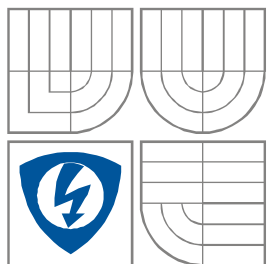




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ENERGIE UVNITŘ AUTOMOBILU

IN-CAR WIRELESS POWER TRANSFER

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Miroslav Cupal

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

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

**Student:** Bc. Miroslav Cupal

**ID:** 134286

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

**NÁZEV TÉMATU:**

## Bezdrátový přenos energie uvnitř automobilu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem projektu je navrhnout bezdrátové napájení sítě senzorů uvnitř automobilu. V první fázi projektu by měly být navrženy a vyrobeny všesměrová vysílací anténa a všesměrová přijímací anténa. Měl by být ověřen přenos energie nad elektricky vodivou rovinou. Energie by měla být přenášena v pásmu blízkém kmitočtu 8 GHz.

V druhé fázi by měla být všesměrová přijímací anténa nahrazena vhodnou anténou směrovou. Experimentálně by měl být ověřen a vzájemně porovnán bezdrátový přenos energie nad vodivou rovinou, a následně pod střechou reálného automobilu. Pozornost by měla být věnována plně kovové střeše a střeše s panoramatickým oknem.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LÁČÍK, J., MIKULÁŠEK, T., RAIDA, Z., URBANEC, T. Substrate integrated waveguide monopolar ring-slot antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, vol. 56, no. 8, p. 1865-1869. ISSN: 0895-2477.

[2] AGBINYA, J. I. *Wireless Power Transfer*, River Publishers, 2012, ISBN: 978-8-7923-2923-3.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 21.5.2015

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

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zaměřuje na návrh antén pro bezdrátový přenos energie uvnitř automobilu v blízkosti kmitočtu 8 GHz. Bezdrátovým přenosem energie se v minulém století zabývala řada vědců, kteří se soustředili na přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti. V současnosti je věnována pozornost metodám schopným přenášet energii s dobrou efektivitou na vzdálenost jednotek metrů pro nabíjení mobilních zařízení, bezdrátových čidel a dalších zařízení s nízkým příkonem.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

anténa, trychtýřová anténa, přenos energie, automobil

## **ABSTRACT**

The thesis is focused on the design of antennas for wireless power transfer inside a car near the frequency of 8 GHz. In the last century, a number of scientists dealt with wireless transmission of energy with high power and long distances. Currently, attention is given to methods capable of transmitting energy with good effectively over a distance of meters for charging mobile devices, wireless sensors and other devices with low power consumption.

## **KEYWORDS**

antenna, horn antenna, energy transfer, car

CUPAL, M. *Bezdrátový přenos energie uvnitř automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 40 s., 5 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Bezdrátový přenos energie uvnitř automobilu 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s 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 prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za cenné a podmětné rady při vedení práce. Také děkuji doc. Ing. Jaroslavu Láčíkovi ph.D a Ing. Janu Vélimovi za pomoc při měření a rady při návrhu antén.

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

# OBSAH

## Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>ix</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xi</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Bezdrátový přenos energie</b>	<b>2</b>
1.1 Elektromagnetická indukce.....	2
1.2 Rezonanční induktivní vazba.....	2
1.3 Radiové záření.....	3
<b>2 Vedení vlny po povrchu karoserie</b>	<b>4</b>
2.1 Buzení povrchové vlny.....	4
<b>3 Vysílací anténa</b>	<b>5</b>
3.1 Návrh vysílací antény.....	5
3.1.1 Vlnovod integrovaný do substrátu.....	5
3.1.2 Vazební štěrbina.....	7
3.1.3 Návrh přechodu mikropásek – SIW.....	7
3.1.4 Popis anténní vrstvy.....	8
3.2 Simulace vysílací antény.....	9
3.2.1 Simulace SIW.....	9
3.2.2 Simulace antény.....	11
3.2.3 Simulace antény nad vodivou plochou.....	13
3.2.4 Parametrická analýza.....	14
3.2.5 Simulace přenosu mezi dvěma anténami nad kovovou deskou.....	16
3.3 Experimentální ověření dosažených výsledků.....	17
3.3.1 Měření činitele odrazu na vstupu antén.....	17
3.3.2 Měření směrových charakteristik vysílací antény.....	18
3.3.3 Měření přenosu mezi dvěma vysílacími anténami.....	19
<b>4 Přijímací anténa</b>	<b>20</b>
4.1 Návrh trychtýřové antény.....	20

4.1.1 Výpočet rozměrů trychtýřové antény.....	20
4.2 Simulace přijímací antény.....	22
4.2.1 Parametrická analýza trychtýřové antény.....	25
4.2.2 Simulace přenosu mezi dvěma trychtýřovými anténami.....	30
4.3 Experimentální ověření dosažených výsledků trychtýřové antény.....	30
4.3.1 Měření činitele odrazu trychtýřové antény.....	30
4.3.2 Měření směrových charakteristik.....	32
4.3.3 Měření přenosu mezi dvěma trychtýřovými anténami.....	32
<b>5 Měření v automobilu</b>	<b>34</b>
<b>6 Závěr</b>	<b>37</b>
<b>Literatura</b>	<b>38</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>40</b>
<b>A Skript pro výpočet rozměru siw</b>	<b>41</b>
<b>B Fotografie antén</b>	<b>42</b>
<b>C Fotografie z měření přenosu</b>	<b>43</b>
<b>D Umístění antén v automobilu</b>	<b>44</b>
<b>E výsledky měření přenosu v automobilu 7,5 GHz – 8,5 GHz</b>	<b>45</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Blokový diagram technologie WiTricity[5].....	3
Obr. 2: Směrové charakteristiky vertikálního vodiče ve vertikální rovině.[6].....	4
Obr. 3: Nákres vlnovodu integrovaného do substrátu.....	5
Obr. 4: Nákres přechodu mikropásek - SIW.....	7
Obr. 5: Ilustrační nákres zářiče antény.....	8
Obr. 6: Model přechodu mikropásek - SIW.....	9
Obr. 7: Závislost činitele odrazu a přenosu na frekvenci pro SIW.....	10
Obr. 8: Rozložení elektrického pole uvnitř SIW.....	10
Obr. 9: Konfigurace napájení antény použité při simulacích.....	11
Obr. 10: Nákres kompletní antény se zobrazenými rozměry.....	11
Obr. 11: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu ve volném prostoru. .....	12
Obr. 12: Směrové charakteristiky vysílací antény ve volném prostoru. Rovina YZ vlevo, XZ uprostřed, XY vpravo.....	12
Obr. 13: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu v různých vzdálenostech od nekonečné vodivé plochy.....	13
Obr. 14: Směrové charakteristiky vysílací antény v blízkosti vodivé plochy pro 3 hlavní roviny. Rovina YZ vlevo, XZ uprostřed, XY vpravo.....	14
Obr. 15: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Rozmítání průměru dd.....	14
Obr. 16: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Rozmítání poloměru šterbiny.....	15
Obr. 17: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Rozmítání vzdálenosti zkratovacích pinů od středu antény.....	15
Obr. 18: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Rozmítání šířky šterbiny.....	16
Obr. 19: Přenos mezi dvěma vysílacími anténami nad vodivou plochou pro různé vzdálenosti.....	16
Obr. 20: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Měření antén ve volném prostoru.....	17
Obr. 21: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Měření antén ve vzdálenosti 5 mm od kovové plochy.....	18
Obr. 22: Porovnání měřených a simulovaných směrových charakteristik.....	18

Obr. 23: Závislost přenosu na frekvenci mezi dvěma vysílacími anténami nad kovovou plochou ve vzdálenosti 1 m.....	19
Obr. 24: Geometrické rozměry trychtýřové antény.....	21
Obr. 25: Ukázka typů rezonátorů.....	22
Obr. 26: Nákres trychtýřové antény s vyznačenými rozměry.....	23
Obr. 27: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro trychtýřovou anténu.....	23
Obr. 28: Směrové charakteristiky trychtýřové antény pro dva typy napájení. Rovina YZ vlevo, rovina XY vpravo.....	24
Obr. 29: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro trychtýřovou anténu v blízkosti vodivé plochy.....	24
Obr. 30: Směrové charakteristiky trychtýřové antény v blízkosti vodivé plochy. Rovina YZ vlevo, rovina XY vpravo.....	25
Obr. 31: Závislost činitele odrazu na frekvenci trychtýřové antény. Parametrické rozmítání rozměru $W$ .....	26
Obr. 32: Směrové charakteristiky trychtýřové antény, rozmítaný rozměr $W$ .....	26
Obr. 33: Závislost činitele odrazu na frekvenci trychtýřové antény. Parametrické rozmítání rozměru $s_0$ .....	27
Obr. 34: Směrové charakteristiky trychtýřové antény, rozmítaný rozměr $s_0$ .....	27
Obr. 35: Závislost činitele odrazu na frekvenci. Parametrické rozmítání $s_1$ .....	28
Obr. 36: Směrové charakteristiky v rovině XY a YZ pro rozmítaný parametr $s_1$ .....	28
Obr. 37: Závislost činitele odrazu na frekvenci. Rozmítaný rozměr $l_r$ .....	29
Obr. 38: Směrové charakteristiky trychtýřové antény, rozmítaný rozměr $l_r$ .....	29
Obr. 39: Závislost přenosu na frekvenci mezi dvěma trychtýřovými anténami.....	30
Obr. 40: Měřená závislost činitele odrazu trychtýřové antény na frekvenci, volný prostor.....	31
Obr. 41: Měřená závislost činitele odrazu na frekvenci pro trychtýřovou anténu v blízkosti kovové plochy.....	31
Obr. 42: Porovnání měřených a simulovaných směrových charakteristik v rovinách YZ a XY.....	32
Obr. 43: Závislost přenosu na frekvenci pro dvě trychtýřové antény nad kovovou plochou.....	33
Obr. 44: Nákres rozmístění antén uvnitř automobilu. $V$ – vysílací, čísla odpovídají pořadí měření. Převzato z [15], upraveno.....	34
Obr. 45: Měřená závislost přenosu na frekvenci pro různé umístění přijímací anténu uvnitř automobilu.....	35

# SEZNAM TABULEK

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Tabulka frekvencí UWB pásem [2].....	1
Tabulka 2: Rozměry antény v mm.....	11
Tabulka 3: Vypočtené rozměry trychtýřové antény.....	21
Tabulka 4: Rozměry trychtýřové antény.....	22
Tabulka 5: Přehled rozmístění antén uvnitř automobilu.....	34

# ÚVOD

Tato závěrečná práce se zabývá bezdrátovým přenosem elektrické energie pro napájení bezdrátových senzorů umístěných uvnitř automobilu. K přenosu elektrické energie je možné využít některou ze známých metod jako je elektromagnetické vyzařování, vázané rezonanční obvody, přenos laserem nebo transformace energie na krátkou vzdálenost (elektromagnetická indukce).[1]

Pro přenos energie uvnitř automobilu má být využito šíření elektromagnetické vlny po vnitřním povrchu karoserie na kmitočet 8 GHz, který leží v pásmu šesté skupiny UWB. [2]

Pro přenos energie jsou použity dvě rozdílné antény s rozdílnými požadavky na jejich vlastnosti. U vysílací antény je důležitá všesměrová vyzařovací charakteristika v horizontální rovině a ve vertikální rovině charakteristika podobná monopolu umístěnému nad zemní plochou. U přijímací antény je důležitý zisk antény a není vyžadována všesměrová charakteristika. U přijímací antény je také požadována větší jednoduchost antény, jelikož lze předpokládat že tato anténa bude využita ve větším počtu u různých senzorů umístěných v automobilu.

Tabulka 1: Tabulka frekvencí UWB pásem [2]

Skupina pásem	Číslo pásma	Nejnižší frekvence [MHz]	Střední frekvence [MHz]	Nejvyšší frekvence [MHz]
1	1	3168	3432	3696
	2	3696	3960	4224
	3	4224	4488	4752
2	4	4752	5016	5280
	5	5280	5544	5808
	6	5808	6072	6336
3	7	6336	6600	6864
	8	6864	7128	7392
	9	7392	7656	7920
4	10	7920	8184	8448
	11	8448	8712	8976
	12	8976	9240	9504
5	13	9504	9768	10032
	14	10032	10296	10560
6	9	7392	7656	7920
	10	7920	8184	8448
	11	8448	8712	8976

Práce je členěna do 6 kapitol, ve kterých jsou postupně probrány možnosti přenosu energie a jejich vhodnost pro použití v automobilu a prozkoumáno vedení vlny po povrchu karoserie. Dále je rozebrána konstrukce vysílací a přijímací antény včetně simulací a experimentálního ověření dosažených výsledků. Dále je provedeno měření uvnitř automobilu s anténami umístěnými v různých částech interiéru. V poslední kapitole jsou hodnoceny dosažené výsledky obou antén a možnosti využití navrženého řešení.

# 1 BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ENERGIE

Principy bezdrátového přenosu energie jsou známy již od prvních pokusů s vyzařováním elektromagnetické vlny. Historicky nejvýznamnějším badatelem v oblasti bezdrátového přenosu energie je Nikola Tesla, který plánoval stavbu celosvětové bezdrátové sítě pro přenos elektrické energie. V této kapitole jsou popsány základní možnosti bezdrátového přenosu energie a diskutována jejich vhodnost pro použití uvnitř automobilu.[1]

Postupně jsou probrány technologie přenosu energie, jejich základní vlastnosti, konstrukční požadavky a vhodnost pro automobilový průmysl. Jsou představeny současné trendy v oblasti bezdrátového přenosu energie a jejich komerční využití.

## 1.1 Elektromagnetická indukce

Tato metoda využívá dvou blízkých cívek, z nichž jedna je protékána střídavým proudem a druhá je buzena vzniklým magnetickým polem a je na ni indukováno střídavé napětí, které v uzavřeném obvodu vyvolá tok proudu. Tato metoda je neefektivnější, pokud jsou cívky vázány těsně u sebe, případně mají společné jádro jako například u transformátorů, kde je tento princip nejčastěji využíván.

Výhodou takto navázaných cívek je možnost měnit napětí na sekundární cívce počtem jejich závitů. Další výhodou je velký rozsah přenášených výkonů, kdy je možné konstruovat cívky pro velké rozsahy proudů. Nevýhodou je velmi rychle klesající efektivita při vzdalování obou cívek a také velká spotřeba vodiče na vinutí cívek.[2][3]

Elektromagnetická indukce je s výhodou využívána ke transformaci napětí v rozvodných soustavách, její použití pro bezdrátový přenos energie je potom méně časté vzhledem k popsaným problémům. V současné době je využívána pro přenos energie na krátkou vzdálenost s velmi nízkými výkony. Jako příklad je možné uvést nabíjení mobilního telefonu položeného na nabíjecí podložce nebo nabíjení elektrického zubního kartáčku umístěného ve stojanu. Pro napájení bezdrátových čidel uvnitř automobilu není tato technologie vhodná kvůli nízké účinnosti. Vzdálenost mezi vysílací anténou a senzorem lze předpokládat v rozsahu od desítek centimetrů až do 2 metrů. Další překážkou v nasazení této technologie je zvýšení elektromagnetického pozadí uvnitř automobilu. To by mohlo mýt i při nízkých výkonech vliv na zdraví posádky, stabilitu a funkčnost elektronických přístrojů v automobilu.[2]

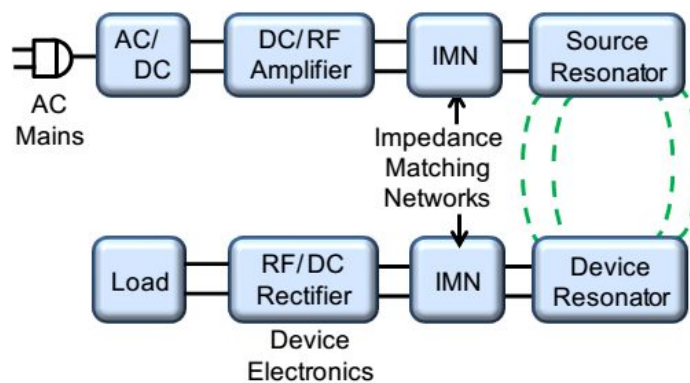
## 1.2 Rezonanční induktivní vazba

Tato metoda využívá vázaných rezonančních obvodů s vysokou jakostí, kdy je využita vazba mezi dvěma cívkami, které mohou být podstatně menší než u předchozí metody a mohou mít i různé tvary a velikosti. Vysílací a přijímací část jsou laděny na stejnou frekvenci, kterou je možné volit od jednotek kHz až po stovky MHz. Díky využití

magnetické rezonance je možné přenášet energii na velkou vzdálenost při zachování dobré účinnosti. [3][4]

Tato metoda je v dnešní době nejčastěji využívána pro bezdrátové napájení nejrůznějších elektronických zařízení. Využívá se pro nabíjecí podložky mobilních telefonů, ale i pro nabíjení elektromobilů a je základem pro mnohá komerční řešení jako například WiTricity, Rezence nebo Qi.[5]

Využití této technologie je možné i uvnitř automobilu, jelikož je velmi dobře přizpůsobitelná okolním podmínkám a je udáván minimální vliv na lidský organizmus. [5]



Obr. 1: Blokový diagram technologie WiTricity[5]

### 1.3 Radiové záření

Přenos energie pomocí radiových vln se skládá ze třech základních částí. Transformace stejnosměrného výkonu na vysokofrekvenční, přenos vysokofrekvenčního výkonu volným prostorem a zpětná transformace vysokofrekvenčního výkonu na stejnosměrný. Přitom je nutné udržet dobrou efektivitu ve všech částech. Za počátek výzkumu VF přenosu energie je možné považovat studii zabývající se touto technologií zpracovanou v roce 1958. V dalších letech bylo zkoumáno mnoho způsobů využití bezdrátového přenosu energie zejména v letectví, vojenské a vesmírné technice. Obecně byly zkoumány možnosti přenosu vysokých výkonů na velké vzdálenosti za pomoci vysoce směrových antén.[1]

Pro maximální efektivitu přenosu je nutné dodržet několik zásad, jako je přímá viditelnost mezi přijímačem a vysílačem a velmi úzký vyzařovací svazek tak, aby se energie šířila pouze přímo od vysílače k přijímači. Proto jsou vhodnými anténami pro mikrovlnný přenos energie paraboly, nebo anténní řady.[1]

Pro použití uvnitř automobilu je nutné zvážit některá omezení a také nároky na bezpečnost posádky. Je třeba zajistit, aby se vlna nešířila přímo prostorem automobilu, ale držela se pouze u povrchu karoserie a nebyla rušena elektronika automobilu. Vzhledem k omezenému prostoru není možné použít parabolické antény nebo anténní řady, které by dokázaly vyzařovat dostatečně úzký svazek.

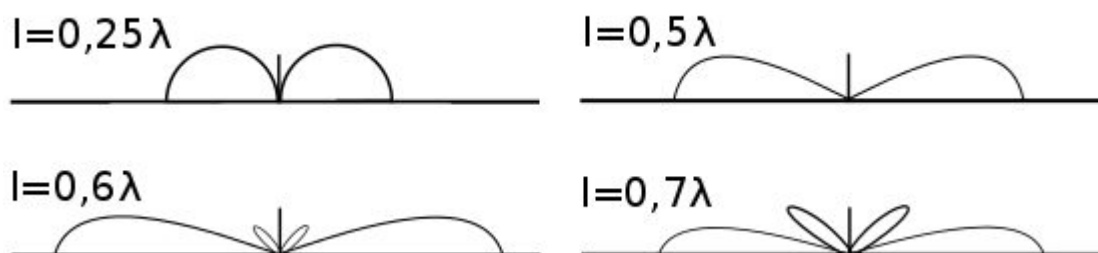
## 2 VEDENÍ VLNY PO POVRCHU KAROSERIE

Povrch karoserie automobilu je z velké části tvořen železem a sklem. Na rozhraní kov - vzduch a sklo - vzduch je možné uvažovat šíření povrchové elektromagnetické vlny. Povrchová vlna se šíří, pokud převládá vodivý proud nad proudem posuvným. Tato podmínka je na rozhraní železo – vzduch zajištěna, na rozhraní sklo - vzduch je dána podmínkou, že je sklo pokovené a alespoň částečně vodivé. Na základě těchto předpokladů je možné uvažovat šíření povrchové vlny po celém povrchu karoserie.

