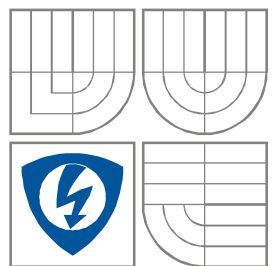


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

REKONFIGUROVATELNÁ ŠTĚRBINOVÁ ANTÉNNÍ ŘADA

RECONFIGURABLE SLOT ANTENNA ARRAY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

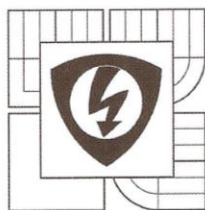
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Filip Weigel

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO, 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Filip Weigel

Ročník: 2

ID: 147000

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Rekonfigurovatelná štěrbinová anténní řada

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte jednoduchou anténní řadu lineárních štěrbinových zářičů. Jednotlivé štěrbyin budte vlnovodem integrovaným do 3D textilního materiálu. Vytvořte numerický model anténní řady a optimalizujte ji pro práci v UWB pásmu bandgroup 6 se středním kmitočtem 8 GHz.

Modifikujte napájecí SIW vlnovod tak, aby bylo možné vhodným spínáním PIN diod zaměřit vyzařování anténní řady do předem zvolených směrů. Zaměřování hlavního laloku optimalizujte pro použití uvnitř automobilu; anténa bude umístěna na vnitřním povrchu střechy a směr hlavního laloku bude zaměřován na sedadla cestujících. Funkčnost antény ověřte experimentem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

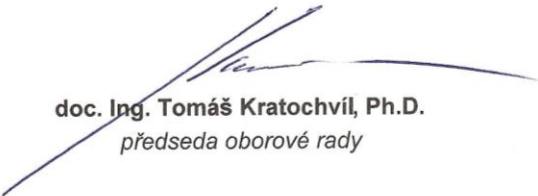
[2] LÁČÍK, J.; MIKULÁŠEK, T.; PUSKELY, J.; RAID, Z.; WOLANSKÝ, D. Compact arrays fed by substrate integrated waveguides, In Proceedings of ICEAA 2014, Aruba: Polytechnico di Torino, 2014, p. 448-451.

Termín zadání: 8. 2. 2016

Termín odevzdání: 19.5.2016

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Konzultanti 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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá základními principy fungování šěrbinových antén. Modely antén byly simulovány ve zvoleném elektromagnetickém simulátoru CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS). Je zde vytvořeno několik modelů šěrbinových antén, které jsou optimalizovány pro komunikaci v autě na frekvenci 8 GHz.

KLÍČOVÁ SLOVA

Šěrba, vlnovod, anténní řada, SMA konektor, koaxiální kabel, polarizace, elektromagnetický simulátor, mikropásek, zisk, CST MWS, SIW.

ABSTRACT

This master's thesis deals with the basic principles of slot antennas. Models of antennas were simulated in a selected electromagnetic simulator CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS). There are several models of slot antennas which are optimized for communication in the car at a frequency 8 GHz.

KEYWORDS

Slot, waveguide, antenna array, SMA connector, coaxial cable, polarization, electromagnetic simulator, microstrip, gain, CST MWS, SIW.

WEIGEL, F. *Rekonfigurovatelná štěrbinová anténní řada*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Rekonfigurovatelná štěrbínová anténní řada jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/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 diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

1	Vybrané modely štěrbinových antén a jejich simulace	2
1.1	Štěrbínová anténa s 1 příčnou štěrbinou	4
1.2	Štěrbínová anténní řada se 3 příčnými štěrbinami.....	6
1.3	Štěrbínová anténa s 1 podélnou štěrbinou	10
1.4	Štěrbínová anténní řada se 4 podélnými štěrbinami	13
1.5	Štěrbínová anténa s kruhovou polarizací	16
2	Porovnání struktur vyrobených na 3D textilu a se vzduchovým substrátem	20
3	Rekonfigurovatelná štěrbinová anténní řada	23
3.1	Změna směru vyzařování pomocí PIN diod	23
3.1.1	Vyzařování antény do levé poloviny vzhledem k napájení.....	23
3.1.2	Vyzařování antény do pravé poloviny vzhledem k napájení.....	25
3.2	Změna směru vyzařování pomocí anténní struktury složené ze dvou substrátových vrstev	27
4	Výroba antény a měření	30
4.1	Anténa se 4 podélnými štěrbinami a vzduchovým substrátem.....	30
4.1.1	Model v CST.....	30
4.1.2	Foto vyrobené antény.....	32
4.1.3	Porovnání měření S11 se simulací.....	33
4.2	Štěrbínová anténní řada tvořená dvěma vrstvami 3D textilu.....	34
4.2.1	Model v CST.....	34
4.2.2	Foto vyrobené antény.....	37
4.2.3	Porovnání měření S11 se simulací.....	38
4.2.4	Porovnání měření směrových charakteristik se simulací.....	40
5	Závěr	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Příklad štěrbinové antény s prokovy	3
Obrázek 2: Pohled shora na anténní strukturu s 1 příčnou štěrbinou.	4
Obrázek 3: Graf parametru S_{11} antény s 1 příčnou štěrbinou.....	5
Obrázek 4: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény s 1 příčnou štěrbinou.....	5
Obrázek 5: Polární grafy antény s 1 příčnou štěrbinou, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ.....	6
Obrázek 6: Pohled shora na anténní strukturu se 3 příčnými štěrbinami	6
Obrázek 7: Graf parametru S_{11} antény se 3 příčnými štěrbinami.....	8
Obrázek 8: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény se 3 příčnými štěrbinami.....	9
Obrázek 9: Polární grafy antény se 3 příčnými štěrbinami, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ.....	9
Obrázek 10: Pohled shora na anténní strukturu s 1 podélnou štěrbinou.....	10
Obrázek 11: Graf parametru S_{11} antény s 1 podélnou štěrbinou	11
Obrázek 12: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény s 1 podélnou štěrbinou	12
Obrázek 13: Polární grafy antény s 1 podélnou štěrbinou, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ.....	12
Obrázek 14: Pohled shora na anténní strukturu se 4 podélnými štěrbinami.....	13
Obrázek 15: Graf parametru S_{11} antény se 4 podélnými štěrbinami	14
Obrázek 16: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény se 4 podélnými štěrbinami	15
Obrázek 17: Polární grafy antény se 4 podélnými štěrbinami, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ.....	15
Obrázek 18: Pohled shora na anténní strukturu s kruhovou polarizací	16
Obrázek 19: Graf parametru S_{11} antény s kruhovou polarizací.....	17
Obrázek 20: Graf osového poměru antény s kruhovou polarizací.....	18
Obrázek 21: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény s kruhovou polarizací.....	18
Obrázek 22: Polární grafy antény s kruhovou polarizací, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ.....	19
Obrázek 23: Pohled shora na anténu se vzduchovým substrátem	20
Obrázek 24: Pohled shora na anténu se substrátem z 3D textilu	20
Obrázek 25: Graf parametru S_{11} antény se 4 podélnými štěrbinami, vlevo anténa se vzduchovým substrátem, vpravo výsledek po vložení 3D textilu	21
Obrázek 26: Graf parametru S_{11} antény se 4 podélnými štěrbinami, vlevo vyladěná	

anténa se vzduchovým substrátem, vpravo výsledek po vložení 3D textilu a vyladění na 8 GHz	21
Obrázek 27: Pohled shora na anténu s překrytými štěrbinami	23
Obrázek 28: Graf průběhu S11 antény s PIN diodami	23
Obrázek 29: Graf 3D vyzařovací charakteristiky antény s PIN diodami	24
Obrázek 30: Polární grafy směrových charakteristik, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ.....	24
Obrázek 31: Pohled shora na anténu s překrytými štěrbinami	25
Obrázek 32: Graf průběhu S11 antény s PIN diodami	25
Obrázek 33: Graf 3D vyzařovací charakteristiky antény s PIN diodami	26
Obrázek 34: Polární grafy směrových charakteristik, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ.....	26
Obrázek 35: Motiv antény složené ze dvou vrstev	27
Obrázek 36: Prostřední stěna antény složené ze dvou vrstev	28
Obrázek 37: Spodní strana antény složené ze dvou vrstev	28
Obrázek 38: Polární grafy směrových charakteristik, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ, port 1	29
Obrázek 39: Polární grafy směrových charakteristik, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ, port 2	29
Obrázek 40: Model antény se 4 podélnými štěrbinami včetně napájení pomocí mikropásku.....	30
Obrázek 41: Detail SMA konektoru a napájecího mikropásku	31
Obrázek 42: Horní strana vyrobené antény	32
Obrázek 43: Spodní strana vyrobené antény	32
Obrázek 44: Porovnání S11 z měření a ze simulace v CST	33
Obrázek 45: Model antény vyrobené ze 3D textilu včetně napájecího vlnovodu	34
Obrázek 46: Prostřední stěna antény včetně vazebních štěrbin	35
Obrázek 47: Spodní strana antény vyrobené z textilu	35
Obrázek 48: Horní strana vyrobené antény	37
Obrázek 49: Spodní strana vyrobené antény	37
Obrázek 50: Detail napájení GCPW vyrobené antény	38
Obrázek 51: Porovnání S11 z měření a ze simulace v CST pro port 1.....	38
Obrázek 52: Porovnání S11 z měření a ze simulace v CST pro port 2.....	39
Obrázek 53: Polární grafy směrových charakteristik dvouvrstvé antény, rovina XZ, port 1	40
Obrázek 54: Polární grafy směrových charakteristik dvouvrstvé antény, rovina YZ,	

port 1	40
Obrázek 55: Polární grafy směrových charakteristik dvouvrstvé antény, rovina XZ, port 2	41
Obrázek 56: Polární grafy směrových charakteristik dvouvrstvé antény, rovina YZ, port 2	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Názvy a hodnoty parametrů antény s 1 příčnou štěrbinou	4
Tabulka 2: Názvy a hodnoty parametrů antény se 3 příčnými štěrbinami	7
Tabulka 3: Názvy a hodnoty parametrů antény s 1 podélnou štěrbinou.....	10
Tabulka 4: Názvy a hodnoty parametrů antény se 4 podélnými štěrbinami.....	13
Tabulka 5: Názvy a hodnoty parametrů antény s kruhovou polarizací	16
Tabulka 6: Tabulka parametrů antény pro porovnání vzduchového substrátu a 3D textilu	22
Tabulka 7: Tabulka parametrů vyrobené antény	30
Tabulka 8: Tabulka parametrů antény vyrobené z 3D textilu	36

ÚVOD

Tato práce spadá do problematiky návrhu a simulace anténních struktur. Cílem je seznámit se s principy fungování šterbinových antén a řad. Úkolem bylo navrhnout šterbinovou anténní řadu, která bude napájena vlnovodem integrovaným do substrátu (struktura SIW). Tyto antény by po řádné optimalizaci měly být použity pro komunikaci uvnitř osobního automobilu na frekvenci 8 GHz. Dalším úkolem bylo vybrat některé z navržených antén, vhodně ji optimalizovat, upravit, vyrobit a změřit za pomoci analyzátoru, aby bylo možné prokázat správnost výpočtů a shodu mezi měřením a simulací.

V 1. kapitole jsou prezentovány vybrané modely šterbinových antén a šterbinových anténních řad včetně jejich parametrů. Návrh a simulace probíhaly v programu CST Microwave Studio. Každá anténa je přizpůsobena na frekvenci 8 GHz a má různou šířku pásma. Je zde zobrazen anténní motiv každé antény, všechny důležité rozměry a parametry antény jsou zpracovány v přehledných tabulkách. Dále jsou zde zobrazeny grafy parametru S_{11} ze simulace, 3D grafy vyzařovací charakteristiky jednotlivých druhů antén a také polární grafy vyzařovacích charakteristik ve 2 rovinách.

Ve 2. kapitole jsou srovnány výsledky ze simulace, pokud je anténa vytvořena na vzduchovém substrátu nebo na 3D textilu. Jsou zde vysvětleny příčiny rozdílů ve výsledcích simulace a následně jsou prezentovány výsledky antény s 3D textilem po vyladění na frekvenci 8 GHz. Poté jsou v tabulce porovnány změny rozměrů obou typů vyladěných antén.

3. kapitola se zabývá rekonfigurovatelnou šterbinou anténní řadou. Tímto pojmem je myšlena změna směrové vyzařovací charakteristiky, která se v anglické literatuře označuje termínem beamforming. Jsou zde uvedené dva způsoby, kterými lze rekonfigurovatelnosti dosáhnout. Varianta antény, která ke změně směrových charakteristik využívá PIN diody, je prozkoumána jen v rámci simulace. Naopak anténa vytvořená ze dvou vrstev textilu byla experimentálně vyrobena, došlo k měření činitele odrazu S_{11} a směrových vyzařovacích charakteristik v bezodrazové komoře a následně byly porovnány vzniklé rozdíly.

4. kapitola se věnuje výrobě antény a následnému měření. Jsou zde detailně zobrazeny anténní struktury včetně napájecího vedení, postupy při návrhu a výrobě. Je zde také několik fotografií vyrobených antén a společný graf parametru S_{11} ze simulace a z naměřených dat. Pro anténu vyrobenou ze dvou vrstev textilu byly také změřeny směrové vyzařovací charakteristiky, které jsou zobrazeny do společných polárních grafů se simulací, aby bylo možné porovnat rozdíly.

1 VYBRANÉ MODELY ŠTĚRBINOVÝCH ANTÉN A JEJICH SIMULACE

Štěrbínové antény jsou v dnešní době využívány hlavně pro svou jednoduchost, přijatelné rozměry a tvary a v neposlední řadě snadnou výrobu. Základ tvoří většinou vlnovod, ve kterém je vzduch nebo může být vložen určitý substrát pro zmenšení rozměrů antény. Vlnovod může být vytvořen i jako SIW struktura (substrate integrated waveguide), kdy horní a spodní stěna vlnovodu je tvořena kovovou deskou a boční stěny tvoří prokovy.

V horní stěně takového vlnovodu jsou vytvořené různé tvary štěrbin, které tvoří anténní motiv. Štěrbina může být jen jedna nebo jich může být více pro zvýšení zisku antény a zlepšení směrových charakteristik, což je základ pro štěrbinovou anténní řadu. Štěrbiny mohou být úzké obdélníkové, prstencové bez zkratu nebo se zkratem, kruhové nebo obdélníkové ve tvaru mezikruží, štěrbin ve tvaru kříže. Podle typu štěrbin se může vybudit jen jedna složka elektrického pole a anténa poté podle toho bude mít lineární nebo kruhovou polarizaci.

Vlnovod může být napájen např. koaxiálním kabelem, kdy je nutné řešit buď přechod z koaxiálního kabelu na vlnovod, nebo napájení pomocí mikropásku, ke kterému je možné připojit SMA konektor. Vyzařování štěrbinové antény způsobují proudy, které tečou v okolí štěrbin. Díky tomu se vyzařování štěrbin také často přirovnává k vyzařování symetrického dipólu.

V této diplomové práci jsou vytvořeny modely antén, které jako substrát využívají vzduch nebo 3D textilní materiál. Tento 3D textil je možné použít na vnitřní stranu střechy auta a takto vytvořenou anténu používat pro komunikaci uvnitř auta. Úplně přesné vlastnosti 3D textilu nejsou známy, a proto probíhají různé testy a měření, jestli je tento materiál vhodný použít jako substrát pro výrobu antén. Hlavními parametry textilu je výška $h = 4$ mm (platí pro nedeformovaný tvar), relativní permitivita $\epsilon_r = 1,4$ a ztrátový činitel $\tan \delta = 0,0015$ na frekvenci 60 GHz.

Při návrhu vlnovodů pro jednotlivé druhy antén bylo nutné nejdříve vypočítat mezní kmitočet použitého vlnovodu, aby bylo zajištěno, že vlnovod vede elektromagnetické vlnění o dané frekvenci 8 GHz. Mezní frekvence vlnovodu lze vypočítat podle vztahu převzatého z [7]:

$$f_m = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

, kde c je rychlost světla v dielektriku uvnitř vlnovodu

a, b jsou po řadě velikosti stran průřezu vlnovodu

m, n pak pořadová (celá) čísla šířeného vidu.

Z toho vyplývá, že pro použité vlnovody o šířce 20 a 30 mm a vid TE₁₀ jsou mezní kmitočty rovny:

$$a = 20 \text{ mm} \Rightarrow f_m = 6,34 \text{ GHz}$$

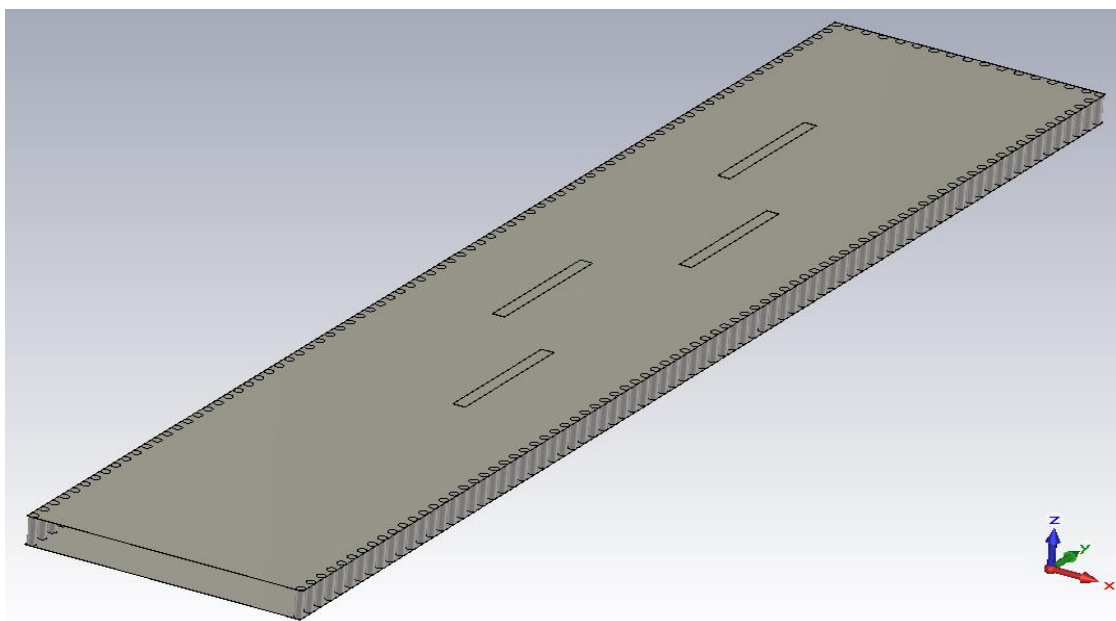
$$a = 30 \text{ mm} \Rightarrow f_m = 4,23 \text{ GHz}$$

Dále je možné vypočítat délku vlny ve vlnovodu podle vzorce převzatého z [7]:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}}$$

, kde f je frekvence vlny ve vlnovodu a f_m je mezní frekvence daného vidu

Z uvedeného vzorce pro délku vlny ve vlnovodu vyplývá, že pokud je frekvence vedená vlnovodem (f) blízká mezní frekvenci (f_m), délka vlny ve vlnovodu (λ_g) je daleko větší než délka vlny ve volném prostředí (λ_0). Čím více se frekvence vedená vlnovodem zvyšuje a oddaluje od mezní frekvence, tím více se vlnová délka vedené vlny přibližuje vlnové délce ve volném prostředí.



