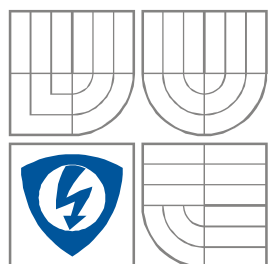


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# NÁVRH PLANÁRNÍCH ANTÉNNÍCH STRUKTUR Z METAMATERIÁLŮ

Design of planar antenna structures from metamaterials

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

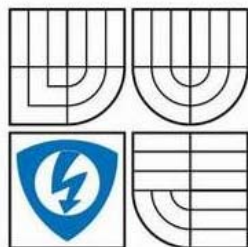
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PETR JAVORA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. ZBYNĚK RAIDA

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Petr Javora  
**Ročník:** 2

**ID:** 47130  
**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh planárních anténních struktur z metamateriálů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s podstatou metamateriálů a s jejich využitím v anténní technice. Základní principy fungování metamateriálů ověřte simulací ve vhodně zvoleném programu.

Pokuste se využít různých kombinací metamateriálů a konvenčních materiálů ke konstrukci antén, jejichž parametry v nějakém ohledu překonávají vlastnosti konvenčních antén.

Na základě získaných zkušeností navrhnete tři různé planární metamateriálové antény na stejném substrátu pro stejné pracovní kmitočtové pásmo 2,4 GHz. Antény vzájemně porovnejte, vybranou anténu realizujte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ZIOLKOWSKI, R.W., ERENOK, A. Metamaterial-based efficient electrically small antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006, vol. 54, no. 7, p. 2113-2130.

[2] ALU, A., BILOTTI, F., ENGHETA, N. Subwavelength, compact, resonant patch antennas loaded with metamaterials. IEEE Transactions on Antennas and propagation. 2007, vol. 55, no. 1, p. 13-25.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 29.5.2009

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Petr Javora  
Bytem: Školní 7, Břeclav, 69003  
Narozen/a (datum a místo): 29. září 1982 ve Znojmě

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
  - ☒ diplomová práce
  - ☐ bakalářská práce
  - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh planárních anténních struktur z metamateriálů

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. května 2009

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ABSTRAKT**

V této práci jsou studovány základní principy metamateriálů, které vykazují v mikrovlnné technice nezvyklé vlastnosti jako je záporná permitivita či permeabilita. Jsou zde popsány typy a vlastnosti antén tvořených metamateriály.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Metamateriál, drátové médium, rezonátor z přerušených kroužků, houbová struktura, anténa s povrchovou vlnou, kompaktní anténa, rezonanční antény nultého řádu.

## **ABSTRAKT**

The thesis deals with basic principles of metamaterials, which exhibit unusual properties in microwave applications (e.g., negative permittivity and permeability). Different type of metamaterial antennas and parameters of such antennas are described in the thesis.

## **KEYWORDS**

Metamaterial, wire medium, split ring resonator, mushroom structure, leaky-wave antenna, compact antenna, Zeroth-Order Resonator Antenna

JAVORA, P. *Návrh planárních anténních struktur z metamateriálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009. 40 s., 2 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Návrh planárních anténních struktur z meta-materiálů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně-právních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....  
(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....  
(podpis autora)

## Obsah:

|                                                  |             |
|--------------------------------------------------|-------------|
| <b>Seznam obrázků .....</b>                      | <b>viii</b> |
| <b>Seznam tabulek .....</b>                      | <b>x</b>    |
| <b>1 Úvod .....</b>                              | <b>1</b>    |
| 1.1 Cíl práce .....                              | 1           |
| <b>2 Teorie metamateriálů .....</b>              | <b>2</b>    |
| 2.1 Metamateriály.....                           | 2           |
| 2.2 Prostředí se zápornou permitivitou .....     | 3           |
| 2.3 Prostředí se zápornou permeabilitou .....    | 4           |
| <b>3 Metamateriálové antény .....</b>            | <b>6</b>    |
| 3.1 Hříbková struktura.....                      | 6           |
| 3.2 Anténa s vytékající vlnou .....              | 7           |
| 3.3 Rezonanční anténa nultého řádu .....         | 8           |
| <b>4 Návrh antén .....</b>                       | <b>9</b>    |
| 4.1 Hříbková anténa .....                        | 9           |
| 4.2 Anténa s vytékající vlnou .....              | 14          |
| 4.3 Rezonanční anténa nultého řádu .....         | 20          |
| <b>5. Výsledky měření .....</b>                  | <b>25</b>   |
| <b>6. Závěr .....</b>                            | <b>31</b>   |
| <b>7. Literatura .....</b>                       | <b>32</b>   |
| <b>8. Seznam symbolů, veličin a zkratk .....</b> | <b>34</b>   |

## Seznam obrázků

|                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 2.1 Možné uspořádání parametrů $\varepsilon$ , $\mu$ a s ním související index lomu prostředí.....                                                                       | 2  |
| Obr. 2.2 Záporný index lomu na rozhraní klasického a levotočivého materiálu. ....                                                                                             | 3  |
| Obr. 2.3 Drátkové médium: záporná permitivita a kladná permeabilita pro $E  z$ .....                                                                                          | 4  |
| Obr. 2.4 Ukázka varianty šterbinového rezonátoru SRR .....                                                                                                                    | 5  |
| Obr. 3.1 Základní model hříbkové struktury    Obr. 3. 2 Ukázka možné realizace .....                                                                                          | 6  |
| Obr. 3.3 Disperzní diagram základní struktury .....                                                                                                                           | 7  |
| Obr. 3.4 Znázornění vyzáření výkonu anténou a fázové principy. Převzato z [10].....                                                                                           | 8  |
| Obr. 3.5 Ideální levotočivé přenosové vedení tvořené sériovými kapacitami ( $C_L$ ) a paralelními indukčnostmi ( $L_L$ ). ....                                                | 8  |
| Obr. 3.6 Výsledný obvod simulující pravo-/levo-ruké části a jeho výsledná fázová funkce.....                                                                                  | 8  |
| Obr. 3.7 Obvod realizující základní buňku struktury .....                                                                                                                     | 9  |
| Obr. 4.1 Náhradní schéma hříbkové antény.....                                                                                                                                 | 9  |
| Obr. 4.2 Rozměry jednotlivých plošek.....                                                                                                                                     | 11 |
| Obr. 4.3 Ukázka návrhového modulu programu Ansoft Designer – mikropáskové vedení ....                                                                                         | 11 |
| Obr. 4.4 Náhled na výslednou strukturu z programu CST .....                                                                                                                   | 12 |
| Obr. 4.5 Kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu simulované antény. Rezonanční kmitočet $f_0$ je 2,4 GHz. ....                                                            | 12 |
| Obr. 4.6 Směrová charakteristika simulované hříbkové antény v rovině H na kmitočtu $f_0$ ...                                                                                  | 13 |
| Obr. 4.7 Směrová charakteristika simulované hříbkové antény v rovině H na kmitočtu $f_{-1}$ ...                                                                               | 13 |
| Obr. 4.8 Ukázka vyzářovacích diagramů z programu CST 2 GHz (vlevo), 2,4 GHz (vpravo)14                                                                                        |    |
| Obr. 4.9 Uspořádání a rozměry elementární buňky antény s vytékající vlnou. ....                                                                                               | 16 |
| Obr. 4.10 Celkové rozměry antény s vytékající vlnou (10 elementárních buněk). Pro simulaci doplněno o impedanční přizpůsobení a napájecí port. ....                           | 16 |
| Obr. 4. 11 Výsledný model antény s vytékající vlnou (10 elementárních buněk) na substrátu o výšce 1,54 mm přizpůsobený na 50 $\Omega$ . ....                                  | 16 |
| Obr. 4.12 Připojení SMA konektoru a 50 $\Omega$ přizpůsobení antény s vytékající vlnou.....                                                                                   | 17 |
| Obr. 4.13 Kmitočtový průběh činitele přenosu a odrazu na vstupu antény s vytékající vlnou. V požadovaném pásmu vykazuje anténa dvě rezonanční minima, 1,94GHz, 2,42 GHz. .... | 17 |
| Obr. 4.14 Zobrazení rozložení povrchových proudů při kmitočtu 2,445GHz .....                                                                                                  | 18 |
| Obr. 4.15 Vyzářovací charakteristika antény s vytékající vlnou na frekvencích 1,94 GHz (nahore), 2,4 GHz (uprostřed) a 2,98 GHz (pravoruký mód) (dole). ....                  | 19 |
| Obr. 4.16 Směrová charakteristika antény s vytékající vlnou v rovině H na frekvenci 2,4 GHz (nahore) a 2,95 GHz (dole).....                                                   | 20 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 4.17 Disperzní diagram .....                                                                                                                   | 20 |
| Obr. 4.18 Elementární buňka s vyznačenými hlavními mírami .....                                                                                     | 21 |
| Obr. 4.19 Ukázka uspořádání antény s 9 základními buňkami .....                                                                                     | 22 |
| Obr. 4.20 Parametr $S_{11}$ , -15dB odpovídá kmitočtu 2,42 GHz .....                                                                                | 22 |
| Obr. 4.21 3D zobrazení vyzařovací charakteristiky na 2,42GHz .....                                                                                  | 23 |
| Obr. 4.22 Směrová charakteristika vlevo pro příčnou rovinu, vpravo podélná .....                                                                    | 23 |
| Obr. 4.23 Ukázka antény před ořezáním na finální rozměry .....                                                                                      | 24 |
| <br>Obr. 5.1 Ukázka dvou realizovaných antén. 2 – ZOR anténa, 4 – hříbková anténa .....                                                             | 25 |
| Obr. 5. 2 Praktické měření – pokusná anténa s 2 buňkami .....                                                                                       | 26 |
| Obr. 5. 3 Ukázka uchycení antény v měřicí komoře pro rovinu v ose z .....                                                                           | 26 |
| Obr. 5. 4 Anténa 1 - Hříbková struktura - Praktické měření .....                                                                                    | 27 |
| Obr. 5. 5 Měřené parametry vektorovým analyzátozem u antény č.2 doplněné o simulaci antény s nepřesnými rozměry (-0,03 mm z „prstů“ struktury)..... | 28 |
| Obr. 5.6 Toleranční analýza výroby, požadovaný průběh(červeně), tolerance -0,03 mm (modře), tolerance +0,03 mm (zeleně) .....                       | 28 |
| Obr. 5.7 Anténa 2 - porovnání měřené a simulované vyzařovací charakteristiky, kmitočet 2,4 GHz, vertikální rovina .....                             | 29 |
| Obr. 5.8 Naměřené směrové charakteristiky na 2,4GHz pro vertikální (nahore) a horizontální (dole) rovinu .....                                      | 30 |

## Seznam tabulek

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 Rozměry a parametry hříbkové antény..... | 10 |
| Tabulka 2 Rozměry a parametry základní buňky.....  | 15 |
| Tabulka 3 Rozměry a parametry základní buňky.....  | 21 |

# 1 Úvod

Metamateriály jsou uměle vyrobené elektromagnetické struktury, které se běžně v přírodě nevyskytují. První se těmito materiály zabýval ruský fyzik Veselago již v roce 1968. Ve své práci předpokládal existenci metamateriálů a předvídal jejich jedinečné elektromagnetické vlastnosti, jako jsou záporná permitivita, permeabilita [1], záporný index lomu atd.

Praktické realizace se metamateriály dočkaly až v roce 1999, kdy John Pendry zrealizoval materiál se zápornou permitivitou a permeabilitou. V současné době nabývají metamateriály velkého významu v oblasti mikrovlnné techniky. Využívá se interakce mikrovlnné části spektra s periodickými strukturami. Tyto struktury lze využít například k vytvoření filtrů s ostrými hranami [2], zvýšení zisku planárních antén [3], realizaci směrových antén [4], vlnovodů [5], vysoko-impedančních zemních desek [6], dutinových rezonátorů s malými rozměry či prostředí se záporným efektivním indexem lomu [7], [8].

## 1.1 Cíl práce

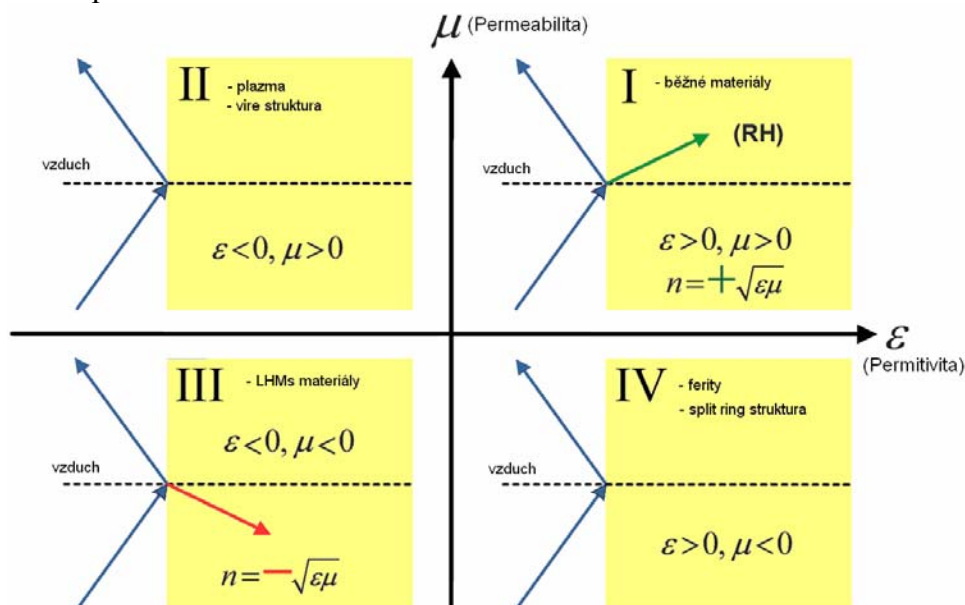
Práce je zaměřena na problematiku metamateriálů. V první části je popsána teorie a základní vlastnosti metamateriálů. Je popsáno použití metamateriálů v anténní technice a jejich různá funkční zapojení. Cílem práce bylo navrhnout tři antény s metamateriálem na frekvenci 2,4 GHz, vzájemně je porovnat, nejvýhodnější zapojení prakticky realizovat a ověřit jeho funkci. Kromě pracovní frekvence bylo dále sledováno impedanční přizpůsobení, vyzařovací charakteristiky, zisk a možnost realizace běžně dostupnými výrobními technologiemi.

## 2 Teorie metamateriálů

### 2.1 Metamateriály

Běžně se setkáváme s materiály, které mají permitivitu  $\epsilon$  i permeabilitu  $\mu$  kladné. Jsou-li jedna případně obě veličiny záporné (viz obr. 1.1), materiály vykazují nezvyklé vlastnosti, a to hlavně z hlediska vedení, vyzařování a rozptylu elektromagnetických vln. Problémem je, že materiály s těmito vlastnostmi nedokážeme jednoduše vyrobit (využíváme toho, že při vhodné vlnové délce vlny částečně reagují na malé vodivé elementy obsažené v materiálu). Výsledné prostředí se pak vlně jeví jako homogenní s námi požadovanými parametry. Metamateriál je tedy složen z umělých částic, které jsou vhodně navrženy tak, aby materiál vykazoval požadované vlastnosti.

Materiály s parametry popsány na obr. 1.1 v sektorech I, II, IV jsou známe a existují v přírodě. Materiál popsáný s sektoru III ( $\epsilon_r < 0$ ,  $\mu_r < 0$ ) vykazuje záporný index lomu. Materiály se záporným indexem lomu se označují jako levotočivé materiály (*left-handed*, LH) podle levotočivé ortogonální soustavy, jež popisuje vzájemné uspořádání vektorů elektrického a magnetického pole.



