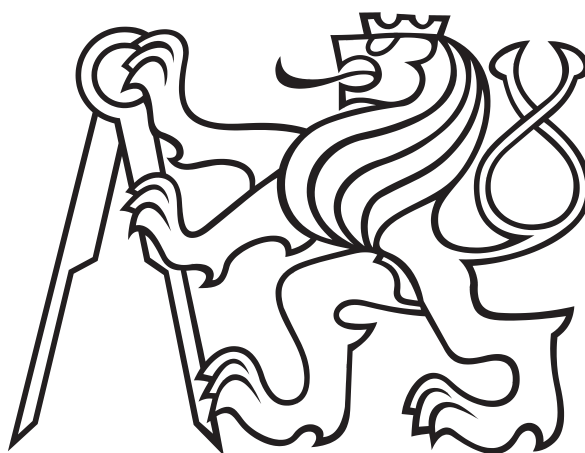


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Michal Průša



Česke vysoké učení technické v Praze

fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole



Diplomová práce

Trychtýřová anténa s dielektrickou čočkou realizovaná  
technologií 3D tisku

**Autor:** Michal Průša

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Kořínek PhD.

**2017**

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „Trychtýřová anténa s dielektrickou čočkou realizovaná technologií 3D tisku“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 18.5.2017

Michal Průša

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Průša** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **406124**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Elektronika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Trychtýřová anténa s dielektrickou čočkou realizovaná technologií 3D tisku**

Název diplomové práce anglicky:

**3D Printed Horn Antenna with Dielectric Lens**

Pokyny pro vypracování:

1. Navrhněte a realizujte trychtýřovou anténu metodou 3D tisku.
2. Optimalizujte vyzařovací vlastnosti trychtýřové antény použitím dielektrické čočky.
3. Dielektrickou anténní čočku realizujte metodou 3D tisku.
4. Zvolte vhodný tiskový materiál na základě znalostí jeho elektrických parametrů.
5. Elektrické parametry realizovaného vzorku ověřte měřením.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Johnson, R., C., Antenna Engineering Handbook, Third Edition, McGraw-Hill, New York, 1992.
- [2] Volakis, J., L., Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 2007.
- [3] Balanis, C., A., Antenna Theory: Analysis and Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [4] Kraus, J. D., Antennas, McGraw-Hill, New York, 1988.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Tomáš Kořínek Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **10.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## Poděkování

Mé poděkování patří panu Ing. Tomášovi Kořínkovi PhD. za cenné rady při konzultacích, za podporu, ochotu, vstřícnost a trpělivost při vedení celé této diplomové práce.

Dále mé poděkování patří firmě Prusa Research s.r.o. za poskytnutí tiskové laboratoře a finančních prostředků.

## **Anotace**

Obsahem této diplomové práce je výhradně rozbor využití FDM/FFF technologie 3D tisku ve vysokofrekvenční technice, konkrétně možnosti realizace trychtýřové antény s dielektrickou čočkou pro optimalizaci vyzařovacích vlastností. V první části se práce zabývá trychtýřovými anténami a jejich návrhem, následně stejným postupem dielektrickými čočkami. Dále se práce zabývá materiály pro 3D tisk, jejich parametry, včetně extrakce a popisu metody. Závěrem práce je popis realizace navržené antény, předvedeny výsledky a porovnány se simulací. Postupy popsány v této práci se podařilo realizovat funkční trychtýřovou anténu s dielektrickou čočkou pomocí 3D tisku, bohužel s velmi nízkým ziskem, a extrahovat parametry běžných materiálů po průchodu procesem.

## **Klíčová slova**

3D tisk, RepRap, Trychtýřová anténa, Anténní čočka, Dielektrická čočka, Extrakce parametrů

## **Abstract**

Content of this masters thesis is specially a research of possible usage of FDM/FFF 3D printing technology in high frequency technology, specifically realization of horn antenna with dielectric lens for optimization of radiation properties. In the first part, the thesis is explaining horn antennas and it's design, then dielectric lenses in similar way. Then the materials for 3D printing is discussed, described properties and it's extraction, including description of the method. At the end, realization of designed antenna and lens is described, presented results and compared to simulation. With methods described in this thesis, we were able to realize working horn antenna with dielectric lens using 3D printing technology, unfortunately with very low gain, and extract parameters of common materials after printing process.