Obrázek 1: Příklad štěrbinové antény s prokvy

Na obrázku 1 je uveden příklad štěrbinové antény, jejíž základ tvoří vlnovod integrovaný do substrátu (SIW struktura).

1.1 Štěrbínová anténa s 1 příčnou štěrbinou



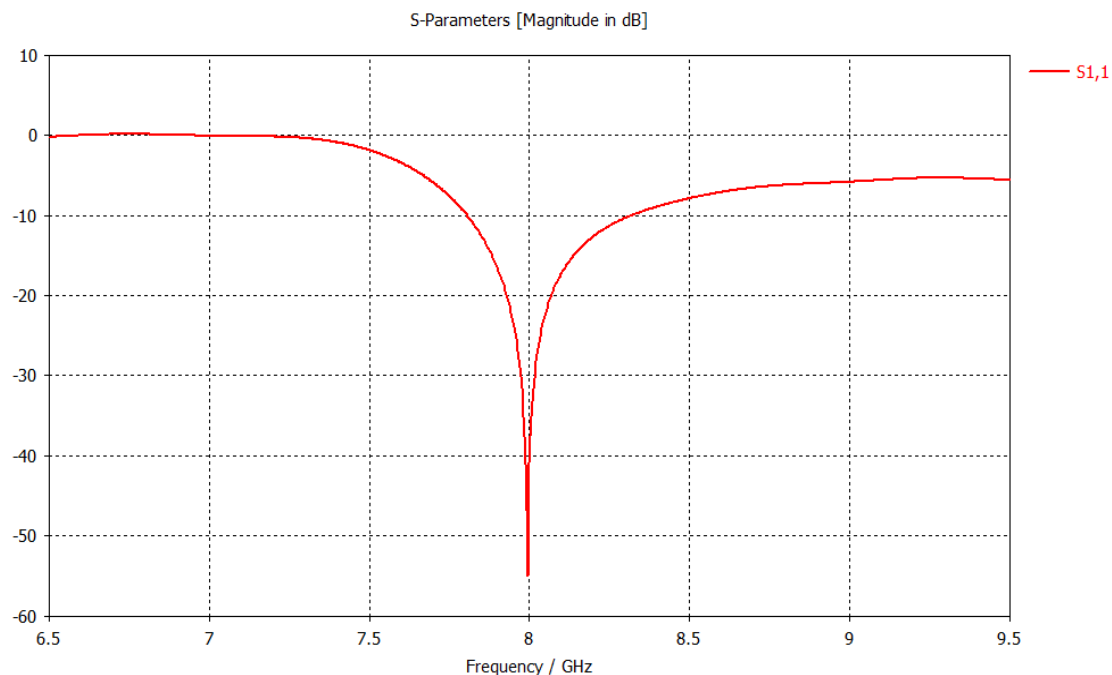
Obrázek 2: Pohled shora na anténní strukturu s 1 příčnou štěrbinou.

Na obrázku 2 je pohled na anténní strukturu s 1 příčnou štěrbinou o rozměrech 16,06 x 2,689 mm. Základ tvoří SIW vlnovod s horní a spodní celistvou deskou a prokovy nahrazující boční stěny. Štěrbina je umístěna souměrně podle osy antény ve vzdálenosti 14,249 mm od konce vlnovodu.

Tabulka 1: Názvy a hodnoty parametrů antény s 1 příčnou štěrbinou

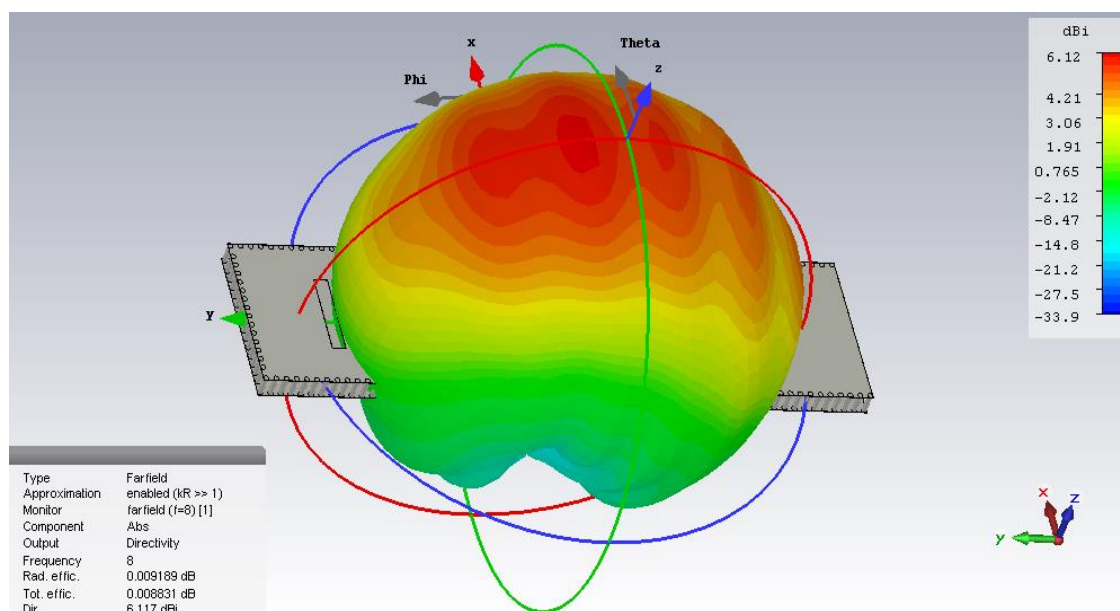
<u>Název parametru</u>	<u>Popis parametru</u>	<u>Hodnota parametru [mm]</u>
W	Šířka anténní struktury	30
Mt	Tloušťka pokovení	0.036
H	Vzdálenost horní a spodní desky (výška substrátu)	4
L	Délka anténní struktury	120
Xst	Délka štěrbiny	16.06
Vzdst	Vzdálenost štěrbiny od konce vlnovodu	14.249
Yst	Šířka štěrbiny	2.689
Rprokov	Poloměr prokovů	0.5
Mezera	Vzdálenost středů prokovů	2

V tabulce 1 jsou všechny důležité parametry antény s 1 příčnou štěrbinou. Poloměr prokovů je 0,5 mm a jsou od sebe vzdáleny 2 mm. Délka této antény je 120 mm.



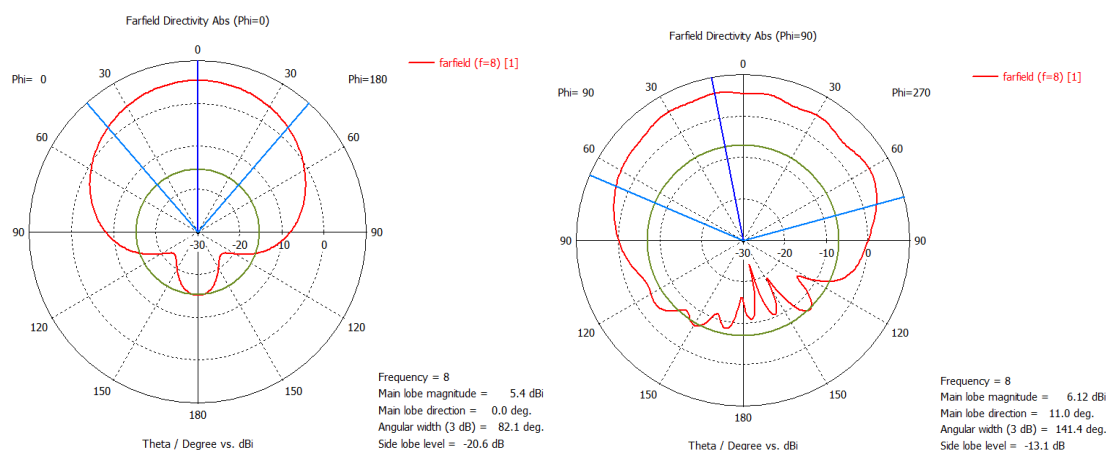
Obrázek 3: Graf parametru S_{11} antény s 1 příčnou šěrbinou

Na obrázku 3 je zobrazen graf parametru S_{11} antény s 1 příčnou šěrbinou. Anténa je vyladěná na frekvenci 8 GHz, kde je hodnota S_{11} kolem -55 dB. Parametr S_{11} je menší než -10 dB v rozmezí 7,80 – 8,32 GHz, což znamená šířku pásma 520 MHz.



Obrázek 4: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény s 1 příčnou šěrbinou

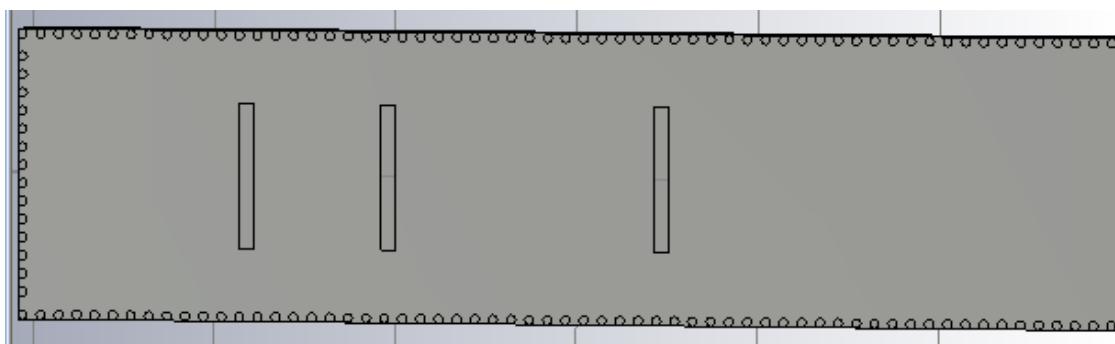
Na obrázku 4 je zobrazen 3D graf vyzařovací charakteristiky antény s 1 příčnou štěrbinou převzatý ze simulace v CST. Anténa vyzařuje směrem kolmo na horní desku vlnovodu. Hodnota vyzařování v hlavním laloku je 6,12 dBi.



Obrázek 5: Polární grafy antény s 1 příčnou štěrbinou, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ

Na obrázku 5 jsou zobrazeny 2 polární grafy ze simulace CST. Jedná se o grafy ve dvou rovinách. V 1. polárním grafu se jedná o rovinu XY, 2. polární graf zobrazuje situaci v rovině YZ. Orientace os X, Y a Z lze zjistit ve 3D grafu vyzařovací charakteristiky.

1.2 Štěrbinová anténní řada se 3 příčnými štěrbinami



Obrázek 6: Pohled shora na anténní strukturu se 3 příčnými štěrbinami

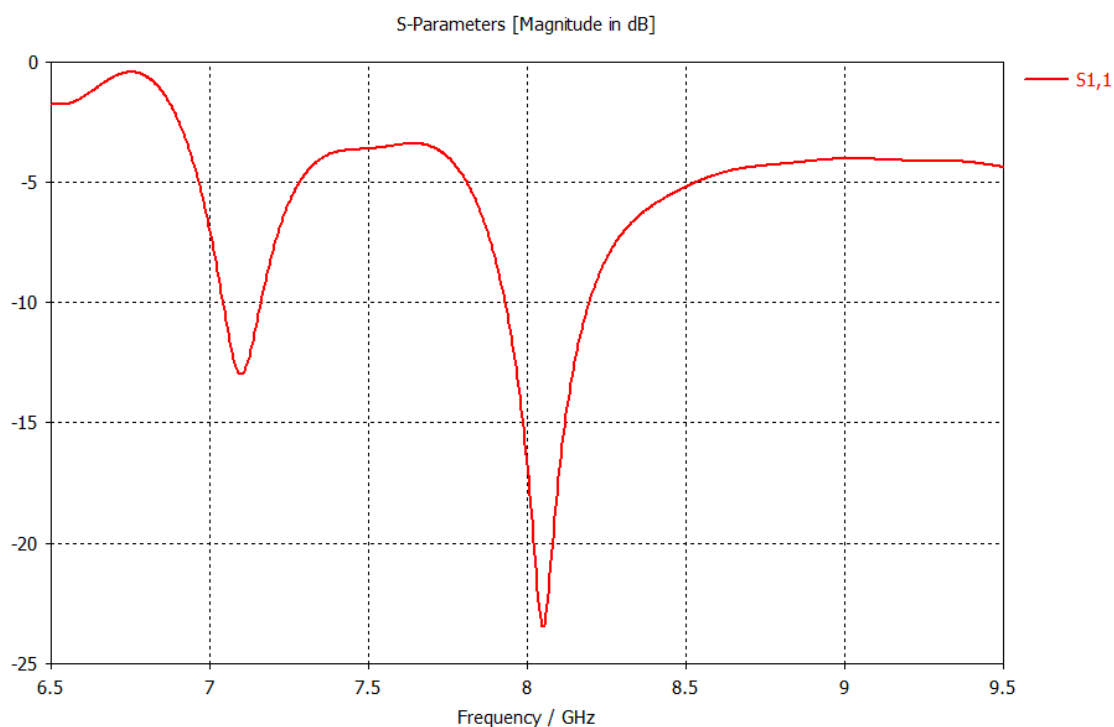
Na obrázku 6 je pohled na anténní strukturu se 3 příčnými štěrbinami, každá má shodné rozměry 15,961 x 1,617 mm. Základ tvoří SIW vlnovod s horní a spodní celistvou deskou a prokovy nahrazující boční stěny. Štěrbiny jsou umístěny v různých

vzdálenostech od sebe i od konce vlnovodu. Původně byla anténa tvořena 4 příčnými štěrbinami, které byly vhodně od sebe vzdáleny. Výsledky simulací ale naznačovaly, že štěrbinu nejsou správně sfázované. 4 štěrbinu už jsou příliš mnoho pro ruční sfázování. Tento postup byl úspěšný pro maximálně 2 štěrbinu. Anténa se 3 štěrbinami je sice ještě vhodně přizpůsobena, ale vyzářovací diagram napovídá, že anténa není vhodná na použití pro komunikaci v autě.

Tabulka 2: Názvy a hodnoty parametrů antény se 3 příčnými štěrbinami

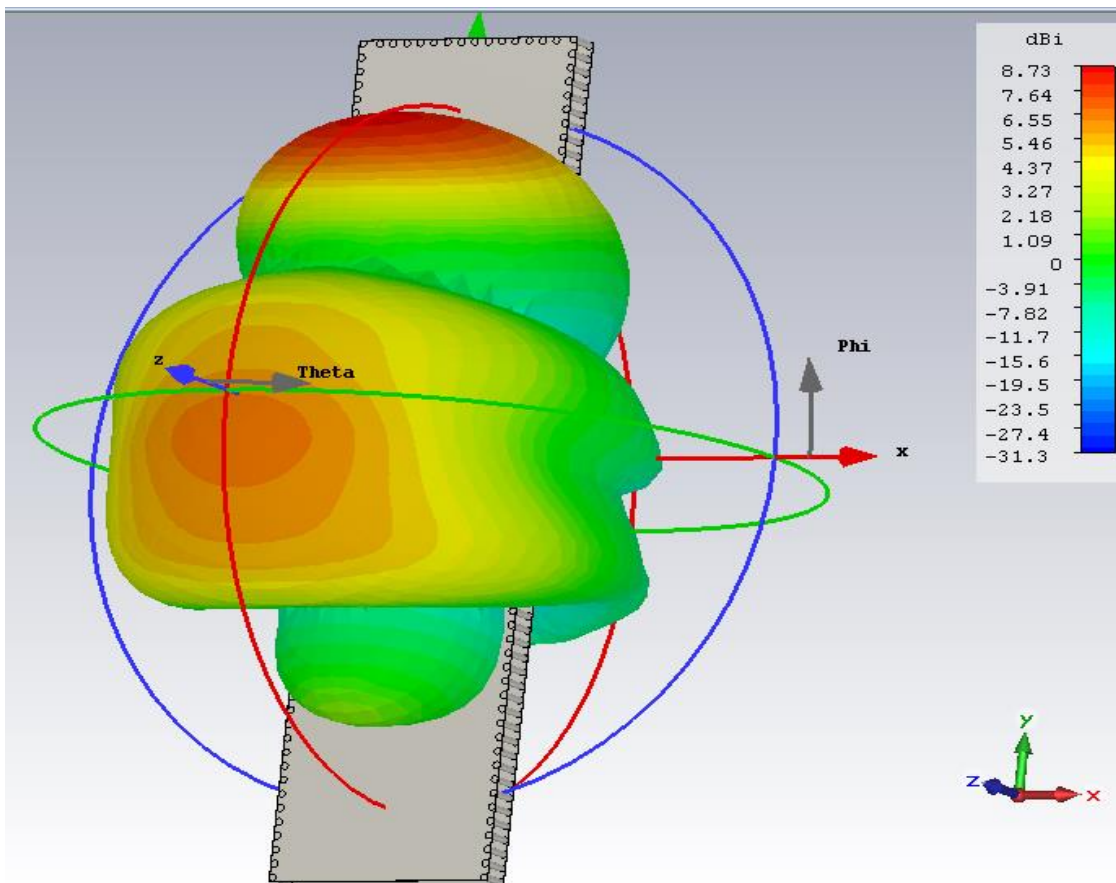
<u>Název parametru</u>	<u>Popis parametru</u>	<u>Hodnota parametru [mm]</u>
W	Šířka anténní struktury	30
Mt	Tloušťka pokovení	0.036
H	Vzdálenost horní a spodní desky (výška substrátu)	4
L	Délka anténní struktury	120
Xst	Délka štěrbinu	15.961
Vzdst	Vzdálenost 1. štěrbinu od konce vlnovodu	23.404
Vzdst2	Vzdálenost 2. štěrbinu od konce vlnovodu	39.138
Vzdst3	Vzdálenost 3. štěrbinu od konce vlnovodu	69.214
Yst	Šířka štěrbinu	1.617
Rprokov	Poloměr prokovů	0.5
Mezera	Vzdálenost středů prokovů	2

V tabulce 2 jsou všechny důležité parametry antény se 3 příčnými štěrbinami. Poloměr prokovů je opět 0,5 mm a jsou od sebe vzdáleny 2 mm. Délka této antény je také 120 mm.



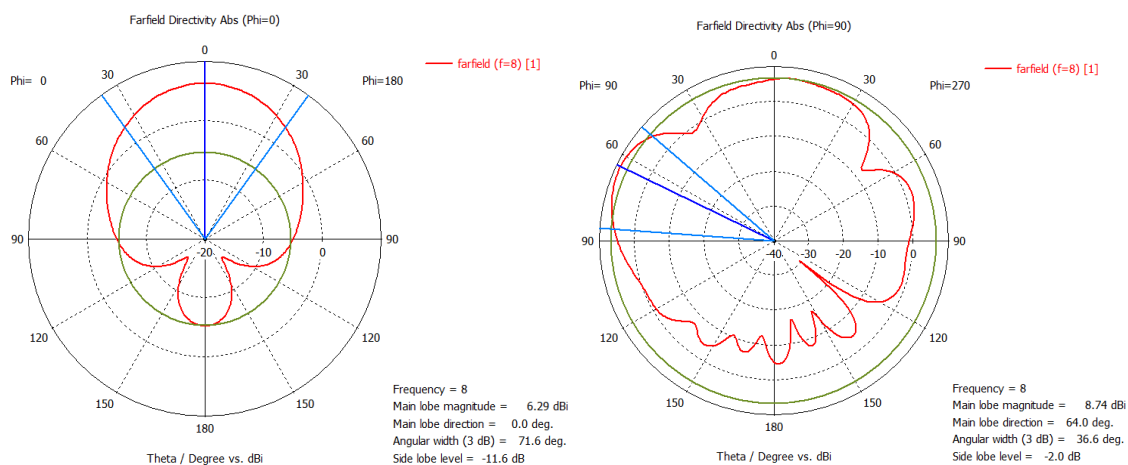
Obrázek 7: Graf parametru S₁₁ antény se 3 příčnými štěrbinami.

