

Návrh a výroba sady čoček pro tvarování svazku milimetrových vln

Bc. Michal Zajíc

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Zajíc**
Osobní číslo: **A13338**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh a výroba sady čoček pro tvarování svazku milimetrových vln**
Téma anglicky: **The Design And Development Of a Lenses Kit for Shaping Millimeter Wave Beam Bundles**

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte a popište teorii potřebnou k danému tématu.
2. Seznamte se a blíže specifikujte vzorce na charakterizaci čoček.
3. Vyberte vhodný materiál na výrobu čoček určených pro tvarování svazku mm vln.
4. Navrhněte a vyrobte sadu čoček pro tvarování výše uvedeného svazku.
5. Ověřte vyrobenou sadu čoček. Ověření provedte měřením na vhodném pracovišti.
6. Naměřená data zpracujte a vizualizujte vhodným způsobem.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. MUSIL, Jindřich a František ŽÁČEK. Microwave measurements of complex permittivity by free space methods and their applications. Academia Praha, 1986, 276 p.
2. HUDLIČKA, Martin a Alireza KAZEMIPOUR. Určování materiálových parametrů ve volném prostoru. Ústřední odborná skupina mikrovlnná technika ČES [online]. 2013, s. 4 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: http://web.cvut.cz/ces/mt/prezentace/CES_Hudlicka_VNA_v1.pdf
3. SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: Přednášky. [online]. 2002 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf
4. Rohde & Schwarz International: R&S ZVA, R&S ZVB, R&S ZVT Operating Manual. Rohde & Schwarz International [online]. 2014 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuels/gb_1/z/zva_2/ZVA_ZVB_ZVT_1
5. MALÝ, Petr. Optika. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013, 368 s. ISBN 978-80-246-2246-0.
6. HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, 2000, vii, s. 890-1032, [38s.] příl. ISBN 80-214-1868-0.
7. LEPIL, Oldřich. Fyzika pro gymnázia. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010, 207 s., [8] s. barev. obr. příl. ISBN 978-80-7196-384-4.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Skočík

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

12. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

15. května 2015

Ve Zlíně dne 6. února 2015

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu


Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s přípoště-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 19.5.2015


.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou tvarování svazku milimetrových vln pomocí čoček. V úvodu teoretické části práce jsou zmíněny základní pojmy týkající se čoček. Dále jsou zde popsány různé způsoby výroby a materiály vhodné pro výrobu, optické vady čoček a teorie elektromagnetického pole. Praktická část práce se zabývá návrhem, realizací a ověřením funkce čoček. Ověřování funkce čoček bylo prováděno na specializovaném laboratorním pracovišti pomocí spektrálního analyzátoru a příslušných zařízení. V práci jsou popsány tři metody ověřování, z nichž pouze jedna se ukázala jako vhodná. Naměřená data jsou zpracována a uvedena v příloze této práce. Práce se dále zabývá vyhodnocením výsledků a doporučením na vylepšení.

Klíčová slova: čočka, ohnisková vzdálenost, spektrální analyzátor, elektromagnetické pole, svazek milimetrových vln

ABSTRACT

This work deals with the millimeter wave beam forming means of lenses. In the beginning of the theoretical part of the thesis are discussed basic terms of the lenses. Furthermore, there are described the different manufacturing methods and materials suitable for producing, the optical aberrations and theory of electromagnetic field. The practical part deals with the proposal, implementation and verification of the lens function. Verification of lenses function was carried out on specialized laboratory workplace using a spectral analyzer and relevant devices. The thesis describes three authentication methods, only one of which proved to be suitable. The measured data are processed and presented in the Appendix to this report. The thesis also discusses the evaluation results and recommendations for improvement.

Keywords: lens, focal distance, spectral analyzer, electromagnetic field, millimeter wave beam

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Skočíkovi za jeho odborné vedení, rady a připomínky, a také doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. a Ing. Jiřímu Korbelovi, Ph.D. za cenné rady při měření.

Dále bych chtěl poděkovat firmě Zámečnictví Libor Skočík za provedení výroby čoček.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 OPTICKÉ ZOBRAZOVÁNÍ	12
1.1 ČOČKY	13
1.1.1 Spojná čočka	13
1.1.2 Rozptylná čočka	14
1.1.3 Fresnelova čočka	14
1.1.4 Kuličková čočka	14
1.2 TENKÁ ČOČKA.....	15
1.3 TLUSTÁ ČOČKA	17
1.3.1 Tloušťka čočky.....	18
2 VÝROBA OPTICKÝCH ČOČEK	20
2.1 TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ.....	20
2.1.1 Hrubé broušení, jemné broušení a leštění	20
2.1.2 Generalizované frézování, broušení a leštění.....	21
2.1.3 Frézování, broušení a leštění.....	22
2.2 LISOVÁNÍ	22
3 MATERIÁLY PRO VÝROBU ČOČEK.....	24
3.1 SKLENĚNÉ MATERIÁLY	24
3.1.1 Optické sklo	24
3.2 PLASTOVÉ MATERIÁLY	26
3.2.1 Termoplasty.....	26
3.2.2 Termosety.....	29
4 OPTICKÉ VADY	30
4.1 KOMA.....	31
4.2 ZKRESLENÍ OBRAZU	31
4.3 OTVOROVÁ VADA.....	31
4.4 BAREVNÁ VADA	32
4.5 ASTIGMATISMUS	32
5 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE	33
5.1 VZNIK ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	33
5.2 ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN	36
5.2.1 Přímá vlna	36
5.2.2 Prostorová vlna.....	36
5.2.3 Povrchová vlna.....	37
5.3 PRŮCHOD ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN MATERIÁLEM	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
6 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI	41
7 SPECIALIZOVANÉ LABORATORNÍ PRACOVÍŠTĚ.....	43

7.1	SPEKTRÁLNÍ OBVODOVÝ ANALYZÁTOR ROHDE&SCHWARZ ZVA67	43
7.2	KONVERTORY ROHDE&SCHWARZ	45
7.3	ELEKTRICKÉ POJEZDY NEWPORT.....	47
7.4	KAMERA SPIRICON PYROCAM III	48
8	NÁVRH ČOČEK.....	50
8.1	VÝBĚR VHODNÉHO MATERIÁLU PRO VÝROBU ČOČEK.....	50
8.2	VOLBA A VÝPOČET PARAMETRŮ ČOČEK	50
8.3	VÝPOČET OHNISKOVÉ VZDÁLENOSTI PRO NAVRHNUTOU ČOČKU.....	52
9	REALIZACE NAVRHNUTÝCH ČOČEK.....	55
10	OVĚŘOVÁNÍ FUNKCE ČOČEK.....	56
10.1	MĚŘENÍ PARAMETRŮ VYROBENÝCH ČOČEK	57
10.2	KALIBRACE SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU ZVA67.....	58
10.3	MĚŘENÍ ÚTLUMU TEFLONU	60
10.4	OVĚŘOVÁNÍ ZA POMOCÍ KAMERY SPIRICON PYROCAM III	61
10.5	OVĚŘOVÁNÍ ZA POMOCI MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ OPHIR VEGA.....	68
10.6	OVĚŘOVÁNÍ ZA POMOCI SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU R&S® ZVA67.....	70
11	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	73
	ZÁVĚR	77
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	82
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK.....	85
	SEZNAM PŘÍLOH.....	86

ÚVOD

Čočky jsou v dnešní době hojně využívány a ne jinak tomu bylo i dříve. První zmínky o čočkách ve formě sklíček byly již ve starém Řecku. Tehdy se používaly zejména pro zapálení ohně za pomoci slunečních paprsků. Postupem času čočky našly své uplatnění v optice a dalších oborech. Dnes už si život bez čoček nejspíš nedovedeme ani představit. Nejčastěji se lidé setkávají s čočkami, které nám slouží k odstranění nedostatků oka. Řeč je tedy o brýlových čočkách nebo i čočkách kontaktních, které nám umožní odstranit vadu oka a zlepšit vidění. Nejsou to ale jenom brýle, kde se čočky využívají, ale i různé přístroje nebo zařízení. Když je řeč o zařízeních, nejspíše každého napadne například dalekohled nebo mikroskop. To jsou zařízení, která ke své funkci využívají právě čočky, nebo spíše soustavu čoček. Čočky se ale využívají i v zařízeních, u kterých by nás to na první pohled nenapadlo. Jmenujme například PIR detektor, který ke své funkci využívá speciální typ čočky, kterým je Fresnelova čočka. Dalším takovým zařízením využívající čočky je třeba čtečka čárových kódů, která ke své funkci také využívá čočky. Možná si to ani neuvědomujeme, ale se zařízeními využívajícími ke své funkci čočky, se setkáváme téměř každý den.

Čočky ale nejsou využívány jen v zařízeních pro běžné využití, ale i pro speciální aplikace, kterou může být třeba tvarování svazku milimetrových vln, což je tématem této práce. S touto speciální aplikací se jen tak nesetkáváme a využívá se spíše k laboratorním účelům. Takovýmto účelem může být například měření komplexní permitivity ve volném prostoru, jak je tomu u nově vybudovaného pracoviště na Fakultě aplikované informatiky, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Toto pracoviště je vybaveno spektrálním obvody analyzáto-rem Rohde&Schwarz ZVA67, což je zařízení pro generování elektromagnetického vlnění a následnou analýzu změn tohoto záření při průchodu volným prostorem nebo překážkou. V případě komplexní permitivity se zkoumá vliv různých materiálů na elektromagnetické vlnění. Tohoto parametru se využívá i v oblasti bezpečnosti, například bezpečnosti letadel. V případě bezpečnosti letadel se jedná zejména o využívání kompozitních materiálů na ochranu části letounu před elektromagnetickým vlněním, především části s avionikou. Je tedy potřeba u těchto materiálů zkoumat jejich permitivitu na elektromagnetické vlnění, aby nedošlo k použití nevhodného materiálu, který by nedokázal zabránit proniknutí nežádoucího vlnění k avionice letounu, kterou by mohl ovlivnit nebo dokonce poškodit.

Jelikož veškerá teorie vztahující se k této problematice je vztahována k rovinné vlně, bylo potřeba vysílaný svazek elektromagnetického vlnění upravit. Nabízely se dvě možnosti pro

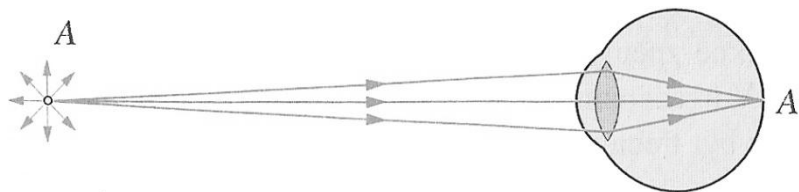
úpravu vlnění, kterými bylo tvarování svazku pomocí odrazu od zrcadel nebo pomocí čoček. První možnost tvarování pomocí odrazu od zrcadel se v této problematice využívá celkem často, ale pro tvarování svazku v oblasti milimetrových vln je vhodnější využití čoček.

Tématem této práce je tedy tvarování svazku milimetrových vln pomocí čoček. V práci je popsán návrh, výroba a následně samotné ověřování funkce čoček, u kterého byly využity tři metody, z nichž pouze jedna byla vhodná. Ostatní dvě metody se ukázaly jako nevhodné a to zejména z důvodu nevhodných zařízení, což bylo ale zjištěno až v průběhu ověřování. Všechny tyto tři metody jsou v práci popsány i včetně důvodů, kvůli kterým byly dvě metody nevhodné. V práci je také uvedeno zhodnocení získaných výsledků a mé doporučené návrhy na vylepšení do budoucna.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OPTICKÉ ZOBRAZOVÁNÍ

Optické zobrazování hraje důležitou roli při zobrazování obrazů okolního světa. Je to dáno tím, že pokud sledujeme předměty nacházející se kolem nás, tak výsledný obraz, který vnímáme je vytvořen čočkou uvnitř oka. Čočkou vytvořený obraz poté vnímáme jako celek. Pokud vezmeme kterýkoliv bod sledovaného předmětu, tak z něj vychází světelné paprsky. Tyto světelné paprsky vytvářejí rozbíhavý svazek paprsků. Tudíž z toho plyne, že pokud by lidské oko neobsahovalo čočku, nebyli bychom schopni dané předměty vidět. Je tedy za potřebí tento rozbíhavý svazek paprsků usměrnit za pomoci čočky a vytvořit z něj sbíhavý paprsek, z kterého už je lidské oko schopno daný předmět vnímat. Na následujícím obrázku č. 1 je vyobrazen princip přímého sledování okem, kdy se sledovaný bod A zobrazuje na sítnici oka v bodě A' v němž se protínají paprsky sbíhavého svazku. Bod A' je poté obrazem bodu A [1].

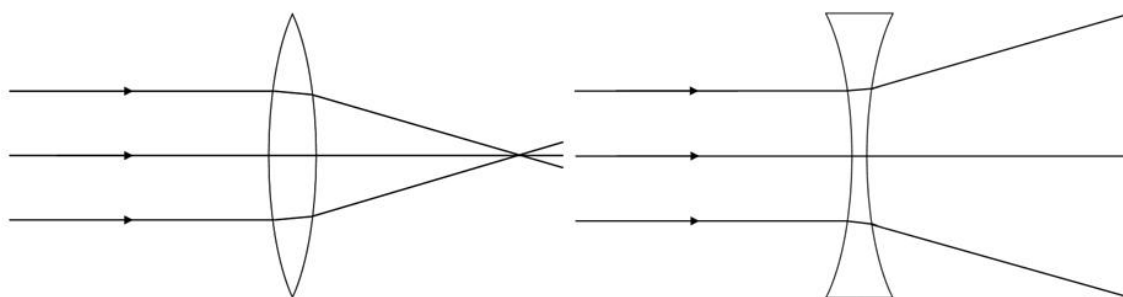


Obr. 1. Přímé vidění okem [1]

Na předchozím obrázku je vyobrazena situace, kdy mezi pozorovaným předmětem a okem není nic jiného než jen vzduch. Není tam tudíž žádné další optické prostředí, které by mohlo měnit směr paprsků vycházejících z pozorovaného předmětu. Takový případ ale nenastává vždy a mezi předmětem a okem se mohou vyskytovat další optická prostředí, která mění směr paprsku. Můžeme si to představit například při použití brýlí, které využívají také čoček. V dnešní době je využíváno velké množství věcí nebo zařízení, která využívají pro svoji funkci čočky. Můžou jimi být například již zmiňované brýle, mikroskop, dalekohled a další. V případě zařízení je využíváno složitějších kombinací čoček, optických hranolů a zrcadel, které mají za úkol například zvětšit sledovaný předmět. Součástky využívané v optických přístrojích se nazývají zobrazovací prvky. Funkcí těchto zobrazovacích prvků je měnit směr světelných paprsků takovým způsobem, aby výsledné zobrazení předmětu bylo co nejkvalitnější. Tyto zobrazovací prvky jsou v daném přístroji uspořádány do optické soustavy [1].

1.1 Čočky

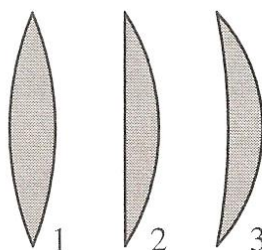
Jak už bylo dříve zmíněno, čočka je důležitou součástí oka a různých optických přístrojů. Čočky jsou vyráběny ve dvou základních typech. Tyto typy se rozlišují na základě toho, jak se po průchodu čočkou šíří světelný paprsek. Prvním typem čočky je spojná čočka neboli spojka. U spojky se procházející paprsky lámou tak, že se po průchodu čočkou střetnou v jednom bodě. Druhým typem čočky je rozptylná čočka neboli rozptylka. U tohoto typu čočky se paprsky rozbíhají a nestřetnou se v žádném společném bodě. Průchod paprsku spojkou a rozptylkou je vyobrazen na následujícím obrázku č. 2. Dále jsou také speciální typy čoček, kterými jsou Fresnelova a kuličková čočka [1],[6].



Obr. 2. Průchod paprsku spojkou a rozptylkou

1.1.1 Spojná čočka

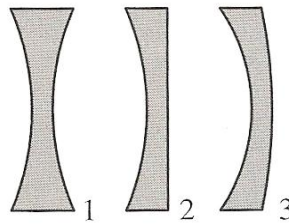
U spojky se tedy procházející paprsky sbíhají v jednom společném bodě. Tento bod se nazývá ohnisko. Spojky se mohou vyrábět ve třech různých typech. Těmito typy jsou dvojnásobně vypuklá spojka (1), ploškovypuklá spojka (2) a dutovypuklá spojka (3). Vzhled jednotlivých typů je na obrázku č. 3 [1].



Obr. 3. Typy spojek [1]

1.1.2 Rozptylná čočka

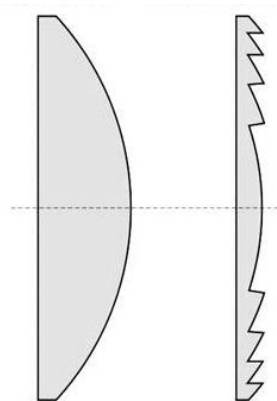
U rozptylné čočky se paprsky nesbíhají v žádném společném bodě. Jsou tedy po průchodu čočkou rozptýleny. Tak jako v případě spojky se i rozptylky můžou vyskytovat ve třech různých typech, kterými jsou dvojdutá rozptylka, ploskodutá rozptylka a vypuklodutá rozptylka. Jednotlivé typy jsou vyobrazeny na následujícím obrázku č. 4 [1].



Obr. 4. Typy rozptylek [1]

1.1.3 Fresnelova čočka

Jedná se o speciální typ čočky vynalezený francouzským fyzikem Augustinem Jeanem Fresnelem. Fresnel z původní vypuklé čočky zachoval pouze části, které lámou světelné paprsky, čímž dosáhl snížení hmotnosti čočky. Fresnelovy čočky se dříve využívaly v majácích na mořích a v dnešní době je můžeme najít např. v PIR detektorech. Vzhled Fresnelovy čočky v porovnání s běžnou čočkou je na následujícím obrázku číslo 5 [23].



Obr. 5. Běžná čočka a
Fresnelova čočka [23]

1.1.4 Kuličková čočka

Kuličková čočka je speciální typ čočky, která je skvělým optickým komponentem pro zlepšení signálového spojení mezi vlákny, zářiči a detektory. Kuličkové čočky se využívají

např. v endoskopii, ve čtečkách čárových kódů a jiných. Vzhled kuličkových čoček je na obrázku číslo 6 [24].



Obr. 6. Kuličkové čočky [25]

1.2 Tenká čočka

Pro znázornění dalších pojmů týkajících se čoček budeme uvažovat tenkou čočku. Je to zejména pro přehlednější a jednodušší vysvětlení.

V případě tenké čočky budeme uvažovat takovou čočku, která má nejtlustší část tenkou ve srovnání s předmětovou vzdáleností (p), s obrazovou vzdáleností (i) a s poloměry křivosti (r_1 a r_2) povrchů čočky. Dále také v případě tenké čočky je uvažováno se světelnými paprsky, které svírají malé úhly s centrální osou čočky. Centrální osa čočky prochází kolmo skrz čočku a rozděluje ji na dvě shodné poloviny [2].

Dalšími důležitými pojmy vztahujícím se k čočkám je ohnisková vzdálenost čočky (f), předmětové ohnisko (F_1) a obrazové ohnisko (F_2). Předmětové ohnisko leží na optické ose spojky, která prochází vodorovně skrz čočku a má takovou vlastnost, že paprsky, které jím procházejí, jsou poté po průchodu čočkou rovnoběžné s optickou osou čočky. V případě spojné čočky se předmětové ohnisko nachází v předmětovém prostoru, ze kterého vstupují do čočky světelné paprsky. Na obrázcích je tento prostor vyobrazen v levé části. Pokud budeme uvažovat rozptylnou čočku, tak v jejím případě se předmětové ohnisko nachází v obrazovém prostoru, což je prostor za čočkou. Na obrázcích vyobrazen v pravé části. Obrazové ohnisko leží také na optické ose čočky, ale v případě spojné čočky se nachází v obrazovém prostoru. Má tu vlastnost, že světelné paprsky, které vstupují do čočky a jsou rovnoběžné s optickou osou, se poté po průchodu čočkou lámou, a dále prochází tímto obrazovým ohniskem a jedná se o reálné ohnisko. Jinak je tomu u rozptylné čočky. Jak už bylo dříve zmíněno, u tohoto typu čočky se paprsky po průchodu rozbíhají, a tudíž se nemůžou v obrazovém prostoru střetnout v žádném společném bodě. Tudíž se u rozptylné

čočky nachází obrazové ohnisko v předmětovém prostoru. Budeme-li opět brát v úvahu paprsky, které vstupují do čočky a jsou rovnoběžné s optickou osou, tak poté pokud tyto paprsky po průchodu čočkou pomyslně zpětně prodloužíme do předmětového prostoru, tak právě tyto paprsky se budou sbíhat v obrazovém ohnisku. Ale jelikož se v něm fyzicky paprsky nesbíhají, jedná se o virtuální ohnisko. Ohnisková vzdálenost vyjadřuje vzdálenost těchto dvou ohnisek od optického středu čočky, který se nachází uprostřed čočky, kde se protínají centrální a optická osa čočky [1],[2],[6].

Na následující rovnici číslo 1, je všeobecné vyjádření určení vzdálenosti ohniskové vzdálenosti, dle [2] :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i} \text{ [m]} \quad (1)$$

kde

f je ohnisková vzdálenost [m]

p je předmětová vzdálenost [m]

i je obrazová vzdálenost [m]

Pokud budeme brát v úvahu čočku, která se nachází v prostředí se vzduchem, tak se ohnisková vzdálenost vypočítá pomocí následujícího vztahu na rovnici číslo 2, dle [2]. Znaménka poloměrů jsou určovány podle znaménkové konvence pro poloměry zakřivení. To znamená, že pokud se střed křivosti nachází v opačné polorovině, než je povrch čočky, bude daný poloměr kladný. Pokud se bude střed křivosti nacházet ve stejné polorovině, budeme tento poloměr brát jako záporný. [2].

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \text{ [m]} \quad (2)$$

kde

n je index lomu čočky obklopené vzduchem [-]

r_1 je poloměr křivosti jedné plochy čočky [m]

r_2 je poloměr křivosti druhé plochy čočky [m]

Pokud se čočka bude nacházet v prostředí s jinou látkou než je vzduch, je potřeba danou rovnici upravit do následující podoby napsané v rovnici číslo 3, dle [2]. Takovouto látkou

můžou být například různé plyny, kapaliny a jiné. Každá tato látka má vlastní index lomu světla n_m .

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n_m} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [\text{m}] \quad (3)$$

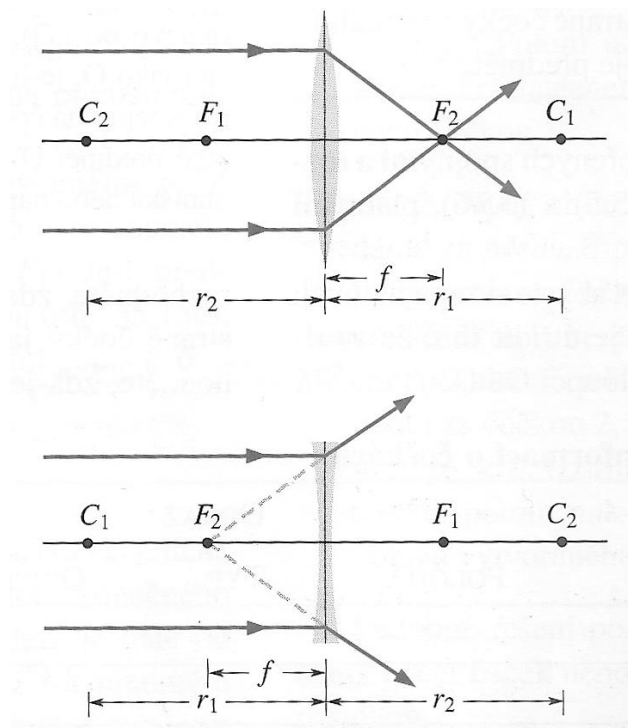
kde

n_m je index lomu čočky obklopené jiným prostředím (např. olej) [-]

Z předcházejících vztahů uvedených v rovnicích číslo 1 až 3 vyplývá následující definice:

"Čočka může vytvářet obraz nějakého předmětu jen tím, že mění směr světelných paprsků. To však může jen tehdy, je-li index lomu odlišný od indexu lomu látky, která ji obklopuje."
[2]

Všechny tyto výše popisované body a vzdálenosti jsou vyobrazeny na následujícím obrázku číslo 7. Na obrázku jde vidět umístění jak pro spojnou tak i pro rozptylnou čočku. Dalšími neznámými jsou body C_1 a C_2 , což jsou středy křivosti optických ploch [1],[2].



Obr. 7. Umístění ohnisek u spojky a rozptylky [2]

1.3 Tlustá čočka

V předchozí kapitole byly uvedeny rovnice, které se vztahují k tenké čočce, tedy k čočce u které neuvažujeme její tloušťku, anebo je taková tloušťka zanedbatelná v poměru k polo-

měrům zakřivení. Nastanou ale i situace, kdy musíme brát v úvahu i samotnou tloušťku čočky, neboť dokáže ovlivnit výslednou ohniskovou vzdálenost čočky. Pro výpočet ohniskové vzdálenosti tlusté čočky slouží následující rovnice číslo 4, dle [19].

