

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole
Obor: Radiové systémy



Mikrovlnný senzor pro měření vzdálenosti

Microwave Sensor for Distance Measurements

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Ladislav Knotek
Vedoucí práce: prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc.
Rok: 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Knotek** Jméno: **Ladislav** Osobní číslo: **439569**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Rádiové komunikace a systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Mikrovlnný senzor pro měření vzdálenosti

Název diplomové práce anglicky:

Microwave Sensor for Distance Measurements

Pokyny pro vypracování:

Analyzujte možnosti realizace antény mikrovlnného senzoru pro měření vzdálenosti na základě otevřeného ústí vlnovodu R100 s ohledem na tvar ekvifázové plochy vyzařovací charakteristiky. Cílem je nalézt takové konstrukční řešení, které by v maximální míře kompenzovalo změnu měřené fáze koeficientu odrazu, resp. vzdálenosti odrazné plochy, při jejím odchýlení od polohy kolmé k ose antény. Uvažujte vzdálenost odrazné plochy v intervalu 80 mm až 160 mm od ústí vlnovodu. Nejlepší nalezené řešení realizujte a experimentálně ověřte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Karel Hoffmann, Zbyněk Škvor, „New method suitable for relative short distance measurement,“ Proceedings of the 40th European Microwave Conference, 28-30 September 2010, Paris, France, pp. 1524-1527.
- [2] Jan Kracek, Milan Svanda, Karel Hoffmann, „Scalar Method for Reading of Chipless RFID Tags Based on Limited Ground Plane Backed Dipole Resonator Array,“ IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2019, Early Access Article.
- [3] Karel Hoffmann, Zbyněk Škvor, „Bezkontaktní mikrovlnný měřič vzdáleností od reflexního povrchu v rozmezí 1/4 vlnové délky až několikanásobek vlnové délky,“ Patent č. 308033, Úřad průmyslového vlastnictví, 2019.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.09.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2022**

prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....
Bc. Ladislav Knotek

Poděkování

Děkuji vedoucímu své diplomové práce, panu prof. Ing. Karlu Hoffmannovi, CSc., za jeho podnětné rady a směřování v celém průběhu tvorby této práce a za jeho čas věnovaný konzultacím. Dále děkuji své rodině za trpělivost, lásku a podporu při studiu.

Bc. Ladislav Knotek

Název práce:

Mikrovlnný senzor pro měření vzdálenosti

Autor: Bc. Ladislav Knotek

Studijní program: Elektronika a komunikace

Obor: Radiové systémy

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc.
Katedra elektromagnetického pole

Abstrakt: V této diplomové práci jsou mapovány vlastnosti dielektrických čoček, které jsou svým rozměrem podobné použité vlnové délce. Čočky jsou simulovány ve 3D simulátoru elektromagnetického pole. Hlavním kritériem, které je zde zkoumáno, je natvarování vyzařované ekvifázové vlnoplochy při umístění čočky blízko k ústí vyzařovací antény. Cílem je vytvořit takovou čočku, která by kompenzovala chybu při interferenčním měření vzdálenosti, ke které dochází při vyosení měřeného objektu. Na začátku je proveden stručný teoretický rozbor, který vysvětluje problematiku. Střední část postupně ukazuje simulované čočky a související poznatky. V závěru práce je provedeno experimentální měření, které prověří funkčnost vybraných dielektrických čoček.

Klíčová slova: čočka, interferometrie, ekvifáze, vlnoplocha

Title:

Microwave Sensor for Distance Measurements

Author: Bc. Ladislav Knotek

Abstract: This diploma thesis is mapping the behavior of dielectric lenses, which are similar in size to the wavelength used. The lenses are simulated in a 3D electromagnetic field simulator. The main criteria examined here is the shaping of the radiated equiphase wavefront when the lens is placed close to the mouth of the radiating antenna. The aim is to create a lens that would compensate for the error in the interference distance measurement that occurs when the measured object is misaligned. At the beginning, a brief theoretical analysis is performed, which explains the issue. The middle part gradually shows the simulated lenses and related findings. At the end of the work, an experimental measurement is performed, which verifies the functionality of selected dielectric lenses.

Key words: lens, interferometry, equiphase, wavefront

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xiii
Úvod	1
1 Teoretický rozbor	3
1.1 Důležité parametry	3
1.2 Interferenční měření vzdálenosti	4
1.3 Měřicí soustava	4
1.4 Odraz od měřeného plechu	6
1.5 Teoretická chyba měření	7
1.6 Dielektrická čočka	8
1.6.1 Antireflexní vrstva	10
2 Simulace a analýza čoček	11
2.1 Požadované vlastnosti struktury	11
2.2 Pojetí simulací a zjednodušení	13
2.2.1 Realizace antireflexní vrstvy	13
2.3 Zpracování dat ze simulací	14
2.3.1 Ukázka zpracování dat ze simulace konkrétní čočky	15
2.4 Simulace bez čočky a eliminace simulační chyby	18
2.5 Typy mapovaných čoček	20
2.6 První průzkum - čočka tvaru kulové úseče	21
2.6.1 Vliv velikosti podstavy čočky	22
2.6.2 Vliv výšky čočky	23
2.6.3 Vliv polohy čočky	24
2.6.4 Vliv permitivity čočky	25
2.6.5 Shrnutí a rozbor výsledků	25
2.7 Oboustranná čočka tvaru kulové úseče	28
2.7.1 Vliv velikosti podstavy čočky	29
2.7.2 Vliv výšky čočky	29
2.7.3 Vliv polohy čočky	30
2.7.4 Vliv permitivity čočky	31
2.7.5 Shrnutí a rozbor výsledků	31
2.8 Oboustranná čočka tvaru paraboloidu	32
2.8.1 Vliv poloměru podstavy čočky	33
2.8.2 Vliv výšky čočky	34
2.8.3 Shrnutí a rozbor výsledků	35
2.9 Kombinovaná čočka	36
2.10 Čočka tvaru kužele	37
2.10.1 Vliv výšky kulového vrchlíku	37
2.10.2 Vliv náklonu stěn čočky	38

2.10.3	Válcová čočka	40
2.10.4	Vliv velikosti permitivity	42
2.11	Shrnutí a rozbor všech čoček	43
2.11.1	Porovnání nejlepších čoček	43
2.11.2	Diskuze vlivu permitivity	44
2.11.3	Další aspekty čoček ovlivňující měření	46
3	Experimentální měření	50
3.1	Měření permitivity použitého materiálu	50
3.2	Výběr čočky pro měření	52
3.3	Popis měřicí aparatury a kalibrace	53
3.4	Výsledky měření	55
3.5	Shrnutí a rozbor výsledků měření	61
	Závěr	63
	Literatura	65
	Přílohy	66
A	Manuál pro zobrazovací aplikaci	66
A.1	Typ zobrazení	68
B	Ukázka skriptu aproximujícího ekvifázové křivky	72
C	Tabulky prozkoumaných čoček	73

Seznam obrázků

1.1	Princip interferenčního měření.	4
1.2	Měřicí soustava.	5
1.3	Buzení soustavy vlnovodů sudým a lichým videm.	5
1.4	Zrcadlení antény na vodivé rovině.	6
1.5	Zrcadlení antény při náklonu plechu.	7
1.6	Opoždění reálné ekvifázové plochy.	8
1.7	Teretická chyba měření v závislosti na vzdálenosti a natočení plechu.	8
1.8	Měřicí soustava s optimální čočkou při natočení plechu.	9
1.9	Příklad efektu čočky dle paprskového modelu.	9
2.1	Základní parametry struktury.	12
2.2	Umístění měřicí antény v kartézských souřadnicích.	13
2.3	Příklad čočky s drážkovanou a homogenní antireflexní vrstvou.	14
2.4	Antireflexní vrstva, řez rovinou $y = 0$	14
2.5	Určování poloměru ekvifázové vlnoplochy v místě zrcadlové čočky.	15
2.6	Oboustranná čočka tvaru kulové úseče.	16
2.7	Příklad aproximace ekvifázových křivek.	16
2.8	Zakřivení ekvifázových křivek a poloha jejich středů v závislosti na poloze plechu.	17
2.9	Řez rovinou $y = 0$, zakřivení ekvifáze u zrcadlové čočky pro $l = 135\text{mm}$	17
2.10	Poloha středu ekvifáze s na ose z dle polohy plechu l pro $\alpha_{max} = 6^\circ$, $f = 10\text{GHz}$	18
2.11	Simulované a aproximované ekvifáze pro $\alpha_{max} = 6^\circ$, $f = 10\text{GHz}$	19
2.12	Poloha středu ekvifáze s na ose z dle polohy plechu l pro různá nastavení.	20
2.13	Čočka tvaru kulové úseče.	20
2.14	Profily čoček tvaru kulové úseče a paraboly.	21
2.15	Profily čoček tvaru kužele a kombinované čočky.	21
2.16	Profil čočky tvaru kulové úseče, parametrický popis.	21
2.17	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 60, u = 20$ s různou výškou v , $f = 10\text{GHz}$	22
2.18	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 60, v = 35$ s různou výškou v , $f = 10\text{GHz}$	23
2.19	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $v = 35, u = 25$ v různých polohách plechu h , $f = 10\text{GHz}$	24
2.20	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky s $h = 60, v = 35, u = 25$ s různou permitivitou, $f = 10\text{GHz}$	25
2.21	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočku s $h = 60, v = 35, u = 25, \epsilon_r = 25, f = 10\text{GHz}$	26

2.22	Průběh ekvifázových vlnoploch z CST a aproximační kružnice pro čočku s $h = 60$, $v = 35$, $u = 25$, $\varepsilon_r = 25$, $f = 10\text{GHz}$	26
2.23	Poloha středu ekvifáze v závislosti na jednotlivých parametrech čočky pro vzdálenost plechu $l = 135$, $f = 10\text{GHz}$	27
2.24	Čočka s $h = 60\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 20\text{mm}$, $\varepsilon_r = 25$, ekvifáze u zrcadlové čočky pro $l = 135\text{mm}$, pohled na rovinu H, $f = 10\text{GHz}$	28
2.25	Profil oboustranné čočky tvaru kulové úseče, parametrický popis.	28
2.26	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 80$, $u = 25$, $\varepsilon_r = 2,52$ s různým poloměrem podstavu v , $f = 10\text{GHz}$	29
2.27	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 80$, $v = 25$, $\varepsilon_r = 2,52$ pro různé poloměry podstavu u	30
2.28	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 80$, $v = 25$, $\varepsilon_r = 2,52$ pro různé poloměry podstavu u , $f = 10\text{GHz}$, $f = 10\text{GHz}$	30
2.29	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 80$, $v = 25$, $\varepsilon_r = 2,52$ pro různé poloměry podstavu u , $f = 10\text{GHz}$	31
2.30	Poloha středu ekvifáze v závislosti na jednotlivých parametrech čočky pro vzdálenost plechu $l = 135$, $f = 10\text{GHz}$	32
2.31	Profil čočky tvaru paraboloidu, parametrický popis.	33
2.32	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro parabolické čočky s $h = 80\text{mm}$, $u = 25$, $\varepsilon_r = 2,52$ s různými poloměry podstavu v , $f = 10\text{GHz}$	33
2.33	Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro parabolické čočky s $h = 80\text{mm}$, $u = 25$, $\varepsilon_r = 2,52$ s různými poloměry podstavu v , $f = 10\text{GHz}$	34
2.34	Poloha středu ekvifáze v závislosti na parametrech u a v pro vzdálenost plechu $l = 135$	35
2.35	Čočka s $h = 90\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\varepsilon_r = 25$, ekvifáze u zrcadlové čočky pro $l = 135\text{mm}$, pohled na rovinu H, $f = 10\text{GHz}$	35
2.36	Profil kombinované čočky, parametrický popis.	36
2.37	Průběh polohy ekvifázového středu dle polohy plechu l pro nejlepší kombinovanou a parabolickou čočku, $f = 10\text{GHz}$	36
2.38	Profil čočky tvaru kužele, parametrický popis.	37
2.39	Průběh polohy ekvifázového středu podle polohy plechu l pro čočku s $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\varepsilon_r = 2,52$, $v_2 = 10\text{mm}$, $f = 10\text{GHz}$	38
2.40	Profily čóček tvaru kužele s $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $u_k = 0\text{mm}$ s krajními zkoumanými hodnotami v_2	38
2.41	Průběh polohy ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro čočku s $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\varepsilon_r = 25$, $u_k = 0\text{mm}$ pro různé hodnoty v_2	39
2.42	Průběh polohy ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro čočku s $h = 90$, $u = 20$, $\varepsilon_r = 2,52$, $u_k = 0\text{mm}$ pro různé hodnoty v , $f = 10\text{GHz}$	39
2.43	Čočka tvaru kužele s parametry $v = 15\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $e = 25$, $v_2 = 20\text{mm}$, $u_k = 0\text{mm}$, $f = 10\text{GHz}$	40
2.44	Profil válcové čočky, parametrický popis.	40

2.45	Poloha ekvifázového středu pro válcovou čočku s parametry $h = 90\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $varepsilon_r = 2,52$ pro různé poloměry podstavy v , $f = 10\text{G}$	41
2.46	Poloha středu ekvifáze v závislosti na velikosti poloměru podstavy čočky v pro různé výšky čočky u , $f = 10\text{GHz}$	41
2.47	Poloha středu ekvifáze s_z podle polohy plechu l pro válcovou čočku s parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 18\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$ pro různé permitivity, $f = 10\text{GHz}$	42
2.48	Poloha středu ekvifáze v závislosti na parametrech u a v pro vzdálenost plechu $l = 135$, $f = 10\text{GHz}$	42
2.49	Poloha ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro nejlepší nalezené čočky od každého typu, $f = 10\text{GHz}$	43
2.50	Porovnání vyzařovaných ekvifázových vlnoploch pro nejlepší motýlí čočku a čočku tvaru paraboloidu, $f = 10\text{GHz}$	44
2.51	Poloha středu ekvifází s_z pro parabolickou čočku s $h = 70\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 25\text{mm}$ pro různé hodnoty ϵ_r	45
2.52	Vyzařované ekvifázové vlnoplochy s použitím parabolické čočky s parametry $h = 70\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 25\text{mm}$ pro různé permitivity, $f = 10\text{GHz}$	46
2.53	Profil vybrané válcové čočky a čočky tvaru kulové úseče.	46
2.54	Absolutní hodnota vyzařovaného elektrického pole v dB pro čočku tvaru válce s parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\epsilon_r = 2,52$ na různých frekvencích.	47
2.55	Absolutní hodnota vyzařovaného elektrického pole v dB pro oboustrannou čočku tvaru kulové úseče s parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 35\text{mm}$, $u = 20\text{mm}$, $\epsilon_r = 2,52$ na různých frekvencích.	47
2.56	Poloha ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro čočku tvaru kulové úseče na různých frekvencích	48
2.57	Poloha ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro čočku tvaru válce na různých frekvencích.	48
2.58	Poloha ekvifázového středu s_z při poloze plechu $l = 135\text{mm}$ pro zkoumané čočky.	49
3.1	Měření permitivity - schema v AWR.	51
3.2	Měření permitivity - shoda naměřených a simulovaných S-parametrů.	51
3.3	Profily čoček vybraných na tisk.	52
3.4	Modely čoček poslané do tisku.	52
3.5	Čočka vzniklá kombinací válce s kulovým vrchlíkem a kulové úseče.	53
3.6	Měřicí sestava.	54
3.7	Soustava měřících vlnovodů obklopená absorbním materiálem a přidaná čočka.	54
3.8	Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem pro vzdálenost plechu $l = 115\text{mm}$	56
3.9	Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem pro vzdálenost plechu $l = 135\text{mm}$	56
3.10	Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem pro vzdálenost plechu $l = 155\text{mm}$	57
3.11	Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce pro vzdálenost plechu $l = 115\text{mm}$	58
3.12	Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce pro vzdálenost plechu $l = 135\text{mm}$	58

3.13	Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce pro vzdálenost plechu $l = 155mm$. . .	59
3.14	Přenosy S_{21} s kombinovanou čočkou pro vzdálenost plechu $l = 115mm$. 60	60
3.15	Přenosy S_{21} s kombinovanou čočkou pro vzdálenost plechu $l = 135mm$. 60	60
3.16	Přenosy S_{21} s kombinovanou čočkou pro vzdálenost plechu $l = 155mm$. 61	61
17	Náhled na okno zobrazovací aplikace s popisem jednotlivých částí. . .	66
18	Detail náhledu aplikace pro výběr základní prohlížené čočky.	67
19	Volba pomlčky u příkladu čočky parabolického typu.	68
20	Volba typu zobrazení.	68
21	Příklad zobrazení při volbě rovina xz	69
22	Příklad zobrazení několika <i>druhých průběhů</i> pro průběh poloměrů ekvifáze podle polohy plechu.	70
23	Tabulka prozkoumaných čoček v aplikaci pro parabolické čočky s $u = 25mm$	70

Seznam tabulek

2.1	Tabulka elektrických délek pro různé permitivity čočky s $u = 25\text{mm}$. . .	45
3.1	Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 115\text{mm}$ s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem.	56
3.2	Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 135\text{mm}$ s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem.	57
3.3	Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 155\text{mm}$ s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem.	57
3.4	Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 115\text{mm}$ s čočkou tvaru válce.	58
3.5	Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 135\text{mm}$ s čočkou tvaru válce.	59
3.6	Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 155\text{mm}$ s čočkou tvaru válce.	59
3.7	Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 115\text{mm}$ s kombinovanou čočkou tvaru kulové úseče a válce s kulovým vrchlíkem.	60
3.8	Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 135\text{mm}$ s kombinovanou čočkou tvaru kulové úseče a válce s kulovým vrchlíkem.	61
3.9	Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 155\text{mm}$ s kombinovanou čočkou tvaru kulové úseče a válce s kulovým vrchlíkem.	61
3.10	Shrnutí průměrných výsledků všech měření.	62
11	Prozkoumané čočky kombinovaného typu	66
12	Prozkoumané čočky tvaru oboustranné kulové úseče	74
13	Prozkoumané čočky tvaru paraboloidu	75
14	Prozkoumané čočky tvaru kužele první část (bez čoček motýlího typu a bez válcových čoček)	76
15	Prozkoumané čočky tvaru kužele druhá část (bez čoček motýlího typu a bez válcových čoček)	77
16	Prozkoumané čočky tvaru válce první část	78
17	Prozkoumané čočky tvaru válce druhá část	79
18	Prozkoumané motýlí čočky	79

Úvod

Elektronické měření vzdálenosti má mnoho různých podob. Různé metody jsou rozebírány v [4]. Mezi nejznámější patří například pulsní radar, který vzdálenost počítá podle doby návratu vyslaného pulzu. Nový typ měření vzdálenosti interferometrickou metodou za použití mikrovln v X-pásmu představují Hoffmann a Škvor v článku [8]. Princip spočívá v interferenci dvou koherentních signálů, z nichž jeden je vyslán anténou do volného prostoru a odražen od vodivé desky zpět. Druhý je referenční. Interferenční průběh tak bude závislý na vzdálenosti odrazné desky. Pokud má odražený, neboli testovací signál podobnou amplitudu jako referenční, budou interferenční minima hluboká a měření bude velmi přesné. Autoři přislíbují mikronové až submikronové rozlišení. Zároveň jsou náklady na zprovoznění takového senzoru relativně nízké. Princip je dále rozebírán také v [6].

Myšlenka je dále rozvinuta v článku [7], kde je aplikována na měření tloušťky plechu a sensor zde také vidí do větší vzdálenosti. Princip spočívá v tom, že testovací signál se odrazí nejprve od jedné a pak od druhé strany plechu. Při známé vzdálenosti vysílacích antén pak lze určit jeho tloušťku.

V této práci uvažujeme podobný princip měření tloušťky plechu, při kterém je však na každé jeho straně nezávislý sensor sestávající se z přijímacího a vysílacího vlnovodu R100. Referenční a testovací signál již nejsou rozděleny pomocí směrové odbočnice, nýbrž vznikají až ve volném prostoru. Referenční signál je pak reprezentován přímým přeslechem mezi vlnovody.

V praxi se při vývoji tohoto senzoru narazilo na mnohá úskalí, která do měření vnášejí nepřesnosti. Jedním z nich je vyosení plechu z osy vyzařování, které způsobí, že sensor vidí plech blíže, než je ve skutečnosti. Signál se tedy vrací dřívější fází, než by měl. Pokud by však měla anténa vhodnou vyzařovací charakteristiku, co do zakřivení ekvifázové vlnoplochy, mohla by tak vadný odraz při vychýlení plechu kompenzovat.

Motivací pro tuto práci je zachovat vysokou přesnost tohoto interferometrického senzoru při vychýlení plechu, za použití vhodné dielektrické čočky. Čočka by měla vyzařovanou vlnoplochu vhodným způsobem zakřivit, aby se i při náklonu plechu vracela do senzoru stejná fáze. Představa problému a funkce optimální čočky je popsána v kapitole 1.4, 1.5 a 1.6. Čočka se musí vejít do prakticky použitelné měřicí sestavy, což ji limituje na velikost podobnou vlnovým délkám v použitém X-pásmu.

Takové využití dielektrické čočky nebylo dosud odborně zpracováno, pouze proběhlo několik experimentů na katedře elektromagnetického pole ČVUT v Praze. Je-

likoř však experimenty nejsou podloženy řádným teoretickým rozbořem, ani nejsou nikde publikovány, vychází práce hlavně z geometrické podstaty problému. Do průzkumu pak bude zahrnuta i nejlepší čočka nalezená ve zmíněných experimentech. Mapování čoček je prováděno pomocí simulátoru elektromagnetického pole CST Studio Suite.

Kapitola 1

Teoretický rozbor

V této kapitole je provedeno stručné uvedení do problematiky a jsou zde rozebrány teoretické principy, dle nichž se práce dále ubírá. Konkrétní požadavky a specifiky celého měřicího systému jsou pak dále uváděny ve druhé kapitole.

1.1 Důležité parametry

Dříve než bude proveden rozbor samotného měření, je vhodné uvést některé důležité parametry. Je to vlnová délka elektromagnetické vlny ve volném prostoru:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (1.1)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu a f je frekvence. Délka vlny v dielektriku s relativní permitivitou ϵ_r je dána jako:

$$\lambda_D = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\text{m}] \quad (1.2)$$

Mezní frekvence jednotlivých vidů TE_{mn} na vlnovodu lze určit dle:

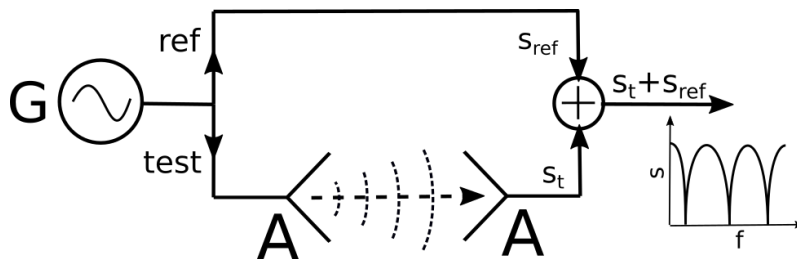
$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\mu\epsilon} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (1.3)$$

kde μ je permeabilita a ϵ permitivita prostředí ve vlnovodu, a a b jsou rozměry vlnovodu, resp. jeho delší a kratší strana. Vztahy jsou převzaty z [5].

1.2 Interferenční měření vzdálenosti

Pro realizaci interferenčního měření je třeba dvou koherentních signálů, jejichž součet vytvoří v rámci frekvenčního spektra tzv. interferenční průběh. Pokud se pak na dané frekvenci sejdou signály v protifázi, vytvoří tak v interferenčním průběhu lokální minimum. V ideálním případě mají signály stejnou amplitudu a minimum je pak nulové. Je zřejmé, že rozdíl vzdálenosti, kterou signály urazily, odpovídá lichému násobku poloviny vlnové délky odpovídající frekvenci tohoto minima.

Typicky je buzený signál rozdělen do referenčního a testovacího kanálu, kde referenční kanál je v rámci měření neměnný a testovací kanál v sobě zahrnuje měřenou vzdálenost. Tento princip je znázorněn na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Princip interferenčního měření.

Vlnové délky, na kterých se objeví lokální minimum lze tedy vyjádřit jako:

$$\lambda_k = \frac{2(l_t - l_r)}{2k - 1} \quad (1.4)$$

kde l_t , l_r odpovídá elektrické délce testovacího, resp. referenčního kanálu a $k \in \mathbb{N}$. Těmto vlnovým délkám pak odpovídají frekvence:

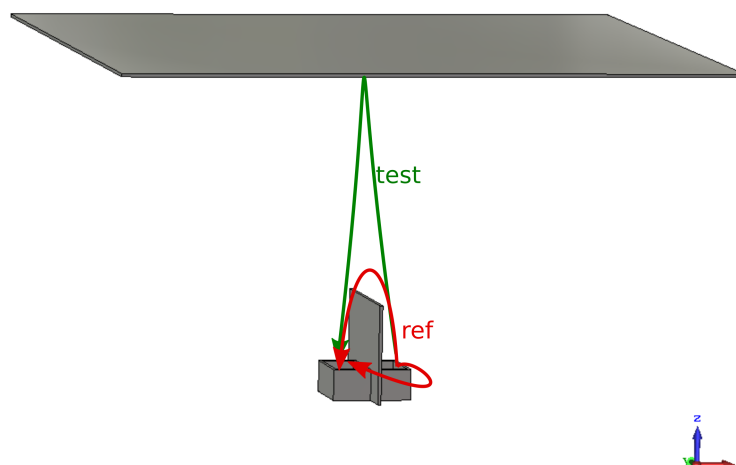
$$f_k = \frac{v_f(2k - 1)}{2(l_t - l_r)} \quad (1.5)$$

kde v_f je fázová rychlost elektromagnetické vlny. Téma je podrobněji popsáno např. v [6] [8].

1.3 Měřicí soustava

V našem případě je výše popsaná koncepce měření aplikovaná na měření vzdálenosti plechu. Vysílací a přijímací anténu reprezentuje soustava dvou vlnovodů R100, z nichž jeden signál vysílá a druhý přijímá. Testovací kanál je reprezentován odrazem od plechu a referenční kanál reprezentuje přímý přeslech mezi vlnovody, jak je naznačeno na obrázku 1.2.

Mezi vlnovody je umístěna kovová přepážka, která potlačuje velikost referenčního signálu na úroveň signálu odraženého od plechu.

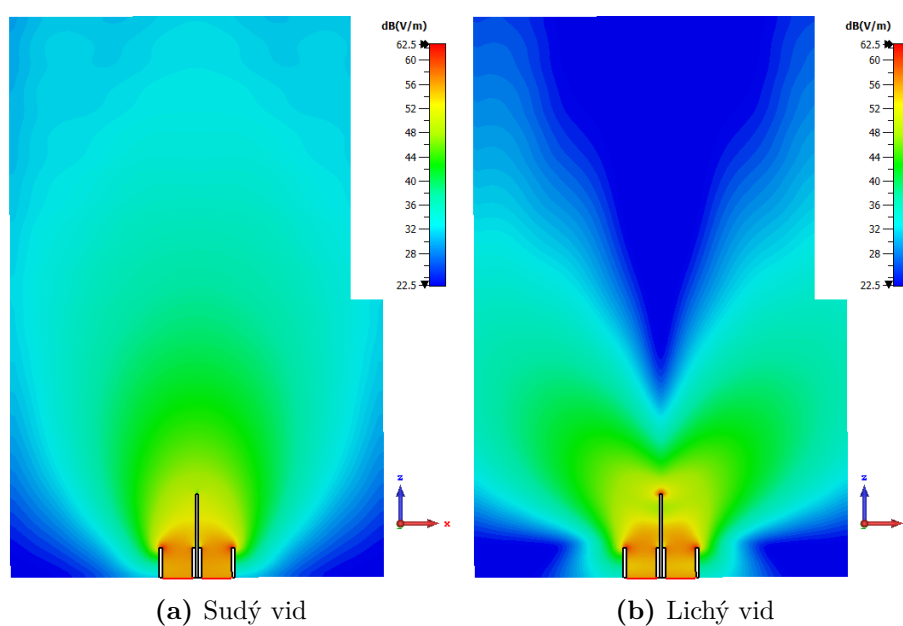


Obrázek 1.2: Měřicí soustava.

Jelikož je měřicí soustava symetrická, lze ji analyzovat metodou sudého a lichého vidu[3]. Dle této metody přenos mezi vlnovody při buzení jednoho z nich pak odpovídá:

$$S_{21} = \frac{1}{2}(S_{11}^{++} - S_{11}^{+-}) \quad (1.6)$$

kde S_{11}^{++}, S_{11}^{+-} jsou S-parametry při vybuzení soustavy vlnovodů sudým, resp. lichým videm. Na obrázku 1.3 je ukázána absolutní hodnota elektrického pole v rovině H , při vybuzení obou vidů na frekvenci $f = 10\text{GHz}$ (bez přítomnosti plechu).

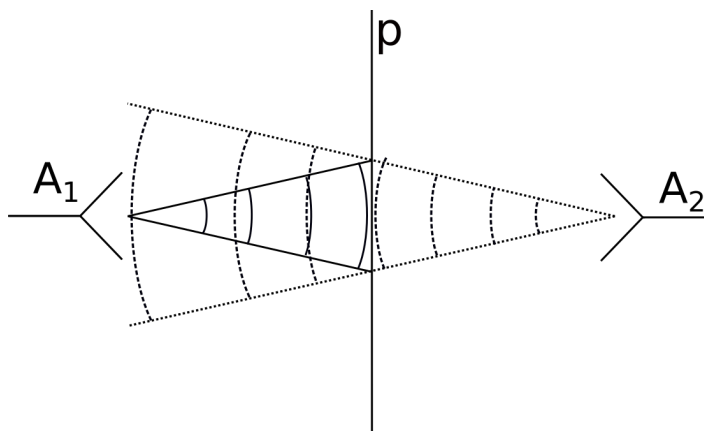


Obrázek 1.3: Buzení soustavy vlnovodů sudým a lichým videm.

Z obrázku 1.3 je patrné, že odraz od plechu bude reprezentován převážně sudým videm.

