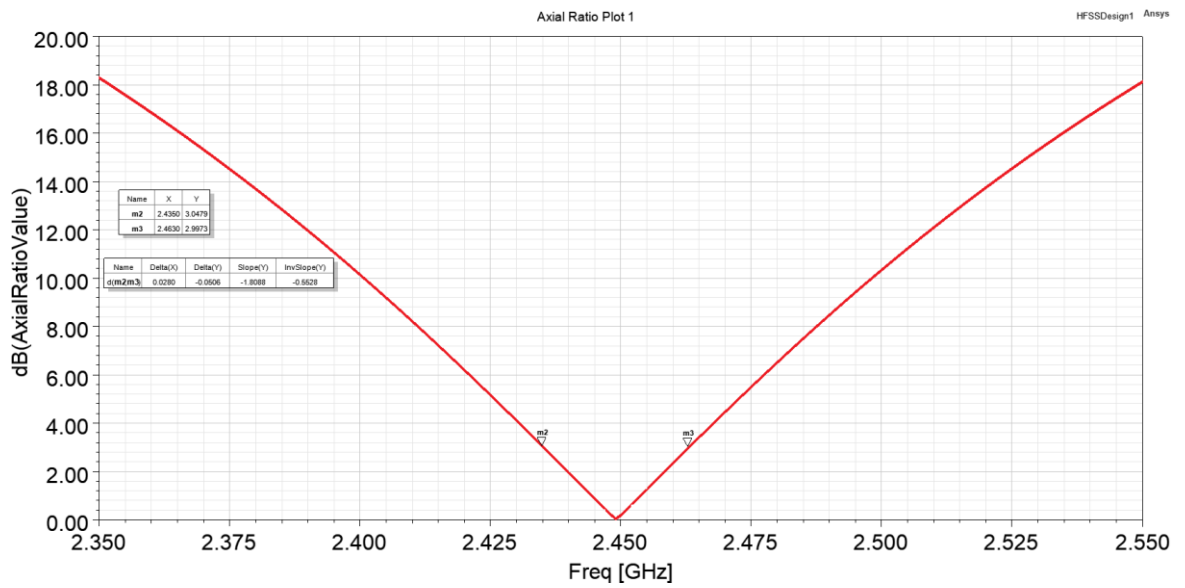
2.4.1 Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí v okolí středního vodiče

Do antény z kapitoly 2.1.3 byla vložena inkluze ve tvaru kvádru s podstavou čtverce, středem této inkluze vede střední vodič, inkluze je z materiálu ARLON AD1000 s $\epsilon_r = 10$. Inkluze má výšku shodnou s výškou substrátu a strany inkluze jsou dlouhé 3,5 mm. Poloměr vzduchových inkluzí je 4,75 mm, délka strany flíčku $L = 36,6$ mm a střední vodič se nachází na ose x ve vzdálenosti 8,8 mm od strany flíčku.

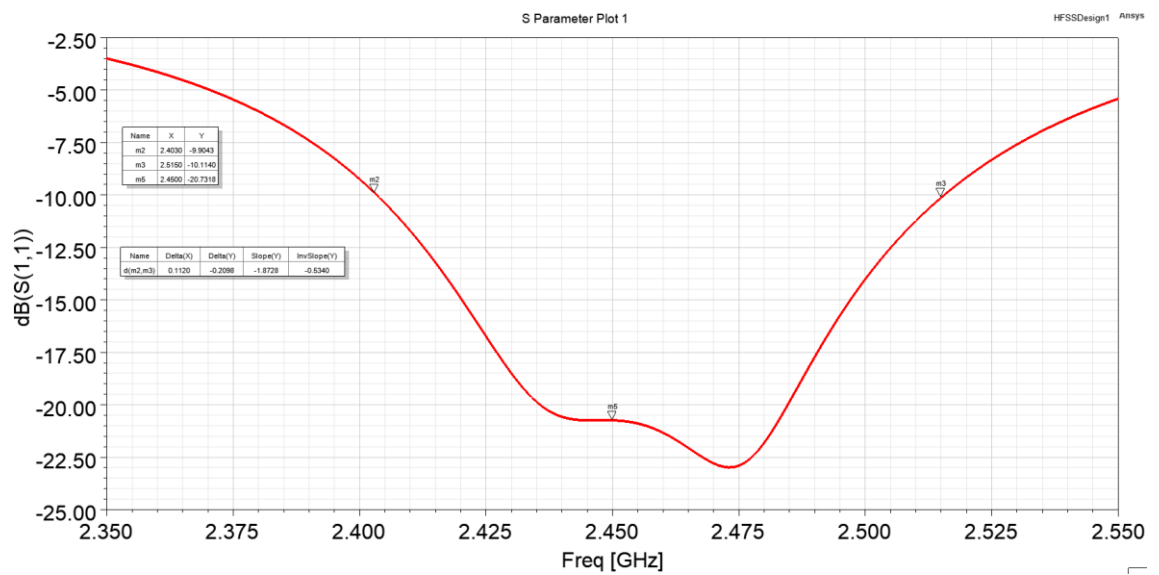


Obrázek 2.25 Model KP flíčkové antény s inkluzí v okolí středního vodiče v ANSYS HFSS

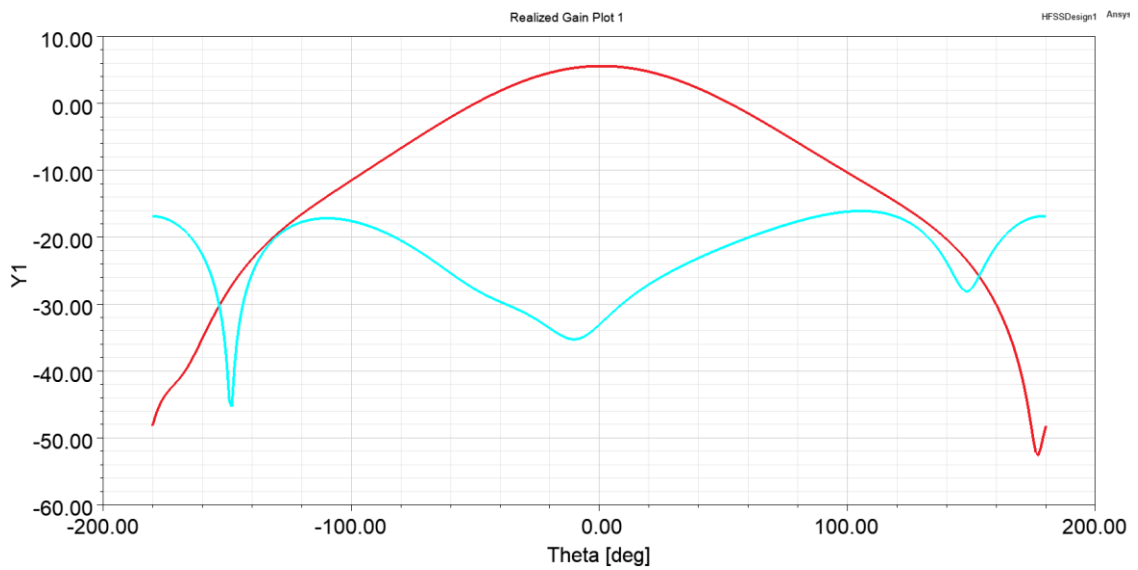
Simulací byla zjištěna šířka pásma osového poměru 28 MHz. Impedanční šířka pásma 112 MHz, tedy 4,57 % a zisk antény 5,6 dBi. Anténa budí RHCP vlnu.