Na obrázku 7 je zobrazen graf parametru S₁₁ antény se 3 příčnými štěrbinami. Anténa je vyladěná na frekvenci 8,05 GHz, kde je hodnota parametru S₁₁ kolem -23 dB. Parametr S₁₁ je menší než -10 dB v rozmezí 7,92 – 8,2 GHz, což znamená šířku pásma 280 MHz. S₁₁ je menší než -10 dB ještě v rozmezí 7,04 – 7,16 GHz.



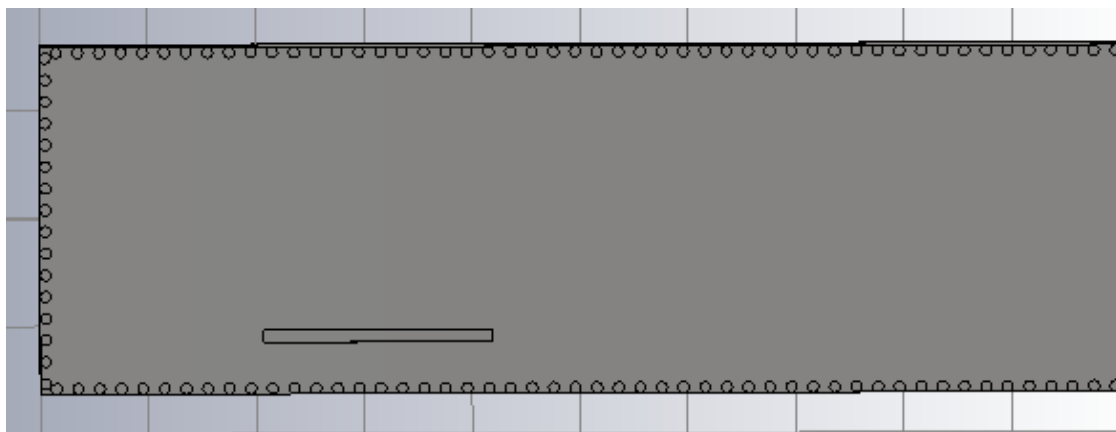
Obrázek 8: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény se 3 příčnými štěrbinami

Na obrázku 8 je znázorněn 3D graf vyzařovací charakteristiky antény se 3 příčnými štěrbinami. Anténa vyzařuje do 2 různých míst, takže není úplně vhodná pro použití pro komunikaci v automobilu. Hodnota vyzařování hlavního laloku je 8,73 dBi.



Obrázek 9: Polární grafy antény se 3 příčnými štěrbinami, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ

1.3 Štěrbínová anténa s 1 podélnou štěrbinou



Obrázek 10: Pohled shora na anténní strukturu s 1 podélnou štěrbinou

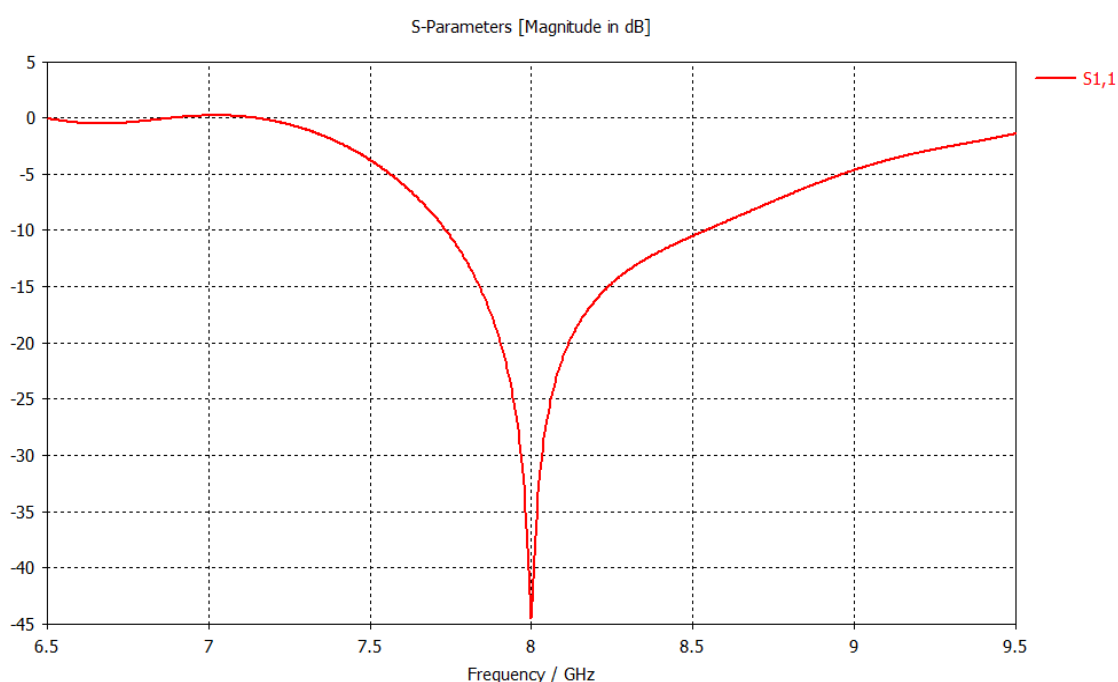
Na obrázku 10 je pohled na anténní strukturu s 1 podélnou štěrbinou, která má rozměry 21,146 x 1,122 mm. Základ tvoří SIW vlnovod s horní a spodní celistvou deskou a prokovy nahrazující boční stěny. Štěrbina je vhodně vyosená tak, aby díky vhodnému rozložení elektrického pole vyzařovala elektromagnetickou vlnu. Štěrbina je vzdálena 20,657 mm od konce vlnovodu.

Tabulka 3: Názvy a hodnoty parametrů antény s 1 podélnou štěrbinou

<u>Název parametru</u>	<u>Popis parametru</u>	<u>Hodnota parametru [mm]</u>
W	Šířka anténní struktury	30
Mt	Tloušťka pokovení	0.036
H	Vzdálenost horní a spodní desky (výška substrátu)	4
L	Délka anténní struktury	100
Yst	Délka štěrbiny	21.146
Vzdst	Vzdálenost štěrbiny od konce vlnovodu	20.657
Xst	Šířka štěrbiny	1.122
Rprokov	Poloměr prokovů	0.5

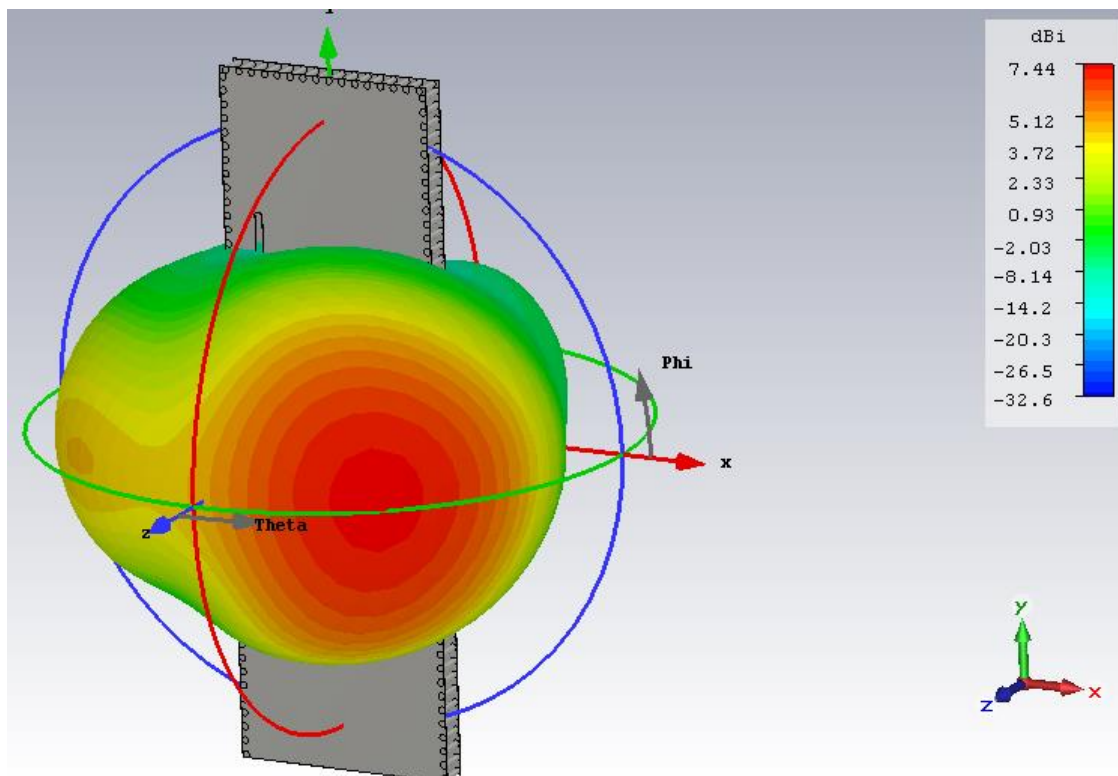
Mezera	Vzdálenost středů proků	2
Vyosení	Vzdálenost štěrbin od osy Y (míra vyosení)	10.674

V tabulce 3 jsou všechny důležité parametry antény s 1 podélnou štěrbinou. Poloměr proků je opět 0,5 mm a jsou od sebe vzdáleny 2 mm. Délka této antény je 100 mm. Novým parametrem je vyosení, které udává vzdálenost štěrbin od osy Y.



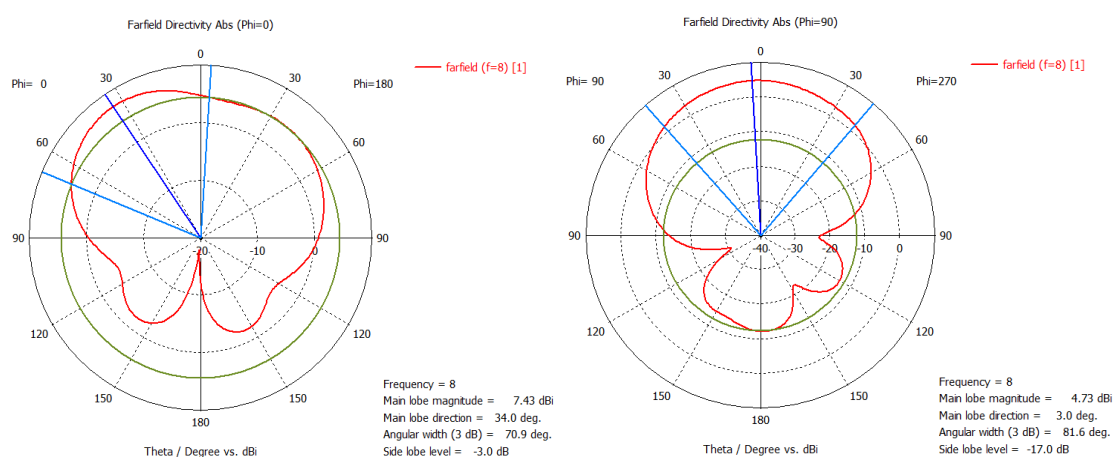
Obrázek 11: Graf parametru S11 antény s 1 podélnou štěrbinou

Na obrázku 11 je zobrazen graf parametru S11 antény s 1 podélnou štěrbinou. Anténa je vyladěná na centrální frekvenci 8 GHz, kde je hodnota parametru S11 kolem -45 dB. Parametr S11 je menší než -10 dB v rozmezí 7,7 – 8,48 GHz, což znamená šířku pásma 780 MHz.



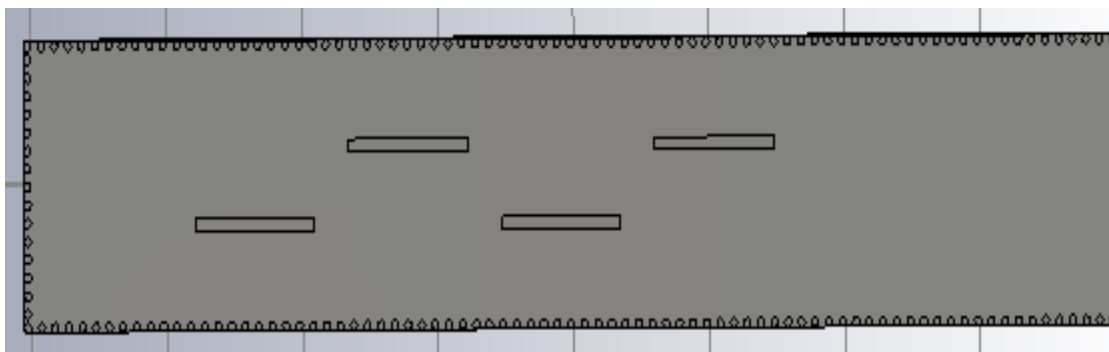
Obrázek 12: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény s 1 podélnou šěrbinou

Na obrázku 12 je znázorněn 3D graf vyzařovací charakteristiky antény s 1 podélnou šěrbinou. Anténa díky vyosení šěrbiny vyzařuje ve směru osy X. Hodnota vyzařování hlavního laloku je 7,44 dBi.



Obrázek 13: Polární grafy antény s 1 podélnou šěrbinou, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ

1.4 Štěrbínová anténní řada se 4 podélnými štěrbinami



Obrázek 14: Pohled shora na anténní strukturu se 4 podélnými štěrbinami

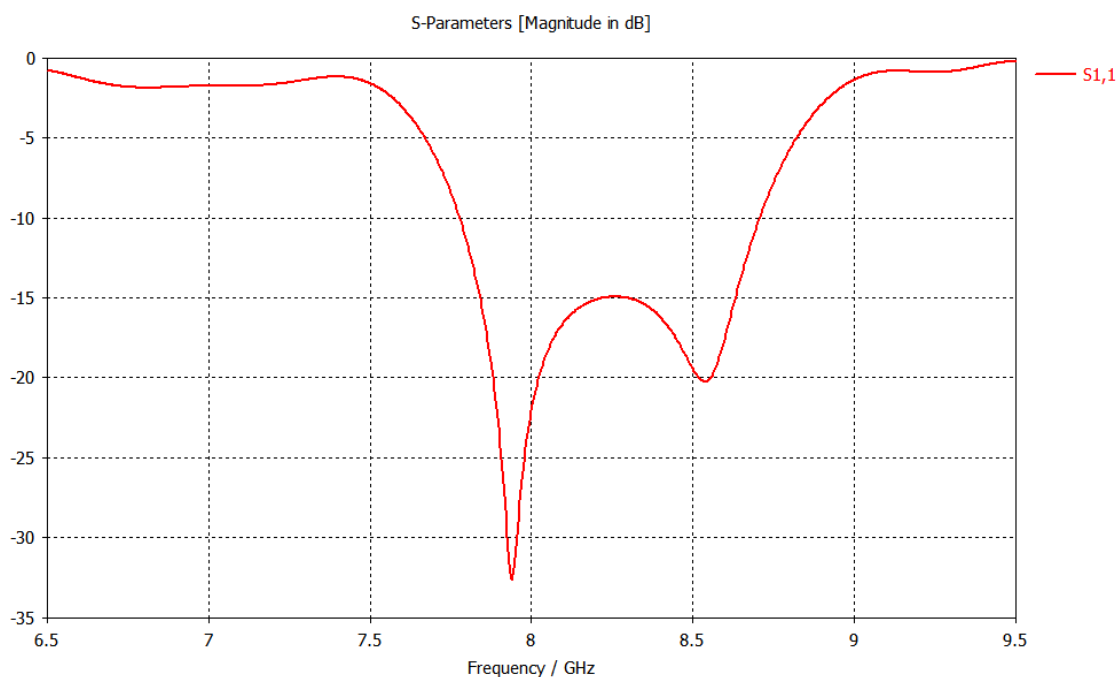
Na obrázku 14 je pohled na anténní strukturu s 4 podélnými štěrbinami, které mají společné rozměry 17,567 x 1,428 mm. Základ tvoří SIW vlnovod s horní a spodní celistvou deskou a prokovy nahrazující boční stěny. Všechny 4 štěrbiny je vhodně vyosené o stejnou vzdálenost tak, aby díky vhodnému rozložení elektrického pole vyzařovaly elektromagnetickou vlnu. 1. štěrbina je vzdálena 24,137 mm od konce vlnovodu a ostatní jsou vzdáleny tak, aby byly ve společné fázi s 1. štěrbinou. Tento typ antény byl vybrán k výrobě a měření, které bylo možné provést po návrhu vhodného napájení.

Tabulka 4: Názvy a hodnoty parametrů antény se 4 podélnými štěrbinami

<u>Název parametru</u>	<u>Popis parametru</u>	<u>Hodnota parametru [mm]</u>
W	Šířka anténní struktury	30
Mt	Tloušťka pokovení	0.036
H	Vzdálenost horní a spodní desky (výška substrátu)	4
L	Délka anténní struktury	160
Yst	Délka štěrbin	17.567
Vzdst	Vzdálenost 1. štěrbin od konce vlnovodu	24.137
Vzdst2	Vzdálenost 2. štěrbin od konce vlnovodu	46.746
Vzdst3	Vzdálenost 3. štěrbin od konce vlnovodu	69.32

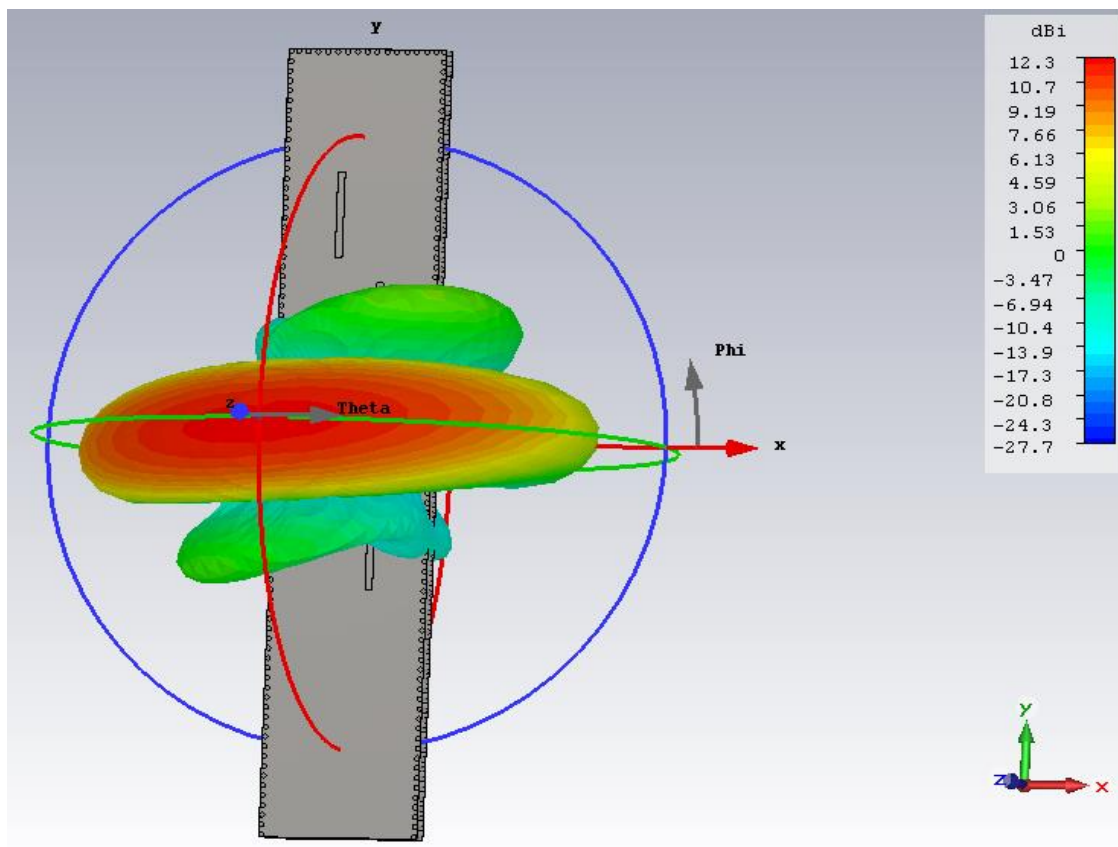
Vzdst4	Vzdálenost 4. šterbiny od konce vlnovodu	91.92
Xst	Šírka šterbiny	1.428
Rprokov	Poloměr prokovů	0.5
Mezera	Vzdálenost středů prokovů	2
Vyoseni	Vzdálenost šterbin od osy Y (míra vyosení)	4.34

V tabulce 4 jsou všechny důležité parametry antény se 4 podélnými šterbinami. Poloměr prokovů je 0,5 mm a jsou od sebe vzdáleny 2 mm. Délka této antény je 160 mm, aby bylo možné sfázovat všechny 4 šterbiny. Společným parametrem pro všechny šterbiny je vyosení, který udává vzdálenost šterbin od osy Y.



