



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## UMĚLÝ MAGNETICKÝ VODIČ PRO TEXTILNÍ KRUHOVĚ POLARIZOVANOU ANTÉNU

ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTOR FOR TEXTILE-INTEGRATED CIRCULARLY POLARIZED ANTENNA

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

John Richard Ritter

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2021





# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** John Richard Ritter

**ID:** 211316

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

## NÁZEV TÉMATU:

### Umělý magnetický vodič pro textilní kruhově polarizovanou anténu

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V doporučené literatuře se seznámte s koncepcí kruhově polarizované antény umístěné nad umělým magnetickým vodičem. Zjednodušenou počítačovou simulací ověřte, zda parametry anténní struktury popsané v [1] odpovídají skutečnosti. Anténní strukturu optimalizujte pro použití v kmitočtovém ISM pásmu 5,8 GHz.

Konvenční substrát nahraďte trojrozměrnou pleteninou. Navrženou anténní strukturu optimalizujte pro zadaný textilní substrát a technologii síťotisku. Optimalizovanou anténu realizujte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WEI LI; BOWEN CAI; YING SUO; A broadband circular polarized microstrip antenna based on artificial magnetic conductor. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston (USA): IEEE, 2018. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608423

[2] P. KOVÁCS; Návrh a optimalizace struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem. Disertační práce. Brno: VUT v Brně, 2010. Dostupné: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=32416](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=32416)

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 27.5.2021

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

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.



## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá kruhově polarizovanou anténou s umělým magnetickým vodičem (AMC, *artificial magnetic conductor*). Koncept této anténní struktury je převzat z [1]. Anténní struktura byla simulována v původní, publikované verzi, aby byla ověřena správnost výsledků v [1]. Následně byla anténa upravena pro výrobu na textilní substrátu a práci v pásmu ISM 5,8 GHz. Po provedených úpravách byla anténa vyrobena a její vlastnosti ověřeny měřeními. Anténa má potenciální využití v bezdrátových komunikačních systémech, jako jsou například sítě WBAN (*wireless body area networks*).

## KLÍČOVÁ SLOVA

Umělý magnetický vodič, textilní substrát, kruhová polarizace, ISM pásmo, planární monopól.

## ABSTRACT

This thesis deals with a circularly polarized antenna using an *artificial magnetic conductor* (AMC). The concept for this antenna is adopted from [1]. The antenna structure was simulated in its original, published form to verify the validity of the results in [1]. The antenna structure was then modified for manufacturing on a textile substrate and for operation in the ISM 5,8 GHz frequency band. After the modification the antenna was manufactured. The antenna properties were subsequently measured to verify the simulated results. The antenna can be potentially used in wireless communication systems, such as *wireless body area networks* (WBAN).

## KEYWORDS

Artificial magnetic conductor, textile substrate, circular polarization, ISM band, planar monopole.

RITTER, John Richard. *Umělý magnetický vodič pro textilní kruhově polarizovanou anténu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2021, 69 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida



## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** John Richard Ritter  
**VUT ID autora:** 211316  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2020/2021  
**Téma závěrečné práce:** Umělý magnetický vodič pro textilní kruhově polarizovanou anténu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.



## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Miroslavu Cupalovi, Ph.D. za organizaci výroby a pomoc při měření činitele odrazu a doc. Ing. Jaroslavu Láčíkovi, Ph.D. za pomoc při měření vyzařovacích charakteristik antény.



# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>15</b>
1.1 Cíl práce . . . . .	15
1.2 Antény integrované do oděvu . . . . .	15
1.2.1 Umělý magnetický vodič . . . . .	16
1.2.2 Kruhová polarizace a její význam . . . . .	16
1.2.3 Textilní substrát . . . . .	16
<b>2 Kruhově polarizovaná anténa nad AMC</b>	<b>19</b>
2.1 Popis anténní struktury . . . . .	19
2.2 Simulace antény . . . . .	25
2.2.1 Impedanční vlastnosti . . . . .	25
2.2.2 Vyzařovací vlastnosti . . . . .	25
2.2.3 Odrazové vlastnosti AMC . . . . .	26
<b>3 Textilní anténa pro ISM pásmo 5,8 GHz</b>	<b>35</b>
3.1 Textilní substrát 3D097 . . . . .	35
3.2 Úprava antény . . . . .	35
3.3 Umělý magnetický vodič . . . . .	36
3.3.1 Osmiúhelníkový AMC . . . . .	36
3.3.2 AMC s křížovými elementy . . . . .	38
3.3.3 AMC se čtvercovými elementy . . . . .	39
3.4 Buzení anténního prvku . . . . .	40
3.4.1 Koaxiální sonda . . . . .	40
3.4.2 Mikropáskové vedení . . . . .	40
3.4.3 Koplanární vlnovod . . . . .	41
3.5 Kompletní anténní struktura . . . . .	42
3.5.1 Anténa s křížovým AMC . . . . .	42
3.5.2 Anténa se čtvercovým AMC . . . . .	45
<b>4 Výroba a měření antény</b>	<b>51</b>
4.1 Výroba antény . . . . .	51
4.2 Měření vlastností antény . . . . .	53
<b>5 Závěr</b>	<b>57</b>
<b>Literatura</b>	<b>59</b>
<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>61</b>

Seznam příloh	63
A Katalogový list SMA konektoru	65

# Seznam obrázků

2.1	Schéma kruhového flíčku . . . . .	19
2.2	Schéma buňky AMC reflektoru . . . . .	20
2.3	Vertikální struktura antény – bokorys . . . . .	20
2.4	Závislost fáze činitele odrazu AMC struktury – převzato z [1] . . . . .	23
2.5	Závislost $ S_{11} $ – převzato z [1] . . . . .	23
2.6	Vyzařovací charakteristiky – převzato z [1] . . . . .	24
2.7	Osový poměr – převzato z [1] . . . . .	24
2.8	Anténní struktura z [1] – pohled v simulačním programu . . . . .	27
2.9	Anténní struktura z [1] – kmitočtová závislost impedance . . . . .	27
2.10	Anténní struktura z [1] – kmitočtová závislost činitele odrazu . . . . .	28
2.11	Anténní struktura z [1] – kmitočtová závislost osového poměru . . . . .	29
2.12	Anténní struktura z [1] – vyzařovací charakteristika . . . . .	30
2.13	Vyzařovací charakteristika – převzato z [1] . . . . .	31
2.14	AMC z [1] – pohled v simulačním programu . . . . .	31
2.15	AMC z [1] – kmitočtová závislost fáze činitele odrazu . . . . .	32
2.16	AMC z [1] – kmitočtová závislost fáze činitele odrazu (správné nastavení) . . . . .	33
3.1	Přepočtený flíček – kmitočtová závislost činitele odrazu . . . . .	36
3.2	Úprava osmiúhelníkového AMC – frekvenční skoky . . . . .	37
3.3	Struktura AMC s křížovými elementy – pohled shora . . . . .	38
3.4	Úprava křížového AMC – kmitočtová závislost fáze činitele odrazu . . . . .	39
3.5	Úprava čtvercového AMC – kmitočtová závislost fáze činitele odrazu . . . . .	40
3.6	Kruhový flíček s koplanárním napájením . . . . .	41
3.7	Anténa s křížovým AMC – pohled v simulačním programu . . . . .	42
3.8	Anténa s křížovým AMC – kmitočtová závislost činitele odrazu . . . . .	43
3.9	Anténa s křížovým AMC – kmitočtová závislost osového poměru . . . . .	43
3.10	Anténa s křížovým AMC – vyzařovací charakteristika . . . . .	44
3.11	Anténa se čtvercovým AMC – pohled v simulačním programu . . . . .	46
3.12	Anténa se čtvercovým AMC – kmitočtová závislost činitele odrazu . . . . .	46
3.13	Anténa se čtvercovým AMC – kmitočtová závislost impedance . . . . .	47
3.14	Anténa se čtvercovým AMC – kmitočtová závislost osového poměru . . . . .	47
3.15	Anténa se čtvercovým AMC – vyzařovací charakteristika . . . . .	48
3.16	Anténa se čtvercovým AMC – vyzařovací charakteristika (potlačené zpětné vyzařování) . . . . .	49
4.1	Výroba – části antény . . . . .	52
4.2	Výroba – kompletní anténa . . . . .	52
4.3	Měřená anténa – kmitočtová závislost činitele odrazu . . . . .	54

4.4	Měřená anténa – kmitočtová závislost osového poměru . . . . .	54
4.5	Měřená anténa – vyzařovací charakteristika . . . . .	55

# 1 Úvod

## 1.1 Cíl práce

Tato práce se zabývá návrhem, optimalizací a výrobou kruhově polarizované antény s umělým magnetickým vodičem (AMC, *artificial magnetic conductor*). Koncept této anténní struktury byl převzat z [1]. Anténní struktura byla simulována v původní, publikované verzi <sup>1</sup>, aby byla ověřena správnost výsledků v [1]. Poté byla anténa optimalizována pro textilní substrát a práci v pásmu ISM 5,8 GHz. Po úspěšné optimalizaci bude anténa vyrobena, a následně změřeny její vlastnosti. Tím bude ověřena správnost návrhu a provedených simulací.

## 1.2 Antény integrované do oděvu

Jak již bylo zmíněno, tato práce je zaměřena na optimalizaci existující anténní struktury pro použití v ISM pásmu 5,8 GHz a pro výrobu na textilním substrátu. Důvodem použití textilního substrátu je snaha vytvořit anténu, která je nositelná na lidském těle. Bezdrátová komunikace totiž přináší uživateli volnost pohybu bez nutnosti přesouvat části infrastruktury (např. díky Wi-Fi není zapotřebí používat kabel). Právě volnost pohybu je velmi žádanou vlastností systémů pro monitorování stavu pacientů v nemocnicích, osob pracujících v nebezpečných prostředích, a také sportovců. Jsou-li tedy antény používané pro přenos informací radiovým kanálem dostatečně malé a nositelné (integrované v oděvu), lze monitorovat stav sledovaných osob vzdáleně (pacienta lze jednoduše přemístit bez přepojování všech možných kabelů).

Sítím pracujícím v blízkosti lidského těla se anglicky říká *wireless body area networks*, WBAN [3]. V systémech WBAN používáme nositelné antény k přenosu informací od sledované osoby ke vzdálenému zařízení (*off-body communication*) nebo mezi zařízeními na těle sledované osoby (*on-body communication*). Jediným rozdílným požadavkem na antény je směr hlavního laloku směrové charakteristiky (maximum vyzařování kolmé k tělu nebo rovnoběžné s povrchem těla). Zbylé nároky kladené na antény jsou totožné [3]:

- již zmíněná malá velikost antény,
- možnost integrace antény do oděvu (nejen do textilu, ale třeba i do knoflíků apod.),
- minimální vyzařování směrem do živé tkáně.

---

<sup>1</sup>Simulace jsou provedeny pomocí modulu HFSS programu *Electronics Desktop* firmy ANSYS.

Anténa, kterou se v práci zabývám, je navržena pro potenciální použití ve WBAN systémech. Jelikož zadání práce nevyžaduje, aby byla anténa optimalizovaná pro použití na lidském těle, vliv živých tkání na funkci antény a její parametry není v práci diskutován.

### 1.2.1 Umělý magnetický vodič

Chceme-li potlačit vyzařování antény do tkáně, musíme anténní prvek od tkáně oddělit stínicí plochou. Při použití elektrického reflektoru musí být anténní prvek od něj vzdálen  $\lambda/4$ , kde  $\lambda$  značí délku vlny. Vzdálenost antény od reflektoru může být minimalizována použitím umělého magnetického vodiče, AMC [2].

AMC struktury jsou tvořeny periodickým polem planárních prvků nad souvislou zemní plochou. K jejich výrobě se používají běžné mikrovlnné substráty oboustranně potažené měděnou fólií. Nulová fáze odrazu je dosažena interferencí vln odražených od elementů periodické struktury a zemní desky [2].

AMC je v této práci použit jako stínicí plocha omezující vyzařování antény do tkáně, a současně jako reflektor této antény.

### 1.2.2 Kruhová polarizace a její význam

Termínem polarizace označujeme směr vektoru intenzity elektrického pole. Při lineární polarizaci se směr nemění, při kruhové polarizaci se směr vektoru pole otáčí vlevo (levotočivá polarizace) nebo vpravo (polarizace pravotočivá). Pokud vektor pole při otáčení mění svou velikost, mluvíme o polarizaci eliptické.

Pro aplikaci ve WBAN sítích je kruhová polarizace anténní struktury velmi důležitá. Kruhová polarizace totiž eliminuje ztráty způsobené polarizačním nepřizpůsobením, které vzniká vlivem vzájemného pootočení přijímací a vysílací antény osobou, jež nosí aparaturu.

Kvalitu kruhové polarizace vyjadřuje osový poměr. Kružnice je speciálním případem elipsy, jejíž hlavní poloosa  $a$  je stejně dlouhá jako její vedlejší poloosa  $b$ . Osový poměr vyjadřuje poměr velikostí hlavní poloosy  $a$  a vedlejší poloosy  $a/b$  v logaritmické míře.

### 1.2.3 Textilní substrát

Antény, které mají být použity ve WBAN sítích, jsou integrované do oděvu. Jedním způsobem integrace do oděvu je anténu vyrobit na materiálu, který se chová jako textil, a tu poté do oděvu zabudovat. Avšak běžný textil vykazuje několik nedostatků. Za prvé běžný textil nemá dostatečně rovný povrch, na kterém by se

dala anténa vyrobit dostupnými metodami (např. metodou sítotisku). Za druhé není výška textilu stejná po celé jeho ploše.

Pro výrobu antén se tedy používají specializované trojrozměrné pleteniny. Tyto pleteniny jsou zkonstruovány tak, aby byly lehké a udržovaly si svou výšku po celé své ploše stejnou. Díky své konstrukci vykazují trojrozměrné pleteniny malé energetické ztráty (velká část pleteniny je vyplněna vzduchem). Pleteniny plní funkci textilního substrátu a jsou často pokryty tenkou fólií, která umožňuje jednodušší výrobu.



## 2 Kruhově polarizovaná anténa nad AMC

V této kapitole se budeme zabývat simulací anténní struktury. Nejprve si popíšeme anténu převzatou z [1]. Následně bude anténa simulována v původní, publikované verzi.

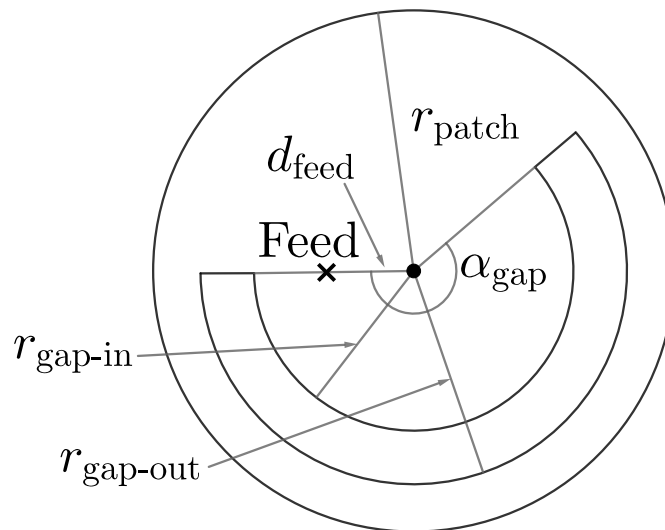
### 2.1 Popis anténní struktury

V této části si popíšeme anténní strukturu převzatou z [1]. Nejprve se budeme zabývat její fyzickou výstavbou – popíšeme si anténní prvek i AMC, poté zmíníme výsledky simulací této anténní struktury publikované v [1].

Celá anténní struktura se skládá z kruhového anténního prvku s drážkou ve tvaru písmene „C“ na konvenčním substrátu. Reflektor je tvořen umělým magnetickým vodičem (AMC), který využívá osmiúhelníkových elementů.

Kruhový flíček (obr. 2.1) má poloměr  $r_{\text{patch}} = 4,85$  mm. Konce drážky kruhového flíčku svírají mezi sebou úhel  $\alpha_{\text{gap}} = 220^\circ$ . Vnitřní a vnější poloměry drážky jsou  $r_{\text{gap-in}} = 3$  mm a  $r_{\text{gap-out}} = 4$  mm. Substrát, na němž je umístěn kruhový flíček, má výšku  $h_{\text{substrate}} = 2$  mm a relativní permitivitu  $\epsilon_r = 2,2$  [-] (obr. 2.3).

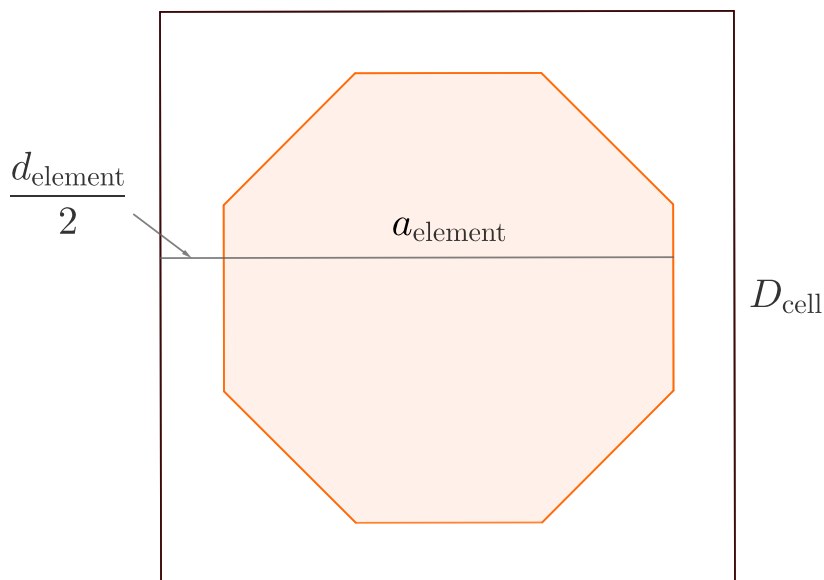
Obr. 2.1: Schéma kruhového flíčku, tvořícího anténní prvek (pohled shora)



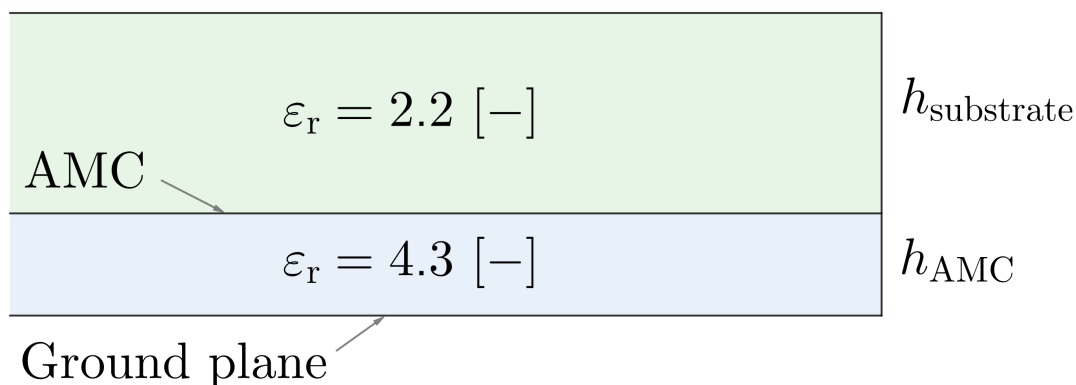
Struktura umělého magnetického vodiče je tvořena 49 buňkami uspořádanými do matice  $7 \times 7$ . Jedna buňka (obr. 2.2) má rozměr  $D_{\text{cell}} = 4,6$  mm. Osmiúhelníkový element (jeden v každé buňce) má šířku (tj. vzdálenost dvou protějších stran)  $a_{\text{element}} = 3,5$  mm. Elementy jsou posazeny uprostřed buněk, proto bude délka mezery mezi jednotlivými elementy  $d_{\text{element}} = D_{\text{cell}} - a_{\text{element}} = 4,6 - 3,5 = 1,1$  mm.