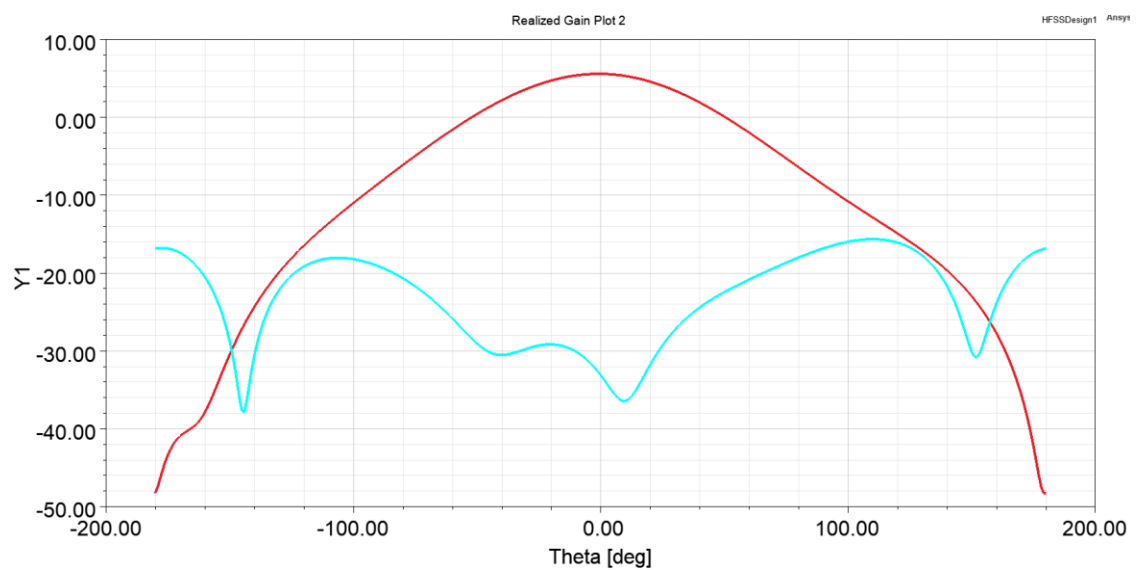
Obrázek 2.26 Osový poměr KP flíčkové antény s inkluzí v okolí středního vodiče



Obrázek 2.27 Činitel odrazu KP flíčkové antény s inkluzí v okolí středního vodiče



Obrázek 2.28 Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí v okolí středního vodiče v rovině XZ – RHCP červeně, LHCP modře



Obrázek 2.29 Souhlasná a křížová složka KP antény s inkluzí v okolí středního vodiče v rovině YZ – RHCP červeně, LHCP modře

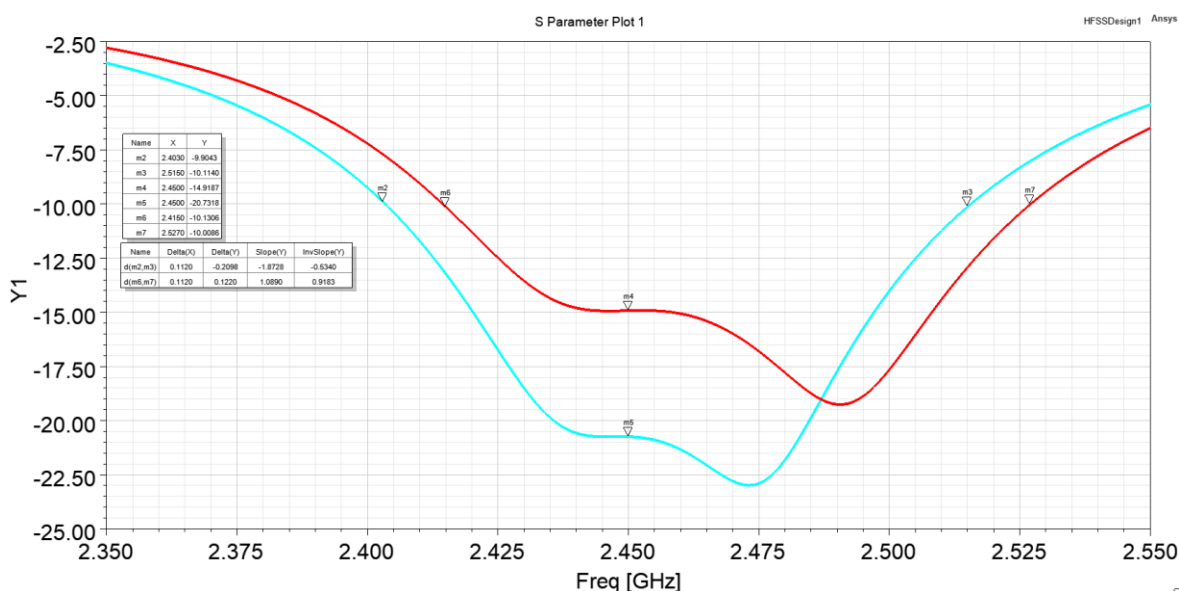
2.5 Porovnání antén s inkluzí v okolí středního vodiče a bez inkluze

Z porovnaných hodnot v tabulce lze vyčíst vliv vysokopermitivní inkluze v okolí středního vodiče. Inkluze má pozitivní vliv na činitel odrazu, který se v tomto případě s vložením velmi malé kostičky z materiálu ARLON AD1000 snížil o 5,8 dB na pracovním kmitočtu. Zisk antény vzrostl o 0,5 dB na hodnotu 5,6 dBi.

Právě tyto dvě porovnávané antény byly vybrány pro realizaci, aby byl dokázán vliv inkluze v okolí středního vodiče i prakticky.

Tabulka 2.6 Srovnání simulovaných hodnot antén s inkluzí u středního vodiče

Typ antény	Impedanční šířka pásma [MHz]	Relativní impedanční šířka pásma [%]	Šířka pásma osového poměru [MHz]	Relativní šířka pásma osového poměru [%]	Zisk [dBi]	Osový poměr na 2,45 GHz [dB]	Činitel odrazu na 2,45 GHz [dB]
KP anténa – bez inkluze u stř. vodiče	112,0	4,57	27,0	1,10	5,1	0,09	-14,9
KP anténa – s inkluzí u stř. vodiče	112,0	4,57	28,0	1,14	5,6	0,20	-20,7



Obrázek 2.30 Činitel odrazu KP fličkových antén – bez inkluze červeně, s inkluzí modře

3. REALIZACE A MĚŘENÍ ANTÉN

V této kapitole je popsán proces výroby navržených antén. Pro výrobu byly na základě dosažených výsledků vybrány dvě antény porovnávané v kapitole 2.5 – anténa s kruhovou vzduchovou inkluzí a s inkluzí z materiálu ARLON AD1000 okolo středního vodiče a anténa s kruhovou vzduchovou inkluzí bez inkluze v okolí středního vodiče. Dále zde jsou prezentovány dosažené výsledky vyrobených antén, které jsou porovnány s výsledky simulovanými.