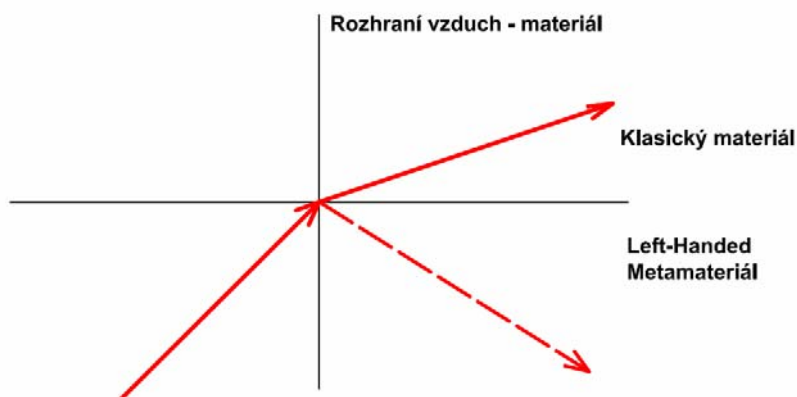
Obr. 2.1 Možné uspořádání parametrů  $\epsilon$ ,  $\mu$  a s ním související index lomu prostředí.

Velmi zajímavý je rozbor situace z ohledem na index lomu prostředí. Ten je totiž záporný. Takové prostředí prakticky zkonstruoval David R. Smith v roce 2000 kombinací pole drátků (se zápornou permitivitou) viz. kapitola 2.2 a pole šterbinových rezonátorů (se zápornou permeabilitou) viz kapitola 2.3, rezonujících na stejné frekvenci. Jsou-li např. permitivita a permeabilita rovny  $-1$ , můžeme psát:

$$\epsilon = e^{i\pi}; \mu = e^{i\pi} \Rightarrow n = \sqrt{\epsilon \cdot \mu} = e^{i\pi/2} \cdot e^{i\pi/2} = -1 \quad (2.6)$$

V případě oddělených polí elektrických a magnetických rezonátorů je elektromagnetická vlna pohlcována, v případě jejich vzájemné kombinace se v oblasti záporného indexu lomu objeví propustné okno a vlna prostředím se záporným indexem lomu prochází. Tato požadovaná odezva je docílena jen v omezeném frekvenčním pásmu v blízkosti rezonance vložených

prvků. Výsledný materiál je tudíž silně disperzní (závislý na frekvenci) a značně ztrátový, díky použití pasivních prvků.



Obr. 2.2 Záporný index lomu na rozhraní klasického a levotočivého materiálu.

Materiál se záporným indexem lomu je levotočivý (LH): směr přenosu energie (skupinová rychlost) má opačnou orientaci než fázová rychlost. Vlna se na rovinném prostředí s LH materiálem láme na opačnou stranu od kolmice než v běžném materiálu. Pomocí LH materiálu lze zkonstruovat tzv. Veselagovu čočku (rovinná deska fungující jako spojná čočka; rozlišovací schopnost není závislá na vlnové délce [9]). V teoretické části je dále naznačena možnost realizace takového prostředí na rádiových kmitočtech.

## 2.2 Prostředí se zápornou permitivitou

Prostředí se zápornou permitivitou (vektory elektrické indukce **D** a elektrické intenzity **E** míří opačnými směry) je známo ve fyzice plazmatu již dlouho. Uměle ho lze vytvořit například pomocí periodické struktury tvořené tenkými kovovými drátky (tzv. drátové médium, *wire medium*). Základní uspořádání je znázorněno na obr. 2.3.

Pokud na periodickou strukturu dopadá elektromagnetická vlna, dochází k mnohonásobným odrazům a interferencím mezi dopadající a odraženými vlnami. Důsledkem je vznik propustných pásem (energie strukturou prochází) a zádržných pásem (energie se od struktury odráží) ve frekvenčním spektru. Tyto jevy se uplatňují, je-li vlnová délka srovnatelná s periodou struktury. Odlišné jevy nastávají, pokud je vlnová délka mnohem větší než perioda struktury.

Permitivita je dána vztahem [2.1]:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (2.1)$$

ve kterém je

$$\omega_p = \sqrt{2\pi c^2 / [d^2] \ln(d/r)},$$

$c$  je rychlost světla,  $r$  je poloměr drátků,  $\gamma$  značí útlum

$$\gamma = \varepsilon_0 (d \cdot \omega_p / r)^2 / \pi \cdot \sigma,$$

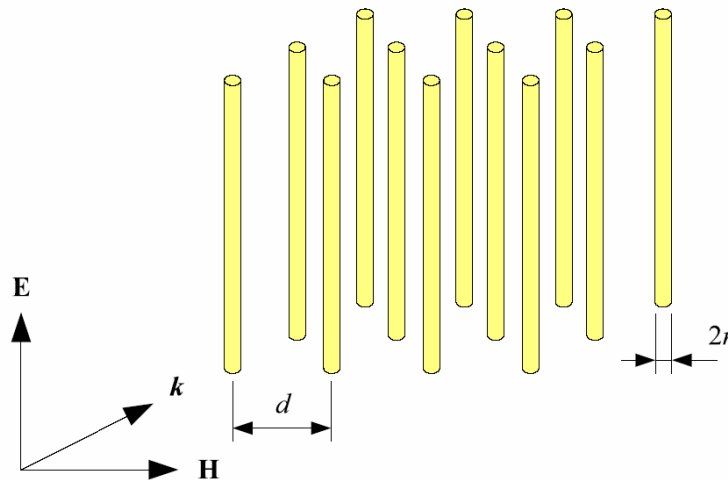
$\omega$  je frekvence dopadající elektromagnetické vlny,  $\sigma$  vodivost drátků,  $d$  je perioda rozmístění drátků v prostoru. Ze vztahu je zřejmé, že permitivita má v okolí rezonance jak reálnou, tak imaginární část. Reálná část je pro určitou frekvenční oblast záporná. Dopadající elektromagnetická vlna bude v oblasti rezonance absorbována a nebude prostředím procházet [10].

Pro rovinnou vlnu platí:

$$\operatorname{Re}(\varepsilon_r) < 0 \quad \text{pro } \omega^2 < \omega_p^2 - \gamma^2. \quad (2.2)$$

Pro  $\gamma = 0$  dostáváme

$$\varepsilon_r < 0 \quad \text{pro } \omega < \omega_p. \quad (2.3)$$



Obr. 2.3 Drátkové médium: záporná permitivita a kladná permeabilita pro  $E \parallel z$ .

Periodické struktury bývají realizovány dielektrickými nebo vodivými objekty periodicky vloženými do prostředí. Délka vodičů bývá mnohem delší než délka vlny (teoreticky by měla být nekonečná). Popsaná struktura vykazuje silnou anizotropii a komplikovanou realizaci. Jedním z možných řešení je použití elektricky krátkých dipólů zatížených indukčnostmi, které je možné snadno vyrábět planární technologií.

## 2.3 Prostředí se zápornou permeabilitou

První návrh prostředí se zápornou permeabilitou pochází od Johna Pendryho z roku 1999. prostředí je složeno z periodicky se opakujících šterbinových rezonátorů (SRR; viz obr. 2.3). Jde o dva vodivé kroužky (je možná i čtvercová realizace), z nichž menší je umístěn souměrně ve větším. Každý z nich má šterbinu vytvořenou na opačné straně. Tyto kroužky jsou kapacitně i indukčně vázány. Elektromagnetická vlna dopadající kolmo na rezonátor v něm při rezonanci vybudí proud s jedním maximem tekoucím podél kroužků. Rezonátor se chová jako magnetický dipól s intenzivní odezvou na elektromagnetickou vlnu. Samozřejmě jsou možné i rezonance na vyšších frekvencích s větším počtem maxim proudů. Na opačných stranách každé šterbiny se hromadí opačné elektrické náboje [10]. Náhradní elektrické schéma je naznačeno na obr. 2.4

Permeabilita soustavy šterbinových rezonátorů je v okolí rezonance dána vztahem [2.4]:

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma\omega}, \quad (2.4)$$

kde

$$F = \pi(a/p)^2,$$

$a$  je poloměr menšího rezonátoru,

$$\omega_0 = c\sqrt{3p/\pi \ln(2wa^3/d)},$$

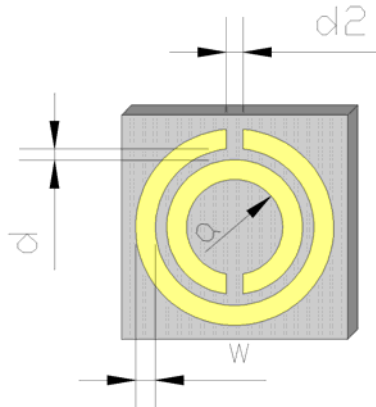
$w$  je velikost rezonátoru,  $d$  je velikost mezery mezi rezonátory,

$$\gamma = 2p.R'/a\mu_0$$

a  $R'$  je jednotkový odpor. Podle [2.5] platí:

$$\mu_r < 0 \text{ pro } \omega_{0m} < \omega < \frac{\omega_{0m}}{\sqrt{1-F}} = \omega_{pm} \quad (2.5)$$

kde  $\omega_{pm}$  je magnetická plazmová frekvence. Pro prstence s průměrem 3 mm se  $\omega_0$  nachází v oblasti 2 až 10 GHz v závislosti na parametrech struktury.



Obr. 2.4 Ukázka varianty šterbinového rezonátoru SRR

Rezonanční frekvence základního obvodu SRR podle obr. 2.4 je  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ .

Pomocí výše nastíněných obvodů je možné zhotovit metamateriál. Díky požadavku na současně zápornou hodnotu permeability i permitivity je realizace výsledné struktury komplikovanější. Díky existenci zádržných pásem a velkým ztrátám není toto zapojení vhodné pro praktické použití. V dalších částech jsou studovány pokročilejší principy realizace metamateriálů.

### 3 Metamateriálové antény

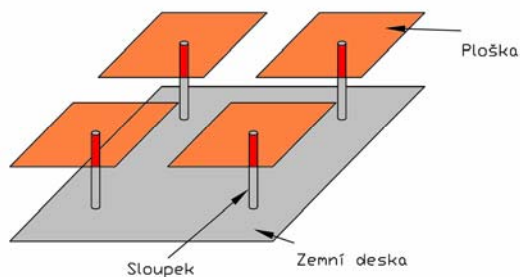
Díky použití metamateriálů je možné konstruovat antény malých rozměrů s dobrými směrovými charakteristikami. Základní možností realizace takové antény je použití klasické antény jako zářiče překrytého metamateriálem [11]. Toto uspořádání je funkční a experimentálně ověřené, ale pro svou fyzickou velikost a nepříliš dobré parametry není v praxi používáno. V současné době díky intenzivnímu zkoumání těchto materiálů vzniká mnoho možných zapojení, perspektivní jsou rovinné mikropáskové antény se zvětšenou účinností vyzařování a omezeným vybuzením povrchové vlny. Svou pozornost soustředíme na tyto planární antény, a to konkrétně na antény s vytékající vlnou, rezonanční antény nultého řádu a antény z tzv. hříbkových struktur.

Základní parametry, které budou sledovány jsou kmitočet, směrový diagram a vstupní impedance. Ostatní parametry antén jsou s těmito provázané a jsou to: směrovost, zisk, polarizace, přizpůsobení atd. Požadavkem je vzájemně porovnat antény pracující na kmitočtu 2,4 GHz. Toto pásmo je možné využít v bezdrátové komunikaci. V současné době jsou asi nejrozšířenější aplikace WiFi (bezdrátová síť využívající standard 802.11a, b, g). Použité kmitočtové pásmo je 2,4 – 2,483 GHz, maximální vysílaný výkon  $EIRP_{max} = 0,1$  W. Antény se běžně používají směrové, sektorové případně všesměrové. Koncept patchových antén, které jsou dále řešeny, je koncipován jako sektorové, případně všesměrové antény s malým ziskem ( $G = 3 - 8\text{dBi}$ ).

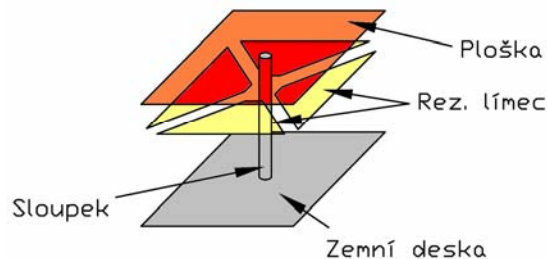
#### 3.1 Hříbková struktura

Pomocí hříbkové struktury lze realizovat dvojrozměrné pravo-/levo-točivé přenosové vedení. Poprvé toto zapojení prezentoval Sievenpieper [12] jako možnost realizace vysoko-impedančního povrchu.

Základní náčrt hříbkové struktury je znázorněn na obr. 3.1. Jedná se o nejjednodušší tzv. otevřenou variantu. Jak je vidět na obr. 3.2, vylepšením základního modelu je např. varianta doplněná o rozdělený rezonanční límec vytvořený kolem propojovacího sloupku mezi spodní zemní deskou a vrchní ploškou. V těchto zjednodušených nákresech to není znázorněno, ale tato vodivá kovová struktura je vytvořena na nosném substrátu.



Obr. 3.1 Základní model hříbkové struktury



Obr. 3. 2 Ukázka možné realizace

Základní hříbková struktura (obr. 3.1) byla použita jako vysoko-impedanční zemní rovina. Využívala se její zádržná pásma pro potlačení nežádoucích vln v planárních anténách. V [13] je ukázáno použití hříbkové struktury pro ověření pozitivního/negativního indexu lomu. Tohoto principu lze využít pro konstrukci tzv. antény se zpětnou vlnou [14]. Konkrétní návrhový postup je uveden v kapitole 4.1. Jednotlivé parametry vedení dle obrázku 4.1 jsou tvořeny: kapacita  $C_L$  – soustředěna v mezerách mezi ploškami, kapacita  $C_R$  – objemem substrátu mezi vrchními ploškami a zemní deskou, indukčnost  $L_L$  – je vázána s propojovacím sloupkem a  $L_R$  – je parazitní vazba plošky.