Substrát umělého magnetického vodiče má výšku  $h_{\text{AMC}} = 1$  mm a relativní permisivitu  $\varepsilon_r = 4,3$  [-] (obr. 2.3).

Obr. 2.2: Schéma jedné buňky periodické planární struktury použité jako reflektor (pohled shora)



Obr. 2.3: Vertikální struktura antény – bokorys



Celkový rozměr anténní struktury (tj. rozměr substrátu)  $D_{\text{substrate}}$  je přímo závislý na velikosti jedné AMC buňky. Platí  $D_{\text{substrate}} = 7 \cdot D_{\text{cell}} = 7 \cdot 4,6 = 32,2$  mm.

Anténní struktura je napájena standardním SMA (*SubMiniature version A*) konektorem. Vnitřní vodič konektoru je veden přes AMC a konvenční substrát k anténnímu prvku. Bod napájení kruhového flíčku se nachází ve směru jednoho z konců drážky ve vzdálenosti  $d_{\text{feed}} = 1,6$  mm od středu flíčku (viz obr. 2.1). Vnější vodič je spojen se zemní plochou na spodku celé anténní struktury.

Přehled všech těchto parametrů je v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Přehled parametrů anténní struktury

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
$h_{\text{substrate}}$ [mm]	2	$r_{\text{gap-out}}$ [mm]	4
$h_{\text{AMC}}$ [mm]	1	$D_{\text{cell}}$ [mm]	4,6
$\varepsilon_r$ [-] konvenční substrát	2,2	$a_{\text{element}}$ [mm]	3,5
$\varepsilon_r$ [-] AMC substrát	4,3	$d_{\text{element}}$ [mm]	1,1
$r_{\text{patch}}$ [mm]	4,85	$D_{\text{substrate}}$ [mm]	32,2
$\alpha_{\text{gap}}$ [°]	220	$d_{\text{feed}}$ [mm]	1,6
$r_{\text{gap-in}}$ [mm]	3		

Anténní struktura byla navržena pro pracovní kmitočet 9 GHz. Výsledky simulací v [1] jsou uspořádány do tří částí:

1. Popis odrazových vlastností reflektoru z AMC;
2. Impedanční vlastnosti anténní soustavy – činitel odrazu;
3. Vyzařovací vlastnosti anténní soustavy.

Nejdříve byla simulována periodická struktura AMC. Bodem zájmu byla hlavně fáze odrazu vlny v závislosti na frekvenci (obr. 2.4). Simulace byla provedena pro tři různé úhly dopadu ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Bylo zjištěno, že se fáze odrazu se změnou úhlu dopadu mění jen minimálně. Kmitočtové pásmo, pro které je fáze činitele odrazu v rozmezí  $\pm 90^\circ$ , je 8,36 GHz až 9,55 GHz.

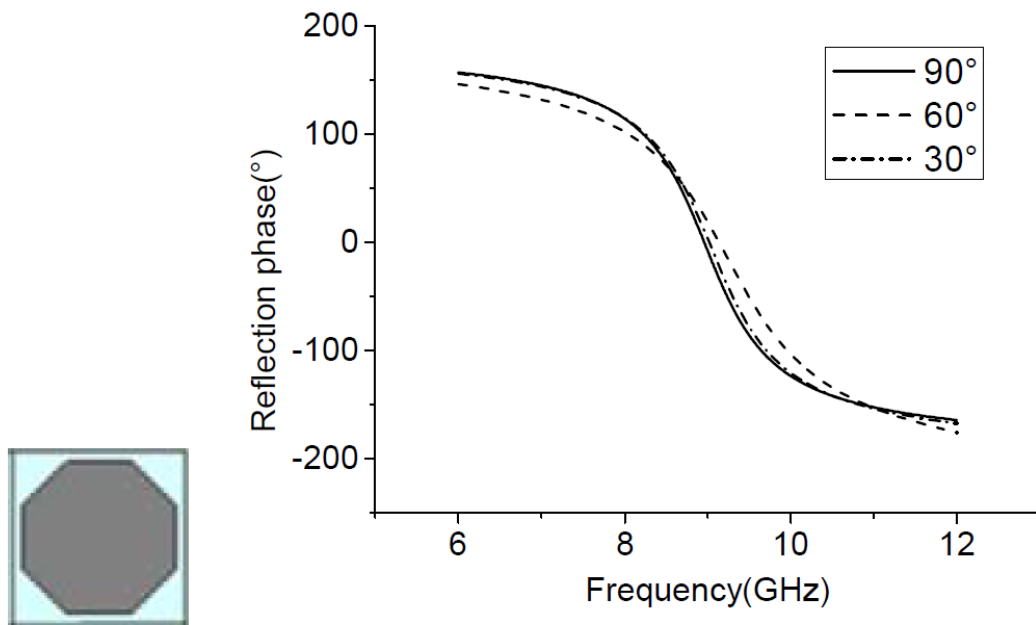
Z impedančních vlastností celé anténní struktury byla zkoumána velikost modulu činitele odrazu (obr. 2.5). Hledáno bylo kmitočtové pásmo, pro něž velikost činitele odrazu (parametr  $|S_{11}|$ ) nepřesáhla -10 dB. Impedanční šířka pásma je 7,42 GHz až 10,74 GHz. Relativní šířka pásma je 36,6%.

Pro vyzařovací vlastnosti celé anténní struktury je směrodatné ověření správného směru hlavního laloku vyzařovací charakteristiky a kruhové polarizace anténní struktury. Vyzařovací charakteristika (obr. 2.6) byla zkoumána ve dvou rovinách na pracovním kmitočtu 9 GHz. Hlavní lalok vyzařovací charakteristiky je směrem vzhůru (směr osy  $z$ ) a anténní soustava v tomto směru dosahuje zisku nad 6 dB. Pro zkoumání kvality kruhové polarizace se zjišťovalo, v jakém kmitočtovém pásmu dosahuje osový poměr hodnot menších než 3 dB (obr. 2.7). Simulován byl osový poměr ve směru osy  $z$  (tj. směr  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$  v polárních souřadnicích). Pracovní kmitočtové pásmo z hlediska kruhové polarizace je od 8,30 GHz do 9,37 GHz – relativní šířka pásma 12,1%.

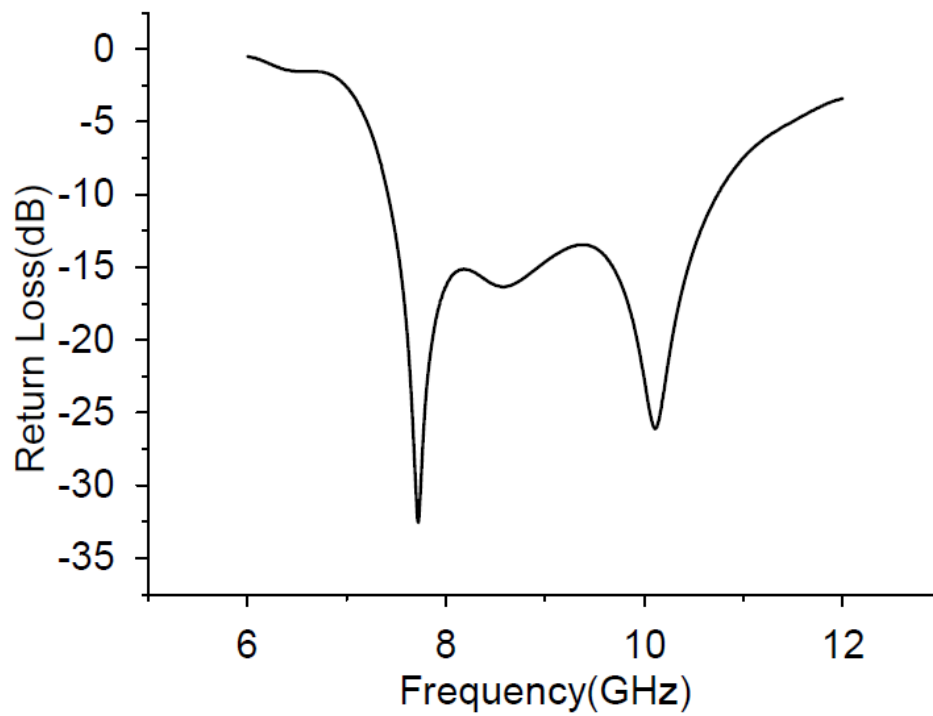
Můžeme shrnout, že anténa publikovaná v [1] má následující parametry:

- Pracovní šířka pásma z hlediska impedančního přizpůsobení ( $|S_{11}| < -10$  dB) je od 7,42 GHz do 10,74 GHz. Vzhledem k pracovnímu kmitočtu 9 GHz to činí 36,6%.
- Pracovní šířka pásma z hlediska kruhové polarizace (osový poměr je menší jak 3 dB) je od 8,30 GHz do 9,37 GHz. Vzhledem k pracovnímu kmitočtu 9 GHz to činí 12,1%.
- Směr maximálního vyzařování antény je  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$ . V tomto směru anténa na pracovním kmitočtu vykazuje zisk nad 6 dB.

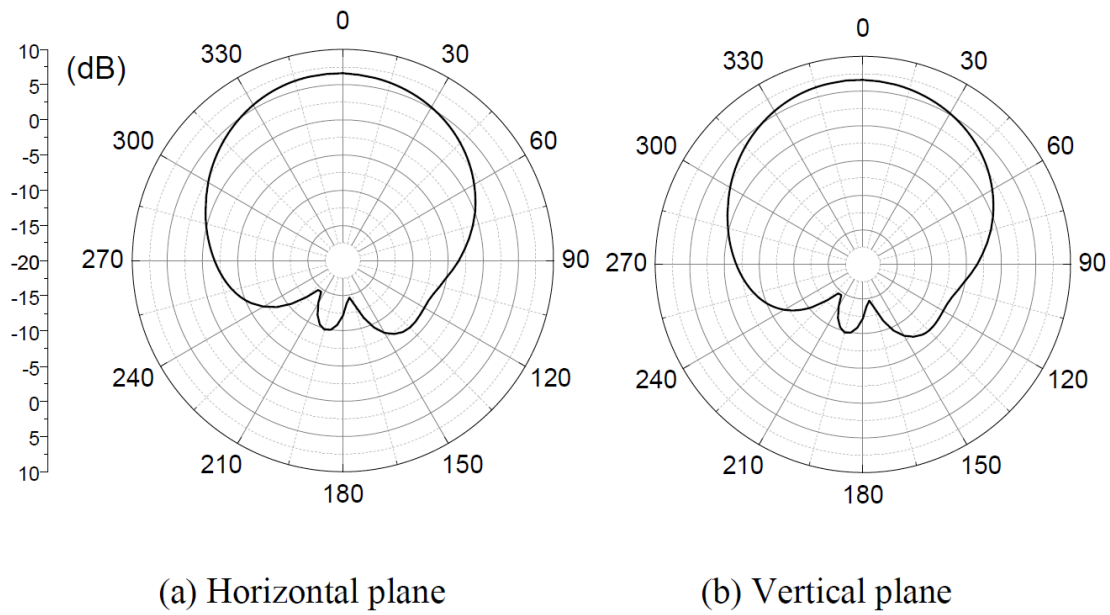
Obr. 2.4: Kmitočtová závislost fáze činitele odrazu AMC struktury – převzato z [1]



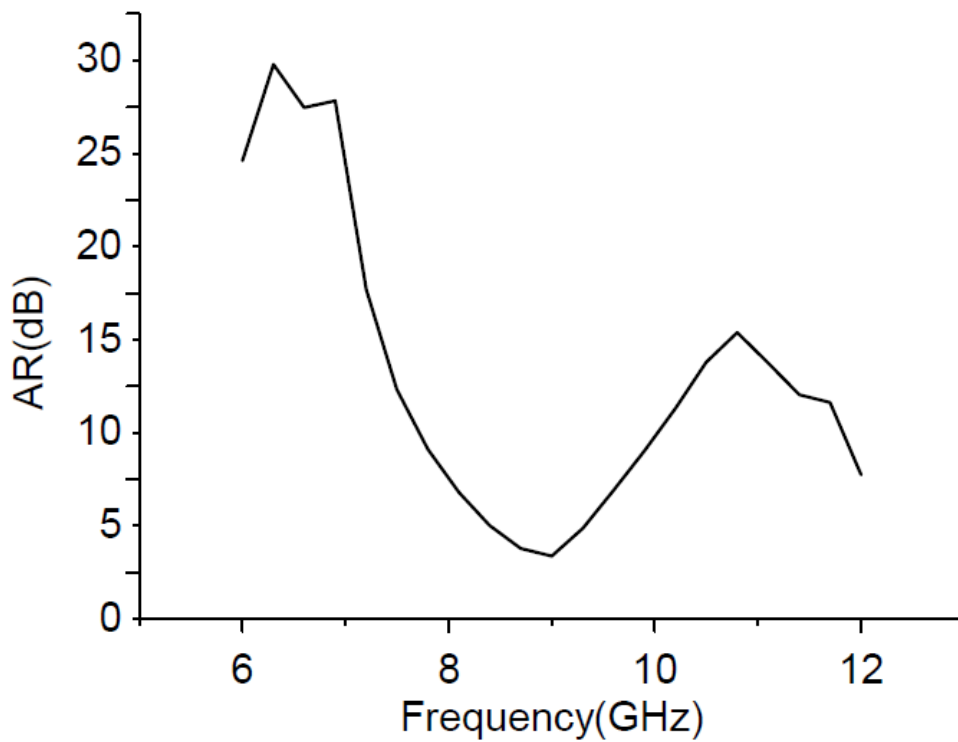
Obr. 2.5: Kmitočtová závislost velikosti  $|S_{11}|$  anténní struktury – převzato z [1]



Obr. 2.6: Vyzařovací charakteristiky anténní struktury – převzato z [1]



Obr. 2.7: Osový poměr anténní struktury ve směru  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$  – převzato z [1]



## 2.2 Simulace antény

V této části si popíšeme výsledky naší simulace anténní struktury, převzaté z [1]. Smyslem této simulace je zkontrolovat, zda jsou výsledky publikované v [1] korektní. Naše výsledky jsou srovnány s výsledky v [1] (viz podkapitulu ??).

Pracovní kmitočet simulace byl nastaven na 9 GHz. Dále byly některé vlastnosti (impedanční přizpůsobení, osový poměr) zkoumány v intervalu kmitočetů od 7 GHz do 11 GHz. Pohled na anténní strukturu v simulačním programu je na obrázku 2.8.

### 2.2.1 Impedanční vlastnosti

Závislost modulu činitele odrazu na frekvenci v naší simulaci je zobrazena v grafu 2.10. Modul činitele odrazu dosahuje na pracovním kmitočtu hodnoty -23,5 dB. Pracovní pásmo z hlediska impedančního přizpůsobení se nachází v rozmezí od 7,58 GHz do 11 GHz. Relativní šířka pásma je 38%.

Velikosti pracovních kmitočtových pásem v článku a v naší simulaci se liší pouze minimálně. V obou případech je pracovní kmitočtové pásmo cirka v rozmezí 7,5 GHz po 11 GHz. Velikost činitele odrazu na pracovním kmitočtu je v našem případě o přibližně 8 dB menší (-23,5 dB oproti -15 dB). Průběhy modulu činitele odrazu si jsou tvarem velmi podobné s jedním značným rozdílem: v článku se nachází v blízkosti 10 GHz druhé větší minimum. Příčina přítomnosti tohoto minima není známa.

### 2.2.2 Vyzařovací vlastnosti

Vyzařovací charakteristika naší simulace v rovinách s  $\varphi = 0^\circ$  a  $\varphi = 90^\circ$  je znázorněna na obrázku 2.12. Průběh osového poměru naší simulace je znázorněn v grafu 2.11. Směr hlavního laloku vyzařovací charakteristiky je totožný se směrem osy  $z$  ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$ ). Zisk antény v tomto směru přesahuje 5 dB. Vyzařování proti směru osy  $z$  (dolů) je oproti vyzařování ve směru hlavního laloku výrazně utlumené. Jedině ve směru koaxiálního napájení (viz vrchní charakteristiku v okolí  $150^\circ$  na obrázku 2.12) je vyzařování poměrově větší. Na pracovním kmitočtu nabývá osový poměr hodnoty 2,17 dB. Průběh osového poměru vykazuje pracovní kmitočtové pásmo od 8,56 GHz do 9,26 GHz (relativní šířka pásma 8%).

Směr hlavního laloku v článku i v naší simulaci je směr osy  $z$  ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$ ). Maximální zisk antény je v naší simulaci o 1dB nižší než v článku (5 dB oproti 6 dB). Tvar vyzařovací charakteristiky v naší simulaci v rovině  $\varphi = 90^\circ$  je zrcadlený vzhledem k charakteristice obou rovin v článku (viz obr. 2.6). Vyzařovací charakteristika publikovaná v článku má v obou zkoumaných rovinách totožný tvar a to i přes to, že se má jednat o vodorovnou (obr. 2.6 nalevo) a svislou rovinu (obr. 2.6 napravo).

Vlastnosti týkající se kvality kruhové polarizace naší simulace a článku se liší. Relativní velikost pracovních kmitočtových pásem se liší o 4%. Hodnota osového poměru na pracovním kmitočtu se také liší. V naší simulaci je dosaženo 2,17 dB a v článku 1,06 [–] (0,51 dB). Hodnota osového poměru na 9 GHz v textu článku nekoresponduje s publikovaným grafem 2.7, kde se jeví být nad 2,5 dB.

### 2.2.3 Odrazové vlastnosti AMC

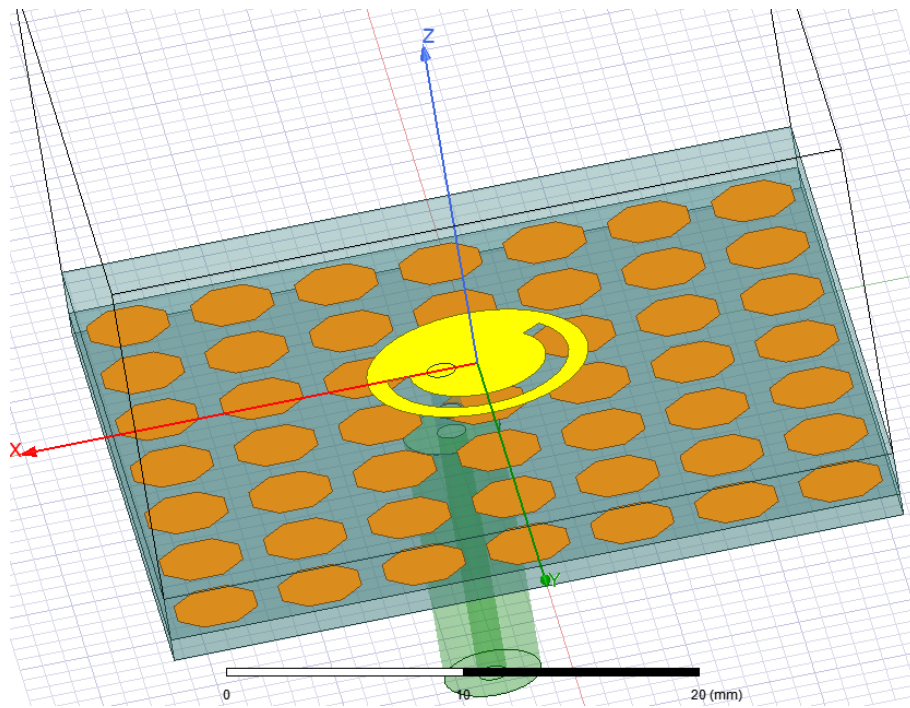
Poslední částí simulace byly odrazové vlastnosti struktury umělého magnetického vodiče. Byla provedená zjednodušená simulace a zkoumaná byla fáze činitele odrazu. Pohled na strukturu AMC v simulačním programu je na obrázku 2.14.

