

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Michal Kovář



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

ANTÉNA PRO DIGITÁLNÍ KLÍČ

DIGITAL KEY ANTENNA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Kovář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Michal Kovář

ID: 240641

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Anténa pro digitální klíč

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci bakalářské práce by měla být navržena, simulována a realizována kruhově polarizovaná anténa, vhodná pro integrování do interiéru auta. Anténa bude využívána společně s modulem digitálního klíče, založeného na Bluetooth Low Energy (BLE) Channel Sounding (CS).

Vypracujte přehled vhodných antén. Pro vybrané antény vytvořte v ANSYS HFSS simulační modely. Výsledky simulací vzájemně porovnejte. Vybrané antény optimalizujte pro použití s kontrolérem NXP KW45. Optimalizované antény realizujte a jejich funkčnost experimentálně ověřte ve stíněné komoře i v reálném prostředí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, C.A. Antenna Theory: Analysis and Design, 4th Edition. Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons, 2016. ISBN: 978-1-118-64206-1.

[2] -, Channel Sounding | Bluetooth® Technology Website [online]. Copyright © 2023 Bluetooth SIG. [cit. 23.05.2023]. Available: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/channel-sounding/>

Termín zadání: 16.2.2024

Termín odevzdání: 27.5.2024

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

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 návrhem kruhově polarizovaných antén, které jsou vhodné na použití Bluetooth Low Energy pro měření vzdálenosti. Anténa má být integrovaná v interiéru auta. Jelikož je za potřebí, aby anténa nebyla příliš velká, modelovaly se mikropáskové antény. Všechny navržené antény obsahují substrát Arlon 25N. Antény jsou modelovány a simulovány v programu Ansys HFSS. Cílem navržených antén je, aby pracovaly na frekvenci 2,44 GHz. Namodelované a nasimulované antény jsou následně porovnány a je vyhodnoceno, která anténa se nejvíce hodí na naše použití. Nejvhodnější anténa je následně vyrobena a jsou ověřeny vlastnosti antény měřením.

Klíčová slova

Lineárně polarizovaná anténa, kruhově polarizovaná anténa, jednobodové napájení, čtvrtvlnný transformátor, dvojbodové napájení, koaxiální sonda, mikropásková anténa.

Abstract

The Bachelor thesis deals with the design of circularly polarized antennas that are suitable for Bluetooth Low Energy for distance measurement. Since the antenna is going integrated into the car interior, that the antenna should not be too large. Hence, the microstrip antennas were modelled. All the proposed antennas contain an Arlon 25N substrate. The antennas are modelled and simulated in Ansys HFSS. The objective of the designed antennas is to operate at 2.44 GHz. The modeled and simulated antennas are then compared and are evaluated to decide which antenna is the most suitable for our application. The most suitable antenna is subsequently manufactured, and its properties are verified through measurement.

Keywords

Linearly polarized antenna, circularly polarized antenna, single point feed, quarter wavelength transformer, dual point feed, coaxial probe, microstrip antenna.

Bibliografická citace

KOVÁŘ, Michal. *Anténa pro digitální klíč* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159028>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Zbyněk Raida.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Michal Kovář
VUT ID studenta:	240641
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	Anténa pro digitální klíč

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: 27.května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za odborné vedení a účinné rady, bez nichž by byla práce obtížně realizovatelná. Dále děkuji doc. Ing. Jaroslavovi Láčíkovi, Ph.D. a Ing. Tomášovi Mikuláškov, Ph.D. za pomoc při výrobě a měření antény

V Brně dne: 27.května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ ANTÉNA.....	13
1.1 ÚVOD	13
1.1.1 Polarizace	13
1.1.2 Vstupní impedance.....	13
1.1.3 S-parametry	13
1.1.4 Směrové charakteristiky.....	14
1.1.5 Zisk antény.....	14
1.1.6 Osový poměr	14
1.1.7 Šířka pásma.....	14
2. LINEÁRNĚ POLARIZOVANÝ FLÍČEK.....	15
2.1 POPIS ANTÉNY	15
2.2 SIMULAČNÍ MODEL	15
2.3 VÝSLEDKY SIMULACÍ	17
3. KRUHOVĚ POLARIZOVANÝ FLÍČEK S JEDNOBODOVÝM NAPÁJENÍM.....	21
3.1 POPIS ANTÉNY	21
3.2 SIMULAČNÍ MODEL	21
3.3 VÝSLEDKY SIMULACÍ	23
4. KRUHOVĚ POLARIZOVANÝ FLÍČEK S DVOUBODOVÝM NAPÁJENÍM	28
4.1 POPIS ANTÉNY	28
4.2 SIMULAČNÍ MODEL	28
4.3 VÝSLEDKY SIMULACÍ	30
5. DVOUPÁSMOVÁ KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ ŠTĚRBINOVÁ ANTÉNA.....	35
5.1 POPIS ANTÉNY	35
5.2 SIMULAČNÍ MODEL	35
5.3 VÝSLEDKY SIMULACÍ	37
6. REÁLNÉ PŘEVODNÍK	47
6.1 VÝBĚR ANTÉNY PRO REÁLNÉ PŘEVODNÍK.....	47
6.2 VYROBENÁ ANTÉNA	47
6.3 MĚŘENÍ REÁLNÉ ANTÉNY V ANTÉNNÍ KOMOŘE.....	48
6.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ V ANTÉNNÍ KOMOŘE A POROVNÁNÍ S VÝSLEDKY ZE SIMULACÍ.....	49
6.5 MĚŘENÍ V REÁLNÉM PROSTŘEDÍ (MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI)	54
7. ZÁVĚR.....	58
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Namodelovaný lineárně polarizovaný flíček (pohled ze shora)	16
2.2	Namodelovaný lineárně polarizovaný flíček (pohled z boku).....	16
2.3	Závislost parametru S11 na frekvenci pro lineárně polarizovaný flíček	17
2.4	Závislost parametru Z11 na frekvenci pro lineárně polarizovaný flíček	18
2.5	Závislost zisku na frekvenci pro lineárně polarizovaný flíček	19
2.6	2D vyzařovací charakteristika lineárně polarizovaného flíčku.....	19
2.7	3D vyzařovací charakteristika lineárně polarizovaného flíčku.....	20
2.8	Proudové rozložení lineárně polarizovaného flíčku	20
3.1	Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením (pohled ze shora)	22
3.2	Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením (pohled z boku).....	22
3.3	Závislost parametru S11 na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením	23
3.4	Závislost parametru Z11 na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením	24
3.5	Závislost osového poměru na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením	25
3.6	Závislost zisku na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením	25
3.7	2D vyzařovací charakteristika pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením	26
3.8	3D vyzařovací charakteristika pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením	26
3.9	Rozložení proudu pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením	27
4.1	Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s dvoubodovým napájením (pohled ze shora)	29
4.2	Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s dvoubodovým napájením (pohled ze spodu)	29
4.3	Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s dvoubodovým napájením (pohled ze boku).....	30
4.4	Pohled na vlnový port na koaxiální sondě.....	30
4.5	Závislost parametru S11 na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením	30
4.6	Závislost parametru Z11 na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením	31
4.7	Závislost osového poměru na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením	32
4.8	Závislost zisku na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením	32
4.9	2D vyzařovací charakteristika pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením	33
4.10	3D vyzařovací charakteristika pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením	33
4.11	Rozložení proudů pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením	34
5.1	Namodelovaný kruhově polarizovaný dvoupásmový flíček (pohled ze shora)	36
5.2	Závislost parametru S11 na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)	37
5.3	Závislost parametru S11 na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)	37
5.4	Závislost parametru Z11 na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)	39
5.5	Závislost parametru Z11 na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)	39
5.6	Závislost osového poměru na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)	40
5.7	Závislost osového poměru na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)	40
5.8	Závislost zisku na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)	41
5.9	Závislost zisku na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)	41
5.10	2D vyzařovací charakteristika pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)	42
5.11	3D vyzařovací charakteristika pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)	42
5.12	2D vyzařovací charakteristika pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)	43
5.13	3D vyzařovací charakteristika pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)	43
5.14	Vyzařovací charakteristika LHCP a RHCP ($f_r = 2,44$ GHz)	44
5.15	Vyzařovací charakteristika LHCP a RHCP ($f_r = 5,80$ GHz)	44
5.16	Rozložení proudů na flíčkovém zažiči pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz,)	45

5.17	Rozložení proudů na zemní ploše pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz,)	45
5.18	Proudové rozložení pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)	46
5.19	Rozložení proudů na zemní ploše pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz,)	46
6.1	Vyrobená anténa (pohled na flíčkový zářič)	47
6.2	Vyrobená anténa (pohled na zemní plochu)	48
6.3	Měření vyzařovacích charakteristik v anténní komoře	48
6.4	Měření osového poměru v anténní komoře	49
6.5	Porovnání výsledků pro S11 parametr na rezonanční frekvenci 2,44 GHz	50
6.6	Porovnání výsledků pro S11 parametr na rezonanční frekvenci 5,80 GHz	50
6.7	Porovnání výsledků osového poměru na rezonanční frekvenci 2,44 GHz	51
6.8	Porovnání výsledků osového poměru na rezonanční frekvenci 5,80 GHz	51
6.9	Porovnání výsledků vyzařovacích charakteristik LHCP pro rezonanční frekvenci 2,44 GHz	52
6.10	Porovnání výsledků vyzařovacích charakteristik RHCP pro rezonanční frekvenci 2,44 GHz	52
6.11	Porovnání výsledků vyzařovacích charakteristik LHCP pro rezonanční frekvenci 5,80 GHz	53
6.12	Porovnání výsledků vyzařovacích charakteristik RHCP pro rezonanční frekvenci 5,80 GHz	53
6.13	Rozložení bodů měření vzdálenosti vně automobilu	54
6.14	Měření vzdálenosti	55
6.15	Umístění antény uvnitř auta mezi sedadly	55
6.16	Porovnání změřených vzdáleností	56
6.17	Ukázka měření vzdálenosti uvnitř automobilu	57
6.18	Výsledky měření vzdálenosti uvnitř automobilu	57

SEZNAM TABULEK

2.1	Vypočítané a optimální parametry lineárně polarizovaného flíčku.....	16
3.1	Vypočítané a optimální parametry kruhově polarizovaného flíčku s jednobodovým napájením.....	22
5.1	Určené charakteristické impedance a elektrické délky pro anténu z [4]	35
5.2	Výsledné velikosti jednotlivých částí flíčkového záříče	36
5.3	Vypočítané velikosti štěrbin.....	36

ÚVOD

Pod pojmem BLE ranging si můžeme představit Bluetooth Low Energy, a pod zkratkou CS se skrývá Channel Sounding. Channel Sounding je technika, která se používá k měření vzdálenosti a polohy Bluetooth zařízení. Technika je založena na indikátorech síly přijatého signálu a úhlu příchodu/odchodu signálu. Vlny pro měření jsou přenášeny a přijímány ve frekvenčních pásmech v rámci 40 BLE kanálů. Pro získání přesného odhadu vzdálenosti jsou počítána časová zpoždění přenášených paketů a měřeny fázové posuny vysílaných tónů.

Pro správné měření vzdálenosti pomocí Channel Sounding by měly mít antény a vysokofrekvenční prvky následující vlastnosti. Jestliže je použita kruhově polarizovaná anténa, je třeba, aby její osový poměr splňoval pro osový poměr podmínku $AR < 3$ dB v celém frekvenčním pásmu, kde anténa pracuje. Ve horizontální rovině antény je zapotřebí maximální intenzita vyzařované vlny. Vstupní impedance antény se musí pohybovat kolem 50Ω , aby anténa byla přizpůsobena k charakteristické impedanci 50Ω . V celém pásmu, které je určeno pro práci antény, by měl činitel odrazu splňovat podmínku $S_{11} < -10$ dB. To znamená, že je odraženo méně než 10 % výkonu zpět ke zdroji. [6]

Jelikož se má anténa nacházet v interiéru auta, měla by být anténa co nejmenší, aby nezabírala příliš mnoho místa. Pro tyto účely byla použita mikropásková anténa, která velikostní podmínku splňuje. Mikropáskové antény mají nízký profil, dají se přizpůsobit i vlnitému povrchu, a jsou levné na výrobu. Co se týče rezonanční frekvence nebo polarizace, jsou mikropáskové antény velmi všestranné. Hlavní nevýhodou mikropáskových antén je malá šířka pásma nebo malá účinnost. Mikropásková anténa je složena ze substrátu, na jehož jedné straně se nachází zemní plocha, a na straně protější flíčkový zářič.

Jako první byla modelována lineárně polarizovaná flíčková anténa. Tato anténa byla vytvořena proto, aby se získal základ pro kruhově polarizované antény, které byly navrženy jako další.

Po lineárně polarizovaném flíčku byl modelován kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením. Pro tento způsob napájení byl použit čtvrtvlnný transformátor.

Další anténa, která byla namodelovaná, je kruhově polarizovaný flíček s dvoubodovým napájením. Pro dvoubodové napájení byla použita metoda napájení flíčku pomocí dvou koaxiálních sond.

Jako poslední anténa byla zvolena dvoupásmová anténa. Tato dvoupásmová anténa byla navržena podle článku [4] tak, aby pracovala na frekvencích 2,44 GHz a 5,80 GHz, kde 2,44 GHz je pro Bluetooth a 5.80 GHz je pro horní pásmo WI-Fi.

Všechny antény byly následně porovnány, a byla vybrána anténa s nejlepšími vlastnostmi. Vybraná anténa byla následně vyrobena a otestována. Testování probíhalo v anténní komoře i v reálném prostředí interiéru auta.

1. KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ ANTÉNA

1.1 Úvod

1.1.1 Polarizace

Anténa je komponent, který převádí elektromagnetické vlny šířící se podél vedení na elektromagnetické vlny vyzařované do okolí. Antény se většinou vyznačují lineární, kruhovou nebo eliptickou polarizací. Polarizace je vlastnost elektromagnetické vlny, která popisuje časově se měnící směr a velikost vektoru elektrického pole.

Lineárně polarizovaná anténa se charakterizuje tím, že vektor elektrického pole kmitá podél čáry (linie). Obecně však platí, že vektor elektromagnetického pole se pohybuje po elipse. Lineární a kruhová polarizace jsou speciální případy eliptické polarizace. Tyto případy nastanou, pokud se z elipsy stane kruh nebo přímka.

U kruhově polarizovaných antén se vektor elektrického pole otáčí kruhovým pohybem. Při každém cyklu provede jednu otáčku. Rozlišuje se, jestli se vektor otáčí ve směru hodinových ručiček nebo ne. Pokud se otáčí po směru hodin, tak se označuje jako pravotočivá polarizace a proti směru jako levotočivá polarizace. [1]

1.1.2 Vstupní impedance

Vstupní impedance je impedance, kterou naměříme na vstupních svorkách antény. Vstupní impedance je definována jako: [1]

$$Z_A = R_A + jX_A, \quad (1.1)$$

kde Z_A je impedance antény na vstupních svorkách, R_A jako anténní odpor na vstupních svorkách a X_A je anténní reaktance na vstupních svorkách.

Ve většině případů se vstupní impedance počítá na rezonanční frekvenci. Vstupní impedance je závislá na frekvenci, tvaru antény, způsobu buzení a na tom, zda jsou v okolí nějaké jiné objekty, které by mohly způsobit ovlivňování. Pokud je napětí a proud ve fázi, bude impedance čistě reálná. Pokud napětí předbíhá proud o 90° , bude impedance čistě imaginární.

Vstupní impedance antény musí být přizpůsobena impedanci zdroje. Kdyby impedance nebyla přizpůsobena, docházelo by k odrazu energie od vstupu antény zpět ke zdroji. S impedančním přizpůsobením souvisí parametr poměr stojatých vln. Pokud je poměr stojatých vln roven jedné, tak je anténa dobře přizpůsobena a nedochází k žádným odrazům. Pokud je poměr stojatých vln větší než jedna, anténa již vykazuje odrazy. [1]

1.1.3 S-parametry

S-parametry popisují vstupně-výstupní vztahy mezi porty. Nejčastěji používaným parametrem je S_{11} , který nazýváme koeficientem odrazu. Parametr S_{11} udává, kolik energie se odrazí od antény. Pokud platí, že parametr $S_{11} = 0$ dB, pak anténa nic

nevyzařuje a všechny výkon je od vstupu antény odražen zpět ke zdroji. Parametr S_{11} nikdy nesmí jít do kladných hodnot. To znamená, že čím menší je hodnota parametru S_{11} , tím anténa lépe vyzařuje. V ideálním případě by se veškerý výkon dodaný do antény měl vyzařit.

Dalším S-parametrem je S_{12} , který představuje výkon přenesený z portu 2 na port 1. Parametr S_{21} představuje přenesený výkon z portu 1 na port 2. [1]

1.1.4 Směrové charakteristiky

Směrové charakteristiky zobrazují, jak je anténa schopna vyzařovat nebo přijímat výkon radiových vln v určitém směru. K vlastnostem záření patří hustota toku energie, intenzita záření, intenzita pole, fáze nebo polarizace. Směrové charakteristiky se vykrešlují ve 2D a ve 3D. [1]

1.1.5 Zisk antény

Zisk udává, kolik vstupního výkonu anténa převede na výkon vyzařený v určitém směru. U vysílací antény označuje zisk koncentraci vstupního výkonu do výkonu vyzařeného ve směru hlavního laloku antény. U přijímací antény popisuje zisk schopnost antény koncentrovat výkon radiových vln na výstupní výkon antény. Zisk antény souvisí se směrovostí a účinností antény.

Vyšší zisk je vhodnější pro antény, u kterých víme, odkud přijímaný signál přichází. Typický příklad pro anténu, kde je lepší vyšší zisk, je přijímací TV anténa. Naopak antény s nižším ziskem jsou lepší, když se neví, odkud přijímaný signál bude přicházet. Je to například GPS anténa v mobilu. [5]

1.1.6 Osový poměr

Osový poměr antény je uváděn u antén, které jsou kruhově polarizované. Je definován jako poměr mezi hlavní a vedlejší osou kruhově polarizované vlny. Ideální kruhová polarizace má osový poměr 1 (0 dB). Pro ideální lineární polarizaci by byl osový poměr roven nekonečno, protože kolmá složka elektrického pole je nulová.

