

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Jan Špůrek



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

TEXTILNÍ ŠTĚRBINOVÁ ANTÉNA

TEXTILE SLOT ANTENNA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Špůrek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Ráida

BRNO 2016

Diplomová práce

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

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Jan Špůrek

ID: 148112

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Textilní štěrbínová anténa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete řadu štěrbínových anténních zářičů s kruhovou polarizací. Jako substrát použijte trojrozměrný textilní materiál. Vodivé plochy vyrobte z měděné fólie a z vodivé pasty sítotiskem. Potřebné amplitudy a fáze intenzity pole, jež budí jednotlivé štěrbiny, nastavte prokovovacími kolíky. Prokovovací kolíky vyrobte z měděného drátu, stěny napájecího vlnovodu vyšijte vodivou nití. Anténní řada by měla pracovat v pásmu UWB bandgroup 6 se středním kmitočtem 8 GHz.

U vyrobené anténní řady proměřte impedanční a směrové charakteristiky. Výsledky měření ověřte počítačovou simulací. Anténní řadu následně instalujte na vnitřní povrch střechy automobilu a ověřte její vhodnost k bezdrátovému spojení na předních i zadních sedadlech.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GARG, R., BHARTIA, P., BAHL, I., ITTIPIBOON, A. Microstrip Antenna Design Handbook, Norwood: Artech House, 2001.

[2] LÁČÍK, J.; MIKULÁŠEK, T.; PUSKELY, J.; RAIDÁ, Z.; WOLANSKÝ, D. Compact arrays fed by substrate integrated waveguides, In Proceedings of ICEAA 2014, Aruba: Polytecnico di Torino, 2014, p. 448-451.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 19.5.2016

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., *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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh různých anténních struktur, založených na štěrbinových anténách, vytvořených v širší stěně obdélníkového vlnovodu. Jako substrát je použita 3D textilie, jejíž vlastnosti jsou zkoumány. Byly navrženy struktury, pracující s lineární i kruhovou polarizací, a další související struktury, sloužící k napájení a dělení výkonu. Struktury jsou navrženy tak, aby pracovaly na středním kmitočtu 8 GHz a v jeho okolí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Textilní vlnovod, štěrbinová anténa, řada štěrbinových antén, lineární polarizace, kruhová polarizace, dělič výkonu, mikropáskové vedení, zemněný koplanární vlnovod

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on design of various antenna structures, based on slot antennas, created in the wider wall of a rectangular-shaped waveguide. As the substrate, it is used a 3D textile material, while its properties are examined. They were designed structures, that operate with linear and circular polarization, and other related structures, that are used for feeding and power division. Structures are designed to operate at central frequency of 8 GHz and its vicinity.

KEYWORDS

Textile waveguide, slot antenna, slot antenna array, linear polarization, circular polarization, power divider, microstrip line, grounded coplanar waveguide

ŠPŮREK, J. *Textilní štěrbinová anténa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 65 s., 10 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Textilní štěrbínová anténa jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 uvedeného semestrálního dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního 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 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.

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 semestrální práce.

Děkuji Ústavu mikroelektroniky za pomoc při výrobě struktur pomocí sítotiskové metody.

V Brně dne

(podpis autora)

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Abstrakt	4
Klíčová slova	4
Abstract	4
Keywords	4
Prohlášení	vi
Poděkování	vi
Obsah	vii
1 Základní popis struktur	2
2 Návrh vlnovodů	3
2.1 Vlnovod pro antény s lineární polarizací (VLP).....	3
2.2 Vlnovod pro antény s kruhovou polarizací (VKP)	5
3 Návrh děličů výkonu	8
3.1 Dělič s odbočkami	8
3.2 Dělič s postupným větvením.....	11
4 Návrh anténních struktur s lineární polarizací	13
4.1 Antény pro horizontální polarizaci	13
4.2 Antény pro vertikální polarizaci	19
5 Návrh anténních struktur s kruhovou polarizací	23
5.1 Obdélníková šterbinová anténa s kruhovou polarizací	23
5.2 Kruhová šterbinová anténa s kruhovou polarizací.....	25
6 Výroba ověřovacího prototypu	33
6.1 Napájení struktury.....	33
6.2 Jednoprvková anténa.....	34
7 Vyrobená anténa	37
8 Srovnání naměřených a simulovaných výsledků	38
9 Srovnání dalších výrobních metod	39

9.1	Měření činitele odrazu	40
9.2	Měření směrových charakteristik.....	40
10	Anténní řady s napájecí strukturou	42
10.1	Dvouprvková řada.....	42
10.2	Čtyř-prvkové řady.....	45
11	Alternativní napájecí struktury	50
11.3	Napájení pomocí vlnovodu.....	50
11.4	Napájení pomocí koplanárního vlnovodu se zemní plochou.....	51
12	Anténní řada s alternativními způsoby napájení	52
12.1	Řada buzená strukturou s vlnovodem.....	52
12.2	Řada buzená koplanárním vlnovodem.....	55
13	Srovnání naměřených a simulovaných výsledků	58
13.1	Impedanční přizpůsobení.....	59
13.2	Směrové charakteristiky	60
13.3	Osový poměr.....	64
	Závěr	65
	Literatura	66
	Přílohy	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 3D textilie	2
Obr. 2 Vlnovod pro antény s lineární polarizací.....	3
Obr. 3 Frekvenční závislost činitele odrazu VLP pro vid TE10.....	4
Obr. 4 Frekvenční závislost činitele přenosu VLP pro vid TE10.....	4
Obr. 5 Frekvenční závislost činitele přenosu VLP pro vid TE20	4
Obr. 6 Rozložení intenzity elektrického pole VLP pro vid TE10	5
Obr. 7 Rozložení intenzity elektrického pole VLP pro vid TE20	5
Obr. 8 Vlnovod pro antény s kruhovou polarizací.....	5
Obr. 9 Frekvenční závislost činitele odrazu VKP.....	6
Obr. 10 Frekvenční závislost činitele přenosu VKP pro vid TE10	6
Obr. 11 Frekvenční závislost činitele přenosu VKP pro vid TE20	7
Obr. 12 Rozložení intenzity elektrického pole VKP pro vid TE10	7
Obr. 13 Rozložení intenzity elektrického pole VKP pro vid TE20	7
Obr. 14 Dělič s jednou odbočkou	8
Obr. 15 Činitel odrazu a činitelé přenosu pro dělič s jednou odbočkou.....	9
Obr. 16 Rozložení intenzity elektrického pole pro dělič s jednou odbočkou	9
Obr. 17 Dělič se dvěma odbočkami.....	10
Obr. 18 Činitel odrazu a činitelé přenosu pro dělič s jednou odbočkou.....	10
Obr. 19 Rozložení intenzity elektrického pole pro dělič se dvěma odbočkami	10
Obr. 20 Dělič s postupným větvením	11
Obr. 21 Činitel odrazu a činitelé přenosu děliče s postupným větvením	11
Obr. 22 Rozložení intenzity elektrického pole pro dělič s postupným větvením	12
Obr. 23 Jednoprvková anténa pro horizontální polarizaci.....	13
Obr. 24 Kmitočtový průběh činitele odrazu jednoprvkové antény pro horizontální polarizaci.....	14
Obr. 25 3D směrové charakteristiky jednoprvkové antény pro horizontální polarizaci .	14
Obr. 26 Směrové charakteristiky - rovina E	14
Obr. 27 Směrové charakteristiky - rovina H.....	14
Obr. 28 Dvouprvková řada pro horizontální polarizaci.....	15
Obr. 29 Kmitočtový průběh činitele odrazu dvouprvkové řady pro horizontální polarizaci	

.....	16
Obr. 30 3D směrové charakteristiky pro dvouprvkovou řadu	16
Obr. 31 Směrové charakteristiky - rovina E	16
Obr. 32 Směrové charakteristiky - rovina H.....	16
Obr. 33 Řada pro horizontální polarizaci - 4 prvky	17
Obr. 34 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady pro horizontální polarizaci	17
Obr. 35 3D Směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady.....	18
Obr. 36 Směrové charakteristiky - rovina E	18
Obr. 37 Směrové charakteristiky - rovina H.....	18
Obr. 38 Jednoprvková anténa pro vertikální polarizaci	19
Obr. 39 Kmitočtový průběh činitele odrazu jednoprvkové antény pro vertikální polarizaci	19
Obr. 40 3D směrové charakteristiky jednoprvkové antény pro vertikální polarizaci	20
Obr. 41 Směrové charakteristiky - rovina E	20
Obr. 42 Směrové charakteristiky - rovina H.....	20
Obr. 43 Dvouprvková řada pro vertikální polarizaci	21
Obr. 44 Kmitočtový průběh činitele odrazu dvouprvkové řady	21
Obr. 45 3D směrové charakteristiky dvouprvkové řady	21
Obr. 46 Směrové charakteristiky - rovina E	22
Obr. 47 Směrové charakteristiky - rovina H.....	22
Obr. 48 Obdélníková anténa pro kruhovou polarizaci.....	23
Obr. 49 Kmitočtový průběh činitele odrazu obdélníkové antény	23
Obr. 50 Kmitočtový průběh osového poměru obdélníkové antény	24
Obr. 51 3D směrové charakteristiky obdélníkové antény.....	24
Obr. 52 Směrové charakteristiky - rovina YZ	24
Obr. 53 Směrové charakteristiky - rovina XY	24
Obr. 54 Kruhová štěrbinová anténa pro kruhovou polarizaci.....	25
Obr. 55 Kmitočtový průběh činitele odrazu kruhové antény.....	25
Obr. 56 Kmitočtový průběh osového poměru kruhové štěrbinové antény	26
Obr. 57 3D směrové charakteristiky pro kruhovou štěrbinovou anténu.....	26
Obr. 58 Směrové charakteristiky - rovina YZ	26
Obr. 59 Směrové charakteristiky - rovina XY	26
Obr. 60 Dvouprvková anténní řada s děličem s jednou odbočkou	27

Obr. 61 Kmitočtová závislost činitele odrazu dvouprvkové řady	27
Obr. 62 Kmitočtová závislost osového poměru řady se dvěma prvky	28
Obr. 63 3D směrové charakteristiky řady se dvěma prvky.....	28
Obr. 64 Směrové charakteristiky - rovina XY	28
Obr. 65 Směrové charakteristiky - rovina YZ	28
Obr. 66 Čtyř-prvková řada s děličem se dvěma odbočkami	29
Obr. 67 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady.....	29
Obr. 68 Kmitočtový průběh osového poměru čtyř-prvkové řady.....	30
Obr. 69 3D směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady	30
Obr. 70 Směrové charakteristiky - rovina XY	30
Obr. 71 Směrové charakteristiky - rovina YZ	30
Obr. 72 Čtyř-prvková řada s děličem s postupným větvením	31
Obr. 73 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady.....	31
Obr. 74 Kmitočtový průběh osového poměru čtyř-prvkové řady.....	32
Obr. 75 3D směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady	32
Obr. 76 Směrové charakteristiky - rovina YZ	32
Obr. 77 Směrové charakteristiky - rovina XY	32
Obr. 78 Přejít mikropáskového vedení na vlnovod.....	33
Obr. 79 Kmitočtový průběh činitele odrazu a činitele přenosu přechodu	34
Obr. 80 Jednoprvková anténa pro výrobu.....	34
Obr. 81 Kmitočtový průběh činitele odrazu jednoprvkové antény pro výrobu	35
Obr. 82 Kmitočtový průběh osového poměru jednoprvkové antény pro výrobu	35
Obr. 83 3D směrové charakteristiky jednoprvkové antény pro výrobu.....	35
Obr. 84 Směrové charakteristiky - rovina YZ	36
Obr. 85 Směrové charakteristiky - rovina XY	36
Obr. 86 Vyrobená anténa - pohled zepředu	37
Obr. 87 Vyrobená anténa - pohled zezadu.....	37
Obr. 88 Srovnání simulovaných a naměřených výsledků.....	38
Obr. 89 Model - měděná folie, převzato z [13]	39
Obr. 90 Model - síťotisk, textil, převzato z [13]	39
Obr. 91 Model síťotisk, folie, převzato z [13].....	39
Obr. 92 Srovnání průběhů činitele odrazu pro simulaci a různé výrobní procesy, převzato z [13]	40
Obr. 93 Směrové charakteristiky - rovina YZ, převzato z [13]	40

Obr. 94 Změřené směrové charakteristiky - rovina XY, převzato z [13]	40
Obr. 95 polarizační odstup - rovina YZ	41
Obr. 96 polarizační odstup - rovina XY	41
Obr. 97 Pohled na výslednou strukturu	42
Obr. 98 Kmitočtový průběh činitele odrazu dvou prvkové řady	43
Obr. 99 Kmitočtový průběh osového poměru dvouprvkové řady	43
Obr. 100 3D směrové charakteristiky dvouprvkové řady	43
Obr. 101 Směrové charakteristiky - rovina XY	44
Obr. 102 Směrové charakteristiky - rovina YZ	44
Obr. 103 Polarizační odstup dvouprvkové řady - rovina XY	44
Obr. 104 Polarizační odstup dvouprvkové řady - rovina YZ	44
Obr. 105 Pohled na výslednou strukturu	45
Obr. 106 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady s odbočkami	45
Obr. 107 Kmitočtový průběh osového poměru čtyř-prvkové řady s odbočkami	46
Obr. 108 3D směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady s odbočkami	46
Obr. 109 Směrové charakteristiky - rovina XY	47
Obr. 110 Směrové charakteristiky - rovina YZ	47
Obr. 111 Polarizační odstup - rovina XY	47
Obr. 112 Polarizační odstup - rovina YZ	47
Obr. 113 Pohled na výslednou strukturu	48
Obr. 114 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady s postupným větvením	48
Obr. 115 Kmitočtový průběh osového poměru čtyř-prvkové řady s postupným větvením	48
Obr. 116 3D směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady s postupným větvením	49
Obr. 117 Směrové charakteristiky - rovina YZ	49
Obr. 118 Směrové charakteristiky - rovina XY	49
Obr. 119 polarizační odstup - rovina YZ	50
Obr. 120 polarizační odstup - rovina XY	50
Obr. 121 Řez vlnovodovou napájecí strukturou	50
Obr. 122 Kmitočtové průběhy činitele odrazu a přenosu vlnovodové napájecí struktury	51
Obr. 123 Napájení pomocí koplanárního vlnovodu	51
Obr. 124 Kmitočtové průběhy činitele odrazu a přenosu pro napájecí strukturu s koplanárním vlnovodem	52

Obr. 125 Řada buzená klasickým vlnovodem	52
Obr. 126 Kmitočtový průběh činitele odrazu řady buzené klasickým vlnovodem	53
Obr. 127 Kmitočtový průběh osového poměru řady buzené klasickým vlnovodem.....	53
Obr. 128 3D směrové charakteristiky řady buzené klasickým vlnovodem	53
Obr. 129 Směrové charakteristiky - rovina YZ	54
Obr. 130 Směrové charakteristiky - rovina XY	54
Obr. 131 Polarizační odstup - rovina YZ.....	54
Obr. 132 Polarizační odstup - rovina XY	54
Obr. 133 Řada buzená koplanárním vlnovodem	55
Obr. 134 Kmitočtový průběh činitele odrazu řady buzené koplanárním vlnovodem.....	55
Obr. 135 Kmitočtový průběh osového poměru řady buzené koplanárním vlnovodem..	55
Obr. 136 3D směrové charakteristiky řady buzené koplanárním vlnovodem	56
Obr. 137 Směrové charakteristiky - rovina YZ	56
Obr. 138 Směrové charakteristiky - rovina XY	56
Obr. 139 Polarizační odstup - rovina YZ.....	57
Obr. 140 Polarizační odstup - rovina XY	57
Obr. 141 Fotografie vyrobené řady.....	58
Obr. 142 Poškozený první vzorek řady – pohled na přechod.....	59
Obr. 143 Měřený a simulovaný kmitočtový průběh činitele odrazu	59
Obr. 144 Směrové charakteristiky RHCP - rovina YZ.....	60
Obr. 145 Směrové charakteristiky LHCP - rovina YZ	61
Obr. 146 Směrové charakteristiky RHCP - rovina XY	62
Obr. 147 Směrové charakteristiky LHCP - rovina XY.....	63
Obr. 148 Kmitočtový průběh osového poměru řady	64

ÚVOD

Žijeme v době, kdy neustále vzrůstají požadavky na výměnu dat v rámci automobilu, ať už se jedná o informace od nejrůznějších senzorů nebo například o multimediální obsah. Tento trend má za následek nutnost tvorby vnitřních automobilových sítí. Vzhledem k tomu, že klasické kabelové rozvody s sebou přinášejí nárůst ceny a hmotnosti automobilu, jsou zkoumány další možnosti, jak tyto rozvody nahradit.

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh různých anténních struktur, které mají sloužit k bezdrátovému přenosu energie uvnitř automobilu, čímž by došlo k významné redukci kabelových svazků. K jejich konstrukci je využita experimentální 3D textilie, jakožto materiál levný, lehký a lehce opracovatelný. Struktury jsou založeny na bázi šterbinových antén, vytvořených v širší stěně vlnovodu, která je realizována měděnou fólií a dalšími vhodnými materiály, přičemž kratší stěny vlnovodu jsou vytvořeny pomocí vodivé nitě. Pozornost je věnována jak lineární polarizaci, tak kruhové polarizaci, stejně jako možnostem napájení struktur. Rovněž jsou srovnány různé technologické postupy výroby. Struktury pracují na středním kmitočtu 8 GHz a v jeho okolí. K simulaci byl využit program CST Microwave Studio. Prezentované výsledky, které nejsou zobrazeny formou kmitočtové závislosti (například směrové charakteristiky), se vždy vztahují ke kmitočtu 8 GHz.

Na závěr práce byla vybraná struktura vyrobena, změřena a dosažené výsledky byly srovnány se simulací.

Poznámka:

V počátku tvorby práce bylo uvažováno s úzkým pracovním pásmem se středním kmitočtem 8 GHz. V průběhu návrhu struktur s kruhovou polarizací výsledky vykazovaly širokopásmové vlastnosti v oblasti impedančního přizpůsobení. Z toho důvodu byla oblast pracovního pásma změněna na bandgroup 6. Bohužel se později ukázalo, že dosažení této šířky pásma je nereálné v oblasti osového poměru a po dohodě s vedoucím práce došlo k návratu k původnímu záměru.

1 ZÁKLADNÍ POPIS STRUKTUR

Všechny struktury v této práci jsou navrženy pro 3D textílii z Obr. 1. Jelikož se původně nejedná o materiál využívaný k výrobě mikrovlnných struktur, není k němu dodávána potřebná technická dokumentace a jeho parametry musely být nejdříve změřeny. Tato práce uvažuje hodnotu relativní permitivity substrátu $\epsilon_r = 1,4$ a výšku 4 mm, což byly v době její tvorby nejaktuálnější údaje.

Navrhované struktury jsou založeny na vlnovodu obdélníkového průřezu, v jehož dutině se nachází 3D textílie, která tak zároveň tvoří nosný prvek struktury. Horní a dolní stěna vlnovodu je realizována pomocí měděné folie, přičemž v horní vrstvě jsou vytvořeny motivy antén. Boční stěny jsou vytvořeny pomocí vodivé nitě Shieldex® 235/34 dtex 4-ply HC.



Obr. 1 3D textílie

2 NÁVRH VLNOVODŮ

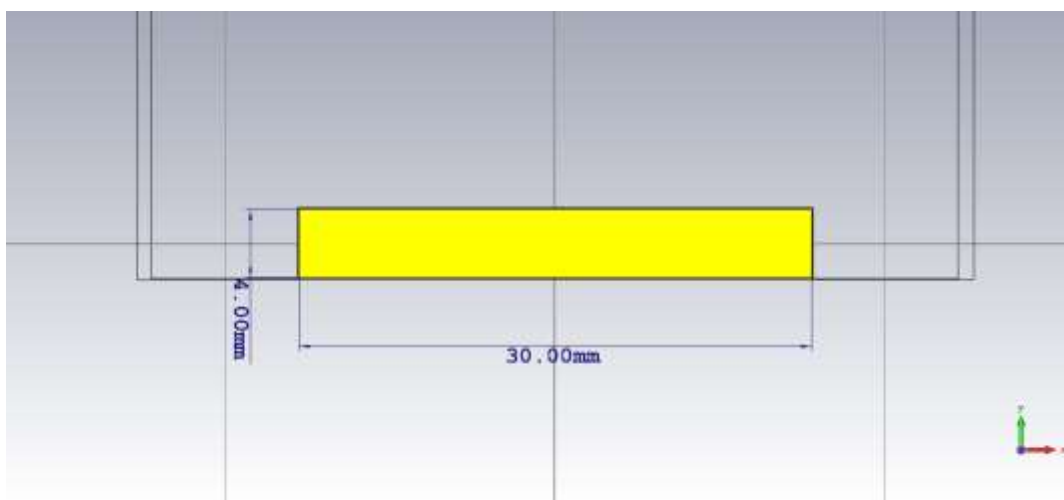
Prvním krokem je návrh samotného vlnovodu, na jehož základě budou jednotlivé struktury navrženy. Vlnovod by měl pracovat s videm TE₁₀. Pro základní návrh byl použit následující vzorec pro výpočet mezních kmitočtů pro jednotlivé vidy.

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

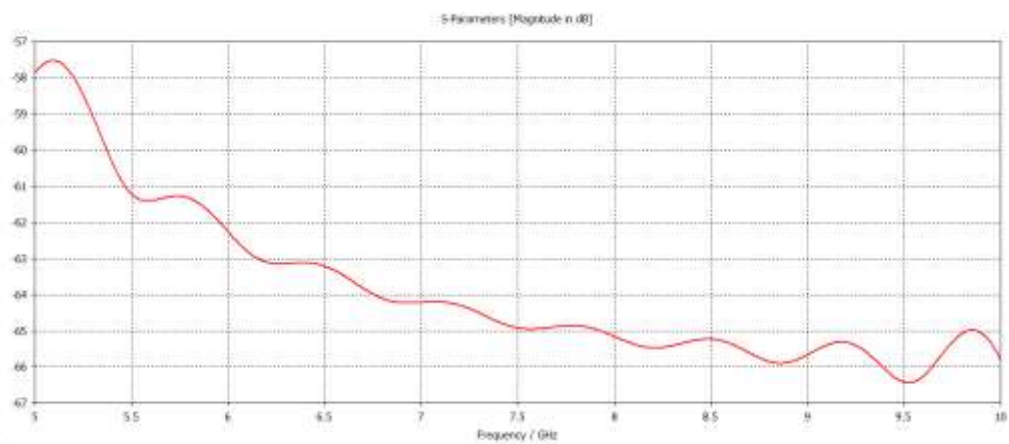
Rovnice 1 Výpočet mezních kmitočtů pro jednotlivé vidy, převzato z [4]

2.1 Vlnovod pro antény s lineární polarizací (VLP)

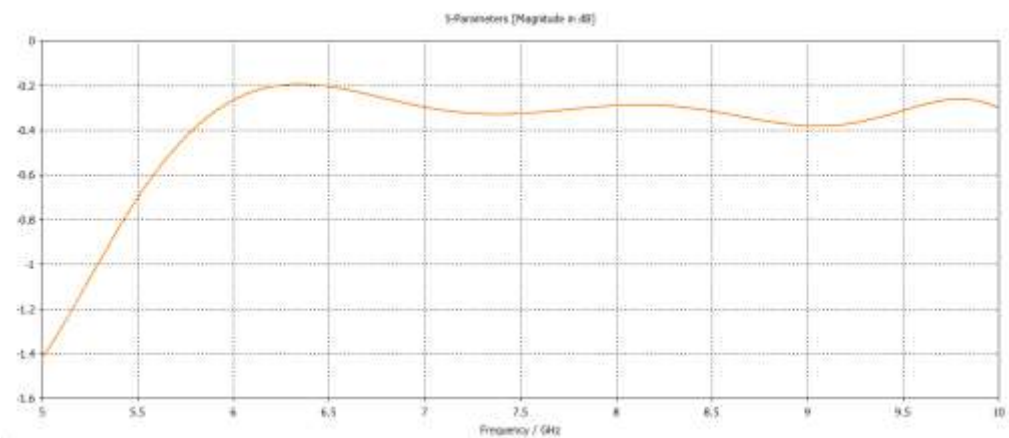
Vzhledem k tomu, že s rostoucí šířkou vlnovodu se zkracuje délka vlny ve vlnovodu na dané frekvenci, byl vlnovod pro antény s lineární polarizací navržen s větší šířkou a mezní frekvenci vidu TE₁₀ hluboko pod pracovním pásmem. Takový postup povede k úspoře podélných rozměrů struktury, jelikož se tím zkrátí délka štěrbin, které mají rozměr poloviny vlnové délky. Nevýhodou tohoto přístupu je vyšší citlivost struktury na změnu rozměrů a polohy jednotlivých štěrbin.



Obr. 2 Vlnovod pro antény s lineární polarizací

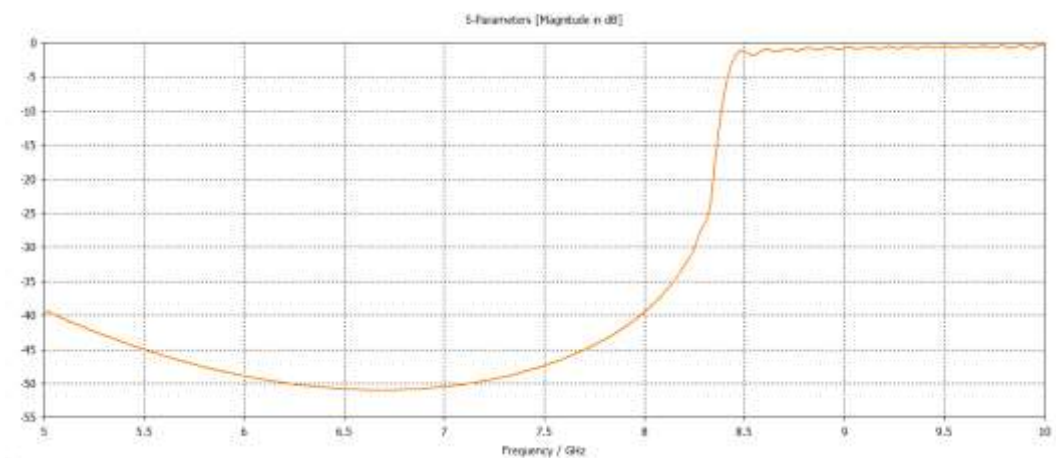


Obr. 3 Frekvenční závislost činitele odrazu VLP pro vid TE10



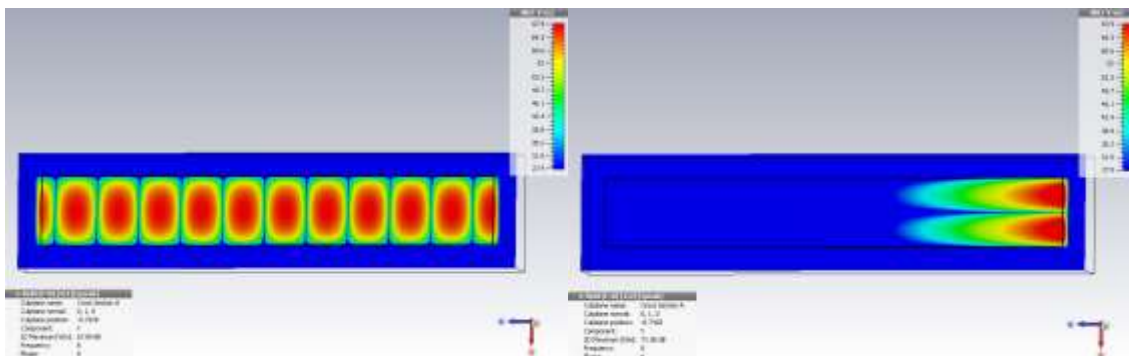
Obr. 4 Frekvenční závislost činitele přenosu VLP pro vid TE10

Z kmitočtových průběhů činitele odrazu a činitele přenosu je patrné, že vlnovod je pro vid TE10 impedančně přizpůsobený v celé zkoumané frekvenční oblasti a rovněž, že celá oblast leží v pásmu propustnosti.



Obr. 5 Frekvenční závislost činitele přenosu VLP pro vid TE20

Z kmitočtového průběhu činitele přenosu pro vid TE₂₀ je patrné, že v okolí frekvence 8 GHz tento vid vybuzen nebude a budeme se tudíž pohybovat v pásmu jednovírovosti. Vidy ve směru osy Y není potřeba ověřovat, jelikož je výška vlnovodu mnohem větší, než jeho šířka. Kritické kmitočty těchto vidů budou mít hodnoty v řádu desítek GHz. Nehrozí tedy ani jejich teoretické vybuzení.



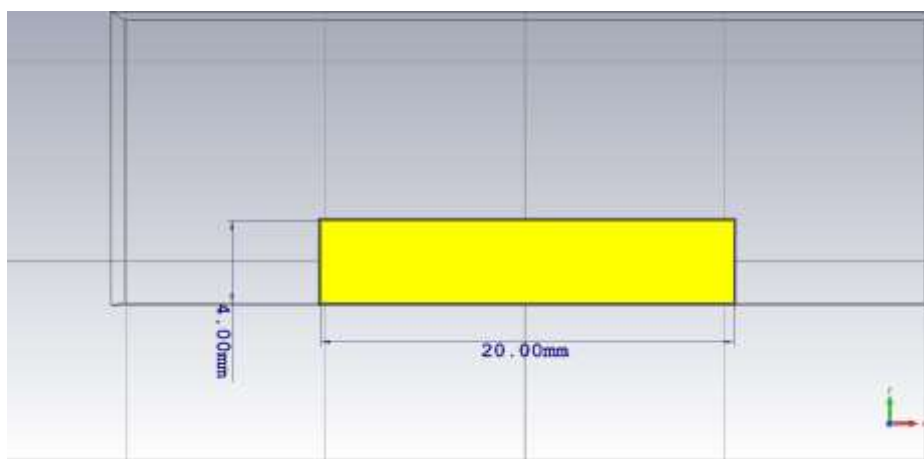
Obr. 6 Rozložení intenzity elektrického pole
VLP pro vid TE₁₀

Obr. 7 Rozložení intenzity elektrického pole
VLP pro vid TE₂₀

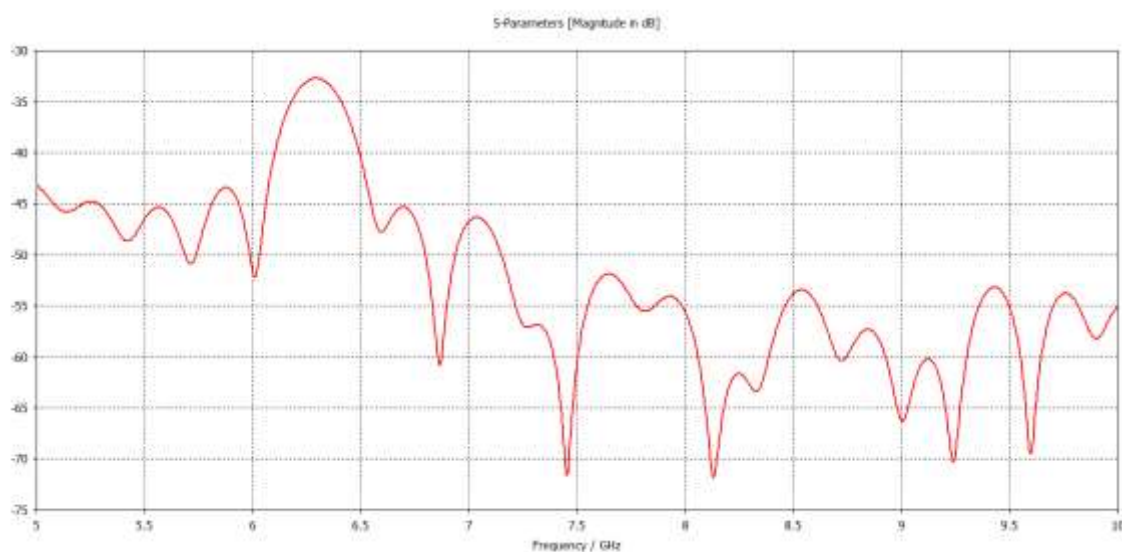
Výše zmíněné závěry dokumentuje i pohled na rozložení intenzit elektrického pole pro oba vidy. Délka vlny pro vid TE₁₀ a frekvenci 8 GHz je přibližně 37 mm.

2.2 Vlnovod pro antény s kruhovou polarizací (VKP)

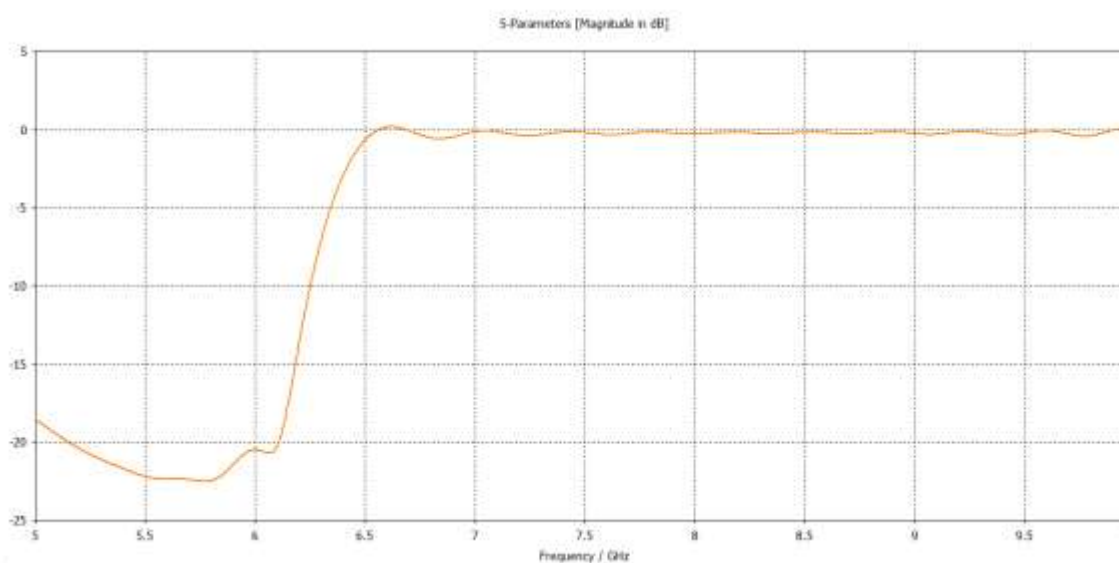
Vlnovod pro anténu s kruhovou polarizací byl naopak navržen s menší šířkou, jelikož by zde nebyla úspora místa v podélném směru tak výrazná, naopak však ušetříme místo ve směru příčném, jelikož budou antény s kruhovou polarizací později umísťovány vedle sebe, každá ve svém vlastním rameni vlnovodu.



Obr. 8 Vlnovod pro antény s kruhovou polarizací

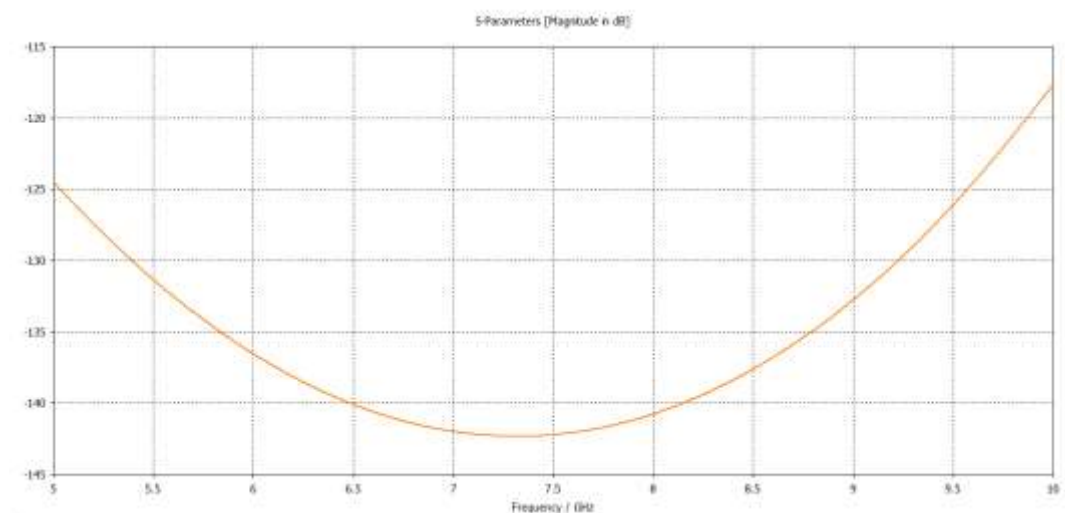


Obr. 9 Frekvenční závislost činitele odrazu VKP



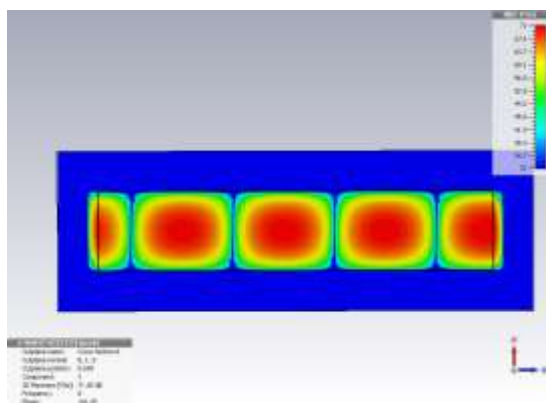
Obr. 10 Frekvenční závislost činitele přenosu VKP pro vid TE10

Jak je z frekvenčních průběhů činitele odrazu a činitele přenosu patrné, vlnovod je v celém zkoumaném frekvenčním rozsahu impedančně přizpůsobený, přičemž kritický kmitočet pro vid TE₁₀ má hodnotu přibližně 6,5 GHz. Hodnoty činitele odrazu pod touto frekvencí nelze považovat za směrodatné, jelikož v jejich případě simulační software nepracuje správně.

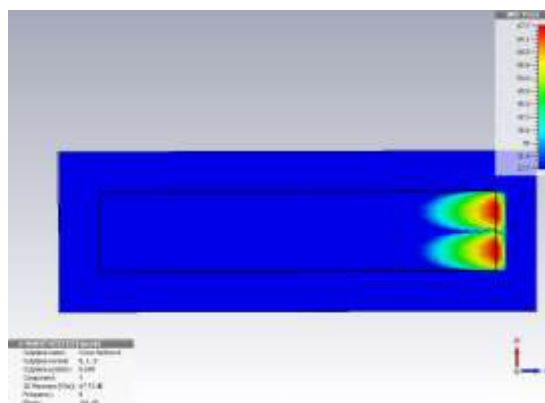


Obr. 11 Frekvenční závislost činitele přenosu VKP pro vid TE20

Z frekvenčního průběhu činitele přenosu pro vid TE20 je patrné, že daný vid vybuzen nebude, vlnovod tedy bude v okolí frekvence 8 GHz pracovat v režimu jednoho vidu.