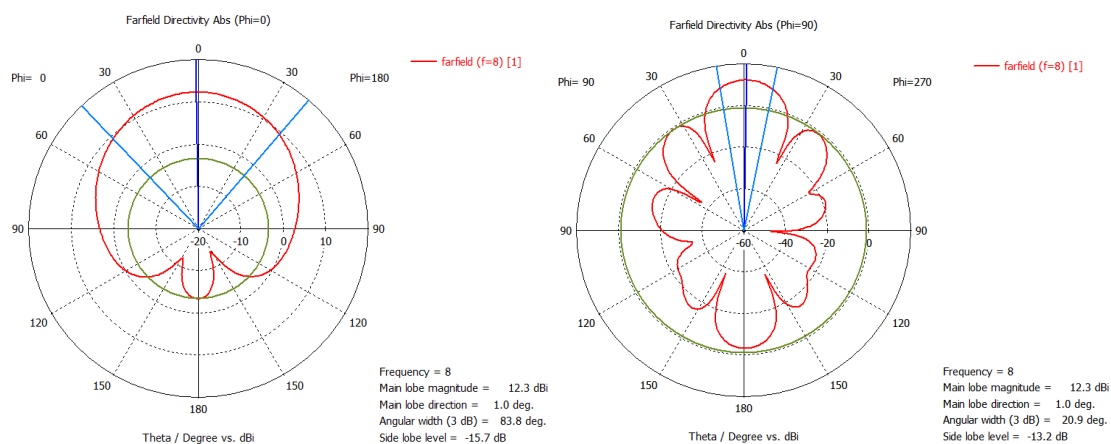
Obrázek 15: Graf parametru S11 antény se 4 podélnými šterbinami

Na obrázku 15 je zobrazen graf parametru S11 antény se 4 podélnými šterbinami. Anténa je vyladěná na centrální frekvenci 7,94 GHz, kde je hodnota parametru S11 kolem -32 dB. Parametr S11 je menší než -10 dB v rozmezí 7,77 – 8,72 GHz, což znamená šířku pásma 950 MHz.



Obrázek 16: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény se 4 podélnými šěrbinami

Na obrázku 16 je znázorněn 3D graf vyzařovací charakteristiky antény se 4 podélnými šěrbinami. Anténa díky 4 sfázovaným šěrbinám vyzařuje úzký svazek ve směru osy Z kolmý na horní desku vlnovodu. Hodnota vyzařování hlavního laloku je 12,3 dBi.



Obrázek 17: Polární grafy antény se 4 podélnými šěrbinami, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ

1.5 Štěrbínová anténa s kruhovou polarizací



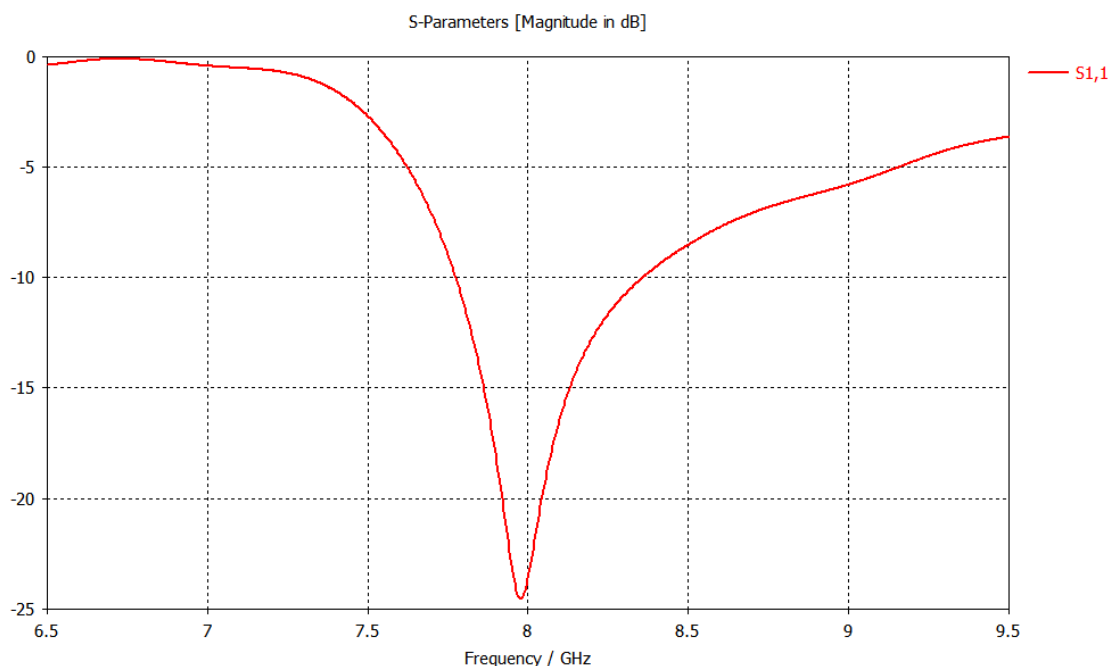
Obrázek 18: Pohled shora na anténní strukturu s kruhovou polarizací

Na obrázku 18 je pohled na anténu, která vyzařuje kruhově polarizovanou vlnu. Základ tvoří SIW vlnovod s horní a spodní celistvou deskou a prokovy nahrazující boční stěny. Anténní motiv tvoří kruhová štěrbina ve tvaru mezikruží. Vnější poloměr mezikruží je 6,866 mm a vnitřní poloměr tohoto mezikruží je 6,356 mm. Střed štěrbiny je vzdálen 1,24 mm od osy Y a 17,425 mm od konce vlnovodu.

Tabulka 5: Názvy a hodnoty parametrů antény s kruhovou polarizací

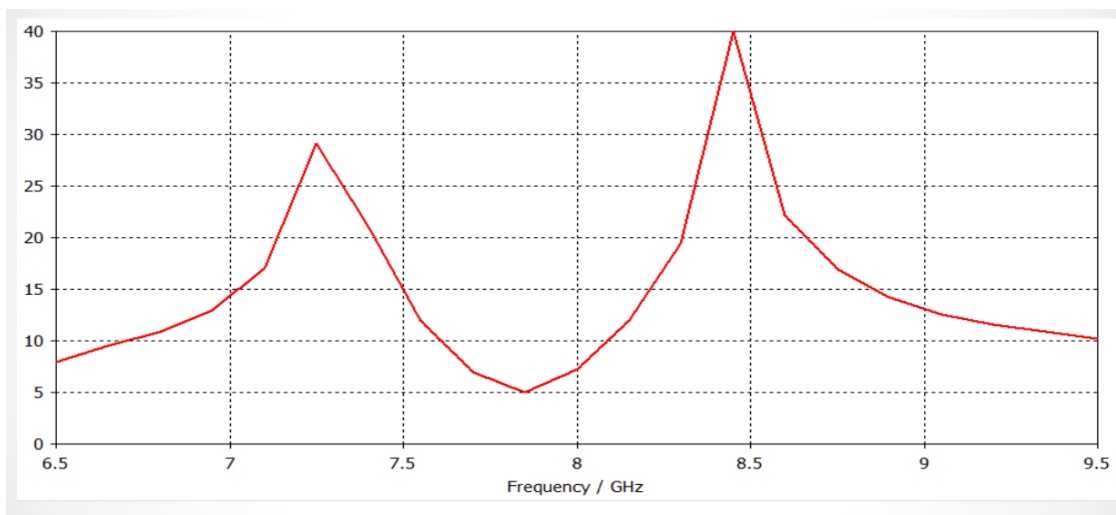
<u>Název parametru</u>	<u>Popis parametru</u>	<u>Hodnota parametru [mm]</u>
W	Šířka anténní struktury	30
Mt	Tloušťka pokovení	0.036
H	Vzdálenost horní a spodní desky (výška substrátu)	4
L	Délka anténní struktury	120
VzdX	Vzdálenost středu anténního motivu od osy Y	1.24
VzdY	Vzdálenost středu anténního motivu od konce vlnovodu	17.425
R1	Vnější poloměr štěrbiny	6.866
R2	Vnitřní poloměr štěrbiny	6.356
Rprokov	Poloměr prokovů	0.5
Mezera	Vzdálenost středů prokovů	2

V tabulce 5 jsou všechny hlavní parametry antény s kruhovou polarizací. Poloměr prokovů je 0,5 mm a jsou od sebe vzdáleny 2 mm. Délka této antény je 120 mm. Vnější poloměr mezikruží, které tvoří štěrbinu, je 6,866 mm a vnitřní poloměr tohoto mezikruží je 6,356 mm.



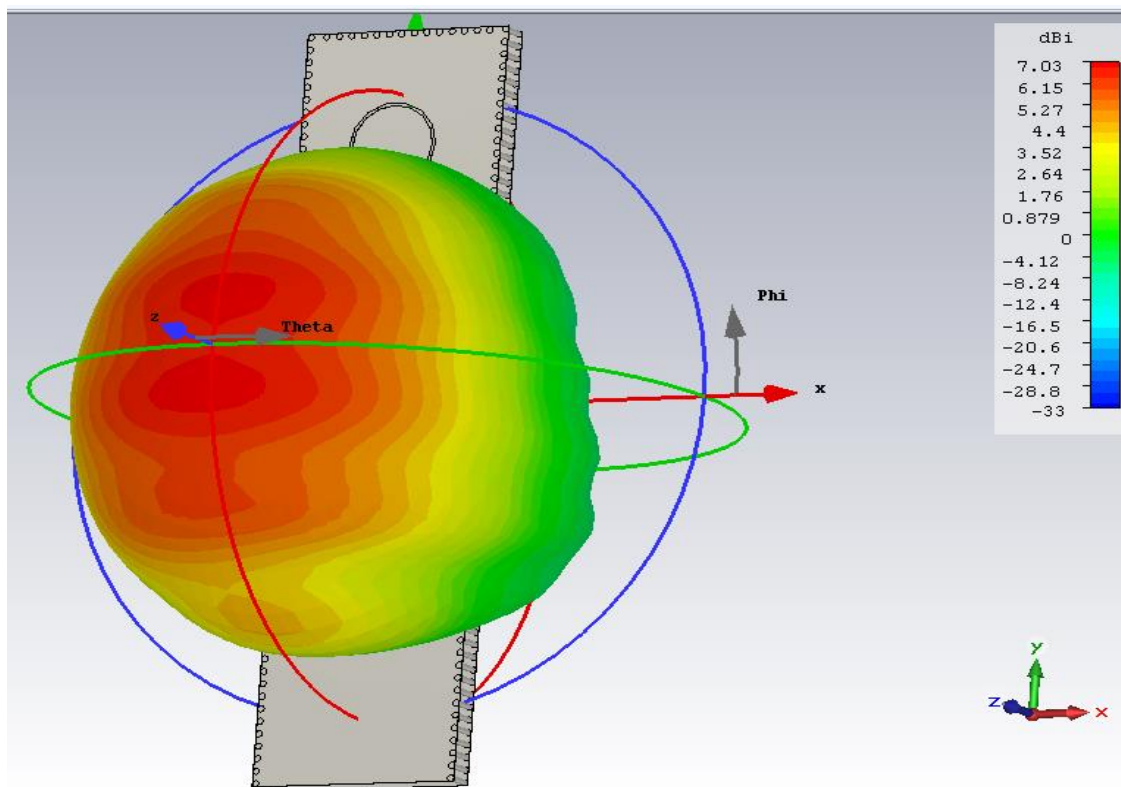
Obrázek 19: Graf parametru S11 antény s kruhovou polarizací

Na obrázku 19 je zobrazen graf parametru S11 antény s kruhovou polarizací. Anténa je vyladěná na centrální frekvenci 7,98 GHz, kde je hodnota parametru S11 kolem -25 dB. Parametr S11 je menší než -10 dB v rozmezí 7,76 – 8,36 GHz, což znamená šířku pásma 600 MHz.



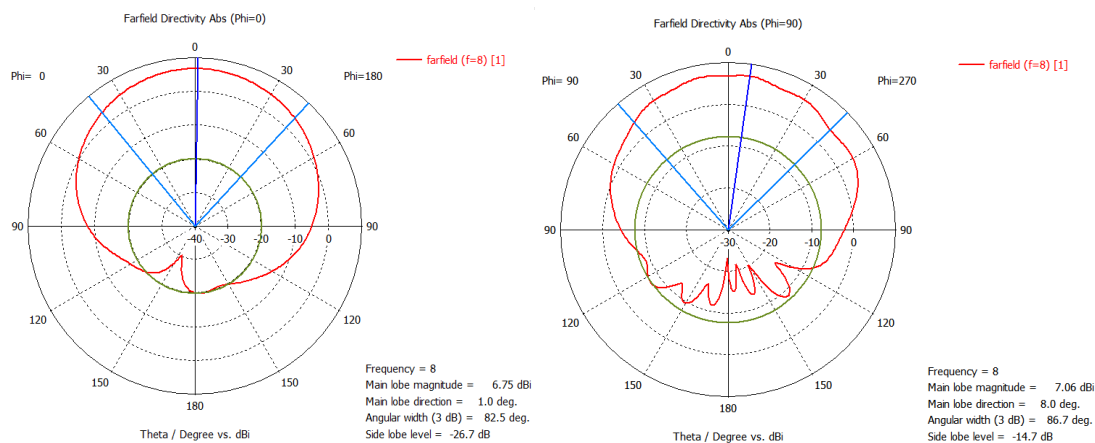
Obrázek 20: Graf osového poměru antény s kruhovou polarizací

Na obrázku 20 je zobrazen graf osového poměru antény s kruhovou polarizací. Nejnižší hodnoty je dosaženo na frekvenci 7,85 GHz, kde je hodnota osového poměru 5 dB. Hodnoty osového poměru jsou nižší než 6 dB ve frekvenčním pásmu 7,76 - 7,92 GHz, což znamená šířku pásma kolem 160 MHz.



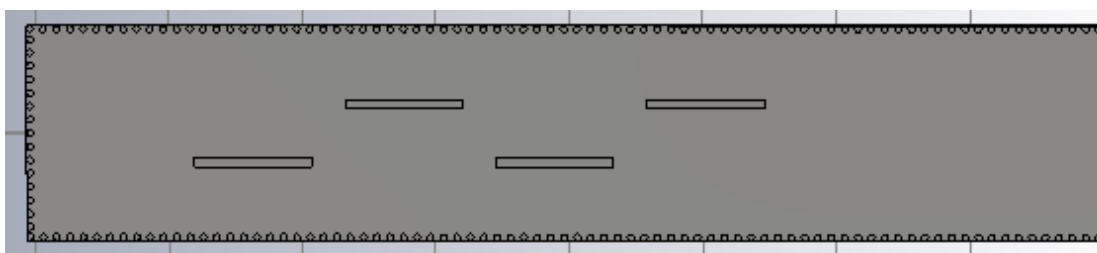
Obrázek 21: 3D graf vyzařovací charakteristiky antény s kruhovou polarizací

Na obrázku 21 je znázorněn 3D graf vyzařovací charakteristiky antény s kruhovou polarizací. Anténa vyzařuje kruhově polarizovanou vlnu kolmo k horní desce vlnovodu, protože anténní motiv tvoří šterbinové mezikruží. Hodnota vyzařování hlavního laloku je 7,03 dBi.