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{t_s(n - 1)}{nr_1r_2} \right) \text{ [m]} \quad (4)$$

kde

n je index lomu čočky obklopené vzduchem [-]

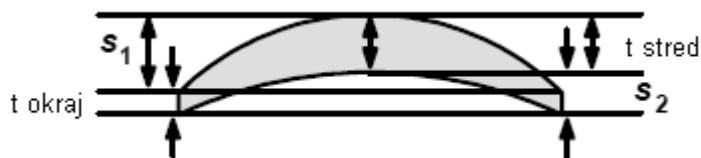
r_1 je poloměr křivosti jedné plochy čočky [m]

r_2 je poloměr křivosti druhé plochy čočky [m]

t_s je středová tloušťka čočky [m]

1.3.1 Tloušťka čočky

Tloušťka čočky je brána v místě průchodu optické osy čočky. V tomto místě jsou od sebe nejvíce vzdáleny vrcholy zakřivení dané čočky. Nejlépe je to vidět z následujícího obrázku číslo 8.



Obr. 8. Parametry čočky t , s_1 a s_2 [3]

Na obrázku jsou znázorněny parametry, které souvisí s tloušťkou čočky. Způsob výpočtu středové tloušťky čočky je v následující rovnici číslo 5, dle [3]:

$$t_s = s_1 - s_2 + t_o \text{ [m]} \quad (5)$$

kde

t_s je středová tloušťka čočky [m]

s_1 je sagita přední křivky [m]

s_2 je sagita zadní křivky [m]

t_o je okrajová tloušťka čočky [m]

Z rovnice tedy plyne, že k úplnému výpočtu středové tloušťky je potřeba znát ještě parametry s_1 , s_2 , t_o a také znalost typu čočky. V případě, že bude čočka dutovypuklého typu, bude parametr s_1 kladný a parametr s_2 záporný. Jinak tomu ale bude, pokud se bude jednat o jiný typ čočky. Platí tedy pravidlo, že pokud se parametr s vztahuje k vypuklé straně čočky, bude kladný a pokud se vztahuje k duté straně čočky, bude naopak záporný. Samotné parametry s_1 a s_2 se určí dle vztahů číslo 6 a 7, dle [3]. Parametr t_o je volen podle požadavků na čočku nebo výrobního postupu [3].

$$s_1 = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \text{ [m]} \quad (6)$$

kde

r_1 je poloměr zakřivení přední strany čočky [m]

d je průměr čočky [m]

$$s_2 = r_2 - \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \text{ [m]} \quad (7)$$

kde

r_2 je poloměr zakřivení zadní strany čočky [m]

d je průměr čočky [m]

2 VÝROBA OPTICKÝCH ČOČEK

Při výrobě optických čoček se využívá několik technologických postupů výroby. Určení správného technologického postupu závisí na volbě materiálu pro výrobu optických čoček. Mezi využívané technologické postupy patří:

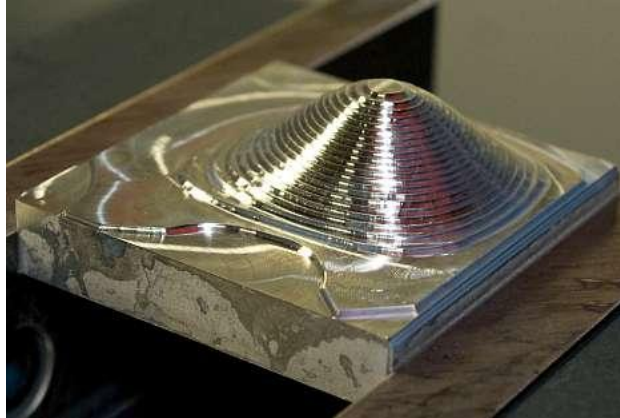
- Třískové obrábění
- Lisování
- Lití

2.1 Třískové obrábění

Při tomto technologickém postupu se využívá vyrobených polotovarů z optických materiálů. Optický materiál se formuje v základní formě, do které se nejčastěji nalije. Po vytvrdnutí materiálu se forma odstraní a tím vznikne polotovar, který je poté dále opracováván. Třískové obrábění je v dnešní době nejčastěji využívaným technologickým postupem pro výrobu optických čoček. Pro samotné třískové obrábění existují tři technologické postupy, kterými je možné optické čočky vyrábět [3],[4].

2.1.1 Hrubé broušení, jemné broušení a leštění

Jedná se o nejstarší technologický postup pro výrobu optických čoček. Pro hrubé broušení, neboli hrubování se dříve využívalo volného brusiva, kterým může být např. korund, smirek a jiné. V dnešní době se využívá pro hrubování nástrojů. Jsou dva typy těchto nástrojů a to tzv. brusná miska a brusný hřib. Typ využívaného nástroje závisí na tvaru čočky. V případě, že je potřeba na čočce vytvořit konvexní (vypuklou) plochu, je využíváno brusné misky a v případě konkávní (duté) plochy se využívá brusného hřibu. Tyto nástroje jsou vyrobeny buď z šedé slitiny neobsahující hliník, anebo je možné v dnešní době využít i tvrdý plast. Tento brusný nástroj musí mít přesný poloměr křivosti a plocha nástroje obsahuje drážky, které mají za úkol udržet brusnou suspenzi při broušení. Při samotném broušení nástroj rotuje v rozmezí 200 až 1000 otáček za minutu a opracovávaná čočka se lehce otáčí. Broušení ovlivňují otáčky nástroje, tlak, materiál nástroje a koncentraci brusiva obsaženého v suspenzi. Moderní systémy využívají pro hrubování speciální frézovací nástroj. Tento nástroj obsahuje diamantové abrazivum, které je zapuštěno do kovové matice. Tyto speciální nástroje mají zrnitost přibližně 160 mikronů. Opracovaný materiál po hrubování lze vidět na následujícím obrázku číslo 9. V tomto případě se sice jedná o kovový materiál, ale pro vyobrazení hrubování je obrázek dostačující [3],[4].

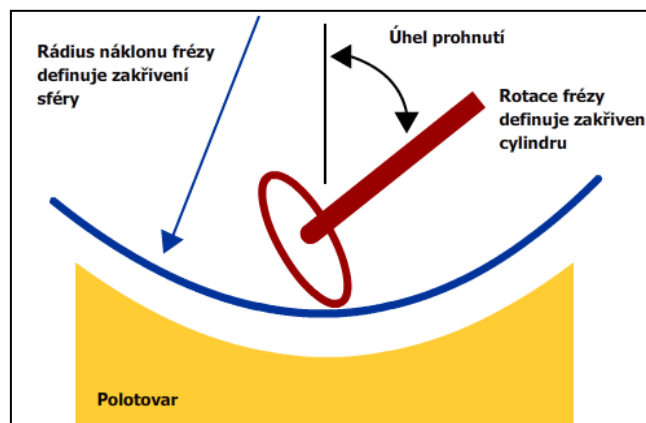


Obr. 9. Materiál po hrubování [5]

Po hrubování následuje jemné broušení tzv. lapování, u kterého se liší zrnitost abraziva. K lapování se využívá diamantových tablet, jejichž zrnitost je přibližně 15 mikronů. Po lapování je povrch čočky matný, a proto je dalším důležitým krokem leštění. Leštění se provádí za pomoci leštící podložky, kterou může být např. polyuretan, a jako leštící médium je využíváno vodní suspenze leštících prášku [3],[4].

2.1.2 Generalizované frézování, broušení a leštění

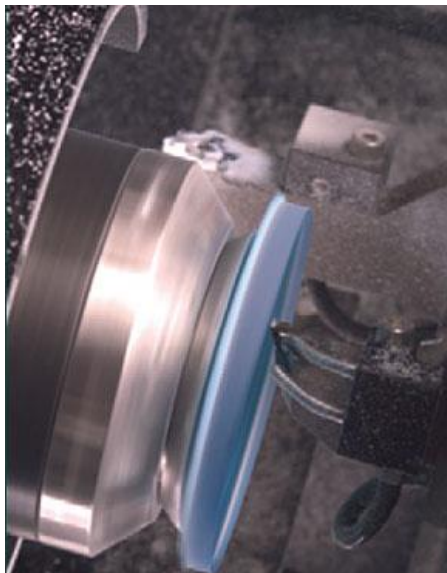
Generalizované frézování je jeden z možných postupů třískového obrábění. V tomto případě se využívá speciální fréza, která obsahuje řezné destičky. Tyto řezné destičky jsou vyrobeny z polykrystalického diamantu. Samotná fréza ovšem generuje tzv. eliptickou chybu. Po generalizovaném frézování se frézované plochy čočky dále opracovávají pomocí šal. Na tyto šaly se nalepují brusné a leštící fólie. Po samotném broušení a leštění je čočka už připravena na použití a nijak dále se neopracovává. Na následujícím obrázku číslo 10 je vyobrazen princip frézy pro generalizované frézování [3],[4].



Obr. 10. Fréza pro generalizované frézování [3]

2.1.3 Frézování, broušení a leštění

Při tomto technologickém postupu je nejprve povrch čočky opracováván speciální frézou s diamantovými noži, která vytvoří zadaný průměr, fazetu a také hrubě opracuje povrch čočky. Po frézování následuje tzv. free-formové broušení, při kterém se využívá speciálního hrotového nástroje SPC. Tento nástroj je zobrazen na obrázku číslo 11. Tento speciální nástroj odstraní eliptickou chybu, která vznikla při frézování. Jelikož hrotový nástroj SPC dokáže čočku tak jemně opracovat, že je možné broušení pomocí šal úplně vypustit. Pokud by ale požadavky na povrch čočky byly vysoké, tak je možné ještě povrch čočky vybrousit pomocí kulových nástrojů obsahující speciální diamantovou brousící vrstvu. Závěrečné leštění je prováděno speciálními houbičkami z polyuretanu [4].

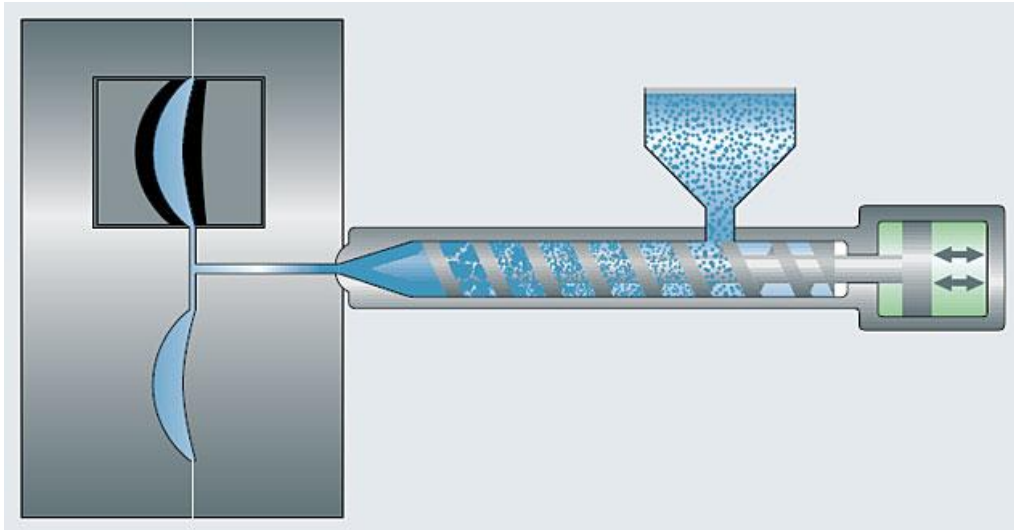


Obr. 11. Nástroj SPC [3]

2.2 Lisování

Dalším možným způsobem výroby optických čoček je využití lisování, kdy je materiál vtlačován do formy. Vtlačování do formy se provádí za zvýšeného tlaku a teploty. Po vychladnutí materiálu ve formě může vzniknout buď hotová čočka nebo polotovár, který je určen k dalšímu opracování. U vtlačování se využívá materiálů v granulované podobě a tento granulát je poté zahříván čímž dojde k jeho změknutí. Po změknutí je materiál vtlačován do speciálních forem. Princip vtlačování materiálu do formy je na obrázku číslo 12. Při lisování je možné využít různých optických materiálů, např. polykarbonát v případě vtlačování nebo minerální sklo. V případě minerálního skla je sklovina zahřátá na tvarovací teplotu a vkapává se do forem. Tento proces vkapávání je automatický a formy se pod

dávkačem automaticky posunují a po vkápnutí skloviny jsou ochlazovány. Po ochlazení je výsledkem hotová čočka [3].



Obr. 12. Princip vlačování materiálu do forem [3]

3 MATERIÁLY PRO VÝROBU ČOČEK

Materiálů pro výrobu čoček se v dnešní době využívá spousta. Jedná se zejména o různé druhy optických skel nebo plastové materiály. Na základě zvoleného druhu materiálu je poté zvolen i technologický proces samotné výroby čoček.

3.1 Skleněné materiály

Sklo jako takové je řazeno mezi přírodní materiály. Má mnohé využití, mezi které patří i výroba optických čoček. Optické sklo se dělí zejména podle indexu lomu. Výsledný index lomu je ovlivňován přidáváním materiálů s různým indexem lomu. Tyto materiály se přidávají do skla při výrobě a na základě jejich vlastností ovlivňují výsledná index lomu optického skla. Vzhled skleněných čoček je na obrázku číslo 13.



Obr. 13. Čočky z optického skla [7]

3.1.1 Optické sklo

Sklo jako takové je amorfní a při běžné pokojové teplotě se vyskytuje v pevném skupenství. V pevném skupenství je křehké a lze jej poměrně jednoduše rozbít. Ovšem při zahřátí se z něj stává viskózní kapalina. Je možné jej tedy různě tvarovat nebo odlévat za využití forem [3].

Složení skla

Sklo se skládá ze tří základních složek, kterými jsou sklotvorné suroviny, taviva a stabilizátory. Dále se můžou do skla přidávat barviva, čeřiva nebo odbarviva (pro dosažení čírého skla) [3].

Sklotvorné suroviny

Sklotvorné suroviny jsou základní složkou skla. Jako hlavní surovina pro výrobu se využívá čistý, jemně rozemletý křemenný písek. Dále se ještě využívá různých oxidů jako oxid boritý a oxid fosforečný. Skla, která obsahují 60 až 80% oxidu křemičitého ve formě křemenného písku, jsou nejčastěji využívanými a nazývají se křemičitá skla. Samotný křemenný písek by neměl obsahovat žádné příměsi, které by mohli výsledné sklo zabarvovat [3].

Taviva

Jsou využívány jako prostředky ke snížení vysoké teploty tání křemene, která se pohybuje kolem 1800°C. Taviva jsou roztavena a poté se nabalí na jednotlivá zrníčka křemenného písku a za pomoci chemických reakcí dojde k roztavení při nižších teplotách, které se pohybují v rozmezí 1400 až 1600°C. Jako taviva se využívají uhličitan sodný, uhličitan draselný a oxid lithný [3].

- Uhličitan sodný, nebo také soda je anorganická sloučenina. Jedná se o sodnou sůl kyseliny uhličité a jeho bod tání je 851°C a vyskytuje se ve formě bílého prášku.
- Uhličitan draselný je bílá sůl kyseliny uhličité s teplotou tání 909°C.
- Oxid lithný je sloučenina kyslíku a lithia s teplotou tání 610°C. Díky nízké teplotě tání stačí velmi malé procento obsahu tohoto taviva, řádově jednotky procent.

Stabilizátory

Stabilizátory se přidávají z důvodu zlepšení chemické stálosti a odolnosti skla. Nejčastěji se využívá vápence a dolomitu. Do optických skel se přidává ještě oxid zinečnatý, který zvyšuje index lomu světla [3].

Výroba skla

Sklo se vyrábí tavením v tavících pecích za vysokých teplot. Při tavení se využívá tři technologických kroků, každý krok při jiné teplotě.

První technologický krok

Je při teplotě 1200°C a nazývá se růst bublinek. Základní složky skla jsou smíchány a po několik hodin zahřívány na danou teplotu. Při tavení vzniká hodně chemických reakcí, které vytváří velké množství plynů. Tyto plyny tvoří v tavenině bublinky, které se v dalším kroku odstraňují [3].

Druhý technologický krok

Při tomto kroku se do taveniny přidávají čeriva, která mají za úkol odstranit vzniklé bublinky při tavení. Po přidání čeriva je teplota zvýšena na 1750°C a vznikající plyny z čeriva pronikají do bublinek a ty poté vystoupají nahoru a opustí taveninu [3].

Třetí technologický krok

V tomto kroku se teplota taveniny snižuje na teplotu přibližně 900 až 1200°C. Při této teplotě jsou vyloučeny z taveniny poslední plyny, které vznikly při předchozích krocích. Poté se sklo stáčí do předehřátých van, kde chladne. Chladnutí skla může trvat několik týdnů, ale i měsíců [3].

3.2 Plastové materiály

Mezi vhodné materiály pro výrobu čoček patří i některé druhy plastů. Čočky vyrobené z plastových materiálů jsou lehčí než skleněné čočky, ale jsou měkčí, a tudíž více náchylné na poškrábání. Proto se plastové čočky někdy opatřují povrchovou úpravou, aby se zamezilo poškrábání. Plastové materiály pro výrobu čoček se dělí do dvou skupin a to na:

- Termoplasty
- Termosety

3.2.1 Termoplasty

Jsou takové plastové materiály, které působením tepla měknou. Patří mezi ně např. polykarbonát nebo teflon. Čočky vyrobené z termoplastů se vyrábí metodou lisování, která je popsána v předchozí podkapitole 2.2.

Teflon

Teflon, celým názvem Polytetrafluorethylen, je krystalický polymer. Má bílou barvu a jeho povrch je hladký. Teflon patří mezi pružné materiály a má vysokou chemickou odolnost, dobré kluzné vlastnosti, odolnost proti stárnutí, odolnost proti vysokým teplotám a další.

Výrobky z teflonu jsou zdravotně nezávadné a to pokud jsou využívány v rozsahu teplot od -70°C do 250°C . Teflon patří mezi termoplasty a jeho teplota tání je přibližně 327°C . Vlastnosti teflonu se mění už při teplotě 260°C a při teplotách nad 350°C nastává tepelný rozklad a vzniklé zplodiny jsou toxické [8],[9].

Teflon náhodně objevil Roy Plunkett v roce 1938, který pracoval v New Jersey pro DuPont. Samotný objev byl patentován v roce 1941 a v roce 1945 byla zaregistrována ochranná známka pro obchodní název Teflon. O pár let později se už Teflon začal využívat, jak v automobilovém průmyslu, elektroinstalacích a i v domácnostech např. jako nepřilnavý povrch kuchyňského nádobí. Postupem času se Teflon začal čím dál více využívat v různých odvětvích průmyslu. Velmi často se využívá pouze pro potažení určitých částí Teflonem, aby byla zajištěna ochrana před poškozením nebo aby se zlepšily vlastnosti povrchu dané části nebo předmětu. Dále našel využití i při elektroinstalacích, jelikož má velmi dobré elektroizolační vlastnosti. Je tedy zřejmé, že Teflon je možné využívat k velké řadě funkcí. Je jen potřeba brát na vědomí, že je zdravotně nezávadný pouze do teploty přibližně 250°C . Na následujícím obrázku číslo 14 jsou znázorněny polotovary z Teflonu, ze kterých je možné obráběním vytvořit požadovaný tvar [8],[9].



Obr. 14. Teflon [9]

Polykarbonát

Polykarbonát patří mezi měkké, lehké a pružné plasty. Dále má vysoký index lomu, nízkou hmotnost a vysokou odolnost proti poškrábání. Mezi jeho další významnou vlastnost patří to, že dokáže pohltit 100% UV záření a tudíž našel své využití ve výrobě brýlových čoček.

Dále se využívá jako komůrkový polykarbonát např. pro přístřešky nebo jako polykarbonátové desky. Na následujícím obrázku číslo 15 jsou polykarbonátové desky [10].



Obr. 15. Polykarbonátové desky [11]

Polymetylmetakrylát

Zkráceně se označuje jako PMMA a jedná se také o termoplast. Jedná se o čirý plast, který je průhlednější než křišťálové sklo s propustností více jak 92% viditelného světla. Nejčastěji se vyskytuje ve formě bloků, desek nebo granulí. Granule se dále využívají k výrobě předmětů nebo polotovarů metodou vstřikování ve vstřikovacích lisích. PMMA má poměrně vysokou chemickou odolnost, ale na druhou stranu má velmi nízkou otěruvzdornost [26].

Trivex

Jedná se o polyuretanový polymer, který byl prvotně vytvořen pro využití ve vojenském průmyslu. Teprve až od roku 2001 se začal využívat v optickém průmyslu a v dnešní době je známý po celém světě. Trivex je pružný a extrémně silný materiál. Má perfektní optické vlastnosti, je velmi odolný proti poškrábání či jinému mechanickému poškození, a patří mezi jeden z nejlehčích plastových materiálů využívaných k výrobě čoček [12].

3.2.2 Termosety

Termosety, na rozdíl od termoplastů, působením tepla tvrdnou a po vytvrzení ztrácí další možnost změny tvaru. Jedná se zejména o pryskyřici CR39. Čočky z termosetů se vyrábí metodou lití.

Pryskyřice CR39

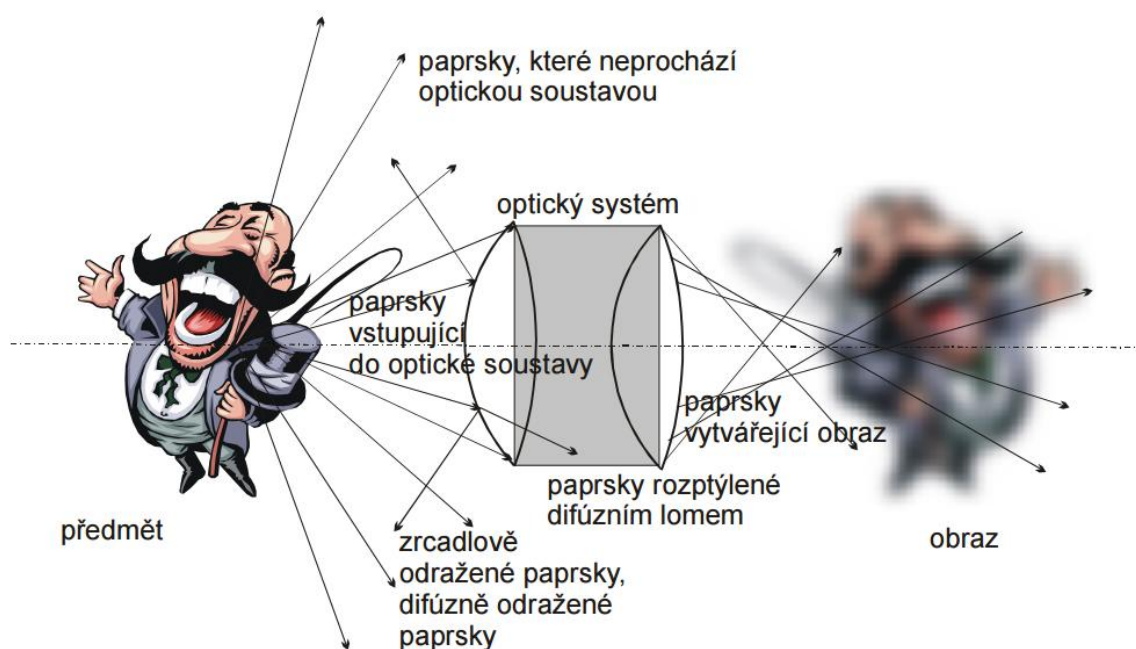
Pryskyřice CR39 je plastový polymer, který se často používá pro výrobu čoček. Nejprve byl vyvinut pro vojenské účely, ale později se jeho oblast využití rozšířila. Jedná se o tekutý polymer, který se odlévá do forem a poté po přidání katalyzátoru a zahřátí mění svoje skupenství a stává se z něj pevná látka. Mezi jeho vlastnosti patří odolnost vůči rozpouštědlům, pevnost a odolnost proti tání. Dále je také velmi odolný proti poškození nebo poškrábání a má velkou propustnost světla. Může se za pomoci barviv barvit do různých odstínů a barev, a také nabízí široké možnosti pro nanášení povrchových úprav. Na následujícím obrázku číslo 16 jsou čočky vyrobené z CR39 obarvené do různých barev [3].



Obr. 16. Čočky z pryskyřice CR39 [13]

4 OPTICKÉ VADY

Při zobrazování čočkou nebo optickou soustavou tvořenou více čočkami, se můžeme setkat s optickými vadami. Jako optické vady jsou brány odchylky obrazu. Tedy můžeme říct, že výsledný zobrazený obraz se liší od vzhledu původního předmětu. Obraz bez optických vad můžeme dostat jedině tehdy, pokud je vytvořen ideální optickou soustavou, která zobrazuje např. bod na bod. Nejlépe je nedokonalé zobrazení obrazu zapříčiněno optickými vadami vidět z následujícího obrázku číslo 17, kde je vyobrazeno zobrazení pomocí reálné optické soustavy [20].