Útlum povrchové vlny roste s rostoucí frekvencí, vzdáleností od zářiče a poklesem vodivosti plochy nad kterou se vlna šíří. Při klasických aplikacích povrchové vlny (vysílání dlouhých vln) je maximální kmitočet omezen vlastnostmi půdy, zejména vodivostí a permitivitou. Vzhledem k omezené vodivosti a vysoké permitivitě půdy, jsou frekvence, při kterých je možné uvažovat šíření povrchové vlny maximálně stovky kilohertzů. Pokud uvažujeme dokonale vodivou plochu, může být frekvence několikanásobně vyšší.[6]

### 2.1 Buzení povrchové vlny

Jelikož je útlum vertikálně polarizované povrchové vlny menší, než vlny horizontální je žádoucí budít právě vertikálně polarizovanou vlnu. Dále se od antény očekává všesměrové vyzařování v horizontální rovině a relativně malý vyzařovací úhel v rovině vertikální. Tomuto požadavku velmi dobře odpovídá vertikální vodič umístěný nad vodivou plochou. Tato anténa září všesměrově v horizontální rovině, ve vertikální rovině je vyzařovací diagram závislý na poměru délky vodiče a vlnové délky. Na Obr. 2 jsou znázorněny vyzařovací diagramy ve vertikální rovině pro různé poměry vlnové délky a délky vodiče.[6]



Obr. 2: Směrové charakteristiky vertikálního vodiče ve vertikální rovině.[6]

Z obrázku vyplývá, že z hlediska směrových vlastností je nejvhodnější volit velikost vodiče jako 0,5 – 0,6 násobek vlnové délky a umístění vodiče co nejbližší vodivé plochy. Problémem takto jednoduché antény je malá účinnost záření a obtížné přizpůsobení. Tyto problémy bývají řešeny kapacitním prodloužením antény nebo změnou tloušťky vodiče. Vzhledem k použitým frekvencím by bylo nutné použít vertikální vodič v řádu jednotek centimetrů. Takovýto prostor není k dispozici a je tedy nutné použít anténu jiného konceptu.[6]

## 3 VYSÍLACÍ ANTÉNA

Při návrhu vysílací antény je nutné zvážit konstrukční požadavky plynoucí z umístění antény uvnitř automobilu. Anténa má být umístěna mezi střešní částí karoserie a polstrováním, které střechu zakrývá. Vzhledem k velmi úzkému prostoru je nutné z výběru vyloučit některé rozměrné typy antén. Vhodnou technologií se jeví technologie planárních antén, které mají výšku danu rozměrem použitého substrátu, který bývá v řádu jednotek milimetrů.[9]

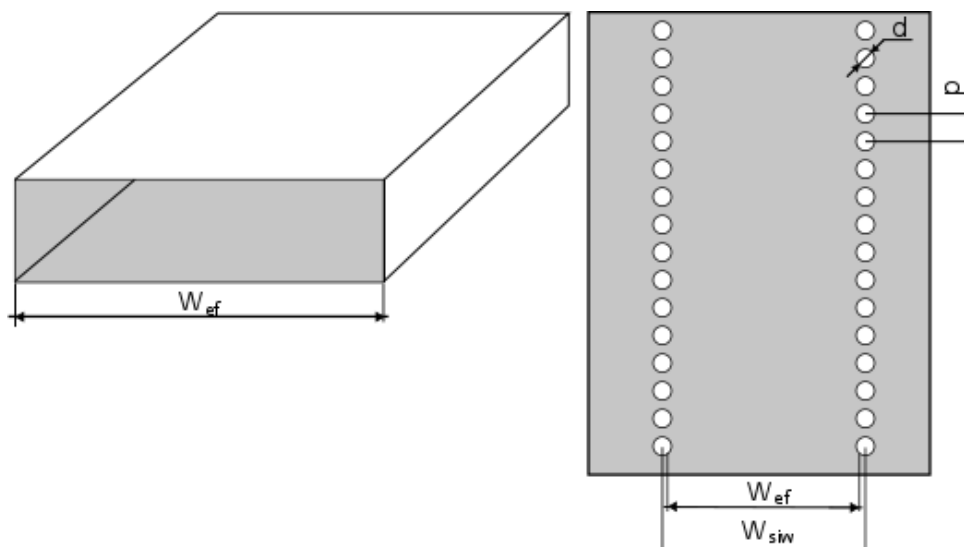
Pro bezdrátový přenos energie je využíván princip šíření povrchové vlny, která dosahuje nejlepších parametrů z hlediska útlumu pokud je polarizace vlny kolmá k rovině zemní plochy, případně ke karoserii automobilu. Tento požadavek opět zužuje výběr možných typů planárních antén. Jako vysílací anténa je využita prstencová šterbinová anténa napájena pomocí vlnovodu integrovaného do substrátu. [9]

Výhodou této antény je její směrová charakteristika, která je podobná směrové charakteristice vodiče kolmého na zemní plochu. Další výhodou je možnost volby napájení, například koaxiální sondou nebo přechodem mikropáskového vedení na vlnovod integrovaný do substrátu. Nevýhodou této antény je její konstrukční provedení, jelikož je vyrobena ze dvou vrstev rozdílného substrátu.

### 3.1 Návrh vysílací antény

#### 3.1.1 Vlnovod integrovaný do substrátu

Pro buzení samotné antény je využít vlnovod integrovaný do substrátu (dále SIW). Na Obr. 3 je nakreslen klasický vlnovod a SIW s vyznačeným příčným rozměrem. Mezi těmito rozměry platí vztah 4 respektive 5.



Obr. 3: Nákres vlnovodu integrovaného do substrátu

Technologie pro výrobu SIW je shodná s technologií výroby antény, a proto je možné jeho použití v úzkých prostorech. Výhody SIWu jsou zejména jednoduchá výrobní technologie a snadné vázání na planární obvody. Nevýhodou je větší útlum proti klasickému vlnovodu se vzduchovým dielektrikem, malá výška substrátu a tedy možnost šíření pouze vidů  $TE_{m0}$ , konečná vodivost stěn a malé vyzařování mezi prokovy. [7]

Jelikož má být k vedení energie využita frekvence 8 GHz, je dolní mezní frekvence SIWu stanovena na 6,2 GHz. Substrát je vyroben z materiálu Arlon 25N o relativní permitivitě  $\epsilon_r = 3,38$  a tloušťce  $h_1 = 0.762$  mm.

Pro výpočet rozměrů SIWu je možné využít analogii s klasickým vlnovodem a vlastnost, že SIWem se šíří pouze vidy  $TE_{m0}$ , kde  $m$  může nabývat kladných celých čísel. Pro výpočet ekvivalentního vlnovodu vyplněného dielektrikem o stejné permitivitě jako je permitivita substrátu je možné využít vztah:

$$w_{ef} = \frac{c}{2 \cdot f_m \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 6,2 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3,38}} = 13,16 \text{ mm} \quad , \quad (1)$$

kde  $w_{ef}$  je příčný rozměr ekvivalentního vlnovodu,  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $f_m$  je mezní frekvence vlnovodu,  $\epsilon_r$  je permitivita substrátu. Dle doporučení je nutné zvolit průměr prokůvů a jejich rozteč podle následujících poměrů:[7]

$$\frac{d}{w} < 1/8 \quad , \quad (2)$$

kde  $d$  je průměr prokovu a  $w$  je šířka vlnovodu. Druhým pravidlem je:

$$\frac{p}{d} < 2 \quad , \quad (3)$$

kde  $p$  je rozteč prokůvů a  $d$  je průměr prokovu. Vzhledem k možnostem výroby a doporučením, byl průměr prokůvů zvolen  $d = 1,2$  mm a rozteč mezi prokovy  $p = 2,58$  mm.

Dále byl pro přibližný výpočet příčného rozměru SIW použit zjednodušený vztah: [7]

$$w = w_{ef} + \frac{d^2}{0,95 \cdot p} = 13,16 + \frac{1,2^2}{0,95 \cdot 2,58} = 13,74 \text{ mm} \quad , \quad (4)$$

kde  $w$  je vzdálenost středu prokůvů SIW,  $w_{ef}$  je efektivní šířka vlnovodu,  $d$  je průměr prokůvů a  $p$  je vzdálenost mezi prokovy. Pro kontrolu, zda je možné použít hodnotu vypočtenou pomocí jednoduššího vztahu byl proveden kontrolní výpočet [7].

$$w_{ef} = w - \frac{1,08 \cdot d^2}{p} + \frac{0,1 \cdot d^2}{w} = 13,74 - 1,08 \cdot \left( \frac{1,2^2}{2,58} \right) + 0,1 \cdot \left( \frac{1,2^2}{13,74} \right) = 13,154 \text{ mm} \quad , \quad (5)$$

kde  $w$  je vzdálenost středu prokůvů SIW,  $w_{ef}$  je efektivní šířka vlnovodu,  $d$  je průměr prokůvů a  $p$  je vzdálenost mezi prokovy. Při zpětné kontrole vypočtených rozměrů  $w_{ef}$  je vidět, že odchylka zjednodušeného vztahu a vztahu složitějšího je 0,006 mm . Konečný rozměr SIW byl zaokrouhlen na 13,8 mm. Zadní strana SIW je zakončena prokovy, jejichž parametry jsou podobné parametrům prokůvů tvořícím boční stěny SIWu. Průměr prokůvů tvořících zadní stěnu je  $d = 1,2$  mm a jejich rozteč je  $p_x = 2,3$  mm. Na zadní stěně jsou návrhové podmínky splněny bezzbytku.

Pro zrychlení výpočtu a jeho lepší přehlednost byl vytvořen skript v programu Scilab, který po zadání mezní a pracovní frekvence vypočítá rozměr ekvivalentního vlnovodu  $w_{ef}$ , velikost vlnovodu SIW  $w$  a další parametry. Zdrojový kód tohoto skriptu je uveden v příloze A.

### 3.1.2 Vazební štěrbin

Vazební štěrbin slouží pro spojení anténní vrstvy a vlnovodu integrovaného do substrátu. U této antény je použita kruhová vazební štěrbin umístěná v horní straně vlnovodu. Její umístění a velikost je kritická pro správné navázání obou částí antény.

Vzdálenost štěrbin od zakončení vlnovodu je dána rozložením pole uvnitř vlnovodu. Štěrbiny je nutné umístit do maxima elektrického pole, tedy do vzdálenosti čtvrtiny vlnové délky od zakončovacích proků. Délka vlny v materiálu Arlon 25N je

$$\lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{8 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3,38}} = 20,4 \text{ mm} \quad (6)$$

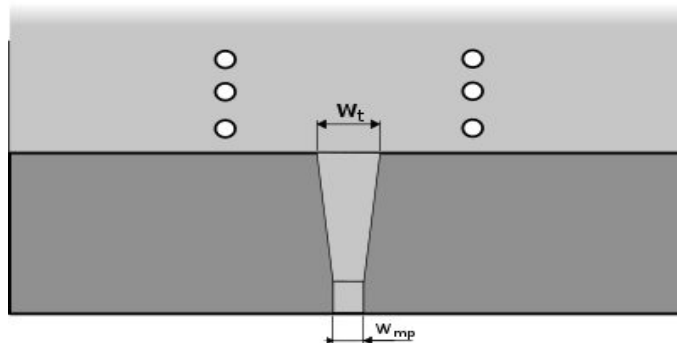
kde  $\lambda$  je délka vlny,  $c$  je rychlost světla,  $f$  je frekvence,  $\epsilon_r$  je permitivita prostředí. Ve vlnovodu je fázová rychlost vlny větší, než v prostředí o stejné permitivitě jakou má výplň vlnovodu, proto je nutné provést výpočet délky vlny ve vlnovodu:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}} = \frac{20,4}{\sqrt{1 - \left(\frac{20,4}{2 \cdot 13,8}\right)^2}} = 30,3 \text{ mm} \quad (7)$$

kde  $\lambda_g$  je délka vlny ve vlnovodu,  $\lambda$  je délka vlny v prostředí o permitivitě  $\epsilon_r$  a  $\lambda_m$  je mezní délka vlny. Vzdálenost vazební štěrbin od konce vlnovodu by měla být 7,6 mm.

### 3.1.3 Návrh přechodu mikropásek – SIW

Při snaze zachovat minimální rozměry antény je nutné z možných řešení vyloučit přímý přechod z koaxiálního kabelu na SIW pomocí sondy. Napájení antény je řešeno pomocí mikropáskového vedení, které je navázáno na vlnovod integrovaný do substrátu. Pro navázání mikropáskového vedení je možné využít několik metod, jako je pozvolná transformace impedance, proudová sonda nebo štěrbinový dipól. Jako vhodný způsob byl zvolen přechod za pomoci impedančního transformátoru, který je z uvedených možností nejjednodušší. [9]



Obr. 4: Návrh přechodu mikropásek - SIW

Pro výpočet šířky mikropáskového vedení bylo využito makro integrované v programu CST MWS. Vstupní parametry pro výpočet mikropáskového vedení byly: permitivita substrátu  $\epsilon_r = 3,38$ , tloušťka substrátu  $h_1 = 0,762$  mm požadovaná impedance  $Z_{mp} = 50 \Omega$ . Šířka použitého mikropásku byla vypočtena  $w_{mp} = 1,68$  mm. Pro výpočet rozměru transformátoru impedance byl použit vztah [9]:

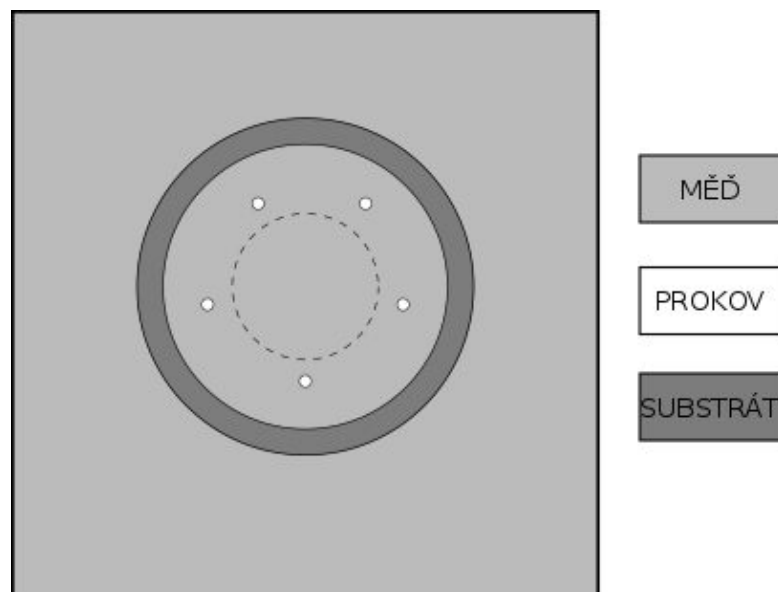
$$w_t = \frac{\eta \cdot h \left[ \frac{w_{mp}}{h_1} + 1,393 + 0,667 \cdot \ln \left( \frac{w_{mp}}{h_1} + 1,444 \right) \right]}{120 \pi} =$$

$$\frac{376,7 \cdot 0,7 \left[ \frac{1,68}{0,762} + 1,393 + 0,667 \cdot \ln \left( \frac{1,68}{0,7} + 1,444 \right) \right]}{120 \pi} = 3,39 \text{ mm}$$
(8)

kde  $w_t$  je šířka transformátoru při ústí vlnovodu,  $\eta$  je charakteristická impedance volného prostoru,  $w_{mp}$  je šířka mikropáskového vedení,  $h_1$  je tloušťka substrátu.

### 3.1.4 Popis anténní vrstvy

Anténa je tvořena oboustranně pokoveným substrátem Arlon CuClad 217 o rozměrech 36 x 36 mm. Relativní permitivita substrátu Arlon CuClad 217 je rovna  $\epsilon_r = 2,17$  a tloušťka  $h = 0,254$ . Na spodní straně antény je umístěna vazební štěrbinu, kterou je anténa buzena, tato štěrbinu byla podle původního návrhu umístěna ve středu destičky, ale optimalizací byla posunuta o 0,91 mm směrem k okraji. Na vrchní straně antény je umístěna prstencová štěrbinu, která je soustředná s vazební štěrbinou na spodní straně antény. Prokovy umístěné v anténní vrstvě slouží k tvarování ekvivalentního magnetického proudu. Tím dochází k úpravě směrové charakteristiky tak, že minimum záření je v ose kolmé na střed antény. Pohled na vrchní stranu antény je na Obr. 5. Fotografie vyrobené antény je uvedena v příloze B. [8]



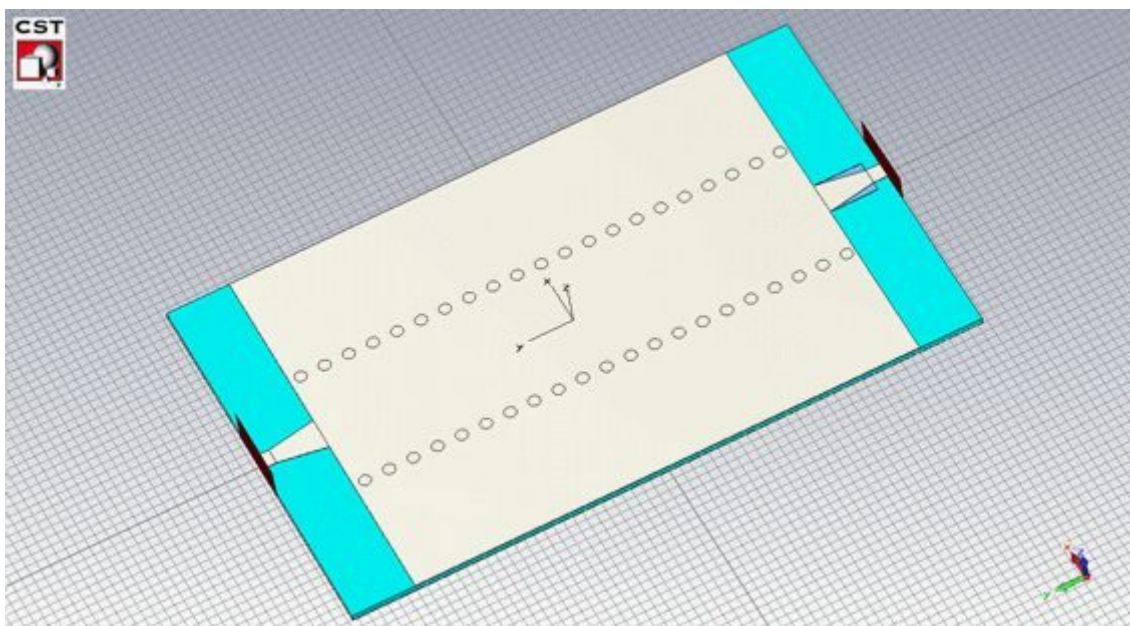
Obr. 5: Ilustrační nákres zářiče antény

## 3.2 Simulace vysílací antény

Simulace antény byla provedena v programu CST Microwave Studio. Byl simulován přechod mikropásek – SIW a následně kompletní anténa. Vzhledem ke složitosti antény byla provedena parametrická analýza antény a optimalizace impedančního přizpůsobení antény a vyzařovací charakteristiky ve volném prostoru. Následně byla anténa umístěna nad nekonečnou vodivou plochu simulující střechu automobilu a byl porovnán vliv umístění antény na vyzařovací charakteristiku a činitel odrazu. V poslední části této kapitoly jsou uvedeny výsledky simulací dvou vysílacích antén umístěných nad nekonečnou vodivou plochou ve vzdálenosti 20, 50, 80 a 100 cm.

### 3.2.1 Simulace SIW

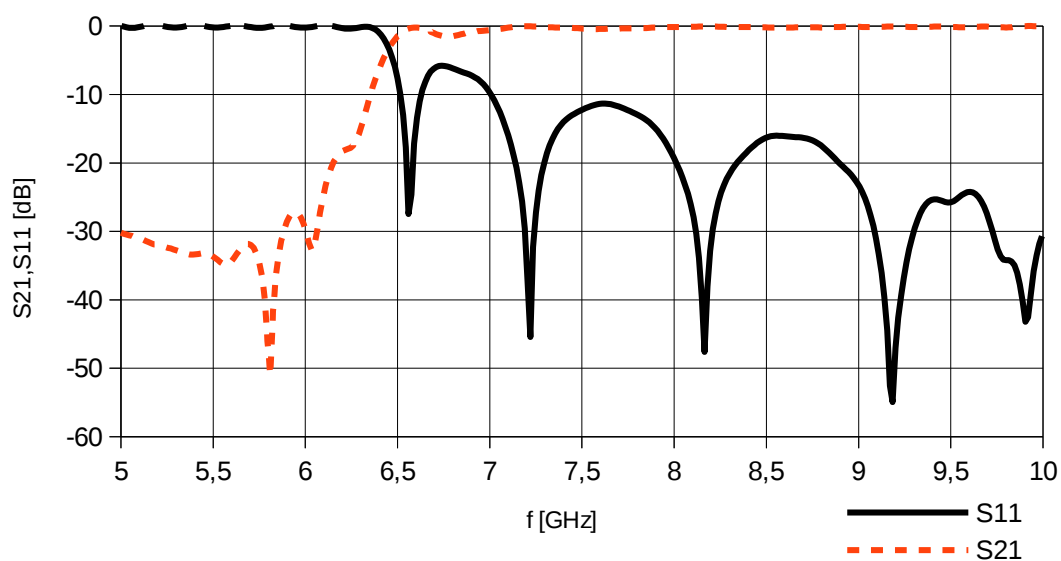
Vzhledem ke komplexnosti návrhu antény byla ověřena správná funkce vlnovodu integrovaného do substrátu a přechodu mikropásek – SIW. Za tímto účelem byla vytvořena jednoduchá struktura sestávající ze dvou přechodů vypočtených v kapitole 3.1.1 a úseku vlnovodu integrovaného do substrátu. Tato simulace je zaměřena na průběh činitele odrazu a přenosu mezi porty 1 a 2 v závislosti na frekvenci, a také na rozložení napěťového potenciálu uvnitř vlnovodu. Celá struktura je zobrazena na Obr. 6.