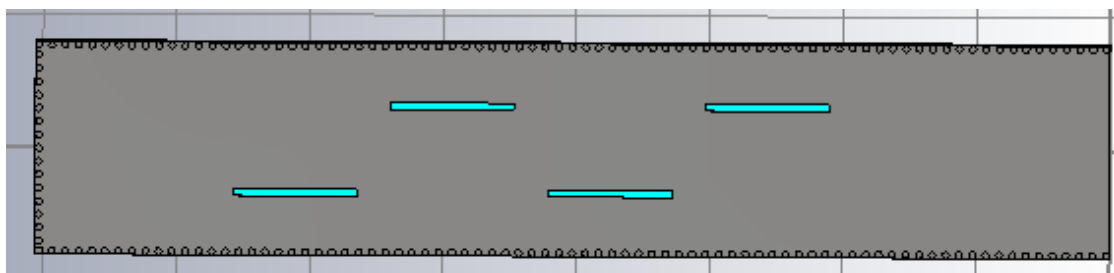


Obrázek 22: Polární grafy antény s kruhovou polarizací, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ

2 POROVNÁNÍ STRUKTUR VYROBENÝCH NA 3D TEXTILU A SE VZDUCHOVÝM SUBSTRÁTEM

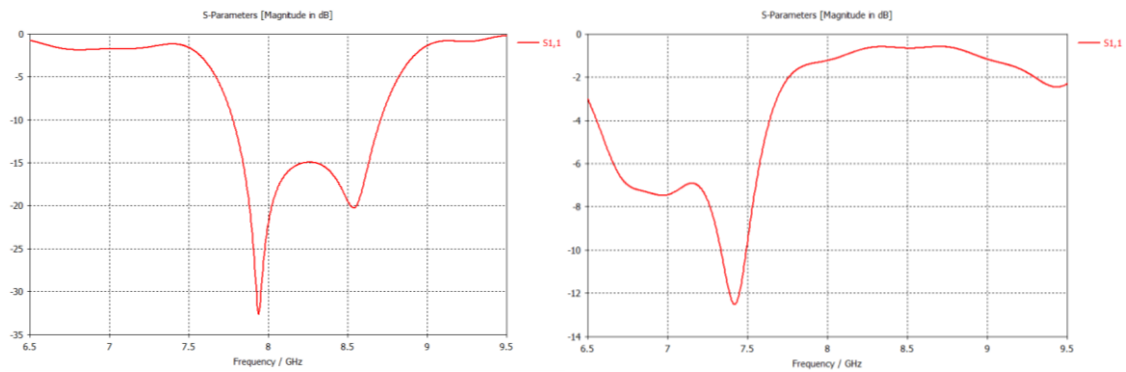


Obrázek 23: Pohled shora na anténu se vzduchovým substrátem



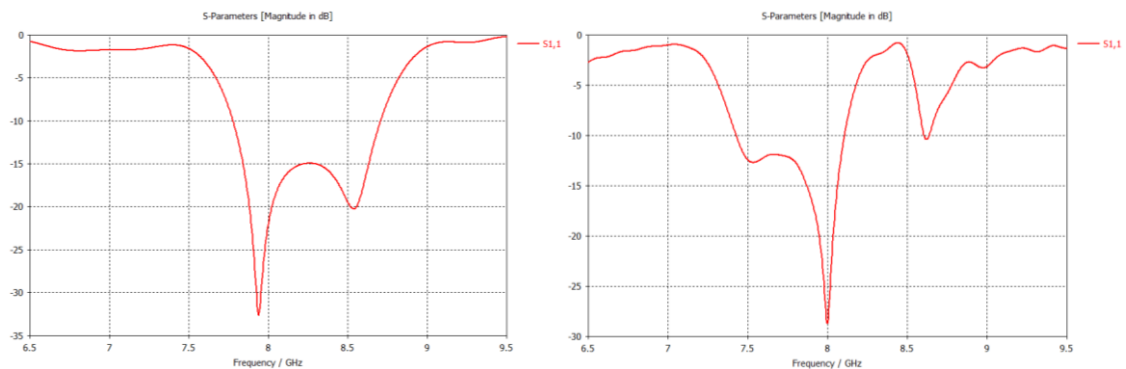
Obrázek 24: Pohled shora na anténu se substrátem z 3D textilu

Na obrázcích 23 a 24 jsou pohledy na motiv antény se 4 podélnými štěrbinami. V 1. případě (obrázek 22) je vlnovod antény vyplněn vzduchem (vzduchový substrát s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1$) a ve 2. případě (obrázek 23) je zde vložen 3D textil, což je materiál, který se využívá např. pro výrobu matrací do domácnosti. 3D textil je vysoký 4 mm a má relativní permitivitu $\epsilon_r = 1.4$. Ve vysokofrekvenční technice má tento materiál podobné vlastnosti jako substráty, které se používají při výrobě planárních antén.



Obrázek 25: Graf parametru S_{11} antény se 4 podélnými štěrbinami, vlevo anténa se vzduchovým substrátem, vpravo výsledek po vložení 3D textilu

Na obrázku 25 jsou k porovnání 2 grafy parametru S_{11} pro anténu se 4 podélnými štěrbinami. Vlevo je situace, kdy anténa je vyrobena na vzduchovém substrátu s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1$ a vyladěna na frekvenci 8 GHz. Vpravo je úplně stejná anténa se shodnými rozměry anténní struktury. Rozdíl je v tom, že uvnitř je 3D textil. Díky rozdílné relativní permitivitě se po vložení textilu anténa přeladí směrem k nižší frekvenci.



Obrázek 26: Graf parametru S_{11} antény se 4 podélnými štěrbinami, vlevo vyladěná anténa se vzduchovým substrátem, vpravo výsledek po vložení 3D textilu a vyladění na 8 GHz

Na obrázku 26 je podobná situace jako na obrázku 25. Vlevo je opět graf S_{11} antény se vzduchovým substrátem. Vpravo je situace pro anténu s 3D textilem, která je ale přeladěná na 8 GHz. Šířka pásma antény je 700 MHz.

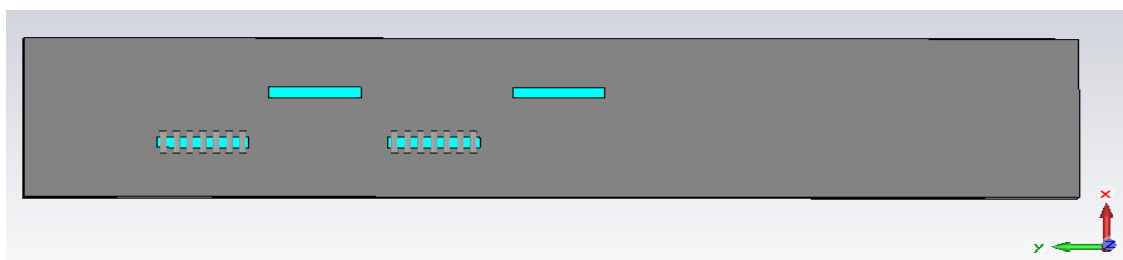
Tabulka 6: Tabulka parametrů antény pro porovnání vzduchového substrátu a 3D textilu

<u>Název parametru</u>	<u>Popis parametru</u>	<u>Hodnota parametru pro vzduchový substrát [mm]</u>	<u>Hodnota parametru pro 3D textil po vyladění</u>
W	Šířka anténní struktury	30	30
Mt	Tloušťka pokovení	0.036	0.036
H	Vzdálenost horní a spodní desky (výška substrátu)	4	4
L	Délka anténní struktury	160	160
Yst	Délka štěrby	17.567	18.47
Vzdst	Vzdálenost 1. štěrby od konce vlnovodu	24.137	28.78
Vzdst2	Vzdálenost 2. štěrby od konce vlnovodu	46.746	52.255
Vzdst3	Vzdálenost 3. štěrby od konce vlnovodu	69.32	76.05
Vzdst4	Vzdálenost 4. štěrby od konce vlnovodu	91.92	99.53
Xst	Šířka štěrby	1.428	1.013
Rprokov	Poloměr proků	0.5	0.5
Mezera	Vzdálenost středů proků	2	2
Vyoseni	Vzdálenost štěrby od osy Y (míra vyosení)	4.34	6.537

3 REKONFIGUROVATELNÁ ŠTĚRBINOVÁ ANTÉNNÍ ŘADA

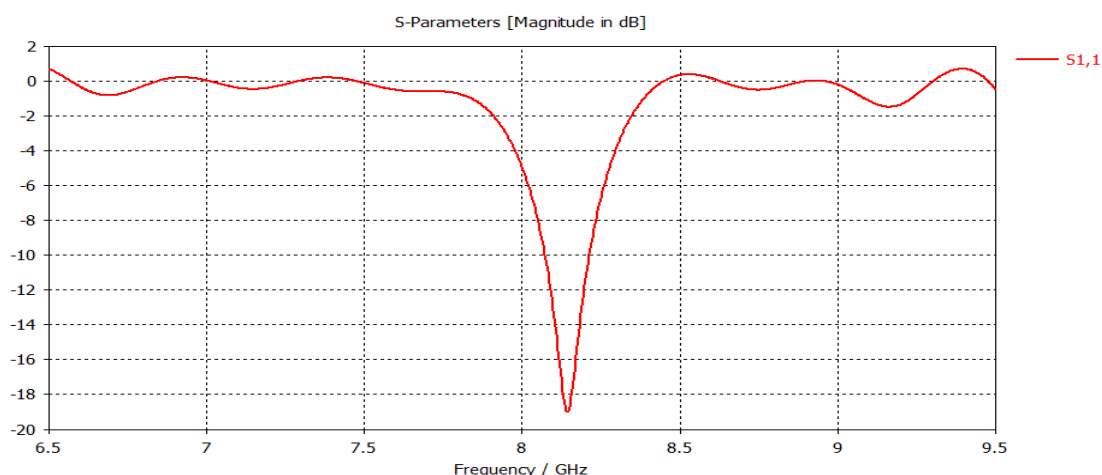
3.1 Změna směru vyzařování pomocí PIN diod

3.1.1 Vyzařování antény do levé poloroviny vzhledem k napájení



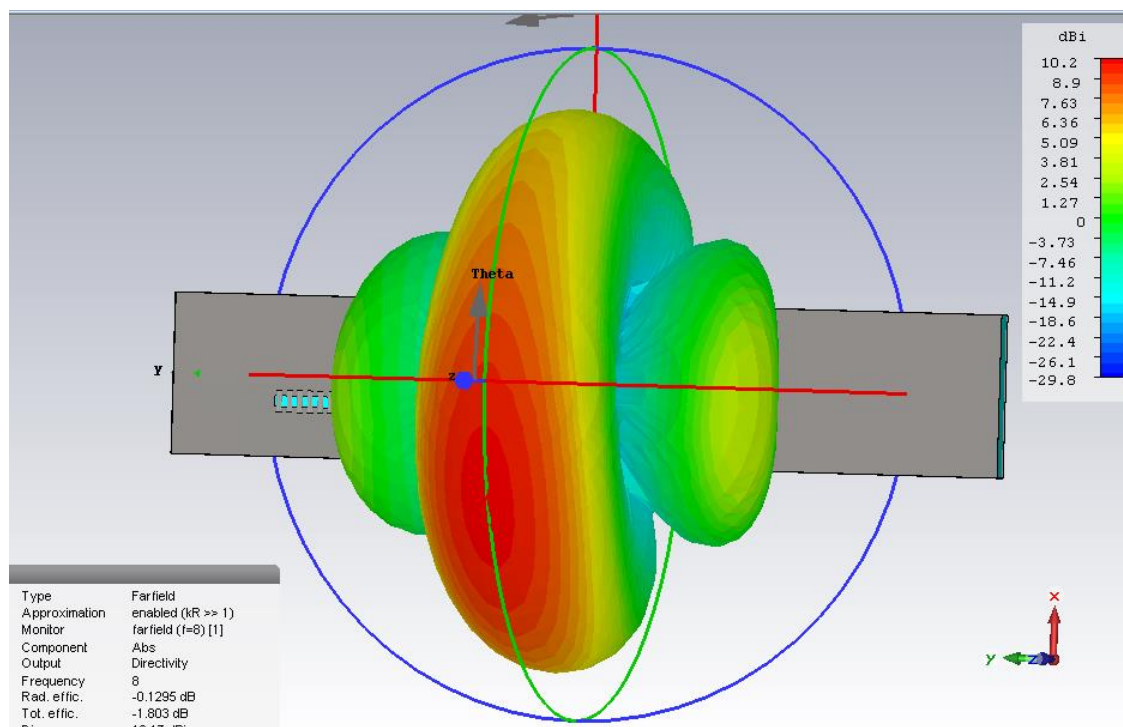
Obrázek 27: Pohled shora na anténu s překrytými štěrbinami

Na obrázku 27 je pohled na anténní strukturu, jejíž základ tvoří vlnovod se 4 podélnými štěrbinami. Dvě štěrbiny jsou překryté válečky, které mají simulovat překrytí pomocí PIN diod. Pokud je PIN dioda v sepnutém stavu, prochází tudy proud a měla by se chovat jako vodič (prokov). Skupina PIN diod uložených vedle sebe přes štěrbinu poté utvoří bariéru, přes kterou elektromagnetická vlna neprojde. Pokud se dioda nachází v rozepnutém stavu, neprochází přes ni téměř žádný proud a dioda by se ideálně měla chovat jako by štěrbiny nebyly vůbec překryté a měly by volně vyzařovat elektromagnetickou vlnu.



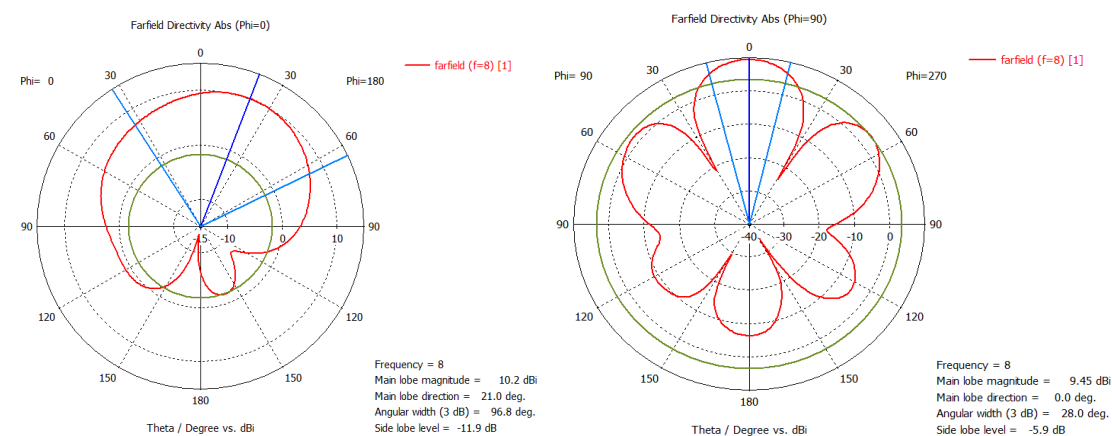
Obrázek 28: Graf průběhu S11 antény s PIN diodami

Na obrázku 28 je zobrazen graf činitele odrazu S_{11} antény s PIN diodami. Anténa je vyladěná na centrální frekvenci 8,1 GHz. Hodnota S_{11} na této frekvenci je -19 dB. S_{11} je menší než -10 dB v rozmezí 8,07-8,21 GHz, což znamená šířku pásma 140 MHz.



Obrázek 29: Graf 3D vyzařovací charakteristiky antény s PIN diodami

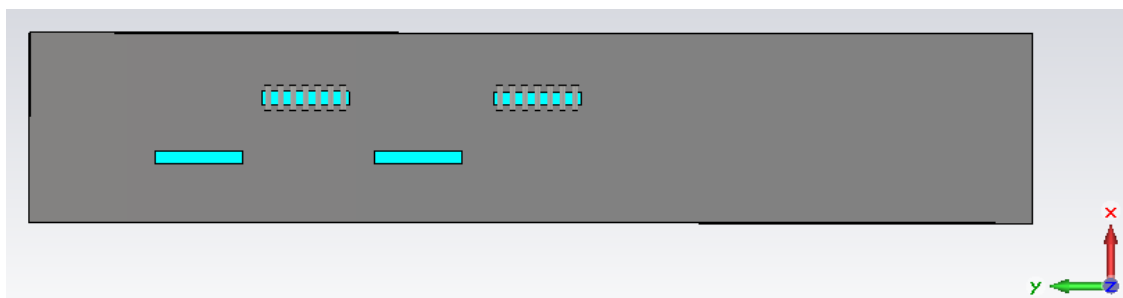
Na obrázku 29 je znázorněn graf 3D vyzařovací charakteristiky antény s PIN diodami. Dochází k vychýlení vyzařování směrem k záporné orientaci osy X vůči situaci bez PIN diod. Hodnota vyzařování hlavního laloku je 10,2 dBi.



Obrázek 30: Polární grafy směrových charakteristik, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ

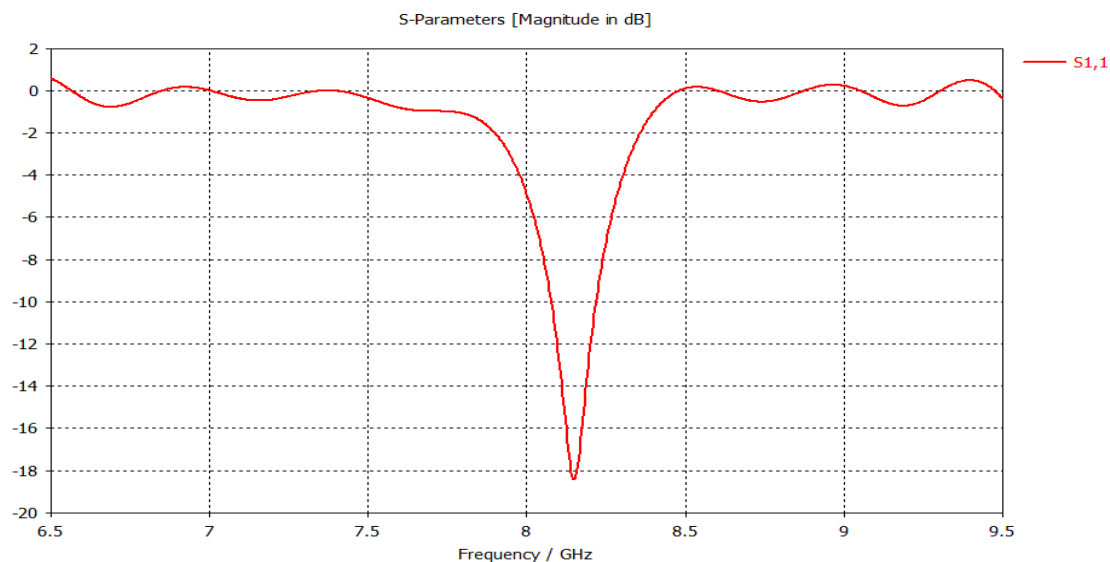
Na obrázku 30 jsou zobrazeny polární grafy směrových charakteristik antény, která má 2 štěrby překryté pomocí PIN diod. Vlevo se nachází rovina XZ, vpravo je zobrazena rovina YZ. Dochází k vychýlení vyzařování anténního svazku asi o 21° vůči situaci bez PIN diod.

3.1.2 Vyzařování antény do pravé poloroviny vzhledem k napájení



Obrázek 31: Pohled shora na anténu s překrytými štěrbinami

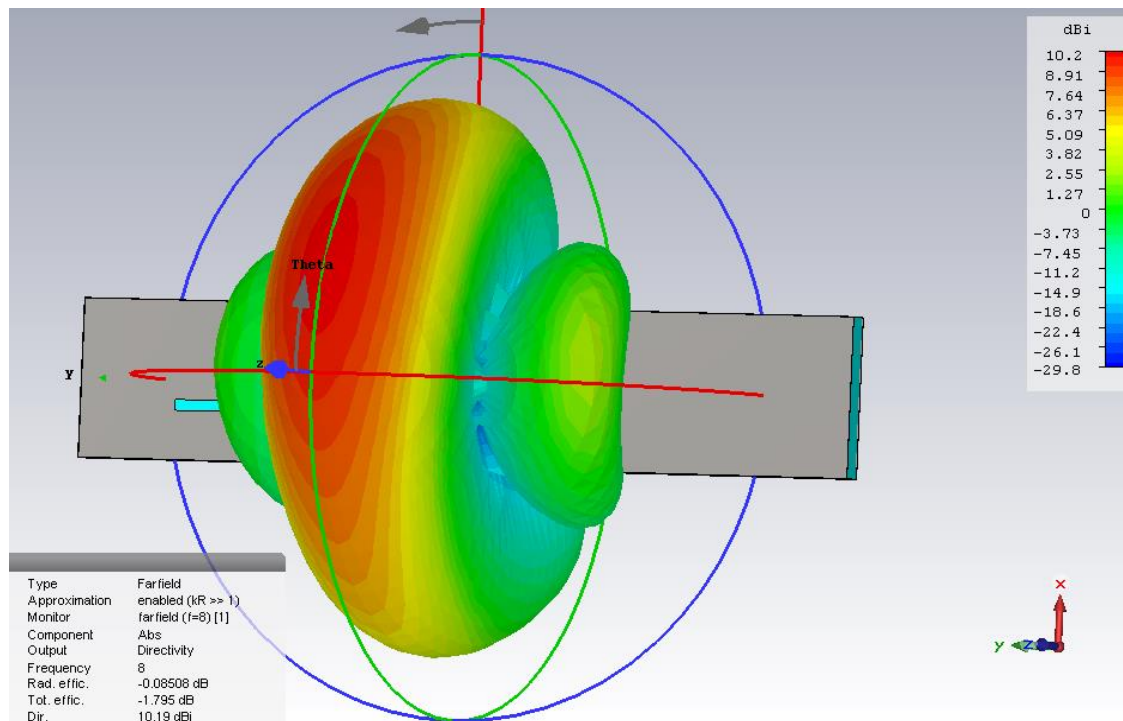
Na obrázku 31 je velmi podobná anténa jako na obrázku 27. Rozdíl je v tom, že překryté jsou 2 jiné štěrby. Díky tomu anténa vyzařuje do pravé poloroviny vzhledem k napájení.