1.1.7 Šířka pásma

Šířka pásma je rozsah frekvencí, na kterých může anténa správně vyzařovat i přijímat energii. Za šířku pásma se považuje za rozsah frekvencí po obou stranách středové rezonanční frekvence. Na rezonanční frekvenci jsou udávány vlastnosti antény jako například vstupní impedance, zisk. Obvykle se rozlišuje šířka pásma záření a šířka pásma impedance, protože jednotlivé vlastnosti antény se nemusejí měnit stejným způsobem. Vlastnosti antény jako zisk, úroveň vedlejšího laloku, polarizace souvisí se šířkou pásma záření. Naopak se šířkou impedance jsou spojeny vlastnosti jako impedance na vstupu nebo účinnost záření. Šířka pásma je jeden z nejdůležitějších parametrů při návrhu antény.[1]

2. LINEÁRNĚ POLARIZOVANÝ FLÍČEK

2.1 Popis antény

Jako první byl namodelovaný a nasimulovaný lineárně polarizovaný flíček napájený mikropáskovým vedením. Anténa se skládá ze substrátu, zemní plochy a flíčkového zářiče. Antény se zanořeným mikropáskovým napájením se používají pro lepší impedanční přizpůsobení. Proud je na konci flíčku malý a napětí je velké. Když se zanořené napájení posune více ke středu, zvýší se proud a napětí klesne. Uprostřed flíčku je proud maximální a napětí minimální.

2.2 Simulační model

Simulační model byl namodelován a simulován v programu Ansys Electronics Desktop verze 2021 R2 s využitím podprogramu High Frequency Structure Simulator (HFSS). Jako první byl nakreslen kvádr o velikostech 62 mm x 62 mm x 1,524 mm., který představuje substrát. U substrátu byl změněn materiál na Arlon25N s relativní permitivitou 3,38. Pod substrát byl nakreslen čtverec o stejných rozměrech jako substrát, který byl pokryt dokonale vodivou plochou. Tím vznikla zemní plocha.

Přibližná velikost flíčku, který je umístěn na substrátu, byl vypočten pomocí vzorců: [1]

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

kde W je šířka flíčku, c rychlost světla ve vakuu, f_r rezonanční frekvence, ϵ_r relativní permitivita substrátu. Délka flíčku byla určena podle vztahu: [1]

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ef}}}, \quad (2.2)$$

kde L je délka flíčku, ϵ_{ef} je efektivní permitivita substrátu, která je dána vztahem: [1]

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \cdot \frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2.3)$$

kde h je výška substrátu. Přibližná délka zanořeného vedení je dána vztahem: [1]

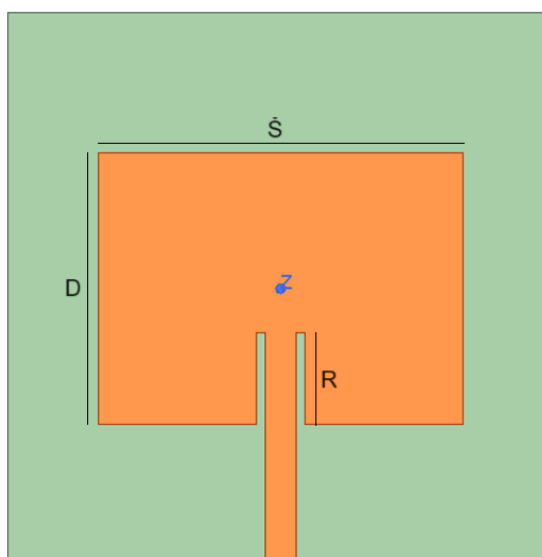
$$Z_{in}(R = R) = Z_{in}(R = 0) \cdot \cos^2\left(\frac{\pi \cdot R}{L}\right), \quad (2.4)$$

kde $Z_{in}(R=R)$ je impedance na začátku zanořeného vedení, $Z_{in}(R=0)$ je impedance na okraji flíčku bez zanořeného vedení, R je délka zanořeného vedení.

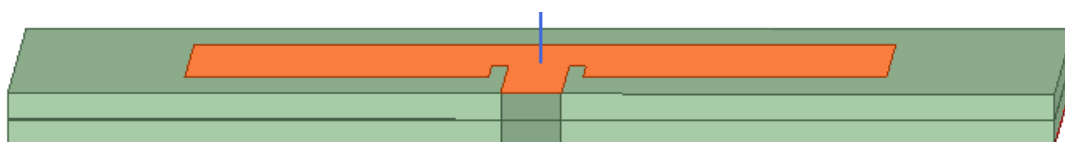
Z vypočítaných hodnot viz tabulka 2.1, byl nakreslen flíček. Flíček je pokryt, stejně jako zem, dokonale vodivou plochou. Jako napájení flíčku bylo zvoleno mikropáskové

vedení. Je nutné, aby mikropáskové vedení mělo charakteristikou impedanci 50Ω , aby byla anténa co nejlépe impedančně přizpůsobena.

Model dále musí obsahovat port pro napájení. Port byl nakreslen pomocí obdélníku, ve směru osy Z tak, aby překrýval celou výšku substrátu a spojoval mikropáskové vedení se zemí, jak je vidět na obrázku 2.2. Na závěr modelování byl přidán otevřený prostor antény.



Obrázek 2.1 Namodelovaný lineárně polarizovaný flíček (pohled ze shora)



Obrázek 2.2 Namodelovaný lineárně polarizovaný flíček (pohled z boku)

Tabulka 2.1 Vypočítané a optimální parametry lineárně polarizovaného flíčku

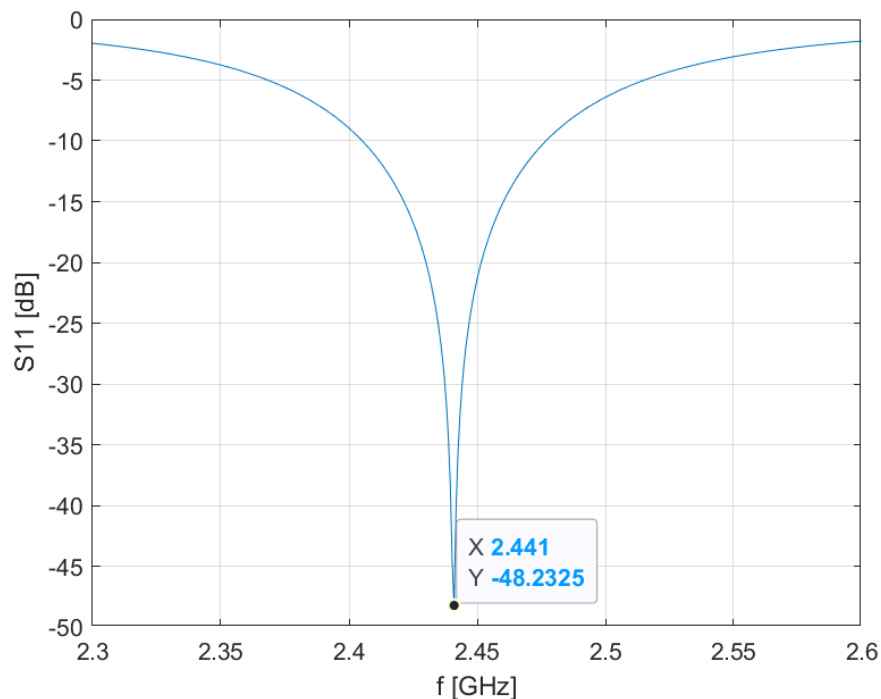
Parametr	Rozměr vypočítaný [mm]	Rozměr optimální [mm]
D	34,5	30,9
Š	41,5	41,5
R	10,2	10,5

Tabulka 2.1 představuje vypočítané rozměry flíčku a rozměry flíčku, které jsou optimální pro použití.

2.3 Výsledky simulací

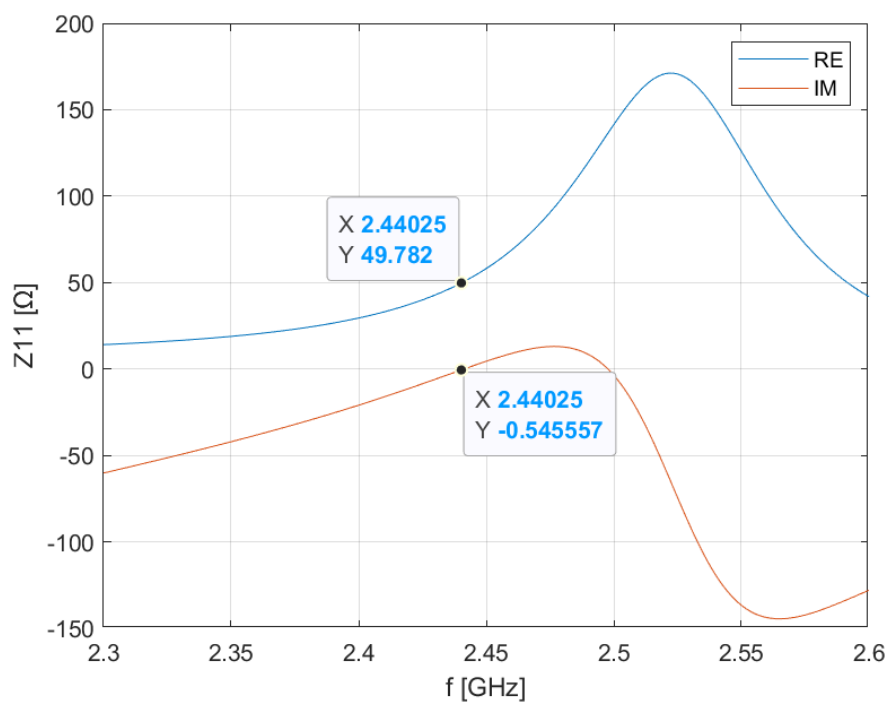
Výsledky simulací jsou vidět na obrázcích 2.3, 2.4, 2.5. Simulace je spuštěna od 2.3 po 2.6 GHz. Velikost kroku byla zvolena na 0,0002 GHz.

Po spuštění simulace se ukázalo, že šířka pásma pro zvolenou výšku substrátu, je příliš malá. Proto bylo zapotřebí přidat ještě jeden substrát o stejných rozměrech. A mezi tyto dva substráty se přidala další plocha, která je z materiálu Taconic RF-30, je široká 0,06 mm a reprezentuje oboustrannou lepicí pásku. Celková výška substrátu je tedy nakonec 3,108 mm. Před přidáním druhého substrátu byla šířka pásma přibližně 40 MHz. Po zvýšení substrátu je šířka pásma 80 MHz.



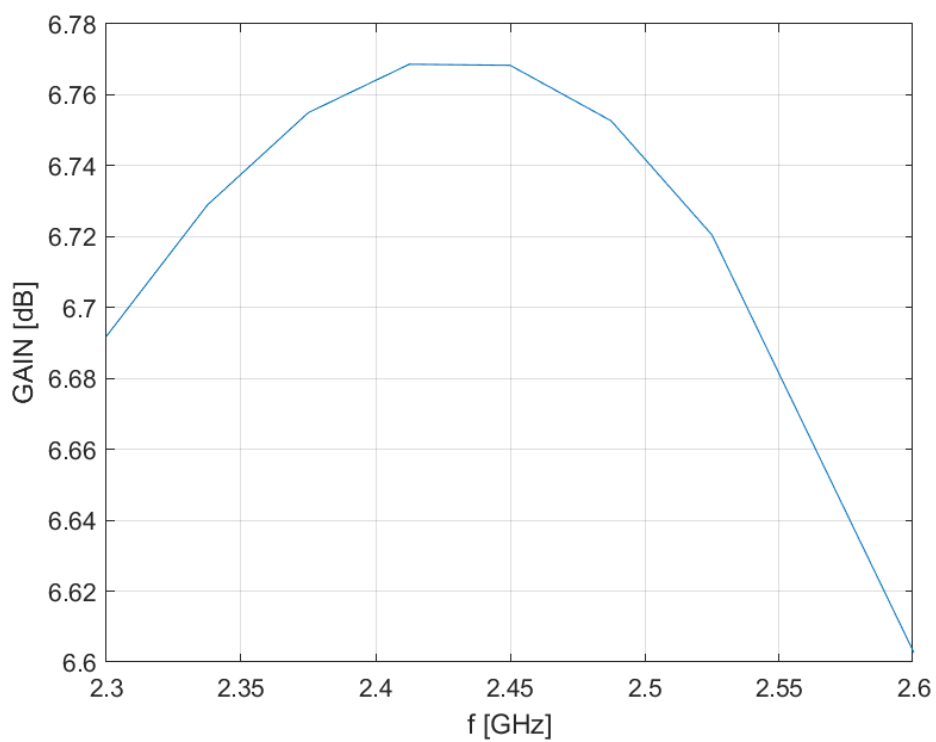
Obrázek 2.3 Závislost parametru S11 na frekvenci pro lineárně polarizovaný flíček

Na obrázku 2.3 je vidět, jak se mění činitel odrazu na změně frekvence. Díky simulacím bylo zjištěno, že změna délky flíčku má vliv hlavně na rezonanční frekvenci. Zvýší-li se délka flíčku, rezonanční frekvence se zmenší. Pokud se naopak délka flíčku zmenší, rezonanční frekvence roste.

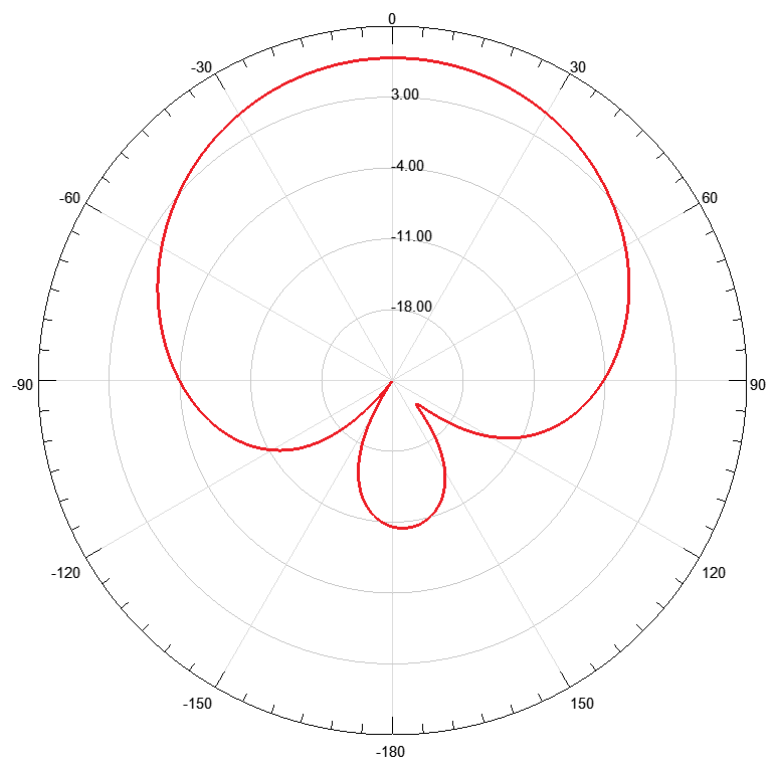


Obrázek 2.4 Závislost parametru Z_{11} na frekvenci pro lineárně polarizovaný flíček

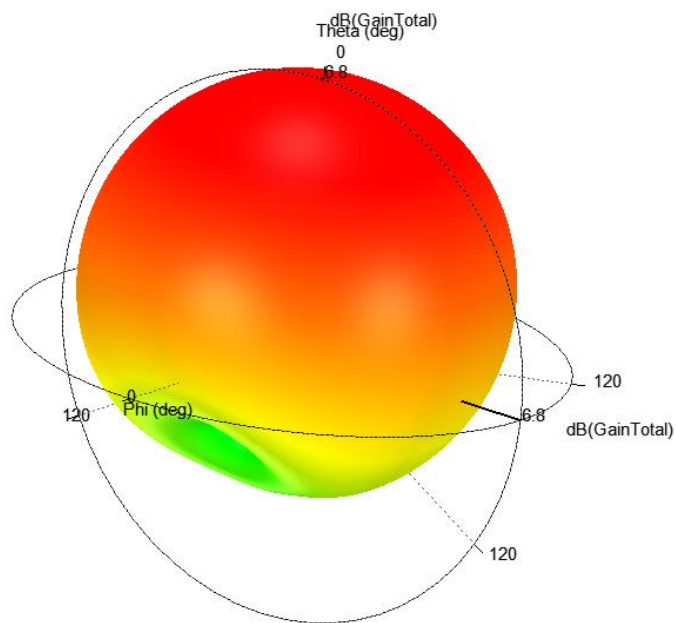
Obrázek 2.4 zobrazuje změnu vstupní impedance antény v závislosti na frekvenci. Impedanční přizpůsobení je nejlepší na 2,44 GHz. Pro okrajové hodnoty šířky pásma je již impedanční přizpůsobení méně uspokojivé. Parametr, který hlavně ovlivňuje impedanční přizpůsobení, je posouvání zanořeného vedení od okraje flíčku směrem ke středu. Simulacemi bylo ověřeno, že čím více je zanořené vedení blíže ke středu flíčku, tím více impedance roste.



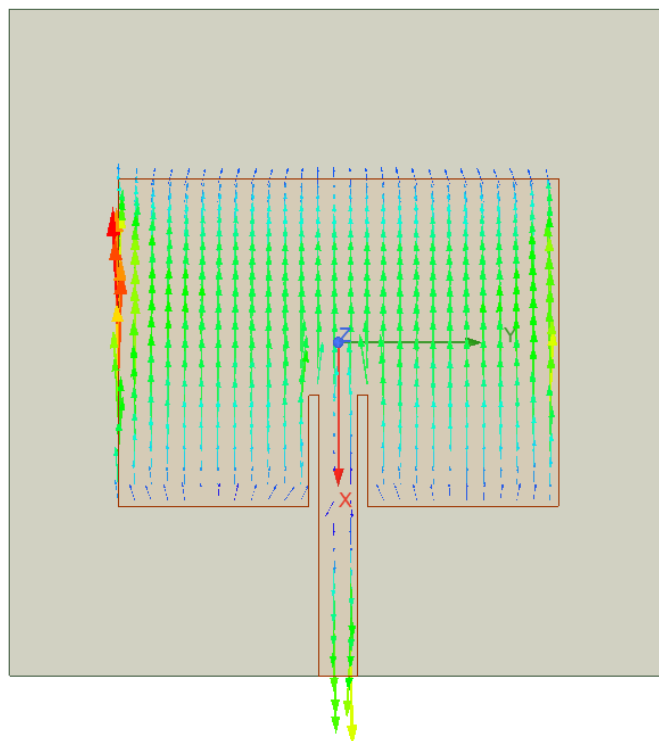
Obrázek 2.5 Závislost zisku na frekvenci pro lineárně polarizovaný flíček



Obrázek 2.6 2D vyzářovací charakteristika lineárně polarizovaného flíčku



Obrázek 2.7 3D vyzařovací charakteristika lineárně polarizovaného flíčku



Obrázek 2.8 Proudové rozložení lineárně polarizovaného flíčku

3. KRUHOVĚ POLARIZOVANÝ FLÍČEK S JEDNOBODOVÝM NAPÁJENÍM

3.1 Popis antény

Jako další byl modelovaný a simulovaný kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením. Jednobodové napájení znamená, že je anténa napájena pouze z jednoho místa. Tento flíček je napájený čtvrtvlnným transformátem s charakteristickou impedancí Z_t , jak je znázorněno na obrázku 3.1. Aby se dosáhlo kruhové polarizace, musí být flíčkový zářič čtvercového tvaru. Po oříznutí protilehlých rohů flíčkového zářiče se dosáhne buď levotočivé, nebo pravotočivé kruhové polarizace. Celý model se skládá ze zemní plochy, substrátu, mikropáskového vedení s charakteristickou impedancí Z_0 , čtvrtvlnného transformačního vedení s charakteristikou impedancí Z_t a flíčkového zářiče.