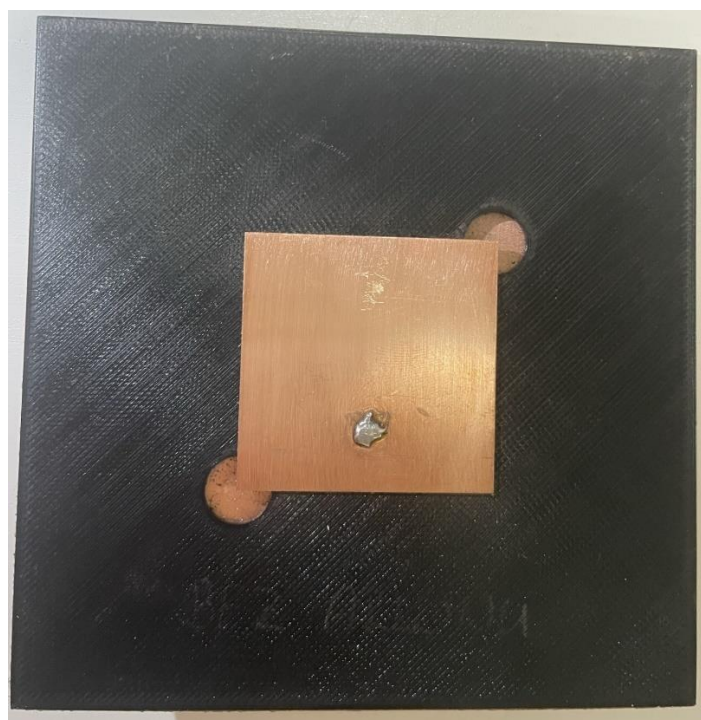
3.1 Tvorba antény

Pro výrobu antény musel být použit měděný plech, nikoli měděná fólie, protože by měděná fólie nezůstala rovná a propadla by se do vzduchových inkluzí. Kvůli dostupnosti měděného plechu musel být použit plech o tloušťce 0,5 mm. Taková tloušťka mědi není pro výrobu antén ideální, jelikož je anténa poté příliš těžká a měď je drahá, proto by bylo vhodnější použít měď o menší tloušťce.

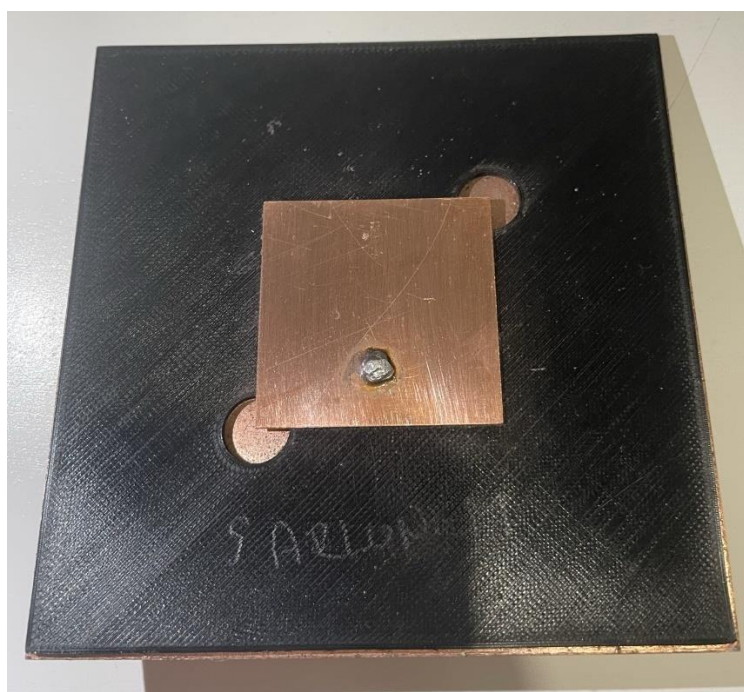
Substráty pro tisk byly modelovány v softwaru SOLIDWORKS, model byl odeslán vedoucímu práce, který substráty vytiskl.

Následně byly jednotlivé komponenty (měděná zemní plocha, tištěný substrát z PLA a měděný flíček) slepeny oboustrannou lepicí páskou 3M 467 MP 200MP Adhesive.

Při pájení konektoru došlo k výraznému zahřátí měděných plechů na vysokou teplotu. Měď následně rozehrála i tištěný substrát, který se při následném zchládnutí smrštil téměř o 2 mm. Tímto se zároveň zvětšila velikost vzduchových inkluzí v průměru o 0,2 mm, přičemž tvar kruhu zůstal zachován. Tyto změny mají zásadní vliv na výsledky měřených antén.



Obrázek 3.1 Zhotovená anténa s kruhovými vzduchovými inkluzemi bez inkluze v okolí středního vodiče



Obrázek 3.2 Zhotovená anténa s kruhovými vzduchovými inkluzemi s inkluzí v okolí středního vodiče

Na první pohled antény vypadají totožně, ale liší se inkluzí v substrátu. Anténa na obrázku 3.2 má v okolí středního vodiče inkluzi z materiálu ARLON AD1000.

Na obrázku 3.2 je zřetelné smršťení substrátu vzniklé zahřátím a jeho následným ochlazením. Anténa byla navržena tak, že zemní plocha má stejné rozměry jako substrát.

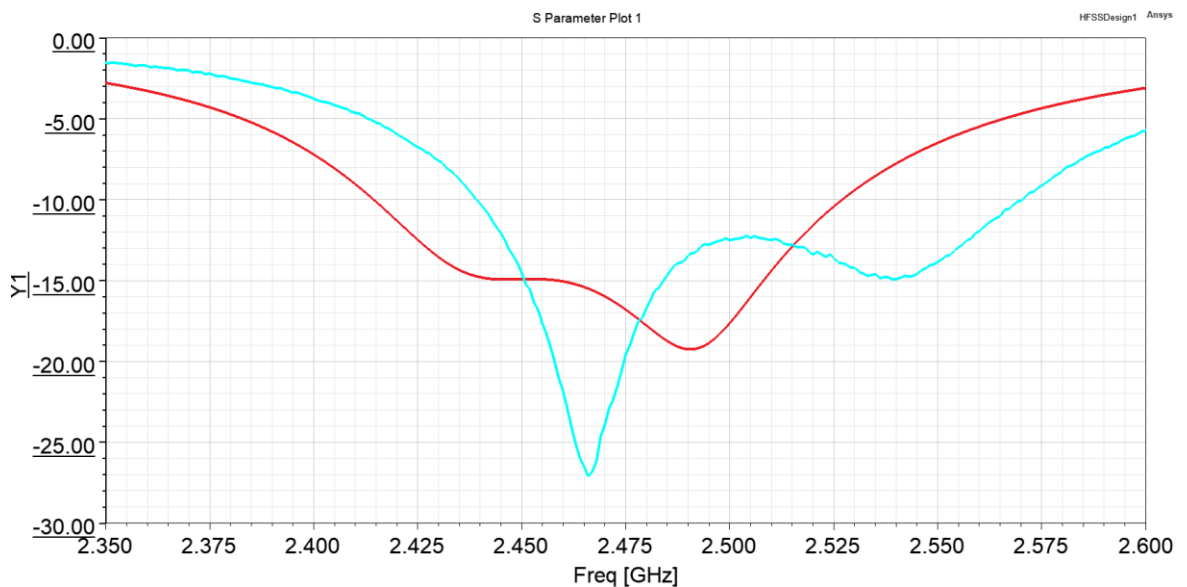
3.2 Skutečná hodnota relativní permitivity substrátu

