



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## ANTÉNNÍ SYSTÉM PRO BEZDRÁTOVÉ MIKROFONY

ANTENNA SYSTEM FOR WIRELESS MICROPHONES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Bartoš

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Láčák, Ph.D.

BRNO 2018

# Diplomová práce

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

**Student:** Bc. Adam Bartoš

**ID:** 164240

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### Anténní systém pro bezdrátové mikrofony

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou antén pro bezdrátový mikrofón pracující v pásmu UHF. Vyberte vhodný typ směrové a všesměrové antény. Dle pokynů vedoucího práce oba typy antén navrhnete ve vhodném simulačním programu. Dále provedte návrh děliče výkonu se stejným dělicím poměrem, který bude rozdělovat signál do 4 přijímačů.

Navržené komponenty realizujte a experimentálně ověřte jejich funkčnost. Detailně diskutujte dosažené výsledky.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, A.C. Antenna Theory: Analysis and Design, 2/E. New York: J. Wiley & Sons, 1996.

[2] PROCHÁZKA, M. Antény - encyklopedická příručka, Praha: BEN - technická literatura, 2001.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 17.5.2018

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Patrik Hricišák

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá návrhom anténneho systému pre bezdrôtový prenos zvuku používaný najmä v profesionálnej zvukárskej praxi. Úvodná časť rieši vo všeobecnosti problematiku bezdrôtových systémov, využívané frekvenčné pásma a praxou overené druhy antén. Následne je riešená distribúcia signálu pomocou anténneho rozbočovača. Návrh jednotlivých antén bol realizovaný s požiadavkou na reálne využitie v praxi a preto boli vybrané typy s vhodnými vlastnosťami a jednoduchou konštrukciou vhodnou na malosériovú výrobu. Práca obsahuje simulácie modelov jednotlivých zariadení, ich reálne konštrukčné návrhy a následné merania prototypov a finálnych výrobkov. Všetky tri vyrobené zariadenia – rackový signálový splitter,  $\lambda/4$  anténa aj Helix anténa sú plne funkčné, dosahujú dobrých parametrov a sú pripravené na ďalšiu výrobu a jednoduché úpravy v prípade potreby zmeny požadovaného frekvenčného pásma. Záver obsahuje celkové zhodnotenie dosiahnutých výsledkov.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

bezdrôtové mikrofóny, anténny systém, UHF pásmo, simulácia, anténny rozbočovač, Wilkinsonov delič, splitter, šroubovicová anténa, helix, koaxiálna anténa, monopól, technická dokumentácia

## ABSTRACT

Master's thesis deals with the design of an antenna system for wireless sound transmission used mainly in professional sound reinforcement. The introductory part deals generally with wireless microphones, frequency bands used and proven antenna types. Next, this work deals with signal distribution that is realized using the antenna splitter. The antenna parts is focused on easy production and real usage, therefore were selected antennas with appropriate properties suitable for small series production. This thesis includes simulation of each device, their real construction design and measurements of built prototypes and final products. All three produced devices – the rack splitter,  $\lambda/4$  antenna and Helix antenna are fully working, achieve good parameters and are ready for further manufacturing and easy modifications in case of frequency band change requirement. The conclusion includes an overall assessment of the results achieved.

## KEYWORDS

wireless microphones, antenna system, UHF band, simulation, antenna splitter, Wilkinson divider, splitter, helical antenna, helix, coaxial antenna, monopole, technical documentation

BARTOŠ, A. *Anténní systém pro bezdrátové mikrofony*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 47 s., 13 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Anténní systém pro bezdrátové mikrofony 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)

# POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať akademickému vedúcemu práce doc. Ing. Jaroslavovi Láčíkovi, Ph.D. za odbornú pomoc pri návrhu celej diplomovej práce. Taktiež by som rád poďakoval Ing. Patrikovi Hricišákovi za pomoc pri konštrukčnom riešení a konzultáciách na textovej časti práce. Za možnosť prakticky testovať dané riešenie v reálnych podmienkach ďakujem firme Michal Urban - Shramot a hudobnej skupine Fuera Fondo. Za vytlačenie obalov a konštrukčných prvkov na 3D tlačiarňi ďakujem Andrejovi Racíkovi z dielne Crab's shed.

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

<b>ABSTRAKT</b>	<b>3</b>
<b>Kľúčové slová</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Keywords</b>	<b>3</b>
<b>Prohlášení</b>	<b>5</b>
<b>Pod'akovanie</b>	<b>5</b>
<b>Obsah</b>	<b>i</b>
<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>iii</b>
<b>Zoznam tabuliek</b>	<b>iv</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Celková koncepcia</b>	<b>2</b>
<b>2 Antény rozbočovač (splitter)</b>	<b>6</b>
2.1 Rozbočovače/zlučovače/deliče všeobecne .....	6
2.2 Základné možnosti realizácie rozbočovačov .....	8
2.2.1 Jednoduchá T-spojka .....	8
2.2.2 Jednoduchý transformátor.....	8
2.2.3 Wilkinsonov delič .....	9
2.3 Výber vhodného rozbočovača .....	10
2.3.1 Návrh rozbočovača - požadované parametre.....	10
2.3.2 Návrh rozbočovača - výpočet .....	12
2.3.3 Návrh rozbočovača - simulácia.....	14
2.3.4 Výsledky simulácie a merania .....	15
2.3.5 Finálny výrobok.....	18
<b>3 Všesmerová anténa</b>	<b>21</b>
3.1 Koaxiálna $\lambda/4$ anténa.....	22
3.1.1 Symetrizačný obvod - balun .....	22
3.1.2 Návrh antény - požadované parametre .....	22

3.1.3	Návrh antény - výpočet.....	23
3.1.4	Návrh antény - simulácia.....	23
3.1.5	Výsledky simulácie a meranie.....	24
3.1.6	Finálny výrobok.....	27
<b>4</b>	<b>Smerová anténa</b>	<b>28</b>
4.1	Logaritmicko-periodické antény.....	28
4.2	Helix antény.....	28
4.2.1	Návrh antény a návrhové vzťahy.....	29
4.2.2	Prispôsobovací obvod.....	32
4.2.3	Návrh antény - výpočet a teoretické parametre.....	33
4.2.4	Návrh antény - simulácia.....	35
4.2.5	Výsledky simulácie a meranie.....	36
4.2.6	Finálny výrobok.....	42
	<b>Záver</b>	<b>44</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>46</b>
	<b>Zoznam symbolov, veličín a skratiek</b>	<b>47</b>
<b>A</b>	<b>Výrobné podklady anténneho systému</b>	<b>1</b>
A.1	Podklad plošného spoja pre splitter (M 1:1).....	1
A.2	Náčrt umiestnenia plošného spoja splitteru v rackovej krabici.....	2
A.3	Základné rozmery helix antény pre výrobu.....	3
A.4	Podklad plošného spoja pre impedančný transformátor helix antény - vhodný pre tlač (M 1:1).....	4
A.5	Podklad plošného spoja pre impedančný transformátor helix antény - kóty	4
A.6	Držiaky drôtu helix antény (M1:2).....	5
A.7	Rozmery koaxiálnej $\lambda/4$ antény pre prototypovú výrobu (M1:2).....	6
<b>B</b>	<b>Zoznam súčiastok</b>	<b>7</b>
B.1	Zoznam súčiastok Wilkinsonovho deliča.....	7
B.2	Zoznam súčiastok koaxiálnej $\lambda/4$ antény.....	7
B.3	Zoznam súčiastok helix antény.....	8
B.4	Príslušenstvo - kabeláž.....	8
<b>C</b>	<b>Fotodokumentácia</b>	<b>9</b>



# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Celková schéma daného riešenia .....	2
Obr. 2 Set mikrofónneho prijímača, mikrofónu a vreckového vysielača Sennheiser ew500 [10] .....	3
Obr. 3 Rozdelenie frekvenčných pásiem využívaných bezdrôtovými systémami Sennheiser [11] .....	3
Obr. 4 Šírenie elektromagnetickej vlny .....	4
Obr. 5 Šírenie vln pri maximálnom prenose energie .....	4
Obr. 6 Minimálny prenos energie spôsobený rozdielnou polarizáciou antén.....	4
Obr. 7 Pokrytie pódia všesmerovou anténou .....	5
Obr. 8 Pokrytie pódia helix anténou .....	5
Obr. 9 Signálový rozbočovač (splitter).....	6
Obr. 10 Signálový zlučovač (combiner) .....	7
Obr. 11 Jednoduchá T-spojka s BNC konektormi a schéma jej zapojenia.....	8
Obr. 12 Pridanie cievky s odbočkou a rezistora do obvodu rozbočovača .....	8
Obr. 13 Pridanie impedančného transformátora do obvodu rozbočovača.....	9
Obr. 14 Zapojenie Wilkinsonovho deliča .....	10
Obr. 15 Náčrt tvaru Wilkinsonovho deliča .....	11
Obr. 16 Náčrt výsledného návrhu rozbočovača.....	14
Obr. 17 Výsledný návrh rozbočovača v 3D vizualizácii s označenými číslami portov .	15
Obr. 18 Graf závislosti činiteľa odrazu všetkých portov na frekvencii .....	16
Obr. 19 Graf závislosti činiteľa prenosu výstupných portov voči vstupnému na frekvencii .....	16
Obr. 20 Graf závislosti izolácie jednotlivých výstupných portov frekvencii .....	17
Obr. 21 Graf závislosti modulu impedancie jednotlivých portov na frekvencii.....	18
Obr. 22 Umiestnenie rozbočovačov v rackovej krabici.....	19
Obr. 23 Detail pripojenia vstupného portu rozbočovača .....	20
Obr. 24 Zadný panel splitteru s SMA konektormi.....	20
Obr. 25 Bičová anténa dodávaná k prijímačom Sennheiser .....	21
Obr. 26 Ukážka koaxiálnej antény WiFi routera pre pásmo 2,4 GHz .....	21
Obr. 27 Transponovaná koaxiálna kolineárna anténa [3] .....	21
Obr. 28 Model antény v CST Microwave Studio .....	22
Obr. 29 Graf závislosti zisku antény na frekvencii - <i>simulácia</i> .....	24
Obr. 30 Vyžarovacia charakteristika koaxiálnej antény vo vertikálnej rovine.....	25

Obr. 31 Vyžarovacia charakteristika koaxiálnej antény v horizontálnej rovine.....	25
Obr. 32 Graf závislosti modulu a fázy činiteľa odrazu antény na frekvencii .....	26
Obr. 33 Graf závislosti pomeru stojatých vln na frekvencii .....	26
Obr. 34 Vyrobená koaxiálna anténa bez obalu .....	27
Obr. 35 Model 3D obalu pre koaxiálnu anténu .....	27
Obr. 36 Koaxiálna anténa - finálny výrobok .....	27
Obr. 37 Shure PA805 Log-Periodická anténa [12].....	28
Obr. 38 Shure HA-8089 Helix anténa [13].....	29
Obr. 39 Návrhové rozmery helix antény [4].....	30
Obr. 40 Helix anténa s prisp. členom zakomponovaným do tela reflektora [6].....	30
Obr. 41 Zapojenie impedančného transformátora .....	32
Obr. 42 Nákres rozmerov mikropáskového impedančného transformátora .....	35
Obr. 43 Model helix antény v CST Microwave Studio a detail umiestnenia impedančného transformátora .....	36
Obr. 44 Graf závislosti zisku helix antény na frekvencii - <i>simulácia</i> .....	37
Obr. 45 Graf závislosti činiteľa odrazu helix antény na frekvencii .....	37
Obr. 46 Graf závislosti modulu impedancie helix antény na frekvencii .....	38
Obr. 47 Graf závislosti pomeru stojatých vln na frekvencii .....	38
Obr. 48 Graf závislosti osového pomeru helix antény na frekvencii - <i>simulácia</i> .....	39
Obr. 49 Graf závislosti predo-zadného pomeru na frekvencii - <i>simulácia</i> .....	39
Obr. 50 Smerový diagram helix antény frekvencia 590 MHz - <i>simulácia</i> .....	40
Obr. 51 Smerový diagram helix antény frekvencia 650 MHz - <i>simulácia</i> .....	41
Obr. 52 Smerový diagram helix antény frekvencia 755 MHz - <i>simulácia</i> .....	41
Obr. 53 Finálna verzia helix antény - predný pohľad.....	42
Obr. 54 Finálna verzia helix antény - držiak .....	43
Obr. 55 Impedančný transformátor helix antény .....	43

## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Závislosť vložného útlmu rozbočovača na počte výstupných portov .....	7
Tab. 2 Známe rozmery koaxiálneho káblu RG-58 .....	23
Tab. 3 Konečné rozmery koaxiálnej antény .....	23
Tab. 4 Parametre antény vypočítané pomocou kalkulátora [4] .....	34

Tab. 5 Rozmery antény použité pri simulácii .....	36
Tab. 6 Parametre ľavotočivej zložky helix antény - <i>simulácia</i> .....	40

# ÚVOD

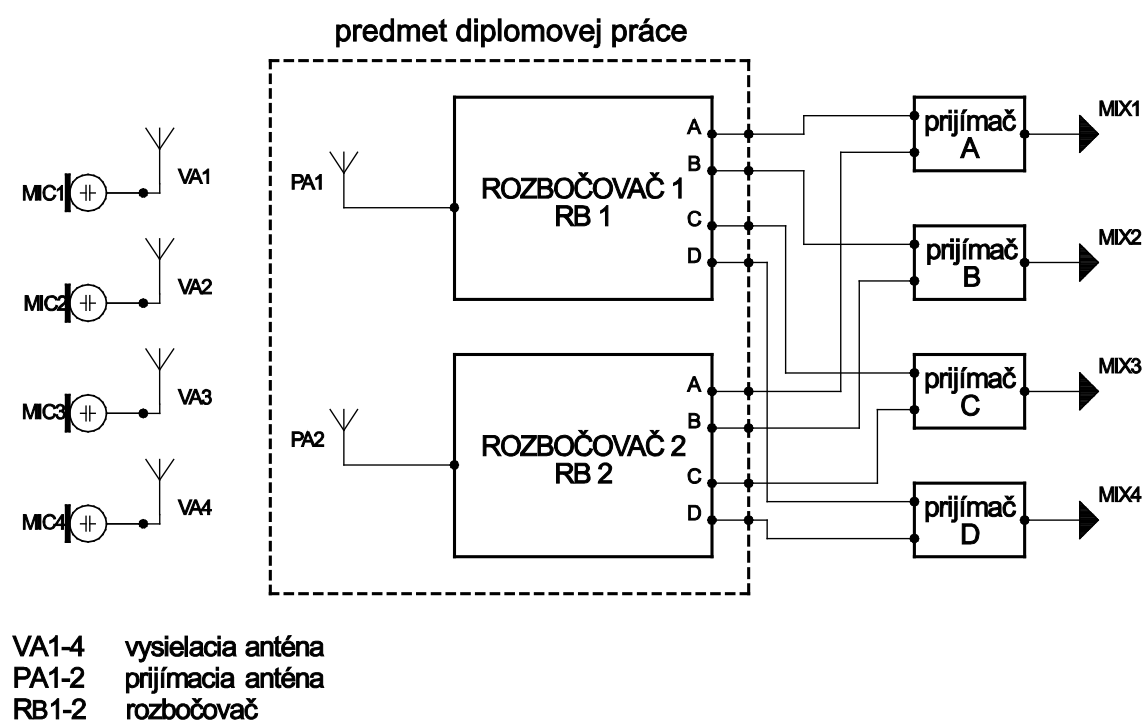
Cieľom tejto práce bolo navrhnuť celkovú koncepciu a riešenie anténneho systému pre bezdrôtové mikrofóny využívaného pri ozvučení rôznych typov kultúrnych podujatí. Boli preskúmané rôzne typy riešení používaných v praxi a vybrané tie najvhodnejšie a výrobné najjednoduchšiu pre danú aplikáciu. Táto diplomová práca je podkladom pre malosériovú výrobu uvedených komponentov v zmysle zadaných požiadaviek a to: konštrukčná jednoduchosť, výrobná nenáročnosť, prevádzková odolnosť a optimálna výrobná cena. Zámerom bolo vyrobiť anténny systém využiteľný najmä pri potrebe prijímať signál z pohybujúcich sa mikrofónov (vysielačov) a to hlavne v horizontálnej rovine. Preto nie je potrebné dosiahnuť široký vyžarovací uhol vo vertikálnej rovine a je možné použiť horizontálne všesmerovú anténu. V prípade smerovej antény je vyžadovaný vyžarovací uhol približne  $50-90^\circ$  v horizontálnej rovine, tak aby bolo možné ľahko použitím takejto antény odfiltrovať rušivé signály prichádzajúce z iných smerov, než sú umiestnené mikrofóny. Jej prípadná kruhová polarizácia je výhodou.

Čo sa týka frekvenčného pásma, požiadavkou bolo navrhnuť antény a anténne rozbočovače funkčné vo frekvenčnom pásme UHF, keďže sa jedná o najvyužívanejšie pásmo bezdrôtovými mikrofónmi. V minulosti sa na tento prenos využívali aj pásma VHF, dnes sa avšak kvôli miniaturizácii takmer nevyužívajú. Novinkou je v posledných rokoch presun využívaných frekvencií do licenčne voľného pásma 2,4 GHz ISM, kde je avšak značný problém so zarušením a s prestupom signálu cez prekážky. Preto sa zatiaľ toto pásmo nepresadilo. Keďže každý výrobca používa rôzne frekvenčné pásma v UHF, boli preskúmané výrobky od viacerých výrobcov a zistená požiadavka na pokrytie pásma približne od 500 do 780 MHz. Vyššie frekvenčné pásma sa už momentálne nepoužívajú (napriek tomu, že výrobcovia majú stále zariadenia s takýmito pásmami v ponuke), keďže momentálne sa v pásmach nad 800MHz nachádzajú mobilné siete LTE. Siete LTE sa majú približne od roku 2021 rozšíriť aj do pásma 700-800MHz a preto momentálne dochádza k presunu do nižších frekvenčných pásiem.