Obr. 17. Optické vady při zobrazování předmětu [21]

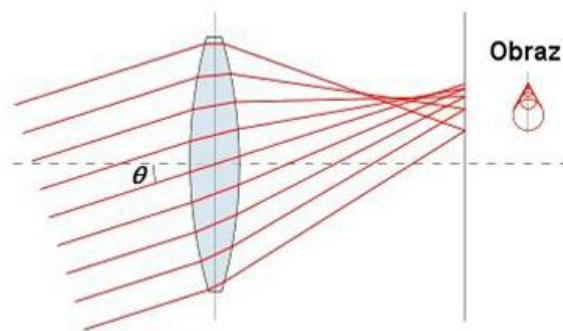
Vznik nedokonalého zobrazení obrazu má tři důvody, které jsou:

- Některé paprsky, jež vycházejí z předmětu, minou optickou soustavou
- Některé paprsky prochází optickou soustavou, ale neprojdou do obrazové roviny
- Paprsky, které projdou optickou soustavou, se neprotnou v obrazové rovině [21]

Jednotlivé optické vady, se kterými se můžeme setkat, jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.1 Koma

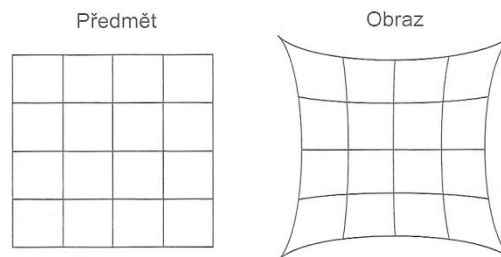
K této optické vadě dochází, je-li optický široký svazek silně skloněný vůči optické ose čočky. Po průchodu čočkou má svazek paprsků nesouměrný tvar a výsledným obrazem je ploška, která je protáhlá jedním směrem. Koma je vyobrazeno na obrázku číslo 18 [20].



Obr. 18. Koma [27]

4.2 Zkreslení obrazu

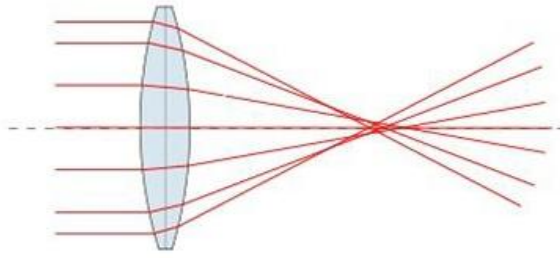
Ke zkreslení obrazu dochází tehdy, pokud se šikmé paprsky protínají v bližší rovině než paprsky které jsou rovnoběžné s osou. Výsledkem této optické vady je zakřivení obrazové roviny. Jednoduše lze tedy říct, že z přímky se stane křivka. Zkreslení obrazu je znázorněno na obrázku číslo 19 [21].



Obr. 19. Zkreslení obrazu [22]

4.3 Otvorová vada

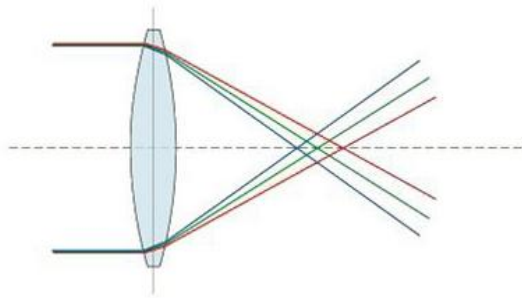
Otvorovou vadu způsobují nedokonalosti povrchu optické lámavé plochy čočky. Procházející paprsky se protínají před obrazovou rovinou a výsledný obraz je tvořen jasným bodem obsahující kruhový rozptylný kroužek. Výsledný zobrazený obraz bude mít nižší kontrast a rozmazané detaily. Otvorová vada je na obrázku číslo 20. Otvorová vada se dělí na podélnou a příčnou [20].



Obr. 20. Otvorová vada [27]

4.4 Barevná vada

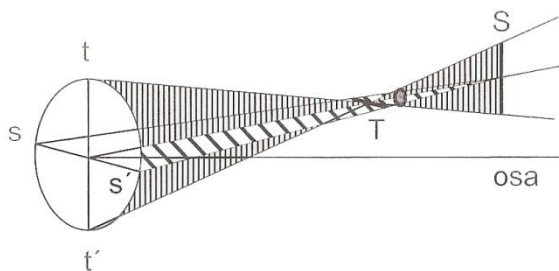
Barevná vada je způsobena odlišnou ohniskovou vzdáleností pro různé barvy světla. Nejjednodušeji to lze vysvětlit na případu zobrazování bodu. Výsledný obraz bodu je tvořen určitou barvou a je obklopen jinými barvami. Barevnou vadu ovlivňuje materiál, ze kterého je čočka vyrobena. Barevná vada je zobrazena na obrázku číslo 21 [20],[22].



Obr. 21 Barevná vada [27]

4.5 Astigmatismus

Případ této vady je vyobrazen na obrázku číslo 22, na kterém bude tato optická vada popsána. Astigmatismus je typ optické vady, kdy jsou paprsky procházející čočkou v rovině ss' zobrazeny v bodě S a paprsky procházející čočkou v rovině tt' zobrazeny v bodě T. Mezi těmito body je oblast, ve které je obraz nejméně rozmazán. Tato oblast je znázorněna v obrázku elipsou [22].



Obr. 22. Astigmatismus [22]

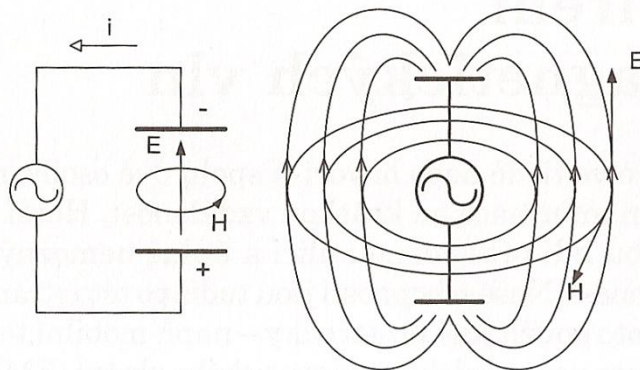
5 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE

Elektromagnetické pole se využívá pro přenos signálů na krátké i dlouhé vzdálenosti. Může se jednat např. o signály při komunikaci pomocí mobilních telefonů. Tyto signály se přenášejí volným prostorem, vlnovody či různými druhy vedení.

5.1 Vznik elektromagnetického pole

Elektromagnetické pole vytváří nerovnoměrně se pohybující částice s elektrickým nábojem. Samotné elektromagnetické pole se skládá z elektrického (E) a magnetického (H) pole. Tato pole jsou od sebe neoddelitelná a podmiňují se. Vznik elektromagnetického pole si vysvětlíme na kondenzátoru. Pokud je kondenzátor připojen na střídavé napětí, vznikne v dielektriku mezi elektrodami střídavé elektrické pole, které vytvoří posuvný proud stejné velikosti jako střídavý proud v obvodu kondenzátoru. Posuvný proud poté vytváří kolem sebe magnetické pole, přičemž směr intenzity magnetického pole se mění v závislosti na směru proudu. Vlivem elektrického pole dochází mezi elektrodami kondenzátoru k polarizaci dielektrika, která se projevuje vzájemnými posuvy mezi zápornými a kladnými částicemi molekul. V závislosti na střídavém napětí a proudu uvnitř obvodu se mění intenzita elektrického a magnetického pole [14].

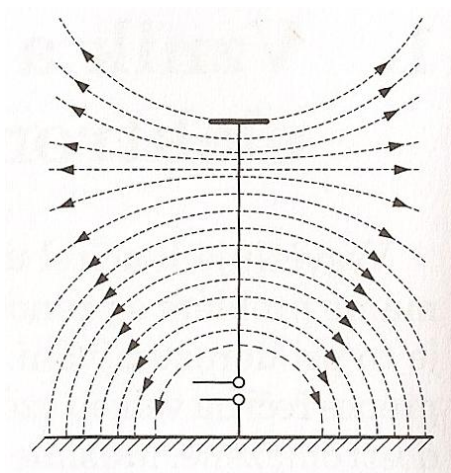
Elektrické a magnetické střídavé pole existují vždy společně a jako celek tvoří elektromagnetické pole. Charakterizují ho vektory E a H , které jsou na sebe navzájem kolmé. Do teď se jednalo o elektromagnetické pole, které vznikalo uvnitř kondenzátoru mezi jeho elektrodami. Pokud se ale elektrody kondenzátoru oddálí, začne se elektromagnetické pole šířit do prostoru kolem kondenzátoru. Elektromagnetické pole je tudíž vyzařováno do prostoru. Vzniklé elektromagnetické pole uvnitř kondenzátoru a elektromagnetické pole šířící se do prostoru je vyobrazeno na obrázku číslo 23 [14].



Obr. 23. Vznik elektromagnetického pole [14]

Po vyzáření elektromagnetického pole do prostoru jsou jeho vlastnosti, tvar a směr šíření ovlivňovány vlastnostmi prostředí, ve kterém se šíří a fázovými vztahy mezi elektrickou a magnetickou složkou pole. Za vlastnosti prostředí jsou považovány permitivita a permeabilita prostředí a vodivost materiálů [14].

K samotnému vyzařování elektromagnetického pole do prostoru slouží antény. Tyto antény bývají nejčastěji zastoupeny jako půlvlnný dipól, který má jednu svoji elektrodu nahrazenou zemí. Vyzařování elektromagnetického pole do prostoru za pomoci půlvlnného dipólu je znázorněno na obrázku číslo 24.



Obr. 24. Vyzařování elektromagnetického pole do prostoru [14]

Vyzářená elektromagnetická energie z antény se dále šíří rychlostí světla a různými směry atmosférou jako postupné elektromagnetické vlnění. Říkáme, že se elektromagnetické pole šíří směrem od antény do prostoru v kulových vlnoplochách. [14] Rychlost šíření elektromagnetického pole v prostoru závisí na permitivitě a permeabilitě prostředí a je dána následující rovnicí číslo 8, dle [14]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \text{ [m/s]} \quad (8)$$

kde

v je rychlost šíření

ε je permitivita prostředí

μ je permeabilita prostředí

Rychlost šíření elektromagnetických vln ve volném prostoru je stejná jako rychlost světla. K elektromagnetickým vlnám se vztahuje ještě další parametr, a to vlnová délka. Vlnová délka elektromagnetických vln určuje vzdálenost dvou sousedních bodů se stejnou fází a je vyjádřena rovnicí číslo 9, dle [14]:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f} \text{ [m]} \quad (9)$$

kde

λ je vlnová délka [m]

v je rychlost šíření [m/s]

f je frekvence [Hz]

c je rychlost světla, tedy $3 \cdot 10^8$ m/s

Z předchozí rovnice tudíž plyne, že vlnová délka elektromagnetických vln je závislá na frekvenci a to tak, že čím větší je frekvence, tím menší je vlnová délka a naopak. V následující tabulce číslo 1 je rozdělení elektromagnetických vln v závislosti na vlnové délce.

Tab. 1. Přehled elektromagnetických vln [14]

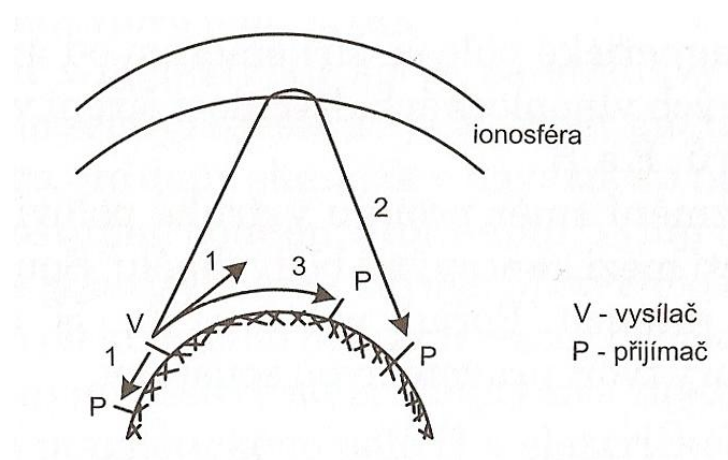
Název vln	Vlnová délka	Frekvence	Použití
Myriametrové	10 - 100 km	3 - 30 kHz	námořní a letecká navigace
Kilometrové	1 - 10 km	30 - 300 kHz	rozhlasové dlouhé vlny DV
Hektometrové	100 - 1000 m	0,3 - 3 MHz	rozhlasové střední vlny SV
Dekametrové	10 - 100 m	3 - 30 MHz	rozhlasové krátké vlny KV
Metrové	1 - 10 m	30 - 300 MHz	rozhlasové velmi krátké vlny VKV
Decimetrové	1 - 10 dm	0,3 - 3 GHz	IV. a V. televizní pásmo, GSM
Centimetrové	1 - 10 cm	3 - 30 GHz	družicové komunikace
Milimetrové	1 - 10 mm	30 - 300 GHz	přistávací a říční radiolokátory

5.2 Šíření elektromagnetických vln

Elektromagnetické vlny se ve volném prostoru můžou šířit třemi způsoby, které jsou:

- Přímá vlna
- Prostorová vlna
- Povrchová vlna

Tyto tři způsoby šíření elektromagnetických vln jsou znázorněny na následující obrázku číslo 25.



Obr. 25. Šíření elektromagnetického vlnění (1 - přímá, 2 - prostorová, 3 - povrchová vlna) [14]

5.2.1 Přímá vlna

Při přímém šíření elektromagnetických vln je nutná viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Elektromagnetické vlny se tedy šíří přímo mezi vysílačem a přijímačem a v daném prostoru nesmí být žádné podstatné překážky. Na přímočarém šíření elektromagnetických vln je založena radiolokace s tím rozdílem, že vysílač i přijímač jsou umístěny ve stejném místě. V případě radiolokace jsou pomocí vysílače vyslány elektromagnetické vlny, které se odrazí od případných objektů v prostoru a putují zpět do místa, odkud byly vyslány. Tam je zachytí přijímač a z přijatého vlnění se vyhodnotí, zda se ve sledovaném prostoru nachází nějaký objekt [14].

5.2.2 Prostorová vlna

Prostorová vlna se šíří odrazem od ionosféry, která se nachází asi ve výšce 60 - 80 km nad zemským povrchem. Ionosféra je část atmosféry, ve které nastává ionizace plynu. Ionosfé-

ra má ve svých vrstvách různá maxima ionizace, a tyto vrstvy ovlivňují přenos elektromagnetických vln. Rozhraní jednotlivých vrstev je proměnlivé a je závislé na denní a roční době. Stav ionizace vyjadřuje počet volných elektronů N obsažených v 1 cm^3 [14].

Na základě frekvence vlny a elevačním úhlu β , pod kterým je vlna vyslána, jednotlivé vrstvy ionosféry vlny buď lámou, odrážejí nebo propouští do další vrstvy. Tato skutečnost záleží na indexu lomu dané vrstvy, který je vyjádřen následující rovnicí číslo 10, dle [14]:

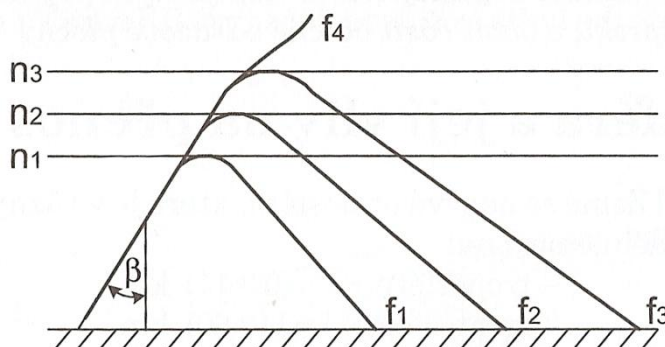
$$n = \sqrt{1 - 80,8 \frac{N}{f^2}} \quad [-] \quad (10)$$

kde

N je počet volných elektronů v jednotce objemu [-]

f je frekvence elektromagnetického vlnění [Hz]

Ze vzorce vychází, že čím větší bude frekvence elektromagnetického vlnění, tím menší bude výsledný index lomu dané vrstvy. Při překročení určité frekvence nedokáže ionosféra vlnu vůbec odrazit a vlna projde skrz ionosféru. Tento princip odrazu je zachycen na následujícím obrázku číslo 26, kde vlnu s nejmenší frekvencí f_1 odráží hned první vrstva a vlnu s nejvyšší frekvencí f_4 už nedokáže zachytit žádná vrstva a vlna projde skrz bez jakéhokoliv odrazu [14].



Obr. 26. Lom elektromagnetických vln v ionosféře [14]

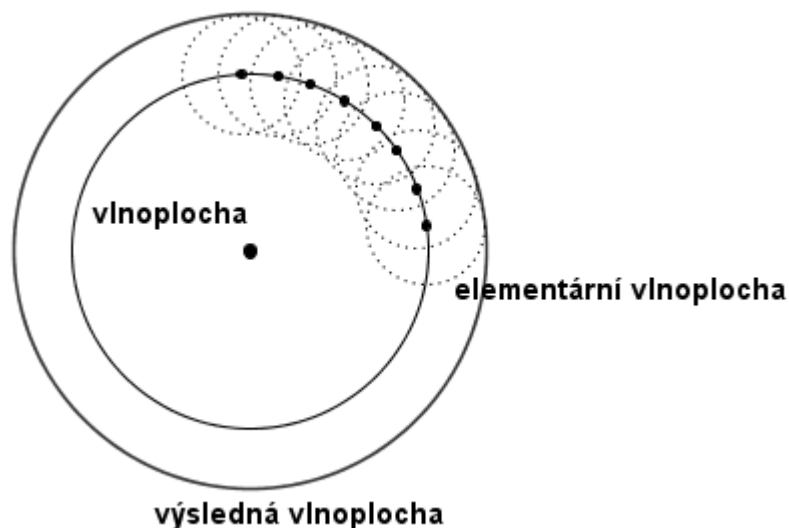
5.2.3 Povrchová vlna

Povrchové šíření elektromagnetických vln má schopnost se ohýbat podél zemského povrchu. Výhodou oproti přímé vlně je, že tento způsob přenosu nemusí mít přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem a vlnění se dokáže ohýbat i přes rozměrnější překážky. Tento způsob šíření je také vhodný pro členitější terén [14].

Princip ohybu elektromagnetických vln

Jak už bylo dříve uvedeno, elektromagnetické vlny se šíří v kulových vlnoplochách. Šíření vln je založeno na Huygensově-Fresnelově principu. Podle tohoto principu se každý bod vlnoplochy stává dalším elementárním zdrojem vlnění. Vlnění vzniklá v částečných zdrojích se skládají neboli interferují [14]. *"Výsledné vlnění se vzájemně ruší, s výjimkou směru šíření, kde se vlnění vzájemně podporuje. Dorazí-li však vlna k překážce, nedojde všude k vzájemnému vyrušení vlnění, protože pod hranou překážky se neuplatní elementární zdroje všech vlnoploch. Skládá se pouze vlnění elementárních zdrojů nad překážkou [14]."*

Výsledné vlnění se ohýbá kolem překážky a velikost ohybu je závislá na vlnové délce a to tak, že čím větší je vlnová délka, tím více je podporován ohyb vlny a naopak. Huygensů-Fresnelův princip je vyobrazen na následujícím obrázku číslo 27.

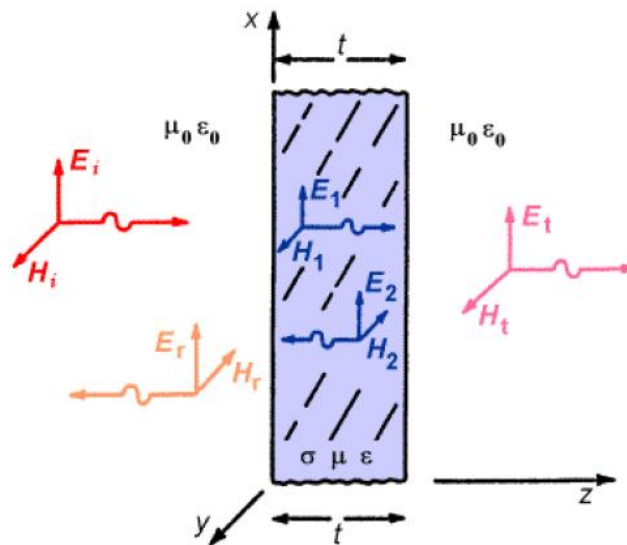


Obr. 27. Huygensův - Fresnelův princip [15]

5.3 Průchod elektromagnetických vln materiálem

Při šíření elektromagnetického vlnění musíme počítat i s průchodem přes pevný materiál. Průchod elektromagnetických vln je znázorněn na obrázku číslo 28, na kterém je pevný materiál, v tomto případě se jedná o kovovou desku, na kterou kolmo dopadá rovinná elektromagnetická vlna šířící se ve směru osy z. V případě kolmého dopadu elektromagnetické vlny na kovovou desku dochází k nejmenším ztrátám, než pokud by vlna dopadala pod jiným úhlem. Uvnitř materiálu dochází k několikanásobným odrazům a výsledná vlna, která projde skrz je utlumena. Část vlny vně materiálu projde skrz a část je odražena zpět

nebo dokonce zanikne uvnitř materiálu. Výsledný útlum vlny závisí zejména na úhlu dopadu na překážku a také na druhu materiálu překážky [16],[17].



Obr. 28. Dopad elektromagnetické vlny na překážku [16]

Těchto poznatků se využívá při stínění, kdy je naopak našim cílem zamezit elektromagnetickým vlnám průchod do prostor, vodičů a dalších. Při stínění je využíváno tokových materiálů, které poskytují největší útlum elektromagnetických vln.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem této praktické části je navrhnout a následně vyrobit čočky pro tvarování svazku milimetrových vln. Vyrobené čočky budou využívány pro zpřesnění analýzy signálu prováděné na spektrálním analyzátoru na nově vybudovaném specializovaném pracovišti na Fakultě aplikované informatiky, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. V případě tohoto pracoviště se bude zkoumat zejména vliv různých materiálů na šíření elektromagnetického vlnění. Jedním z těchto parametrů je komplexní permitivita ve volném prostoru, která má v dnešní době velký význam zejména v ochraně elektroniky před nechtěnými signály.

Prostředí kolem nás obsahuje nepřeberné množství signálů různých frekvencí. Je jasné, že ne všechny signály jsou žádoucí a některé mohou mít negativní vliv na elektroniku. Pokud je elektronika ovlivňována nežádoucími signály, tak může být omezena její funkčnost, nebo dokonce se může nenávratně poškodit. Proto je potřeba zabránit přístupu nežádoucích signálů na nejnáchylnější části elektroniky. K tomu se využívá stínění a tím se dostáváme k již zmíněné komplexní permitivitě. Ta udává schopnost materiálu ovlivnit šíření elektromagnetických vln. Tohoto poznatku se využívá u výběru vhodných materiálů využívaných pro stínění. Jako příklad si můžeme uvést využívání kompozitních materiálů k ochraně avioniky letadel. V tomto případě se část trupu, která obsahuje avioniku, odstíní za pomoci vhodných kompozitních materiálů, aby nedocházelo k negativnímu ovlivňování elektroniky a elektronických přístrojů letadel. Běžně jsou u kompozitních materiálů známé mechanické vlastnosti, ale v případě elektrických vlastností tomu tak není a proto se musí zkoumat.

Nové pracoviště je vybaveno spektrálním obvodovým analyzátozem typu ZVA67 od firmy Rohde&Schwarz, které je schopno generovat a analyzovat změny signálu až do frekvence 67 GHz. Jelikož ale bylo požadováno analyzování signálů na vyšších frekvencích, je rozsah frekvenčního pásma spektrálního analyzátoru nedostačující, a tak byly ještě pořízeny čtyři sady konvertorů, které umožňují generování signálů až do frekvence 325 GHz. Samotné konvertory jsou vybaveny kruhovými vysílacími anténami vyrobenými na zakázku firmou Rohde&Schwarz. Kruhové antény jsou pro každý konvertor odlišné v závislosti na frekvenčním rozsahu.

Pokud chceme provádět analýzu signálů, je potřeba generovanou vlnu tvarovat do rovinné vlny a to zejména proto, že veškerá teorie vztahující se k tomuto tématu předpokládá, že testovaným vzorkem prochází rovinná vlna. Nabízely se dvě možnosti jakým způsobem

toho dosáhnout. První možností bylo využití sady zrcadel, které by vyslanou vlnu odrážely směrem ke sledovanému vzorku a následně po průchodu vzorku poté k přijímací anténě. Druhým způsobem bylo využití čoček, které nevyužívají odrazu, ale lomu paprsků při průchodu materiálem s jiným indexem lomu než je index lomu vzduchu. Tento způsob tvarování vlny je přesnější, a proto byl zvolen jako požadovaný způsob tvarování a je realizován a testován v rámci praktické části této diplomové práce.

7 SPECIALIZOVANÉ LABORATORNÍ PRACOVISTĚ

Na Fakultě aplikované informatiky, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně bylo vybudováno nové laboratorní pracoviště, na kterém je možné provádět analýzu elektromagnetického vlnění ve volném prostoru. Na tomto pracovišti se zkoumá zejména vliv materiálů na elektromagnetické vlnění, tedy jejich permitivita. Pracoviště je vybaveno spektrálním analyzátozem R&S® ZVA67, který je doplněn konvertory pro zvýšení frekvence generovaných signálů. Tyto konvertory jsou připevněny k elektrickým pojezdům.

Pro účely ověřování navrhnutých čoček bylo pracoviště dále dovybaveno počítačem a speciální kamerou od firmy Spiricon vhodnou mimo jiné pro sledování svazku paprsků elektromagnetických vln. Kompletní pracoviště je na následujícím obrázku číslo 29 a jednotlivé komponenty jsou blíže popsány v následujících podkapitolách.