1.4 Odraz od měřeného plechu

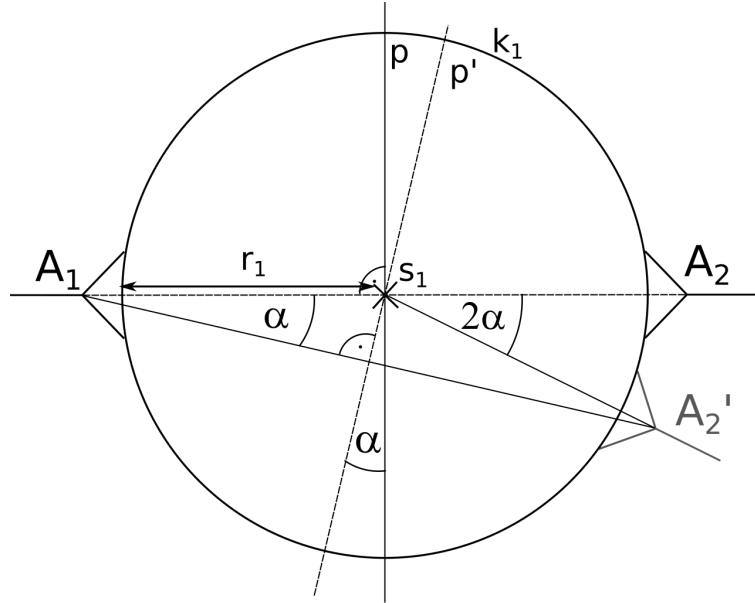
Při odrazu elektromagnetické vlny od vodivého materiálu lze odraz modelovat pomocí virtuální antény, jak je naznačeno na obrázku 1.4. Při odrazu vlny vyslané vysílací anténou A_1 od odrazného plechu p se do místa antény A_1 vrací vlna ekvivalentní vlně, kterou by vyslala anténa A_2 umístěná zrcadlově za rovinou symetrie v místě plechu. [1]



Obrázek 1.4: Zrcadlení antény na vodivé rovině.

Situace při vychýlení plechu o úhel α v ose vyzařování antény je znázorněna na obrázku 1.5. Zrcadlová anténa se posune o úhel 2α po kružnici k_1 se středem s_1 a poloměrem r_1 , přičemž s_1 leží v ose otáčení plechu a r_1 je roven vzdálenosti plechu od ústí antény. Mechanická vzdálenost posunuté virtuální antény A'_2 od antény A_1 se bude zmenšovat podle $\cos(\alpha)$. Aby při náklonu plechu nenastala chyba měření, je nutné, aby fáze odraženého signálu, hypoteticky přicházejícího od virtuální antény A_2 a posunuté virtuální antény A'_2 , byla stejná. To by znamenalo kulovou ekvifázovou vlnoplochu se středem s_1 . Elektrická vzdálenost reálné a zrcadlové antény by se tak při náklonu plechu neměnila.

Při předpokladu nedokonalého řešení je vhodné ukázat závislost velikosti chyby na vychýlení a vzdálenosti měřeného plechu.



Obrázek 1.5: Zrcadlení antény při náklonu plechu.

1.5 Teoretická chyba měření

Pro demonstraci závislosti velikosti chyby na vzdálenosti a vychýlení odrazného plechu budeme na problematiku nahlížet pouze v H rovině xz uprostřed apertury antény, přičemž osa z jde ve směru šíření signálu od antény, jak je vidět na obrázku 1.6.

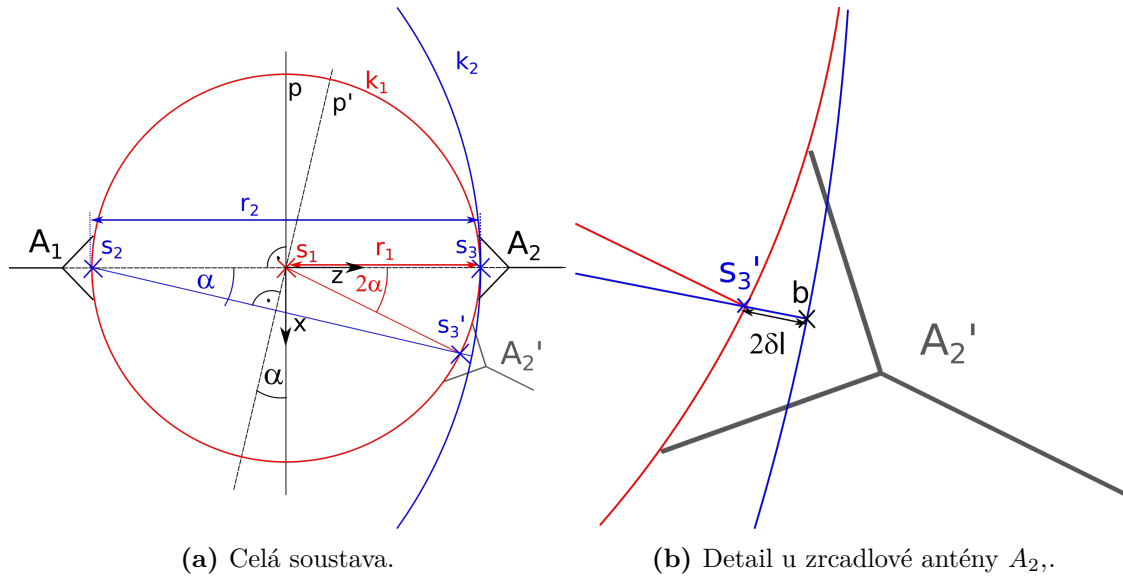
Pro jednoduchost uvažujeme osu otáčení plechu a tedy i střed optimálního kulového resp. kružnicového tvaru ekvifáze $s_1[x, z] = [0, 0]$. Předpokládáme, že zrcadlová anténa bude ve vzdálené zóně a šířící se ekvifázová plocha bude mít kulový charakter se středem například v $s_2[x, z] = [0, -r_1]$, tedy u ústí antény A_1 . Chyba bude způsobena opožděním fáze oproti ideálnímu průběhu ve středu ekvifázové vlnoplochy S'_3 u virtuální antény A'_2 . Opoždění fáze je rovno vzdálenosti bodů b a S'_3 , jak je vidět na obrázku 1.7b. Bod b odpovídá posunutí po kružnici reálného průběhu ekvifáze k_2 o úhel α . Jako teoretickou chybu měření musíme uvažovat pouze polovinu této vzdálenosti, neboť vzdálenost plechu odpovídá polovině vzdálenosti antén A_1 a A_2 . Chybu lze vyjádřit dle následujících vztahů:

$$p_1[x, z] = r_1[\sin(2\alpha), \cos(2\alpha)] \quad (1.7)$$

$$p_2[x, z] = [r_2 \sin(\alpha), r_2 \cos(\alpha) - r_2 + r_1] \quad (1.8)$$

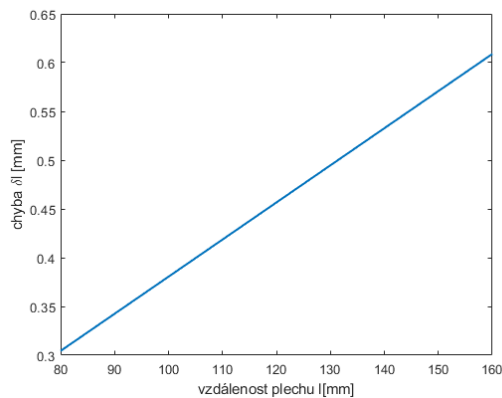
$$\delta l = \frac{\sqrt{(p_{1x} - p_{2x})^2 + (p_{1z} - p_{2z})^2}}{2} \quad (1.9)$$

Dle 1.9 můžeme vynést závislost teoretické chyby měření δl na vzdálenosti plechu

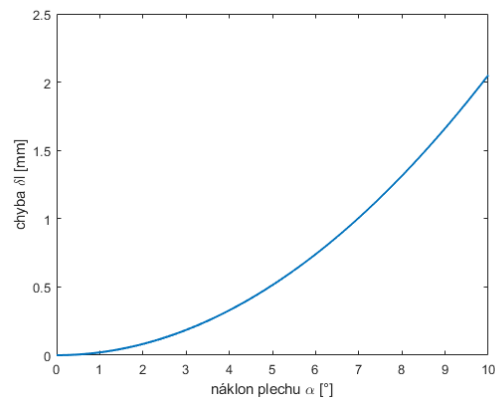


Obrázek 1.6: Opoždění reálné ekvifázové plochy.

$l = r_1$ a na náklonu plechu α (obr. 1.7).



(a) Dle vzdálenosti plechu l , $\alpha = 5^\circ$.



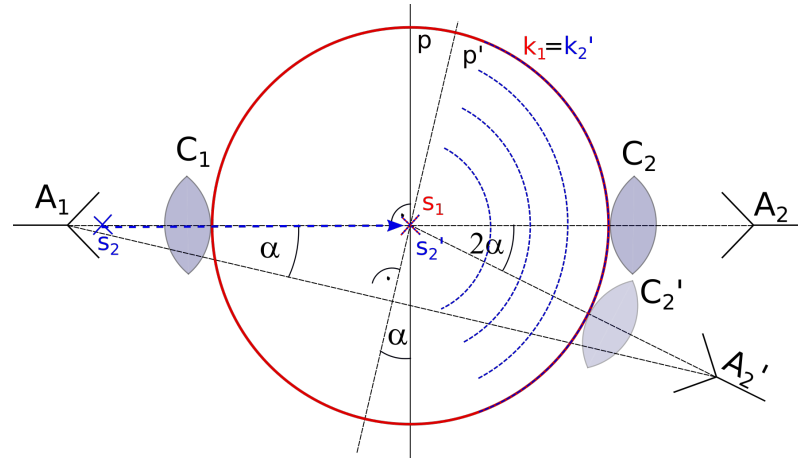
(b) Dle natočení plechu α , $l = 135\text{mm}$.

Obrázek 1.7: Teoretická chyba měření v závislosti na vzdálenosti a natočení plechu.

Je vidět, že se vzdáleností plechu chyba lineárně narůstá. Je proto nejlepší nastavit měřící aparaturu tak, aby plech mohl být co nejbližší antény. Vzdálenost ovšem musí být alespoň tak velká, aby se v interferenčním průběhu v rámci měřené polohy plechu vyskytovalo vždy alespoň jedno minimum.

1.6 Dielektrická čočka

Jedním z řešení, jak zmenšit chybu měření popsanou výše, je použití dielektrické čočky. Funkce čočky je znázorněna na obrázku 1.8. Kdyby se podařilo vyvinout takovou čočku, která by vytvořila obraz středu zakřivení vyzařované ekvifázové vlnoplochy s_2' na úrovni plechu, chyba by byla nulová.

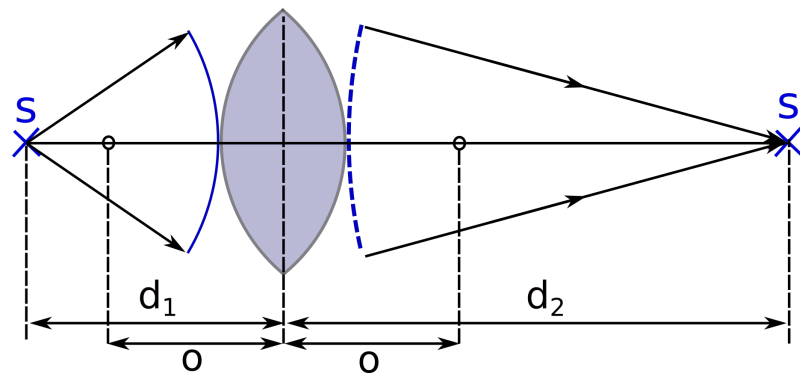


Obrázek 1.8: Měřící soustava s optimální čočkou při natočení plechu.

Pokud by byla vlnová délka elektromagnetické vlny zanedbatelná oproti velikosti čočky, lze čočku analyzovat paprskovou optikou a platí vztah:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{o} \quad (1.10)$$

kde d_1 a d_2 jsou vzdálenosti středu kulové vlnoplochy s , respektive jeho obrazu s' od středu čočky a o je vzdálenost ohniska od středu čočky. Vzdálenost ohniska pak závisí na tvaru a permitivitě čočky. [2] Princip je znázorněn na obrázku 1.9



Obrázek 1.9: Příklad efektu čočky dle paprskového modelu.

Na naše měření vzhledem k použitým vlnovým délkám paprskovou optiku nelze aplikovat. Umístění čočky navíc může být v blízké zóně vyzařování antény, a tudíž nelze předpokládat kulovou šířící se vlnoplochu. Optimální variantu čočky si tedy nemůžeme takto jednoduše spočítat. Lze však předpokládat, že čočka určitým způsobem fungovat bude, a můžeme tak dosáhnout promítnutí obrazu vyzařovací antény do blízkosti plechu, ideálně jako na obrázku 1.8. Kromě toho čočka prodlouží elektrickou vzdálenost plechu od antény a systém tak bude robustnější co se týče počtu minim v interferenčním průběhu. Jinak řečeno, při stejném počtu minim bude plech blíže k anténě a dle (1.9) tak bude případná chyba měření menší.

1.6.1 Antireflexní vrstva

Dielektrická čočka může sice vylepšit tvar ekvifázové vlnoplochy, nicméně na jejím povrchu bude vzhledem k impedančnímu skoku docházet k parazitním odrazům, které mohou měření ovlivňovat. Je proto žádoucí opatřit čočku antireflexní vrstvou, která by tyto odrazy potlačila. Ta může být vytvořena na principu klasického čtvrtvláňného impedančního transformátoru. Pro čočku ve volném prostoru platí, že relativní permitivita antireflexní vrstvy bude rovna:

$$\varepsilon_{rv} = \sqrt{\varepsilon_{rc}} \quad (1.11)$$

kde ε_{rc} je relativní permitivita čočky. Hloubka vrstvy pak bude $\lambda/4$ odpovídající dané frekvenci.

Kapitola 2

Simulace a analýza čoček

V této kapitole jsou na začátku uvedeny konkrétní požadavky, které má struktura splňovat, a následně je krátce popsáno pojetí a zpracování simulací. Hlavní bod kapitoly je pak hledání nejlepší čočky, jejíž princip je popsán v kapitole 1.6.

Problematika by se těžko uchopovala matematicky, čočka je tedy hledána zkoumáním velkého vzorku možností a z průběžného pozorování výsledků je směřováno k optimální variantě. Vzhledem k tomu, že zkoumané dielektrické objekty se svou velikostí podobají použité vlnové délce. Během průzkumu nabývají nejrůznějších tvarů, nelze je považovat za klasické čočky. Pro účely této práce nechtě je čočka libovolný dielektrický objekt, který svým objemem přesáhne použité vlnové délky.

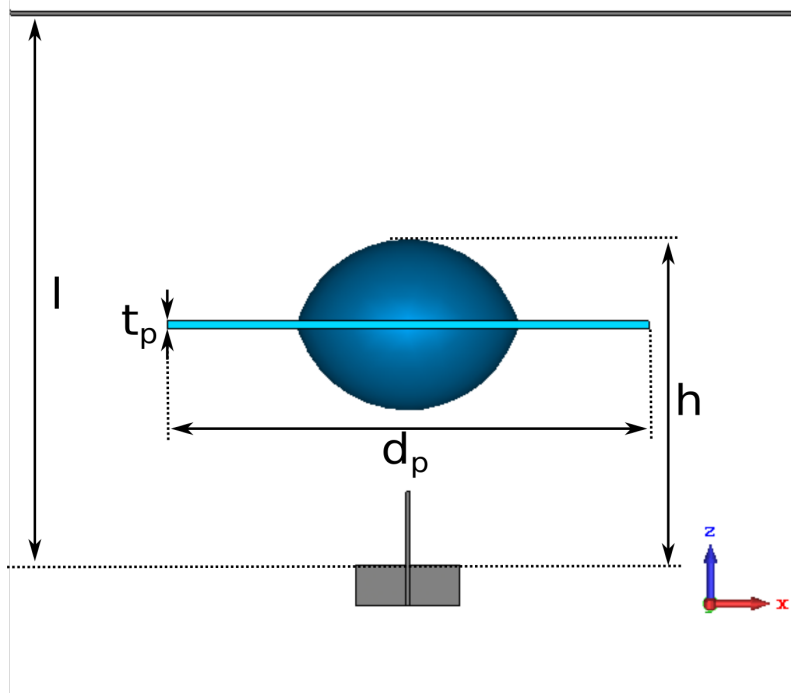
Zkoumání čoček experimentálním měřením by bylo časově i technicky náročné, proto je hledání provedeno simulacemi a nejlepší výsledky jsou prověřeny experimentálně, jak je popsáno v další kapitole.

Simulace byly prováděny v programu CST Studio Suite od společnosti Simulia, který je zaměřen na modelování elektromagnetického pole. Výsledky simulací jsou zpracovávány v programu Matlab 18b.

2.1 Požadované vlastnosti struktury

Zde budou uvedeny konkrétní požadavky hledané čočky a meze, ve kterých se může pohybovat. Nejprve je vhodné definovat důležité parametry struktury. Jsou to:

- Vzdálenost měřeného plechu od ústí vlnovodů: l
- Vzdálenost horního okraje čočky od ústí vlnovodů: h
- Tloušťka podložky, na které bude čočka upevněna: t_p
- Šířka podložky d_p



Obrázek 2.1: Základní parametry struktury.

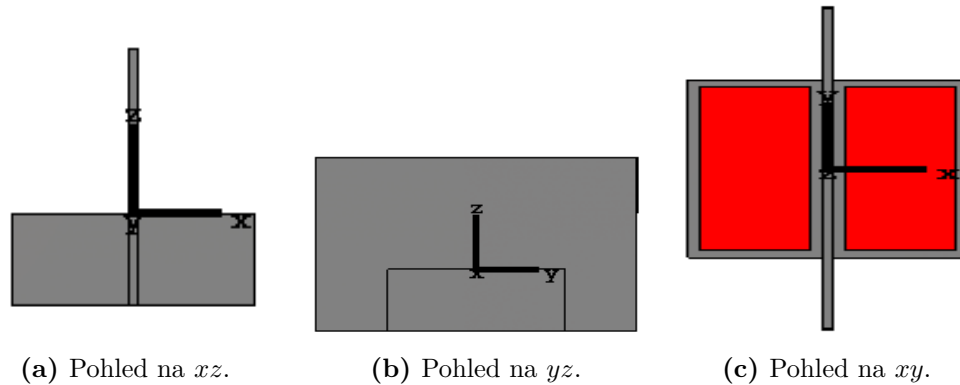
V rámci této práce se počítá s vytištěním čočky na 3D tiskárně s materiálem s permitivitou $\epsilon_r = 2,52$. V níže zmíněných podmínkách jsou tedy zahrnuty i vlastnosti materiálu a rozlišení tiskárny. Čočka by měla být použitelná v připravené měřící soustavě na měření tloušťky plechů vyráběných na sériové lince. Vlnovody jsou umístěny ve čtvercové prohlubni z absorpčního materiálu, aby se omezily parazitní odrazy od okolních objektů. Pro tyto účely a za těchto podmínek má struktura splňovat následující kritéria:

1. Poloha měřeného plechu se bude pohybovat v intervalu $l \in (80; 160)$ mm od ústí vlnovodů.
2. Čočka by měla zasahovat do vzdálenosti $h \leq 90$ mm
3. Velikost tloušťky podložky $t_p \geq 2$ mm
4. Ideální velikost šířky podložky $d_p = 118$ mm, vertikální velikost čočky pak musí být menší
5. Relativní permitivita čočky $\epsilon_r = 2,52$
6. Čočka by měla být opatřena antireflexní vrstvou, pro potlačení multiodrazů.
7. Čočka by měla fungovat konzistentně v rámci použitého frekvenčního spektra $f \in (8; 12,5)$ GHz

Pro lepší zmapování chování čoček byly zkoumány i čočky s jinou permitivitou ϵ_r .

2.2 Pojetí simulací a zjednodušení

Celá struktura je popisována v kartézské soustavě souřadnic $\{x, y, z\}$, přičemž osa z je kolmá na ústí vlnovodů, resp. jde ve směru nejvřšího šíření pole. Ústí vlnovodů jsou umístěny v rovině $z = 0$ se středem v $[x;y]=[0;0]$. Umístění soustavy vlnovodů v souřadnicích je znázorněno na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Umístění měřicí antény v kartézských souřadnicích.

Nejvíc energie při vybuzení vidu TE_{01} se bude šířit v rovině H , tedy v rovině $y = 0$. Pro jednoduchost budou čočky zkoumány pouze z pohledu na tuto rovinu při frekvenci $f = 10\text{GHz}$ s tím, že u vybraných variant se pak prověří jejich funkčnost v celém frekvenčním spektru. Simulace jsou zprvu prováděny bez měřicího plechu a předmětem zkoumání je poloměr zakřivení ekvifázové vlnoplochy, resp. poloha jejího středu. Ekvifázové vlnoplochy jsou zkoumány v místě hypotetické zrcadlové čočky pro vzdálenosti plechu $80\text{mm} - 160\text{mm}$.

2.2.1 Realizace antireflexní vrstvy

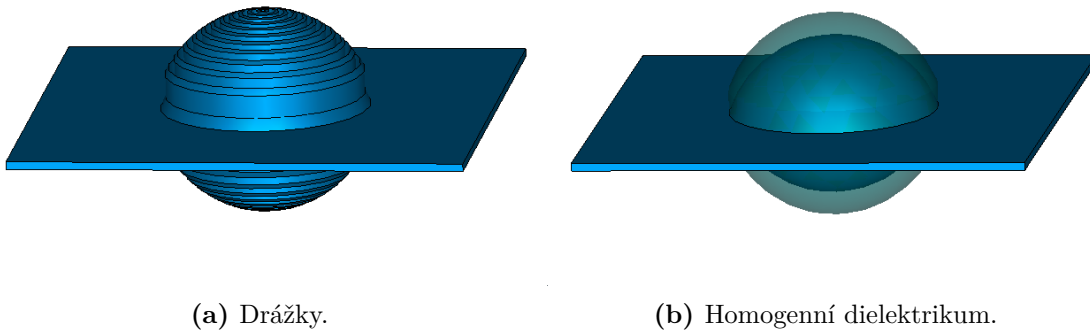
Jak bylo zmíněno v předešlé podkapitole, čočka by pro správnou funkčnost měla být opatřena antireflexní vrstvou. Potlačí se tak parazitní odrazy uvnitř i vně čočky. Při tisku čočky na 3D tiskárně je vrstva realizována pomocí drážek širokých tak, aby bylo dosaženo správné permitivity. V CST bylo pro jednoduchost a rychlost simulace modelována vrstva z homogenního dielektrika s danou permitivitou (obr. 2.3).

Vrstva byla počítána pro frekvenci $f = 10\text{GHz}$, která v rámci použitého frekvenčního spektra přibližně odpovídá průměrné vlnové délce. Pokud je permitivita čočky $\varepsilon_r = 2.52$, vychází pak hloubka vrstvy dle (1.11) na:

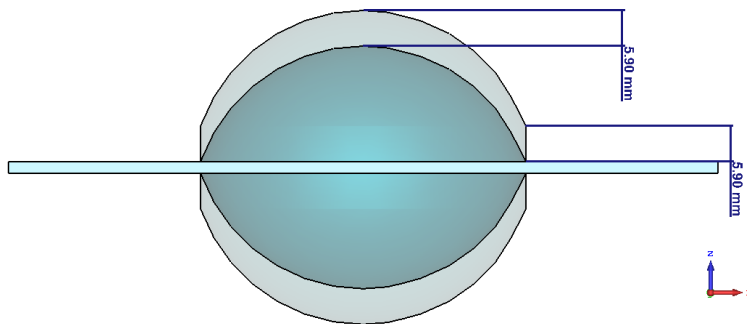
$$t_v \doteq 5.9\text{mm} \quad (2.1)$$

Je zřejmé, že vrstva funguje optimálně pouze na dané frekvenci, nicméně i v jejím okolí dokáže odrazy značně potlačit.

Hloubka vrstvy byla koncipována ve směru osy z , tedy ve směru šíření pole, jak je vidět na obrázku 2.4.



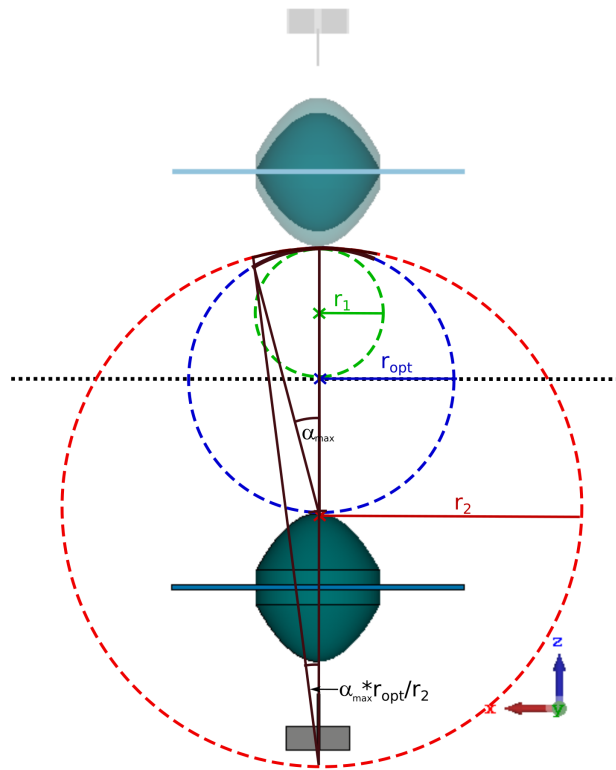
Obrázek 2.3: Příklad čočky s drážkovanou a homogenní antireflexní vrstvou.



Obrázek 2.4: Antireflexní vrstva, řez rovinou $y = 0$.

2.3 Zpracování dat ze simulací

Po každé simulaci byly exportovány hodnoty elektrického pole v rovině H a dále byly zpracovávány v programu MATLAB. Jelikož se ve vlnovodu při příjmu signálu uplatní pouze složky elektrického pole ve směru osy x , byla fáze počítána pouze jako $\phi = \arctan \frac{\text{Im}(E_x)}{\text{Re}(E_x)}$. Hodnoty fáze poskládané do matice odpovídající rovině H pak byly analyzovány jednoduchým algoritmem, který pro každou hypotetickou polohu plechu určil poloměr zakřivení ekvifáze v místě zrcadlové čočky. S ohledem na požadavky struktury, popsané v kapitole 2.1, byla poloha plechu uvažována od 20mm od čočky, tedy $l = h + 20\text{mm}$ do $l = 160\text{mm}$, s krokem 1mm. V místě určování poloměru ekvifázové vlnoplochy byly do matice fitovány části kružnic o poloměrech r_1 až r_2 . Kružnice, u které docházelo k nejmenším výchylkám fáze, byla vybrána jako nejlépe aproximující. Kružnice byly fitovány v oblasti, kam by se posunula zrcadlová čočka při naklonění plechu $\alpha \in (-18^\circ; 18^\circ)$ a rozsah zkoumaných poloměrů byl $(r_1; r_2) = (\frac{2r_{opt}}{3}; 2,5l)$ s krokem 1mm, přičemž optimální poloměr je roven vzdálenosti plechu od čočky: $r_{opt} = l - h$. Princip je naznačen na obrázku 2.5.

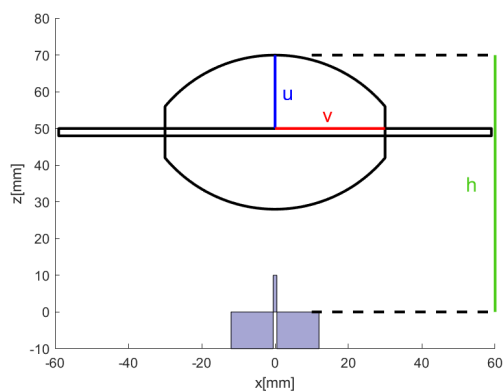


Obrázek 2.5: Určování poloměru ekvifázové vlnoplochy v místě zrcadlové čočky.

Kvalita čočky je posouzena podle toho, jak se reálný poloměr aproximační kružnice přiblížil optimálnímu poloměru r_{opt} , respektive podle toho, jak blízko plechu se posunul střed kulové ekvifázové vlnoplochy. Největší váhu na posouzení má pak vzdálenost plechu $l = 135\text{mm}$, kde se měřený plech bude vyskytovat nejpravděpodobněji.

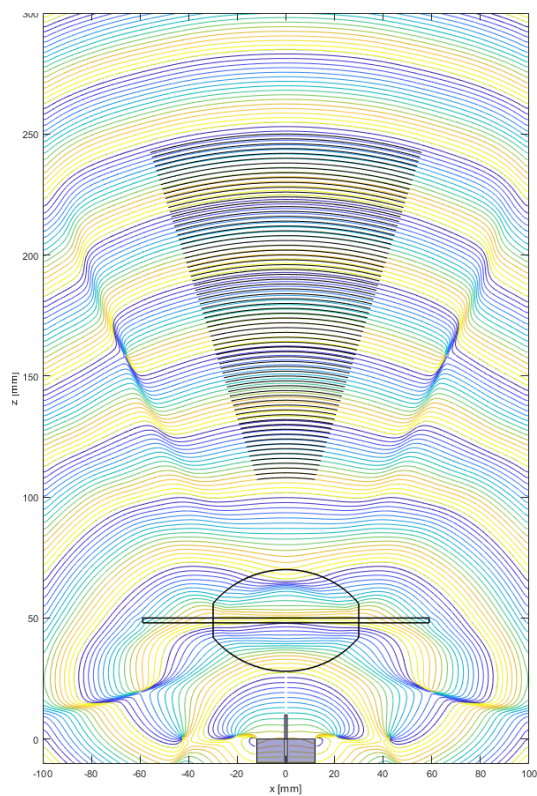
2.3.1 Ukázka zpracování dat ze simulace konkrétní čočky

Příklad zpracování výsledků simulace v rovině H je ukázáno na oboustranné čočce tvaru kulové úseče s rozměry dle obrázku 2.6. Jedna polovina čočky má výšku $u = 20\text{mm}$, poloměr podstavy $v = 30\text{mm}$ a zasahuje do vzdálenosti $h = 70\text{mm}$.