Prijímače obsahujú štandardne 2 diverzité vstupy so vstupnou impedanciou  $50 \Omega$  a väčšina má taktiež na vstupe zaradený vstupný filter, ktorý teda nie je v tomto anténnom systéme potrebný. Vhodné je spomenúť, že každý mikrofónny prijímač je použiteľný iba s jedným mikrofónom (bežné modely). Keďže sa zväčša používajú naraz dva a viacej kusov mikrofónov a aby nebolo potrebné pre každý prijímač zvlášť inštalovať antény, je vhodné použiť antény rozbočovač (splitter), tak aby bol ale zároveň zachovaný diverzitný príjem. Ako optimálne riešenie vzhľadom k rozmerom, útlmu a počtu používaných mikrofónov bol zvolený rozbočovač s jedným vstupom a 4 výstupmi. Takéto rozbočovače teda budú musieť byť použité dva, aby bola zachovaná plná diverzita vstupného signálu.

# 1 CELKOVÁ KONCEPCIA

Celkový vyžadovaný návrh je vidno na nasledujúcej blokovej schéme (Obr. 1 Celková schéma daného riešenia). Signál z bezdrôtových mikrofónov MIC1-4, prípadne univerzálnych vreckových vysielateľov je vysielaný pomocou integrovaných antén. Prijímaný je pomocou antén, ktoré bude potrebné skonštruovať. Keďže prijímače (Obr. 2) obsahujú 2 anténne vstupy, používajú diverzifický príjem a preto je pre dosiahnutie čo najlepšej kvality prenosu zvuku potrebné použiť 2 antény rôzne umiestnené v priestore a teda aj 2 nezávislé a oddelené anténne rozbočovače.



Obr. 1 Celková schéma daného riešenia

Signál je pomocou rozbočovačov rozdelený na vhodný počet výstupov, ktoré sú následne prepojené so vstupmi prijímačov. Tie majú zvyčajne vstupnú impedanciu  $50 \Omega$  a je teda vhodné celé riešenie tohto systému postaviť na rovnakej impedancii. Prijímače majú možnosť ladiť frekvenciu v určitom frekvenčnom rozsahu. Každý výrobca používa rôzne frekvenčné pásma a ich šírky. Pre príklad je uvedená tabuľka výrobcu Sennheiser (Obr. 3), ktorá obsahuje zoznam pásiem využívaných jej najpredávanejšími bezdrôtovými systémami v pásme UHF. V tejto práci bude uvažované použitie pásiem C, B, G a prípadne A, ktoré sa najčastejšie používajú na území Slovenskej a Českej republiky. Jedná sa teda o frekvenčné pásmo 566 - 776 MHz, pre ktoré bude potrebné dosiahnuť dostatočné parametre jednotlivých komponentov. Úzkopásmové komponenty - antény, budú môcť byť naladené iba pre dané konkrétne pásmo, napr. C, B alebo G so šírkou 36 (42) MHz.

Prijímač pretransformuje vysokofrekvenčný signál na nízko-frekvenčný zvukový signál, ktorý je ďalej privedený na vstup mixpultu, prípadne iného zariadenia schopného spracovať takýto signál.

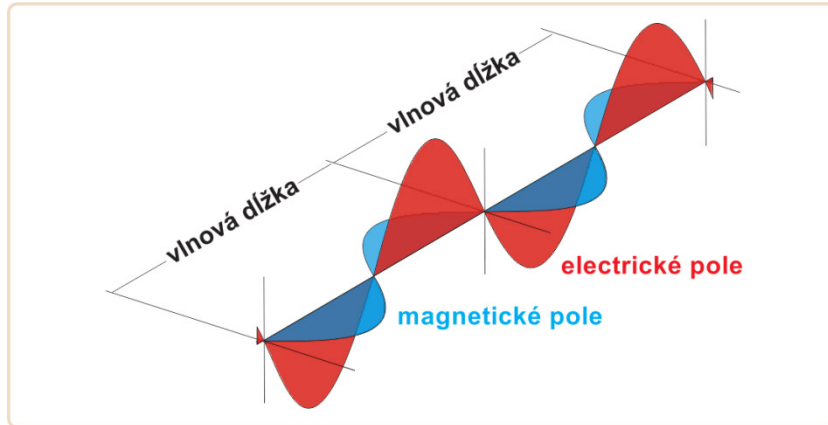


Obr. 2 Set mikrofónneho prijímača, mikrofónu a vreckového vysielača Sennheiser ew500 [10]

	TV Channel	From MHz	To MHz	Sennheiser G2	Sennheiser XS	Sennheiser G3	
Must Not Be Used In The UK. 863 - 865MHz is licence exempt.	70	862	870	Range-E 830-865 MHz 35 MHz	Range-E 821-832 MHz and 863-865 MHz only	Range-E 823-865 MHz 42 MHz	
	69	854	862				
	68	846	854				
	67	838	846				
	66	830	838				
	65	822	830				
	64	814	822				
	63	806	814				
	62	798	806				
	61	790	798				
Interleaved Spectrum Available for PMSE use	60	782	790	Range-D 786-822 MHz 38 MHz			Range-D 780-822 MHz 42 MHz
	59	774	782				
	58	766	774				
	57	758	766				
	56	750	758				
	55	742	750				
	54	734	742				
	53	726	734				
	52	718	726				
	51	710	718				
	50	702	710				
	49	694	702				
	48	686	694				
	47	678	686				
	46	670	678				
	45	662	670				
	44	654	662				
	43	646	654				
	42	638	646				
	41	630	638				
Six months rolling notice in UK. Consult JPMG.	40	622	630	Range-B 626-662 MHz 36 MHz	Range-GB 606-630 MHz 24 MHz	Range-B 626-668 MHz 42 MHz	Range-GB 606-648 MHz 42 MHz
	39	614	622				
	38	606	614				
	37	598	606				
	36	590	598				
	35	582	590				
	34	574	582				
	33	566	574				
	32	558	566				
	31	550	558				
Interleaved Spectrum Available for PMSE use	30	542	550	Range-A 518-554 MHz 36 MHz		Range-G 566-608 MHz 42 MHz	Range-A 516-558 MHz 42 MHz
	29	534	542				
	28	526	534				
	27	518	526				
	26	510	518				
	25	502	510				
	24	494	502				
	23	486	494				
	22	478	486				
	21	470	478				

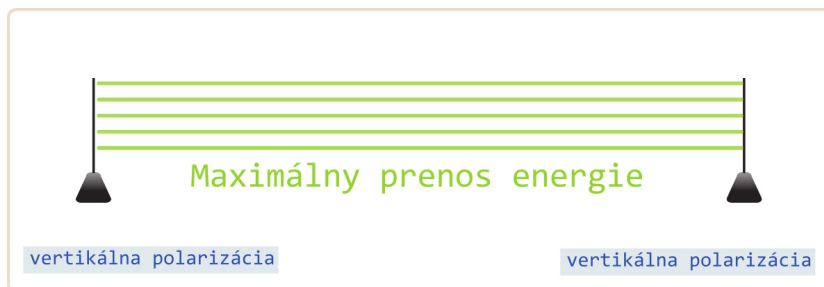
Obr. 3 Rozdelenie frekvenčných pásiem využívaných bezdrôtovými systémami Sennheiser [11]

Ako je možné vidieť na nasledujúcom obrázku, elektromagnetická vlna sa skladá z dvoch zložiek - elektrickej a magnetickej zložky, ktoré oscilujú určitou frekvenciou a sú na seba navzájom kolmé. Polarizácia vln vzniká na strane vysielača, napríklad vertikálne umiestnená monopólová anténa vyžaruje vlny polarizované vertikálne.



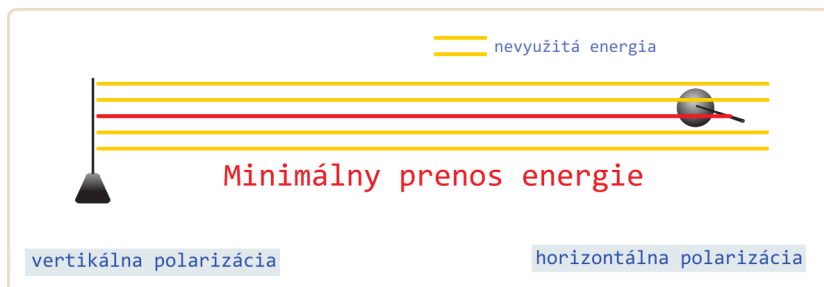
Obr. 4 Šírenie elektromagnetickej vlny

Aby bolo možné dosiahnuť maximálny prenos energie od vysielača k prijímaču, je v tomto prípade potrebné zachovať rovnakú polarizáciu a polohu oboch antén. Akákoľvek odchýlka polohy od polohy rovnobežnej spôsobí horšie šírenie signálu.



Obr. 5 Šírenie vln pri maximálnom prenose energie

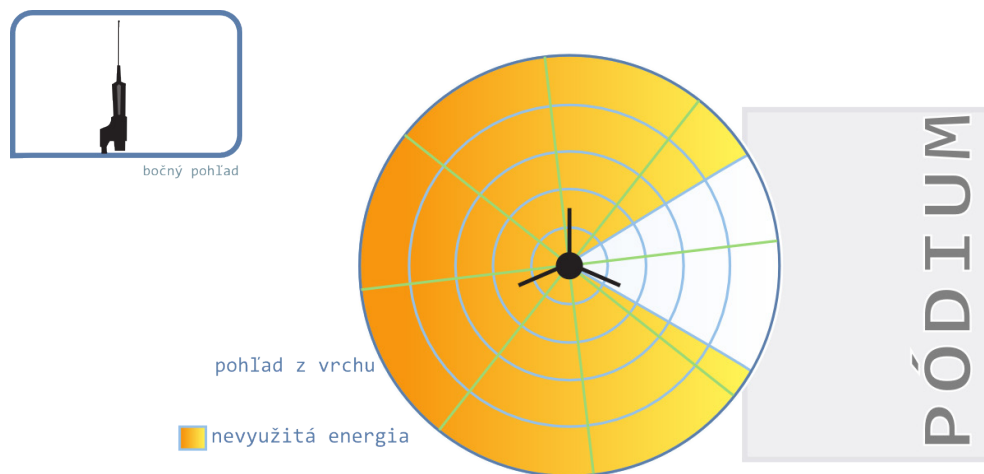
Ak sa antény vzájomne natočia o uhol  $90^\circ$  spôsobí to najhorší možný príjem signálu. Signál je vtedy prijímaný iba z odrazov a dochádza k znateľným výpadkom.



Obr. 6 Minimálny prenos energie spôsobený rozdielnou polarizáciou antén

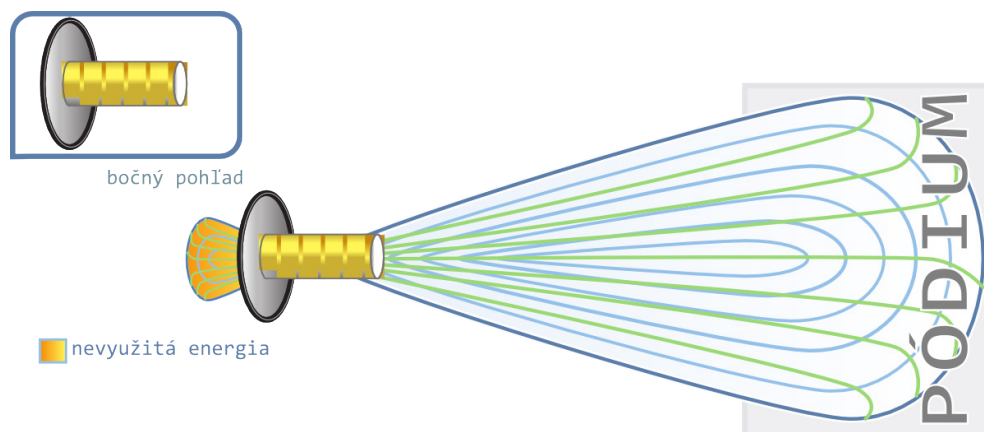
Obrázky a teória prevzaté a upravené z [14].

Väčšina antén trpí problémom s polarizáciou. Vo väčšine prípadov to nie je problém - vysielanie FM rádia alebo DVB-T televízneho vysielania prebieha stabilne určitou polarizáciou a stačí preto správne natočiť anténu pri inštalácii. Problém nastáva v hudobnom a filmovom priemysle, kde je pri použití bezdrôtových systémov poloha antény dôležitý aspekt meniaci sa v čase.



Obr. 7 Pokrytie pódia všesmerovou anténou

Vysielacie antény sú majoritne  $\lambda/4$  lineárne antény polarizované vertikálne. Štandardne sa preto prijímacie lineárne polarizované antény taktiež umiestnia vertikálne. Problém nastane pri pohybe vysielача umiestneného na interpretovi a zmene jeho orientácie voči prijímacej anténe. Tento problém je možné efektívne riešiť jedine použitím kruhovo polarizovaných antén, napríklad typu Helix.



Obr. 8 Pokrytie pódia helix anténou

Použitie a princíp funkcie obidvoch typov antén je vysvetlený v kapitolách o všesmerovej a smerovej anténe.

Obrázky a teória prevzaté a upravené z [14].



## 2 ANTÉNNY ROZBOČOVAČ (SPLITTER)

Antény rozbočovač je vhodné použiť tam, kde je potreba distribuovať signál medzi viacerými mikrofónnymi prijímačmi (typicky rack osadený prijímačmi). Ušetrí sa viacero antén a kabeláže. Hlavným sledovaným parametrom je priechodzí útlm rozbočovača od ktorého závisí, či bude signál dostatočne silný pre jednotlivé prijímače alebo bude potrebné ešte použiť antény zosilňovač na zosilnenie vstupného signálu do rozbočovača. Praxou je overené, že 4-cestné rozbočovače môžu byť riešené pasívne, keďže dosahujú priechodzí útlm dostatočne nízky vzhľadom na dostatočnú citlivosť prijímačov a nemusí sa teda do obvodu zakomponovať aj antény zosilňovač. Ten sa zväčša používa až pri prenose signálu na väčšie vzdialenosti (stovky metrov), kedy dochádza k väčšiemu útlmu signálu a väčšiemu vplyvu rušenia. Vtedy je zároveň vhodné použiť aj úzkopásmový filter a vysoko smerové antény, čo avšak nie je prípad použitia v tejto práci.

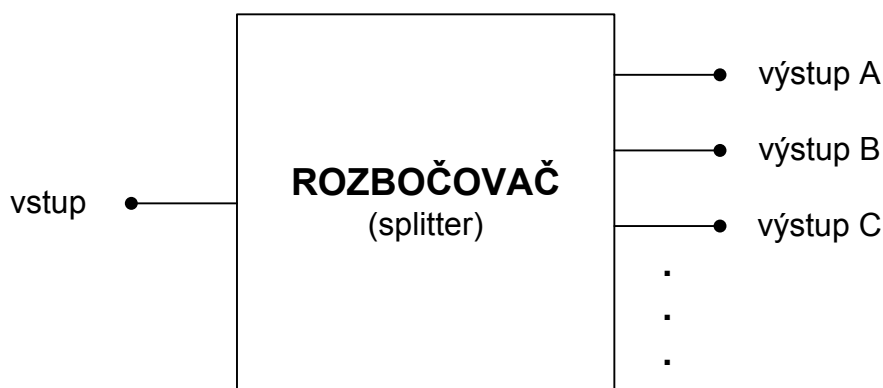
### 2.1 Rozbočovače/zlučovače/deliče všeobecne

Zvyčajne sa jedná o pasívne zariadenie, ktoré prijíma na vstupe signál a prenáša ho do viacerých výstupov s určitou amplitúdovou a fázovou charakteristikou.

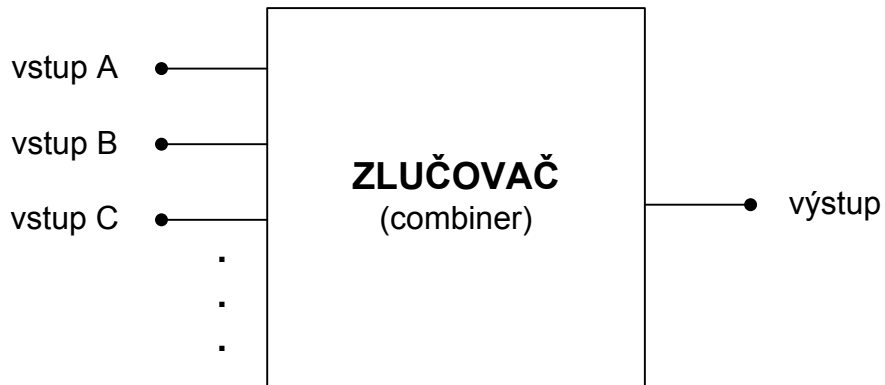
Teoreticky by mal mať tieto parametre:

- rovnakú amplitúdu na každom výstupe
- nulový fázový posun medzi jednotlivými výstupmi
- vysokú úroveň izolácie každého výstupného signálu
- vložný útlm podľa počtu výstupných portov (Tab. 1)

[1]



Obr. 9 Signálový rozbočovač (splitter)



Obr. 10 Signálový zlučovač (combiner)

Keďže sa jedná o pasívne zariadenie, ktoré by malo mať dostatočnú izoláciu a nulový fázový posun signálu medzi jednotlivými výstupnými portami, je ho možné použiť aj ako zlučovač signálu, kde výstup bude v tomto prípade tvoriť vstupný port, na ktorom bude vektorový súčet signálu jednotlivých výstupných portov (v tomto prípade vstupných). Izolácia vstupných portov v prípade použitia ako zlučovača závisí od impedančného prispôsobenia výstupu. V prípade najhoršieho impedančného prispôsobenia (otvorený port) bude izolácia dosahovať 6 dB, v prípade najlepšieho teoreticky nekonečno.