Měření parametru S11 antén ukázalo, že je kmitočet u obou antén posunut o 50 MHz nahoru vzhledem k simulacím. To znamenalo, že uvažovaná permitivita substrátu PLA $\epsilon_r = 2,71$ není správná a reálná hodnota relativní permitivity je nižší [9]. Skutečnou hodnotu jsme zjistili z poměru simulované frekvence a měřené frekvence a poměru hledané relativní permitivity s permitivitou uvažovanou pro simulaci. Výchozí vzorec má tedy podobu

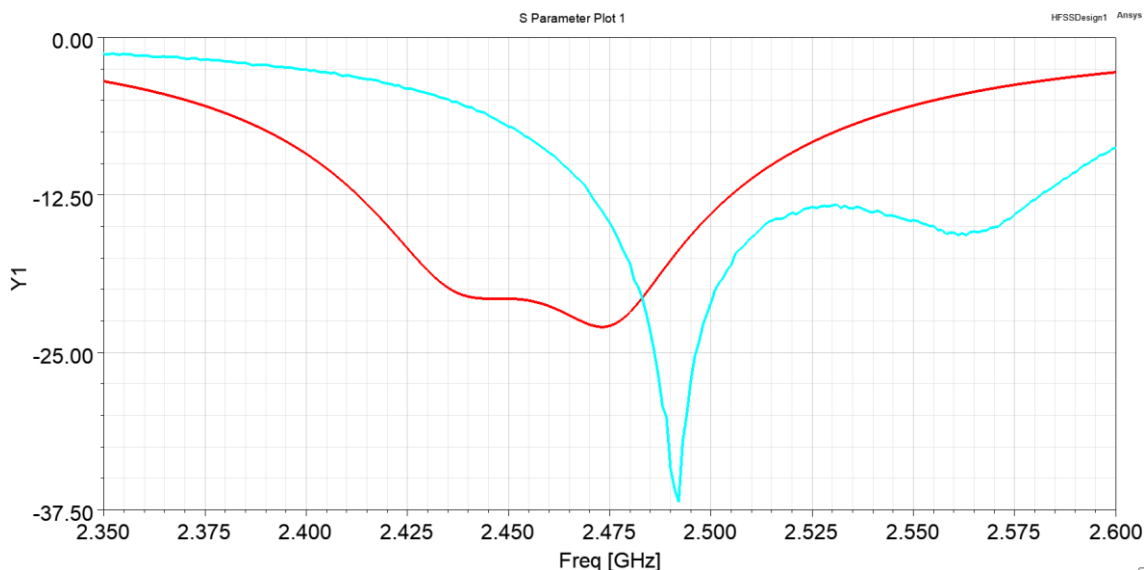
$$\frac{f_{sim}}{f_{měř}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{rsku}}}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (3.1)$$

Ve vztahu 3.1 znamená f_{sim} simulovaný pracovní kmitočet, tedy 2,45 GHz. $f_{měř}$ v tomto vzorci značí změřený pracovní kmitočet vyrobené antény, což vychází 2,50 GHz. Hodnotu relativní permitivity uvažovanou při simulaci představuje ϵ_r a ϵ_{rsku} značí hledanou skutečnou relativní permitivitu použitého materiálu.

Výpočtem ϵ_{rsku} bylo zjištěno, že použitý filament pro tisk nemá $\epsilon_r = 2,71$, ale má hodnotu $\epsilon_{rsku} = 2,60$ [9]. S touto hodnotou relativní permitivity substrátu musela být provedena korekce rozměrů antény.



Obrázek 3.3 Zobrazovaný frekvenční posun u antény bez inkluze u středního vodiče, červená – simulace, modrá - měření



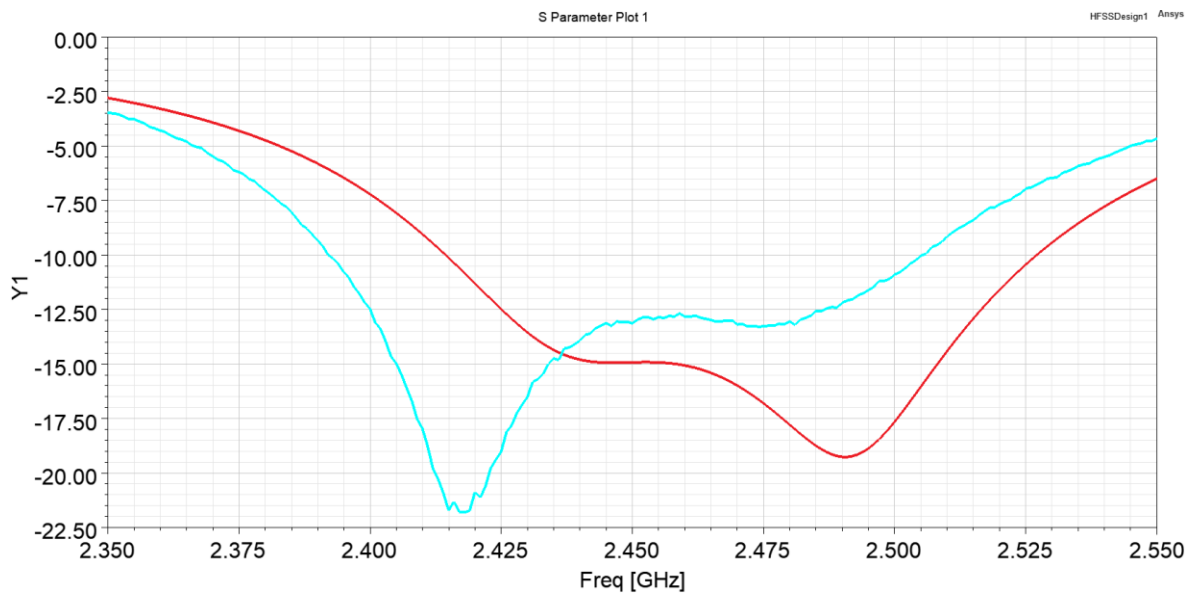
Obrázek 3.4 Zobrazený frekvenční posun u antény s inkluzí u středního vodiče, červená – simulace, modrá - měření