## **Key words**

3D printer, RepRap, Horn antenna, Antenna lens, Dielectric lens, Parameter Extraction

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
1.1	Motivace . . . . .	1
1.2	Cíl . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Teoretický rozbor</b>	<b>2</b>
2.1	3D tisk a materiály . . . . .	2
2.1.1	Princip technologie FDM . . . . .	2
2.1.2	Vlastnosti technologie . . . . .	3
2.1.3	Materiály využitelné pro vysokofrekvenční techniku . . . . .	5
2.2	Trychtýřová anténa . . . . .	6
2.2.1	Základní princip . . . . .	6
2.2.2	Charakterizace struktury . . . . .	8
2.3	Anténní čočky . . . . .	9
2.3.1	Základní princip . . . . .	9
2.4	Extrakce dielektrických parametrů . . . . .	10
2.4.1	Princip extrakce . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Návrh</b>	<b>12</b>
3.1	Trychtýřová anténa . . . . .	12
3.2	Anténní čočka . . . . .	12
3.3	Extrakce dielektrických parametrů . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Realizace</b>	<b>13</b>
4.1	3D tisk . . . . .	13
4.2	Pokovení . . . . .	13



4.3	Měření parametrů . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>15</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Téma anténních struktur osazených čočkami, zejména anténních čoček jako takových, bylo velmi aktuální a rozvíjené v počátcích vývoje antén pro mikrovlnnou techniku. Avšak s příchodem reflektorových antén se velká část pozornosti odklonila právě k nim zejména z důvodu jejich vyšší efektivity. Poslední dobou se stále se zvyšujícím kmitočtem, anténní struktury s čočkami začínají opět získávat svoji poroznost.[1 - Modern Lens Antennas for Communications Engineering.pdf]

### 1.1 Motivace

3D tisk je technologie zejména pro výrobu rychlých prototypů, takzvaný "rapid prototyping", používaná ve stále více oborech. S uvedením speciálních polymerních materiálů vykazující vyšší elektrickou vodivost do prodeje má stále větší smysl využití právě této technologie pro urychlení vývoje a malosériovou výrobu antén (s výjimkou dielektrických rezonančních struktur).

### 1.2 Cíl

Primárním cílem této práce je výzkum využití 3D tiskové technologie FDM pro výrobu anténní struktury (trychtýřová anténa s dielektrickou čočkou) od návrhu optimalizovaného pro jednoduchou výrobu, přes extrakci dielektrických parametrů po průchodu technologickým procesem, po vlastní realizaci navržené struktury. Sekundárním cílem práce byl průzkum možností následného pokovení pro minimalizaci rozdílu mezi "vytisknutou" a profesionálně realizovanou strukturou.

# Kapitola 2

## Teoretický rozbor

Před vlastním návrhem a realizací je nezbytně nutné být seznámen alespoň se základní teorií použitých technologií a postupů. Bez této znalosti by se jednalo pouze o útržky textu a nebylo by možno zacházet do řešení komplexnější problematiky a kladení možných dalších témat pro následující výzkum a posun technologie.

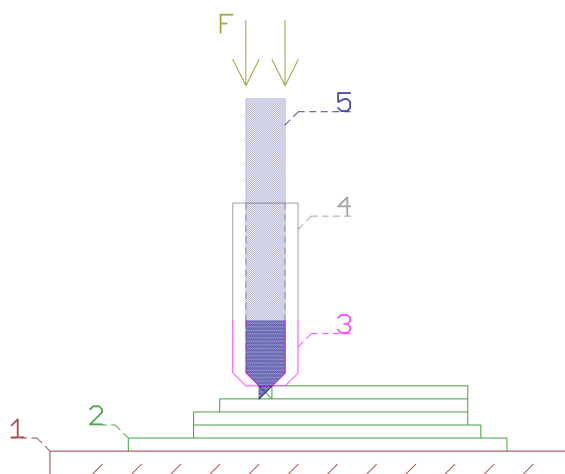
### 2.1 3D tisk a materiály

3D tisk je na rozdíl od jiných technologií aditivní proces. Jedná se tedy o postupné přidávání základního materiálu v diskretních krocích (vrstvách). Technologií existuje několik a s postupným rozšiřováním možností aplikace jich stále přibývá. Pro řešení této práce byla vybrána technologie FDM vzhledem k jejímu masovému rozšíření, dostupnosti a nízkých nákladů.