Obr. 6: Model přechodu mikropásek - SIW

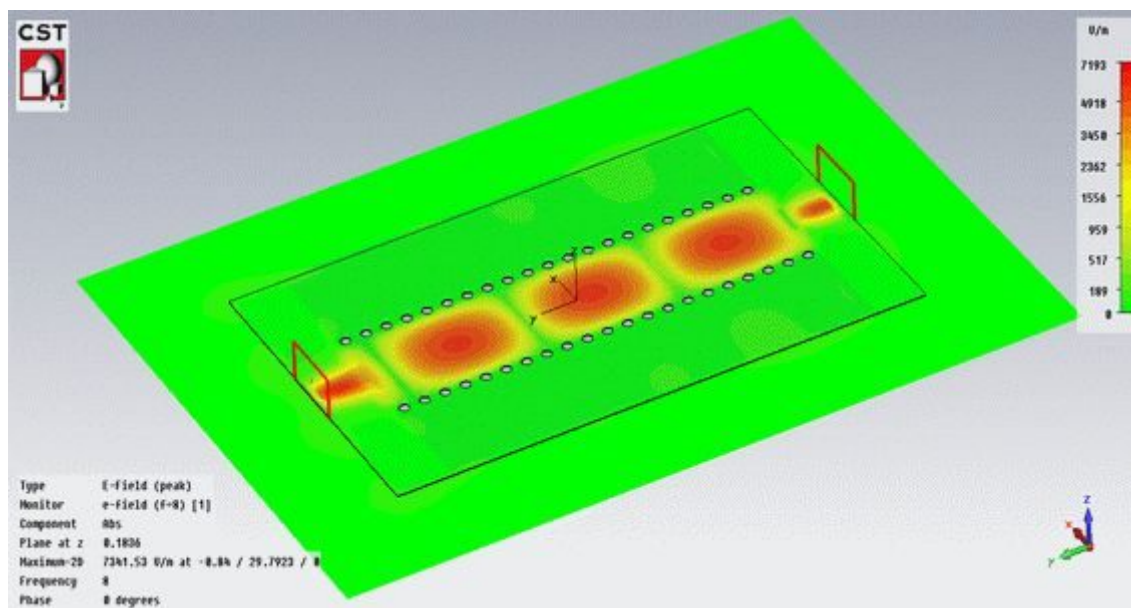
Na Obr. 7 jsou znázorněny průběhy činitele odrazu na vstupu SIW a přenosu mezi porty 1 a 2. Z těchto průběhů vyplývá, že SIW má stabilní přenosové parametry od frekvence 7 GHz, což je plně postačující pro použití v celém pásmu bangroup 6, do kterého spadá pracovní frekvence 8 GHz.

Závislost činitele odrazu a přenosu SIW na frekvenci



Obr. 7: Závislost činitele odrazu a přenosu na frekvenci pro SIW

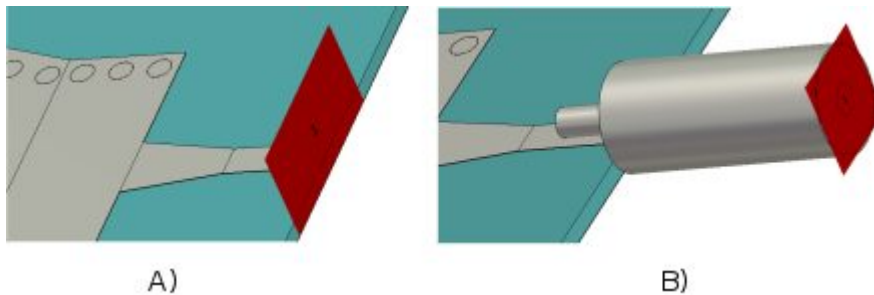
Na Obr. 8 je vykresleno rozložení elektrického pole uvnitř SIWu. Na tomto obrázku není pozorovatelné prosakování mezi prokovy a rozložení pole je podle teoretických předpokladů.



Obr. 8: Rozložení elektrického pole uvnitř SIW

### 3.2.2 Simulace antény

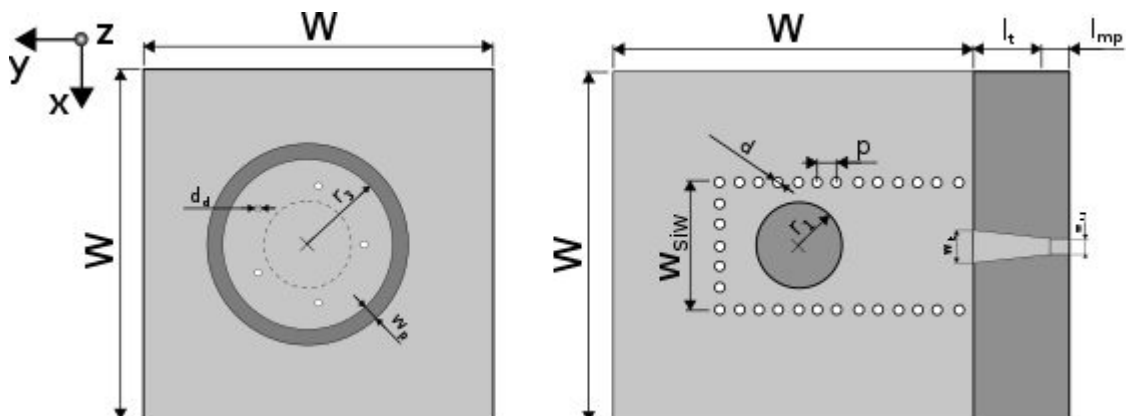
Simulace antény byla provedena ve třech základních konfiguracích. V první konfiguraci byla anténa simulována ve volném prostoru a napájení bylo řešeno vlnovodným portem přímo na mikropáskové vedení, jak je vidět na Obr. 9 A). V druhé konfiguraci bylo napájení řešeno pomocí části koaxiálního kabelu, který simuluje SMA konektor Obr. 9 B). Jako poslední byla provedena simulace antény umístěné nad vodivou plochu, která reprezentuje střechu automobilu. V Tabulce 2 jsou uvedeny rozměry, se kterými byla anténa simulována ve všech konfiguracích. Náčrsek antény je uveden na Obr. 10.



Obr. 9: Konfigurace napájení antény použité při simulacích

Tabulka 2: Rozměry antény v mm

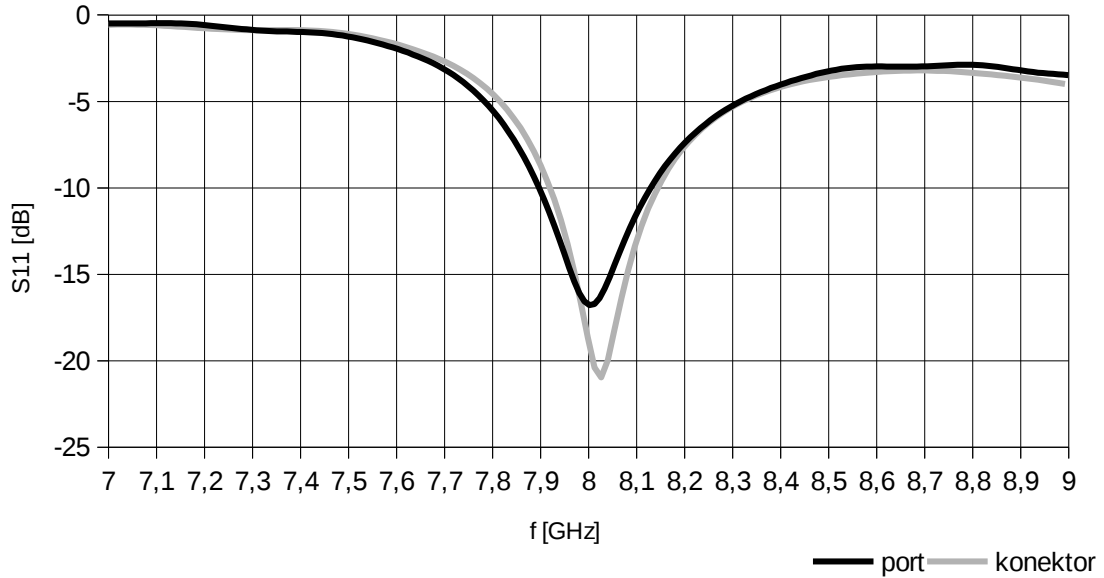
Rozměr	$W$	$L_v$	$L_{mp}$	$L_t$	$W_s$
Hodnota	36	40	1,5	5	13,8
Rozměr	$W_T$	$d$	$p$	$W_{mp}$	$W_p$
Hodnota	3,39	1,2	2,58	1,68	1,6
Rozměr	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$d_d$	
Hodnota	9	7,2	8,77	0,8	



Obr. 10: Náčrsek kompletní antény se zobrazenými rozměry

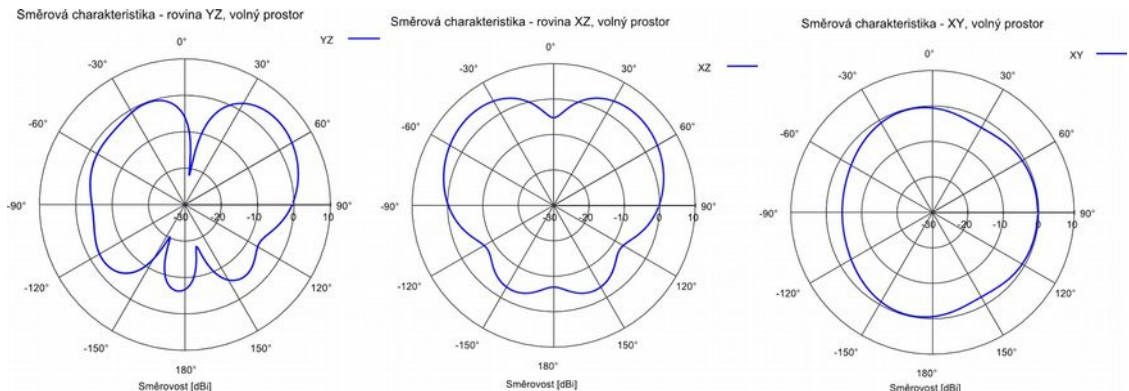
Průběh činitele odrazu pro anténu v první a druhé konfiguraci je uveden na Obr. 11. Anténa je přizpůsobena na frekvenci 8 GHz s činitelem odrazu na vstupu -17 dB respektive -21 dB pro anténu napájenou koaxiálním vedením. Šířka pásma antény je  $BW = 225 \text{ MHz}$ , v procentuálním vyjádření  $BW\% = 2,82 \%$ .

Závislost činitele odrazu na frekvenci



Obr. 11: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu ve volném prostoru.

Směrové charakteristiky jsou vykresleny pro rovinu rovnoběžnou s plochou antény (XY) a roviny na plochu antény kolmou (YZ a XZ). V rovině antény má být anténa všesměrová, tak aby byla energie dostupná po celém povrchu karoserie automobilu. V rovině kolmé na plochu antény má být minimum vyzařování v ose antény a maximum v rovině antény. Ve volném prostoru se směrové charakteristiky pouze vzdáleně přibližují požadovanému průběhu. V horizontální rovině vykazuje anténa velmi dobré všesměrové vlastnosti. Ve vertikální rovině je minimum mírně vychýleno od osy antény a maxima nejsou v ideální pozici pro buzení povrchové vlny.

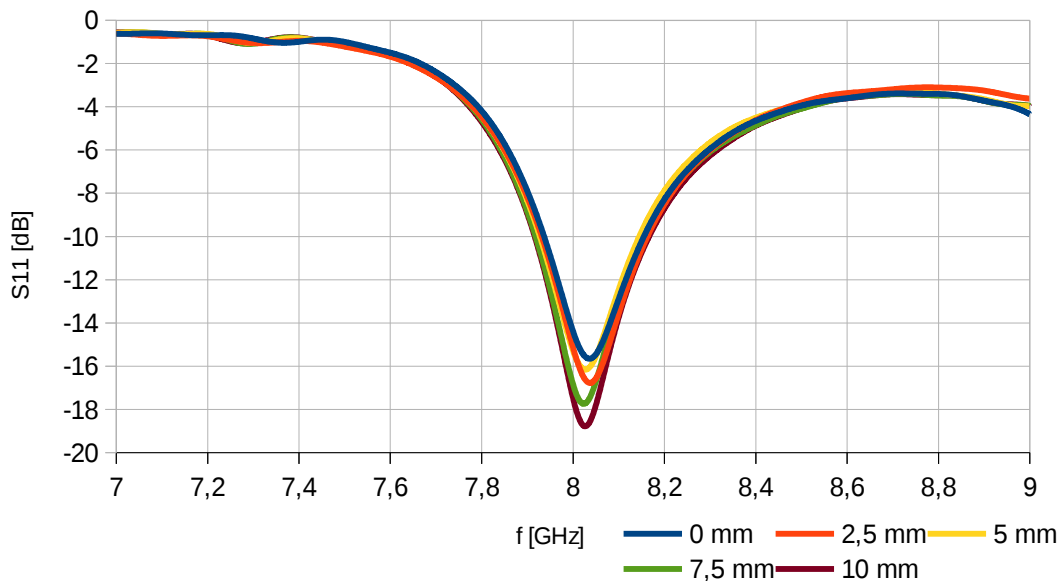


Obr. 12: Směrové charakteristiky vysílací antény ve volném prostoru. Rovina YZ vlevo, XZ uprostřed, XY vpravo.

### 3.2.3 Simulace antény nad vodivou plochou

Vzhledem k časové náročnosti simulací byla střecha automobilu, u které má být anténa umístěna, nahrazena nekonečně rozlehlou vodivou plochou. Anténa byla umístěna do různých vzdáleností od této plochy. Tyto vzdálenosti jsou v rozsahu 0 mm až 10 mm s krokem 2,5 mm. Aby mohla být simulace provedena ve všech uvedených vzdálenostech, byla použita anténa napájená pomocí vlnového portu a mikropásku. Pro všechny uvedené vzdálenosti je na Obr. 13 zobrazen činitel odrazu na vstupu antény  $S_{11}$ . Směrové charakteristiky jsou pro rozmítané vzdálenosti antény od plochy zobrazeny na Obr. 14.

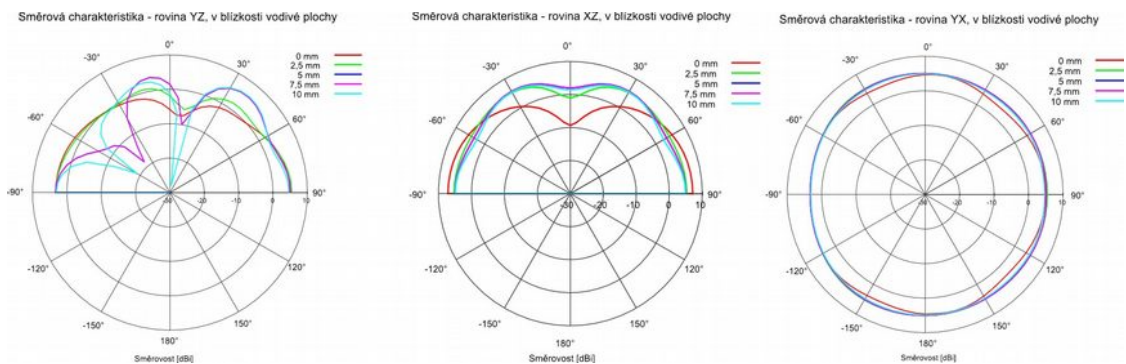
Závislost činitele odrazu na frekvenci - různá vzdálenost od vodivé plochy



Obr. 13: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu v různých vzdálenostech od nekonečné vodivé plochy.

Z grafu je patrné, že změnou vzdálenosti mezi anténou a nekonečnou vodivou plochou nedochází k výrazným změnám činitele odrazu ani k výrazné změně šířky pásma antény.

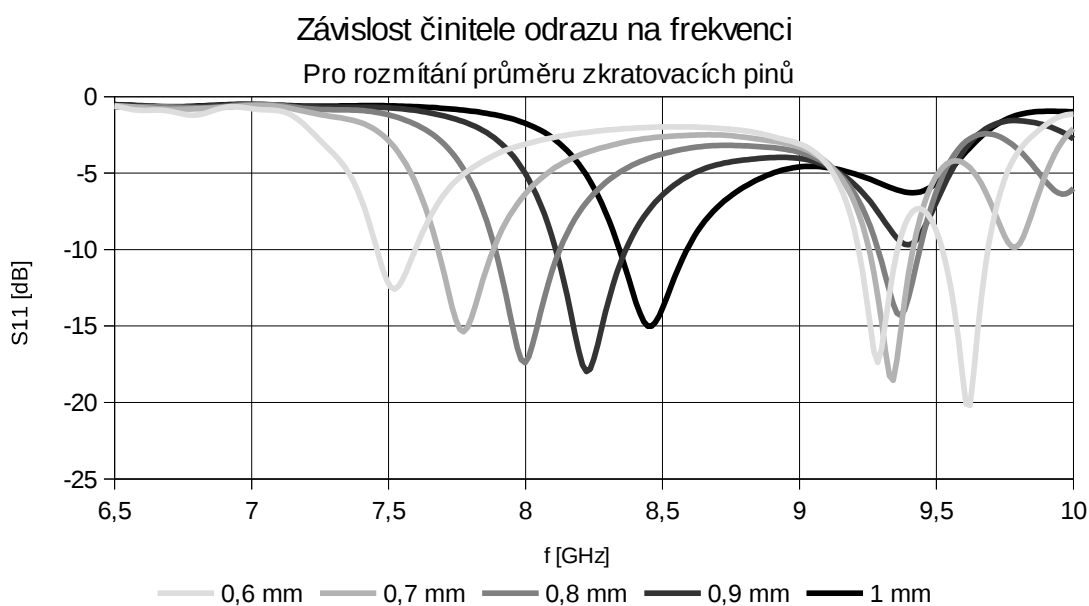
Směrové charakteristiky antény v blízkosti vodivé plochy se liší podle vzdálenosti. Pro přiléhající anténu jsou charakteristiky srovnatelné s vodičem kolmým na vodivou plochu. S rostoucí vzdáleností se charakteristiky stále více deformují a narůstá vyzařování do otevřeného prostoru. Také se objevují minima v několika směrech. Směrové charakteristiky v rovině XY (rovině antény) vykazují všesměrový charakter pro všechny případy vzdálenosti. Zisk antény se pohybuje v rozsahu 3,3 dBi až 5,1 dBi pro všechny vzdálenosti antény od kovové plochy.



Obr. 14: Směrové charakteristiky vysílací antény v blízkosti vodivé plochy pro 3 hlavní roviny. Rovina YZ vlevo, XZ uprostřed, XY vpravo.

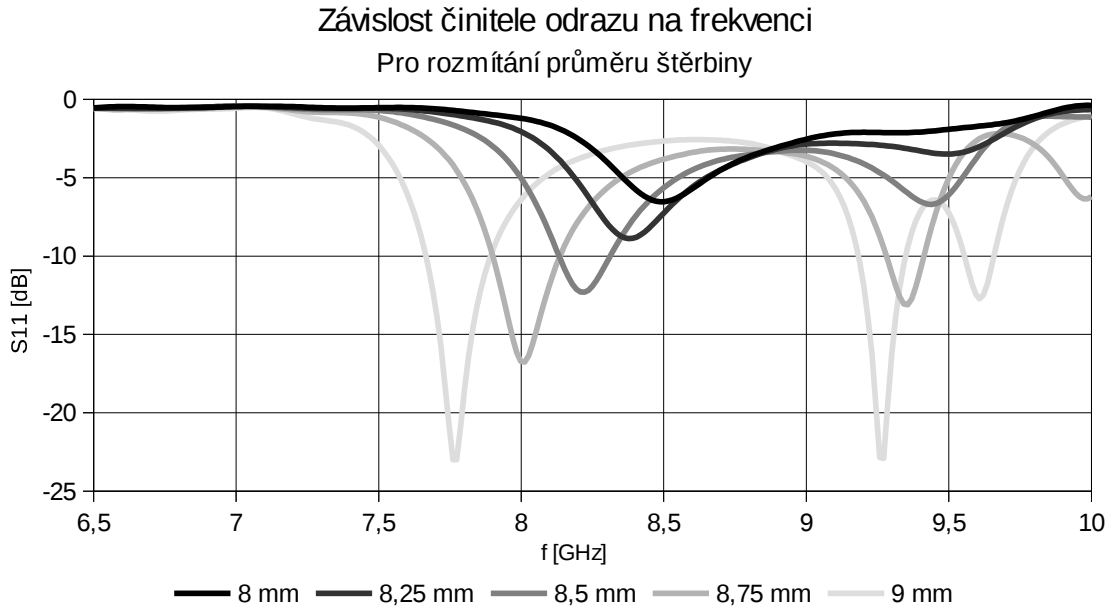
### 3.2.4 Parametrická analýza

Při změně rozměrů antény dochází ke změně rezonanční frekvence a vstupní impedance antény. Při porovnání průběhů uvedených v této kapitole, je dobře patrný vliv změny rozměrů antény na rezonanční frekvenci a vstupní impedanci antén. Nejvíce ovlivňujícím rozměrem antény je vzdálenost a průměr zkratovacích pinů. Z Obr. 45 je patrné, že změna průměru zkratovacího pinu o 0,1 mm posune rezonanční frekvenci o 240 MHz.