Simulační program umožňuje přiřadit hranicím buňky periodické vlastnosti. Ve výsledku se potom považuje naše jediná buňka za nekonečnou matici identických buněk. Budící port se nachází v dostatečné výšce nad AMC buňkou a byl nastaven tak, aby vysílal rovinnou vlnu. Zkoumána byla potom fáze činitele odrazu na tomhle portu. Vliv úhlu dopadu vlny na AMC nebyl zkoumán.

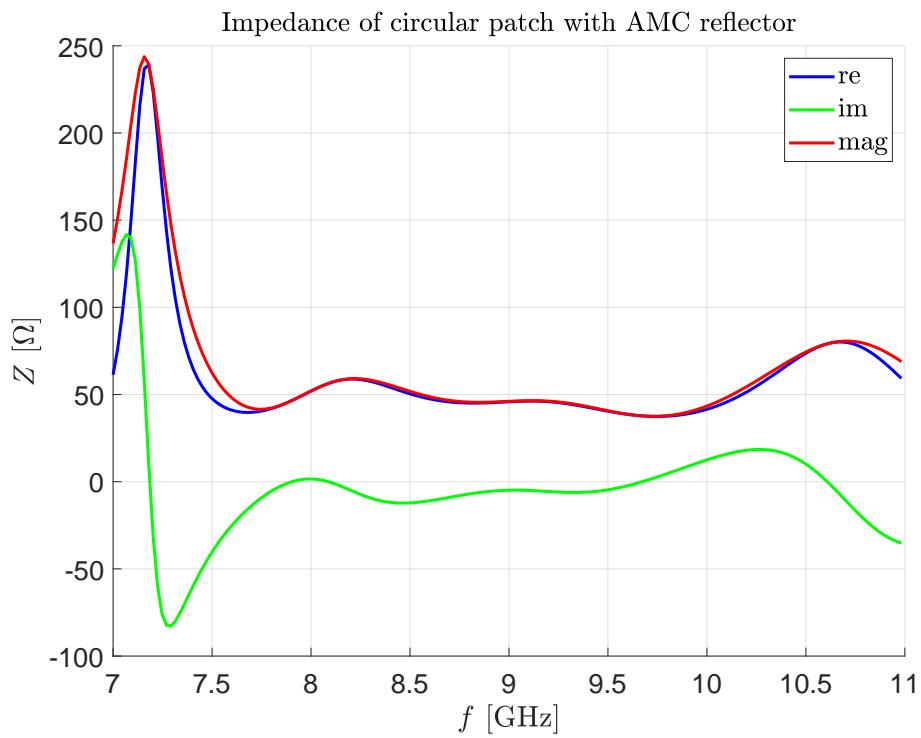
Výsledek simulace lze vidět na obrázku 2.15. Na pracovním kmitočtu (9 GHz) dosahuje fáze činitele odrazu hodnoty  $20^\circ$  a nulové fáze je dosaženo v blízkosti 10 GHz. Výsledek je blízký výsledku v [1].

Při simulaci jedné buňky AMC lze využít speciální funkci nazývanou deembedding. Díky této funkci počítáme fázi činitele odrazu v rovině periodického povrchu, a nikoli v rovině budícího portu. Správným nastavením deembeddingu (nastaven na vrchní část AMC struktury) bylo dosaženo výsledku na obr. 2.16. Fáze činitele odrazu dosahuje nulové hodnoty na kmitočtu 16,5 GHz a na pracovním kmitočtu 9 GHz je  $150^\circ$ . Výsledek získaný se správně nastaveným deembeddingem je kmitočtově posunut o 6,5 GHz oproti výsledku bez nastaveného deembeddingu.

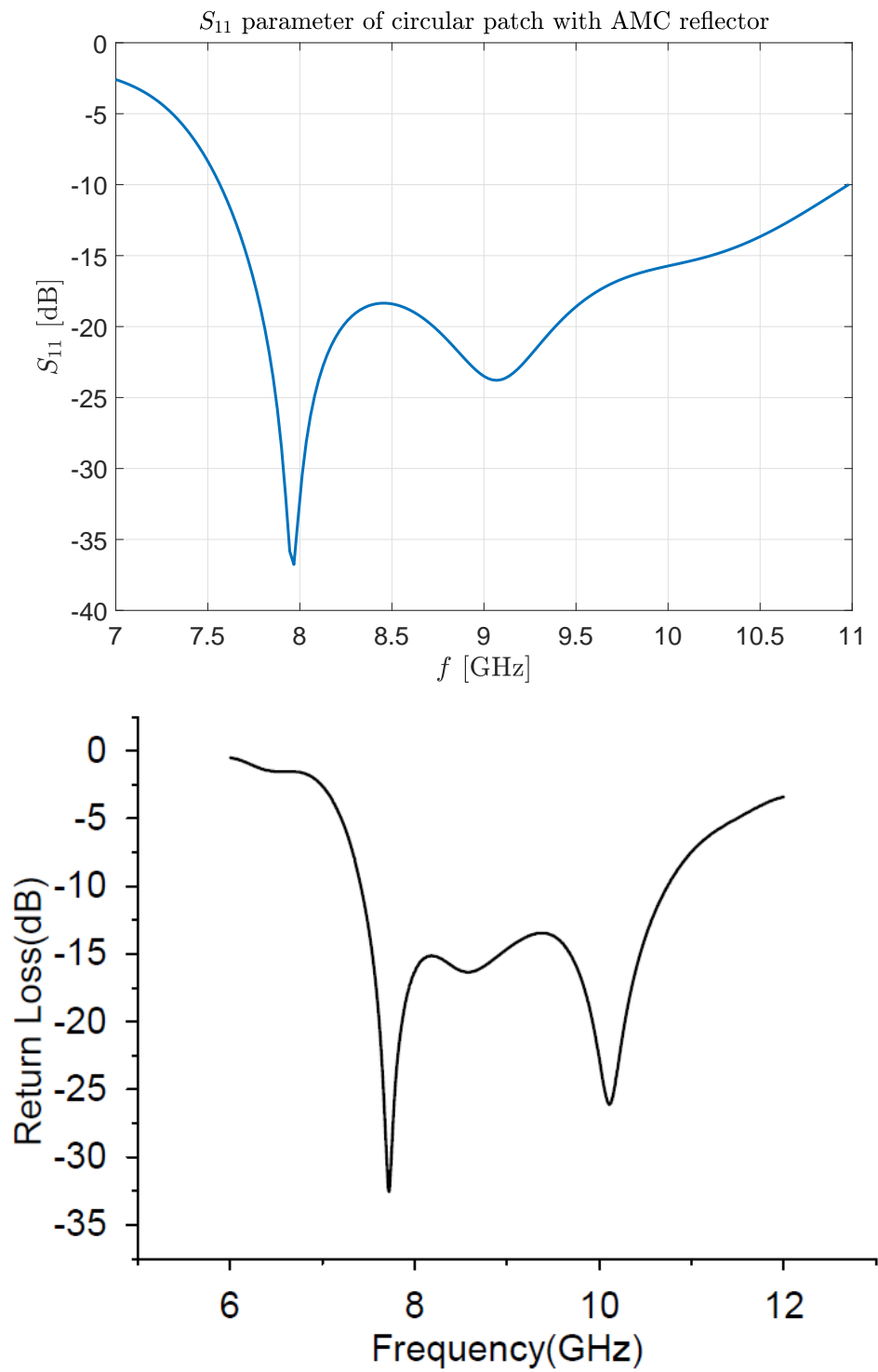
Obr. 2.8: Pohled na anténní strukturu v simulačním programu – naše simulace



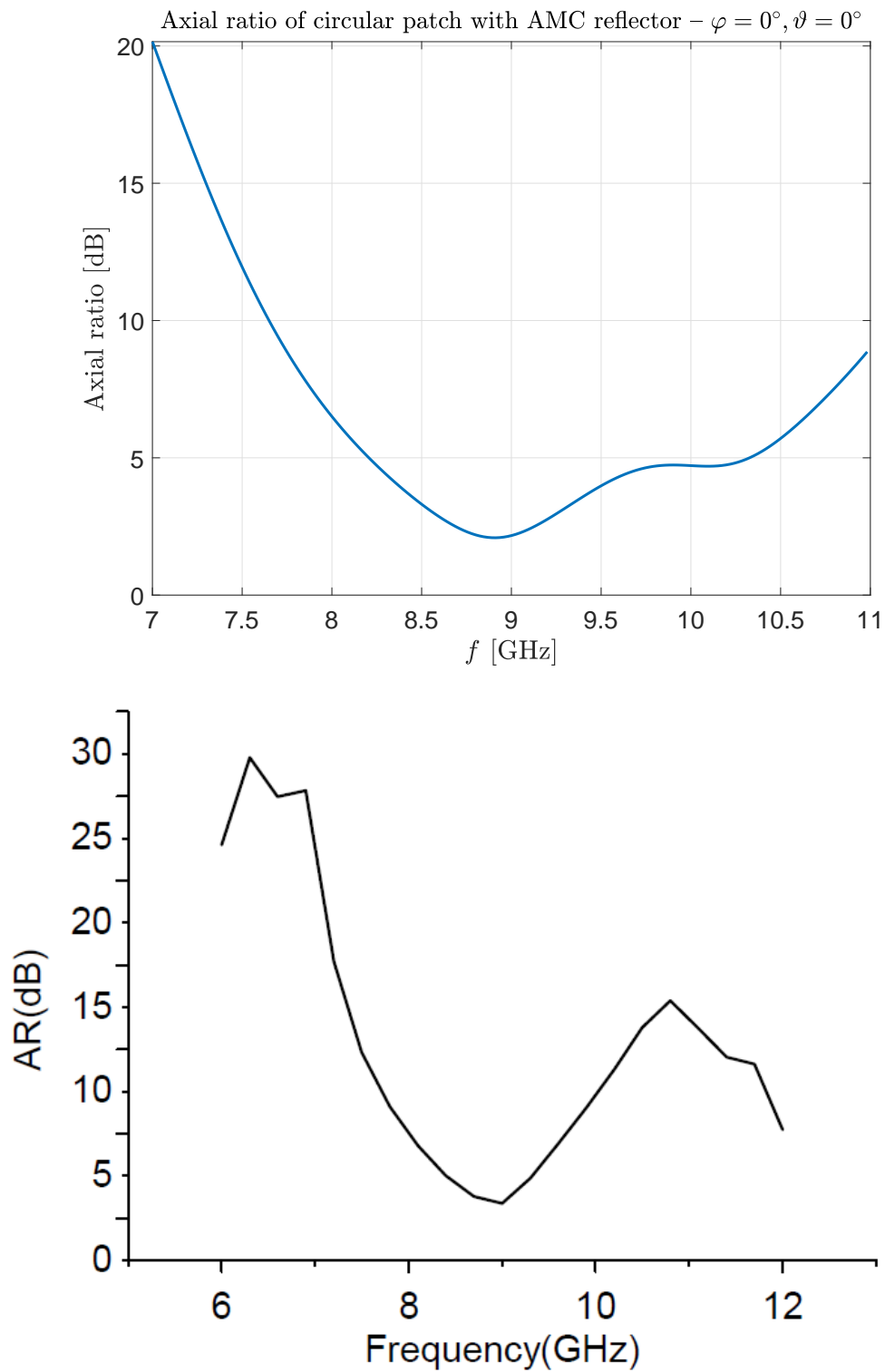
Obr. 2.9: Kmitočtová závislost impedance (celková velikost, reálná i imaginární část) – naše simulace



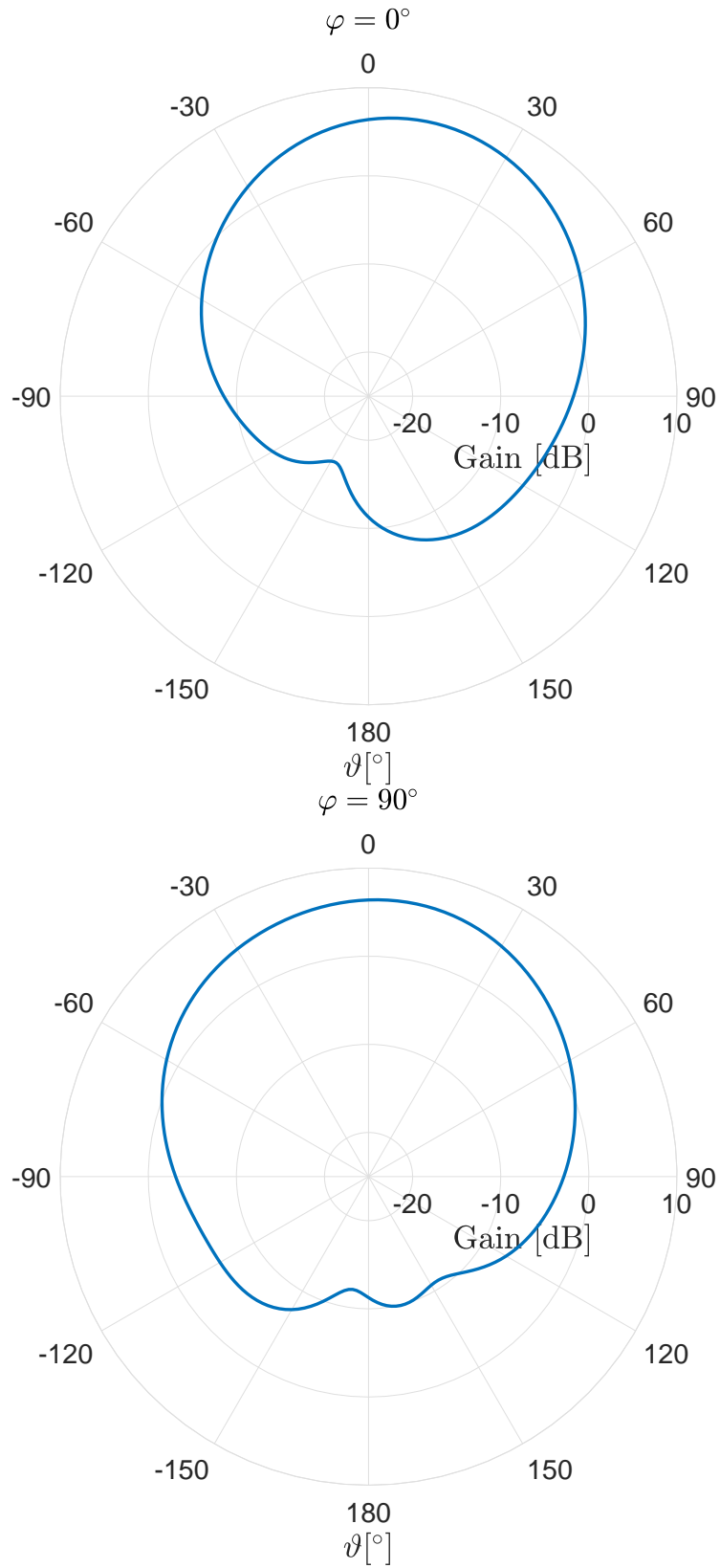
Obr. 2.10: Kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu  $|S_{11}|$  – naše simulace (nahore). Dole pro srovnání obr. z [1].



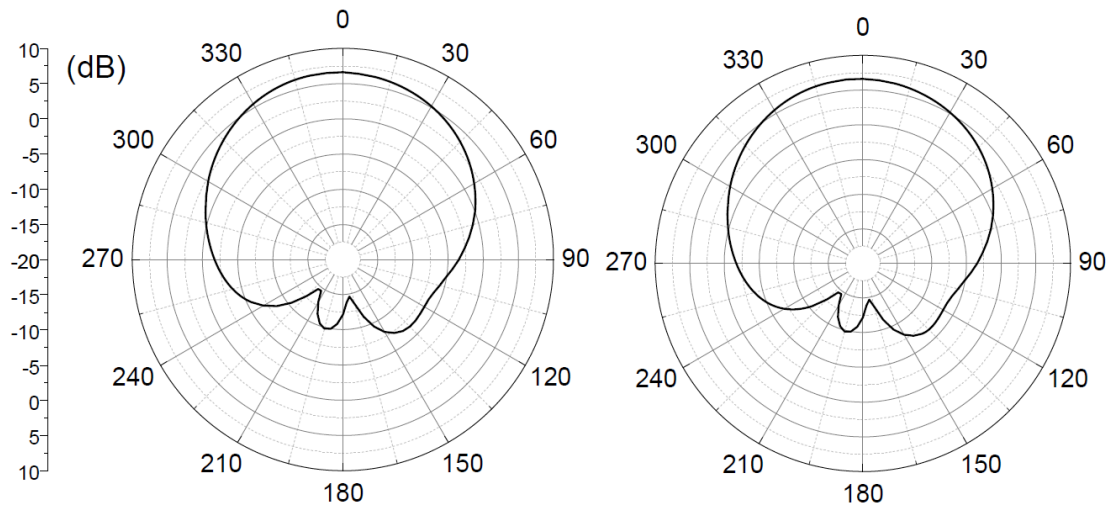
Obr. 2.11: Kmitočtová závislost osového poměru (pro  $\varphi = 0^\circ$ ;  $\vartheta = 0^\circ$ ) – naše simulace (nahore). Dole pro srovnání obr. z [1].