### 3.2 Anténa s vytékající vlnou

Princip činnosti spolu se základním fázovým popisem jsou znázorněny na obr. 3.4. K vyzařování energie pomocí vytékající vlny je nutno vytvořit otevřenou strukturu, nad kterou je volný prostor. Amplituda vidů vytékající vlny roste ve směru kolmém k substrátu (v ose  $y$ , viz obr. 3.4). Prostorová vytékající vlna je vybudena, jestliže je splněna fázová podmínka [3.1]

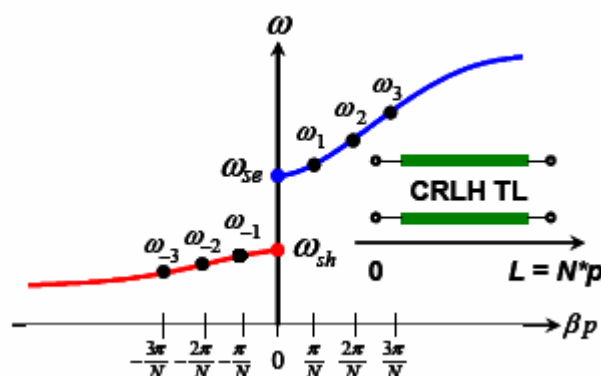
$$\text{Re}(\gamma_z) \leq k_0, \quad (3.1)$$

kde  $k_0$  značí fázovou konstantu a  $\gamma_z$  značí konstantu šíření

Hodnota úhlu, pod kterým vlna vytéká, se dá určit podle vztahu [3.2]

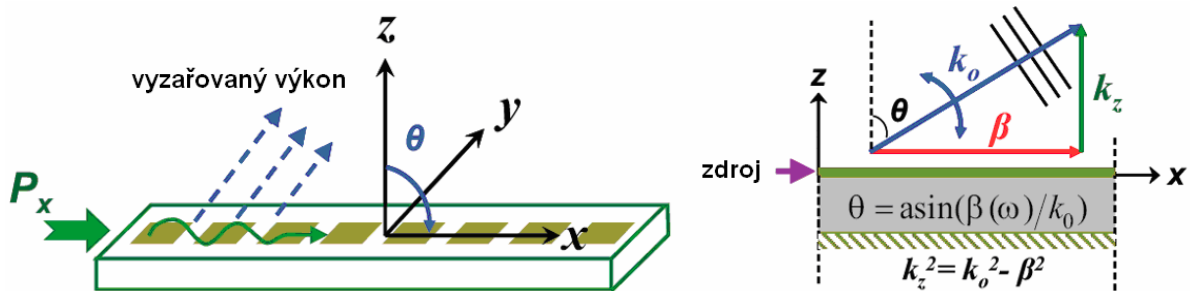
$$\theta = \arccos\left(\frac{\text{Re}(\gamma_z)}{k_0}\right). \quad (3.2)$$

Anténa s vytékající vlnou je vytvořená pomocí pravidel pro přenosové vedení. Základem je zapojení dvojbranů vytvářejících nerezonanční obvody tvořené indukčnostmi a kapacitami.

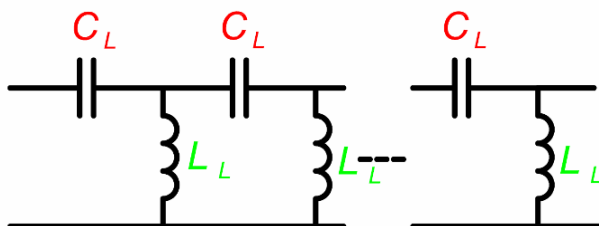


Obr. 3.3 Disperzní diagram základní struktury

Na obr. 3.5 je znázorněno ideální levotočivé přenosové vedení, které je realizováno pouze pomocí sériových kapacit ( $C_L$ ) a paralelních indukčností ( $L_L$ ). Toto ideální LH přenosové vedení by bylo rezonančně nezávislé, mělo by nízké ztráty a bylo by širokopásmové. Vedení ale nelze realizovat kvůli nevyhnutelným fyzikálním omezením způsobeným parazitními pravotočivými (RH) obvodovými prvky.



Obr. 3.4 Znáznornění vyzáření výkonu anténou a fázové principy. Převzato z [10].



Obr. 3.5 Ideální levotočivé přenosové vedení tvořené sériovými kapacitami ( $C_L$ ) a paralelními indukčnostmi ( $L_L$ ).

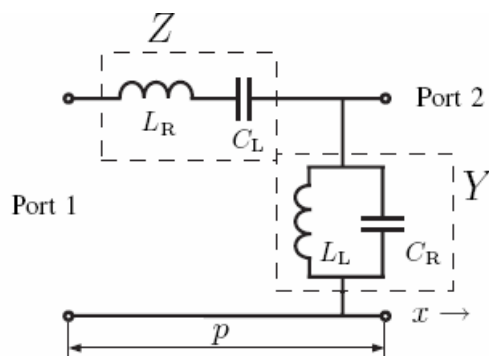
Proto se počítá se složitějšími modely, které zahrnují i parazitní obvodové prvky. Výsledné kompozitní zapojení je znázorněno na obr. 3.9.



Obr. 3.6 Výsledný obvod simulující pravo-/levo-ruké části a jeho výsledná fázová funkce.

### 3.3 Rezonanční anténa nultého řádu

Velikost rezonanční antény nultého řádu (zkratka ZOR, *Zero Order Resonator Antenna*) může být menší než polovina vlnové délky. Délka vlny je zde ovlivněna interakcemi s elementární buňkou. V porovnání s klasickými flíčkovými anténami dochází k významné redukci velikosti. Samotná anténa je tvořena interdigitálními kapacitami a kapacitními meandry připojenými k čtvercovým ploškám. Tyto plošky vytvářejí virtuální zemní desku. Bližší postup návrhu pomocí přenosového vedení je v kapitole 4.3



Obr. 3.7 Obvod realizující základní buňku struktury

Charakteristická impedace  $Z$  a konstanta šíření  $\gamma$  jsou definovány jako

$$Z_0 = \left( \frac{Z_s}{Y_p} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

$$\gamma = (Z_s \cdot Y_p)^{1/2} \quad (3.4)$$

Kde  $Z_s$  je sériová impedance a  $Y_p$  je paralelní admitance. Hodnoty obvodových prvků se udávají na jednotku délky vedení. V případě bezeztrátového vedení je konstanta šíření dána vztahem

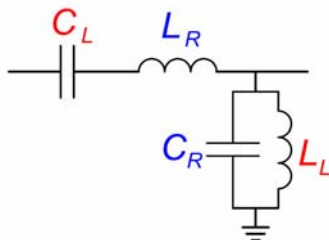
$$\gamma = (Z_s \cdot Y_p)^{1/2} = j \cdot 2\pi \cdot f \cdot (L \cdot C)^{1/2} \quad (3.5)$$

kde kromě obvodových prvků  $L$ ,  $C$  je frekvence  $f$ .

## 4 Návrh antén

### 4.1 Hříbková anténa

Tato anténa vychází z návrhu podle [12], [14]. Jedná se o upravenou tzv. hříbkovou strukturu, tato anténa pracuje ve dvou módech. Anténa je navržena a optimalizována pro rezonanci na frekvenci  $f_0 = 2,42$  GHz,  $f_{+1} = 2,67$  GHz a  $f_{-1} = 2,25$  GHz. Je navržena na substrátu ARLON 25N ( $\epsilon_r = 3,38$ , s tloušťkou  $h = 1,54$  mm). Základní substrát je ze spodní strany pokoven (zemní rovina), sloupky mají průměr 0,5 mm. Na obr. 4.1 je náhradní elektrický model jedno rozměrného CRLH metamateriálu.



Obr. 4.1 Náhradní schéma hříbkové antény.

Při návrhu bylo počítáno s parametry pro rezonanci antény na kmitočtu 2,8 GHz. Následně díky numerickým optimalizacím a ladění parametrů v programu CST Microwave studio došlo k úpravě parametrů tak, aby bylo splněno zadání. Jednalo se hlavně o pracovní kmitočet 2,4 GHz, šířku pásma alespoň 8 MHz, impedanční přizpůsobení na 50 Ω. Napájení antény je řešeno mikropáskem. V tabulce 2 jsou počáteční i finální hodnoty. Při návrhu bylo nutné zohlednit některá omezení jako je šířka izolační mezery nejméně 0,2 mm, dále průměr sloupků, výrobní tolerance atd. Hodnoty obvodových prvků je možné přibližně spočítat podle

$$C_R \approx \varepsilon_r \varepsilon_o \frac{t^2}{h} \text{ [F]} , \quad (4.1)$$

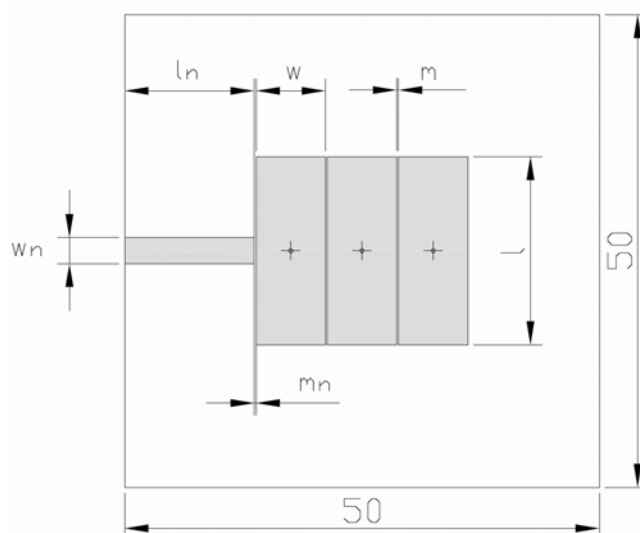
$$L_L \approx 0,2 h \left[ \ln \left( \frac{2h}{r} \right) - 0,75 \right] \text{ [H]} , \quad (4.2)$$

kde  $\varepsilon_o$  značí permitivitu vakua ( $8,85418 \cdot 10^{-12}$ ),  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita,  $t$  představuje tloušťku pokovení,  $h$  výšku substrátu a  $r$  poloměr sloupků.

Při znalosti těchto obvodových prvků (sériové kapacita a paralelní indukčnost) dokážeme dopočítat paralelní rezonanci.

| Parametr               |                 | Počáteční parametry | Finální hodnota |
|------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Šířka pásku            | $w$             | 9,00 mm             | 7,30 mm         |
| Délka pásku            | $l$             | 35,00 mm            | 21,00 mm        |
| Mezera mezi pásky      | $m$             | 0,35 mm             | 0,30 mm         |
| Délka napájecího pásku | $l_n$           | 10,00 mm            | 11,20 mm        |
| Šířka napájecího pásku | $w_n$           | 5,00 mm             | 3,36 mm         |
| Mezera napájecí pásek  | $m_n$           | 0,3 mm              | 0,1 mm          |
| Poloměr sloupků        | $r$             | 0,12 mm             | 0,25 mm         |
| Výška substrátu        | $h$             | 1,54 mm             | 1,54 mm         |
| Permitivita substrátu  | $\varepsilon_r$ | 2,17                | 3,38            |

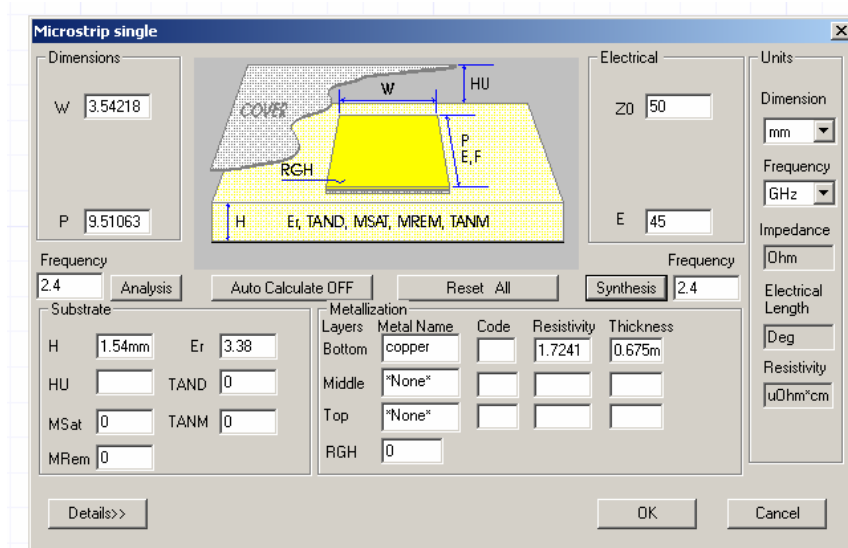
Tabulka 1 Rozměry a parametry hříbkové antény.



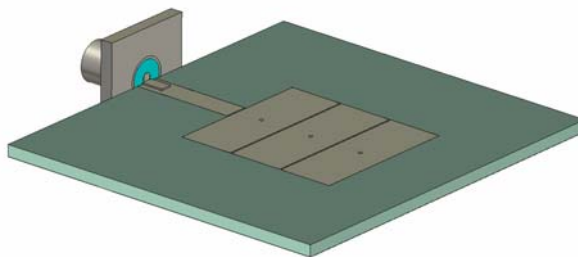
Obr. 4.2 Rozměry jednotlivých plošek.

Výsledná struktura má vstupní impedanci  $50,5 \Omega$ , rezonanční kmitočet  $f_0 = 2,4\text{GHz}$ ,  $f_{-1} = 2,2\text{GHz}$ ,  $f_{+1} = 2,65 \text{ GHz}$ . Jsou možné i varianty, kdy bude požadovaný kmitočet dosažen v nižším nebo vyšším rezonančním módu. Při simulaci v programu CST Microwave Studio, byl kladen velký důraz na správné nastavení parametrů časové a frekvenční analýzy, což je nezbytná podmínka pro dosažení odpovídajících výsledků. Velký význam má jak nastavení mřížky Mesh, tak zhuštění mřížky na hranách struktur. Dle doporučení výrobce byl použit pro simulaci antény s mikropáskovým napájením plošný napájecí port (Waveguide port) s rozměry  $h_{\text{port}} = 5 * h$ ,  $w_{\text{port}} = 6 - 10 * w$ . Při kterých nedochází k degradaci elektrického pole na rozhraní port-struktura.

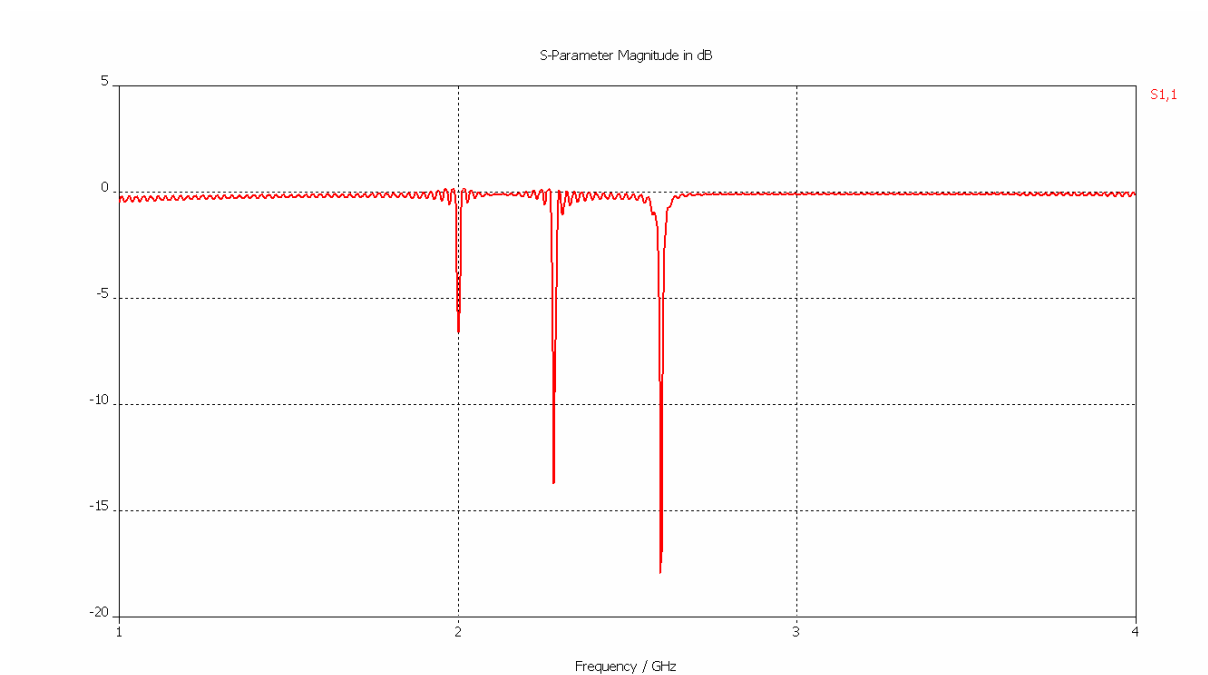
Jak už bylo zmíněno napájení antény bylo realizováno mikropáskovým vedením, při návrhu bylo počítáno s co nejlepším impedančním přizpůsobením. Bylo využito jednak numerické výpočty pro microstrip vedení, tak automatický návrh v prostředí programu Ansoft Designer. Pro připojení je počítáno s SMA konektorem, výsledné rozměry antény jsou  $50 \times 50 \text{ mm}$ .