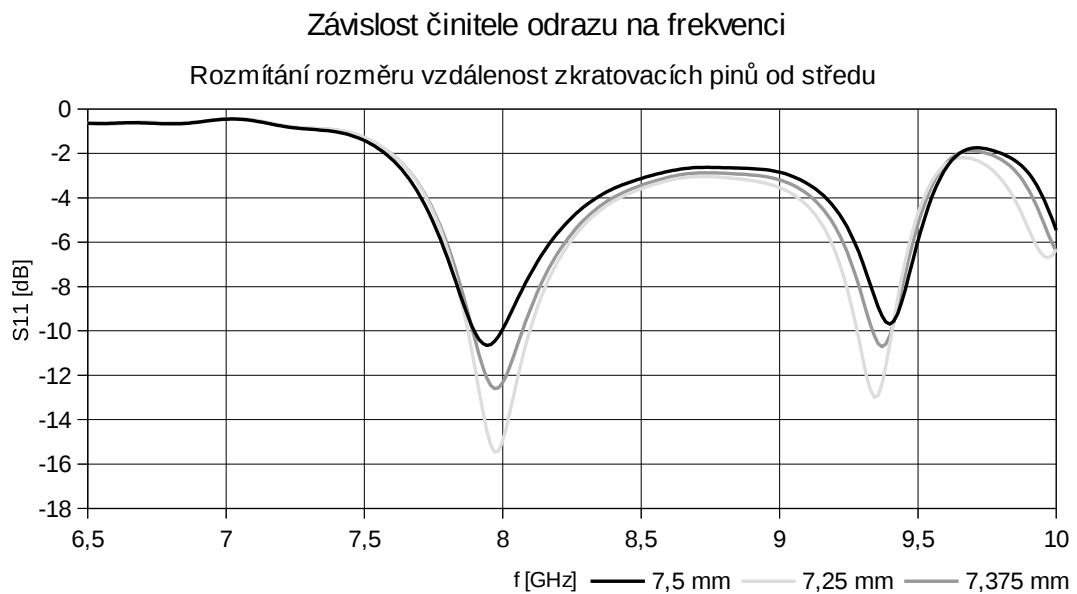
Obr. 15: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Rozmítání průměru  $d_a$ .

Druhým nejvýznamnějším parametrem je poloměr štěrbiny  $r_1$ . Tento rozměr byl rozmítán v rozsahu 8 mm a 9 mm, při kroku 0,25 mm. Na Obr. 16 je dobře viditelná závislost rezonanční frekvence antény na obvodu rezonanční štěrbiny. Také dochází k výrazné změně činitele odrazu v rozsahu 1,5 GHz.



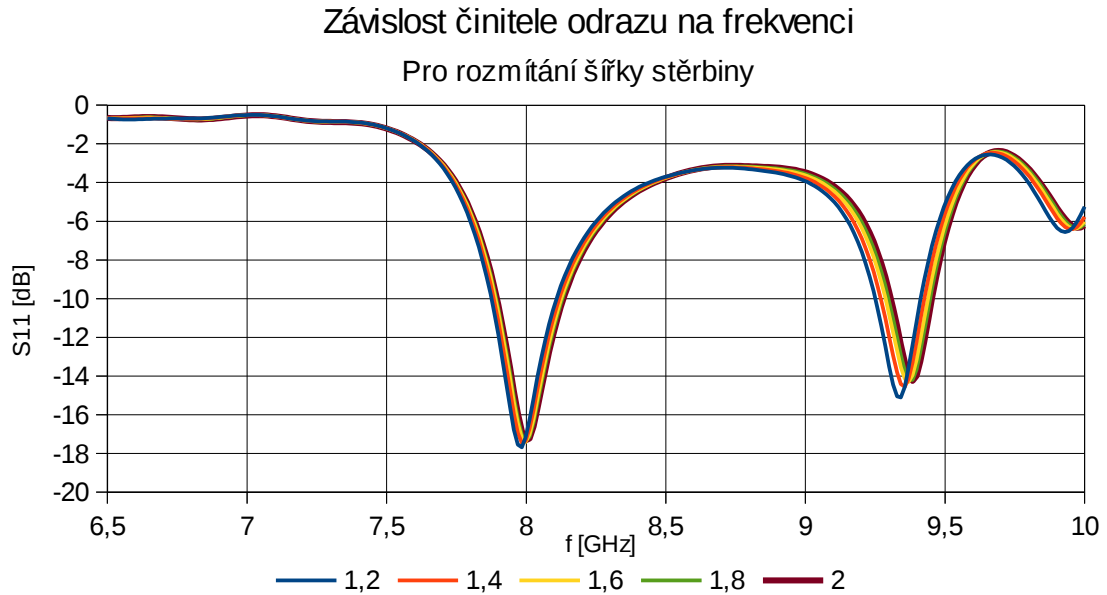
Obr. 16: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Rozmítání poloměru štěrbiny.

Dalším rozmítaným rozměrem je vzdálenost zkratovacích pinů od středu antény, která má výrazný vliv na činitel odrazu na vstupu antény a menší vliv na rezonanční frekvenci. U tohoto rozměru jsou uvedeny pouze tři hodnoty, jelikož pro další dva rozměry vykazovala simulace nestabilitu a její výsledky nemohou být považovány za přesné.



Obr. 17: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Rozmítání vzdálenosti zkratovacích pinů od středu antény.

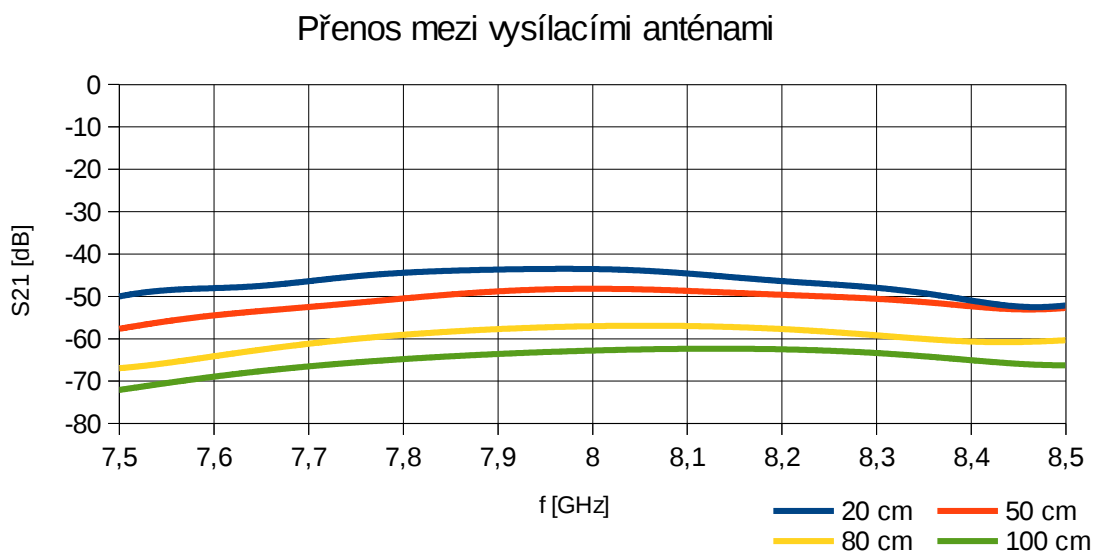
Poslední parametrická analýza se zabývá vlivem změny šířky vyzářovací šterbiny. Šířka šterbiny nemá výraznější vliv na rezonanční frekvenci, ani na přizpůsobení antény v rozsahu 1,2 mm do 2 mm.



Obr. 18: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Rozmítání šířky šterbiny.

### 3.2.5 Simulace přenosu mezi dvěma anténami nad kovovou deskou

Byl simulován přenos mezi dvěma anténami umístěnými nad nekonečně rozlehlou vodivou plochou. Vzdálenost antén byla 20, 50, 80 a 100 cm. Anténa byla simulována ve vzdálenosti 2,5 mm od vodivé plochy. Dosažené výsledky jsou pro různé vzdálenosti antén zobrazeny na Obr. 19 .



Obr. 19: Přenos mezi dvěma vysílacími anténami nad vodivou plochou pro různé vzdálenosti.

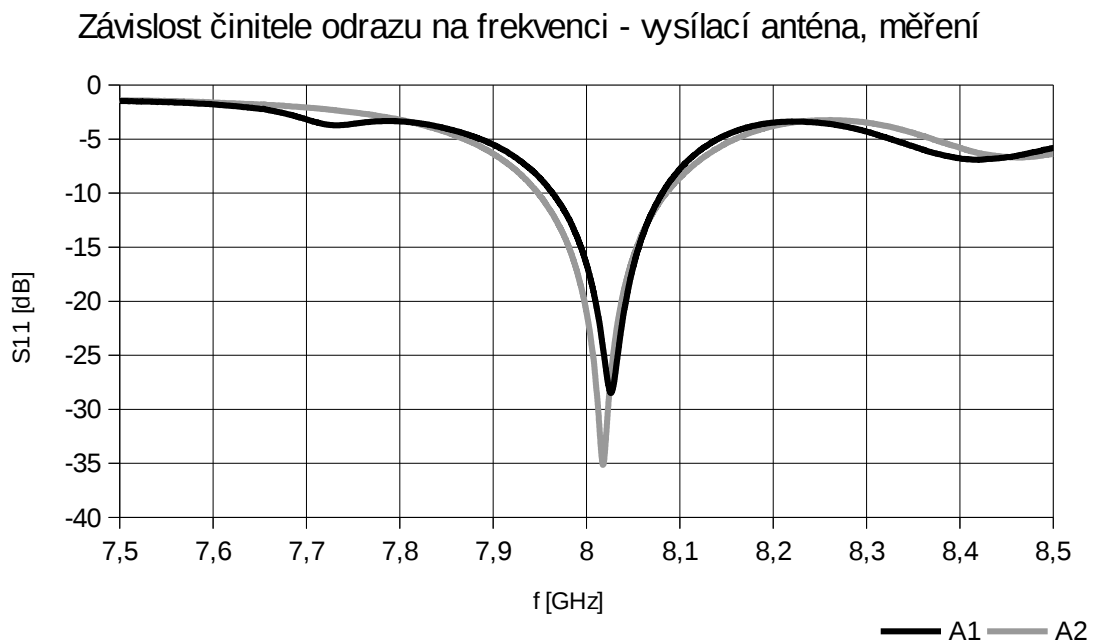
Přenos mezi dvěma vysílacími anténami se pohybuje na pracovním kmitočtu 8 GHz v rozsahu -43 dB pro vzdálenost 20 cm až do -67 dB pro vzdálenost antén 1 m.

### 3.3 Experimentální ověření dosažených výsledků

Po potřeby měření přenosu energie byly vyrobeny dva vzorky vysílací antény. U těchto vzorků byl změřen činitel odrazu  $S_{11}$ . Dále byl změřen přenos mezi anténami  $S_{21}$  umístěnými nad kovovou plochou, která simuluje střechu automobilu. Vzdálenost mezi kovovou plochou a anténou byla nastavena na 5 mm. Tato vzdálenost je dána použitým typem konektoru a také použitým koaxiálním kabelem. Dalšími měřeními parametry jsou směrové charakteristiky antény v rovinách XY, YZ a XZ. Směrové charakteristiky byly změřeny na jednom vzorku antény.

#### 3.3.1 Měření činitele odrazu na vstupu antén

Při měření činitele odrazu na vstupu antén byl odhalen konstrukční nedostatek. Jelikož je anténa tvořena dvěma substráty vázanými štěrbinou, je velmi důležitá přesnost sesazení obou vrstev a také vzdálenost mezi vrstvami. Konstrukční nedostatek spočívá v chybějících sesazovacích značkách, například dírkách na kraji obou substrátů, díky kterým by bylo možné jednoduše a přesně sesadit obě vrstvy. I přes popsané problémy se podařilo obě vrstvy sesadit s relativně dobrou přesností. Dalším konstrukčním nedostatkem je zvětšení mezery mezi oběma substráty vlivem zvoleného spojení. Závislost činitele odrazu na frekvenci měřených antén je zobrazena na Obr. 20.



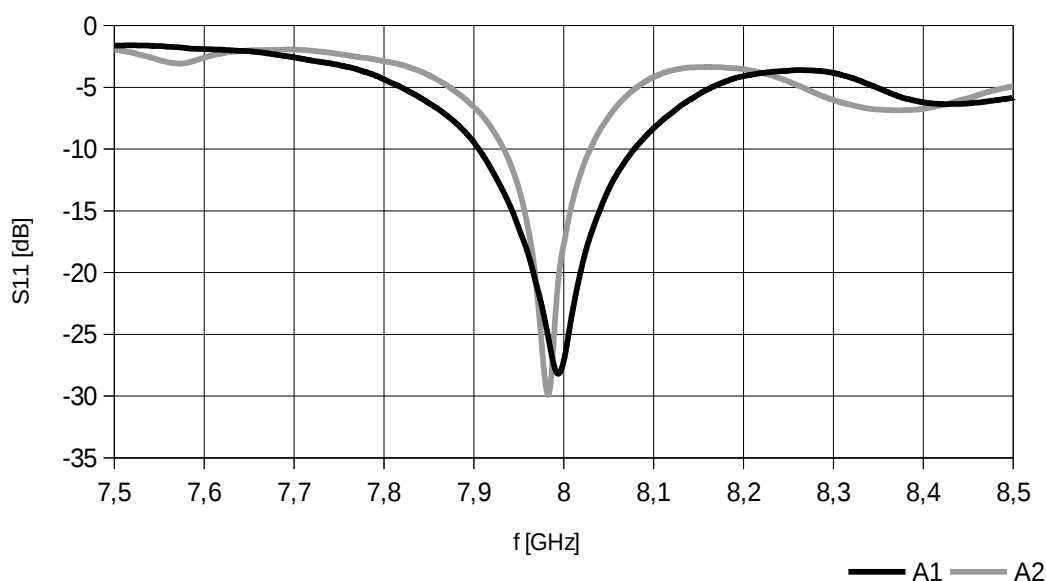
Obr. 20: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Měření antén ve volném prostoru.

Vyrobené antény vykazují velmi dobré přizpůsobení. Důvody rozdílů v průbězích činitele odrazu pro obě antény jsou popsány výše. Rezonanční frekvence prvního

vzorku (A1) je  $f_0 = 8,026$  GHz, druhého (A2)  $f_0 = 8,018$  GHz. Šířka pásma obou antén je velmi podobná a to  $BW_{A1} = 116$  MHz a  $BW_{A2} = 138$  MHz.

Činitel odrazu antén byl také změřen nad kovovou plochou. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 21. Antény byly měřeny ve vzdálenosti 5 mm nad kovovou plochou, která je dána napájecím kabelem a použitým konektorem. Dle teoretických předpokladů nedošlo k výraznější změně činitele odrazu. U jedné z antén došlo k mírnému posunu rezonanční frekvence, tato odchylka je však způsobena výše popsány nedostatky vyrobených antén.

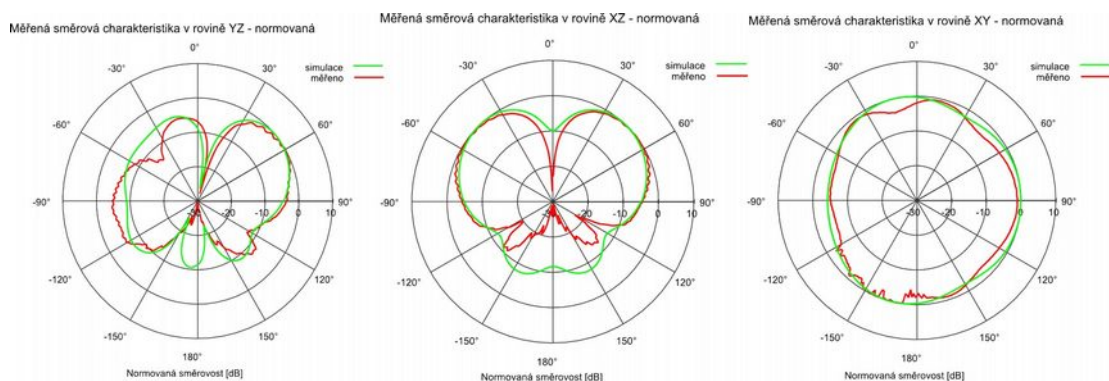
Závislost činitele odrazu na frekvenci, vysílací anténa v blízkosti kovové plochy



Obr. 21: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro vysílací anténu. Měření antén ve vzdálenosti 5 mm od kovové plochy.

### 3.3.2 Měření směrových charakteristik vysílací antény

Měření směrových charakteristik bylo provedeno v útlumové komoře ústavu radioelektroniky ve třech hlavních rovinách. Vysílací anténa byla měřena ve volném prostoru, bez použití kovové desky. Normované směrové charakteristiky jsou uvedeny na Obr. 22. Tvar měřených směrových charakteristik se velmi dobře shoduje s výsledky simulací. Odchylky mezi měřenými hodnotami a simulacemi jsou dány nedostatky antény popsány v kapitole 3.3.1 a použitím reálného konektoru.

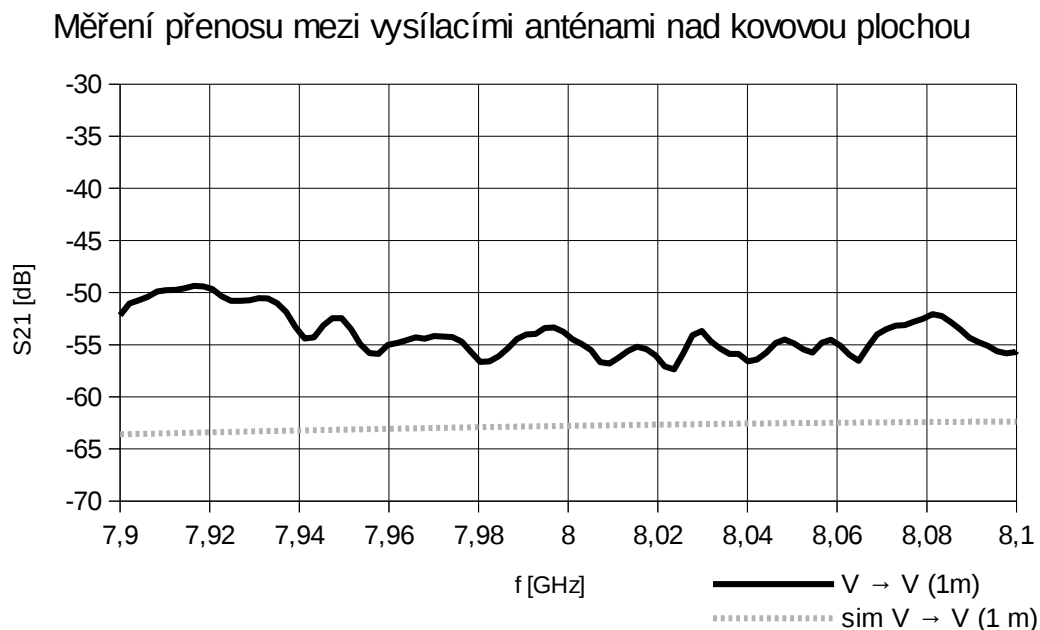


Obr. 22: Porovnání měřených a simulovaných směrových charakteristik.

### 3.3.3 Měření přenosu mezi dvěma vysílacími anténami

Byl změřen přenos mezi dvěma vysílacími anténami  $S_{21}$  vzdálenými 5 mm od kovové plochy. Měření bylo provedeno na vzdálenost 100 cm a probíhalo nad pocínovaným plechem o rozměrech 140 x 120 cm. Měření bylo provedeno pomocí vektorového obvodového analyzátoru R&S ZVL 13, 9 kHz - 13.6 GHz s následujícím nastavením. Výkonová úroveň 0 dBm, šířka mezifrekvenčního filtru 1 kHz a zapnuté průměrování. Vzhledem k popsaným nastavením bylo měření provedeno pouze v pásmu přenosu antén.

Měření nebylo provedeno v útlumové komoře, ani na volném prostranství, proto může být ovlivněno odrazy od okolních předmětů a stěn. Naměřený průběh pro vzdálenost antén 1 m je uveden na Obr. 23.



Obr. 23: Závislost přenosu na frekvenci mezi dvěma vysílacími anténami nad kovovou plochou ve vzdálenosti 1 m.

Přenos mezi dvěma vysílacími anténami se ve sledovaném pásmu pohybuje v rozmezí -50 dB až -57 dB. Na pracovní frekvenci 8 GHz je přenos roven -54 dB, tato hodnota je o 11 dB vyšší než hodnota udávaná simulací provedenou v programu CST.

## 4 PŘIJÍMACÍ ANTÉNA

Základním požadavkem na přijímací anténu je zachování vertikální polarizace. Dalšími požadavky jsou malé rozměry a maximální zisk v přímém směru a výrobní jednoduchost.