Obr. 2.12: Vyzařovací charakteristika v rovinách  $\varphi = 0^\circ$  (nahore) a  $\varphi = 90^\circ$  (dole) na pracovním kmitočtu – naše simulace



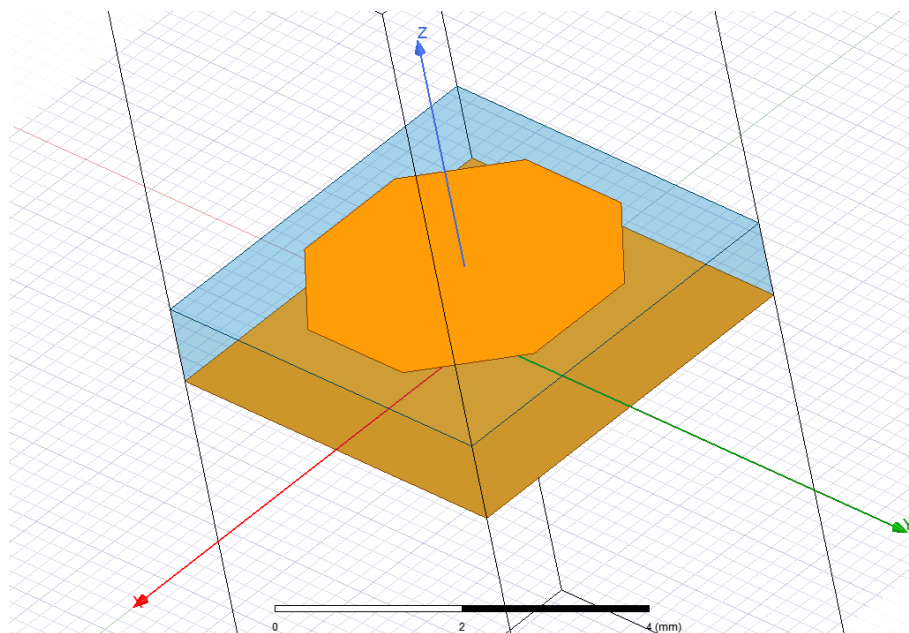
Obr. 2.13: Vyzařovací charakteristika anténní struktury – převzato z [1] (pro srovnání s obr. 2.12)



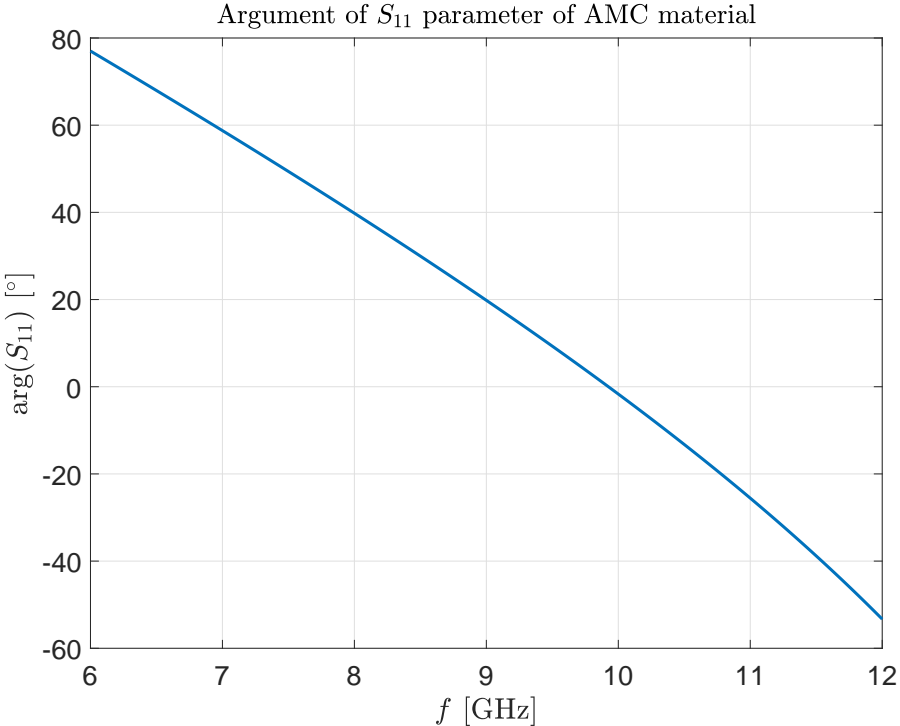
(a) Horizontal plane

(b) Vertical plane

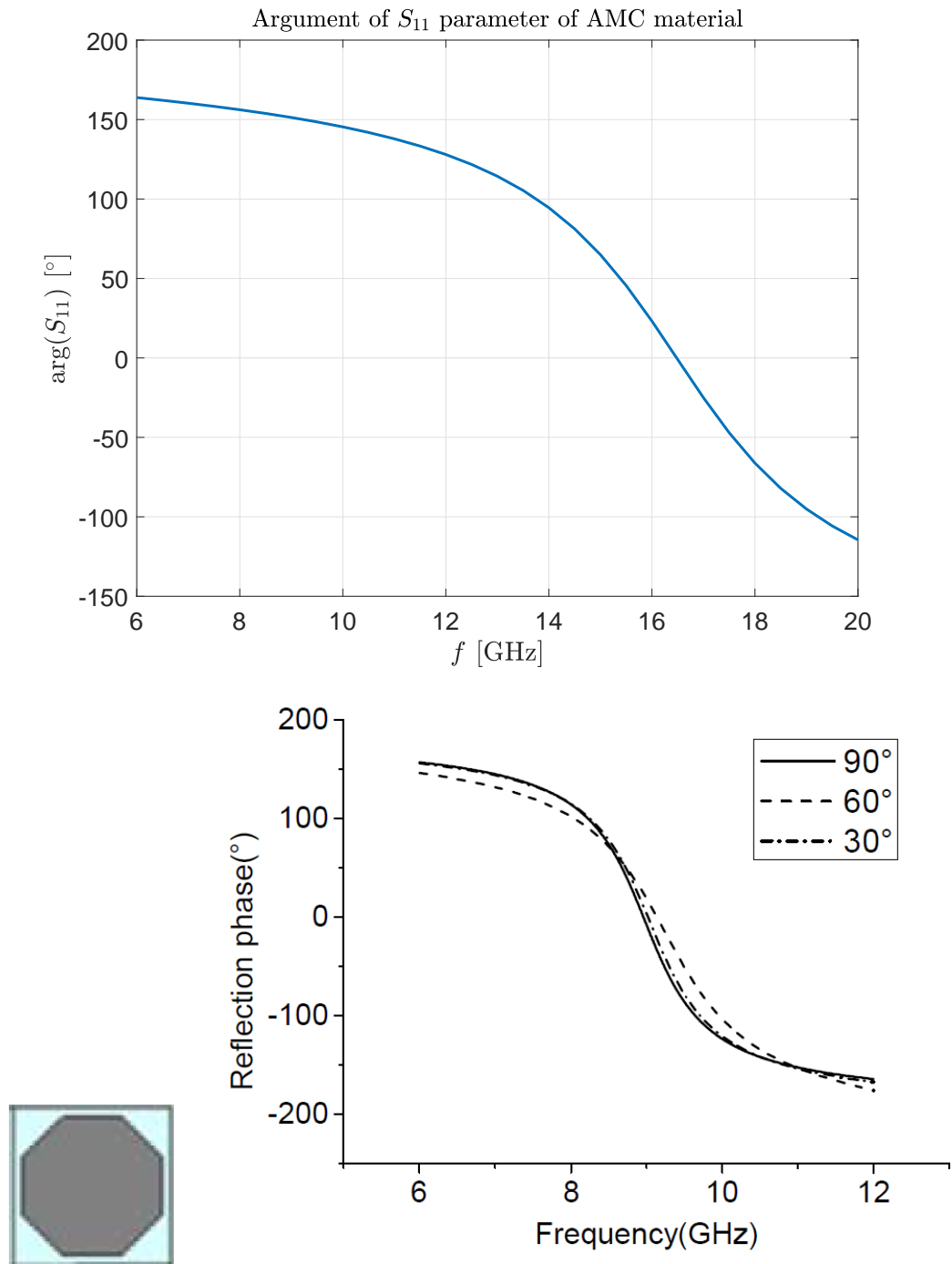
Obr. 2.14: Pohled na AMC strukturu v simulačním programu – naše simulace



Obr. 2.15: Kmitočtová závislost fáze činitele odrazu AMC struktury – naše simulace



Obr. 2.16: Kmitočtová závislost fáze činitele odrazu AMC struktury se správně nastaveným budícím portem – naše simulace (nahore). Dole pro srovnání obr. z [1]





## 3 Textilní anténa pro ISM pásmo 5,8 GHz

Cílem práce je upravit anténu z článku [1] tak, aby pracovala v ISM pásmu 5,8 GHz, mohla být vyrobena z trojrozměrné pleteniny jako substrátu a využita jako nositelná anténa. Použili jsme přibližné výpočty a jednoduché změny parametrů flíčkové antény a AMC. Simulací změněného flíčku a AMC ukážeme, zda úprava je možná.

### 3.1 Textilní substrát 3D097

Nejprve pár informací k použitému textilnímu substrátu. Jedná se o trojrozměrnou pleteninu 3D 097 (modrá) vyrobenou firmou SINTEX a. s. Pletenina je vyrobena z polyesteru a PET monofilamentu. Její výška je  $h_{\text{textile}} = 2,59$  mm a její relativní permitivita je  $\varepsilon_r = 1,22$  [-].

Pro účely výroby sítotiskem je potřeba, aby potišťené části pleteniny byly pokryty vyhlazovací fólií. Jedná se o bílou fólii s výškou  $h_{\text{foil}} = 0,05$  mm a relativní permitivitou  $\varepsilon_r = 3,1$  [-].

V simulacích bude vždy uvážěn textilní substrát s vyhlazovací fólií na jeho vrchní straně. Reflektor AMC struktury nebude vyroben metodou sítotisku, tudíž není potřeba mít na jeho místě pleteninu pokrytou fólií.

### 3.2 Úprava antény

Porovnáním délky vlny na pracovním kmitočtu 9 GHz na původním substrátu a délky vlny na trojrozměrné pletenině na novém pracovním kmitočtu 5,8 GHz dostaneme poměr, podle kterého lze přibližně vypočítat nové rozměry kruhového flíčku. Délka vlny na substrátu (9GHz):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{2,2}} = 0,6742 \text{ [-]} \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c \cdot \delta}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 0,6742}{9 \cdot 10^9} = 22,47 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Délka vlny pleteniny (5,8 GHz):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{1,22}} = 0,9054 \text{ [-]} \quad (3.3)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c \cdot \delta}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 0,9054}{5,8 \cdot 10^9} = 46,83 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Poměr obou délek vln potom je:

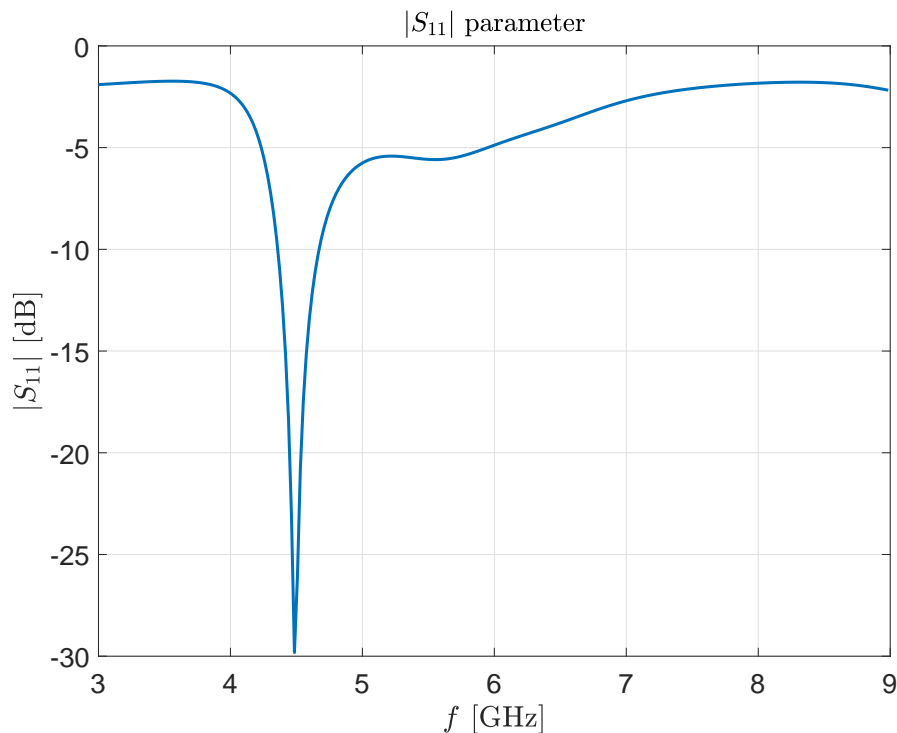
$$\frac{\lambda_{\text{text}}}{\lambda_{\text{sub}}} = \frac{46,83}{22,47} = 2,084 \text{ [-]} \quad (3.5)$$

Vynásobíme-li parametry flíčku z tabulky 2.1 tímto poměrem, dostáváme jeho nové parametry:

$$\begin{aligned} r_{\text{patch}} &= 10,1 \text{ mm}, \\ r_{\text{gap-in}} &= 6,2 \text{ mm}, \\ r_{\text{gap-out}} &= 8,3 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Simulace kruhového flíčku je provedena na téměř stejné struktuře, která byla simulována v kapitole 2.2. Jedinou změnou mimo velikost kruhového flíčku je výměna původních substrátů za textilní substrát s fólií. Závislost modulu činitele odrazu v této simulaci je na obrázku 3.1. Vidíme, že kruhový flíček je přizpůsobený na kmitočet 4,49 GHz. Lze tedy usoudit, že bude možný optimalizovat kruhový flíček v nové anténní struktuře pro práci v pásmu ISM 5,8 GHz.

Obr. 3.1: Kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu  $|S_{11}|$  – přepočtený flíček

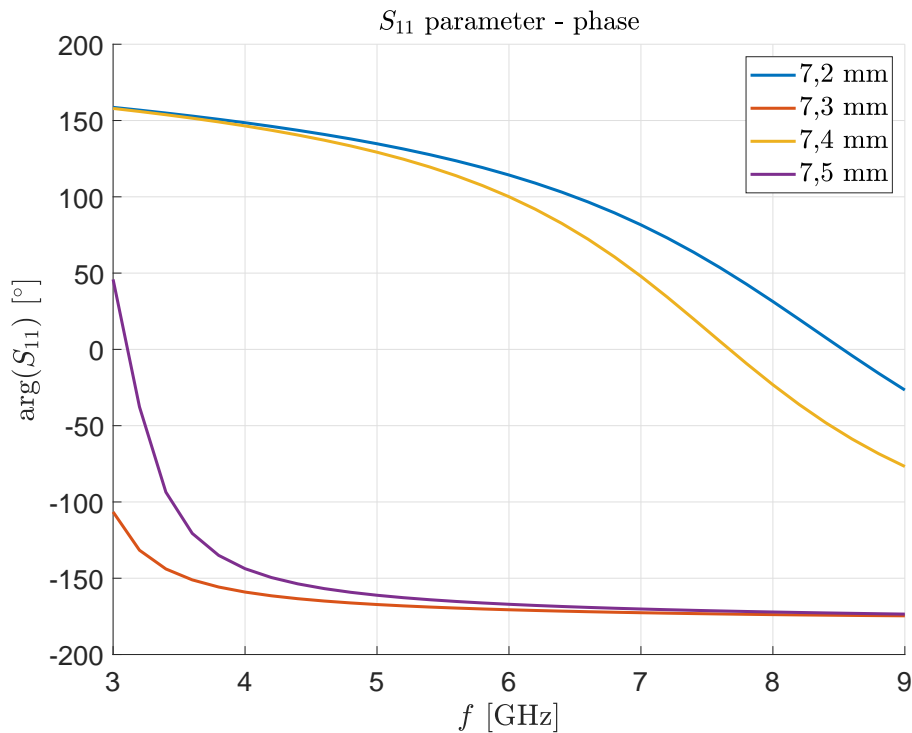


### 3.3 Umělý magnetický vodič

#### 3.3.1 Osmiúhelníkový AMC

Při úpravě AMC je možné měnit velikost buňky  $D_{\text{cell}}$  a šířku elementu  $a_{\text{element}}$ . Cílem je dosáhnout nulové fáze činitele odrazu na kmitočtu 5,8 GHz a zároveň zachovat kompaktní velikost celé anténní struktury. Dalším důležitým faktorem je navržené

Obr. 3.2: Kmitočtová závislost fáze činitele odrazu s frekvenčními skoky – osmiúhelníkový AMC



velikosti přizpůsobit technologii síťotisku, tzn. veškeré parametry uvádět s přesností na desetiny milimetru.

Zvětšením obou parametrů zároveň snižuje pracovní kmitočet AMC struktury. Dosažení kmitočtu 5,8 GHz by vyžadovalo zvětšení nad šestinásobek původních parametrů. Zvětšením parametrů na jejich šestinásobek nejenom mnohonásobně zvětší AMC strukturu, ale také ztíží výrobu. Zvětšením právě 3,33 krát došlo k frekvenčnímu skoku. Činitel odrazu dosahoval nulové hodnoty na 4,4 GHz. Příčina frekvenčního skoku je neznáma.

Další možností bylo pouze trochu zvětšit velikost buňky a nezávisle zvětšovat velikost elementů. Dosud neznámým důvodem docházelo v některých případech při postupném zvětšování elementů k frekvenčním skokům. Situaci ilustruje obrázek 3.2. Velikost buňky je  $D_{\text{cell}} = 7,6$  mm a šířka elementů je postupně měněná z 7,2 mm až po 7,5 mm. V případech, kdy ke skokům nedošlo, tak nebylo možné docílit optimalizace AMC na 5,8 GHz.

AMC struktura založena na osmiúhelníkových elementech není tedy vhodná pro naše účely. Simulace ukazují, že by celá struktura musela být zvětšena na více než šestinásobek své původní velikosti. Naší snahou je navrhnout anténu co nejmenší. Ostatně může nastat situace, že malá změna parametrů může znamenat velký kmitočtový posun (viz obrázek 3.2).

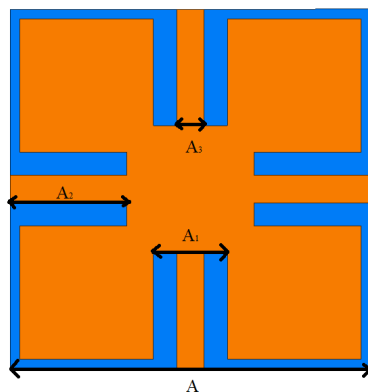
### 3.3.2 AMC s křížovými elementy

V této kapitole popíšeme AMC strukturu s vodivými elementy ve tvaru kříže (převzato z [4]) a její úpravu pro naši anténní strukturu. Tento AMC nahradí AMC s osmiúhelníkovými elementy.

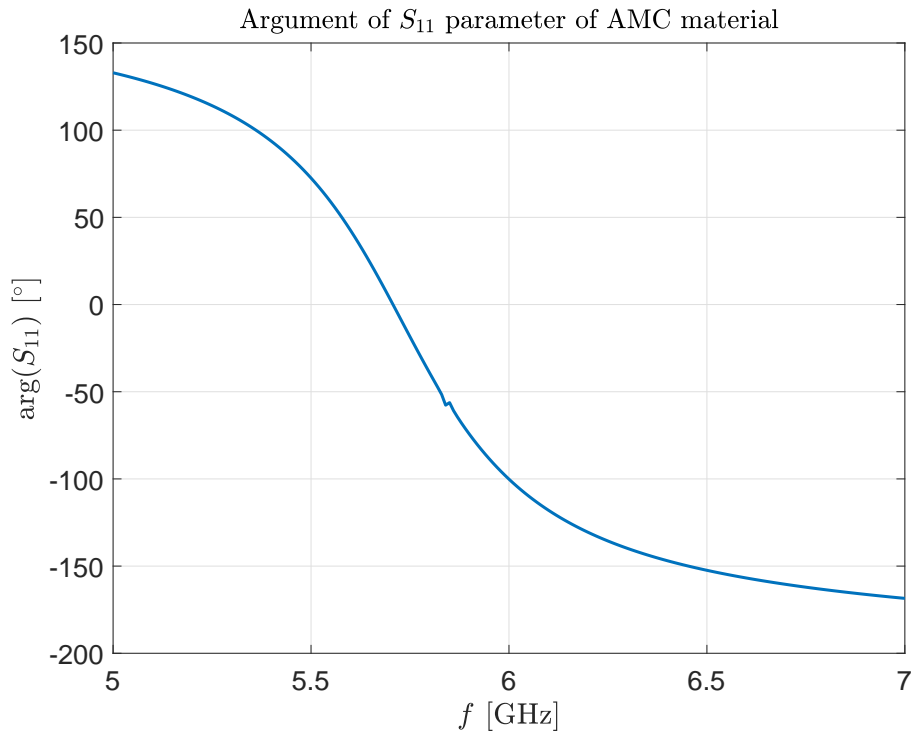
Jedná se o čtvercovou buňku s odrazovým elementem ve tvaru čtverce (viz obrázek 3.3). V [4] byl substrát použitý pro AMC strukturu z pellenové pleteniny s ýškou 1,8 mm a relativní permitivitou  $\epsilon_r = 1,08$  [-]. AMC elementy byly osazeny na substrátu a na spodní straně substrátu je zemní plocha. Parametry křížových elementů v [4] byly  $A = 17$  mm,  $A_1 = 3,5$  mm,  $A_2 = 5,5$  mm a  $A_3 = 1,3$  mm. AMC v [4] byl navržen na kmitočet 5,8 GHz (ověřili jsme simulací).