#### 2.1.1 Princip technologie FDM

Fused deposition modeling, zkráceně FDM, případně FFF (Fused Filament Fabrication) je technologie 3D tisku využívající možnost opakovatelného přechodu mezi skupenstvími působením energie ve formě tepla termoplastických polymerních materiálů. Základní materiál ve formě filamentu (drátu) definovaného průměru, zpravidla 1.75 mm, nebo 2.85 mm, je vtlačován do přehřáté trysky silou  $F$ . Pokud teplota horké zóny trysky převyšuje teplotu skelného přechodu vtlačovaného materiálu dojde k dramatickému oslabení mezimolekulárních sil a vzniku viskózní kapaliny. Jelikož je průměr trysky velmi blízký průměru vtlačovaného filamentu, s výjimkou jejího hrdla které je násobně menší, zpravidla 0.4 mm,

jediná možnost jak uvolnit vnitřní tlak je vytlačení kapaliny hrdlem. Jakmile teplota vytlačené kapaliny klesne pod teplotu skelného přechodu dojde k obnovení mezimolekulárních sil a materiál je opět pevnou látkou. Tento jev je obecně znám pod názvem extruze. Toto nám však nestačí pro vytvoření trojrozměrného objektu dle zadání. Je tedy třeba extrudér osadit na zařízení zajišťující pohyb v trojrozměrném prostoru. Proces tisku pak probíhá pohybem extrudéru po předem definovaných trasách, zpravidla vždy v jedné vrstvě, a vytlačováním materiálu dle potřeby. Celý proces se poté opakuje dokud není dokončen zadaný objekt.



Obrázek 2-1: Princip technologie FDM. 1 - Tisková podložka, 2 - Již hotové vrstvy výsledného objektu, 3 - Horká zóna trysky, 4 - Tryska, 5 - Filament, F - Vtlačovací síla

### 2.1.2 Vlastnosti technologie

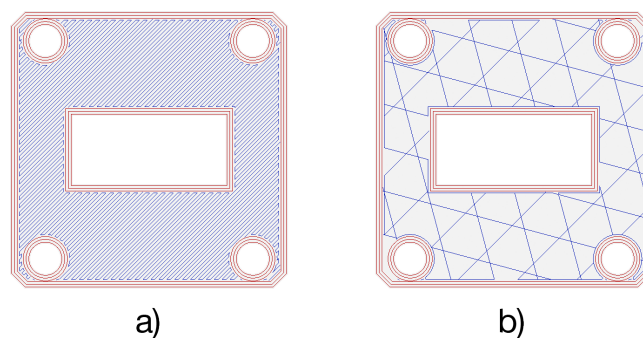
3D tisk, podobně jako jiné technologie má specifické vlastnosti, které ovlivňují charakter výsledného produktu. Ovlivněných vlastností je velmi mnoho, pro naši aplikaci se zaměříme na dielektrické (chceme vědět jaké bude mít výsledný produkt dielektrické vlastnosti, abychom ho byly schopni popsat, navrhovat a simulovat) a mechanické (produkt musí být možno pevně a stabilně ukotvit na pozici, a musí do něj být možno navázat elektromagnetickou vlnu známým způsobem). Je však nutno brát v potaz, že má i celou řadu vlastností, kterých lze využít pro vytvoření složitých struktur, které by nebylo možné jinými technologiemi jednoduše realizovat, například vnitřní uzavřené struktury. Některé z nich jsou zatím pro dostatečně přesné aproximace dosažitelné v reálném časovém horizontu zcela náhodně, jiné zase přímo ovlivňují námi velmi žádané parametry a můžeme je takto řídit.