Obr. 4.3 Ukázka návrhového modulu programu Ansoft Designer – mikropáskové vedení

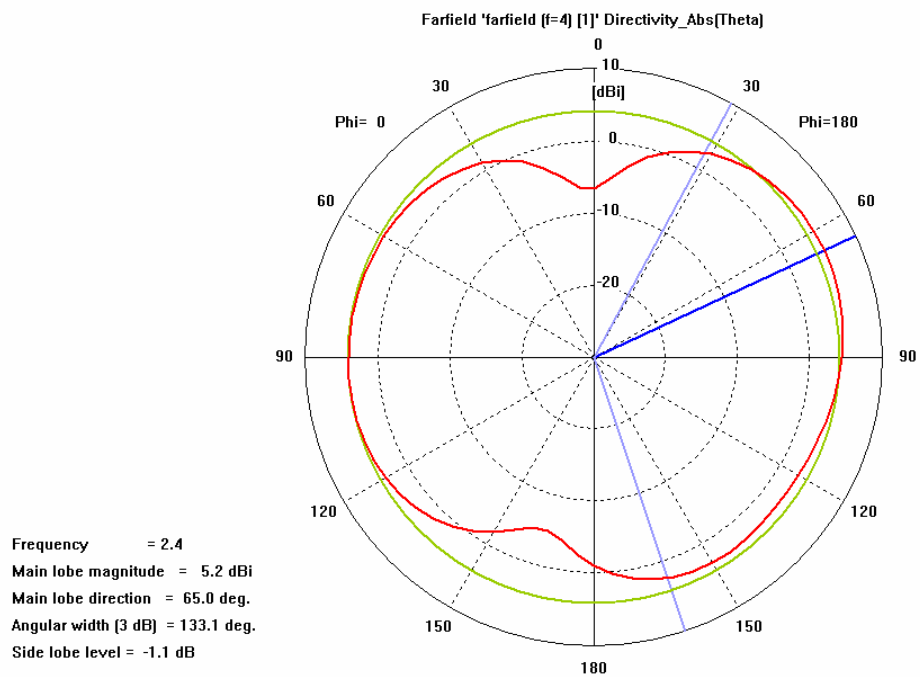


Obr. 4.4 Náhled na výslednou strukturu z programu CST.

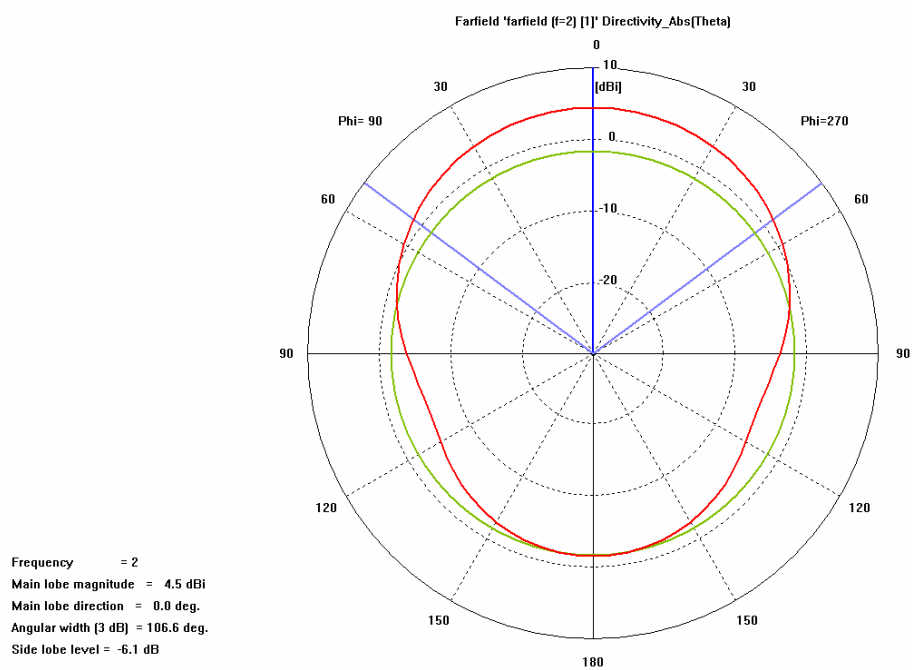


Obr. 4.5 Kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu simulované antény.  
Rezonanční kmitočet  $f_0$  je 2,4 GHz.

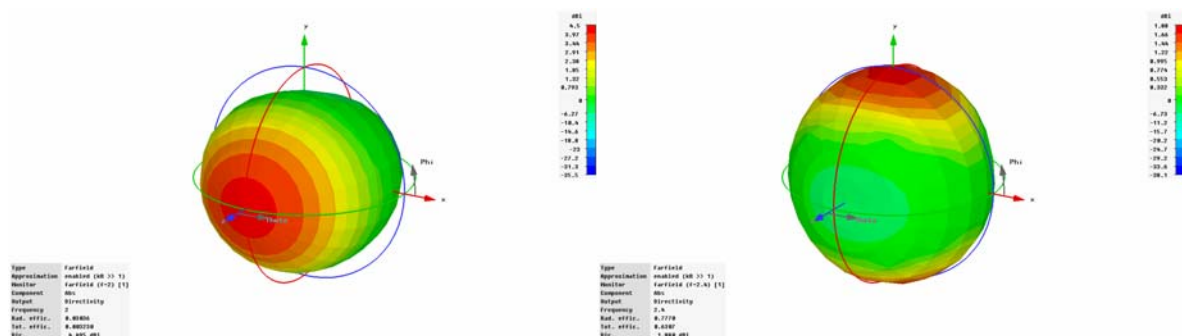
U tohoto modelu byl ověřován vliv rozdílu mezi teoretickým modelem se sloupky dosahujícími pouze na povrch substrátu a praktickou realizací, kdy sloupky výrazně přecházejí. Taktéž byl ověřen vliv zařazení co nejpřesnějšího modelu jednotlivých materiálů do simulace. Blíže jsou tyto vlivy popsány v poslední kapitole; jejich vliv je pozorovatelný, ale proti chybám vzniklým při výrobě se jedná o chyby zanedbatelné.



Obr. 4.6 Směrová charakteristika simulované hříbkové antény v rovině H na kmitočtu  $f_0$ .



Obr. 4.7 Směrová charakteristika simulované hříbkové antény v rovině H na kmitočtu  $f_{-1}$ .



Obr. 4.8 Ukázka vyzařovacích diagramů z programu CST  
2 GHz (vlevo), 2,4 GHz (vpravo)

Jak je vidět z kmitočtového průběhu činitele odrazu na vstupu  $S_{1,1}$ , je tato anténa impedančně přizpůsobena na frekvencích  $f_0 = 2,4$  GHz (požadovaný mód),  $f_{-1} = 2$  GHz a  $f_{+1} = 2,65$  GHz. Zisk antény je 5,587 dB na kmitočtu 2,4 GHz. Směrová charakteristika je nakreslena na obr. 4.6, 4.7 a 4.8. Jak lze vidět z vyzařovacích charakteristik, je při rezonancích směr hlavních vyzařovacích laloků vzájemně pootočený o  $90^\circ$ . Anténa byla navržena pro použití v komunikačních systémech (GSM/DCS). Výsledky plně odpovídají parametrům antény uváděným v literatuře [14].

## 4.2 Anténa s vytékající vlnou

Základní princip byl stručně popsán v teoretické části (kapitola 3.2). Nyní bude objasněn matematický popis návrhu, postup optimalizací, funkční požadavky a dosažené parametry. Struktura je tvořena interdigitálními kapacitami s kapacitou  $C_i$  [15]. Který tvoří sériovou kapacitu viz obrázek 3.5, 3.6. Kapacitu je možno určit podle [16]

$$C \approx \frac{l}{3}(n-1)(\epsilon_r + 1)\epsilon_0 \left[ \ln\left(1 + \frac{w}{s}\right) + \frac{3}{4} \right], \quad (4.3)$$

kde  $n$  značí počet prstů,  $w$  šířku jednoho prstu,  $s$  mezeru mezi prsty. Tento vztah platí s chybou menší než 5% za podmínek  $w/h = 0,01 \div 0,1$  a  $s/h = 0,01 \div 0,1$ .

Dále je pomocí uzemněného pásku tvořena paralelní indukce  $L_L$ , kterou lze vyjádřit přibližným vztahem [4.4]

$$L \approx \frac{Z_V}{\omega} \operatorname{tg} kl, \quad (4.4)$$

Tato struktura umožňuje vytvořit antény s vysokou směrovostí. Základní uspořádání je nakresleno na obr. 4.9 [15]. Interdigitální kapacitory jsou doplněny o paralelní kapacitory a další prvky. Tyto rezonátory jsou vytvořeny planární technologií na nosném substrátu.

Anténa je navržena na práci na frekvenci  $f = 2,4$  GHz. Přesněji pracuje v širokém rozsahu kmitočtů, zajímavá je ale oblast od 1,8 po 2,6 GHz, kdy anténa pracuje v LH módu. Nad tímto frekvenčním rozsahem je, pro pochopení funkce, zajímavé pásmo, kde anténa pracuje v klasickém RH módu. Je impedančně přizpůsobena na hodnotu  $Z_0 = 50 \Omega$ , napájena je mikropáskovým vedením. Celá anténa je vytvořena na substrátu Arlon ( $\epsilon_r = 3,38$  při 10GHz) s tloušťkou  $h = 1,54$  mm.

Při návrhu byly zvažovány dva různé počty rezonančních pásků  $N_1 = 8$  a  $N_2 = 10$ . Dále v textu je rozepsána varianta s počtem  $N_2 = 10$ , pro níž přibližně platí vztah [4.5]

$$w_p \approx \frac{w}{\frac{5N}{3} - \frac{2}{3}} \approx 0,35 \text{ mm}. \quad (4.5)$$

Mezery mezi pásky jsou široké

$$m \approx \frac{2w_c}{3} \approx 0,22 \text{ mm}. \quad (4.6)$$

Délku pásků lze přibližně odvodit podle vztahu

$$l_p \approx \frac{\lambda_g}{8} \approx \frac{c_0}{8f_0\sqrt{\varepsilon_r}} \approx 8,5 \text{ mm}. \quad (4.7)$$

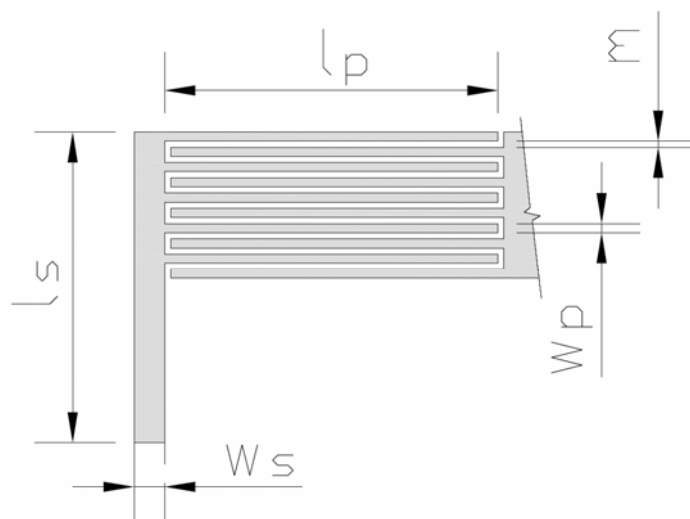
Ve výše uvedených vzorcích značí,  $l_c$  délku pásku,  $c_0$  rychlost světla ve vakuu,  $\varepsilon_r$  relativní permitivitu substrátu.

Z vypočtených výchozích hodnot bylo simulací a optimalizací dosaženo finálního návrhu (obr. 4.7) s uvedenými rozměry.

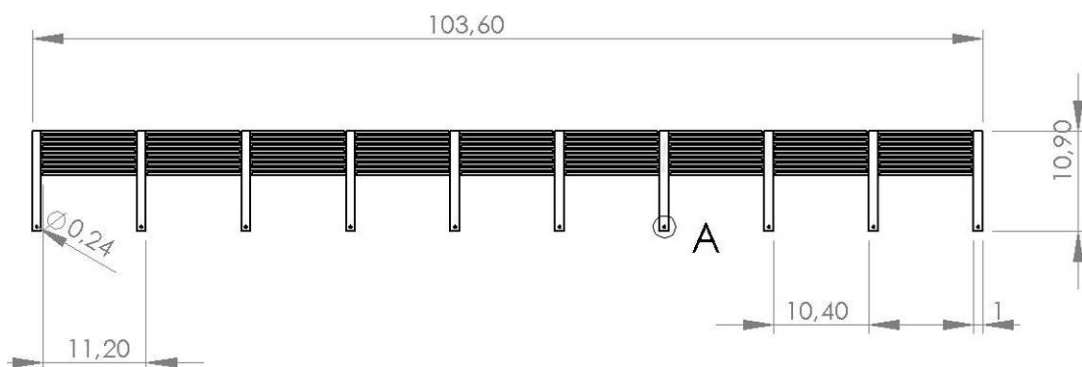
| Parametr              |                 | Finální hodnota |
|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Perioda z. buňky      | $p$             | 11,40 mm        |
| Délka sloupku         | $l_s$           | 10,20 mm        |
| Šířka sloupku         | $w_s$           | 1,00 mm         |
| Délka pásku           | $l_p$           | 10,20 mm        |
| Šířka pásku           | $w_p$           | 0,35 mm         |
| Mezera mezi pásky     | $m$             | 0,20 mm         |
| Poloměr prokovení     | $r$             | 0,12 mm         |
| Výška substrátu       | $h$             | 1,54 mm         |
| Permitivita substrátu | $\varepsilon_r$ | 3,38            |

Tabulka 2 Rozměry a parametry základní buňky

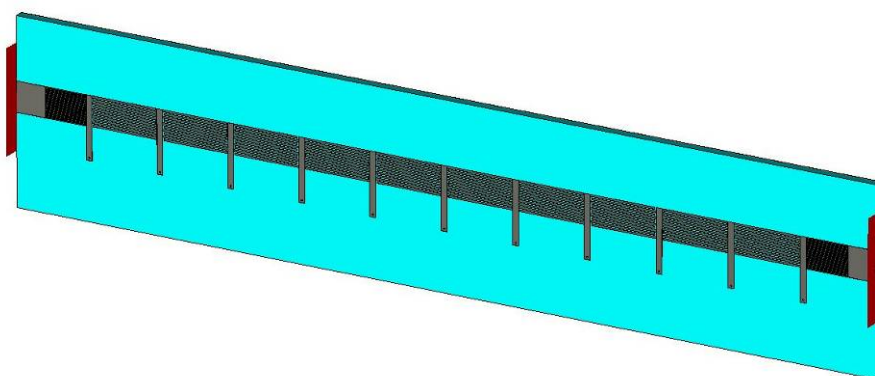
Pro popis základní buňky jsou uvedeny rozměry a parametry v tabulce 2. Perioda  $p$  udává prostorové opakování základní buňky. U antény byla provedena optimalizace na dosažení požadovaného frekvenčního průběhu. Vliv na výslednou charakteristiku má tloušťka pokovení substrátu, z dokumentace byla zjištěna že tento substrát je vyráběn v několika provedeních, tento substrát konkrétně by měl mít tloušťku měděné vrstvy 30 um, s kterou je dále počítáno. Základní obvodové prvky byly řešeny výpočetně, následovně ověřeny v programu Ansoft Designer a v programu CST Microwave Studio optimalizovány. S ohledem na požadavky výroby byla věnována pozornost i tolerancím a jejich vlivu na výsledný obvod viz. Kapitola 5 - hodnocení.