Obr. 12 Rozložení intenzity elektrického pole VKP pro vid TE10



Obr. 13 Rozložení intenzity elektrického pole VKP pro vid TE20

Obdobné závěry opět plynou z pohledů na rozložení intenzit elektrického pole pro oba vidy. U vidu TE20 je patrné, že daleko méně proniká do struktury, než v případě vlnovodu pro antény s lineární polarizací. Vlnová délka pro vid TE10 a frekvenci 8 GHz je přibližně 51 mm.

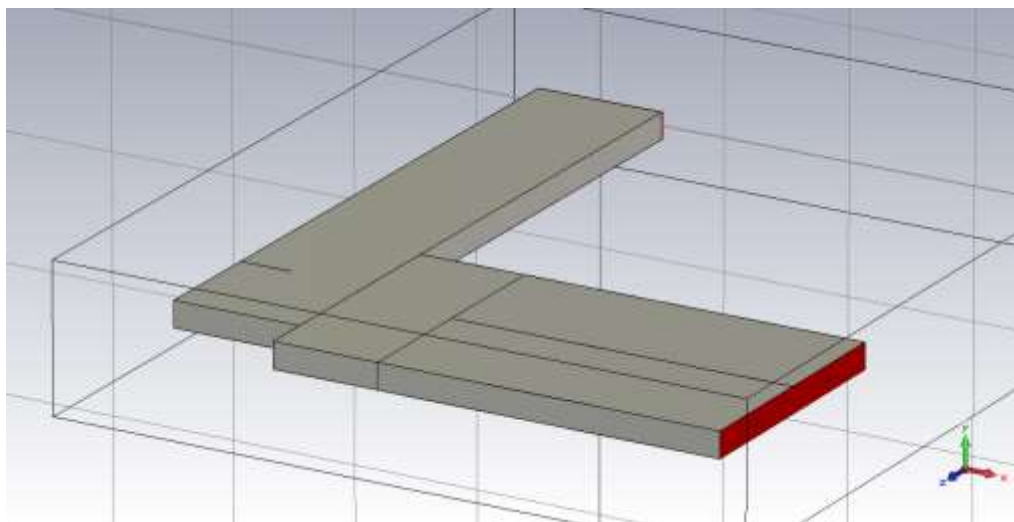
3 NÁVRH DĚLIČŮ VÝKONU

Jelikož anténní řada pro kruhovou polarizaci nepracovala dobře při umístění jednotlivých antén do jednoho ramena vlnovodu za sebe, byly navrženy děliče výkonu, aby mohla každá anténa mít rameno vlastní.

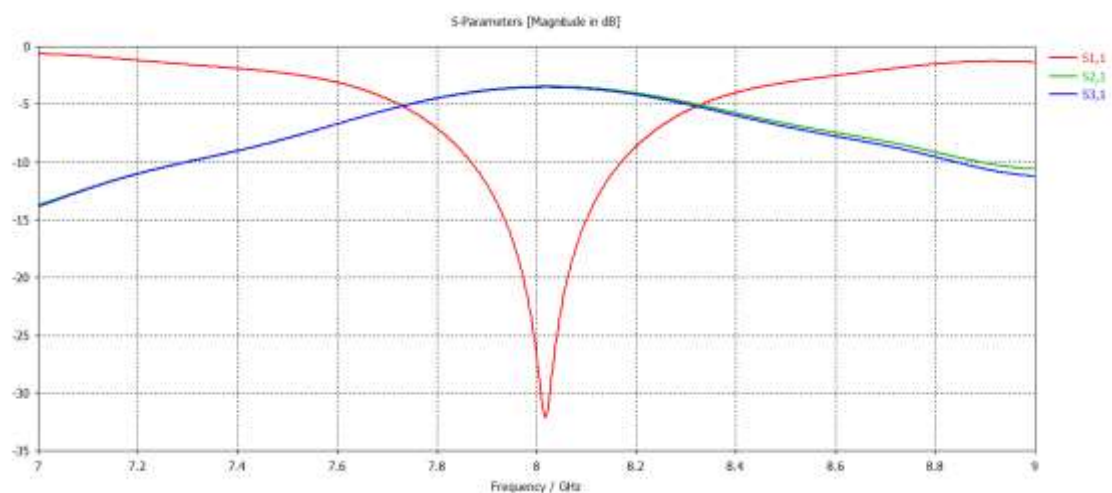
3.1 Dělič s odbočkami

Základní koncepce tohoto děliče byla převzata z [1]. Tento dělič se vyznačuje snadnou modifikovatelností. Do struktury lze přidat libovolný počet odboček, přičemž u každé odbočky lze samostatně ladit fázi a amplitudu signálu vůči ostatním odbočkám. Ladění fáze spočívá v podélném posuvu odbočky vůči hlavnímu vlnovodu, amplitudu ovlivňuje šířka vazebního okna odbočky. Těchto vlastností lze s výhodou využít k řízení směru hlavního laloku řady. V našem případě byl dělič navržen tak, aby v každém rameni byla fáze i amplituda stejná a řada tedy zářila kolmo na rovinu vlnovodu. Problematickou vlastností tohoto děliče je impedanční přizpůsobení na požadované frekvenci, kterého je s každou přibývajícím odbočkou problematičtější dosáhnout a doba potřebná k vyladění struktury rychle roste.

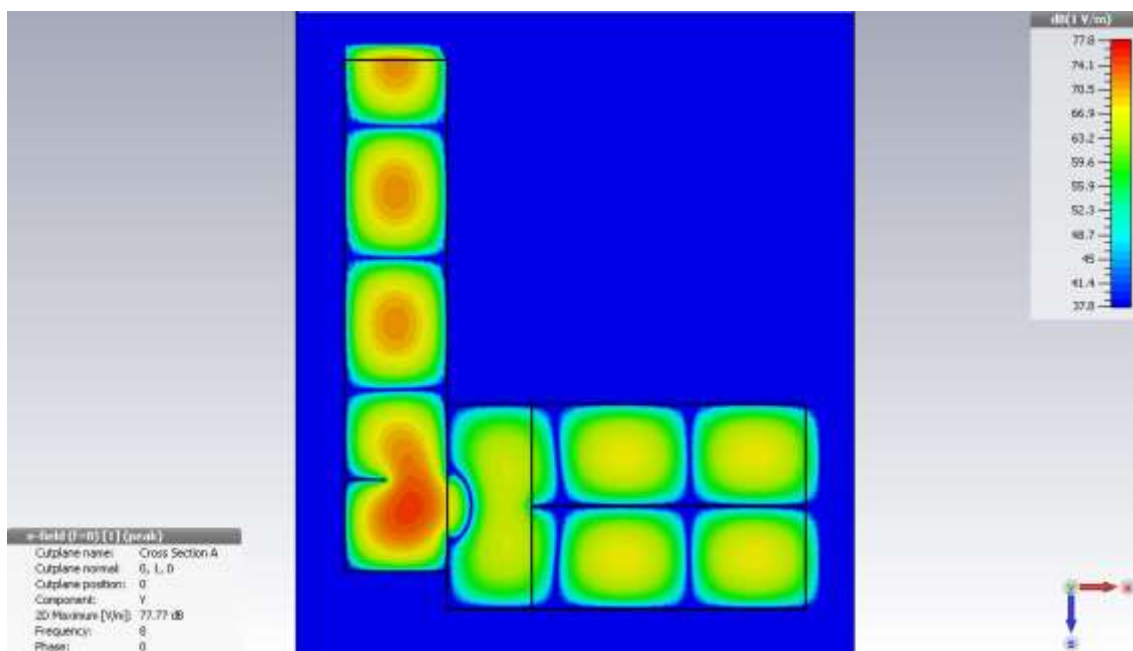
3.1.1 Dělič s jednou odbočkou



Obr. 14 Dělič s jednou odbočkou



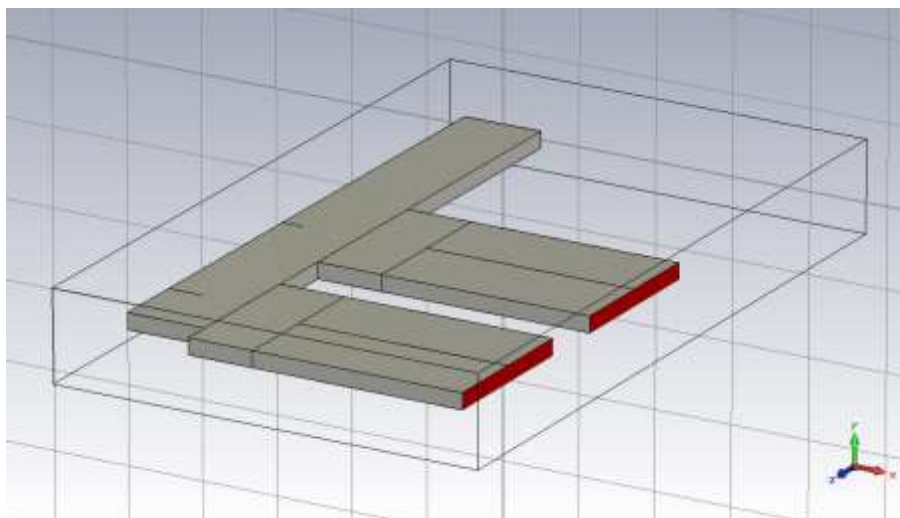
Obr. 15 Činitel odrazu a činitelé přenosu pro dělič s jednou odbočkou



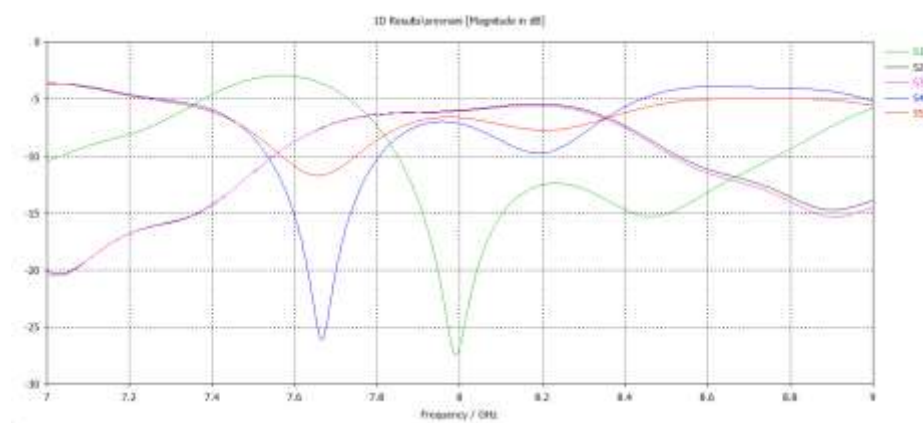
Obr. 16 Rozložení intenzity elektrického pole pro dělič s jednou odbočkou

Z grafiky výše je patrné, že je dělič na požadované frekvenci impedančně přizpůsoben, a že v jednotlivých ramenech jsou amplitudy i fáze shodné.

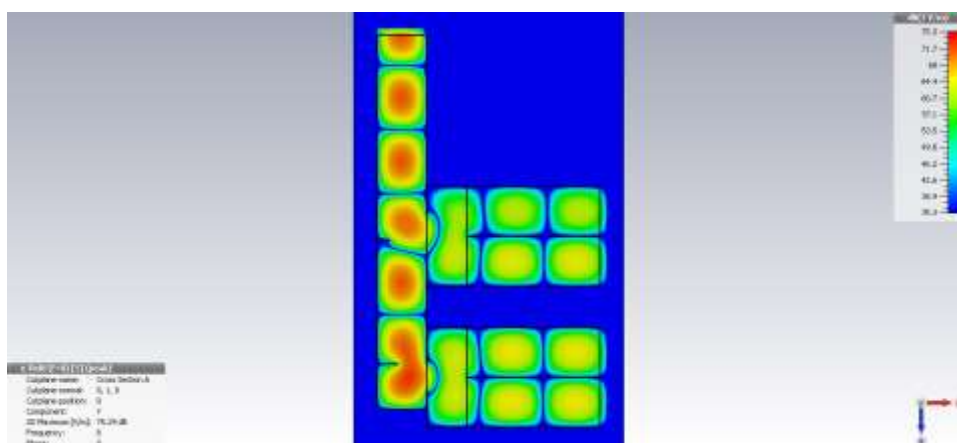
3.1.2 Dělič se dvěma odbočkami



Obr. 17 Dělič se dvěma odbočkami



Obr. 18 Činitel odrazu a činitelé přenosu pro dělič s jednou odbočkou

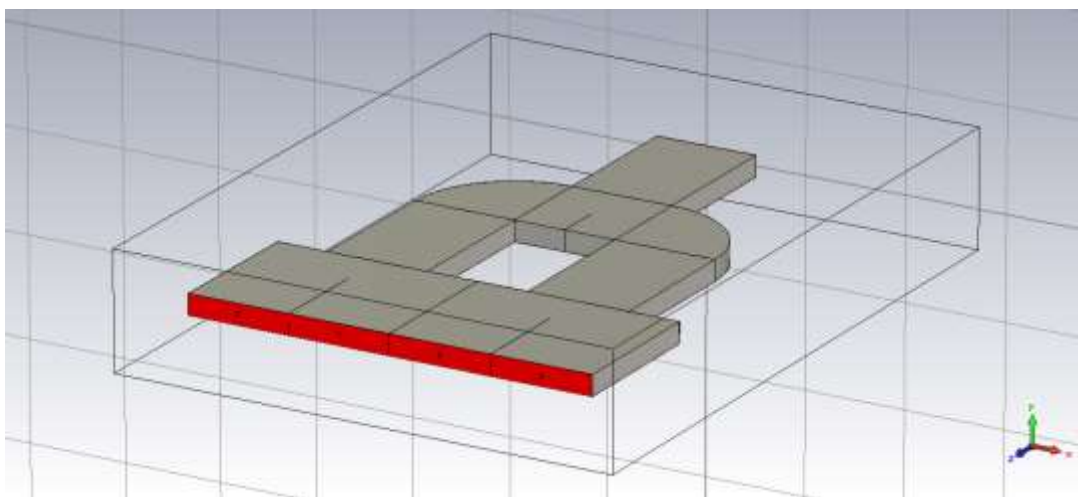


Obr. 19 Rozložení intenzity elektrického pole pro dělič se dvěma odbočkami

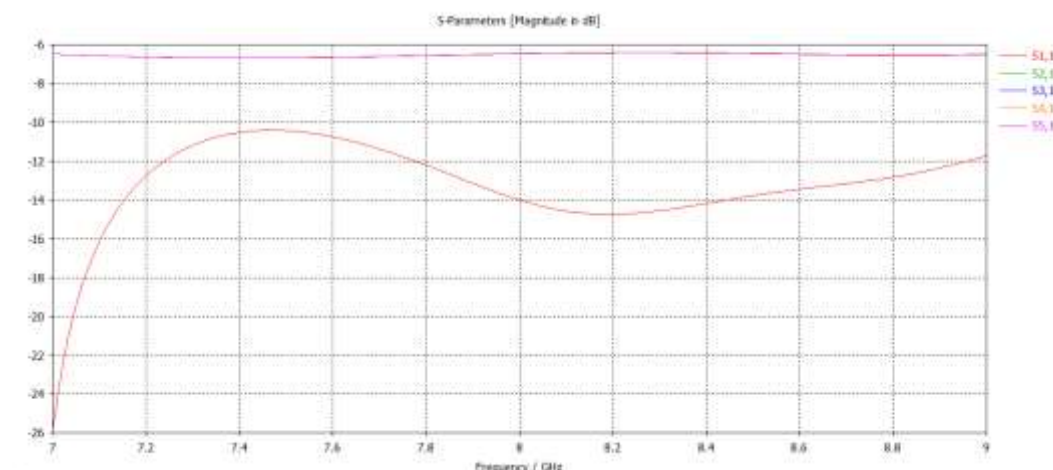
Z výše zmíněných obrázků je patrné, že rovněž dělič se dvěma odbočkami je na požadované frekvenci impedančně přizpůsoben, nicméně, přenos do obou odboček není úplně rovnoměrný a u druhé odbočky rovněž dochází k nerovnoměrnému rozdělení mezi jednotlivá ramena. Fáze se ve všech čtyřech ramenech shodují. Parametry struktury by pravděpodobně šlo zlepšit dalším laděním. Pro další použití se však zmíněné nedokonalosti neukázaly být kritické.

3.2 Dělič s postupným větvením

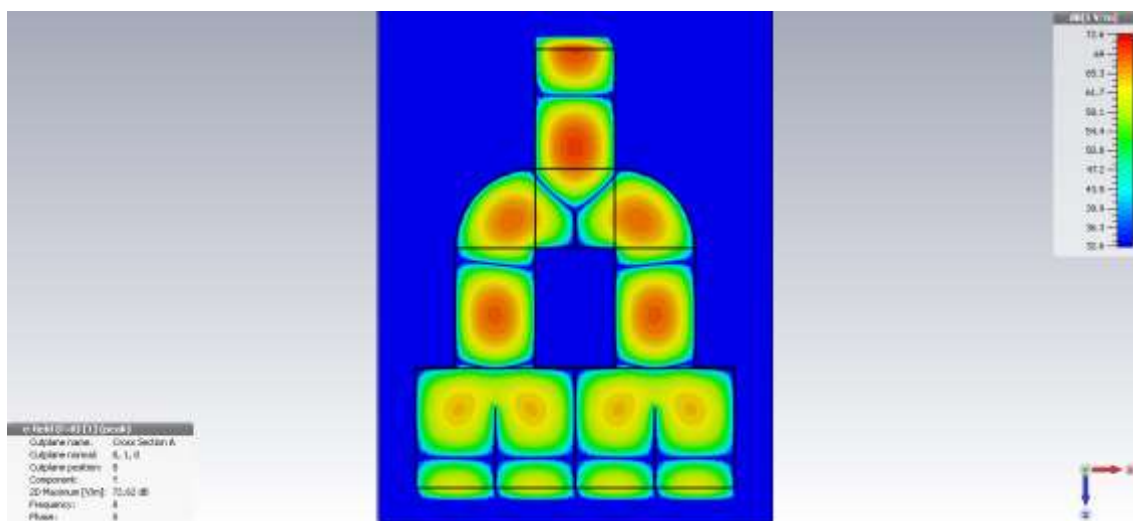
Základní koncepce tohoto děliče byla převzata z [2]. Výhodou tohoto děliče je skutečnost, že svým uspořádáním zabezpečuje v každém rameni stejnou amplitudu a fázi signálu. Nevýhodou je jeho obtížná modifikovatelnost. Pro každý počet ramen musí být dělič navrhnout znova, s odlišnou geometrií.



Obr. 20 Dělič s postupným větvením



Obr. 21 Činitel odrazu a činitelé přenosu děliče s postupným větvením



Obr. 22 Rozložení intenzity elektrického pole pro dělič s postupným větvením

Z grafů a obrázků výše plyne, že rovněž tento dělič je na požadované frekvenci impedančně přizpůsoben. Dělení energie a shodnost fází mezi jednotlivými rameny je takřka dokonalá.

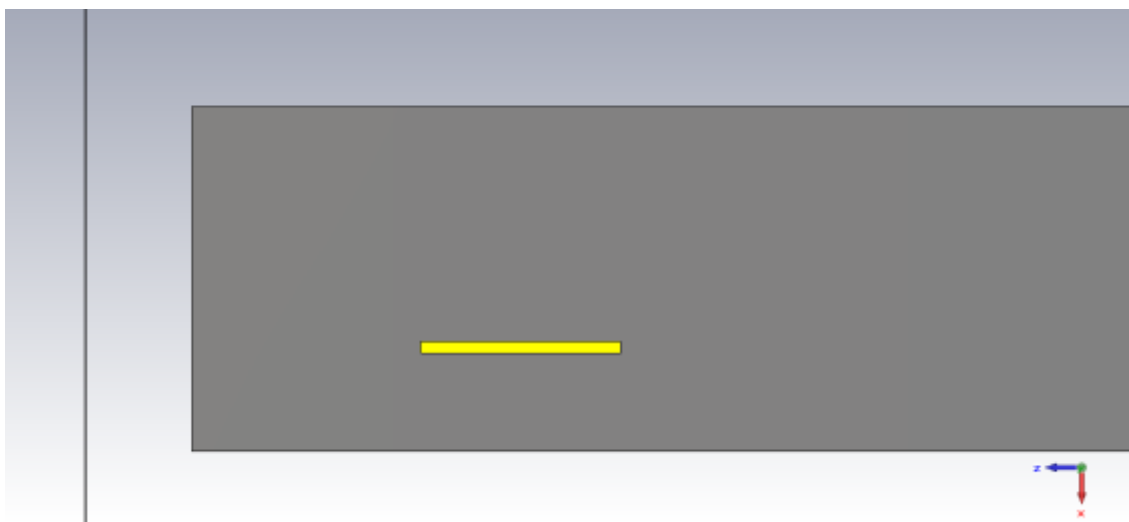
4 NÁVRH ANTÉNNÍCH STRUKTUR S LINEÁRNÍ POLARIZACÍ

Byly navrženy struktury jak pro vertikální, tak pro horizontální polarizaci. Sestávají se z několika štěrbinových antén umístěných v jednom rameni vlnovodu. Pro vertikální polarizaci jsou štěrby umístěny napříč vlnovodem, pro horizontální podélně vlnovodem. Vlnovod je ve všech případech na svém druhém konci zkratován, aby v něm bylo definováno neměnné rozložení intenzity elektrického pole. Struktury byly navrženy s využitím informací z [7], [8], [9] a [12].

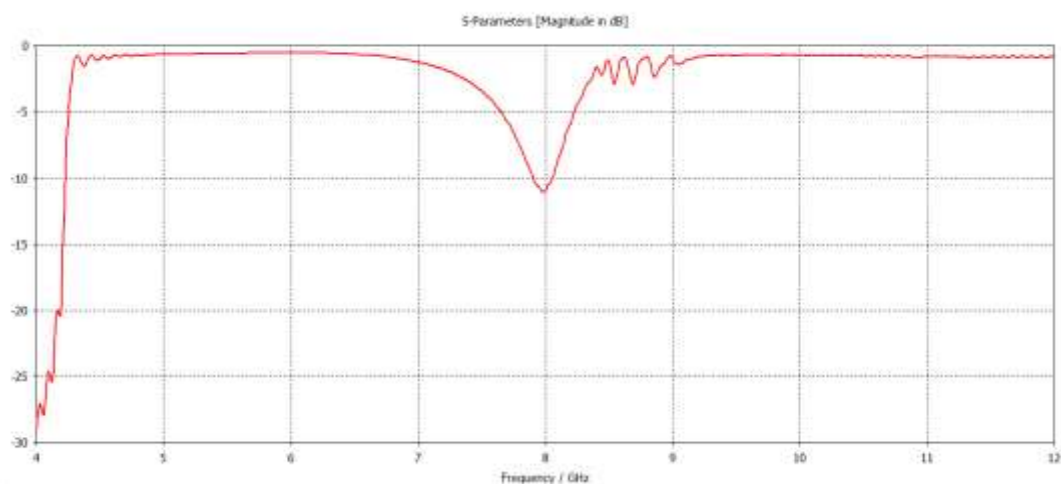
4.1 Antény pro horizontální polarizaci

Štěrbinová anténa, umístěná podélně vlnovodem, září díky tomu, že narušuje tok proudů po plášti vlnovodu v příčném směru, čímž mezi okraji štěrby vznikne rozdíl napětí. Z toho důvodu nemůže být štěrbina umístěna ve středu vlnovodu, jelikož je zde proud, tekoucí příčně stěnou vlnovodu, nulový. Délka štěrby ovlivňuje její rezonanční frekvenci, její délka odpovídá přibližně polovině vlnové délky rezonančního kmitočtu. Tloušťka štěrby ovlivňuje šířku pásma, ve kterém je struktura impedančně přizpůsobená. Čím širší, tím větší šířka pásma, klesá však polarizační čistota antény. Štěrbina by měla být umístěna tak, aby se její střed nacházel v oblasti maxima intenzity elektrického pole půlvlny.

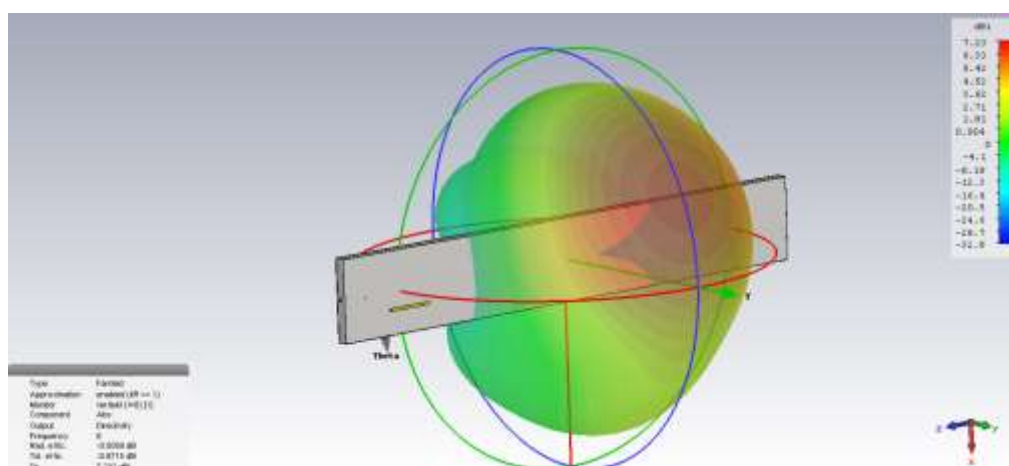
4.1.1 Anténa pro horizontální polarizaci – 1 prvek



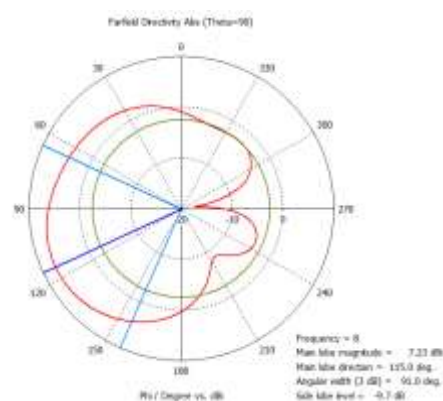
Obr. 23 Jednoprvková anténa pro horizontální polarizaci



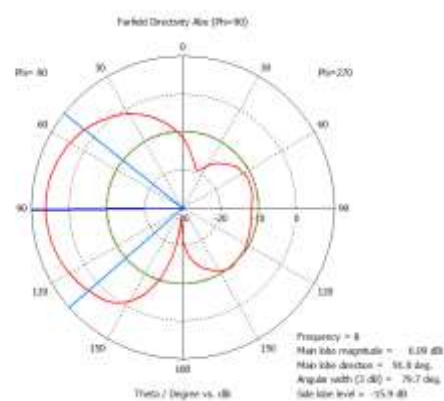
Obr. 24 Kmitočtový průběh činitele odrazu jednoprvkové antény pro horizontální polarizaci



Obr. 25 3D směrové charakteristiky jednoprvkové antény pro horizontální polarizaci



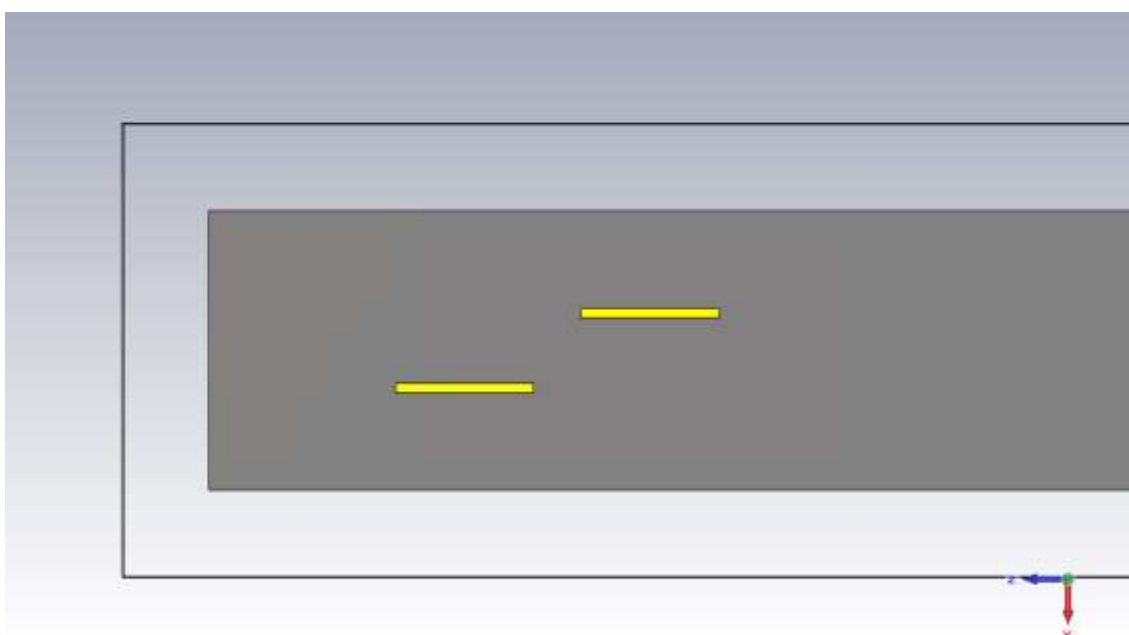
Obr. 26 Směrové charakteristiky - rovina E



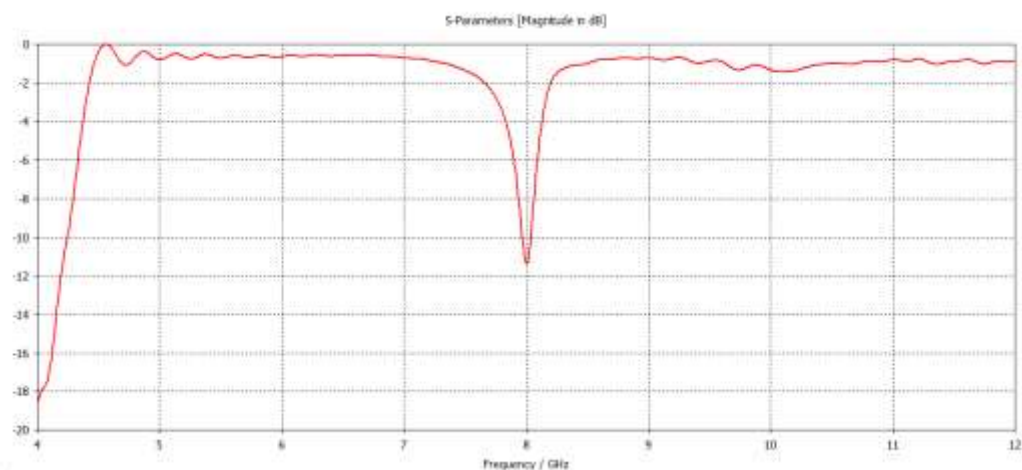
Obr. 27 Směrové charakteristiky - rovina H

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu jednoprvkové antény je patrné, že anténa rezonuje na požadované frekvenci, nesplňuje však kritérium pro impedanční přizpůsobení. Toto by šlo zlepšit posunem antény dále od středu vlnovodu, avšak anténa zde slouží pouze jako prototyp prvku pro anténní řadu, ve které již bude kritéria dosaženo i se současným odsazením od středu. Ze směrových charakteristik je patrné vyosení hlavního laloku v rovině E, což je dáno právě vyosením antény od středu vlnovodu a tedy nestejnými rozměry vodivého povrchu vlnovodu pod a nad štěrbinou. Tento jev by měl být u řady rovněž potlačen. Zisk antény je 7,3 dBi, úhlová šířka hlavního laloku v rovině H je přibližně 80° , v rovině E přibližně 91° .

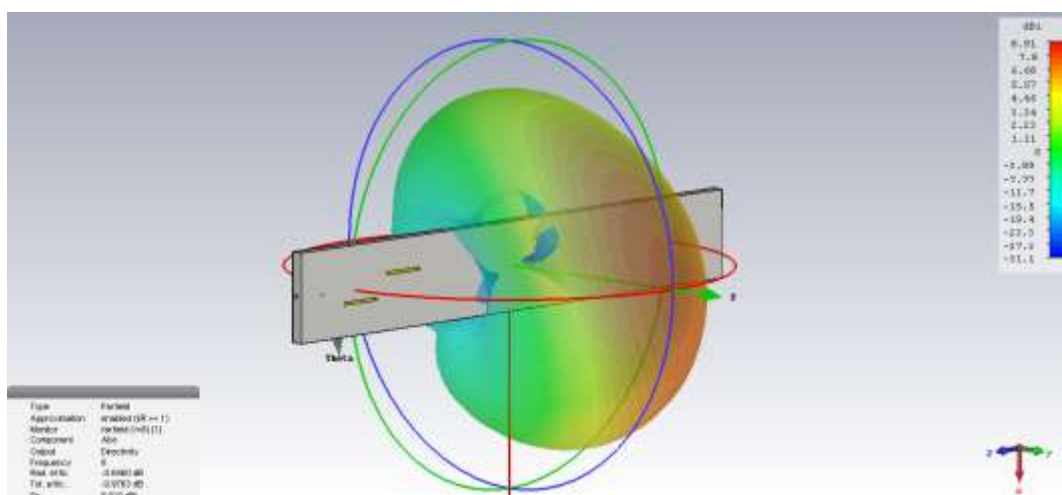
4.1.2 Dvouprvková anténní řada pro horizontální polarizaci



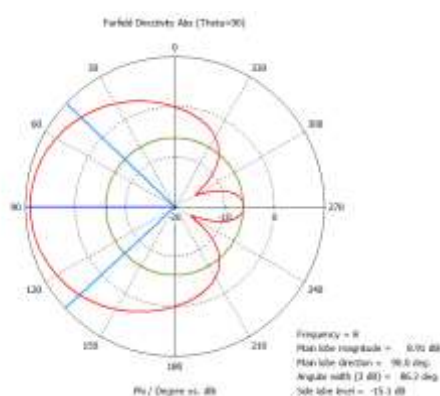
Obr. 28 Dvouprvková řada pro horizontální polarizaci



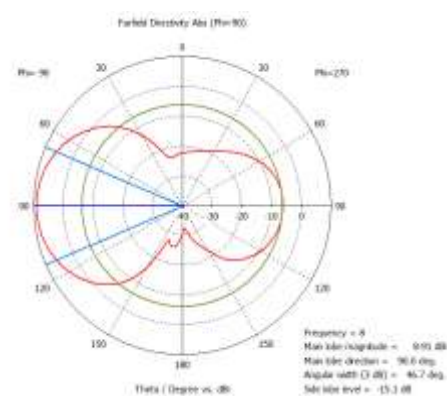
Obr. 29 Kmitočtový průběh činitele odrazu dvouprvkové řady pro horizontální polarizaci



Obr. 30 3D směrové charakteristiky pro dvouprvkovou řadu



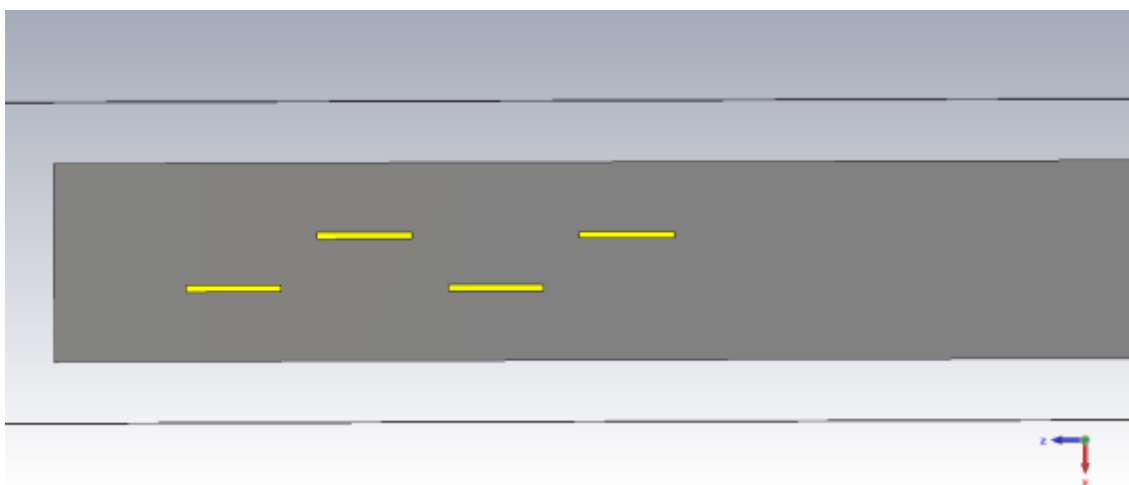
Obr. 31 Směrové charakteristiky - rovina E



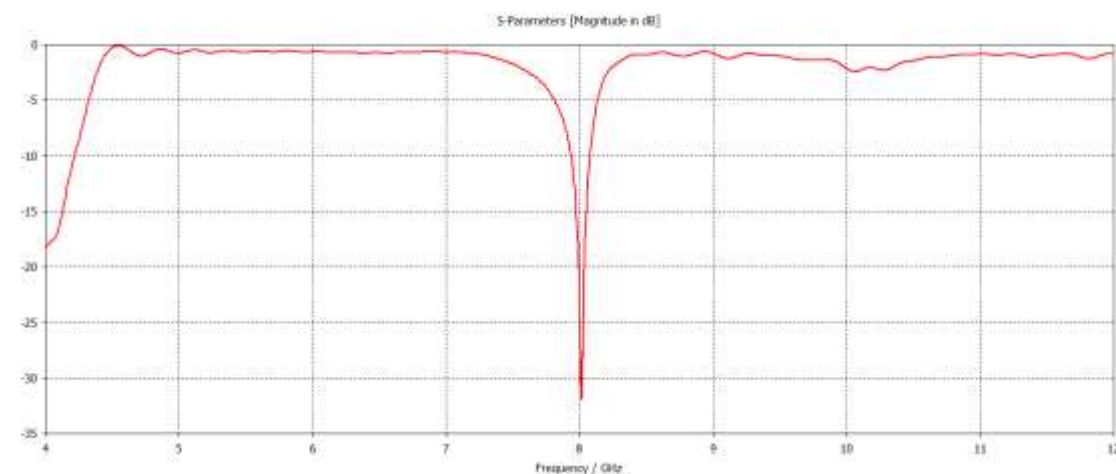
Obr. 32 Směrové charakteristiky - rovina H

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu dvouprvkové řady je patrné, že je impedančně přizpůsobená na požadovaném kmitočtu. Šířka pásma činí přibližně 66 MHz. Zisk řady stoupl na 8,9 dBi. Dle předpokladu došlo ke kompenzaci vyosení směru hlavního laloku v rovině E. Šířka hlavního laloku v rovině H výrazně klesnula – na přibližně 47°, šířka hlavního laloku v rovině E zůstala prakticky beze změn a činí přibližně 86°, jelikož v horizontálním směru žádné prvky přidány nebyly.