## Vrstvy

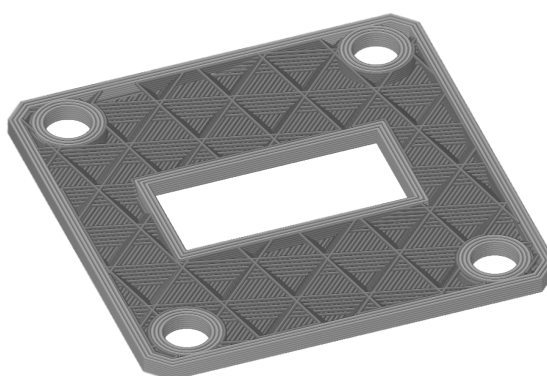
Pokud budeme uvažovat ideální podmínky (absolutně čisté prostředí bez kontaminace nechtěnými látkami, ideální filament, rovnoměrnou kontrolovanou distribuci tepla, atd...) stále je objekt tvořen z vrstev. Jelikož vždy vrtva, na které se aktuálně nanáší, je dokonce pod teplotou skelného přechodu, pro odstranění deformace vlivem sil jako gravitace, či tepelné roztažnosti, nedojde k dokonalému spojení polymerních řetězců mezi vrtvami. Při laminaci vrstev může také dojít ke kontaminaci produktu, jako například prachovými částicemi či vzduchovými kapsami. Toto se však dá zanedbat jelikož lze snadno stabilizovat okolní prostředí a minimalizovat vliv. Hlavní ovlivněné vlastnosti, pro naši aplikaci podstatné, jsou mechanické. Vždy je v ose vrstev rozložení mezne plasticity neuniformní, dochází tedy k plastické deformaci významně v těchto oblastech, což někdy může být problém z důvodu nutnosti splnění možnosti upevnění a realizovatelnosti produktu. Z dielektrického hlediska tedy nebude ani relativní permitivita uniformně rozložená v jedné ose, vznikne tedy periodická struktura. Tento vliv by bylo možné omezit buďto zvýšením diskretizačního kroku, tedy omezením počtu rozhraní, což může v jistých případech ovlivňovat vlastnosti celé struktury vzhledem růstu kvantizačního šumu, nebo naopak snížením kroku kdy již bude úroveň šumu blízká nule, což se bohužel negativně projeví na době tisku, to však v některých případech není problém. Výzkum popisu tohoto chování je však předmětem dalším.

## Vnitřní struktury

Vlivem principu vrstvení je možno vytvářet vnitřní struktury definovaných tvarů, dokonce i selektivně, a takto velmi silně ovlivňovat pro nás důležité parametry. Mechanické vlastnosti tímto lze selektivně měnit, například zpevněním montážních otvorů v technologickém okolí, což v našem případě není první v pořadí. Dielektrické vlastnosti jsou tímto však velmi ovlivněny. Technologií je totiž možno vytvářet prakticky jakékoliv struktury uvnitř produktu ve zvolených místech, tedy například vytisknout Luneburgovu či Maxwell fish-eye čočku. Je však ale nutno provést výzkum na toto téma dostatečné podrobný výzkum, jedná se totiž o skokové změny vlastností. Tyto změny poté vytváří rozhraní, kde dochází odrazům, které zatím modelovat a popsat je velmi komplexní úlohou.



Obrázek 2-2: Porovnání různého motivu vrstvy, a) 100 % vyplň typem rectilinear, b) 20 % vyplň typem cubic



Obrázek 2-3: Náhled vrstev 1-6 struktury s kombinovanou výplní typu rectilinear (první dvě vrstvy) a cubic o rozdílné procentuální výplni

### 2.1.3 Materiály využitelné pro vysokofrekvenční techniku

Termopolymerních materiálů které by se daly využít je celá řada, teoreticky je možné uplatnit velké množství, prakticky však ale vyplývá otázka bezpečnosti, jelikož průchod některých polymerů procesem může uvolňovat nebezpečné látky, či v případě směsí její části. Dále je však nutné brát v potaz i vlastnosti jako tepelná roztažnost Mezi nejrozšířenější patří PLA, ABS a PET, tyto materiály však lze uplatnit zejména v čočkách, či dielektrických rezonátorech, jelikož vykazují velmi malou vodivost. Objevují se ale stále nové směsy materiálů jako například PLA s výraznou příměsí grafénových šupin, či měděného prachu které v ideálním případě disponují velmi vysokou vodivostí.