Obr. 4.9 Uspořádání a rozměry elementární buňky antény s vytékající vlnou.

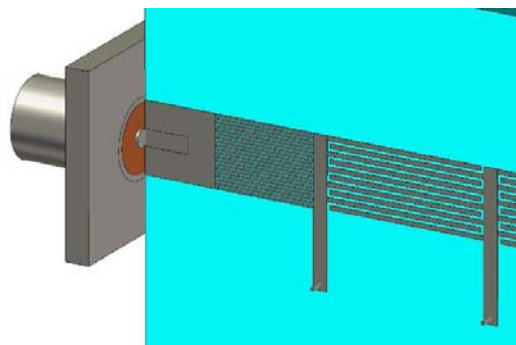


Obr. 4.10 Celkové rozměry antény s vytékající vlnou (10 elementárních buněk).  
Pro simulaci doplněno o impedanční přizpůsobení a napájecí port.

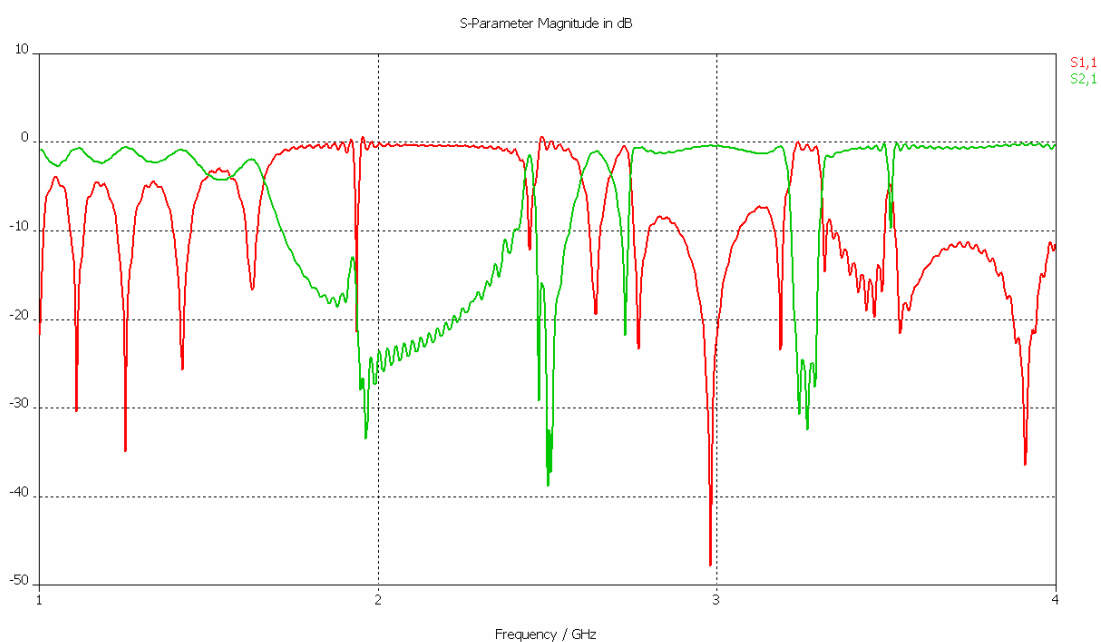


Obr. 4. 11 Výsledný model antény s vytékající vlnou (10 elementárních buněk)  
na substrátu o výšce 1,54 mm přizpůsobený na 50  $\Omega$ .

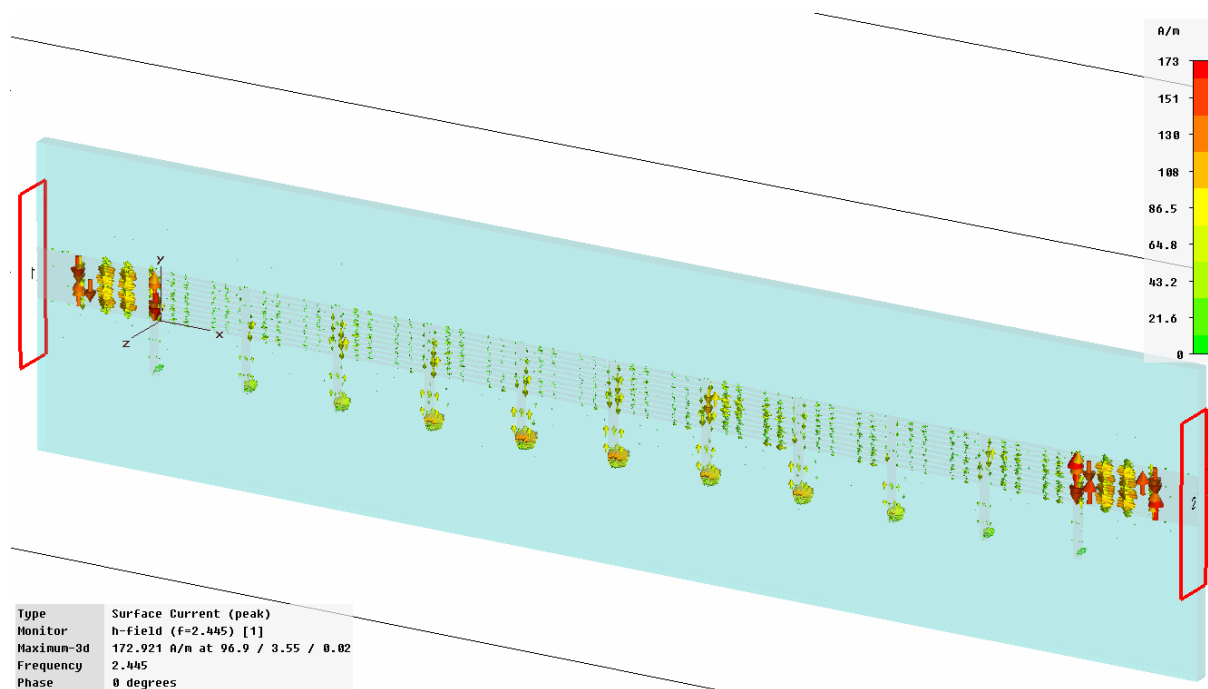
Navržená anténa má přizpůsobeny jednotlivé buňky k napájecí části s impedancí 50  $\Omega$ . Bylo je dosaženo mikropáskovým vedením o délce 5 mm. Anténa je navržena pro připojení dvěma porty. Díky symetrii to nemá na výsledné charakteristiky podstatný vliv.



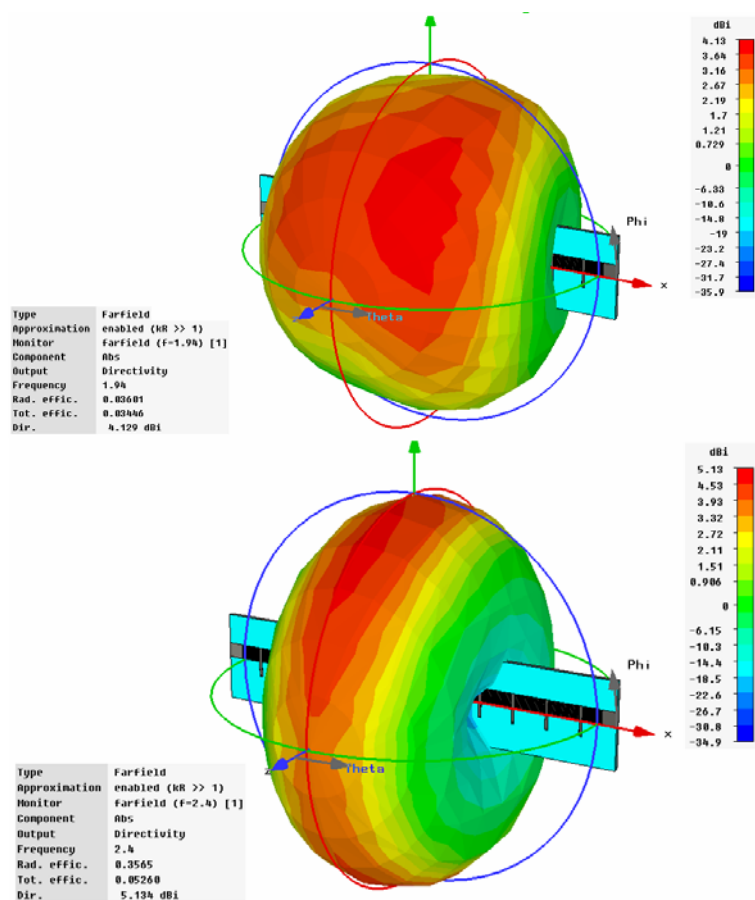
Obr. 4.12 Připojení SMA konektoru a  $50\ \Omega$  přizpůsobení antény s vytékající vlnou.

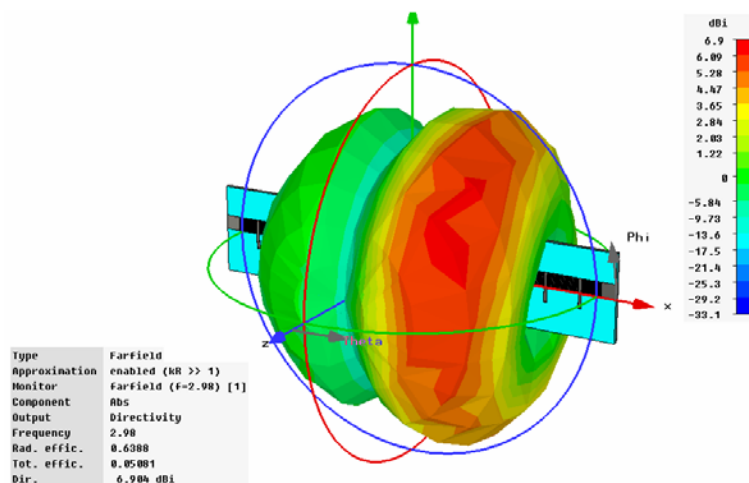


Obr. 4.13 Kmitočtový průběh činitele přenosu a odrazu na vstupu antény s vytékající vlnou. V požadovaném pásmu vykazuje anténa dvě rezonanční minima, 1,94GHz, 2,42 GHz.



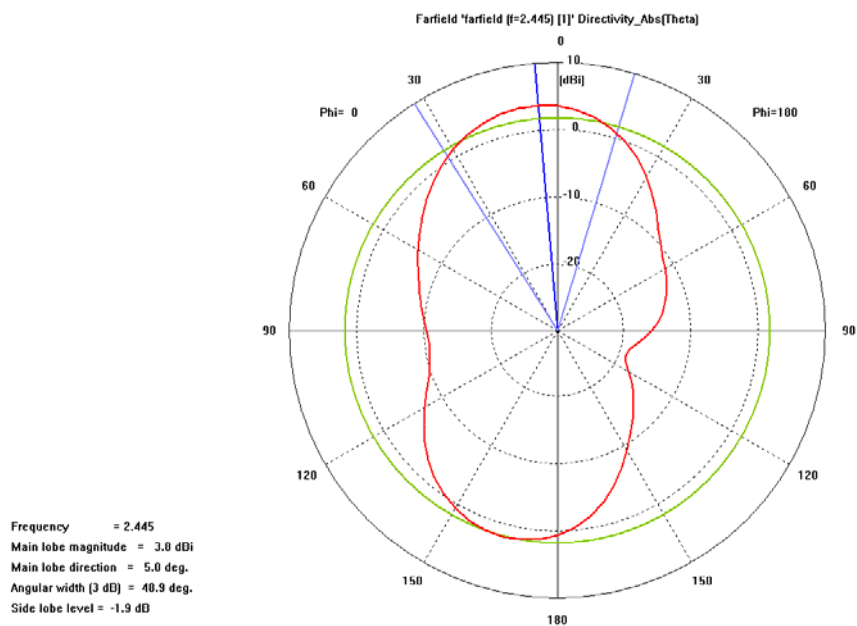
Obr. 4.14 Zobrazení rozložení povrchových proudů při kmitočtu 2,445GHz

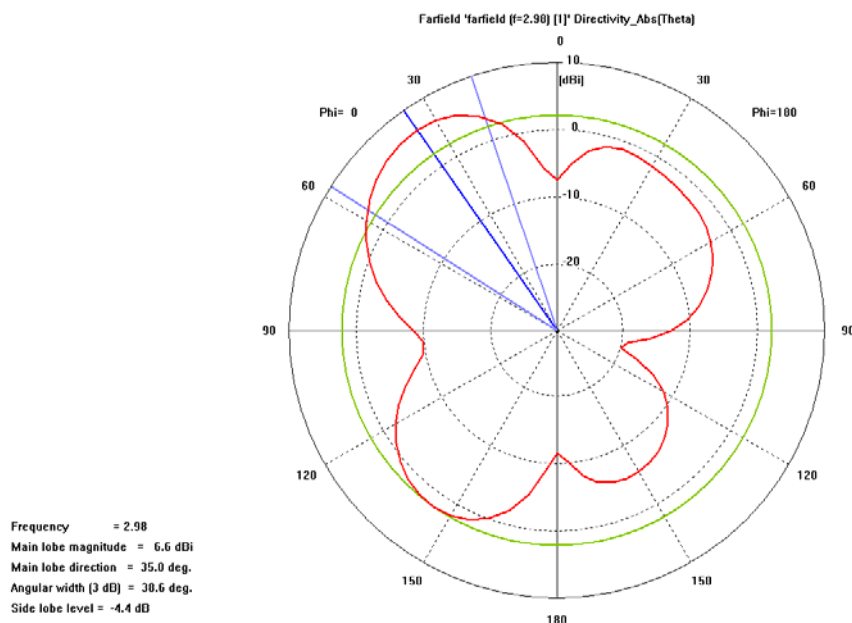




Obr. 4.15 Vyzařovací charakteristika antény s vytékající vlnou na frekvencích 1,94 GHz (nahore), 2,4 GHz (uprostřed) a 2,98 GHz (pravoruký mód) (dole).

Anténa původních parametrů pracuje v požadovaném módu ve frekvenčním rozsahu do 2,4 GHz. Pomocí disperzního diagramu jsem ověřil, že simulovaná anténa pracuje v přibližně stejném frekvenčním rozsahu.



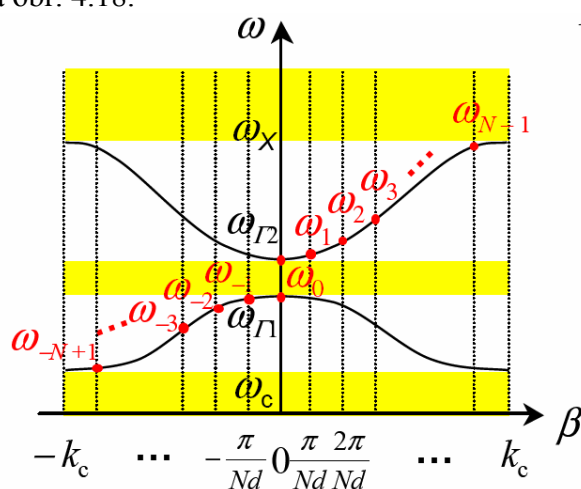


Obr. 4.16 Směrová charakteristika antény s vytékající vlnou v rovině H na frekvenci 2,4 GHz (nahore) a 2,95 GHz (dole).