3.2 Simulační model

Jako první byla vypočítaná velikost flíčkového zářiče. Délka strany flíčku by se měla rovnat $\lambda/2$. Vlnová délka λ se vypočítá pomocí vztahu:[1]

$$\lambda = \frac{c}{f_r \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3.1)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, f_r je rezonanční frekvence a ϵ_r je relativní permitivita substrátu.

Z velikosti impedance na kraji flíčkového zářiče a velikosti impedance mikropáskového vedení s impedancí Z_0 byla vypočítaná charakteristická impedance čtvrtvlnného transformačního vedení podle vztahu: [1]

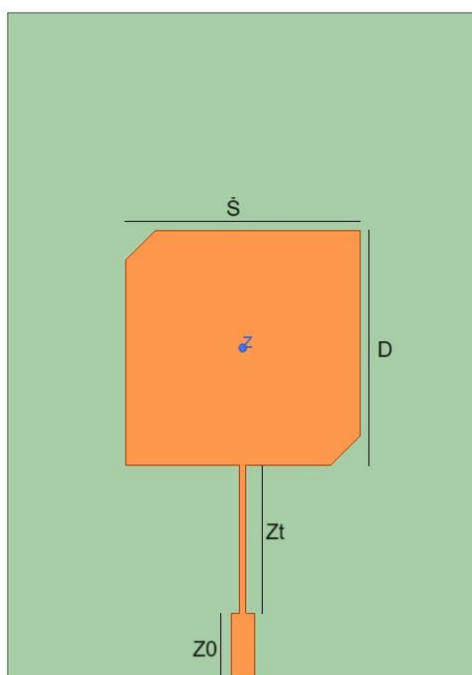
$$Z_t = \sqrt{Z_0 \cdot Z_a}, \quad (3.2)$$

kde Z_t je impedance čtvrtvlnného transformačního vedení a Z_a je velikost impedance na kraji flíčkového zářiče. Pomocí online nástroje na výpočet parametrů mikropáskového vedení [2] byla vypočítaná přibližná šířka a délka čtvrtvlnného transformačního vedení a mikropáskového vedení. Výsledný tvar flíčku byl označen jako dokonale elektricky vodivá plocha.

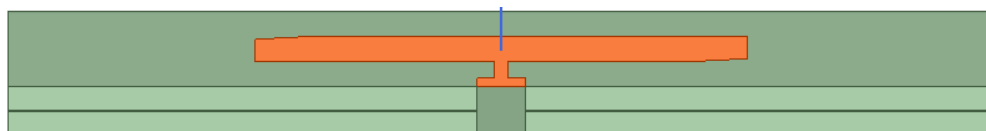
Pod flíčkový zářič byl nakreslen kvádr, který představuje substrát. Za substrát byl zvolen materiál Arlon 25N. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3, i zde byl vytvořen dvojitý substrát. Mezi substráty byl přidán materiál Taconic RF-30 s výškou 0,06 mm, který reprezentuje oboustrannou lepicí pásku.

Na spodní straně celkového substrátu byl nakreslen obdélník se stejnými rozměry jako substrát. Poté byl obdélník pokryt dokonale vodivou plochou, a tím vznikla zemní plocha. Na okraj substrátu byl přidán tzv. lumped port tak, aby spojoval zemní plochu

s mikropáskovým napáječem flíčku. Na závěr byl přidán otevřený prostor v okolí antény, aby simulace dobře fungovala.



Obrázek 3.1 Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením (pohled ze shora)



Obrázek 3.2 Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením (pohled z boku)

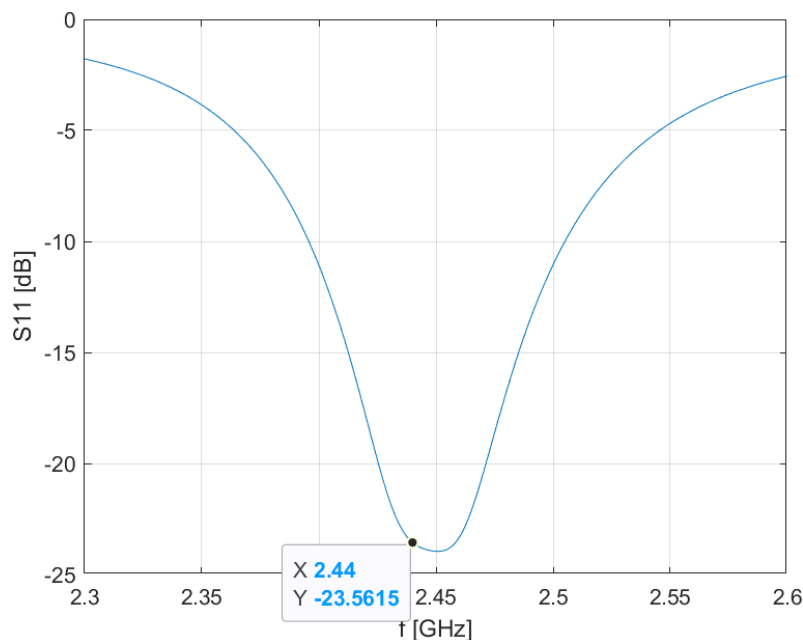
Tabulka 3.1 Vypočítané a optimální parametry kruhově polarizovaného flíčku s jednobodovým napájením

Parametr	Vypočítané hodnoty [mm]	Určené pomocí online nástroje [2] [mm]	Optimální hodnoty [mm]
Velikost flíčku	33,4	-	30,9
Délka čtvrtvlnného vedení	16,7	-	19,5
Délka mikropáskového vedení	-	9,4	9,2
Šířka čtvrtvlnného vedení	-	1	0,9
Šířka mikropáskového vedení	-	7,2	3

Tabulka 3.1 zobrazuje hodnoty vypočítané nebo určené pomocí online nástroje na počítání mikropáskového vedení [2]. Velký rozdíl je hlavně ve velikosti flíčku a šířce mikropáskového vedení. Bylo zapotřebí udělat kompromis mezi impedančním přizpůsobením a osovým poměrem. Když byla šířka mikropáskového vedení přibližně stejně velká jako vypočítaná hodnota, byl osový poměr velký. Když se zmenšila šířka vedení, zmenšil se i osový poměr, ale trochu klesla rezonanční frekvence. Proto se ještě musela snížit velikost flíčku, aby vše bylo v rozumné míře.

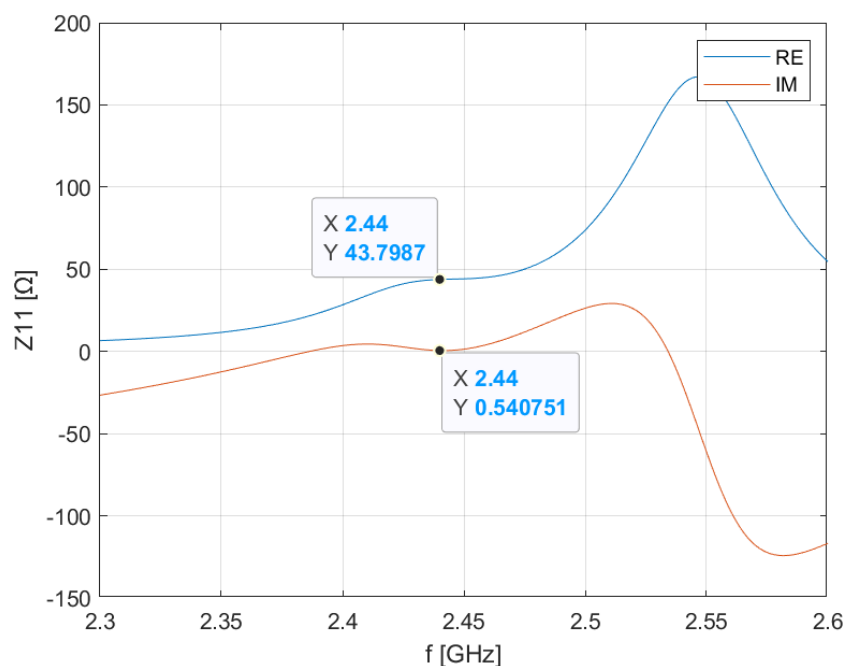
3.3 Výsledky simulací

Po namodelování celého kruhově polarizovaného flíčku s jednobodovým napájením se spustila simulace. Simulace je puštěna v rozsahu od 2,3 GHz po 2,6 GHz. Pro osový průběh je simulační průběh zkrácen na rozsah 2,4 GHz do 2,5 GHz.



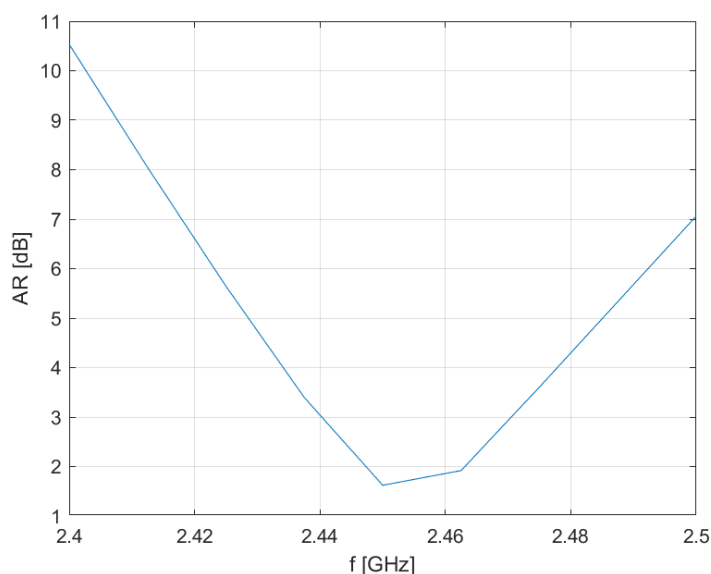
Obrázek 3.3 Závislost parametru S11 na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením

Pomocí simulací bylo zjištěno, že hlavní vliv na rezonanční frekvenci má změna velikosti flíčkového čtvercového zářiče. Zvýší-li se délka čtvercového zářiče, rezonanční frekvence se sníží.



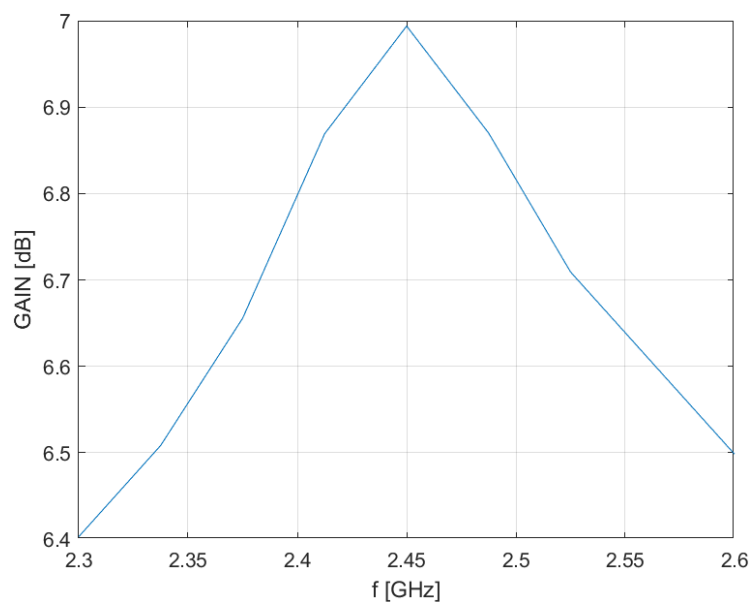
Obrázek 3.4 Závislost parametru Z_{11} na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodový napájením

Obrázek 3.4 zobrazuje impedanční přizpůsobení kruhově polarizovaného flíčku s jednobodovým napájením. Hlavní vliv na impedanční přizpůsobení měly změny velikosti mikropáskového vedení a čtvrtvlnného transformačního vedení. Zvyšování šířky mikropáskové vedení má za následek primárně snížení reálné hodnoty impedance. Se zvýšením šířky čtvrtvlnného transformačního vedení rostla hlavně imaginární část impedance. Když se prodloužila délka mikropáskového vedení, nebo délka čtvrtvlnného transformačního vedení, zvýšila se imaginární část impedance.

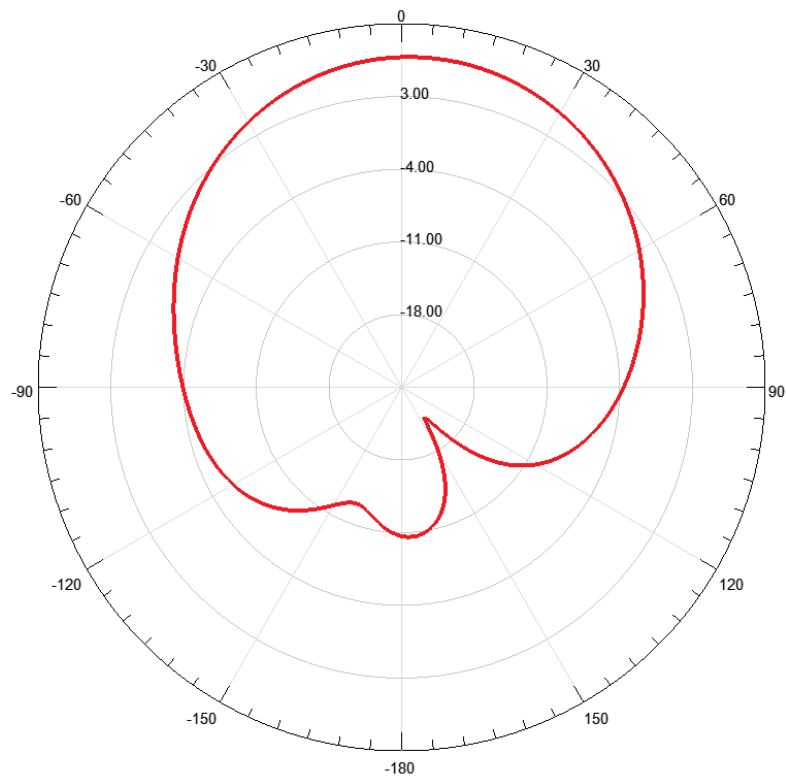


Obrázek 3.5 Závislost osového poměru na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodový napájením

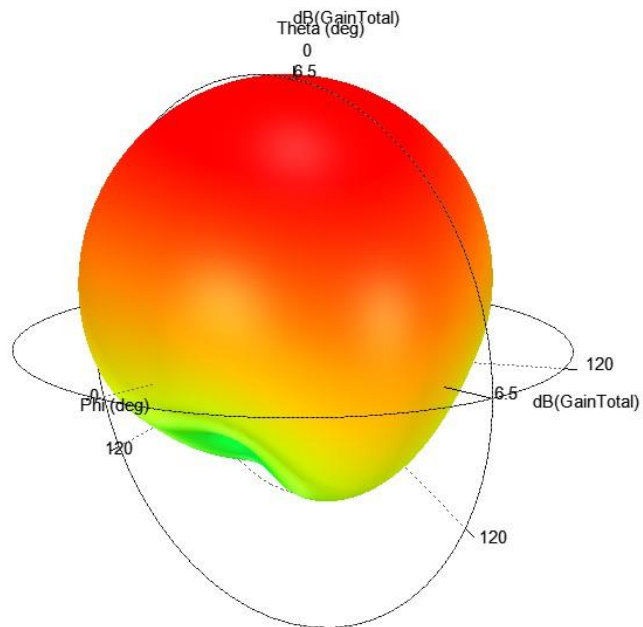
Obrázek 3.5 zobrazuje závislost osového poměru na frekvenci. Největší vliv na osový poměr měl tvar flíčku, který musí být čtvercový, a velikost oříznutí protilehlých rohů čtvercového flíčku. Pokud by nebyl flíček ve tvaru čtverce, zvyšoval by se tím osový poměr, a tím by se nejednalo o kruhovou polarizaci. Dobrého osového poměru se dosáhlo pouze na frekvencích od 2,44 GHz po 2,47 GHz. Na okrajích frekvenčního pásma již není osový poměr ideální.



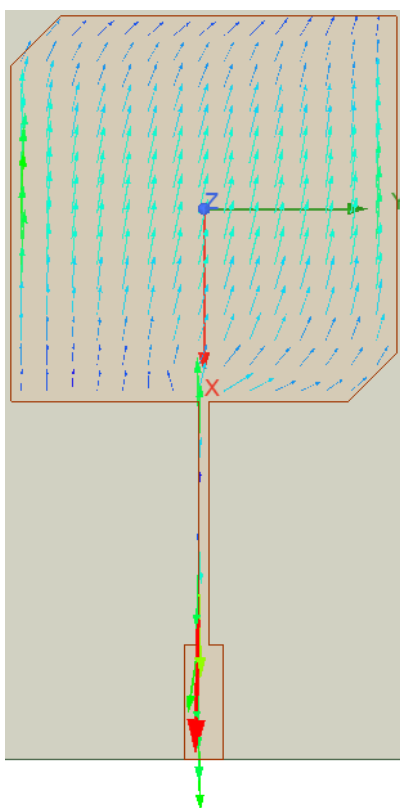
Obrázek 3.6 Závislost zisku na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodový napájením



Obrázek 3.7 2D vyzářovací charakteristika pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodový napájením



Obrázek 3.8 3D vyzářovací charakteristika pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodový napájením



Obrázek 3.9 Rozložení proudu pro kruhově polarizovaný flíček s jednobodovým napájením

Po spuštění animace proudů se začaly vektory proudů pohybovat po směru hodinových ručiček. Jedná se tedy o pravotočivou polarizaci. Ta byla dosažena tím, že se ořízly protilehlé rohy flíčku, jak je vidět na obrázku 3.9. Kdyby byly oříznuty druhé dva protilehlé rohy, jednalo by se o levotočivou polarizaci.