Obr. 29. Laboratorní pracoviště

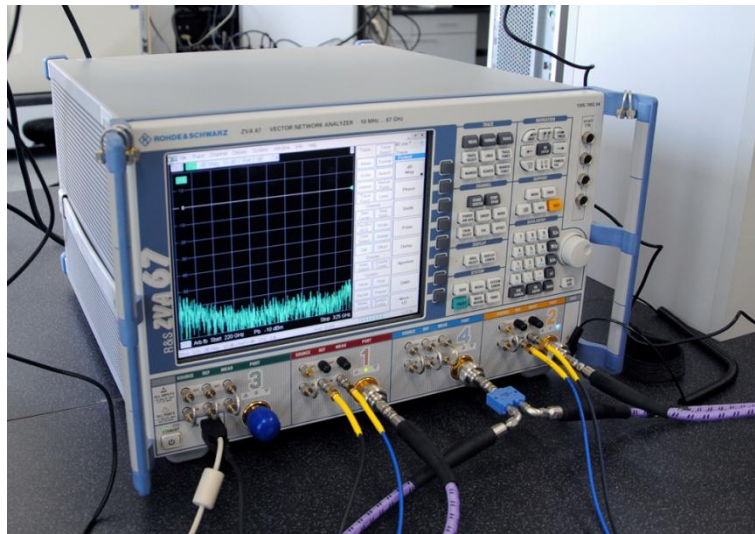
7.1 Spektrální obvodový analyzátoz Rohde&Schwarz ZVA67

Spektrální analyzátozy jsou zařízení, která dokážou provést analýzu signálů elektromagnetického vlnění. Na těchto zařízeních se můžou měřit různé parametry, např. již zmiňovaná permitivita ve volném prostoru. Analyzátozy jsou vybaveny vysílací a přijímací anténou a na základě vyslaného a poté přijatého signálu analyzují změny jako např. útlum signálu při průchodu materiálem. Pracoviště bylo vybaveno spektrálním obvodovým analyzátozem Rohde&Schwarz ZVA67.

Řada zařízení R&S[®]ZVA je ideální volbou pro náročné měření jak v laboratoři, tak ve výrobě - od měření filtrů, které vyžadují maximální dynamický rozsah, lineární a nelineární měření na zesilovačích, až po měření na přijímačích a vysílačích. Řada zařízení R&S[®]ZVA stanovila milníky pro nejnáročnější aplikace:

- První spektrální analyzátor se čtyřmi vnitřními zdroji pro měření až do 67 GHz
- První spektrální analyzátor, který generuje fázově-koherentní signály [18]

Na následujícím obrázku číslo 30 je zachycen spektrální analyzátor R&S[®]ZVA67.



Obr. 30. Spektrální analyzátor R&S[®]ZVA67

Zařízení R&S[®]ZVA67 obsahuje jeden zdroj na port. Speciální bezpečnostní spínací zařízení umožňuje paralelní výstup signálu, tj. signály mohou vystupovat na měřené zařízení přes všechny porty ve stejnou dobu. Kromě toho je přímý přístup ke generátoru a přijímači k dispozici volitelně. Tento koncept nabízí mnoho výhod, ať už se jedná o rychlost měření nebo funkčnost. Mezi hlavní přednosti zařízení R&S[®]ZVA patří zejména:

- Široké mezifrekvenční pásmo a dynamický rozsah pro rychlé a přesné měření
- Minimální nároky na kalibraci a čas
- Paralelní měření - až 4x rychlejší
- Rychlé přepínání mezi nastaveními nástrojů
- Kanálové bity a uživatelské porty - vysokorychlostní řízení externích zařízení
- Segmentované zobrazování pro optimální rychlost, přesnost a dynamický rozsah
- Přenos dat probíhá současně [18]

Specifikace R&S®ZVA67

- Počet portů pro testování 2 nebo 4
- Frekvenční rozsah 10 kHz až 67 GHz
- Počet testovacích bodů na stopě 1 až 600001
- Měřená šířka pásma 1 Hz až 1 MHz (s možností až do 30 MHz)
- Maximální počet vnitřních zdrojů 4
- Operační systém Windows XP Embedded [18]

Dynamický rozsah měření R&S®ZVA67 při šířce pásma 10Hz

- Mezi testovacími porty typ. 140 dB
- S přímým přístupem přijímače typ. >145 dB
- Výstupní výkon testovacího portu typ. 18 dB
- Výkonový rozsah typ. >58 dB
- Doba měření na testovací vzorek <3,5μs
- Doba přenosu dat (v závislosti na způsobu propojení)
 - IEC/IEEE sběrnice <2,9ms
 - VX11 přes 100 Mbit/s LAN <1,3ms
 - RSIB přes 100 Mbit/s LAN <0,7ms
- Doba přepnutí mezi kanály <1ms
- Doba přepnutí mezi nastavením nástrojů <10ms [18]

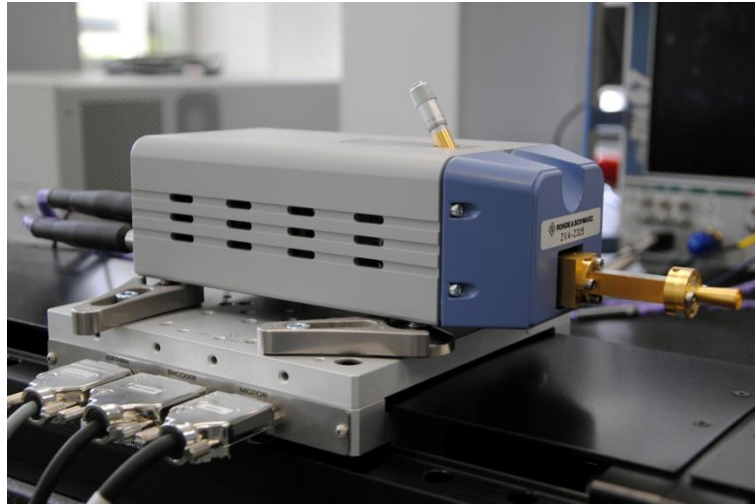
7.2 Konvertory Rohde&Schwarz

Jelikož spektrální analyzátor R&S®ZVA67 dokáže generovat signály pouze do 67 GHz, byly k němu pořízeny čtyři sady konvertorů taktéž od firmy Rohde&Schwarz, kde každá sada obsahuje vysílací a přijímací konvertor. Tyto konvertory dokážou generovat signály na vyšších frekvencích. Ke konvertorům byly dále pořízeny kruhové antény vyrobené na zakázku taktéž firmou Rohde&Schwarz, které jsou lepší, ale na druhou stranu poměrně dražší při porovnání se standardně dodávanými čtvercovými anténami. Jednotlivé sady konvertorů jsou:

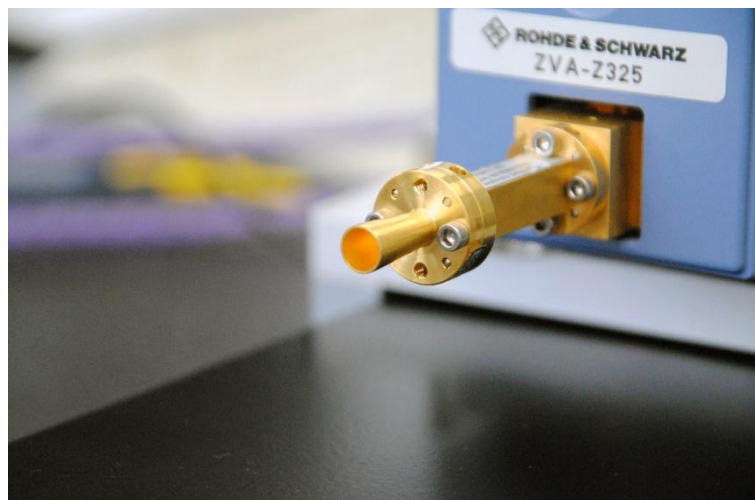
- ZVA-Z90E
- ZVA-Z140
- ZVA-Z220

- ZVA-Z325

Na následujících obrázcích číslo 31 a 32 je zachycen konvertor, v tomto případě R&S® ZVA-Z325 a detail zakázkové kruhové antény od firmy Rohde&Schwarz.



Obr. 31. Konvertor R&S® ZVA-Z325



Obr. 32. Kruhová anténa

Vlastnosti konvertorů

- Proměnný výstupní výkon
- Elektronické ovládání napájení
- Automatické nastavení parametrů
- Pulsní měření
- Kalibrace [18]

Specifikace konvertorů Rohde&Schwarz

Specifikace jednotlivých konvertorů firmy Rohde&Schwarz, kterými je vybaveno pracoviště, je uvedena v následující tabulce číslo 2.

Tab. 2. Specifikace konvertorů [18]

	ZVA-Z90E	ZVA-Z140	ZVA-Z220	ZVA-Z325
Frekvenční rozsah [GHz]	60 - 90	90 - 140	140 - 220	220 - 325
Dynamický rozsah [dB]	>100	>85	>85	>80
	typ. 115	typ. 105	typ. 105	typ. 100
Výstupní výkon [dBm]	typ. +10	typ. +3	typ. -12	typ. -20

7.3 Elektrické pojezdy Newport

Jelikož pro účely měření je potřebné s konvertory pohybovat, bylo pracoviště vybaveno elektrickými pojezdy firmy Newport. Komplet elektrických pojezdů se skládá ze dvou drah s lineárními motory typu IMS-LM a z řídicí jednotky XPS, která slouží k ovládní pojezdů. Tyto pojezdy jsou vybaveny plošinou, ke které jsou ukotveny konvertory. Dráhy s lineárními motory jsou propojeny s řídicí jednotkou, která motory ovládá. K ovládní samotné řídicí jednotky pojezdů je využíváno notebooku. K ovládní pojezdů slouží prostředí, ke kterému se přistupuje přes internetový prohlížeč po zadání IP adresy 192.168.0.254 do adresového řádku. Propojení notebooku a řídicí jednotky je realizováno pomocí běžného síťového kabelu s konektorem RJ-45. Dráhy elektrických pojezdů s připevněnými konvertory a řídicí jednotka jsou vyobrazeny na následujících obrázcích číslo 33 a 34.



Obr. 33. Dráhy elektrických pojezdů s konvertory



Obr. 34. Řídící jednotka pojezdů konvertorů

7.4 Kamera Spiricon Pyrocam III

Pro účely ověření navrhnutých čoček bylo pracoviště dovybaveno ještě stolním počítačem a speciální kamerou, která umožňuje mimo jiné sledování elektromagnetického pole a dokáže jej převést do grafické podoby. Pro naše účely bylo využito kamery Pyrocam III od firmy Spiricon. Jedná se o kameru s pyroelektrickým polem, které slouží jako snímací plocha. Kamera umožňuje sledování různých vlnových délek signálů za pomoci výměnných filtrů.

K propojení kamery s počítačem slouží kabel s rozhraním FireWire (neboli IEEE 1394) a napájení zajišťuje spínaný zdroj 12V/2A. Všechn potřebný software je uložen na CD, které bylo dodáno spolu s kamerou. Kamera Pyrocam III je zobrazena na následujících obrázcích číslo 35 a 36.



Obr. 35. Kamera Spiricon Pyrocam III



Obr. 36. Kamera Spiricon Pyrocam III - konektory

Vlastnosti kamery Spiricon Pyrocam III

- Rozsah sledovaného spektra 13 - 355 nm
1,06 - 3000 μm
- Rozměr snímacího čipu 12,8 mm x 12,8 mm
- Rozměr snímacích elementů 80 μm x 80 μm
- Počet snímacích elementů 160 x 160 (celkem 25 600 elementů)
- Velikost pixelů 75 μm x 75 μm
- Snímací módy Chopped
Pulsed [28]

8 NÁVRH ČOČEK

V této kapitole je popsán výběr vhodného materiálu a samotný návrh čoček včetně výpočtu ohniska navrhnuté čočky.

8.1 Výběr vhodného materiálu pro výrobu čoček

Při výběru vhodného materiálu bylo nutné zvolit takový materiál, který umožní navrhnutou čočku vyrobit. Jelikož bude výroba prováděna za pomoci soustruhu, byl zvolen plastový materiál, konkrétně Teflon. Tento materiál vyhovuje nejen z hlediska výroby, ale vyhovující jsou i jeho vlastnosti.

Hlavní vlastnosti teflonu:

- Neměnné vlastnosti pro různé frekvence
- Žádná disperze
- Dobře obrobitelný
- Pružný
- Odolnost proti stárnutí

Na základě těchto vlastností je Teflon vyhovující materiál pro účely navrhovaných čoček.

8.2 Volba a výpočet parametrů čoček

Při samotném návrhu čoček bylo nutné nejprve rozhodnout, o jaký typ čočky se bude jednat. Bylo rozhodnuto, že se bude jednat o dvojevypuklou spojnou čočku, která bude pro naše účely nejvíce vhodná. Dalšími potřebnými parametry nutnými k výrobě jsou průměr čočky a poloměry zakřivení ploch čočky. V případě průměru čočky byl zvolen průměr $d = 50$ mm a to zejména z toho důvodu, že firma, která bude zajišťovat výrobu samotných čoček, má běžně skladem teflonové tyče o průměru 50 mm a pro naše účely bude plně dostačující. Na základě průměru čočky musely být zvoleny dostačující poloměry zakřivení, které umožňují výrobu. Po konzultaci s vedoucím práce, který má již v této oblasti řadu zkušeností, byly zvoleny poloměry zakřivení $r_{1,2} = 100$ mm. Na základě těchto zvolených parametrů bylo určeno ohnisko navrhnuté čočky. K výpočtu ohniska byly využity rovnice uvedené v teoretické části.

Nejprve bylo nutné vypočítat tloušťku navrhnuté čočky. K výpočtu tloušťky bylo využito rovnic číslo 5, 6 a 7 uvedených v podkapitole číslo 1.3 v teoretické části. Jako první byly určeny parametry s_1 a s_2 .

$$s_1 = r_1 - \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (11)$$

$$s_1 = 0,1 - \sqrt{0,1^2 - \left(\frac{0,05}{2}\right)^2} \quad (12)$$

$$s_1 = 3,18 \cdot 10^{-3} m = \mathbf{3,18 \text{ mm}} \quad (13)$$

$$s_2 = r_2 - \sqrt{r_2^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (14)$$

$$s_2 = 0,1 - \sqrt{0,1^2 - \left(\frac{0,05}{2}\right)^2} \quad (15)$$

$$s_2 = 3,18 \cdot 10^{-3} m = \mathbf{3,18 \text{ mm}} \quad (16)$$

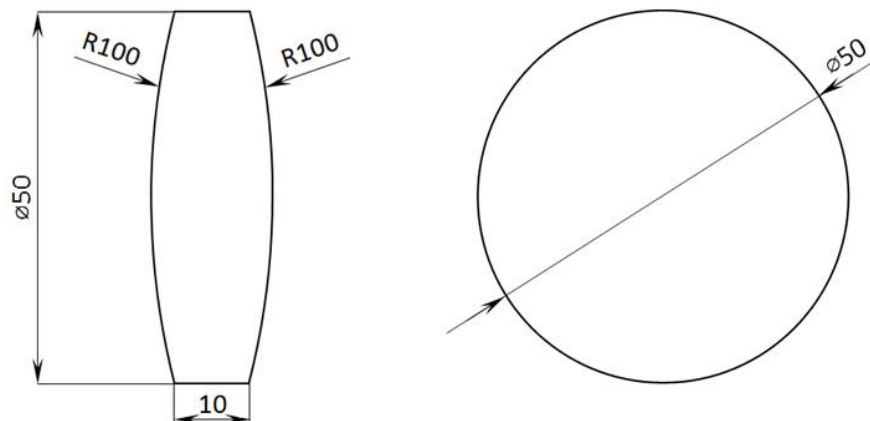
Po výpočtu parametrů s_1 a s_2 byla vypočítána celková tloušťka navrhnuté čočky. Parametr $t_o = 10 \text{ mm}$ byl zvolen kvůli technologii výroby, která vyžadovala nezaoblenou část pro uchycení při opracovávání. Výpočet celkové tloušťky je uveden níže.

$$t_s = s_1 + s_2 + t_o \quad (17)$$

$$t_s = 3,18 \cdot 10^{-3} + 3,18 \cdot 10^{-3} + 0,01 \quad (18)$$

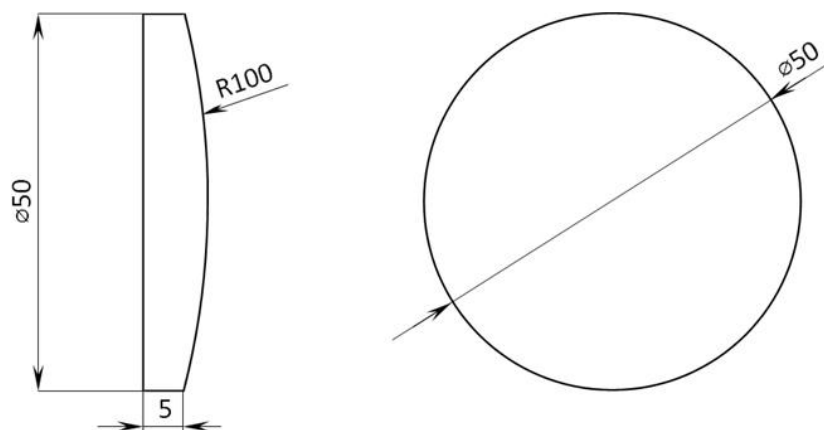
$$t_s = 16,36 \cdot 10^{-3} m = \mathbf{16,36 \text{ mm}} \quad (19)$$

Celková středová tloušťka navrhnuté čočky je 16,36 mm. Nárýs a bokorys navrhnuté čočky v měřítku 1:1 je na následujícím obrázku číslo 37.



Obr. 37. Nárys a bokorys čočky v měřítku 1:1

Na základě výše navrhnuté čočky budou vyrobeny tři ploskovypuklé čočky, kdy jedna tato čočka bude přesná polovina navrhnuté vypuklé čočky, viz obrázek 38. Čočky se budou vyrábět jako ploskovypuklé z důvodu zjednodušení výrobního postupu a výsledná dvojvypuklá čočka se bude skládat ze dvou vyrobených ploskovypuklých čoček.



Obr. 38. Nárys a bokorys vyráběné čočky v měřítku 1:1

8.3 Výpočet ohniskové vzdálenosti pro navrhnutou čočku

Pro navrhnutou čočku je potřeba vypočítat ohniskovou vzdálenost. Tato vypočítaná ohnisková vzdálenost bude poté ověřována praktickým měřením. Pro výpočet ohniskové vzdálenosti bylo využito rovnice číslo 4, uvedené v podkapitole číslo 1.3 v teoretické části.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{t_s(n - 1)}{nr_1r_2} \right) \quad (20)$$

Z rovnice vyplývá, že pro výpočet ohniskové vzdálenosti je ještě potřebná znalost indexu lomu materiálu, ze kterého je čočka vyrobená. Jak už bylo psáno výše, zvoleným materiá-

lem pro výrobu je Teflon. K výpočtu indexu lomu bylo potřeba zjistit permitivitu, která je v případě teflonu $\varepsilon = 2,1$. Index lomu byl vypočítán pomocí následujícího vzorce:

$$n = \sqrt{\varepsilon} \quad (21)$$

$$n = \sqrt{2,1} \quad (22)$$

$$n = \mathbf{1,449} \quad (23)$$

Nyní už bylo možné vypočítat ohniskovou vzdálenost, ke které bylo využito již zmiňované rovnice.

$$\frac{1}{f} = (1,449 - 1) \left(\frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,1} + \frac{0,01636(1,449 - 1)}{1,449 \cdot 0,1 \cdot 0,1} \right) \quad (24)$$

$$\frac{1}{f} = 0,449(20 + 0,507) \quad (25)$$

$$\frac{1}{f} = 9,208 \quad (26)$$

$$f = 0,109 \text{ m} = \mathbf{109 \text{ mm}} \quad (27)$$

Jelikož se čočka bude vyrábět jako polovina navrhnuté dvojbypuklé čočky, je zde vypočítána ohnisková vzdálenost i pro tuto ploskovypuklou čočku. Pro výpočet této ohniskové vzdálenosti si vystačíme s rovnicí pro tenkou čočku, neboť tloušťka čočky je relativně malá v poměru s poloměrem čočky. Parametr r_1 je roven ∞ z důvodu rovné jedné strany čočky. Pro výpočet využijeme rovnice číslo 2 uvedené v podkapitole číslo 1.2 v teoretické části.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (28)$$

$$\frac{1}{f} = (1,449 - 1) \left(\frac{1}{\infty} + \frac{1}{0,1} \right) \quad (29)$$

$$\frac{1}{f} = 0,449(0 + 10) \quad (30)$$

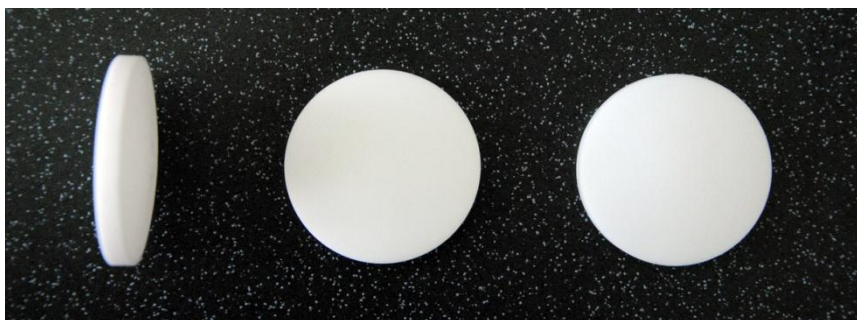
$$\frac{1}{f} = 4,49 \quad (31)$$

$$f = 0,223 \text{ m} = \mathbf{223 \text{ mm}} \quad (32)$$

9 REALIZACE NAVRHNUTÝCH ČOČEK

Na základě návrhu čoček bylo nyní možné čočky vyrobit. Jelikož byly kladeny vysoké požadavky na přesnost výroby, byla pro výrobu vybrána vhodná firma. Jako vhodná firma, která byla ochotná výrobu zajistit, byla vybrána firma Zámečnictví Libor Skočík se sídlem ve Veselí nad Moravou.

Firma již měla zkušenosti s obráběním Teflonu, a proto byla ochotná vyhovět našim požadavkům na výrobu čoček. Firmě byl poskytnut nárys a bokorys čočky v měřítku 1:1, na jehož základě budou čočky vyrobeny. K výrobě čoček bylo využito Teflonové tyče o průměru 50 mm, která byla opracovávána za pomoci soustruhu. Při samotné výrobě se vyskytl problém a to, že se nedařilo vyrobit čočky s požadovaným poloměrem zakřivení. Bylo to způsobeno vlastností Teflonu, který je pružný a tudíž při opracovávání soustruhem se různě kroutil. Aby byl tento problém odstraněn, tak si firma sama navrhla a poté zkonstruovala speciální přípravek, který zabránil kroucení Teflonu. Nyní již bylo možné vyrobit stejné čočky přesně podle našich požadavků. Tyto čočky jsou zachyceny na obrázcích číslo 39 a 40.



Obr. 39. Vyrobené čočky

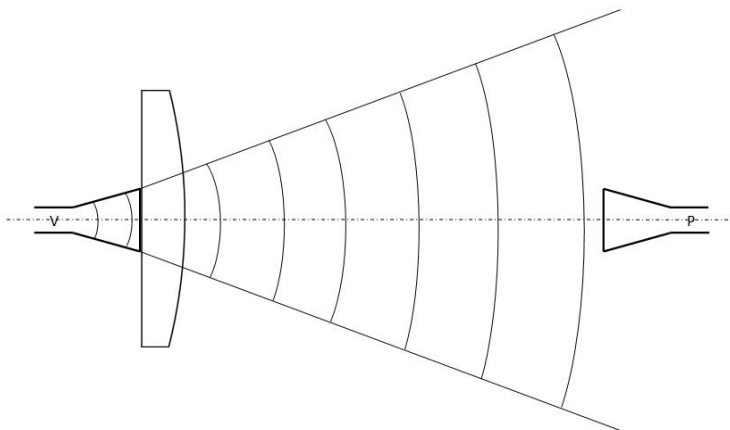


Obr. 40. Detail čočky

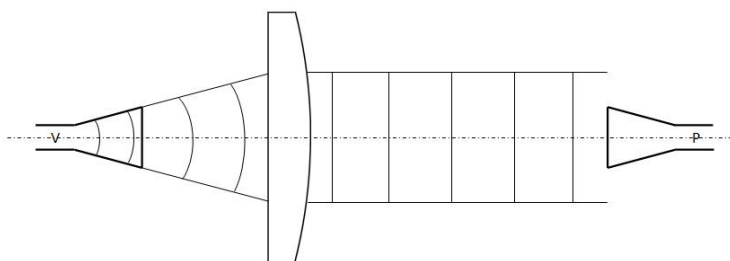
10 OVĚŘOVÁNÍ FUNKCE ČOČEK

V této kapitole jsou popsány způsoby, jakým byly navrhnuté a následně vyrobené čočky ověřovány. U čoček byly kontrolovány rozměry a také zda plní danou funkci, za jejímž účelem byly navrhnuty. Ověřování bylo prováděno na laboratorním pracovišti na Fakultě aplikované informatiky, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Jednotlivé kroky jsou popsány v následujících podkapitolách.

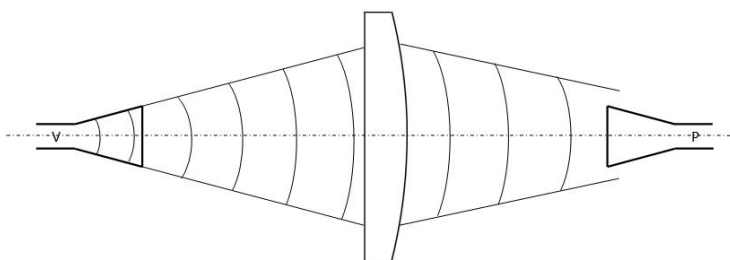
Při ověřování správné funkce čoček se vycházelo z teoretických znalostí o čočkách. Z teorie vyplývá, že při umístění čočky před zdroj může dojít ke třem situacím. Tyto jednotlivé situace jsou znázorněny na obrázcích číslo 41 až 43.