Obrázek 32: Graf průběhu S11 antény s PIN diodami

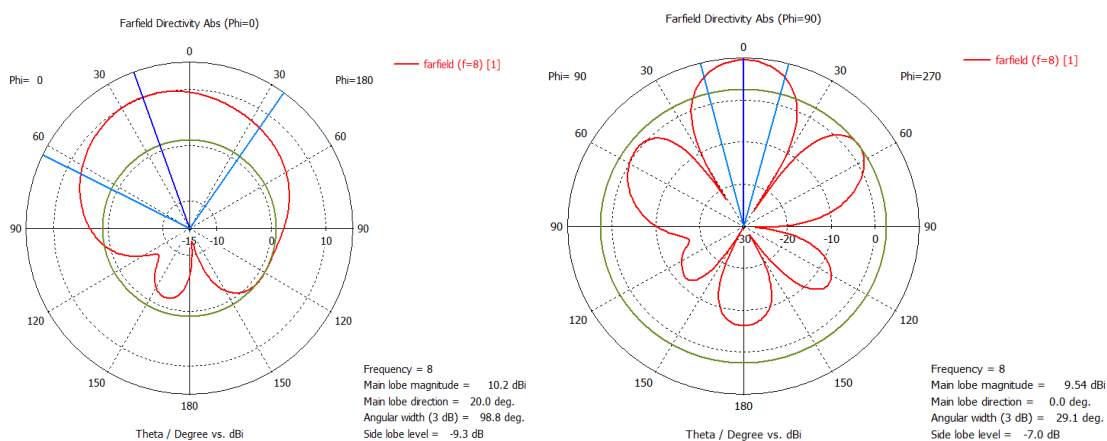
Na obrázku 32 je zobrazen graf činitele odrazu S11 antény s PIN diodami po překrytí jiných štěrbin. Anténa zůstala vyladěná na centrální frekvenci 8,1 GHz.

Hodnota S11 na této frekvenci je -19 dB. S11 klesá pod hodnotu -10 dB v rozmezí 8,07-8,21 GHz, což značí šířku pásma 140 MHz.



Obrázek 33: Graf 3D vyzařovací charakteristiky antény s PIN diodami

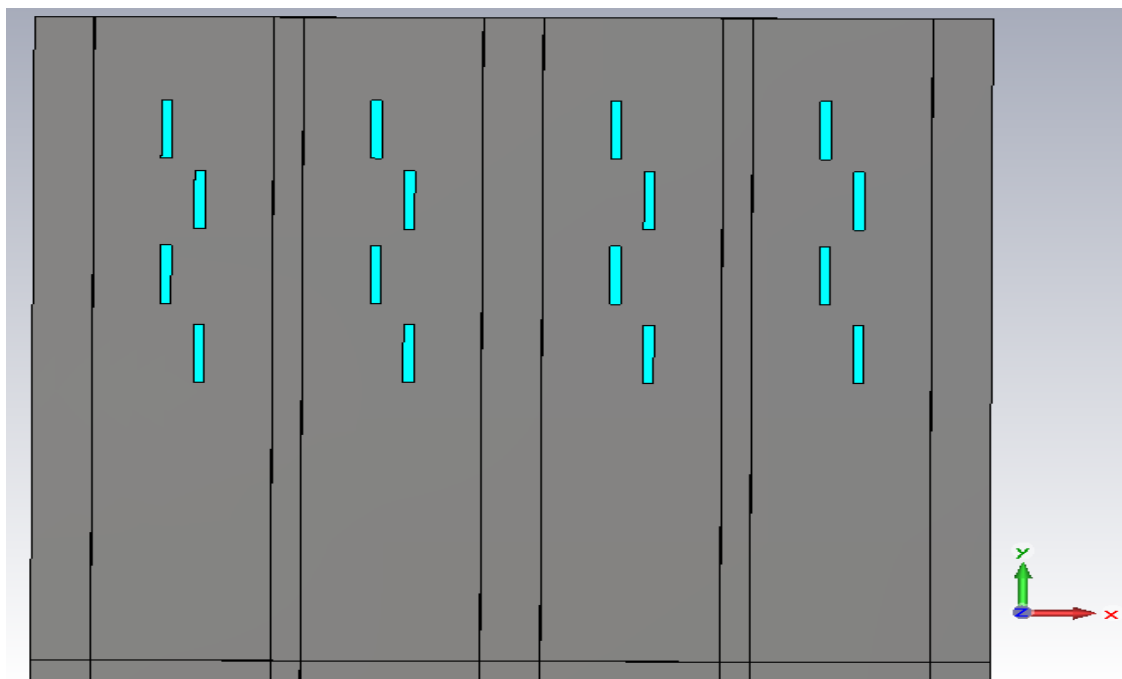
Na obrázku 33 je znázorněn graf 3D vyzařovací charakteristiky antény s PIN diodami po překrytí jiných šěrbin. Dochází zde tedy k vychýlení vyzařování směrem ke kladné orientaci osy X vůči situaci bez PIN diod. Hodnota vyzařování hlavního laloku je 10,2 dBi.



Obrázek 34: Polární grafy směrových charakteristik, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ

Na obrázku 34 jsou zobrazeny polární grafy směrových charakteristik antény, která má 2 štěrbiny překryté pomocí PIN diod. Jedná se ale o jiné štěrbiny než v předchozím případě. Vlevo se nachází rovina XZ, vpravo je zobrazena rovina YZ. Dochází k vychýlení vyzařování anténního svazku asi o 20° vůči situaci bez PIN diod.

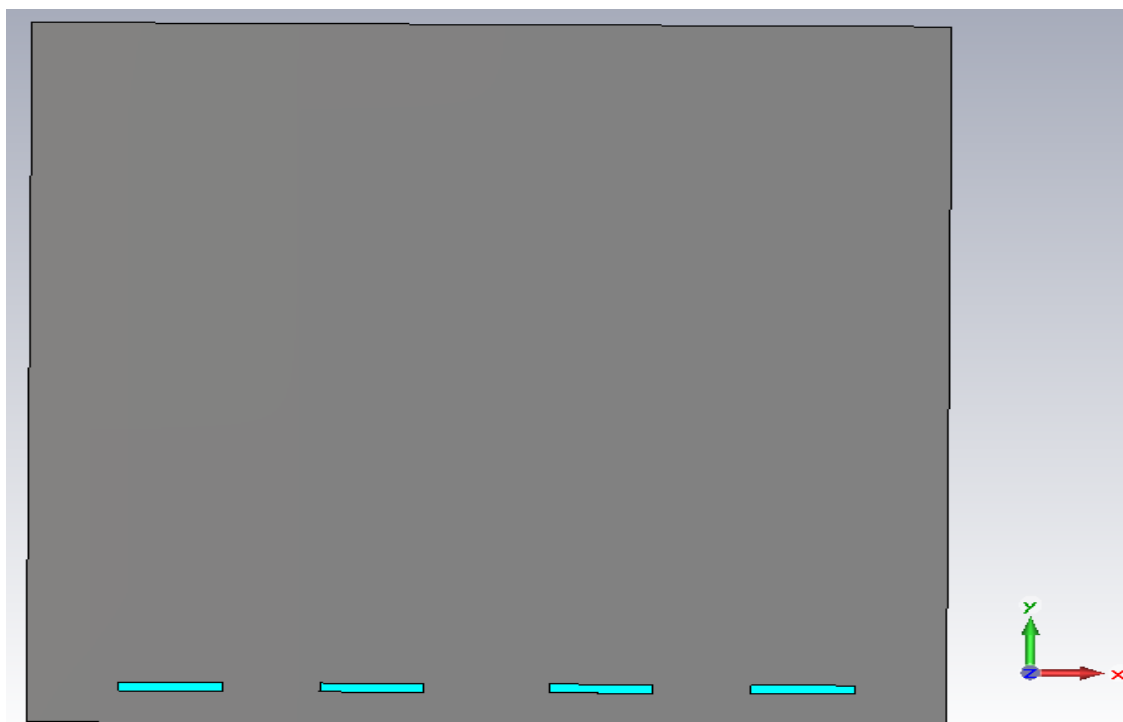
3.2 Změna směru vyzařování pomocí anténní struktury složené ze dvou substrátových vrstev



Obrázek 35: Motiv antény složené ze dvou vrstev

Na obrázku 35 je zobrazen motiv štěrbinové anténní řady, která je složena ze dvou vrstev 3D textilu. Základ antény tvoří 4 vlnovody o šířce 30 mm, které se nachází v horní vrstvě textilu. V každém vlnovodu jsou vyřezány 4 štěrbiny, které jsou vhodně vyosené vůči delší ose symetrie vlnovodu. Ve spodní vrstvě textilu se nachází jeden napájecí vlnovod široký 20 mm, ve kterém jsou vyřezány 4 vazební štěrbiny. Ty slouží pro přenos energie do vlnovodů v horní vrstvě. Bližší detail prostřední vrstvy včetně vazebních štěrbin je na obrázku 36.

Na obou koncích napájecího vlnovodu jsou napájecí porty. Podle toho, který port je připojen k napájení antény, je možné volit směr, kterým bude anténa vyzařovat elektromagnetickou vlnu. Je to z toho důvodu, že k vlnovodu, který je nejbližší k napájení, se dostane největší část energie. Do zbylých vlnovodů projde méně energie a nejmenší energii je buzen vlnovod, který je nejvíce vzdálen od napájecího portu.



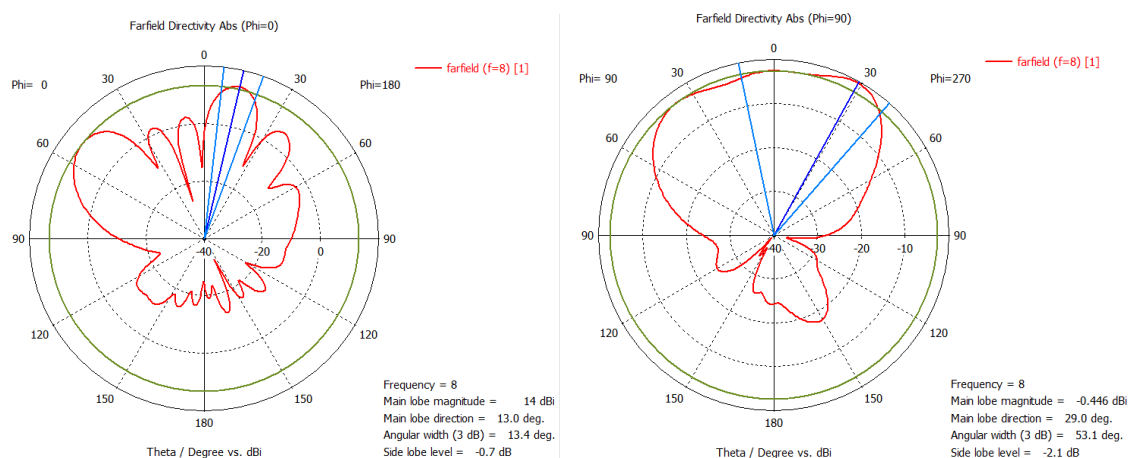
Obrázek 36: Prostřední stěna antény složené ze dvou vrstev

Na obrázku 36 je zobrazena prostřední stěna antény. Tato stěna tvoří zemní plochu a směřuje tak vyzařování antény přes štěrby motivu antény do horní poloviny. Jsou zde také zobrazeny 4 vazební štěrby, přes které je vedena energie ze spodního napájecího vlnovodu do 4 vlnovodů v horním textilu, které tvoří hlavní část antény.



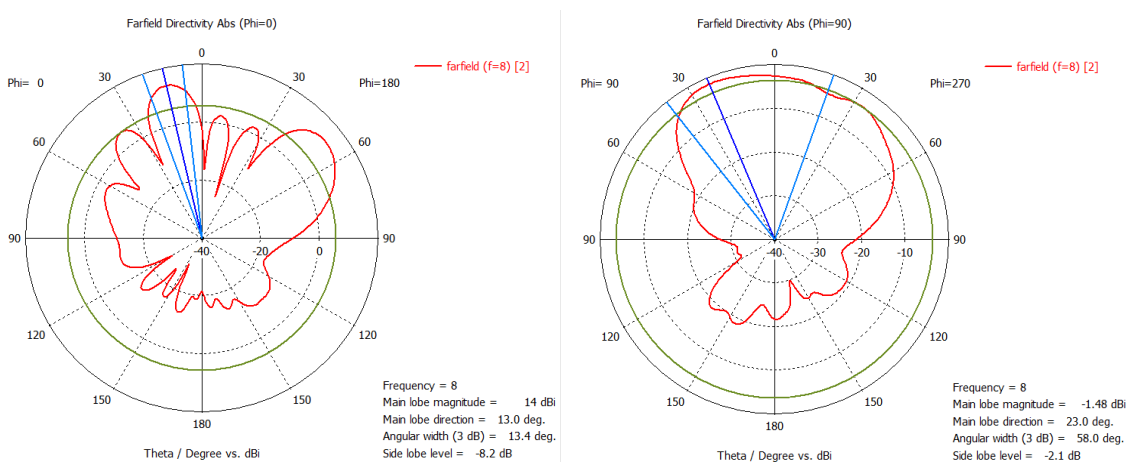
Obrázek 37: Spodní strana antény složené ze dvou vrstev

Na obrázku 37 je zobrazena spodní část celé struktury, kde je možné vidět spodní část napájecího vlnovodu.



Obrázek 38: Polární grafy směrových charakteristik, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ, port 1

Na obrázku 38 jsou zobrazeny polární grafy směrových charakteristik antény, která je složena ze dvou vrstev 3D textilu, ve kterých je vytvořeno celkem 5 vlnovodů. Vlevo je znázorněna rovina XZ, vpravo je zobrazena rovina YZ. Dochází k vychýlení vyzařování anténního svazku asi o 14° od roviny YZ.



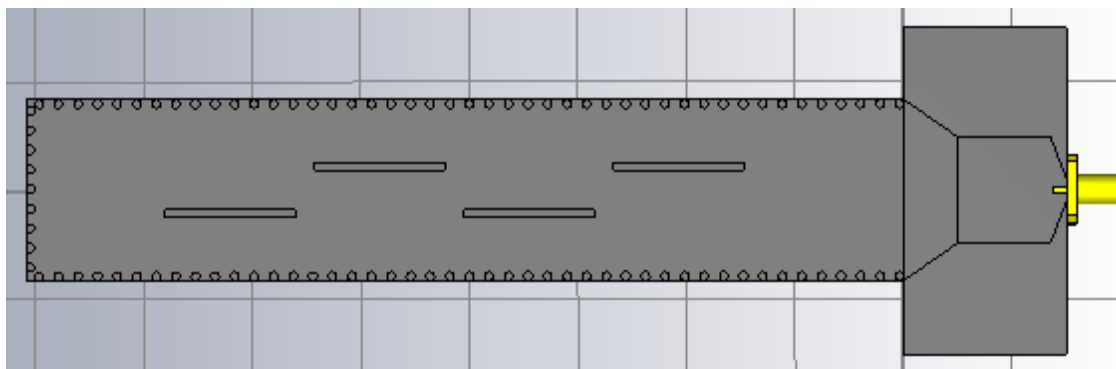
Obrázek 39: Polární grafy směrových charakteristik, vlevo rovina XZ, vpravo rovina YZ, port 2

Na obrázku 39 jsou znázorněny opět polární grafy pro roviny XZ a YZ, v tomto případě se jedná o situaci, kdy je anténa napájena z portu 2.

4 VÝROBA ANTÉNY A MĚŘENÍ

4.1 Anténa se 4 podélnými štěrbinami a vzduchovým substrátem

4.1.1 Model v CST



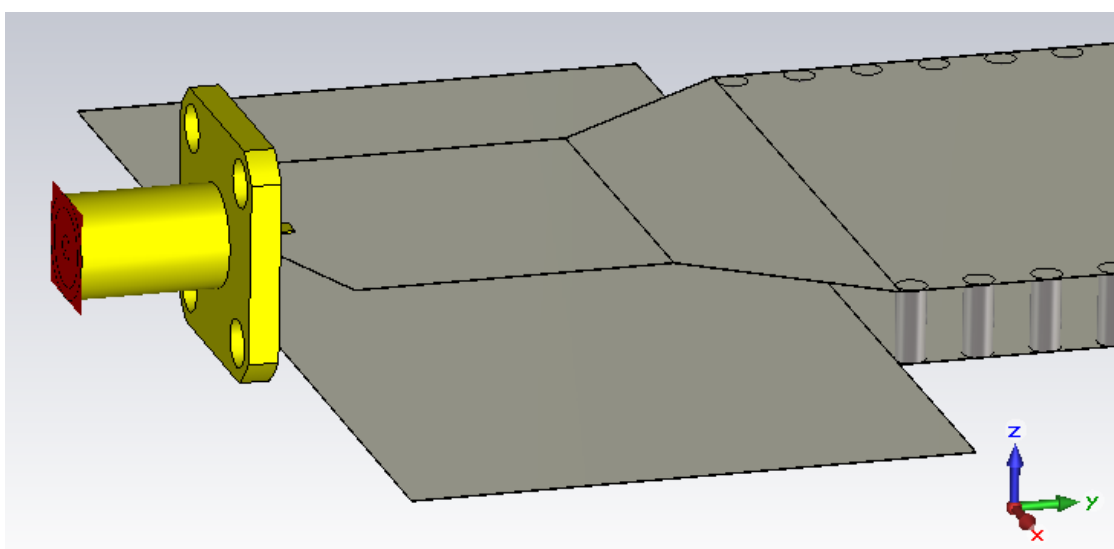
Obrázek 40: Model antény se 4 podélnými štěrbinami včetně napájení pomocí mikropásku

Na obrázku 40 je pohled na anténní strukturu s 4 podélnými štěrbinami, která byla vybrána pro výrobu a měření. Základ tvoří SIW vlnovod s horní a spodní celistvou deskou a prokovy nahrazující boční stěny. Všechny 4 podélné štěrbiny jsou vyosené o stejnou vzdálenost (4,34 mm) tak, aby díky vhodnému rozložení elektrického pole vyzařovaly elektromagnetickou vlnu. 1. štěrbina je vzdálena 24 mm od konce vlnovodu a ostatní jsou vzdáleny tak, aby byly ve společné fázi s 1. štěrbinou. Tento typ antény byl vybrán k výrobě a měření. To bylo možné provést po návrhu vhodného napájení. Vlnovod antény je buzen navrženým mikropáskovým vedením. K tomuto mikropásku je na jedné straně připojen model SMA konektoru a na 2. straně je vidět postupný přechod z mikropásku na vlnovod (Loft).