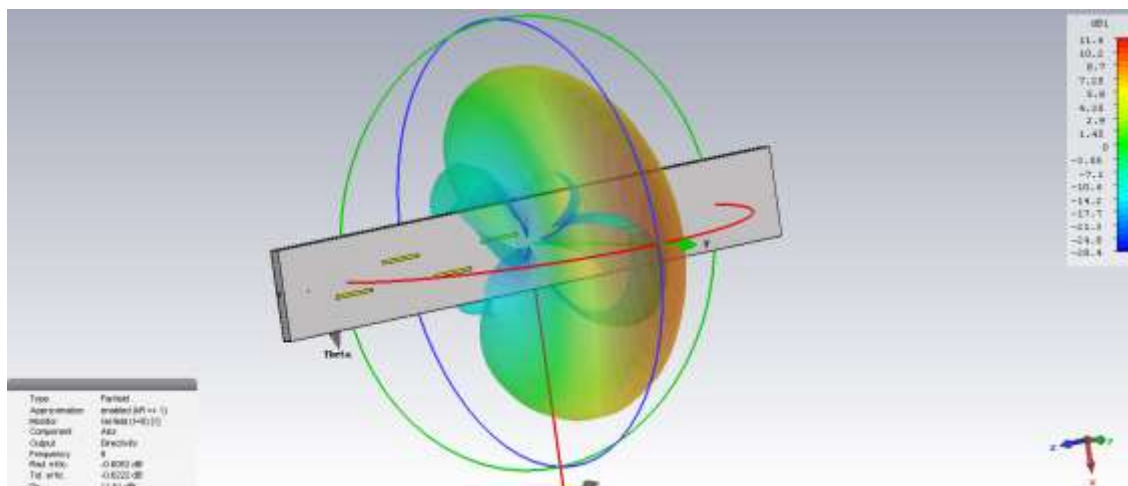
4.1.3 Čtyř-prvková anténní řada pro horizontální polarizaci



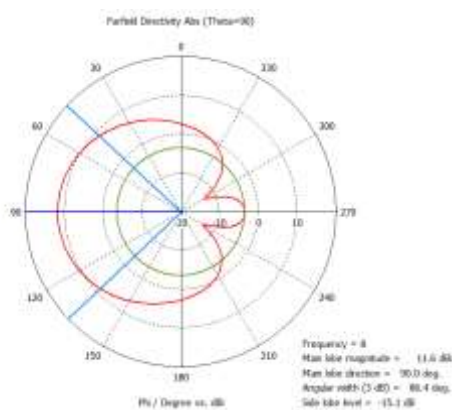
Obr. 33 Řada pro horizontální polarizaci - 4 prvky



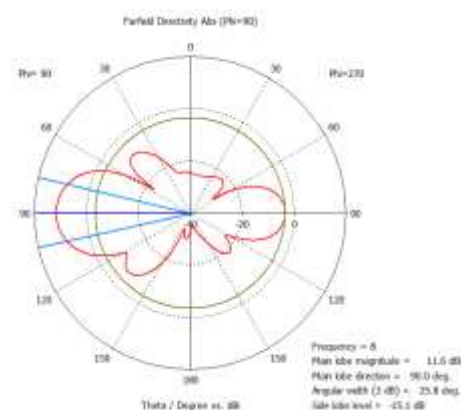
Obr. 34 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady pro horizontální polarizaci



Obr. 35 3D Směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady



Obr. 36 Směrové charakteristiky - rovina E



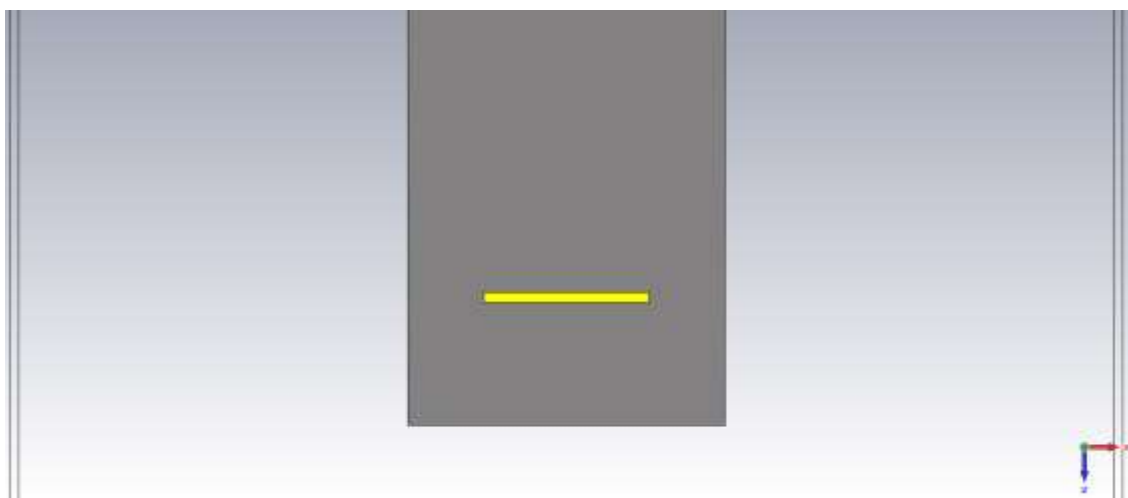
Obr. 37 Směrové charakteristiky - rovina H

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu je patrné, že rovněž čtyř-prvková řada je impedančně přizpůsobená na požadované frekvenci. Šířka pásma činí přibližně 132 MHz. Oproti dvouprvkové řadě tedy došlo ke zdvojnásobení šířky pásma. Směrové charakteristiky zaznamenávají další zúžení šířky hlavního laloku v rovině H – na přibližně 26°. Šířka hlavního laloku v rovině E zůstává opět bez výrazných změn – přibližně 87°.

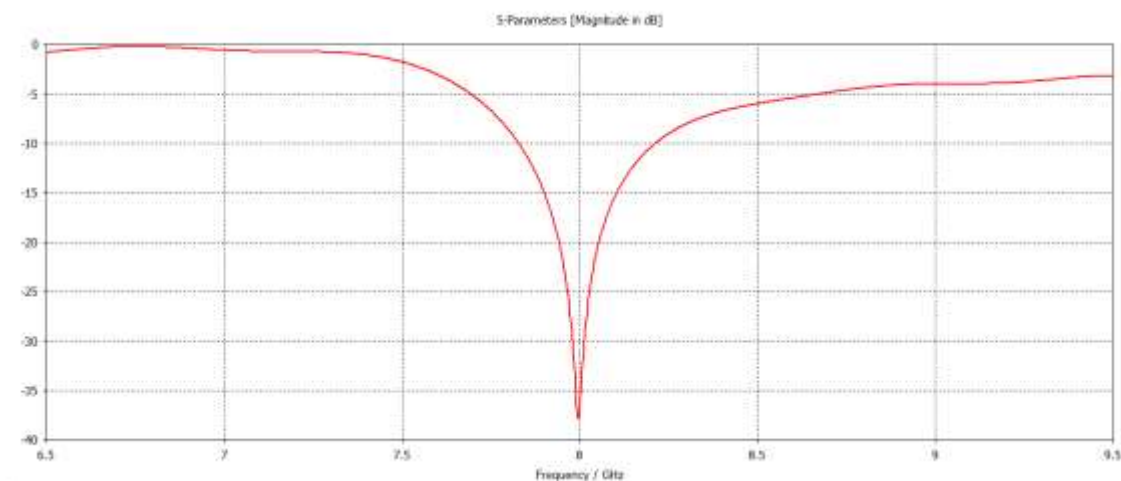
4.2 Antény pro vertikální polarizaci

Princip činnosti antény pro vertikální polarizaci je obdobný jako u antény pro polarizaci horizontální. Štěrbina je zde umístěna napříč vlnovodem, narušuje tedy povrchové proudy tekoucí podél stěny vlnovodu. Z toho důvodu je teoretické optimální umístění štěrby v oblasti minima intenzity elektrického pole, tedy ve vzdálenosti poloviny vlnové délky od zkratovaného konce vlnovodu. V praxi však štěrbina ovlivní rozložení pole ve svém okolí, a tudíž bude tato vzdálenost jiná.

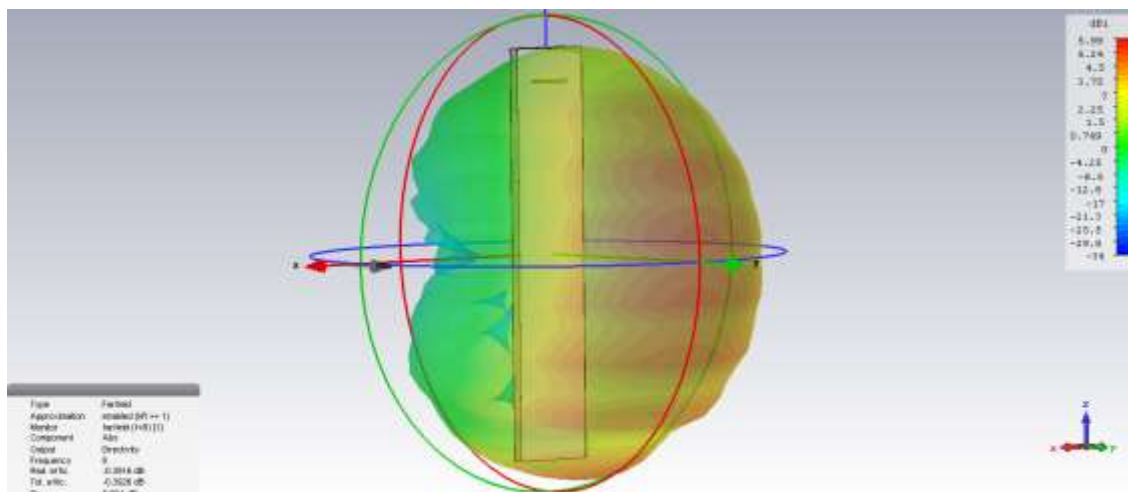
4.2.1 Anténa pro vertikální polarizaci – 1 prvek



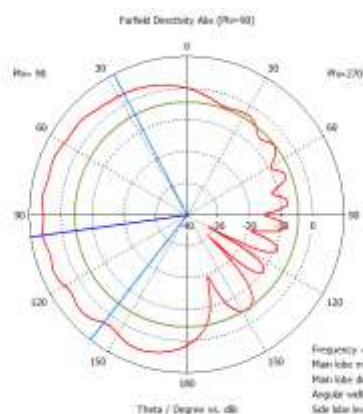
Obr. 38 Jednoprvková anténa pro vertikální polarizaci



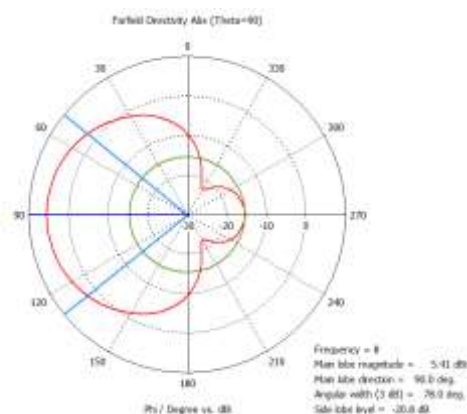
Obr. 39 Kmitočtový průběh činitele odrazu jednoprvkové antény pro vertikální polarizaci



Obr. 40 3D směrové charakteristiky jednoprvkové antény pro vertikální polarizaci



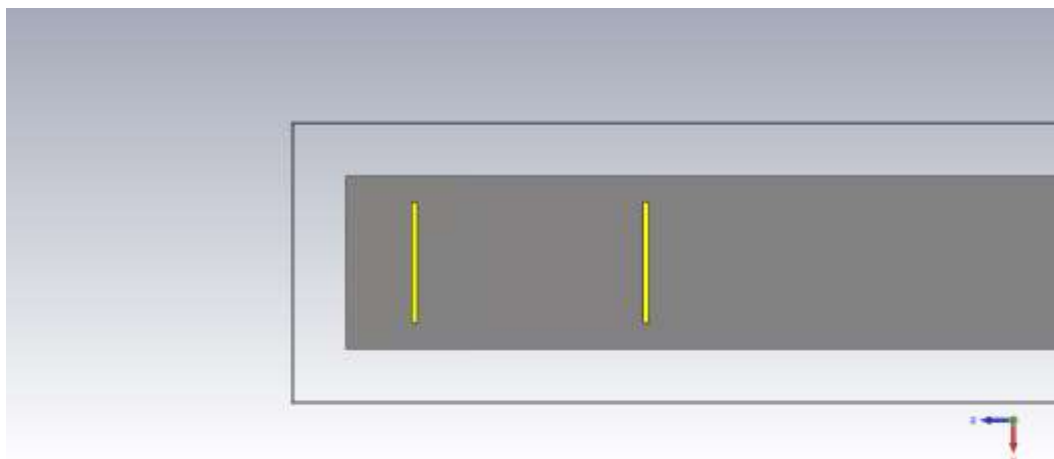
Obr. 41 Směrové charakteristiky - rovina E



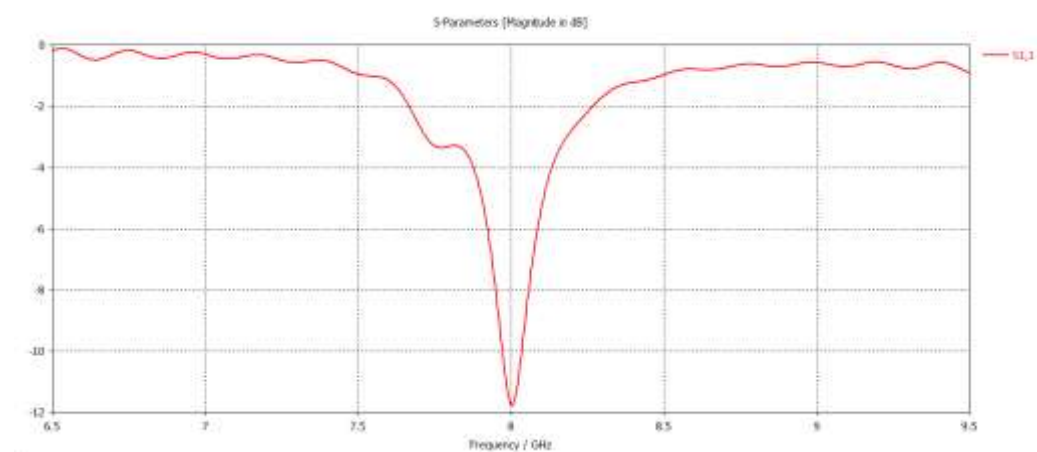
Obr. 42 Směrové charakteristiky - rovina H

Jak je z kmitočtového průběhu činitele odrazu patrné, anténa je impedančně přizpůsobená na požadovaném kmitočtu, přičemž šířka pásma dosahuje přibližně 387 MHz, což je téměř trojnásobek nejlepšího výsledku antény pro horizontální polarizaci. Zisk antény činí 6 dBi, šířka hlavního laloku v rovině E je přibližně 114°, v rovině H přibližně 78°. Směr hlavního laloku je opět ze stejného důvodu, jako u antény s horizontální polarizací, vyosen ze směru kolmého na vlnovod.

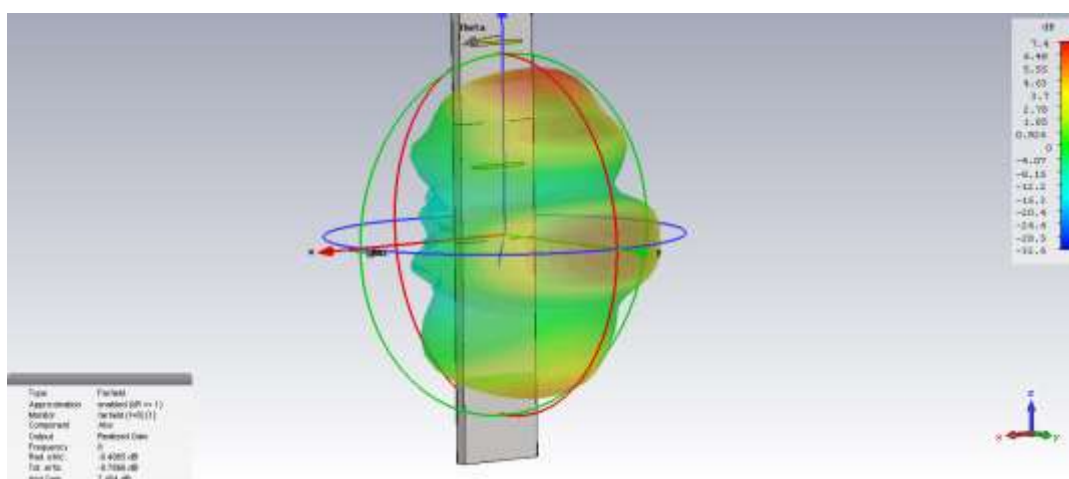
4.2.2 Dvouprvková anténní řada pro vertikální polarizaci



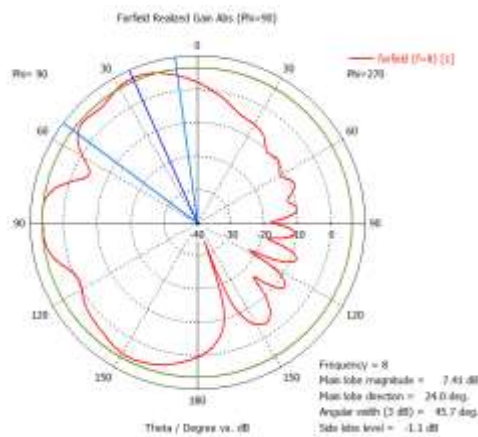
Obr. 43 Dvouprvková řada pro vertikální polarizaci



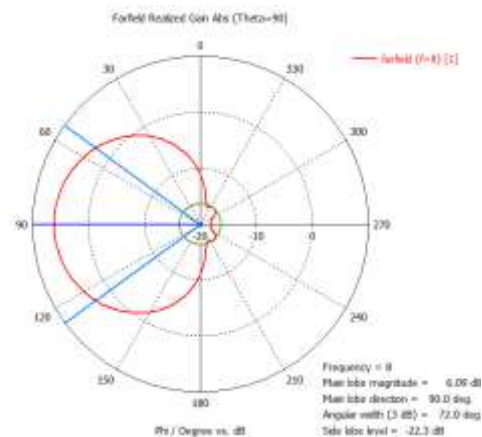
Obr. 44 Kmitočtový průběh činitele odrazu dvouprvkové řady



Obr. 45 3D směrové charakteristiky dvouprvkové řady



Obr. 46 Směrové charakteristiky - rovina E



Obr. 47 Směrové charakteristiky - rovina H

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu je patrné, že je struktura impedančně přizpůsobená na požadované frekvenci, avšak oproti jednoprvkové struktuře došlo k výraznému zhoršení, jak v úrovni, tak v šířce pásma, která tentokrát činí pouze 71 MHz. Směrové charakteristiky se vyznačují výraznými postranními laloky v rovině E, které dokonce svou velikostí převyšují zamýšlený hlavní lalok. Rovina H je prakticky beze změn. Zisk antény ve směru kolmém na vlnovod činí 6,8 dBi.

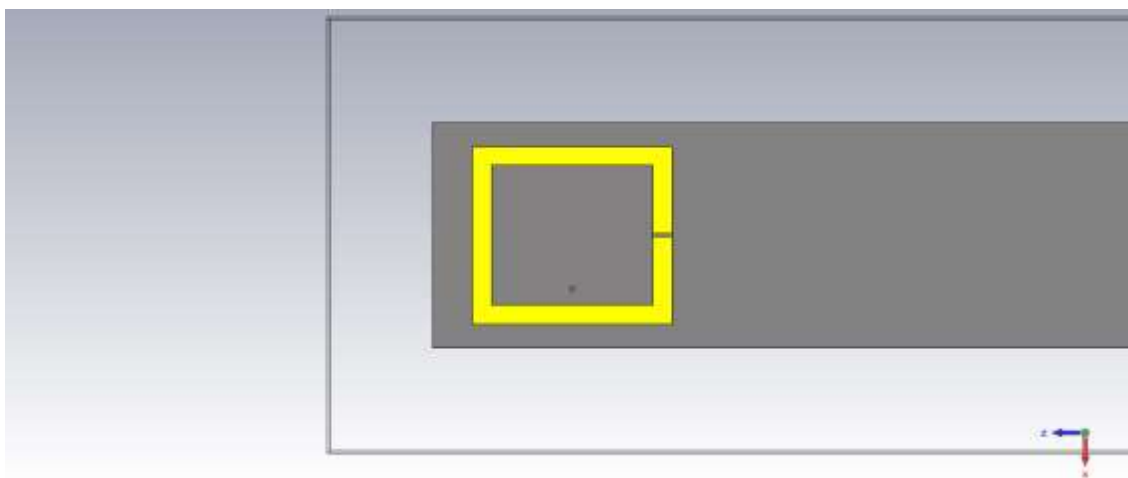
Struktura je velmi obtížně laditelná a to i po přidání rezonančních okének, které měly zajistit stálější rozložení intenzity elektrického pole v okolí jednotlivých prvků. Z tohoto důvodu, a na základě výsledků simulovaných parametrů, byla tato struktura označena jako neperspektivní a nebylo v jejím návrhu dále pokračováno.

Jako alternativa za struktury s vertikální i horizontální polarizací byly navrženy struktury s polarizací kruhovou, generující pravotočivou vlnu, které jsou rozebrány v následující kapitole.

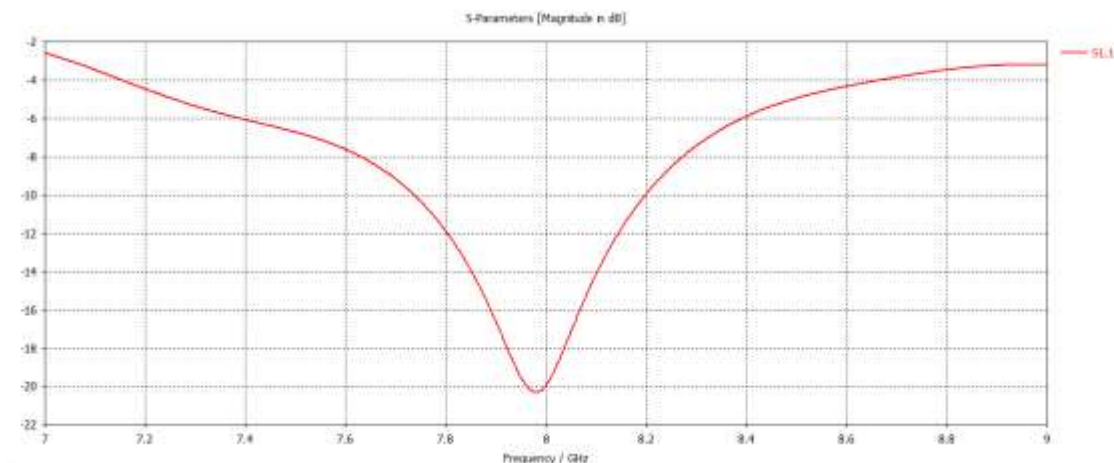
5 NÁVRH ANTÉNNÍCH STRUKTUR S KRUHOVOU POLARIZACÍ

5.1 Obdélníková štěrbinová anténa s kruhovou polarizací

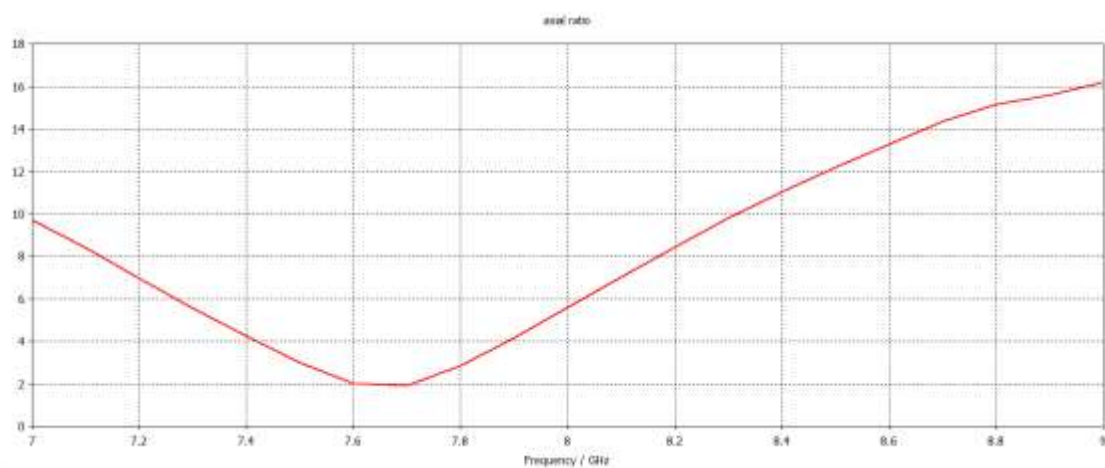
Základní návrh obdélníkové štěrbinové antény byl převzat z [3]. K vybuzení kruhově polarizované vlny slouží především, uvnitř antény umístěný, zkratovací kolík. Zkratovací pásek, spojující vnitřní kovovou plochu antény a zbytek stěny vlnovodu, slouží ke zlepšení impedančního přizpůsobení struktury.



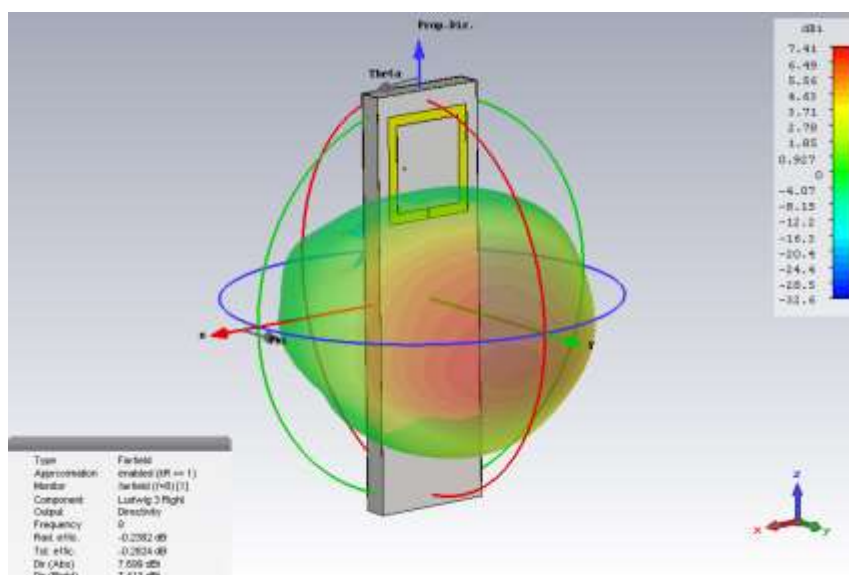
Obr. 48 Obdélníková anténa pro kruhovou polarizaci



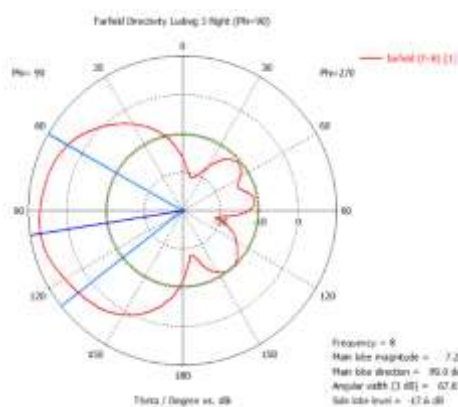
Obr. 49 Kmitočtový průběh činitele odrazu obdélníkové antény



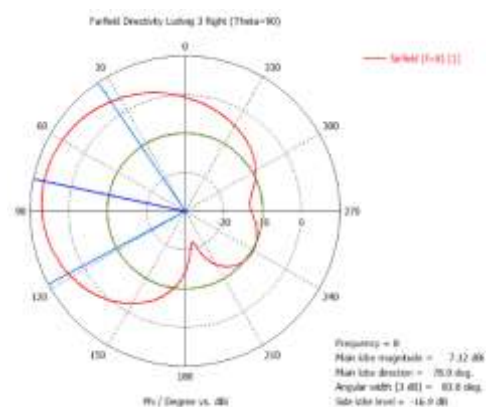
Obr. 50 Kmitočtový průběh osového poměru obdélníkové antény



Obr. 51 3D směrové charakteristiky obdélníkové antény



Obr. 52 Směrové charakteristiky - rovina YZ

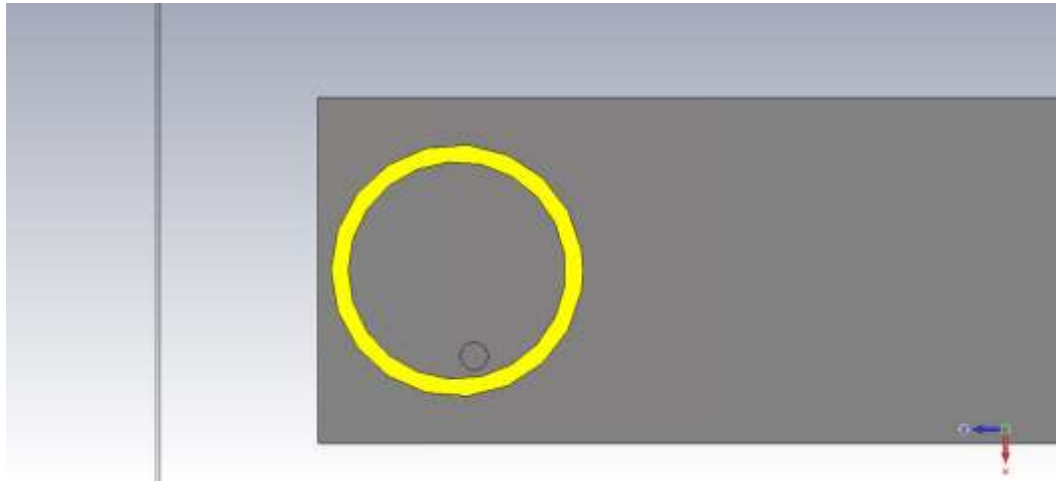


Obr. 53 Směrové charakteristiky - rovina XY

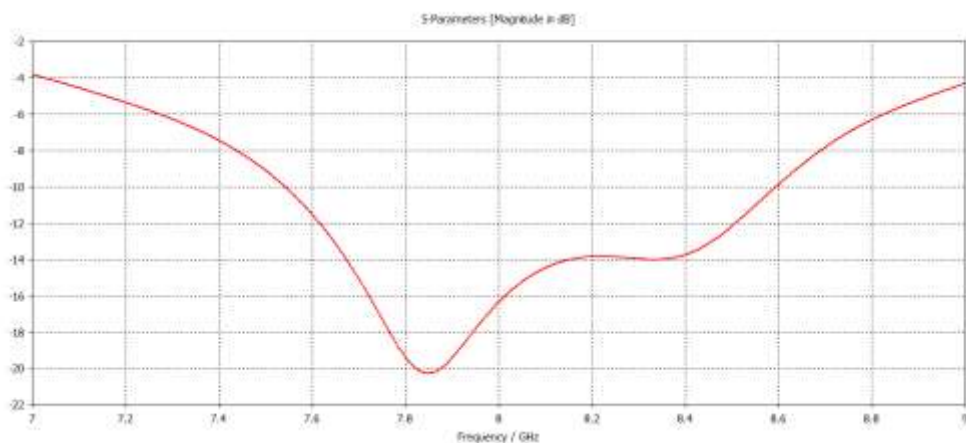
Z kmitočtového průběhu činitele odrazu obdélníkové antény je patrné, že anténa je impedančně přizpůsobená na požadovaném kmitočtu, přičemž šířka pásma činí 460 MHz. Z kmitočtového průběhu osového poměru je patrné, že nejlepší hodnoty osového poměru leží v okolí kmitočtu 7,6 GHz, pro správnou funkci antény je ho tedy potřeba dodatečně vyladit. Šířka pásma, ve které je osový poměr lepší, než 3 dB, činí přibližně 314 MHz. Ze směrových charakteristik je patrné, že směr hlavního laloku je v obou rovinách mírně vyosen. Šířka hlavního laloku v rovině YZ činí 68° , v rovině XY 84° . Zisk antény je roven 7,4 dBi.

5.2 Kruhá šěrbinová anténa s kruhovou polarizací

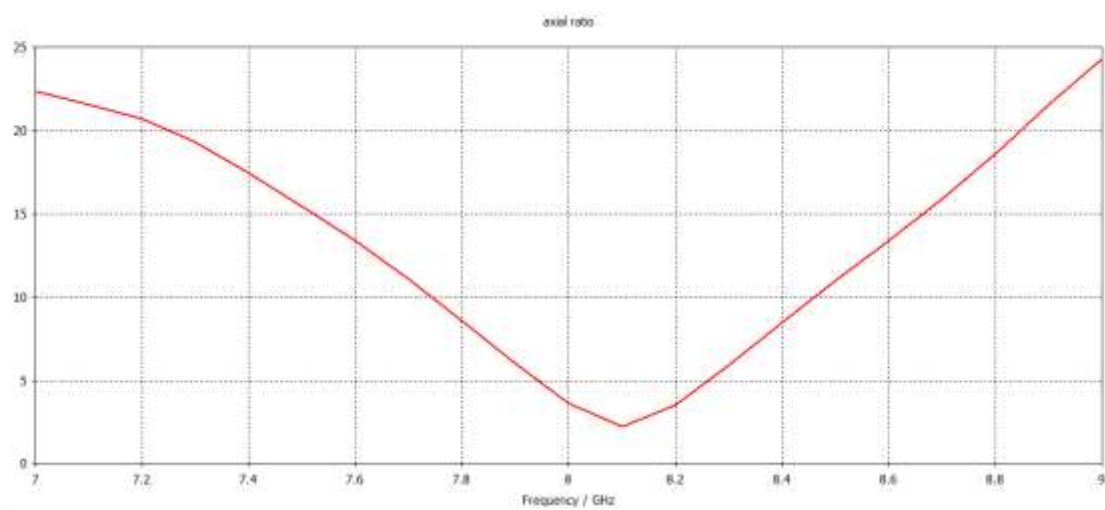
Základní koncept kruhové šěrbinové antény je převzat z [5]. Kruhové polarizace je v případě této antény rovněž dosaženo umístěním zkratovacího kolíku. Kromě tvaru šěrbiny se kruhá anténa od obdélníkové liší rovněž absencí zkratovacího pásku.



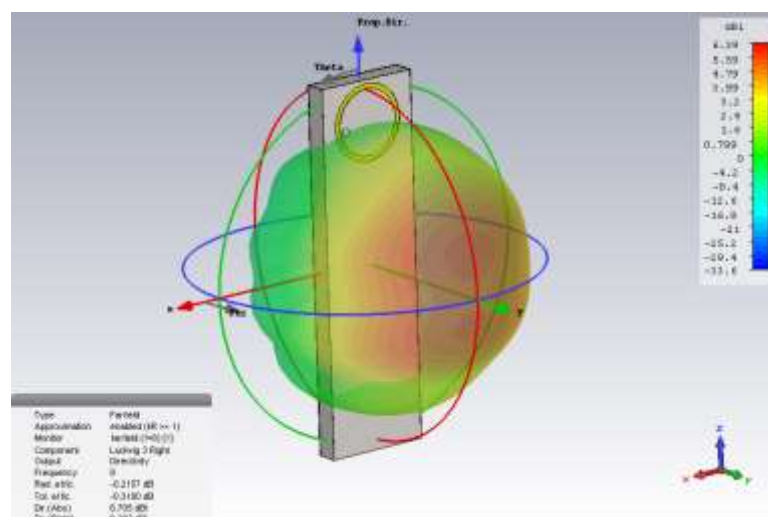
Obr. 54 Kruhá šěrbinová anténa pro kruhovou polarizaci



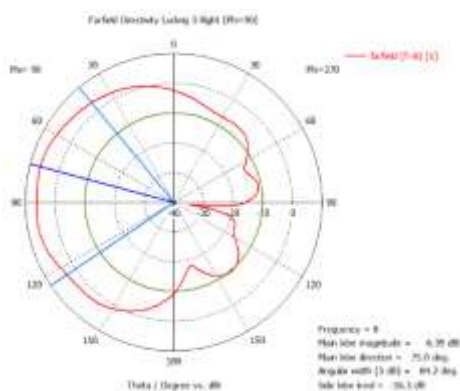
Obr. 55 Kmitočtový průběh činitele odrazu kruhové antény



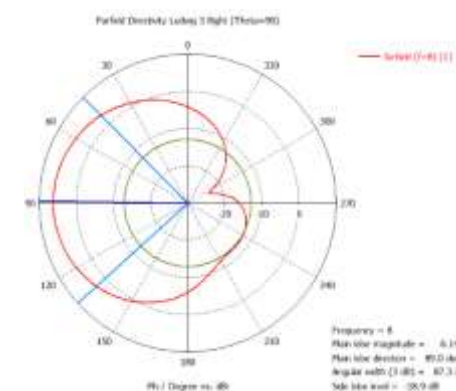
Obr. 56 Kmitočtový průběh osového poměru kruhové štěrbinové antény



Obr. 57 3D směrové charakteristiky pro kruhovou štěrbinovou anténu



Obr. 58 Směrové charakteristiky - rovina YZ

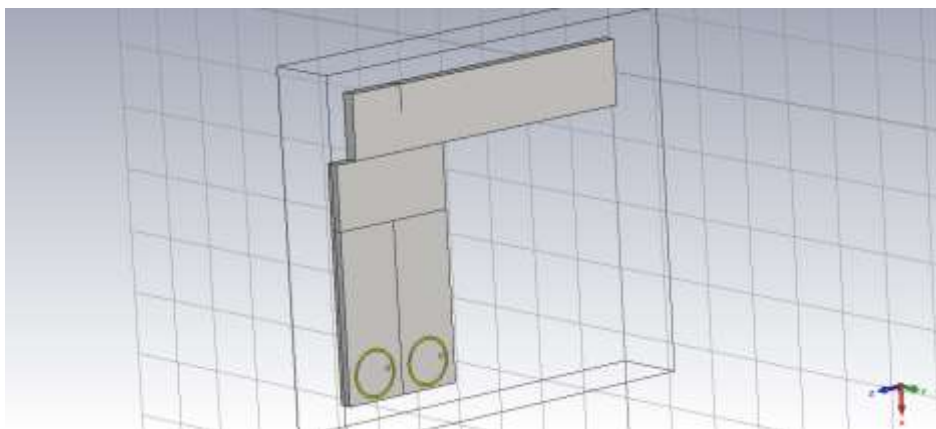


Obr. 59 Směrové charakteristiky - rovina XY

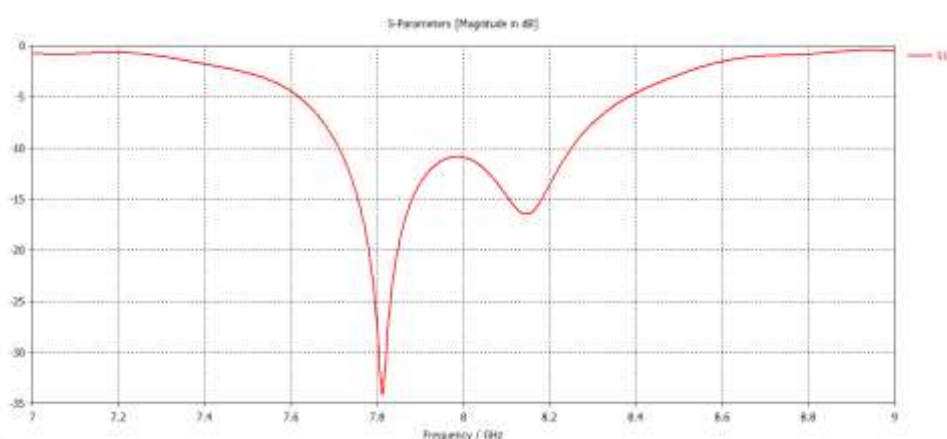
Z kmitočtového průběhu činitele odrazu kruhové šterbinové antény je patrné, že anténa je na požadovaném kmitočtu impedančně přizpůsobena, přičemž šířka pásma pro impedanční přizpůsobení činí 1,05 GHz, což je přibližně dvojnásobek oproti anténě obdélníkové. Minimum osového poměru leží poblíž kmitočtu 8 GHz, jeho polohu lze dodatečně ladit změnou průměru vnitřního kruhu. Šířka pásma, v níž je osový poměr lepší, než 3 dB, činí 118 MHz, což je přibližně třetina oproti anténě obdélníkové. Ze směrových charakteristik je patrné, že hlavní lalok je vyosen pouze v rovině YZ. Šířka hlavního laloku v rovině YZ činí 84° , v rovině XY 87° . Zisk antény činí 6,4 dBi.