Vhodnou technologií pro výrobu je opět planární struktura. Vzhledem k požadovaným vlastnostem je vhodnou anténou trychtýřová anténa v planárním provedení. Tato anténa vykazuje dobré směrové vlastnosti zejména v rovině H a také dobrý zisk. Nevýhodou této antény jsou její rozměry, zejména vztah mezi vlnovou délkou a velikostí ústí antény. Další nevýhodou je zhoršení směrové charakteristiky proti klasické trychtýřové anténě. [10]

Napájecí struktura může být opět řešena pomocí mikropáskového vedení nebo koaxiální sondy. Vzhledem k aplikaci antény je opět výhodnější použít napájení pomocí mikropáskového vedení. Na tento typ napájení je možné vázat planární obvody a realizovat tak obvod s požadovaným senzorem přímo na substrátu antény.

### 4.1 Návrh trychtýřové antény

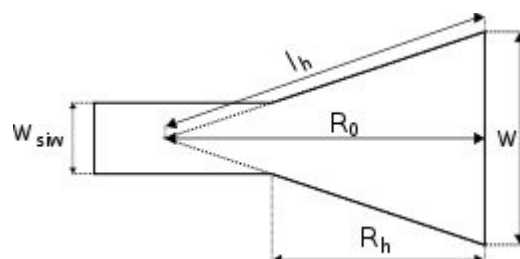
Pro návrh trychtýřové antény je využit stejný substrát jako u vysílací antény, tedy Arlon 25N o tloušťce  $h = 0.762$  mm a relativní permitivitě  $\epsilon_r = 3.38$ . Tento substrát byl vybrán kvůli snaze eliminovat množství použitých substrátů. Pro trychtýřovou anténu by byl vhodný substrát o větší tloušťce, například Arlon 25N o tloušťce 1.52 mm nebo větší. Anténa s větší tloušťkou substrátu by vykazovala lepší směrové vlastnosti a také větší šířku pásma.[11]

#### 4.1.1 Výpočet rozměrů trychtýřové antény

Jelikož je anténa tvořena planární strukturou, je tomu přizpůsobeno také napájení. To je tvořeno třemi částmi. První část je mikropáskové vedení o charakteristické impedanci  $50 \Omega$ . Druhou částí je přechod z mikropáskového vedení na vlnovod integrovaný do substrátu. Třetí částí je vlnovod integrovaný do substrátu, který přechází v trychtýřovou anténu.

Základní parametry napájecí části antény jsou stejné jako u vysílací antény a je tedy výhodné využít již vypočtené rozměry. Rozměry mikropáskového vedení o impedanci  $50 \Omega$  jsou tedy  $w_{mp} = 1,68$  mm a délka vedení byla zvolena  $l_{mp} = 5$  mm. Mezi mikropáskem a vlnovodem integrovaným do substrátu je opět využito transformátoru impedance o rozměrech vypočtených podle vztahu 8. Délka byla opět zvolena  $l_t = 5$  mm a příčný rozměr na straně SIW byl vypočten  $w_t = 3.39$  mm.

Základní rozměry trychtýřové antény jsou dány vztahy 9, 10 a 11, které jsou převzaty z [11]. Pro návrh antény je rozhodující rezonanční kmitočet antény a také vzdálenost mezi ústím trychtýře a středem napájecího vlnovodu. Tuto vzdálenost je možné volit v závislosti na požadovaných směrových vlastnostech antény. Geometrie antény je uvedena na Obr. 24. [11]



Obr. 24: Geometrické rozměry trychtýřové antény

Pro výpočet šířky ústí trychtýře  $W$  je použit vztah 9 převzatý z [11]. Tento poměr mezi vlnovou délkou, délkou  $R_0$  a velikostí ústí trychtýře zaručuje optimální směrové vlastnosti antény.

$$W = \sqrt{3 \cdot \lambda \cdot R_0} \quad , \quad (9)$$

kde  $W$  je velikost vyústění trychtýře,  $\lambda$  je vlnová délka ve vakuu a  $R_0$  je vzdálenost od středu napáječe ke středu vyústění antény. Další rozměr je délka strany pomyslného trojúhelníka, který je tvořen středem vyústění antény, středem napájecího vlnovodu a krajem trychtýřové antény

$$l_H = \sqrt{R_0^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2} \quad , \quad (10)$$

kde  $l_H$  je délka strany pomyslného trojúhelníka,  $R_0$  je vzdálenost od středu napáječe k vyústění antény a  $W$  je velikost vyústění antény. Pro konstrukci antény je důležitým rozměrem délka trychtýře  $R_H$

$$R_H = (W - w_{siw}) \cdot \sqrt{\frac{l_H}{W} - \frac{1}{4}} \quad , \quad (11)$$

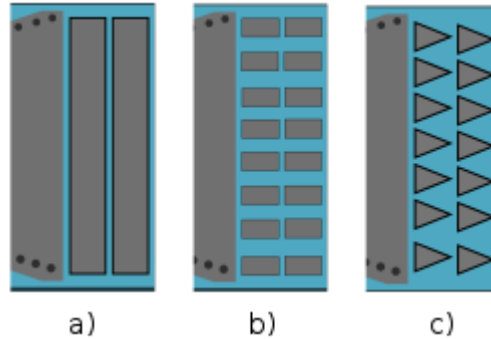
kde  $R_H$  je vzdálenost od konce vlnovodu po konec trychtýře,  $W$  je velikost ústí vlnovodu,  $w_{siw}$  je příčný rozměr vlnovodu,  $l_H$  je délka strany pomyslného trojúhelníka. Vypočtené rozměry antény jsou uvedeny v Tabulce 3.

Tabulka 3: Vypočtené rozměry trychtýřové antény

Rozměr	$w_{siw}$	$l_h$	$R_0$	$W$	$R_h$
vypočteno [mm]	13,8	57,1	50	55,3	63,7

Vzhledem k rozdílné impedanci na hraně trychtýřové antény a okolního prostředí dochází k částečnému odrazu vlny zpět do prostoru vlnovodu. Jako řešení tohoto problému je možné využít dielektrické čočky nebo tvarovací elementy. Tyto možnosti však nedosahují dobrých výsledků a nejsou vhodné pro zamýšlenou aplikaci. Další možností zlepšení přechodu mezi prostředím je využití planárních rezonátorů. Tyto rezonátory jsou umístěny před ústím trychtýře a jsou využívány u planárních trychtýřových antén s tloušťkou substrátu menší než desetina vlnové délky pro úpravu přizpůsobení a směrových vlastností antény, zejména předozadního poměru. [12]

V literatuře je možné dohledat několik variant použitých rezonátorů. Základní variantou jsou dva celé rezonátory za sebou Obr. 25 a). Dále je možné navyšovat jejich počet, měnit mezeru mezi rezonátory nebo je dělit Obr. 25 b), c).



Obr. 25: Ukázka typů rezonátorů

Pro realizaci antény byla vybrána základní varianta se dvěma nedělenými rezonátory. Základními rozměry rezonátorů jsou délka rezonátorů, šířka, a mezera mezi rezonátory. Šířka rezonátorů je určena šířkou ústí antény. Vazební mezery mezi rezonátory a anténou určují velikost vazby mezi rezonátory a jsou voleny  $s \ll l_r$ . Nejdůležitějším rozměrem rezonátorů je jejich délka  $l_r$ , tato délka přímo ovlivňuje rezonanční frekvenci rezonátorů a může být vypočtena pomocí vztahu 12

$$f_{r0} = \frac{c}{2 \cdot L_{eq} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{2 \cdot l_r \cdot \left(1 + 0,7 \frac{h}{l_r}\right) \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (12)$$

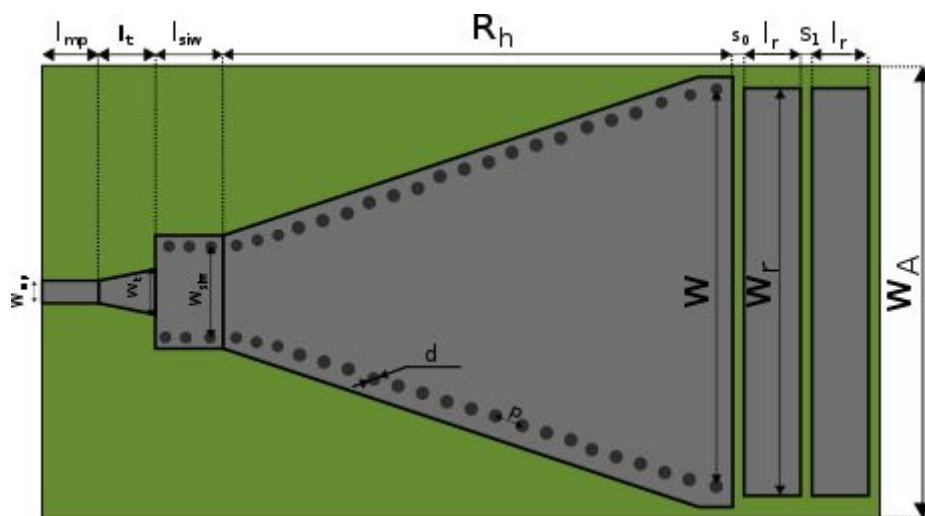
kde  $f_{r0}$  je rezonanční frekvence rezonátoru,  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $L_{eq}$  je ekvivalentní délka rezonátoru,  $\epsilon_r$  je permitivita substrátu,  $l_r$  je délka rezonátoru a  $h$  je tloušťka substrátu. Pomocí vzorce 12 byla vypočítána délka rezonátorů  $l_r = 9,67$  mm.

## 4.2 Simulace přijímací antény

Simulace přijímací antény byla opět provedena v programu CST MWS. Anténa byla simulována ve volném prostoru a také v blízkosti nekonečné vodivé plochy. Byla provedena parametrická analýza pro posouzení vlivu změny rozměrů na vlastnosti antény. Rozměry, se kterými byla anténa simulována jsou uvedeny v Tabulce 4. a náčrt antény s vyznačenými rozměry na Obr. 26.

Tabulka 4: Rozměry trychtýřové antény

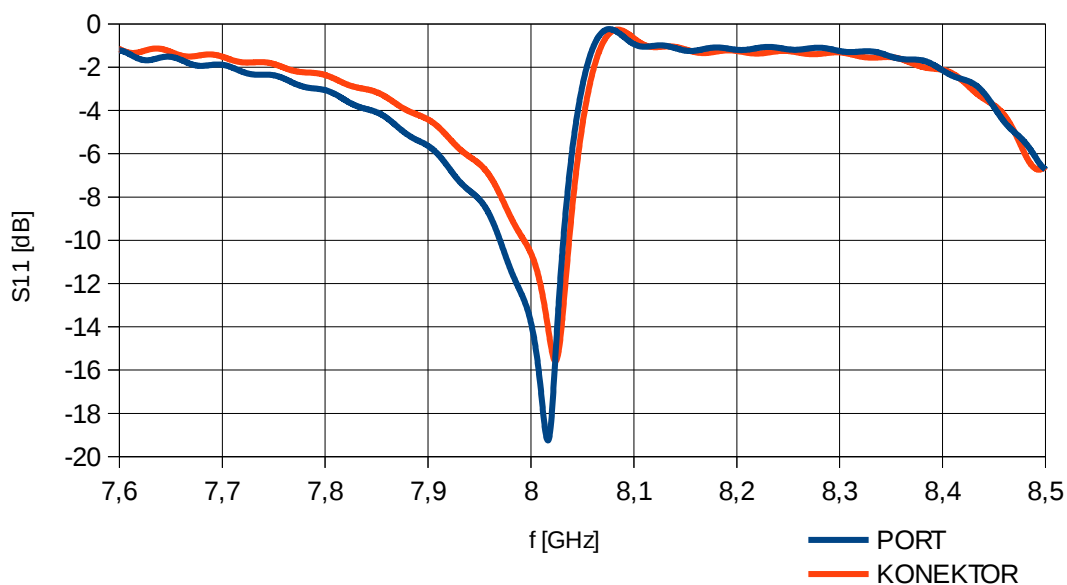
Rozměr	$w_{mp}$	$w_t$	$l_{mp}$	$l_t$	$W_a$
Hodnota	1,68	3,39	5	5	40
Rozměr	$l_r$	$w_{siw}$	$l_{siw}$	$R_H$	$W_r$
Hodnota	9,1	13,8	6	38,7	36
Rozměr	$p$	$d$	$s_0$	$s_1$	$W$
Hodnota	2,24	1,2	0,2	0,31	34,88



Obr. 26: Náčes trychtýřové antény s vyznačenými rozměry

Na Obr. 27 je zobrazena závislosti činitele odrazu antény na frekvenci s použitím dvou různých typů napájení. V prvním případě je napájení mikropáskového vedení řešeno pomocí vlnovodného portu a ve druhém pomocí části koaxiálního kabelu, který představuje SMA konektor.

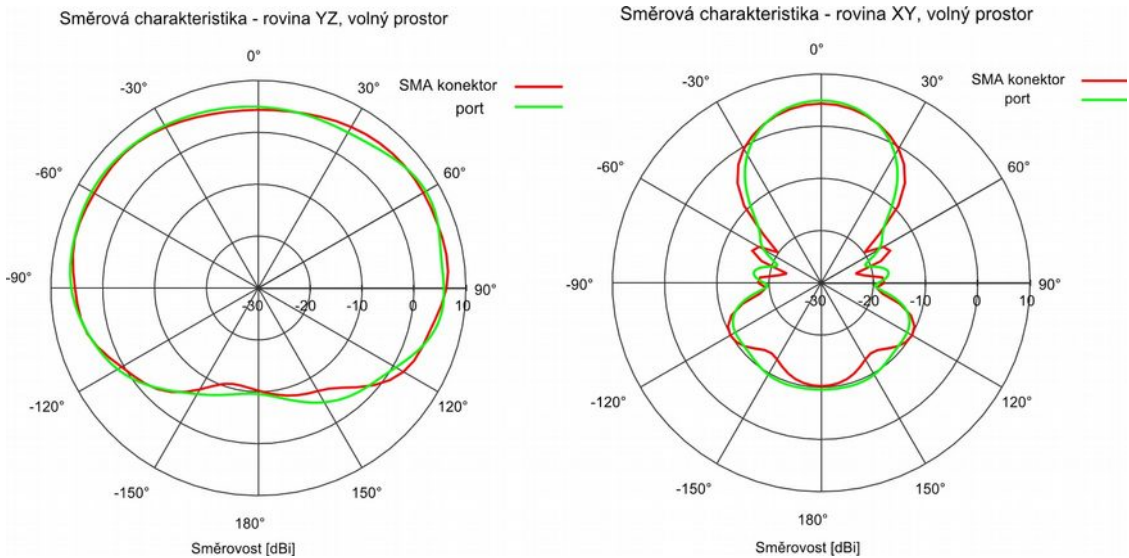
#### Závislost činitele odrazu trychtýřové antény na frekvenci



Obr. 27: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro trychtýřovou anténu.

Výsledky simulací se liší zejména šířkou pásma. Při použití konektoru je šířka pásma 48 MHz při použití portu 63 MHz. Rezonanční kmitočet při použití konektoru je  $f_0=8,02$  GHz, bez konektoru 8,018 MHz. Činitel odrazu  $S_{11}$  se se pro různé simulace napájení liší o 3,4 dB.

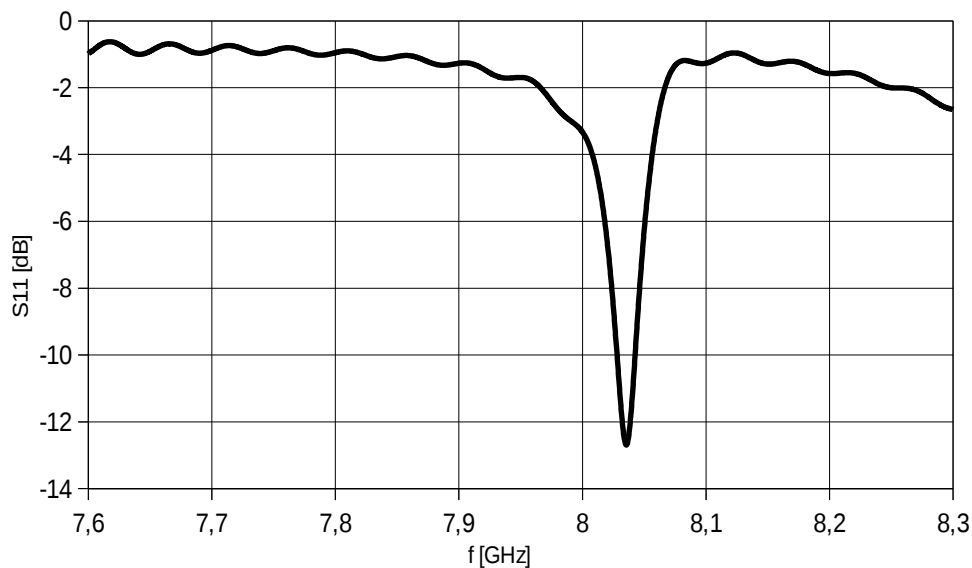
Směrové charakteristiky jsou pro oba typy napájení prakticky totožné a vychází podle teoretických předpokladů. V rovině YZ dosahuje hlavní lalok šířky 180°. V rovině XY je hlavní lalok více směřován a jeho šířka je 40°. Hodnota zisku antény je v přímém směru 6 dBi. Zadní lalok je potlačen o 16 dB. Směrové charakteristiky jsou zobrazeny pro roviny YZ a XY na Obr. 28.



Obr. 28: Směrové charakteristiky trychtýřové antény pro dva typy napájení. Rovina YZ vlevo, rovina XY vpravo.

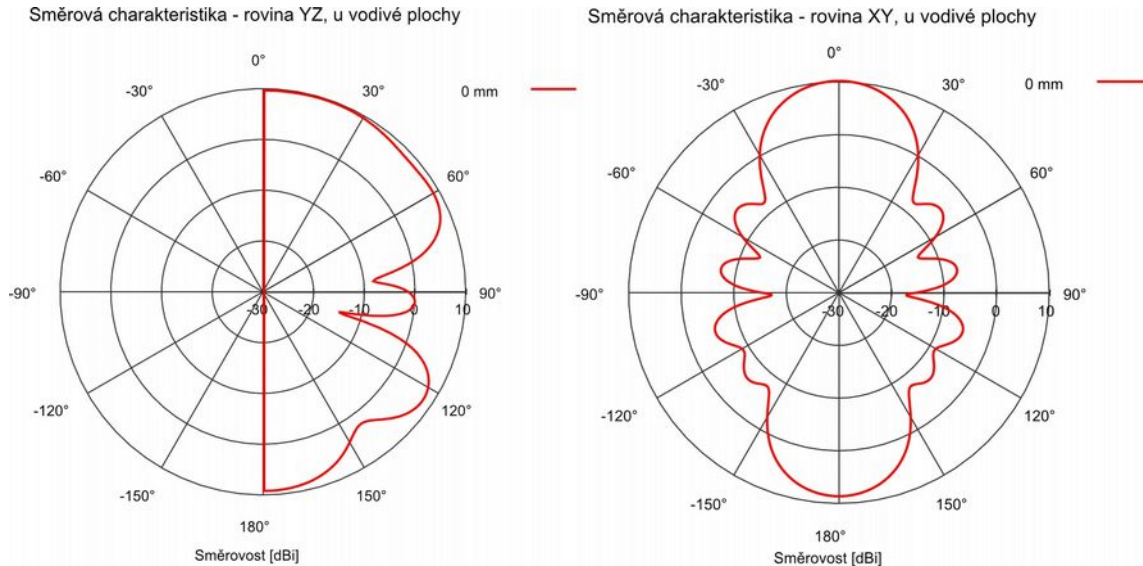
Při simulaci antény v blízkosti vodivé plochy došlo k posunu rezonanční frekvence a ke zhoršení činitele odrazu. Došlo také ke změně tvaru směrové charakteristiky. Rezonanční kmitočet antény  $f_0$  je posunut na frekvenci  $f_0 = 8,036$  GHz. Šířka pásma antény v blízkosti vodivé plochy je rovna  $BW = 16$  MHz pro  $S_{11} \leq 10$  dB.

#### Závislost činitele odrazu trychtýřové antény na frekvenci v blízkosti vodivé plochy



Obr. 29: Závislost činitele odrazu na frekvenci pro trychtýřovou anténu v blízkosti vodivé plochy.

Směrové charakteristiky trychtýřové antény jsou v blízkosti vodivé plochy značně deformovány. Zisk antény vzrostl na hodnotu 10 dBi a šířka hlavního laloku v rovině XY je rovna 38°. Dochází k výraznému nárůstu zadního laloku a také laloků postranních. Zadní lalok je potlačen o 2 dB.