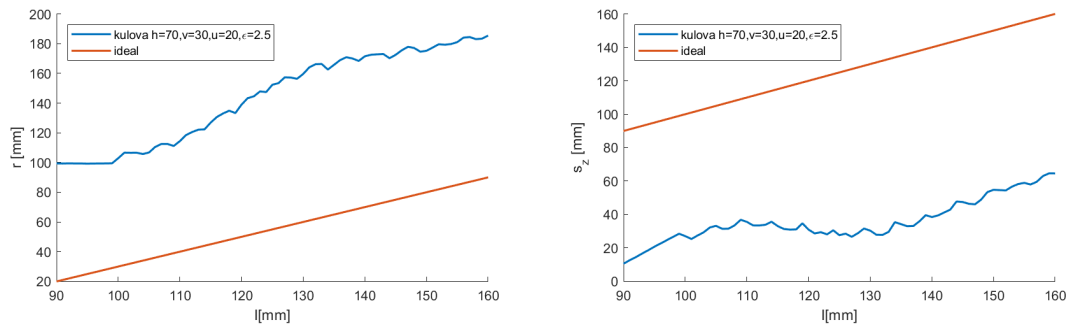
Obrázek 2.6: Oboustranná čočka tvaru kulové úseče.

Na obrázku 2.7 je znázorněno určení poloměrů aproximačních kružnic ekvifázových křivek ve zkoumané oblasti, aproximační kružnice jsou nakresleny černou barvou.



Obrázek 2.7: Příklad aproximace ekvifázových křivek.

Získaná data lze snadno graficky znázornit v závislosti na poloze hypotetického plechu, případně vzdálenosti ekvifázové křivky od ústí vlnovodů či okraje čočky. Závislost poloměru ekvifází a polohy jejich středů na poloze plechu ukazuje obrázek 2.8. Je vidět, že zakřivení ekvifázových křivek je poměrně daleko od optimální varianty.

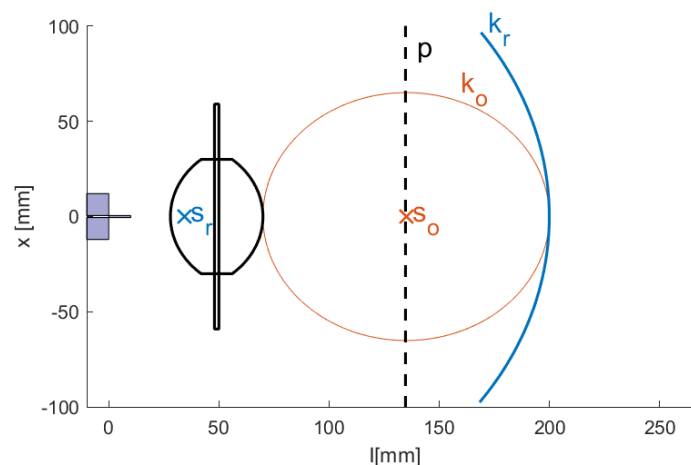


(a) Poloměr zakřivení ekvifázových křivek.

(b) Poloha středu ekvifází.

Obrázek 2.8: Zakřivení ekvifázových křivek a poloha jejich středů v závislosti na poloze plechu.

Obrázek 2.9 znázorňuje situaci pro vzdálenost plechu $l = 135\text{mm}$. Kružnice k_1 se středem s_r aproximuje reálnou ekvifázovou křivku u hypotetické zrcadlové čočky. Kružnice k_o se středem s_o v rovině plechu je optimální ekvifázová křivka pro nulovou teoretickou chybu.

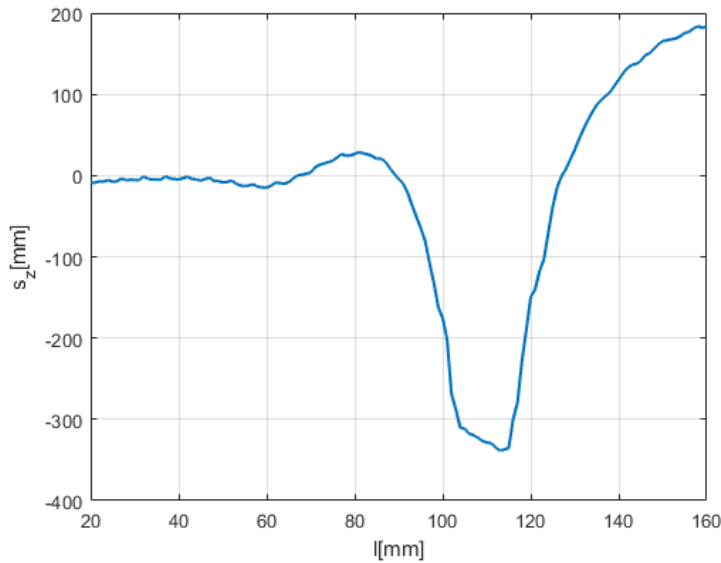


Obrázek 2.9: Řez rovinou $y = 0$, zakřivení ekvifáze u zrcadlové čočky pro $l = 135\text{mm}$.

2.4 Simulace bez čočky a eliminace simulační chyby

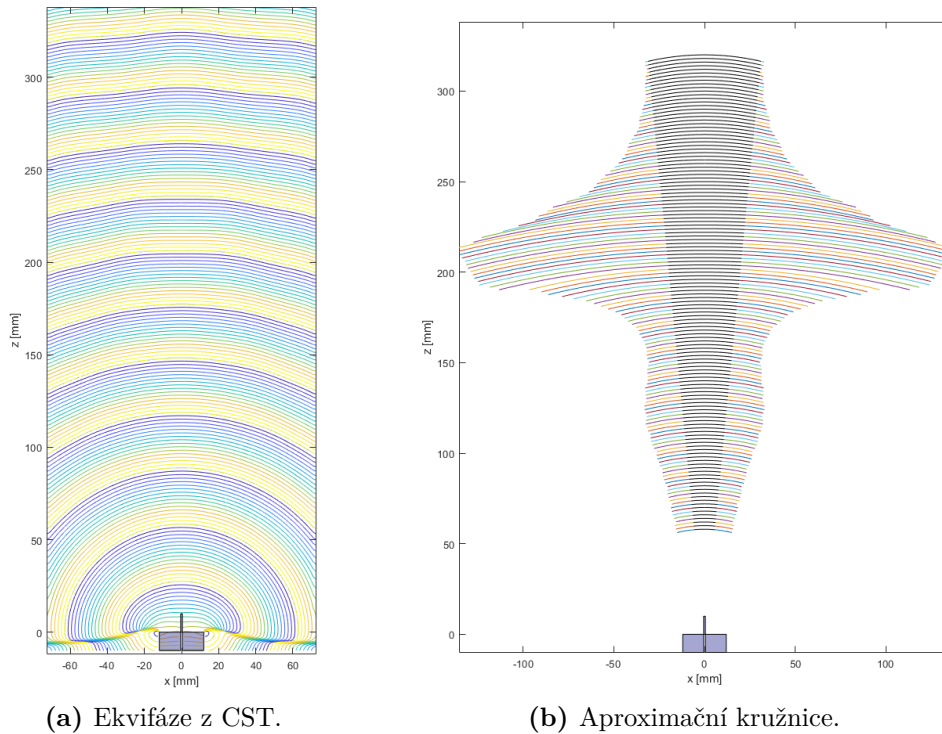
Před simulacemi čoček je nejprve vhodné provést simulaci bez čočky, aby pak bylo možné efekt čoček správně interpretovat. Zakřivení ekvifázových křivek je hledáno algoritmem popsáním v podkapitole 2.3. V tomto případě byly křivky zkoumány v místě zrcadlové antény. V reálném měření bude náklon plechu způsobující chybu velmi malý, např. $\alpha_{max} = 1^\circ$, nicméně při experimentálním měření je nutno pro dostatečnou přesnost instalace nakloněného plechu a dostatečné rozlišení vektorového analyzátoru uvažovat náklon alespoň $\alpha = 6^\circ$. Předpokládáme však, že se v oblasti výskytu zrcadlové čočky nebo antény při náklonu plechu $\alpha \in (-5^\circ; 5^\circ)$ bude ekvifázová vlnoplocha dostatečně podobat kružnici a naměřená chyba se tak bude moci přepočítat pro menší náklon.

Na základě těchto úvah byla pro aproximaci kružnicemi uvažována nejprve oblast výskytu zrcadlové antény při $\alpha \in (-6^\circ; 6^\circ)$. Po projetí algoritmem je vidět, že výsledky fyzikálně nedávají smysl. Střed ekvifází bychom očekávali v blízkosti vyzářovací antény. Při zkoumání zakřivení pouze ve zmíněné oblasti však dochází s rostoucí vzdáleností od antény k podivnému navlnění polohy středu, jak ukazuje obrázek 2.10.



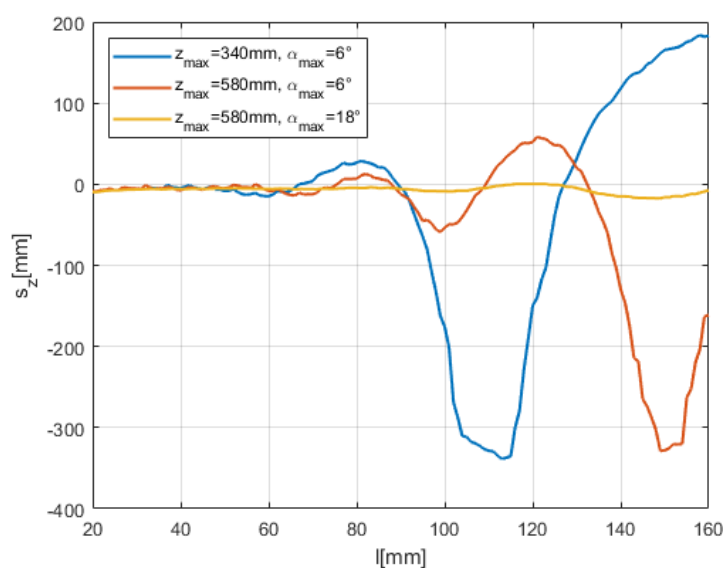
Obrázek 2.10: Poloha středu ekvifáze s na ose z dle polohy plechu l pro $\alpha_{max} = 6^\circ$, $f = 10\text{GHz}$.

Příčinou této chyby je nedokonalé definování hraničních podmínek v CST při volbě *open* u stěny simulovaného boxu. Pokud se dopadající elektromagnetická vlna nešíří kolmo k této stěně, dochází při jejím dopadu k malým odrazům. Tyto odrazy pak zapříčiní navlnění vyzářovaného pole, jak je vidět nahoře na obrázku 2.11a. Obrázek 2.11b zobrazuje aproximační kružnice, kdy je pro názornost z každé kružnice zobrazena úseč o stejném $\phi = 14^\circ$. Černě jsou zobrazeny úseky, které byly fitovány do matice fáze z CST, tedy oblasti uvažovaného výskytu zrcadlové antény při náklonu plechu $\alpha \in (-6^\circ; 6^\circ)$.



Obrázek 2.11: Simulované a aproximované ekvifáze pro $\alpha_{max} = 6^\circ$, $f = 10\text{GHz}$.

Pro správnou interpretaci výsledků z CST je vhodné zvětšit simulovaný box. Zejména však pomůže zvětšit zkoumanou oblast hypotetického výskytu zrcadlové antény zvětšením maximálního uvažovaného náklonu plechu α_{max} , do které fitujeme kružnice. Tím se zahradí případné navlnění ekvifázových křivek *zprůměrováním* zakřivení přes zkoumanou oblast. Ukázalo se, že vhodnou hodnotou je $\alpha_{max} = 18^\circ$. Výsledek ukazuje obrázek 2.12, poloha středu se pohybuje v blízkosti $z = 0$, dle očekávání. Pro porovnání je na obrázku i průběh pro $\alpha_{max} = 6^\circ$ s použitím menšího a většího boxu. Je vidět, že pouhým zvětšením boxu se značného zlepšení nedosáhne. V analýze výsledků simulací čoček tedy také budeme aplikovat vyhodnocovací algoritmus při $\alpha_{max} = 18^\circ$. Přes toto opatření jsou průběhy někdy navlněné. Navlnění však není příliš výrazné a nebude způsobovat dezinterpretaci výsledků.



Obrázek 2.12: Poloha středu ekvifáze s na ose z dle polohy plechu l pro různá nastavení.

2.5 Typy mapovaných čoček

Bylo prozkoumáno několik typů čoček. V této práci budou výsledky průzkumu postupně stručně popsány v takovém pořadí, v jakém byly zkoumány. Získané poznatky o chování čoček se s rostoucí velikostí prozkoumaného vzorku upřesňují a v některých případech i mění, proto budou podrobněji diskutovány až na závěr.

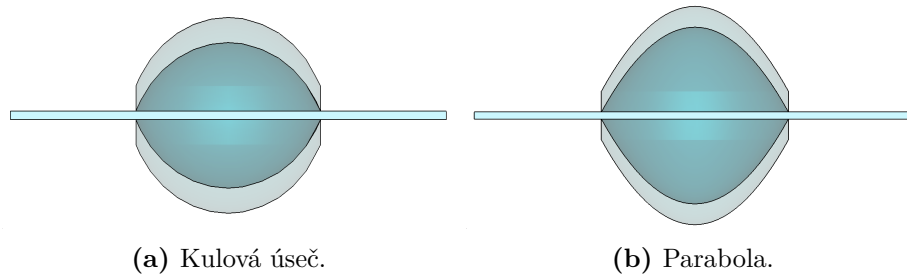
Nejprve bylo vhodné zmapovat základní chování čočky z hlediska tvaru, velikosti a permitivity. To bylo provedeno u čočky tvaru kulové úseče. Ta byla pro rychlost a jednoduchost simulována bez antireflexní vrstvy. Podle poznatků z tohoto prvotního průzkumu byly pak navrhovány další zkoumané typy, které již byly simulovány i s antireflexní vrstvou.



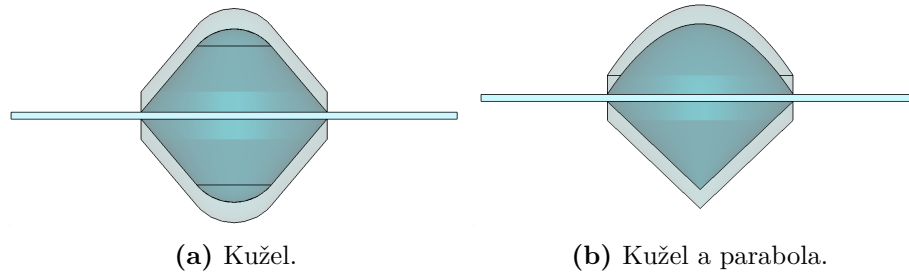
GHz”GHz.pdf"

Obrázek 2.13: Čočka tvaru kulové úseče.

V návaznosti na první průzkum byly dále zkoumány pouze čočky vypouklé na obě strany. Nejprve byly simulovány symetricky vypouklé čočky tvaru kulové úseče a paraboly (obr. 2.14). Výsledky byly ještě daleko od optimální varianty, a tak byla dále navržena čočka tvaru části kužele s kulovým vrchlíkem a kombinovaná čočka, která je nahoru vypouklá do parabolického tvaru a dolů do tvaru kužele (obr. 2.15).



Obrázek 2.14: Profily čoček tvaru kulové úseče a paraboly.



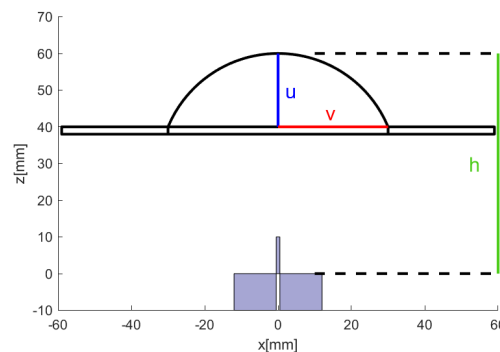
Obrázek 2.15: Profily čoček tvaru kužele a kombinované čočky.

2.6 První průřez - čočka tvaru kulové úseče

Chování čočky bylo sledováno na základě několika parametrů:

- Výška čočky: u
- Poloměr podstavy čočky: v
- Poloha horního okraje čočky od ústí vlnovodů: h
- Relativní permitivita čočky: ε_r

Rozměrové parametry jsou zobrazeny na profilu čočky na obrázku 2.16.



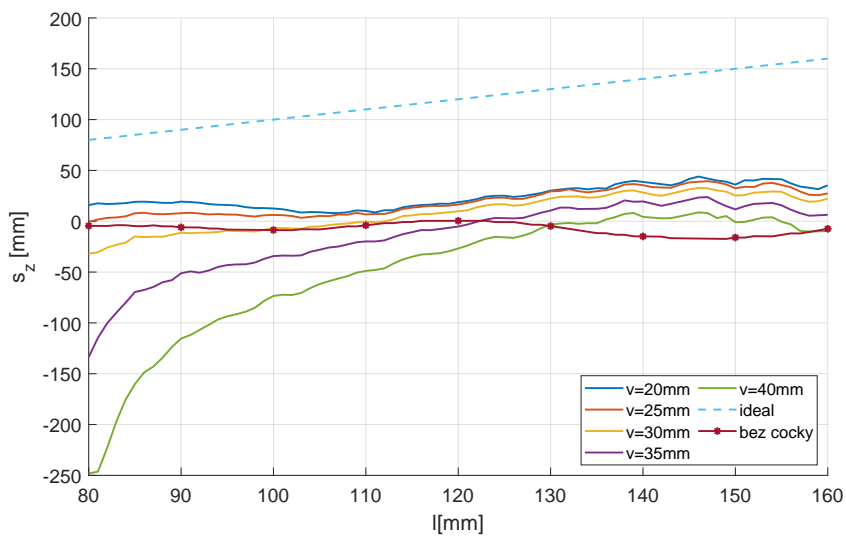
Obrázek 2.16: Profil čočky tvaru kulové úseče, parametrický popis.

Protože je tato čočka vypouklá jen na jednu stranu, je její elektrická délka krátká oproti dalším oboustranně vypouklým čočkám. Proto byla u každé závislosti na

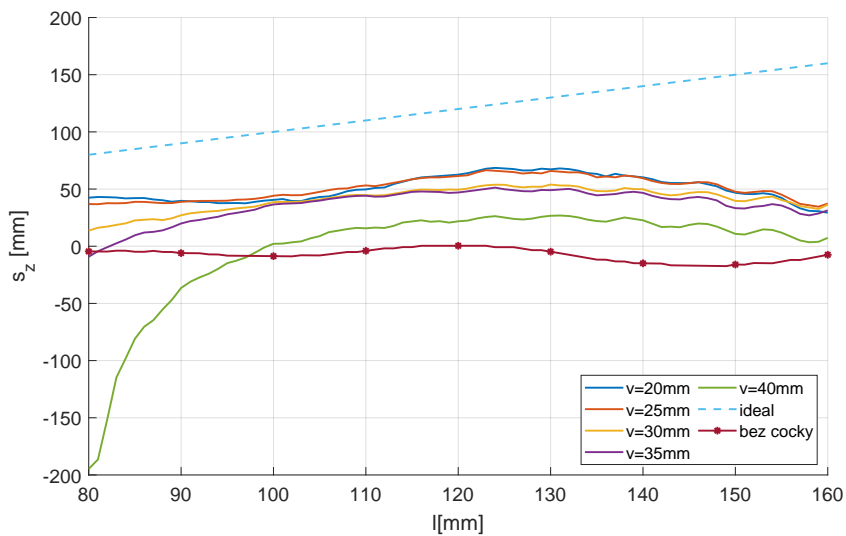
rozměrových parametrech ukázána i varianta s relativní permitivitou čočky $\varepsilon_r = 5$, která její elektrickou délku prodloužila. Můžeme pak také pozorovat rozdíl vlivu některých parametrů za různých elektrických délek čočky.

2.6.1 Vliv velikosti podstavy čočky

Kvalita čočky s ohledem na poloměr podstavy je ukázána pro čočku definovanou parametry $h = 60$, $u = 20$, $\varepsilon_r = 2.52$, resp. $\varepsilon_r = 5$. Poloměr podstavy je pak zkoumán od $v = 20$ mm do $v = 40$ mm s krokem 5 mm. S rostoucím poloměrem se vlastnosti čočky zhoršují co do polohy středu ekvifázových vlnoploch, jak je vidět na obrázku 2.17a, resp. 2.17b.



(a) S relativní permitivitou čočky $\varepsilon_r = 2,52$.

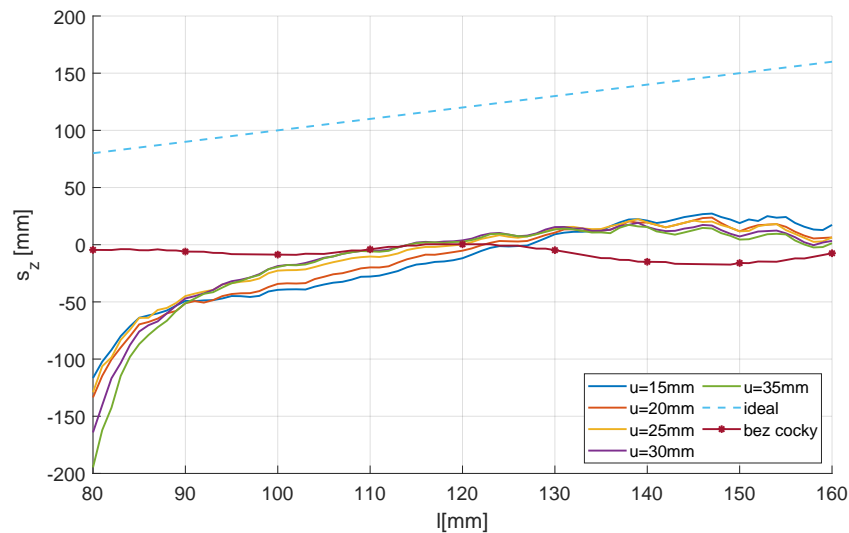


(b) S relativní permitivitou čočky $\varepsilon_r = 5$.

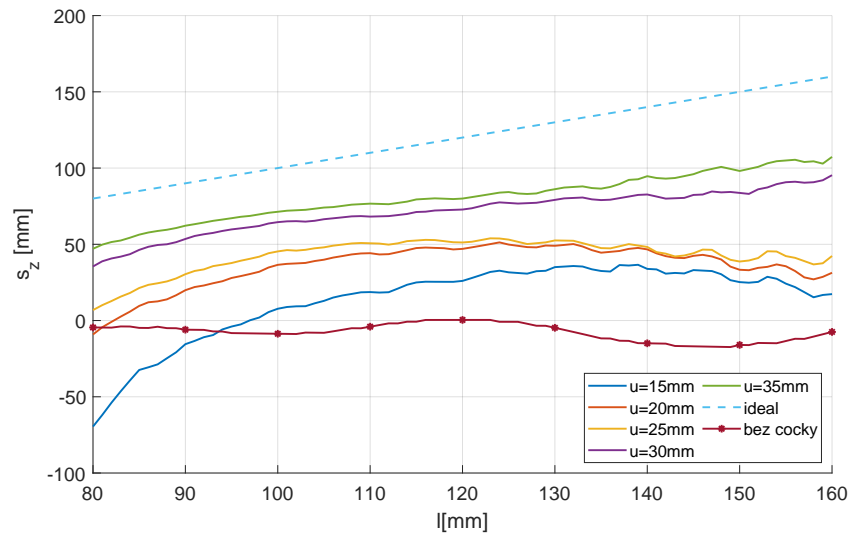
Obrázek 2.17: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 60, u = 20$ s různou výškou v , $f = 10$ GHz

2.6.2 Vliv výšky čočky

Kvalita čočky s ohledem na její výšku je ukázána pro čočku definovanou parametry $h = 60, v = 35, \varepsilon_r = 2,52$, resp. $\varepsilon_r = 5$. Poloměr podstavy je pak zkoumán od $u = 20\text{mm}$ do $u = 35\text{mm}$ s krokem 5mm . S rostoucí výškou se chování čočky zlepšuje, jak je vidět na obrázku 2.18a, resp. 2.18b.



(a) S relativní permitivitou čočky $\varepsilon_r = 2,52$.

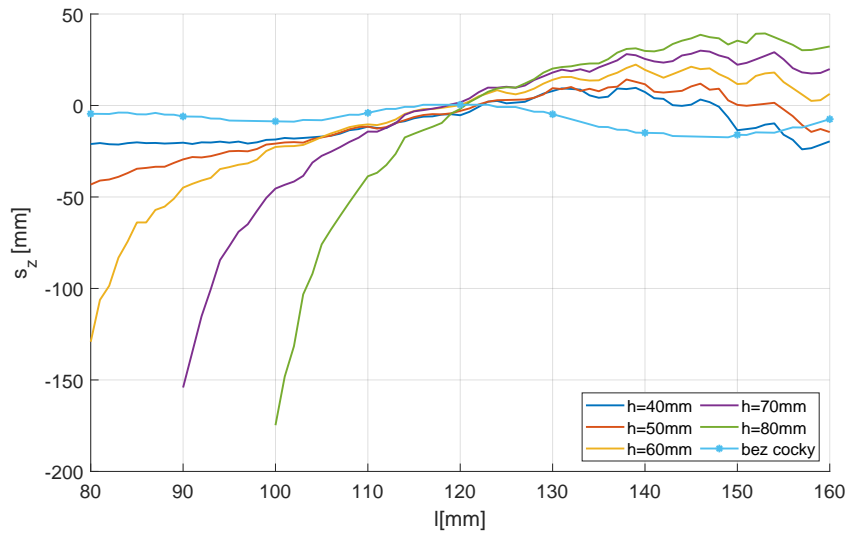


(b) S relativní permitivitou čočky $\varepsilon_r = 5$.

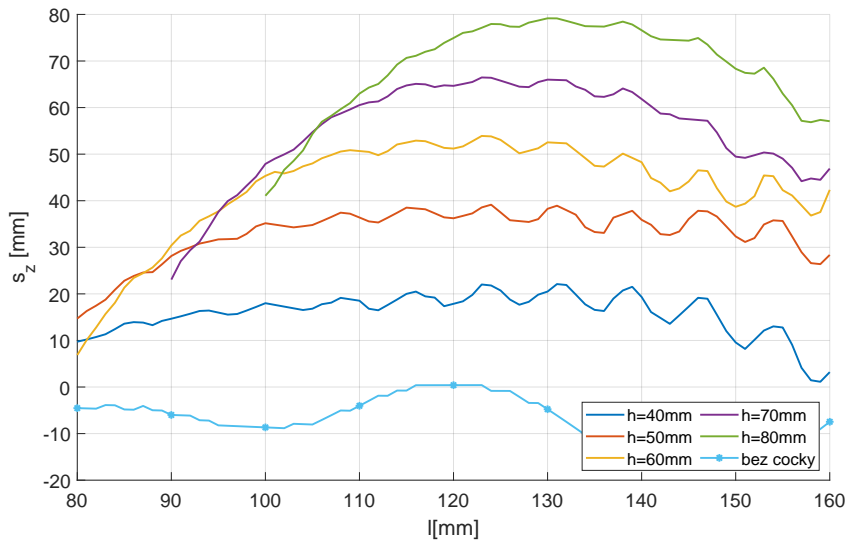
Obrázek 2.18: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 60, v = 35$ s různou výškou v , $f = 10\text{GHz}$.

2.6.3 Vliv polohy čočky

Kvalita čočky s ohledem na její polohu je ukázána pro čočku definovanou parametry $v = 35, u = 25, \varepsilon_r = 2.52$, resp. $\varepsilon_r = 5$. Poloha čočky je zkoumána od $h = 40\text{mm}$ do $h = 80\text{mm}$ s krokem 5mm . S rostoucí vzdáleností od ústí vlnovodů se vlastnosti čočky zlepšují, jak je vidět na obrázku 2.19a, resp. 2.19b.



(a) S relativní permitivitou čočky $\varepsilon_r = 5$.

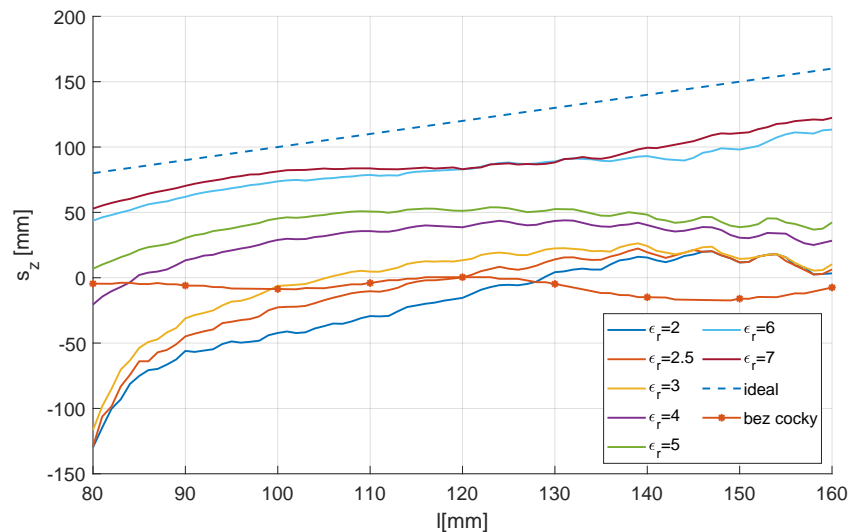


(b) S relativní permitivitou čočky $\varepsilon_r = 5$.

Obrázek 2.19: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $v = 35, u = 25$ v různých polohách plechu h , $f = 10\text{GHz}$.