Pro naši anténní strukturu bylo potřeba nahradit pleteninu z pellonu textilním substrátem 3D097 s vyhlazovací fólií. Po nahrazení se změnilo chování AMC a bylo potřeba změnit parametry křížových elementů. Po několika iteracích změn jsme dosáhli výsledků na obrázku 3.4. Parametry změněné struktury byly  $A = 16$  mm,  $A_1 = 3,3$  mm,  $A_2 = 5,2$  mm a  $A_3 = 1,2$  mm. Na kmitočtu 5,8 GHz dosahuje fáze činitele odrazu  $-39^\circ$  a nulová fáze je na kmitočtu 5,71 GHz.

Obr. 3.3: Struktura AMC s křížovými elementy – pohled shora



Obr. 3.4: Kmitočtová závislost fáze činitele odrazu – křížový AMC



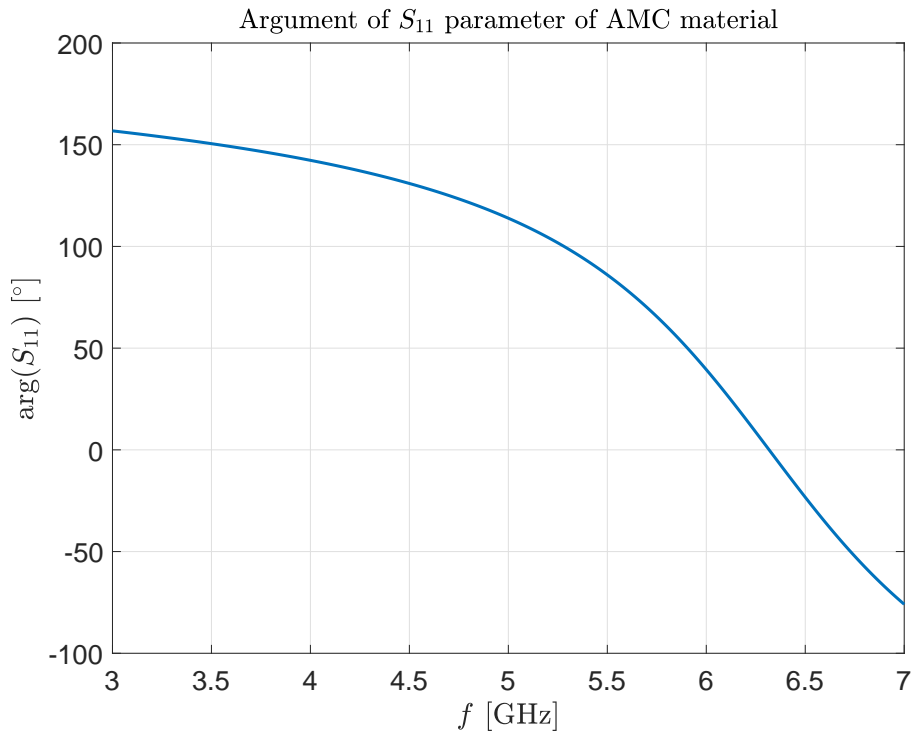
### 3.3.3 AMC se čtvercovými elementy

AMC se čtvercovými elementy má stejnou strukturu jako oba AMC předtím. Jedná se o čtvercové buňky. Na spodní straně textilního substrátu je vodivý reflektor a na horní straně jsou osazeny čtvercové elementy.

Úprava byla provedena pro pracovní kmitočet 5,8 GHz, přičemž byly parametry struktury zaokrouhlovány na desetiny milimetrů (kvůli výrobní technologii). Po několika iteracích změn jsme došli k těmto parametrům: rozměr buňky  $D_{\text{cell}} = 18$  mm, šířka čtvercového elementu  $a_{\text{sq}} = 10,5$  mm.

Obrázek 3.5 ukazuje závislost fáze činitele odrazu na kmitočtu. Fáze je rovná nule na 6,32 GHz. Na 5,8 GHz je fáze činitele odrazu  $61^\circ$ . Výsledek není naprosto ideální, opět se jedná o jistý kompromis mezi požadovanými vlastnostmi a nároky na výrobu. Dále opět docházelo k obdobným frekvenčním skokům, které byly popsány v kapitole 3.3.1 a obrázku 3.2.

Obr. 3.5: Kmitočtová závislost fáze činitele odrazu – čtvercový AMC



## 3.4 Buzení anténního prvku

### 3.4.1 Koaxiální sonda

Předtím, než bylo možné odsimulovat celou anténní strukturu s AMC z kapitoly 3.3.2, bylo potřeba provést výměnu napájecího vedení.

Koaxiální sonda, která je vedena skrz oba substráty, je nevhodná pro naši anténu. Protože je k anténě přivedena ze spodní strany, znemožňuje anténu připevnit na rovné povrchy. Dalším problémem koaxiální sondy je použitý textilní substrát. Při deformaci textilu se kolem vnitřního vodiče budou vytvářet nehomogenity (volná místa), které by mohly způsobit změnu chování antény. Napájení se bude tedy realizovat planární strukturou (mikropásek, koplanár, apod.).

### 3.4.2 Mikropáskové vedení

Navržené planární vedení je zakončeno SMA konektorem<sup>1</sup>. Použité vedení bude také sloužit jako impedanční transformátor, tudíž nebude jeho charakteristická impedance rovna charakteristické impedanci SMA konektoru ( $50 \Omega$ ).

<sup>1</sup>Pro katalogový list viz přílohy

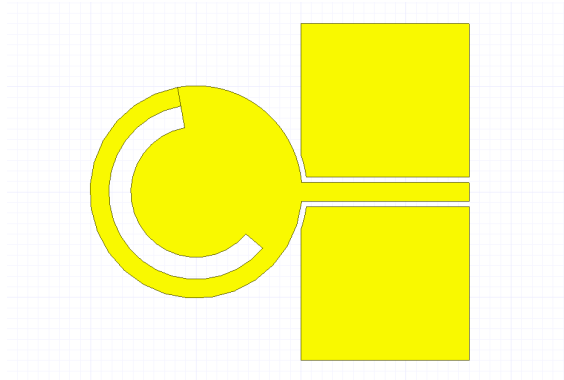
Nejprve bylo uváženo mikropáskové vedení. Vlastní mikropásek byl umístěn na vrchním substrátu a jeho zemní plocha byla na úrovni AMC elementů. Zemní plocha vedení zasahovala do AMC struktury. Aby bylo možné přizpůsobit hranovou impedanci anténního prvku k systému s charakteristickou impedancí  $50 \Omega$ , bylo třeba navrhnout vedení s charakteristikou impedancí blízko  $100 \Omega$  (zjištěno empiricky). Šířka mikropásku byla stanovena na 3,7 mm. Dimenze mikropásku jsou nevhodné pro použitý SMA konektor, neboť průměr dielektrika je menší než šířka mikropásku. Mikropásek bylo potřeba vyměnit.

### 3.4.3 Koplanární vlnovod

Mikropáskové vedení bylo vyměněno za koplanární vlnovod. Charakteristická impedance a elektrická délka vlnovodu byly převzaty od mikropáskového vedení a dle potřeby pozměněny. Díky struktuře koplanárního vlnovodu nebylo nutné zavádět zemní plochu na úrovni AMC. Dimenze navrženého vlnovodu také vyhovovaly použitému konektoru.

Na obrázku 3.6 je vyobrazen kruhový flíček s koplanárním vlnovodem. Parametry vlnovodu jsou různé pro anténu s křížovým a anténu se čtvercovým AMC. Drážka v kruhovém flíčku byla pootočená tak, aby bylo dosaženo lepší kruhové polarizace.

Obr. 3.6: Kruhový flíček s koplanárním napájením – pohled shora



## 3.5 Kompletní anténní struktura

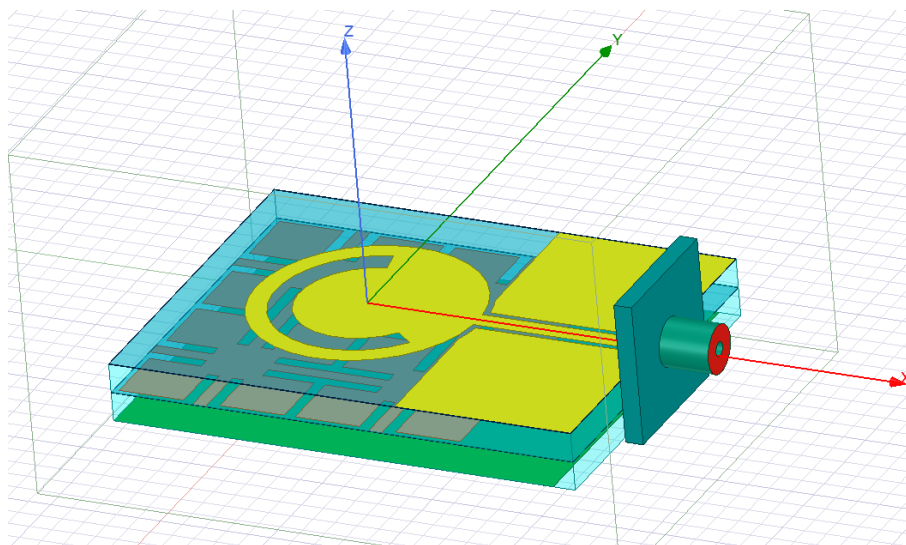
### 3.5.1 Anténa s křížovým AMC

V této kapitole si popíšeme výsledky simulace antény s křížovým AMC. Na obrázku 3.7 je vidět anténa v simulačním programu. AMC struktura je tvořena čtyřmi buňkami uspořádanými do matice  $2 \times 2$ . Spodní reflektor (na obrázku zelený) je na konci zkrácen, aby nebyl přes konektor vodivě spojen se zemní plochou vedení. Parametry koplanárního vlnovodu pro tuto anténu jsou  $l_{\text{cop}} = 16$  mm,  $w_{\text{cop}} = 1,8$  mm a  $s_{\text{cop}} = 0,5$  mm.

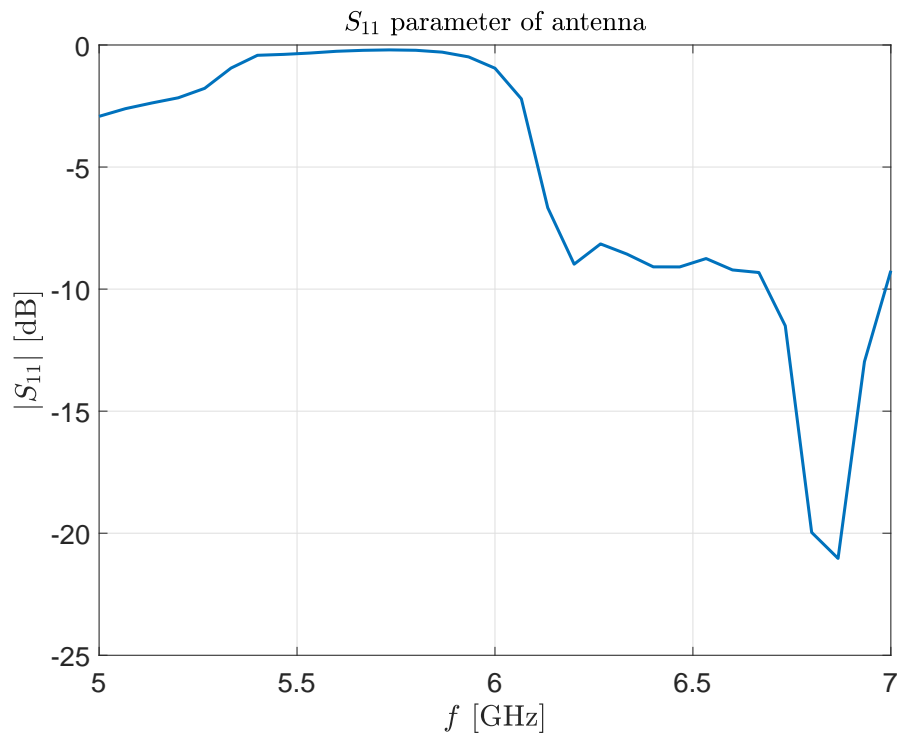
Anténa v této konfiguraci vyzařuje nejenom ve směru osy  $z$ , ale také se vytvořily postranní laloky (viz obrázek 3.10 dole). Osový poměr (obr. 3.9) je také poněkud vyšší, na 5,8 GHz dokonce nabývá hodnoty nad 20 dB. Impedanční přizpůsobení (obr. 3.8) by také bylo potřeba zrevidovat – hrozil by obdobný problém jako v případě mikropáskového vedení.

Z výše uvedených důvodů (především vyzařovací charakteristika) bylo rozhodnuto vyměnit typ elementů AMC struktury. Využijeme čtvercových elementů.

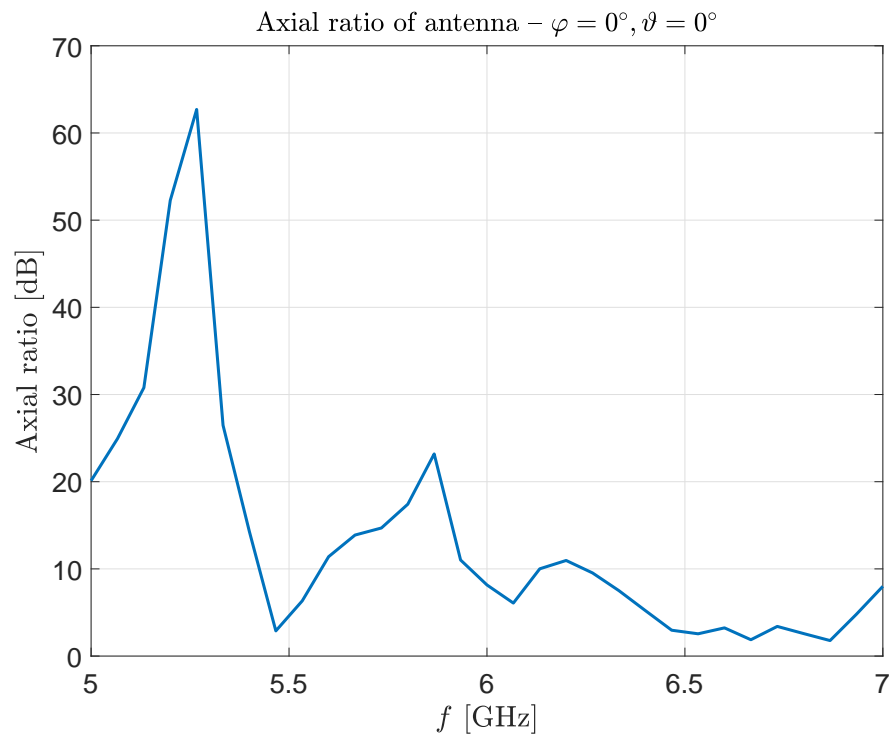
Obr. 3.7: Pohled na anténu s křížovým AMC v simulačním programu



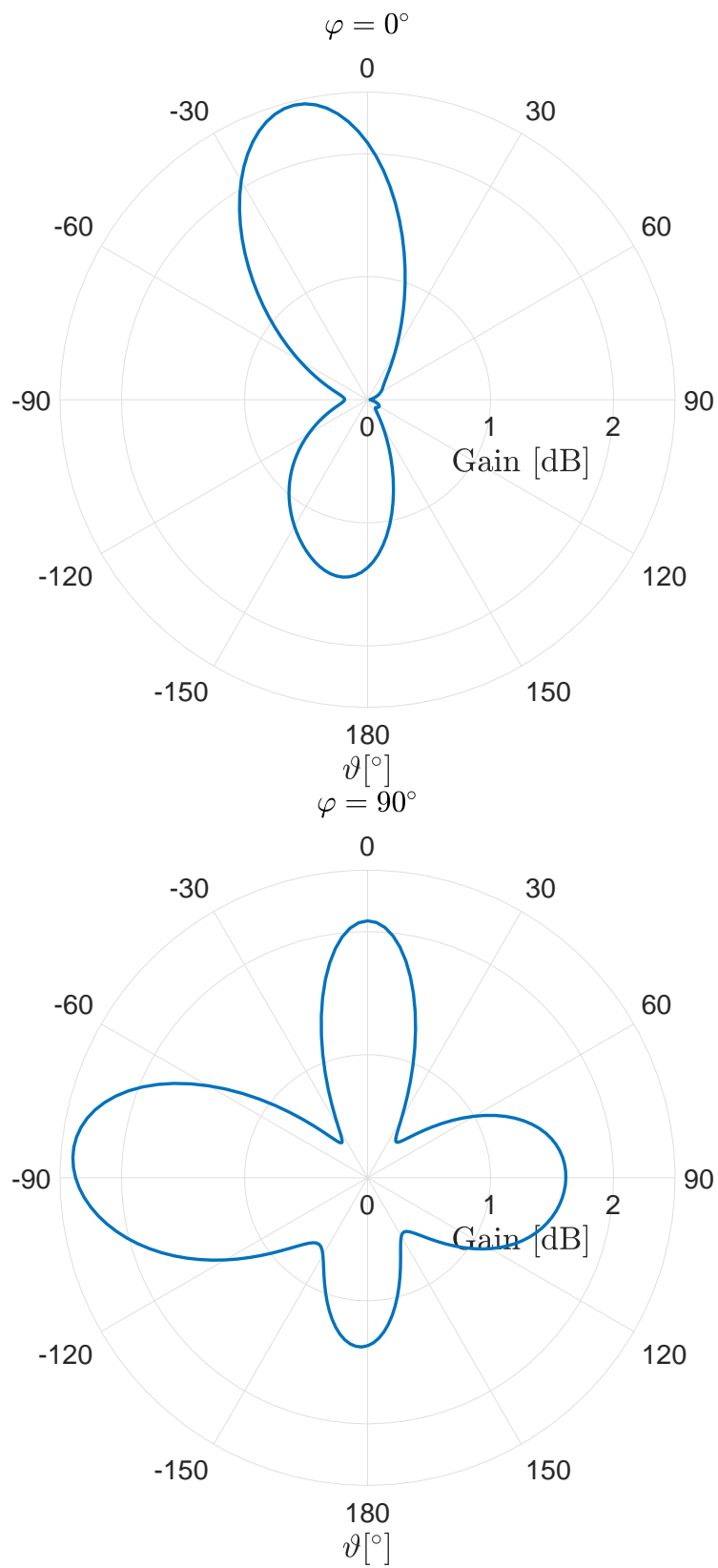
Obr. 3.8: Kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu  $|S_{11}|$  – anténa s křížovým AMC



Obr. 3.9: Kmitočtová závislost osového poměru (pro  $\varphi = 0^\circ$ ;  $\vartheta = 0^\circ$ ) – anténa s křížovým AMC



Obr. 3.10: Vyzařovací charakteristika v rovinách  $\varphi = 0^\circ$  (nahore) a  $\varphi = 90^\circ$  (dole) na pracovním kmitočtu



### 3.5.2 Anténa se čtvercovým AMC

V této kapitole si popíšeme výsledky simulace antény se čtvercovým AMC. Pohled na anténu v simulačním programu je na obrázku 3.11. AMC je tvořen čtyřmi buňkami. Reflektor (zelený na obrázku 3.11) je zkrácen, aby nedošlo k vodivému spojení se zemní plochou koplanárního vlnovodu.