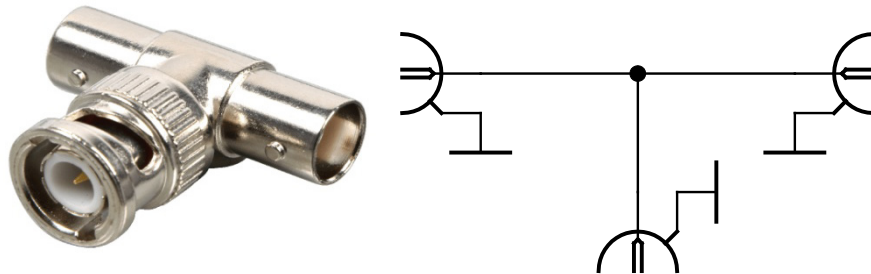
[1]

Počet výstupných portov	Teoretický vložný útlm [dB]
2	3,0
3	4,8
4	6,0
5	7,0
6	7,8
8	9,0

Tab. 1 Závislosť vložného útlmu rozbočovača na počte výstupných portov

## 2.2 Základné možnosti realizácie rozbočovačov

### 2.2.1 Jednoduchá T-spojka



Obr. 11 Jednoduchá T-spojka s BNC konektormi a schéma jej zapojenia

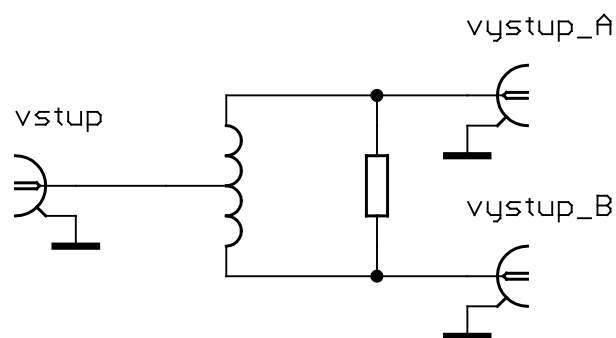
Najjednoduchšia forma rozbočovača, má jeden vstup a dva výstupy, ktoré majú rovnakú amplitúdu a fázu, keďže sú na priamo prepojené a mechanicky symetrické. Spojenie na priamo avšak spôsobuje straty vplyvom odrazu, keďže vstupy a výstupy nie sú impedančne prispôbené. Vzniká značný vložný útlm a malá úroveň izolácie medzi výstupmi (maximálne 3 dB v ideálnom prípade).

[1]

### 2.2.2 Jednoduchý transformátor

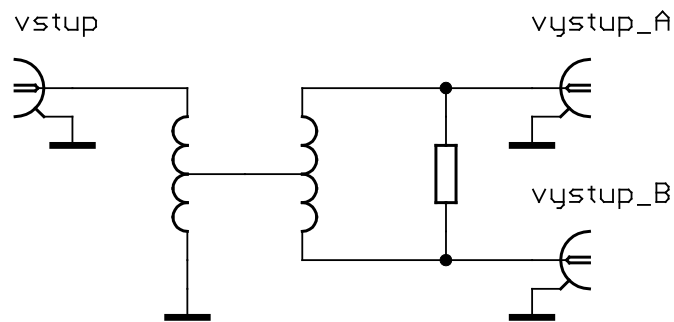
U obvyčajnej T-spojky nastáva problém s impedančným prispôbením a slabou izoláciou medzi výstupnými portami. Izoláciu je možné doceliť pridaním cievky s odbočkou na vstup a zároveň rezistoru medzi výstupné porty. Cievka spôsobí fázový posun o  $180^\circ$ , rezistorom prejde signál napriamo a tak sa na správnom mieste odčíta a dosiahneme ideálne nekonečne veľkú izoláciu.

[1]



Obr. 12 Pridanie cievky s odbočkou a rezistora do obvodu rozbočovača

Stále avšak tento obvod nerieši impedančné prispôsobenie na vstupe. To musí byť vyriešené impedančným transformátorom s pomerom 2:1.



Obr. 13 Pridanie impedančného transformátora do obvodu rozbočovača

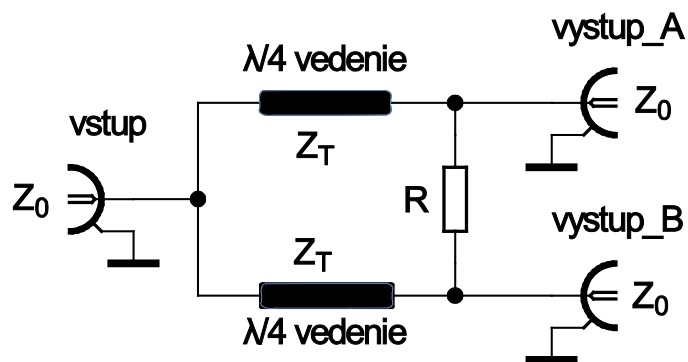
Takéto zapojenie nebude mať teoreticky žiadny útlm, keďže zapojenie je symetrické a na koncoch rezistora je rovnaké napätie. Útlm signálu na každom porte bude spôsobovať iba rozdelenie signálu na 2 časti a bude teda na každom porte 3 dB. Odpor rezistoru by mal mať rovnakú hodnotu ako je impedancia transformátora, v tomto prípade súčtu impedancií 2 vinutí transformátora zapojených do série.

### 2.2.3 Wilkinsonov delič

Využíva princíp štvrt'vlnného impedančného transformátora. Pomocou vedenia o štvrtinovej dĺžke oproti dĺžke vlny sa dá vytvoriť vedenie, ktoré bude transformovať impedanciu. Impedancia tohto vedenia závisí od charakteristickej impedancie obvodov, z ktorých sa delič skladá a ktoré na delič nadväzujú. V prípade riešenia pomocou planárnej verzie je možné jednoducho meniť reálnu aj imaginárnu zložku impedancie tohto úseku vedenia zmenou šírky a dĺžky cesty na substráte (obojsmerný plošný spoj).

Aby bola na obidvoch výstupoch Wilkinsonovho deliča dosiahnutá rovnaká impedancia, je potrebné medzi vstup a výstup vložiť vedenie s impedanciou rovnou  $\sqrt{2}$ -násobku požadovanej impedancie.

Medzi výstupné porty je opäť umiestnený rezistor, ktorý spôsobí odčítanie priamej vlny a vlny fázovo posunutej o  $180^\circ$  a tak je možné dosiahnuť väčšiu izoláciu medzi výstupnými portami.



Obr. 14 Zapojenie Wilkinsonovho deliča

$Z_0$  - charakteristická impedancia vstupných a výstupných portov

$Z_T$  - impedancia  $\lambda/4$  transformátora  $Z_T = \sqrt{2} \cdot Z_0$

$R$  - odpor rezistoru  $R = 2 \cdot Z_0$

## 2.3 Výber vhodného rozbočovača

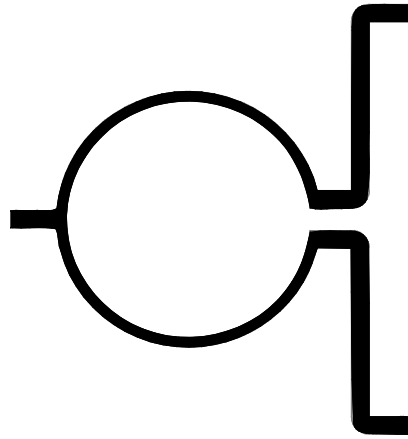
Pri výbere vhodného typu rozbočovača bola do úvahy braná možnosť jednoduchej výroby, kvalita parametrov daného riešenia a jeho rozmer v prípade návrhu, ktorý obsahuje jeden vstup a štyri výstupy.

Všetky porty musia byť prispôsobené na impedanciu  $50 \Omega$ , na vstupe by mal byť čo najmenší odraz, priechodzí útlm čo najnižší, použiteľný frekvenčný rozsah približne 500 - 800 MHz, rozmery jedného kanálu rozbočovača (1 vstup, 4 výstupy) maximálne 200 x 150 mm a celé riešenie by malo byť zabudovateľné do krabice, ktorá bude mať tzv. rackové rozmery - výšku 1U (44,5 mm) a šírku 19" (480 mm). Vstupné a výstupné porty by mali byť typu BNC alebo SMA. Odstup medzi výstupnými portami nie je zásadný, avšak je výhodou, pretože ak by dosahoval vhodné parametre, bude možné rozbočovač použiť aj ako zlučovač.

Podľa zadaných podmienok bol vybraný delič typu Wilkinson, ktorý je ľahko realizovateľný na substráte FR4 (klasický plošný spoj) a teda je ho možné ľahko vyrábať vo väčších sériách. Rozmery sú taktiež vyhovujúce. Po prvotnom návrhu v programe CST Microwave Studio boli zistené dostačujúce parametre a tak pokračovalo ladenie tohto typu rozbočovača.

### 2.3.1 Návrh rozbočovača - požadované parametre

Pri návrhu rozbočovača bude uvažované pásmo 500 - 800 MHz, preto je stredný kmitočet zvolený 650 MHz. Po orientačnom prepočte dĺžky vlny na substráte bol pôvodný návrh, ktorý počítal s rovnými úsekmi vedenia pozmenený a úseky transformačného vedenia boli tvarované do kruhu, tak aby celá doska rozbočovača dosahovala vhodné rozmery.



Obr. 15 Náčrt tvaru Wilkinsonovho deliča

Aby bola dodržaná funkčná podmienka Wilkinsonovho deliča, bolo potrebné zostrojiť vedenia o vhodnej dĺžke a šírke. Výpočet rozmerov jednotlivých vedení bol uskutočnený pomocou macro funkcie "Calculate analytical line impedance" v simulačnom software CST Microwave studio a vzťahov uvedených nižšie.

Pri výpočtoch je potrebné poznať požadovanú *strednú frekvenciu*, *hrúbku substrátu*, *hrúbku pokovenia*, *relatívnu permitivitu substrátu* a *impedanciu vedení*, ktorú potrebujeme dosiahnuť.

Keďže je potrebné impedančne prispôbiť vstup a 2 výstupy s impedanciou  $50 \Omega$ , bude potrebné vypočítať šírku pre  $50 \Omega$  vedenia a vedenia  $\lambda/4$  transformátora.

Dĺžka  $50 \Omega$  vedení nie je kritická, avšak je vhodné, aby mali dĺžku aspoň 5 mm. Dĺžku  $70,7 \Omega$  vedení musíme spočítať, tak aby dosahovala dĺžku štvrtiny vlny na substráte, keďže sa jedná o štvrt'vlnný transformátor. Pre výpočet dĺžky vlny musí byť taktiež zarátaný činiteľ skrátenia vlny na substráte.

Návrh rozbočovača obsahuje aj rezistory umiestnené na výstupných vedeniach, ktoré zabezpečujú lepší odstup signálu medzi výstupnými portami. Pri dostatočnom odstupe signálu medzi výstupnými portami (lepší ako 20dB) bude možné využívať rozbočovač taktiež ako zlučovač signálov z vysieláčov.

### 2.3.2 Návrh rozbočovača - výpočet

Zadané parametre pre výpočty:

- stredná frekvencia  $f = 650$  MHz
- impedancia vstupných a výstupných portov  $Z_{in, out} = 50 \Omega$

Zadané parametre substrátu FR4:

- relatívna elektrická permitivita  $\epsilon_r = 4,3$  (pri 400 MHz)
- stratový činiteľ  $tg \delta = 0,014$
- výška substrátu  $h = 1,5$  mm
- hrúbka pokovenia  $t = 36 \mu\text{m}$

Výpočet dĺžky vlny vo vákuu

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

- $\lambda_0$  - dĺžka vlny vo vákuu  
 $c$  - rýchlosť svetla vo vákuu  
 $f$  - zadaná frekvencia

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{650 \cdot 10^6} \text{ m} \doteq 0,4615 \text{ m}$$

Výpočet impedancie  $\lambda/4$  transformátora

$$Z_T = \sqrt{2} \cdot Z_{in, out} \quad (2.2)$$

$$Z_T = \sqrt{2} \cdot 50 \Omega \doteq 70,7 \Omega$$

Výpočet hodnoty rezistoru vloženého medzi výstupné vedenia

$$R = 2 \cdot Z_{in, out} \quad (2.3)$$
$$R = 2 \cdot 50 \Omega = 100 \Omega$$

Šírka vedení - výpočet v CST Microwave Studio

- šírka mikropáskového vedenia vypočítaná pre impedanciu  $50 \Omega$ : **2,9 mm**
- šírka mikropáskového vedenia vypočítaná pre impedanciu  $70,7 \Omega$ : **1,5 mm**

### Výpočet efektívnej permitivity potrebnej pre ďalšie výpočty

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\left(\frac{h}{W}\right)}} \quad (2.4)$$

- $\epsilon_{eff}$  - efektívna permitivita mikropásku  
 $h$  - výška substrátu  
 $W$  - šírka mikropásku

$$\epsilon_{eff} = \frac{4,3 + 1}{2} + \frac{4,3 - 1}{2\sqrt{1 + 12\left(\frac{1,5}{1,5}\right)}} \doteq 3,108$$

### Výpočet dĺžky vlny $\lambda/4$ na mikropásku

$$\lambda = k \cdot \lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \lambda_0 \quad (2.5)$$

- $\lambda$  - dĺžka vlny  
 $\lambda_0$  - dĺžka vlny vo vákuu  
 $k$  - činiteľ krátenia  
 $\epsilon_{eff}$  - efektívna permitivita (vzorec (2.4))

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{3,108}} \cdot 0,4615 \text{ m} \doteq 0,2618 \text{ m}$$
$$\frac{\lambda}{4} = \frac{0,2618}{4} \text{ m} = 0,06545 \text{ m} = 65,45 \text{ mm}$$

Pre ušetrenie materiálu substrátu bolo  $70,7 \Omega$  vedenie tvarované do kruhu, preto je potrebné dĺžku tohto  $\lambda/4$  vedenia prepočítať na polomer kruhu.

### Výpočet polomeru $r$ kruhu $\lambda/4$ vedenia

$\lambda/4$  je vypočítané pomocou vzorca (2.5)

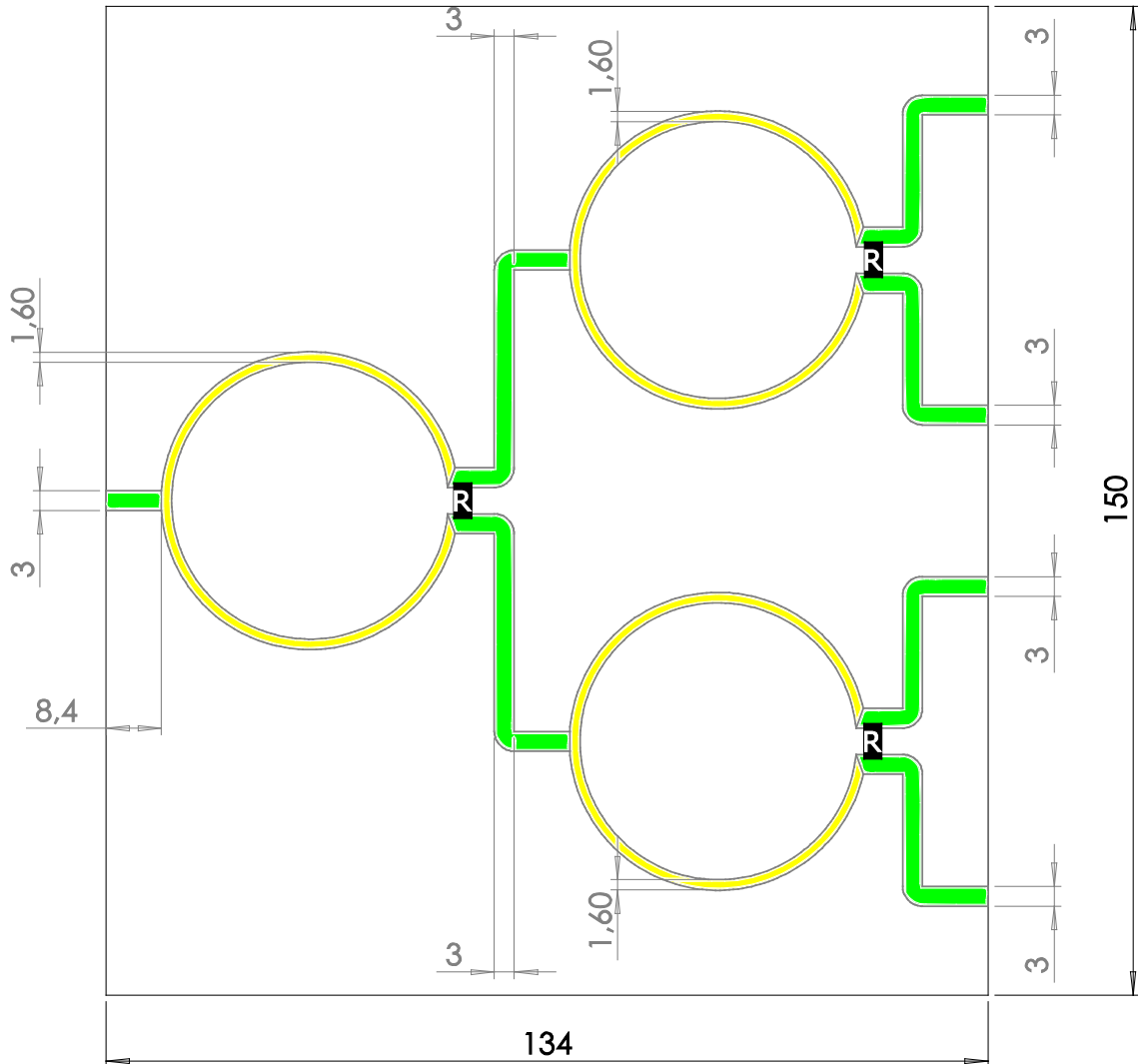
$$r = \frac{\lambda/4}{\pi} \quad (2.6)$$

$$r = \frac{65,45}{\pi} \text{ mm} \doteq 20,83 \text{ mm}$$



### 2.3.3 Návrh rozbočovača - simulácia

Návrh v simulačnom software CST Microwave Studio začal modelovaním substrátu, následne bol nakreslený obrazec deliča s jedným vstupom a dvomi výstupmi, ktorý bol vyladený na čo najlepšie parametre. Ten bol následne 2-krát skopírovaný a spojený, tak aby celý rozbočovač obsahoval 4 výstupy. Veľkosť celého substrátu bola prispôbená veľkosti vybraného typu krabice. Takýto rozbočovač so 4 výstupmi dosahuje mierne horších parametrov ako rozbočovač s 2 výstupmi. Výsledky simulácie je možné vidieť v grafoch na nasledujúcich stranách.

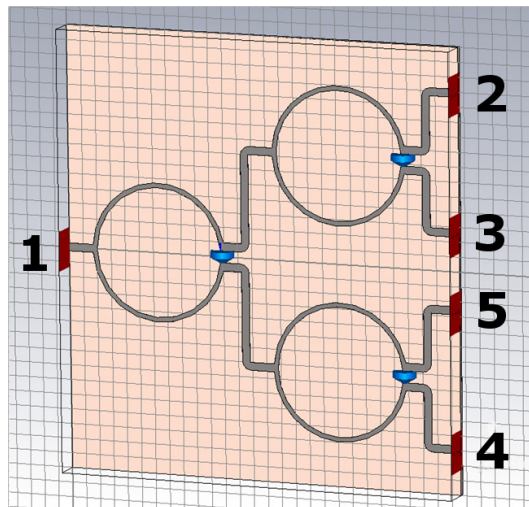


Obr. 16 Náčrt výsledného návrhu rozbočovača

Žltou farbou sú znázornené časti  $\lambda/4$  transformátora, teda vedenia s impedanciou  $70,7 \Omega$  a zelenou farbou spojovacie vedenia s impedanciou  $50 \Omega$ . Vedenia vyznačené rovnakou farbou majú rovnakú šírku. Osadenie rezistorov je označené čiernym obdĺžnikom s písmenom "R". Obraz návrhu rozbočovača vhodného pre výrobu je možné nájsť v prílohách v mierke 1:1.