### 4.3 Rezonanční anténa nultého řádu

Následující anténa vychází návrhu rezonanční antény nultého řádu ZOR [17]. Konkrétní zapojení bylo uzpůsobeno pro práci na kmitočtu 2,4GHz. Nadále je v této práci realizovaná ve variantě s 9 elementární buňky. Možná je i realizace s různým počtem elementárních buněk (2 až  $n$ ), dle ověření velmi dobré parametry dosahuje anténa s přibližně 7 a více buňkami. Pomocí pravo-/levo-rukého vedení je možné realizovat vysoce směrovou antény. Toto zapojení dosahuje vysoké efektivity ( $> 70\%$ ).

Počáteční varianta měla hodnoty viz tabulka 3. Následně došlo k optimalizaci na požadovaný kmitočet a možnost výroby. Výsledné rozměry struktury jsou uvedeny dále (tabulka 34) nákres je na obr. 4.18.

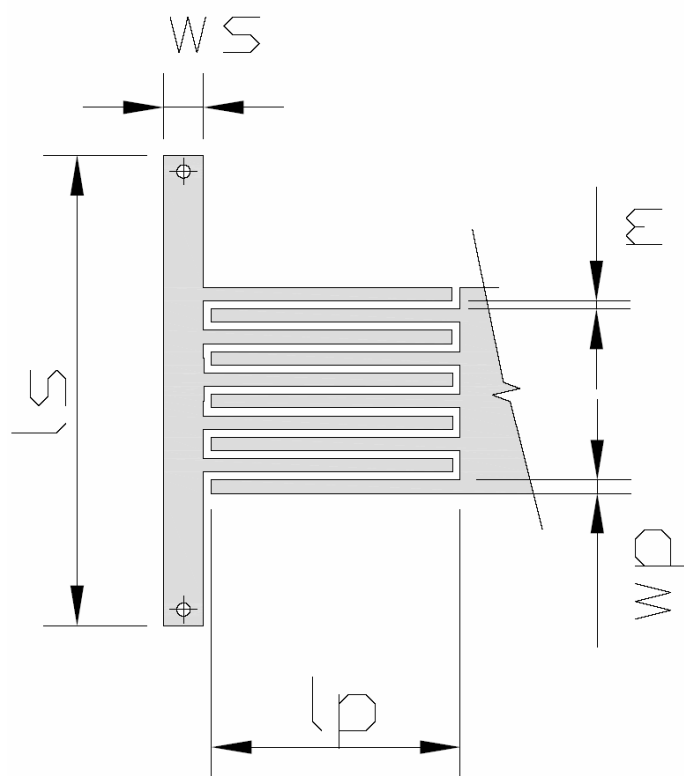


Obr. 4.17 Disperzní diagram

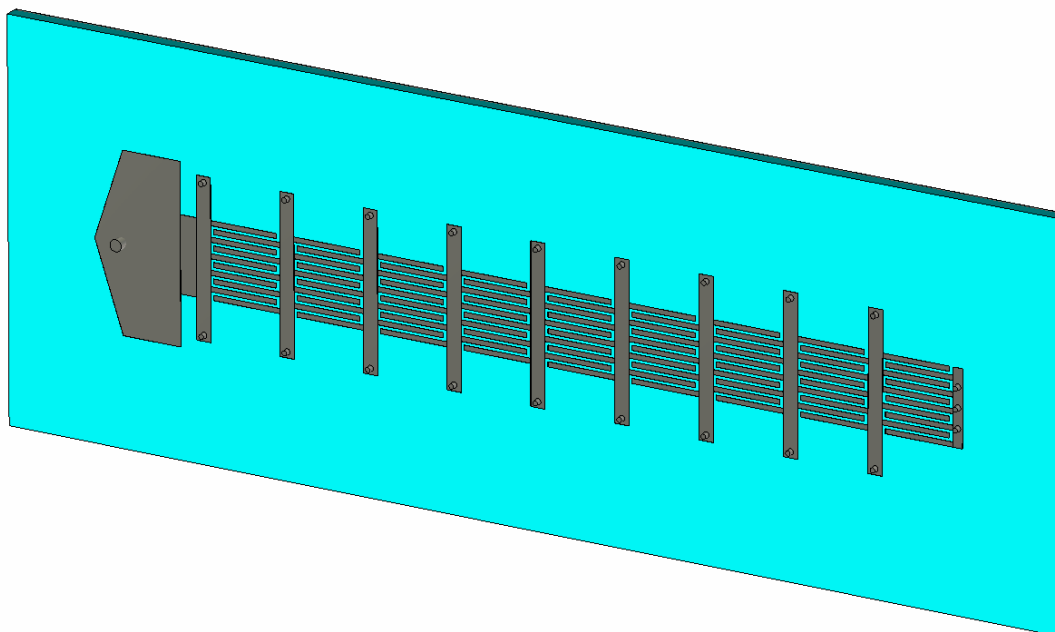
Fyzické rozměry antény jsou 40 x 125 mm, což odpovídá  $1 \times 0,3125 \lambda_0$ . Materiál je stejný jako u ostatních antén ARLON 25N ( $h = 1,54$  mm, permitivita 3,38). Konkrétní obvodové prvky (viz. Obr. 3.9) mají parametry  $L_R = 1,89$  nH,  $C_L = 2,20$  pF,  $L_L = 1,53$  nH,  $C_R = 2,78$  pF a perioda buňky  $p = 8,8$  mm.

| Parametr              |              | Hodnota  |
|-----------------------|--------------|----------|
| Perioda z. buňky      | $p$          | 8,80 mm  |
| Délka sloupku         | $l_s$        | 17,60 mm |
| Šířka sloupku         | $w_s$        | 1,50 mm  |
| Délka pásku           | $l_p$        | 7,00 mm  |
| Šířka pásku           | $w_p$        | 0,55 mm  |
| Mezera mezi pásky     | $m$          | 0,30 mm  |
| Poloměr prokovení     | $r$          | 0,25 mm  |
| Výška substrátu       | $h$          | 1,54 mm  |
| Permitivita substrátu | $\epsilon_r$ | 3,38     |

Tabulka 3 Rozměry a parametry základní buňky

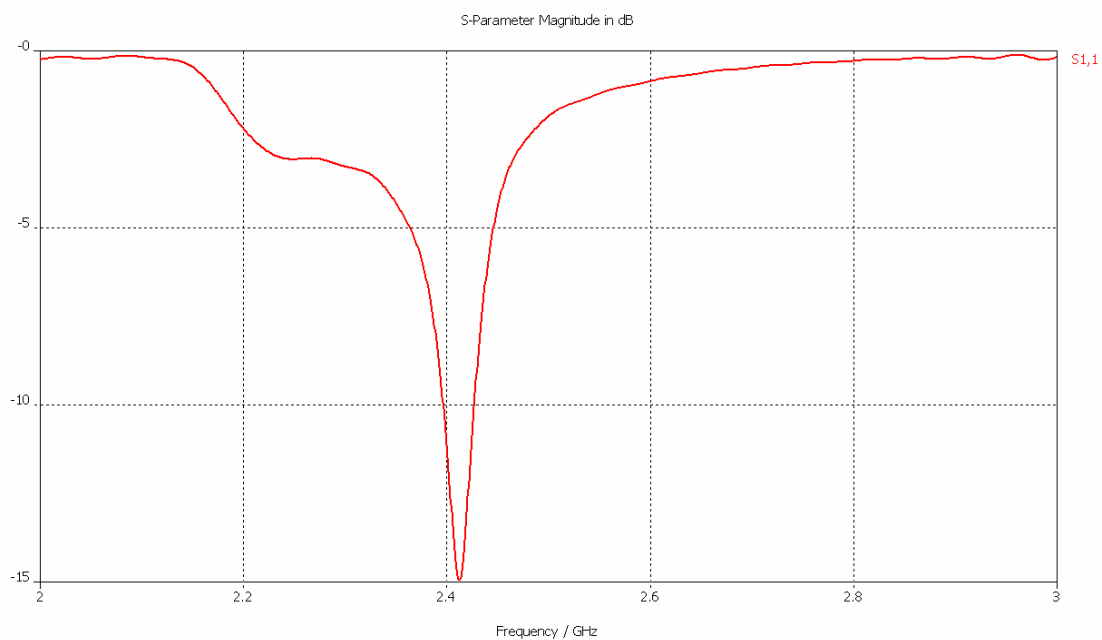


Obr. 4.18 Elementární buňka s vyznačenými hlavními mírami

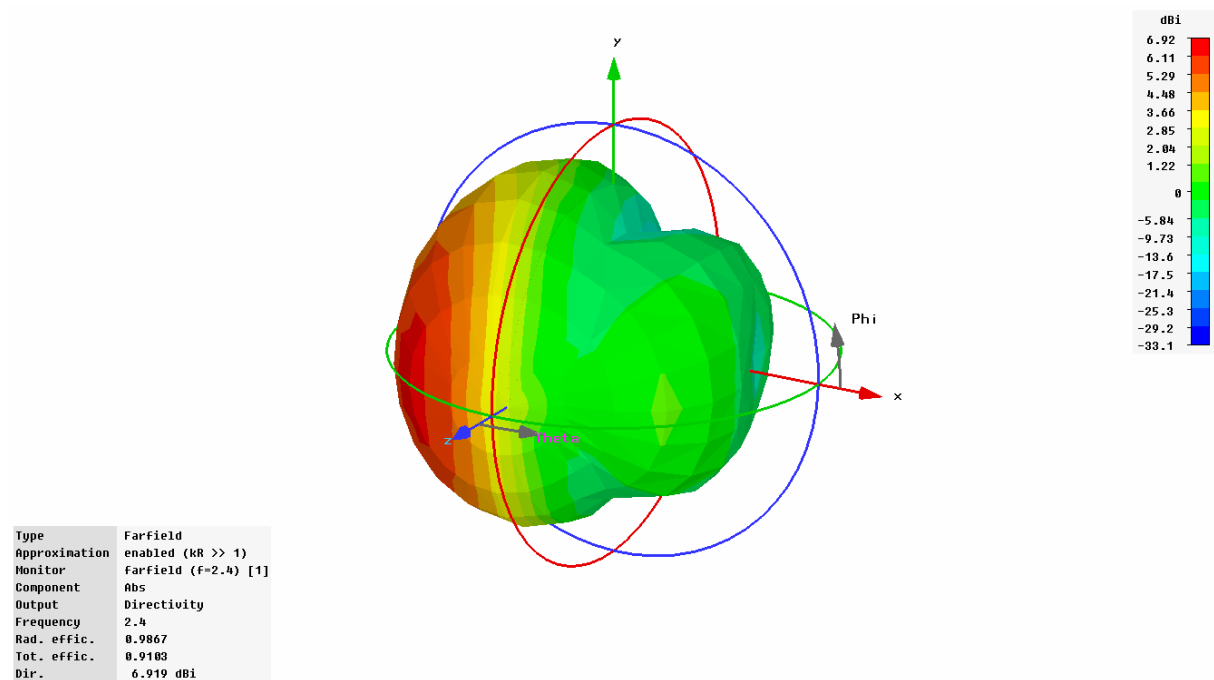


Obr. 4.19 Ukázka uspořádání antény s 9 základními buňkami

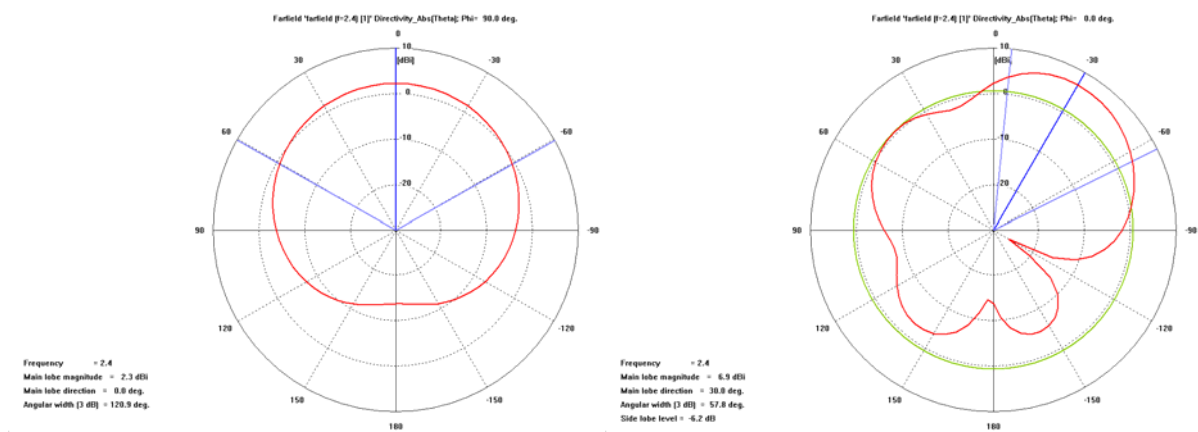
Na obrázku 4.19 je znázorněna anténa v simulačním programu, napájení je řešeno pomocí simulovaného konektoru SMA, umístěného v přizpůsobovací plošce.