2.6.4 Vliv permitivity čočky

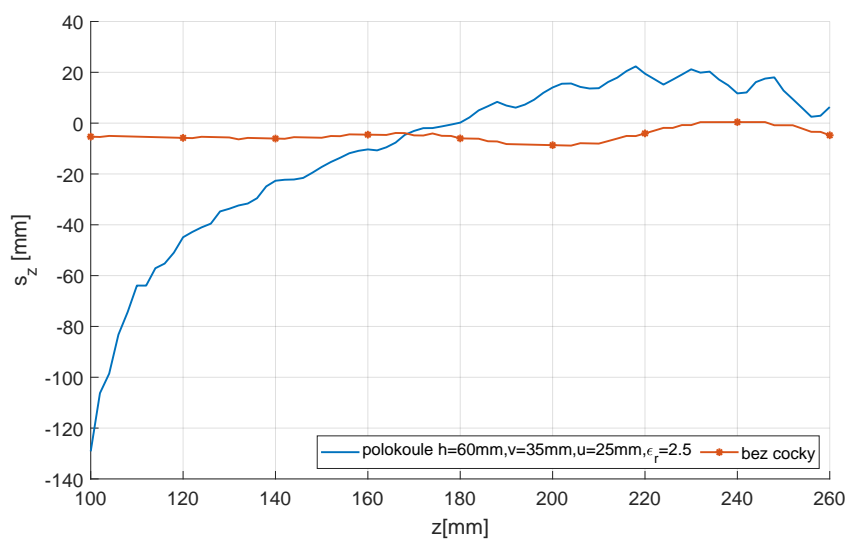
Kvalita čočky s ohledem na její polohu je ukázána pro čočku definovanou parametry $v = 35, u = 25, \varepsilon_r = 2, 52$, resp. $\varepsilon_r = 5$. Permittivita čočky je zkoumána od $\varepsilon_r = 2$ do $\varepsilon_r = 7$ mm s krokem 1. Do ukázaného vzorku je navíc zařazena i čočka s permitivitou $\varepsilon = 2, 52$. S rostoucí permitivitou se vlastnosti čočky zlepšují, jak je vidět na obrázku 2.20.



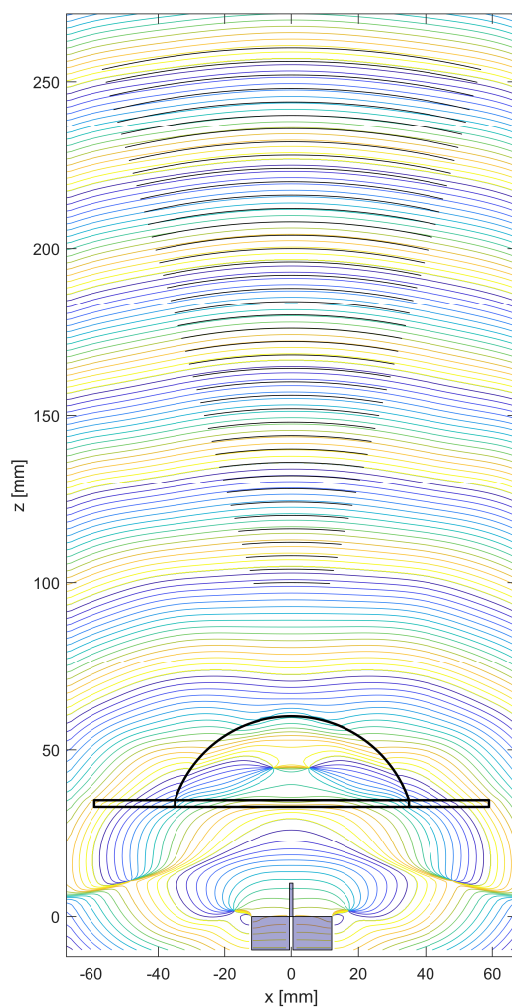
Obrázek 2.20: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky s $h = 60$, $v = 35$, $u = 25$ s různou permitivitou, $f = 10$ GHz.

2.6.5 Shrnutí a rozbor výsledků

Na obrázcích v předchozích podkapitolách je možné si všimnout, že průběhy polohy ekvifázových středů na ose z začínají relativně hluboko pod nulou. Zakřivení ekvifázových vlnoploch je tedy v blízkosti čočky velmi malé. Pro interpretaci tohoto jevu je možné připodobnit situaci k chování vlnoplochy u čočky, oproti které by byla vlnová délka zanedbatelně malá (obr. 1.9). Než se zde vlnoplocha dostane za promítnutý obraz svého středu, je zakřivení dokonce záporné. V našem případě k zápornému zakřivení zatím dochází pouze v těsné blízkosti u čočky a těžko lze mluvit o poloze či existenci ohniska. Nicméně je možné pozorovat, že za čočkou dochází často ke srovnání vlnoplochy téměř do roviny xy . S rostoucí vzdáleností od čočky pak zakřivení roste a nakonec je téměř vždy větší než u struktury bez přítomnosti čočky. Situace je ukázána na příkladu konkrétní čočky s parametry $h = 60, v = 35, u = 25, \varepsilon_r = 25$ na obrázku 2.21 a 2.22.



Obrázek 2.21: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočku s $h = 60$, $v = 35$, $u=25$, $\epsilon_r = 25$, $f = 10\text{GHz}$.

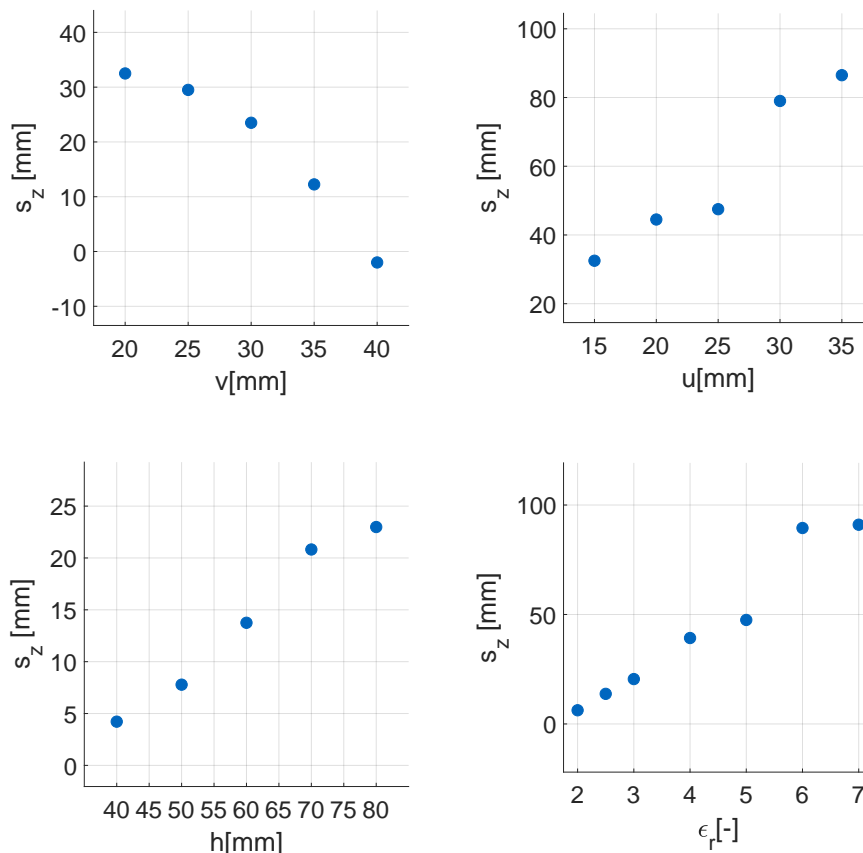


Obrázek 2.22: Průběh ekvifázových vlnoploch z CST a aproximační kružnice pro čočku s $h = 60$, $v = 35$, $u = 25$, $\epsilon_r = 25$, $f = 10\text{GHz}$.

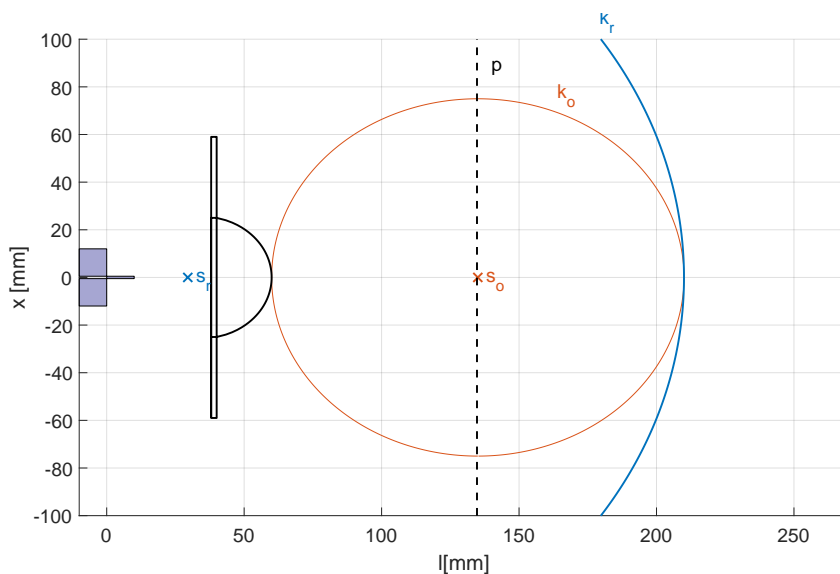
Na obrázku 2.23 jsou ukázány jednotlivé tendence polohy středu ekvifáze na ose z dle jednotlivých parametrů definujících čočku. Průběhy jsou vyňaty z grafů výše pro polohu plechu $l = 135\text{mm}$. Pro tendenční průběhy dle h, v byly použity data od čoček s permitivitou $\epsilon_r = 2,52$. Pro znázornění tendence podle výšky čočky u byl průběh zobrazen pro permitivitu $\epsilon_r = 5$, neboť tendence se zde projevují zřetelněji až při větší elektrické délce čočky. Z průběhů dle u, v, ϵ_r je zřejmé, že kvalita čočky se lepší s jejím rostoucím zakřivením. Průběh dle h ukazuje, že je nejvýhodnější umístit čočku od vlnovodů co nejdále. Z lepších vlastností čoček s větší permitivitou lze také usuzovat, že bude lepší použít čočku s větší elektrickou délkou.

Na základě těchto poznatků byl směřován průzkum dalších čoček. Rozměrově bude tedy oblast průzkumu zaměřená víc na čočky s větším zakřivením umístěné dál od ústí vlnovodů. Čočky budou oboustranné, čímž se vylepší jejich celkové zakřivení i elektrická délka. Nelze se však spoléhat na to, že tyto poznatky z prvního průzkumu budou platit v pro všechny typy čoček, proto poslouží spíše jen jako prvotní vodítko. Na základě dalších výsledků se pak zikáné poznatky potvrdí, vyvrátí nebo upřesní.

Je zřejmé, že čočka tvaru kulové úseče vypouklá na jednu stranu se nejeví jako dobrá varianta. U těchto čoček s permitivitou $\epsilon_r = 2,52$ zůstává střed ekvifázových vlnoploch dokonce za čočkou, jak je ukázáno na obrázku pro čočku s $h = 60\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 20\text{mm}$, $e = 25$ na obrázku 2.24.



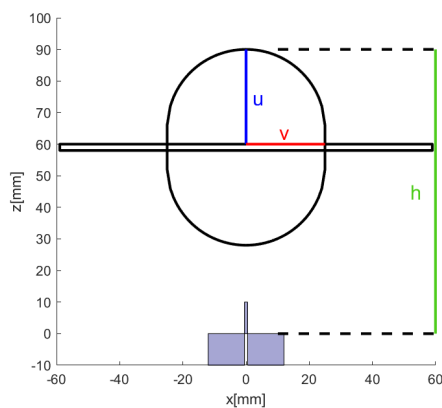
Obrázek 2.23: Poloha středu ekvifáze v závislosti na jednotlivých parametrech čočky pro vzdálenost plechu $l = 135$, $f = 10\text{GHz}$.



Obrázek 2.24: Čočka s $h = 60\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 20\text{mm}$, $\varepsilon_r = 25$, ekvifáze u zrcadlové čočky pro $l = 135\text{mm}$, pohled na rovinu H, $f = 10\text{GHz}$

2.7 Oboustranná čočka tvaru kulové úseče

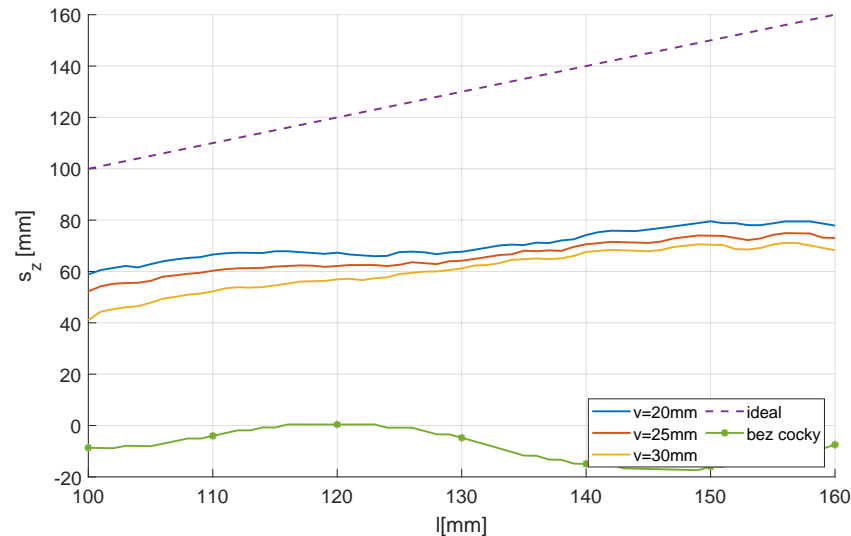
Jako první z dalších čoček byla prozkoumána čočka tvaru kulové úseče vypouklá symetricky na obě strany. Čočka je definována stejnými parametry, jako v předchozí kapitole, jak je vidět na obrázku 2.25. Tato čočka již byla opatřena antireflexní vrstvou, popsanou v kapitole 2.2.1.



Obrázek 2.25: Profil oboustranné čočky tvaru kulové úseče, parametrický popis.

2.7.1 Vliv velikosti podstavy čočky

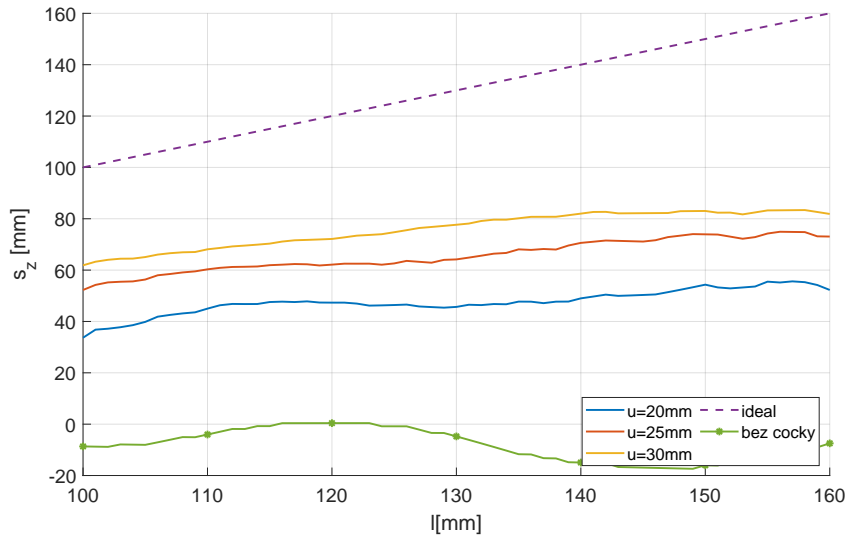
Vliv velikosti poloměru podstavy čočky na polohu ekvifázového středu je ukázán na čočce s parametry $h = 80, u = 25, \varepsilon = 2,52$ pro poloměry podstavy od $v = 20\text{mm}$ do $v = 30\text{mm}$ s krokem 5mm . Zlepšování čočky se zmenšujícím se poloměrem je opět zřejmé, jak je vidět na obrázku 2.26. Jelikož se jedná o kulovou úseč pokrytou antireflexní vrstvou, musí poloměr splňovat $v \geq u - t_a$, kde t_a je hloubka antireflexní vrstvy.



Obrázek 2.26: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 80, u = 25, \varepsilon_r = 2,52$ s různým poloměrem podstavy $v, f = 10\text{GHz}$.

2.7.2 Vliv výšky čočky

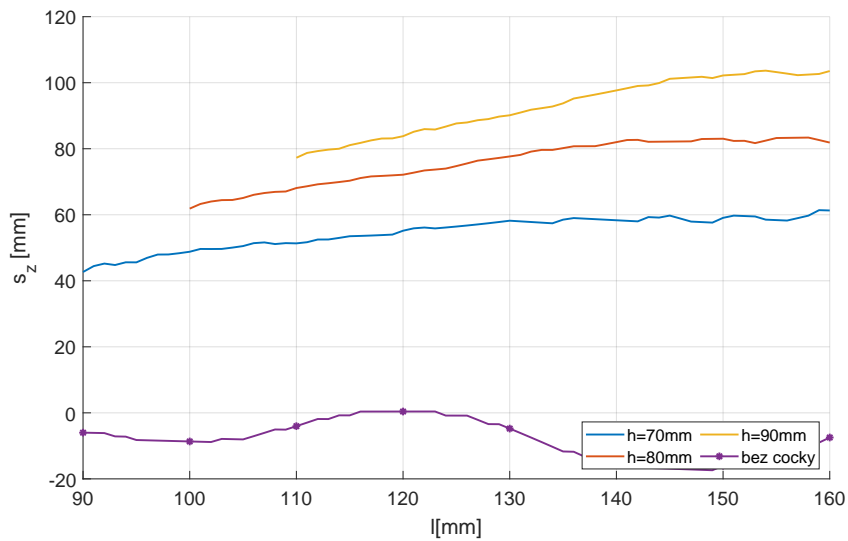
Vliv výšky čočky na polohu ekvifázového středu je ukázán na čočce s parametry $h = 80, v = 25, \varepsilon_r = 2,52$ pro výšky čočky od $u = 20\text{mm}$ do $u = 30\text{mm}$ s krokem 5mm . V souladu s poznatky z kapitoly 2.6.5 platí, že s roustoucí výškou se kvalita čočky zlepšuje, jak je vidět na obrázku 2.27. Jelikož se jedná o kulovou úseč pokrytou antireflexní vrstvou, musí výška splňovat $u \geq v - t_a$, kde t_v je hloubka antireflexní vrstvy.



Obrázek 2.27: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 80$, $v = 25$, $\varepsilon = 2,52$ pro různé poloměry podstavy u .

2.7.3 Vliv polohy čočky

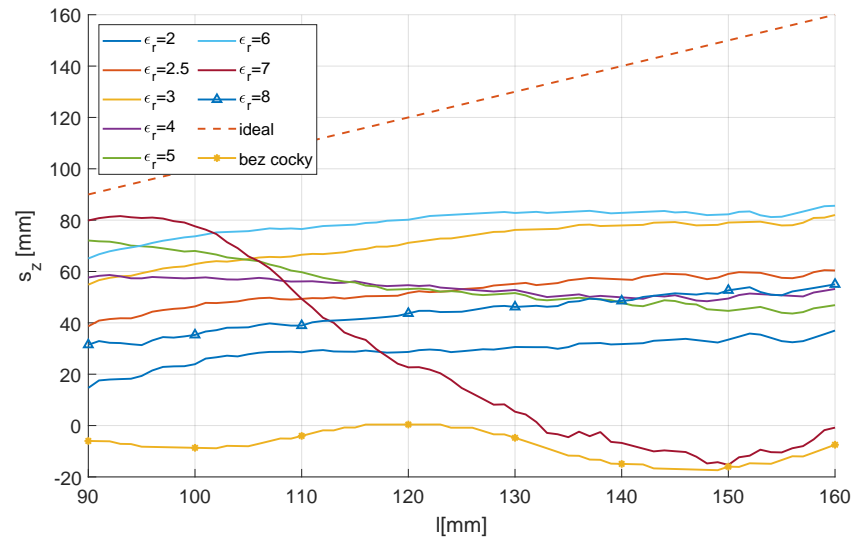
Vliv polohy čočky na polohu ekvifázového středu je ukázán na čočce s parametry $v = 25\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\varepsilon_r = 2,52$ pro čočky vzdálené od ústí vlnovodů od $h = 70\text{mm}$ do $u = 90\text{mm}$ s krokem 5mm . V souladu s poznatky z kapitoly 2.6.5 platí, že s rostoucí vzdáleností od antény se kvalita čočky zlepšuje, jak lze vidět na obrázku 2.28.



Obrázek 2.28: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 80$, $v = 25$, $\varepsilon = 2,52$ pro různé poloměry podstavy u , $f = 10\text{GHz}$, $f = 10\text{GHz}$.

2.7.4 Vliv permitivity čočky

Vliv permitivity čočky na polohu ekvifázového středu je ukázán na čočce s parametry $h = 70\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 25\text{mm}$, $\varepsilon_r = 2, 52$ pro čočky s relativní permitivitou od $\varepsilon_r = 2$ do $\varepsilon_r = 8$ s krokem 1. Výsledky se neshodují s tendencí, která byla zjištěna v kapitole 2.6.5, kde s rostoucí permitivitou se kvalita čočky zlepšovala. Jak je vidět na obrázku 2.29, čočka se s rostoucí permitivitou zlepšuje pouze do $\varepsilon_r = 3$, a poté nastávají zdánlivě náhodné skoky.



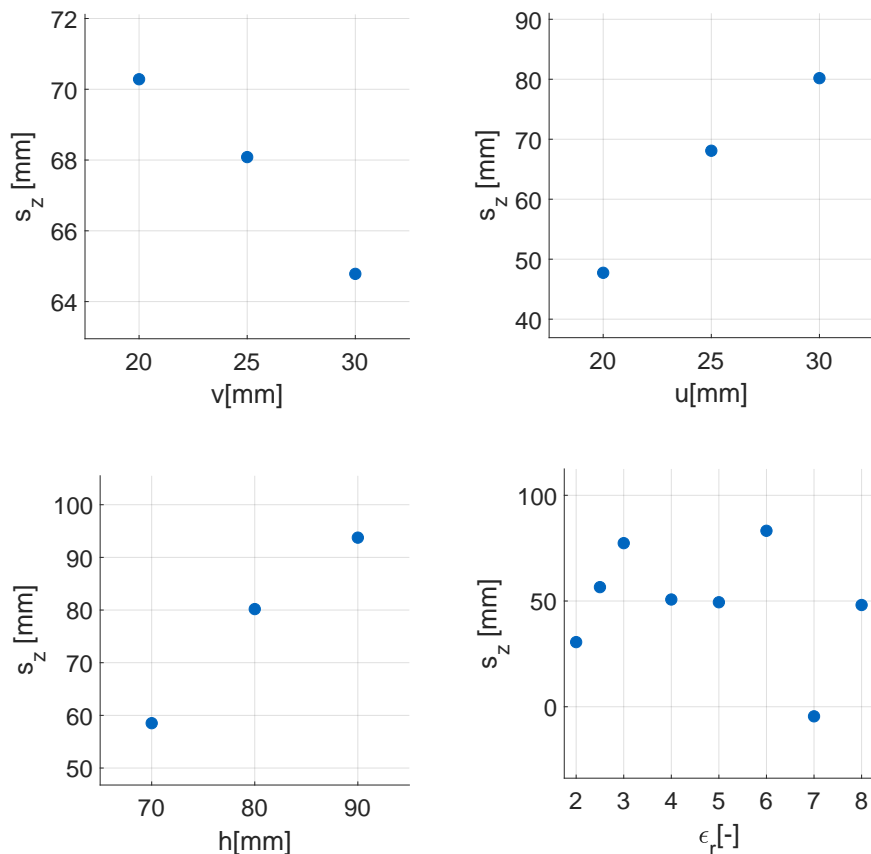
Obrázek 2.29: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro čočky tvaru kulové úseče s $h = 80$, $v = 25$, $\varepsilon_r = 2, 52$ pro různé poloměry podstavy u , $f = 10\text{GHz}$.

2.7.5 Shrnutí a rozbor výsledků

Na obrázku 2.23 jsou ukázány průběhy polohy středu ekvifáze na ose z dle jednotlivých parametrů definujících čočku. Tendence vyvozené v prvním průřezu byly potvrzeny u parametrů h, v, u . Stále platí, že vlastnosti čočky se zlepšují s rostoucím zakřivením a s rostoucí vzdáleností čočky od antény. Je vidět, že ještě nebylo dosaženo optimálního bodu co se týče poměru u/v , který ovšem u čočky tvaru kulové úseče nemohl být dále zvětšován, neboť musí platit $(u - t_a)/v \leq 1$, kde t_a je hloubka antireflexní vrstvy ve směru osy z .

Z prvního průřezu se zdálo, že rostoucí permitivita také přispívá ke kvalitě čočky, nicméně nové simulace ukazují, že u větších rozměrů čočky ve směru osy z existuje jistý bod, od kterého se už kvalita s rostoucí permitivitou nezlepšuje, ale začíná nějakým způsobem oscilovat. Hypotézy vysvětlující tento jev budou diskutovány až po prozkoumání většího vzorku čoček.

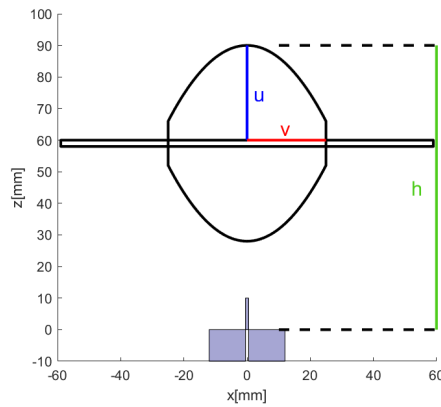
Jelikož u čočky tvaru kulové úseče už nemůžeme jít se zakřivením čočky dál, nabízí se jako další postup čočka tvaru části elipsoidu, nebo parabolická čočka. Byla zvolena druhá varianta.



Obrázek 2.30: Poloha středu ekvifáze v závislosti na jednotlivých parametrech čočky pro vzdálenost plechu $l = 135$, $f = 10\text{GHz}$.

2.8 Oboustranná čočka tvaru paraboloidu

Oboustranná parabolická čočka je definována stejnými parametry jako předchozí prozkoumané typy čoček. Profil čočky s popsányými prostorovými parametry je znázorněn na obrázku 2.31. Čočka je symetricky vypouklá na obě strany. Pro rozměry, které byly prozkoumány u oboustranné čočky tvaru kulové úseče, má parabolická čočka velmi podobné výsledky. Budou zde tedy ukázány pouze důležité konstelace parametrů, které přesahují možnosti kulové čočky, a které ukazují, kde se přibližně nachází optimální zakřivení čočky.

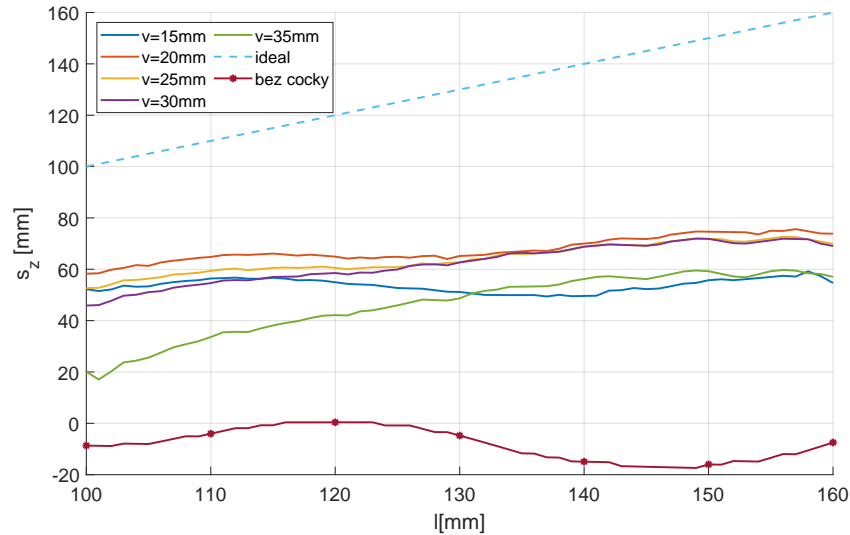


Obrázek 2.31: Profil čočky tvaru paraboloidu, parametrický popis.

2.8.1 Vliv poloměru podstavy čočky

Vliv poloměru podstavy čočky je ukázán na čočce s parametry $h = 80\text{mm}$, $u = 26\text{mm}$, $\epsilon_r = 25$ pro poloměry od $v = 15\text{mm}$ do $v = 35\text{mm}$ s krokem 5mm .

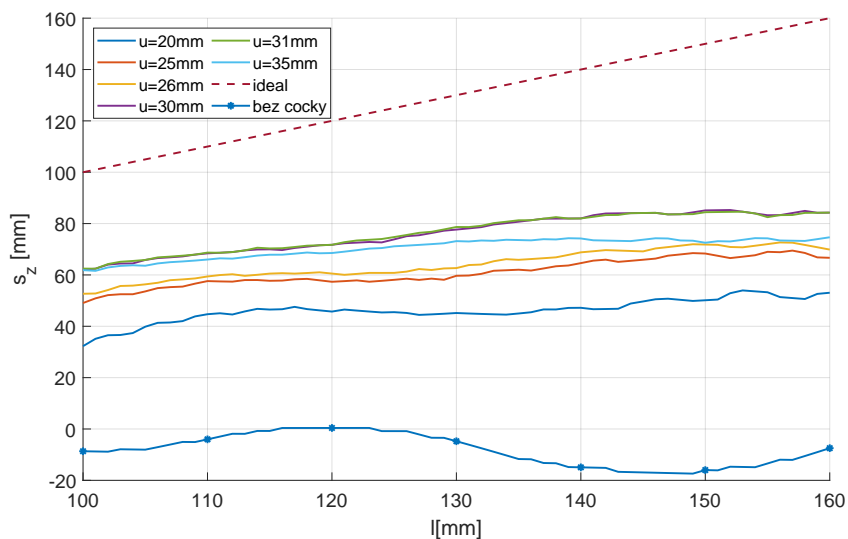
Jak je vidět na obrázku 2.33, kvalita čočky roste s klesajícím poloměrem pouze do hodnoty $v = 20$ a pro hodnotu $v = 15$ již zaznamenáváme pokles. Pro hodnoty poloměru od $v = 20\text{mm}$ do $v = 30\text{mm}$ se vlastnosti této čočky příliš nemění.



Obrázek 2.32: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro parabolické čočky s $h = 80\text{mm}$, $u = 25$, $\epsilon_r = 2,52$ s různými poloměry podstavy v , $f = 10\text{GHz}$.