Obr. 41. Čočka umístěná před ohniskem



Obr. 42. Čočka umístěná v ohnisku



Obr. 43. Čočka umístěná za ohniskem

Teorie říká, že v případě pokud je čočka umístěna do vzdálenosti od zdroje menší, než je její ohnisko, bude výsledný svazek paprsků rozbíhavý. V případě pokud umístíme čočku do její ohniskové vzdálenosti, bude výsledný svazek paprsků tvořen rovinnou vlnou. A v posledním případě, pokud bude čočka umístěna do větší vzdálenosti, než je její ohnisková vzdálenost, bude výsledný svazek sbíhavý. Tyto teoretické poznatky byly ověřovány v podkapitolách uvedených níže. Pro ověřování správné funkce čočky bude využíváno vyrobené ploskovypuklé čočky, neboť výsledky ověření budou plně dostačující i bez použití dvojnásobné čočky. Dvojnásobná čočka bude sloužit pro měření na menší vzdálenost, neboť má menší ohniskovou vzdálenost.

10.1 Měření parametrů vyrobených čoček

Před používáním vyrobených čoček byly ověřeny jejich rozměry. U každé čočky se měřil její průměr a tloušťka. Rozměry byly ověřovány měřením pomocí digitálních měřidel, kde pro měření průměru čočky bylo využito digitálního posuvného měřítka a pro měření tloušťky čočky bylo využito digitálního mikrometru. Způsoby měření jsou zachyceny na následujících obrázcích číslo 44 a 45 a naměřené hodnoty jsou zachyceny v tabulce číslo 3. U každé čočky bylo z naměřených hodnot určeno minimum, maximum, průměr a směrodatná odchylka. Pro výpočet směrodatné odchylky bylo využito tabulkového editoru Microsoft Excel.



Obr. 44. Měření posuvným měřítkem



Obr. 45. Měření mikrometrem

Tab. 3. Naměřené hodnoty rozměrů čoček

	Průměr čočky [mm]			Tloušťka čočky [mm]		
	Čočka 1	Čočka 2	Čočka 3	Čočka 1	Čočka 2	Čočka 3
	50,120	50,070	50,110	8,246	8,268	8,249
	50,210	50,120	50,150	8,212	8,261	8,255
	50,170	50,130	50,130	8,241	8,260	8,248
	50,140	50,110	50,110	8,201	8,263	8,251
	50,100	50,100	50,100	8,224	8,266	8,258
	50,090	50,120	50,140	8,214	8,258	8,253
	50,190	50,110	50,160	8,215	8,266	8,257
	50,170	50,150	50,120	8,208	8,270	8,249
	50,130	50,100	50,110	8,215	8,261	8,250
	50,180	50,090	50,150	8,209	8,273	8,247
Min	50,090	50,070	50,100	8,201	8,258	8,247
Max	50,210	50,150	50,160	8,246	8,273	8,258
Průměr	50,150	50,110	50,128	8,219	8,265	8,252
Sm. odch.	0,040	0,022	0,021	0,014	0,005	0,004

Z naměřených hodnot je patrné, že čočky jsou vyrobené téměř přesně podle našich požadavků, liší se pouze v řádu setin milimetrů, a tudíž výroba byla velmi přesná. Shodné jsou taktéž čočky mezi sebou, kdy se jejich rozměry liší v řádu setin milimetrů.

10.2 Kalibrace spektrálního analyzátoru ZVA67

Tak jako u každého měřicího zařízení, tak i u spektrálního analyzátoru by se měla provést před měřením kalibrace. Kalibrace se provádí zejména z důvodu dosažení přesnějších měřených hodnot. Ke kalibraci u spektrálního analyzátoru R&S[®]ZVA67 slouží speciální kalibrační sada R&S[®]ZV-WR03, viz obrázek 46.

Tato kalibrační sada obsahuje pět částí, kterými jsou:

- 1x krátký standard
- 1x pevný (nenastavitelný) standard
- 1x nastavitelný standard
- 2x podložka



Obr. 46. Kalibrační sada R&S® ZV-WR03

Jelikož ke spektrálnímu analyzátoru byly připojeny konvertory R&S® ZVA-Z325, byla podle návodu výrobce jediná možná metoda pro kalibrování kalibrace typu TRL. Metoda kalibrace typu TRL využívá linii s odpovídající charakteristickou impedancí jako referenční impedanci a této charakteristické impedance je ideálně dosaženo ve vzduchu. Všechny potřebné součásti, které udávají referenční hodnoty impedance, jsou obsaženy v kalibrační sadě. Při provádění kalibrace se postupuje podle postupu uvedeného v technických informacích od výrobce kalibrační sady.

Postup při kalibraci je následující:

1. Aktivujte frekvenční mód konvertoru ("System" > "System Config..." > "Frekvency Converter") a připojte dva konvertory
2. Klikněte na "Channel" > "Start Cal" > "Two-Port P1 P2" > "TRL"
3. V následujícím okně klikněte na "Next" a zobrazí se okno s měřícími standardy
4. Připojte krátký standard z kalibrační sady na konvertor číslo 1 a klikněte na "Port 1: WR03" > "Reflect" pro spuštění kalibrační sekvence
5. Stejným způsobem postupujte i u konvertoru číslo 2
6. Nyní použijte podložku číslo 1 a vložte ji mezi konvertory a klikněte na "Through"
7. Poté použijte podložku číslo 2 a vložte ji opět mezi konvertory a klikněte na "Line 1"
8. Po provedení předchozích kroků klikněte na "Apply", čímž dojde ke korekci systematické chyby
9. Poté zavřete okno průvodce a kalibrace je tímto dokončena

Pozn.:

Jelikož spektrální analyzátor obsahuje operační systém Windows XP Embedded, volí se nabídky uvedené v postupu kalibrace pomocí kurzoru připojené počítačové myši nebo případně pomocí tlačítek spektrálního analyzátoru.

10.3 Měření útlumu Teflonu

Před samotným ověřováním vyrobených čoček bylo potřeba změřit útlum materiálu, z něhož byly čočky vyrobeny, tedy Teflonu a to zejména z důvodu, abychom zjistili, do jaké míry Teflon ovlivňuje elektromagnetické vlnění. K měření bylo využito spektrálního analyzátoru, na kterém byla provedena kalibrace. Po provedení kalibrace a umístění konvertorů do požadované vzdálenosti, musela být dále provedena normalizace, která zaručí, že zařízení bude měřit pouze prostředí mezi konvertory. Postup provedení normalizace je následující:

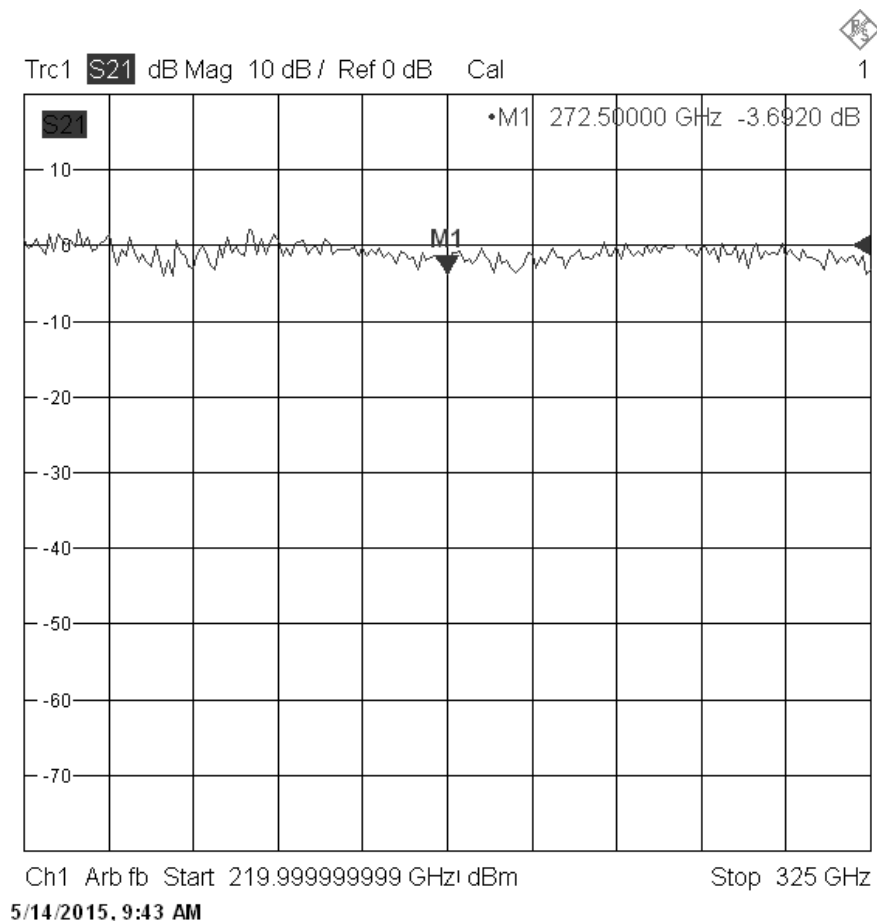
1. Zvolte položku "Cal" > "Start Cal" > "Two-Port P1 P2" > "Normalize Both Directions" a otevře se okno pro normalizaci
2. V okně klikněte na "Next" a otevře se okno "Measure Standards"
3. V okně "Measure Standards" zvolte položku "Through" a chvíli počkejte
4. Po chvíli se zviditelní tlačítko "Apply" na které klikněte a tím je normalizace provedena

Po provedení normalizace již bylo možné přistoupit k měření útlumu. Měření útlumu Teflonu bylo prováděno pro celý frekvenční rozsah, který umožňují konvertory, tedy 220 GHz až 325 GHz. Pro nastavení frekvence a dalších nastavení bylo nutné provést následující kroky:

- Zvolit položku "Meas" > "Trans S21" - pro měření přenosu mezi konvertory
- Zvolit položku "Format" > "dB Mag" - pro zvolení jednotky měření
- Zvolit položku "Marker" > "Marker 1" - pro zapnutí markeru pro sledování
- Zvolit položku "Start Center" a vepsat startovací frekvenci, tedy 220 GHz
- Zvolit položku "Stop Center" a vepsat konečnou frekvenci, tedy 325 GHz

Tímto byl spektrální analyzátor nastaven a mohlo být prováděno měření. Pro měření útlumu teflonu byl do trasy mezi konvertory vložen teflon o stejném průměru a tloušťce jako měla vyrobená čočka. Po vložení teflonu do trasy se přímo na displeji spektrálního analy-

zátoru zobrazil výsledný útlum v celém nastaveném frekvenčním rozsahu, viz obrázek 47. Výsledný útlum teflonu tedy vychází přibližně 3 dB.



Obr. 47. Útlum teflonu

10.4 Ověřování za pomoci kamery Spiricon Pyrocam III

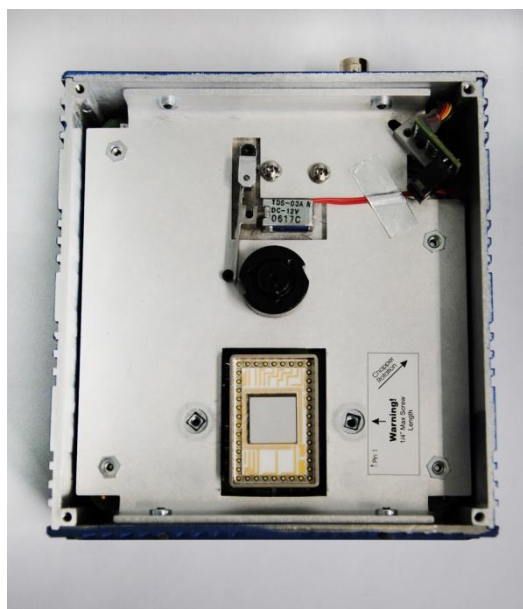
Samotné ověření správné funkce navrhnutých čoček bylo zamýšleno za pomoci speciální kamery Spiricon Pyrocam III, která slouží mimo jiné ke sledování elektromagnetického vlnění. Celý postup ověřování včetně oživení kamery je popsán v této podkapitole.

Jak už bylo psáno výše, kamera vyžaduje ke své funkčnosti počítač, ke kterému je propojena přes rozhraní FireWire. Jelikož laboratorní pracoviště bylo vybaveno stolním počítačem bez FireWire konektoru, bylo nutné základní desku počítače rozšířit o FireWire kartu. Tato FireWire karta byla umístěna do PCI slotu základní desky. Po zapnutí počítače s operačním systémem Windows XP 64bit byly automaticky nainstalovány potřebné ovladače pro FireWire kartu. Nyní už počítač disponoval funkčním FireWire portem a kamera mohla být propojena s počítačem. Po připojení kamery počítač vyžadoval instalaci ovladačů

pro kameru. Tyto ovladače spolu s potřebným softwarem kamery byly uloženy na výrobcem přiložených CD. Ovladače byly manuálně vyhledány na CD a byla provedena jejich instalace. Po nainstalování ovladačů byla provedena ještě instalace ovládacího softwaru kamery. Tento software obsahoval dva programy, kterými jsou program Pyrocam III Control Console a program BeamGate. Blíže jsou tyto programy popsány níže.

Po instalaci veškerého potřebného softwaru byla nutná ještě poslední úprava kamery a to výměna filtru umístěného před snímacím čipem. Kamera byla osazena germaniovým filtrem, který ale nebyl vhodný pro sledování frekvencí v rozsahu od 220 GHz do 325 GHz, které byly vyžadovány. Následovala tedy demontáž stávajícího filtru a montáž vhodného filtru vyrobeného z LDPE materiálu. Tento filtr je vhodný pro sledování elektromagnetického vlnění o frekvencích v řádu THz.

Pro demontáž stávajícího germaniového filtru bylo nutné odšroubovat čtyři šrouby s vnitřním šestihranem (imbus), pomocí kterých byl upevněn kryt kamery. Po odstranění krytu bylo potřeba oddělat rotující clonu snímacího čipu, která byla připevněna třemi šrouby s vnitřním šestihranem. Po odstranění clony už byl umožněn přístup k samotnému filtru. Filtr byl připevněn dvěma šrouby z přední části a čtyřmi šrouby z bočních stran. Všechny tyto šrouby byly taktéž s vnitřním šestihranem. Po odstranění filtru se naskytl pohled na samotný snímací čip kamery. Tento pohled je zachycen na následující obrázku číslo 48.



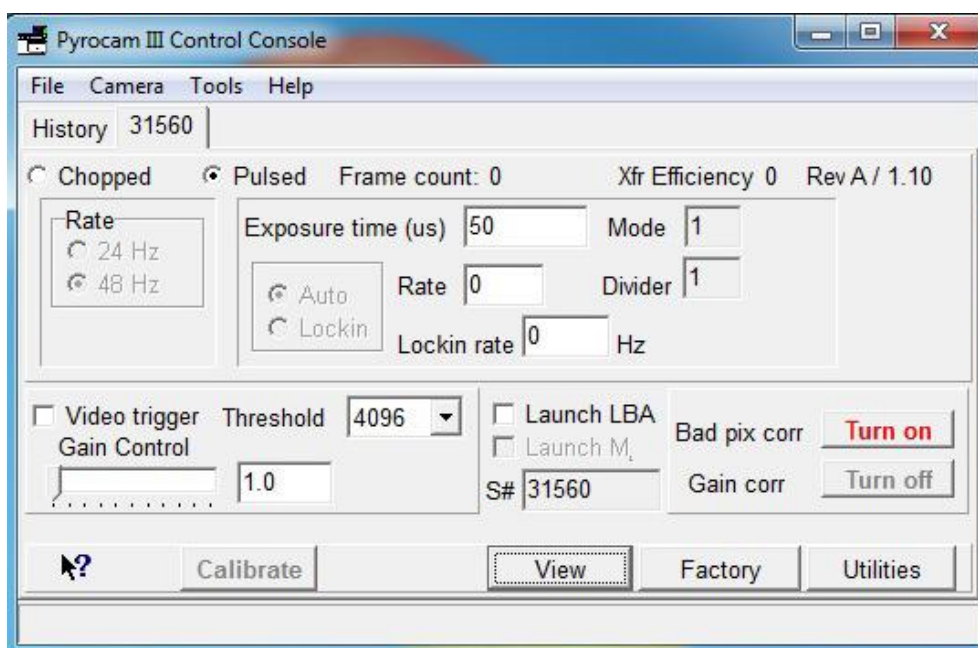
Obr. 48. Kamera s demontovaným filtrem

Po odstranění stávajícího germaniového filtru bylo možné nainstalovat požadovaný filtr z LDPE materiálu, který je zachycen na obrázku číslo 49. Při instalaci filtru a kompletizaci kamery se postupovalo opačným postupem, než jakým byla kamera rozebrána.



Obr. 49. LDPE filtr

Po výměně filtru byla kamera připojena k napájení a ke stolnímu počítači. Jak už bylo psáno výše, ke kameře byly dodány dva programy. Prvním programem byl program Pyrocam III Control Console, který sloužil k ovládání kamery a nastavování parametrů. Vzhled programového okna je na obrázku číslo 50.

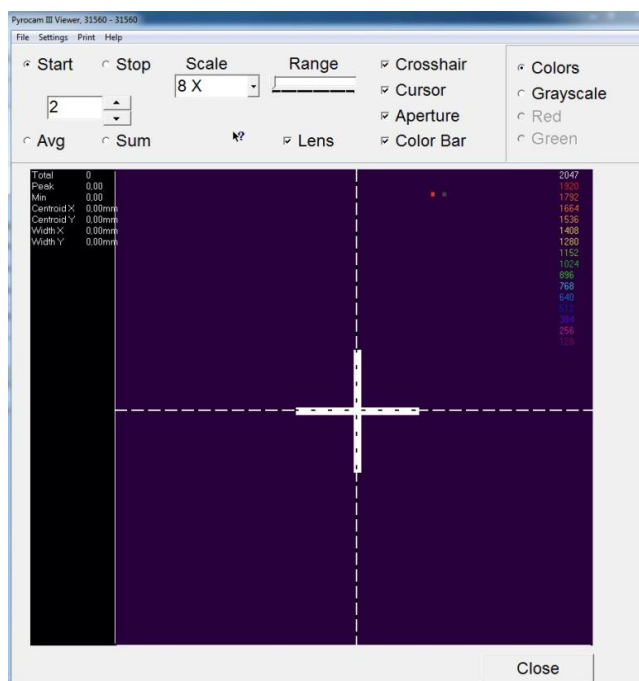


Obr. 50. Program Pyrocam III Control Console

Tento program je jednoduchý a uživatelsky přívětivý. Po spuštění programu a připojení kamery se kamera automaticky zobrazila v programu a bylo možné ji dále nastavovat. Pokud by bylo připojeno k počítači více kamer, objevili by se v programu v dalších záložkách. Program nabízí stejně tak jako kamera dva základní snímací módy. Prvním módem

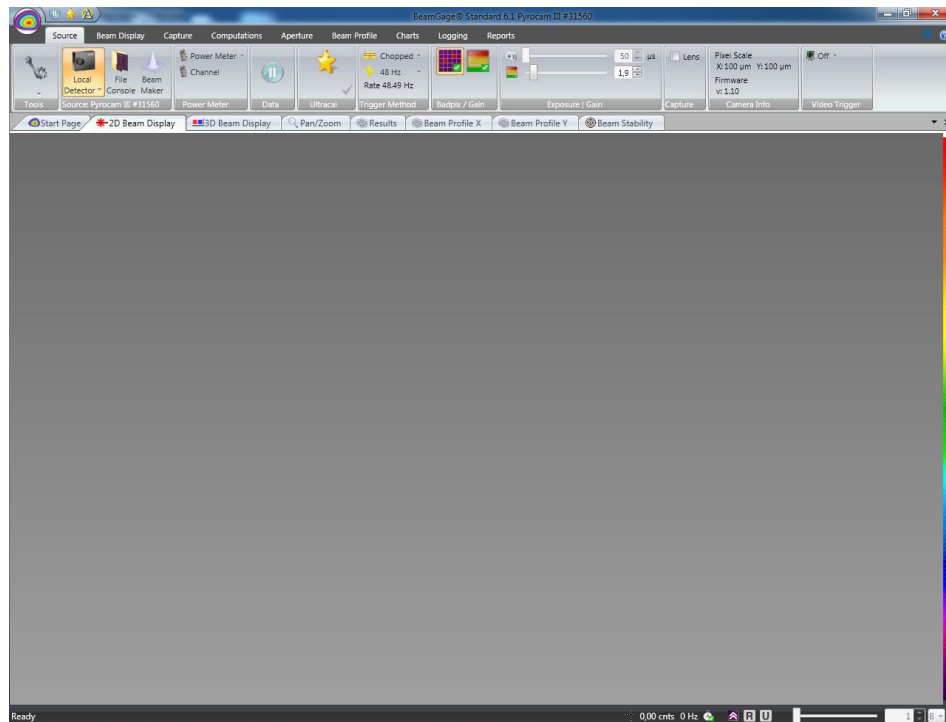
je Chopped mód, při kterém před snímacím čipem s filtrem rotuje clona s výřezy. Rychlost rotace této clony lze v programu nastavit na dvě různé hodnoty, a to 24 Hz a 48 Hz. Dalším módem je Pulsed mód, při kterém se clona zastaví v takovém místě, aby nezakrývala snímací čip. V případě tohoto módu je možné využít externího signálu, který je připojen přes Trigger vstup, pro spuštění snímání.

Dále program obsahuje volbu Utilities, která slouží pro další práci se zaznamenaným snímkem jako např. zobrazení zaznamenaných hodnot kamerou a volba Factory, která slouží k aktualizaci firmware kamery. Další důležitou volbou je volba View, která otevře okno pro zobrazení snímaného obrazu. Vzhled okna je na obrázku číslo 51. Volba View umožňuje snímaný obraz zastavit nebo opětovně spustit, dále pak zobrazit průměrné hodnoty z nasnímaných obrázků anebo součet těchto hodnot. Dále je možné zaznamenaný obrázek přiblížit, či zobrazit kurzor nebo stupnici. Volba obsahuje také možnost přepínání mezi 2D a 3D zobrazením.



Obr. 51. Pyrocam III Control Console - View

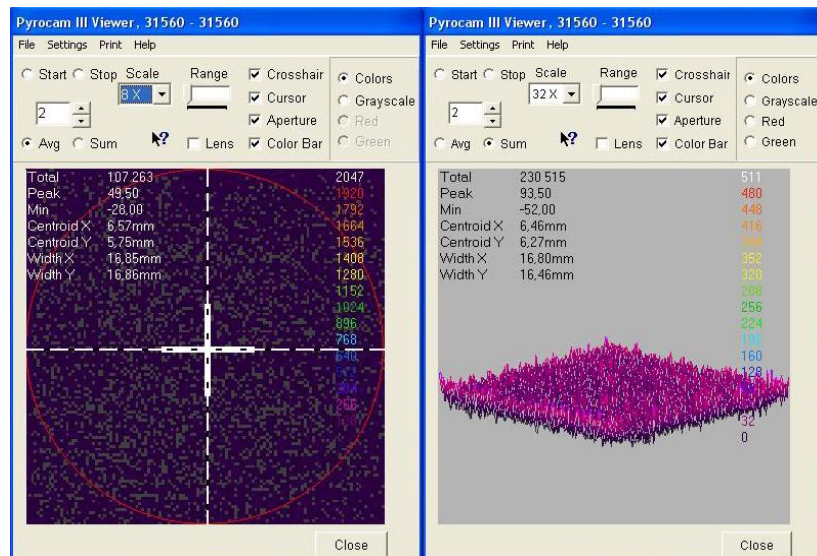
Druhým programem dodávaným výrobcem je program BeamGate, který slouží k úpravě a práci se zaznamenanými snímky kamerou. Vzhled programu BeamGate je na obrázku číslo 52. Blíže tento program nebude popisován, jelikož nebyl při ověřování využit. Důvod nevyužití programu je popsán níže v této podkapitole.



Obr. 52. Program BeamGate

Po základním seznámení s programy a kamerou bylo přistoupeno k samotnému ověřování. První měření bylo prováděno bez vyrobených čoček kvůli získání referenčních hodnot vyzařovaného elektromagnetického vlnění.

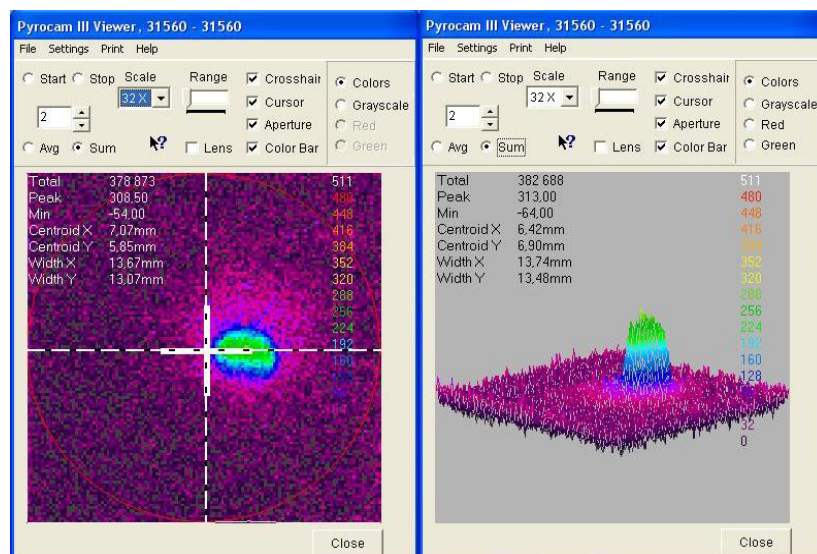
Nejprve byly nastaveny konvertory spektrálního analyzátoru tak, aby byla mezi nimi vzdálenost 30 cm. Poté byla před vysílací anténu konvertoru umístěna kamera do vzdálenosti 5 cm a byly spuštěny potřebné programy na počítači, ke kterému byla kamera připojena a bylo připojeno napájení kamery. Na již zapnutém a kalibrovaném spektrálním analyzátoru bylo nastaveno vyzařování elektromagnetického vlnění v rozsahu frekvencí 220 GHz až 325 GHz. Postup samotného nastavení analyzátoru je popsán v předcházející podkapitole číslo 10.2. Po nastavení byly zapnuty samotné konvertory a již docházelo k vysílání elektromagnetického vlnění. Poté už následovala práce s programem kamery. V tu chvíli se vyskytl problém, jelikož kamera nebyla schopna zachytit žádný signál a na snímku zobrazovala pouze šum, viz obrázek 53, kde je zachycený šum zobrazen ve 2D i 3D pohledu. Pro zvýraznění zobrazovaného šumu byla ve 3D zobrazení zapnuta funkce "Sum", která sčítá naměřené hodnoty.