Vzhledem k tomu, že kruhová šterbinová anténa je jednodušší na ladění a zároveň vykazuje, kromě šířky pásma osového poměru, lepší chování oproti anténě obdélníkové, byla tato anténa vybrána pro tvorbu anténních řad s kruhovou polarizací.

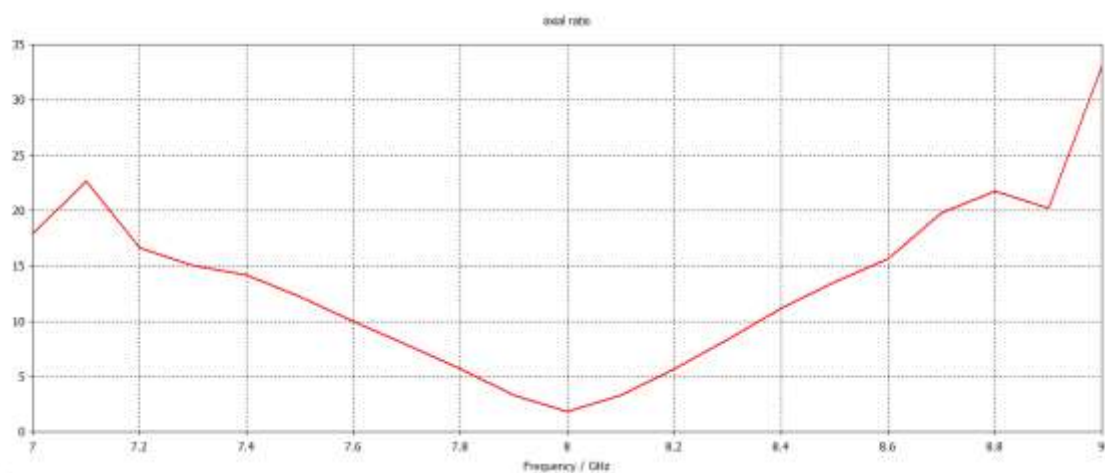
5.2.1 Dvouprvková anténní řada s kruhovou polarizací s děličem s jednou odbočkou



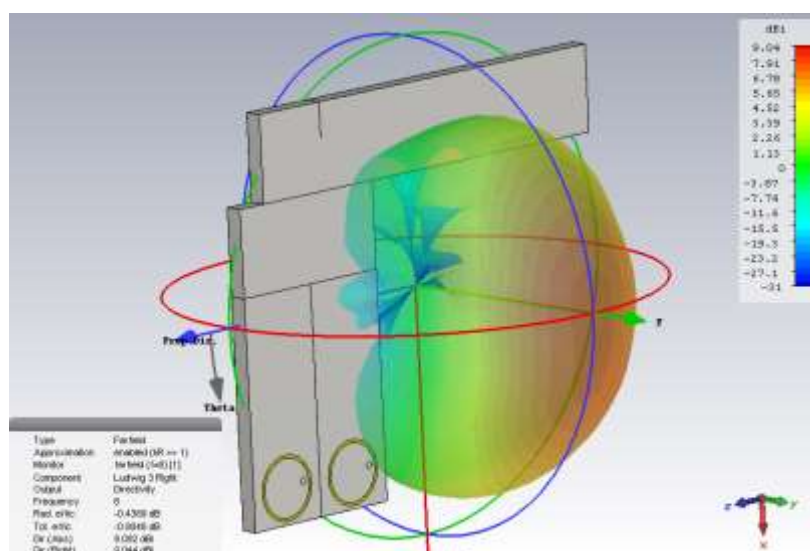
Obr. 60 Dvouprvková anténní řada s děličem s jednou odbočkou



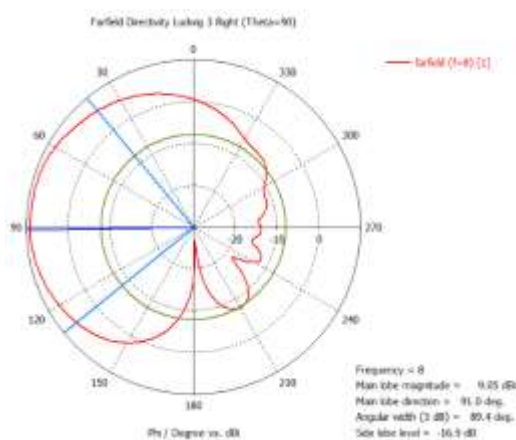
Obr. 61 Kmitočtová závislost činitele odrazu dvouprvkové řady



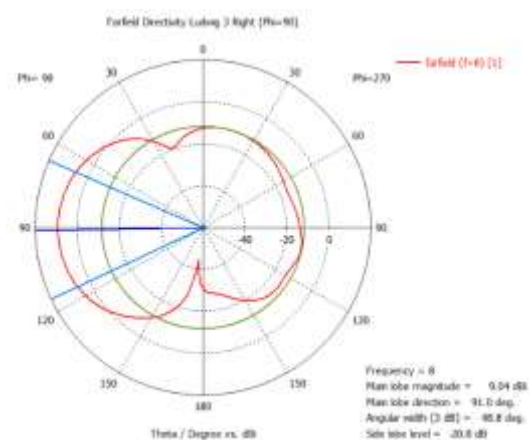
Obr. 62 Kmitočtová závislost osového poměru řady se dvěma prvky



Obr. 63 3D směrové charakteristiky řady se dvěma prvky



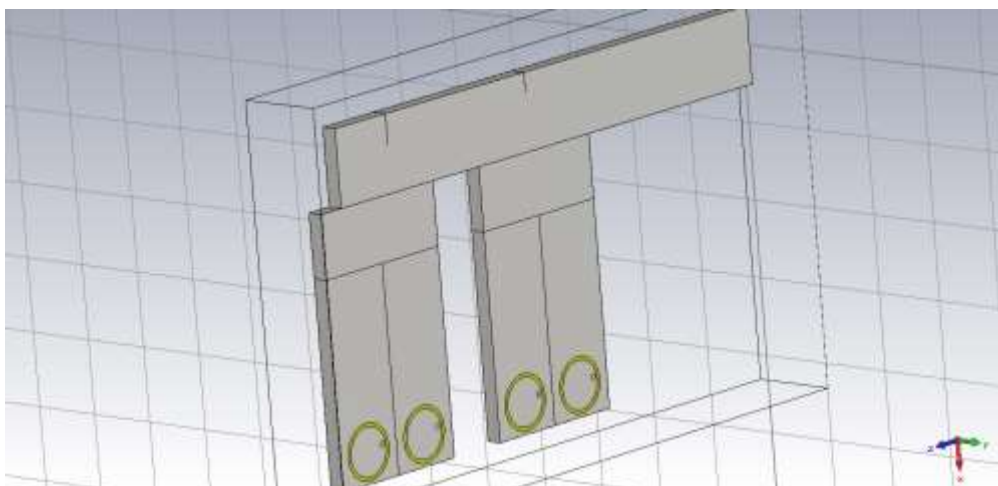
Obr. 64 Směrové charakteristiky - rovina XY



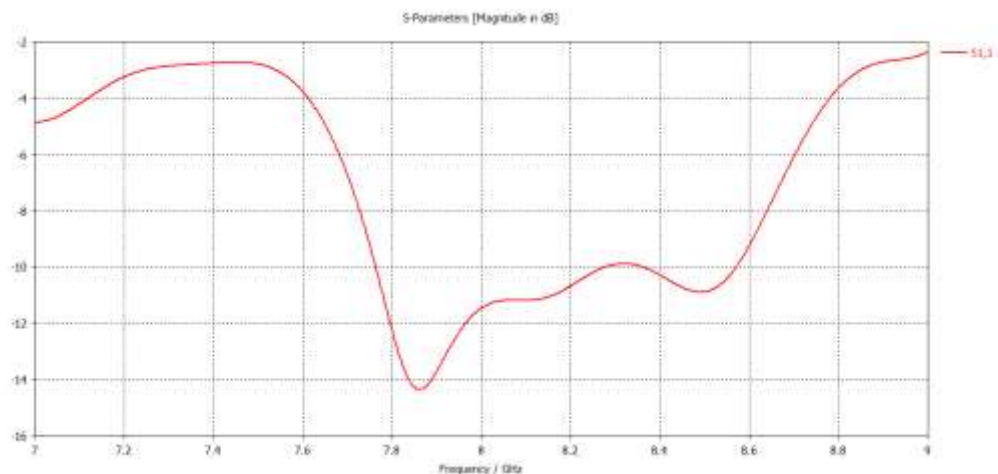
Obr. 65 Směrové charakteristiky - rovina YZ

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu řady se dvěma prvky můžeme vidět, že řada je na požadovaném kmitočtu impedančně přizpůsobena, přičemž šířka pásma činí přibližně 548 MHz. Nejlepší hodnota osového poměru, 1,9 dB, leží přesně na požadovaném kmitočtu 8 GHz. Šířka pásma pro osový poměr lepší, než 3 dB, činí přibližně 156 MHz. Směrové charakteristiky se v obou rovinách vyznačují téměř nevychýlenými směry hlavního laloku, přičemž šířka hlavního laloku v rovině XY činí 89° a 49° v rovině YZ, což je přibližně polovina hodnoty antény s jedním prvkem. Zisk řady činí přibližně 9 dBi.

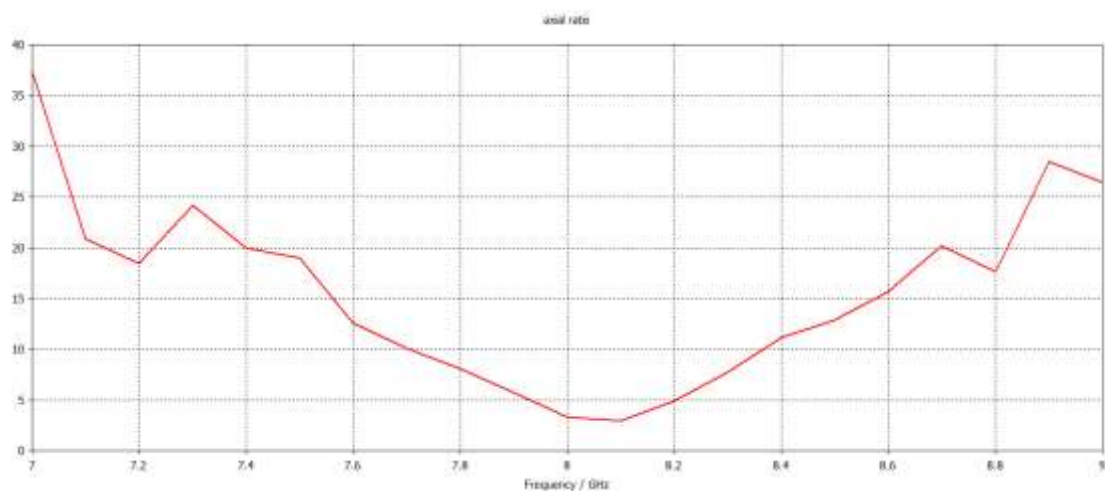
5.2.2 Čtyř-prvková anténní řada s kruhovou polarizací s děličem se dvěma odbočkami



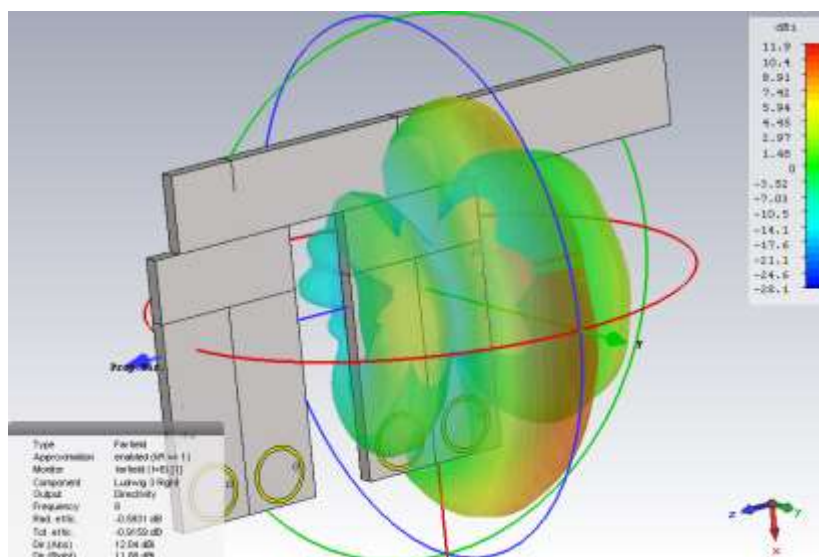
Obr. 66 Čtyř-prvková řada s děličem se dvěma odbočkami



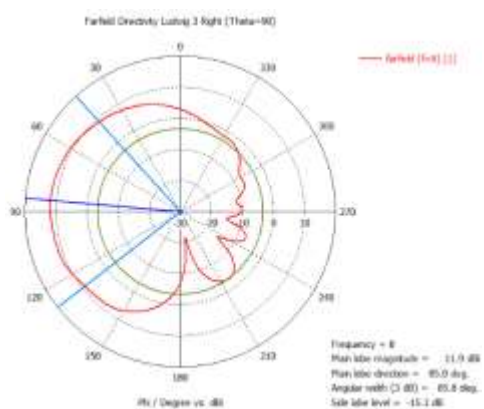
Obr. 67 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady



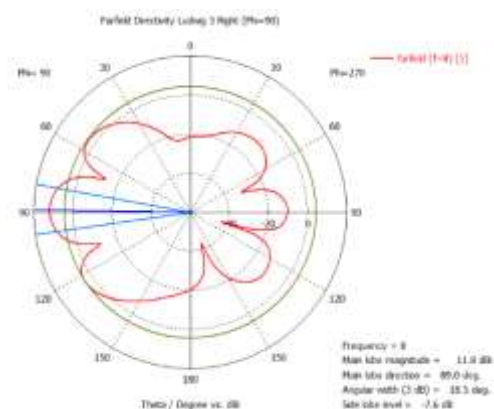
Obr. 68 Kmitočtový průběh osového poměru čtyř-prvkové řady



Obr. 69 3D směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady



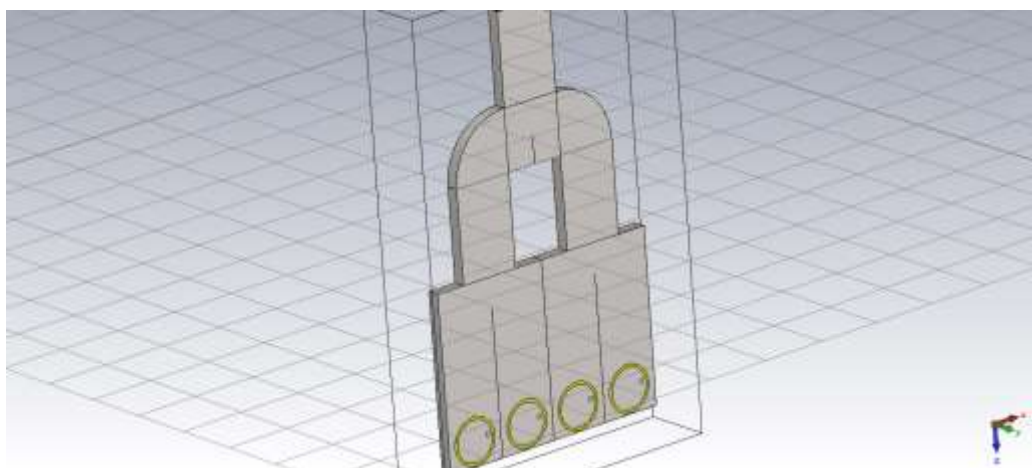
Obr. 70 Směrové charakteristiky - rovina XY



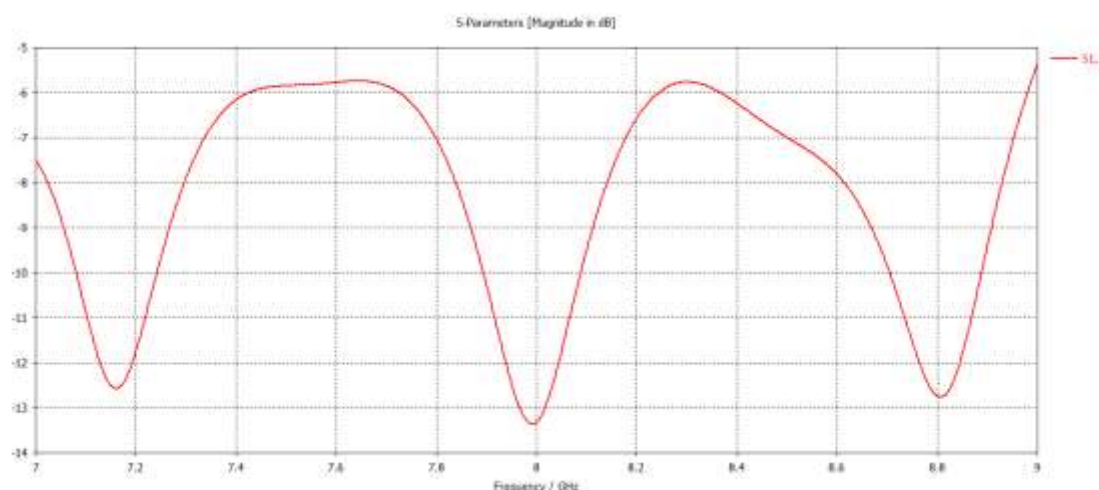
Obr. 71 Směrové charakteristiky - rovina YZ

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu čtyř-prvkové řady je patrné, že není tak dobře přizpůsobena, jako řada dvouprvková. Zachovává si však přibližně stejnou šířku pásma a s určitou mírou benevolence lze tvrdit, že šířka pásma činí 800 MHz. Minimum osového poměru je mírně posunuto ve směru k vyšším kmitočtům, došlo k jeho zhoršení, jelikož se pod 3 dB dostává pouze v úzkém pásmu. Tento nedostatek lze pravděpodobně snadno odstranit posunem zkratovacího kolíku blíže k okraji kruhu. V takovém případě by čtyř-prvková řada měla oproti dvouprvkové řadě vykazovat rozšíření pásma, kde se osový poměr pohybuje pod hranicí 3 dB, jelikož v oblasti minima došlo k určitému zarovnání průběhu. V případě směrových charakteristik došlo ke zvýšení úchylky hlavního laloku v rovině XY. Šířka hlavního laloku v rovině XY vykazuje minimální změnu, šířka v rovině YZ činí přibližně 18° . V této rovině tedy došlo k více než dvojnásobnému zúžení šířky hlavního laloku. Zisk antény činí skoro 12 dBi.

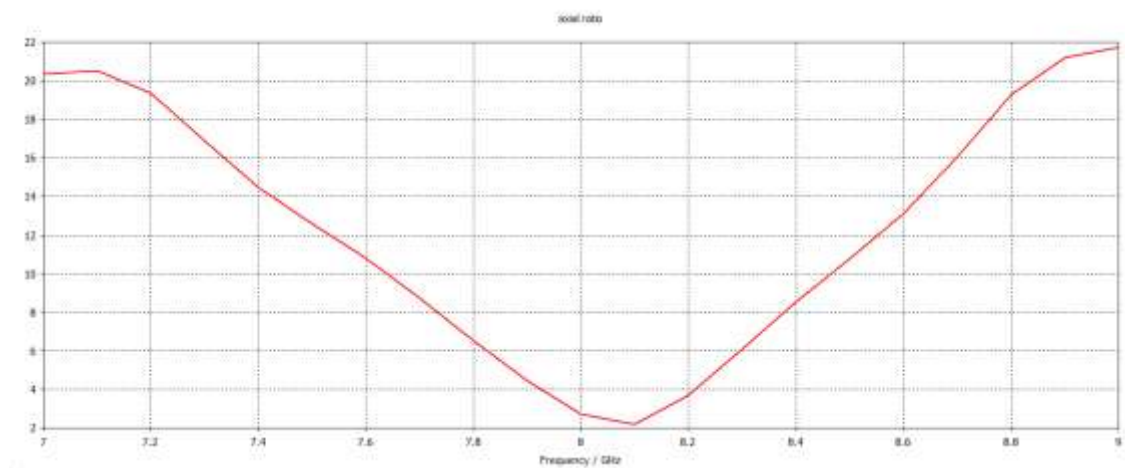
5.2.3 Čtyř-prvková anténní řada s kruhovou polarizací s děličem s postupným větvením



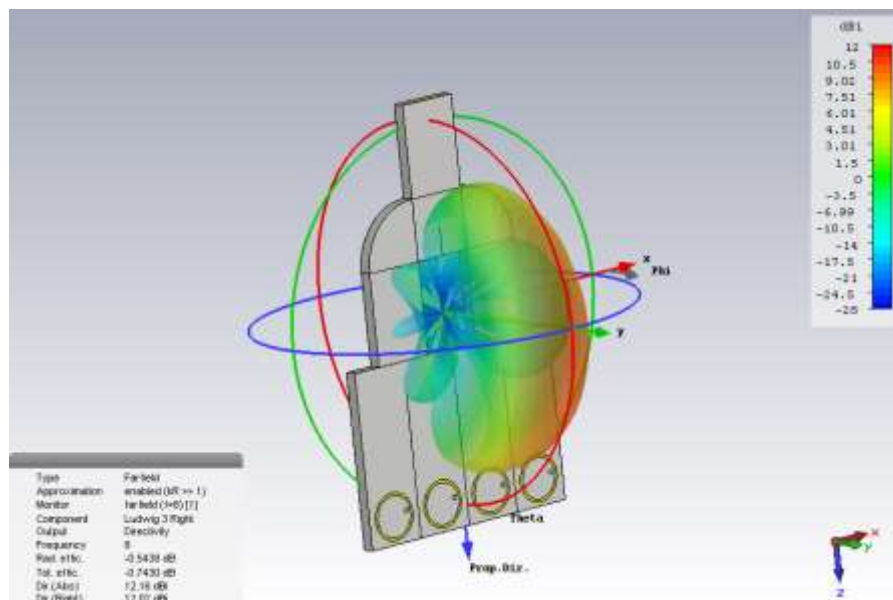
Obr. 72 Čtyř-prvková řada s děličem s postupným větvením



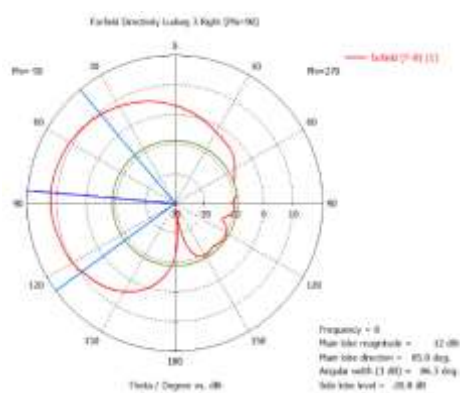
Obr. 73 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady



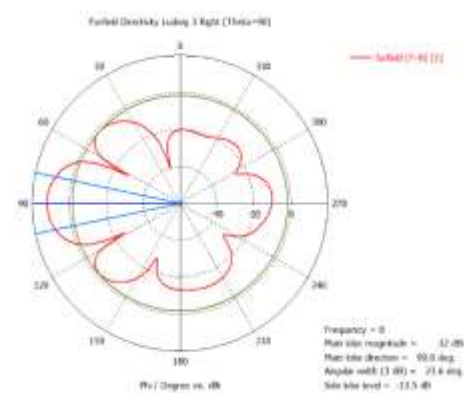
Obr. 74 Kmitočtový průběh osového poměru čtyř-prvkové řady



Obr. 75 3D směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady



Obr. 76 Směrové charakteristiky - rovina YZ



Obr. 77 Směrové charakteristiky - rovina XY

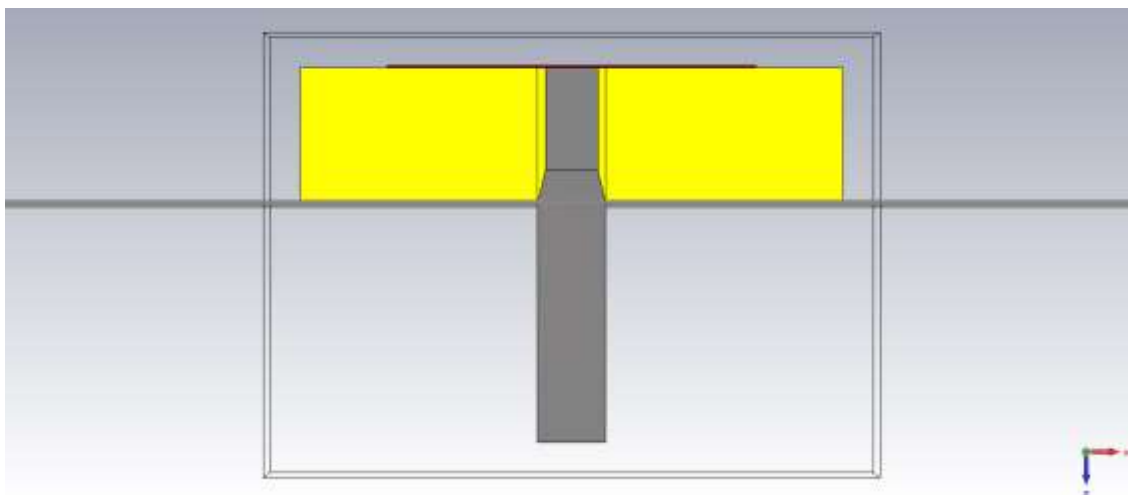
Z kmitočtového průběhu činitele odrazu čtyř-prvkové řady je patrné, že anténa je na požadovaném kmitočtu přizpůsobena a šířka pásma činí přibližně 200 MHz, což je podstatně méně, než v případě čtyř-prvkové řady s děličem s odbočkami. Nicméně, vzhledem k obecně dosahovaným šířkám pásma pro osový poměr menší, než 3 dB, se nejedná o výrazný nedostatek. Minimální hodnota osového poměru je zde rovněž mírně odladěna směrem k vyšším kmitočtům a šířka pásma činí přibližně 168 MHz. Směry hlavního laloku vykazují v obou rovinách menší úchylky, než u čtyř-prvkové řady s děličem s odbočkami. Jejich šířky jsou v rovině YZ 86°, respektive 24° v rovině XY. Řada tedy vykazuje menší zúžení hlavního svazku v rovině XY. Zisk řady činí rovněž 12 dBi.

6 VÝROBA OVĚŘOVACÍHO PROTOTYPU

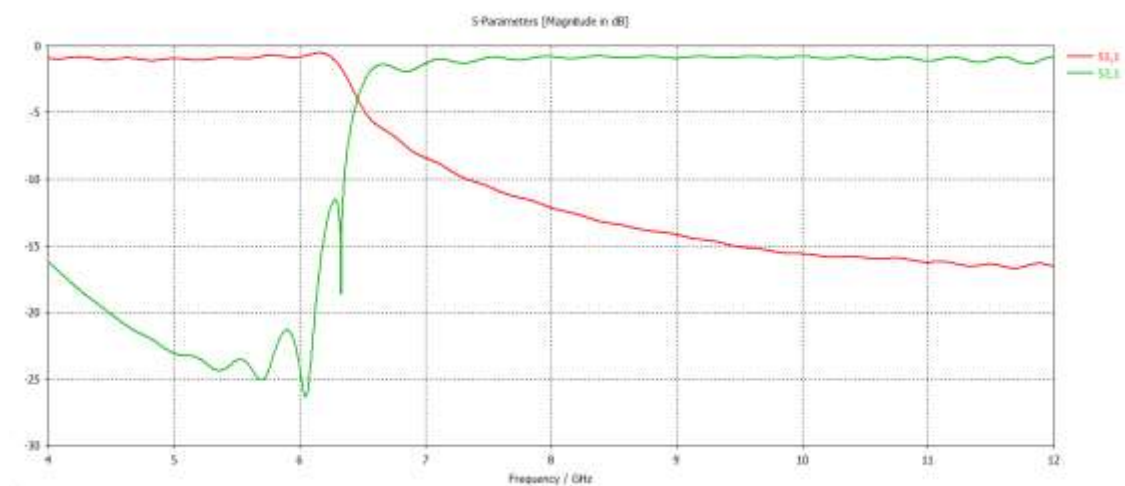
Vzhledem k tomu, že jsou struktury navrženy na experimentálním materiálu, je nutné jejich parametry měřením ověřit. Za tímto účelem byla vybrána struktura jednoduché antény s kruhovou polarizací, vzhledem ke své relativní jednoduchosti. Taková struktura bude s nejmenší pravděpodobností zatížena výrobními chybami a nepřesnostmi a podá tedy nejméně zkreslené výsledky.

6.1 Napájení struktury

Napájení struktury jednoprvkové antény je řešeno mikropáskovým vedením o charakteristické impedanci 50 Ω . Potřebná šířka páska byla vypočítána pomocí [6]. Aby bylo impedanční přizpůsobení struktury co nejlepší, rozšiřuje se mikropásek postupně až na hodnotu šířky vlnovodu, aby byl přechod co možná nejplynulejší. Mikropáskové vedení je pak napájeno standardním SMA konektorem.



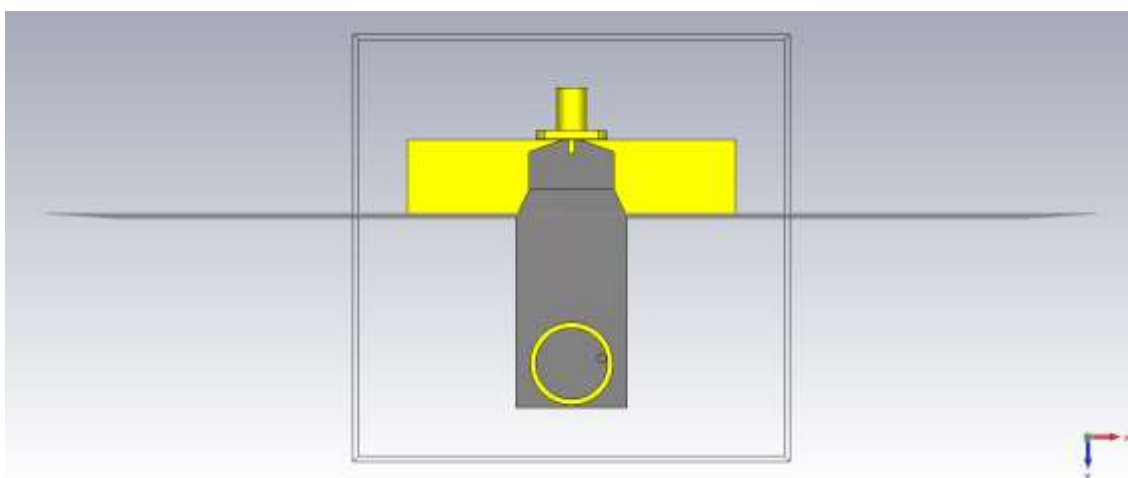
Obr. 78 Přechod mikropáskového vedení na vlnovod



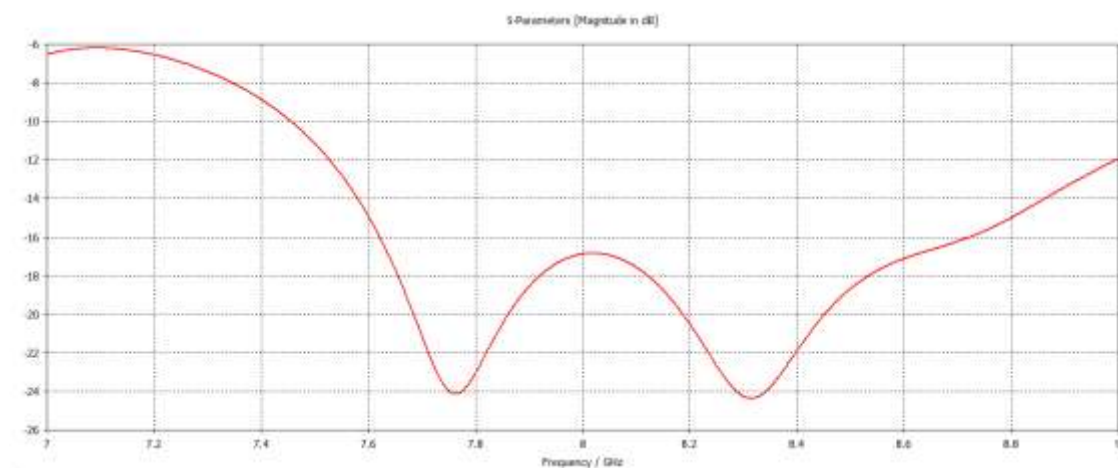
Obr. 79 Kmitočtový průběh činitele odrazu a činitele přenosu přechodu

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu a přenosu přechodu mikropáskového vedení na vlnovod je patrné, že je pro použití v požadovaném frekvenčním pásmu dostačující.