3.3 Měření antén

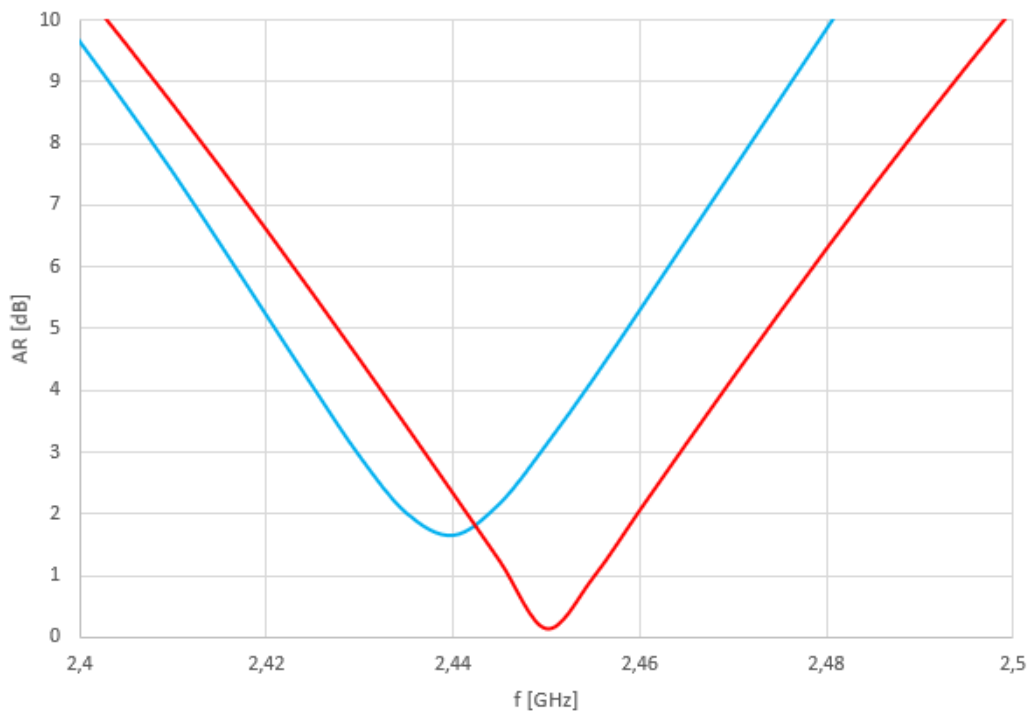
Měření činitele odrazu, tedy parametru S_{11} , bylo provedeno za pomoci vektorového obvodového analyzátoru Rhode&Schwarz ZVL3 v laboratoři. Dále byly měřeny vyzářovací charakteristiky a osově poměry antén v bezodrazové komoře.

3.3.1 Kruhově polarizovaná fličková anténa s inkluzí ve tvaru kruhu bez inkluze v okolí středního vodiče

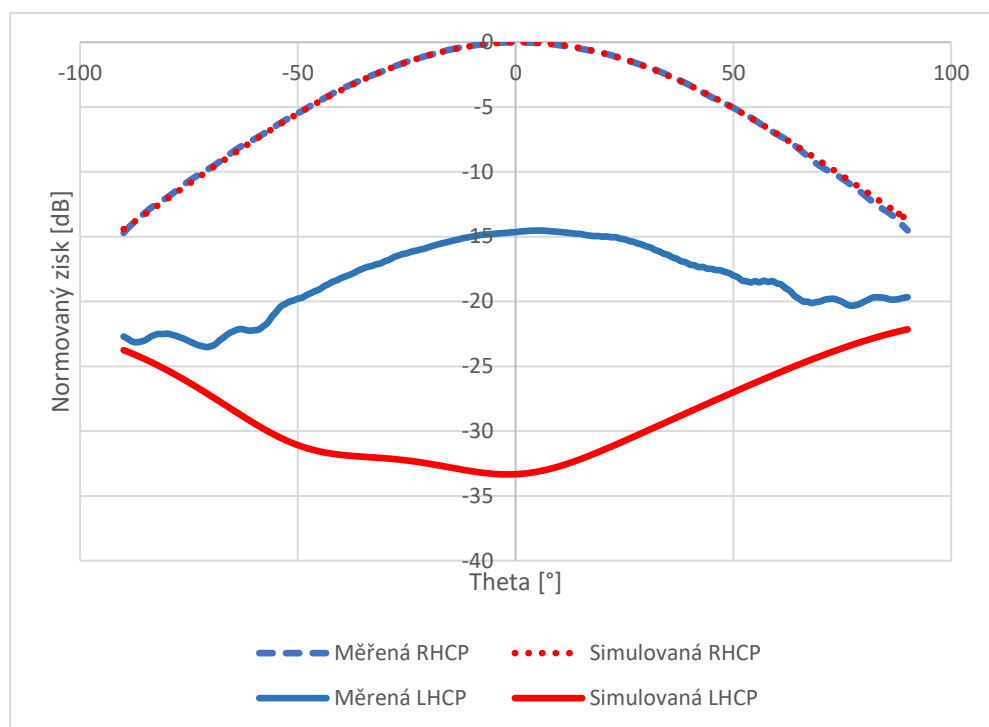
Z naměřených hodnot vyplývá, že pracovní kmitočet vyrobené antény je posunut o 10 MHz směrem dolů, tedy na hodnotu 2,44 GHz. Tento posun je způsoben především nepřesnostmi při výrobě. Osový poměr na pracovním kmitočtu má hodnotu 1,6 dB, zhoršení osového poměru způsobila deformace vzduchových inkluzí při zahřátí mědi. U vyzářovací charakteristiky se souhlasné složky simulované i měřené antény shodují, ale křížové složky se diametrálně liší. Zisk simulované antény je 5,1 dBi, zatímco změřený zisk vyrobené antény je 6,53 dBi.



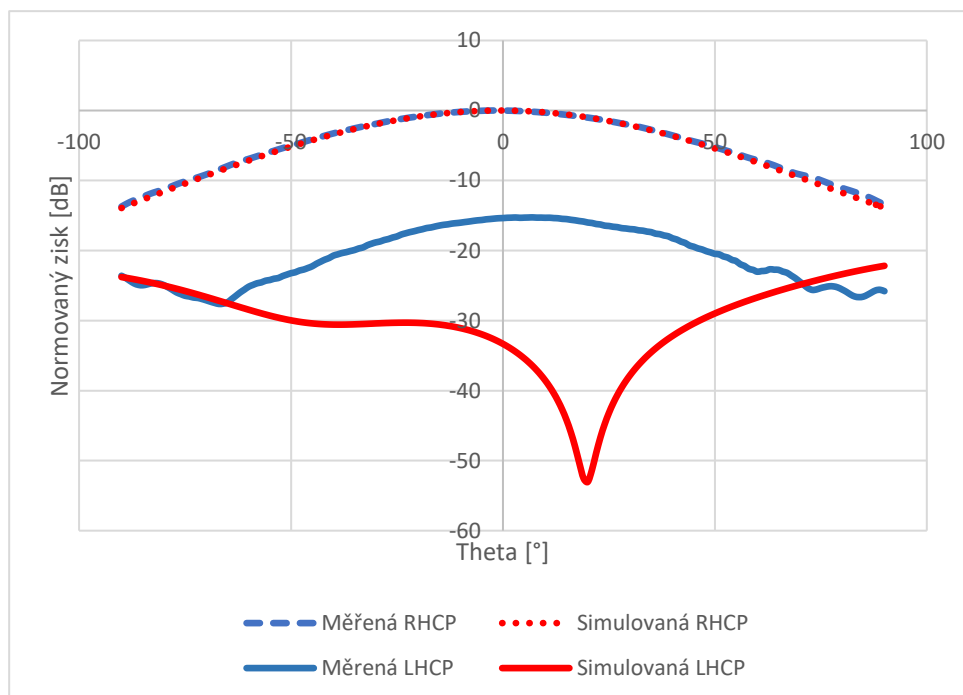
Obrázek 3.5 Porovnání parametrů S11 simulované a vyrobené antény bez inkluze u středního vodiče, červená – simulace, modrá - měření