4. KRUHOVĚ POLARIZOVANÝ FLÍČEK S DVOUBODOVÝM NAPÁJENÍM

4.1 Popis antény

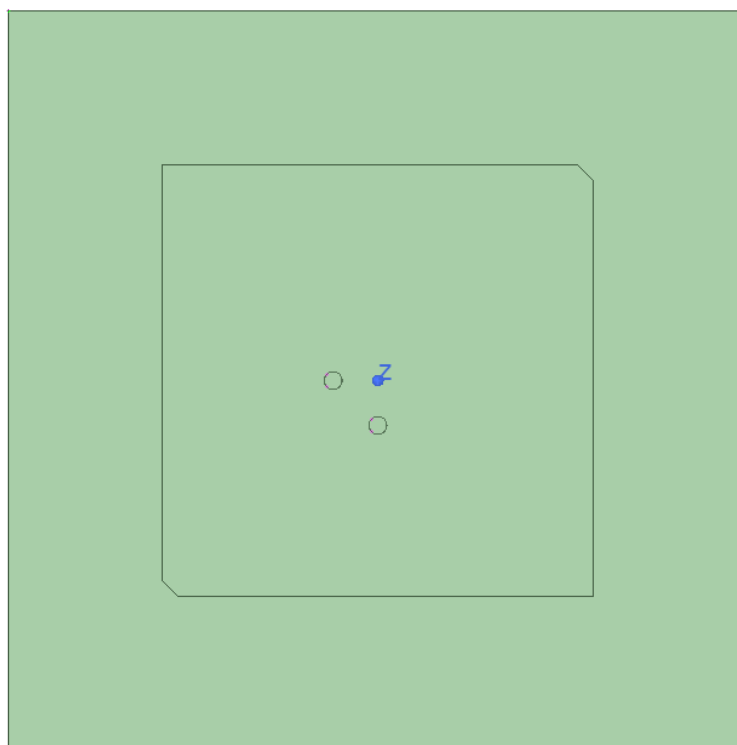
Další anténa vhodná na naše použití je kruhově polarizovaný flíček s dvoubodovým napájením. Dvoubodové napájení znamená, že anténa je napájena ze dvou míst. V tomto případě byla použita jako napájení koaxiální sonda. V tomto případě je vnější část koaxiálního SMA konektoru připojena na zemní plochu. Vnitřní část SMA konektoru je vedena skrz substrát a je připojena na flíčkový zářič, jak je vidět na obrázku 4.3. Pro návrh koaxiální sondy do modelované antény byl použit SMA konektor Amphenol RF 132134. Izolačním materiálem je Teflon, vnější část konektoru má průměr 4,06 mm a vnitřní 1,27 mm. [3]

4.2 Simulační model

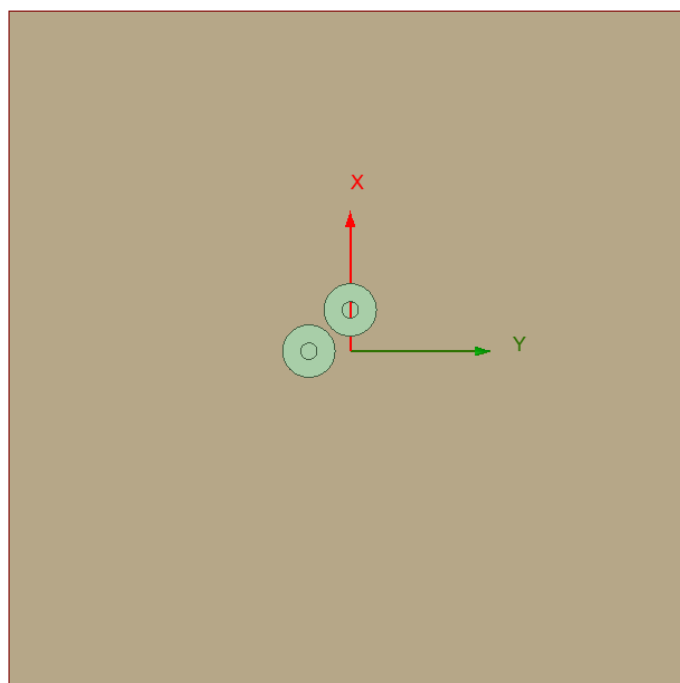
Velikost čtvercového flíčkového zářiče byla přibližně vypočítaná, jako v kapitole 3.2, pomocí vzorce (3.1). Poté byl, opět jako v předchozích kapitolách, nakreslen dvojitý substrát, aby se zvýšila šířka pásma. Pod substrátem se nachází zemní plocha. Flíčkový zářič a zemní plocha jsou dokonale elektricky vodivé.

Koaxiální sonda se začala modelovat tak, že se nakreslil v programu HFFS válec o průměru 4,06 mm. Tento válec byl umístěn tak, aby se jeho začátek dotýkal zemní plochy. Poté byl nakreslen menší válec a o průměru 1,27 mm a byl umístěn na stejné souřadnice jako válec o průměru 4,06 mm. Následně se tyto dva válce odečetly, pomocí příkazu subtract tak, aby zůstal větší válec s otvorem od menšího válce. Vnější a vnitřní část výsledného válce s otvorem byla pokryta dokonale vodivou plochou. Jako izolační materiál mezi dokonale vodivými plochami byl podle dokumentace SMA konektoru zvolen Teflon s relativní permitivitou 2,1. [3] Pokračovalo se nakreslením dalšího válce, který měl průměr 1,27 mm a vede od zemní plochy k flíčkovému zářiči. Tento válec se také pokryl dokonale elektricky vodivou plochou. Na závěr musel být přidán ještě jeden válec o průměru 1,271 mm. Tento válec se pomocí příkazu subtract odečetl od celého substrátu i od zemní plochy. Všechny válce mají stejné souřadnice pozice x a y. Pro dosažení kruhové polarizace musela být přidána druhá koaxiální sonda.

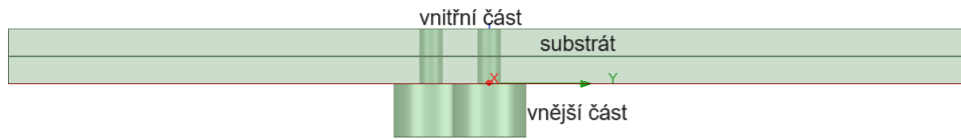
Ze spodní části válce o průměru 4,06 mm je přidán vlnový port. Port je nadefinován, jak je zobrazeno na obrázku 4.4. U jednoho ze dvou portů bylo za potřeby změnit jeho fázi na 90° a výkon obou portů nastavit na 1 W. Aby simulace fungovala podle představ, byl přidán otevřený prostor v okolí antény.



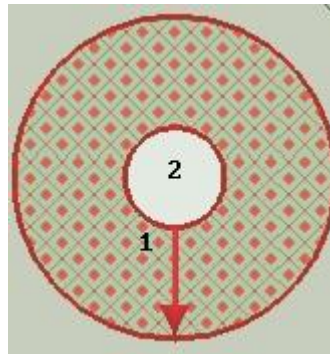
Obrázek 4.1 Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s dvoubodovým napájením (pohled ze shora)



Obrázek 4.2 Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s dvoubodovým napájením (pohled ze spodu)

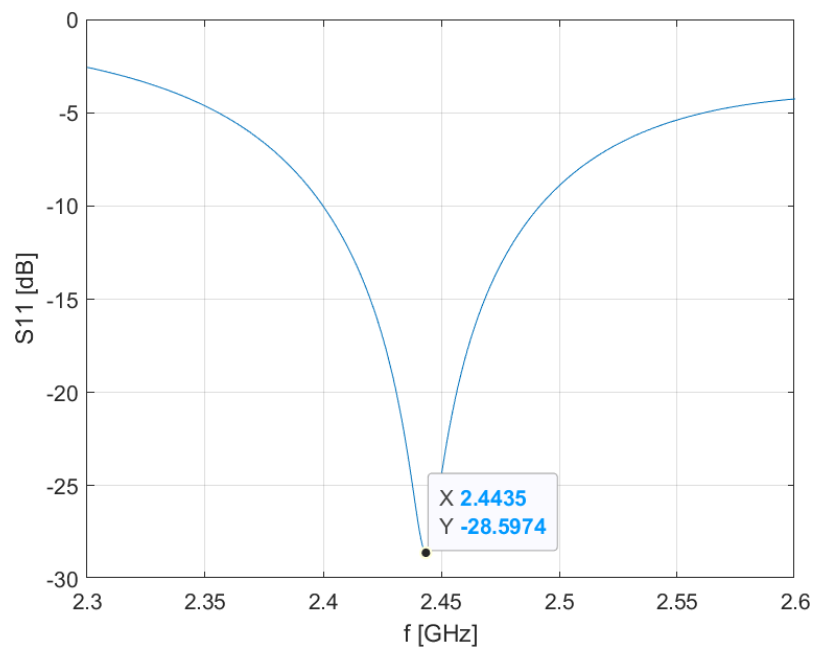


Obrázek 4.3 Namodelovaný kruhově polarizovaný flíček s dvoubodovým napájením (pohled ze boku)



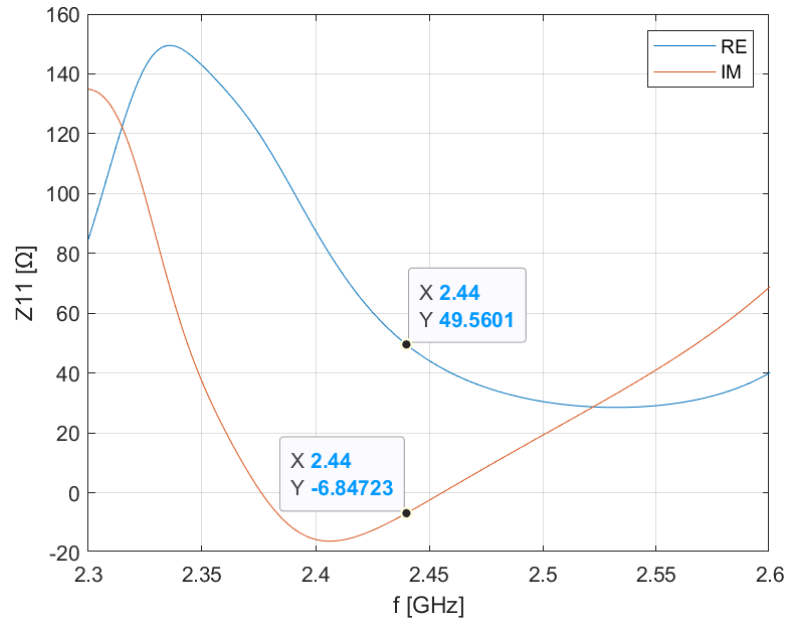
Obrázek 4.4 Pohled na vlnový port na koaxiální sondě.

4.3 Výsledky simulací



Obrázek 4.5 Závislost parametru S11 na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením

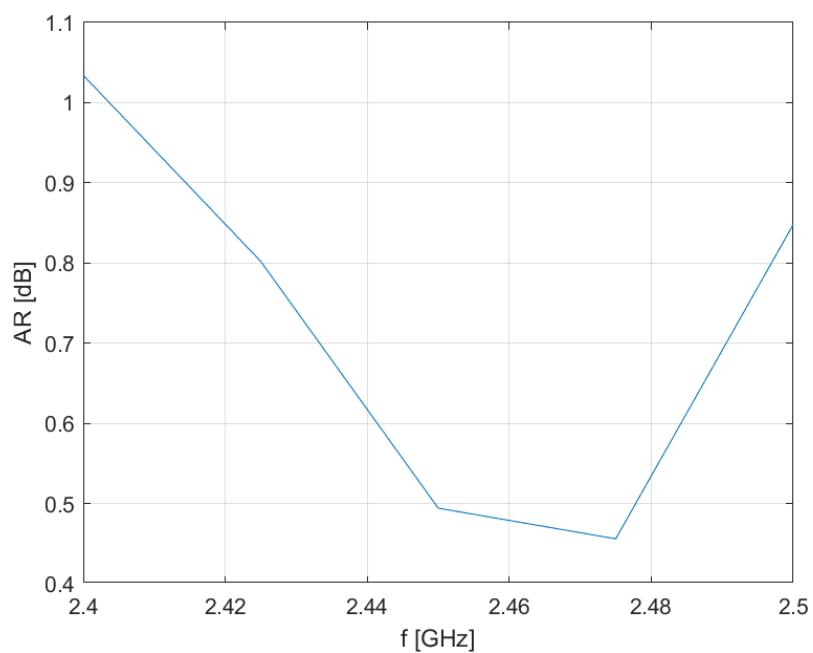
Na obrázku 4.5 je vidět činitel odrazu S11 v závislosti na frekvenci. Změnou velikost flíčku dochází hlavně ke změně rezonanční frekvence. Je-li velikost flíčku zvětšena, rezonanční frekvence klesá. Činitel odrazu se zmenšil, když se koaxiální sondy posunuly dále od středu.



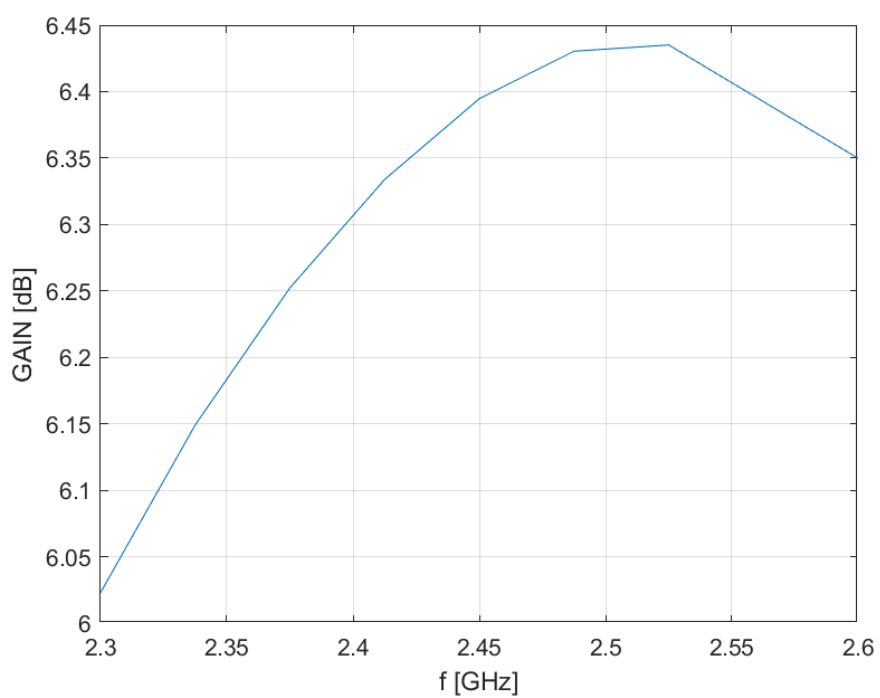
Obrázek 4.6 Závislost parametru Z11 na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením

Na obrázku 4.6 je zobrazeno impedanční přizpůsobení antény. Impedanční přizpůsobení se měnilo, když byly koaxiální sondy posovány po ose X a Y od středu nebo ke středu flíčkového zářiče. Jestliže se koaxiální sondy posunuly dále od středu, reálná i imaginární část impedance klesaly. Aby se dosáhlo lepšího impedančního přizpůsobení, přidalo se do simulačního modelu oříznutí protilehlých rohů flíčkového zářiče. Oříznutí rohů má za následek zvýšení reálné i imaginární části impedance.

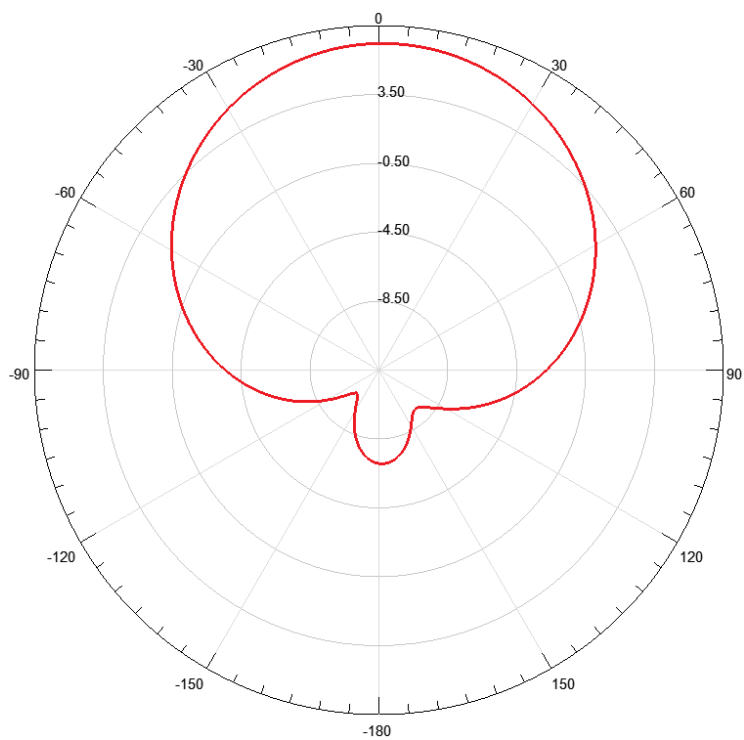
Obrázek 4.7 zobrazuje závislost osového poměru na frekvenci. U dvojbodového napájení se požadované hodnoty osového poměru do 3 dB dosáhlo v celé šířce pásma, kde anténa pracuje.