Tabulka 7: Tabulka parametrů vyrobené antény

<u>Název parametru</u>	<u>Popis parametru</u>	<u>Hodnota parametru [mm]</u>
W	Šířka anténní struktury	30
Mt	Tloušťka pokovení	0.036
H	Vzdálenost horní a spodní desky (výška substrátu)	4
L	Délka anténní struktury	160

Yst	Délka štěrbiny	24
Vzdst	Vzdálenost 1. štěrbiny od konce vlnovodu	24
Vzdst2	Vzdálenost 2. štěrbiny od konce vlnovodu	51.5
Vzdst3	Vzdálenost 3. štěrbiny od konce vlnovodu	79
Vzdst4	Vzdálenost 4. štěrbiny od konce vlnovodu	106.5
Xst	Šířka štěrbiny	1.428
Rprokov	Poloměr prokůvů	0.8
Mezera	Vzdálenost středů prokůvů	3.6
Vyoseni	Vzdálenost štěrbín od osy Y (míra vyosení)	4.34
Wpasek	Šířka mikropásku	19.28
Lpasek	Délka mikropásku	30
Wzem	Šířka zemní plochy mikropásku	60

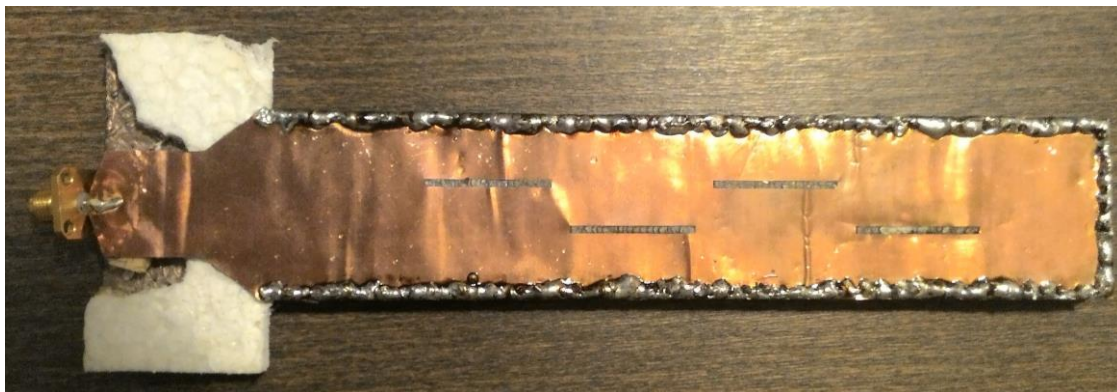


Obrázek 41: Detail SMA konektoru a napájecího mikropásku

Na obrázku 41 je detailnější pohled na napájecí mikropásek ze zemní deskou, ke kterému je připojen SMA konektor. Rozměry mikropásku byly navrženy pomocí

Microstrip kalkulátoru dostupného z [13]. Substrátem mezi mikropáskem a zemní deskou je vzduch s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1$, tloušťka substrátu je 0,4 mm, síla pokovení je 36 μm a frekvence 8 GHz. Mikropásek by měl být navržen na charakteristickou impedanci 50 Ω , aby bylo možné připojit 50 Ω SMA konektor. Z těchto parametrů bylo zjištěno, že mikropásek musí mít šířku 19,28 mm.

4.1.2 Foto vyrobené antény



Obrázek 42: Horní strana vyrobené antény

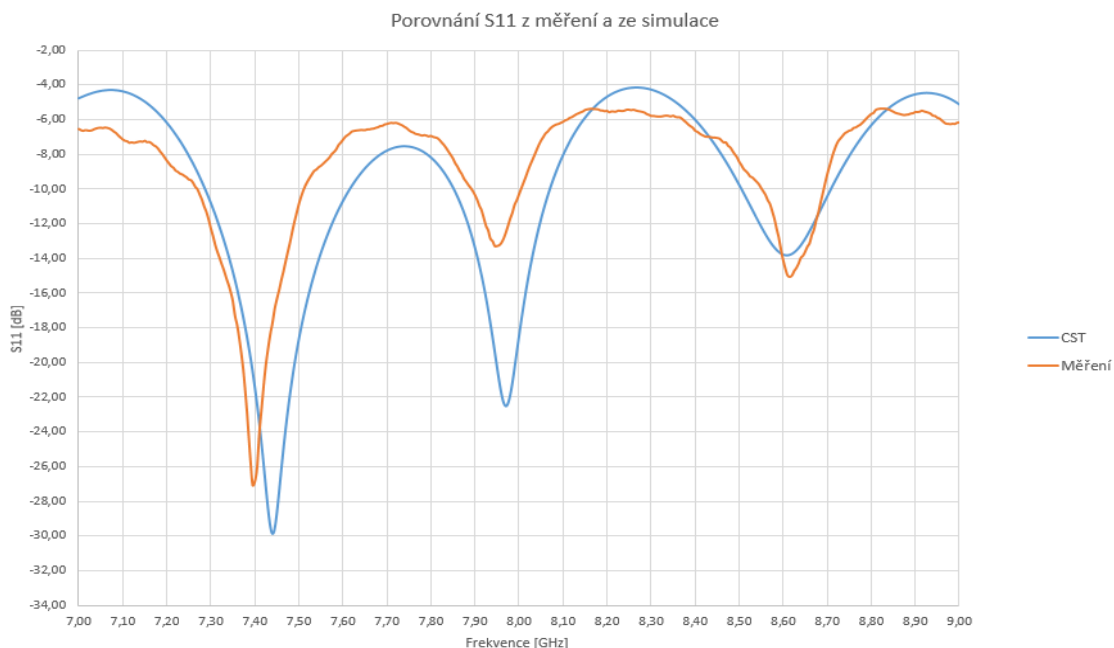
Na obrázku 42 je vyfocená horní strana antény, kde je vidět anténní motiv (podélné štěrby). U napájecího mikropásku jsou zbytky polystyrénové výplně, která posloužila jako opora při výrobě. Měděná fólie byla z výroby mírně pokroucená a deformovaná a bylo nutné pokusit se ji co nejvíce narovnat. Napájení obstarává zlatý SMA konektor připojený k mikropáskovému vedení.



Obrázek 43: Spodní strana vyrobené antény

Na obrázku 43 je vyfocená spodní strana realizované antény. Část antény tvoří plný profil z měděné fólie a rozšířená část je zemní plocha pro napájecí mikropásek.

4.1.3 Porovnání měření S11 se simulací

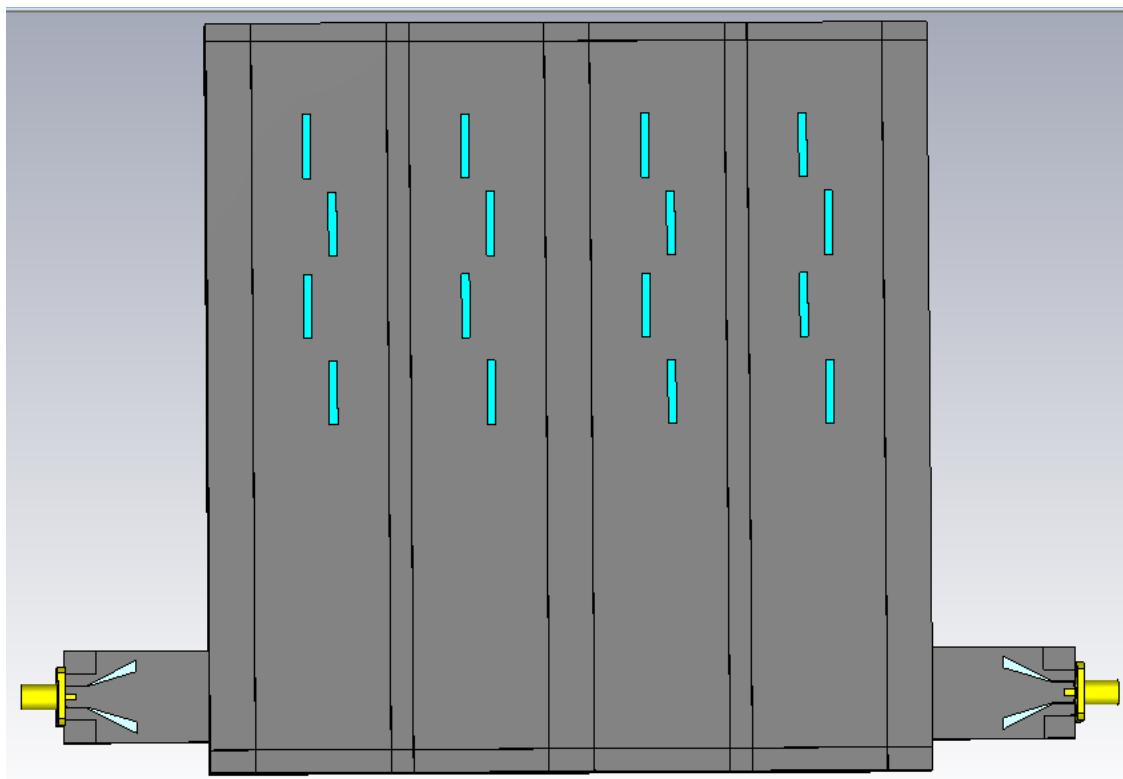


Obrázek 44: Porovnání S11 z měření a ze simulace v CST

Na obrázku 44 jsou zobrazeny 2 průběhy parametru S11 v jednom grafu, aby je bylo možné vzájemně porovnat a prokázat shodu simulace a měření. Jeden průběh je ze simulace CST a druhý je získaný změřením antény pomocí analyzátoru. Oba průběhy nejsou frekvenčně vůči sobě nijak posunuté, liší se jen hodnotami S11 na ose Y. Hodnoty S11 klesají pod -10 dB ve 3 frekvenčních oblastech. Anténa byla navržena podle CST na frekvenci 7,97 GHz s šířkou pásma od 7,85 – 8,07 GHz (220 MHz). Hodnota S11 podle CST na frekvenci 7,97 GHz je -22 dB. Podle měření je anténa přizpůsobena na frekvenci 7,96 GHz s šířkou pásma 120 MHz. Hodnota S11 na frekvenci 7,96 GHz podle měření je -13,5 dB.

4.2 Štěrbínová anténní řada tvořená dvěma vrstvami 3D textilu

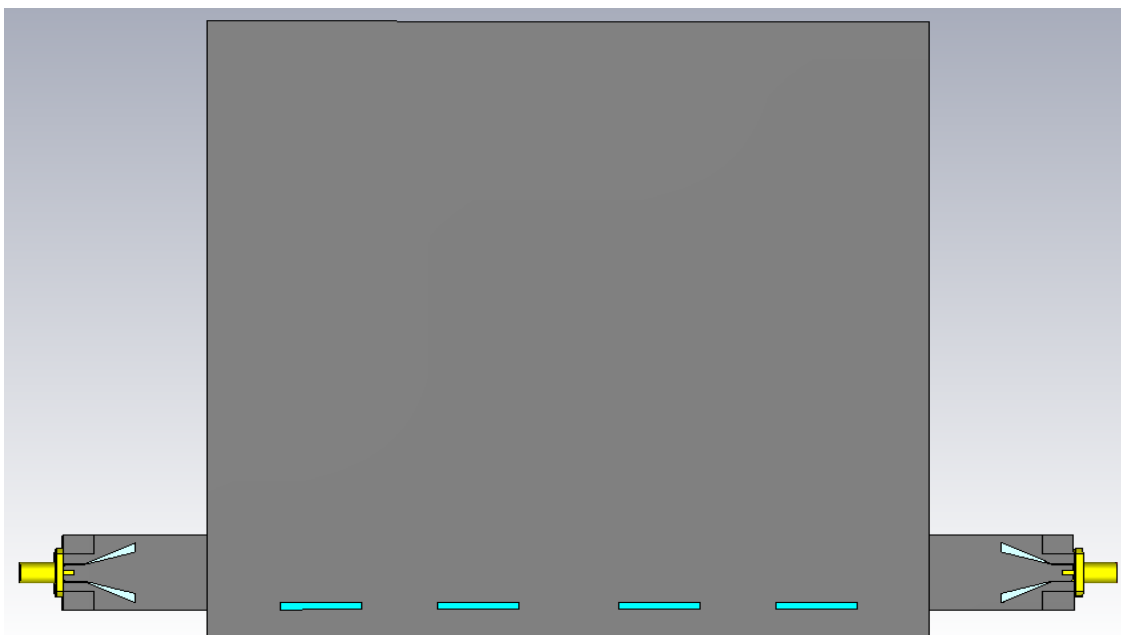
4.2.1 Model v CST



Obrázek 45: Model antény vyrobené ze 3D textilu včetně napájecího vlnovodu

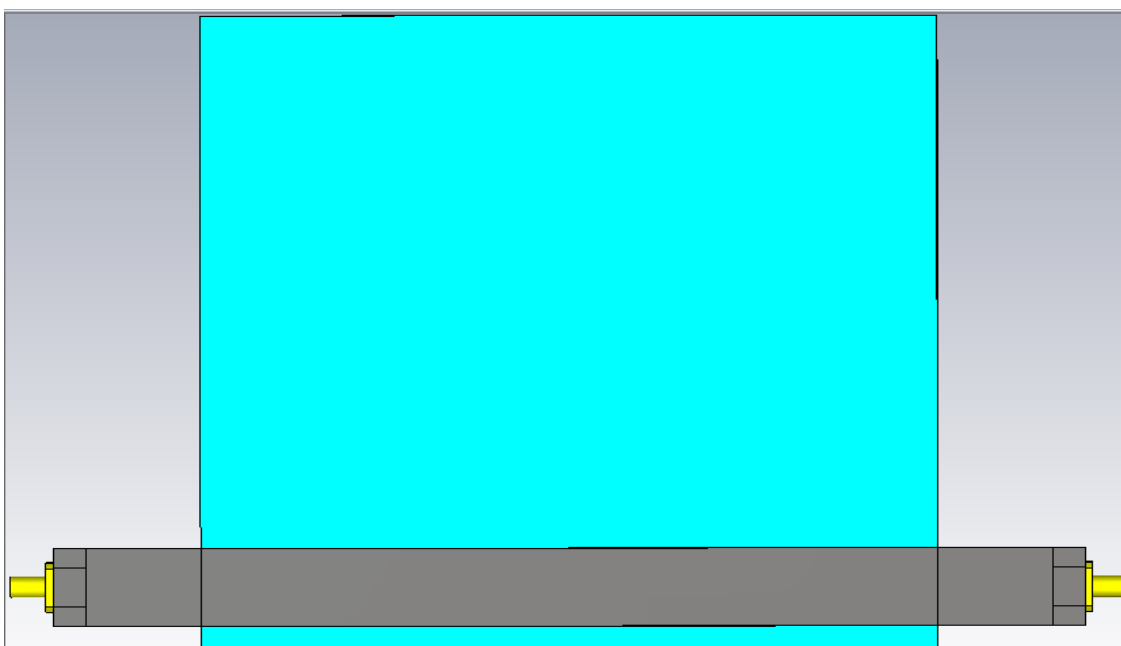
Na obrázku 45 je znázorněn pohled na horní stranu antény vyrobené z textilu včetně napájecího vlnovodu s konektory. Tato anténa byla vybrána pro výrobu a měření z důvodu jednodušší výroby než varianta s PIN diodami. Přejech z SMA konektoru na vlnovod je vytvořen pomocí GCPW struktury (grounded coplanar waveguide), která v porovnání s napájecím mikropáskem dosahuje menšího vyzařování napájení.

Podle toho, ke kterému konektoru je připojeno napájení antény, je možné volit směr, kterým bude anténa vyzařovat elektromagnetickou vlnu. Je to z toho důvodu, že k vlnovodu, který je nejbližší k napájení, se dostane největší část energie. Do zbylých vlnovodů projde méně energie a nejmenší energií je buzen vlnovod, který je nejvíce vzdálen od napájecího portu. Díky tomu dochází ke změně směru vyzařování.



Obrázek 46: Prostřední stěna antény včetně vazebních štěrbin

Na obrázku 46 je prostřední vrstva, která se nachází mezi dvěma vrstvami textilu. Jedná se o vodivou vrstvu, ve které se nacházejí vazební štěrbin, přes které proniká energie z napájecího vlnovodu do horní vrstvy, kde jsou 4 vlnovody. Na obě strany vyčnívají části vlnovodu, kde je realizován přechod na SMA konektory pomocí GCPW struktury.



Obrázek 47: Spodní strana antény vyrobené z textilu

Na obrázku 47 je model antény ze spodní strany, kde je vidět pouze napájecí vlnovod s konektory, který se nachází ve spodní textilní vrstvě.