2.8.2 Vliv výšky čočky

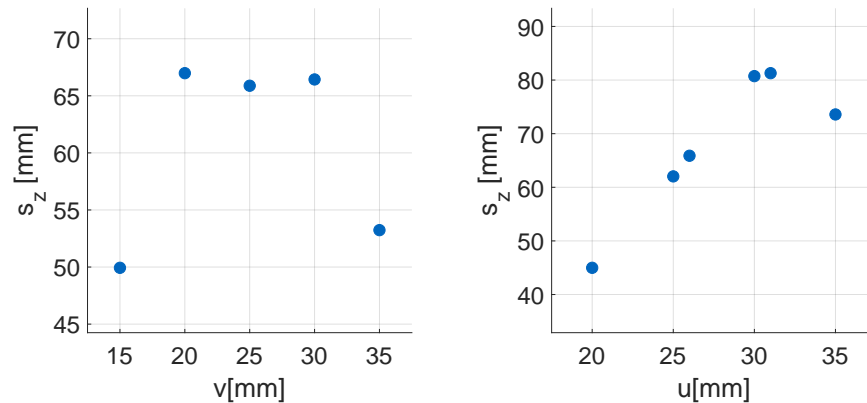
Poloha středu ekvifáze v závislosti na výšce čočky je ukázána na čočce s parametry $h = 80\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $\varepsilon_r = 25$. Výšky čočky jsou zde od $u = 20\text{mm}$ do $u = 35\text{mm}$ s krokem 1mm . Do zkoumaného vzorku jsou navíc přidány čočky s výškou $u = 26\text{mm}$ a $u = 31\text{mm}$. Je vidět, že přibližně kolem hodnoty $u = 30\text{mm}$ se růst kvality čočky zastaví a pro $u = 35\text{mm}$ zaznamenáváme již viditelný pokles.



Obrázek 2.33: Poloha středu ekvifází na ose z podle polohy plechu l pro parabolické čočky s $h = 80\text{mm}$, $u = 25$, $\varepsilon_r = 2,52$ s různými poloměry podstavy v , $f = 10\text{GHz}$.

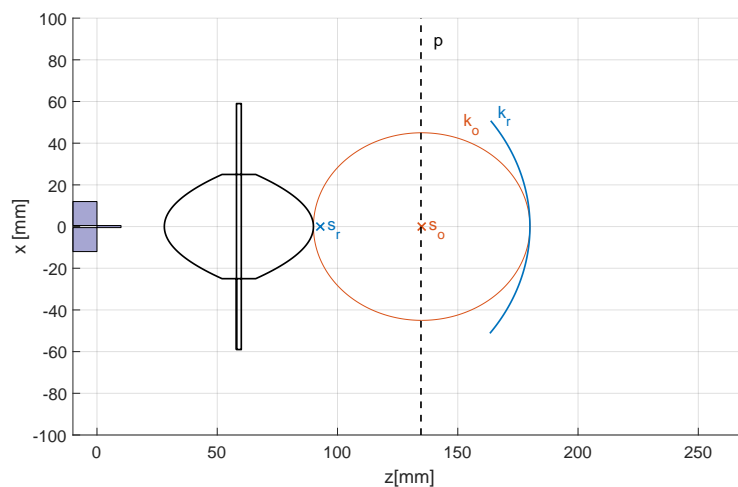
2.8.3 Shrnutí a rozbor výsledků

Z ukázaného průřezu parabolické čočky se přibližně mohou odvodit optimální hodnoty parametrů pro symetricky vypouklé čočky parabolického nebo jiného zakulaceného tvaru s permitivitou $\epsilon_r = 2,52$. Pro poloměr podstavy čočky to budou hodnoty v intervalu $v \in (20; 30)$ mm, spíše blíže k hodnotě $v = 20$ mm. Pro výšku čočky to budou hodnoty okolo $u \doteq 30$ mm. Vliv parametrů je zobrazen na obrázku 2.34.



Obrázek 2.34: Poloha středu ekvifáze v závislosti na parametrech u a v pro vzdálenost plechu $l = 135$.

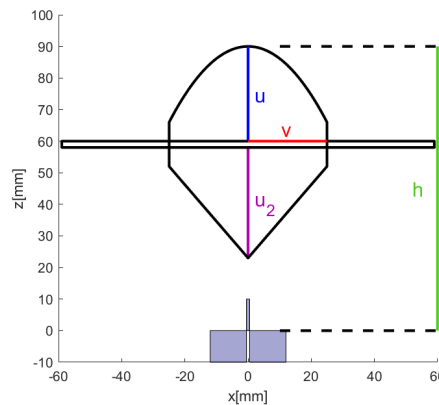
Pořád platí poznatek zjištěný v prvním průřezu ohledně polohy čočky, a totiž, že čočku je nejvýhodnější umístit co nejdále od antény. S ohledem na to, že dle zadání smí čočka zasahovat pouze do $h = 90$ mm, byla nalezena jako zatím nelepší možná varianta čočka parabolického tvaru, definovaná parametry $h = 90$ mm, $v = 25$ mm, $u = 30$ mm, $\epsilon_r = 2,52$. Na obrázku je vidět, že u této čočky se již střed ekvifáze dostal mezi čočku a plech. Pro zjištění dalších možností je třeba definovat čočku jiného tvaru. Jako první bude ukázána čočka kombinovaná z kužele a paraboly.



Obrázek 2.35: Čočka s $h = 90$ mm, $v = 25$ mm, $u = 30$ mm, $\epsilon_r = 2,52$, ekvifáze u zrcadlové čočky pro $l = 135$ mm, pohled na rovinu H, $f = 10$ GHz.

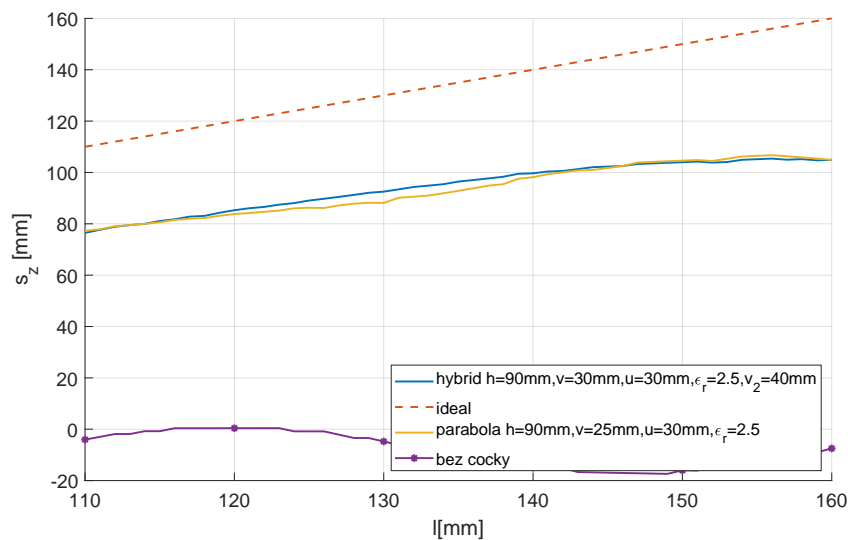
2.9 Kombinovaná čočka

Kombinovaná čočka je směrem k anténě tvarovaná jako kužel a směrem k plechu je vypouklá do tvaru paraboloidu. Je definovaná stejnými parametry jako předešlé varianty a jedním dalším parametrem, totiž výškou jehlanu u_2 . Profil čočky s popisnými parametry je zobrazen na obrázku 2.36.



Obrázek 2.36: Profil kombinované čočky, parametrický popis.

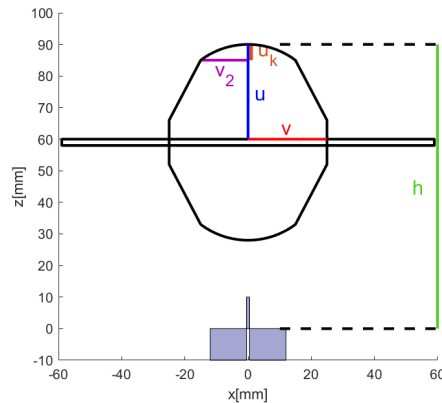
Z prozkoumaného vzorku vykazuje nejlepší chování (pro relativní permitivitu $\epsilon_r = 2,52$) s konstelací parametrů $h = 90, v = 30, u = 30, v_2 = 40$. Průběh je znázorněn společně s nejlepší variantou parabolické čočky na obrázku 2.37.



Obrázek 2.37: Průběh polohy ekvifázového středu dle polohy plechu l pro nejlepší kombinovanou a parabolickou čočku, $f = 10\text{GHz}$.

2.10 Čočka tvaru kužele

Tato čočka má tvar určené části kužele, na kterém je posazen kulový vrchlík. Je symetricky vypouklá na obě strany. Je definována stejnými parametry jako např. čočka tvaru kulové úseče a dalšími dvěma parametry, které definují kulový vrchlík. Jsou to poloměr základny kulového vrchlíku v_2 a výška kulového vrchlíku u_k . Profil čočky s popisnými parametry je zobrazen na obráz

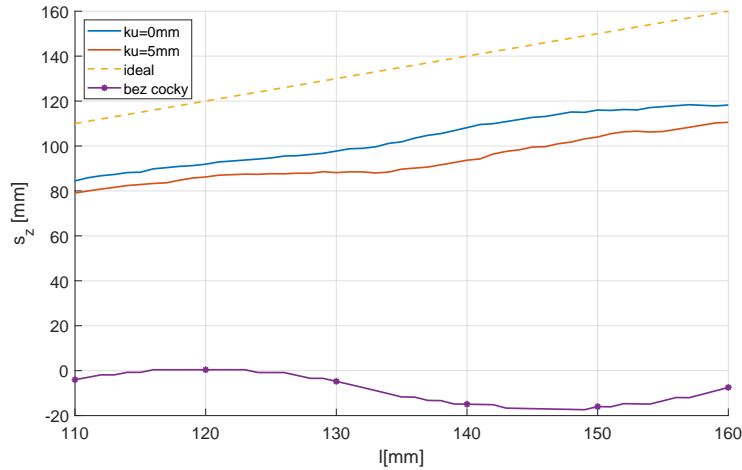


Obrázek 2.38: Profil čočky tvaru kužele, parametrický popis.

Tato čočka byla navrhována na doplnění průřezu čoček tvaru kulové úseče a paraboloidu. Různými konstelacemi parametrů kulového vrchlíku lze dosáhnout různých zakřivení stěn čočky. Průřez čoček tohoto typu došel k překvapujícím závěrům.

2.10.1 Vliv výšky kulového vrchlíku

Ukázalo se, že nejlepší variantou je hodnota výšky kulového vrchlíku $u_k = 0$, a to pro všechny prozkoumané konstelace parametrů. Zde je tato vlastnost ukázána na obrázku 2.39 na čočce s parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\varepsilon_r = 2,52$, $v_2 = 10\text{mm}$ pro $u_k = 5\text{mm}$ a $u_k = 0\text{mm}$.



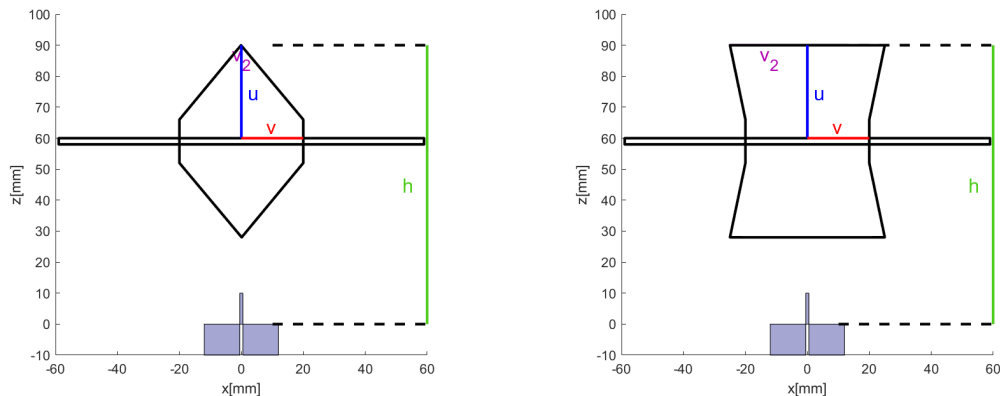
Obrázek 2.39: Průběh polohy ekvifázového středu podle polohy plechu l pro čočku s $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\varepsilon_r = 2,52$, $v_2 = 10\text{mm}$, $f = 10\text{GHz}$.

2.10.2 Vliv náklonu stěn čočky

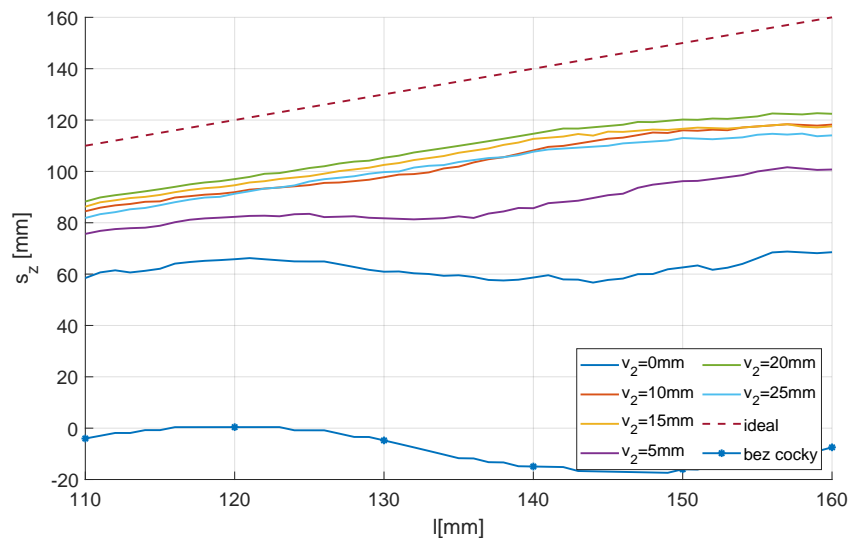
Vliv náklonu stěn je demonstrován ve dvou bodech. V prvním je zkoumána závislost polohy ekvifázového středu na změně velikosti podstavy kulového vrchlíku v_2 při stejné velikosti podstavy čočky a ve druhém bodě naopak.

Závislost na velikosti podstavy kulového vrchlíku

Závislost je ukázána již na čočce s výškou kulového vrchlíku $u_k = 0\text{mm}$, která se ukázala jako nejlepší. Čočka je dále definována parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$. Poloměr podstavy kulového vrchlíku je pak zkoumán od $v_2 = 0$ do $v_2 = 25$ s krokem 5mm , tedy až do obráceného náklonu stěn (obr. 2.40). Průběhy jsou zobrazeny na obrázku 2.41. Je vidět, že s rostoucím náklonem se čočka lepší a nejlepší výsledky má varianta s $v_2 = 20$. V tomto případě se čočka podobá válci.



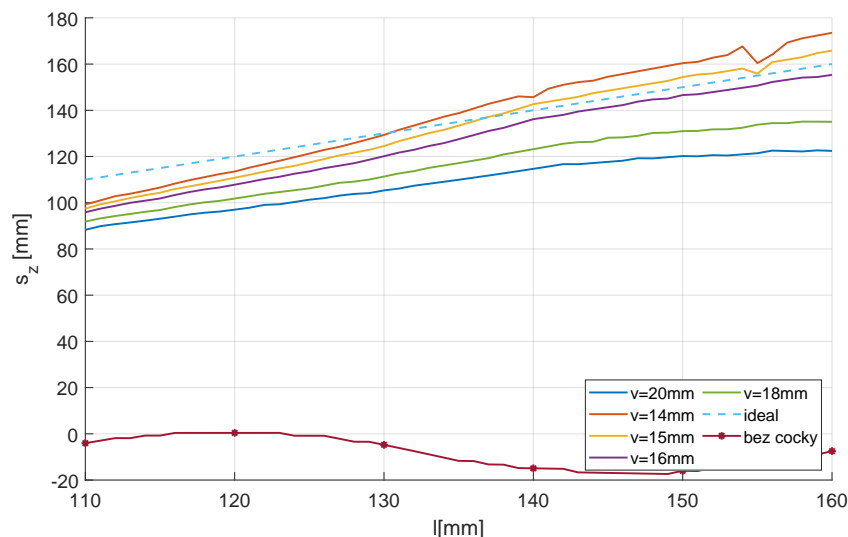
Obrázek 2.40: Profily čoček tvaru kužele s $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $u_k = 0\text{mm}$ s krajními zkoumanými hodnotami v_2 .



Obrázek 2.41: Průběh polohy ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro čočku s $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\varepsilon_r = 25$, $u_k = 0\text{mm}$ pro různé hodnoty v_2 .

Závislost na velikosti podstavy čočky

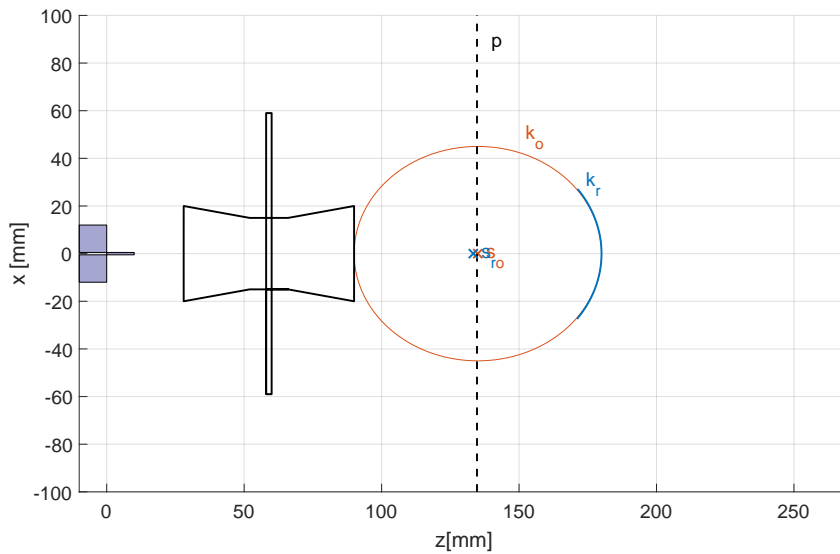
Vliv velikosti podstavy čočky je ukázán pro stejné $v_2 = 20$ a je zde demonstrován pouze pro $v \leq v_2$. Další parametry definující čočku jsou $h = 90$, $u = 20$ a $\varepsilon_r = 2,52$. Poloměr podstavy v je zkoumán pro hodnoty $v \in [14; 15; 16; 18; 20]\text{mm}$. Varianta $v = 20\text{mm}$ je nejlepší čočka z předchozího bodu, která se podobá válci. Na obrázku 2.42 je vidět, že se zmenšující se podstavou se vlastnosti čočky ještě zlepšují a pro $v \leq 15$ se ekvifázový střed dostává od určitého místa až za úroveň plechu.



Obrázek 2.42: Průběh polohy ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro čočku s $h = 90$, $u = 20$, $\varepsilon_r = 2,52$, $u_k = 0\text{mm}$ pro různé hodnoty v , $f = 10\text{GHz}$.

Čočka s poloměrem podstavy $v = 15$ se jeví jako nejlepší. Při poloze plechu je střed ekvifáze téměř u plechu a chyba měření by mohla být velmi dobře eliminována.

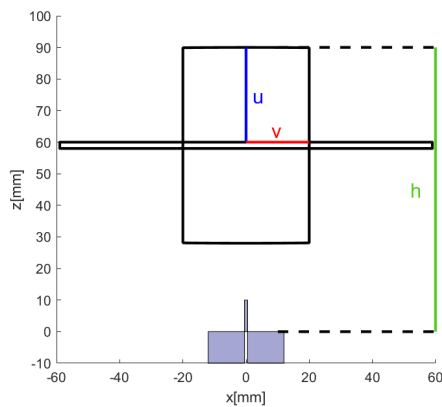
Struktura je zobrazena v H rovině na obrázku 2.43 společně s ekvifázovou křivkou v místě zrcadlové čočky pro polohu plechu $l = 135\text{mm}$.



Obrázek 2.43: Čočka tvaru kužele s parametry $v = 15\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $e = 25$, $v_2 = 20\text{mm}$, $u_k = 0\text{mm}$, $f = 10\text{GHz}$.

2.10.3 Válcová čočka

Podmnožinou čočky typu kužele je válcová čočka. Na větším vzorku válcových čoček můžeme pozorovat zajímavý jev. Čočku válcového typu lze definovat pouze čtyřmi parametry a demonstrace zjištěných poznatků tak bude přehlednější.

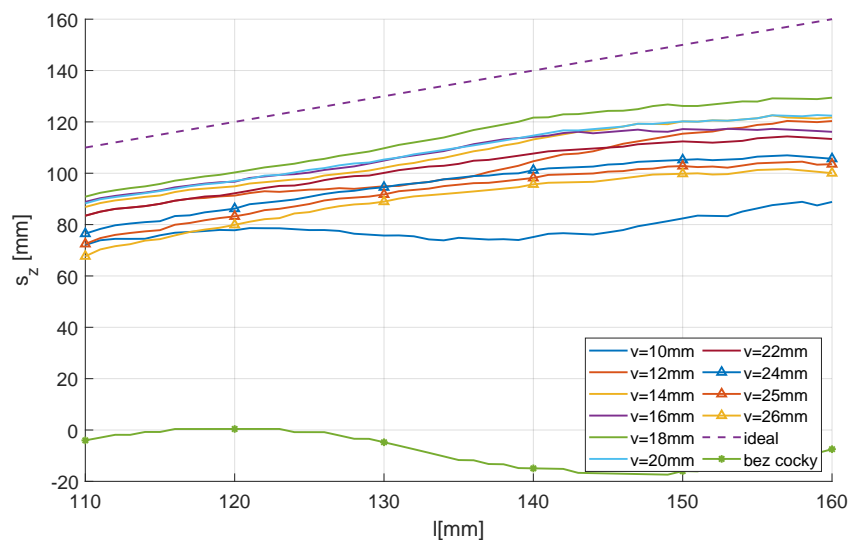


Obrázek 2.44: Profil válcové čočky, parametrický popis.

Optimální velikost podstavy pro danou výšku čočky

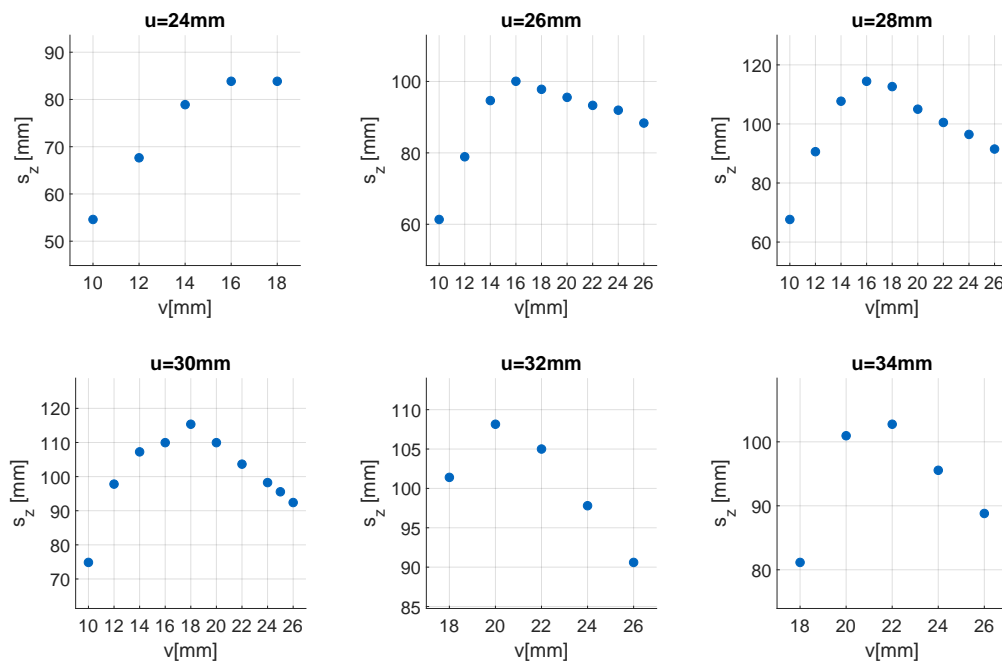
Ukazuje se, že pro každou výšku čočky u je jiná optimální velikost poloměru podstavy v . Průběhy pro různé v jsou ukázány na příkladu čočky definované parametry $h = 90\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\varepsilon_r = 2,52$ pro hodnoty v od $v = 10$ do $v = 26\text{mm}$. Průběhy

jsou zobrazeny na obrázku 2.45. Z obrázku je patrné, že nejvhodnější poloměr podstavy bude pro takto definovanou čočku $v = 18\text{mm}$.



Obrázek 2.45: Poloha ekvifázového středu pro válcovou čočku s parametry $h = 90\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $varepsilon_r = 2,52$ pro různé poloměry podstavy v , $f = 10\text{G}$.

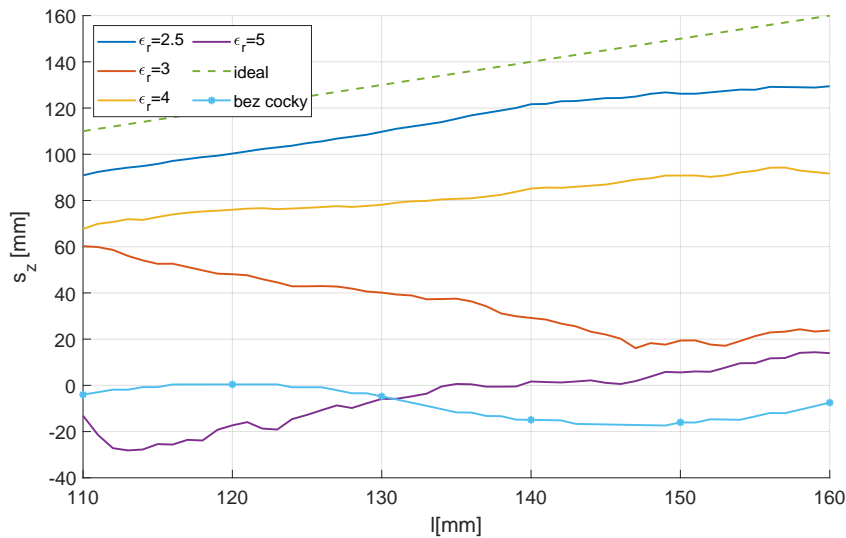
Pro další čočky s různými výškami u jsou na obrázku 2.46 pouze polohy ekvifázového středu pro různá v v poloze plechu $l = 135\text{mm}$. Stojí za povšimnutí, že pro $u \geq 30$ u prozkoumaného vzorku platí, že nejlepší poloměr pak vychází $v \doteq u - 12\text{mm}$.



Obrázek 2.46: Poloha středu ekvifáze v závislosti na velikosti poloměru podstavy čočky v pro různé výšky čočky u , $f = 10\text{GHz}$.

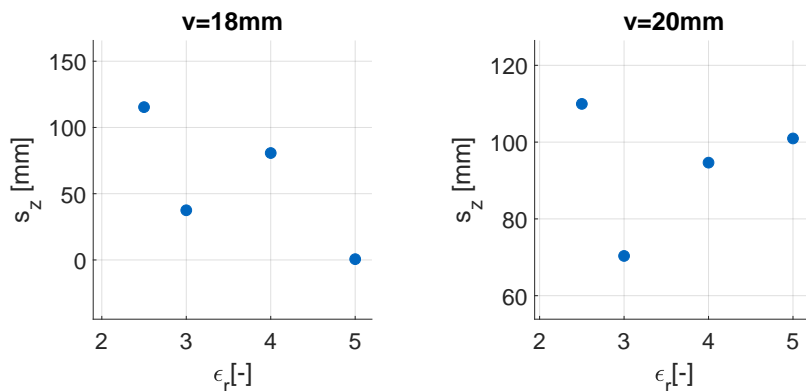
2.10.4 Vliv velikosti permitivity

Posledním parametrem, jehož vliv na kvalitu kuželové čočky zde bude rozebrán, je permitivita. Čočky tvaru kužele, které mají kulový vrchlík a šikmé stěny, jsou svým tvarem relativně podobné čočkám tvaru kulové úseče nebo paraboloidu a v důsledku toho mají i podobné vlastnosti. Vliv permitivity tedy bude ukázán na čočce tvaru válce. Na obrázku 2.47 jsou zobrazeny průběhy pro válcovou čočku definovanou parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 18\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$ a relativní permitivita je zkoumána pro hodnoty od $\epsilon_r = 3$ do $\epsilon_r = 5$. Do průřezu je také zahrnuta čočka s permitivitou $\epsilon_r = 2,52$.



Obrázek 2.47: Poloha středu ekvifáze s_z podle polohy plechu l pro válcovou čočku s parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 18\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$ pro různé permitivity, $f = 10\text{GHz}$.

Je vidět, že čočka o permitivitě $\epsilon_r = 2,52$ je nejlepší a u permitivit $\epsilon_r = 3$ a ϵ_5 jsou vidět skokové propady. Zajímavé je, že u čočky, která má poloměr podstavy $v = 20\text{mm}$, tedy o 2mm větší, je průběh trochu jiný, jak je vidět na obrázku 2.48. U permitivity $\epsilon_r = 5$ není pokles vůbec patrný. Hodnoty v grafech jsou brány pro vzdálenost plechu $l = 135\text{mm}$.