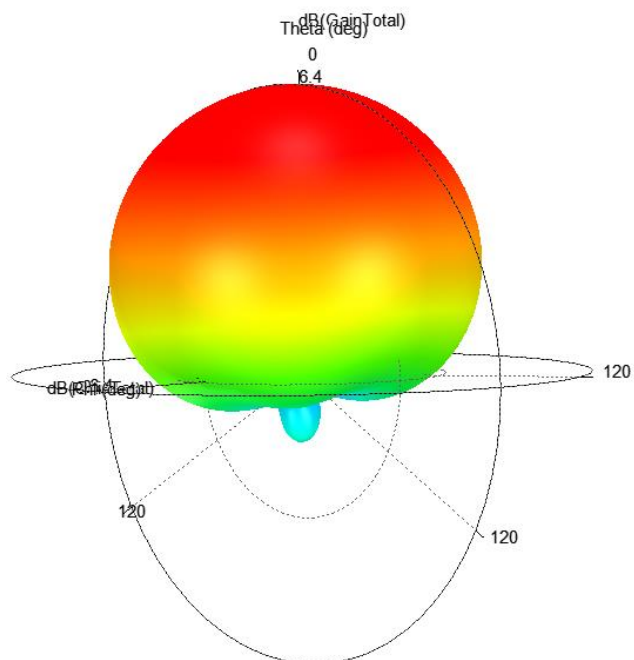
Obrázek 4.7 Závislost osového poměru na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením



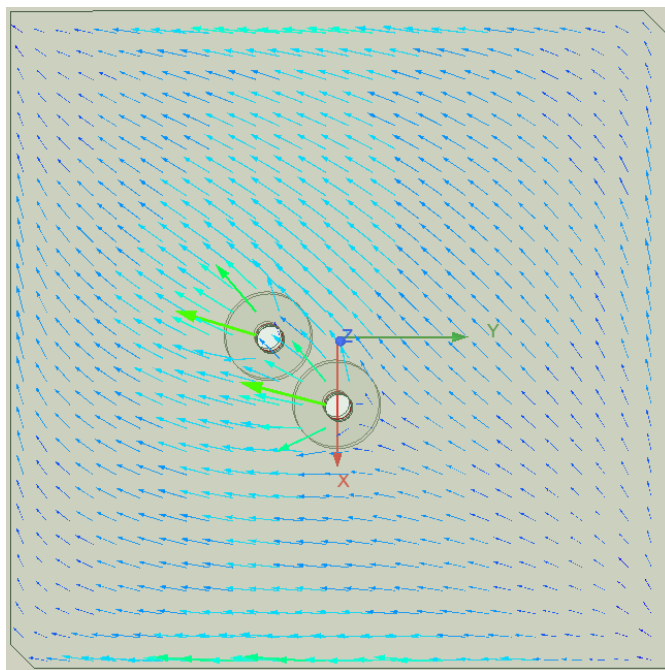
Obrázek 4.8 Závislost zisku na frekvenci pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením



Obrázek 4.9 2D vyzářovací charakteristika pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením



Obrázek 4.10 3D vyzářovací charakteristika pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením



Obrázek 4.11 Rozložení proudů pro kruhově polarizovaný flíček s dvojbodovým napájením

Po spuštění animace vektorů proudu se proudové vektory začaly pohybovat směrem na pravou stranu. Jde tedy o pravotočivou polarizaci.

5. DVOUPÁSMOVÁ KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ ŠTĚRBINOVÁ ANTÉNA

5.1 Popis antény

Anténa je popsána v literatuře [4]. Jedná se o dvoupásmovou kruhově polarizovanou anténu. Anténa je složena ze zemní plochy se dvěma štěrbinami, a dále ze substrátu a flíčkového zářiče. V literatuře [4] je vytvořena anténa, která pracuje na frekvencích 1,227 GHz a 1,575 GHz. Anténa byla modifikována, aby pracovala na frekvencích 2,44 GHz a 5,80 GHz. Kmitočet 2,44 GHz je střední frekvence frekvenčního pásma pro Bluetooth a pásma Wi-Fi 2,4 GHz a 5,80 GHz je střední frekvence pásma Wi-Fi 5 GHz

5.2 Simulační model

Simulování začalo tím, že se do HFSS programu překreslila anténa z literatury [4] pro ověření, zda výsledky simulací odpovídají výsledkům v této literatuře [4]. Výsledky překreslené antény se neshodovaly s výsledky z literatury [4]. Simulací bylo zjištěno, že anténa z [4] pracuje na frekvenci 1.575 GHz, ale již ne na 1,227 GHz.

Pomocí online nástroje [2] bylo vypočteno, jakou má každá část flíčkového zářiče charakteristickou impedanci a elektrickou délku. Následně byly vypočítány velikosti jednotlivých částí flíčkového zářiče tak, aby měly stejnou charakteristickou impedanci a elektrickou délku. Části flíčkového zářiče jsou vyobrazeny na obrázku 5.1 černou číslicí. Pro naše účely byl použit substrát Arlon 25N s relativní permitivitou 3,38 a výškou 1,524 mm. Pro zvýšení šířky pásma bylo zapotřebí zvýšit výšku substrátu. Pro tento účel se použil ještě jeden substrát Arlon 25N se stejnou výškou. Mezi tyto dva substráty se vložil další materiál reprezentující oboustrannou lepicí pásku, která tyto dva substráty slepila k sobě.

Tabulka 5.1 Určené charakteristické impedance a elektrické délky pro anténu z [4]

část	Charakteristická impedance [Ω]	Elektrická délka [$^\circ$]
1	50,8	159,3
2	23,7	126,7
3	45,5	76,2

Tabulka 5.2 Výsledné velikosti jednotlivých částí fličkového zářiče

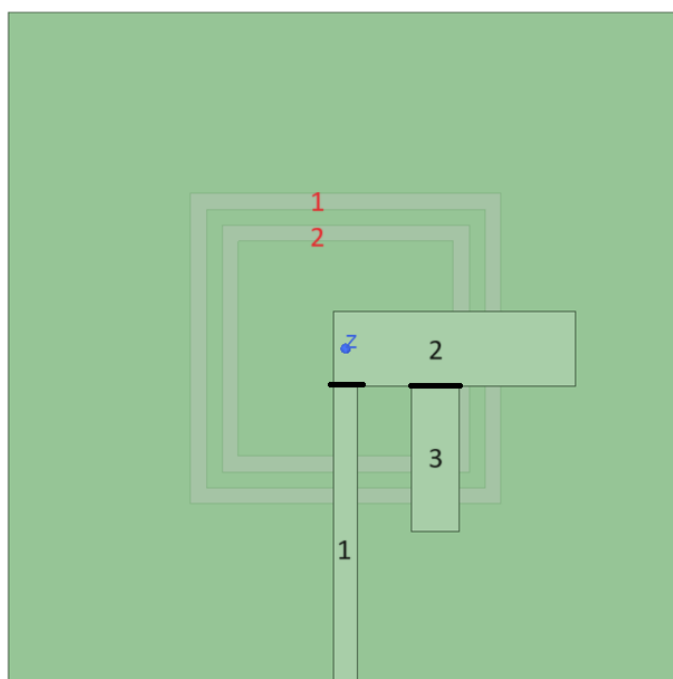
část	Šířka [mm]	Délka [mm]
1	2,2	27,8
2	7	22,5
3	4,5	13,5

Za pomoci [2] se ověřilo, jaký vliv má změna rezonanční frekvence, relativní permitivity substrátu a výšky substrátu na velikost mikropáskového vedení. Zmenší-li se výška substrátu, zmenší se i šířka mikropáskového vedení. Se snížením relativní permitivity substrátu dojde k navýšení šířky mikropáskového vedení. Jestliže se zvýší rezonanční frekvence, dojde k poklesu délky mikropáskového vedení.

Tabulka 5.3 Vypočítané velikosti štěrbin

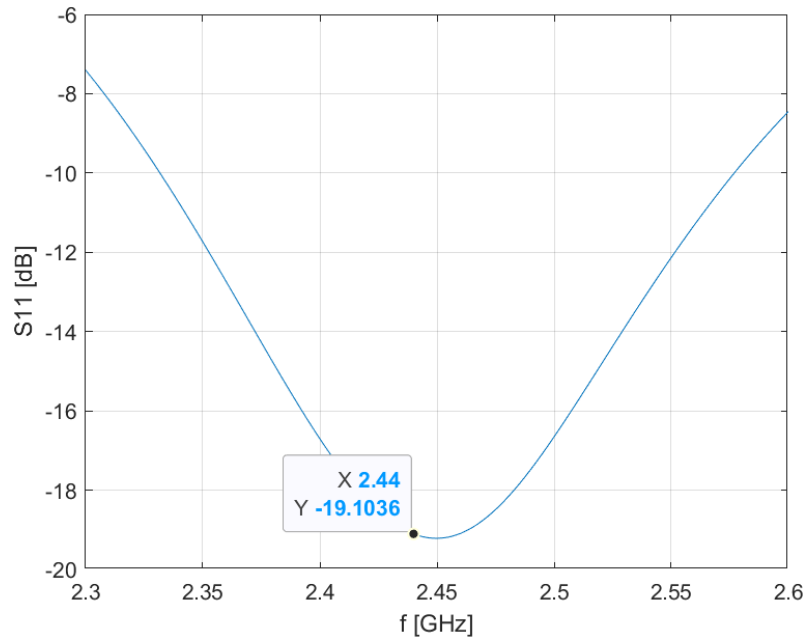
Štěrba	Vnější délka štěrby [mm]	Vnitřní délka štěrby [mm]
1	29,1	26,1
2	23,5	20,5

Tabulka 5.2 a 5.3 představují hodnoty dvoupásmové antény, která by měla pracovat na frekvencích 2,44 GHz a 5,80 GHz.

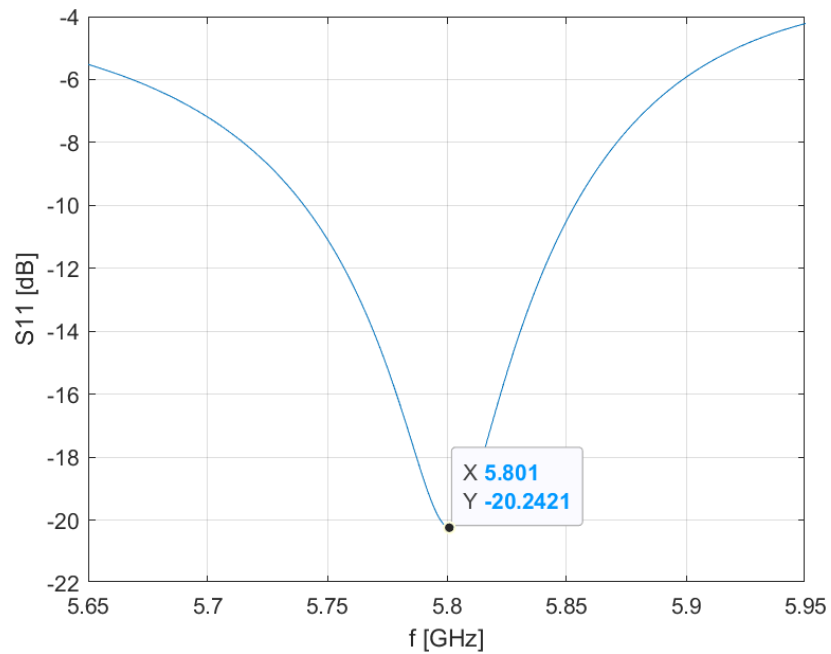


Obrázek 5.1 Namodelovaný kruhově polarizovaný dvoupásmový fliček (pohled ze shora)

5.3 Výsledky simulací



Obrázek 5.2 Závislost parametru S11 na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)

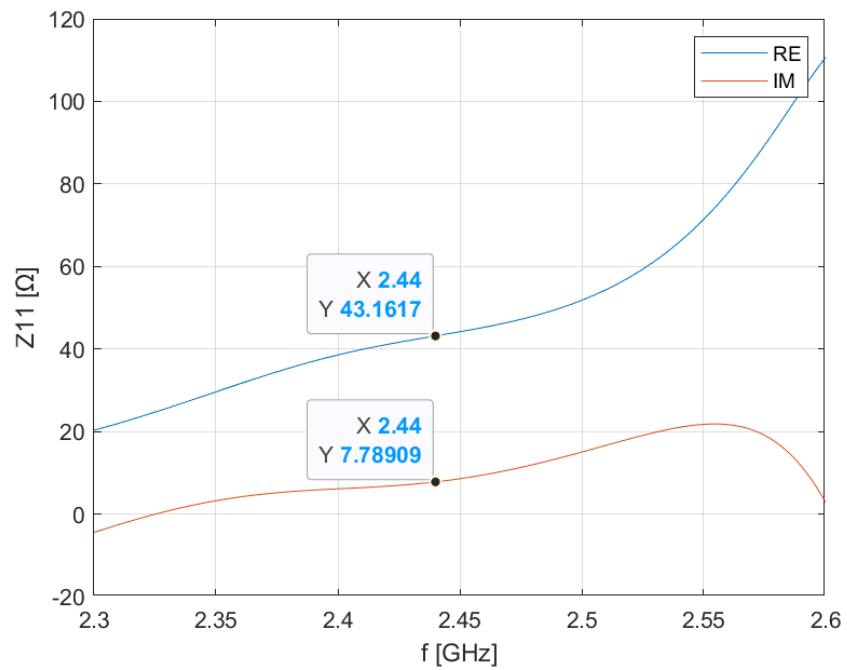


Obrázek 5.3 Závislost parametru S11 na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)

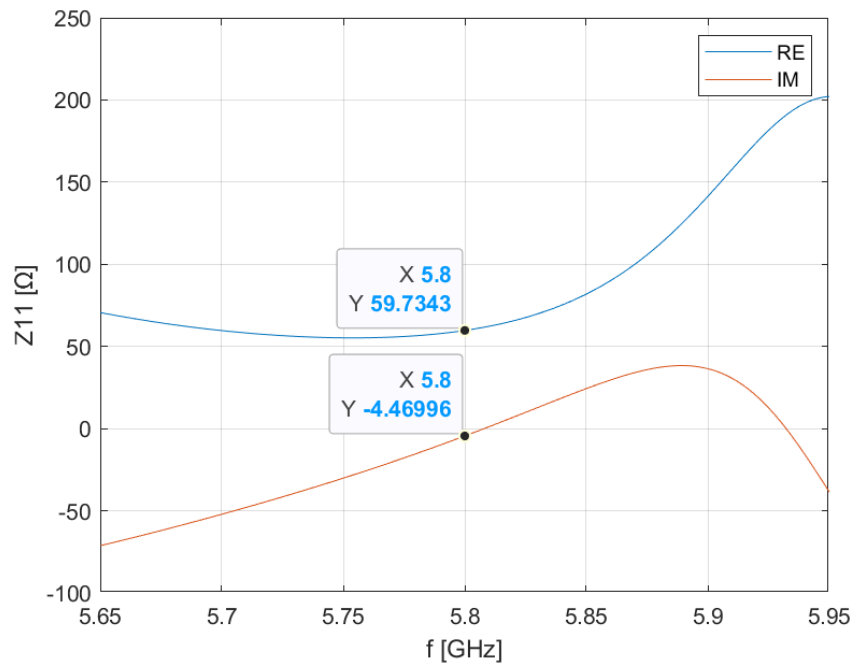
Rezonanční frekvence, na kterých chceme, aby anténa pracovala, se nastavují primárně pomocí štěrbin na zemní ploše antény. Zvyšování rezonančních frekvencí se dosáhlo snížením vnějších stran štěrbin. Vnější štěrbina má hlavní vliv na rezonanční frekvenci 5,80 GHz. Vnitřní štěrbina ovlivňuje hlavně rezonanční frekvenci 2,44 GHz. Změnou vnitřních stran štěrbin se rezonanční frekvence doladily na požadované. Vnitřní strany štěrbin ovlivňují rezonanční frekvence stejně jako vnější strany štěrbin. Rezonanční frekvence se dá doladit i změnou vzdálenosti mezi první a třetí částí flíčkového zářiče. Čím blíže k sobě obě části jsou, tím klesá hlavně nižší rezonanční frekvence.

Impedanční přizpůsobení, které je vidět na obrázcích 5.4 a 5.5, bylo ovlivňováno zejména změnou velikostí flíčkového zářiče. Zvětšením šířky druhé části flíčkového zářiče vedla ke zvýšení především imaginární části impedance na obou rezonančních frekvencích. Snižování šířky části třetí flíčkového zářiče ovlivnilo zvýšení imaginární části impedance na nižší rezonanční frekvenci. Se zvýšením šířky třetí části došlo na snížení reálné části impedančního přizpůsobení. Zkrácením druhé části flíčkového zářiče se zmenšila reálná část impedančního přizpůsobení nižší rezonanční frekvence. Prodloužení třetí části zvýšila hlavně imaginární část rezonanční frekvence 5,80 GHz. Jestliže byla první část užší, zvětšila se reálná část nižší rezonanční frekvence. Při rozšíření části jedna se zmenšila reálná část nižší rezonanční frekvence. Při prodloužení druhé části se zvýšily obě imaginární části. Oddálením třetí části od části první došlo ke snížení imaginární části nižší rezonanční frekvence. Přiblížením třetí části k první části dochází k zvýšení imaginární části nižší rezonanční frekvence. Zde jsou vypsány jen hlavní změny na impedančním přizpůsobení, ke kterým docházelo. Při změnách velikosti jakékoliv části flíčkového zářiče i velikosti štěrbin na zemní ploše docházelo k ovlivnění všech parametrů dvoupásmové antény.

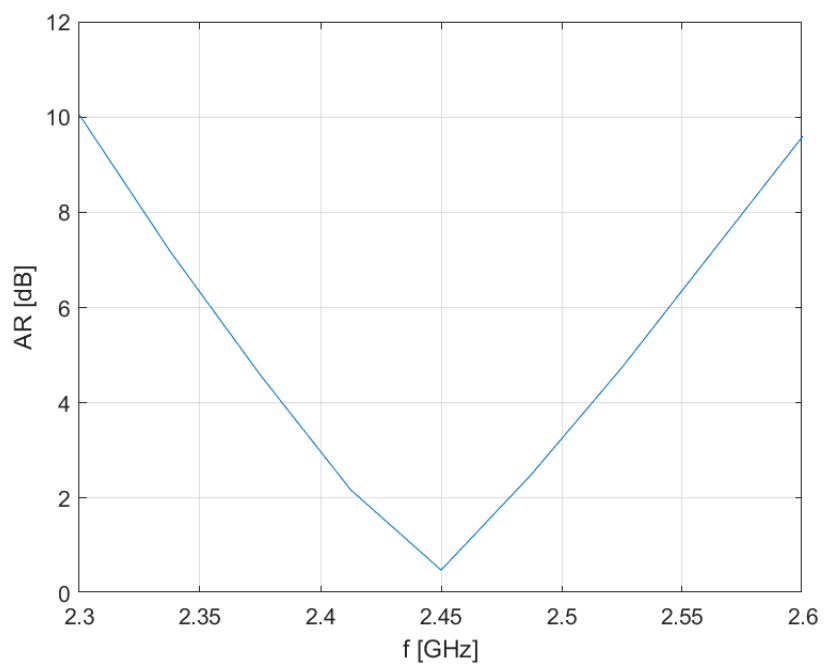
Pro dosažení dobrého osového poměru se musel udělat kompromis mezi impedančním přizpůsobením a osovým poměrem. Proto na rezonanční frekvenci 2,44 GHz není úplně ideální impedanční přizpůsobení.