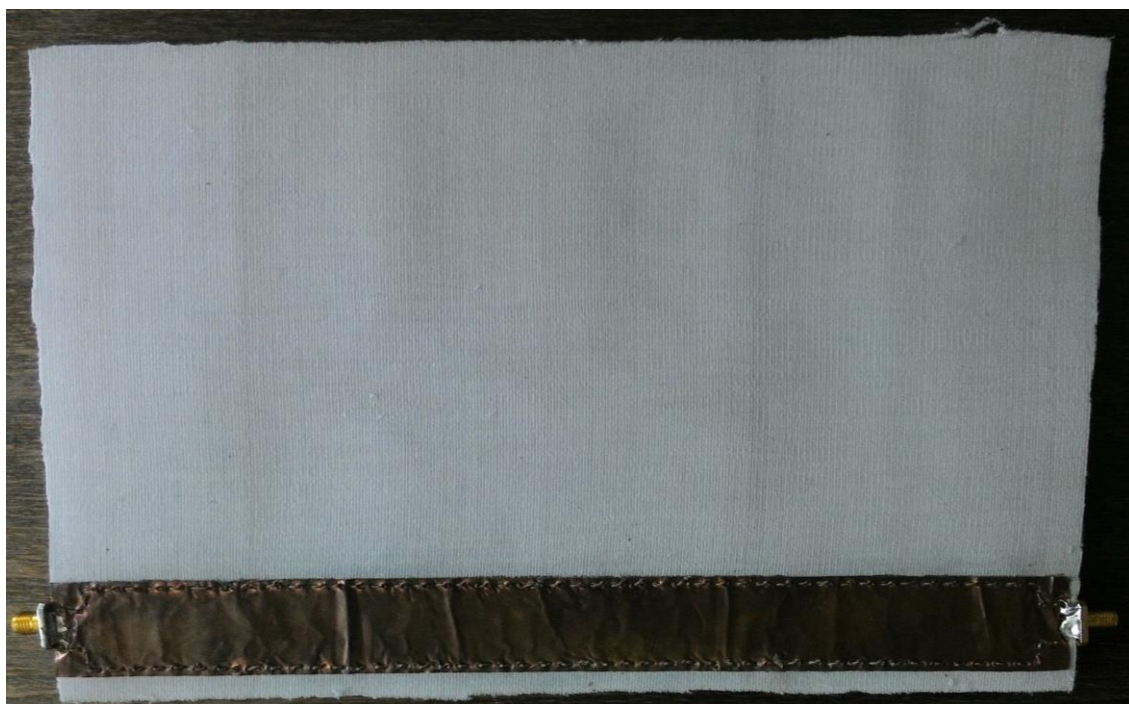
Tabulka 8: Tabulka parametrů antény vyrobené z 3D textilu

<u>Název parametru</u>	<u>Popis parametru</u>	<u>Hodnota parametru [mm]</u>
W	Šířka anténní struktury	160
Mt	Tloušťka pokovení	0.036
H	Vzdálenost horní a spodní desky (výška substrátu)	4
L	Délka anténní struktury	160
Yst	Délka štěrby	14
Vzdst	Vzdálenost 1. štěrby od konce vlnovodu	20
Vzdst2	Vzdálenost 2. štěrby od konce vlnovodu	37
Vzdst3	Vzdálenost 3. štěrby od konce vlnovodu	55
Vzdst4	Vzdálenost 4. štěrby od konce vlnovodu	74
Xst	Šířka štěrby	1.8
Rprokov	Poloměr proků	0.5
Mezeraprok	Vzdálenost středů proků	2.3
Vyoseni	Vzdálenost štěrbin od osy Y (míra vyosení)	2.8
WApert	Šířka vazební štěrby	2
WSiw	Šířka napájecího vlnovodu	20
Wmotiv	Šířka vlnovodu antény	30
VzdVazebni	Vzdálenost vazebních štěrbin od počátku vlnovodu	8.2
LApert	Délka vazební štěrby	18

4.2.2 Foto vyrobené antény



Obrázek 48: Horní strana vyrobené antény



Obrázek 49: Spodní strana vyrobené antény

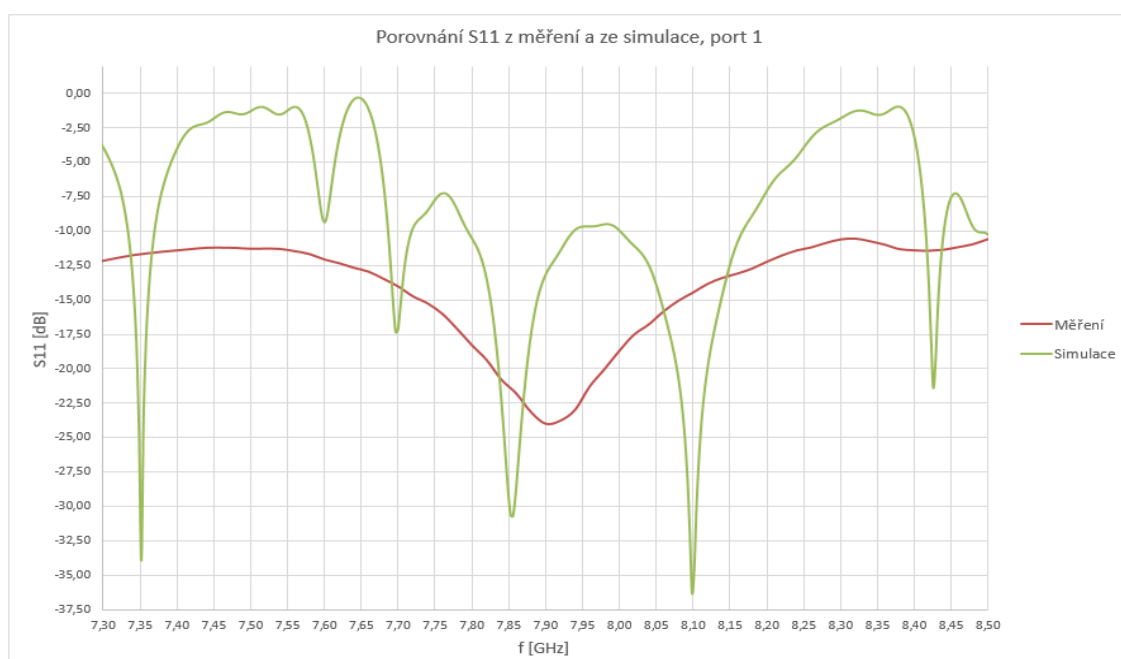
Na obrázku 48 a 49 jsou fotografie vyrobené antény složené ze dvou vrstev 3D

textilu včetně SMA konektů. Základ tvoří trojrozměrný textilní materiál (3D textil), který slouží jako substrát. Na textilu je nalepena měděná fólie, do které byly za pomoci pracovníků dílny na ústavu vyleptány štěrby a díry na prokvy. Prokvy byly vytvořeny prošitím vrstvy měděné fólie a textilu pomocí jehly a nitě. Jedná se o vodivou nit, u které je daná vodivost zajištěna díky příměsi stříbra do struktury nitě. Vzhledem k velikosti antény bylo nutné prošít celkem téměř 1000 prokvů, což bylo velmi náročné na čas a přesnost výroby.



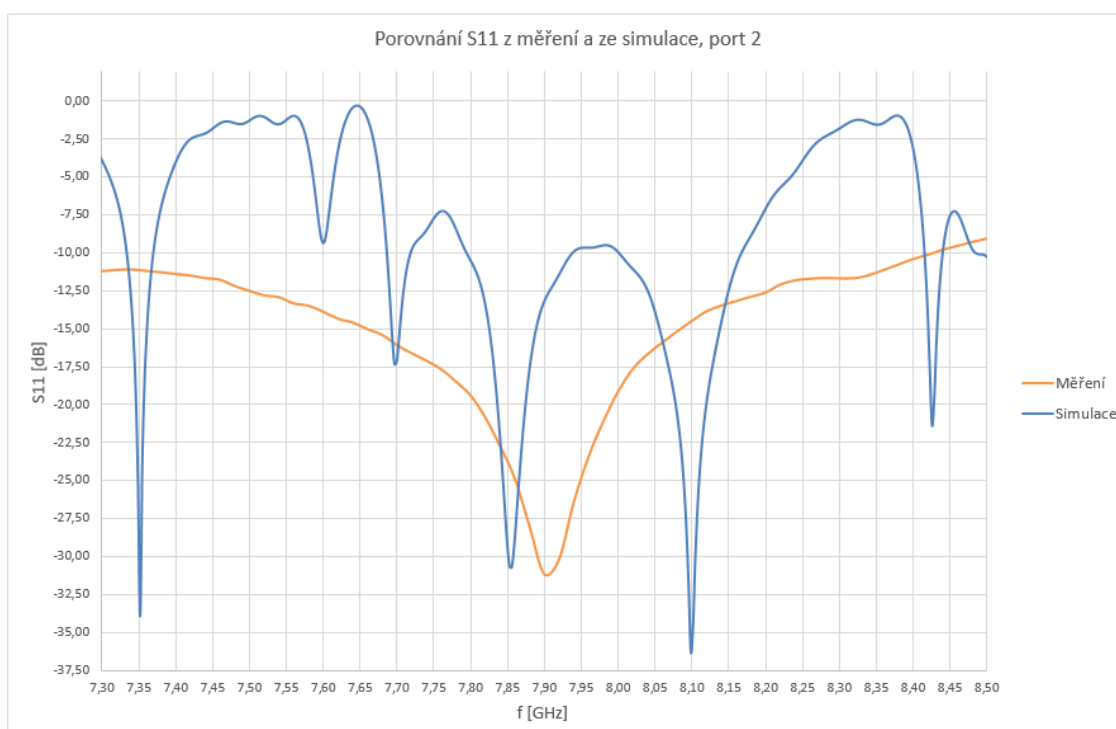
Obrázek 50: Detail napájení GCPW vyrobené antény

4.2.3 Porovnání měření S11 se simulací



Obrázek 51: Porovnání S11 z měření a ze simulace v CST pro port 1

Na obrázku 51 je porovnání činitele odrazu ze simulace a z měření pro port 1. Podle simulace S11 klesá pod -10 dB v několika kmitočtových oblastech. V těsném okolí frekvence 8 GHz je S11 podle simulace mírně větší než -10 dB (reálná hodnota je -9,8 dB). Toto nemusí být považováno za problém, protože simulace nepočítá s útlumy kabelu a kabelových spojů. Po uvážení těchto útlumů může při měření průběh S11 celkově dosáhnout nižších hodnot, což znamená, že anténa je přizpůsobena na požadovanou frekvenci 8 GHz s šířkou pásma 380 MHz. Podle měření je anténa nejlépe přizpůsobena na frekvenci 7,91 GHz, kde je hodnota S11 kolem -23 dB.

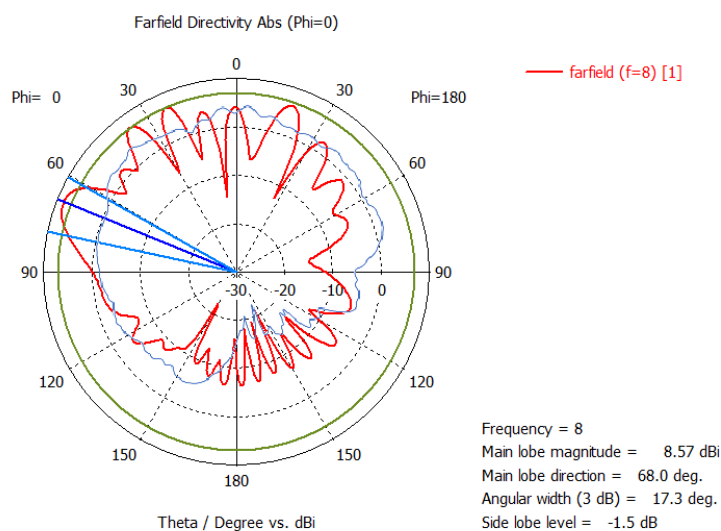


Obrázek 52: Porovnání S11 z měření a ze simulace v CST pro port 2

Na obrázku 52 je graf S11 velmi podobný jako na obrázku 51. Naměřený činitel odrazu S11 pro port 2 také téměř v celém zobrazeném kmitočtovém pásmu není větší než -10 dB. Podle měření je anténa nejlépe přizpůsobena na frekvenci 7,91 GHz, kde je hodnota S11 kolem -31 dB.

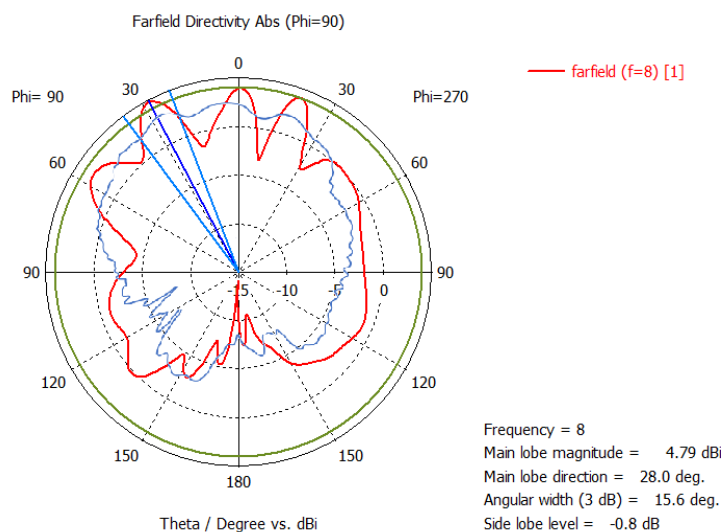
4.2.4 Porovnání měření směrových charakteristik se simulací

Na níže uvedených grafech jsou zobrazeny polární grafy směrových charakteristik antény vyrobené z textilního substrátu. Červenou barvou jsou zobrazeny výsledky simulace, světle modrý průběh znázorňuje naměřená data.

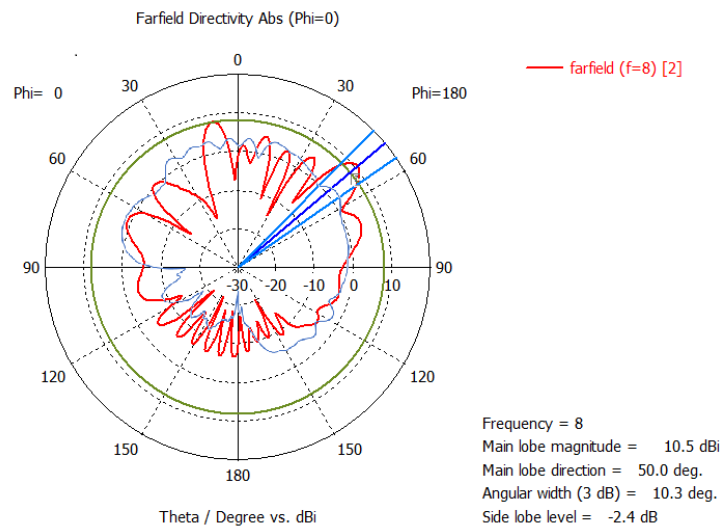


Obrázek 53: Polární grafy směrových charakteristik dvouvrstvé antény, rovina XZ, port 1

Na obrázku 53 jsou naměřené směrové charakteristiky roviny XZ při napájení z portu 1. Dochází k vychýlení vyzařování antény o 68° vůči rovině YZ. Nevýhodou je, že anténa nevyzařuje jedním hlavním lalokem, ale vyzařuje více laloky.

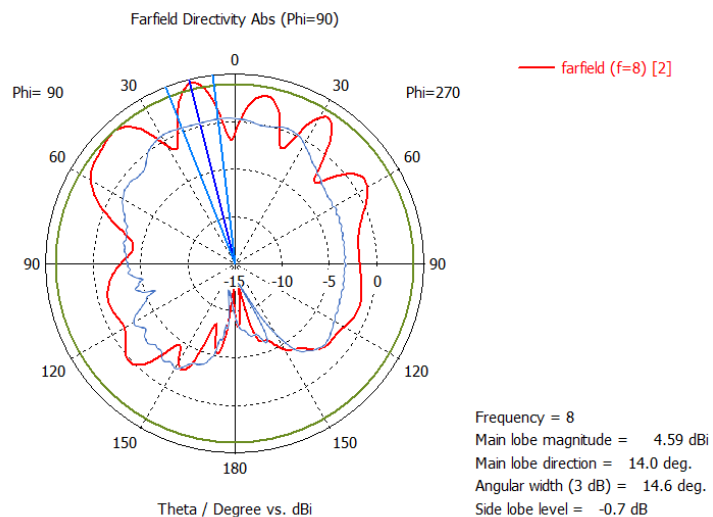


Obrázek 54: Polární grafy směrových charakteristik dvouvrstvé antény, rovina YZ, port 1



Obrázek 55: Polární grafy směrových charakteristik dvouvrstvé antény, rovina XZ, port 2

Na obrázku 55 je zobrazena podobná situace jako na obrázku 53. V tomto případě je anténa napájena z portu 2. Dochází k vychýlení vyzařování antény o 50° vůči rovině YZ. Také v tomto případě zde není patrný pouze jeden hlavní lalok, ale více menších laloků.



Obrázek 56: Polární grafy směrových charakteristik dvouvrstvé antény, rovina YZ, port 2

5 ZÁVĚR

Základ této diplomové práce byl vytvořen jako semestrální projekt, který byl v zimním semestru úspěšně obhájen. V letním semestru byl projekt dále rozšířen, obohacen o nové i vylepšené stávající anténní struktury a upraven na strukturu a rozsah diplomové práce.

Cílem této práce bylo navrhnout šterbinovou anténní řadu. Bylo vytvořeno několik různých modelů, které byly simulovány v programu CST MWS a jejich výsledky navzájem porovnány. Pro výrobu byly vybrány vhodné typy antén pro komunikaci v autě, které dosahovaly nejlepších výsledků simulace a bylo možné je poměrně jednoduše manuálně vyrobit. Základ první vyráběné antény by měl tvořit vzduchový substrát umístěný uvnitř vlnovodu. Vyrobit takovou anténu by ale bylo docela složité, a proto je jako opora použit polystyrén. Ten má relativní permitivitu blízkou 1 a ostatní parametry jsou také velmi podobné jako u vzduchu.

Na polystyrén byla nalepena upravená měděná fólie, do které byly za pomoci pracovníků školní dílny vyleptány šterbiny a díry na prokovy, které tvoří motiv antény. Poté byly postupně prokovy umístěny do správných otvorů a zapájeny. Nakonec byl připojen zlatý SMA konektor. V laboratoři proběhlo měření parametru S_{11} pomocí analyzátoru a výsledky byly zpracovány společně se simulací do stejného grafu, aby byly patrné rozdíly. V tomto případě nebyly měřeny směrové vyzařovací charakteristiky, ale grafy činitele odrazu S_{11} z měření a ze simulace se velmi dobře shodují, což potvrzuje správnost výpočtů a simulace.

Druhý typ vyrobené antény byl zvolen kvůli možné rekonfigurovatelnosti. Hlavním prvkem této antény by měly být PIN diody. Ty je možné spínat nebo rozepínat a volit tak stav, jestli šterbina elektromagnetickou vlnu vyzařuje nebo nevyzařuje. Díky tomu je možné řídit anténní svazek a měnit směrové vyzařování antény do požadovaného prostoru v osobním automobilu, kde je plánováno její využití pro komunikaci. Tento typ antény by ale byl náročný na výrobu, proto byla zvolena varianta se dvěma vrstvami textilu.

U této antény lze řídit směr vyzařování jednoduchou volbou napájecího portu. Anténa byla také vyrobena manuálně, kdy byly do měděné fólie vyleptány potřebné motivy a díry na prokovy. Po nalepení fólie na textil bylo nutné celou textilní vrstvu prošíť jehlou a nití, což představuje téměř 1000 stehů. Následovalo měření činitele odrazu S_{11} a měření směrových charakteristik ve stíněné komoře. Porovnané výsledky simulací a měření už v tomto případě nejsou tak přesvědčivé jako v případě první vyrobené antény se vzduchových substrátem. Velké množství ručně šitých prokovů a vzájemné sesazení obou textilních vrstev není dokonale přesné, a proto zde mohou vznikat malé odchylky jednotlivých parametrů, které mají velký vliv na celkovou přesnost a elektrické vlastnosti antény.

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: Politecnico di Torino, 2014, p. 448-451.
- [3] RAIDÁ, Z. Počítačové řešení komunikačních systémů. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [4] BALANIS, C.A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005, xvii, 1117 s. ISBN 978-0-471-66782-7.
- [5] ŠTUMPF, M., DE HOOP, A.T., LAGER, I.E. Pulsed electromagnetic field radiation from a narrow slot antenna with a dielectric layer. *Radio Science*. 2010, vol. 45, issue 5. DOI: 10.1029/2009RS004335.
- [6] Anténa. Wikipedia [online]. 2016 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ant%C3%A9na>
- [7] Vlnovod. Wikipedia [online]. 2016 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnovod>
- [8] PORČ, J. Automobilová anténa pro mobilní komunikaci. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009.
- [9] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., RAIDÁ, Z. Elektromagnetické vlny a vedení. 2. rozšířené a přepracované vydání. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 1999. ISBN 80-214-1261-5
- [10] GARG, Ramesh. Microstrip antenna design handbook. Boston: Artech House, 2001, 845 s. ISBN 08-900-6513-6.
- [11] Dvořák, P. Štěrbínová anténa. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014.
- [12] Smrček, J. Štěrbínová anténa pro systémy s více anténami. Bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.
- [13] *Microstrip Line Calculator* [online]. [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/ms_line_e.htm
- [14] *Design of Beamforming Slot Antenna Arrays using Substrate Integrated Waveguide*. Montreal, 2012.
- [15] *SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE MONOPOLAR RING-SLOT ANTENNA*. Brno, 2013.