Obrázek 3.6 Porovnání osového poměru simulované a vyrobené antény bez inkluze u středního vodiče, červená – simulace, modrá - měření



Obrázek 3.7 Vyzařovací charakteristiky simulované a vyrobené antény bez inkluze u středního vodiče v rovině XZ

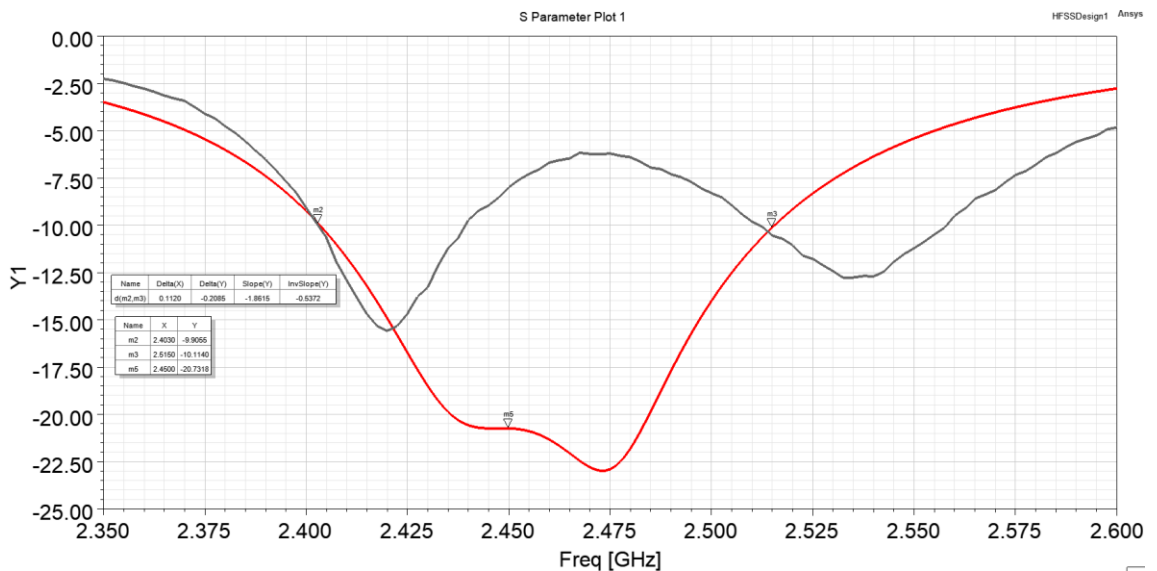


Obrázek 3.8 Vyzařovací charakteristiky simulované a vyrobené antény bez inkluze u středního vodiče v rovině YZ

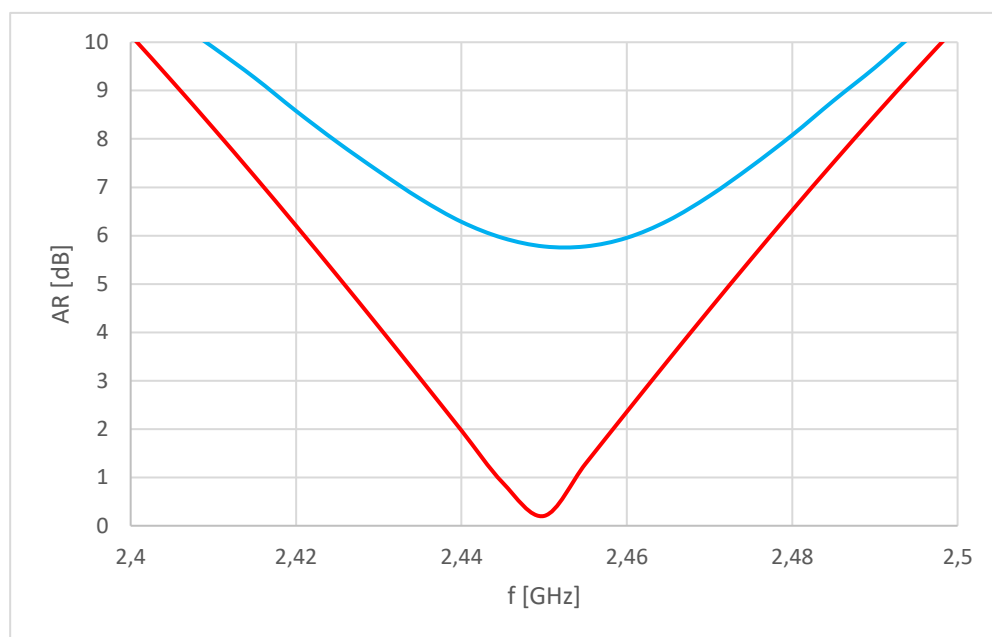
3.3.2 Kruhově polarizovaná flíčková anténa s inkluzí ve tvaru kruhu s inkluzí v okolí středního vodiče

U této antény došlo k výraznější deformaci substrátu než u antény předešlé. Průměr vzduchové inkluze se zvětšil o 0,4 mm, což má negativní vliv na osový poměr, který má na pracovním kmitočtu 2,45 GHz hodnotu 5,7 dB. Dále se v substrátu zvětšil prostor pro vložení inkluze z materiálu ARLON AD1000 o 0,3 mm, tudíž není dokonalý kontakt mezi substrátem a touto inkluzí, což má negativní vliv především na impedanční přizpůsobení. I u této antény se souhlasná složka shoduje se simulací, ale křížová složka není tak tlumena jako bylo simulováno. Změřený zisk antény je 5,2 dBi.