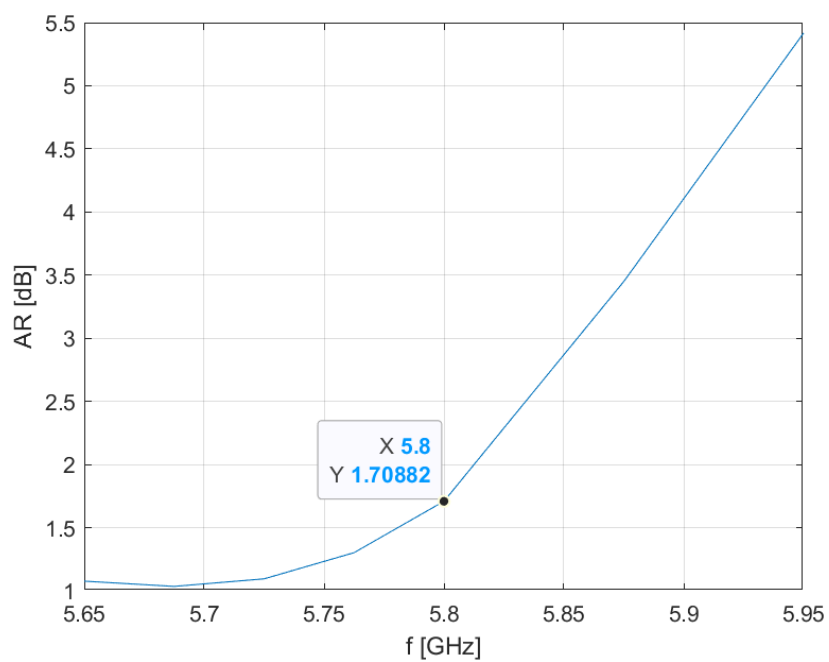
Obrázek 5.4 Závislost parametru Z_{11} na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)



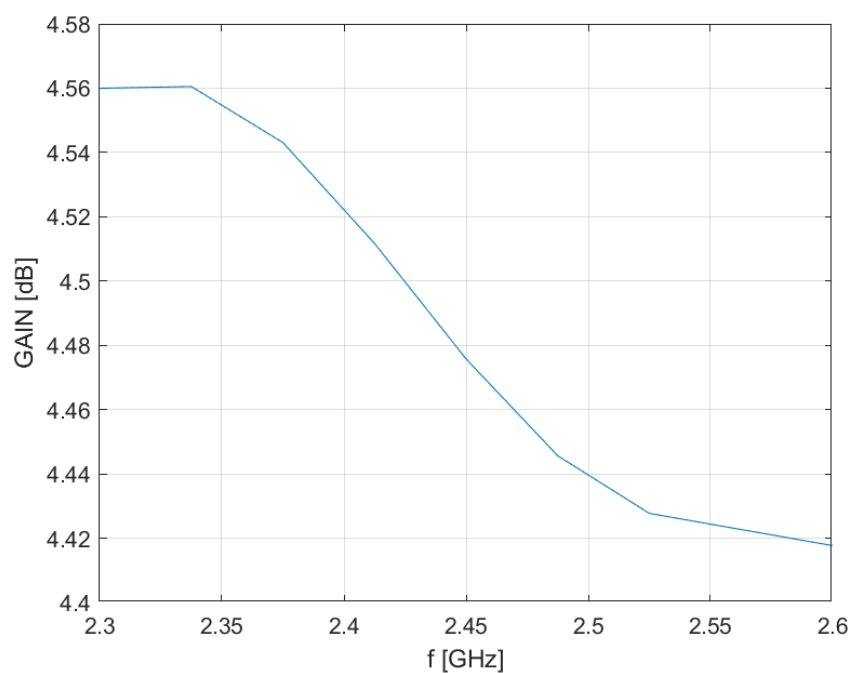
Obrázek 5.5 Závislost parametru Z_{11} na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)



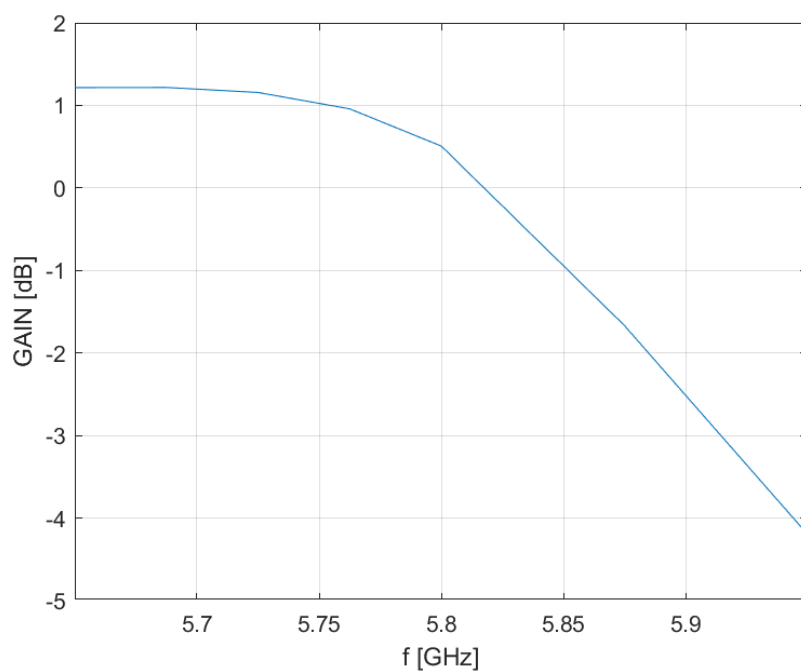
Obrázek 5.6 Závislost osového poměru na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)



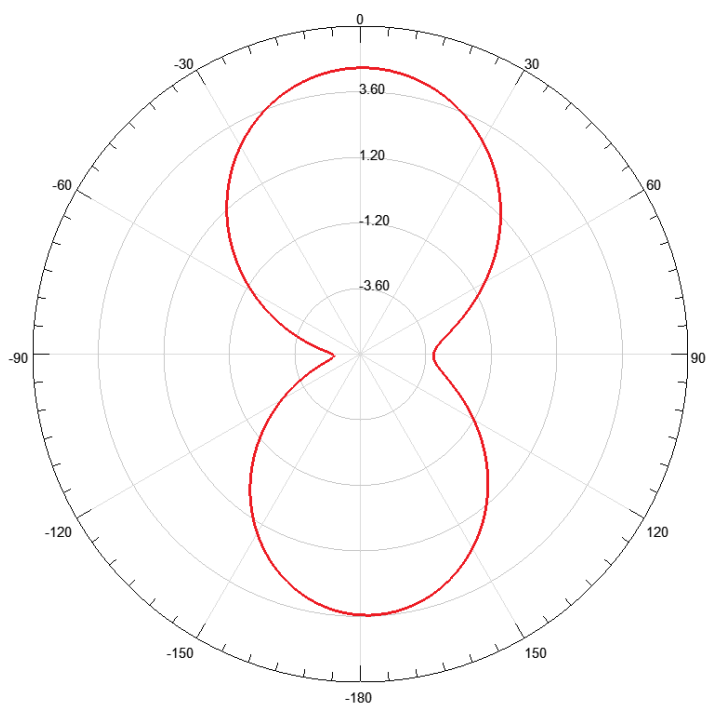
Obrázek 5.7 Závislost osového poměru na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)



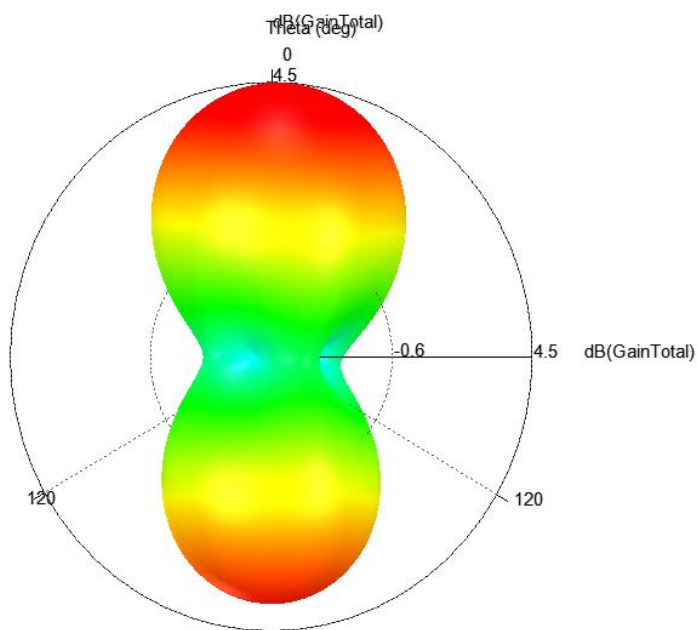
Obrázek 5.8 Závislost zisku na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)



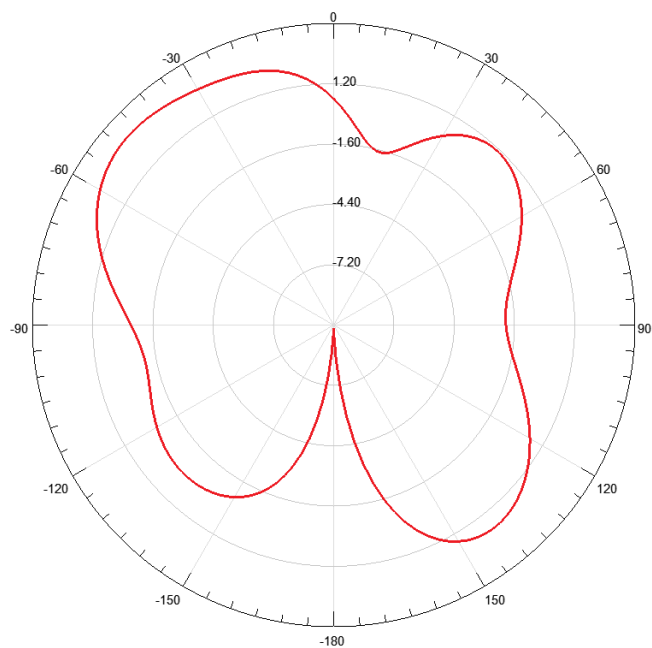
Obrázek 5.9 Závislost zisku na frekvenci pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)



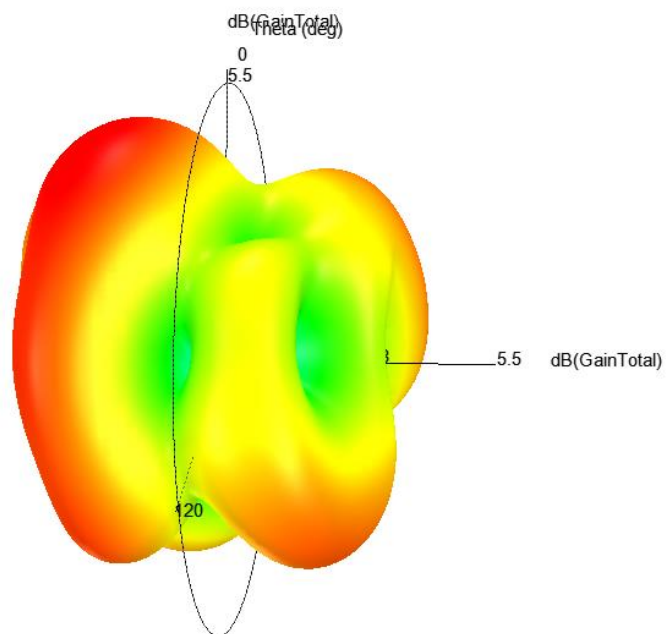
Obrázek 5.10 2D vyzářovací charakteristika pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)



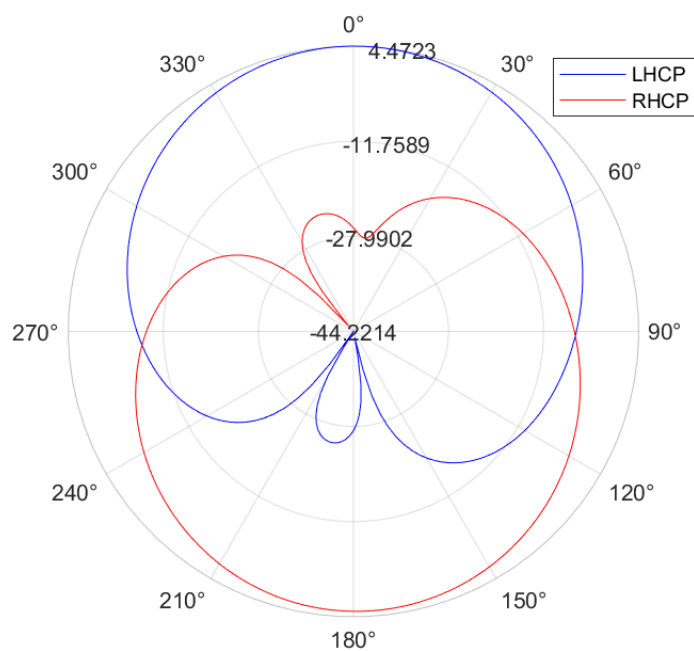
Obrázek 5.11 3D vyzářovací charakteristika pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz)



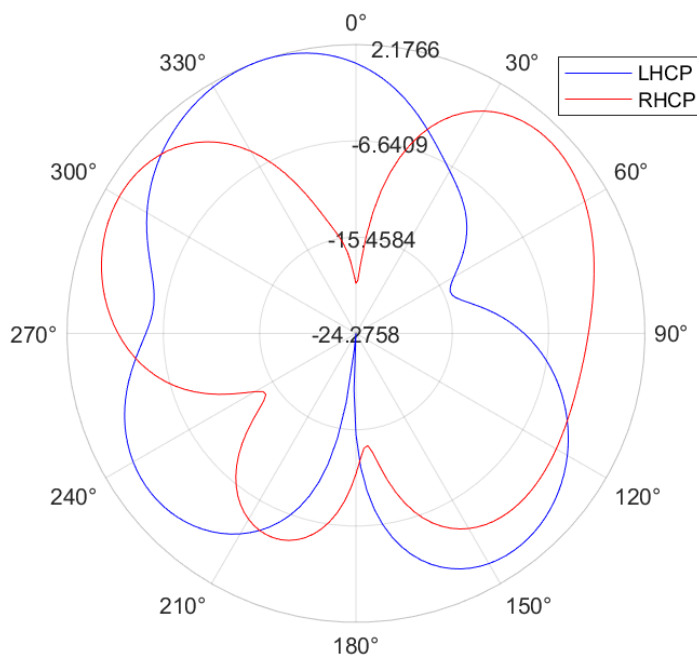
Obrázek 5.12 2D vyzářovací charakteristika pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)



Obrázek 5.13 3D vyzářovací charakteristika pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)

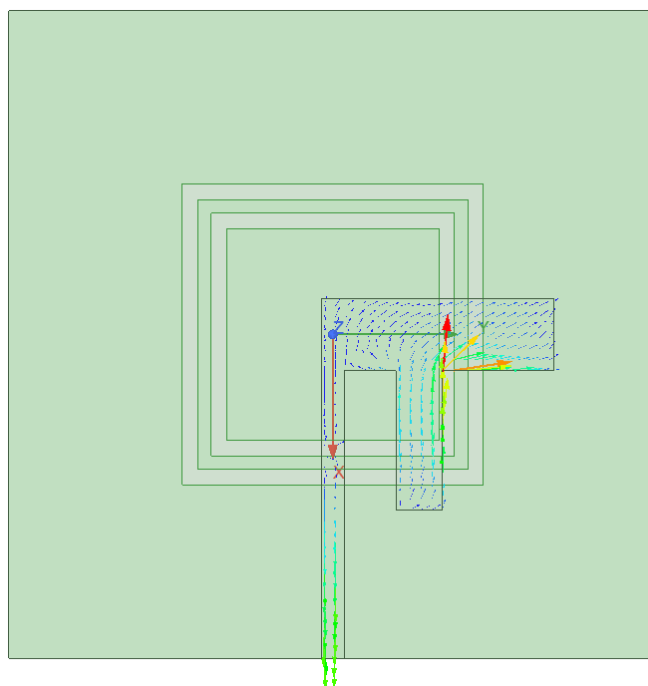


Obrázek 5.14 Vyzařovací charakteristika LHCP a RHCP ($f_r = 2.44$ GHz)

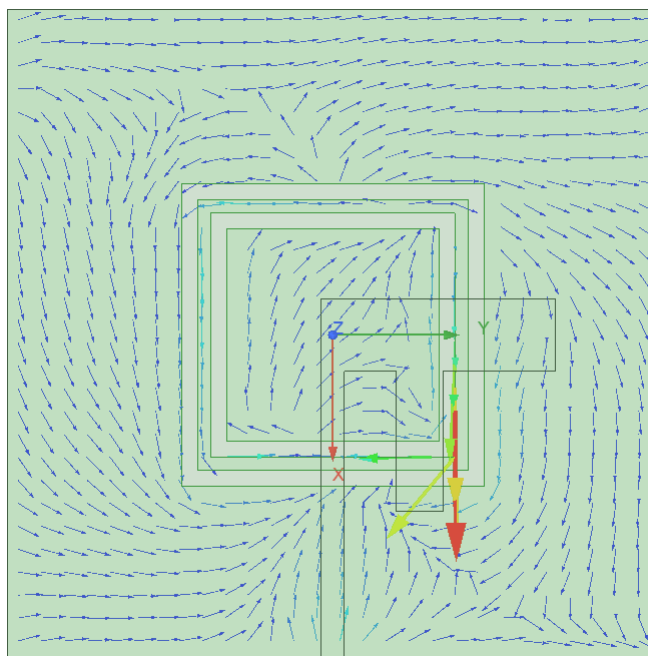


Obrázek 5.15 Vyzařovací charakteristika LHCP a RHCP ($f_r = 5,80$ GHz)

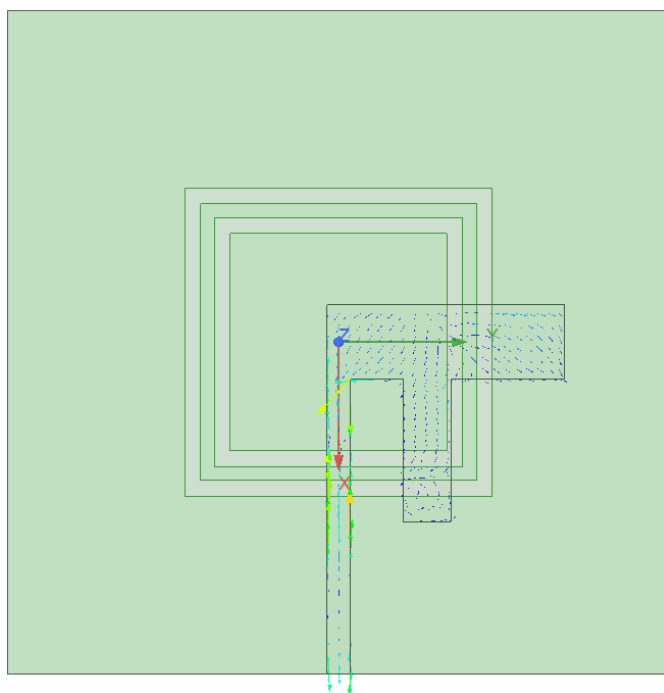
Na obrázku 5.14 a 5.15 jsou vidět vyzařovací charakteristiky LHCP a RHCP. Polarizace LHCP vyzařuje hlavně směrem od vlnovky a RHCP vyzařuje hlavně směrem od zemní plochy.