## "Vodivé" materiály

Jelikož mezi nejrozšířenější materiály patří PLA, které vykazuje výborné zpracovatelské vlastnosti je většina těchto směsí právě na tomto nosiči. Jako příměs pro vodivé materiály je možno použít teoreticky jakékoliv fragmenty vodivé látky jako třeba měď, stále populárnější je ale grafén, z důvodu jeho vysoké vodivosti způsobené  $\pi$  elektrony. Při plnění nosného polymeru je však nutno brát v potaz že při zvyšujícím se podílu plniva se vlastnosti výsledné směsi velmi mění. Jelikož je pro nás nyní nejvýznamnější elektrická vodivost, je tedy logický cíl maximalizace právě tohoto kritéria. Bohužel se ale stále bude jednat o směs vysoce vodivého materiálu ve velmi nevodivém polymeru, což má dramatický dopad na výsledek. V první řadě i když budeme uvažovat dokonale uniformní rozložení a identické frakce příměsi ve filamentu, vlivem průchodu extrudérem nelze předpokládat, že výsledek bude stejný. Dochází totiž k opětovnému promísení a dokonalý popis celého systému zatím není znám. V druhé řadě je třeba stále brát ohled na zpracovatelnost materiálu a volit správné poměry příměsí, z pravidla 40 - 80 % [2- Konzultace Josef Doleček - Filamentum]. Z výše uvedených faktů je bohužel patrné, že výsledný produkt má nezanedbatelné dielektrické vlastnosti. Ačkoliv se může zdát že tyto materiály nejsou pro naši aplikaci zatím použitelné, stále existuje možnost následného pokovení produktu, kde tyto vlastnosti výrazně zjednoduší proces.

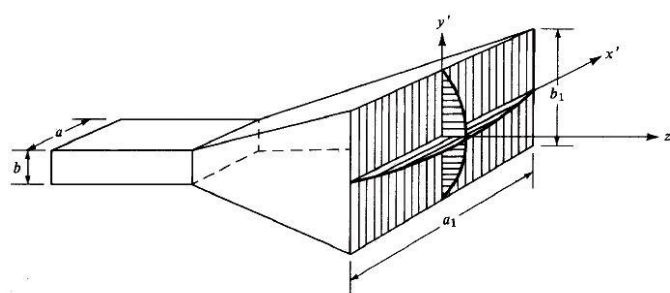
## 2.2 Trychtýřová anténa

Trychtýřová anténa patří mezi základní anténní struktury využívané jak samostatně, tak ve formě ozařovačů reflektorových antén, či v kombinaci s anténní čočkou. Těchto struktur existuje několik druhů, v našem případě se ale zaměříme na nejpoužívanější, tedy pyramidální trychtýřovou anténu. Tento typ antény byl zvolen zejména kvůli své jednoduchosti a požadavkům na technologii výroby.