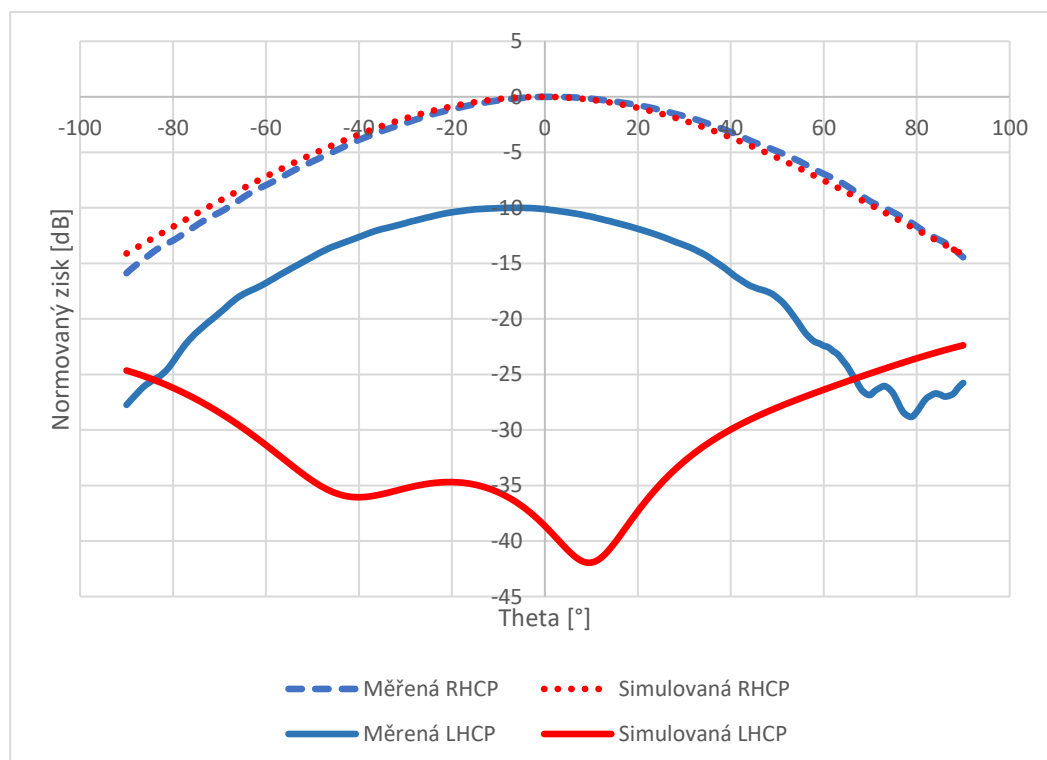
Kvůli nevhodně zvolenému materiálu pro substrát, který se při výrobě zdeformoval, nedošlo ke korelaci se simulovaným průběhem činitele odrazu, čímž ani nebylo prakticky potvrzeno, že použitím vysokopermitivní inkluze v místě napájení dojde k lepšímu impedančnímu přizpůsobení.



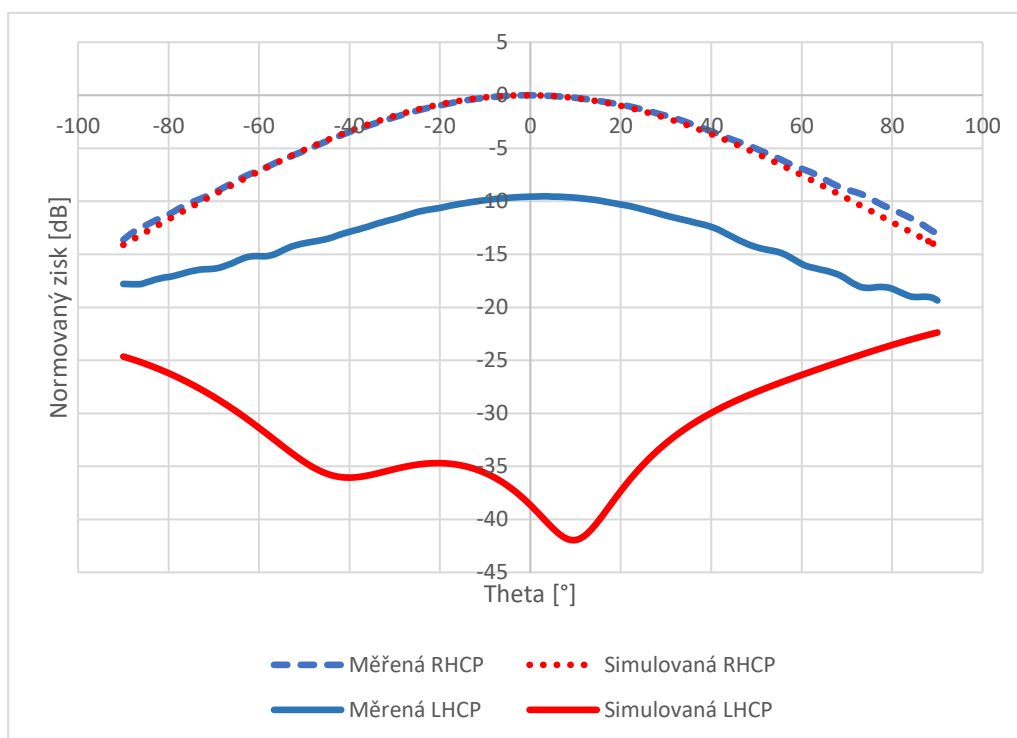
Obrázek 3.9 Porovnání parametrů S11 simulované a vyrobené antény s inkluzí u středního vodiče, červená – simulace, hnědé - měření



Obrázek 3.10 Porovnání osového poměru simulované a vyrobené antény s inkluzí u středního vodiče, červená – simulace, modrá – měření



Obrázek 3.11 Vyzařovací charakteristiky simulované a vyrobené antény s inkluzí u středního vodiče v rovině XZ



Obrázek 3.12 Vyzařovací charakteristiky simulované a vyrobené antény s inkluzí u středního vodiče v rovině YZ

3.4 Srovnání antén

U vyrobené antény bez inkluze v okolí středního vodiče se shoduje impedanční šířka pásma se simulovanou anténou, ale u šířky pásma osového poměru došlo oproti simulaci ke zmenšení na 20 MHz. Zisk vyrobené antény je o 1,43 dB vyšší než u simulované antény a to 6,53 dBi. Pracovní kmitočet je na 2,44 GHz a osový poměr je na tomto kmitočtu 1,6 dB.

Impedanční šířku pásma ani šířku pásma osového poměru se u antény s inkluzí u středního vodiče nepodařilo změřit kvůli deformaci substrátu. Zvětšením vzduchových inkluzí se od sebe vzdálily dva buzené módy, čímž se činitel odrazu na pracovním kmitočtu zvýšil nad -10 dB na hodnotu -8 dB a osový poměr vzrostl nad 3 dB. Zisk vyrobené antény je o 0,4 dB nižší než u simulované antény.