### 2.3.4 Výsledky simulácie a merania

Na nasledujúcich stranách je možné nájsť výsledky simulácií z programu CST Microwave Studio a zároveň zmerané hodnoty pomocou vektorového analyzéra Agilent E5071C. Všetky porty analyzéra boli nakalibrované na impedanciu  $50 \Omega$ . Čísla jednotlivých portov sú uvedené na obrázku nižšie, pričom vstupný port má číslo 1 a výstupné porty 2, 3, 4, 5.

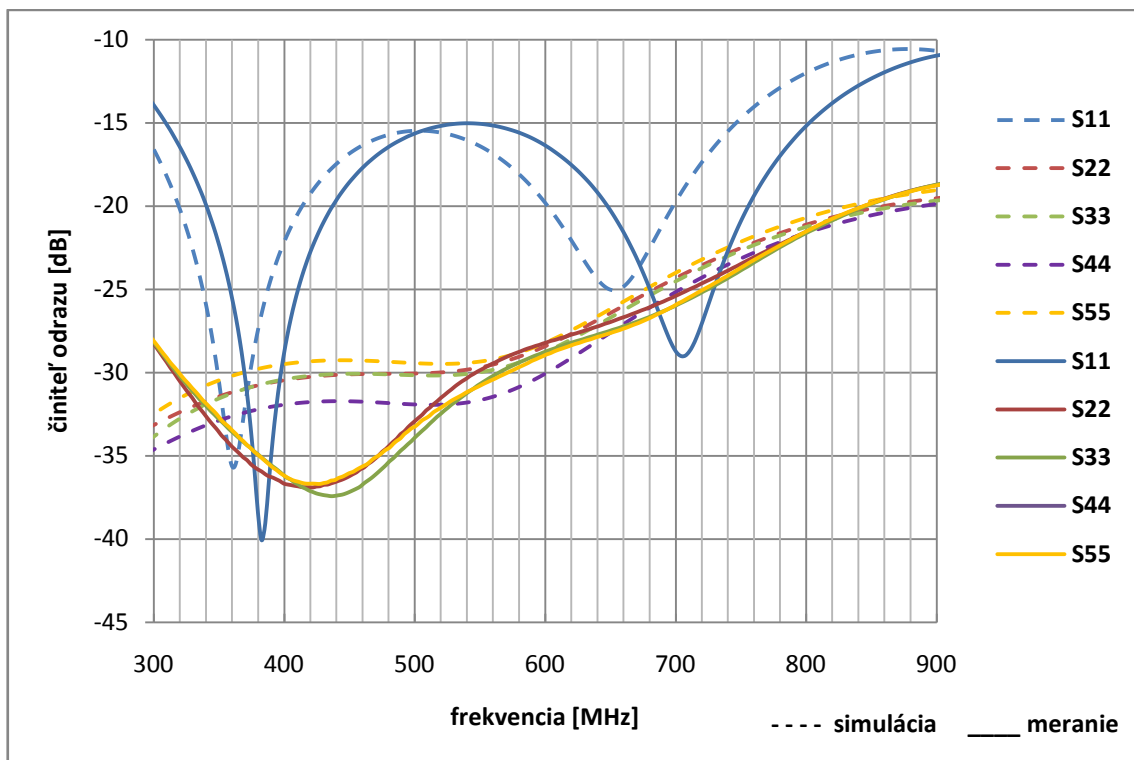


Obr. 17 Výsledný návrh rozbočovača v 3D vizualizácii s označenými číslami portov

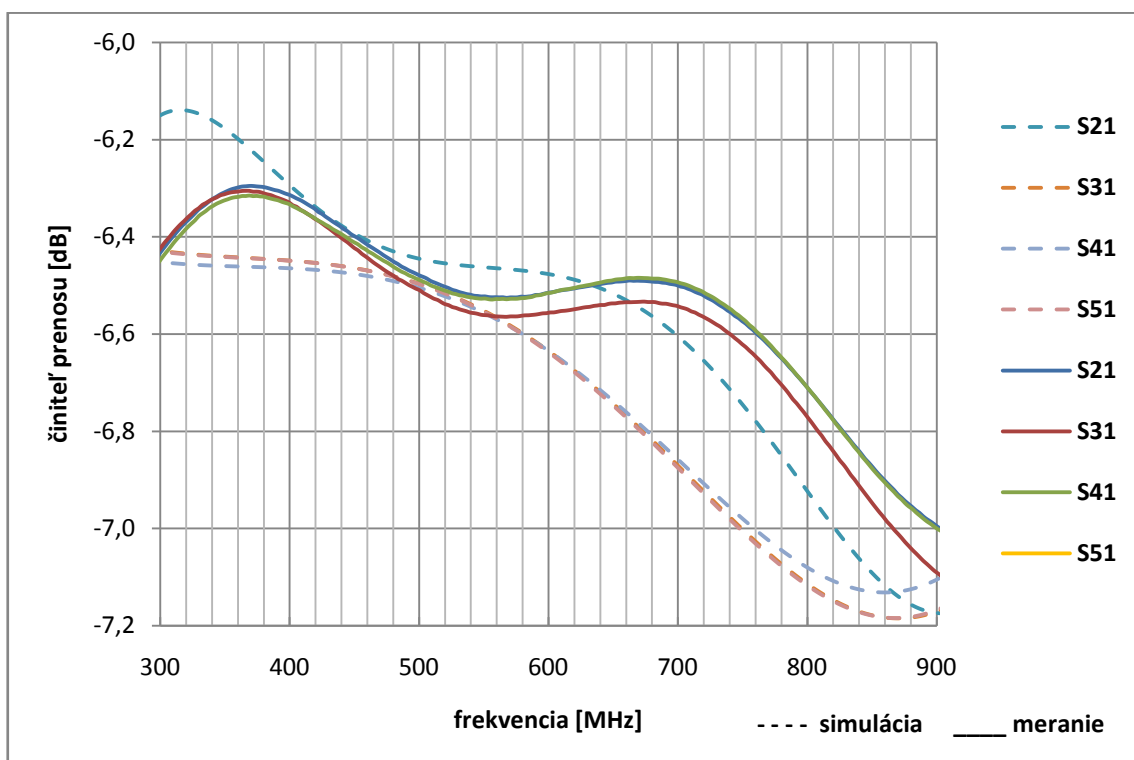
Činiteľ odrazu dosahuje takmer v celom požadovanom pásme úrovne pod  $-15 \text{ dB}$ , čo je dostatočná hodnota pre dané použitie. Pri simulácii bolo mierne lepších hodnôt dosiahnutých pri eliptickom tvare Wilkinsonovho deliča a pri väčších rozstupoch medzi jednotlivými cestami na substráte. To by ale znamenalo zväčšenie rozmerov plošného spoja, pričom zlepšenie parametrov by bolo zanedbateľné. Koeficienty odrazu na všetkých výstupných portoch sú takmer rovnaké. V celom pásme dosahujú hodnoty pod  $-20 \text{ dB}$ , čo je veľmi dobrý výsledok.

Rozdiel medzi simulovanými a zmeranými výsledkami činiteľa odrazu je iba mierny. Frekvenčný posun bol pravdepodobne spôsobený rozdielom medzi hodnotou permitivity substrátu FR4 použitou v simulácii a reálne použitého materiálu pri konštrukcii.

Činiteľ prenosu nemá úplne konštantný charakter, avšak pre dané použitie je tolerancia zmeny o maximálne  $1 \text{ dB}$  v celom požadovanom frekvenčnom pásme dostatočná. Samotné straty v obvode teda spôsobujú útlm približne  $0,4$  až  $1 \text{ dB}$ , ak odpočítame hodnotu  $6 \text{ dB}$ , čo je útlm spôsobený rozdelením signálu na 4 rovnaké výstupy. Reálne meranie dosahuje mierne lepších hodnôt ako simulácia.

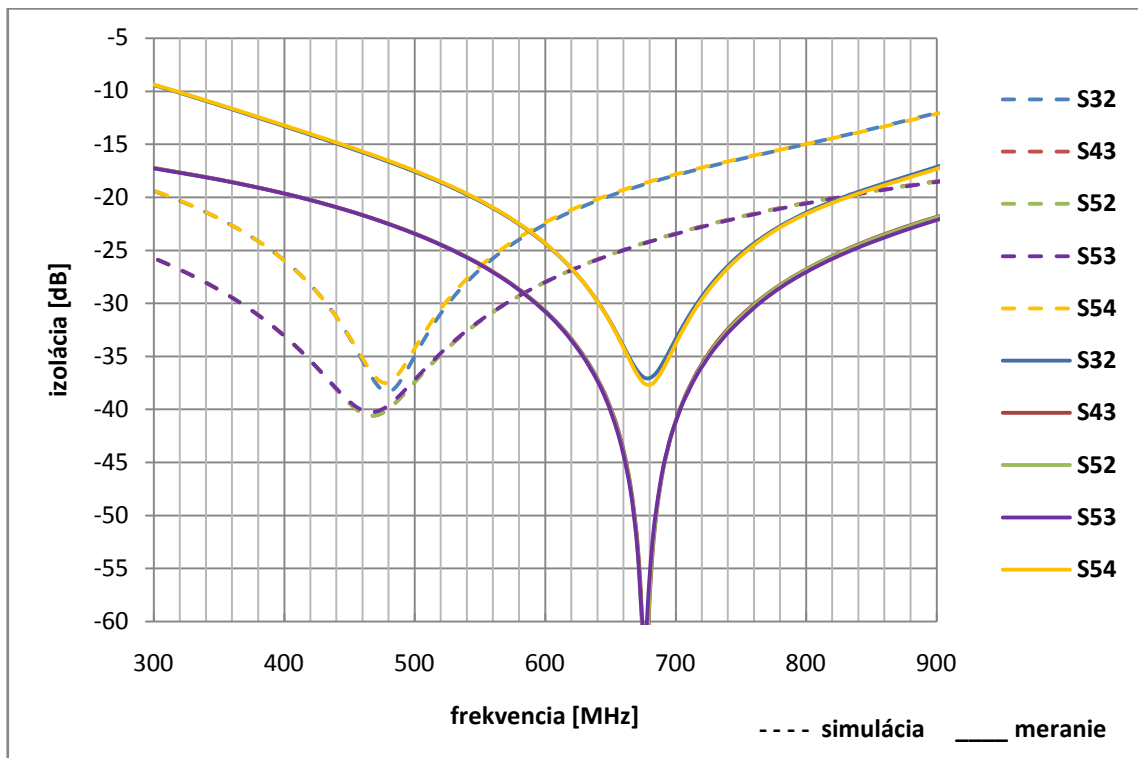


Obr. 18 Graf závislosti činiteľa odrazu všetkých portov na frekvencii



Obr. 19 Graf závislosti činiteľa prenosu výstupných portov voči vstupnému na frekvencii

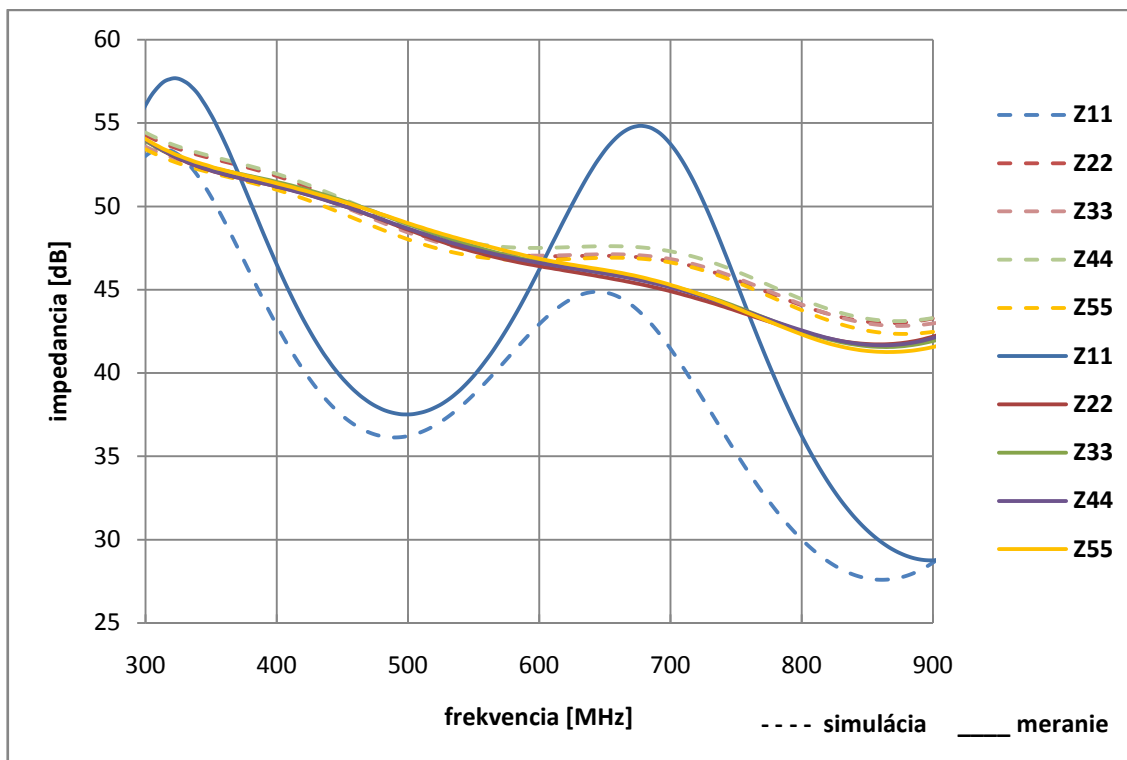
Pri použití daného riešenia ako rozbočovač nie je hodnota odstupe medzi jednotlivými výstupnými portami dôležitá. Avšak to, že dosahuje pomerne dobrých hodnôt, a to lepších ako 17 dB v celom pásme, umožňuje toto riešenie použiť aj ako signálový **zlučovač** pre viacero vysielateľov. Opäť sa hodnoty simulácie a reálneho merania líšia, tentokrát sú pomerne výrazne frekvenčne posunuté, môže to byť pravdepodobne spôsobené parazitnými vlastnosťami SMD rezistorov umiestnených na výstupných portoch každého Wilkinsonovho deliča.



Obr. 20 Graf závislosti izolácie jednotlivých výstupných portov frekvencii

Reálna časť impedancie vstupného portu mierne osciluje okolo hodnoty  $50 \Omega$ , pravdepodobne by to šlo vylepšiť predĺžením vstupného  $50 \Omega$  vedenia. To by však zväčšilo rozmery plošného spoja a nebolo by možné použiť danú krabice, ktorá bola zvolená pri finálnej konštrukcii. Výstupné porty dosahujú impedanciu v tolerancii  $\pm 7 \Omega$  v celom požadovanom pásme. Opäť je možné vidieť mierne rozdiely medzi simulovanými výsledkami a reálnym meraním, najväčší rozdiel je v prípade hodnoty  $Z_{11}$ , spôsobený pravdepodobne konštrukciou vstupného portu.

Všetky dosiahnuté parametre rozbočovača sú dostatočné pre dané použitie a meraním u finálnej verzie rozbočovača neboli zistené žiadne výrazné odchýlky od simulovaných hodnôt. Dobré parametre izolácie medzi výstupnými portami zároveň predurčujú rozbočovač použiť aj ako signálový zlučovač pre bezdrôtové vysieláče využívané najmä pre in-ear monitoring muzikantov.



Obr. 21 Graf závislosti modulu impedancie jednotlivých portov na frekvencii

### 2.3.5 Finálny výrobok

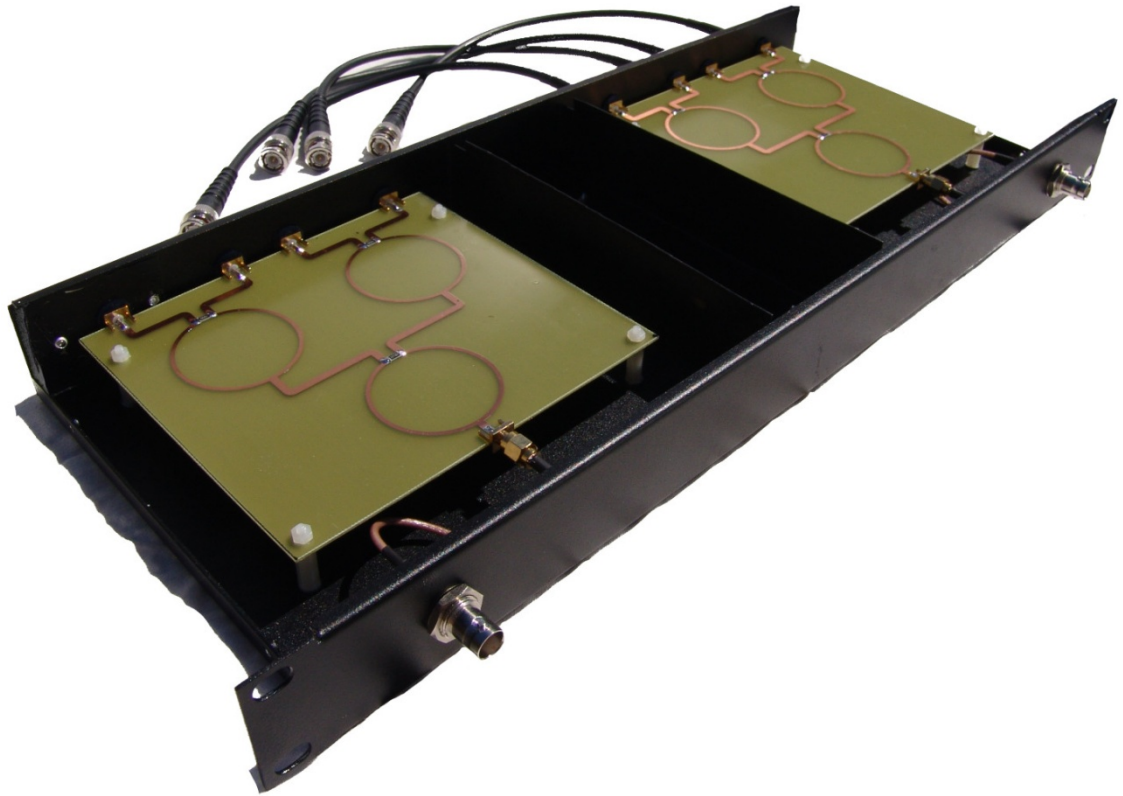
Pre dané praktické využitie bolo rozhodnuté umiestniť dva kusy rozbočovačov do montážnej kovovej skrinky typu rack (ďalej v texte racková krabica) o výške 1U. Možnosť využitia plechovej krabice bola overená v simulačnom programe, keďže pri určitých rozmeroch by sa na niektorých kmitočtoch mohla chovať ako dutinový rezonátor a to by parazitne pôsobilo na parametre rozbočovača.