Obr. 53. 2D a 3D zobrazení šumu

Jelikož nebylo jisté, zda není problém pouze s kompatibilitou softwaru a operačního systému, byla kamera zprovozněna i na stolním počítači s nainstalovaným operačním systémem Windows 7, kde se ukázalo, že dodávaný software s tímto operačním systémem nebyl kompatibilní a program neustále padal.

Bylo tedy nutné ověřit, zda je vůbec kamera funkční. Vrátili jsme se zpět k osobnímu počítači s operačním systémem Windows XP a zapnuli zobrazování kamery. Za pomoci laserového ukazovátka o výkonu přibližně 1 mW byla ověřena funkčnost snímacího čipu kamery. Po namíření laserového paprsku na filtr kamery začala kamera zobrazovat i jiné hodnoty než jen šum, viz obrázek 54. Tímto bylo tedy dokázáno, že kamera je plně funkční, a problém bude jinde.



Obr. 54. 2D a 3D zobrazení laseru

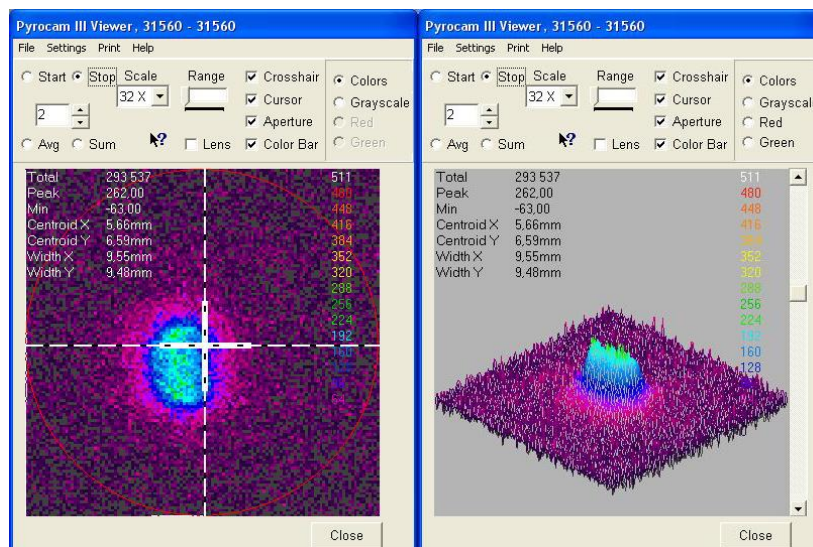
Po prostudování dokumentace kamery a internetových stránek týkajících se dané problematiky bylo usouzeno, že kamera má příliš malou citlivost snímacího čipu a pro naše účely bude tedy nevyhovující. Tato skutečnost byla dokázána za pomoci již zmiňovaného laserového ukazovátka o výkonu přibližně 1 mW, u kterého dokázala kamera zachytit relativně slabý signál. Pro demonstrování zachyceného signálu bylo u předcházejícího obrázku využito funkce "Scale", která byla nastavena na maximální hodnotu 32x zvětšení obrazu. Tudíž bylo jasné, že výkon vysílacího konvertoru nebude dostatečný a kamera není schopná tento signál zachytit. Pro zvýšení výkonu konvertoru byla nastavena počáteční a koncová frekvence na 220 GHz a výkon konvertoru nastaven na maximum. K nastavování výkonu konvertoru slouží otočná hlavice umístěna na horní straně konvertoru. I tak byl ale výkon nedostatečný a kamera zachycovala pouze šum. Maximální výkon konvertoru dosahuje přibližně hodnoty 140 μ W.

Jelikož již bylo jasné, že za pomoci kamery nebude možné čočky ověřit, byla alespoň zachycena modelová situace, jakou by ověřování probíhalo. K tomu bylo využito laserového ukazovátka o výkonu přibližně 1 mW a skleněné lupy, tedy spojné čočky, viz obrázek 55. Ve své podstatě jde o zachycení módové struktury svazku laseru.



Obr. 55. Měření modelové situace

Při tomto měření byla kamera umístěna tak, aby byla až za obrazovým ohniskem lupy a tudíž byl laserový svazek rozšířen. Bylo tak učiněno z důvodu, aby fokusovaný paprsek nepoškodil snímací čip kamery. Výsledný zaznamenaný signál je na obrázku číslo 56, jak ve 2D tak i ve 3D zobrazení.



Obr. 56. Zachycená modelová situace ve 2D a 3D zobrazení

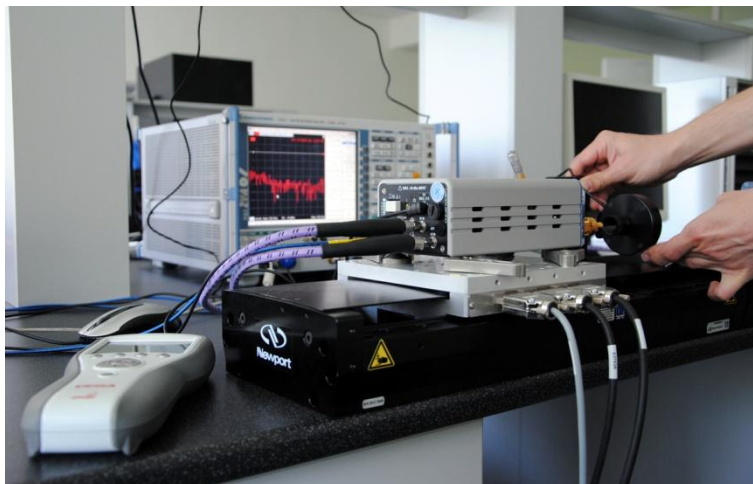
Stejným způsobem jako v případě modelové situace by se postupovalo i při měření svazku milimetrových vln, pokud by kamera měla dostatečnou citlivost snímacího čipu. Postupovalo by se tak, že by se mezi konvertory umístila kamera a postupným posunováním kamery by se zjišťoval tvar a velikost svazku. Jelikož ale kamera nebyla vhodná, muselo se postupovat jinými způsoby, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

10.5 Ověřování za pomoci měřicího zařízení Ophir VEGA

Další metodou, která byla vyzkoušena pro ověření funkce čoček, bylo přímé měření za pomoci měřicího zařízení Ophir VEGA. Toto měřicí zařízení má vyšší citlivost a tudíž jsme se domnívali, že bude vhodný pro účely našeho měření. Jedná se o automatické měřicí zařízení, které na základě připojeného externího detektoru dokáže měřit výkon signálu. Po připojení detektoru se zařízení automaticky nastaví a je možné jej využít k měření. Pro připojení externích detektorů slouží rozhraní RS232. Dále je zařízení vybaveno USB rozhraním pro možnost připojení k počítači. Zařízení podporuje zobrazení číselných hodnot nebo grafické znázornění měřené veličiny. Přepínání mezi těmito dvěma zobrazeními se provádí za pomoci tlačítek v poloze "Menu", kde pro zobrazení číselné hodnoty je potřeba zvolit položku "Power" a pro grafické znázornění položku "Tune". Samotné měřicí zařízení je velmi uživatelsky přívětivé a jeho ovládání je jednoduché.

Po seznámení se s měřicím zařízením bylo přistoupeno k měření. Pro účely měření byl k měřicímu zařízení připojen detektor založený na principu termočlánků. Jednalo se tedy o tepelný senzor. Při měření byl detektor umístěn před vysílací anténu a postupně byl po

určitých krocích posouván do větší vzdálenosti. Způsob měření je zachycen na následujícím obrázku číslo 57.



Obr. 57. Měření pomocí měřícího zařízení Ophir VEGA

Při měření v blízkosti vysílací antény byla naměřena hodnota výkonu přibližně $141 \mu\text{W}$. Tato naměřená hodnota je na obrázku číslo 58, jak v grafickém tak i v číselném zobrazení



Obr. 58. Naměřená hodnota u antény

Jenže po oddálení detektoru do větší vzdálenosti od antény se vyskytl problém. Při postupném vzdalování detektoru od vysílací antény výkon neklesal, ale naopak stoupal, což je nesmysl, protože v přímé blízkosti vysílací antény je signál nejsilnější a má nejvyšší výkon. Již ve vzdálenosti 5 cm od vysílací antény zařízení ukazovalo hodnotu okolo $170 \mu\text{W}$, viz obrázek 59.



Obr. 59. Naměřená hodnota 5cm od antény

Z důvodu zvyšování měřeného výkonu ve větší vzdálenosti od antény nebylo možné využít ani tuto metodu k ověření funkčnosti čoček. Zvyšování výkonu bylo způsobeno tím, že detektor zachytával i jiné signály z okolí a ne jenom signály vycházející z antény. Detektor totiž reagoval i na tepelné záření vycházející z lidského těla, což bylo ověřeno přiložením detektoru na pokožku. Z výše uvedeného tedy plyne, že měřící zařízení nebude možné pro naše účely využít a ověření čoček bude muset být provedeno jinou metodou.

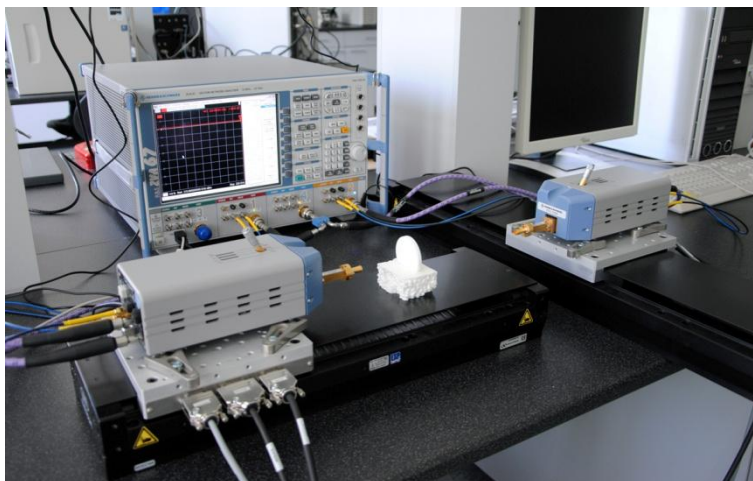
10.6 Ověřování za pomoci spektrálního analyzátoru R&S® ZVA67

Další metodou, která byla použita k ověření funkce čoček, bylo měření pomocí spektrálního analyzátoru. Tato metoda již byla úspěšná a postup měření je uveden v této podkapitole. Při této metodě měření bylo využito spektrálního analyzátoru R&S® ZVA67 a k němu připojených konvertorů R&S® ZVA-Z325. Tyto konvertory byly umístěny na elektrických pojizdech tak, že posuvem se měnila vzdálenost mezi konvertory. Pro účely měření bylo nutné posuv přijímacího konvertoru otočit o 90°, aby byly posuvy na sebe kolmo a tvořili velké "T" tak, aby vysílací a přijímací konvertor byly přímo naproti sobě. Jelikož byl jeden pojezd otočen o 90°, bylo u toho to pojezdu nutné otočit i konvertor. Konvertor byl připevněn za pomoci čtyř držáků, které byly připevněny pomocí čtyř šroubů s vnitřním šestihřtíkem k plošině pojездů. Po otočení konvertoru byla provedena kalibrace a normalizace spektrálního analyzátoru. Dále byl na spektrálním analyzátoru zvolen požadovaný přenos,

zvolena jednotka, zapnutý marker a nastavena počáteční a koncová frekvence. V případě tohoto měření se jednalo v obou případech o frekvenci 220 GHz. Postupy kalibrace, normalizace a dalších nastavení jsou popsány v předcházejících podkapitolách číslo 10.2 a 10.3.

Po připravení spektrálního analyzátoru byly dále zprovozněny a nastaveny elektrické pojedy. K řídicí jednotce pojezdů byl připojen notebook pomocí síťového kabelu s koncovkou RJ-45. Po připojení síťového kabelu bylo nutné v notebooku změnit nastavení síťového adaptéru ("Ovládací panely" > Centrum síťových připojení a sdílení" > "Změnit nastavení adaptéru" > " Síť Ethernet" > "Vlastnosti") a u položky "Protokol IP verze 4" zvolit vlastnosti, zaškrtnout volbu "Použít následující IP adresu" a vepsat IP adresu 192.168.0.100 a masku podsítě 255.255.255.0 a potvrdit pomocí "OK". Po nastavení již bylo možné otevřít jakýkoliv internetový prohlížeč a do adresového řádku zadat adresu 192.168.0.254 a potvrdit. Po načtení se objevilo okno pro zadání přihlašovacích údajů. Po vyplnění přihlašovacích údajů bylo k ovládní pojezdů potřeba zvolit položku "Front Panel" > "Move" a zobrazilo se okno s tabulkou. V tabulce byly uvedeny dva připojené pojedy, u kterých bylo potřeba zvolit volbu "Initialize" pro zahájení komunikace a poté volbu "Home" pro umístění pojezdu do výchozí pozice. Tato výchozí pozice byla přesně uprostřed pojezdu. Dále bylo v tabulce pole pro psaní hodnoty posuvu. Tato hodnota odpovídala velikosti posunutí konvertoru v mm. Jelikož výchozí pozice byla uprostřed pojezdu, tak posun směrem doleva byl pro záporné hodnoty a posun směrem doprava byl pro kladné hodnoty.

Nyní již bylo všechno potřebné nastaveno a mohlo být přistoupeno k samotnému měření. Princip měření spočíval v tom, že vysílací konvertor bude po celou dobu ve stejné pozici a přijímací konvertor se bude postupně posouvat do vzdálenosti 50 mm doleva a doprava a ze spektrálního analyzátoru se budou odečítat naměřené hodnoty útlumu signálu v dB. Vzdálenost mezi přijímací a vysílací anténou byla nastavena na 250 mm. Situace měření je zachycena na následujícím obrázku číslo 60.



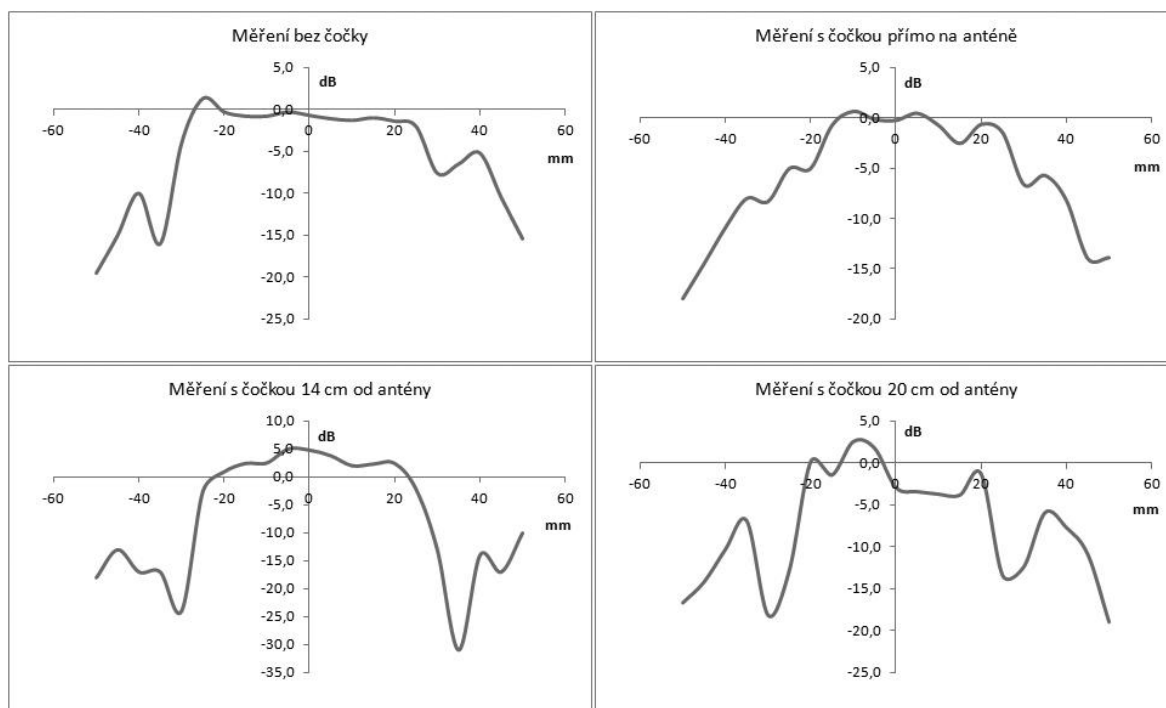
Obr. 60. Měření za pomoci spektrálního analyzátoru

Při měření byly nejprve změřeny hodnoty bez čočky, kdy bylo s přijímacím konvertorem posunováno po kroku 5 mm, vždy 50 mm doprava i doleva. Po naměření hodnot bez čočky bylo přistoupeno na měření s čočkou. Při prvním měření s čočkou byla čočka umístěna hned za vysílací anténu konvertoru a s přijímacím konvertorem bylo pohybováno tak jak v předchozím případě. Následně byla čočka posunována po kroku 20 mm směrem od vysílací antény konvertoru a proveden odečet hodnot pro stejný posuv přijímacího konvertoru, tak jako v předchozích případech. Poslední měření s čočkou bylo ve vzdálenosti 220 mm od vysílací antény. Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek a byly z nich vytvořeny grafy. Tyto tabulky a grafy jsou uvedeny v příloze PI, která je součástí této práce. Po vytvoření grafů a zhodnocení bylo rozhodnuto, že v rozmezí 120 mm až 150 mm vzdálenosti čočky od vysílací antény bude měření zpřesněno a bude se s čočkou postupovat po 5 mm. Důvody jsou uvedeny v navazující kapitole. V této kapitole jsou také uvedeny výsledky měření.

11 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Jak už bylo popsáno v předcházející kapitole, k ověřování správné funkce čoček byly použity tři různé metody, z nichž pouze jedna se ukázala jako vhodná. V této kapitole jsou popsány pouze výsledky vhodné metody, tedy ověřování za pomoci spektrálního analyzátoru ZVA67. U této metody se využívalo posuvu přijímacího konvertoru a měření útlumu signálu. Veškeré naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek, které jsou součástí přílohy PI. Z těchto naměřených hodnot byl pro každou vzdálenost čočky od vysílací antény vytvořen graf. Kvůli přehlednosti jsou v této kapitole uvedeny pouze čtyři grafy, viz obrázek 61. Všechny vytvořené grafy jsou uvedeny v příloze PI.

Hlavním cílem ověřování bylo zjistit, zda čočka fokusuje svazek milimetrových vln a v jaké vzdálenosti od vysílací antény se nachází její ohnisko. Tyto poznatky byly zjišťovány z vytvořených grafů.



Obr. 61. Vybrané čtyři grafy

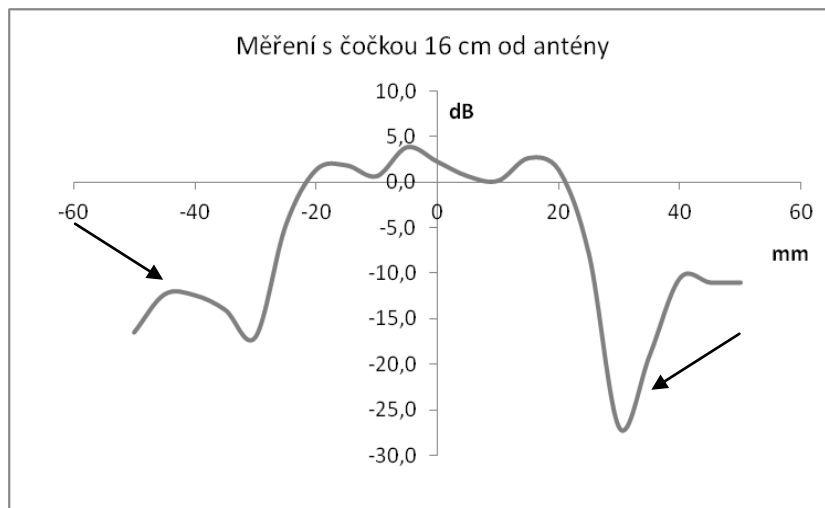
Pro názornou ukázkou byly vybrány čtyři grafy, které znázorňují měření bez čočky, dále měření s čočkou přímo na anténě a měření ve vzdálenosti 14 cm a 20 cm. Jako referenční graf byl brán graf pro měření bez čočky, neboť tento graf znázorňuje původní vysílaný svazek milimetrových vln. Z grafů je patrné, že při porovnání referenčního grafu a grafu z měření přímo na anténě je na první pohled viditelná změna a tudíž je potvrzeno, že čočka mění tvar svazku. Tuto skutečnost udává tvar křivky, kdy při měření s čočkou klesá útlum

signálu více plynule, než je tomu u měření bez čočky. Následně při porovnání všech vytvořených grafů již nebylo pochyb, že čočka má vliv na vysílaný svazek milimetrových vln. Tento svazek je tedy fokusován čočkou.

Funkce čočky byla tedy potvrzena a nyní zbývalo zjistit ohniskovou vzdálenost čočky. Ta se stejně tak jako v předchozím případě zjišťovala z vytvořených grafů, u kterých se zkoumala největší změna strmosti klesání křivky. Tato změna strmosti klesání křivky značí, že čočka je ve své ohniskové vzdálenosti a tudíž na přijímací anténu dopadá soustředěný svazek vln. To potvrzují také teoretické předpoklady uvedené v předchozí kapitole číslo 10, konkrétně obrázek číslo 42. Z prvotního měření, které bylo prováděno postupným oddalování čočky od vysílací antény po 2 cm, bylo patrné, že největší změna strmosti klesání křivky byla u grafu, který byl měřen ve vzdálenosti 14 cm. Z toho důvodu bylo rozhodnuto, že v rozmezí 12 cm až 15 cm bude měření zpřesněno a bude se postupovat po kroku 5 mm. Po doměření a zpracování hodnot byly vytvořeny zbylé grafy. Tyto grafy jsou seřazeny postupně podle vzdálenosti, v jaké se nacházela čočka od vysílací antény, a jsou uvedeny v příloze PI této práce.

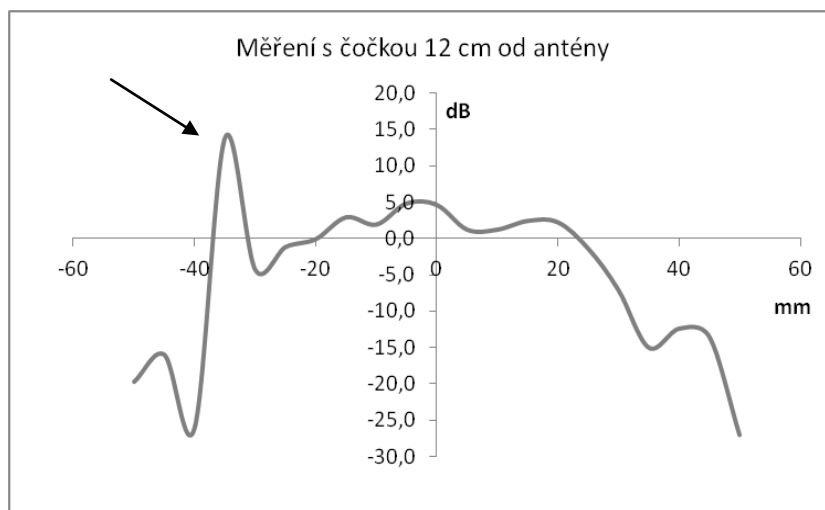
Po bližším prozkoumání grafů bylo zjištěno, že největší změna strmosti klesání křivky nastává ve vzdálenosti 14 cm a tudíž v této vzdálenosti se nachází ohnisko vyrobené ploskovypuklé čočky. K této vzdálenosti je zapotřebí přičíst délku trychtýřku antény, která je přibližně 1,5 cm, neboť právě v té vzdálenosti od hrany antény se nachází samotný zdroj záření. Výsledné ohnisko čočky tedy vychází přibližně 15,5 cm, což se liší od teoreticky vypočítané ohniskové vzdálenosti, ale s tím se počítalo.