Tabulka 3.1 Srovnání simulovaných a změřených hodnot antén

Typ antény	Impedanční šířka pásma [MHz]	Relativní impedanční šířka pásma [%]	Šířka pásma osového poměru [MHz]	Relativní šířka pásma osového poměru [%]	Zisk [dBi]	Osový poměr na 2,45 GHz [dB]	Činitel odrazu na 2,45 GHz [dB]
KP anténa – bez inkluze u stř. vodiče - simulace	112,0	4,57	27,0	1,10	5,1	0,09	-14,92
KP anténa – bez inkluze u stř. vodiče - měřeno	112,0	4,57	20,0	0,82	6,53	3,12	-13,13
KP anténa – s inkluzí u stř. vodiče - simulace	112,0	4,57	28,0	1,14	5,6	0,20	-20,73
KP anténa – s inkluzí u stř. vodiče - měřeno	Nezměřeno – S11 > -10 dB	-	Nezměřeno – AR > 3 dB	-	5,2	5,77	-8,00

4. ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout kruhově polarizovanou anténu a měnit lokálně relativní permitivitu substrátu za účelem dosažení maximální šířky pásma. Vedoucím práce bylo zadáno navrhnout anténu pro pásmo ISM se střední frekvencí 2,45 GHz. Jako substrát byl zvolen kvůli dostupnosti materiál PLA pro 3D tisk s dielektrickou konstantou $\epsilon_r = 2,71$ [9], tloušťka substrátu je 1,524 mm. Při výrobě bylo zjištěno, že relativní permitivita použitého materiálu PLA je 2,6.

V práci byl zkoumán vliv tvarování vzduchových inkluzí v substrátu pod dvěma rohy flíčku, které se nacházejí v diagonále. Bylo zjištěno, že tvarování inkluze má vliv na impedanční šířku pásma. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s kruhovou inkluzí, proto byl tento koncept vybrán i pro další zkoumání. Impedanční šířka pásma kruhově polarizované antény s kruhovou inkluzí byla u simulované i vyrobené antény 112 MHz, u konvenční antény se zkrácenými rohy byla simulací zjištěna impedanční šířka pásma 106 MHz. Tvarováním inkluze tedy došlo ke zvětšení šířky pásma o 6 MHz, tedy o 0,24 %.

Dále bylo zkoumáno stupňování inkluze, ale bylo zjištěno, že stupňování nemá na šířku pásma vliv a navíc je koncept se stupňovanou inkluzí složitější na výrobu.

Simulacemi bylo zjištěno, že vložením vysokopermitivního materiálu do oblasti středního vodiče sice nedojde ke zvětšení šířky pásma, ale lze tak dosáhnout i s malou inkluzí diametrálně lepšího impedančního přizpůsobení.

Metodou 3D tisku se podařilo vyrobit kruhově polarizovanou flíčkovou anténu na nehomogenním substrátu. Výrobou antény bylo zjištěno, že materiál PLA není vhodný pro realizaci antén, kvůli nestálosti rozměrů při změnách teploty. Z důvodů deformace substrátu se nepodařilo potvrdit zlepšení impedančního přizpůsobení zavedením vysokopermitivní inkluze do substrátu.

3D tisk je vhodný pro výrobu nízkonákladových flíčkových antén, ale musí být vybrán teplotně stálý materiál. Možnou alternativou materiálu PLA by mohl být materiál PETG.

LITERATURA

- [1] BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd Edition. New Jersey: John Wiley, 2005. ISBN 0-471-66782-X.
- [2] GARG, R., P. BHARTIA, I. BAHL a A. ITTIPOBOON. *Microstrip antennas design handbook*. Boston, London: Artech house, 2001. ISBN 0-89006-513-6.
- [3] SHARMA, P. a K. GUPTA. Analysis and optimized design of single feed circularly polarized microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1983, **31**(6), 949-955. ISSN 0096-1973. Dostupné z: doi:10.1109/TAP.1983.1143162
- [4] ARMIN, Farid, Astriany NOER, KAMIRUL a Suisbiyanto PRASETYA. Modification of 2.2 GHz S-Band Rectangular Patch Microstrip Antenna using Truncated Corner Method for Satellite Applications. In: *2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)* [online]. IEEE, 2020, 2020-12-10, s. 284-288 [cit. 2022-12-30]. ISBN 978-1-7281-8404-3. Dostupné z: doi:10.1109/ISRITI51436.2020.9315475
- [5] TUOVINEN, Tommi, Erkki T. SALONEN a Markus BERG. An Artificially Anisotropic Antenna Substrate for the Generation of Circular Polarization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2016, **64**(11), 4937-4942. ISSN 0018-926X. Dostupné z: doi:10.1109/TAP.2016.2602381
- [6] WANG, S., L. ZHU, J. WANG a W. WU. Circularly Polarised Patch Antenna Using 3D-Printed Asymmetric Substrate., *Electronic Letters*. 2018, (54), 674–676. Dostupné z: doi:10.1049/el.2018.0769
- [7] WANG, Shiyang, Xiao ZHANG, Lei ZHU a Wen WU. Single-Fed Wide-Beamwidth Circularly Polarized Patch Antenna Using Dual-Function 3-D Printed Substrate. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [online]. 2018, **17**(4), 649-653 [cit. 2023-01-01]. ISSN 1536-1225. Dostupné z: doi:10.1109/LAWP.2018.2810105
- [8] WANG, Shiyang, Lei ZHU a Wen WU. 3-D Printed Inhomogeneous Substrate and Superstrate for Application in Dual-Band and Dual-CP Stacked Patch Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 2018, **66**(5), 2236-2244 [cit. 2023-01-01]. ISSN 0018-926X. Dostupné z: doi:10.1109/TAP.2018.2810330
- [9] ZECHMEISTER, Jaroslav a Jaroslav LACIK. Complex Relative Permittivity Measurement of Selected 3D-Printed Materials up to 10 GHz. 2019 Conference on Microwave Techniques (COMITE). IEEE, 2019, 2019, 1-4. ISBN 978-1-5386-9337-7. Dostupné z: doi:10.1109/COMITE.2019.8733590
- [10] SAMSUZZAMAN, Md., Norbahiah MISRAN, M. TARIKUL ISLAM, M. R. I. FARUQUE a Mohammad TARIQUL ISLAM. Right hand circularly polarized 2.40 GHz truncated corner patch antenna for small satellite application. *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED*

MATERIALS. 2019, 2019, (9-10), p. 570 - 576. ISBN 978-1-5386-9337-7.
Dostupné z: doi:10.1109/COMITE.2019.8733590

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

HFSS	High Frequency Simulation System
RHCP	Pravotočivá kruhová polarizace (z angl. Right handed circular polarization)
LHCP	Levotočivá kruhová polarizace (z angl. Left handed circular polarization)
AR	Osový poměr (z angl. Axial ratio)
LP	Lineární polarizace
KP	Kruhová polarizace
ISM	Industrial, Scientific and Medical (band)
PLA	Polylactic acid

Symboly:

ϵ_r	relativní permitivita dielektrika	(-)
ϵ_{reff}	efektivní relativní permitivita dielektrika	(-)
W	šířka flíčku antény	(mm)
h	výška substrátu	(mm)
f_r	rezonanční frekvence	(Hz)
ΔL	rozšíření flíčku	(mm)
L	skutečná délka flíčku	(mm)
ϵ_0	permitivita vakua	(F/m)
μ_0	permeabilita vakua	(H/m)