Do stredu krabice bola umiestnená priečka pre zlepšenie izolácie oboch rozbočovačov. Neboli zistené žiadne zásadné zmeny v simulovaných výsledkoch.

Po prieskume trhu bolo zistené z finančného a rozmerového hľadiska ako najlepší typ KK1U-18001 od predajcu EZK. Rozmerový náčrt umiestnenia rozbočovačov a jednotlivých konektorov v krabici je uvedený v prílohe.

Vlastnosti krabice (rozmer vonkajší / vnútorný):

- šírka: 442 / 436 mm
- hĺbka: 182 / 175 mm
- výška: 44 / 40 mm (rack 1U)
- materiál: železo



Obr. 22 Umiestnenie rozbočovačov v rackovej krabici

Výpočtom podľa teórie kvadrátorových dutinových rezonátorov boli overené frekvencie, na ktorých by sa skrinka správala parazitne. Nezasahujú pásmo, v ktorom rozbočovač funguje. Výpočet je uvedený nižšie (2.7).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\varepsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{\text{šírka}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{\text{výška}}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{\text{hlĺbka}}\right)^2} \quad (2.7)$$

Vid s najnižšou frekvenciou je  $TE_{101}$ . Keďže krabica je vyplnená vzduchom s relatívnou permitivitou približne  $\varepsilon_r = 1$ , za  $\varepsilon$  sa dosadí permitivita vákua  $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$  a za permeabilitu  $\mu = 1.256 \times 10^{-6} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ . Počíta sa so šírkou jednej komory rozbočovača, ktorá má podľa prílohy **šírka** = 0,185 m.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 1.256 \cdot 10^{-6}}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{0,185}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{0,175}\right)^2}$$

Po výpočte na kalkulačke vyjde  $f_0 = 1178 \text{ MHz}$ . V krabici by teda nemali nastávať žiadne rezonancie, čo potvrdila aj simulácia v CST.

[16]

Krabička nemá odnímateľné panely, preto nie je možné umiestniť vstupný konektor priamo na plošný spoj rozbočovača. Kvôli čo najlepšiemu zachovaniu impedancie všetkých častí vstupného vedenia bol na vstupný port rozbočovača umiestnený SMA konektor, ktorý je následne prepojený krátkym kusom kábla RG316 s BNC konektorom na prednom paneli. BNC konektor bol použitý z dôvodu kompatibility s anténami od iných výrobcov.



Obr. 23 Detail pripojenia vstupného portu rozbočovača

SMA konektory sú umiestnené na zadnom paneli. Ich použitie umožňuje variabilitu pri používaní rôznych dĺžok a typov káblov pre prepojenie s prijímačmi. Pre toto konkrétne použitie boli vyrobené krátke prepájacie káble SMA - BNC o dĺžke 30cm, ktoré prepoja antény splitter umiestnený v racku s prijímačmi.



Obr. 24 Zadný panel splitteru s SMA konektormi

### 3 VŠESMEROVÁ ANTÉNA

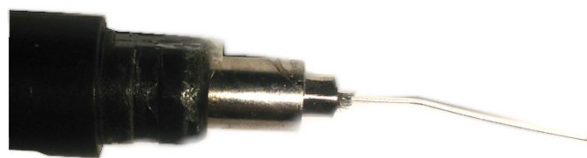
Bežnými anténami dodávanými k bezdrôtovým mikrofónom sú tzv. bičové (whip), ktoré neobsahujú žiadnu zemnú dosku a ich zemná časť napájača sa pripojí priamo na zem plošného spoja v zariadení. Niektorí výrobcovia kvôli ušetreniu miesta skracujú anténu stočením do špirály a vytvárajú tak istý druh helix antény. Tieto typy antén nemajú symetrizačný člen (balun) a využívajú iba zemnú dosku prijímača, čo má parametre asymetrickej dipólovej antény a nie monopólu.



Obr. 25 Bičová anténa dodávaná k prijímačom Sennheiser

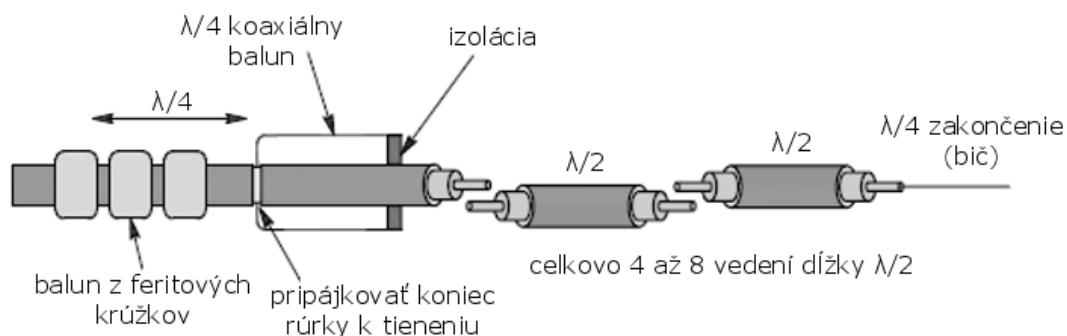
Lepším riešením sú koaxiálne antény, ktoré obsahujú symetrizačný člen. Tie sa skladajú z odizolovaného koaxiálneho vodiča s dĺžkou približne  $\lambda/4$  a kovovej trubky, ktorá sa nachádza medzi konektorom a odizolovaným vodičom.

[8]



Obr. 26 Ukážka koaxiálnej antény WiFi routera pre pásmo 2,4 GHz

Tieto antény majú avšak pomerne malý zisk a tak boli skúmané iné alternatívy pre anténu, ktorá by mala väčší zisk aj za cenu prípadného zúženia vyžarovacieho uhla vo vertikálnej rovine. Bola skúmaná možnosť použiť kolineárnu anténu skladajúcu sa zo 4 - 8 úsekov koaxiálneho vedenia o dĺžke  $\lambda/2$ . Táto možnosť bola zavrhnutá, keďže anténa by dosahovala iba mierne vyššieho zisku za cenu veľmi veľkých rozmerov.



Obr. 27 Transponovaná koaxiálna kolineárna anténa [3]



### 3.1 Koaxiálna $\lambda/4$ anténa

Pre svoju konštrukčnú jednoduchosť a dostačujúce parametre bola na ďalšie skúmanie vybratá koaxiálna štvrt'vlnná anténa. Mala by dosahovať zisku približne 2 dBi a šírku pásma dostačujúcu na pokrytie vybraného pásma využívaného bežnými výrobcami bezdrôtových systémov.

Bola namodelovaná monopólová anténa. Zostrojená je z koaxiálneho káblu a za vstupným portom obsahuje balun tvorený rúrkou z medi. Na jej modelovanie boli použité rozmery koaxiálneho káblu RG-58. Drôt samotnej antény bol vytvorený odstránením tienenia a gumenej izolácie z káblu.

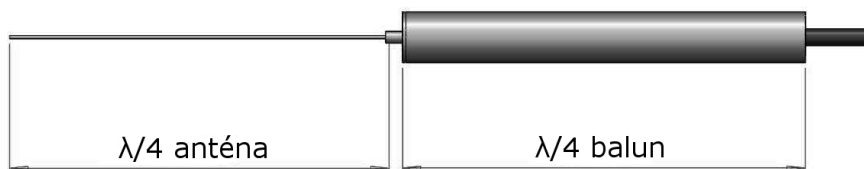
#### 3.1.1 Symetrizačný obvod - balun

Symetrizačný obvod je tvorený koaxiálnym  $\lambda/4$  balunom pripojeným na tienenie koaxiálneho káblu z ktorého je anténa zostrojená. Jeho dĺžka je štvrtina vlnovej dĺžky vynásobená činiteľom krátenia pre voľný priestor  $k = 0,95$ . Priemer by mal byť väčší ako je priemer káblu ktorý obklopuje. Koaxiálne vedenie by malo byť v trubke čo najlepšie vycentrované, môžu byť na to použité napríklad kusy plastu alebo teflónu. Pre lepšie potlačenie povrchového prúdu môžu byť v blízkosti balunu umiestnené feritové jadrá.

[3]

#### 3.1.2 Návrh antény - požadované parametre

Anténa by mala mať vstupnú impedanciu  $50 \Omega$  a strednú frekvenciu 587MHz. Z teoretického hľadiska je pomerne úzkopásmová, preto je pri návrhu uvažované pásmo 566 - 608 MHz. Model bude obsahovať súčasti spomenuté v odstavcoch vyššie a krátky kus káblu na ktorý bude možné osadiť konektor a ktorý bude zároveň slúžiť ako konštrukčný prvok antény. Pre dostatočné vlastnosti je možné uvažovať napríklad kábel typu RG-58.



Obr. 28 Model antény v CST Microwave Studio

### 3.1.3 Návrh antény - výpočet

stredná frekvencia	$f = 587 \text{ MHz}$ (566-608 MHz)
rýchlosť svetla	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
vlnová dĺžka (vzorec (2.1))	$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{587 \cdot 10^6} \text{ m} = 0,5111 \text{ m}$
vlnová dĺžka $\lambda/4$	$\frac{\lambda}{4} = \frac{0,551}{4} \text{ m} = 0,1378 \text{ m}$

priemer vnútorného vodiča $r$	0,91 mm
priemer izolácie (teflón) $ri$	2,95 mm
priemer tienenia $rs$	3,51 mm
priemer obalu $rii$	4,95 mm
priemer balun $r_{balun}$	15 mm (voľne zvolený)

Tab. 2 Známe rozmery koaxiálneho káblu RG-58

### 3.1.4 Návrh antény - simulácia

Anténa bola namodelovaná v CST Microwave Studio s vyššie vypočítanými rozmermi, ktoré boli následne upravované na základe výsledkov parametrickej simulácie. Prvotne bol vyladený činiteľ odrazu S11 na strednú frekvenciu, následne sa doladili rozmery antény, tak aby hodnoty činiteľa odrazu a zisku boli čo najlepšie v celom požadovanom pásme. Boli testované rôzne priemery balunu, ako dostatočný rozmer bol zistený priemer 15 mm. Širší balun nijak nezlepšoval parametre antény. Daný rozmer je zároveň bežne dostupný s hrúbkou steny 1 mm z medi, ktorá sa dobre pájkuje.

dĺžka drôtu antény	111 mm
dĺžka balunu	118 mm
priemer balunu	15 mm

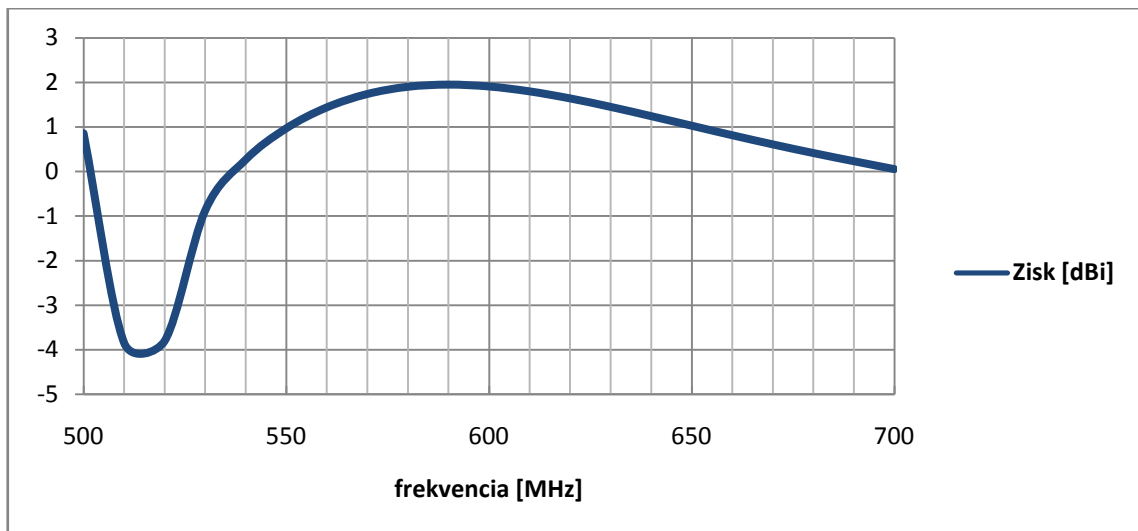
Tab. 3 Konečné rozmery koaxiálnej antény

Simuláciami boli dosiahnuté konečné rozmery modelu antény, kedy dosahovala najlepších parametrov.

### 3.1.5 Výsledky simulácie a meranie

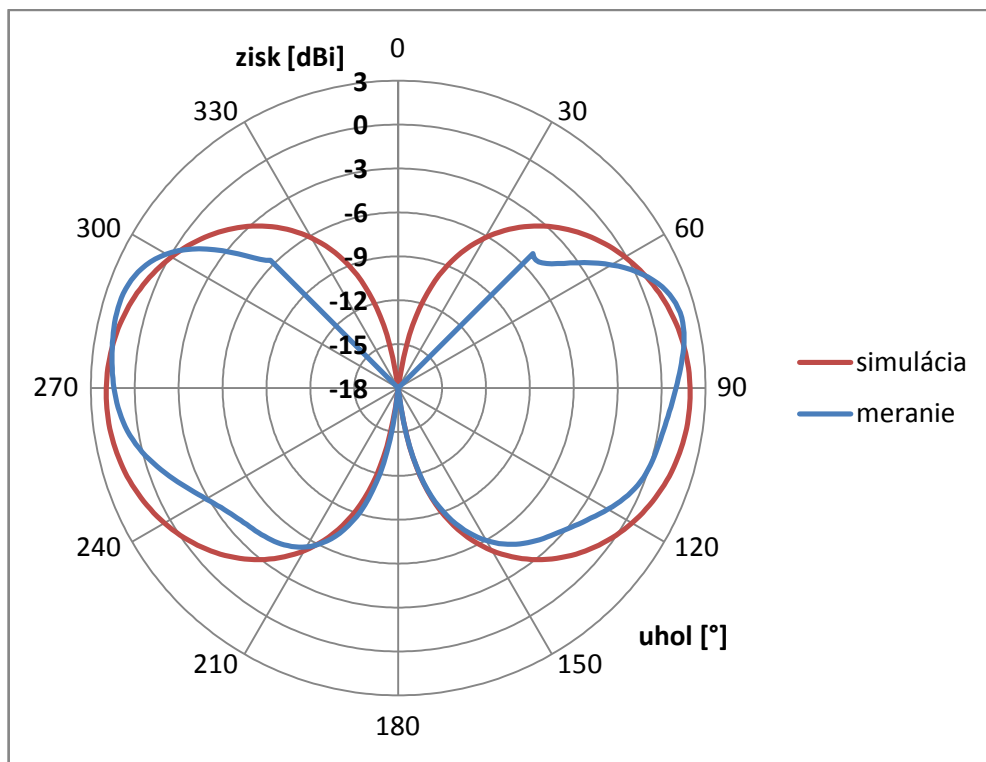
Z výsledkov simulácie vyplynulo, že tvary vyžarovacích charakteristík boli v celom požadovanom frekvenčnom pásme rovnaké, preto sú uvedené iba pre strednú frekvenciu 587 MHz. Mierne sa menil zisk, čo je zrejme z nasledujúcich grafov.

Maximálny zisk antény bol dosiahnutý na frekvencii **590 MHz** a to **1,95 dBi**, čo je takmer ideálna veľkosť zisku v porovnaní s teoretickou hodnotou u monopólových antén. Meranie zisku reálneho výrobku nebolo z dôvodu chýbajúceho vybavenia realizované. Výsledok simulácie by mal ale pri pomerne jednoduchom modeli dosahovať presných hodnôt a preto je ich možné použiť ako relevantný výsledok.

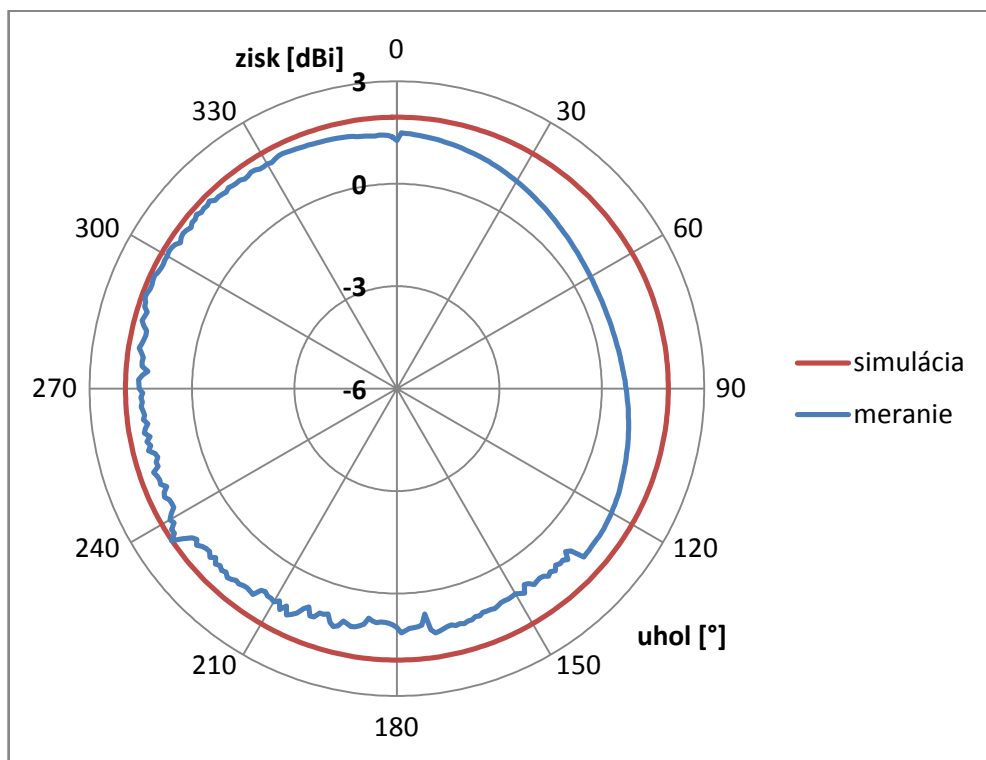


Obr. 29 Graf závislosti zisku antény na frekvencii - *simulácia*

Zo simulovaných hodnôt boli vytvorené smerové diagramy vyžarovania antény v horizontálnej a vertikálnej rovine. Šírka hlavného laloku vo vertikálnej rovine dosahuje približne  $77^\circ$  ( $\pm 3^\circ$ ) v celom frekvenčnom pásme. V horizontálnej rovine anténa vyžaruje všesmerovo ( $360^\circ$ ). Pomocou merania bol zmeraný približný tvar vyžarovacej charakteristiky reálnej antény, avšak nebol zmeraný presný zisk. Preto je toto meranie iba orientačné, keďže hodnota zisku bola normalizovaná k hodnote zistenej simuláciou. Toto meranie je taktiež značne kostrbaté, spôsobili to pravdepodobne malé rozmery meracej komory.