Z vytvořených grafů bylo dále patrné, že čím dále byla čočka od vysílací antény, tím více docházelo k obtékání signálu kolem čočky a tím docházelo k nepřesným naměřeným hodnotám v krajních polohách posuvu přijímacího konvertoru. V grafech je tato nepřesnost vidět po krajích křivky, kdy po strmém klesání křivka opět znovu stoupá. Důvodem bylo již zmiňované obtékání signálu kolem čočky a tím pádem přijímací anténa konvertoru zachycovala signály vycházející přímo z vysílací antény. Tato nepřesnost je viditelná z grafů z měření ve vzdálenosti 10 cm a více. Pro názornou ukázkou byl vybrán graf ze vzdálenosti 16 cm, ze kterého je tento nedostatek patrný, viz obrázek 62. Z tohoto důvodu bych chtěl doporučit možné vylepšení, které je popsáno níže v této kapitole.



Obr. 62. Graf s nepřesností způsobenou obtékáním signálu

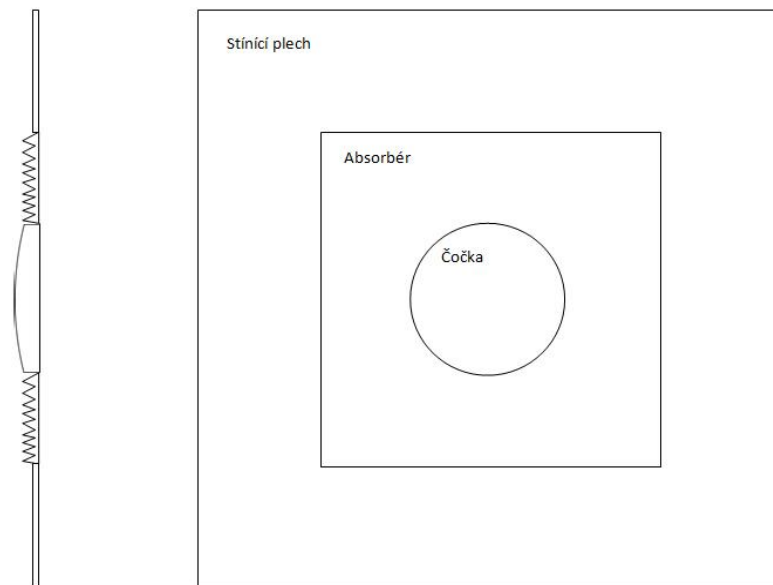
V některých grafech se objevila anomálie, kdy při klesající tendenci křivky pro vedlejší polohu posuvu konvertoru křivka prudce stoupla a v další poloze opět klesá a vrací se ke své klesající tendenci, viz obrázek 63. Tato anomálie byla s největší pravděpodobností způsobena difrakčním bočním lalokem.



Obr. 63. Graf s anomálií křivky

Nicméně tyto dva nedostatky nijak neovlivňovali ověřování čoček a při vyhodnocování výsledků byly brány v potaz.

Jako doporučení na vylepšení bych doporučil přípravek na zabránění obtékání signálu kolem čočky. Nárýs a bokorys tohoto přípravku jsou znázorněny na obrázku číslo 64.



Obr. 64. Nárys a bokorys přípravku na vylepšení

Tento přípravek se skládá ze stínícího plechu čtvercového tvaru, který má ve svém středu otvor pro připevnění čočky a absorbéru také čtvercového tvaru. Funkce absorbéru je pohltit elektromagnetické vlnění nebo případně jej odrazit. K zabránění obtékání elektromagnetického vlnění kolem absorbéru je přípravek dále vybaven stínícím plechem, který toto vlnění odrazí. Výsledný účel navrhovaného přípravku bude zabránit obtékání signálu kolem čočky, a tudíž bude přijímací anténou zachycen pouze signál, který projde skrz čočku.

Jako další vylepšení bych navrhl vyrobit další čočky s jinými poloměry a to z důvodu, že mnou navrhnuté čočky s poloměrem 100 mm nebudou dostačující pro některá měření, zejména měření na větší vzdálenosti. Proto bych doporučil navrhnout a nechat vyrobit sadu čoček, z nichž každá bude mít jiný poloměr zakřivení a tudíž i jiné ohnisko.

ZÁVĚR

Cíl práce pojednává o problematice tvarování svazku milimetrových vln pomocí čoček. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá základními pojmy problematiky, jako jsou optické zobrazování, typy čoček a optické vady. Dále jsou v teoretické části práce popsány možné způsoby výroby čoček a vhodné materiály. Další potřebnou teorií, která je v práci uvedena, je teorie elektromagnetického pole. Tato teorie obsahuje způsob vzniku a šíření elektromagnetických vln.

Praktická část pojednává o samotných čočkách, které budou sloužit ke tvarování svazku milimetrových vln na nově vybudovaném specializovaném pracovišti Fakulty aplikované informatiky, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Toto pracoviště se bude využívat zejména pro měření komplexní permitivity ve volném prostoru. Specializované pracoviště je v práci blíže popsáno včetně základních technických specifikací jednotlivých zařízení. Dále už je v práci popsán samotný návrh čoček, který obsahuje výběr vhodného materiálu a výpočet parametrů čoček. Jako vhodný materiál pro výrobu byl vybrán Teflon. Jelikož byl Teflon dodáván ve formě tyčí o průměru 50 mm, byl tento průměr brán v potaz i při samotném návrhu. Průměr navržené čočky je tedy shodný s průměrem Teflonové tyče. Pro realizaci čoček byla zadána zakázka specializované firmě na zámečnické obráběcí práce, která provedla samotnou výrobu podle návrhu. Firma byla zvolena z důvodu přesnosti výroby, neboť je nemožné vyrobit čočky z Teflonu přesných tvarů bez speciálního vybavení. Po výrobě čoček bylo provedeno ověření jejich rozměrů, kde bylo zjištěno, že výroba byla velmi přesná a rozměry reálných čoček od navrhnutých se liší pouze v řádu setin mm, což je zanedbatelné. Následně bylo přistoupeno k ověřování samotné funkce vyrobených čoček. Pro ověřování funkce bylo využito již zmíněného specializovaného pracoviště. Hlavním zařízením tohoto pracoviště je spektrální obvodový analyzátor ZVA67 od firmy Rohde&Schwarz, na kterém byla před započítím ověřování provedena kalibrace typu TRL (Thru-Reflect-Line) a následná normalizace. Normalizace byla provedena za účelem, aby spektrální analyzátor měřil pouze prostředí mezi anténami. Pro účely ověření správné funkce čoček byly využity celkem tři metody, z nichž pouze jedna se ukázala jako vhodná a umožnila ověření funkce čoček. První metodou bylo ověřování pomocí speciální kamery, která měla být vhodná i pro sledování elektromagnetického vlnění. Tato metoda byla neúspěšná z důvodu malé citlivosti snímacího čipu kamery. Kamera byla tedy určena pro měření vyšších výkonů. Další metodou bylo ověřování pomocí měřicího zařízení s připojeným tepelným detektorem, které dokáže měřit výkon záření. Při této metodě nastal pro-

blém, jelikož při měření detektor zaznamenával i další záření, nikoli jenom záření vycházející z antény, což se projevilo rostoucím výkonem při postupném oddalování detektoru od vysílací antény. Tím pádem tato metoda nemohla být taky použita a musela být zvolena metoda jiná. Poslední metodou bylo ověřování funkce pomocí měření na spektrálním analyzátoru ZVA67, která byla již vhodná a díky ní se podařilo ověřit funkčnost čoček. Při této metodě se postupně mezi vysílací a přijímací anténu umísťovala čočka a měřil se útlum signálu při posunu přijímací antény o danou vzdálenost doleva a doprava od středu osy vysílací antény. Data získaná z této metody měření byla zpracována do tabulek a grafů, ze kterých bylo možné vyčíst, jakým způsobem čočka ovlivňuje svazek milimetrových vln. Na základě tohoto ovlivňování bylo určeno ohnisko vyrobené čočky. Ohnisková vzdálenost udává, v jaké vzdálenosti od zdroje záření bude vlnění za čočkou tvarováno do rovinné vlny. Toto ohnisko se sice mírně liší od teoreticky vypočítaného ohniska, ale s tím se počítalo, neboť do jisté míry musíme brát v potaz i ovlivňování svazku materiálem čočky. Na základě získání nových zkušeností při ověřování čoček byly navrženy možné vylepšení, které by do budoucna zpřesnily výsledky měření. Podrobnější vyhodnocení výsledků je uvedeno v kapitole číslo 11. Součástí práce je příloha PI, ve které jsou uvedena veškerá naměřená data a z nich vytvořené grafy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010, 207 s., [8] s. barev. obr. příl. ISBN 978-80-7196-384-4.
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, 2000, vii, s. 890-1032,[38s.] příl. ISBN 80-214-1868-0.
- [3] Konvenční a Free-Form technologie výroby brýlových čoček. *Lékařská fakulta Masarykovy univerzity* [online]. 2012 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js12/vyroba_cocek/web/index.html
- [4] *Česká oční optika* [online]. 2013 [cit. 2015-04-19]. ISSN 1211-233X. Dostupné z: http://www.4oci.cz/dokumenty/pdf/4oci_2013_04.pdf
- [5] CAM systémy a hodnocení strategií obrábění. *CAD.cz* [online]. 2011 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/component/content/article/2385.html>
- [6] MUSIL, Jindřich a František ŽÁČEK. *Microwave measurements of complex permittivity by free space methods and their applications*. Academia Praha, 1986, 276 p. ISBN 04-449-9536-6.
- [7] Sférická optika. *Meopta* [online]. 2013 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.meopta.cz/cz/sfericka-optika-1404041288.html>
- [8] Charakteristika teflonu. *Hansanet: Řempe na internetu* [online]. 2014 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.hansanet.cz/clanek/29/Charakteristika-teflonu.aspx>
- [9] Teflon was Invented by Accident. *Today I Found Out* [online]. 2011 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.todayifoundout.com/index.php/2011/08/teflon-was-invented-by-accident/>
- [10] Plasty pro stavebnictví a architekturu 3: Polykarbonát (PC). 2008. *IMateriály* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/clanky/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-3-polykarbonat-pc_101416.html
- [11] Polykarbonátové desky Macrolux od firmy PAMA, a.s. *PAMA - komplet* [online]. 2013 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.pamaas.cz/polykarbonat>

- [12] TRIVEX. *JAI KUDO* [online]. 2010 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.jaikudo.cz/cocky-pro-ty-nejmladsi/trivex>
- [13] Welcome to Element EyeWear. *UK Online Sunglasses Store: Smith Lens Info* [online]. 2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.elementeyewear.co.uk/smith-lens-info-c58.html>
- [14] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: [učebnice]*. 3. vyd. České Budějovice: Kopp, 2008, 2 sv. (341, 325 s.). ISBN 978-80-7232-359-3.
- [15] Šíření vlnění. *Techmania - Edutorium - Exponáty* [online]. 2008 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=657
- [16] SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: Přednášky. [online]. 2002 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf
- [17] HUDLIČKA, Martin a Alireza KAZEMIPOUR. Určování materiálových parametrů ve volném prostoru. *Ústřední odborná skupina mikrovlnná technika ČES* [online]. 2013, s. 4 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: http://web.cvut.cz/ces/mt/prezentace/CES_Hudlicka_VNA_v1.pdf
- [18] Produkty (Rohde & Schwarz Czech Republic). 2015. *Rohde & Schwarz Czech Republic* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.rohde-schwarz.cz/cz/products/>
- [19] Measuring the Magnification of Homemade Simple Microscope Lenses. *Mic-UK* [online]. 2007 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/indexmag.html?http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artoct07/jd-lens.html>
- [20] SCHRÖDER, Gottfried. *Technická optika*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981, 158 s.
- [21] KUBÍNEK, Roman. *Optika - přednášky pro bakaláře* [online]. 2003, s. 78 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/optika.pdf>
- [22] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013, 368 s. ISBN 978-80-246-2246-0.

- [23] Fresnelova čočka. 2015. *MEF* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1534-fresnelova-cocka>
- [24] Understanding Ball Lenses. 2014. *Edmund Optics* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/optics/understanding-ball-lenses/>
- [25] Precision glass ball lenses from Applied Image have multiple utilities. 2013. *Laser Focus World* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.laserfocusworld.com/articles/2013/03/precision-glass-ball-lenses-from-applied-image-have-multiple-uti.html>
- [26] Plasty pro stavebnictví a architekturu 2: Polymetylmetakrylát (PMMA). 2008. *IMateriály* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/clanky/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-2-polymetylmetakrylat-pmma_101415.html
- [27] Základní kámen každého foťáku. Jak vzniká obraz v objektivu. 2007. *Idnes.cz* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/zakladni-kamen-kazdeho-fotaku-jak-vznika-obraz-v-objektivu-pan-/tec_foto.aspx?c=A071025_103506_tec_foto_jlb
- [28] THZ beam profile: Pyroelectric Laser Profiler. 2015. *Ophir Spiricon* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.ophiropt.com/laser-measurement-instruments/beam-profilers/products/industrial-applications/the-cameras/pyrocam>
- [29] Rohde & Schwarz International: R&S®ZVA, R&S®ZVB, R&S®ZVT Operating Manual. *Rohde & Schwarz International*[online]. 2014 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/z/zva_2/ZVA_ZVB_ZVT_OperatingManual_en_25.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PIR	Pasiv Infra Red
CD	Compact Disc
R&S [®]	Rohde & Schwarz
TRL	Thru-Reflect-Line
LDPE	Low-Density Polyethylene
PCI	Peripheral Component Interconnect
IP	Internet Protocol
USB	Universal Serial Bus

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Přímé vidění okem [1]</i>	12
<i>Obr. 2. Průchod paprsku spojkou a rozptylkou</i>	13
<i>Obr. 3. Typy spojek [1]</i>	13
<i>Obr. 4. Typy rozptylek [1]</i>	14
<i>Obr. 5. Běžná čočka a Fresnelova čočka [23]</i>	14
<i>Obr. 6. Kuličkové čočky [25]</i>	15
<i>Obr. 7. Umístění ohnisek u spojky a rozptylky [2]</i>	17
<i>Obr. 8. Parametry čočky t, s_1 a s_2 [3]</i>	18
<i>Obr. 9. Materiál po hrubování [5]</i>	21
<i>Obr. 10. Fréza pro generalizované frézování [3]</i>	21
<i>Obr. 11. Nástroj SPC [3]</i>	22
<i>Obr. 12. Princip vtlačování materiálu do forem [3]</i>	23
<i>Obr. 13. Čočky z optického skla [7]</i>	24
<i>Obr. 14. Teflon [9]</i>	27
<i>Obr. 15. Polykarbonátové desky [11]</i>	28
<i>Obr. 16. Čočky z pryskyřice CR39 [13]</i>	29
<i>Obr. 17. Optické vady při zobrazování předmětu [21]</i>	30
<i>Obr. 18. Koma [27]</i>	31
<i>Obr. 19. Zkreslení obrazu [22]</i>	31
<i>Obr. 20. Otvorová vada [27]</i>	32
<i>Obr. 21 Barevná vada [27]</i>	32
<i>Obr. 22. Astigmatismus [22]</i>	32
<i>Obr. 23. Vznik elektromagnetického pole [14]</i>	33
<i>Obr. 24. Vyzařování elektromagnetického pole do prostoru [14]</i>	34
<i>Obr. 25. Šíření elektromagnetického vlnění (1 - přímá, 2 - prostorová, 3 - povrchová vlna) [14]</i>	36
<i>Obr. 26. Lom elektromagnetických vln v ionosféře [14]</i>	37
<i>Obr. 27. Huygensův - Fresnelův princip [15]</i>	38
<i>Obr. 28. Dopad elektromagnetické vlny na překážku [16]</i>	39
<i>Obr. 29. Laboratorní pracoviště</i>	43
<i>Obr. 30. Spektrální analyzátor R&S[®] ZVA67</i>	44
<i>Obr. 31. Konvertor R&S[®] ZVA-Z325</i>	46

<i>Obr. 32. Kruhová anténa</i>	46
<i>Obr. 33. Dráhy elektrických pojezdů s konvertory</i>	47
<i>Obr. 34. Řídící jednotka pojezdů konvertorů</i>	48
<i>Obr. 35. Kamera Spiricon Pyrocam III</i>	48
<i>Obr. 36. Kamera Spiricon Pyrocam III - konektory</i>	49
<i>Obr. 37. Narys a bokorys čočky v měřítku 1:1</i>	52
<i>Obr. 38. Narys a bokorys vyráběné čočky v měřítku 1:1</i>	52
<i>Obr. 39. Vyrobené čočky</i>	55
<i>Obr. 40. Detail čočky</i>	55
<i>Obr. 41. Čočka umístěná před ohniskem</i>	56
<i>Obr. 42. Čočka umístěná v ohnisku</i>	56
<i>Obr. 43. Čočka umístěná za ohniskem</i>	56
<i>Obr. 44. Měření posuvným měřítkem</i>	57
<i>Obr. 45. Měření mikrometrem</i>	57
<i>Obr. 46. Kalibrační sada R&S[®]ZV-WR03</i>	59
<i>Obr. 47. Útlum teflonu</i>	61
<i>Obr. 48. Kamera s demontovaným filtrem</i>	62
<i>Obr. 49. LDPE filtr</i>	63
<i>Obr. 50. Program Pyrocam III Control Console</i>	63
<i>Obr. 51. Pyrocam III Control Console - View</i>	64
<i>Obr. 52. Program BeamGate</i>	65
<i>Obr. 53. 2D a 3D zobrazení šumu</i>	66
<i>Obr. 54. 2D a 3D zobrazení laseru</i>	66
<i>Obr. 55. Měření modelové situace</i>	67
<i>Obr. 56. Zachycená modelová situace ve 2D a 3D zobrazení</i>	68
<i>Obr. 57. Měření pomocí měřicího zařízení Ophir VEGA</i>	69
<i>Obr. 58. Naměřená hodnota u antény</i>	69
<i>Obr. 59. Naměřená hodnota 5cm od antény</i>	70
<i>Obr. 60. Měření za pomoci spektrálního analyzátoru</i>	72
<i>Obr. 61. Vybrané čtyři grafy</i>	73
<i>Obr. 62. Graf s nepřesností způsobenou obtékáním signálu</i>	75
<i>Obr. 63. Graf s anomálií křivky</i>	75
<i>Obr. 64. Narys a bokorys přípravku na vylepšení</i>	76

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Přehled elektromagnetických vln [14]</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 2. Specifikace konvertorů [18]</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 3. Naměřené hodnoty rozměrů čoček</i>	<i>58</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PI Naměřené hodnoty a grafy

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY A GRAFY

V této příloze jsou uvedeny veškeré naměřené hodnoty, které jsou zpracovány do tabulek číslo 1 a 2. Z těchto naměřených hodnot byly vytvořeny grafy, které jsou uvedeny jako obrázky 1 až 18. Tyto grafy jsou seřazeny podle vzdálenosti, ve které byla umístěna čočka. Komentáře k těmto grafům jsou uvedeny v praktické části této práce, konkrétně v kapitole číslo 11.

Tabulka 1. Naměřené hodnoty 1. část

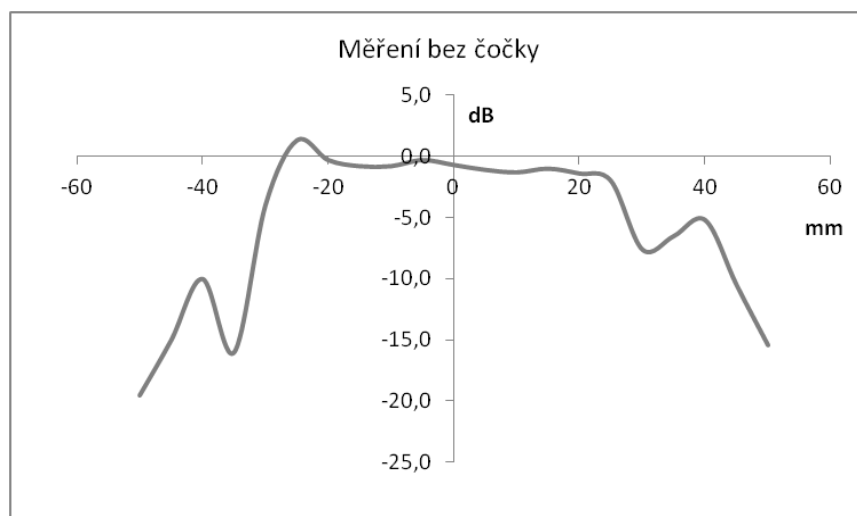
Vzdál. [mm]*	Bez čočky	Vzdálenost čočky od antény [cm]							
		0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	12,5
		[dB]							
50,0	-15,4	-13,9	-17,7	-19,7	-12,5	-22,0	-21,5	-27,0	-13,0
45,0	-10,5	-14,0	-15,7	-14,7	-7,8	-12,9	-17,2	-13,5	-27,0
40,0	-5,2	-8,2	-10,0	-9,1	-5,5	-10,7	-17,0	-12,4	-14,0
35,0	-6,5	-5,7	-7,9	-9,0	-7,5	-6,7	-12,4	-15,0	-21,0
30,0	-7,6	-6,6	-7,5	-9,0	-5,5	-2,3	-4,1	-7,1	-8,4
25,0	-2,0	-1,4	-3,5	-4,4	-2,5	-2,1	-0,8	-1,4	-0,2
20,0	-1,4	-0,6	-0,9	-1,3	0,1	-0,1	0,8	2,2	2,4
15,0	-1,0	-2,5	-2,9	-1,8	0,4	1,2	1,8	2,4	1,6
10,0	-1,3	-0,7	-5,0	-2,0	-2,5	-1,8	1,0	1,2	0,4
5,0	-1,1	0,5	-1,7	0,4	-0,4	0,9	2,4	1,2	3,2
0,0	-0,7	-0,2	1,3	1,5	3,1	4,5	4,8	4,6	6,3
-5,0	-0,3	-0,1	0,4	1,0	-1,8	2,1	4,2	4,8	4,1
-10,0	-0,8	0,7	-0,5	1,5	2,6	4,3	4,1	1,9	4,9
-15,0	-0,8	-0,7	-0,1	-2,1	2,3	2,1	3,2	2,9	1,9
-20,0	-0,3	-5,0	-3,2	-6,7	-4,0	-3,4	-2,9	-0,1	-0,2
-25,0	1,3	-5,0	-5,8	-5,7	-4,0	-4,1	-1,3	-1,2	-1,4
-30,0	-4,0	-8,3	-8,0	-8,6	-6,4	-2,8	-2,7	-4,3	-9,9
-35,0	-16,0	-8,0	-9,7	-9,2	-10,0	-5,4	-7,0	13,8	-15,1
-40,0	-10,0	-10,9	-14,0	-13,6	-11,8	-9,8	-12,5	-26,0	-20,8
-45,0	-15,0	-14,5	-18,0	-15,1	-14,7	-17,5	-25,0	-16,0	-19,8
-50,0	-19,5	-18,0	-25,0	-19,0	-14,7	-17,6	-19,0	-19,7	-21,4

Tabulka 2. Naměřené hodnoty 2. část

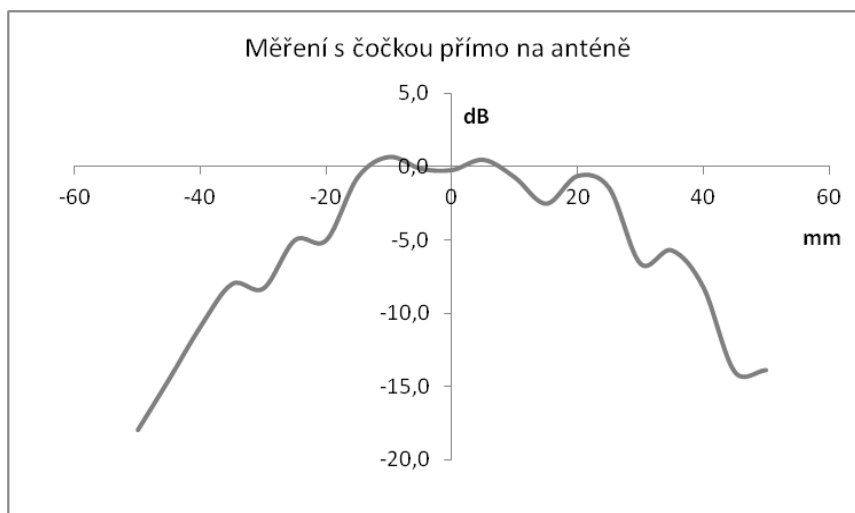
Vzdál. [mm]*	Vzdálenost čočky od antény [cm]								
	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	16,0	18,0	20,0	22,0
	[dB]								
50,0	-10,0	-12,5	-10,0	-13,8	-13,0	-11,0	-15,0	-19,0	-15,8
45,0	-27,0	-19,0	-17,0	-11,7	-12,0	-11,0	-11,9	-10,9	-12,0
40,0	-11,0	-10,0	-14,0	-22,0	-7,7	-10,5	-7,7	-7,7	-8,7
35,0	-20,0	-18,0	-31,0	-18,0	-12,0	-19,0	-10,0	-5,9	-6,5
30,0	-15,0	-15,0	-13,0	-16,0	-25,0	-27,0	-17,0	-12,4	-7,5
25,0	-2,8	-1,8	-2,1	-3,4	-10,5	-7,9	-16,6	-13,4	-27,0
20,0	1,9	2,1	2,5	2,0	-0,5	1,4	-0,7	-1,3	-1,8
15,0	2,9	2,1	2,4	2,9	3,5	2,7	0,6	-3,8	-3,2
10,0	0,4	1,7	2,1	-0,2	1,4	0,2	-0,2	-3,7	-3,8
5,0	1,9	3,2	3,9	2,3	1,9	0,7	-1,3	-3,4	-1,4
0,0	4,8	5,3	4,9	3,7	2,7	2,3	0,1	-2,9	0,4
-5,0	4,6	3,6	5,1	3,7	3,6	3,9	2,9	1,8	1,7
-10,0	4,4	5,3	2,6	3,7	1,7	0,7	0,9	2,6	0,7
-15,0	3,2	2,4	2,5	2,1	1,7	1,9	0,3	-1,4	-2,8
-20,0	-0,9	0,5	1,0	0,5	0,1	1,4	1,4	0,2	1,2
-25,0	-1,4	-1,9	-2,5	-3,0	-1,5	-4,7	-6,4	-12,8	8,5
-30,0	-5,7	-10,0	-24,0	-14,8	-9,0	-17,0	-13,2	-18,2	-15,0
-35,0	-11,0	-16,0	-17,0	-15,3	-20,0	-14,0	-10,0	-6,9	-6,1
-40,0	-29,0	-22,0	-17,0	-29,0	-16,0	-12,4	-9,8	-10,3	-8,5
-45,0	-17,0	-14,0	-13,0	-14,0	-13,5	-12,3	-12,7	-14,2	-18,5
-50,0	-21,0	-23,0	-18,0	-17,9	-19,5	-16,5	-16,8	-16,7	-15,0

Pozn.:

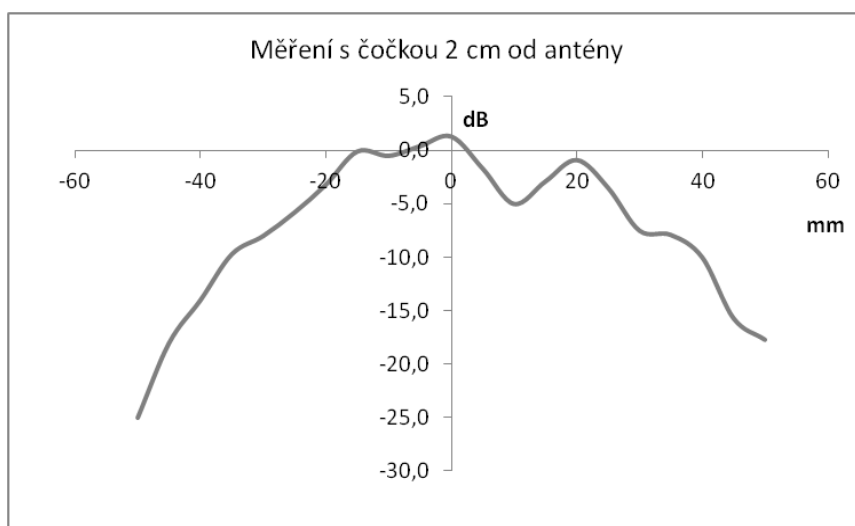
* Záporné hodnoty u vzdálenosti v tabulce číslo 1 a 2 jsou z důvodu posuvu konvertoru ze středu pojezdu. Při pohybu konvertoru doleva jsou hodnoty záporné a při pohybu doprava jsou kladné.