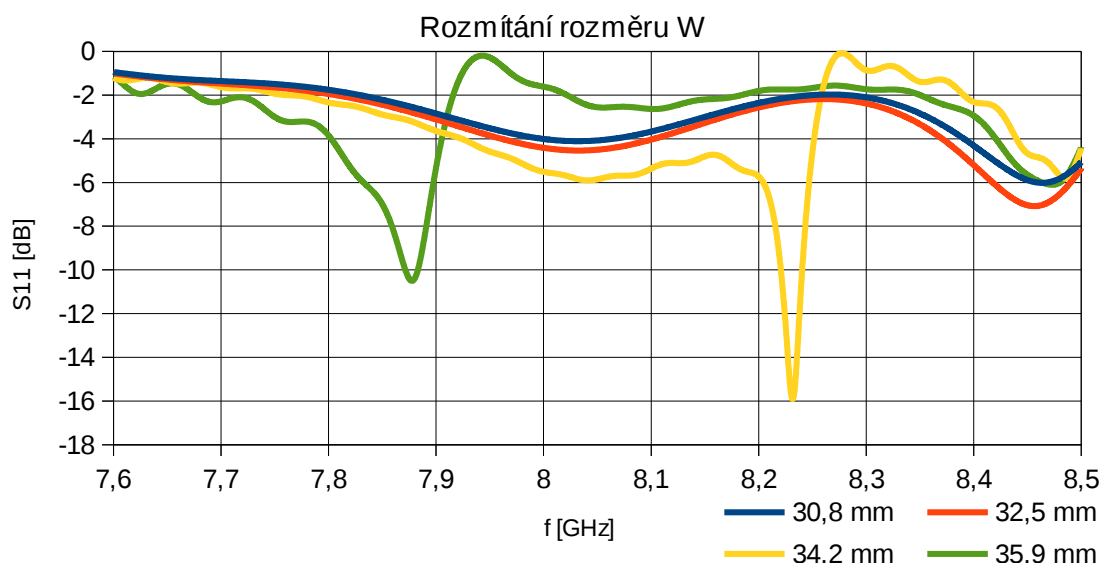
Obr. 30: Směrové charakteristiky trychtýřové antény v blízkosti vodivé plochy. Rovina YZ vlevo, rovina XY vpravo.

#### 4.2.1 Parametrická analýza trychtýřové antény

Pro provedení parametrické analýzy byly vybrány rozměry nejvíce ovlivňující chování antény. Těmito to rozměry jsou: šířka trychtýře, délka rezonátorů a velikost mezer mezi rezonátory. Rozmítání všech hodnot bylo provedeno v blízkosti hodnot, které jsou uvedeny jako referenční. Jako výstup jsou zobrazovány závislosti činitele odrazu na frekvenci a směrové charakteristiky pro obě hlavní roviny YZ a XY. Pro parametrickou analýzu byla použita anténa napájená vlnovodným portem vázaným na mikropáskové vedení.

Prvním rozmítaným parametrem je velikost ústí antény  $W$ . tento rozměr má výrazný vliv na rezonanční frekvenci antény a její přizpůsobení. Rozmítání je provedeno v rozsahu  $W = 30,8 \div 35,9$  mm s krokem 1,7 mm. Změny činitele odrazu antény jsou zobrazeny na Obr. 31, směrové charakteristiky na Obr. 32.

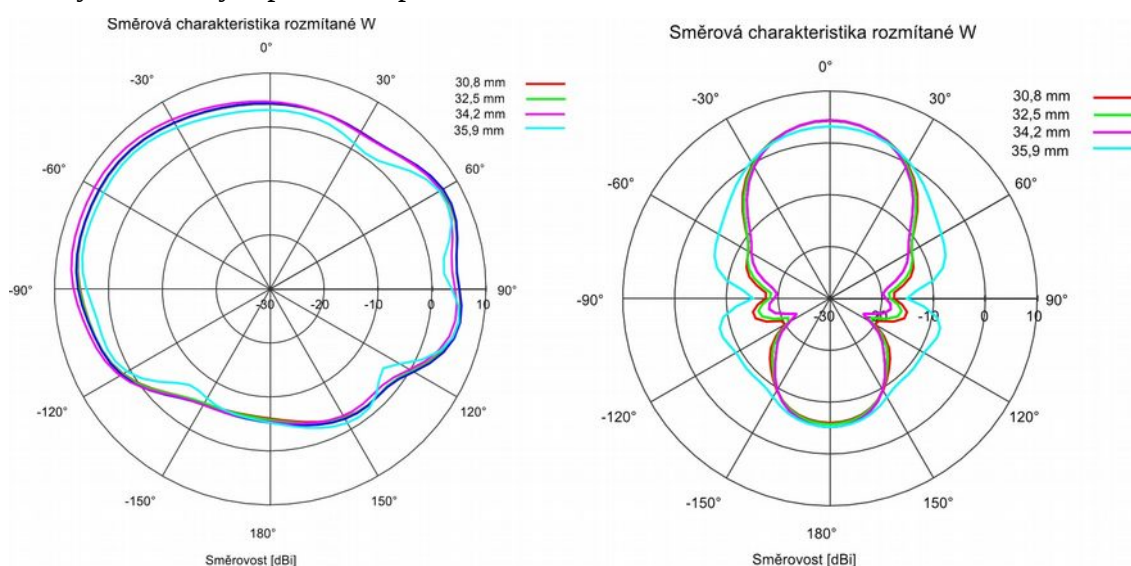
## Závislost činitele odrazu na frekvenci



Obr. 31: Závislost činitele odrazu na frekvenci trychtýřové antény. Parametrické rozmítání rozměru W

Pro hodnoty  $W = 30,8$  a  $32,5$  mm neklesá činitel odrazu  $S_{11}$  pod  $-10$  dB v celém sledovaném pásmu. Z průběhů je patrné, že se zvětšováním ústí trychtýřové antény  $W$  klesá rezonanční frekvence antény. Pro rozměr  $W = 34,2$  mm je rezonanční frekvence antény rovna  $f_0 = 8,23$  GHz. Pro rozměr  $W = 35,9$  mm je rezonanční frekvence antény rovna  $f_0 = 7,88$  GHz.

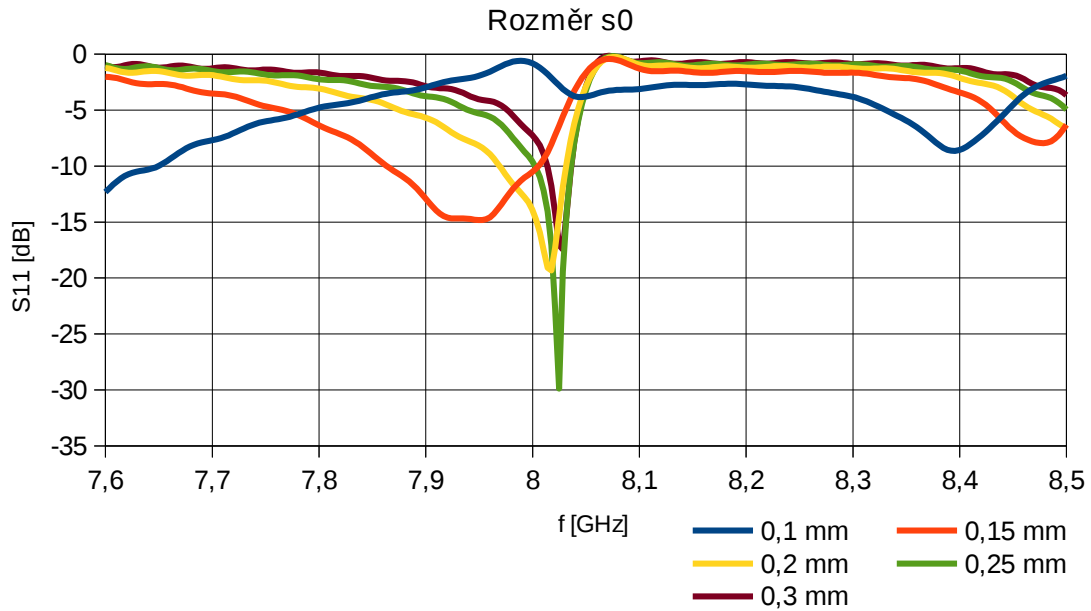
Při pohledu na směrové charakteristiky je pozorovatelný vliv na potlačení postranních laloků antény. Změna směrových charakteristik je prakticky zanedbatelná až na hodnotu rozměru  $W = 35,9$  mm. Zde dochází k poklesu zisku antény a také zvýraznění postranních laloků. Toto chování je způsobeno přiblížením prokůvů ke kraji antény a zvětšeným přesahem přes šířku rezonátorů.



Obr. 32: Směrové charakteristiky trychtýřové antény, rozmítaný rozměr W.

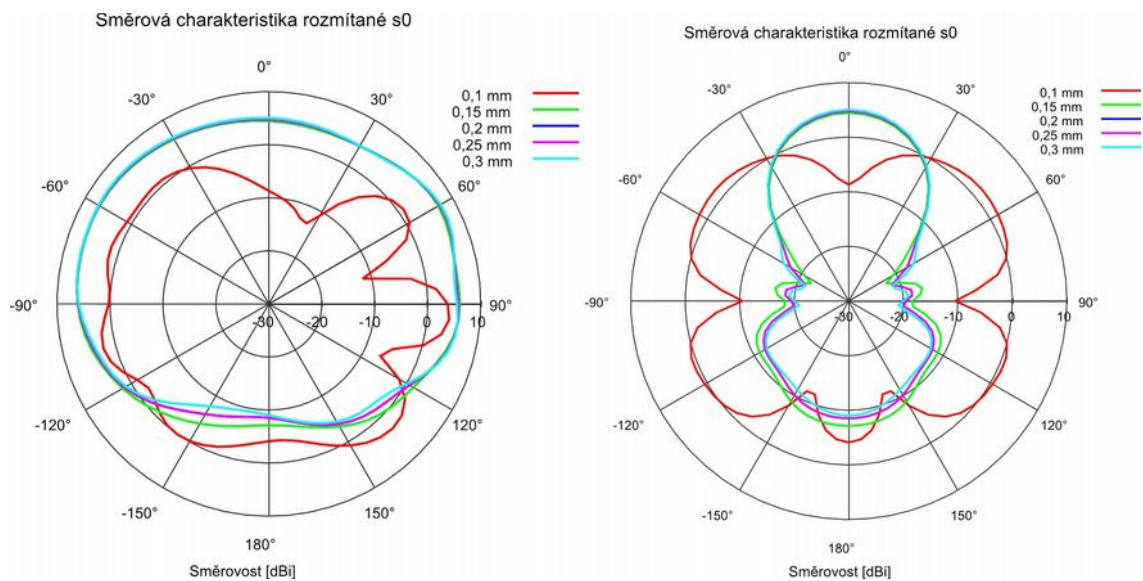
Dalším sledovaným rozměrem je velikosti štěrbiny mezi prvním rezonátorem a ústím trychtýře. Ta je rozmítána v rozsahu 0,1 až 0,3 mm. Tento rozměr je velmi důležitý zejména z hlediska přizpůsobení antény a šířky pásma. Tento vliv je dobře patrný z průběhu  $s_0 = 0,15$  mm, kde dochází ke značnému navýšení šířky pásma. Z grafu je také patrné, že změnou tohoto rozměru je možné zlepšit přizpůsobení antény proti realizovanému návrhu. K tomuto kroku nebylo přistoupeno z důvodu zmenšení šířky pásma antény.

### Závislost činitele odrazu na frekvenci



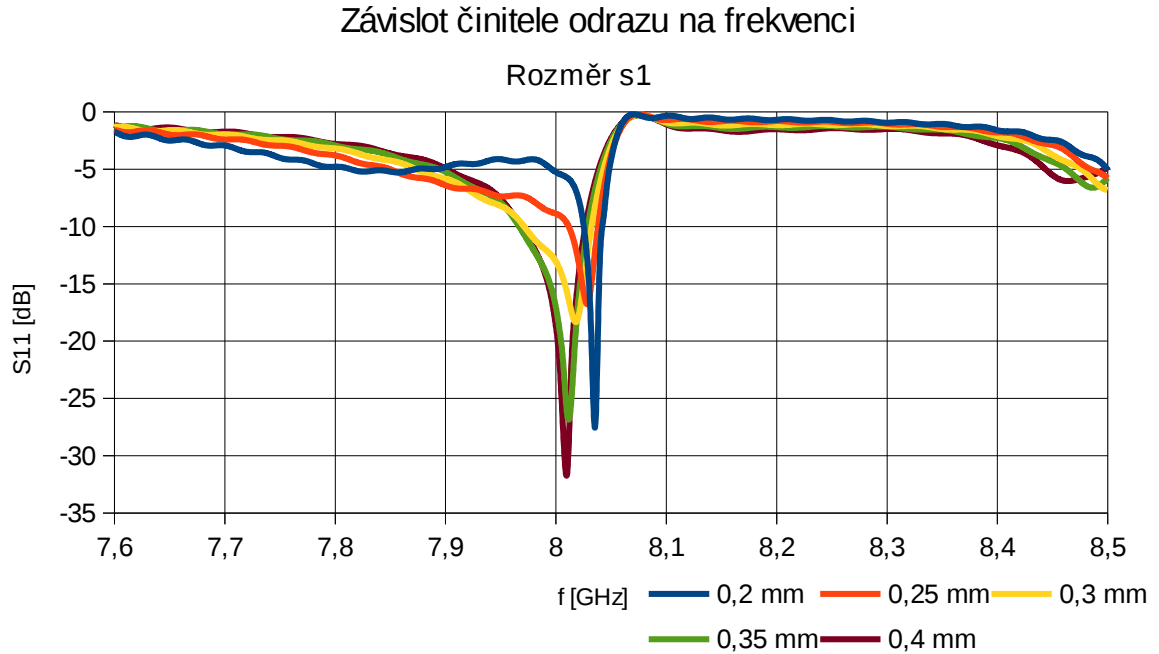
Obr. 33: Závislost činitele odrazu na frekvenci trychtýřové antény. Parametrické rozmítání rozměru  $s_0$ .

Vliv změny parametru na směrové charakteristiky je viditelný na velikosti bočních laloků a také zadního laloku. Extrémní případ nastává pro hodnotu  $s_0 = 0,1$  mm, kdy dochází k výrazné změně směrových charakteristik v obou rovinách.



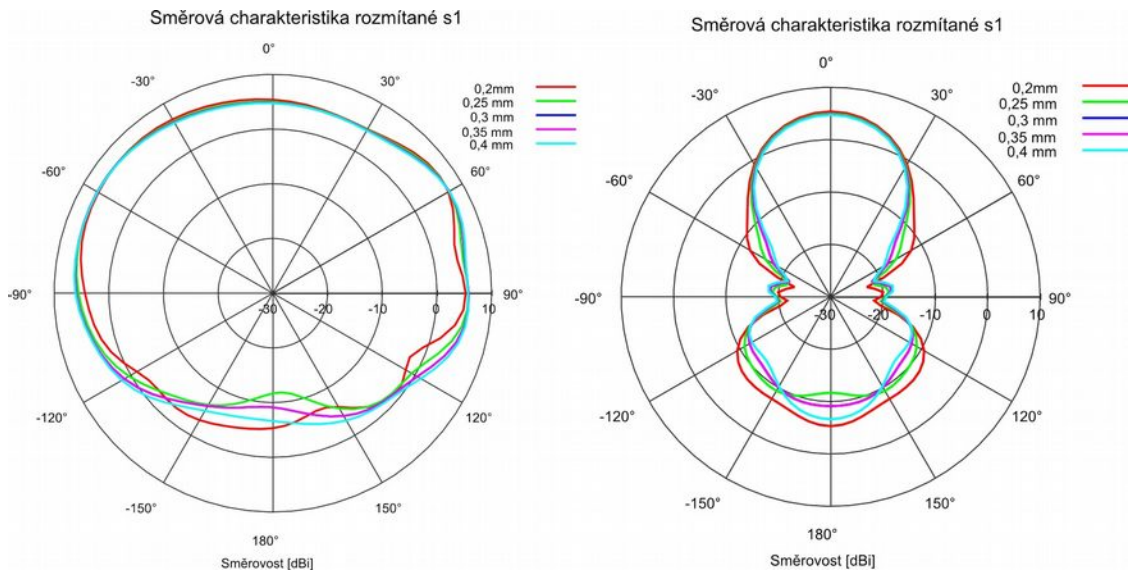
Obr. 34: Směrové charakteristiky trychtýřové antény, rozmítané rozměr  $s_0$ .

Dalším důležitým rozměrem je vzdálenost mezi jednotlivými rezonátory  $s_1$ . Tato vzdálenost ovlivňuje zejména přizpůsobení antény, včetně šířky pásma s minimálním vlivem na změnu rezonanční frekvence. Rozměr je rozmítán v rozmezí 0,2 až 0,4 mm s krokem 0,05 mm. Průběh závislosti činitele odrazu na frekvenci je na Obr. 35 a směrové charakteristiky pro roviny XY a YZ na Obr. 36.



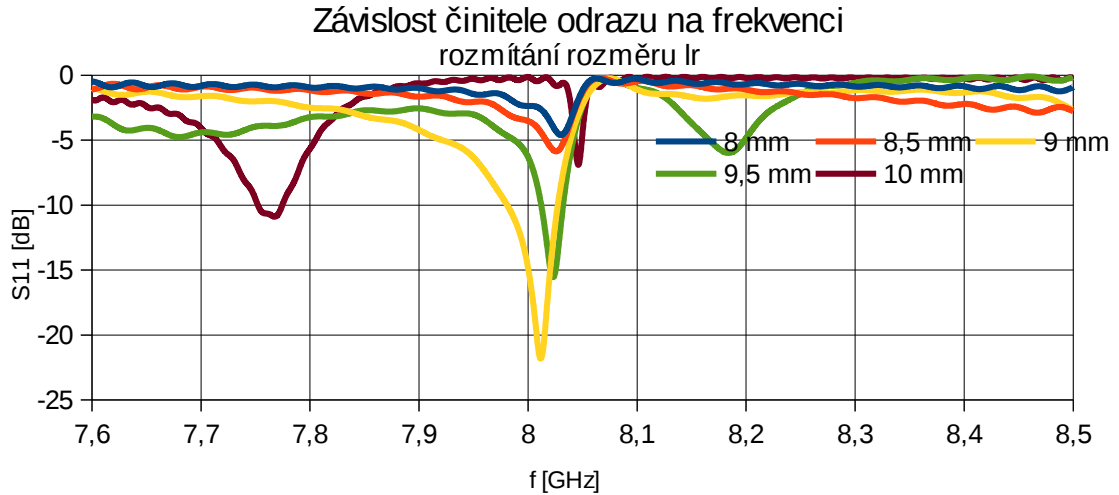
Obr. 35: Závislost činitele odrazu na frekvenci. Parametrické rozmítání  $s_1$ .

Změna parametru  $s_1$  má vliv na velikost a tvar zadního laloku. Potlačení zadního laloku se mění v rozsahu 5 dB.



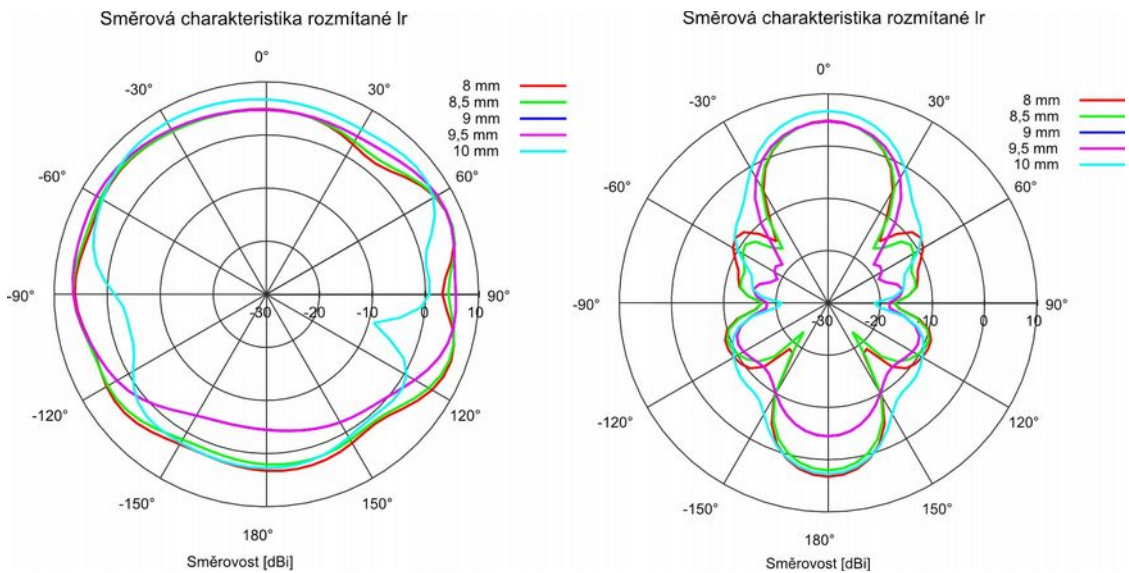
Obr. 36: Směrové charakteristiky v rovině XY a YZ pro rozmítaný parametr  $s_1$

Posledním sledovaným rozměrem je délka rezonátoru  $l_r$ . Délka rezonátoru je rozmítána v rozsahu od 8 mm do 10 mm s krokem 0,5 mm. Rozměr  $l_r$  má vliv na rezonanční frekvenci i přizpůsobení antény, jak lze pozorovat na Obr. 37. V rozsahu 8 až 9 mm dochází ke změně činitele odrazu. Pro hodnoty  $l_r = 9,5$  a 10 mm dochází ke vzniku dalších minim na kmitočtech 7,765 GHz a 8,18 GHz. Výrazný je i vliv na směrové charakteristiky antény zobrazené na Obr. 38.