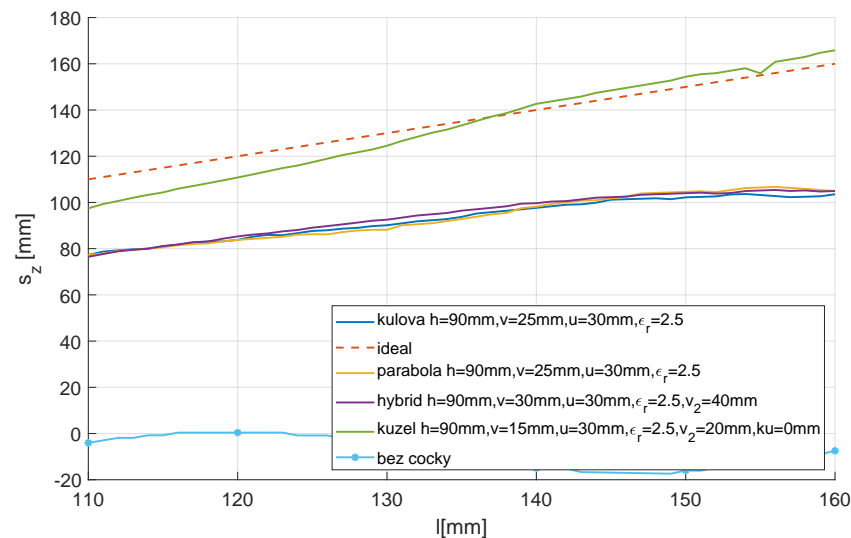
Obrázek 2.48: Poloha středu ekvifáze v závislosti na parametrech u a v pro vzdálenost plechu $l = 135$, $f = 10\text{GHz}$.

2.11 Shrnutí a rozbor všech čoček

V této podkapitole bude provedeno stručné shrnutí všech výsledků. Nejprve budou porovnány nejlepší čočky všech typů, pak budou diskutovány možné hypotézy vysvětlující vliv změny permitivity na chování čočky. Nakonec na čočky nahlédneme trochu jinou optikou než dosud.

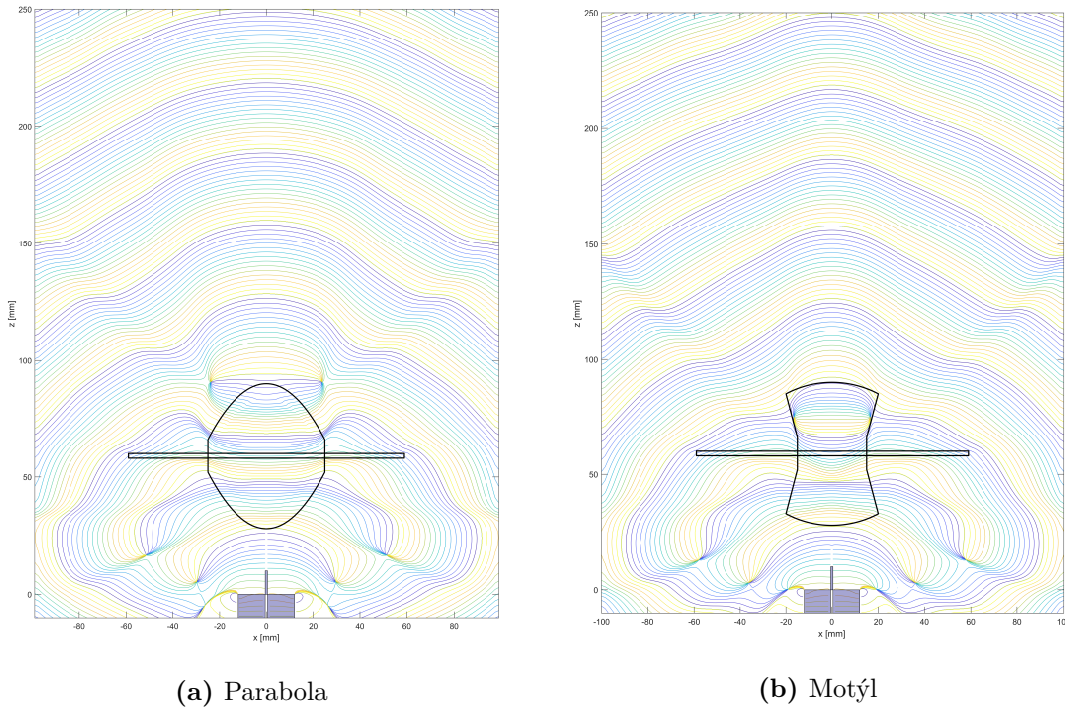
2.11.1 Porovnání nejlepších čoček

Pro lepší vzhled na vlastnosti prozkoumaných čoček je vhodné porovnat nejlepší dosažené výsledky v jednom grafu. Polohu středu ekvifáze u nejlepších čoček všech typů ukazuje obrázek 2.49.



Obrázek 2.49: Poloha ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro nejlepší nalezené čočky od každého typu, $f = 10\text{GHz}$.

Z obrázku je zřejmé, že u čoček tvaru kulové úseče, paraboly a kombinované čočky lze dosáhnout přibližně stejných výsledků, které jsou ovšem ještě poměrně daleko od optimálního průběhu. Čočka tvaru kužele, který má užší stranu u podložky, dokáže oproti tomu optimální průběh téměř kopírovat. Tento specifický typ čočky svým tvarem připomíná vázacího motýlka, můžeme o ní tedy pro zjednodušení mluvit jako o čočce *motýlího* typu. Po válcové čočce tak máme další podtyp čočky tvaru kužele. Čočka motýlího typu se klasické čočce vůbec nepodobá a výsledek je tedy velmi překvapivý. Porovnání vyzařovaných ekvifázových vlnoploch je zobrazeno na obrázku 2.50, pro čočku motýlího typu a čočku tvaru paraboloidu.



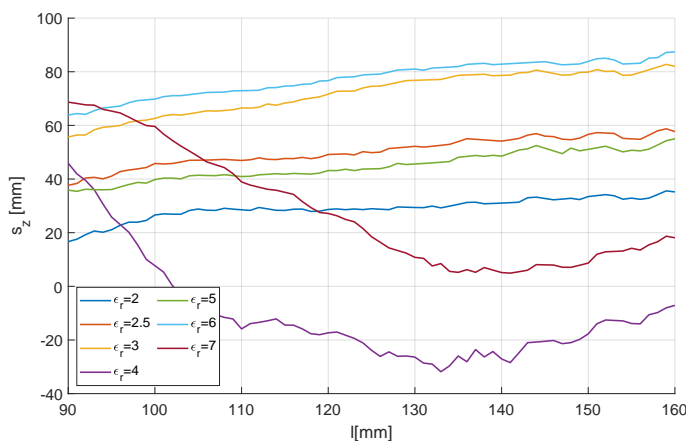
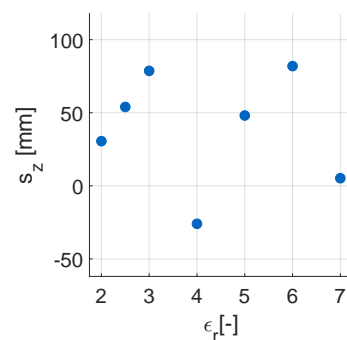
Obrázek 2.50: Porovnání vyzářovaných ekvifázových vlnoploch pro nejlepší motýlí čočku a čočku tvaru paraboloidu, $f = 10\text{GHz}$.

2.11.2 Diskuze vlivu permitivity

V kapitolách 2.7.4 a 2.10.4 byly ukázány závislosti polohy středu ekvifází na permitivitě čočky. Prezentované výsledky byly ovšem na první pohled těžko vysvětlitelné a nebyly hlouběji diskutovány. Je tedy vhodné se nad nimi nyní zamyslet a vyslovit hypotézy vysvětlující sledované jevy. Nejprve se pokusíme vysvětlit výsledky analýzy u konkrétního případu parabolické čočky.

Parabolická čočka, na které budeme vliv permitivity pozorovat, je definovaná parametry $h = 70\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 25\text{mm}$ a hodnoty permitivity jsou od $\varepsilon_r = 2$ do $\varepsilon_r = 7$. Průběhy polohy středu podle polohy plechu jsou zobrazeny na obrázku 2.58a. Je vidět, že u hodnot permitivity $\varepsilon_r = 3$ a $\varepsilon_r = 7$ dochází k podivným propadům a při ostatních hodnotách poloha ekvifázového středu relativně náhodně skáče. Jev pak lépe ilustruje obrázek 2.53b, kde je zobrazena závislost polohy středu na permitivitě pro vzdálenost plechu $l = 135\text{mm}$.

Vypadá to, že s rostoucí permitivitou kvalita čočky vždy chvíli roste a pak dojde k náhlému propadu. Je zajímavé dát si tyto výsledky do souvislosti s elektrickou délkou čočky, případně ji porovnat s elektrickou délkou volného prostoru. Elektrické délky čočky ve směru osy z jsou pro použité permitivity vyneseny v tabulce 2.1. Jako jednotky jsou použity vlnové délky na frekvenci $f = 10\text{GHz}$. Délky, které mají za desetinou čárkou podobné hodnoty, jsou vyznačeny stejnou barvou. Na obrázku 2.53b je vidět, že čočky s těmito permitivitami vykazují i podobné vlastnosti. Zdá se tedy, že chování čočky se nějakým způsobem opakuje s rostoucí elektrickou délkou (ve směru osy z) s periodou 1λ .

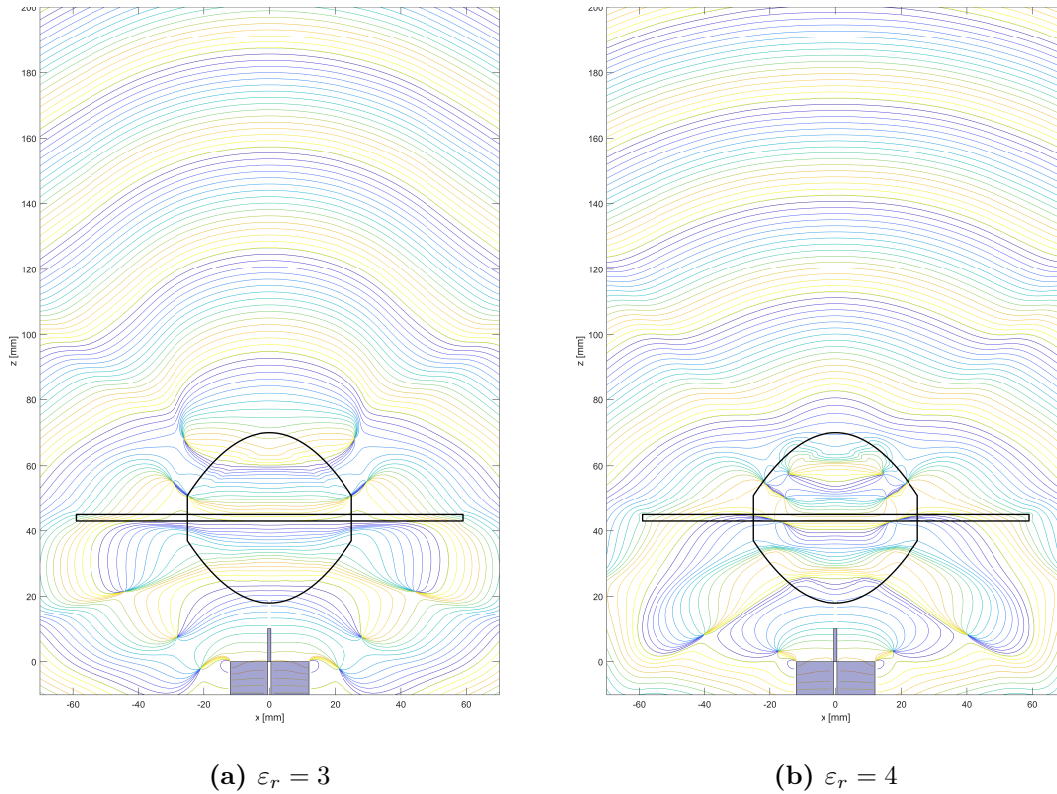
(a) s_z podle l (b) s_z pro $l = 135\text{mm}$

Obrázek 2.51: Poloha středu ekvifází s_z pro parabolickou čočku s $h = 70\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 25\text{mm}$ pro různé hodnoty ϵ_r .

$\epsilon_r [-]$	$l_e [\lambda @ 10\text{GHz}]$	$l_e - l_{e1} [\lambda @ 10\text{GHz}]$
1,00	1,67	0,00
2,00	2,26	0,60
2,50	2,51	0,84
3,00	2,73	1,06
4,00	3,13	1,46
5,00	3,48	1,81
6,00	3,80	2,13
7,00	4,10	2,43

Tabulka 2.1: Tabulka elektrických délek pro různé permitivity čočky s $u = 25\text{mm}$.

Na obrázku 2.58 jsou zobrazeny vyzařované ekvifázové vlnoplochy pro zkoumanou parabolickou čočku s permitivitou $\epsilon_r = 3$ a $\epsilon_r = 4$. Podle obrázků i podle zjištěných poznatků lze vyslovit tuto hypotézu: Vyzařovaná vlnoplocha je tvořena na základě dvou efektů. Prvním je fokusace čočky. Druhým je sčítání vlny, která čočkou prochází a vlny, která čočku obtéká. Vliv fokusace čočky bude klesat se zmenšujícími se rozměry čočky, zejména horizontálními, a se zmenšujícím se zakřivením čočky. O to více se bude uplatňovat efekt kombinace prošlé a obteklé vlny. To by znamenalo, že se vlastnosti malých čoček nezanedbatelně mění s frekvencí. Pak je tedy zřejmé, že pokud bude mít navržená čočka horizontálně menší rozměry, bude také úzkopásmovější. V dalším bodě této kapitoly bude mimo jiné ukázána závislost chování vybraných čoček na frekvenci.

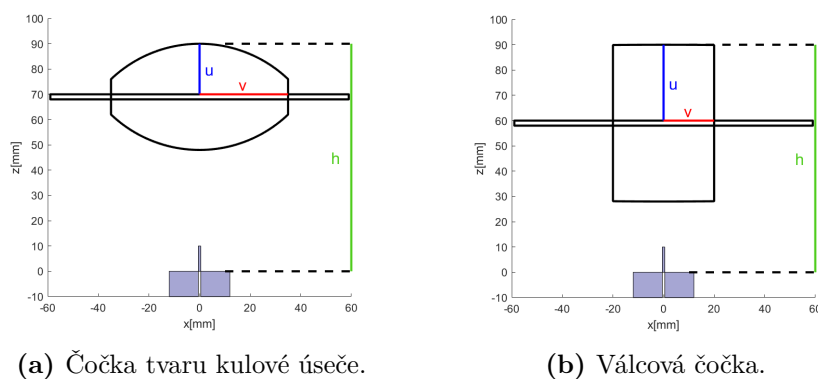


Obrázek 2.52: Vyzařované ekvifázové vlnoplochy s použitím parabolické čočky s parametry $h = 70\text{mm}$, $v = 25\text{mm}$, $u = 25\text{mm}$ pro různé permitivity, $f = 10\text{GHz}$.

2.11.3 Další aspekty čoček ovlivňující měření

Průzkum čoček byl zaměřen pouze na zakřivení ekvifázových vlnoploch na frekvenci $f = 10\text{GHz}$. V duchu komplexnosti je vhodné doplnit průzkum o frekvenční vlastnosti vybraných čoček v rámci měřicího frekvenčního spektra $f \in (8; 12, 5)\text{GHz}$.

Pro demonstraci těchto vlastností čoček byly vybrány dvě čočky s velmi odlišnými parametry, aby se mohly dobře porovnat jejich vlastnosti. Je to čočka typu kulové úseče definovaná parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 35\text{mm}$, $u = 20\text{mm}$, $\epsilon_r = 2,52\text{mm}$ a válcová čočka s parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\epsilon_r = 2,52\text{mm}$. Pro porovnání jsou zobrazeny na obrázku.

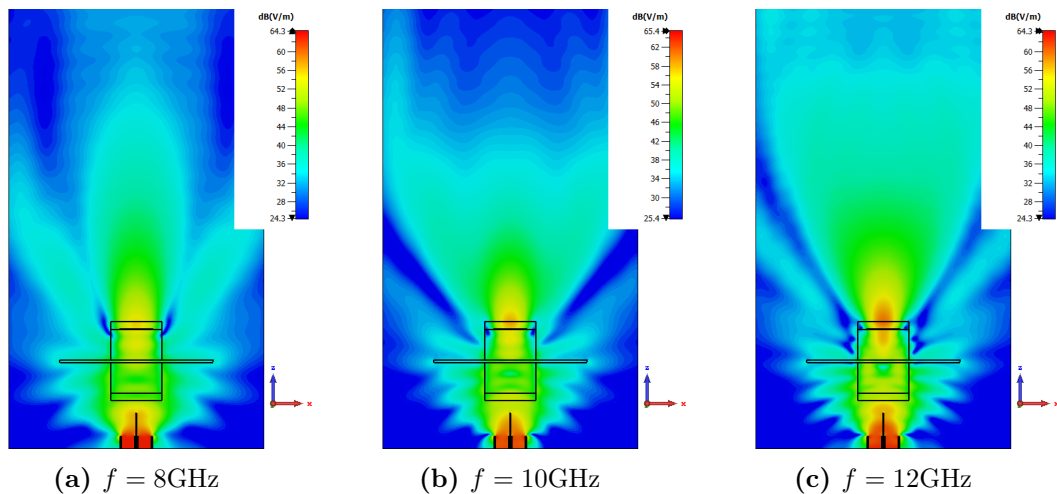


Obrázek 2.53: Profil vybrané válcové čočky a čočky tvaru kulové úseče.

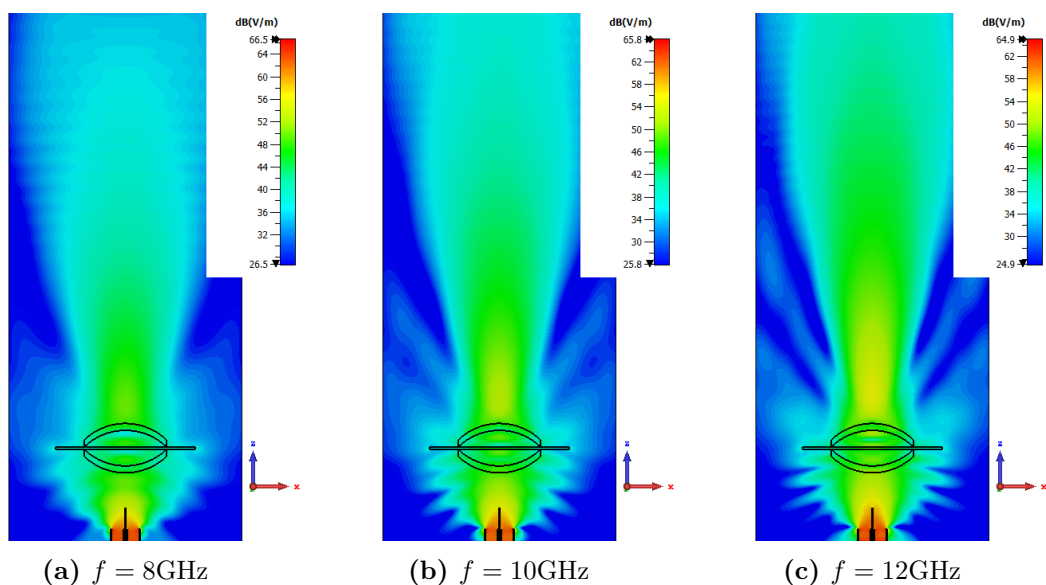
Vyzařovací vlastnosti čoček

V interferenčním měření je důležitá shodná amplituda referenčního a testovacího signálu. Měření je také velmi citlivé a mohou ho ovlivnit různé parazitní odrazy od okolních objektů, proto je nejlepší co nejostřejší vyzařovací charakteristika. Z těchto důvodů je vhodné ukázat absolutní hodnotu vyzařovaného pole.

Na obrázcích 2.54, respektive 2.55 je vidět, že úzká kulová čočka fokusuje energii mnohem lépe a poměrně konzistentně v celém frekvenčním spektru. Čočka tvaru válce oproti tomu vyzařované pole téměř nefokusuje a vyzařovací charakteristika se s frekvencí mění.



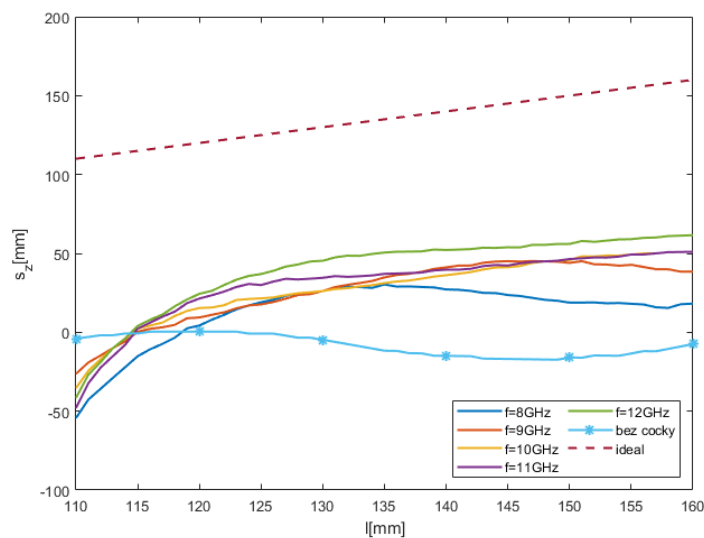
Obrázek 2.54: Absolutní hodnota vyzařovaného elektrického pole v dB pro čočku tvaru válce s parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\epsilon_r = 2,52$ na různých frekvencích.



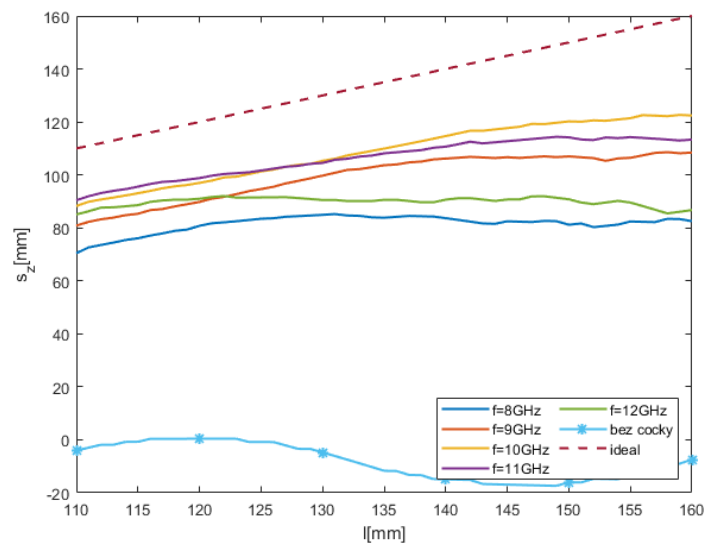
Obrázek 2.55: Absolutní hodnota vyzařovaného elektrického pole v dB pro oboustrannou čočku tvaru kulové úseče s parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 35\text{mm}$, $u = 20\text{mm}$, $\epsilon_r = 2,52$ na různých frekvencích.

Kvalita čoček v závislosti na frekvenci

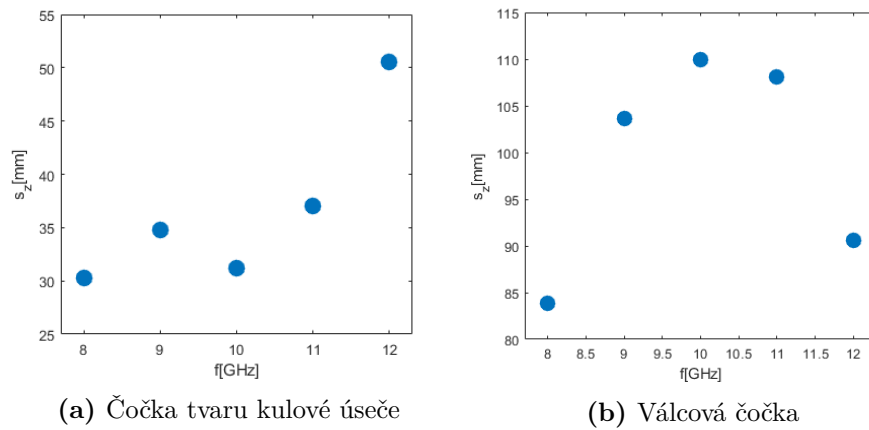
Na závěr druhé kapitoly budou ukázány kvality vybraných čoček tvaru kulové úseče a tvaru válce v závislosti na frekvenci. Na obrázcích 2.56, respektive 2.57 je vidět, že kvalita čočky tvaru válce je lepší v celém frekvenčním spektru a pro všechny polohy plechu. Změna vlastností čoček s frekvencí je pak lépe zobrazena na obrázku 2.58b. Podle grafů na obrázku lze říci, že kvalita čočky tvaru kulové úseče má tendenci s frekvencí růst. Bude to nejspíš tím, že u této čočky převládá efekt fokusace. Čočka tvaru válce oproti tomu funguje nejlépe v pásmu okolo $f = 10\text{GHz}$. To je pravděpodobně způsobeno tím, že u této čočky převládá efekt prošlé a obtékající vlny a čočka má pak vhodnou elektrickou délku pouze v tomto pásmu.



Obrázek 2.56: Poloha ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro čočku tvaru kulové úseče na různých frekvencích



Obrázek 2.57: Poloha ekvifázového středu s_z podle polohy plechu l pro čočku tvaru válce na různých frekvencích.



Obrázek 2.58: Poloha ekvifázového středu s_z při poloze plechu $l = 135\text{mm}$ pro zkoumané čočky.

Kapitola 3

Experimentální měření

V této kapitole bude popsáno experimentální měření, které prověří vlastnosti vybraných čoček. Čočky byly zkoumány převážně z hlediska schopnosti natvarování ekvifázové charakteristiky. Měření ukáže, jak se tato schopnost skutečně projeví na velikosti chyby při vychýlení měřeného plechu a jaký vliv mají ostatní vlastnosti čočky, jako například vyzařovací charakteristika.

V rámci měření byla přeměřena i permitivita materiálu z 3D tiskárny. Toto měření bude uvedeno na začátku a pak se kapitola bude věnovat čočkám. Nejprve bude stručně popsán výběr testované čočky, pak se zaměříme na koncepci měřící aparatury. Výsledky měření budou uvedeny všechny najednou bez větších komentářů a poté budou shrnuty a rozebrány.

3.1 Měření permitivity použitého materiálu

Měření permitivity použitého materiálu z 3D tiskárny bylo provedeno s pomocí dvou vytištěných hranolků. Hranolky byly navrženy tak, aby přesně pasovaly do vlnovodu typu R100. Princip měření permitivity spočíval v přeměření S-parametrů dvou různých úseků vlnovodu s těmito hranolky uvnitř. Změřené parametry byly importovány do programu AWR design environment, kde byla provedena simulace na shodných úsecích vlnovodných vedení jako při měření. Permitivita uvnitř simulovaných vedení byla měněna, dokud nebylo dosaženo shody měřených a simulovaných S-parametrů. Tato hodnota permitivity pak odpovídá permitivitě materiálu z tiskárny.

Pro měření byly použity následující komponenty:

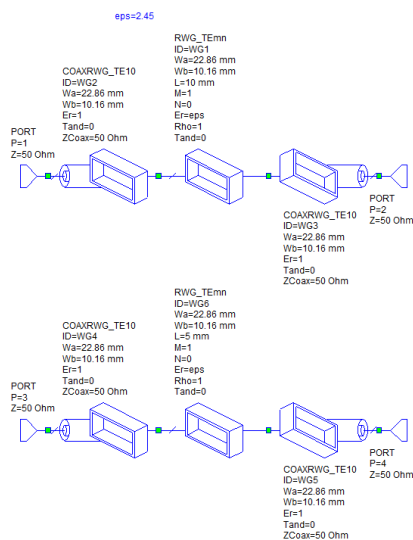
1. Vektorový analyzátor *Agilent Technologies E8364A*.
2. 2x Koaxiální kabely *Agilent*
3. 2x propojka koaxial-R100
4. vlnovodné vedení R100 dlouhé 5mm, respektive 10mm

5. 2x vytištěný hranolek dlouhý 5mm, respetive 10mm

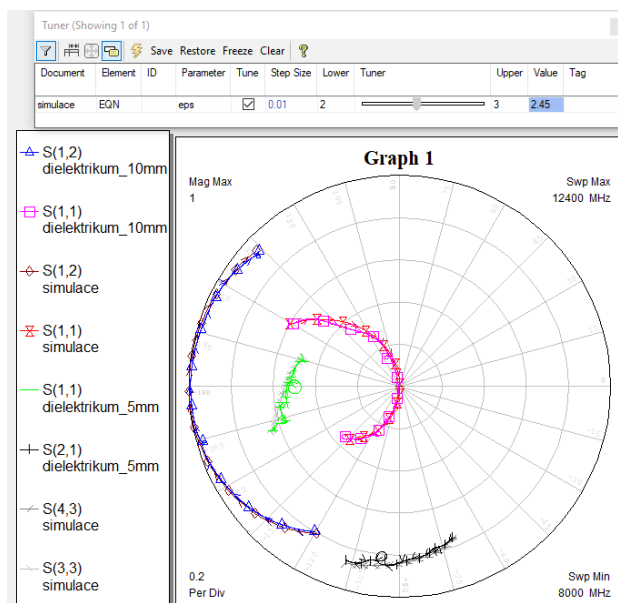
Vektorový analyzátor byl kalibrován ve frekvenčním pásmu $f \in (8; 12, 4)$ GHz metodou TLR (kalibry *Through, reflect, line*). Permitivita byla v simulaci měněna s pomocí tuneru s krokem 0,01. Nalezená permitivita, na které došlo k nejlepší shodě, byla rovna:

$$\epsilon_r = 2,45$$

Výsledná shoda naměřených a simulovaných parametrů je ukázána v polárním grafu na obrázku 3.2. Schema, které bylo při simulaci použito, je na zobrazeno na obrázku 3.1. Relativní permitivita tištěného materiálu je tedy o 0,07, než u materiálu použitého v simulacích v CST (při simulacích byla uvažována permitivita tištěného materiálu $\epsilon_r = 2,52$).