Obr. 4.20 Parametr s11, -15dB odpovídá kmitočtu 2,42 GHz



Obr. 4.21 3D zobrazení vyzařovací charakteristiky na 2,42GHz



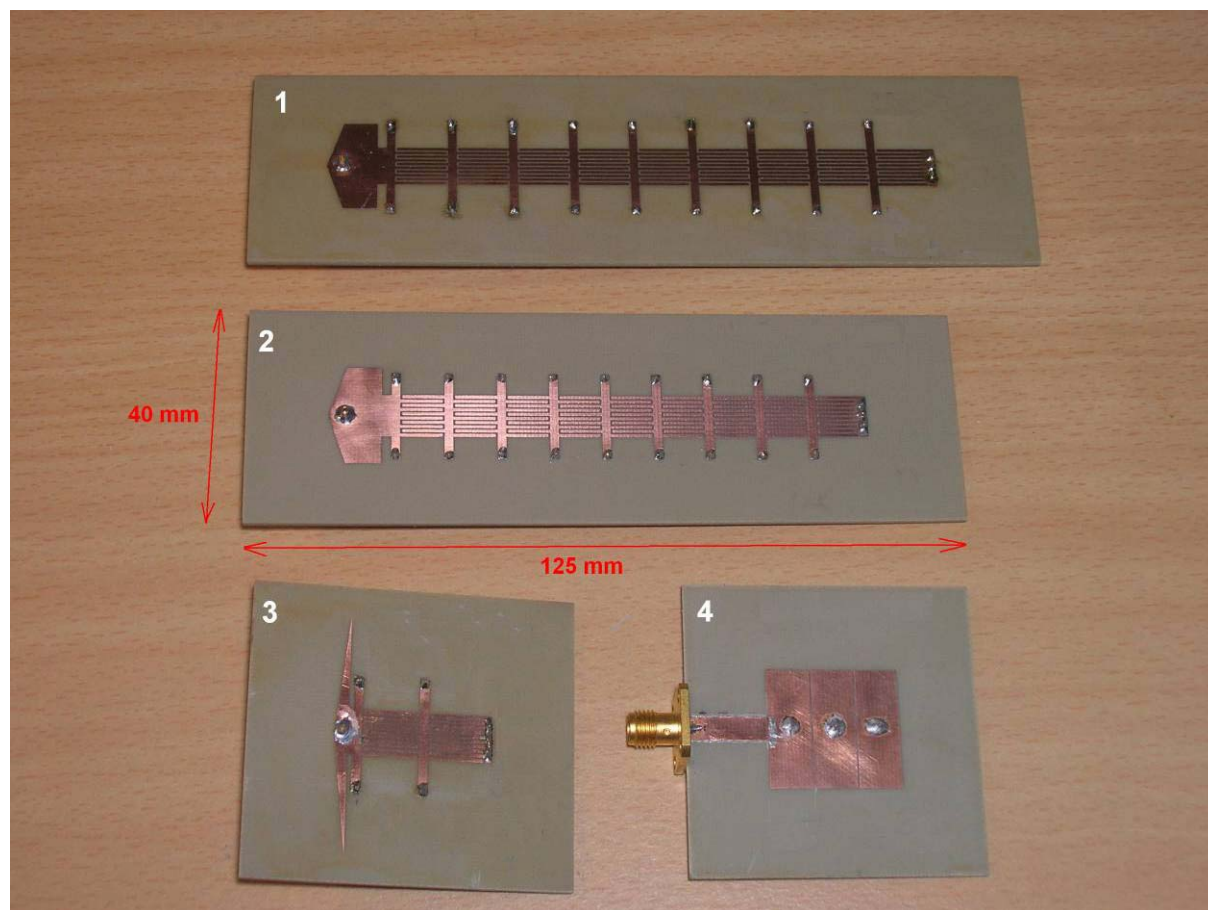
Obr. 4.22 Směrová charakteristika vlevo pro příčnou rovinu, vpravo podélná



Obr. 4.23 Ukázka antény před ořezáním na finální rozměry

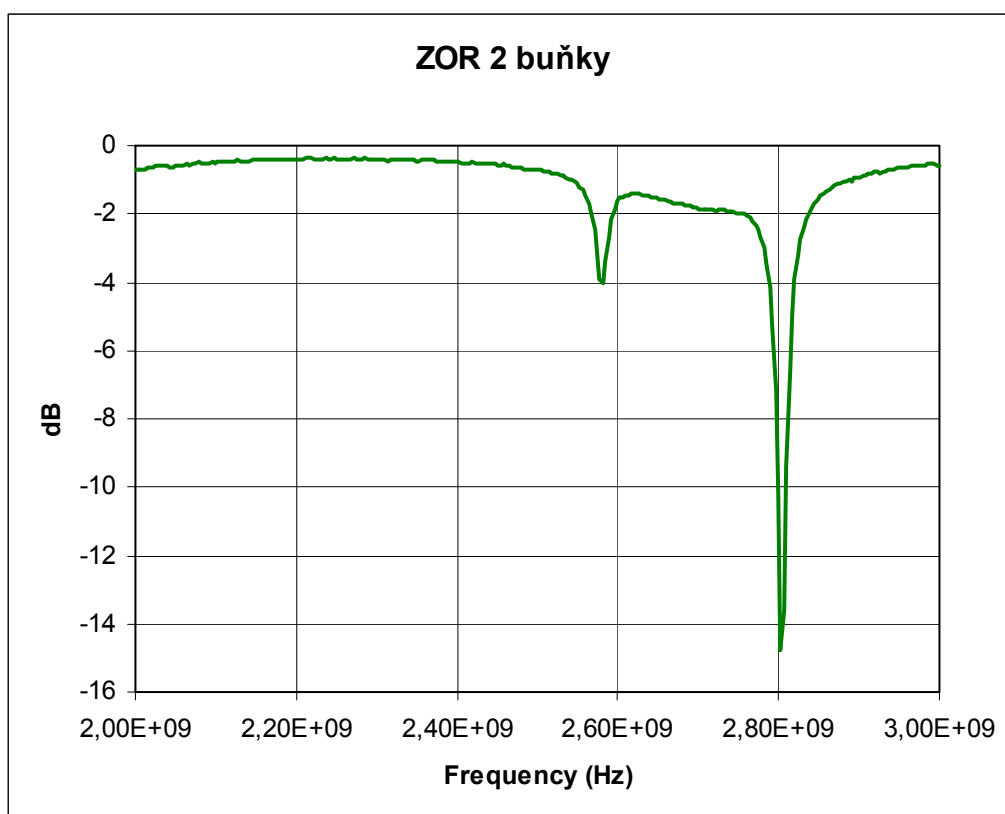
## 5. Výsledky měření

Jak již bylo zmíněno výše, nejvýhodnější z hlediska dosažitelných parametrů je anténa č.3 (kapitola 4.2). Pro praktické ověření návrhu byla vyrobena pomocí fotocesty odleptáním vzoru na desce z materiálu Arlon 25N s parametry  $h = 1,54$  mm, pokovení 30  $\mu\text{m}$ , permitivita  $\epsilon_r = 3,38$ . Na obrázku 5.1 je vidět anténa 1 která sloužila k ověření parametrů návrhu. S ohledem na návrhová a výrobní omezení byla anténa optimalizována ne na nejlepší parametry, ale na parametry, které půjdou jednodušeji reprodukovat při výrobě. Anténa 4 je realizace podle kapitoly 4.1. Měřené parametry jsou na obrázku 5.3.

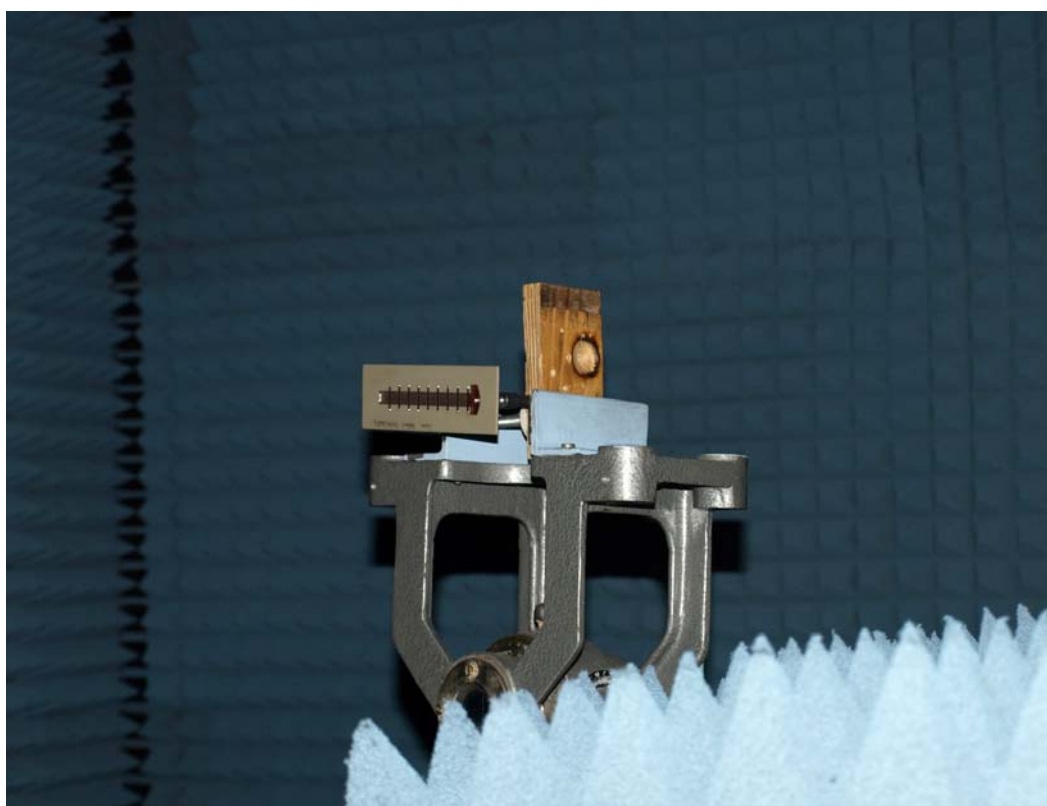


Obr. 5.1 Ukázka dvou realizovaných antén. 2 – ZOR anténa, 4 – hříbková anténa

Anténa na obrázku 5.1 číslo 3 je pokusný vzor, který obsahuje pouze dvě základní buňky. Rezonanční frekvence je posunuta směrem nahoru, parametry takto vytvořené antény jsou horší než u modelu s více buňkami. Frekvence 2,8GHz,  $D = 5,32\text{dBi}$ ,  $G = 3.1$  dB.



Obr. 5. 2 Praktické měření – pokusná anténa s 2 buňkami

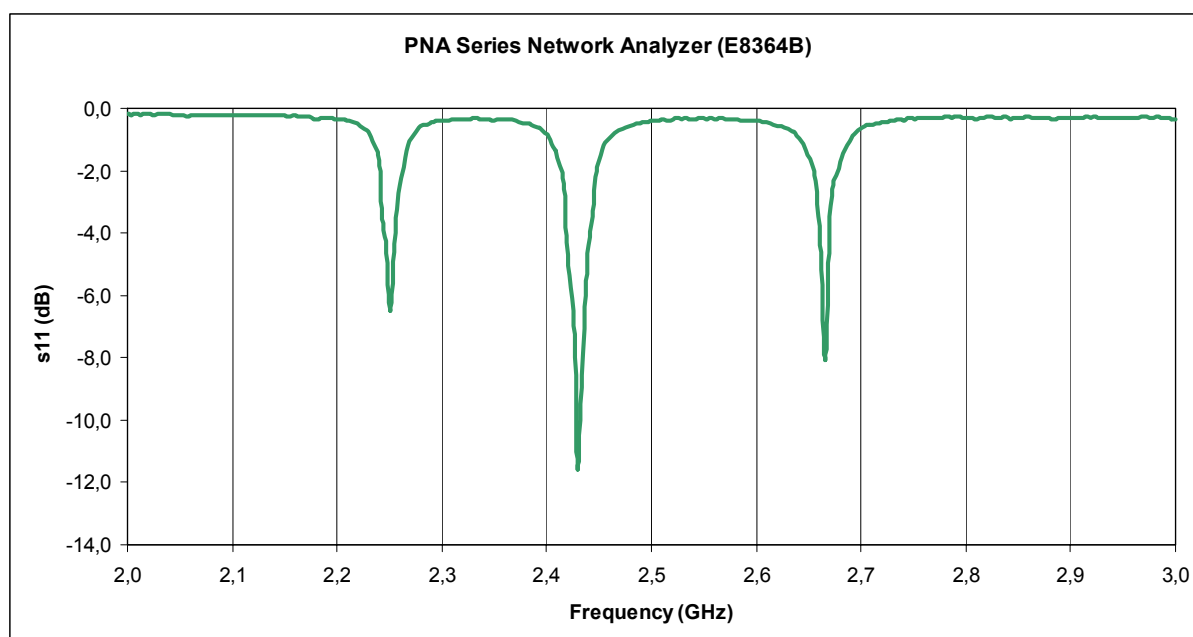


Obr. 5. 3 Ukázka uchycení antény v měřící komoře pro rovinu v ose z

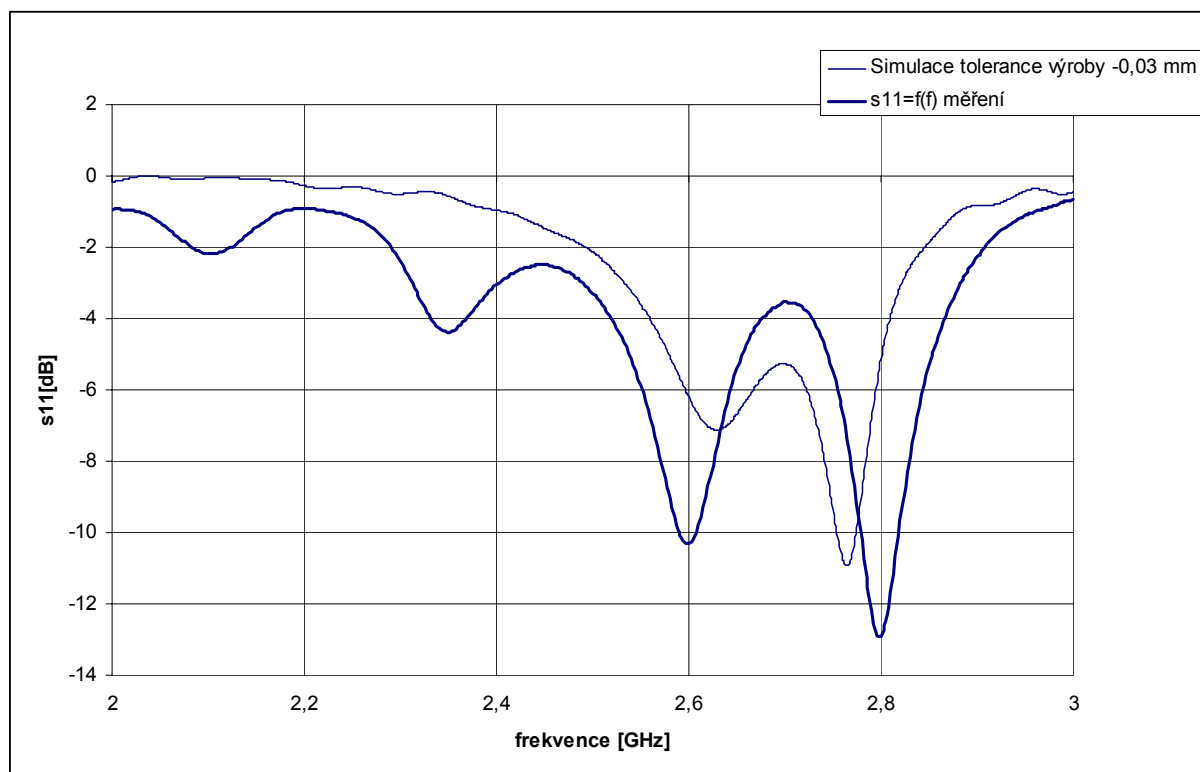
Při ověřování vyrobených antén bylo zjištěno, že výrobní proces dosahuje nedostatečné přesnosti. Jak je vidět v grafu na obrázku 5.1 při zahrnutí tolerančního pole do simulace struktury v míře  $\pm 0,03$  mm u rezonanční antény nultého řádu. Při nastavení rozměrů struktury o  $-0,03$  mm dochází k rozladění prakticky přesně odpovídajícímu naměřeným průběhům, viz srovnávací graf (obrázek 5.4).

I přes opakovanou snahu o kompenzaci těchto nepřesností při výrobě bylo dosaženo pouze částečně dobrých parametrů, což je způsobeno naprosto náhodnými výrobními tolerancemi při opakované výrobě. Z tohoto hlediska jsou výsledky nejlepší u hříbkové struktury. Takto realizovaná anténa je na vliv výrobních nepřesností nejméně náchylná, je to dáno jednoduššími strukturami, kde stačí v zásadě dodržet požadované izolační mezery.