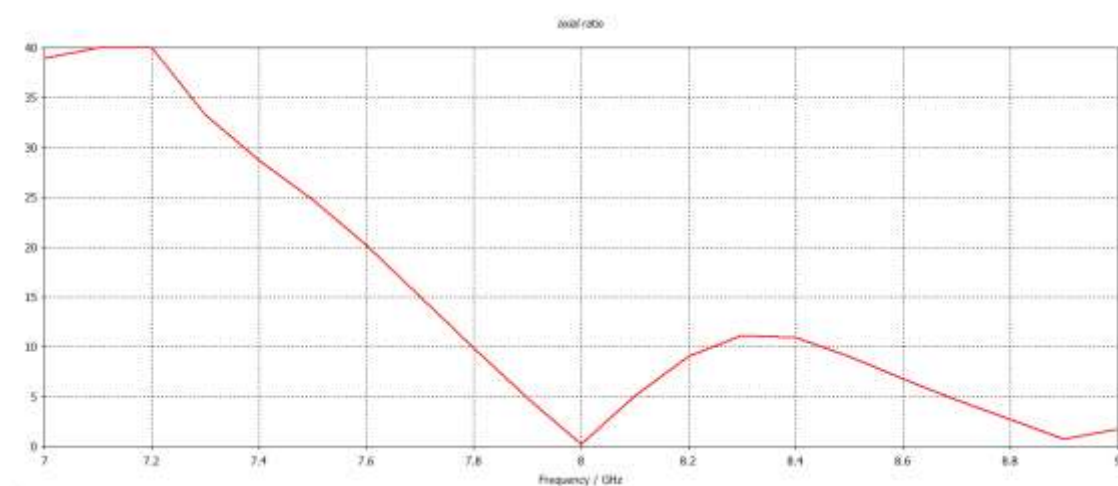
6.2 Jednoprvková anténa



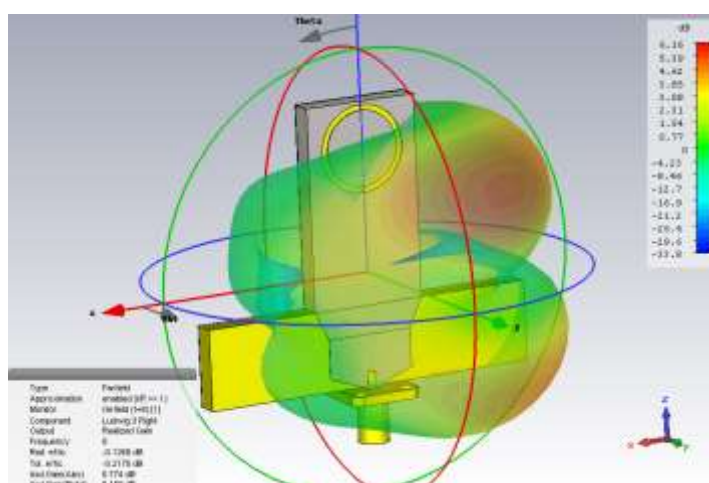
Obr. 80 Jednoprvková anténa pro výrobu



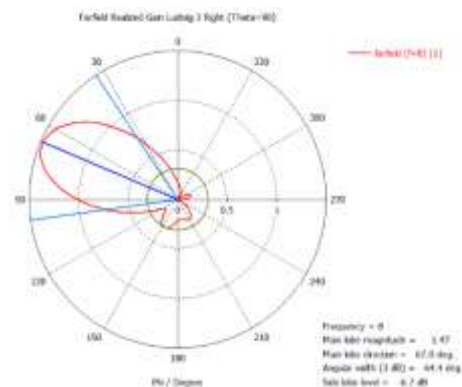
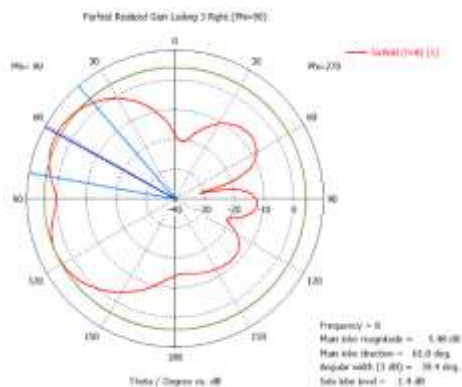
Obr. 81 Kmitočtový průběh činitele odrazu jednoprvkové antény pro výrobu



Obr. 82 Kmitočtový průběh osového poměru jednoprvkové antény pro výrobu



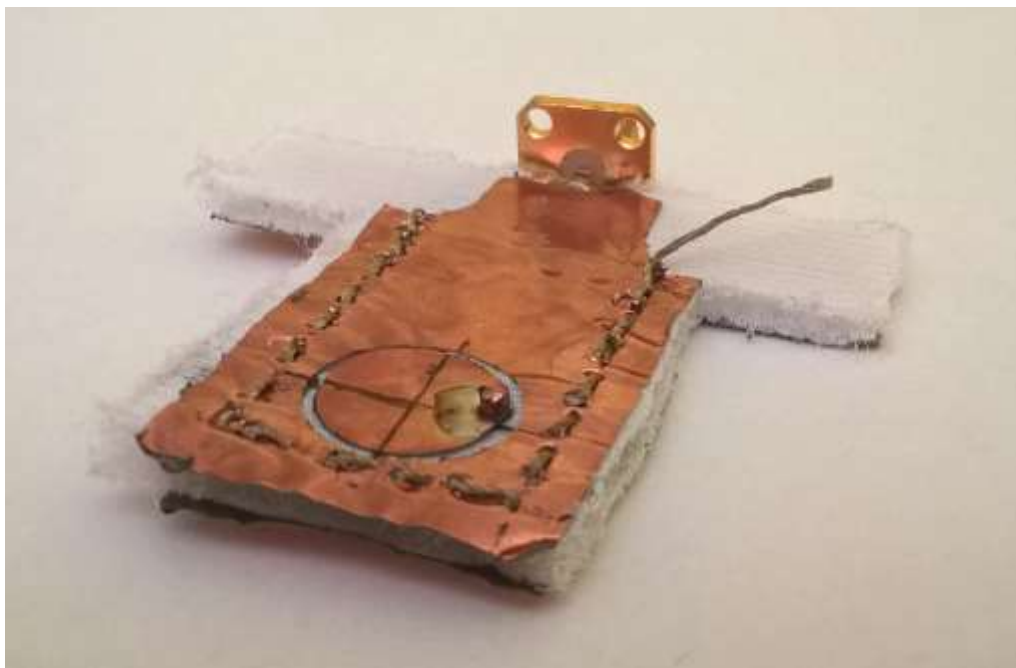
Obr. 83 3D směrové charakteristiky jednoprvkové antény pro výrobu



Obr. 84 Směrové charakteristiky - rovina YZ Obr. 85 Směrové charakteristiky - rovina XY

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu je patrné, že anténa je přizpůsobena ve většině rozsahu sledovaného frekvenčního pásma. Vzhledem k tomu, že horní hranice impedančního přizpůsobení leží až za hranicí sledovaného pásma, není možné zjistit šířku pásma pro impedanční přizpůsobení. Minimální hodnota osového poměru je naladěna přesně na požadovaný kmitočet 8 GHz a dosahuje zde hodnoty 0,2 dB. Šířka pásma činí přibližně 120 MHz. Směrové charakteristiky vykazují neideální tvar, jelikož napájecí struktura je svou velikostí srovnatelná se strukturou anténní a výrazně tedy ovlivňuje vyzařovací diagram. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o ověřovací prototyp a konečným výsledkem práce by měla být mnohem rozměrnější anténní řada, nemělo by se jednat o kritický problém. Lepšího výsledku by bylo možno dosáhnout užitím koaxiální sondy.

7 VYROBENÁ ANTÉNA



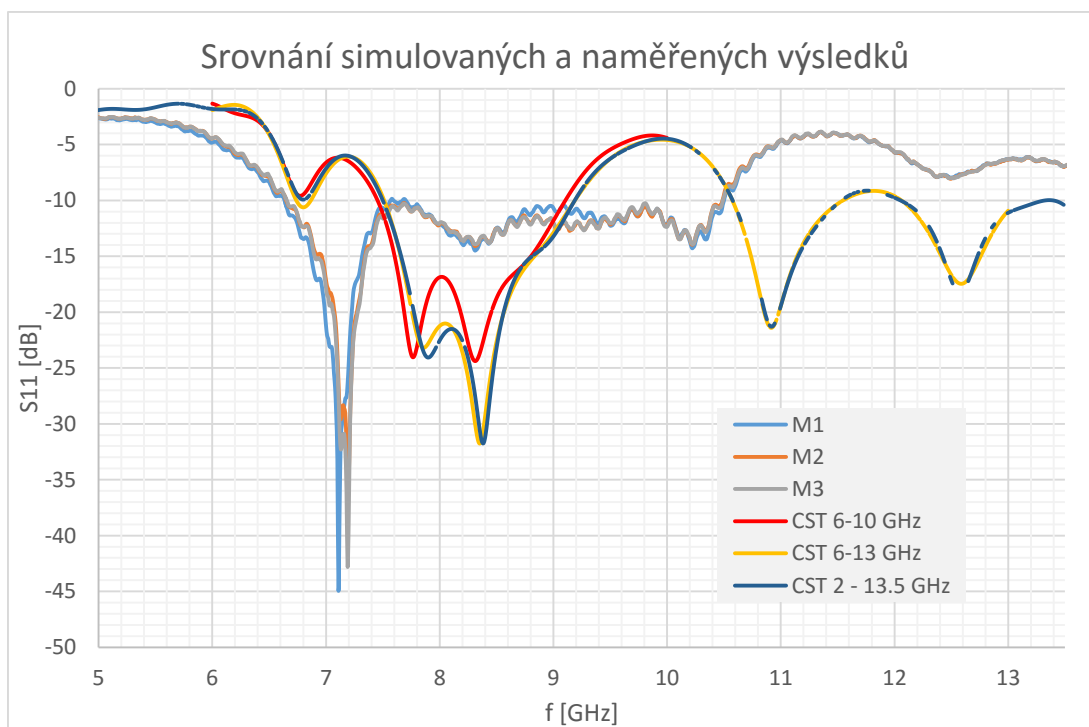
Obr. 86 Vyrobená anténa - pohled zepředu



Obr. 87 Vyrobená anténa - pohled zezadu

Z obrázků vyrobené antény je patrné, že přesnost výrobní metody je velice nízká. Došlo ke zmačkání měděné folie vlivem namáčení a sušení při vyleptávání vzoru. Vzhledem k náchylnosti folie k trhání jsou jednotlivé stěhy, tvořící kratší stěny vlnovodu, velmi daleko od sebe. Struktura tudíž bude náchylná k únikům signálu těmito mezerami. Šití, stejně jako odměření vodících čar pro šití a nalepení vnitřního kruhu, probíhalo ručně, což do struktury zaneslo další nepřesnosti. Při pájení konektoru došlo k mírnému kolapsu textilie v okolí konektoru, což ovlivnilo charakteristickou impedanci mikropáskového vedení. Naopak, nepotvrdily se prvotní obavy ze spálení folie při pájení, ukázala se být nadměru odolná.

8 SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH VÝSLEDKŮ



Obr. 88 Srovnání simulovaných a naměřených výsledků

Z naměřených a simulovaných kmitočtových průběhů činitele odrazu je patrné, že se ne zcela shodují. Je však možno pozorovat jasnou podobnost obou průběhů, která naznačuje správnost návrhu struktury. Rozdíly jsou patrně zapříčiněny velmi nepřesnou výrobní metodou antény. Struktura je však i tak v požadovaném frekvenčním pásmu impedančně přizpůsobená, oproti simulaci je šířka pásma dokonce větší směrem k vyšším kmitočtům. K přesnějšímu posouzení chování struktury by bylo nutné provést měření směrových charakteristik, k čemuž došlo v následující kapitole.

9 SROVNÁNÍ DALŠÍCH VÝROBNÍCH METOD

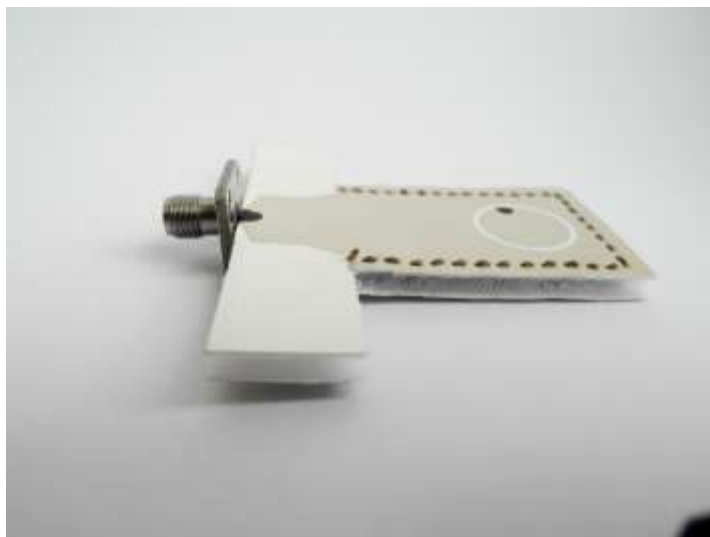
Vzhledem k ne zcela vyhovujícím výsledkům měření prvního prototypu, byl vytvořen jednak precizněji vyrobený model z měděné folie, a navíc, byl vyroben i model pomocí sítotisku, tisknutím jak přímo na textil, tak na textil potažený nažehlovací folií.



Obr. 89 Model - měděná folie, převzato z **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

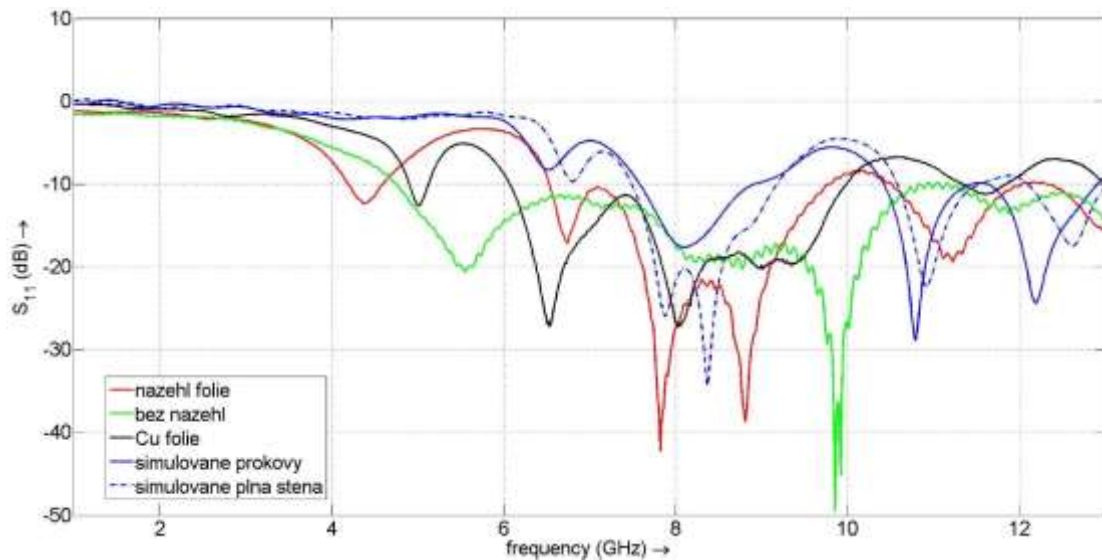


Obr. 90 Model - sítotisk, textil, převzato z **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**



Obr. 91 Model sítotisk, folie, převzato z **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

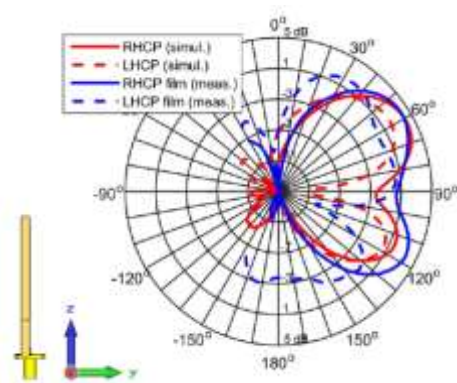
9.1 Měření činitele odrazu



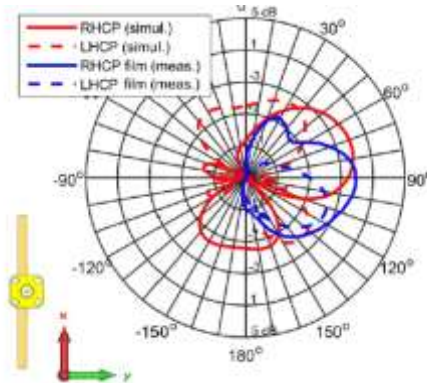
Obr. 92 Srovnání průběhů činitele odrazu pro simulaci a různé výrobní procesy, převzato z **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Z obr. 92 je patrné, že preciznější výroba u modelu s měděnou folií přinesla znatelně lepší výsledky, než v případě prvního prototypu. Největší shody se simulací dosahuje model s nazehlenou folií. Z toho důvodu se tento výrobní postup jeví jako nejvhodnější. Tento závěr podporuje i fakt, že sítotisková metoda umožňuje zcela přesné sesazení vnitřního kruhu antény vzhledem ke zbytku struktury – model není zatížený nepřesností, jako u modelu z měděné folie, kde je kruh potřeba nalepit ručně. Zajímavostí je, že realitě více odpovídá simulační model s plnými stěnami, než model se stěnami, tvořenými prokovy.

9.2 Měření směrových charakteristik



Obr. 93 Směrové charakteristiky - rovina YZ, převzato z **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

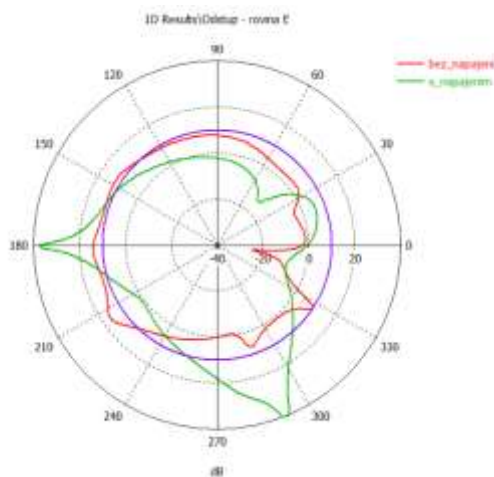


Obr. 94 Změřené směrové charakteristiky - rovina XY, převzato z **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

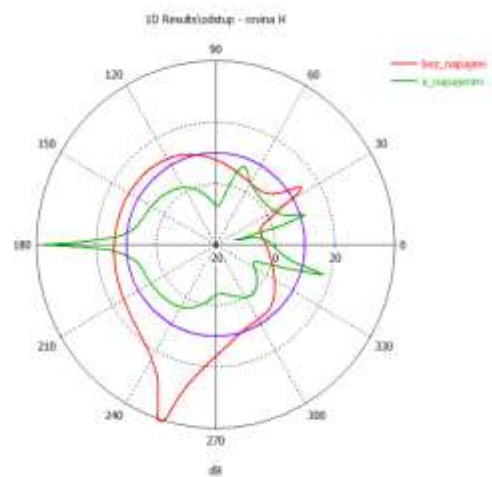
Ze směrových charakteristik je patrné, že v obou rovinách dochází ke shodě se simulací až na vlnu LHCP v případě roviny XY. Pro přehlednost zde bylo vybráno pouze měření s nejvyšší shodou, které proběhlo opět pro model s nažehlenou folií a potvrzuje tedy vhodnost této výrobní metody.

Z průběhů si můžeme všimnout, že polarizace RHCP nemá od LHCP v žádném směru nijak velký odstup. Tento jev je dle simulací charakteristický pouze pro tento konkrétní model v kombinaci se zvoleným typem napájení. Samotná struktura antény bez doplněného napájení (buzení vlnovodovým portem) podává daleko lepší výkony. Vzhledem k tomu, že jednoprvková anténa je zde použita pouze pro účely ověření návrhu a nalezení nejlepšího výrobního postupu, není tento jev zásadní. U návrhu anténních řad je mu však věnována pozornost, aby nedošlo k opakování situace a tyto řady měly akceptovatelný odstup i po přidání napájecí struktury.

Porovnání odstupů RHCP od LHCP simulací s napájením a bez napájení je možno vidět na následujících obrázcích (směr vyzařování v obou rovinách 90° , platí i pro všechny následující struktury):



Obr. 95 polarizační odstup - rovina YZ



Obr. 96 polarizační odstup - rovina XY

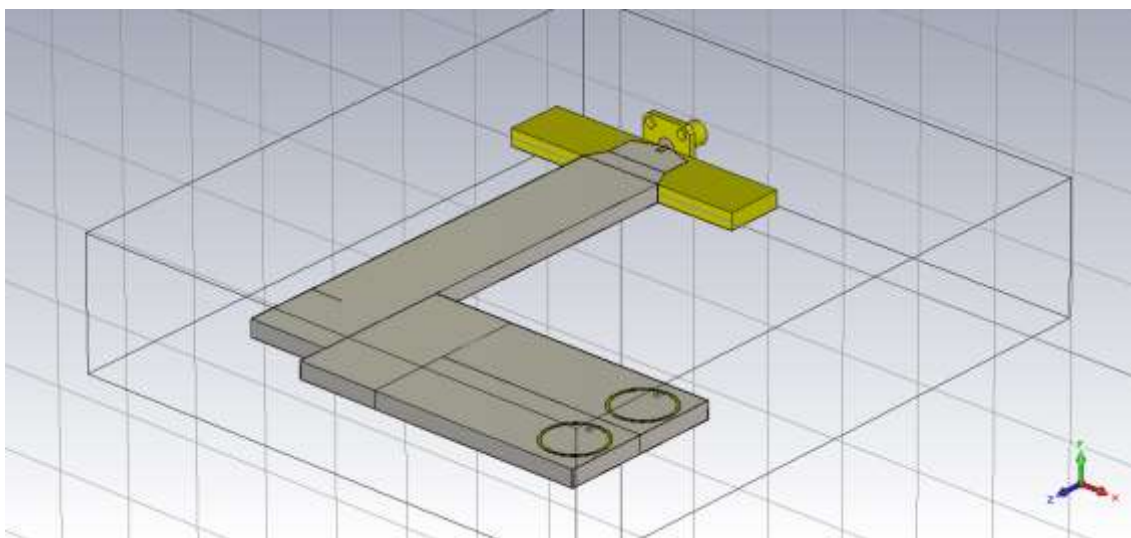
10 ANTÉNNÍ ŘADY S NAPÁJECÍ STRUKTUROU

Vzhledem k nemožnosti dosáhnout akceptovatelného osového poměru v zadaném kmitočtovém pásmu bandgroup 6, bylo kmitočtové pásmo na základě diskuze s vedoucím práce redukováno na pásmo 7,8 – 8,2 GHz.

Tato kapitola se věnuje přidáním napájecích struktur do modelů anténních řad a následným výběrem nejvhodnější anténní řady a napájecí struktury pro výrobu. Jako výchozí napájecí struktura je použito napájení pomocí mikropáskového vedení z šesté kapitoly.

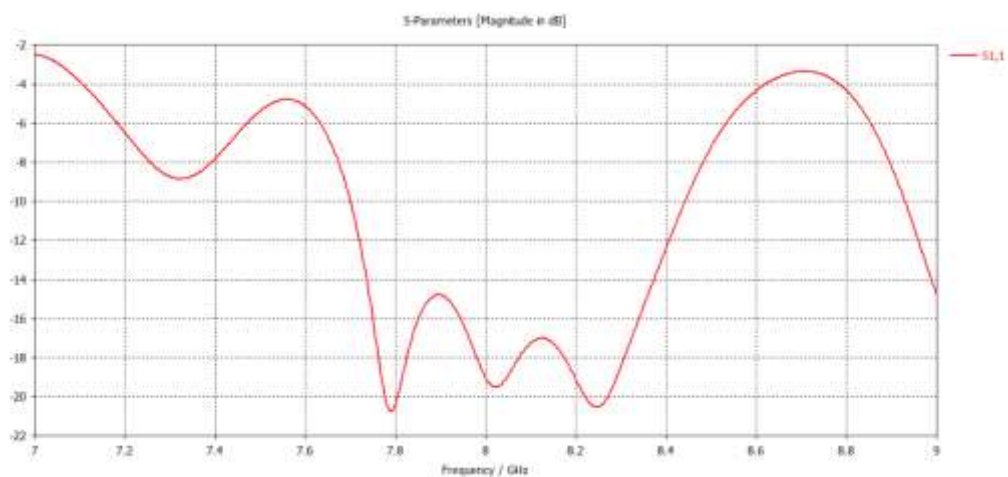
10.1 Dvouprvková řada

V případě dvouprvkové řady máme výběr pouze z jednoho typu – děliče s postupným větvením.

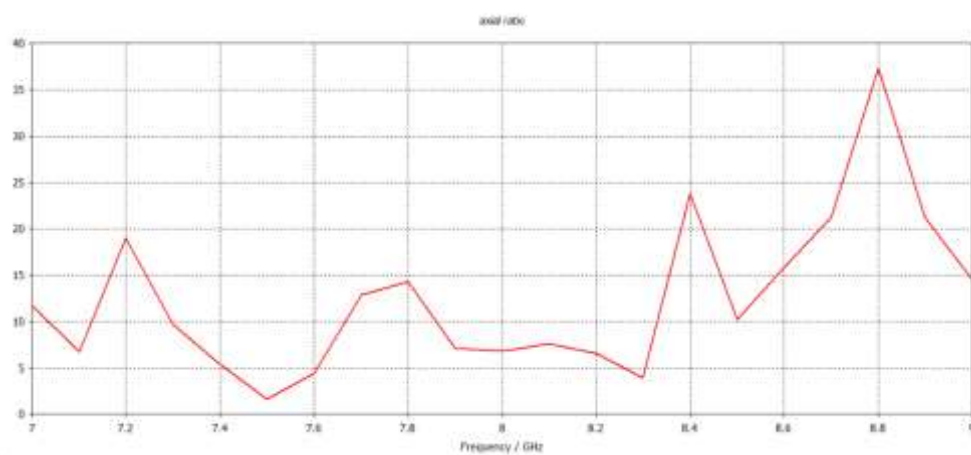


Obr. 97 Pohled na výslednou strukturu

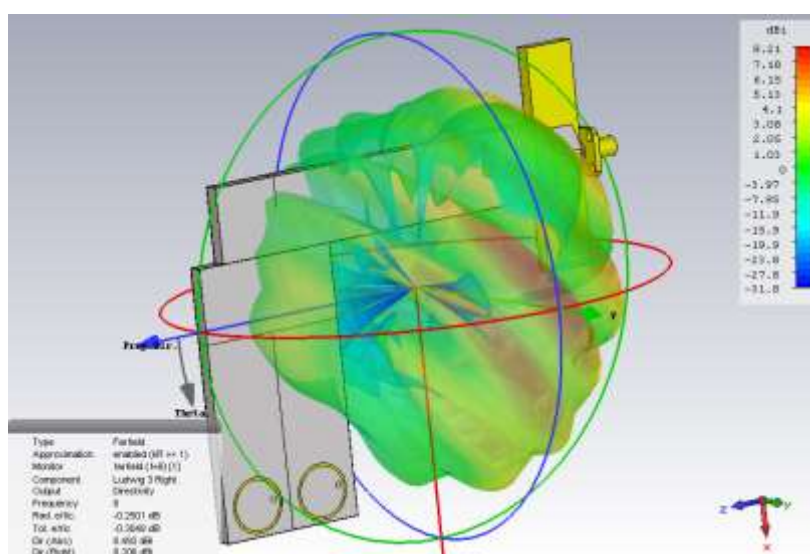
K napájení dvouprvkové řady bylo opět použito mikropáskové vedení a model SMA konektoru, stejně jako u jednoprvkové antény. Rozměry napájecí struktury zůstávají stejné.



Obr. 98 Kmitočtový průběh činitele odrazu dvou prvkové řady

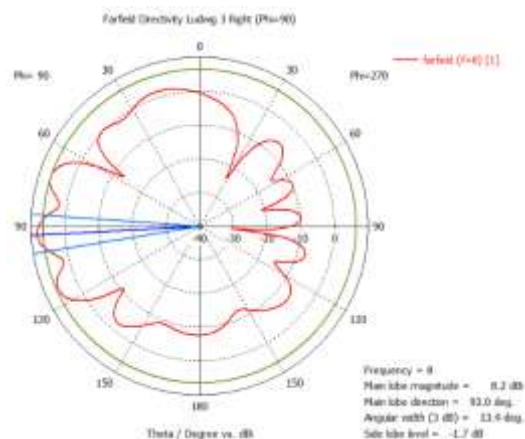
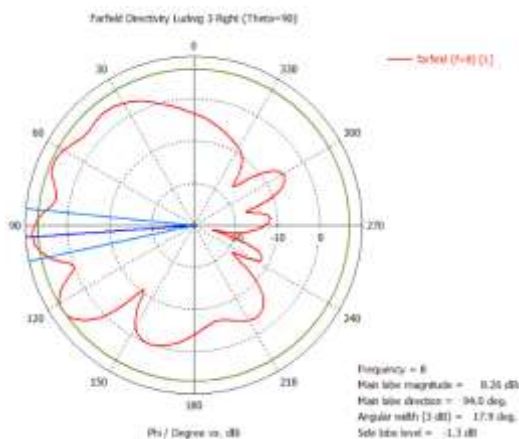


Obr. 99 Kmitočtový průběh osového poměru dvouprvkové řady



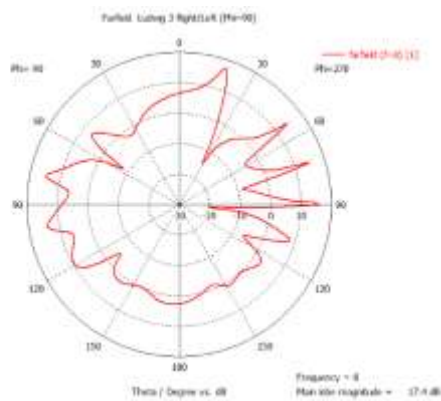
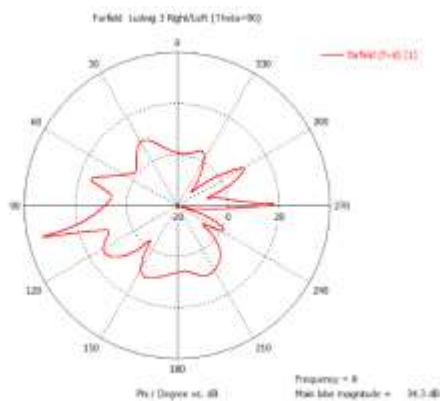
Obr. 100 3D směrové charakteristiky dvouprvkové řady

Z naměřených průběhů je patrné, že řada je impedančně přizpůsobena v požadovaném kmitočtovém pásmu. Kmitočtový průběh osového poměru však vykazuje značené zhoršení. Jev je patrně způsoben parazitním vyzařováním napájecí struktury, který je možné pozorovat na obrázku se směrovými charakteristikami. Vyzařovací diagram vykazuje značné zvlnění, celkový tvar naznačuje, že je vyzařování antén výrazně ovlivněno napájecí strukturou.



Obr. 101 Směrové charakteristiky - rovina XY Obr. 102 Směrové charakteristiky - rovina YZ

Zvlnění je patrné i z řezu směrovými charakteristikami v rovině XY i v rovině YZ. Jsou tím pádem zkresleny i šířky hlavních laloků, jejich směry i zisk.



Obr. 103 Polarizační odstup dvouprvkové řady - rovina XY Obr. 104 Polarizační odstup dvouprvkové řady - rovina YZ

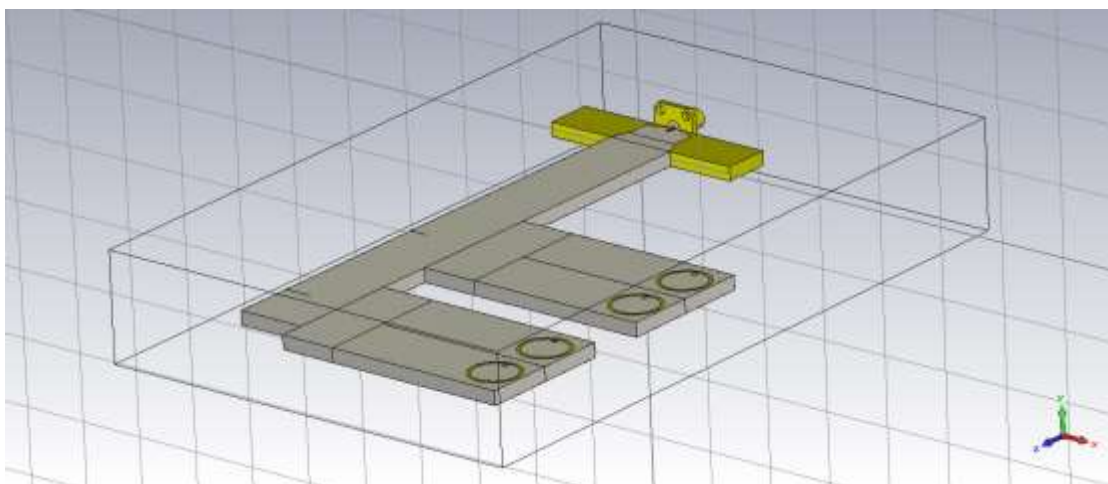
Z diagramů, znázorňujících polarizační odstup v jednotlivých rovinách můžeme pozorovat podobný efekt jako u jednoprvkové antény, tedy nízký odstup levotočivé vlny od pravotočivé. Napájecí struktura zde rovněž negativně ovlivňuje vlastnosti celku. Efekt však není tak výrazný, jako u řady jednoprvkové.

10.2 Čtyř-prvkové řady

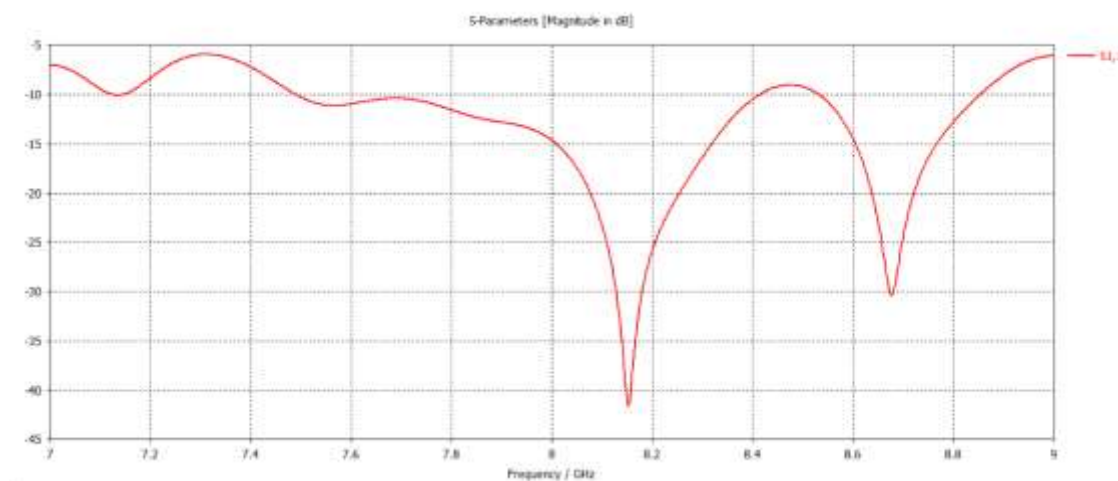
V případě čtyř-prvkových řad je již na výběr ze dvou typů děličů – dělič s odbočkami (stejně jako u řady dvouprvkové) a dělič s postupným větvením.

10.2.1 Čtyř-prvková řada s děličem s odbočkami

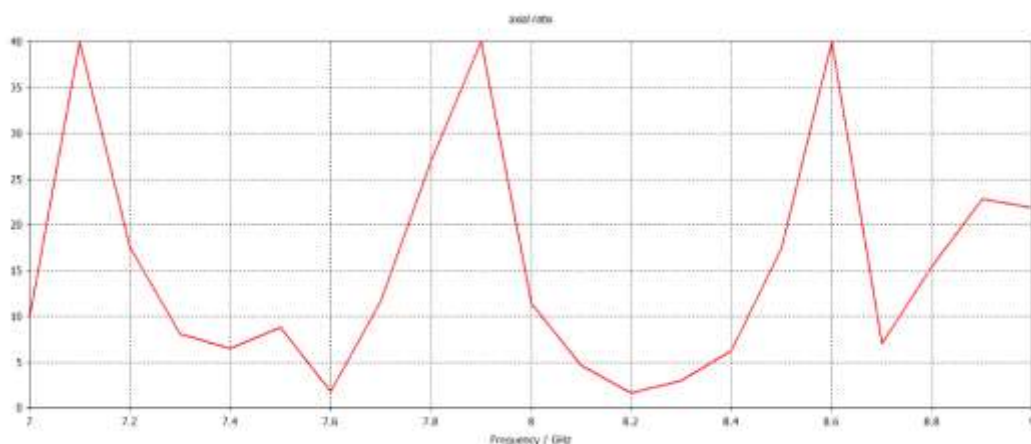
K napájení čtyř-prvkové řady bylo opět použito napájení shodných parametrů jako v předchozích případech, zejména kvůli určení vlivu i na tuto strukturu.



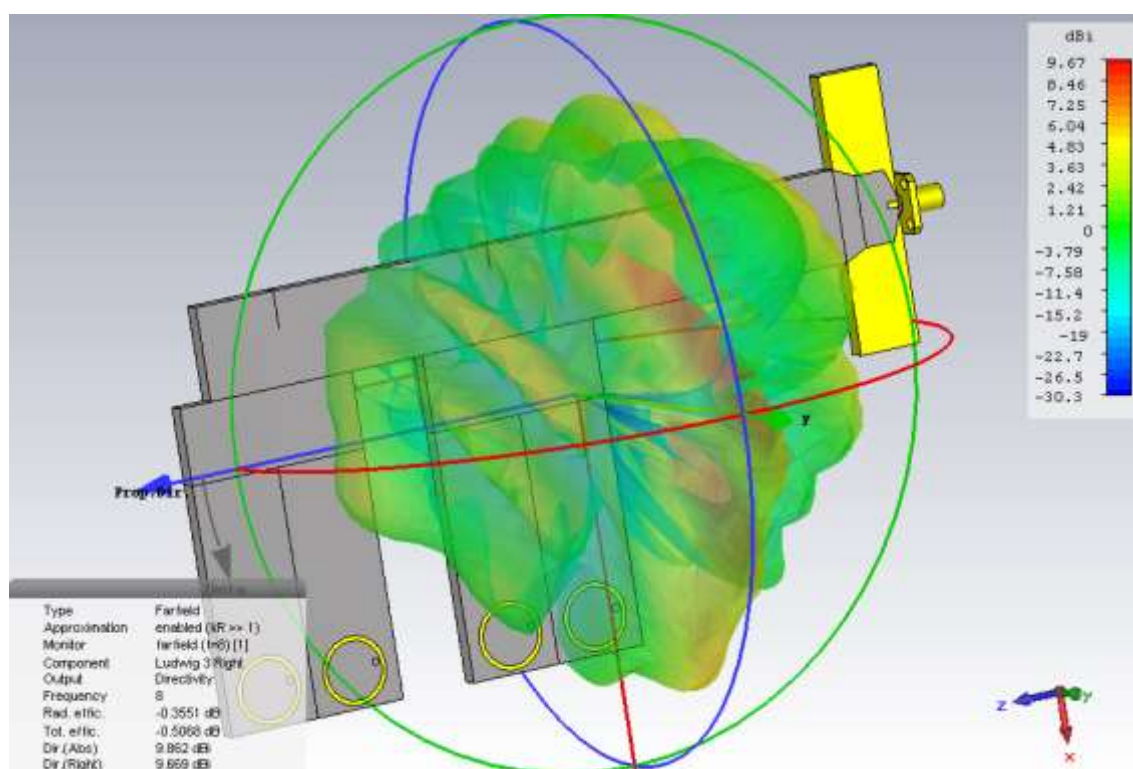
Obr. 105 Pohled na výslednou strukturu



Obr. 106 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady s odbočkami

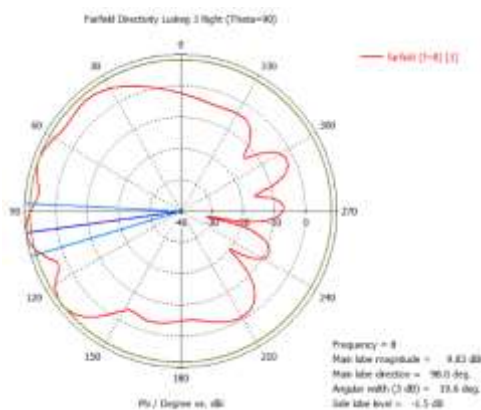


Obr. 107 Kmitočtový průběh osového poměru čtyř-prvkové řady s odbočkami

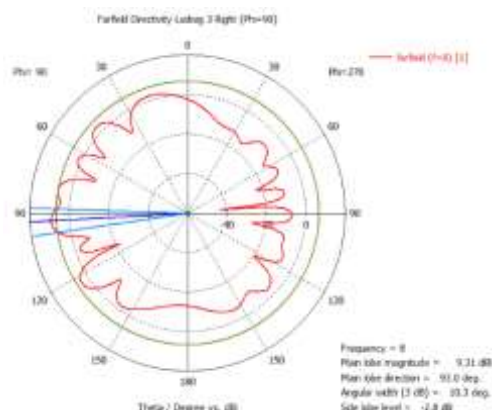


Obr. 108 3D směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady s odbočkami

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu čtyř-prvkové řady s odbočkami je patrné, že i tato struktura si zachovala své impedanční přizpůsobení v požadovaném kmitočtovém pásmu. Kmitočtový průběh osového poměru vykazuje menší míru ovlivnění oproti dvouprvkové řadě a zachovává si přijatelné hodnoty v dostatečně širokém kmitočtovém pásmu. Směrové charakteristiky vykazují menší zvlnění, než v případě dvouprvkové řady, stále však zůstává výrazné.