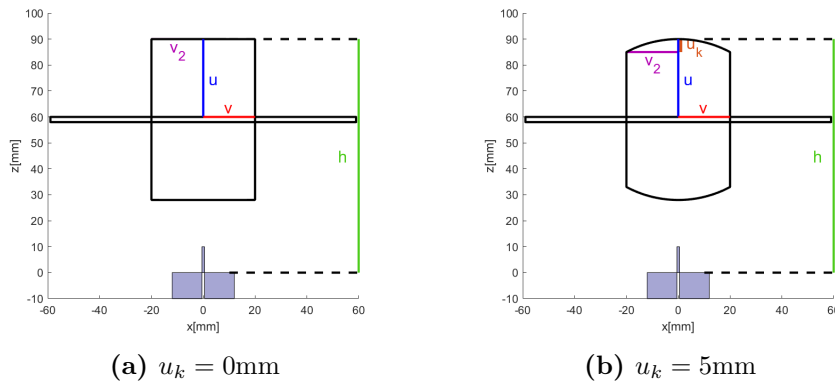
Obrázek 3.1: Měření permitivity - schema v AWR.



Obrázek 3.2: Měření permitivity - shoda naměřených a simulovaných S-parametrů.

3.2 Výběr čočky pro měření

V průzkumu čoček simulacemi v CST a následnou analýzou byl prozkoumán poměrně velký vzorek různých typů čoček. Jako nejlepší čočka z hlediska kompenzace chyby natvarováním ekvifázové charakteristiky se ukázala motýlí čočka popsaná v kapitole 2.10.2. Pro měření však byly vybrány zvoleny dvě čočky tvaru válce, protože čočka motýlího typu byla objevena až po zadání tisku. Tyto čočky však mají oproti čočce motýlího typu trochu ostřejší vyzařovací charakteristiku a jejich vlastnosti jsou z hlediska polohy ekvifázového středu stále dobré. Na jedné válcové čočce byl navíc kulový vrchlík. Čočky jsou definovány parametry $h = 90\text{mm}$, $v = 20\text{mm}$, $u = 30\text{mm}$, $\varepsilon_r = 2,52$ a $u_k = 0$, respektive $u_k = 5$. Profily těchto čoček s prostorovými parametry ukazují obrázek 3.3.



Obrázek 3.3: Profily čoček vybraných na tisk.

Válcová čočka s kulovým vrchlíkem má trochu horší vlastnosti, co do zakřivení ekvifázové vlnoplochy, jak je popsáno v sekci 2.10.1. Čočka byla do měření vybrána, aby bylo možné pozorovat vliv fokusace pole. Předpokládáme, že kulový vrchlík bude fokusaci vylepšovat.

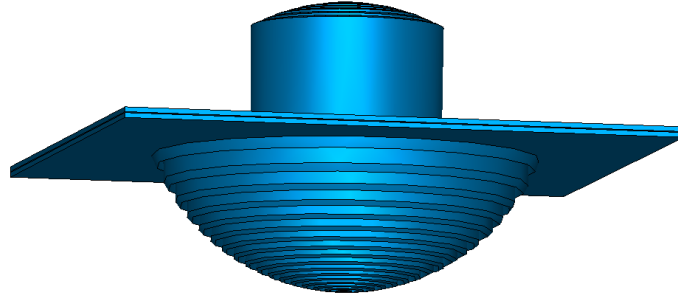
Na tisk pomocí 3D tiskárny byly připraveny pouze poloviny těchto čoček, které se byly vytištěny dvakrát. Čočka pak vznikla přiložením obou polovin k sobě. Návrh drážkové antireflexní vrstvy byl koncipován s ohledem na rozlišení 3D tiskárny. Použitá šířka přepážek mezi drážkami tak byla zvolena na hodnotu $0,93\text{mm}$. Šířka drážek pro správnou průměrnou permitivitu dle (1.11) pak vychází na $1,46\text{mm}$. Návrhy poslané do tisku ukazují obrázek 3.7.



Obrázek 3.4: Modely čoček poslané do tisku.

V laboratoři byla přítomna také starší čočka, která byla vytisknuta během experimentálního průzkumu, který předcházela této práci. Tato čočka má tvar kulové

úseče s výškou $u = 23\text{mm}$ a poloměrem podstavy $v = 35\text{mm}$. V měření byla použita v kombinaci s válcovou čočkou s kulovým vrchlíkem $u_k = 5\text{mm}$, jak je vidět na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Čočka vzniklá kombinací válce s kulovým vrchlíkem a kulové úseče.

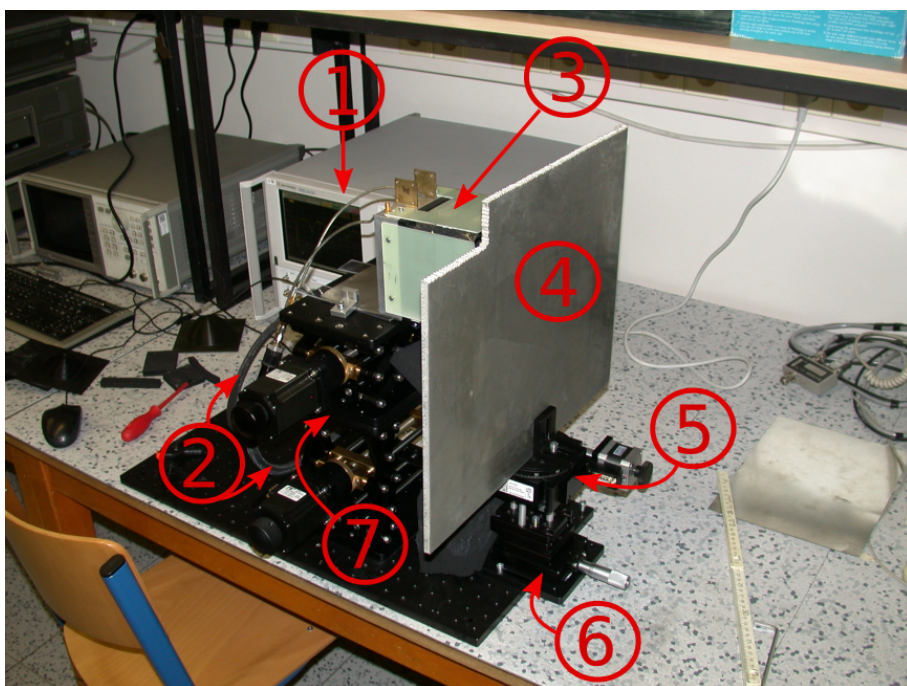
3.3 Popis měřící aparatury a kalibrace

Při měření je třeba ověřit velikost chyby při náklonu odrazného plechu. Za tímto účelem byla postavena měřící sestava skládající se z následujících komponent:

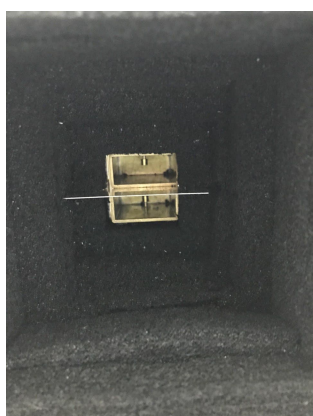
1. Vektorový analyzátor *Agilent Technologies E8364A*
2. 2x Koaxiální kabely *Agilent*
3. Mikrovlnný senzor se dvěma vlnovody R100 rozdělenými kovovou přepážkou, umístěný v konstrukci vyplněné absorbačním materiálem
4. Odrazný plech
5. Rotační pozicioner
6. Lineární pozicioners rozsahem 25mm
7. 2x podstavec s vertikálním posuvem

Pro konstrukci sestavy byly použity další drobné komponenty (například šroubky, podložky, pomocné desky, pravoúhlé úchyty atd.).

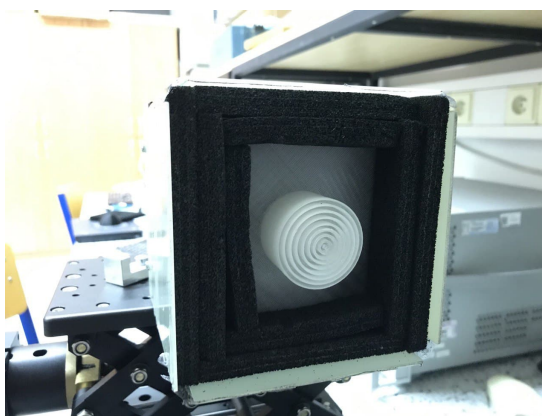
Postavená měřící soustava je zobrazena na obrázku 3.6. Odrazný plech (4) je uchycen na rotačním pozicioneru(5), který slouží pro přesné vychýlení plechu z osy vyzařování. Pod rotačním pozicionerem je lineární pozicioner(5). Rozsah lineárního pozicioneru je menší než oblast předpokládaného výskytu plechu. Vzdálenost je tedy vždy nastavena ručně posunutím celé sestavy pod plechem a pozicioner slouží pouze pro přesné změny vzdálenosti. Vlnovodný senzor je upevněný v hranatém držáku(3), kde je obklopený absorbním materiálem. Koaxiální kabely(2) s přechodovými spojkami připojují senzor do vektorového analyzátoru(1).



Obrázek 3.6: Měřící sestava.



(a) Vlnovody R100 s kovovou přepážkou.



(b) Čočka umístěná nad měřicí anténou.

Obrázek 3.7: Soustava měřících vlnovodů obklopená absorbním materiálem a přidaná čočka.

Kalibrace

Vektorový analyzátor byl kalibrován metodou OSM unknown Thru (kalibry *open*, *short*, *match*, *through* a propojka neznámé délky) na konci testovacích kabelů pro frekvenční pásmo $f \in (8; 13)$ GHz. Výsledky byly zpracovávány pouze v pásmu $f \in (8; 12, 5)$ GHz, které se při použití vlnovodů R100 v praxi používá.

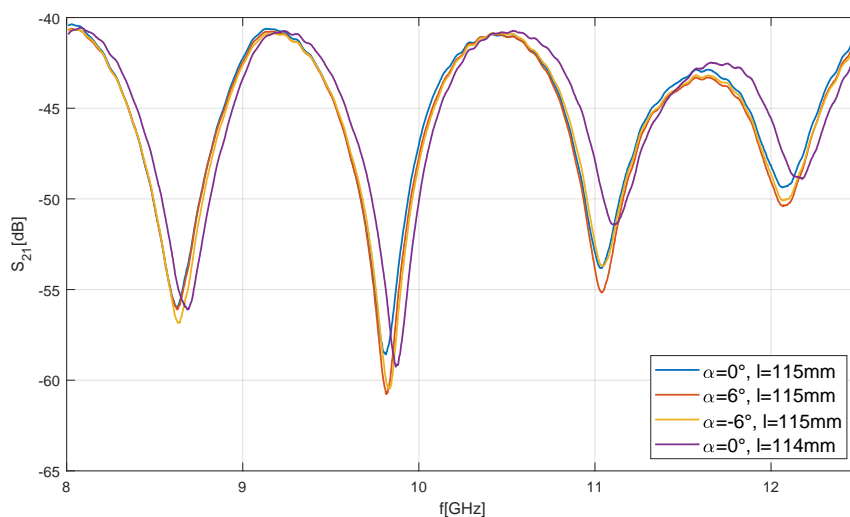
3.4 Výsledky měření

Výsledky měření budou postupně uvedeny zvlášť pro každou měřenou čočku a nakonec budou porovnány získané průměrné hodnoty. Pro každou čočku bylo provedeno měření pro tři polohy plechu $l = [115; 135; 155]$ mm. V každé poloze byl pak měřen přenos S_{21} při vychýlení plechu o $\alpha = [-6; 0; 6]^\circ$. Jako výsledná chyba se brala průměrná z obou směrů vychýlení plechu. V každé poloze byla poloha senzoru ručně doladěna, aby vyzařované pole směřovalo co možná nejvíc do osy otáčení plechu. Poloha se ladila při sledování pohybu jednoho lokálního minima ve frekvenčním spektru. Byla ustálena v poloze, kdy se minimum pohybovalo co možná nejpodobněji při otáčení plechu na obě strany. Pro určení velikosti chyby δl při vychýlení plechu byl pro každou polohu změřen přenos s plechem o 1mm blíž v nevychýlené poloze. U každého minima tak byla určena závislost polohy minima ve frekvenčním spektru na poloze plechu l , na základě které byla posléze určena chyba. V rámci změny vzdálenosti 1mm lze tuto závislost považovat za lineární. Za výslednou chybu byl považován průměr chyb při $\alpha = 6^\circ$ a $\alpha = -6^\circ$.

Protože v praxi se očekává maximální vychýlení plechu menší, je v tabulkách uvedena i přepočtená hodnota pro vychýlení $\alpha_{max} = 1^\circ$. Zdánlivá vzdálenost plechu se při vychýlení zmenšuje s $\cos \alpha$. Chybu lze tedy snadno přepočítat vynásobením konstantou:

$$K = \frac{1 - \cos(1^\circ)}{1 - \cos(6^\circ)}$$

Při použití testovaných čoček nebyl interferenční průběh vždy ideální. Proto byla chyba počítána pouze u těch minim, která byla hlubší než $15dB$. Pro ilustraci kvality interferenčního přenosu budou ukázány kromě získaných hodnot také měřené průběhy S_{21} . Výsledky měření budou diskutovány v další podkapitole.

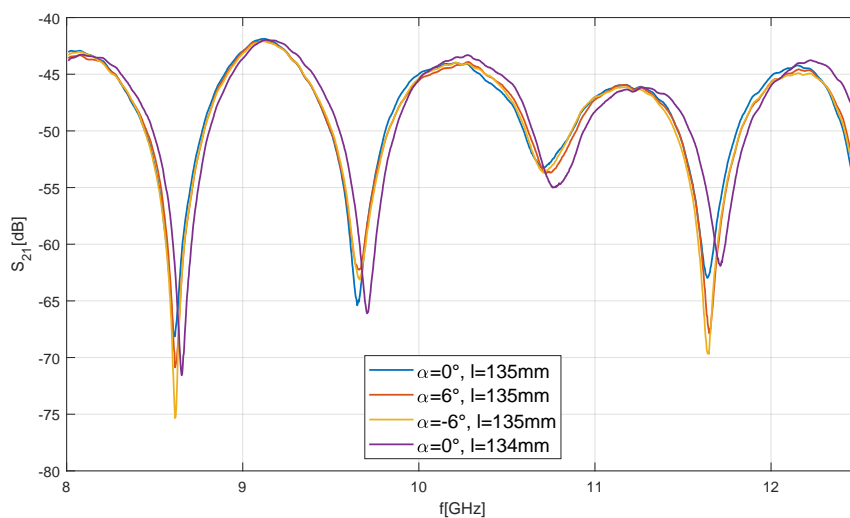


Obrázek 3.8: Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem pro vzdálenost plechu $l = 115\text{mm}$.

f [GHz]	δl [μm]@ $+6^\circ$	δl [μm]@ -6°	δl_{av} [μm]@ $\pm 6^\circ$	δl [μm]@ 1°
8,631	-56	56	0	0
9,813	56	333	194	5

Tabulka 3.1: Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 115\text{mm}$ s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem.

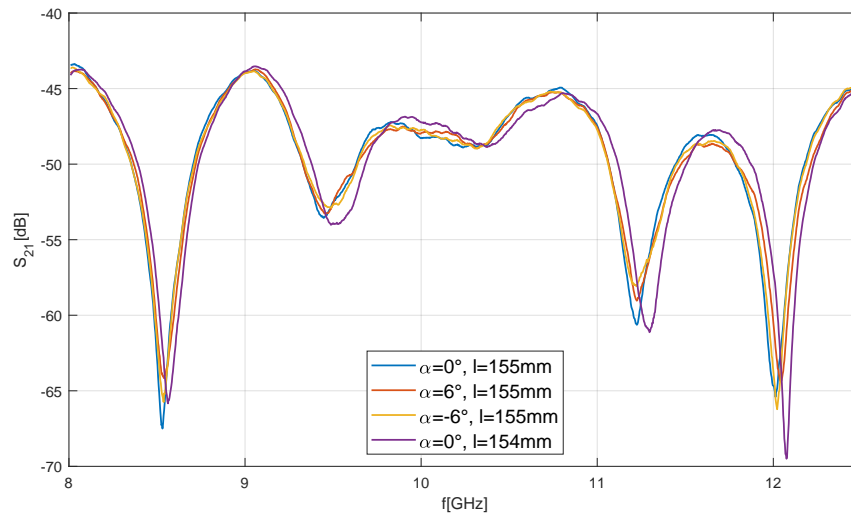
Válcová čočka s kulovým vrchlíkem



Obrázek 3.9: Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem pro vzdálenost plechu $l = 135\text{mm}$.

f [GHz]	δl [μm]@ $+6^\circ$	δl [μm]@ -6°	δl_{av} [μm]@ $\pm 6^\circ$	δl [μm]@ 1°
8,616	0	0	0	0
9,650	222	278	250	7
11,638	167	125	146	4
12,547	250	214	232	6

Tabulka 3.2: Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 135\text{mm}$ s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem.

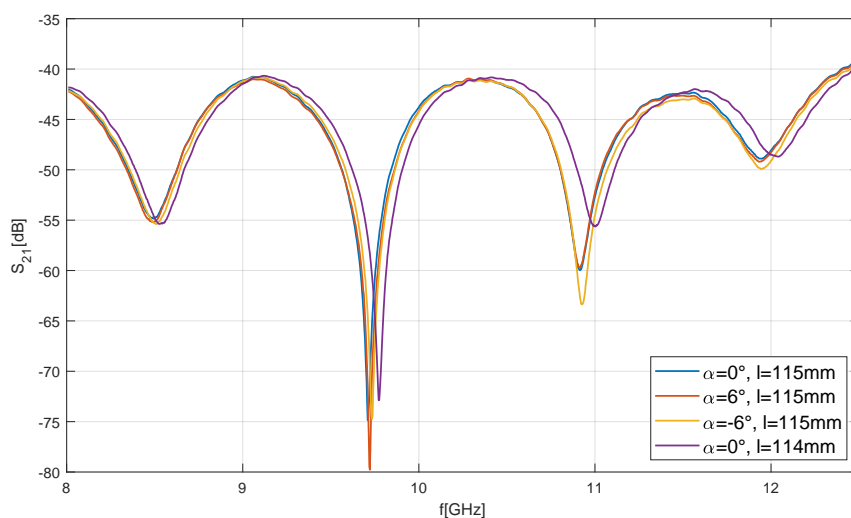


Obrázek 3.10: Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem pro vzdálenost plechu $l = 155\text{mm}$.

f [GHz]	δl [μm]@ $+6^\circ$	δl [μm]@ -6°	δl_{av} [μm]@ $\pm 6^\circ$	δl [μm]@ 1°
8,531	300	200	250	7
11,225	0	0	0	0
12,013	500	150	325	9

Tabulka 3.3: Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 155\text{mm}$ s čočkou tvaru válce s kulovým vrchlíkem.

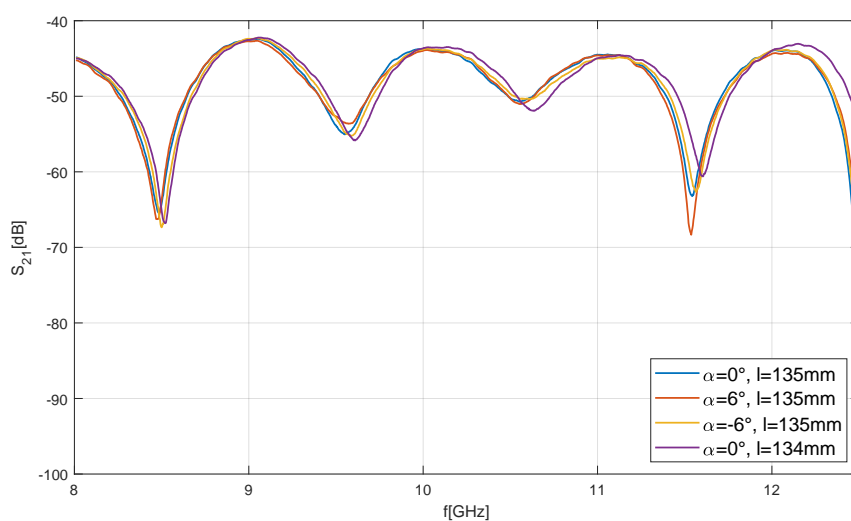
Válcová čočka bez kulového vrchlíku



Obrázek 3.11: Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce pro vzdálenost plechu $l = 115\text{mm}$.

f [GHz]	δl [μm]@ $+6^\circ$	δl [μm]@ -6°	δl_{av} [μm]@ $\pm 6^\circ$	δl [μm]@ 1°
8,494	100	400	250	7
9,709	200	400	300	8
10,916	0,0	143	71	2

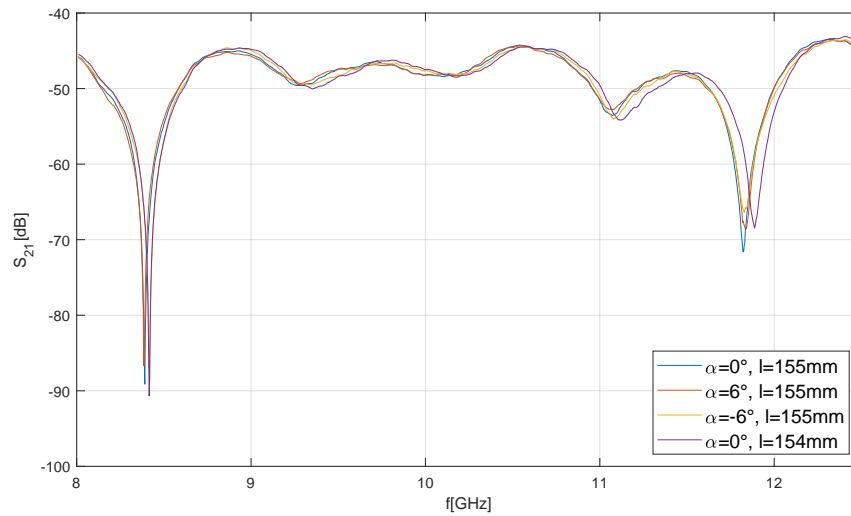
Tabulka 3.4: Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 115\text{mm}$ s čočkou tvaru válce.



Obrázek 3.12: Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce pro vzdálenost plechu $l = 135\text{mm}$.

f [GHz]	δl [μm]@ $+6^\circ$	δl [μm]@ -6°	δl_{av} [μm]@ $\pm 6^\circ$	δl [μm]@ 1°
8,484	-167	417	125	3
11,544	-100	350	125	3
12,484	182	91	136	4

Tabulka 3.5: Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 135\text{mm}$ s čočkou tvaru válce.

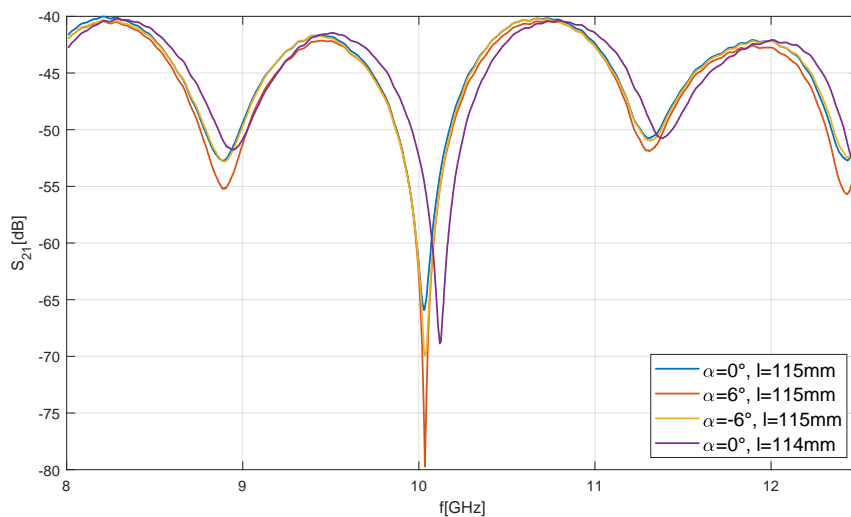


Obrázek 3.13: Přenosy S_{21} s čočkou tvaru válce pro vzdálenost plechu $l = 155\text{mm}$.

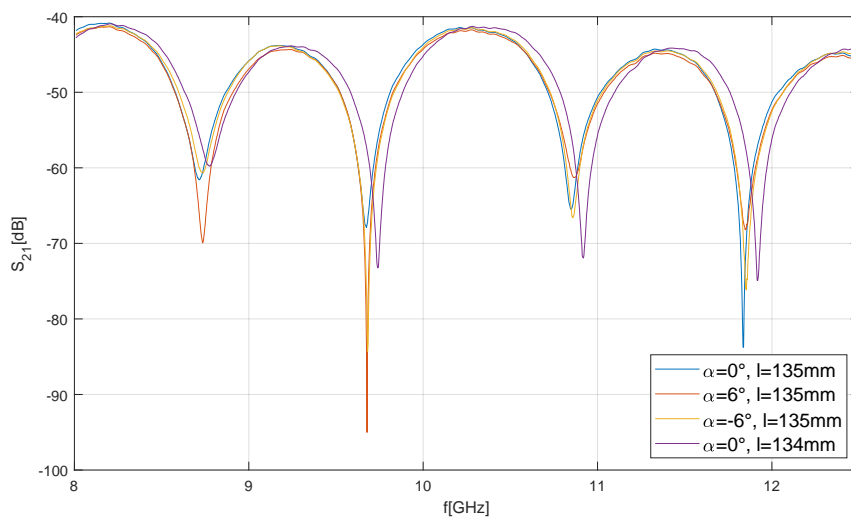
f [GHz]	δl [μm]@ $+6^\circ$	δl [μm]@ -6°	δl_{av} [μm]@ $\pm 6^\circ$	δl [μm]@ 1°
8,391	-250	1000	375	10
11,822	190	95	143	4
12,766	444	556	500	14

Tabulka 3.6: Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 155\text{mm}$ s čočkou tvaru válce.

Kombinovaná čočka tvaru kulové úseče a válce s kulovým vrchlíkem

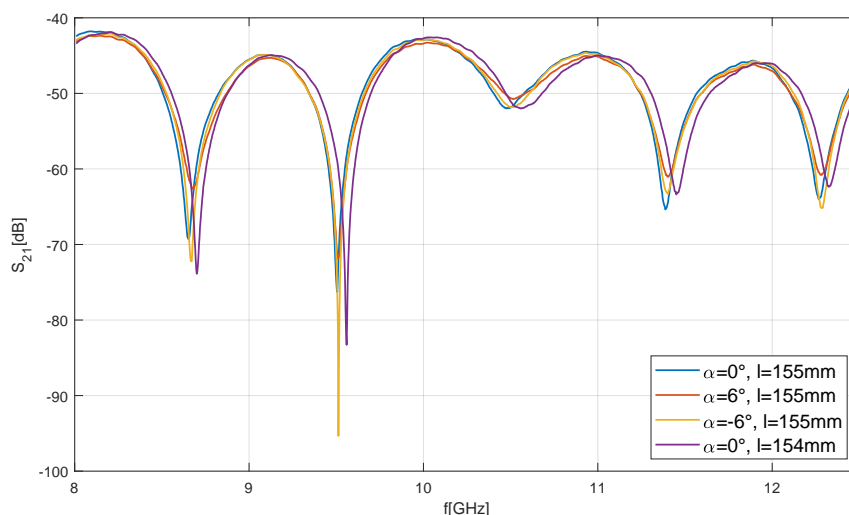
Obrázek 3.14: Přenosy S_{21} s kombinovanou čočkou pro vzdálenost plechu $l = 115\text{mm}$.

f [GHz]	δl [μm] @ $+6^\circ$	δl [μm] @ -6°	δl_{av} [μm] @ $\pm 6^\circ$	δl [μm] @ 1°
10,028	-6	-6	-6	0

Tabulka 3.7: Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 115\text{mm}$ s kombinovanou čočkou tvaru kulové úseče a válce s kulovým vrchlíkem.Obrázek 3.15: Přenosy S_{21} s kombinovanou čočkou pro vzdálenost plechu $l = 135\text{mm}$.

f [GHz]	δl [μm]@ $+6^\circ$	δl [μm]@ -6°	δl_{av} [μm]@ $\pm 6^\circ$	δl [μm]@ 1°
8,716	300	400	350	10
9,675	48	95	71	2
10,85	273	136	205	6
11,838	120	200	160	4

Tabulka 3.8: Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 135\text{mm}$ s kombinovanou čočkou tvaru kulové úseče a válce s kulovým vrchlíkem.



Obrázek 3.16: Přenosy S_{21} s kombinovanou čočkou pro vzdálenost plechu $l = 155\text{mm}$.

f [GHz]	δl [μm]@ $+6^\circ$	δl [μm]@ -6°	δl_{av} [μm]@ $\pm 6^\circ$	δl [μm]@ 1°
8,653	600	333	467	13
9,506	59	118	88	2
11,388	200	200	200	6
12,269	167	278	222	6

Tabulka 3.9: Naměřená a přepočtená chyba δl při vzdálenosti plechu $l = 155\text{mm}$ s kombinovanou čočkou tvaru kulové úseče a válce s kulovým vrchlíkem.

3.5 Shrnutí a rozbor výsledků měření

Tabulka 3.10 shrnuje průměrné velikosti chyb po přepočtu na vychýlení plechu $\alpha = 1^\circ$. Velikosti chyb jsou v řádu jednotek mikrometrů. Při pohledu na interferenční průběhy je vidět, že lokální minima jsou často velmi nevýrazná. To může být způsobeno například parazitními odrazy či frekvenční nestabilitou čočky. Nejhorší interferenční průběh nastal při použití čočky tvaru válce, při vzdálenosti plechu $l = 155\text{mm}$. Patrně je to způsobeno málo zaostřenou vyzařovací charakteristikou této čočky. Signál odražený od plechu tak bude moc slabý. Je vidět, že v blízkosti okrajových hodnot frekvenčního pásma $f \in (8; 12, 5)\text{GHz}$ je průběh lepší. Je to nejspíš

	$\delta l_{av} [\mu\text{m}] @ 1^\circ$		
	Válcová s vrchlíkem	Válcová bez vrchlíku	Kombinovaná
$l = 115\text{mm}$	2,5	5,7	0
$l = 135\text{mm}$	4,3	3,3	5,5
$l = 155\text{mm}$	5,3	9,3	6,8

Tabulka 3.10: Shrnutí průměrných výsledků všech měření.

tím, že vyzařovací charakteristika použité válcové čočky je nejméně zaostřená na frekvenci $f = 10\text{GHz}$ a na frekvencích $f = 8\text{GHz}$ a $f = 12\text{GHz}$ vyzařovaná energie o něco fokusovanější (obr. 3.13). Je zajímavé si povšimnout, že kvalita čočky co do zakřivení ekvifází má opačnou tendenci a je nejlepší v pásmu $f \in (9 : 11)\text{GHz}$. Další nevýhodou válcové čočky bez kulového vrchlíku by mohly být parazitní multiodrazy, ke kterým přispívá její plochý vršek. Čočka je sice opatřena antireflexní vrstvou, ta ale funguje ideálně pouze na frekvenci, na které je navržena. K multiodrazům může docházet mezi čočkou a plechem, ale i uvnitř čočky a mezi čočkou a anténou. Široká vyzařovací charakteristika také může způsobit odrazy od okolních objektů. To by mohlo vysvětlovat i to, proč byly u této čočky naměřeny lepší výsledky pro polohu plechu $l = 135$, než pro polohu plechu $l = 115$, ačkoli by se chyba měla se vzdáleností plechu lineárně zvětšovat. (1.7) Různé odrazy mohou chybu kompenzovat, nebo naopak zvětšovat.