Změnou elementů AMC struktury se změnila impedanční vlastnosti, a tak bylo potřeba znovu upravit koplanární vlnovod. Nejlepšího možného výsledku bylo dosaženo s  $l_{\text{cop}} = 16$  mm,  $w_{\text{cop}} = 2$  mm a  $s_{\text{cop}} = 0,4$  mm.

Pásmo impedančního přizpůsobení antény (viz obr. 3.12) je 5,67 GHz až 6,26 GHz – pokrývá celé pásmo ISM 5,8 GHz. Na pracovním kmitočtu 5,8 GHz má činitel odrazu velikost -11 dB. Impedance antény (viz obr. 3.13) na 5,8 GHz je přibližně  $(28 - j4) \Omega$ .

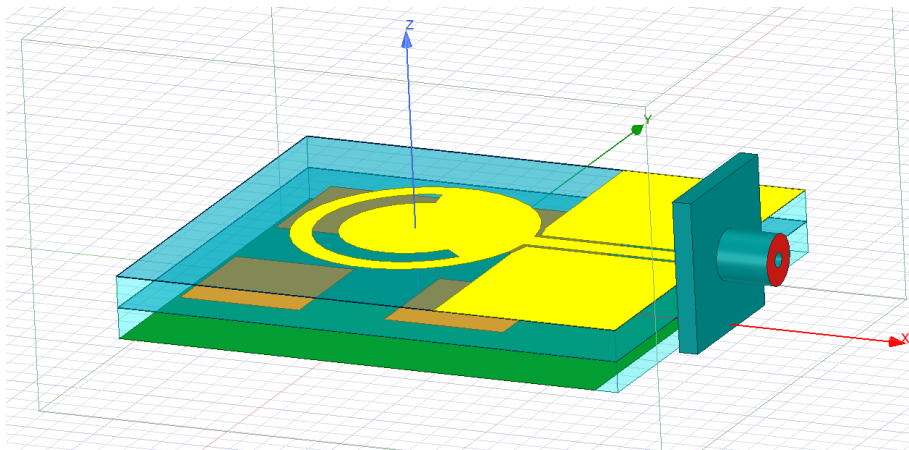
Kvalita kruhové polarizace byla zkoumána ve směru osy  $z$  ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$ ). Osový poměr (viz obr. 3.14) nabývá minima 4,08 dB na 5,87 GHz. Na pracovním kmitočtu 5,8 GHz nabývá hodnoty 4,21 dB. Způsob jak snížit osový poměr pod 3 dB bez znehodnocení impedančního přizpůsobení nebyl nalezen.

Hlavní lalok vyzařovací charakteristiky (viz obr. 3.15) směřuje směrem vzhůru. Vlivem napájecího vedení je směr maxima vyzařování vychýleno o  $20^\circ$  směrem k napájení – maximum vyzařování ve směru  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 20^\circ$  (viz obr. 3.15 nahoře). Celkový zisk antény ve směru maxima je 5,2 dBi a ve směru kolmo vzhůru ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$ ) je zisk 3,6 dBi.

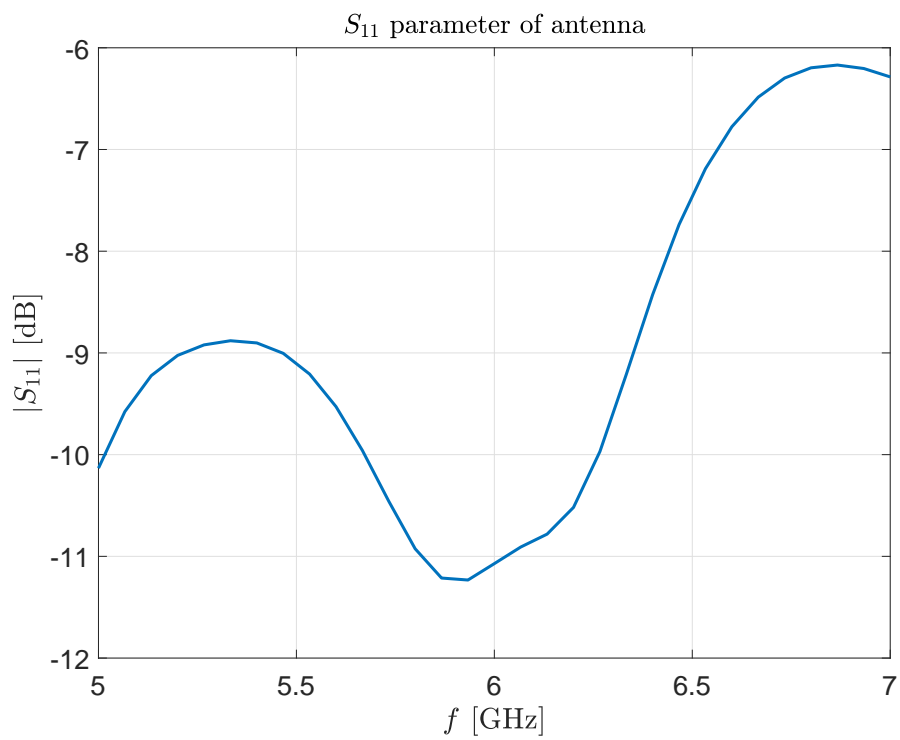
Kromě hlavního laloku vykazuje anténa také nezanedbatelné vyzařování směrem dolů. Hlavním důvodem zpětného vyzařování je nejpravděpodobněji použitý SMA konektor a malý rozměr AMC struktury. K ověření této myšlenky jsme provedli simulaci s přidavnými AMC buňkami a prodlouženým reflektorem tak, aby odstínil konektor (přírubu konektoru bylo nutné v simulaci zmenšit). Vlivem změn se zmenšilo zpětné vyzařování o přibližně 8 dB, a dokonce zisk hlavního laloku se zvětšil o skoro 4 dB – vlivem větší AMC struktury (viz obrázek 3.16). Zpětné vyzařování by se tedy teoreticky dalo omezit přidáním AMC buněk a stíněním konektoru.

Anténa se čtvercovým AMC bude vyrobena a její vlastnosti budou ověřeny měřením.

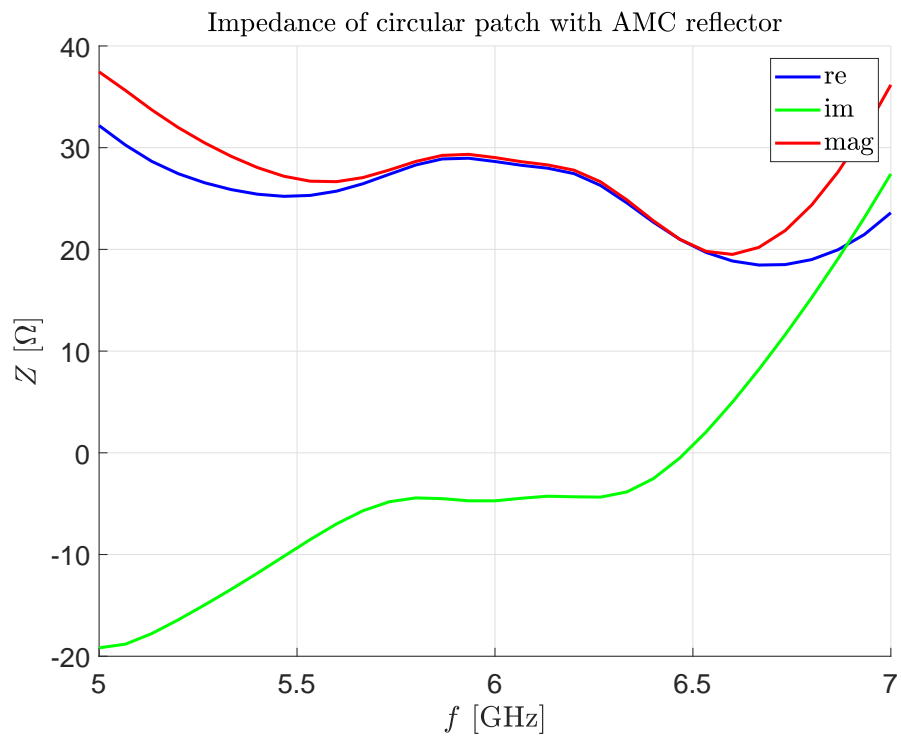
Obr. 3.11: Pohled na anténu se čtvercovým AMC v simulačním programu



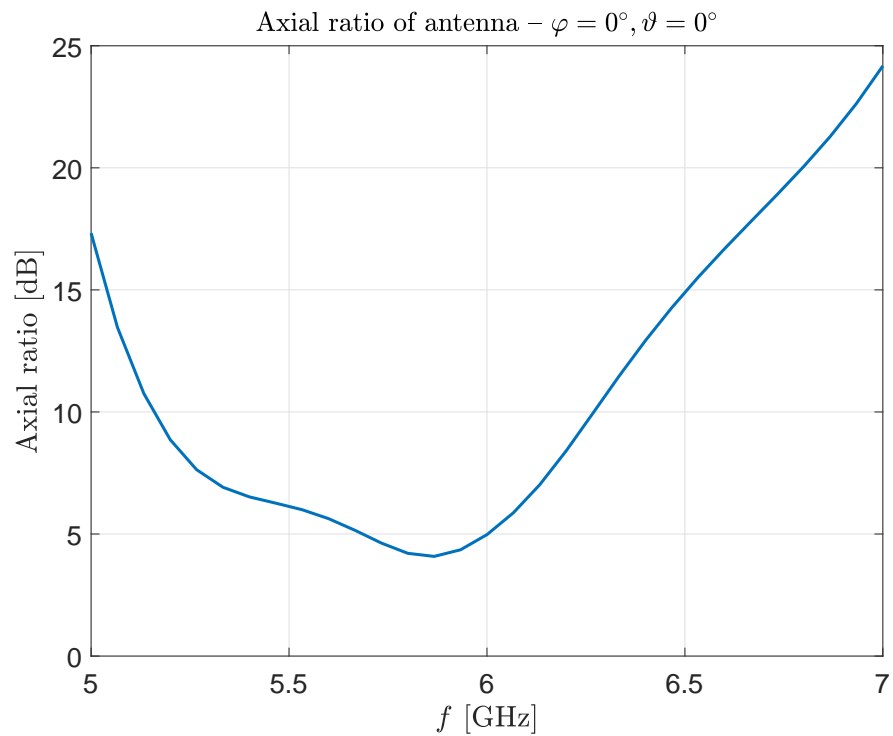
Obr. 3.12: Kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu  $|S_{11}|$  – anténa se čtvercovým AMC



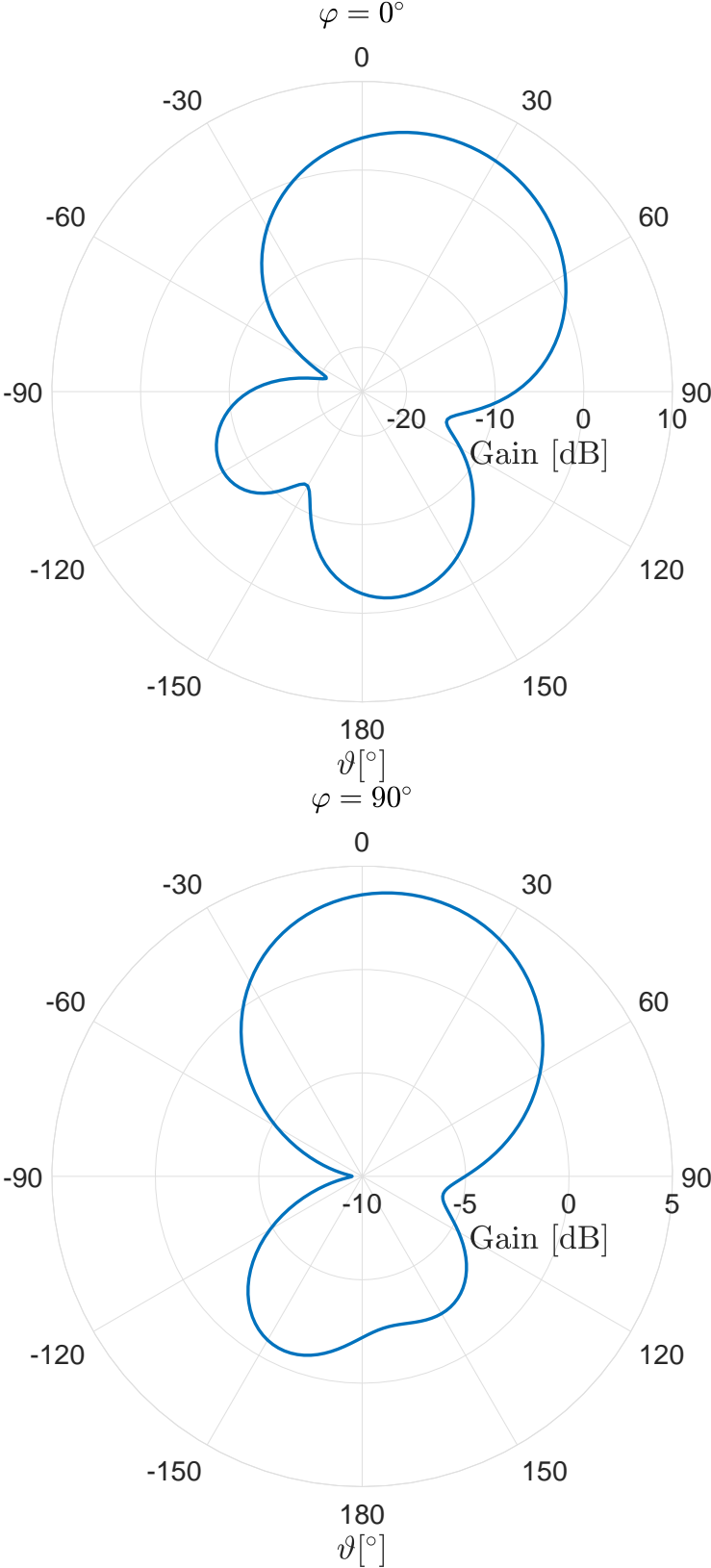
Obr. 3.13: Kmitočtová závislost impedance (celková velikost, reálná i imaginární část) – anténa se čtvercovým AMC



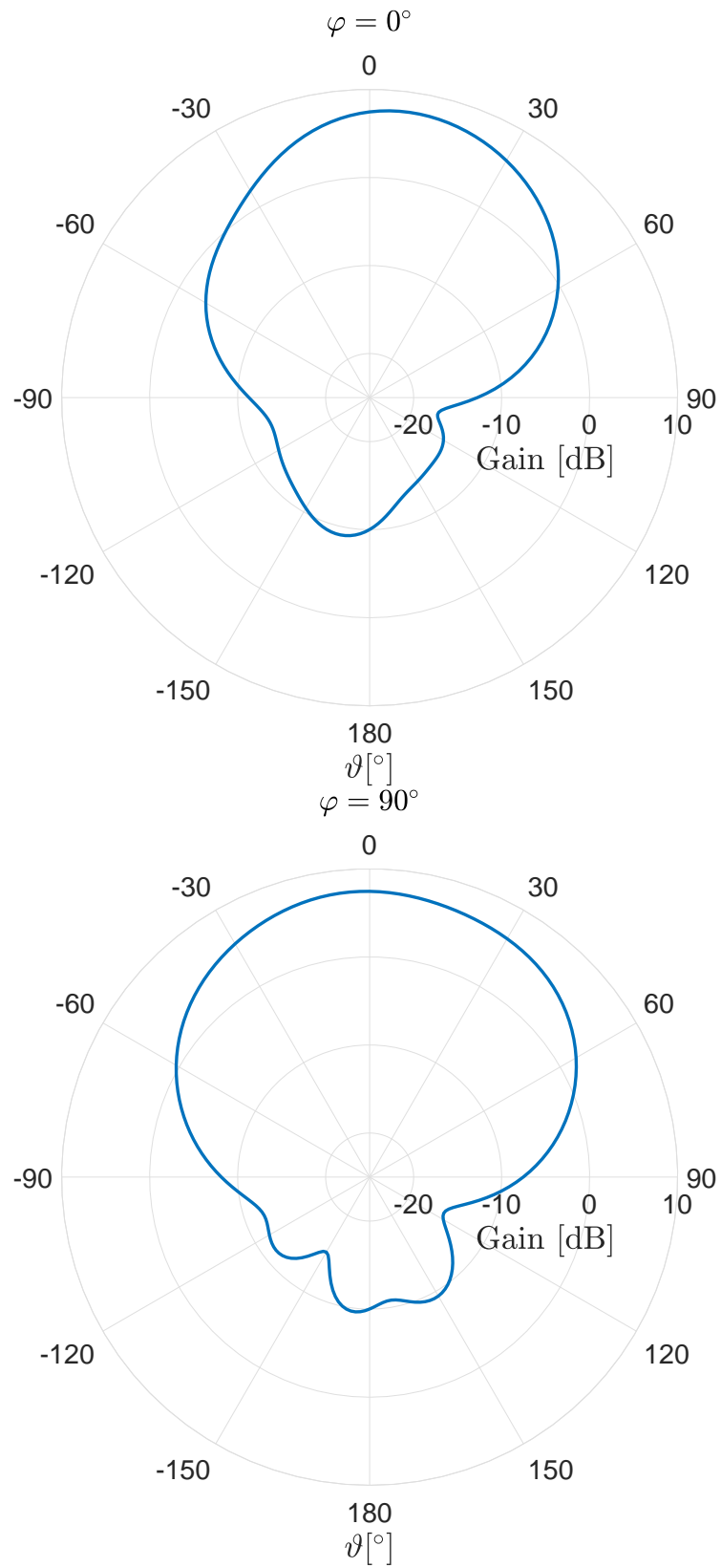
Obr. 3.14: Kmitočtová závislost osového poměru (pro  $\varphi = 0^\circ$ ;  $\vartheta = 0^\circ$ ) – anténa se čtvercovým AMC



Obr. 3.15: Vyzařovací charakteristika v rovinách  $\varphi = 0^\circ$  (nahore) a  $\varphi = 90^\circ$  (dole) na pracovním kmitočtu



Obr. 3.16: Vyzařovací charakteristika v rovinách  $\varphi = 0^\circ$  (nahore) a  $\varphi = 90^\circ$  (dole) na pracovním kmitočtu – potlačení zpětného vyzařování





## 4 Výroba a měření antény

V této kapitole se budeme zabývat výrobou navržené antény a také změřením jejich vlastností. Měření slouží především jako způsob ověření výsledků provedených simulací.

### 4.1 Výroba antény

Nyní si popíšeme způsob výroby antény simulované v kapitole 3.5.2.

Původně měly být všechny části (kromě reflektoru) vytištěny na textilní substrát pokrytý fólií metodou sítotisku. Nakonec nebylo možné realizovat jak kruhový flíček s koplanárním vlnovodem, tak i AMC strukturu sítotiskem. Pouze kruhový flíček s napájecím vlnovodem byly vyrobeny metodou sítotisku. Použitá byla stříbrná vodivá pasta.

Textilní substrát, na kterém byl vytištěn kruhový flíček, byl z obou stran zakryt fólií. Fólii na spodní straně (nepotištěná strana) nebylo možné odstranit bez poničení substrátu, a tak tam byla ponechána. Díky tomu byly AMC elementy obklopeny z obou stran fólií. Vliv této přídavné fólie je podle další simulace velmi nepatrný – vede k malému frekvenčnímu posuvu impedančního přizpůsobení a zvýšení osového poměru o cca. 0,3 dB.