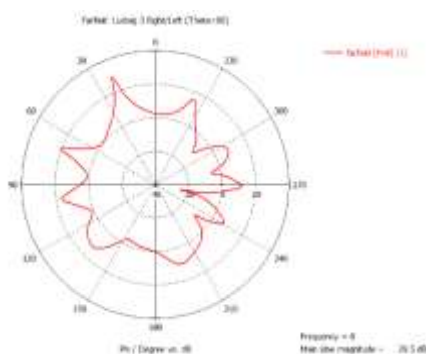


Obr. 109 Směrové charakteristiky - rovina XY

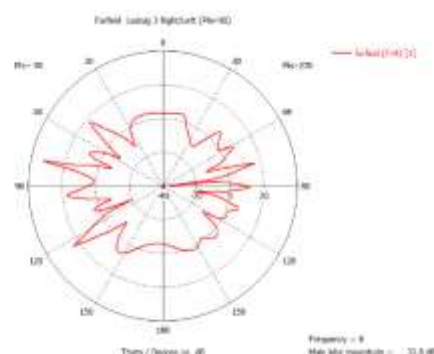


Obr. 110 Směrové charakteristiky - rovina YZ

Z řezů směrovými charakteristikami je rovněž patrné menší zvlnění. Tvary charakteristik již nejsou tak výrazně zkresleny, jako v případě dvouprvkové řady.



Obr. 111 Polarizační odstup - rovina XY



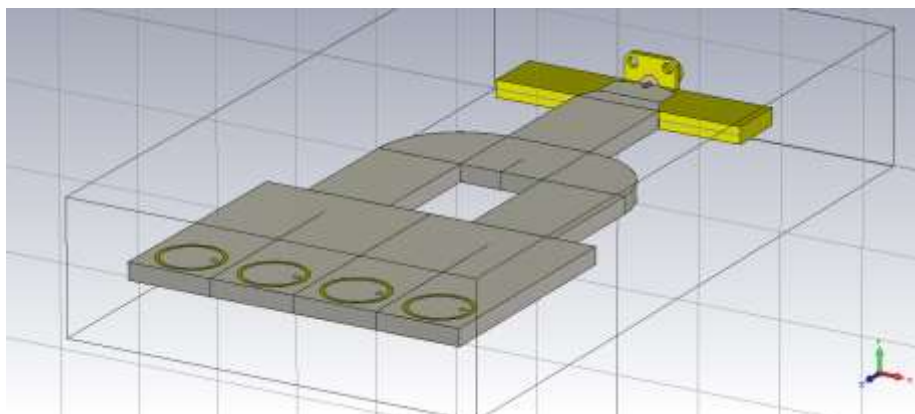
Obr. 112 Polarizační odstup - rovina YZ

Z grafu polarizačních odstupů je patrné, že čtyř-prvková řada zde vykazuje větší zvlnění charakteristik oproti řadě dvouprvkové – v některých směrech dosahuje hodnot lepších, avšak v některých směrech odstup klesá až k hodnotě 0 dB. Celkově lze tedy tyto charakteristiky označit jako horší, než v případě dvouprvkové řady.

Napájecí struktura tedy u čtyř-prvkové řady méně narušuje osový poměr a směrové charakteristiky, větší mírou však negativně ovlivňuje polarizační odstup řady, než v případě řady dvouprvkové.

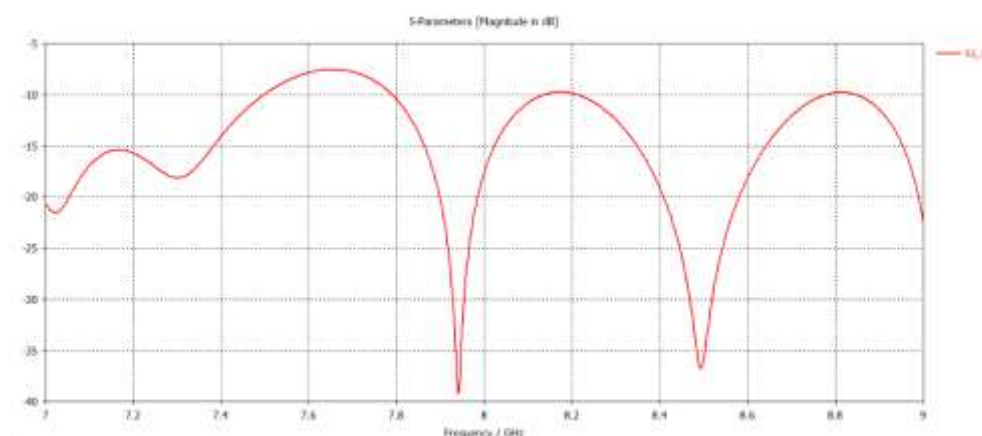
Struktura nebyla však plně optimalizována (možno pozorovat například u kmitočtového průběhu osového poměru, kde minimum neleží na kmitočtu 8 GHz), jelikož byl tento typ struktury po poradě s vedoucím vyhodnocen jako neperspektivní, hlavně kvůli složitému ladění a pozornost byla zaměřena na strukturu s děličem s postupným větvením.

10.2.2 Čtyř-prvková řada s děličem s postupným větvením

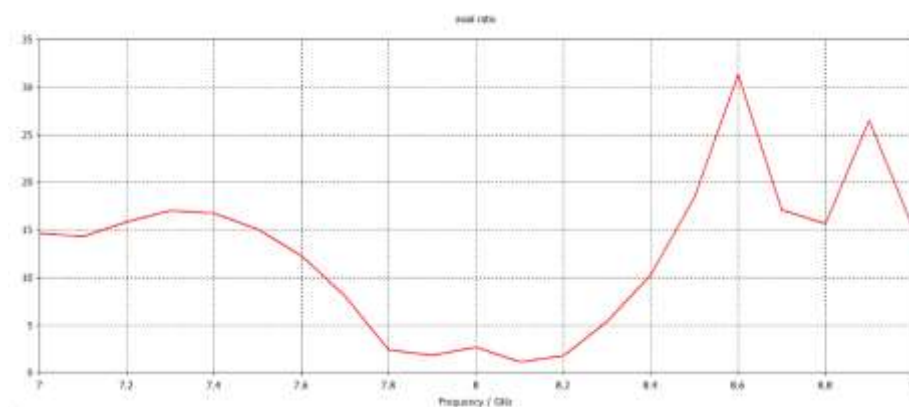


Obr. 113 Pohled na výslednou strukturu

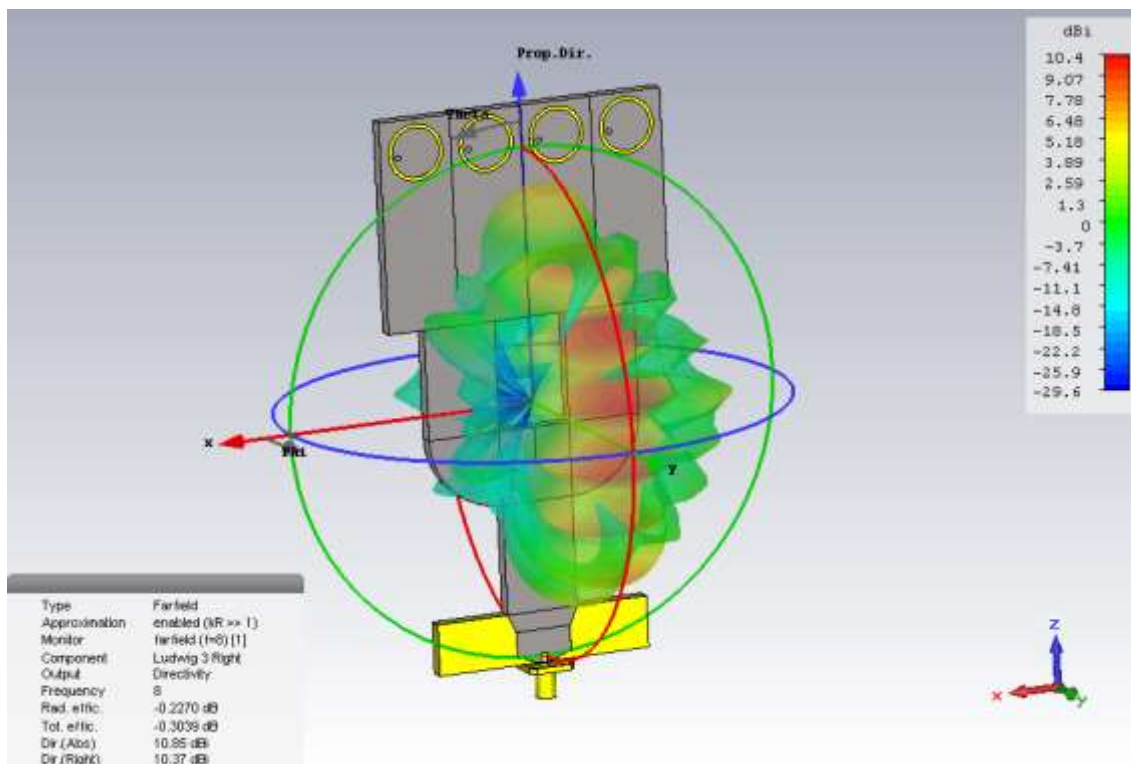
I v případě řady s postupným větvením byla použita původní napájecí struktura. Geometrie modelu je zcela odlišná od modelů předchozích, je tedy na místě zkoumat ovlivnění struktury i v tomto případě.



Obr. 114 Kmitočtový průběh činitele odrazu čtyř-prvkové řady s postupným větvením

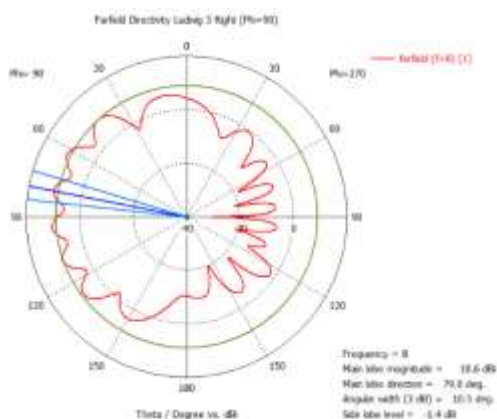


Obr. 115 Kmitočtový průběh osového poměru čtyř-prvkové řady s postupným větvením

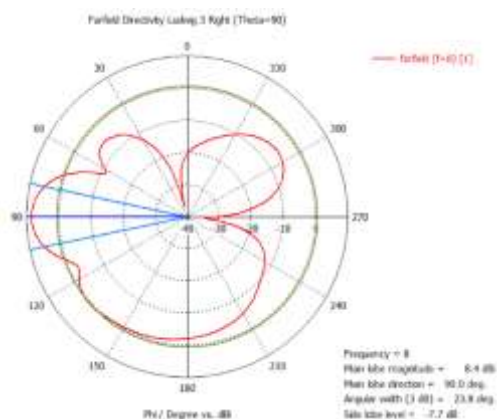


Obr. 116 3D směrové charakteristiky čtyř-prvkové řady s postupným větvením

Z kmitočtového průběhu činitele odrazu je patrné, že čtyř-prvková řada vyhovuje kritériu impedančního přizpůsobení v požadovaném kmitočtovém pásmu. Kmitočtový průběh osového poměru je rovněž v pořádku, oproti všem ostatním strukturám je zde dosaženo nejlepších výsledků. Směrové charakteristiky však opět vykazují nežádoucí zvlnění vlivem napájecí struktury.

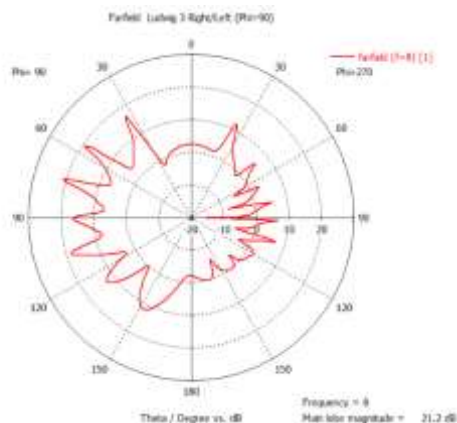


Obr. 117 Směrové charakteristiky - rovina YZ

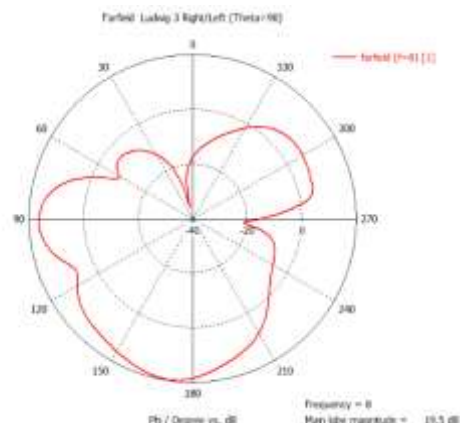


Obr. 118 Směrové charakteristiky - rovina XY

Z řezů směrovými charakteristikami v rovině YZ a v rovině XY je vidět, že výrazně ovlivněná je hlavně rovina YZ. Přítomné zvlnění zkresluje šířku hlavního laloku, jeho směr i zisk.



Obr. 119 polarizační odstup - rovina YZ



Obr. 120 polarizační odstup - rovina XY

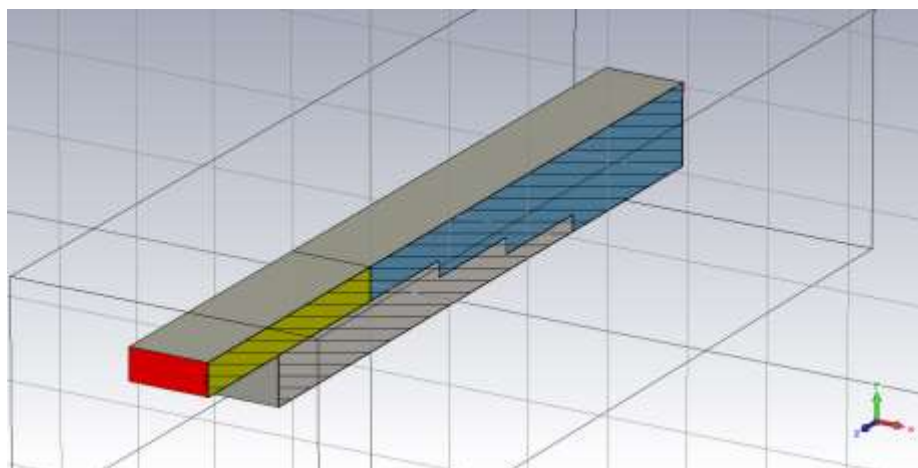
Z průběhů polarizačních odstupů vyplývá, že řada má problémy s nízkým odstupem v rovině YZ. Rovina XY vykazuje dobré vlastnosti.

Vzhledem k tomu, že napájecí struktura vnáší do modelu výrazné zhoršení parametrů i v případě řady s postupným větvením, byly zkoumány další možnosti napájení struktury.

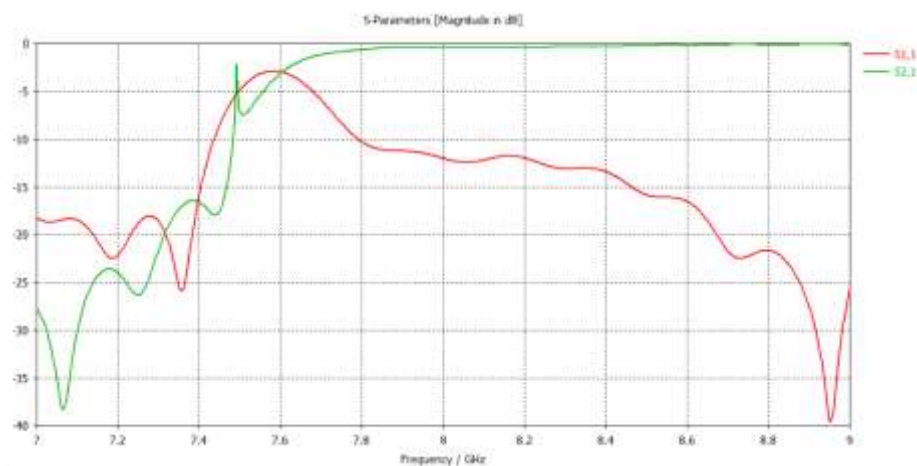
11 ALTERNATIVNÍ NAPÁJECÍ STRUKTURY

10.3 Napájení pomocí vlnovodu

Základní koncept napájení vlnovodem byl převzat z [13]. Přejechod z klasického vlnovodu, vyplněného vzduchem, je realizován schodkovitou strukturou, která postupně upravuje výšku vlnovodu.



Obr. 121 Řez vlnovodovou napájecí strukturou

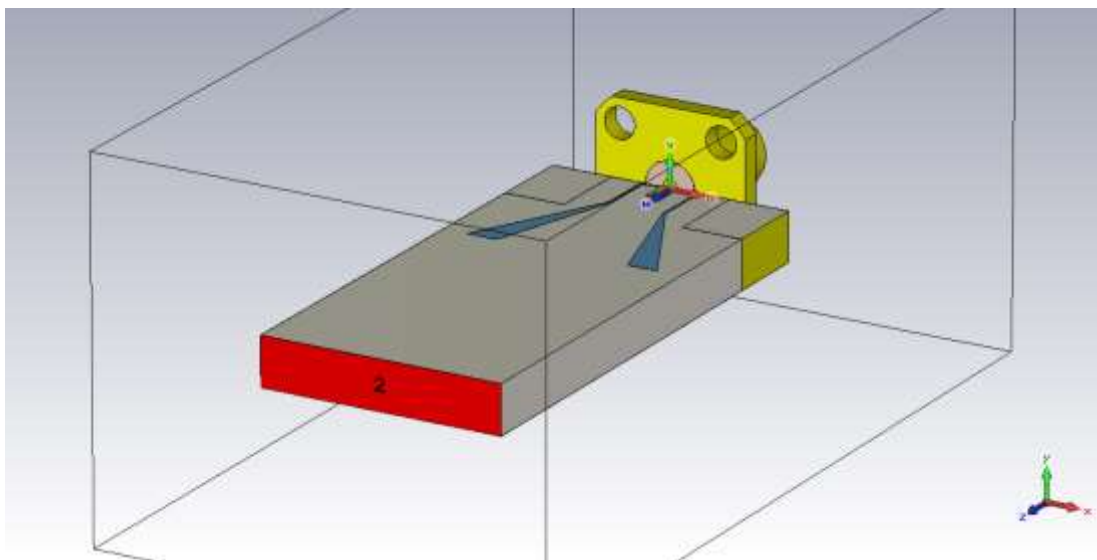


Obr. 122 Kmitočtové průběhy činitele odrazu a přenosu vlnovodové napájecí struktury

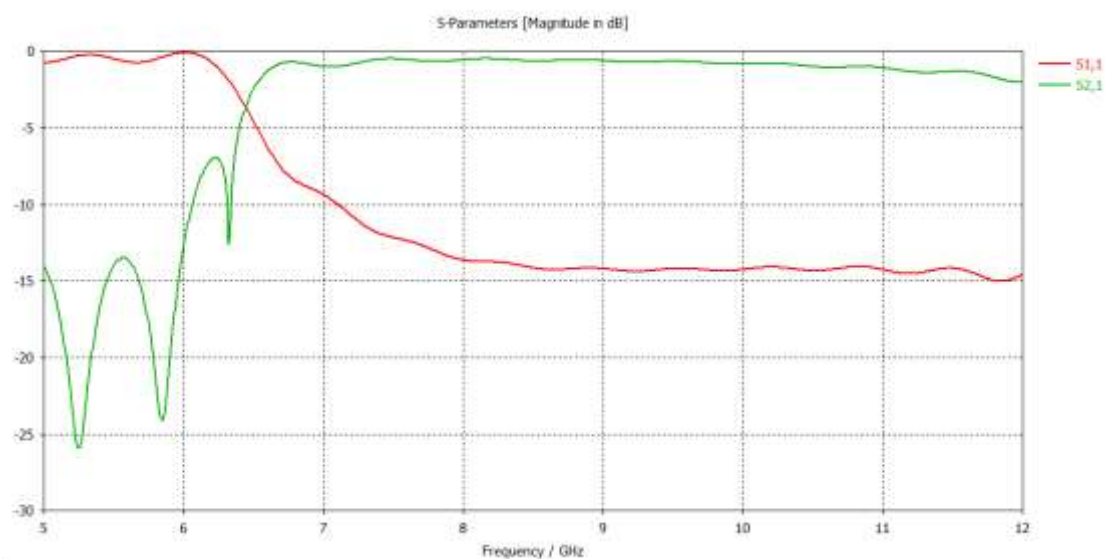
Z kmitočtových průběhů činitele odrazu a přenosu je patrné, že struktura vykazuje dostatečné parametry pro použití k napájení anténní řady.

10.4 Napájení pomocí koplanárního vlnovodu se zemní plochou

Koncept napájení byl převzat z [15]. Jako mezičlánek mezi textilním vlnovodem a SMA konektorem je použit zemněný koplanární vlnovod, jehož mezery se při přechodu do vlnovodu rozšiřují a zároveň roste jejich rozteč, kvůli zajištění co možná nejplynulejšího přechodu a omezení odrazů. Signálový pásek musí být konkrétně u této struktury v místě napojení na SMA konektor seříznut směrem od konektoru, jinak by vzhledem ke své šířce přišel do kontaktu s vnějším pláštěm konektoru a došlo by ke zkratu.



Obr. 123 Napájení pomocí koplanárního vlnovodu

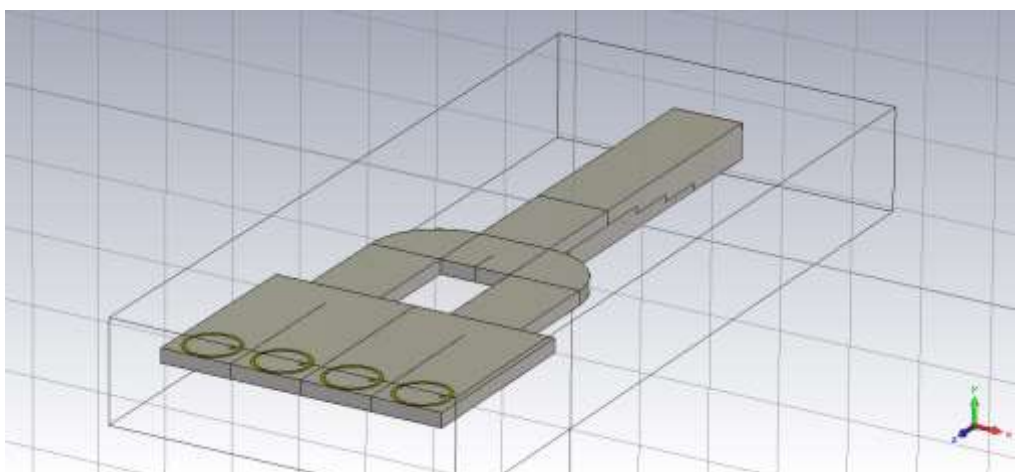


Obr. 124 Kmitočtové průběhy činitele odrazu a přenosu pro napájecí strukturu s koplanárním vlnovodem

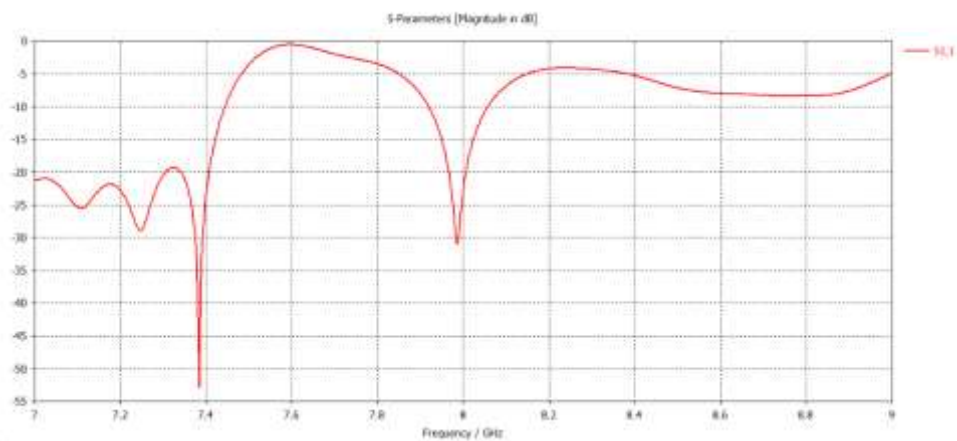
Z kmitočtových průběhů činitele odrazu a přenosu je patrné, že se tato napájecí struktura chová velmi podobně jako předchozí dvě struktury (mikropásek a vlnovod) a je tedy vyhovující pro použití v anténní řadě.

12 ANTÉNNÍ ŘADA S ALTERNATIVNÍMI ZPŮSOBY NAPÁJENÍ

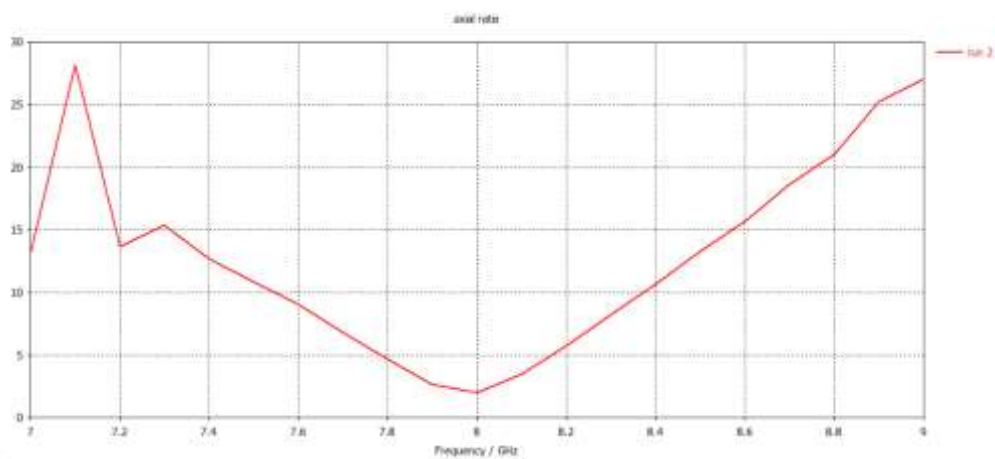
11.1 Řada buzená strukturou s vlnovodem



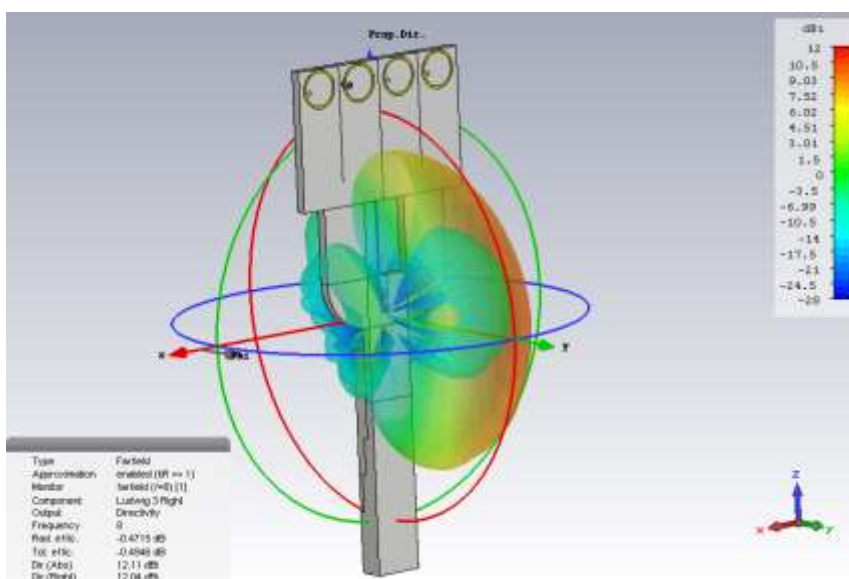
Obr. 125 Řada buzená klasickým vlnovodem



Obr. 126 Kmitočtový průběh činitele odrazu řady buzené klasickým vlnovodem

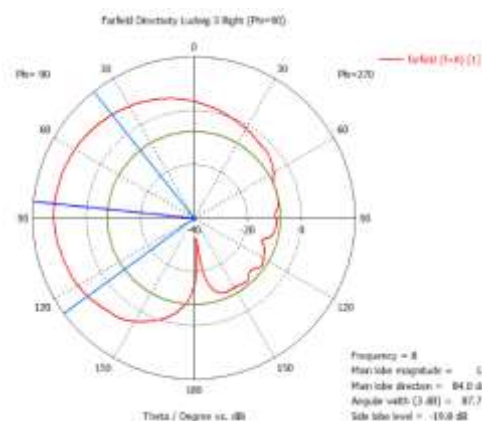


Obr. 127 Kmitočtový průběh osového poměru řady buzené klasickým vlnovodem

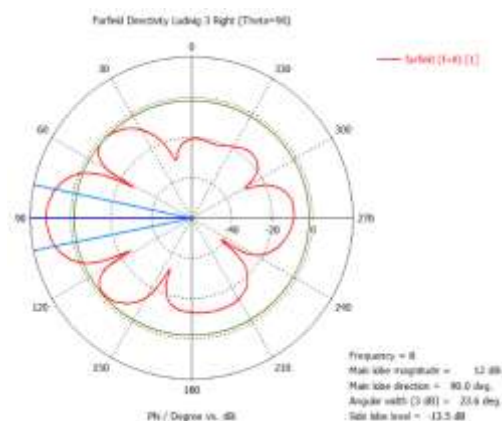


Obr. 128 3D směrové charakteristiky řady buzené klasickým vlnovodem

Z kmitočtových průběhů činitele odrazu a osového poměru je patrné, že struktura svými vlastnostmi dostatečně vyhovuje požadovaným parametrům. V případě činitele odrazu je nutno zmínit, že v simulaci nejsou uvažovány ztráty. Při měření reálného vzorku je očekávána větší šířka pásma. Tento předpoklad podporuje i realizované měření ověřovacího prototypu z kapitoly 8 a 9. Směrové charakteristiky jsou dle očekávání prosty jakékoliv degradace, jelikož struktura nemá kudy parazitně vyzařovat. Největší nevýhodou této možnosti napájení je její složitá fyzická realizace.

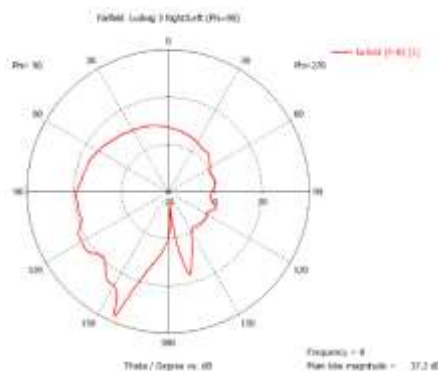


Obr. 129 Směrové charakteristiky - rovina YZ

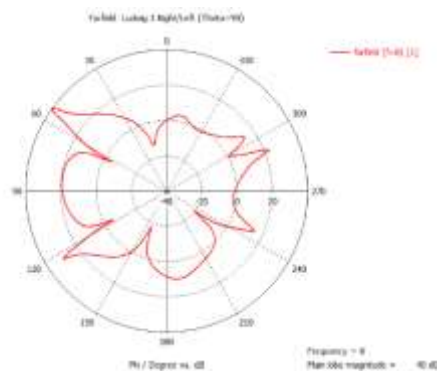


Obr. 130 Směrové charakteristiky - rovina XY

Z řezů směrovými charakteristikami v rovině YZ a v rovině XY si můžeme všimnout, že se prakticky shodují s charakteristikami původní struktury bez napájení.



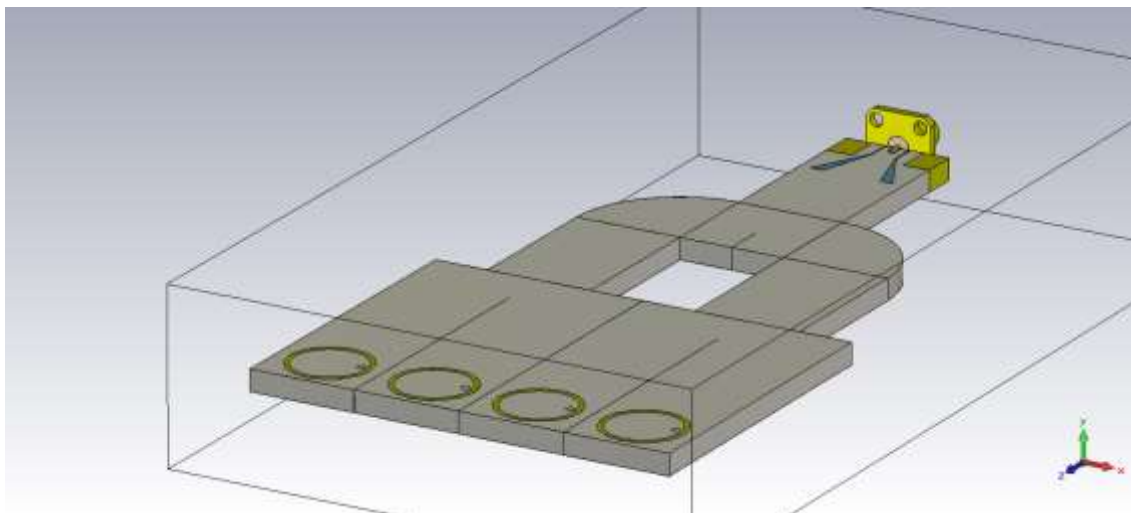
Obr. 131 Polarizační odstup - rovina YZ



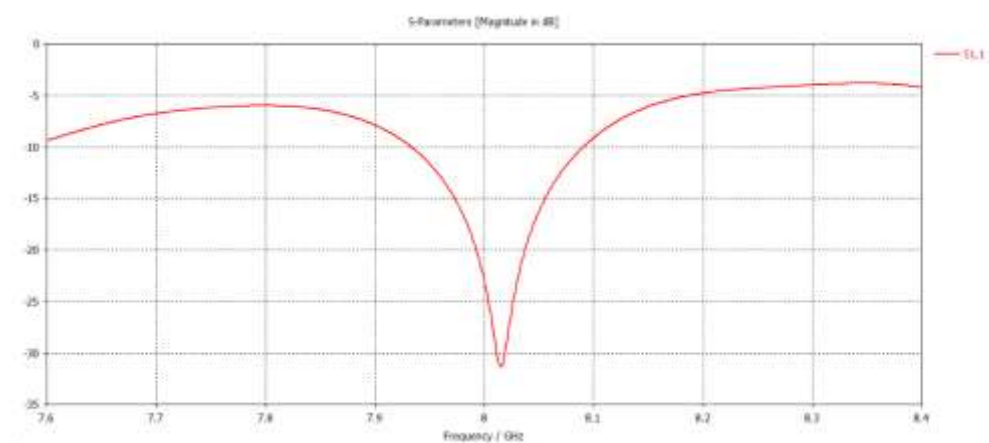
Obr. 132 Polarizační odstup - rovina XY

Z grafů, znázorňujících polarizační odstup je patrné, že struktura není náchylná k žádným velkým propadům a zachovává si v celé pracovní úhlové šířce dobrou hodnotu odstupu.