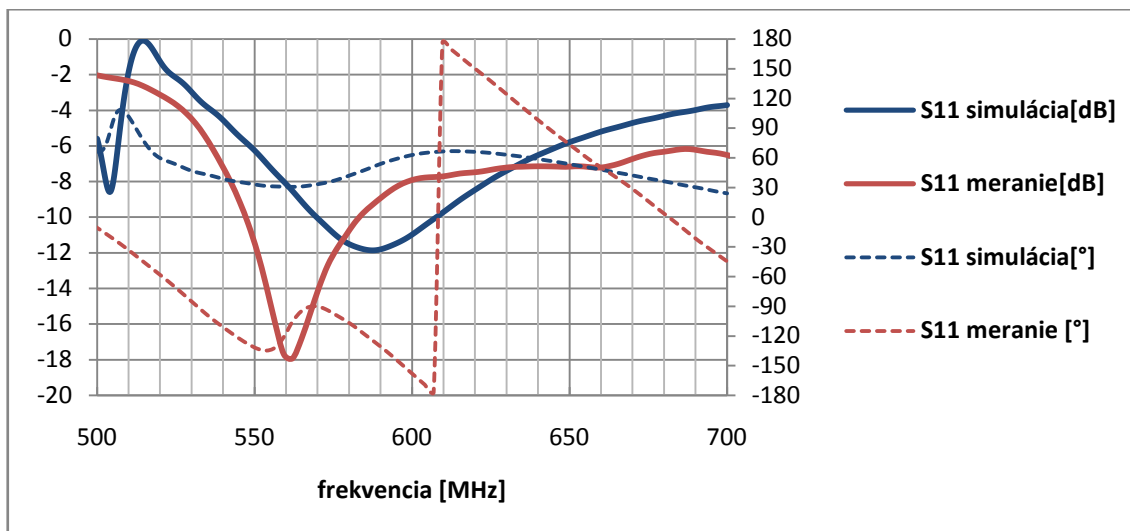


Obr. 30 Vyžarovacia charakteristika koaxiálnej antény vo vertikálnej rovine



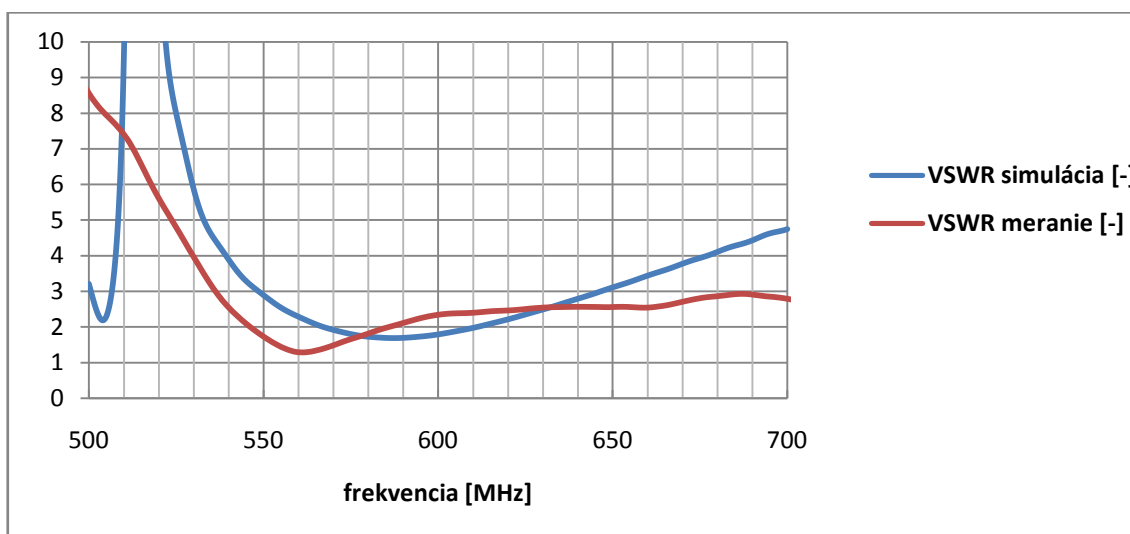
Obr. 31 Vyžarovacia charakteristika koaxiálnej antény v horizontálnej rovine

Činiteľ odrazu lepší ako -10 dB bol pri simulácii dosiahnut takmer v celom požadovanom pásme (570 - 610 MHz). V prípade merania sú tieto hodnoty dosahované v užšom frekvenčnom pásme (546 - 583 MHz) a zároveň mierne frekvenčne posunuté. Posun môže byť spôsoben miernym roztavením izolácie stredného vodiča koaxiálneho káblu a zmenou jeho parametrov. V prípade výroby antény pre ďalšie frekvenčné pásma bude potrebné s týmto posunom počítať a zostrojiť viacero testovacích kusov s rozličnými rozmermi, z ktorých bude vybran vyhovujúci. Na grafe je vyneseny aj priebeh fázy činiteľa odrazu.



Obr. 32 Graf závislosti modulu a fázy činiteľa odrazu antény na frekvencii

Pomer stojatých vln (VSWR) dosahuje u vyrobenej antény v danom pásme hodnôt 1,5 - 2,5, čo znamená, že je odrazené maximálne asi 18 % výkonu. Simulované hodnoty sa výrazne nelíšia. Anténa je teda vhodná aj na vysielanie pri nižších výkonoch. V praxi sú štandardne bez licencie povolené výkony do 50mW.



Obr. 33 Graf závislosti pomeru stojatých vln na frekvencii

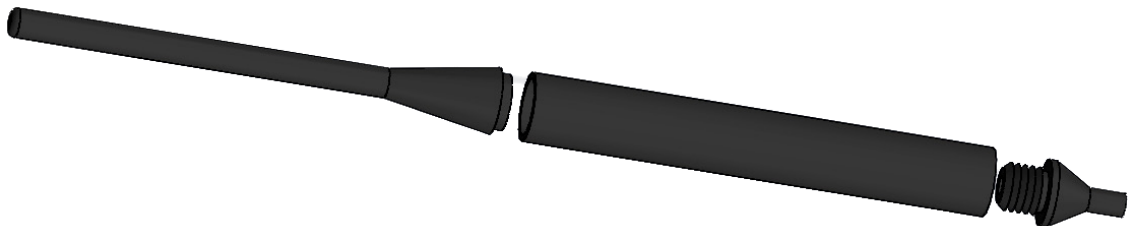
### 3.1.6 Finálny výrobok

Konečné konštrukčné riešenie obsahuje približne 50cm kus káblu RG58, ktorý je na konci odizolovaný na požadovanú dĺžku. Ďalej sa skladá z medenej rúrky odrezanej na simuláciou zistenú dĺžku. Rúrka je zakončená medenou koncovkou, ktorá je k nej prispájkovaná pomocou cínu. Do koncovky je vyvítaná diera o priemere približne 5 mm, tak aby bolo možné prestrčiť kábel RG-58 a prispájkovať jeho tienenie. Na koniec káblu je osadený konektor BNC, kvôli zachovaniu kompatibility s veľkou väčšinou prijímačov a so zhotoveným splitterom.



Obr. 34 Vyrobená koaxiálna anténa bez obalu

Aby anténa získala mechanickú odolnosť a lepší vzhľad, je potrebné ju umiestniť do obalu. Keďže sa jedná o pomerne atypický rozmer, obal bol navrhnutý v 3D modelačnom programe a následne vyrobený na 3D tlačiarňi. Skladá sa z 3 dielov - obal drôtu, obal balunu a centrovacia zátka, ktorá zabezpečí vycentrovanie káblu v balune.



Obr. 35 Model 3D obalu pre koaxiálnu anténu

Tieto časti sú spojené lepením. Na prechod kábel - zátka bola navlečená bužírka a kábel prilepený, tak aby ho nebolo možné vytrhnúť. Fotografia hotového výrobku je nižšie. Výrobná dokumentácia s presnými rozmermi sa nachádza v prílohe.



Obr. 36 Koaxiálna anténa - finálny výrobok

## 4 SMEROVÁ ANTÉNA

Smerová anténa by mala mať využitie najmä v miestach s väčším rušením a pri prenosoch na väčšie vzdialenosti v rádoch desiatok až stoviek metrov. V UHF pásmach je časté rušenie spôsobené vysielacími televíznymi DVB-T signálmi. Smerovou anténou je možné takéto riešenie čiastočne eliminovať správnym umiestnením takejto antény voči smeru rušiacoho signálu. Smerové antény majú taktiež vyšší zisk, čo je v prípade pasívneho riešenia anténneho systému bez anténneho zosilňovača výhodou.

V princípe sa pre použitie s bezdrôtovými mikrofónmi, ak uvažujeme smerové antény, v praxi používajú na kratšie vzdialenosti antény Logaritmicke-periodické a na mierne väčšie vzdialenosti (100-300 m) typu Helix. Obidva typy antén majú určité výhody aj nevýhody.

### 4.1 Logaritmicke-periodické antény

Jedná sa o lineárne polarizované širokopásmové antény. Dosahujú pomerne široké vyžarovacie uhly a možnosti pokrytia veľkej šírky frekvenčného pásma. Umožňujú tak univerzálnejšie použitie s rôznymi typmi zariadení. Pre svoj širší vyžarovací uhol (v horizontálnej rovine väčšinou okolo  $100^\circ$ ) je možné Log-periodické antény často vidieť blízko interpretov, kde pokrývajú celú oblasť pódia. Ich konštrukcia je pre jednoduchosť väčšinou realizovaná na substráte (obojstrannom plošnom spoji). Niektoré typy sú vyhotovené ako aktívne so zabudovaným anténnym zosilňovačom, tieto sú zväčša obmedzené iba na určité presné pásmo od daného výrobcu bezdrôtových systémov.



Obr. 37 Shure PA805 Log-Periodická anténa [12]

### 4.2 Helix antény

Sú to kruhovo polarizované širokopásmové typy antén. Oproti anténam Log-periodickým majú užšiu vyžarovaciu charakteristiku, čím dosahujú lepšieho zisku. Ich hlavnou výhodou je ale kruhová polarizácia, ktorá zaručuje stabilný príjem signálu a

zmenšuje možnosť nečakaných výpadkov signálu pri rôznom pohybe a polohe vysielacieho zariadenia. Výrazne tak zlepšujú kvalitu príjmu a obmedzujú výpadky signálu na minimum. Využitie kruhovej polarizácie v spojení s lineárne polarizovanou anténou na strane vysielateľa síce spôsobí stratu 3 dB, avšak tento útlm bude konštantný a nezávislý na uhle natočenia mikrofónu voči prijímacej anténe. Bude tak možné dosiahnuť vyššieho zisku signálu na strane prijímateľa pri rôznych polohách bezdrôtového mikrofónu. V prípade použitia lineárnych antén na strane prijímateľa aj vysielateľa nastáva problém pri natočení jednej z antén o 90° voči rovine druhej antény, kedy značne rastie útlm signálu na prenosovej trase a zväčša sú prijímané iba rôzne odrazy signálu od prekážok.

[14]



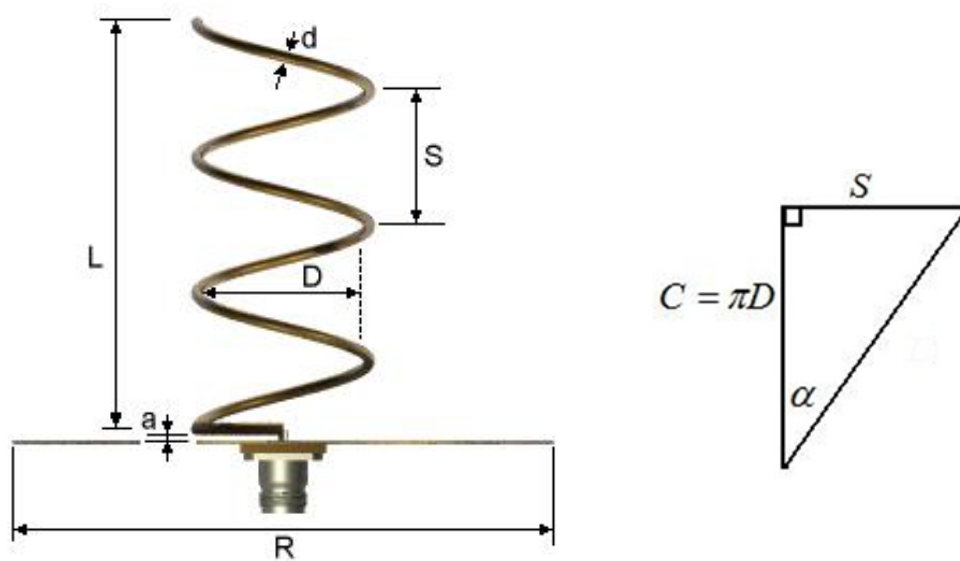
Obr. 38 Shure HA-8089 Helix anténa [13]

#### 4.2.1 Návrh antény a návrhové vzťahy

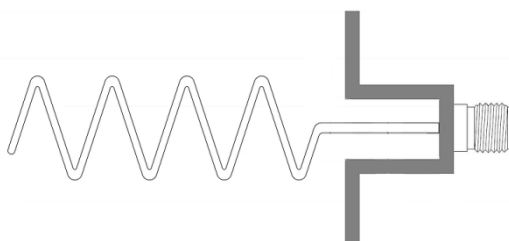
Pre realizáciu bola vybraná anténa typu Helix kvôli svojim lepším vlastnostiam pri príjme signálu z rôznych zdrojov, ktoré sa náhodne pohybujú po pódiu a zaujímajú rôznu polohu voči anténe. Tento typ antény bol zvolený aj kvôli reálnej trhovej dostupnosti iba od jedného výrobcu a teda možnej dobrej konkurencieschopnosti pri malosériovej výrobe.

Konštrukcia antény je pomerne jednoduchá. Skladá sa zo zatočeného drôtu do tvaru závitnice, kruhového reflektora a prispôbovacieho člena. Keďže anténa dosahuje rádovo vyššej impedancie ako požadovaných 50  $\Omega$ , bude potrebné navrhnuť vhodný impedančný transformátor. Možnosti jeho realizácie a konštrukčného návrhu sú diskutované v ďalšej kapitole.





Obr. 39 Návrhové rozmery helix antény [4]



Obr. 40 Helix anténa s prisp. členom zakomponovaným do tela reflektora [6]

Parametre antény:

- $D$  - priemer závitú antény
- $C$  - obvod závitú

$$C = \pi \cdot D \quad (4.1)$$

- $S$  - dĺžka medzery medzi jednotlivými závitmi
- $\alpha$  - uhol stúpania

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{S}{C} \quad (4.2)$$

- $N$  - počet závitov
- $L$  - celková výška antény

$$L = N \cdot S \quad (4.3)$$

- $R$  - priemer reflektora
- $d$  - hrúbka drôtu

Väčšina návrhových vzťahov vychádza z praxe a tak budú uvedené iba niektoré základné vzťahy. Všetky dĺžkové jednotky sú v metroch.

Pre správnu funkčnosť je potrebné, aby mal drôt aspoň 3 až 5 závitov. Hustotou závitov je možné ovplyvňovať smer a uhol vyžarovania antény. Počtom závitov je ovplyvnený zisk antény a tým pádom opäť aj uhol vyžarovania. Anténa s aspoň 3 závitmi sa začína polarizáciou antény približovať tvaru kruhovej polarizácie vtedy ak platí, že obvod závitov  $C$  je približne rovný dĺžke vlny:

$$\frac{3\lambda}{4} \leq C \leq \frac{4\lambda}{3} \quad [\text{m}] \quad (4.4)$$

Podľa toho ako sa zvolí obvod závitov a dosadí sa do tejto nerovnosti, je možné následne vypočítať najkratšiu a najdlhšiu vlnovú dĺžku, kde bude anténa dosahovať dostatočného zisku (do -3 dB). Anténa je podľa tohto vzťahu širokopásmová s teoretickou šírkou pásma približne 1:2, čo je v prípade použitia pre požadované frekvenčné pásmo 500 - 800 MHz dostatočné.

Helix anténa je anténa s postupnou vlnou a tak sa prúd šíri pozdĺž antény. Fáza sa postupne mení. Impedancia je reálna a je ju možné približne vypočítať:

$$Z_{in} = 140 \frac{C}{\lambda} \quad [\Omega] \quad (4.5)$$

Anténa má najlepšie parametre pre uhol stúpania 12 až 14°, zvyčajne sa používa 13°.

[7]

Osový pomer antény (Axial Ratio) sa dá zlepšiť pridávaním počtu závitov drôtu:

$$AR = \frac{2N + 1}{2N} \quad [-] \quad (4.6)$$

Anténa má maximum vyžarovania v smere pozdĺž osi cievky. Jej zisk sa dá tiež orientačne vypočítať pomocou nasledujúceho vzorca:

$$G = \frac{6,2 \cdot C^2 NS}{\lambda^3} \quad [-] \quad (4.7)$$

Šírka vyžarovacieho uhlu (beam angle) pre polovičný výkon (pokles o 3 dB) helix antény v stupňoch je približne:

$$BA = \frac{65\lambda}{C \sqrt{\frac{NS}{\lambda}}} \quad [^\circ] \quad (4.8)$$

Vzorce prevzaté z [7].