Čočka s kulovým vrchlíkem má o něco lepší výsledky a je tedy vidět, že fokusace čočky a její vyzařovací charakteristika je při takovém měření důležitá. Zaoblení na vršku čočky by mohlo přispívat k eliminaci multiodrazů a zároveň k lepší fokusaci energie. Každopádně je vidět, že použitý kulový vrchlík není dostatečně efektivní na to, aby měl interferenční průběh hluboká minima v celém požadovaném rozsahu polohy odrazného plechu.

Chování kombinované čočky jde těžko hlouběji rozebírat, neboť nebyla v průzkumu zmapována. Lze usuzovat, že spodní čočka tvaru kulové úseče bude přispívat k ostré a frekvenčně stabilní vyzařovací charakteristice. Na druhou stranu bude působit proti efektu prošlé a obtékající vlny, který je nejspíš příčinou zakřivení ekvifázových vlnoploch u čoček, jako je použitá čočka tvaru válce. Nulovou chybu při poloze plechu $l = 115$ nelze považovat za průkaznou, neboť je počítaná pouze z jednoho minima (ostatní minima nebyla dostatečně hluboká).

Na závěr měření můžeme říci, že vytištěné válcové čočky nejsou z výše zmíněných důvodů pro takto koncipované interferenční měření vhodné. Jejich použití by se mohlo uplatnit možná tam, kde by se odrazný měřený objekt hýbal pouze v malém rozsahu vzdáleností a kde by nebyly přítomny objekty, co by mohly signál odrážet. Multiodrazům mezi komponenty měřící sestavy by se ovšem stejně nezabránilo a pro realizaci funkčního senzoru s čočkou tohoto typu by se musely řádně prošetřit.

Závěr

Cílem této práce bylo zmapovat možnosti využití dielektrických čoček pro vylepšení interferenčního měření vzdálenosti. Čočka má za úkol kompenzovat chybu vzniklou vychýlením měřeného objektu. Důraz má být kladen zejména na tvar vyzařované ekvifázové vlnoplochy.

Na začátku práce je proveden stručný rozbor problematiky. Ve druhé kapitole nejprve představen způsob, jakým budou čočky simulovány a analyzovány. Hlavní část celé práce je pak postupné prezentování poznatků získaných během analýzy. Čočky jsou postupně popisovány tak, jak byly zkoumány. Během prezentace zkoumaných čoček je kladen důraz na diskutování vlivu jednotlivých parametrů a postupné objasňování souvislostí. Hlavní zkoumanou vlastností čoček je přitom schopnost tvarovat vyzařovanou ekvifázovou vlnoplochu. Po představení celého prozkoumaného vzorku jsou nejprve diskutovány dosud neobjasněné vlivy některých parametrů. Pak je provedeno stručné shrnutí získaných poznatků a porovnání nejlepších nalezených možností jednotlivých typů čoček. V závěru střední části práce jsou ukázány další aspekty čoček, které během předchozího průzkumu nebyly zásadněji nahlíženy. Jsou to aspekty jako frekvenční závislost, nebo vyzařovací charakteristika antény s použitím dané čočky. V poslední kapitole je představeno experimentální měření, které prověřilo vybrané čočky. Ukázalo se, že s vylepšováním ekvifázové charakteristiky se zhoršují jiné vlastnosti čočky. Je to zmiňovaná vyzařovací charakteristika a frekvenční stabilita. Vliv těchto vlastností má na měření zásadní vliv. Zdá se tedy, že čočky, které ekvifázovou vlnoplochu nejlépe tvarují, jsou pro použití v praxi téměř nepoužitelné. V závěru poslední kapitoly jsou pak výsledky měření diskutovány s ohledem na konkrétní použité čočky.

Zhodnocení výsledků práce

V práci se podařilo zmapovat značné množství dielektrických čoček nejrůznějších tvarů. Pro přehlednější náhled na velký prozkoumaný vzorek byla vyvinuta zobrazovací aplikace která umí data různým způsobem jednoduše zobrazovat a pomáhá uživateli udělat si pěkný přehled o chování čoček, z hlediska tvaru vyzařované ekvifázové vlnoplochy. Byly zjištěny zajímavé poznatky, z nichž můžeme jmenovat například motýlí čočku, která umí ekvifázovou vlnoplochu natvarovat, ačkoli svým tvarem klasickou čočku nikterak nepřipomíná. Tyto poznatky ohledně nestandardních tvarů čoček vedly ke vznesení zajímavých hypotéz, které mohou být dále rozvíjeny, ověřovány a upřesňovány.

Na druhou stranu práce nemusela být tolik zaměřená na tvarování ekvifázových vlnoploch. Kdyby se u každé čočky vždy rovnou zaznamenávala vyzařovací charakteristika a frekvenční závislosti, mohl být získaný přehled lepší a získané poznatky přesnější. Experimentální měření by bylo vhodnější provést na větším vzorku čoček.

Další možná vylepšení

Na základě vznesených nedostatků výše by bylo vhodné doplnit průzkum čoček při souběžném zaznamenávání tvaru ekvifázových vlnoploch i vyzařovací charakteristiky čočky napříč celým použitým frekvenčním pásmem. Na základě získaných dat by bylo možné potvrdit či vyvrátit některé vznesené hypotézy, jako například:

1. S rostoucím zakřivením ekvifázové vlnoplochy vždy klesá frekvenční stabilita čočky.
2. U čoček válcového a jim podobného tvaru se jevy opakují se změnou jejich vertikální elektrické délky (tedy se změnou frekvence nebo permitivity čočky) s periodou 1λ .

Podle průzkumu provedeného v této práci je zřejmé, že všechny tři vlastnosti (tvar ekvifázové vlnoplochy, frekvenční stabilita, vyzařovací charakteristika) jsou na sobě nějakým způsobem závislé. Z hlediska kompenzace chyby při interferenčním měření jdou proti sobě a je nutno udělat kompromis.

Literatura

- [1] Dušan Černohorský. *Antény a šíření rádiových vln: Šíření rádiových vln*. Czech. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1972.
- [2] Josef Marek. *Optika: Základy fotometrie. Paprsková optika. Pro I. ročník středních průmyslových škol strojnických*. Czech. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1972.
- [3] J. Reed a G. J. Wheeler. „A Method of Analysis of Symmetrical Four-Port Networks“. In: *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 4.4 (1956), s. 246–252.
- [4] J.M. Rüeger. *Electronic Distance Measurement: An Introduction*. Springer-Verlag, 1990. ISBN: 9783540515234. URL: <https://books.google.cz/books?id=YY4RAQAAIAAJ>.
- [5] V. Tysl a V. Růžička. *Teoretické základy mikrovlnné techniky*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN: 80-03-00141-2.
- [6] K. Hoffmann a Z. Skvor. „Contactless distance measurement method“. In: *77th ARFTG Microwave Measurement Conference*. 2011, s. 1–4.
- [7] K. Hoffmann a Z. Skvor. „Microwave interferometric method for metal sheet thickness measurement“. In: *81st ARFTG Microwave Measurement Conference*. 2013, s. 1–3.
- [8] K. Hoffmann a Z. Škvor. „New method suitable for relative short distance measurement“. In: *The 40th European Microwave Conference*. 2010, s. 1524–1527.

Přílohy

h [mm]	v [mm]	u [mm]	ϵ_r	u_2 [mm]	$s_z@l = 135\text{mm}$
90	25	25	2,5	40	88
90	25	30	2,5	35	88
90	25	30	2,5	40	84
90	30	25	2,5	35	96
90	30	25	2,5	40	86
90	30	30	2,5	35	88
90	30	30	2,5	40	83

Tabulka 11: Prozkoumané čočky kombinovaného typu

A Manuál pro zobrazovací aplikaci



Obrázek 17: Náhled na okno zobrazovací aplikace s popisem jednotlivých částí.

Na obrázku 17 je zobrazen náhled na okno zobrazovací aplikace s popisem jednotlivých částí. Jejich funkce budou postupně vysvětleny.

Výběr prohlížené čočky

Obrázek 18: Detail náhledu aplikace pro výběr základní prohlížené čočky.

Typ čočky

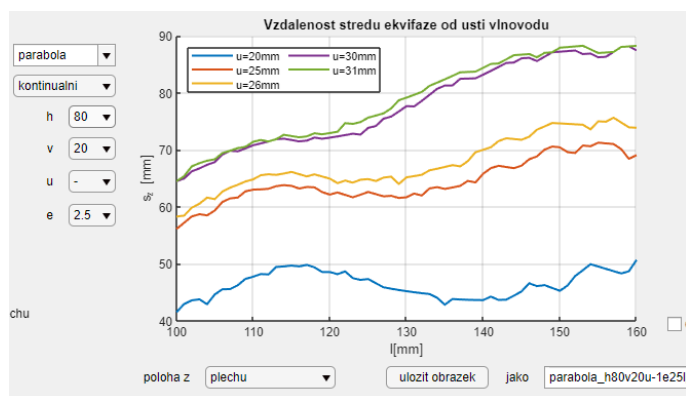
Na obrázku 18 je vidět detail okna aplikace pro volbu zobrazované čočky. U kolonky **typ cocky** jsou možnosti všech typů čoček probraných v této práci. Pro jednoduší prohlížení válcových čoček, které spadají pod čočku typu kužele, je zde pro praktičnost speciální kolonka. Kombinovaná čočka je zde pod jménem **hybrid**. Navíc jsou zde také možnosti průběhu **bez čočky** a možnost **mereno** značí čočku měřenou v experimentu předcházejícímu této práci.

Parametry čočky

U kolonky **antireflexni vrstva** lze zvolit typ antireflexní vrstvy. U některých čoček byla simulována i vrstva s drážkami a někde byla provedena simulace bez vrstvy.

Pak následují kolonky s parametry definujícími čočku. Ty by se měly nastavovat postupně zeshora, pak se nabízejí možnosti pouze simulovaných konstelací.

Při nastavení všech parametrů na nějakou hodnotu lze nastavit pro libovolný parametr možnost **pomlčky**. Zobrazí se pak všechny existující hodnoty tohoto parametru. Na obrázku 19 je vidět příklad pro tuto volbu u parabolické čočky.

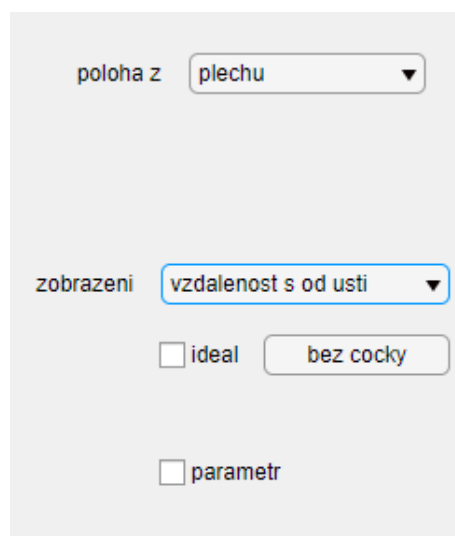


Obrázek 19: Volba pomlčky u příkladu čočky parabolického typu.

Nejlepší

Tlačítko **nejlepší** najde čočku zvoleného typu s nejlepšími vlastnostmi pro ekvifázi v poloze na ose zobrazované v grafu (bude upřesněno v dalším bodě).

A.1 Typ zobrazení



Obrázek 20: Volba typu zobrazení.

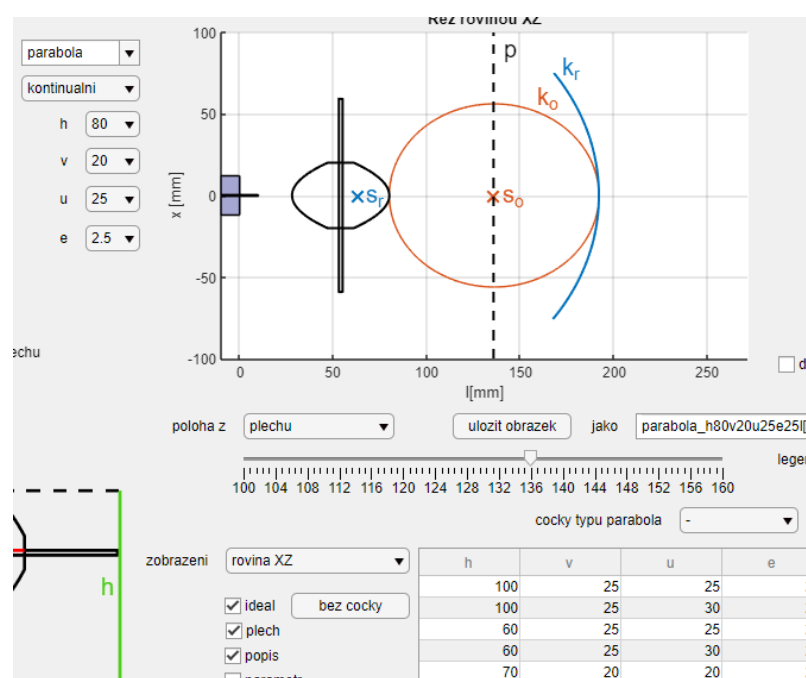
Na obrázku 20 je detail náhledu okna aplikace pro volby typu zobrazení.

Kolonka **poloha z** Určí typ nastavení vertikální osy. Možnost **plechu** je používána pro všechny grafy zobrazené v této práci. Při této volbě se nahlíží ekvifáze v místě zrcadlové čočky pro polohy plechu na ose. Dalšími možnostmi jsou volby **od čočky** a **od ústí vlnovodů**. Pak je na ose z zobrazena vzdálenost zkoumané ekvifáze od čočky, respektive od ústí vlnovodů.

Kolonka **zobrazení** určí zobrazovanou položku. Možnosti jsou:

- **polomer** - zobrazí poloměr kružnice aproximující danou ekvifázi.

- **vzdálenost s od ustí** - zobrazí vzdálenost dané ekvifáze od ústí vlnovodů. **Vzdálenost s od cocky** zobrazí vzdálenost středu zkoumané ekvifáze od okraje čočky.
- **Chyba** - zobrazí teoreticky vypočtenou hodnotu chyby pro vychýlení plechu o $\alpha = 5^\circ$. Chyba je zjednodušeně počítána jako polovina rozdílu fáze optimální a reálné ekvifázové křivky u **okraje zrcadlové čočky**.
- **Rovina xz** - zobrazí profil čočky v H rovině. Příklad tohoto zobrazení je na obrázku 21. Pod kolonkou zobrazení se objeví zaškrťovací možnosti pro zobrazení hypotetického plechu a ideální ekvifázové vlnoplochy (pouze při volbě **poloha z: plechu** a popis, který do obrázku přidá popisky).



Obrázek 21: Příklad zobrazení při volbě **rovina xz**.

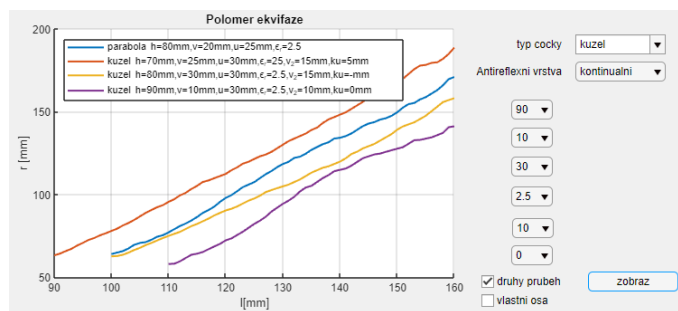
Zobrazený graf a možnost uložit obrázek

K bodu číslo 3 stačí říct, že kliknutím na tlačítko **uložit obrázek**, se zobrazený graf uloží do adresáře, kam je momentálně nastavená matlabovská cesta. Obrázek se uloží v png i pdf v rozlišení 300DPI.

Druhá čočka

V sektoru 4 z obrázku 17 se při zaškrtnutí kolonky **druha cocka** (dole v tomto sektoru, trochu zakrytá červeným oválem) objeví možnost porovnání zobrazené čočky (čoček) s druhou čočkou definovanou obdobným způsobem jako je čočka zobrazená ze sektoru 1. Po výběru konkrétní čočky se klikne na tlačítko **zobraz** a čočka se přidá do grafu. Je možné postupně přidávat libovolný počet čoček. (Při změně čočky ze

sektoru 1, nebo změně typu zobrazení ale přidané čočky zmizí). Příklad zobrazení několika průběhů najednou je na obrázku 22.



Obrázek 22: Příklad zobrazení několika *druhých průběhů* pro průběh poloměrů ekvifáze podle polohy plechu.

Profil čočky s parametry

V sektoru 5 (obr. 17 se zobrazuje profil vybrané čočky (pokud jsou definované všechny parametry) podle výběru v sektoru 1. Tento obrázek lze uložit obdobně jako u zobrazovaný graf. Obrázek se uloží kliknutím na tlačítko **uložit obrázek čočky**.

Tabulka prozkoumaných čoček daného typu

Byly simulovány čočky s mnoha konstelacemi parametrů, proto byla do aplikace přidána tabulka s prozkoumanými čočkami, kde se uživatel může zorientovat. Tabulka je umístěna v sektoru 6, dle obrázku 17. Na obrázku 23 je vidět detail tohoto sektoru. Uživatel může specifikovat výběr zobrazených konstelací v kolonce **cočka typu** [typ čočky ze sek. 1]. Pokud nechá pomělkou, zobrazí se všechny prozkoumané konstelace pro čočku daného typu (zvolenou v sektoru 1). Pokud zvolí některý z parametrů, zobrazí se pouze čočky s hodnotou tohoto parametru nastavenou v sektoru 1. Příklad na obrázku 23 zobrazuje všechny čočky tvaru paraboloidu které mají výšku $u = 25\text{mm}$.

h	v	u	e	
100	25	25	2.5000	0
60	25	25	2.5000	0
70	20	25	2.5000	0
70	25	25	2.0000	0
70	25	25	2.5000	0
70	25	25	3.0000	0
70	25	25	4.0000	0
70	25	25	5.0000	0
70	25	25	6.0000	0

Obrázek 23: Tabulka prozkoumaných čoček v aplikaci pro parabolické čočky s $u = 25\text{mm}$.

Umístění legendy

V sektoru 7 na obrázku 17 si uživatel může zvolit polohu legendy na grafu. Může se tak předejít zakrytí průběhů legendou.

B Ukázka skriptu aproximujícího ekvifázové křivky

```

1
2 %funkce aproximující ekvifázovou
3 křivku v daném místě zrcadlové cocky l
4
5
6 %py....matice fází, dílek..rozlišení
7 matice v cm, lx...počet prvků vertikálně
8 function [faze2,kx,ky,kR,opt,dim] = ...
9 ...aproximace(dcp,py,dilek,lx,l);
10 dim=0;
11 opt=1;
12
13 %vzdálenost cocky se změní na opt. poloměr v [m]
14 vel=dcp*100/(2*dilek);
15 %průzkum do max natočení plechu alfa=18deg
16 alfa=pi/10;
17
18 %alfa*2=poodjetí zrcadlové coc
19 fik=2*alfa;
20
21 fimin=-fik;
22 fimax=+fik;
23 %min aproximovaná hodnota x v matici fází
24 minn=round(vel*sin(fimin)+lx/2);
25 %max aproximovaná hodnota x v matici fází
26 maxx=round(vel*sin(fimax)+lx/2);
27 %hodnoty x pro definování částí
28 kružnic pro fitování do matice fází
29 kx=minn:maxx;
30 %velikost zkoumané oblasti
31 lp2=maxx-minn;
32
33 str2=round(lp2/2); %
34 %procházení průměru approx. kružnic od 2/3
35 %vzdálenosti plechu od cocky do 2*vzdálenost plech od ústí
36 for R=dcp*2/3:dcp/100:2*1
37
38
39
40
41     dim=dim+1;
42     %poloměr v m
43     kvel=R*100/(2*dilek);
44     %spocítání y hodnot odpovídající fitované kružnici
45     ky(dim,:)=sqrt((kvel)^2-(kx-lx/2).^2)+1/dilek...
46     ...+((dcp+(dcp-R))*100+2)/(2*dilek);
47     %do vektoru R se ukládá aktuální R
48     % (pro případný zájem o nějaký plot v budoucnu)
49     kR(dim)=R;
50     %presné hodnoty y zaokrouhlené na pozici v matici
51     v2 = round(ky(dim,:));
52     %uloženo pro případné budoucí ploty
53     ky(dim,:)=v2;
54     %zbytečný krok
55     p2 = kx;
56     %kolik hodnot fází uložit?

```

```
57     do=maxx-minn+1;
58     if do<1
59         do=1;
60     end
61     %ukladani hodnot fazi fitovanych kruznici prumerem R
62     for i=1:do;
63         faze2(dim,i) = py(p2(i),v2(i));
64     end
65     %osetreni chyby pri nevhodnem R
66     if str2==0
67         str2=1
68     end
69     %od vseh hodnot faze je odedctena hodnota v uhlu alfa 0
70     skoky=abs(faze2(dim,:)-mean(faze2(dim,str2)));
71     %korekce, pokud by faze byla u prechoddu 2pi->0
72     for i = 1:length(skoky)
73         if skoky(i)>6
74             skoky(i)=2*pi-skoky(i);
75         end
76     end
77     %faktor ohodnoceni kvality aproximace -
78     % jak se faze celkove vychyluje?
79
80     stdev(dim)=sum(skoky)/length(skoky);
81
82     %pokud doposavad nejlip, oznaceno jako opt....
83
84     if stdev(dim)<stdev(opt)
85
86         opt=dim;
87     end
88
89     %funkce vraci hodnoty fazi pro vsechny aproximace
90     %aby si uzivatal mohl vse prohlednout
91 end
92
93 end
```

C Tabulky prozkoumaných čoček

$h[mm]$	$v[mm]$	$u[mm]$	ε_r	$s_z@l = 135mm$
60	20	20	2,5	172
60	20	25	2,5	160
60	30	20	2,5	180
60	30	25	2,5	174
70	20	20	2,5	156
70	25	20	2,5	157
70	25	25	2	168
70	25	25	2,5	143
70	25	25	3	121
70	25	25	4	148
70	25	25	5	149
70	25	25	6	115
70	25	25	7	201
70	25	25	8	151
70	25	30	2,5	141
70	30	20	2,5	162
70	30	25	2,5	148
70	30	30	2,5	151
70	30	35	2,5	172
70	35	20	2,5	177
80	20	20	2,5	140
80	20	25	2,5	118
80	25	20	2,5	141
80	25	25	2,5	121
80	25	30	2,5	108
80	30	20	2,5	145
80	30	25	2,5	123
80	30	30	2,5	116
80	30	35	2,5	132
90	20	30	2,5	83
90	20	35	2,5	88
90	25	25	2,5	105
90	25	30	2,5	85
90	30	30	2,5	92
90	30	35	2,5	99
90	35	20	2,5	148

Tabulka 12: Prozkoumané čočky tvaru oboustranné kulové úseče

$h[mm]$	$v[mm]$	$u[mm]$	ε_r	$s_z@l = 135mm$
70	25	25	5	151
70	25	25	6	116
70	25	25	7	192
70	25	26	2,5	143
70	25	30	2,5	139
70	30	20	2,5	162
70	30	25	2,5	148
70	35	20	2,5	175
70	35	25	2,5	160
80	15	26	2,5	138
80	20	20	2,5	144
80	20	25	2,5	125
80	20	26	2,5	121
80	20	30	2,5	107
80	20	31	2,5	106
80	25	20	2,5	143
80	25	25	2,5	126
80	25	26	2,5	122
80	25	30	2,5	108
80	25	31	2,5	107
80	25	35	2,5	114
80	30	20	2,5	147
80	30	25	2,5	126
80	30	26	2,5	122
80	30	30	2,5	113
80	30	35	2,5	119
80	35	20	2,5	160
80	35	25	2,5	138
80	35	26	2,5	135
90	20	26	2,5	107
90	20	30	2,5	90
90	20	35	2,5	85
90	25	25	2,5	112
90	25	26	2,5	108
90	25	30	2,5	86

Tabulka 13: Prozkoumané čočky tvaru paraboloidu

$h[mm]$	$v[mm]$	$u[mm]$	ε_r	$v_2[mm]$	$u_k[mm]$	$s_z@l = 135mm$
100	25	25	2,5	10	5	95
100	25	25	2,5	15	5	86
100	25	30	2,5	10	5	72
100	25	30	2,5	15	5	63
70	25	25	2,5	10	5	148
70	25	30	2,5	10	5	139
70	25	30	2,5	15	5	137
80	15	25	2,5	10	5	132
80	15	25	2,5	5	5	147
80	15	30	2,5	10	5	108
80	15	30	2,5	5	5	131
80	15	35	2,5	10	5	110
80	15	35	2,5	5	5	120
80	20	25	2,5	10	5	128
80	20	25	2,5	15	5	116
80	20	30	2,5	10	5	107
80	20	30	2,5	15	5	99
80	20	35	2,5	10	5	112
80	20	35	2,5	15	5	111
80	25	25	2,5	10	5	133
80	25	25	2,5	15	5	123
80	25	25	2,5	1	5	144
80	25	25	2,5	5	5	123
80	25	25	2	15	5	150
80	25	25	3	15	5	89
80	25	25	4	15	5	190
80	25	30	2,5	10	5	112
80	25	30	2,5	15	5	106

Tabulka 14: Prozkoumané čočky tvaru kužele první část (bez čoček motýlího typu a bez válcových čoček)

$h[mm]$	$v[mm]$	$u[mm]$	ε_r	$v_2[mm]$	$u_k[mm]$	$s_z@l = 135mm$
80	25	30	2,5	1	5	140
80	25	30	2,5	5	5	121
80	25	30	2	15	5	140
80	25	30	3	15	5	114
80	25	30	4	15	5	131
80	25	35	2,5	10	5	114
80	25	35	2,5	15	5	114
80	25	35	2,5	1	5	132
80	25	35	2,5	5	5	116
80	30	25	2,5	10	5	140
80	30	25	2,5	15	5	127
80	30	25	2,5	20	5	122
80	30	30	2,5	10	5	116
80	30	30	2,5	15	5	111
80	30	30	2,5	20	5	114
80	30	35	2,5	10	5	118
80	30	35	2,5	15	5	119
80	30	35	2,5	20	5	126
90	20	30	2,5	0	0	119
90	20	30	2,5	10	0	77
90	20	30	2,5	10	5	90
90	20	30	2,5	15	0	72
90	20	30	2,5	15	5	77
90	20	30	2,5	20	5	74
90	20	30	2,5	5	0	96
90	20	35	2,5	10	5	87
90	20	35	2,5	15	5	92
90	25	25	2,5	10	5	117
90	25	25	2,5	15	5	106
90	25	30	2,5	10	5	92
90	25	30	2,5	15	5	82
90	25	35	2,5	15	5	87

Tabulka 15: Prozkoumané čočky tvaru kužele druhá část (bez čoček motýlího typu a bez válcových čoček)

$h[mm]$	$v[mm]$	$u[mm]$	ε_r	$s_z@l = 135mm$
90	10	24	2,5	123
90	10	26	2,5	116
90	10	28	2,5	110
90	10	30	2,5	104
90	12	24	2,5	110
90	12	26	2,5	99
90	12	28	2,5	88
90	12	30	2,5	80
90	14	24	2,5	99
90	14	26	2,5	84
90	14	28	2,5	72
90	14	30	2,5	72
90	16	24	2,5	94
90	16	26	2,5	79
90	16	28	2,5	65
90	16	30	2,5	69
90	18	24	2,5	94
90	18	26	2,5	80
90	18	28	2,5	67
90	18	30	2,5	64
90	18	30	3	141
90	18	30	4	98

Tabulka 16: Prozkoumané čočky tvaru válce první část

$h[mm]$	$v[mm]$	$u[mm]$	ε_r	$s_z@l = 135mm$
90	18	30	5	178
90	18	32	2,5	77
90	18	34	2,5	97
90	20	26	2,5	83
90	20	28	2,5	74
90	20	30	2,5	69
90	20	30	3	107
90	20	30	4	84
90	20	30	5	77
90	20	32	2,5	70
90	20	34	2,5	77
90	22	26	2,5	85
90	22	28	2,5	78
90	22	30	2,5	75
90	22	32	2,5	74
90	22	34	2,5	76
90	24	26	2,5	87
90	24	28	2,5	83
90	24	30	2,5	80
90	24	32	2,5	80
90	24	34	2,5	83
90	25	30	2,5	83
90	26	26	2,5	90
90	26	28	2,5	87
90	26	30	2,5	86
90	26	32	2,5	88
90	26	34	2,5	89

Tabulka 17: Prozkoumané čočky tvaru válce druhá část

$h[mm]$	$v[mm]$	$u[mm]$	ε_r	$v_2[mm]$	$s_z@l = 135mm$
90	14	30	2,5	16	69
90	14	30	2,5	18	58
90	14	30	2,5	20	41
90	15	30	2,5	20	46
90	16	30	2,5	18	60
90	16	30	2,5	20	52
90	16	30	2,5	22	57
90	18	30	2,5	20	62
90	18	30	2,5	22	64
90	18	30	2,5	24	69
90	20	30	2,5	25	76

Tabulka 18: Prozkoumané motýlí čočky