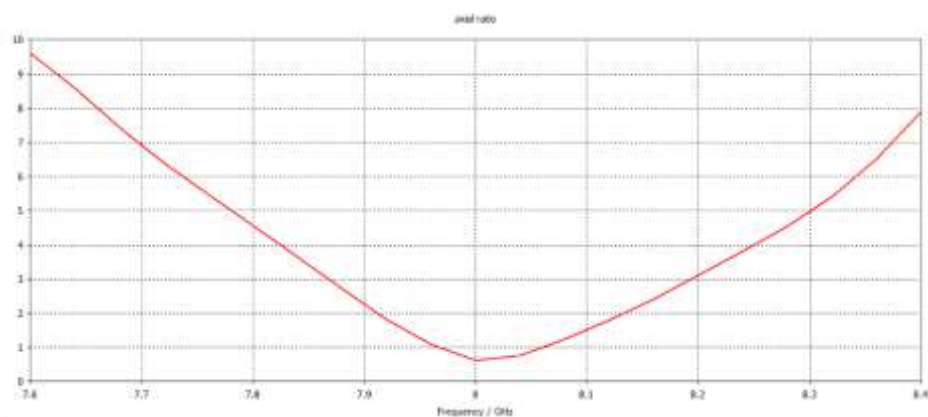
11.2 Řada buzená koplanárním vlnovodem



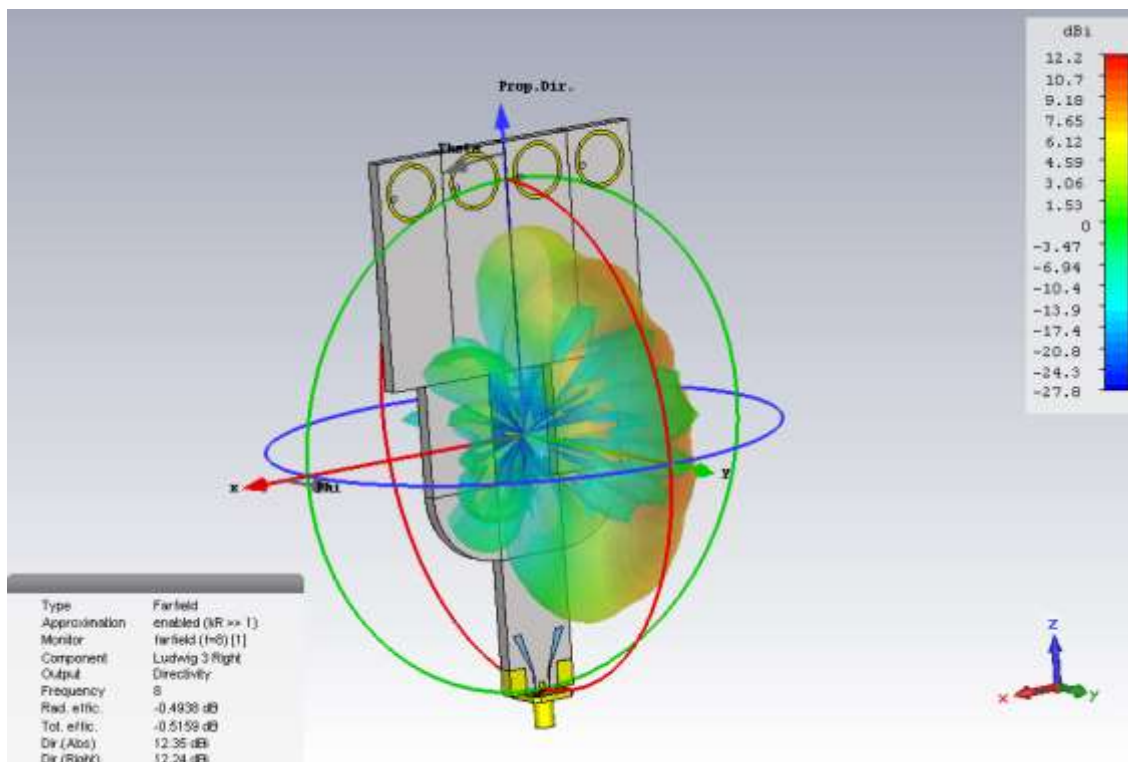
Obr. 133 Řada buzená koplanárním vlnovodem



Obr. 134 Kmitočtový průběh činitele odrazu řady buzené koplanárním vlnovodem

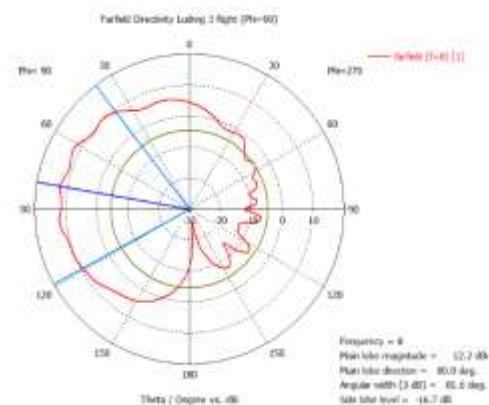


Obr. 135 Kmitočtový průběh osového poměru řady buzené koplanárním vlnovodem

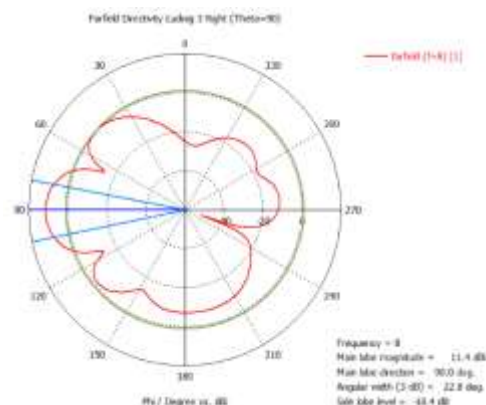


Obr. 136 3D směrové charakteristiky řady buzené koplanárním vlnovodem

Z grafů kmitočtových průběhů činitele odrazu a osového poměru řady s koplanárním vlnovodem vyplývá, že i tato struktura odpovídá zadání. Směrové charakteristiky vykazují určité zvlnění. Zůstává však na akceptovatelné úrovni.

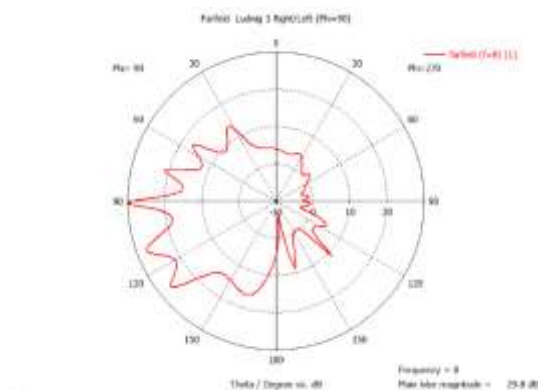


Obr. 137 Směrové charakteristiky - rovina YZ

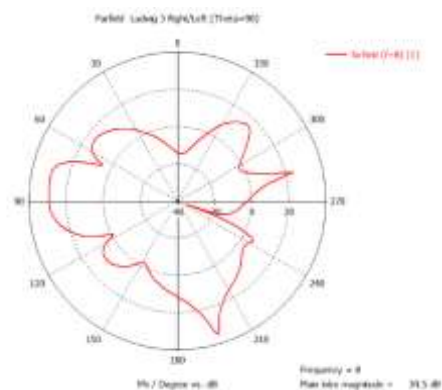


Obr. 138 Směrové charakteristiky - rovina XY

Řezy směrovými charakteristikami v rovině YZ a v rovině XY potvrzují akceptovatelnou úroveň interferencí napájecí struktury – nijak výrazně není změněna šířka hlavního laloku, ani jeho směr, ani zisk.



Obr. 139 Polarizační odstup - rovina YZ



Obr. 140 Polarizační odstup - rovina XY

Struktura si zachovává dobré hodnoty polarizačního odstupu, v rovině YZ je charakteristika zvlněná, stejným charakterem, jako v případě mikropáskového vedení, avšak v daleko menší, již akceptovatelné, míře.

Po zhodnocení parametrů všech alternativ byla jako nejvhodnější možnost pro výrobu vybrána čtyř-prvková řada s děličem s postupným větvením, napájená koplanárním vlnovodem se zemní rovinou, jelikož je tato struktura svými parametry vyvážená a je tedy ideálním kompromisem mezi ostatními.

13 SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH VÝSLEDKŮ



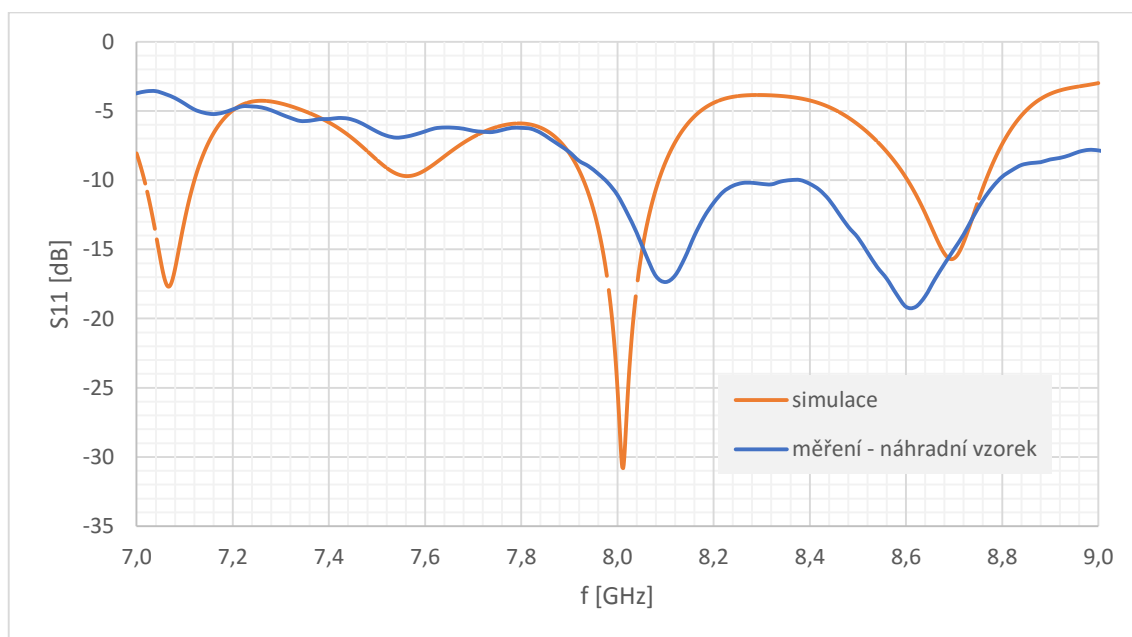
Obr. 141 Fotografie vyrobené řady

Při výrobě prvního vzorku řady došlo k nehodě. V procesu lepení SMA konektoru lepidlo při zasychání nateklo do textlie, což mělo za následek zkratování struktury v oblasti vstupu. Struktura byla částečně opravena odstraněním příslušné části textlie a nahrazením novou. Strukturální poškození a deformace v oblasti přechodu však bylo natolik výrazné, že nebylo možné očekávat vypovídající výsledky měření. Vzhledem k tomu, že byly natištěny dva exempláře řady, byl vyroben náhradní vzorek. U poškozeného vzorku byly následně změřeny pouze směrové charakteristiky, jelikož by měly být poškozením nejméně ovlivněny.



Obr. 142 Poškozený první vzorek řady – pohled na přechod

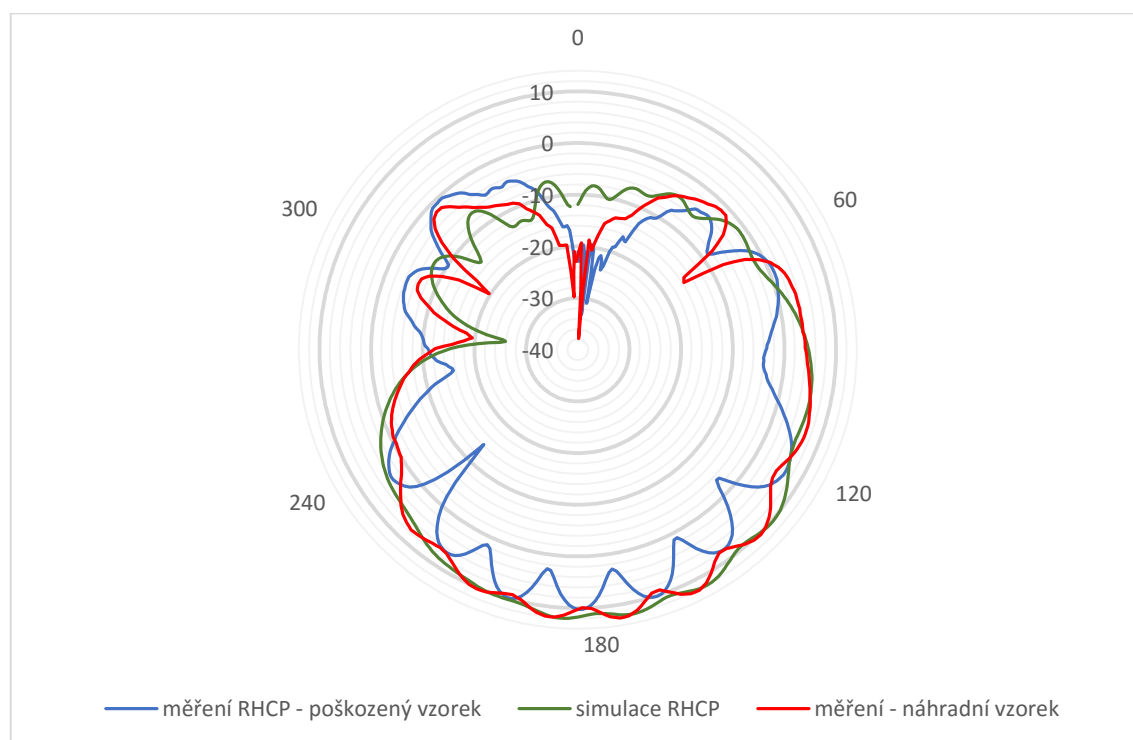
13.1 Impedanční přizpůsobení



Obr. 143 Měřený a simulovaný kmitočtový průběh činitele odrazu

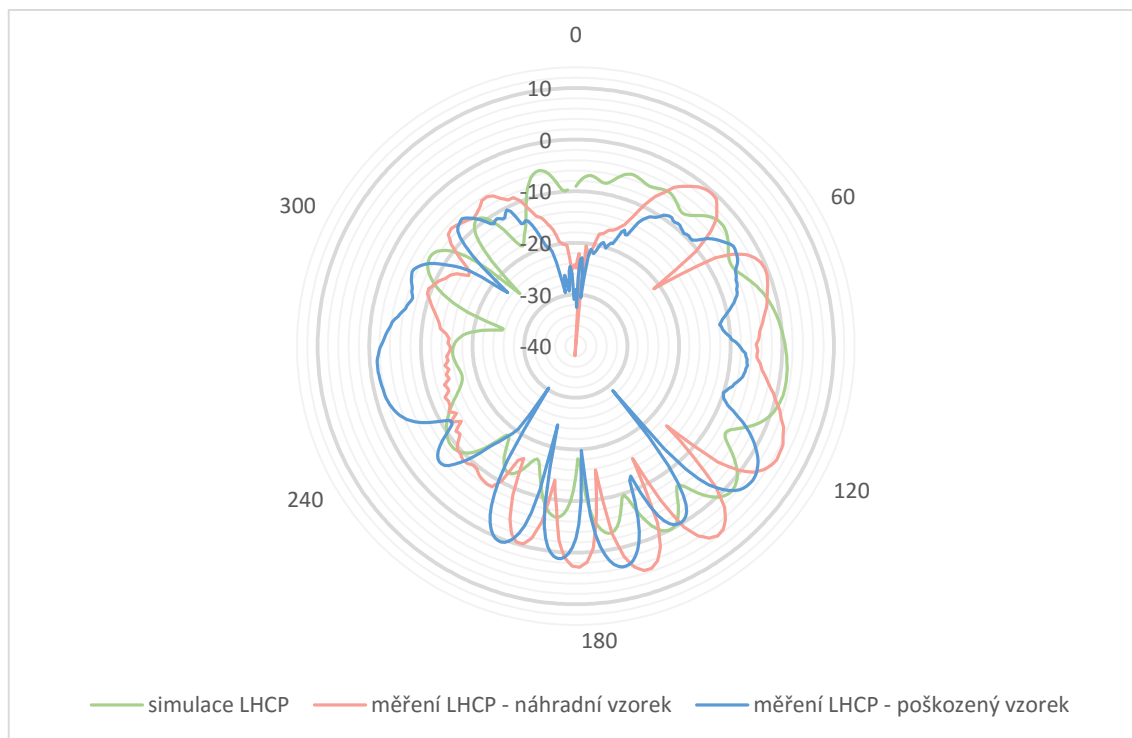
Jak můžeme ze srovnání obou průběhů vidět, naměřené výsledky odpovídají simulaci. Lze zde pozorovat menší frekvenční posuv, který je pravděpodobně dán tím, že model pracuje s šířkou boční stěny 0,01 mm, přičemž tloušťka stehu je výrazně vyšší. Tato skutečnost vede k mírnému zúžení vlnovodu, což má za následek prodloužení vlnových délek jednotlivých frekvencí a tedy i posun charakteristik k vyšším kmitočtům. Impedanční šířka pásma měřené struktury dosahuje 800 MHz. Změnu průběhu činitele odrazu může způsobovat i fakt, že potisk nebyl úplně ideální, jelikož velikost řady již byla na hranici výrobních možností metody. To se projevilo odstáváním nažehlovací folie od textilu a následnému vzniku vzduchových bublin.

13.2 Směrové charakteristiky



Obr. 144 Směrové charakteristiky RHCP - rovina YZ

Ze srovnání směrových charakteristik v rovině YZ pro pravotočivou vlnu můžeme vidět, že výsledky, dle očekávání, více odpovídají simulaci v případě náhradního vzorku. K poměrně dobré shodě dochází však i pro vzorek poškozený.

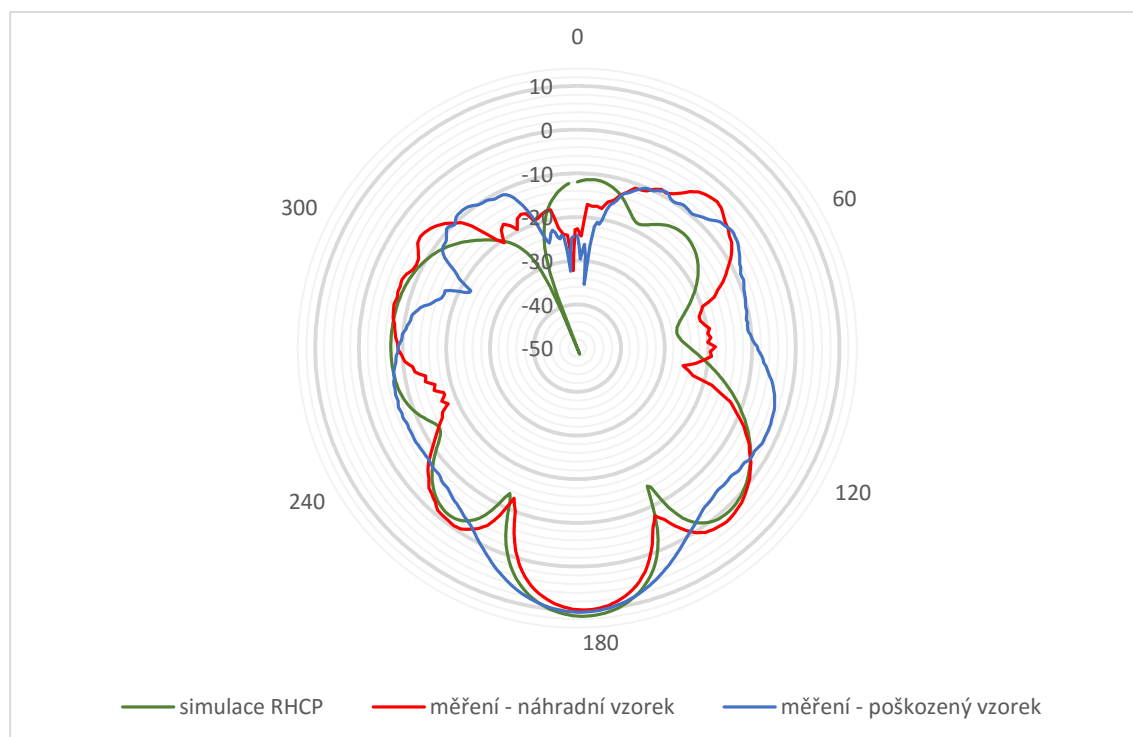


Obr. 145 Směrové charakteristiky LHCP - rovina YZ

Ze srovnání směrových charakteristik levotočivé vlny v rovině YZ je patrné, že v případě obou vzorků jsou hodnoty i zvlnění vyšší, než v případě simulace. Tento jev je pravděpodobně způsoben tím, že při výrobě řady došlo k mírné deformaci struktury. Při instalaci prokovovacích kolíků do jednotlivých antén vznikla v okolní struktuře kruhových motivů prohlubeň a navíc samotné prokovovací kolíky se nepodařilo zcela zkrátit na požadovanou délku a zasahují tedy mírně nad strukturu.

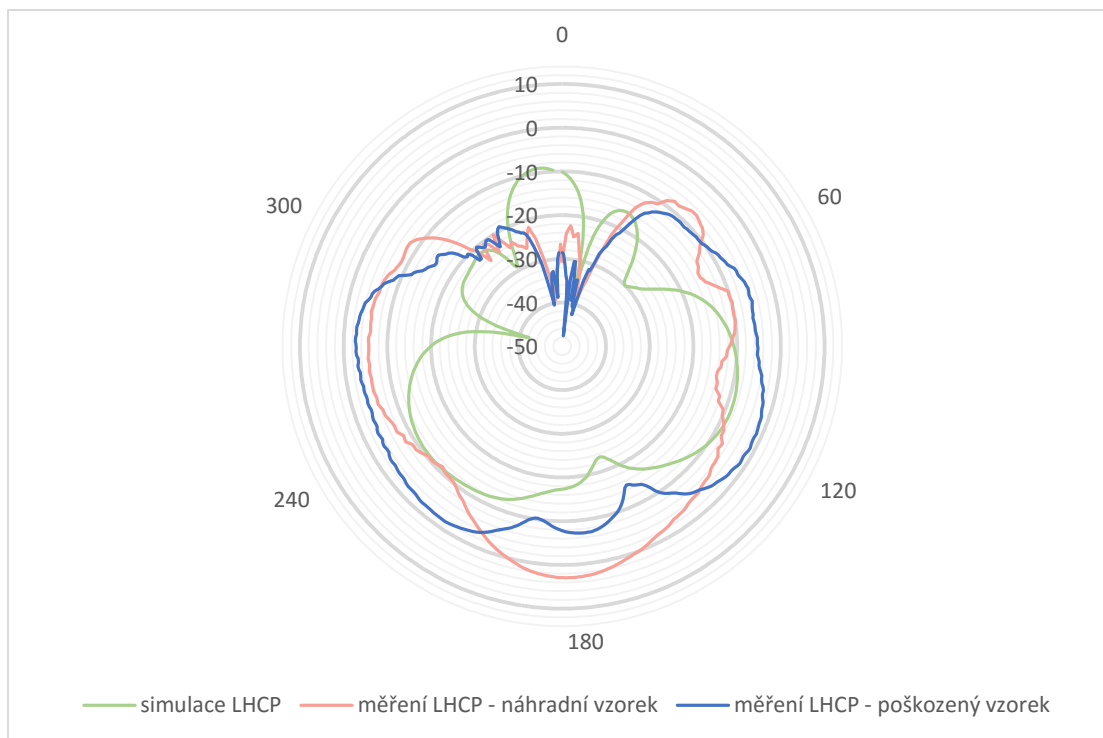
Pokud vůči sobě srovnáme charakteristiky obou vzorků, je zde patrné, že charakteristiky jsou navzájem o malý úhel pootočený, přičemž charakteristika poškozené řady je v souladu se simulací. Tento jev je způsoben tím, že při výrobě náhradního vzorku lepidlo na spodní straně řady u prokovovacích kolíků vytvrdlo ve tvaru bublin a tedy řadu nadzvedává vůči podložce v oblasti kruhových motivů, přičemž v oblasti přechodu koplanárního vlnovodu se spodní stěna vlnovodu podložky dotýká. To má za následek úhlový offset řady vůči úhlu podložky, ke které je při měření připevněna. U poškozeného vzorku zde bubliny nevznikly, tudíž v jeho případě žádný znatelný offset nevznikl.

Odchylka je bohužel právě taková, že do oblasti roviny XY (směr 180° v rovině YZ) posunula oblast lokálního maxima levotočivé vlny, což bude mít za následek změření úplně jiné charakteristiky pro LHCP v rovině XY a zdánlivé zhoršení polarizačního odstupu v daném směru oproti simulaci. Vzhledem k tomu, že charakteristika RHCP je v této oblasti poměrně stálá, neměla by být příliš ovlivněna.



Obr. 146 Směrové charakteristiky RHCP - rovina XY

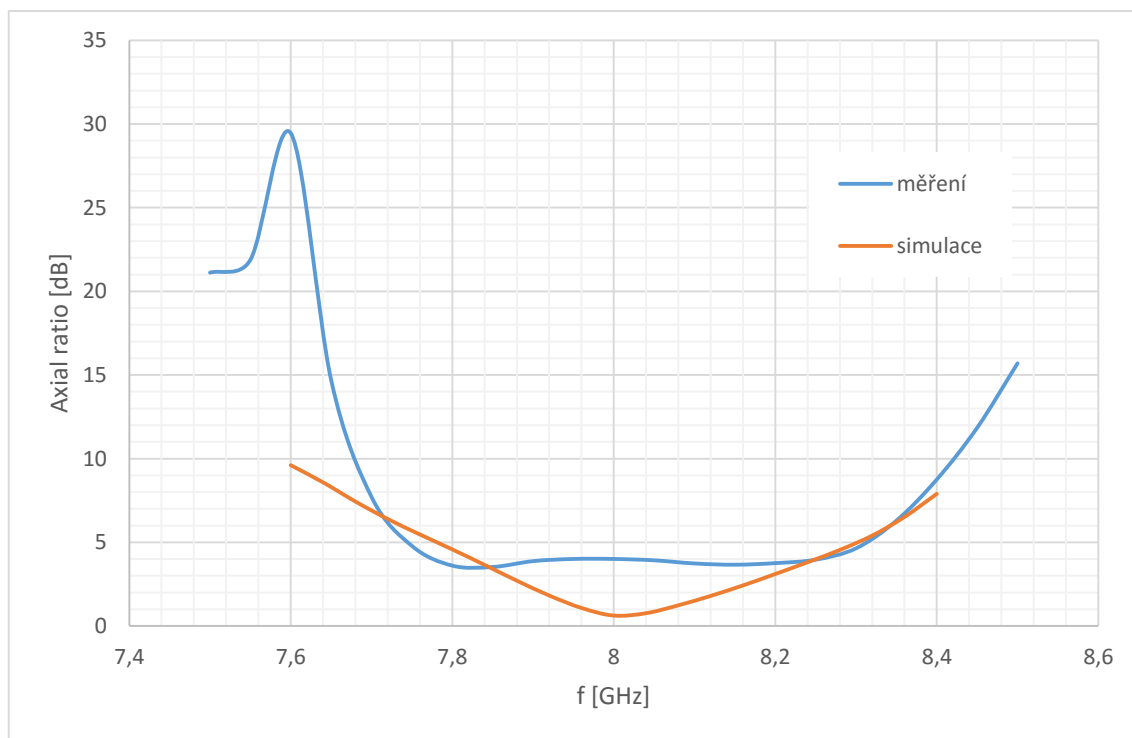
Směrové charakteristiky pro pravotočivou vlnu v rovině XY opět ukazují shodu se simulací, zejména v případě náhradního vzorku, jehož charakteristika je se simulací téměř totožná. V případě vzorku poškozeného zde patrně má vliv zdeformovaný přechod koplanárního vlnovodu, který pravděpodobně daleko více parazitně vyzařuje, než přechod nepoškozený.



Obr. 147 Směrové charakteristiky LHCP - rovina XY

Směrové charakteristiky levotočivé vlny pro rovinu XY potvrzují předpoklady, diskutované u LHCP charakteristik v rovině YZ – změřený diagram pro náhradní vzorek je díky úhlovému offsetu zcela jiný oproti simulaci, zatímco diagram pro poškozený vzorek simulaci odpovídá, až na všeobecně vyšší úrovni.

13.3 Osový poměr



Obr. 148 Kmitočtový průběh osového poměru řady

Z kmitočtových průběhů osového poměru je patrné, že reálná řada opět vykazuje shodu se simulací. Hodnota osového poměru však v okolí kmitočtu 8 GHz neklesá k simulované hodnotě, ale zůstává v tomto pásmu na přibližně konstantní úrovni okolo 3,5 - 4 dB. Jev je způsoben neideálním umístěním prokovovacích kolíků, jelikož byly vsazovány ručně, čímž byla do struktury vnesena nepřesnost. Ke zhoršení hodnot přispěl i fakt, že celá struktura byla mírně prohnuta do tvaru písmene U, což má za následek odchýlení os krajních antén od přímého směru, ve kterém byl osový poměr měřen.

ZÁVĚR

Byly navrženy antény a jejich řady s lineární a kruhovou polarizací a struktury s nimi úzce související – vlnovody, děliče výkonu a napájení pomocí mikropáskového vedení. Vlastnosti struktur byly detailně rozebrány, srovnány a zhodnoceny, přičemž na základě těchto informací bylo rozhodnuto o dalším rozvoji struktur s kruhovou polarizací. Následně byla vybrána nejvhodnější struktura pro kruhovou polarizaci.

V další fázi práce byl pomocí různých výrobních metod vytvořen prvotní prototyp antény s kruhovou polarizací, jejíž naměřené vlastnosti byly srovnány se simulací. Výsledky srovnání jsou s přihlédnutím k nepřesné výrobní metodě hodnoceny jako vyhovující a ve shodě se simulací. Na základě dosažených výsledků byla jako nejvhodnější výrobní metoda vybrán sítotisk na nažehlovací folii.

Práce poté zaměřila na možnosti napájení anténních řad, kde bylo zkoumáno napájení pomocí mikropáskového vedení a napájecí struktury alternativní k mikropáskovému vedení. Na základě dosažených výsledků byla k realizaci vybrána řada s děličem s postupným větvením a jako napájecí struktura zemnný koplanární vlnovod.

Vyrobená řada byla následně změřena, přičemž výsledky odpovídají simulaci a prokazují správnost návrhu. Odchytky jsou způsobeny nepřesnou výrobou, která je dána velkou mírou ruční práce – prošívání bočních stěn vlnovodů, instalace prokovovacích kolíků. Pokud by se podařilo tyto úkony zautomatizovat, došlo by všeobecně ke zlepšení parametrů řady.

Vzhledem k tomu, že fyzické rozměry řady již narážely na limity sítotiskové výrobní metody, došlo vlivem technických potíží k šestitýdennímu zpoždění výroby řady, což mělo za následek výrazné zkrácení doby pro dokončení řady a její změření. Z tohoto důvodu se již nestihlo zrealizovat měření v automobilu a provést případnou další iteraci pro korekci odchylek zaznamenaných při realizovaných měřeních.

LITERATURA

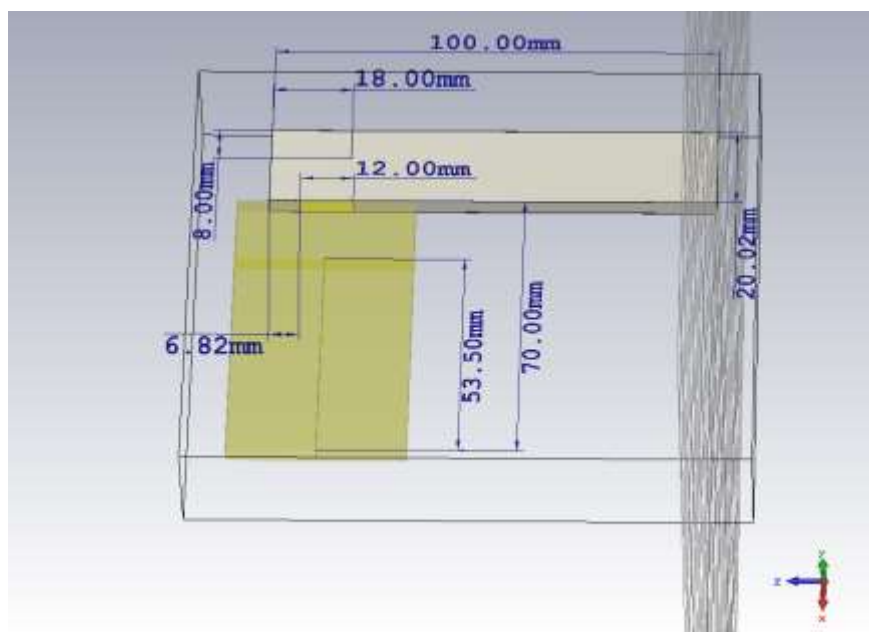
- [1] Feed Circuits. Tokyo Institute of Technology: Dept. of Electrical and Electric eng. [online]. Tokyo, 2003 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/research/animation-e.html>
- [2] DS5EVU's Blog. DS5EVU's Blog [online]. 2009 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://ds5evu.tistory.com/category/Study>
- [3] LÁČIK, Jaroslav. Štěrbínové a širokopásmové antény. Brno, 2014. Přednáška Návrh antén a směrových spojů. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] LÁČIK, Jaroslav. Kovové vlnovody obdélníkového průřezu. Brno, 2013. Přednáška Mikrovlnná technika. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] KIM, D., J.W. LEE, C.S. CHO a T.K. LEE. X-band circular ring-slot antenna embedded in single-layered SIW for circular polarisation. Electronics Letters. 2009, 45(13): 668-. DOI: 10.1049/el.2009.0901. ISSN 00135194. Dostupné také z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el.2009.0901>
- [6] Microstrip Line Calculator. Sphere [online]. 2004 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/ms_line_e.htm
- [7] LÁČÍK, J.; MIKULÁŠEK, T.; PUSKELY, J.; RAIDÁ, Z.; WOLANSKÝ, D. Compact arrays fed by substrate integrated waveguides, In Proceedings of ICEAA 2014, Aruba: Polytecnico di Torino, 2014, p. 448-451.
- [8] RAIDÁ, Z, M KUFA, P VSETULA a D WOLANSKY. Filtering Antennas: Comparison of Different Concepts. Brno.
- [9] RAIDÁ, Zbynek, D WOLANSKY, Vladimír HEBELKA a David. Two-Pole Filtering Antenna for Body Centric Communications. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013: 221-224.
- [10] RAU, M., A. IFTEMIE, O. BALTAG a D. COSTANDACHE. The Study of the Electromagnetic Shielding Properties of a Textile Material with Amorphous Microwire. Advances in Electrical and Computer Engineering. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011, 11(1): 17-22. DOI: 10.4316/AECE.2011.01003. ISSN 1582-7445. Dostupné také z: <http://www.aece.ro/abstractplus.php?year=2011>
- [11] GARG, R., BHARTIA, P., BAHL, I., ITTIPIBOON, A. Microstrip Antenna Design Handbook, Norwood: Artech House, 2001.
- [12] Antenna Theory [online]. 2009 [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/>
- [13] ŠPŮREK, Jan, Jan VĚLIM, Miroslav COUPAL, Zbyněk RAIDÁ, Jan PRÁŠEK a Jaromír HUBÁLEK. *Slot Loop Antennas Printed on 3D Textile Substrate*. Brno, 2016. VUT. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.
- [14] VAŠINA, Petr a Jaroslav LÁČÍK. 2 x 2 SIW Rectangular Ring Slot Antenna Array for 60 GHz Band. Brno, 2015. Brno University of Technology.
- [15] LÁČÍK, Jaroslav, Tomáš MIKULÁŠEK, Zbyněk RAIDÁ a Tomáš URBANEC. SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE MONOPOLAR RING-SLOT ANTENNA. Brno, 2013. Brno University of Technology.

SEZNAM PŘÍLOH

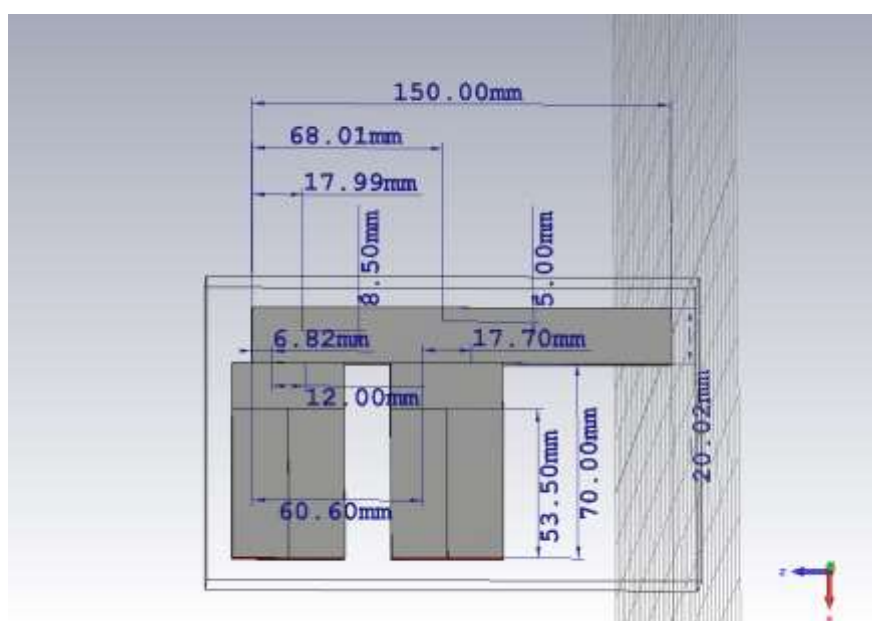
Příloha 1 Rozměry děliče s jednou odbočkou	68
Příloha 2 Rozměry děliče se dvěma odbočkami	68
Příloha 3 Rozměry děliče s postupným větvením	69
Příloha 4 Rozměry antény pro horizontální polarizaci	69
Příloha 5 Rozměry dvouprvkové řady pro horizontální polarizaci.....	70
Příloha 6 Rozměry čtyř-prvkové řady pro horizontální polarizaci	70
Příloha 7 Rozměry antény pro vertikální polarizaci	71
Příloha 8 Rozměry dvouprvkové řady pro vertikální polarizaci.....	71
Příloha 9 Rozměry obdélníkové antény pro kruhovou polarizaci	72
Příloha 10 Rozměry kruhové antény pro kruhovou polarizaci	72
Příloha 11 Rozměry dvouprvkové řady pro kruhovou polarizaci.....	73
Příloha 12 Rozměry čtyř-prvkové řady pro kruhovou polarizaci	73
Příloha 13 Rozměry čtyř-prvkové řady pro kruhovou polarizaci	74
Příloha 14 Rozměry prototypu kruhové antény pro kruhovou polarizaci	74
Příloha 15 Rozměry dvouprvkové řady s odbočkami s mikropáskovým napájením	75
Příloha 16 Rozměry čtyř-prvkové řady s odbočkami s mikropáskovým napájením	75
Příloha 17 Rozměry řady s postupným větvením s mikropáskovým napájením.....	75
Příloha 18 Rozměry vlnovodové napájecí struktury.....	76
Příloha 19 Rozměry napájecí struktury se zemněným koplanárním vlnovodem	76
Příloha 20 Rozměry řady s napájením pomocí vlnovodu.....	76
Příloha 21 Rozměry řady napájené pomocí zemněného koplanárního vlnovodu	77

PŘÍLOHY

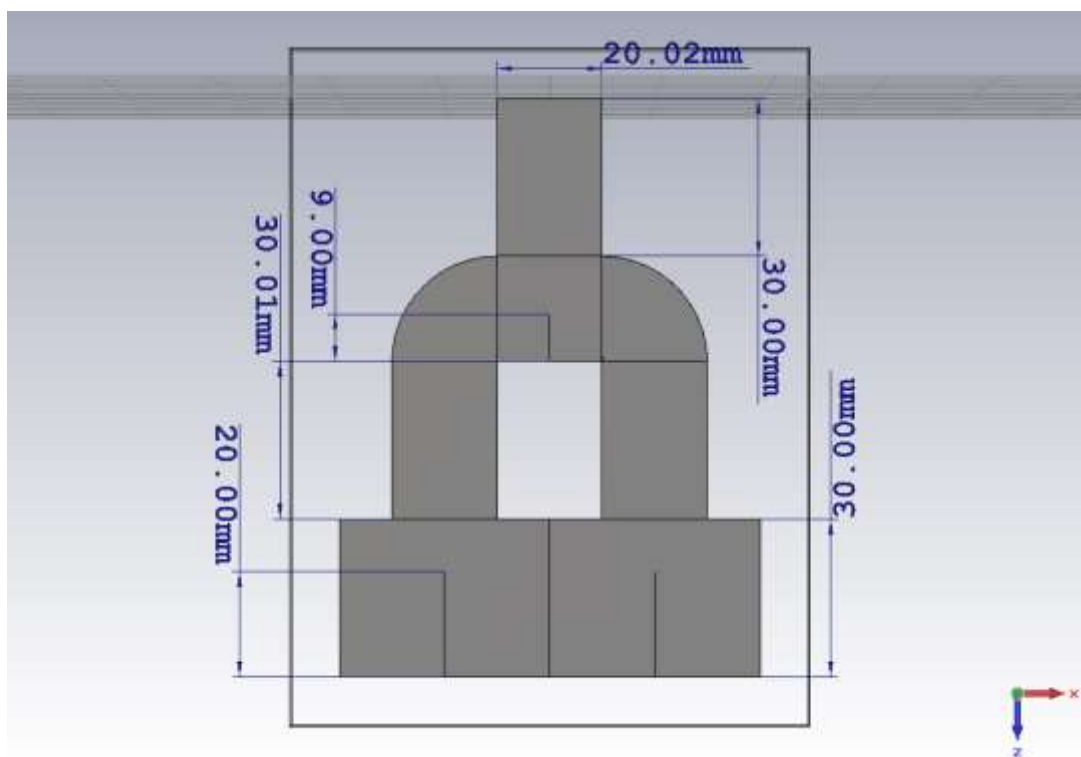
Pokud nejsou některé rozměry struktur zaznačeny, jsou shodné s odpovídajícími parametry struktur, z nichž byly odvozeny.