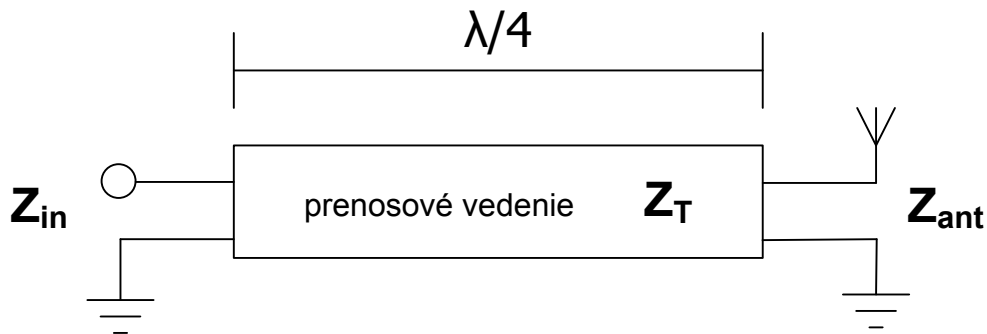
## 4.2.2 Prispôsobovací obvod

Impedančný transformátor je možné realizovať:

- drôtom vedeným v blízkosti reflektora - hrúbkou a vzdialenosťou drôtu od reflektora sa mení impedancia (Obr. 39)
- zapustením do tela reflektora (Obr. 40)
- $\lambda/4$  vedením pripojeným medzi konektor a samotný drôt antény

Prvá z uvedených možností je pomerne ťažko realizovateľná, keďže by musel byť použitý značne hrubý drôt. Zo zvyšných dvoch možností je z hľadiska variability pri návrhu jednoduchšie zostrojiť impedančný transformátor pomocou  $\lambda/4$  vedenia.

Tento krátky  $\lambda/4$  úsek vedenia môže byť realizovaný z kusu koaxiálneho káblu s požadovanou impedanciou a dĺžkou alebo presne skonštruovaným impedančným transformátorom pomocou mikropáskového obvodu zrealizovaného na substráte.



Obr. 41 Zapojenie impedančného transformátoru

Samotná anténa dosahuje bez prispôsobovacieho obvodu impedancie približne  $140 \Omega$  (4.5), keďže pomer obvodu závitů helixu a vlnovej dĺžky sa zväčša rovná 1. Pomocou nasledujúceho vzorca vychádzajúceho z rovnice prenosového vedenia je možné spočítať potrebnú impedanciu impedančného transformátoru. Vzorec je možné upraviť na takýto jednoduchý tvar, kde  $Z_T$  je požadovaná impedancia transformátora,  $Z_{in}$  je impedancia vedenia na vstupe transformátora a  $Z_{ant}$  impedancia samotnej antény bez transformátora.

$$Z_T = \sqrt{Z_{in} \cdot Z_{ant}} \quad (4.9)$$

Po dosadení známych hodnôt získame  $Z_T = \sqrt{50 \cdot 140} \doteq 84 \Omega$ .

Bude teda možné použiť  $\lambda/4$  úsek koaxiálneho vedenia s impedanciou  $75 \Omega$ , prípadne  $93 \Omega$  alebo použiť transformátor zostrojený pomocou mikropáskového vedenia s presnou impedanciou. Tento výpočet sa nachádza v ďalšej kapitole, ktorá obsahuje kompletný teoretický návrh antény.

[15]

### 4.2.3 Návrh antény - výpočet a teoretické parametre

Keďže anténa by mala byť širokopásmová, zadané frekvenčné pásmo bude obsahovať všetky bežne používané pásma u bezdrôtových systémov. To zodpovedá rozsahu približne 500 - 800 MHz (stredná frekvencia 650 MHz). Kruhová polarizácia by mala mať čo najlepšie parametre a osový pomer (axial ratio) by mal dosahovať v ideálnom prípade hodnoty 3dB. Šírka uhlu vyžarovania antény by mala mať hodnotu 50-70°. Počet závitov antény by mohol byť 8, pretože by to mala byť optimálna hodnota, ktorá by mala zabezpečiť dostatočný zisk antény a zároveň by výrazne nezväčšila jej rozmery. Anténu by malo byť možné upevniť na stojan, prípadne prichytiť o konštrukciu pódia.

V nasledujúcich výpočtoch sú použité vyššie uvedené vzťahy a premenné. Z praktických poznatkov o helix anténach je známe, že obvod jednej otáčky helixu  $C$  je vhodné zvoliť ako vlnovú dĺžku  $\lambda$  strednej frekvencie, preto je možné rovno vypočítať priemer  $D$  helixu použitím vzorca (4.1):

$$D = \frac{C}{\pi} = \frac{\lambda}{\pi} \quad (4.10)$$

Vlnovú dĺžku  $\lambda$  je možné vypočítať pomocou vzorca (2.1):

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{650 \cdot 10^6} \doteq \mathbf{0,4615 \text{ m}}$$

Pre výpočet priemeru helixu je dosadená vypočítaná vlnová dĺžka do vzorca (4.10):

$$D = \frac{0,4615}{\pi} \doteq 0,1469 \text{ m} = \mathbf{146,9 \text{ mm}}$$

Zo známej hodnoty obvodu jednej otáčky helixu  $C$  je možné pomocou nerovnice (4.4) vypočítať teoretický frekvenčný rozsah helix antény:

$$\begin{array}{ll} \frac{3\lambda}{4} \leq C & \frac{4\lambda}{3} \geq C \\ \frac{3\lambda}{4} \leq 0,4615 & \frac{4\lambda}{3} \geq 0,4615 \\ \lambda \leq 0,4615 \frac{4}{3} & \lambda \geq 0,4615 \frac{3}{4} \\ \lambda \leq 0,6153 \text{ m} & \lambda \leq 0,3461 \text{ m} \\ f_{min} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,6153} \text{ Hz} & f_{max} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,3461} \text{ Hz} \\ \mathbf{f_{min} \doteq 488 \text{ MHz}} & \mathbf{f_{max} \doteq 867 \text{ MHz}} \end{array}$$

S použitím vzorcov (4.7) a (4.8) je možné vypočítať teoretický zisk antény **G** a šírku vyžarovacieho uhla **BA**, je ale potrebné poznať stúpanie závitů helixu **S** (vzorec (4.2)). Uhol stúpania závitů **α** je vhodné zvoliť 13°.

$$\tan(\alpha) = \frac{S}{C} \quad (4.11)$$

$$S = C \cdot \tan(\alpha) = 0,4615 \cdot \tan(13) = \mathbf{0,1065 \text{ m}}$$

$$G = \frac{6,2 \cdot 0,4615^2 \cdot 8 \cdot 0,1065}{0,4615^3} = \mathbf{11,44}$$

$$G [\text{dBi}] = 10 \cdot \log(G) = 10 \cdot \log(11,41) = \mathbf{10,58 \text{ dBi}}$$

$$BA = \frac{65 \cdot 0,4615}{0,4615 \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot 0,1065}{0,4615}}} = 47,83^\circ$$

Ak je známa veľkosť stúpania závitů, dá sa vypočítať aj celková dĺžka antény **L** pomocou vzorca (4.3):

$$L = 8 \cdot 0,1065 \text{ m} = \mathbf{0,852 \text{ m}}$$

Pre overenie predchádzajúcich výpočtov boli požadované parametre antény zadané do kalkulátora na webovej stránke [4] (ďalej online kalkulátor), ktorý spočíta orientačné rozmery antény a približný zisk antény.

Vlnová dĺžka	$\lambda =$ 461.5 mm
Priemer helixu	<b>D</b> = 157.9 mm
Zisk	14.43 dBi
Priemer drôtu	<b>d</b> = 9.2 mm
Medzera medzi vinutiami	<b>S</b> = 46.1 mm
Odskok prisp. členu	<b>a</b> = 4.4 mm
Celková dĺžka drôtu	3986.3 mm
Minimálny priemer reflektoru	<b>R</b> = 286.1 mm
Celková dĺžka antény	<b>L</b> = 369.2 mm

Tab. 4 Parametre antény vypočítané pomocou kalkulátora [4]

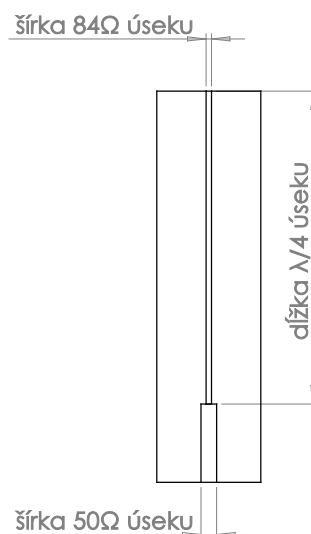
Výpočet dĺžky koaxiálneho vedenia ako impedančného transformátora pomocou vzorca (2.5) a s pomocou známej vlnovej dĺžky vypočítanej vyššie, pričom je známe, že koaxiálny kábel URM70 využitý na konštrukciu má činiteľ krátenia rovný  $k = 0,66$ .

$$\frac{\lambda_k}{4} = \frac{0,4615 \cdot 0,66}{4} \text{ m} = 0,07615 \text{ m} = \mathbf{76,15 \text{ mm}}$$

Výpočet rozmerov mikropáskového impedančného transformátora je možné zrealizovať jednoducho, keďže väčšina vzorcov a hodnôt potrebných na výpočet sa nachádza v prvej kapitole, kde sa počítali tieto rozmery pre rozbočovač zhotovený rovnakou metódou. Z týchto vypočítaných hodnôt je možné použiť:

- dĺžka  $\lambda/4$  úseku mikropásku = **65,45mm**
- šírka mikropáskového vedenia vypočítaná pre impedanciu  $50 \Omega$ : **2,9 mm**
- šírka mikropáskového vedenia vypočítaná pre impedanciu  $84 \Omega$ : **1,0 mm**

Posledná hodnota musela byť prepočítaná rovnako ako v prípade rozbočovača pomocou makro nástroja "Calculate analytical line impedance" v programe CST Microwave Studio.



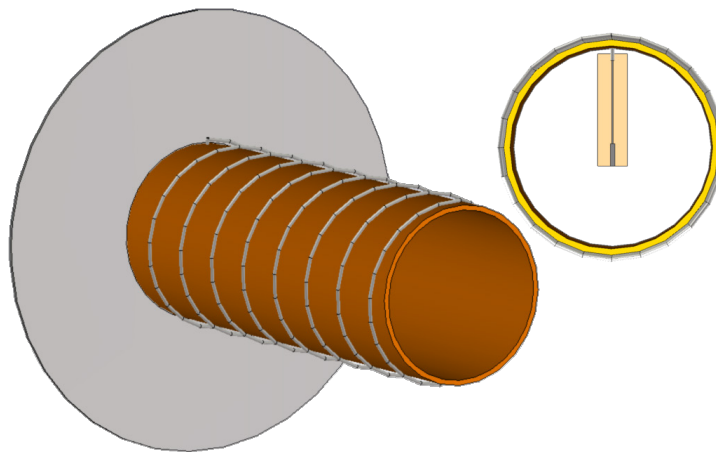
Obr. 42 Nákres rozmerov mikropáskového impedančného transformátora

#### 4.2.4 Návrh antény - simulácia

Rozmery antény boli približne vypočítané pomocou vyššie uvedených vzorcov a overené s výslednými hodnotami vypočítanými pomocou online kalkulatéra [4]. Anténa bola následne namodelovaná v programe CST Microwave Studio. Na vytvorenie modelu helix cievky bolo použité makro "Construct - Coils - 3D Linear Helical Spiral".

Prvá verzia modelu antény bola zhotovená z veľmi hrubého drôtu, toto riešenie bolo zavrnuté kvôli svojej vysokej cene a komplikovanej úprave drôtu. Následne bolo namodelované riešenie bez impedančného transformátora, kde bolo overené, že samotná anténa dosahuje impedancie  $140 \Omega$ . S touto impedanciou bolo počítané a bol zostrojený model s impedančným transformátorom na mikropásku.

Tento model bol postupne upravovaný a znova simulovaný počas celého vývoja mechanickej konštrukcie antény. Parametre antény boli v simulačnom software ladené tak, aby sa podarilo dosiahnuť čo najlepší činiteľ odrazu v požadovanom frekvenčnom rozsahu, daný vyžarovací uhol a osový pomer aspoň 3 dB.



Obr. 43 Model helix antény v CST Microwave Studio a detail umiestnenia impedančného transformátora

#### 4.2.5 Výsledky simulácie a meranie

Nasledujúce výsledky boli dosiahnuté dlhodobou simuláciou a upravovaním modelu. Celkový náčrt s okótovanými rozmermi jednotlivých komponentov antény sa nachádza v prílohe. Hodnoty zisku, osového pomeru a smerové diagramy sú zistené pomocou simulácie, keďže nebolo možné anténu tohto typu a frekvenčného rozsahu zmerať v meracej komore (malé rozmery komory), ktorá sa nachádza na UREL. Smerové diagramy sú vyhotovené na stredných frekvenciách 3 vybraných pásiem používaných výrobcom Sennheiser. Ostatné parametre antény boli reálne zmerané. Merania boli vyhotovené na dvoch kusoch antén, prvé meranie na anténe s impedančným transformátorom zhotoveným pomocou úseku koaxiálneho vedenia, druhé meranie s impedančným transformátorom z mikropásku.

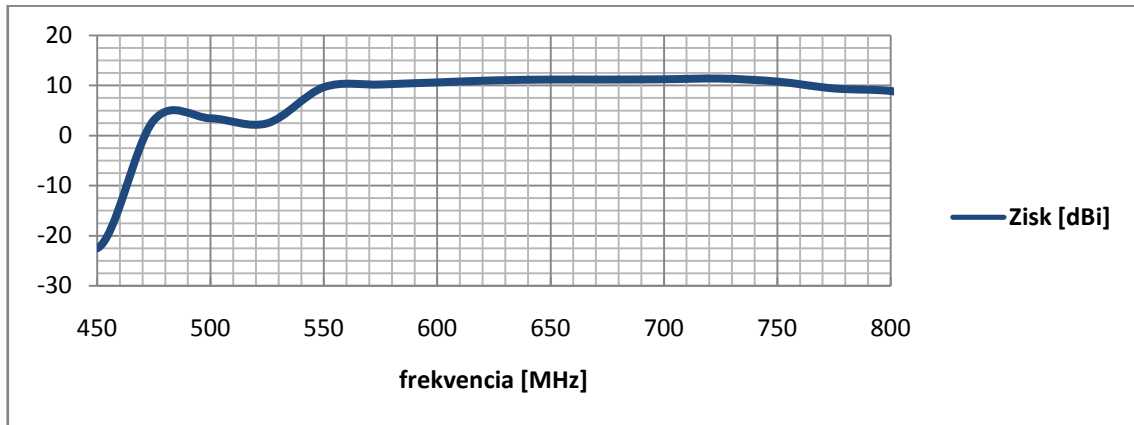
Priemer helixu	<b>D=</b>	146 mm
Priemer drôtu	<b>d=</b>	2,7 mm
Priemer reflektora	<b>R=</b>	350 mm
Celková dĺžka antény	<b>L=</b>	370 mm

Tab. 5 Rozmery antény použité pri simulácii

Simuláciami bolo zistené, že na vyšších frekvenciách, najmä v pásme 700 - 800 MHz sa zhoršujú viaceré parametre antény vrátane osového pomeru a činiteľa odrazu, zužuje sa tak použiteľné frekvenčné pásmo antény. Reálne použiteľné frekvenčné pásmo vyplývajúce zo simulácie a merania je teda približne **550 - 750 MHz**. Zúženie frekvenčného pásma je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené použitým typom impedančného transformátora, ktorý je zo svojho princípu pomerne úzkopásmový.

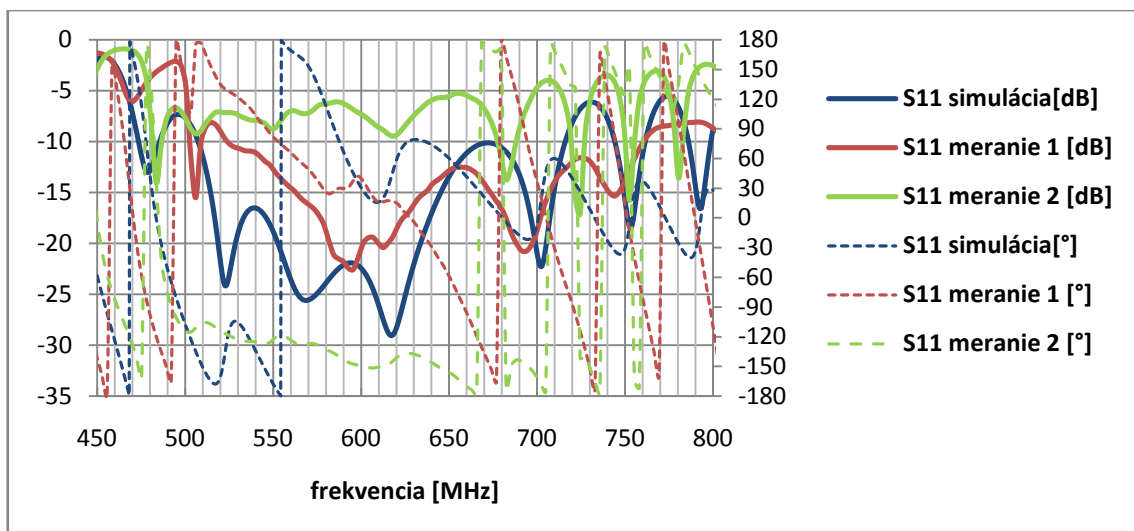
Anténa dosahuje zisku približne **10 dBi** v celom požadovanom frekvenčnom pásme. Zlepšovanie zisku sa podarilo dosiahnuť lepším prispôbením impedancie antény.

Bolo testovaných viacero rozmerov reflektora a stúpania závitov. So zväčšujúcim sa priemerom reflektora sa parametre antény zlepšovali iba mierne, preto tento rozmer ostal na hodnote **350 mm**.