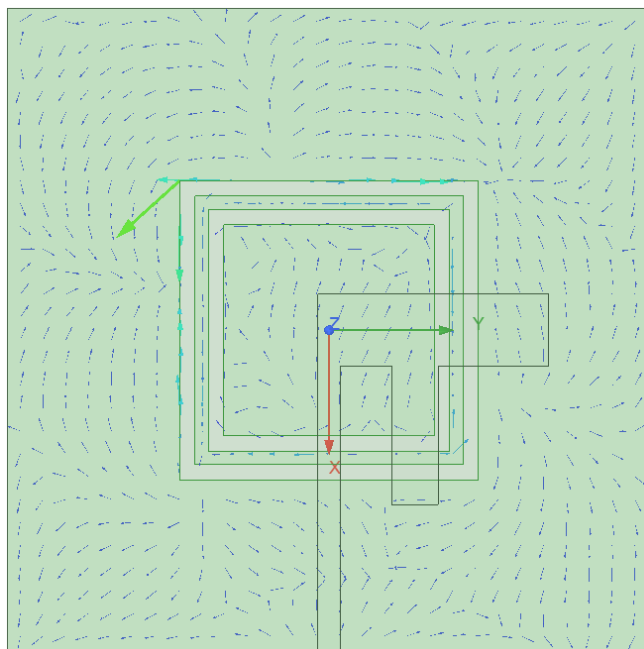
Obrázek 5.16 Rozložení proudů na flíčkovém zařiči pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz,)



Obrázek 5.17 Rozložení proudů na zemní ploše pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 2,44$ GHz,)



Obrázek 5.18 Proudové rozložení pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz)



Obrázek 5.19 Rozložení proudů na zemní ploše pro dvoupásmovou flíčkovou anténu ($f_r = 5,80$ GHz,)

6. REÁLNÉ PROVEDENÍ

6.1 Výběr antény pro reálné provedení

Pro reálné provedení antény byla vybrána dvoupásmová kruhově polarizovaná štěrbinová anténa. Důvodem této volby bylo to, že splňuje požadavky pro Bluetooth low energy, jako je rezonanční frekvence 2,44 GHz, je dobře impedančně přizpůsobena a je kruhově polarizovaná. Navíc je tato anténa ještě naladěna na rezonanční frekvenci 5,80 GHz, což představuje 5G pásmo Wi-Fi.

Pro reálné použití by se dal použít i flíček s dvoubodovým napájením, který také splňuje podmínky pro Bluetooth low energy. Nevýhodou tohoto flíčku oproti dvoupásmové štěrbinové antény je nefunkčnost na 5G pásmu Wi-Fi a při reálné realizaci by bylo zapotřebí dvou koaxiálních sond a posouvač fáze na jedné z koaxiálních sond. Proto byla zvolena jako výhodnější anténa pro realizaci dvoupásmová kruhově polarizovaná štěrbinová anténa.

6.2 Vyrobená anténa

Anténa je vyrobena na substrátu Arlon 25N s výškou 1,524 mm a relativní permitivitou 3,38. Vyrobená anténa se skládá ze dvou částí. Jedna část je zemní plocha a druhá část je flíčkový zářič. Tyto dvě části bylo zapotřebí spojit oboustrannou lepicí páskou. Dále se musela vyrobená anténa osadit konektorem. Výsledná anténa je zobrazena na obrázku 6.1 a 6.2.



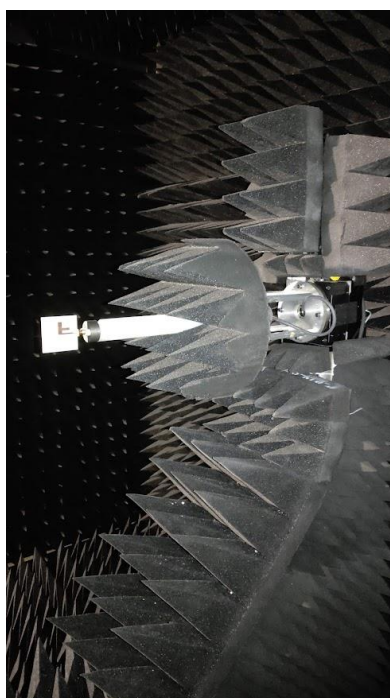
Obrázek 6.1 Vyrobená anténa (pohled na flíčkový zářič)



Obrázek 6.2 Vyrobená anténa (pohled na zemní plochu)

6.3 Měření reálné antény v anténní komoře

Reálné měření probíhalo v anténní komoře, jak je zobrazeno na obrázku 6.3. a 6.4



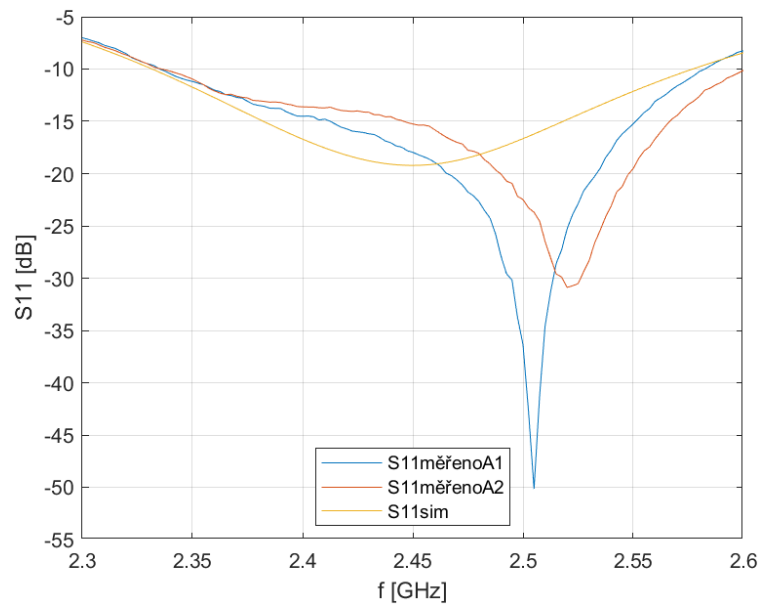
Obrázek 6.3 Měření vyzářovacích charakteristik v anténní komoře



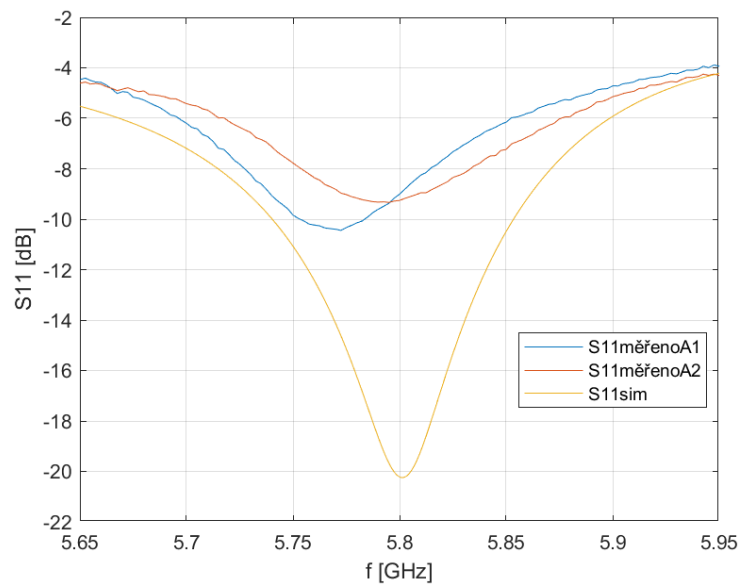
Obrázek 6.4 Měření osového poměru v anténní komoře

6.4 Výsledky měření v anténní komoře a porovnání s výsledky ze simulací

Reálné měření probíhalo na dvou vyrobených anténách, které jsou totožné. První anténa je označena pomocí A1 a druhá anténa je označena A2. Výsledky měření je porovnáváno s výsledky získanými pomocí simulací. Měření probíhalo na rezonančních frekvencích 2,44 GHz a 5,80 GHz. Na frekvenci 2,44 GHz je rozsah od 2,30 po 2,60 GHz, a na frekvenci 5,80 GHz je rozsah měření 5,65 až 5,95 GHz.

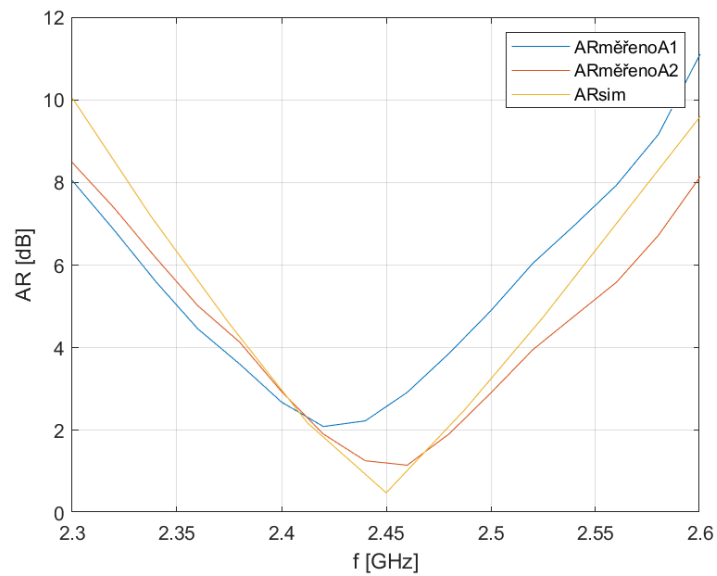


Obrázek 6.5 Porovnání výsledků pro S11 parametr na rezonanční frekvenci 2,44 GHz

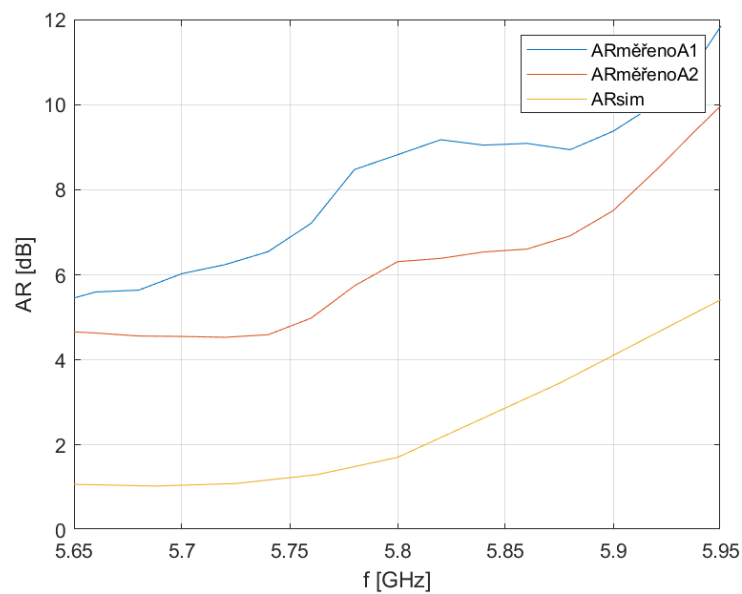


Obrázek 6.6 Porovnání výsledků pro S11 parametr na rezonanční frekvenci 5,80 GHz

Jak je vidět na obrázku 6.5 činitel odrazu pro reálné antény na rezonanční frekvenci 2,44 GHz je mírně frekvenčně posunutý, ale dosáhlo se lepšího činitele odrazu než u simulovaného modelu. Naopak mezi činitelem odrazu zobrazeném na obrázku 6.6 pro rezonanční frekvenci 5,80 GHz není téměř žádný frekvenční posun mezi měřeními antény a simulací, ale je zde horší činitel odrazu reálných antén.

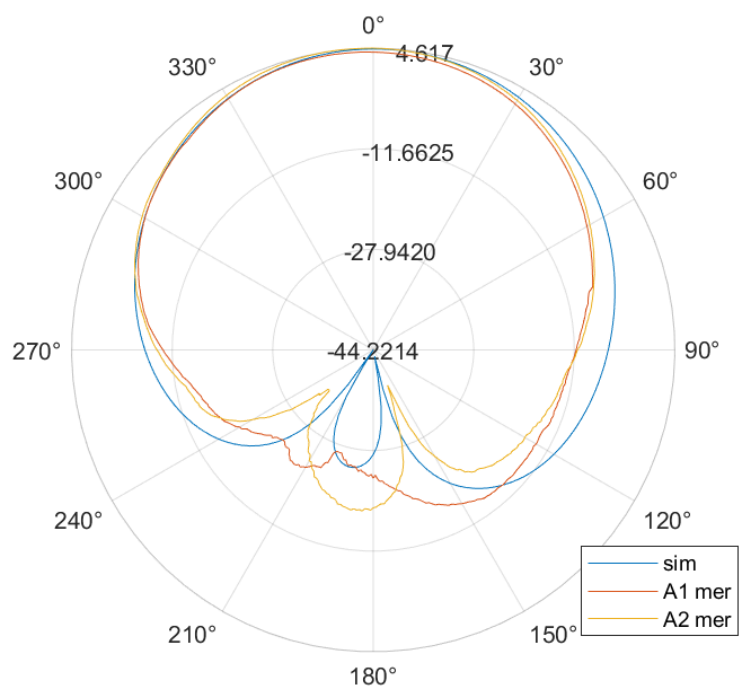


Obrázek 6.7 Porovnání výsledků osového poměru na rezonanční frekvenci 2.44 GHz

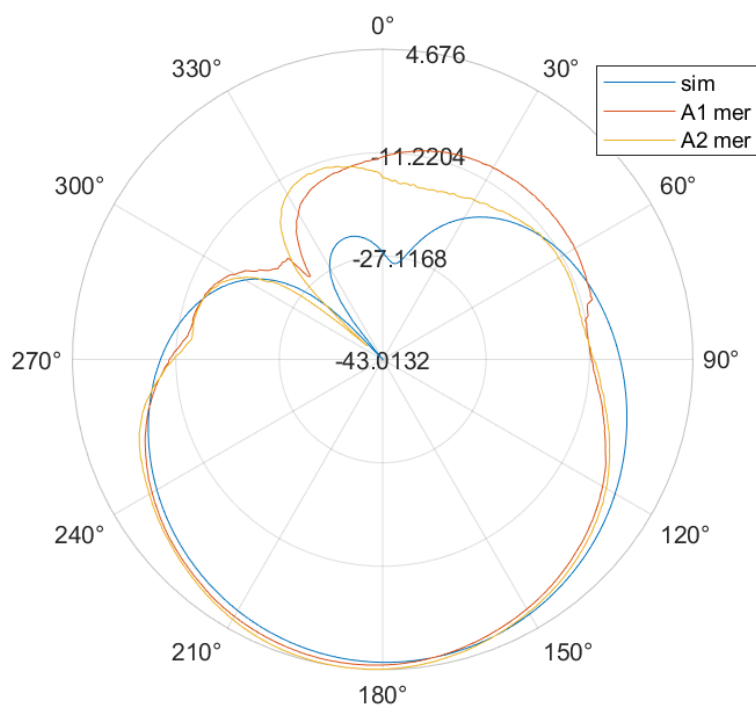


Obrázek 6.8 Porovnání výsledků osového poměru na rezonanční frekvenci 5.80 GHz

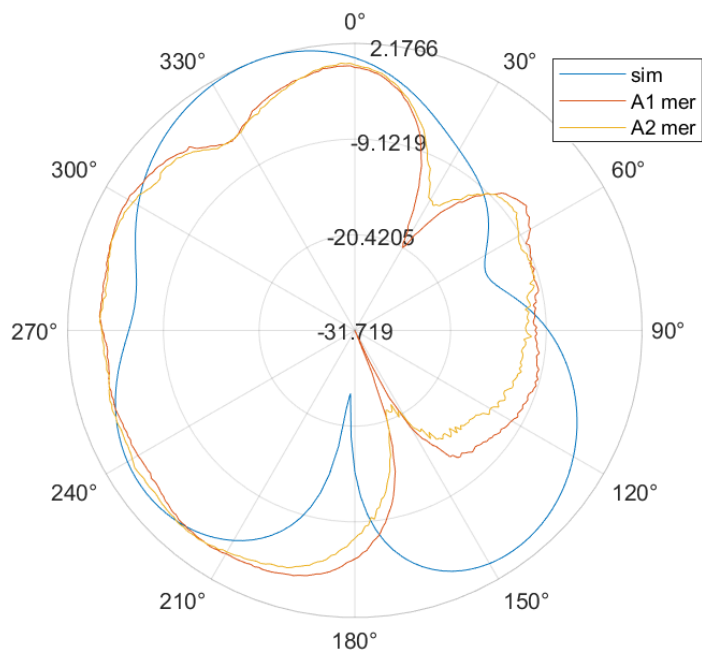
Na obrázku 6.7 je vidět, že osový poměr na rezonanční frekvenci 2,44 GHz je téměř shodný s průběhem získaným pomocí simulace. Lepšího osového poměru ale dosáhla měřená anténa A2. Osový poměr rezonanční frekvence 5,80 GHz, který je zobrazen na obrázku 6.8, je pro reálné antény příliš vysoký a už se nepodobá kruhové polarizaci.