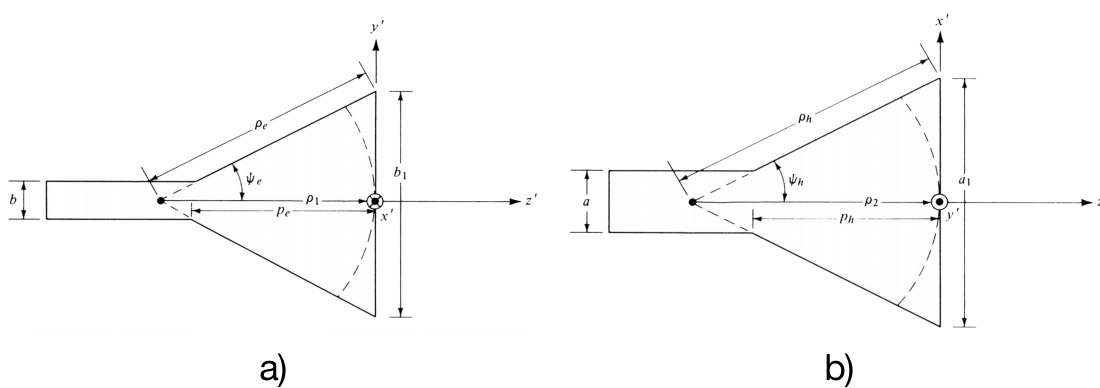
### 2.2.1 Základní princip

Trychtýřová anténa není nic jiného, než postupně se rozšiřující ústí vlnovodu v daných směrech. V případě pyramidálního trychtýře dochází k otevření jak v  $E$ , tak  $H$  rovině. Postupné otevření trychtýře lze považovat za impedanční transformátor zajišťující, v ideálním případě bezodrazné, vyvázání vlny do volného prostoru v definovaném pásmu. Základní

parametry jsou vyobrazeny na obrázku 2-4,2-5.



Obrázek 2-4: Pyramidální trychtýřová anténa



Obrázek 2-5: Pyramidální trychtýřová anténa v řezu a)E-roviny, b)H-roviny

- $a, b$  - Rozměry vlnovodu
- $a_1, b_1$  - Rozměry ústí trychtýře
- $x', y'$  - E-rovina, H-rovina
- $z'$  - Směr Poyntingova vektoru
- $\rho$  - Délka stěny trychtýře
- $p$  - Délka trychtýře
- $\psi$  - Úhel otevření



### 2.2.2 Charakterizace struktury

#### Směrovost a zisk

Směrovost charakterizuje strukturu z hlediska poměru intenzit vyzářeného výkonu struktury do určitého směru, ku celkovému vyzářenému výkonu do celého prostoru. Jde tedy o schopnost antény "směrovat" výkon do určitého směru. Toto však z principu reciprocity paltí i opačně, tedy pro přijatý výkon. Na základě tohoto lze definovat maximální směrovost antény.

$$G_p/dB = 10 * [1.008 + \log_{10}(\frac{a_1*b_1}{\lambda^2})]$$

2-6: Maximální směrovost pyramidální trychtýřové antény

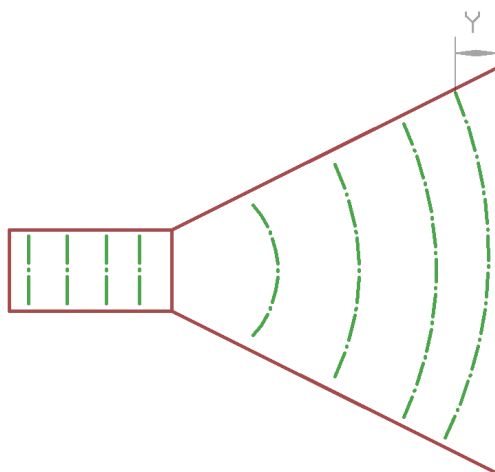
Zisk antény je však pro aplikace zajímavějším parametrem, jelikož zahrnuje i ztráty vyzařovací účinností  $\eta_r$ .

$$G_{dB} = D_{dB} - \eta_r(dB)$$

2-7: Vztah zisku a směrovosti

#### Fázová chyba

Jelikož při vyvazování vlny z vlnovodu do volného prostředí dochází k transformaci vlny rovinné na kulovou. Z této skutečnosti plyne, že na rozhraní ústí trychtýře bude existovat oblast, kde se střed vlny bude nacházet právě na rozhraní, ale její okraje stále uvnitř. Tento rozdíl se nazývá fázová chyba a vede k deformaci směrové charakteristiky a snížení směrovosti. Pro minimalizaci této chyby je vhodné, aby úhel otevření trychtýře byl co nejmenší, nicméně je však ale nutno brát v potaz, že tímto narůstá jeho odélka a zároveň i náročnost realizace.