Dále byl vyříznut vytištěný motiv a další, stejně velký kus textilního substrátu pro AMC elementy.

AMC elementy byly vyleptány z měděné vrstvy, která byla z jedné strany pokryta lepidlem. Přebytečné lepidlo bylo odstraněno. Následně byly kovové elementy navzájem spojeny proužky lepící pásky. Spojené elementy byly potom nalepeny na připravený kus textilního substrátu pokrytý fólií. Lepící páska byla poté odstraněna.

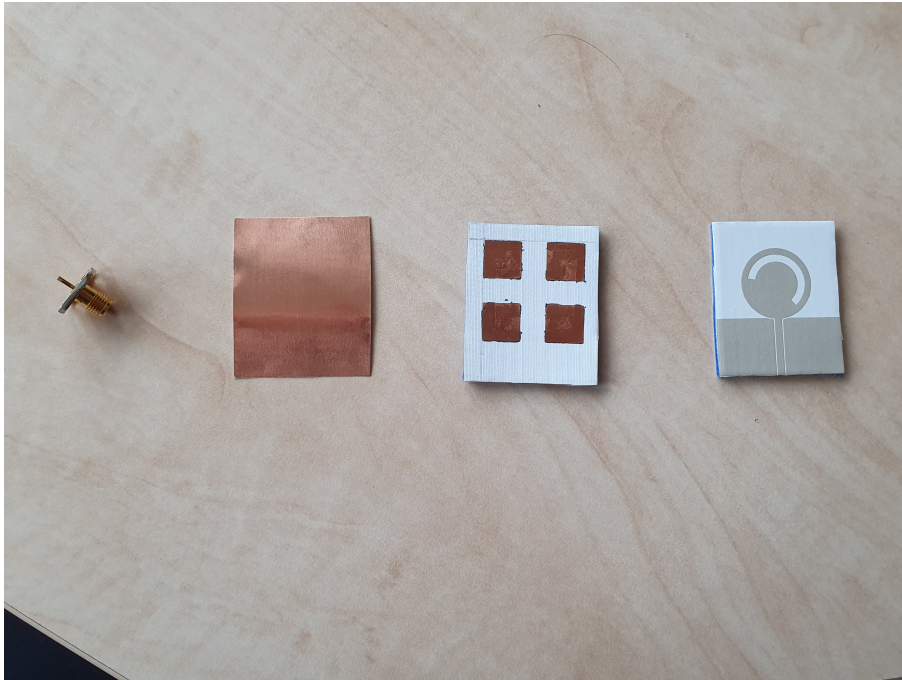
Oba kusy textilu (jeden s flíčkem, druhý s AMC elementy) byly k sobě přilepeny oboustrannou lepící fólií.

Reflektor byl vyříznut z měděné fólie pokryté lepidlem a nalepen na spodní stranu antény.

Naposledy byl speciálním vodivým lepidlem přilepen SMA konektor k anténě. Lepidlo muselo přes noc vyschnout. Pro kontrolu bylo vyzkoušeno, zda nedošlo díky lepidlu k vodivému spojení vnějšího a vnitřního vodiče vlnovodu.

Fotografie z výroby antény viz na obrázcích 4.1 a 4.2.

Obr. 4.1: Části antény – zleva SMA konektor, reflektor, spodní substrát s AMC, vrchní substrát s flíčkem



Obr. 4.2: Kompletní vyrobená anténa – proces schnutí lepidla



## 4.2 Měření vlastností antény

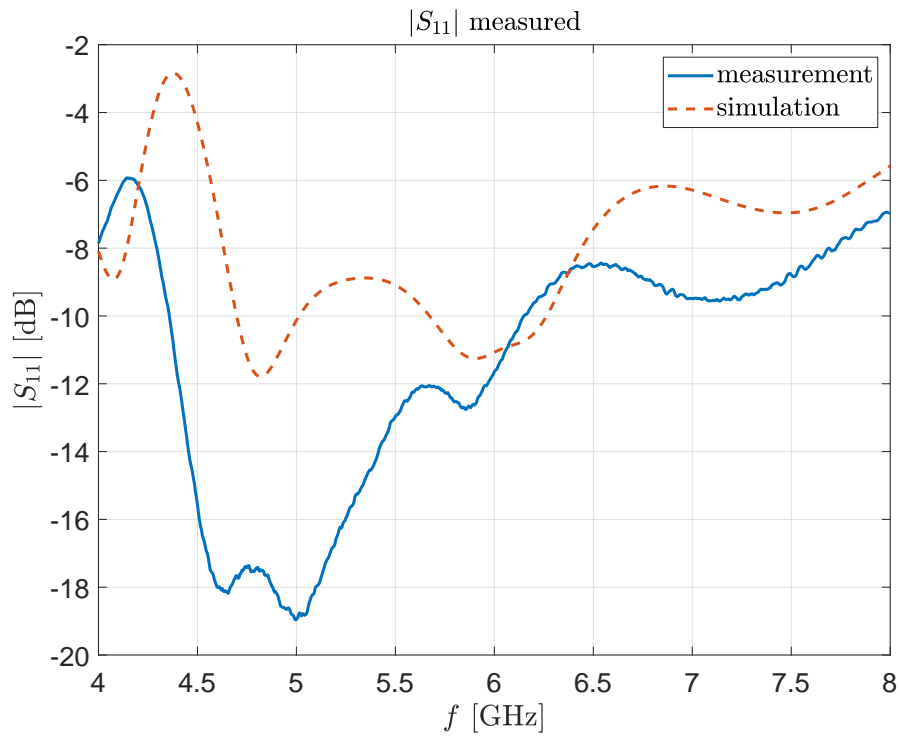
Měření antény bylo provedeno na dvou různých pracovištích. Činitel jakosti byl měřen pomocí vektorového obvodového analyzátoru. Osový poměr a vyzařovací charakteristika byly změřeny v bezodrazové stíněné komoře.

Nejprve bylo zkoumáno impedanční přizpůsobení antény. Kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu je na obrázku 4.3. Impedanční šířka pásma vyrobené antény je 4,36 GHz až 6,15 GHz. Minima dosahuje činitel odrazu na kmitočtu 5 GHz. Oproti simulovaným výsledkům došlo ke zmenšení činitele odrazu. Příčinou jsou pravděpodobně ztráty v substrátu a vodivých vrstvách, které nebyly uvažovány v simulaci. Anténa je přizpůsobená pro pracovní kmitočet 5,8 GHz, tudíž lze měřit její směrové charakteristiky.

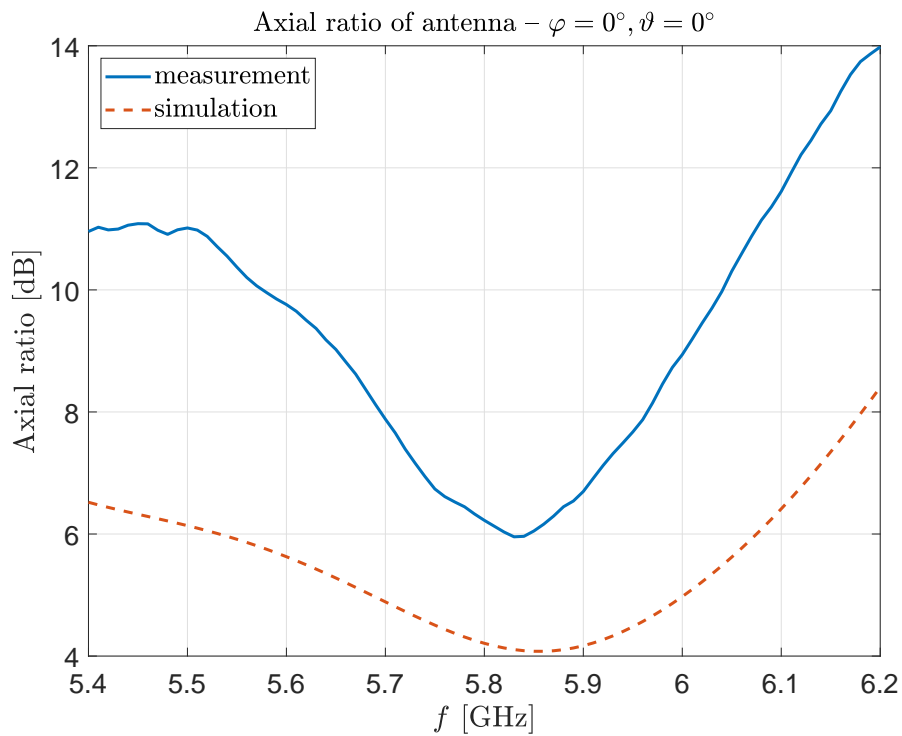
Pro měření osového poměru a směrové charakteristiky bylo potřeba provést referenční měření. Po referenčním bylo možné měřit směrové vlastnosti antény. Anténa byla na měřicí stojan připevněna sériovým zapojením několika konektorů tak, aby její hlavní směr vyzařování (kolmo na plochu antény) směřoval do přijímací antény v komoře. Připevnění antény znemožnilo měření kompletní směrové charakteristiky. Proměřená byla rovina podélná ( $\varphi = 0^\circ$ ) a příčná ( $\varphi = 90^\circ$ ) v rozsahu  $\vartheta \in \langle -120^\circ; 120^\circ \rangle$ . Vyzařovací charakteristika je zobrazena na obrázku 4.5. Zobrazená je jak souhlasná, tak křížová složka. Na obrázku jsou hodnoty normalizovány vzhledem k maximum souhlasné složky. Vidíme, že hlavní směr vyzařování antény je směrem vzhůru. Maximum vyzařování je od vertikální osy  $z$  vychýleno o cca  $20^\circ$  – stejně jako v simulaci. Zisk antény ve směru osy  $z$  je 3,4 dBi (byla provedena korekce na osový poměr), tudíž rozdíl od simulace je 0,2 dBi.

Kmitočtová závislost osového poměru je na obrázku 4.4. Osový poměr vyrobené antény má minimum 5,95 dB na kmitočtu 5,83 GHz. Na pracovním kmitočtu 5,8 GHz je osový poměr 6,22 dB. Oproti simulaci je osový poměr zvýšený o 2 dB. Příčinou zvýšení jsou pravděpodobně neideální vlastnosti použitých materiálů (především nehomogenita substrátu a nenulová tloušťka vodivých ploch).

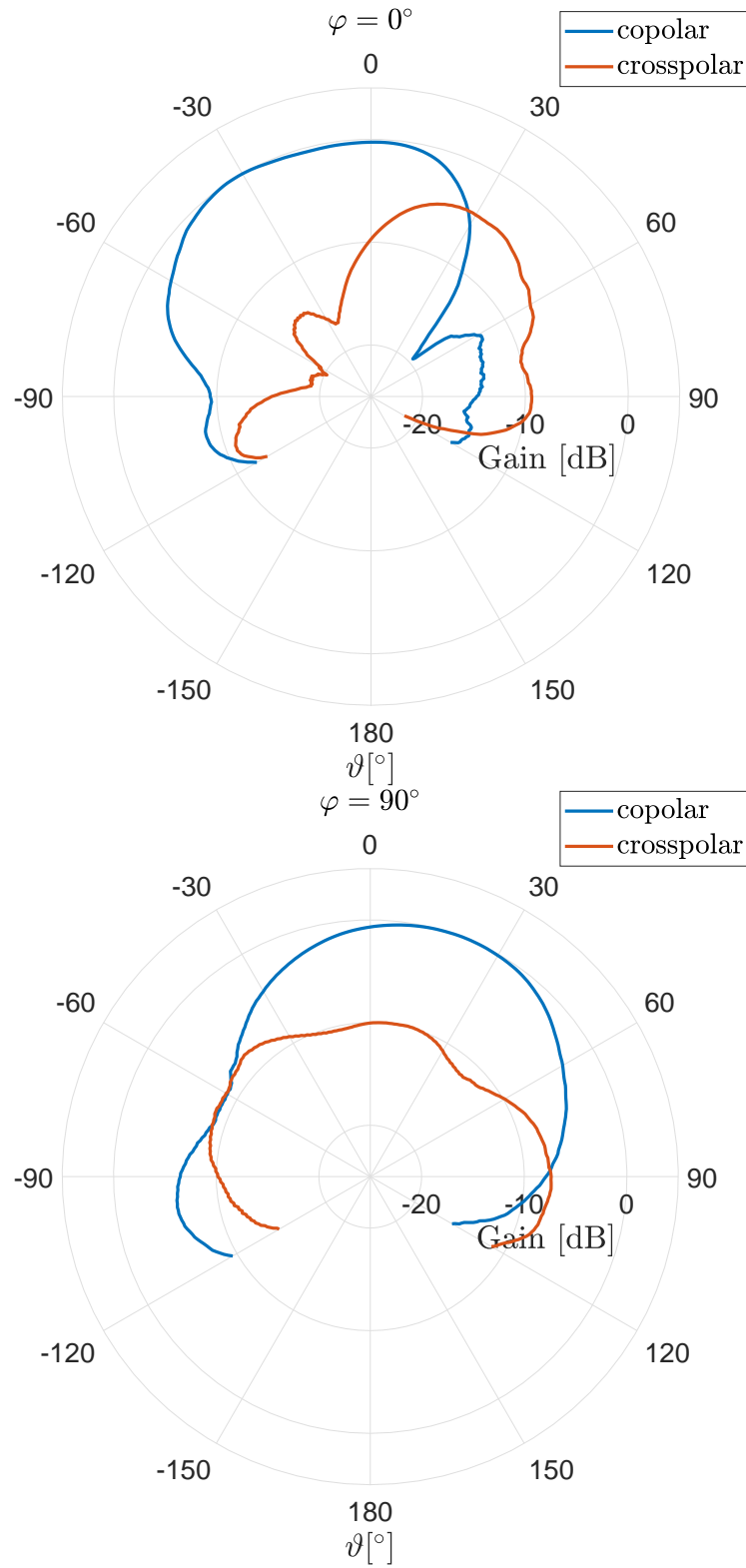
Obr. 4.3: Kmitočtová závislost velikosti činitele odrazu  $|S_{11}|$  – měřená anténa



Obr. 4.4: Kmitočtová závislost osového poměru (pro  $\varphi = 0^\circ$ ;  $\vartheta = 0^\circ$ ) – měřená anténa



Obr. 4.5: Vyzařovací charakteristika měřené antény v rovinách  $\varphi = 0^\circ$  (nahore) a  $\varphi = 90^\circ$  (dole) na pracovním kmitočtu – normalizováno vzhledem k maximumu





## 5 Závěr

V této práci byla představena anténní struktura z [1]. Byla popsána její geometrie a také výsledky její simulace v [1]. Dále byly výsledky z [1] ověřovány naší simulací. Výsledky naší simulace a simulace v [1] byly srovnány. Následně byla kruhově polarizovaná anténa s AMC upravena pro práci v pásmu ISM 5,8 GHz a výrobu na textilním substrátu. Hlavními úpravami byly změny parametrů anténního prvku, výměna typu AMC elementů, změna parametrů AMC a nahrazení napájení anténního prvku<sup>1</sup>. Navržená anténa byla poté vyrobena. Vlastnosti antény byly experimentálně změřeny.

Výsledky v [1] se od výsledků naší simulace v některých ohledech lišily. Největším rozdílem byla kmitočtová závislost fáze činitele odrazu AMC materiálu. V článku tvrdí, že nulové fáze je dosaženo na pracovním kmitočtu 9 GHz, v naší simulaci (při správném nastavení deembeddingu) je nulová fáze na 16,5 GHz. Dále je v textu článku zmiňováno, že osový poměr (směr vyzařování vzhůru  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$ ) na pracovním kmitočtu 5,8 GHz je 0,5 dB, což nekoresponduje ani s publikovaným grafem, ani s výsledky naší simulace (u nás 2,17 dB na 9 GHz). Vyzařovací charakteristiky jsou v jedné rovině totožné, druhá rovina byla v článku označena jako vodorovná, ale charakteristika zůstala identická s rovinou vertikální (viz obr. 2.6). Jak v článku, tak v naší simulaci dosahovala anténa zisku nad 6 dB ve směru hlavního vyzařování.

Požadavky kladené na anténní strukturu byly především impedanční přizpůsobení na 5,8 GHz, vyzařovací charakteristika s hlavním lalokem ve směru kolmo vzhůru a nejkvalitnější možná kruhová polarizace. Zároveň byla snaha udržet rozměry antény co nejmenší a umožnit jednoduché připevnění na rovné povrchy.

Úpravy anténní struktury začaly anténním prvkem samotným. Srovnány byly vlnové délky na kmitočtu 9 GHz v substrátu v [1] a v textilním substrátu na novém pracovním kmitočtu 5,8 GHz. Parametry anténního prvku poté byly v tomto poměru zvětšeny. Parametry AMC struktury byly upravovány tak, aby se dosáhlo nulové fáze činitele odrazu na pracovním kmitočtu. Nicméně podmínkou bylo, aby rozměry jedné buňky zůstaly co nejmenší. AMC s osmiúhelníkovými elementy nebylo možné upravit tak, aby splňoval všechny podmínky.

Osmiúhelníky byly vyměněny za další typy elementů AMC struktury: kříže (viz obr. 3.3) a čtverce. V případě křížů bylo docíleno nulové fáze činitele odrazu na 5,7 GHz (na 5,8 GHz byla fáze  $-39^\circ$ ). Pro případ čtvercových elementů byla nulová fáze na 6,3 GHz (na 5,8 GHz byla  $61^\circ$ ).

Napájení anténního prvku bylo potřeba změnit. Koaxiální sonda nevyhovuje, neboť znemožňuje připevnění antény na rovném povrchu. Koaxiální sondu vystřídal koplanární vlnovod zakončený SMA konektorem. Vlnovod neslouží pouze jako

---

<sup>1</sup>Veškeré simulační podklady jsou u vedoucího práce.

napájení, ale také transformuje impedanci anténního prvku.

Nejprve byla simulována celá anténní struktura s AMC s křížovými elementy (matice  $2 \times 2$  buněk). Použitím křížových elementů vznikly dva nežádané postranní laloky ve vyzařovací charakteristice. Anténa takhle nevyhovuje požadavku na vyzařovací charakteristiku.

Anténní struktura s AMC se čtvercovými elementy vyhovovalo všem požadavkům. Anténa je impedančně přizpůsobena pro celé ISM pásmo a jeho blízké okolí, vyzařovací charakteristika má hlavní lalok ve směru kolmo vzhůru a osový poměr je nejmenší možný (4 dB na 5,8 GHz). Zisk antény ve směru kolmo vzhůru je 3,6 dBi. Celkové rozměry antény (včetně konektoru) jsou přibližně  $4 \times 5$  cm.

Anténa se čtvercovým AMC byla vyrobena. Nakonec byl metodou sítotisku vyroben pouze kruhový flíček s koplanárním vlnovodem. Využitá byla stříbrná vodivá pasta. Vlastnosti vyrobené antény byly následně změřeny.