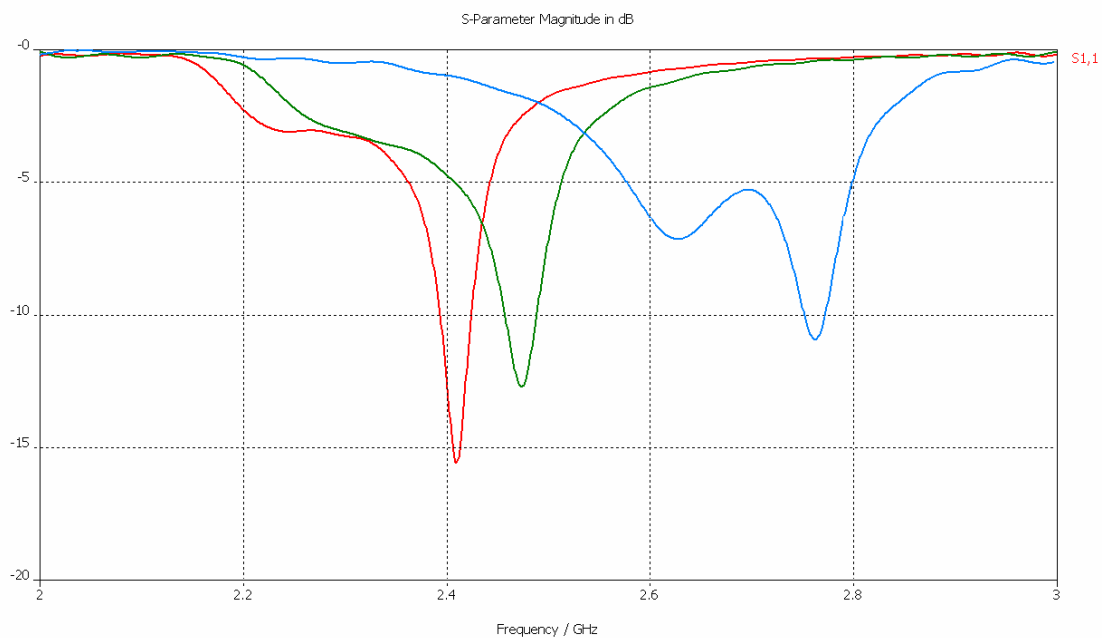
Jak je vidět na obr. 5.3 kde je měřen parametr  $s_{11}$  u hříbkové antény. V porovnání se simulovanými průběhy, frekvenčně jednotlivé rezonance  $f_0$ ,  $f_{-1}$ ,  $f_{+1}$  sedí, rozdíl je u dosažených parametrů ohledně přizpůsobení a  $s_{11}$ . Přesto lze dosažené parametry považovat pro dostatečné pro praktické využití.



Obr. 5. 4 Anténa 1 - Hříbková struktura - Praktické měření

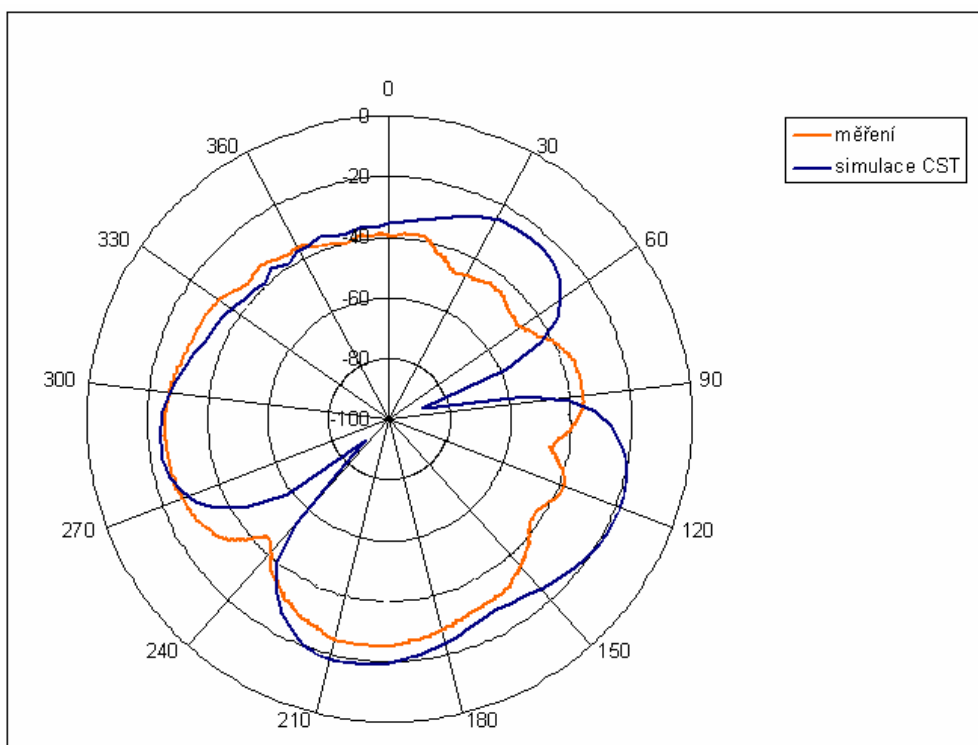


Obr. 5. 5 Měřené parametry vektorovým analyzátořem u antény č.2 doplněné o simulaci antény s nepřesnými rozměry (-0,03 mm z „prstů“ struktury)

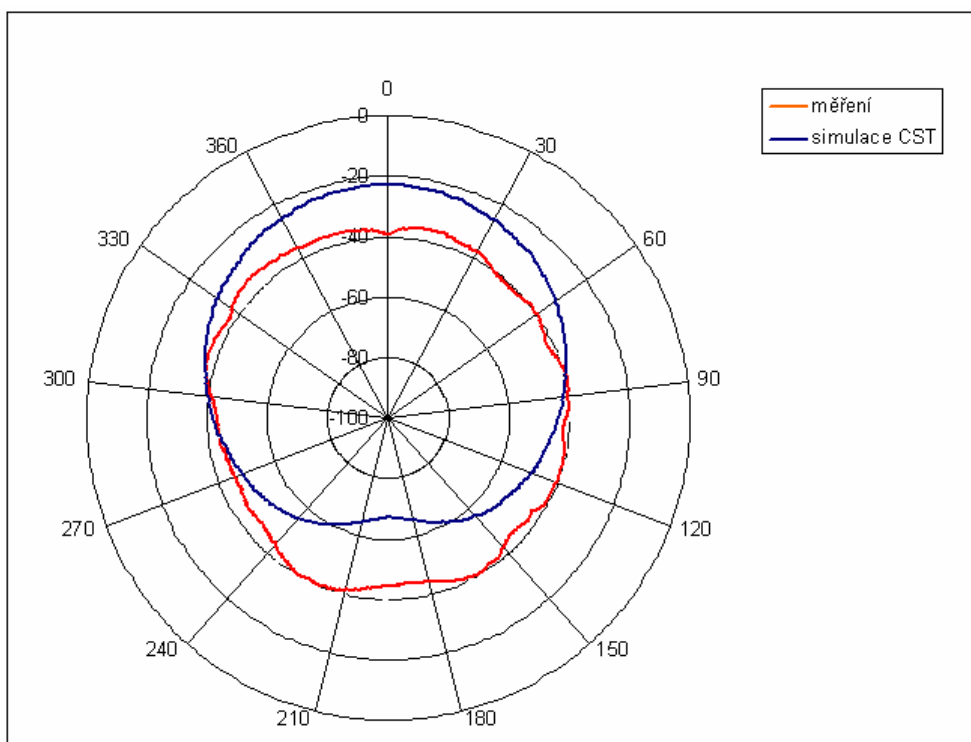


Obr. 5.6 Toleranční analýza výroby, požadovaný průběh(červeně), tolerance -0,03 mm (modře), tolerance +0,03 mm (zeleně)

Teoretické simulace v programu CST Microwave Studio, nezahrnují řadu vlivů jak už ohledně reálných vlastností materiálů, tolerancí výroby, zjednodušený model výpočtu apod. Přesto jsou výsledky zvláště u jednodušších struktur značně přesné, viz. výsledky měření hříbkové antény.



Obr. 5.7 Anténa 2 - porovnání měřené a simulované vyzařovací charakteristiky, kmitočet 2,4 GHz, vertikální rovina



Obr. 5.8 Naměřené směrové charakteristiky na 2,4GHz pro vertikální (nahore) a horizontální (dole) rovinu

U antény 2 byla změřena v bezodrazové komoře vyzařovací charakteristika. Měření proběhlo na kmitočtu 2,4 GHz a 2,6GHz v obou možných natočeních antény v rovinách i polarizacích. Naměřená data jsou znázorněna v obrázku 5.6 a 5.7. Tvar charakteristiky (minim, maxim i úrovni signálu) přibližně odpovídají předpokládaným průběhům. Naměřené průběhy díky nepřesnosti měření jsou pouze orientační, vypovídají o tvaru charakteristiky, úroveň signálu se může lišit.

## 6. Závěr

Cílem práce bylo porovnat vlastnosti tří typů antén z metamateriálů, realizovaných pro objektivní porovnání na stejném základním materiálu. Díky této podmínce, byly vybrány antény, které principiálně budou vyhovovat návrhu na jeden z dostupných materiálů.

Nejjednodušší anténa vychází z hříbkové struktury. U této antény i přes důsledné impedanční přizpůsobení a optimalizaci nebylo možné dosáhnout lepšího impedančního přizpůsobení než  $S_{11} < -11$  dB. Požadovaný pracovní kmitočet byl v návrhu i realizaci téměř identický, taktéž funkce a parametry antény odpovídají teoretickým předpokladům.

Zajímavějším zapojením s dobrými parametry je anténa s vytékající vlnou. Tato anténa vyniká zejména značnou šířkou frekvenčního pásma. Na požadovaném kmitočtu 2,4 GHz je anténa impedančně přizpůsobena. Impedanční přizpůsobení však činí výrobu antény obtížnou díky nutnosti dosáhnout přesné izolační mezery o tloušťce 0,1 mm. Anténa pracuje v levorukém módu v širší frekvenční oblasti, je vhodná jak pro demonstrativní ukázkou funkce tak pro další vylepšování ve snaze dosáhnout výjimečných parametrů.

Třetí porovnávanou anténou je anténa rezonanční. Ta se vyznačuje hlavně zmenšením fyzických rozměrů vzhledem k vlnové délce. Teoretický návrh a optimalizace dosáhly požadovaných parametrů, díky vlivu výroby, ale nesplnila anténa při praktickém měření očekávání. Pokud by se využila výrobní metoda s garantovanou přesností, vychází tato anténa díky svým parametrům jako optimální.

## 7. Literatura

- [1] VESELAGO, V. G. *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\varepsilon$  and  $\mu$* . Soviet Physics Uspekhi, 1968, vol.10, no.4. p. 509-514.
- [2] GIL, I.; BONACHE, J.; GARCIA-GARCIA, J.; et al. *Metamaterials in Microstrip Technology for Filter Applications*. Departament d'Enginyeria Electronica, Autonomous Univ. of Barcelona, Bellaterra, Spain, July 2005, p. 668- 671. vol. 1A, ISBN 0-7803-8883-6
- [3] YANG, F. R.; COCCIOLI, R.; QIAN, ITOH. *PBG-Assisted Gain Enhancement of Patch Antennas on High-Dielectric Konstant Substrate*. IEEE AS-P International Symposium Digest, 1999, Orgando, vol. 4.
- [4] LI, H.; ZHOU, L.; HANG, Z.; ZHANG, Y.; et al. *Planar metamaterials and applications in directive antennas*. *Microwave Conference Proceedings, Dec. 2005, Asia-Pacific Conference Proceedings*, vol. 1, p. 4. ISBN 0-7803-9433-X.
- [5] KAFESAKI, M.; AGIO, M.; SOUKOULIS C. M. *Waveguides in finite-height two-dimensional photonic crystals*. J. Opt. Soc., 2002, B 19, p. 2232-2240.
- [6] SIEVENPIPER, D.; ZHANG, L.; YABLONOVITCH, E. High-Impedance Electromagnetic Ground Planes. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, Nov 1999, vol. 47, Issue: 11, p. 2059-2074. ISSN 0018-9480.
- [7] PARAZZOLI, C. G.; GREGOR, R. B.; NIELSEN, J. A.; et al. *Performance of a negative index of refraction lens*. Appl. Phys., 2004. Lett. 84.
- [8] SHELBY, R. A.; SMITH, D. R. ; SHULTZ, S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science Magazine*, April 2001, vol. 292, no. 5514. p. 77 – 79.
- [9] PENDRY, J. B.; SMITH, D. R. Reversing Light with Negative Refraction. *Physics Today*, 2004, Volume 57, Issue 6. p. 37-44.
- [10] CALOZ, C.; ITOH, T. *Elektomagnetic Metamaterials: Transmission Line and Microwave Applications*. Wiley-Interscience publication, 2006. ISBN 0-471-66985-7
- [11] LI, H.; ZHOU, L.; HANG, Z.; ZHANG, Y.; et al. *Planar Metamaterials and Applications in Directive Antennas*, Microwave Conference Proceedings, 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings. Volume 1, Issue 4-7.
- [12] SIEVENPIPER, D.; ZHANG, L.; BROAS, R. F. J.; ALEXPOLOUS, N. G.; YABLONOVITCH, E. *High-impedance surface electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band*. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1999, Volume 47, Issue 11, Nov 1999. p. 2059 – 2074.

- [13] CALOZ, C.; LAI, A.; ITOH, T. *Wave interactions in a left-handed mushroom structure*. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE Volume 2, Issue. 20-25, June 2004. p. 1403 – 1406.
  
- [14] LAI, A.; LEONG, K.; ITOH, T. *Dual-mode compact microstrip antenna based on fundamental backward wave*. Microwave Conference Proceedings, 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings. Volume 4, Issue , 4-7 Dec. 2005.
  
- [15] Department of Electrical Engineering, *Left-Handed Metamaterials for Microwave Engineering Applications*, 10-Cell CRLH Leaky-Wave Antenna, *UCLA*
  
- [16] SVAČINA, J. *Mikrovlnná integrovaná technika*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008, ISBN 978-80-214-3751-7
  
- [17] RENNINGS, A. ; LIEBIG, S.; OTTO, S.; CALOZ, C.; et al. *Highly Directive Resonator Antennas based on Composite Right/Left-Handed (CRLH) Transmission Lines*. INICA apos;07. 2nd International ITG Conference on Volume, Issue , 28-30 March 2007. p.190 - 194

## 8. Seznam symbolů, veličin a zkratk

|                 |                                      |
|-----------------|--------------------------------------|
| $\alpha$        | konstanta útlumu                     |
| $\beta$         | fázová konstanta šíření              |
| $B$             | vektor indukce magnetického pole     |
| $c$             | rychlost světla ve vakuu             |
| $D$             | vektor indukce elektrického pole     |
| $E$             | vektor intenzity elektrického pole   |
| $\varepsilon_0$ | permitivita vakua                    |
| $\varepsilon_r$ | relativní permitivita                |
| $f$             | kmitočet                             |
| $G$             | zisk antény                          |
| $h$             | tloušťka substrátu                   |
| $H$             | vektor intenzity magnetického pole   |
| $\gamma_z$      | konstanta šíření ve směru osy $z$    |
| $k$             | konstanta šíření v obecném prostředí |
| $k_0$           | konstanta šíření ve vakuu            |
| LH              | Left-Handed                          |
| LHM             | Left-Handed Material                 |
| $n$             | celocíselný index                    |
| $n_{eff}$       | efektivní index lomu                 |
| RH              | Right-Handed                         |
| RHM             | Right-Handed Material                |
| $t$             | tloušťka pokovení                    |
| $w$             | šířka štěrbin                        |
| $\mu_0$         | permeabilita vakua                   |
| $\mu_r$         | relativní permeabilita               |
| $\lambda_0$     | délka vlny ve vakuu                  |
| $\omega$        | úhlový kmitocet                      |