Obr. 37: Závislost činitele odrazu na frekvenci. Rozmítaný rozměr  $l_r$ .

Při změně rozměru  $l_r$  dochází k velmi výrazným změnám tvaru směrových charakteristik. Při zvětšování rozměru  $l_r$  dochází k rozšiřování hlavního laloku a také k růstu zadního laloku. Potlačení zadního laloku lze měnit pomocí délky rezonátorů v rozmezí 8 dB.



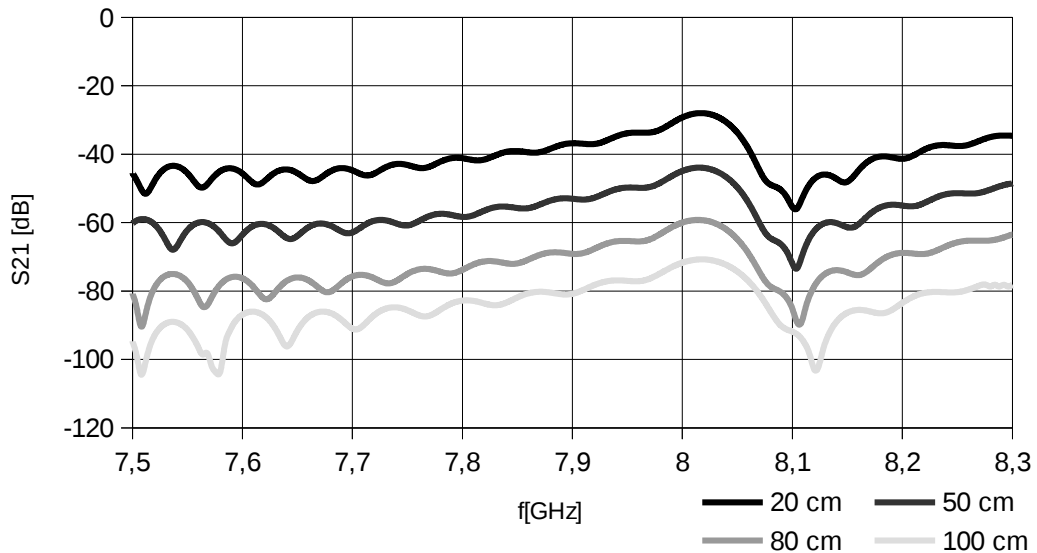
Obr. 38: Směrové charakteristiky trychtýřové antény, rozmítaný rozměr  $l_r$ .

Ze zobrazených průběhů vyplývá značná závislost základních vlastností antény na rozměrech rezonátorů a vazebních štěrbin. Pomocí malých změn těchto rozměrů je možné upravovat průběh činitele odrazu ve značném rozsahu kmitočtů. Společným rysem při změně rozměrů antény je zachování zpětného laloku. Tento lalok může být výrazněji potlačen s využitím upravených rezonátorů popsanych v kapitole 4.1.1.

## 4.2.2 Simulace přenosu mezi dvěma trychtýřovými anténami

Přenos mezi dvěma trychtýřovými anténami byl opět simulován v CST MWS. Antény byly umístěny přímo naproti sobě ve vzdálenosti 20, 50, 80 a 100 cm. Vzdálenost mezi anténami a vodivou plochou byla stanovena na 5 mm. Dosažené výsledky jsou zobrazeny na Obr. 39.

Přenos dvou trychtýřových antén nad nekonečnou vodivou plochou



Obr. 39: Závislost přenosu na frekvenci mezi dvěma trychtýřovými anténami.

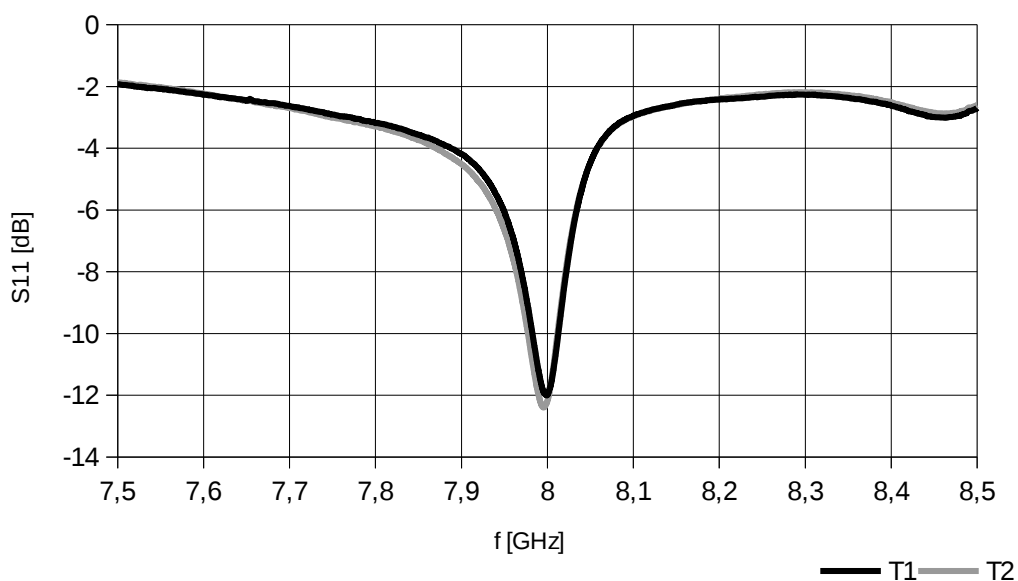
## 4.3 Experimentální ověření dosažených výsledků trychtýřové antény

Bylo provedeno měření činitele odrazu  $S_{11}$  pro dva vyrobené vzorky trychtýřové antény. Také byl změřen přenos mezi těmito anténami a směrové charakteristiky v rovině XY a YZ. Při měření bylo použito stejné nastavení přístrojů a stejná konfigurace pracoviště jako v případě měření vysílacích antén.

### 4.3.1 Měření činitele odrazu trychtýřové antény

Činitel odrazu byl měřen v otevřeném prostoru pomocí vektorového obvodového analyzátoru R&S. Závislost činitele odrazu na frekvenci je zobrazena na Obr. 40. Naměřené výsledky se výrazně liší od výsledků udávaných simulacemi. Rezonanční kmitočet vzorku  $T_1$  klesl na  $f_0 = 8$  GHz, rezonanční kmitočet druhého vzorku je  $f_0 = 7,996$  GHz. Činitel odrazu antén se u obou vzorků blíží hodnotě  $S_{11} = -12$  dB. Šířka pásma obou vyrobených vzorků je  $BW = 30$  MHz. U všech parametrů antény došlo ke zhoršení proti simulovaným výsledkům. I přes uvedené nedostatky je možné využít trychtýřovou anténu pro měření přenosu energie.

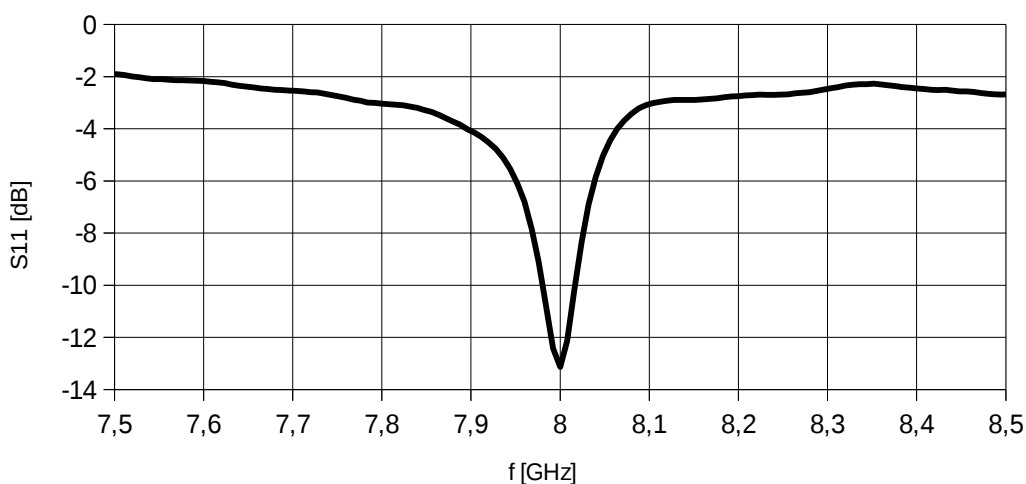
### Závislost činitele odrazu na frekvenci, přijímací, měření



Obr. 40: Měřená závislost činitele odrazu trychtýřové antény na frekvenci, volný prostor.

Bylo provedeno měření antén nad kovovou plochou ve vzdálenosti 5 mm od této plochy. Vzdálenost antény od kovové plochy je dána použitým konektorem a koaxiálním kabelem. Průběh činitele odrazu pro oba vzorky je totožný. Na rozdíl od výsledků simulace antény v blízkosti vodivé plochy nebyl pozorován posun rezonančního kmitočtu antény.

### Závislost činitele odrazu na frekvenci, trychtýřová anténa u kovové plochy

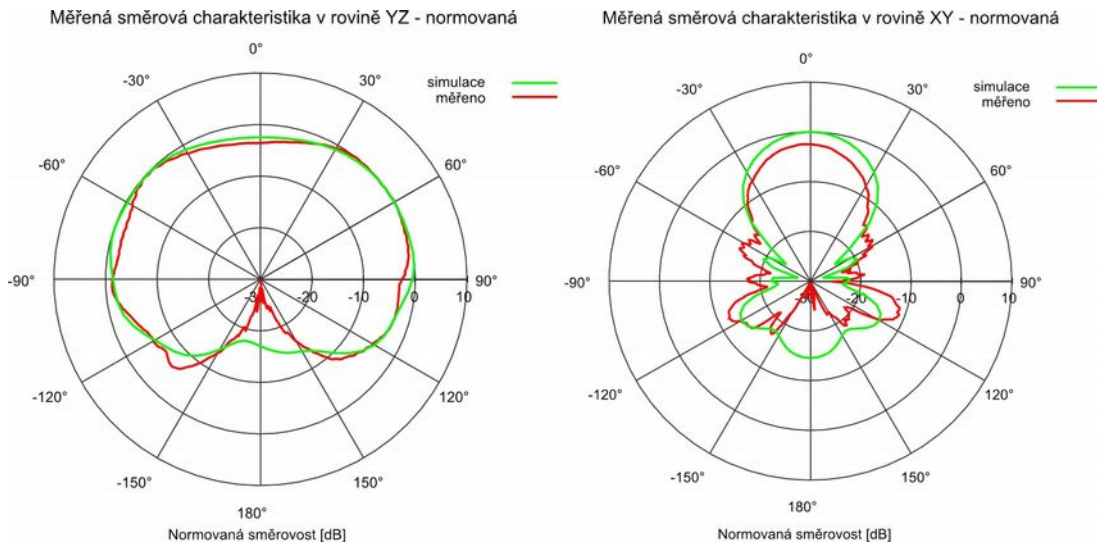


Obr. 41: Měřená závislost činitele odrazu na frekvenci pro trychtýřovou anténu v blízkosti kovové plochy.

### 4.3.2 Měření směrových charakteristik

Měření směrových charakteristik bylo provedeno v útlumové komoře ústavu radioelektroniky ve dvou hlavních rovinách. Vysílací anténa byla měřena ve volném prostoru, bez použití kovové desky. Normované směrové charakteristiky jsou uvedeny na Obr. 42. Tvar měřených směrových charakteristik se velmi dobře shoduje s výsledky simulací.

V grafech pro obě roviny lze pozorovat rozdíl v normovaných hodnotách v rozsahu do 2 dB ve směru hlavního laloku. V grafu pro rovinu XY je dobře pozorovatelný nárůst postranních laloků antény proti výsledkům daných simulací.

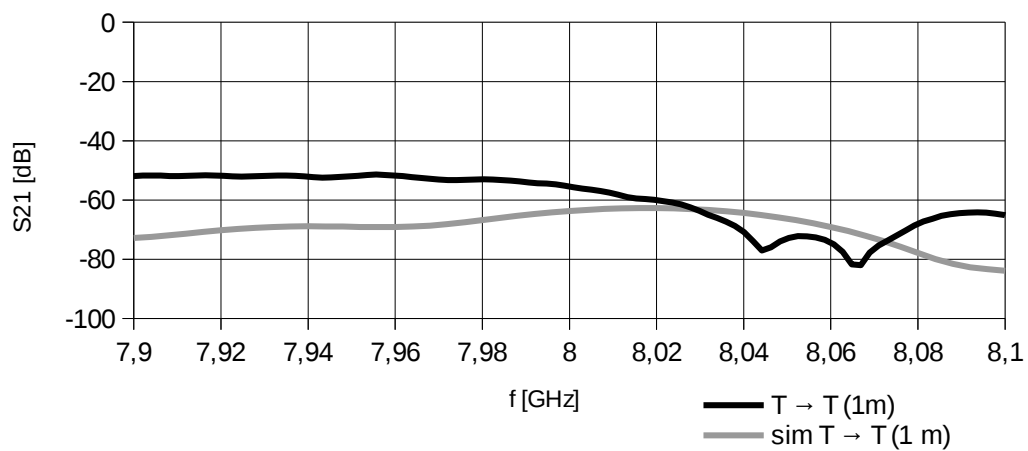


Obr. 42: Porovnání měřených a simulovaných směrových charakteristik v rovinách YZ a XY.

### 4.3.3 Měření přenosu mezi dvěma trychtýřovými anténami

Byl změřen přenos mezi dvěma trychtýřovými anténami  $S_{21}$  vzdálenými 5 mm od kovové plochy. Měření bylo provedeno na vzdálenost 100 cm a probíhalo nad pocínovaným plechem o rozměrech 140 x 120 cm. Měření bylo provedeno pomocí vektorového obvodového analyzátoru R&S ZVL13 9 kHz - 13,6 GHz s následujícím nastavením. Výkonová úroveň 0 dBm, šířka mezifrekvenčního filtru 10 kHz a zapnuté průměrování. Vzhledem k popsaným nastavením bylo měření provedeno pouze v pásmu 7,9 až 8,1 GHz, jelikož na větším rozsahu by došlo ke zpomalení měření. Výsledek měření je na Obr. 43.

### Měření přenosu mezi trychtýřovými anténami nad kovovou plochou



Obr. 43: Závislost přenosu na frekvenci pro dvě trychtýřové antény nad kovovou plochou.

Naměřená hodnota přenosu mezi dvěma trychtýřovými anténami se pohybuje v rozsahu -52 dB až -82 dB. Hodnota přenosu na pracovním kmitočtu 8 GHz je rovna -56 dB. Odchylka mezi simulovanou a měřenou hodnotou na kmitočtu 8 GHz je rovna 7,7 dB.

## 5 MĚŘENÍ V AUTOMOBILU

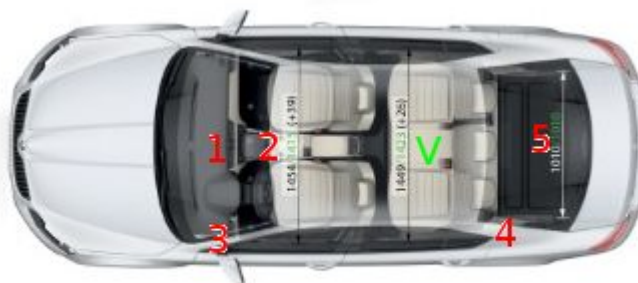
Měření přenosu bylo provedeno uvnitř automobilu Škoda Octavia Limousine. Interiér automobilu byl ponechán v základní konfiguraci a bez posádky. Pro potřeby měření byly odmontován kryt předního sloupku a kryt elektroniky nad předním sklem. Dále byly při měření uzavřeny dveře a okna.

Vysílací anténa byla umístěna v blízkosti střešního světla v zadní části vozu. Byla připevněna na kryt střechy pomocí polystyrenového nástavce vysokého 5 mm. Kabel, vedoucí od spektrálního analyzátoru k vysílací anténě, byl veden okénkem a následně po okraji střechy v blízkosti držadel pro pasažéry. Kabel nezasahoval do přímé dráhy mezi vysílací a přijímací anténou. Fotografie umístění vysílací antény je uvedena v příloze D.

Přijímací anténa byla umístěna na pěti různých místech pokrývajících interiér automobilu. Prvním místem byl okraj předního skla, u elektroniky umístěné na skle. Druhým místem byla plocha palubní desky nad výdechy ventilace. Třetím místem umístění přijímací antény byl levý přední sloupek v prostoru u palubní desky. Dalším umístěním byl sloupek u zadního skla. Poslední umístění antény bylo uprostřed zadního skla. Přímé vzdálenosti mezi přijímací a vysílací anténou jsou uvedeny v Tabulce 5. Všechna popsaná umístění jsou zobrazena na Obr. 44 a v příloze D.

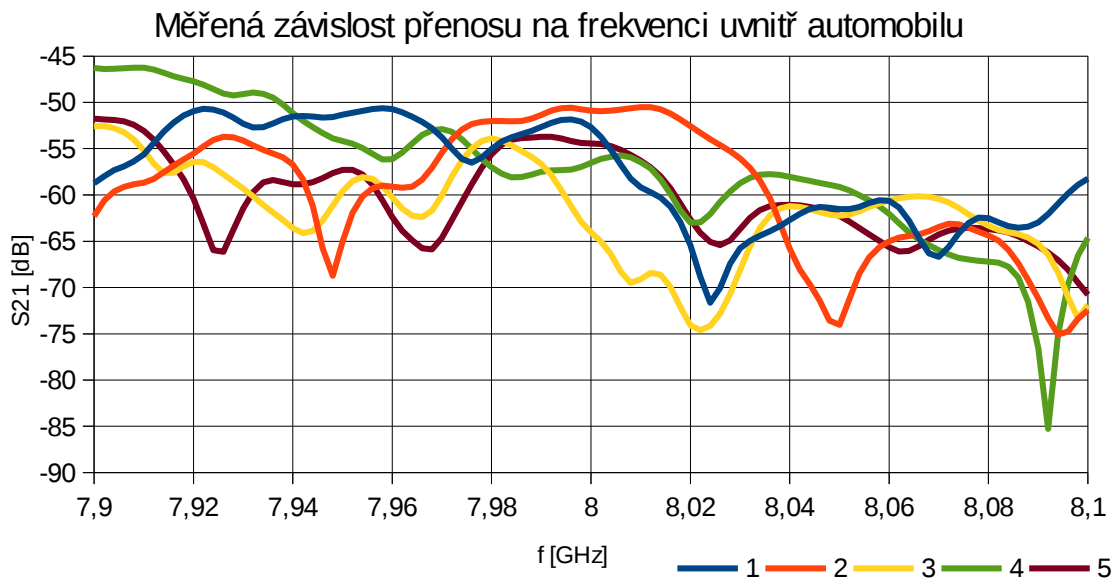
Tabulka 5: Přehled rozmístění antén uvnitř automobilu

číslo měření	Umístění antény	Vzdálenost mezi anténami [cm]
1	palubní deska	150
2	elektronika u předního skla	120
3	přední sloupek	170
4	zadní sloupek	80
5	střed zadního okna	90



Obr. 44: Nákres rozmístění antén uvnitř automobilu. V – vysílací, čísla odpovídají pořadí měření. Převzato z [15], upraveno

Přenos byl měřen pomocí vektorového obvodového analyzátoru R & S ZVA67. Základní nastavení tohoto analyzátoru byla následující: výstupní výkon 20 dBm, šířka mezifrekvenčního filtru 1 kHz, měřený rozsah 7,5 GHz až 8,5 GHz s krokem měření 2 MHz. Vzhledem k vyššímu výpočetnímu výkonu tohoto analyzátoru mohl být měřen větší frekvenční rozsah, než v případě měření pomocí R & S ZVL 13. Pro zlepšení přehlednosti je na Obr. 45 zobrazeno pásmo v rozsahu 7,9 GHz až 8,1 GHz, celé měřené pásmo je zobrazeno v příloze E.



Obr. 45: Měřená závislost přenosu na frekvenci pro různé umístění přijímací antény uvnitř automobilu.

Z naměřených dat vyplývá, že u čtyřech různě umístěních antény byl změřen přenos v rozmezí  $S_{21} = -50,9$  dB až  $-60$  dB. Při pátém umístění byl změřen přenos  $S_{21} = -64$  dB. Nejlepšího přenosu  $S_{21} = -50,9$  dB bylo dosaženo při měření č. 2, tedy při umístění trychtýřové antény u střechy nad předním sklem. Tato skutečnost odpovídá předpokladu, jelikož maximum vyzařování vysílací antény je blízké rovině střechy.

Při umístění antény na palubní desce (měření č. 1) byl přenos na kmitočtu 8 GHz roven  $S_{21} = -52,7$  dB. Trychtýřová anténa v této pozici neměřila přímo na anténu vysílací, ale do prostoru automobilu. Díky šířce hlavního laloku v rovině E (YZ) došlo k dobrému přenosu i při této skutečnosti.