Činitel odrazu antény byl měřen pomocí vektorového obvodového analyzátoru a vyzařovací charakteristika s osovým poměrem byly změřeny. Impedanční šířka pásma měřené antény je 4,36 GHz až 6,15 GHz. Došlo ke snížení modulu činitele odrazu vlivem ztrát ve struktuře. Osový poměr dosahuje minima 5,95 dB na kmitočtu 5,83 GHz. Na pracovním kmitočtu je osový poměr 6,22 dB. Průběh osového poměru ve srovnání se simulací zůstal stejný, hodnoty se ale zvětšily o 2dB v blízkosti pracovního kmitočtu. Příčinou jsou pravděpodobně neideální vlastnosti použitých materiálů (především nehomogenita substrátu a nenulová tloušťka vodivých ploch). Vyzařovací charakteristika antény vykazuje hlavní směr vyzařování směrem kolmo vzhůru se ziskem 3,4 dBi na pracovním kmitočtu. Rozdíl zisku oproti simulaci je 0,2 dB. Lze tedy říct, že vlastnosti antény odpovídají zjednodušené simulaci.

## Literatura

- [1] LI, Wei, Bowen CAI a Ying SUO. A Broadband Circular Polarized Microstrip Antenna Based on Artificial Magnetic Conductor. In: *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 343-344 [cit. 2020-12-03]. ISBN 978-1-5386-7102-3. Dostupné z: doi: 10.1109/APUSNCUR-SINRSM.2018.8608423
- [2] P. KOVÁCS; Návrh a optimalizace struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem. Disertační práce. Brno: VUT v Brně, 2010. Dostupné: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=32416](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=32416)>
- [3] RAIDA, Zbyněk, Jaroslav LÁČÍK, Michal MRNKA, Jan PUSKELY, Tomáš MIKULÁŠEK a Petr VAŠINA. *Elektromagnetické struktury v blízkosti živých tkání*. V Brně: Vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-214-5449-1.
- [4] A. Alemaryeen and S. Noghianian. On-Body Low-Profile Textile Antenna With Artificial Magnetic Conductor. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 6, pp. 3649-3656, June 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2902632.



# Seznam symbolů a zkratek

AMC	artificial magnetic conductor
WBAN	wireless body area networks
$\varepsilon_r$	relativní permitivita
$h_{\text{substrate}}$	výška konvenčního substrátu
$h_{\text{AMC}}$	výška substrátu AMC materiálu
$r_{\text{patch}}$	poloměr kruhového flíčku tvořící anténní prvek
$\alpha_{\text{gap}}$	úhel drážky anténního prvku
$r_{\text{gap-in}}$	vnitřní poloměr drážky anténního prvku
$r_{\text{gap-out}}$	vnější poloměr drážky anténního prvku
$d_{\text{feed}}$	vzdálenost koaxiálního napájení od středu anténního prvku
$D_{\text{substrate}}$	rozměr čtvercového substrátu
$D_{\text{cell}}$	rozměr čtvercové buňky AMC
$a_{\text{element}}$	rozměr osmiúhelníkového elementu planární periodické struktury
$d_{\text{element}}$	vzdálenost mezi elementy planární periodické struktury
<b>SMA</b>	SubMiniature version A
$Z_0$	charakteristická impedance
<b>ISM</b>	<b>I</b> ndustrial, <b>S</b> cientific and <b>M</b> edical Frequency Band
$h_{\text{textile}}$	výška trojrozměrné pleteniny 3D097
$h_{\text{foil}}$	výška vyhlazovací fólie
$l_{\text{cop}}$	délka koplanárního vlnovodu
$w_{\text{cop}}$	šířka vnitřního vodiče koplanárního vlnovodu
$s_{\text{cop}}$	šířka mezer koplanárního vlnovodu
$a_{\text{sq}}$	šířka čtvercového AMC elementu



# Seznam příloh

A Katalogový list SMA konektoru

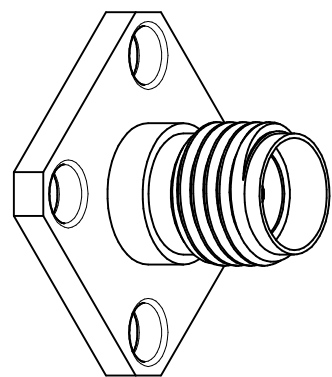
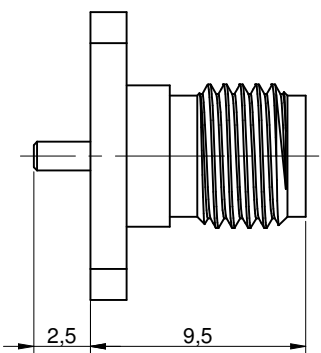
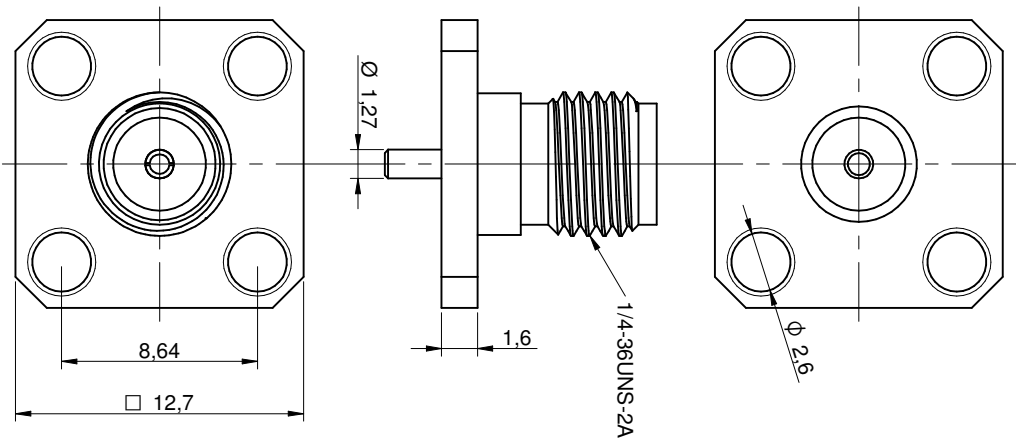
65



## **A Katalogový list SMA konektoru**

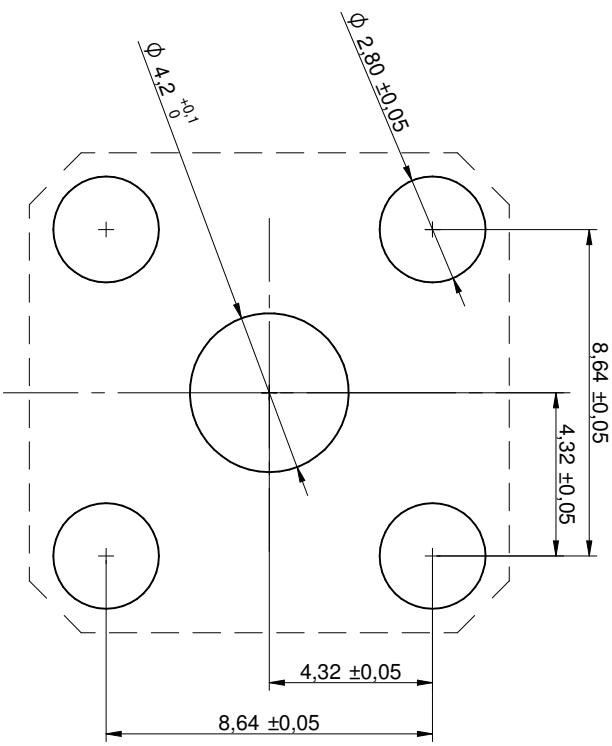
V této příloze je úplný katalogový list SMA konektoru použitého ve vyrobené anténní struktuře.

Dimensions: [mm]



Scale - 3:1

Recommended Mounting Hole: [mm]



Scale - 5:1

Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG  
EMC & Inductive Solutions  
Max-Eyth-Str. 1  
74638 Waldenburg  
Germany  
Tel: +49 (0) 79 42 945 - 0  
www.we-online.com  
eISos@we-online.com



CREATED	CHECKED	GENERAL TOLERANCE	PROJECTION METHOD
DES0	JTS	DIN ISO 2768-1m	
<b>DESCRIPTION</b>			
<b>SMA Panel Jack 4-Hole Flange</b>			
<b>Straight Round Post WR-SMA</b>			
REVISION	STATUS	DATE (YYYYMMDD)	BUSINESS UNIT
001.000	Valid	2018-03-19	eISos
ORDER CODE		PAGE	
<b>60312422114521</b>		1/4	

The electronic component has been designed and developed for usage in general electronic equipment only. This product is not authorized for use in equipment where a higher safety standard and reliability standard is especially required or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death, unless the parties have executed an agreement specifically governing such use. Moreover Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG is not authorized for use in equipment where a higher safety standard and reliability standard is especially required or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death, unless the parties have executed an agreement specifically governing such use. Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG must be informed about the intent of such usage before the design stage. In addition, sufficient reliability evaluation checks for safety must be performed on every electronic component which is used in electrical circuits that require high safety and reliability functions or performance.

## Material Properties:

Insulator Material	PTFE
Insulator Color	White
Center Contact Material	Beryllium Copper
Center Contact Plating	Gold, min. 0.76µm over Nickel
Body Material	Brass
Body Plating	Gold, min. 0.076µm over Nickel

## Kind Properties:

Interface	MIL-STD-348
Connector Type	SMA
Gender	Jack
Orientation Type	Straight

## General Information:

Operating Temperature	-65 °C up to +165 °C
Compliance	RoHS

## Electrical Properties:

Properties	Test conditions	Value	Unit	Tol.
Impedance	DC~18 GHz	50	Ω	
Frequency Range		DC~18 GHz		
VSWR	DC~12.4 GHz	1.2		max.
Insertion Loss	DC~12.4 GHz	0.14	dB	max.
VSWR	12.4 GHz~18 GHz	1.4		max.
Insertion Loss	12.4 GHz~18 GHz	0.2	dB	max.
Insulation Resistance	500 V (DC) in 120 sec.	5000	MΩ	min.
Contact Resistance Initial 1)		R	mΩ	max.
Contact Resistance After Test 2)		R	mΩ	max.
Contact Resistance Initial 3)		R	mΩ	max.

Contact Resistance After Test 4)	R	2	mΩ	max.
Withstanding Voltage	500 V (AC) in 60 sec.		1000	V (RMS) min.
Working Voltage 5)			335	V (RMS) min.

- 1) Center Contact
  - 2) Center Contact
  - 3) Outer Contact
  - 4) Outer Contact
  - 5) At sea level
- VSWR: The VSWR in application varies decisively according to PCB layout

## Mechanical Properties:

Properties	Value	Unit	Tol.
Center Contact Retention (Axial)	26.7	N	min.
Mating Cycle	500	Cycles	
Recommended Mating Torque	57	Ncm	

## Packaging Properties:

Properties	Value
Packaging	Tray
Packaging Unit	Qty. 60

Würth Elektronik eSOS GmbH & Co. KG  
EMC & Inductive Solutions

Max-Eyth-Str. 1  
74638 Waldenburg  
Germany  
Tel: +49 (0) 79 42 945 - 0  
www.we-online.com  
eSOS@we-online.com



WÜRTH ELEKTRONIK

CREATED DSSC	CHECKED JTS	GENERAL TOLERANCE DIN ISO 2768-1m	PROTECTION METHOD	
-----------------	----------------	--------------------------------------	----------------------	--

**SMA Panel Jack 4-Hole Flange**  
**Straight Round Post WR-SMA**

REVISION 001.000	STATUS Valid	DATE (YYYYMMDD) 2018-03-19	BUSINESS UNIT eISan	PRICE 2/4
ORDER CODE <b>60312422114521</b>				

This electronic component has been designed and developed for usage in general electronic equipment only. This product is not authorized for use in equipment where a higher safety standard and reliability standard is especially required or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death, unless the parties have executed an agreement specifically governing such use. Moreover Würth Elektronik eSOS GmbH & Co. KG is not authorized for use in equipment where a higher safety standard and reliability standard is especially required or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death, unless the parties have executed an agreement specifically governing such use. Würth Elektronik eSOS GmbH & Co. KG must be informed about the intent of such usage before the design stage. In addition, sufficient reliability evaluation checks for safety must be performed on every electronic component which is used in electrical circuits that require high safety and reliability functions or performance.

## Cautions and Warnings:

### The following conditions apply to all goods within the product services of the Connectors of Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG:

#### General:

- This electronic component is designed and developed with the intention for use in general electronics equipment.
- Before incorporating the components into any equipment in the field such as military, aerospace, aviation, nuclear control, submarine, transportation, (automotive control, train control, ship control), transportation signal, disaster prevention, medical, public information network, etc. where higher safety and reliability are especially required or if there is possibility of direct damage or injury to human body, Würth Elektronik must be asked for a written approval.
- In addition, even electronic component in general electronic equipment, when used in electrical circuits that require high safety, reliability functions or performance, the sufficient reliability evaluation-check for the safety must be performed by the user before usage.
- The connector is designed and manufactured to be used within the datasheet specified values.
- Do not use the connector outside the datasheet specifications.
- Prevent any damage or scratches on the connector, especially on the actuator.
- Direct mechanical impact to the product shall be prevented (e.g overlapping of the PCBs).
- The responsibility for the applicability of the customer specific products and use in a particular customer design is always within the authority of the customer. All technical specification for standard products do also apply to customer specific products.
- Würth Elektronik products are qualified according to international standards which are listed into each product reliability report. All products characteristics are therefore given according to results obtained throughout these detailed test protocols. May any product characteristic be qualified by the customer, out of given Würth Elektronik specifications. Würth Elektronik cannot ensure its validity and sustainability over time.
- The Connectors are designed to be used along with Würth Elektronik counterparts and tools. Würth Elektronik cannot insure the reliability of these components while being used with other products.

#### Product Specific:

##### Soldering:

- The solder profile must comply with the Würth Elektronik technical soldering specification, otherwise this will void the warranty.
- Other soldering methods are not verified and have to be validated by the customer at his own risk.

##### Cleaning and Washing:

- Parts are not constructed for washing, so washing can cause malfunction afterwards.
- Cleaning agent that are used to clean the customer applications might damage or change the characteristics of the component, body, pins and termination.


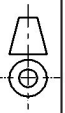
- Please do not submerge our washable products into water or cleaning agents or put them in locations exposed to water completely.
- When cleaning by hand (brushing), please do not use excessive force on our connectors to avoid malfunction afterwards, because customer could deform function relevant areas.
- We recommended a solution without organic acid (preserve the plating against corrosion) volatile, without residues and compatible with the plastic.
- We recommend to perform tests and to let a part in immersion in the solution 8 to 12 hours and see if there is a degradation.

##### Storage Conditions:

- The Connectors are considered MSL 1 into closed original packaging and are not subject to storage time limits regarding the moisture sensitivity but all products shall be used before the end of the period of 12 months based on the products date code, if not 100% solderability can't be warranted.

##### Handling:

- Do not repeatedly operate the connector with excessive force. It may damage or deforms the contact dome which results in malfunction.
- In the case a product requires particular handling precautions, in addition to the general recommendations mentioned here before, these will appear on the product datasheet.

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG EMC & Inductive Solutions Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany Tel: +49 (0) 79 42 945 - 0 www.we-online.com eiSos@we-online.com			
CREATED Desc	CHECKED JTS	GENERAL TOLERANCE DIN ISO 2768-1m	PROTECTION METHOD 
REVISION 001.000		STATUS Valid	ORDER CODE <b>60312422114521</b>
DATE (YYYYMMDD) 2018-03-19		BUSINESS UNIT eiCan	PRICE 3/4
<b>DESCRIPTION</b> <b>SMA Panel Jack 4-Hole Flange</b> <b>Straight Round Post WR-SMA</b>			

This electronic component has been designed and developed for usage in general electronic equipment only. This product is not authorized for use in equipment where a higher safety standard and reliability standard is especially required or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death, unless the parties have executed an agreement specifically governing such use. Moreover Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG and its subsidiaries are not authorized for use in equipment where a higher safety standard and reliability standard is especially required or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death, unless the parties have executed an agreement specifically governing such use. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG must be informed about the intent of such usage before the design stage. In addition, sufficient reliability evaluation checks for safety must be performed on every electrical component which is used in electrical circuits that require high safety and reliability functions or performance.

## Important Notes

### The following conditions apply to all goods within the product range of Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG:

#### 1. General Customer Responsibility

Some goods within the product range of Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG contain statements regarding general suitability for certain application areas. These statements about suitability are based on our knowledge and experience of typical requirements concerning the areas, serve as general guidance and cannot be estimated as binding statements about the suitability for a customer application. The responsibility for the applicability and use in a particular customer design is always solely within the authority of the customer. Due to this fact it is up to the customer to evaluate, where appropriate to investigate and decide whether the device with the specific product characteristics described in the product specification is valid and suitable for the respective customer application or not.

#### 2. Customer Responsibility related to Specific, in particular Safety- Relevant Applications

It has to be clearly pointed out that the possibility of a malfunction of electronic components or failure before the end of the usual lifetime cannot be completely eliminated in the current state of the art, even if the products are operated within the range of the specifications. In certain customer applications requiring a very high level of safety and especially in customer applications in which the malfunction or failure of an electronic component could endanger human life or health it must be ensured by most advanced technological aid of suitable design of the customer application that no injury or damage is caused to third parties in the event of malfunction or failure of an electronic component. Therefore, customer is cautioned to verify that data sheets are current before placing orders. The current data sheets can be downloaded at [www.we-online.com](http://www.we-online.com).

#### 3. Best Care and Attention

Any product-specific notes, cautions and warnings must be strictly observed. Any disregard will result in the loss of warranty.

#### 4. Customer Support for Product Specifications

Some products within the product range may contain substances which are subject to restrictions in certain jurisdictions in order to serve specific technical requirements. Necessary information is available on request. In this case the field sales engineer or the internal sales person in charge should be contacted who will be happy to support in this matter.

#### 5. Product R&D

Due to constant product improvement product specifications may change from time to time. As a standard reporting procedure of the Product Change Notification (PCN) according to the JEDEC-Standard inform about minor and major changes. In case of further queries regarding the PCN, the field sales engineer or the internal sales person in charge should be contacted. The basic responsibility of the customer as per Section 1 and 2 remains unaffected.

#### 6. Product Life Cycle

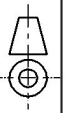
Due to technical progress and economical evaluation we also reserve the right to discontinue production and delivery of products. As a standard reporting procedure of the Product Termination Notification (PTN) according to the JEDEC-Standard we will inform at an early stage about inevitable product discontinuance. According to this we cannot guarantee that all products within our product range will always be available. Therefore it needs to be verified with the field sales engineer or the internal sales person in charge about the current product availability expectancy before or when the product for application design-in-disposal is considered. The approach named above does not apply in the case of individual agreements deviating from the foregoing for customer-specific products.

#### 7. Property Rights

All the rights for contractual products produced by Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG on the basis of ideas, development contracts as well as models or templates that are subject to copyright, patent or commercial protection supplied to the customer will remain with Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG. Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG does not warrant or represent that any license, either expressed or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, application, or process in which Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG components or services are used.

#### 8. General Terms and Conditions

Unless otherwise agreed in individual contracts, all orders are subject to the current version of the "General Terms and Conditions of Würth Elektronik eISos Group", last version available at [www.we-online.com](http://www.we-online.com).

Würth Elektronik eISos GmbH & Co. KG EMC & Inductive Solutions		Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany Tel: +49 (0) 79 42 945 - 0		www.we-online.com eISos@we-online.com	
CREATED	CHECKED	GENERAL TOLERANCE	PROTECTION METHOD		
D8Sc	JTS	DIN ISO 2768-1m			
<b>DESCRIPTION</b> <b>SMA Panel Jack 4-Hole Flange</b> <b>Straight Round Post WR-SMA</b>			ORDER CODE	6031 24221 14521	
REVISION	STATUS	DATE (YYYY-MM-DD)	BUSINESS UNIT	PRICE	
001.000	Valid	2018-03-19	eISos	4/4	