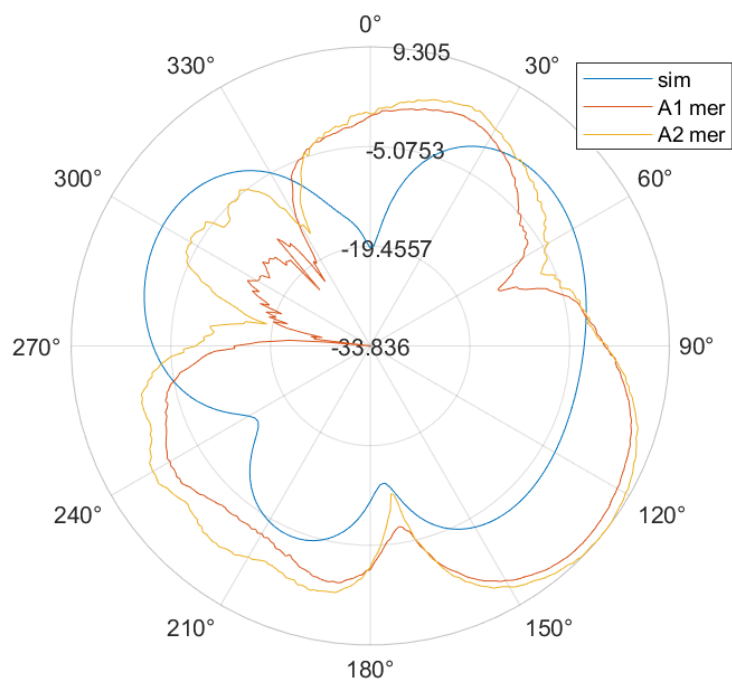
Obrázek 6.9 Porovnání výsledků vyzařovacích charakteristik LHCP pro rezonanční frekvenci 2.44 GHz



Obrázek 6.10 Porovnání výsledků vyzařovacích charakteristik RHCP pro rezonanční frekvenci 2.44 GHz



Obrázek 6.11 Porovnání výsledků vyzářovacích charakteristik LHCP pro rezonanční frekvenci 5,80 GHz

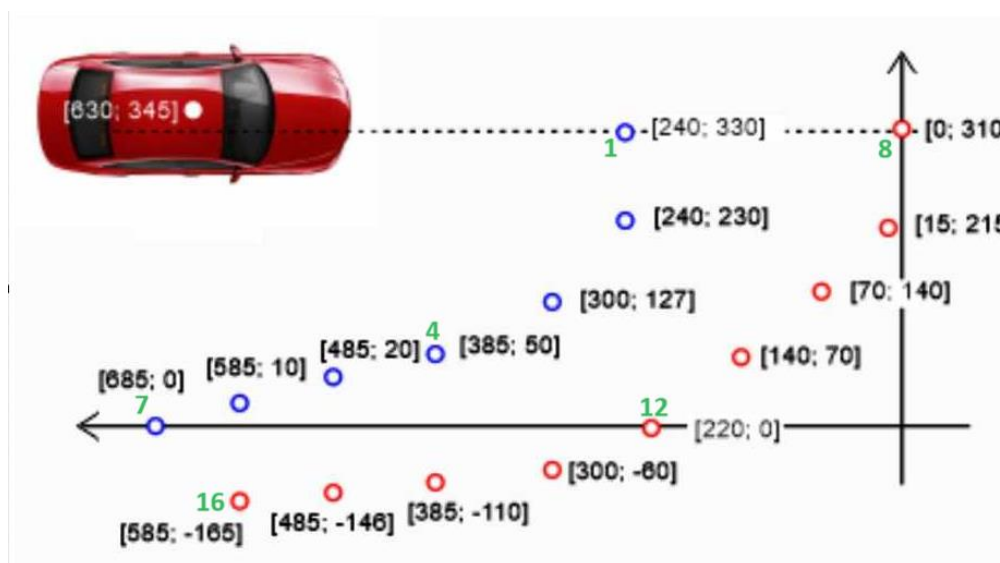


Obrázek 6.12 Porovnání výsledků vyzářovacích charakteristik RHCP pro rezonanční frekvenci 5,80 GHz

Vyzařovací charakteristika s orientací LHCP, která vyzařuje směrem od fličkového zářiče do prostoru je zobrazena na obrázku 6.9. naměřené charakteristiky jsou téměř totožně s charakteristikou simulovanou. Vyzařovací charakteristika s orientací RHCP, která je zobrazena na obrázku 6.10, je vyzařovaná od zemní plochy do volného prostoru. Charakteristiky jsou opět téměř shodné jako simulované. Na rezonanční frekvenci 5,80 GHz jsou vyzařovací charakteristiky pro LHCP zobrazené na obrázku 6.11 a pro RHCP na obrázku 6.12; oproti simulačnímu průběhu jsou utlumené.

6.5 Měření v reálném prostředí (měření vzdálenosti)

Měření probíhalo v prostorách podzemní garáže ve zkušebním automobilu Škoda Octavia. Jako první byla měřena vzdálenost mezi anténou umístěnou v automobilu a druhou anténou, která byla umístěna v různých bodech kolem automobilu. Body měření jsou zobrazeny na obrázku 6.13. Zeleně napsaná čísla na obrázku 6.13 určují pořadí měřených bodů. Příklad měření je zobrazen na obrázku 6.14. Měření v určitých bodech probíhalo různými technikami měření. Výsledky měření jsou zobrazeny na obrázku 6.16.



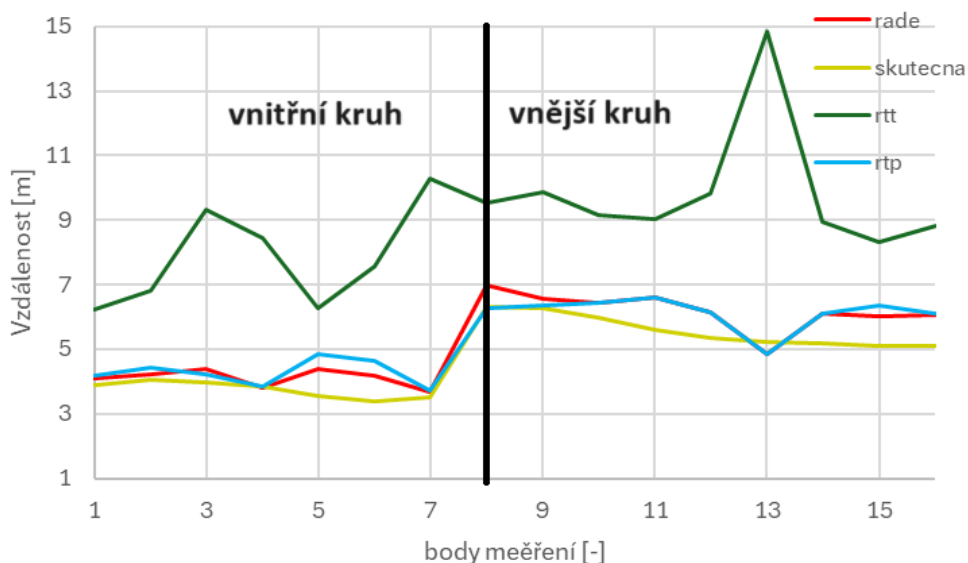
Obrázek 6.13 Rozložení bodů měření vzdálenosti vně automobilu



Obrázek 6.14 Měření vzdálenosti



Obrázek 6.15 Umístění antény uvnitř auta mezi sedadly



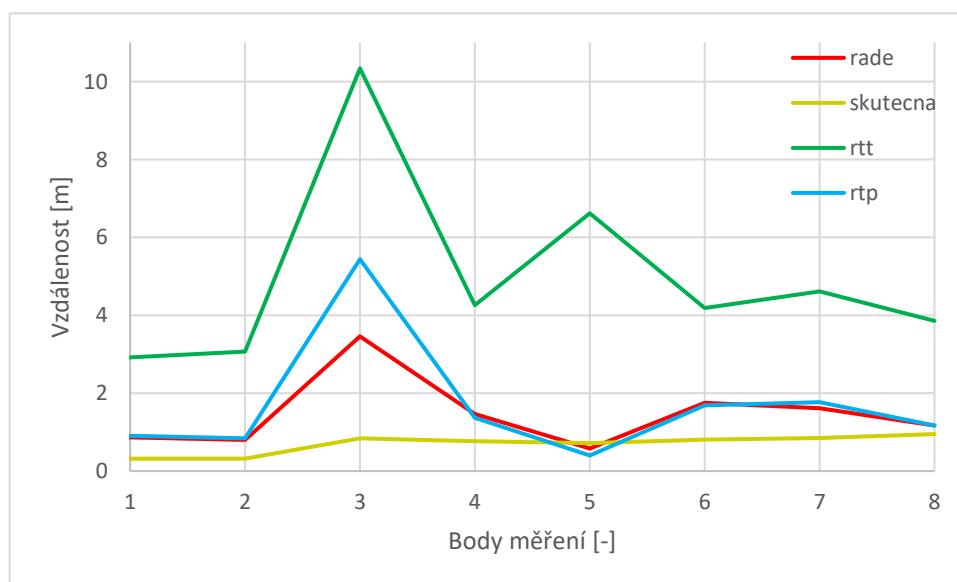
Obrázek 6.16 Porovnání změřených vzdáleností

Z obrázku 6.16 je vidět, že nejhorsí výsledky měření dosahuje metoda RTT, která je založena na časovém zpoždění přenášených paketů. Důvod nepřesnosti této metody je, že na krátkou vzdálenost se zpoždění paketů tolik neprojeví, tak jako na dlouhé vzdálenosti. Z výsledku měření je také vidět, že čím více byl bod měření na boku auta, tím je vzdálenost počítána s větší chybou. Výsledky měření metodou RTP a RADE jsou poměrně dost přesné.

Další měření bylo provedeno tak, že se obě antény nacházely uvnitř automobilu. Měření probíhalo na všech pěti sedadlech automobilu. Měření probíhalo v pořadí: 1. sedadlo spolujezdce, 2. sedadlo řidiče, 3. sedadlo za řidičem se souhlasnou polarizací, 4. sedadlo za řidičem s protichůdnou polarizací, 5. prostřední sedadlo s protichůdnou polarizací, 6. prostřední sedadlo se souhlasnou polarizací, 7. sedadlo za spolujezdcem nesouhlasnou polarizací a jako poslední sedadlo za spolujezdcem se souhlasnou polarizací. Ukázka měření v automobilu je zobrazena na obrázku 6.17. Výsledky měření jsou zobrazeny na obrázku 6.18.



Obrázek 6.17 Ukázka měření vzdálenosti uvnitř automobilu



Obrázek 6.18 Výsledky měření vzdálenosti uvnitř automobilu

Z obrázku 6.18 je vidět, že je opět nejhorší metoda měření RTT. Naopak nejlepších výsledků dosahuje metoda RADE. U měření se souhlasnou polarizací (body měření 3, 6) je menší přesnost měření.

7. ZÁVĚR

V bakalářské práci byl hlavní úkol vybrat vhodné kruhově polarizované antény, které by byly vhodné na použití pro BLE ranging. Všechny numerické modely antén byly modelovány v programu Ansys Electronics Desktop 2021 R2 v podprogramu HFFS.

V úvodní části bakalářské práce jsou popsány parametry, se kterými se potom pracuje při popisu simulovaných antén a při výsledcích simulací. Mezi tyto parametry patří vstupní impedance, činitel odrazu S_{11} , osový poměr AR, zisk, směrové charakteristiky, polarizace antény a šířka pásma.

Jako první byl vytvořen numerický model lineárně polarizovaného flíčku. U tohoto flíčku bylo zvoleno napájení pomocí mikropáskového vedení. Lineárně polarizovaný flíček s mikropáskovým vedením má na rezonanční frekvenci 2,44 GHz činitel odrazu S_{11} -48 dB. Splněna podmínka pro $S_{11} < -10$ dB je na frekvencích přibližně od 2,40 GHz po 2,48 GHz. To je pásmo, kde se pohybují také frekvence pro BLE ranging. Na rezonanční frekvenci je rovněž splněna podmínka impedančního přizpůsobení. Vyzařovací charakteristiky splňují podmínku vyzařování ve vertikálním směru od antény, a maximální zisk je téměř 6,8 dB. Tato anténa byla použita jako základ pro kruhově polarizované antény, které jsou hlavním cílem bakalářské práce.

První kruhově polarizovaná anténa, která byla modelována, je anténa s jednobodovým napájením. Jednobodové napájení bylo zvoleno jako první, protože je jednodušší než dvojbodové napájení. Jako impedanční přizpůsobení pro tuto anténu je zvolen čtvrtvlnný transformátor. Činitel odrazu S_{11} se na rezonanční frekvenci pohybuje kolem -23 dB. Zde je pracovní frekvenční pásmo, která splňuje podmínku $S_{11} < -10$ dB, na kmitočtech od 2,4 GHz do 2,5 GHz. Impedanční přizpůsobení u této antény není zcela přesně 50 Ω , ale je to stále v rámci tolerance. Oproti lineárně polarizovanému flíčku je pro kruhově polarizovaný flíček důležitý i parametr osového poměru. Hodnoty osového poměru AR <3 dB se dosáhlo na frekvencích pouze od 2,44 GHz až po 2,47 GHz. Tím není splněna podmínka, která určuje, že osový poměr má nabývat hodnot AR <3 dB v celém pracovním rozsahu frekvencí. Pro lepší hodnoty osového poměru bylo použito dvojbodové napájení.

Za účelem lepšího osového poměru v celém frekvenčním rozsahu bylo použito dvojbodové napájení. Dvojbodové napájení je řešeno pomocí dvou koaxiálních sond, kde jedna koaxiální sonda má posunutou fázi o 90°. Osový poměr při dvoubodovém napájení se v celém frekvenčním rozsahu pohybuje pod hodnotou 1 dB. Tím je splněna podmínka, která se u jednobodového napájení nedokázala splnit. Lepší výsledek byl dosažen také u činitele odrazu, kde na rezonanční frekvenci je činitel odrazu přibližně -28 dB. U impedančního přizpůsobení se dosáhlo výsledku, že impedance není na rezonanční frekvenci čistě reálná, ale je zde i malá hodnota reaktance. Tato hodnota se ale pohybuje v toleranci, aby se mohl zvolit kompromis mezi osovým poměrem a impedančním přizpůsobením.

Poslední anténa, která byla modelována a je vhodná na použití pro BLE ranging, a zároveň by mohla přijímat signál 5G pásma WiFi, je dvoupásmová flíčková anténa. Tato anténa byla publikována v literatuře [4], a následně byla modifikována na rezonanční frekvence 2,44 GHz a 5,80 GHz. Na rezonančních frekvencích se dosáhlo činitele odrazu kolem -20 dB. Anténa není úplně přesně impedančně přizpůsobena padesáti ohmům, protože se musel zvolit kompromis mezi impedančním přizpůsobením a osovým poměrem. Tato anténa má oproti dalším simulovaným modelům vyzařovací charakteristiku ve směru od flíčkového zářiče tak i od zemní plochy.

Pro reálné provedení byla použita dvoupásmová anténa, která byla navržena jako poslední, protože je naladěna na dvě pásma. Další důvod volby byl dobrý osový poměr v celém frekvenčním pásmu BLE bez použití dvou koaxiálních sond a změny fáze, které by byly pro flíček s dvoubodovým napájením potřeba.

Reálné měření probíhalo v anténní komoře, a následně proběhla zkouška funkčnosti měření vzdálenosti v okolí automobilu. U změřeného parametru S_{11} se ukázalo, že je rezonanční frekvence mírně posunuta na vyšší frekvence. Místo 2,44 GHz se naměřila rezonanční frekvence zhruba 2,50 GHz. Tento rozdíl bude dán nepřesností výroby a nepřesným slepením dvou substrátů k sobě. Hlavní důvod je použití Lumped portu v simulačním modelu, který není úplně tak přesný jako vlnový port. Důvod volby lumped portu je, že je méně náročný na nastavení parametrů. Na rezonanční frekvenci 5,80 GHz se činitel odrazu pohybuje kolem -10 dB. Tato nepřesnost může být ovlivněna nepřesným lepením dvou substrátů k sobě, protože na vyšších frekvencích je poměrně dost znát jakákoliv nepřesnost. Osový poměr a vyzařovací charakteristiky na rezonanční frekvenci 2,44 GHz se hodně podobají výsledkům získaným ze simulací. Na frekvenci 5,80 GHz jsou výsledky osového poměru nad 3 dB, což nesplňuje podmínku kruhové polarizace.

Při měření vzdálenosti se ukázalo, že anténa, která byla navržena a následně vyrobena je vhodná na použití měření vzdálenosti. Když byly antény natočeny k sobě tak, aby jejich hlavní vyzařovací laloky byly orientovány přímo proti sobě, jsou výsledky měření vzdáleností poměrně přesné. Čím více se měření odchylovalo z přímého směru, tím vznikala větší chyba, protože hlavní vyzařovací laloky už nebyly v přímé viditelnosti.

Literatura

- [1] BALANIS, C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th Edition. Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons, 2016. ISBN: 978-1-118-64206-1
- [2] Microstrip Line Calculator. Online. 2011. Dostupné z: <https://www.emtalk.com/mscalc.php>. [cit. 2023-12-14].
- [3] 132134AMPHENOL RF. Online. 2023. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/details/132134/konektory-sma-smb-smc/amphenol-rf/?brutto=1&cy=CZK&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA7OqrBhD9ARIsAK3UXh30dYYSPcF3L0vnNI1WQHzvdXpc24uOB-yJdB57H1M8lsE6s2VnUooaAvBaEALw_wcB. [cit. 2023-12-14].
- [4] W. -T. Hsieh, T. -H. Chang and J. -F. Kiang, "Dual-Band Circularly Polarized Cavity-Backed Annular Slot Antenna for GPS Receiver," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 4, pp. 2076-2080, April 2012, doi: 10.1109/TAP.2012.2186229.
- [5] *Antenna Gain*. Online. Antenna-theory.com. 2020. Dostupné z: <https://www.antenna-theory.com/basics/gain.php>. [cit. 2023-12-15].
- [6] *Channel Sounding*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/channel-sounding-cr-pr/>. [cit. 2023-12-15].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

HFFS	High Frequency Structure Simulator
BLE	Bluetooth Low Energy
CS	Channel Sounding
RHCP	Right Hand Circle Polarized
LHCP	Left Hand Circle Polarized

Symboly:

W	šířka flíčku	(m)
c	rychlost světla ve vakuu	(m/s)
f_r	rezonanční frekvence	(Hz)
ϵ_r	relativní permitivita	(-)
L	délka flíčku	(m)
ϵ_{ef}	efektivní permitivita substrátu	(-)
h	výška substrátu	(m)
R	délka zanořeného vedení	(m)
$Z_{in}(R=R)$	impedance na začátku zanořeného vedení	(Ω)
$Z_{in}(R=0)$	impedance na okraji flíčku	(Ω)
λ	vlnová délka	(m)
Z_t	impedance čtvrtvlnného transformačního vedení	(Ω)
Z_0	impedance mikropáskového vedení	(Ω)
Z_a	impedance na kraji flíčkového zářiče	(Ω)