Při měření č. 5 byla anténa umístěna uprostřed zadního skla. Při tomto umístění byl změřený přenos roven  $S_{21} = -54,4$  dB.

Při umístění trychtýřové antény u zadního sloupku byl naměřený přenos roven  $S_{21} = -56,6$  dB. V tomto případě je vzdálenost mezi vysílací a trychtýřovou anténou nejmenší (80 cm). Ke zhoršení přenosu došlo vlivem vychýlení osy trychtýřové antény z přímé spojnice mezi anténami. Toto vychýlení bylo způsobeno tuhostí přírodního kabelu a nemožností umístění antény do správné polohy.

Nejhoršího přenosu bylo dosaženo při umístění antény na sloupku u předního skla. Přenos při tomto měření (č. 3) byl na kmitočtu 8 GHz roven  $S_{21} = -64$  dB. Tato hodnota je dána vzdáleností mezi anténami a zejména překážkami mezi anténami. Před ústím trychtýřové antény začínala část bočního airbagu. Dalším nedostatkem při tomto umístění bylo vychýlení osy antény z přímé spojnice mezi anténami, stejně jako v případě měření u zadního sloupku.

## 6 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá přenosem energie uvnitř automobilu pomocí radiového vyzařování na frekvenci 8 GHz. Cílem bylo navrhnout vysílací a přijímací anténu pro napájení bezdrátových senzorů uvnitř automobilu a ověřit funkčnost měření na reálném automobilu.

V první části byl proveden rozbor možných způsobů bezdrátového napájení a diskutováno jejich použití uvnitř automobilu. Ve druhé části je popsán princip šíření povrchové vlny. Třetí část se zaměřuje na návrh vysílací antény, provedení simulací a měření přenosu mezi těmito anténami. Ve čtvrté části je navržena přijímací anténa a provedena simulace a měření přenosu nad vodivou plochou mezi těmito anténami. V poslední části je popsáno měření přenosu uvnitř automobilu a popsány výsledky měření.

Byl proveden návrh a simulace vysílací všesměrové antény. Anténa byla simulována v blízkosti vodivé plochy a zkoumán vliv vzdálenosti plochy na parametry antény. Anténa byla vyrobena ve dvou vzorcích a změřeny základní parametry s následujícími výsledky. Rezonanční kmitočet antény  $f_0 = 8,018$  GHz, šířka pásma pro pokles činitele odrazu pod hodnotu  $-10$  dB BW = 138 MHz. Dále byl změřen přenos mezi dvěma vysílacími anténami umístěnými v blízkosti kovové plochy. Hodnota přenosu na kmitočtu 8 GHz je rovna  $S_{21} = -58$  dB.

Byl proveden návrh planární trychtýřové antény, která slouží jako anténa přijímací. Byl proveden návrh antény a provedena simulace. Byla provedena parametrická analýza a zkoumán vliv jednotlivých parametrů na vlastnosti antény. Byla provedena simulace antény v blízkosti vodivé plochy a pozorován její vliv na směrové charakteristiky antény. Následně byly změřeny vlastnosti antény s následujícími výsledky. Rezonanční frekvence antény  $f_0 = 7,996$  GHz a šířka pásma antény 30 MHz. Byl změřen přenos mezi dvěma trychtýřovými anténami nad kovovou plochou. Hodnota přenosu  $S_{21}$  na kmitočtu 8 GHz je rovna  $S_{21} = -56$  dB.

Bylo provedeno měření přenosu energie uvnitř automobilu. Vysílací anténa byla umístěna v blízkosti střešního světla v zadní části střechy. Přijímací trychtýřová anténa byla umístěna v různých částech automobilu, například u palubní desky nebo na sloupku u zadního okna. Přenos mezi anténami  $S_{21}$  se pohyboval v rozmezí  $-50,9$  dB až  $-64$  dB na kmitočtu 8 GHz. Nejlepšího přenosu bylo dosaženo při umístění trychtýřové antény v blízkosti střechy. Přenos při tomto umístění byl roven  $-50,9$  dB. Nejhoršího přenosu bylo dosaženo při umístění antény na sloupek u předního skla. Hodnota přenosu při tomto umístění byla rovna  $S_{21} = -64$  dB.

Z naměřených hodnot je patrná dobrá distribuce energie do prostoru automobilu. Pokles přenosu je ovlivněn zejména umístěním trychtýřové antény a jejím směřováním k anténě vysílací.

Tato metoda přenosu energie je vhodná zejména pro zařízení s velmi nízkým odběrem. Jako příklad lze uvést senzory pro měření teploty. Jako další rozvoj problematiky lze navrhnout výzkum zvýšení elektromagnetického pozadí uvnitř automobilu nebo konstrukci senzoru na substrátu antény a ověření funkčnosti.

# LITERATURA

- [1] BROWN, W.C. *The History of Power Transmission by Radio Waves*. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1984, vol. 32, issue 9, s. 1230-1242. DOI: 10.1109/TMTT.1984.1132833.
- [2] *List of UWB channels*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-12-1]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_UWB\\_channels](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_UWB_channels)
- [3] ZHAO, Jun, Guizhi XU, Chao ZHANG, Wei ZHANG a Xuan LI. *A Contrastive Studies between Magnetic Coupling Resonance and Electromagnetic Induction in Wireless Energy Transmission*. *2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications*. IEEE, 2012, s. 1-4. DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310324. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6310324>
- [4] OTA, Y., T. TAKURA, F. SATO, H. MATSUKI a Xuan LI. *Wireless power transfer by low coupling electromagnetic induction — LC booster*. *2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*. IEEE, 2012, s. 175-178. DOI: 10.1109/IMWS.2012.6215779. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6215779>
- [5] WITRICITY CORPORATION. *Wireless Power Over Distance* [online]. © 2009-2014 [cit. 2014-1-12]. Dostupné z: [www.witricity.com](http://www.witricity.com)
- [6] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z. *Antény a šíření rádiových vln*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005. 146 s. ISBN 80-214-1943-1.
- [7] LÁČÍK, Jaroslav. *Mikrovlnná technika (Vlnovod integrovaný do substrátu, obvody na bázi vlnovodu integrovaného do substrátu) – přednášky* [pdf]. Brno: VUT–FEKT, Ústav radioelektroniky, 12-10-2014. Dostupné z URL: [www.vutbr.cz](http://www.vutbr.cz).
- [8] LÁČÍK, J., T. MIKULAŠEK. *Circular ring-slot antenna fed by SIW for WBAN applications*. *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2013*. s. 213-216. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6546248&queryText%3DCircular+Ring-slot+Antenna+Fed>
- [9] DESLANDES, Dominic. *Design equations for tapered microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide transitions*. *2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*. IEEE, 2010, : 704-707. DOI: 10.1109/MWSYM.2010.5517884. ISBN 978-1-4244-6056-4. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5517884>
- [10] BOZZI, M., A. GEORGIADIS a K. WU. 2011. *Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas*. *IET Microwaves, Antennas*. 5(8): 909-. DOI: 10.1049/iet-map.2010.0463. ISSN 17518725. Dostupné také z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-map.2010.0463>
- [11] LECTURE 18: Horn Antennas(Rectangular horn antennas. Circular apertures.)[online]. [cit. 2015-3-4] Dostupné z URL: [http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna\\_dload/current\\_lectures/L18\\_Horns.pdf](http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L18_Horns.pdf)

- [12] ESQUIUS-MOROTE, Marc, Benjamin FUCHS, Jean-Francois ZURCHER a Juan R. MOSIG. A Printed Transition for Matching Improvement of SIW Horn Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. IEEE, 2013, **61**(4): 1923-1930. DOI: 10.1109/TAP.2012.2231923. ISBN 978-1-4244-6056-4. ISSN 0018-926x. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6374212>
- [13] ESQUIUS-MOROTE, M, B FUCHS a J. R. MOSIG. 2012. A new type of printed Ku-band SIW horn antenna with enhanced performances. In: *2012 International Symposium on Antennas and Propagation*. Piscataway: IEEE, s. 223-226. ISBN 9781467310017. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=>
- [14] ESQUIUS-MOROTE, Marc, Benjamin FUCHS, Jean-Francois ZURCHER a Juan R. MOSIG. Novel Thin and Compact H-Plane SIW Horn Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 2013, vol. 61, issue 6, s. 2911-2920 [cit. 2015-05-18]. DOI: 10.1109/tap.2013.2254449.
- [15] Škoda Media Portal. <https://media.skoda-auto.com/> [online]. 8.1.213n. 1. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: [https://media.skoda-auto.com/en/\\_layouts/Skoda.PRPortal/picture.aspx?ID=4730](https://media.skoda-auto.com/en/_layouts/Skoda.PRPortal/picture.aspx?ID=4730)

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

UWB	ultra wideband, ultra širokopásmová
f	frekvence
$\lambda$	vlnová délka
SIW	Substrate Integrated Waveguide, Vlnovod integrovaný do substrátu
$\epsilon_r$	relativní permitivita
TE <sub>0m</sub>	Transverzálně elektrické vid ve vlnovodu
c	Rychlost světla ve vakuu
f <sub>m</sub>	Mezní frekvence
w <sub>ef</sub>	efektivní šířka vlnovodu
d	průměr prokovů
w	šířka SIW
p	rozteč prokovů SIW
w	šířka SIW
$\lambda_g$	délka vlny ve vlnovodu
$\lambda_m$	mezní vlnová délka vlnovodu
w <sub>t</sub>	šířka impedančního transformátoru
w <sub>m</sub>	šířka mikropáskového vedení
Z <sub>mp</sub>	impedance mikropáskového vedení
h <sub>1</sub>	tloušťka substrátu
$\eta$	charakteristická impedance prostředí
S <sub>11</sub>	činitel odrazu
S <sub>21</sub>	činitel přenosu
BW	šířka pásma
BW%	šířka pásma v %

## A SKRIPT PRO VÝPOČET ROZMĚRU SIW

```
function vypocet(fc, er, d, p, fprac)
    c = 3e8;
    //fc = 6.2e9;
    //er = 3.38;
    //d = 1.2e-3;
    //p = 2.58e-3;
    //fprac = 8e9;

    lampracer=c/(fprac*sqrt(er)) // vypocet vlnove delky v
                                // materialu
    wef=c/(2*fc*sqrt(er)) // vypocet pricneho rozmeru
                           // ekvivalentniho vlnovodu
    lamc=c/(fc*sqrt(er)) // výpočet kritické vlnové
                           // délky
    w=wef+d^2/(0.95*p) // vypocet pricneho rozmeru
                       // SIW
    wefc=w-1.08*(d^2/p)+0.1*(d^2/w) //kontrola ekvivalentniho
                                    //vlnovodu presnejsim

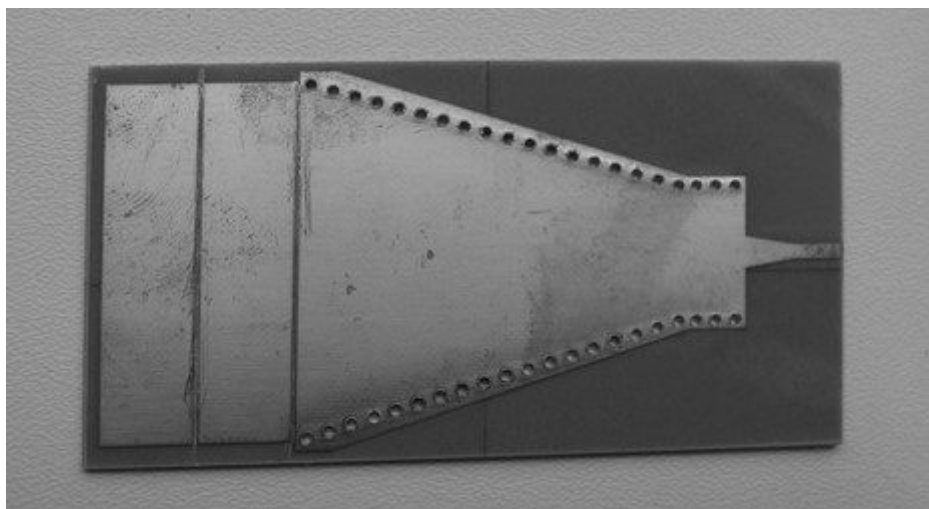
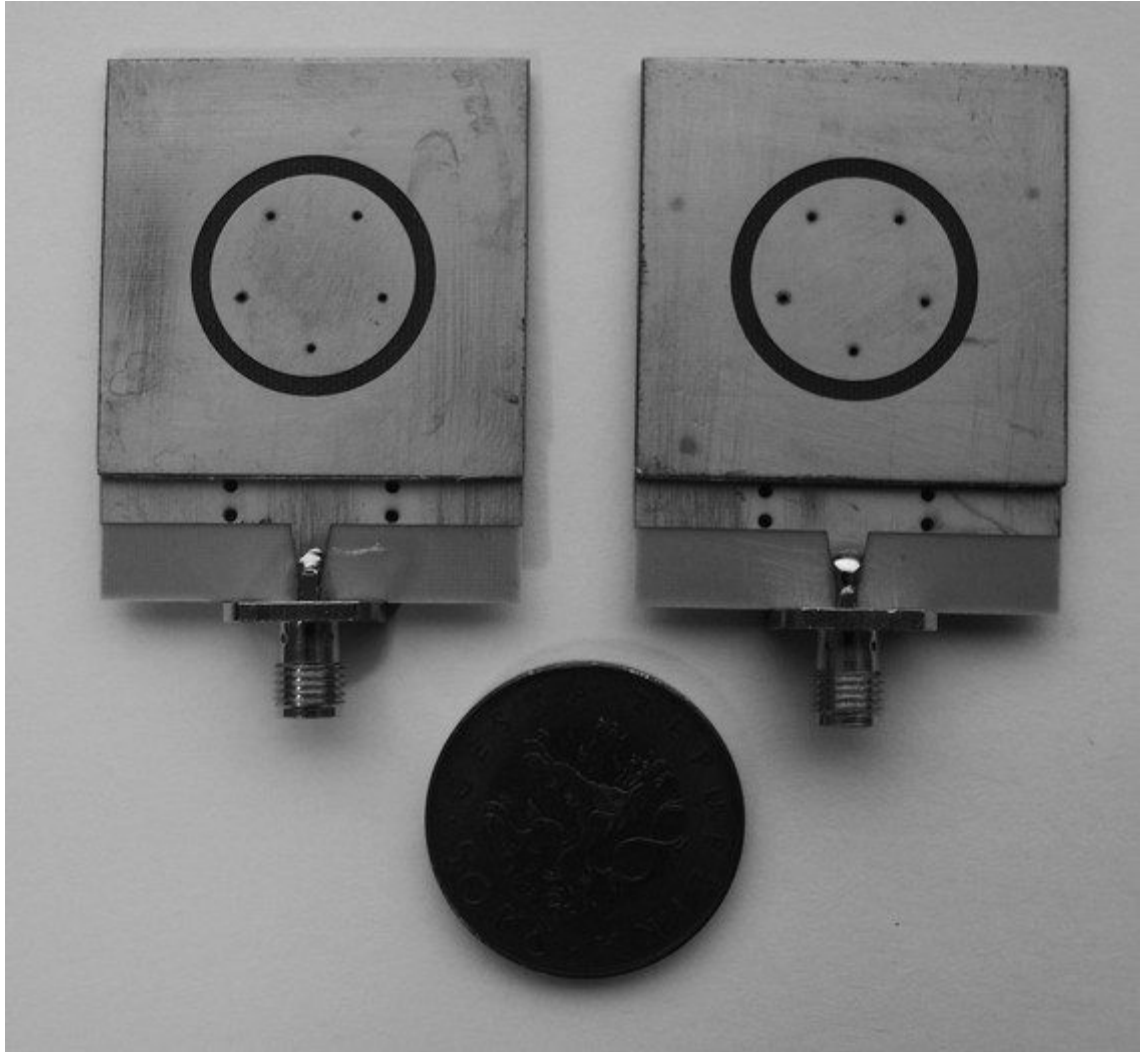
vypoctem
    // delka vlny ve vlnovodu
    lamgs = 1 /(sqrt((1/(lampracer))^2-(1/(2*w))^2))

    // prepocet na milimetry
    lampracer = lampracer*1e3
    w = w *1e3
    lamgs = lamgs*1e3

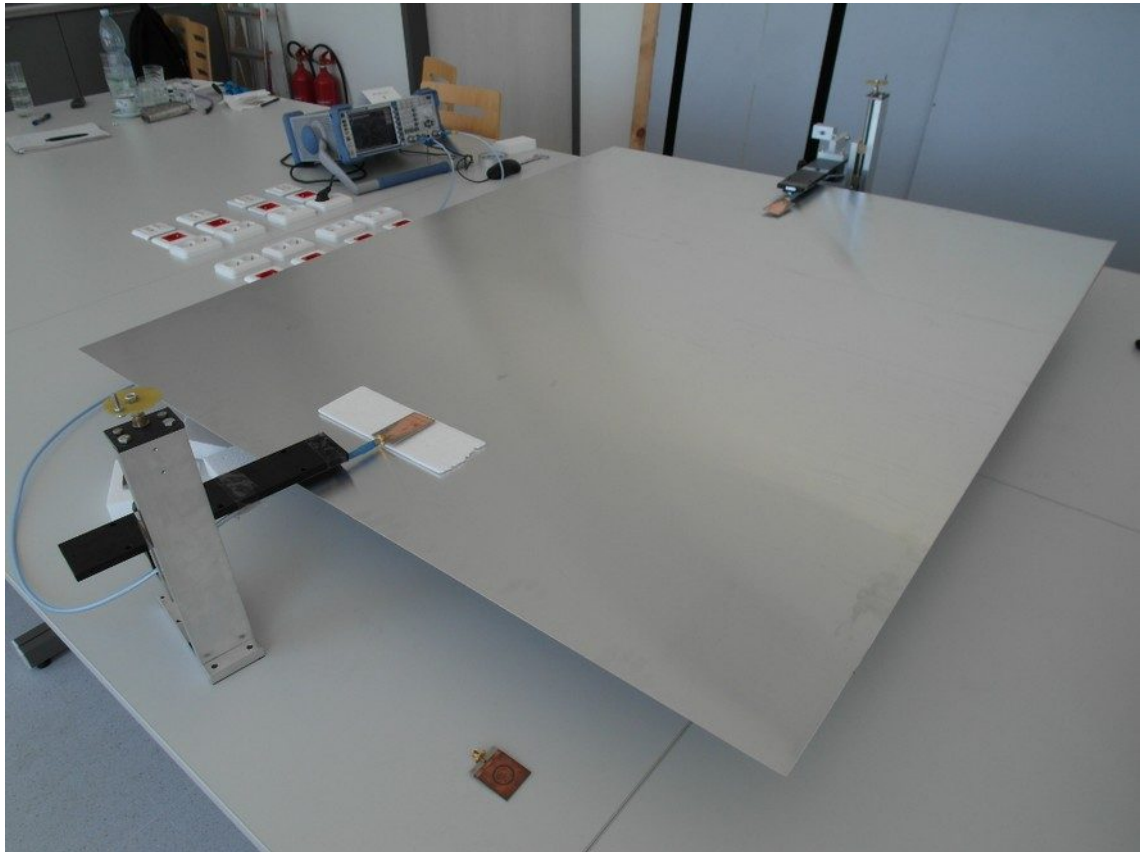
    // vytisteni vypocitanych parametru
    printf('Delka lam/4 - volny prostor: %f\n',c/fprac/4*1e3)
    printf('Délka vlny v substratu: %f mm \n',(lampracer))
    printf('Příčný rozměr wef je: %f mm \n',wef*1e3)
    printf('Příčný rozměr wefc je: %f mm \n',wefc*1e3)
    printf('Příčný rozměr SIW je: %f mm \n',w)
    printf('Délka vlny ve vlnovodu je: %f mm\n',lamgs)

    // kontrola zda jsou spravne navrzey prokovy
    if p/d<2 then
        printf('Pomer p/d je mensi nez 2\n')
        if p/w<1/8 then
            printf('Pomer p/w je mensi nez 1/8')
        end
    else printf('Prokovy nejsou navrzene spravne')
    end
endfunction
```

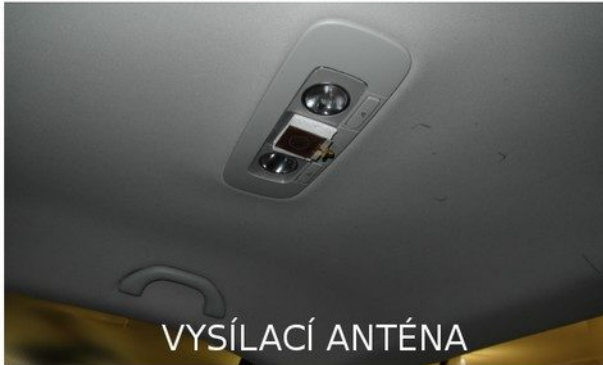
## B FOTOGRAFIE ANTÉN



## C FOTOGRAFIE Z MĚŘENÍ PŘENOSU



## D UMÍSTĚNÍ ANTÉN V AUTOMOBILU



## E VÝSLEDKY MĚŘENÍ PŘENOSU V AUTOMOBILU 7,5 GHz – 8,5 GHz