Obrázek 2-8: Znázornění fázové chyby  $Y$

## 2.3 Anténní čočky

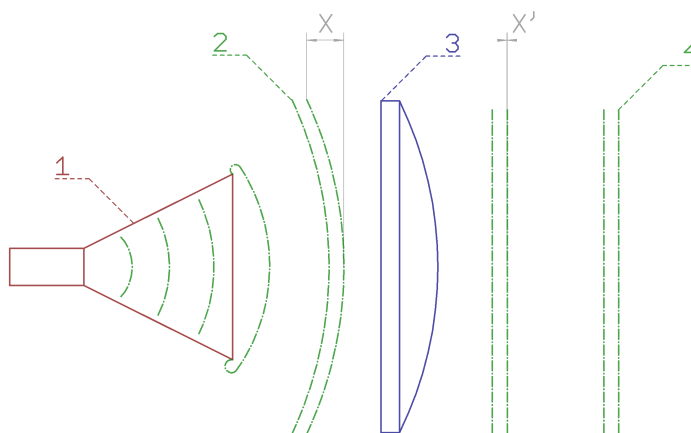
Podobně jako v optice, i zde lze použít čočku, jelikož světlo má z důvodu duality i charakter vlny. Existuje tedy celá řada různých realizací čoček, lze je rozdělit do dvou základních kategorií:

- Zpomalovací, neboli dielektrické
- Urychlující, neboli kovové

### 2.3.1 Základní princip

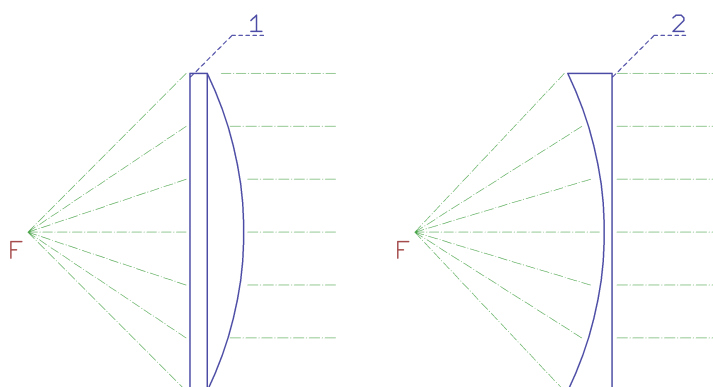
Hlavním úkolem čočky je kolimovat paprsek, neboli snížit rozbíhavost, v případě anténní domény transformovat kulovou vlnu na rovinnou. Jak můžeme vidět na obrázku 2-9, kde:

- 1 - Trychtýřová anténa
- 2 - Vystupující kulová vlna z trychtýře
- 3 - Anténní čočka
- 4 - Výsledná rovinná vlna
- $X$  - Parametr kulovitosti vstupní vlny
- $X'$  - Parametr kulovitosti výstupní vlny



Obrázek 2-9: Princip anténní čočky

Pro zajištění této funkce je však ale nutno, aby anténní čočka měla rozdílnou relativní permitivitu  $\epsilon_r$  než okolní prostředí, ve kterém se vlna šíří. Touto podmínkou je způsobeno zpomalení, nebo zrychlení, vlny a následné kolimaci. Z čehož plyne již výše uvedené rozdělení čoček, viz obrázek 2-10.

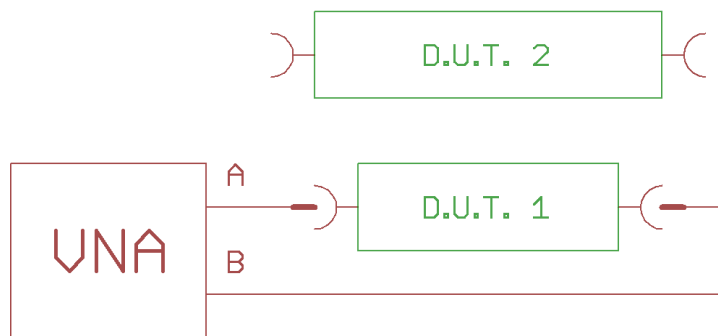


Obrázek 2-10: Typy anténních čoček. 1 - Zpomalující, 2 - Zrychlující

## 2.4 Extrakce dielektrických parametrů

Znalost dielektrických parametrů je klíčová pro návrh vlastních struktur, zejména anténních čoček. Pro většinu materiálů jsou tyto parametry již známe, nicméně pokud se rozhodneme strukturu realizovat technologií 3D tisků, vstupuje do tohoto mnoho dalších proměnných které mohou výrazně ovlivnit výsledné parametry produktu, ať už v prospěch, či naopak. Pro získání těchto parametrů lze použít například proces integrovaný v CST MW