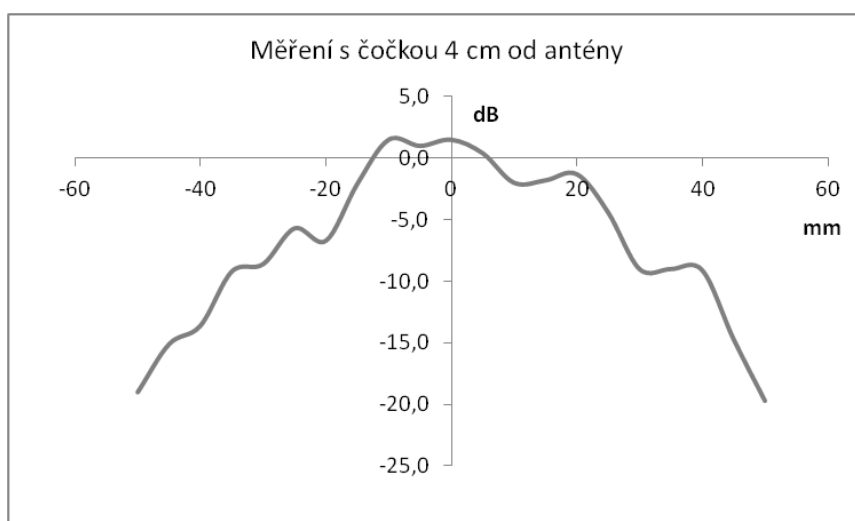
Obrázek 1. Měření bez čočky



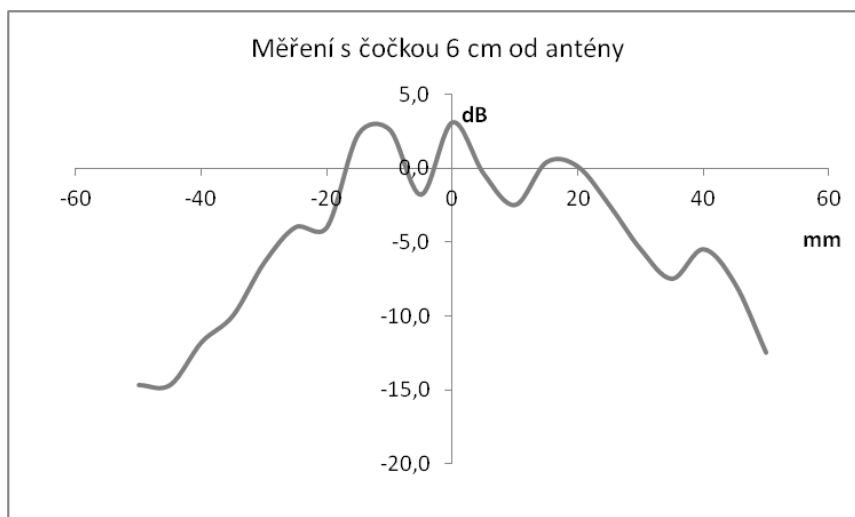
Obrázek 2. Měření s čočkou přímo na anténě



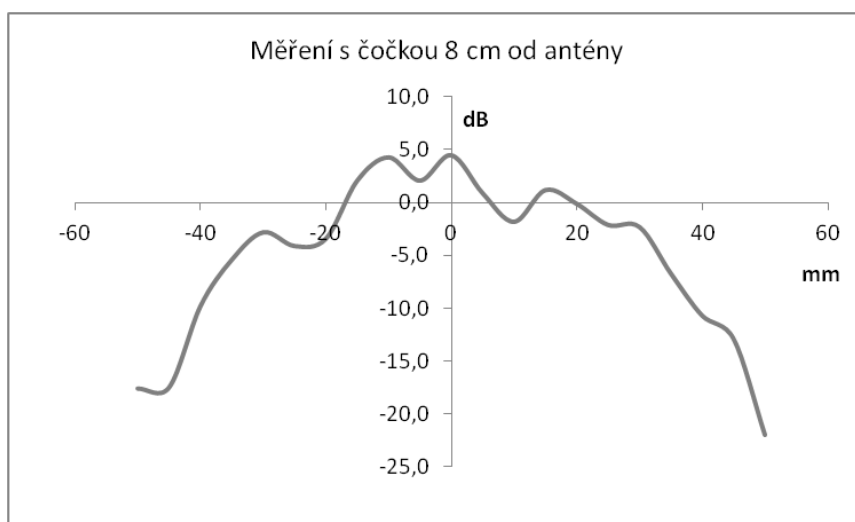
Obrázek 3. Měření s čočkou 2 cm od antény



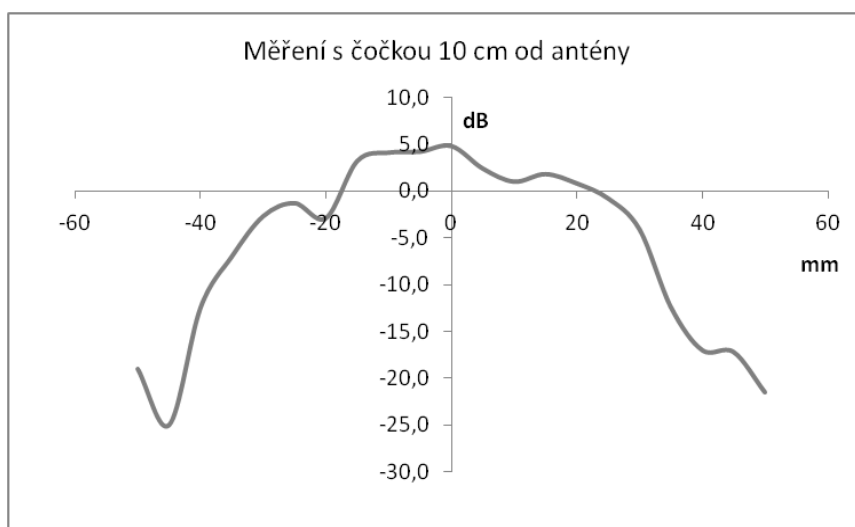
Obrázek 4. Měření s čočkou 4 cm od antény



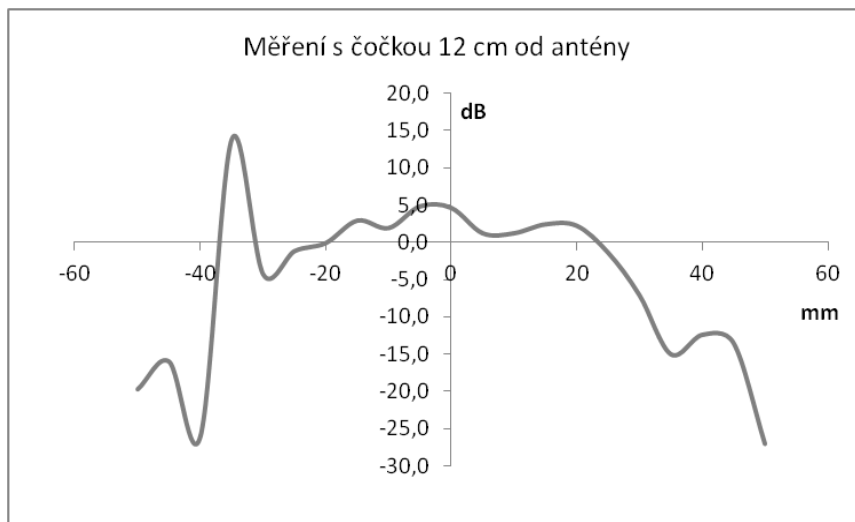
Obrázek 5. Měření s čočkou 6 cm od antény



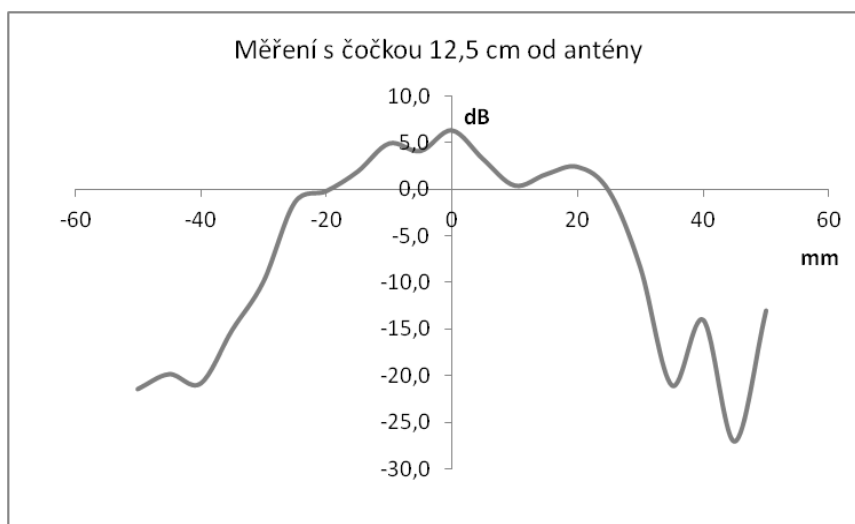
Obrázek 6. Měření s čočkou 8 cm od antény



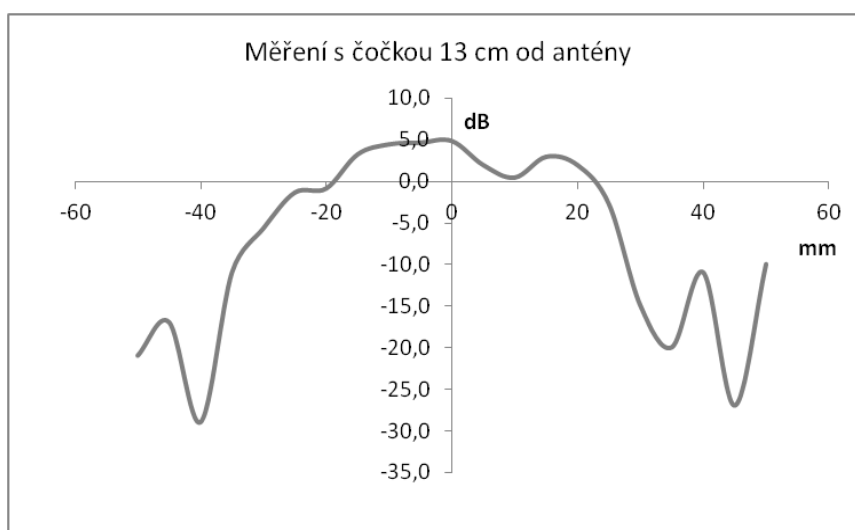
Obrázek 7. Měření s čočkou 10 cm od antény



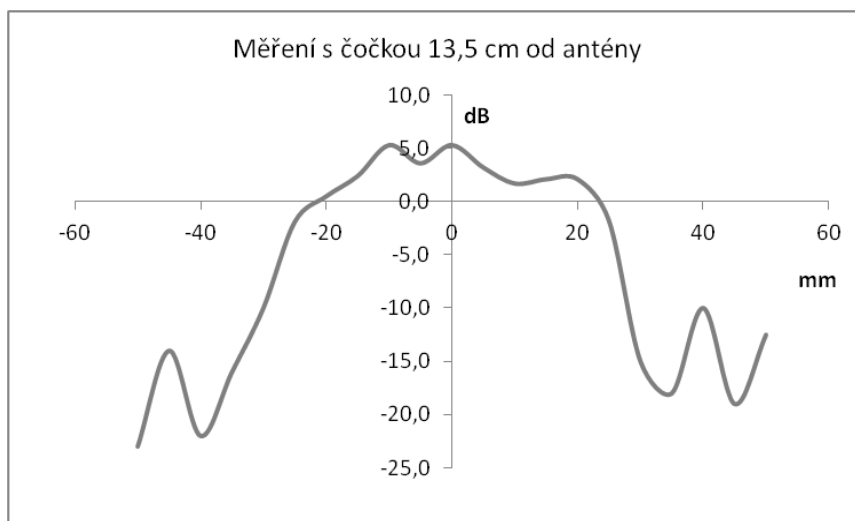
Obrázek 8. Měření s čočkou 12 cm od antény



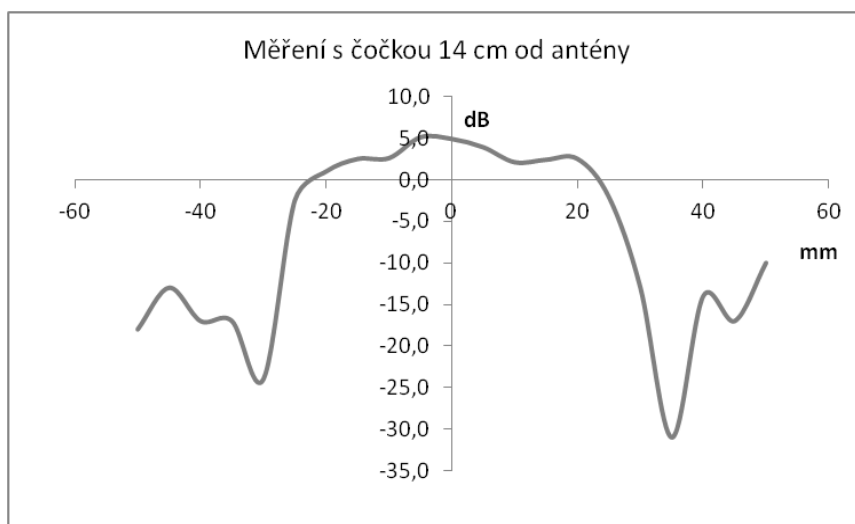
Obrázek 9. Měření s čočkou 12,5 cm od antény



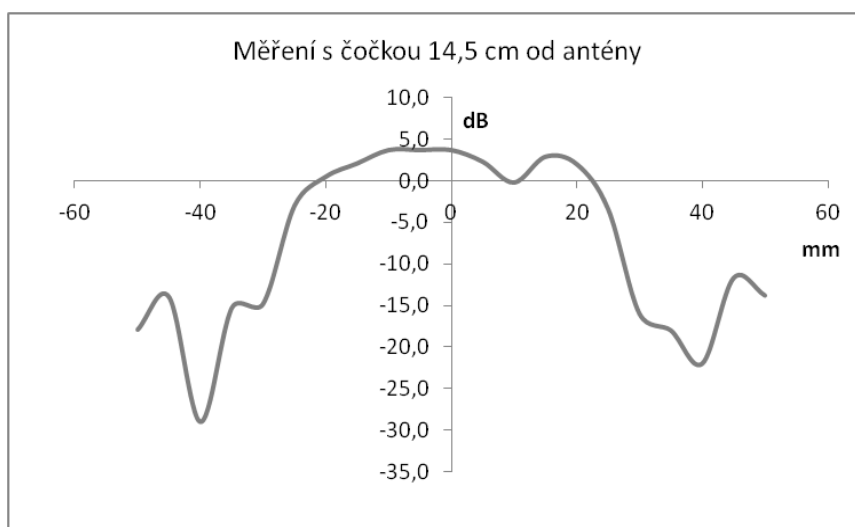
Obrázek 10. Měření s čočkou 13 cm od antény



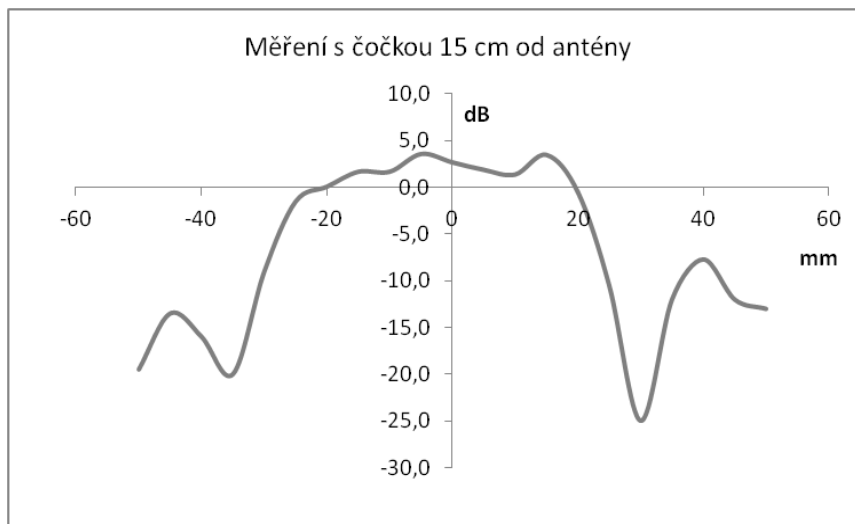
Obrázek 11. Měření s čočkou 13,5 cm od antény



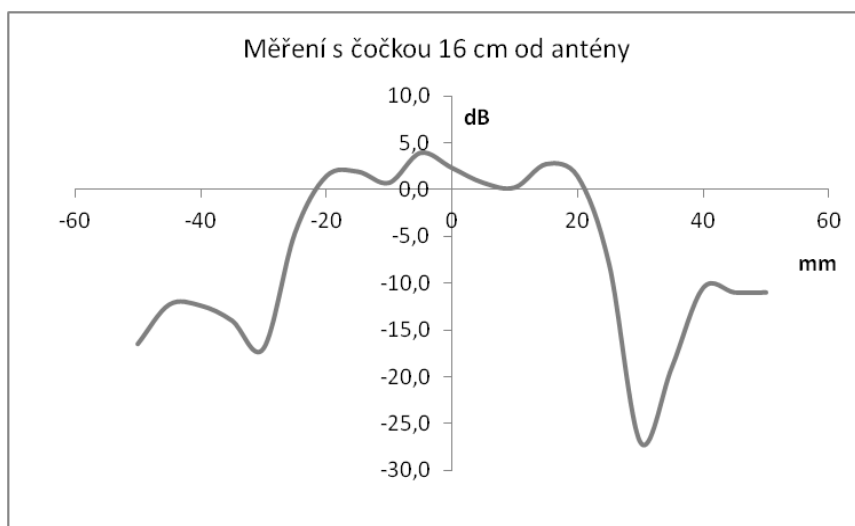
Obrázek 12. Měření s čočkou 14 cm od antény



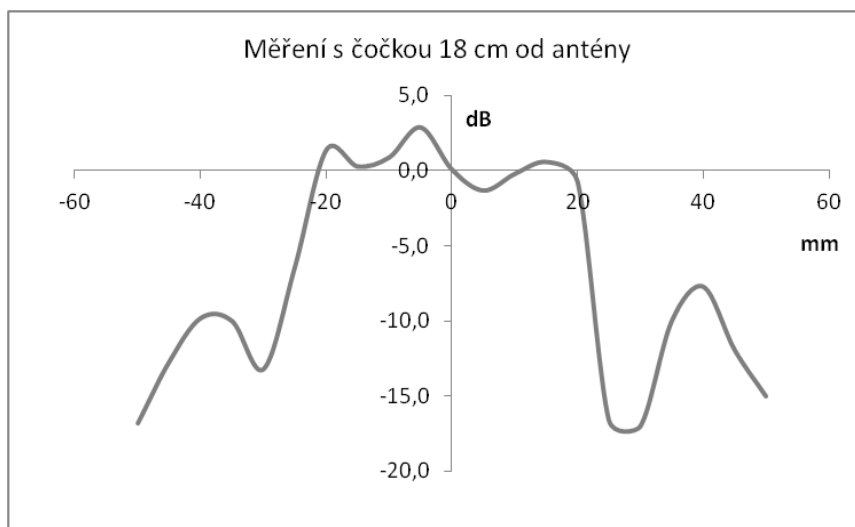
Obrázek 13. Měření s čočkou 14,5 cm od antény



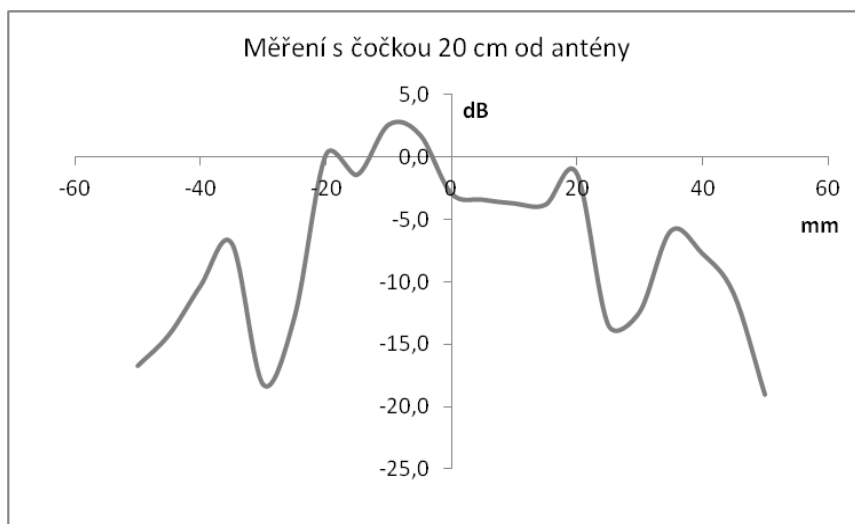
Obrázek 14. Měření s čočkou 15 cm od antény



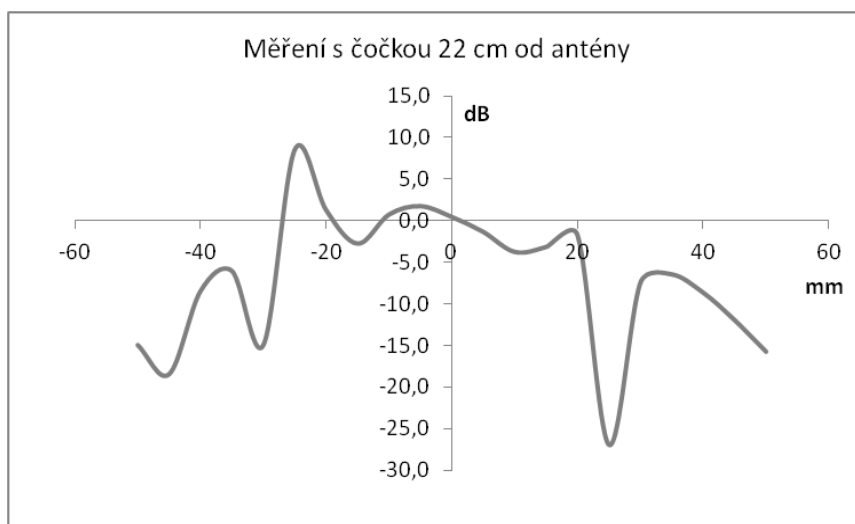
Obrázek 15. Měření s čočkou 16 cm od antény



Obrázek 16. Měření s čočkou 18 cm od antény



Obrázek 17. Měření s čočkou 20 cm od antény



Obrázek 18. Měření s čočkou 22 cm od antény

Výše uvedené grafy byly vytvořeny z dat získaných při prvotním i následném přesnějším měření. Pro přehlednost jsou grafy seřazeny postupně podle vzdálenosti, v jaké se při měření nacházela čočka.