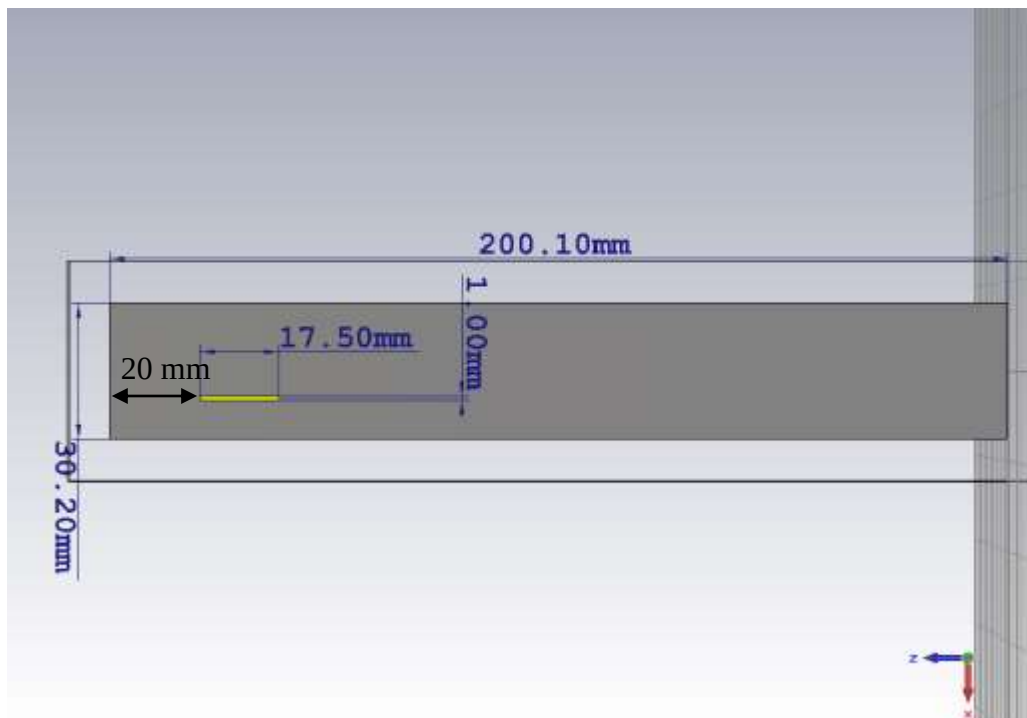
Příloha 1 Rozměry děliče s jednou odbočkou



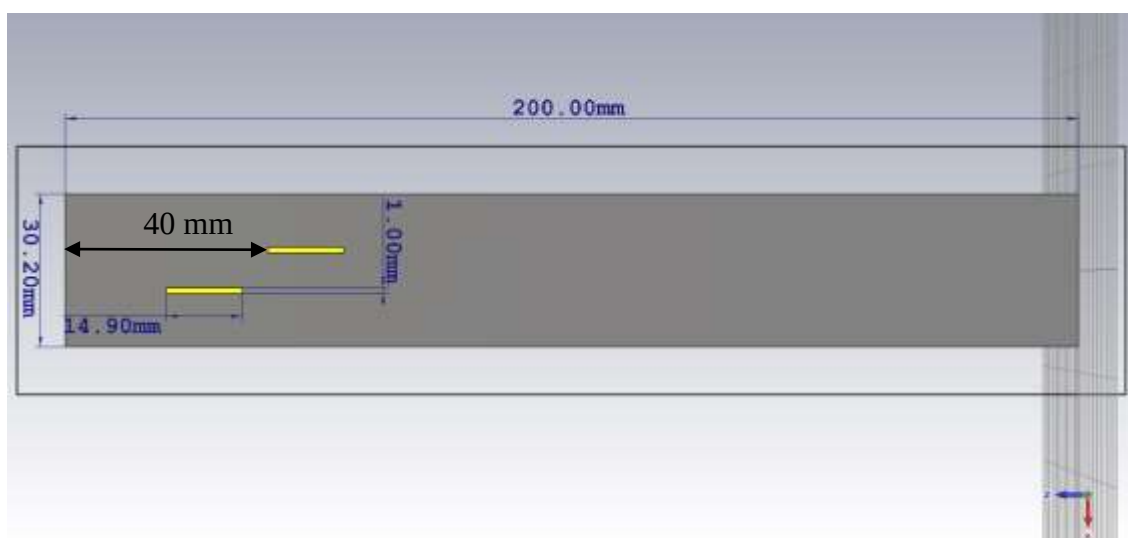
Příloha 2 Rozměry děliče se dvěma odbočkami



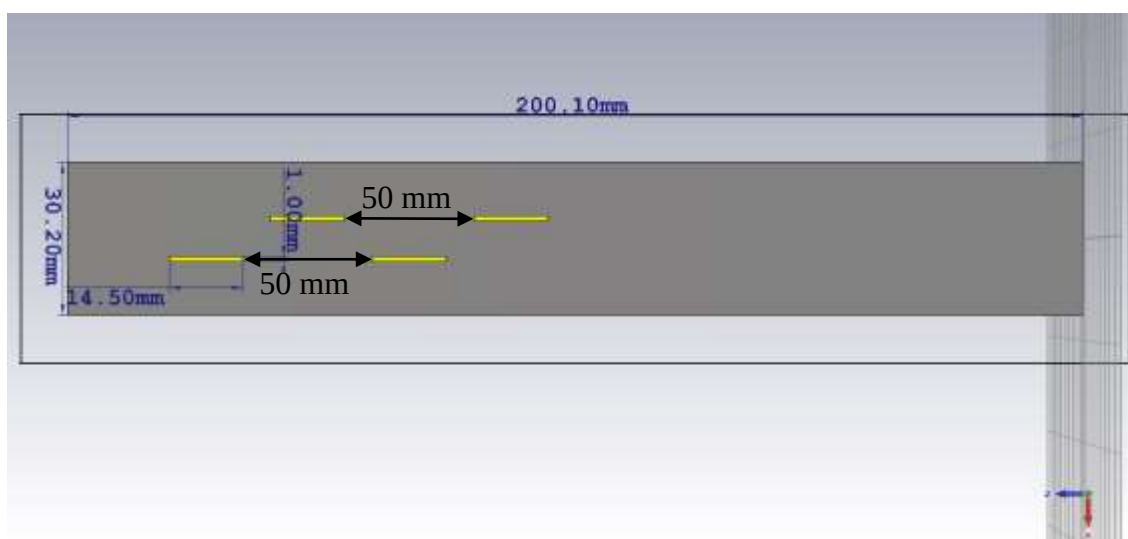
Příloha 3 Rozměry děliče s postupným větvením



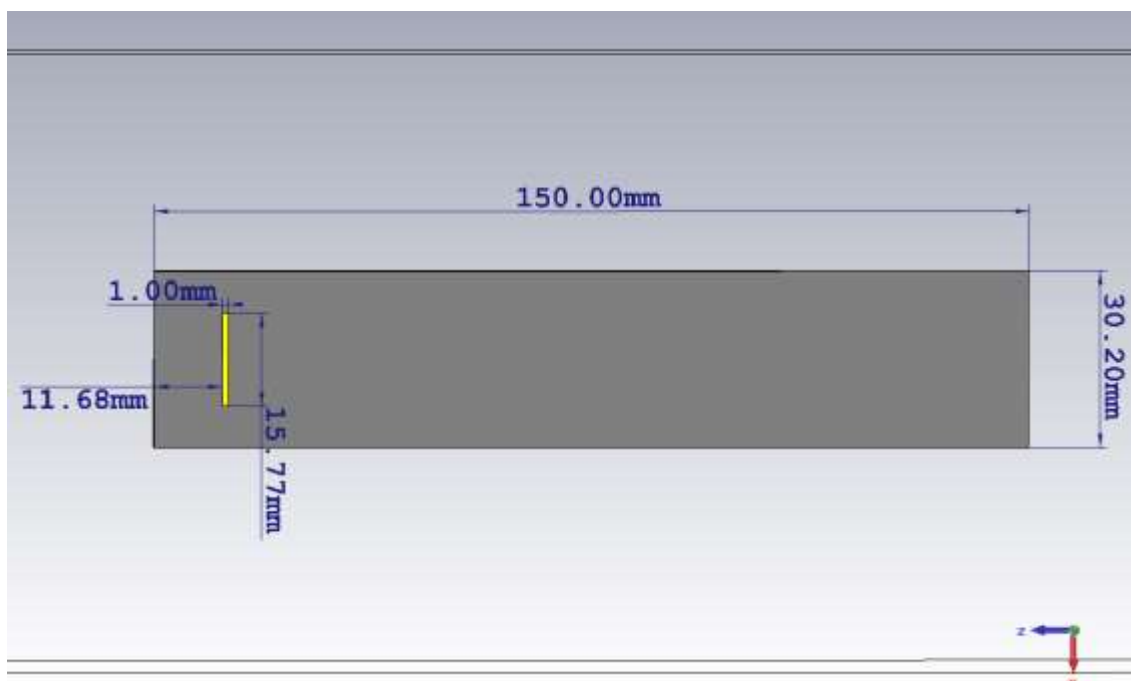
Příloha 4 Rozměry antény pro horizontální polarizaci



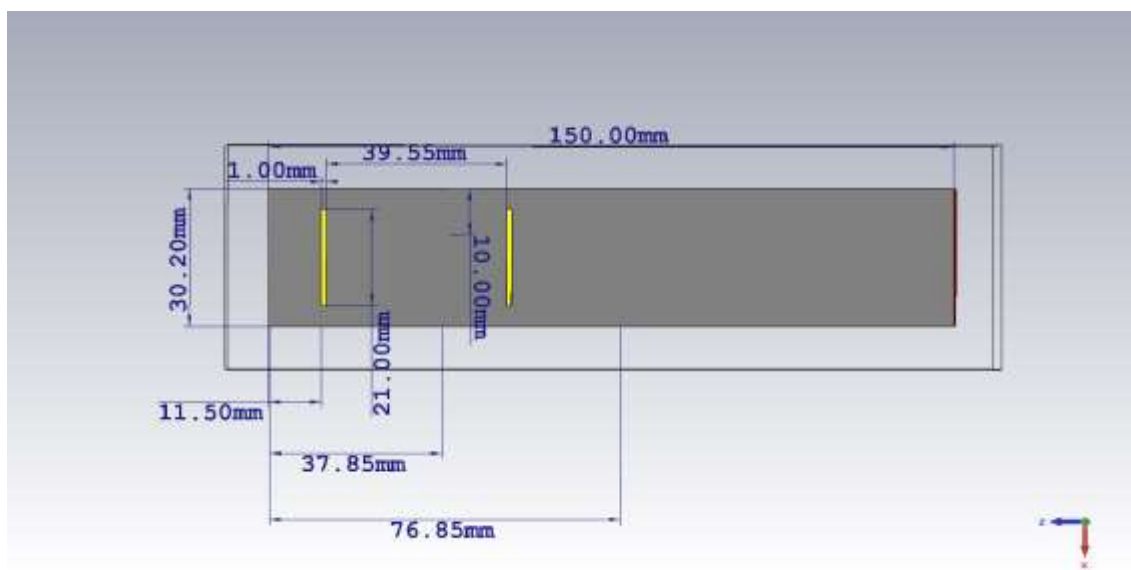
Příloha 5 Rozměry dvouprvkové řady pro horizontální polarizaci



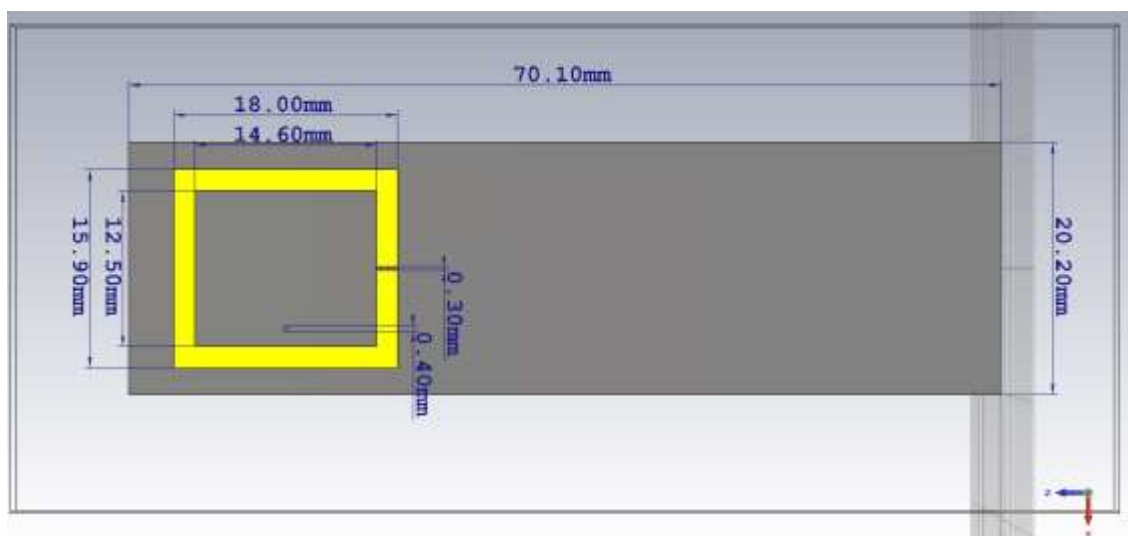
Příloha 6 Rozměry čtyř-prvkové řady pro horizontální polarizaci



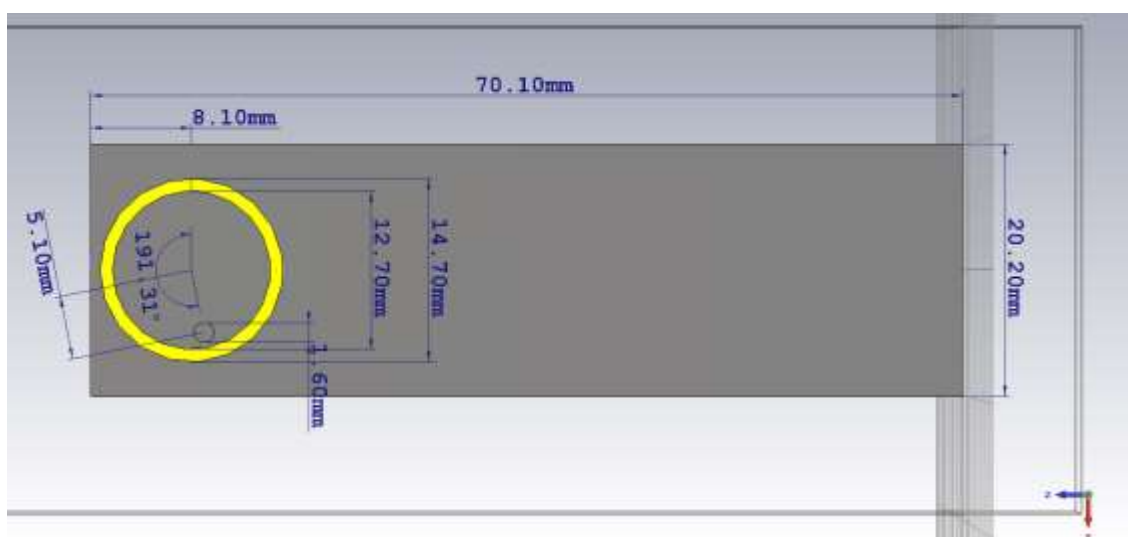
Příloha 7 Rozměry antény pro vertikální polarizaci



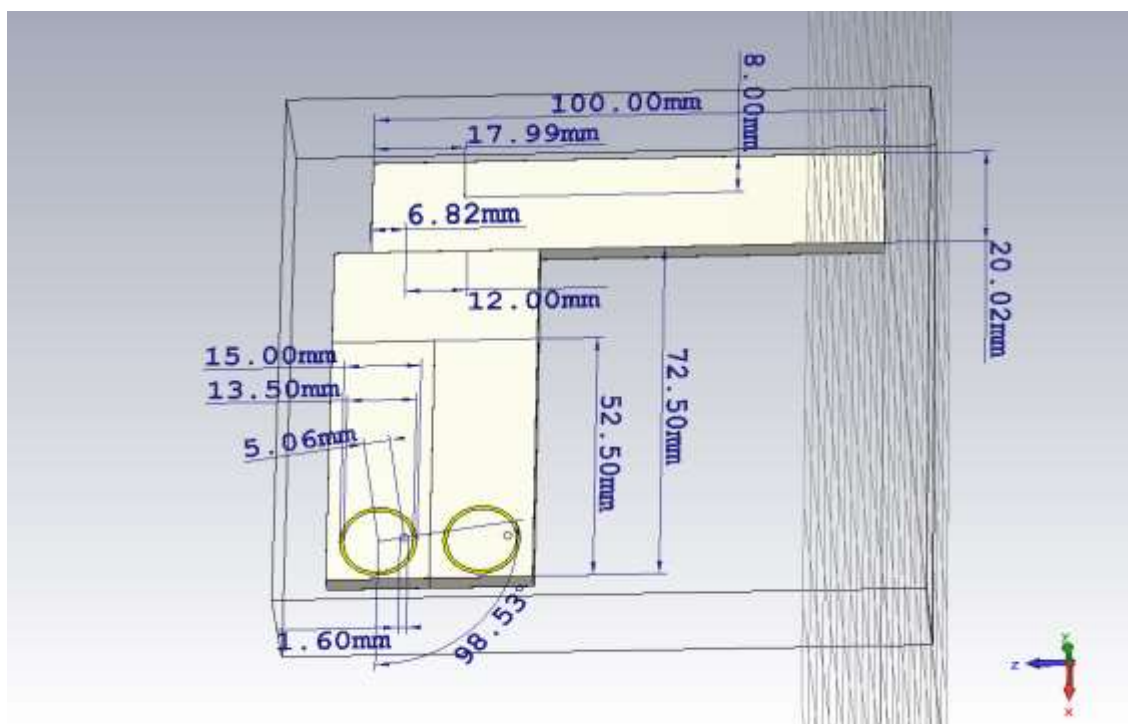
Příloha 8 Rozměry dvouprvkové řady pro vertikální polarizaci



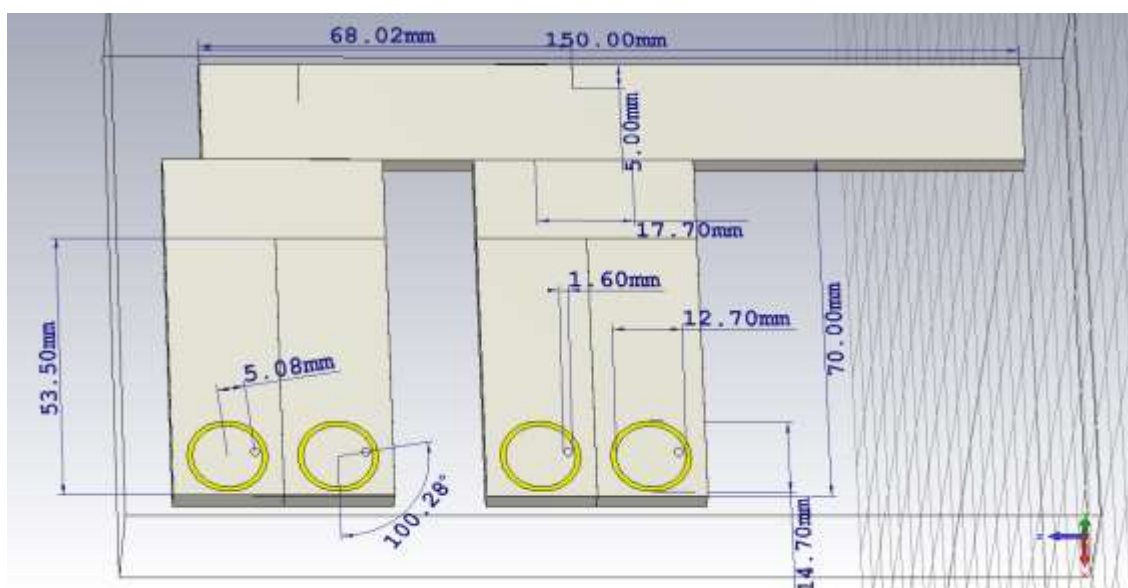
Příloha 9 Rozměry obdélníkové antény pro kruhovou polarizaci



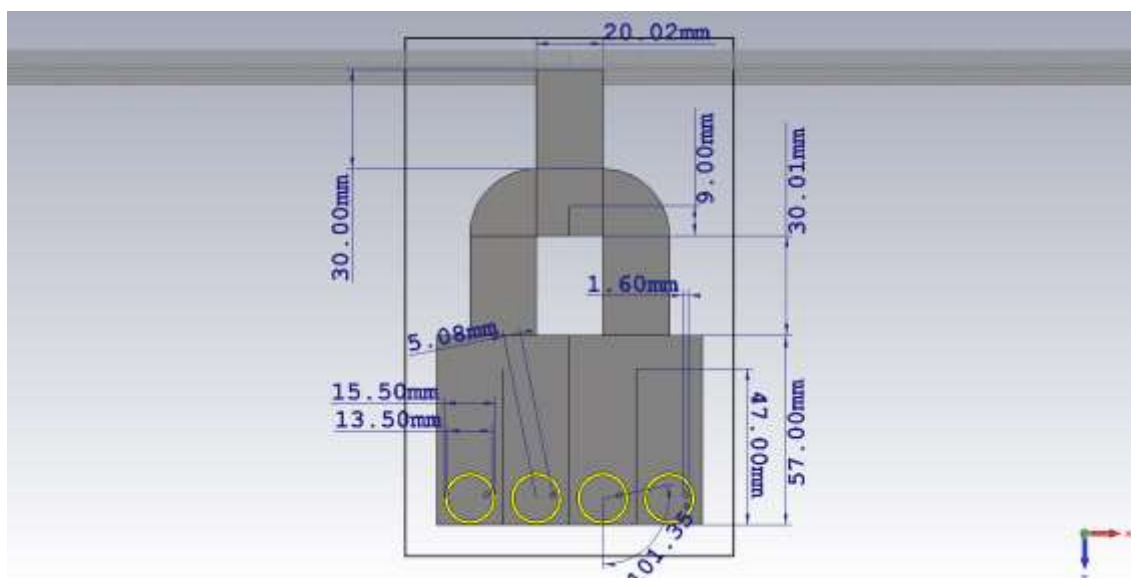
Příloha 10 Rozměry kruhové antény pro kruhovou polarizaci



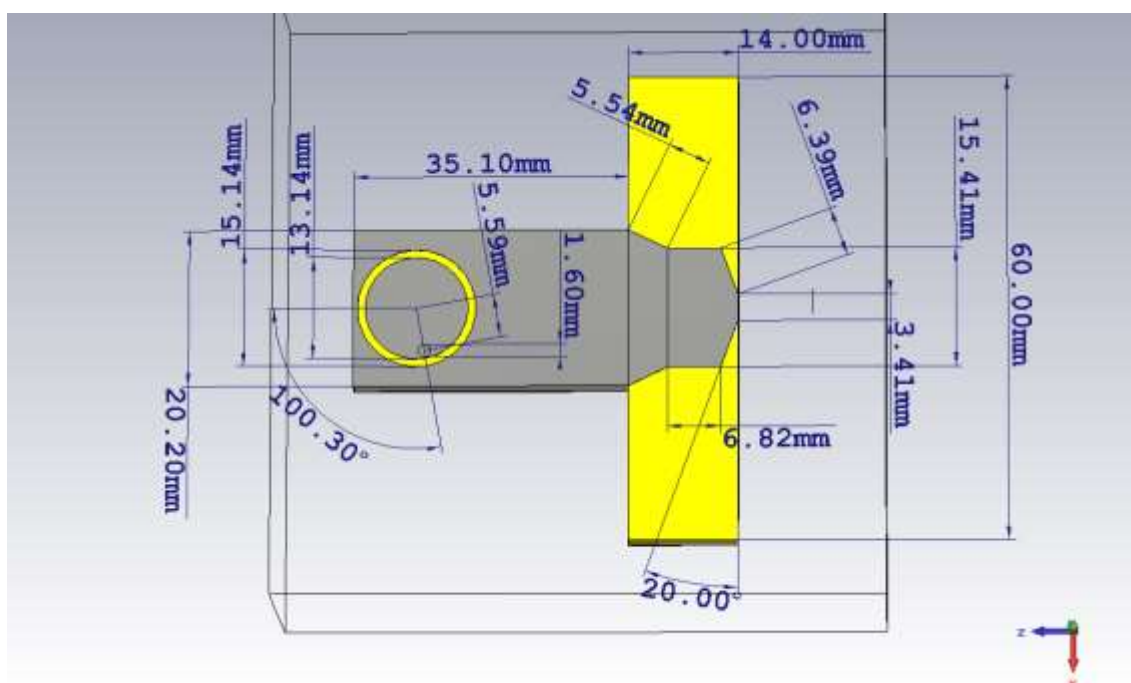
Příloha 11 Rozměry dvouprvkové řady pro kruhovou polarizaci



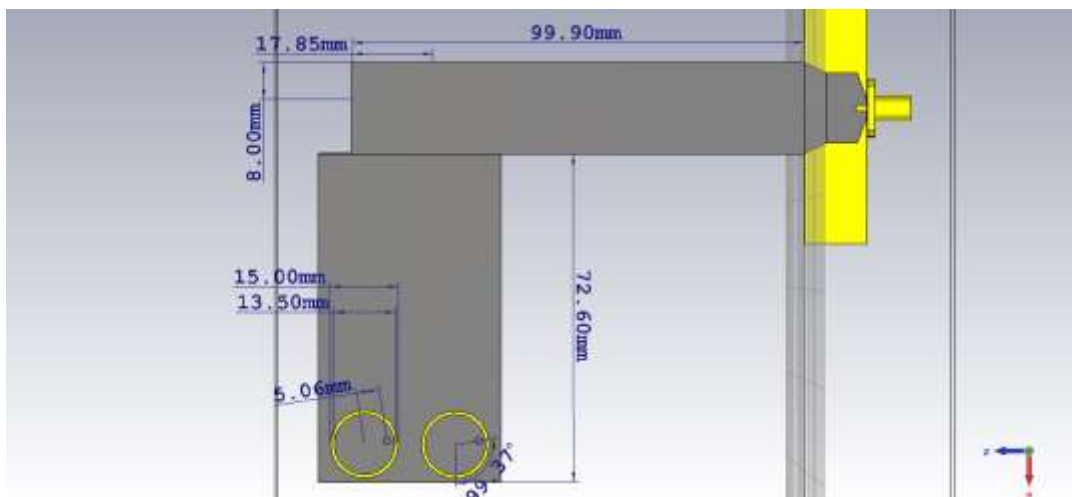
Příloha 12 Rozměry čtyřprvkové řady pro kruhovou polarizaci



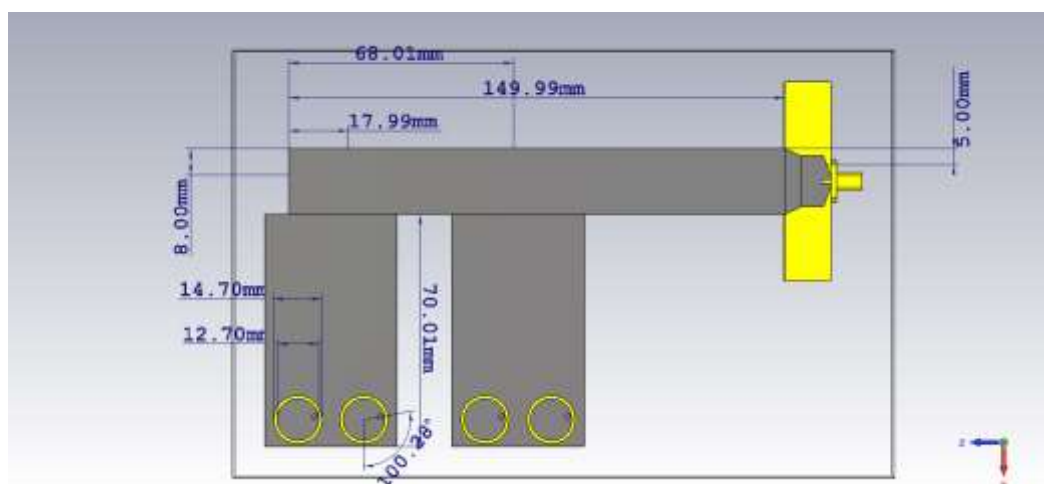
Príloha 13 Rozměry čtyř-prvkové řady pro kruhovou polarizaci



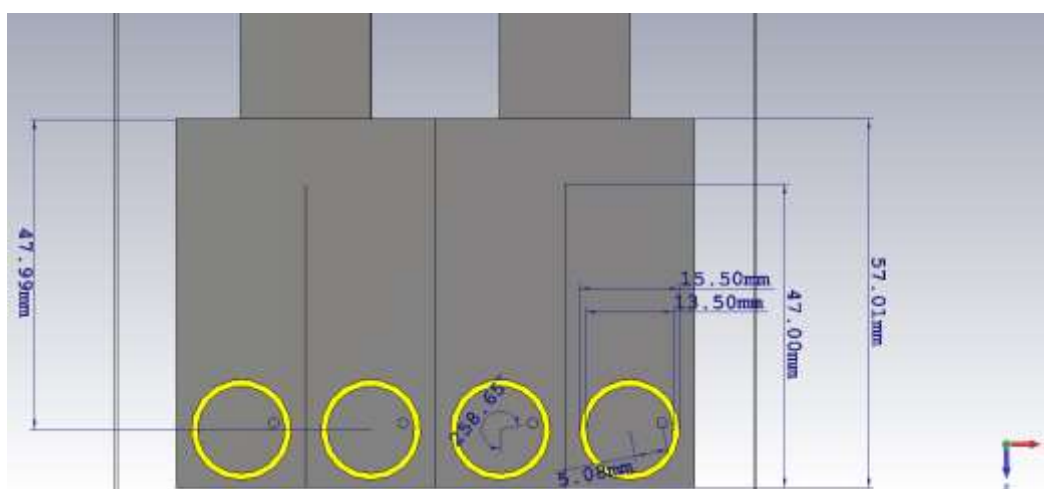
Príloha 14 Rozměry prototypu kruhové antény pro kruhovou polarizaci



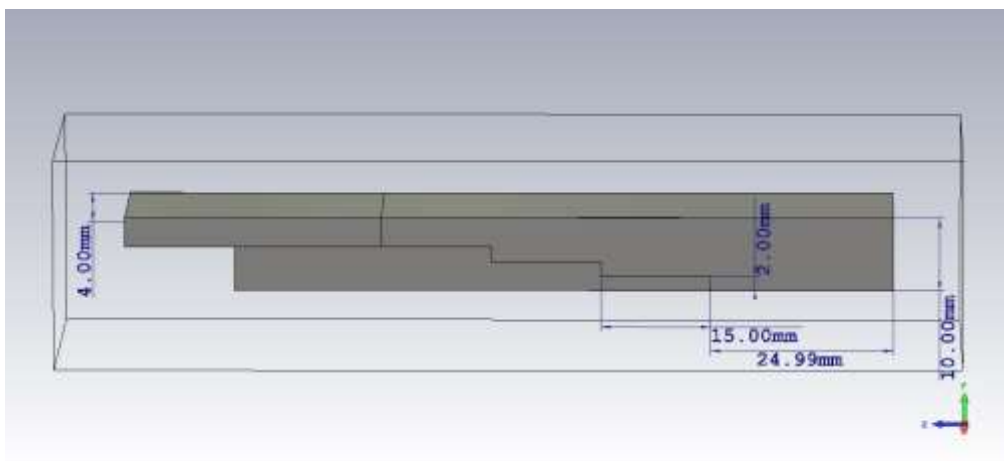
Příloha 15 Rozměry dvouprvkové řady s odbočkami s mikropáskovým napájením



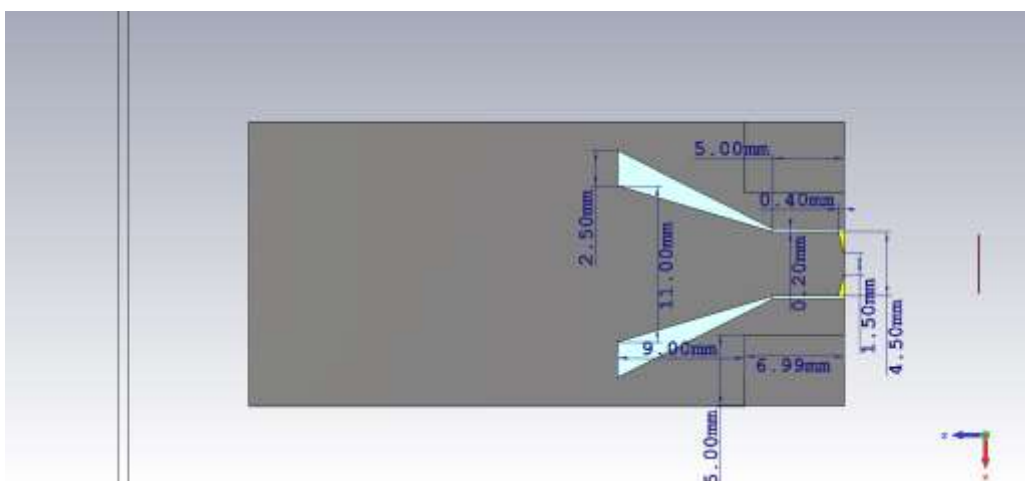
Příloha 16 Rozměry čtyřprvkové řady s odbočkami s mikropáskovým napájením



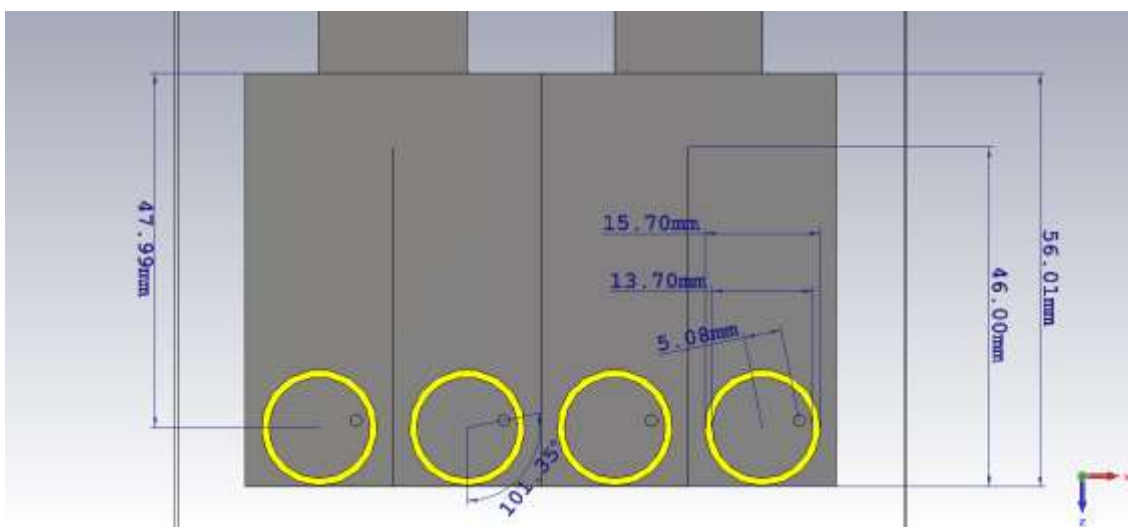
Příloha 17 Rozměry řady s postupným větvením s mikropáskovým napájením



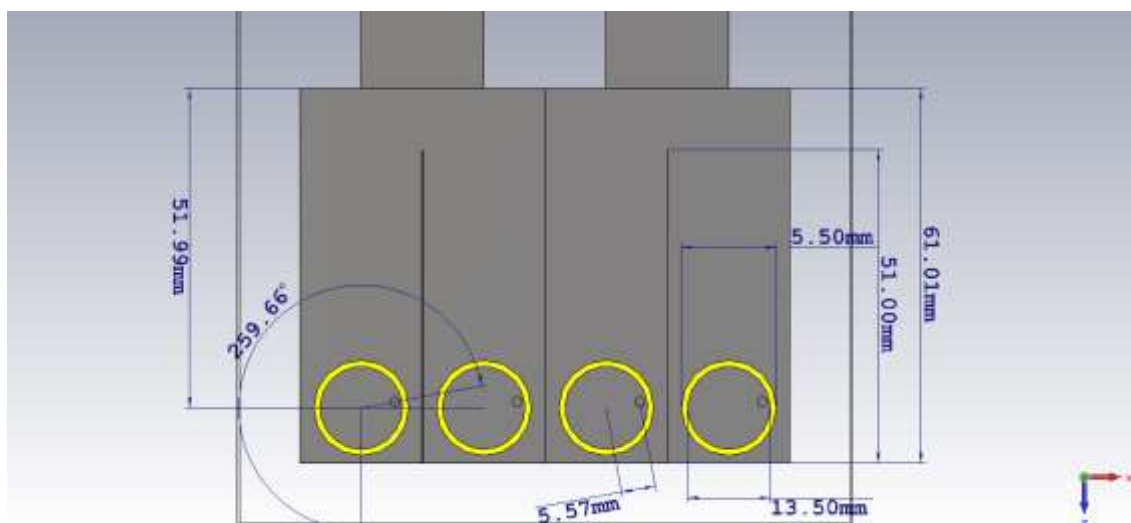
Příloha 18 Rozměry vlnovodové napájecí struktury



Příloha 19 Rozměry napájecí struktury se zemněným koplanárním vlnovodem



Příloha 20 Rozměry řady s napájením pomocí vlnovodu



Příloha 21 Rozměry řady napájené pomocí zemněného koplanárního vlnovodu