studio, který lze papsat blokovým schématem na obrázku 2-11



Obrázek 2-11: Blokové schéma extrakce dielektrických parametrů

### 2.4.1 Princip extrakce

Extrakce parametrů spočívá ve změření přenosu mezi kanály  $A$  a  $B$  vektorového analyzátoru pro dva geometricky odlišné vzorky materiálu, jehož parametry chceme extrahovat. Jelikož v systému dojde ke změně pouze rozměru neznámého materiálu, tak na základě rozdílného přenosu jsme schopni z naměřených dat extrahovat dielektrické parametry jako relativní permitivitu  $\epsilon_r$  a ztrátový činitel  $tg\delta$ .

## Kapitola 3

### Návrh

#### 3.1 Trychtýřová antnéna

#### 3.2 Anténní čočka

#### 3.3 Extrakce dielektrických parametrů

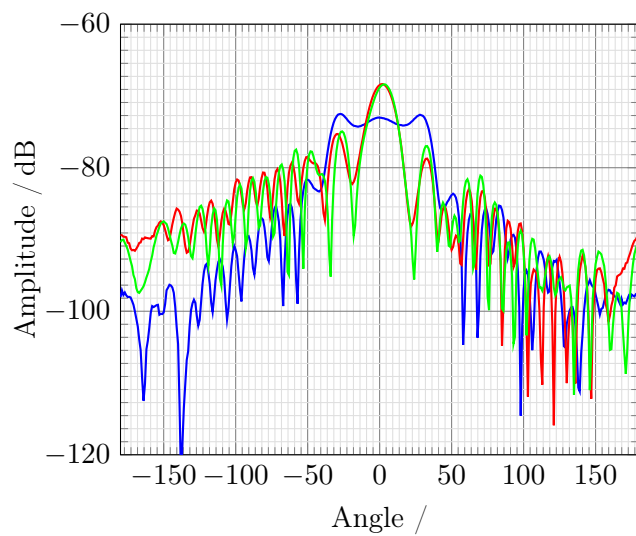
## Kapitola 4

# Realizace

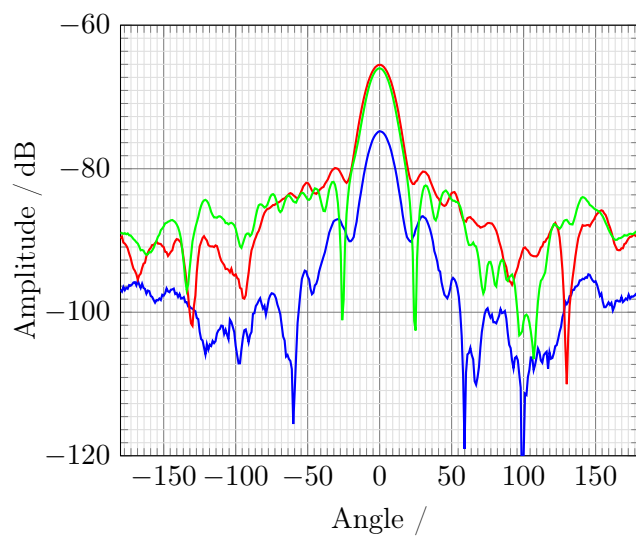
### 4.1 3D tisk

### 4.2 Pokovení

### 4.3 Měření parametrů



Obrázek 4-1: Řez vyzařovací charakteristiky v E rovině



Obrázek 4-2: Řez vyzařovací charakteristiky v H rovině

Kapitola 5

Závěr