Obr. 44 Graf závislosti zisku helix antény na frekvencii - *simulácia*

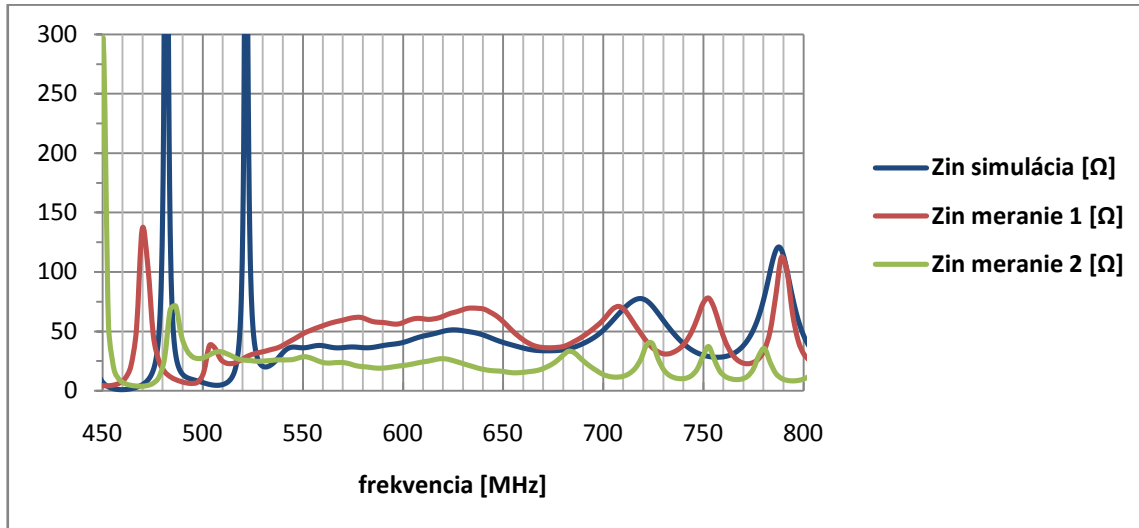
Hodnoty modulu činiteľa odrazu dosahujú u prvého meraného kusu antény veľmi dobrých hodnôt v pásme **550 - 635 MHz**. Vyššie pásmo má stále dobré hodnoty pod -10 dB, avšak zhoršuje sa fázová zložka činiteľa odrazu, ktorá značne kolíše. Druhý meraný kus nedosahoval príliš dobré parametre. Pravdepodobne nastala chyba pri výrobe mikropáskového transformátoru, ktorý kvôli tomu nesprávne transformuje impedanciu antény.



Obr. 45 Graf závislosti činiteľa odrazu helix antény na frekvencii

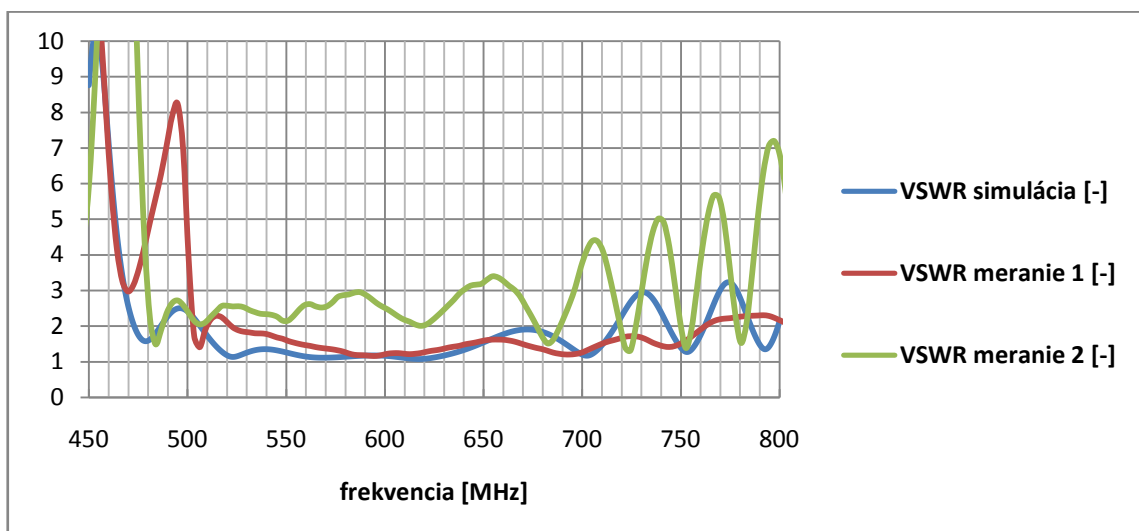


Hodnoty modulu impedancie sa približujú požadovanej impedancii  $50 \Omega$  okrem merania s mikropáskovým transformátorom. Prvé meranie bolo zhotovené s krátkym úsekom koaxiálneho káblu URM70 o impedancii  $75 \Omega$  pripojeného na miesto impedančného transformátora. Druhé meranie bolo uskutočnené s mikropáskovým vedením na substráte FR4.



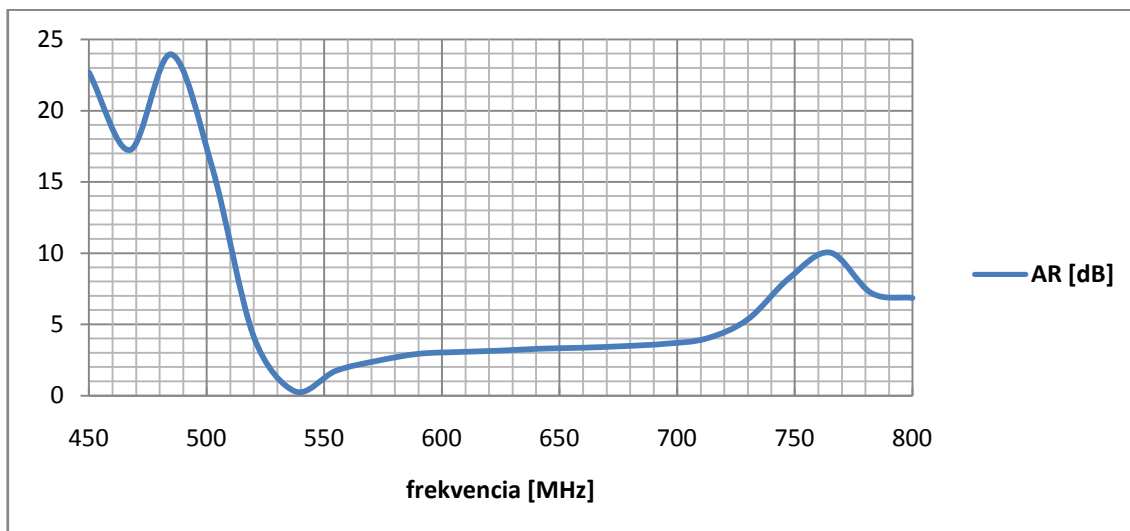
Obr. 46 Graf závislosti modulu impedancie helix antény na frekvencii

Pomer stojatých vln má v prípade simulácie aj prvého merania v celom frekvenčnom pásme hodnotu menšiu ako 2, čo je veľmi dobrý výsledok a anténa teda môže byť použitá aj ako vysielacia. V prípade druhého merania je vidno vplyv zlého impedančného prispôsobenia.



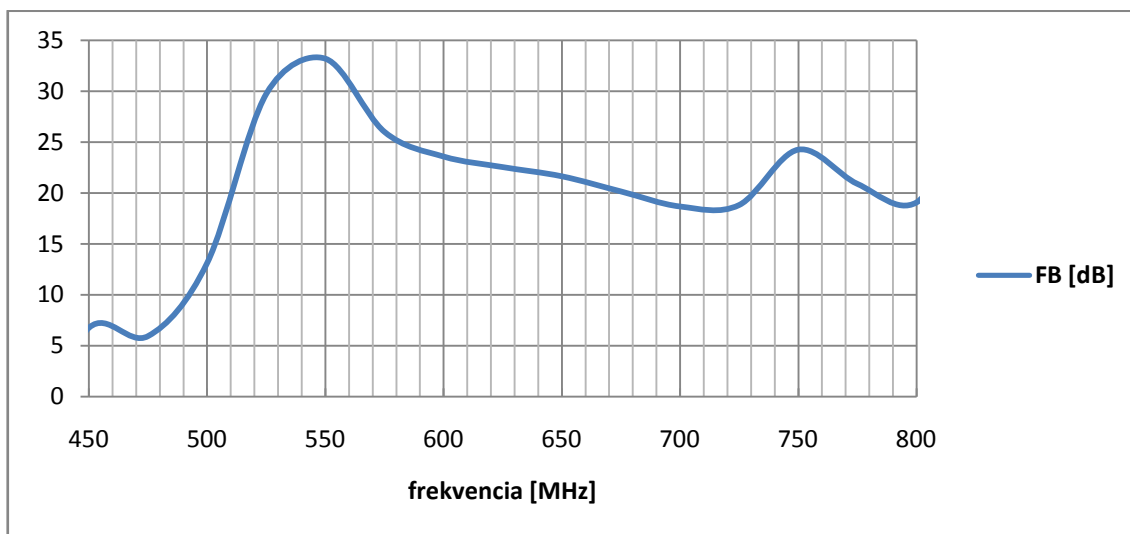
Obr. 47 Graf závislosti pomeru stojatých vln na frekvencii

Osový pomer (Obr. 48) by mal ideálne dosahovať hodnoty aspoň 3 dB, simuláciou sa podarilo dosiahnuť hodnoty **3 - 4 dB**. Pôvodná simulácia dosahovala hodnôt 4-5 dB a na konci pásma sa výrazne zhoršovala. Na okraji pásma sa podarilo hodnotu zlepšiť zväčšením stúpania drôtu z ktorého je anténa zostrojená. Hodnotu osového pomeru zlepšilo o 1 dB v celom pásme umiestnenie impedančného transformátora do stredu (vnútra) helix závitnice.



Obr. 48 Graf závislosti osového pomeru helix antény na frekvencii - *simulácia*

Hodnoty predozadného pomeru sú pre smerové antény v prípade potreby odstránenia rušenia z určitého smeru zásadné. Tým, že anténa takmer v celom pásme dosahuje výborných hodnôt tohto pomeru a to cez 20 dB, je vhodná na takéto použitie.



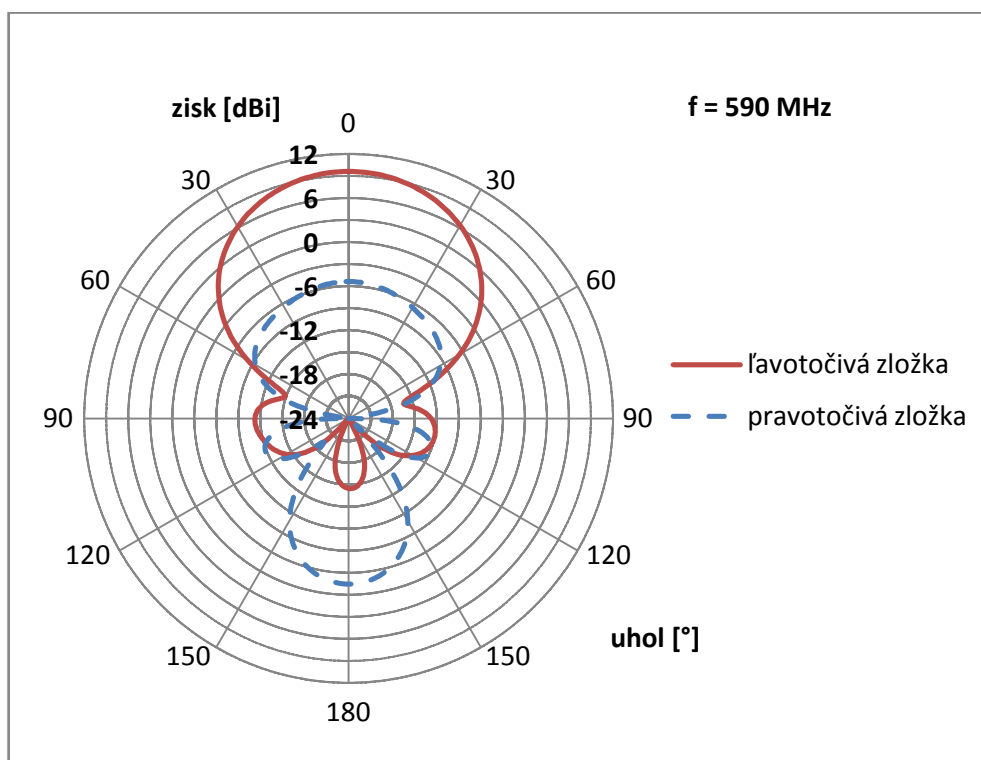
Obr. 49 Graf závislosti predozadného pomeru na frekvencii - *simulácia*

Keďže anténa má ľavotočivú polarizáciu, v nasledujúcej tabuľke sú uvedené zásadné vlastnosti antény na 3 vybraných kmitočtoch. Pre prvé dva anténa dosahuje výborných parametrov. V treťom je taktiež použiteľná, zhoršuje sa avšak smerovosť a zisk antény. Pre pravotočivú zložku je zbytočné údaje uvádzať, keďže je v tomto prípade parazitná.

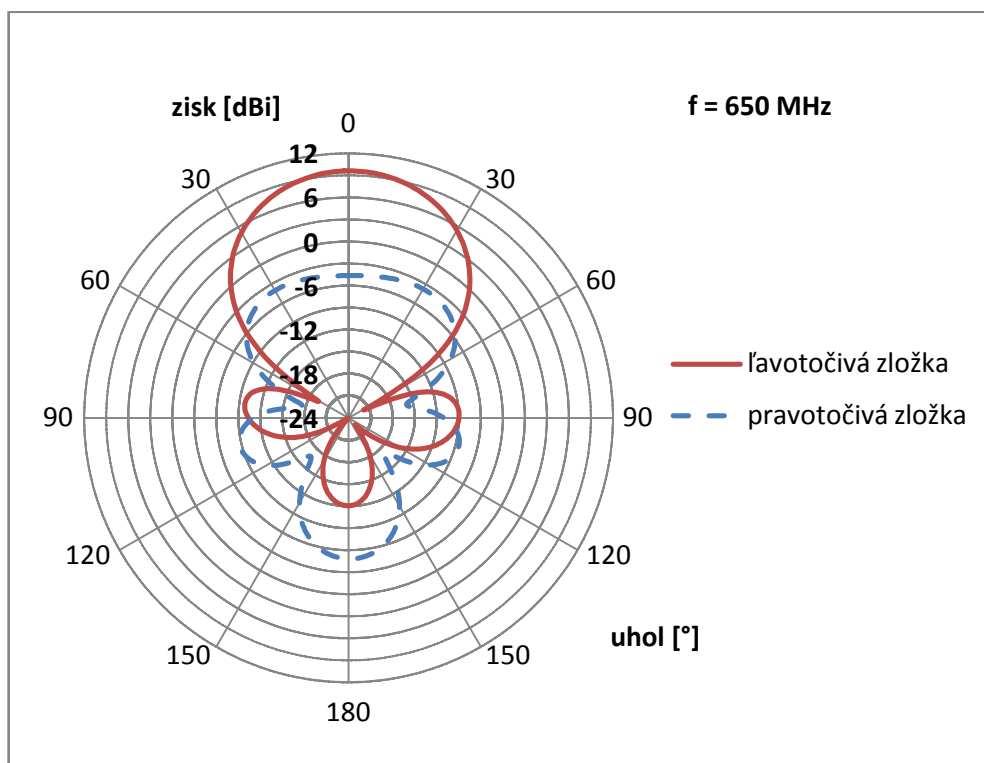
frekvencia	MHz	590	650	755
úroveň hlavného laloka	dB	9,64	9,61	4,2
smer hlavného laloka	°	0	1	0
úroveň bočného laloka	dB	-20,9	-18,5	-14,1
vyžarovací uhol (-3 dB)	°	56,7	50,7	77,6

Tab. 6 Parametre ľavotočivej zložky helix antény - *simulácia*

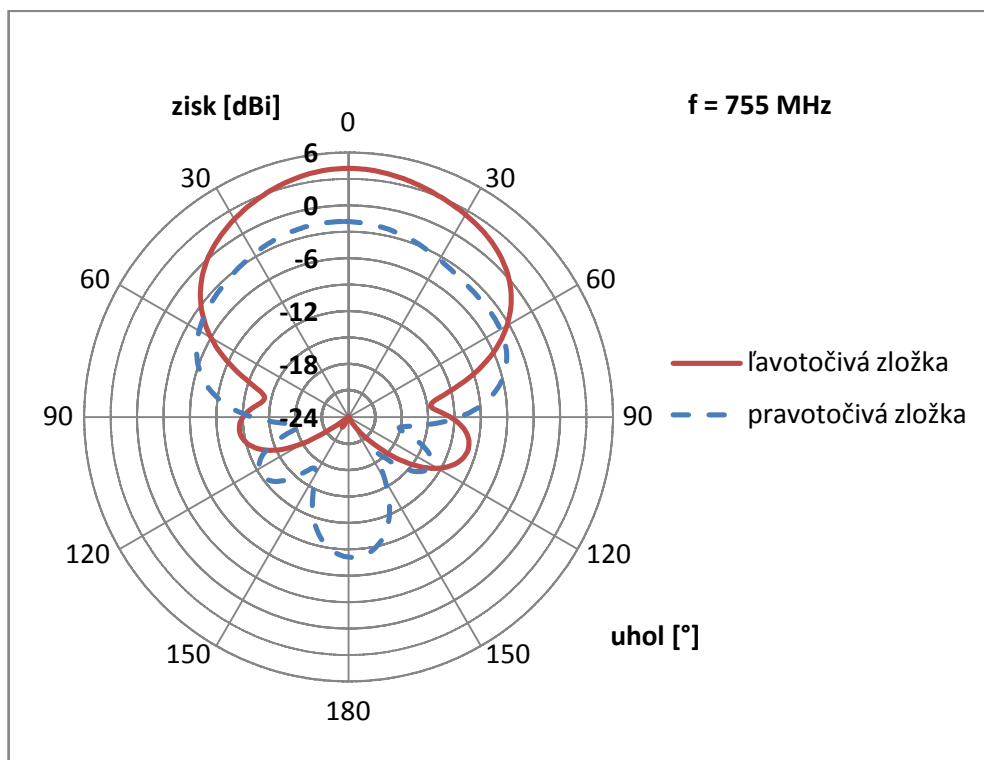
Z nasledujúcich smerových diagramov je zreteľne viditeľný tvar vyžarovacej charakteristiky antény pri rôznych frekvenciách. Taktiež je možné vidieť, že so zvyšujúcou sa frekvenciou sa zhoršuje osová symetria a zvyšuje sa úroveň bočných lalokov.



Obr. 50 Smerový diagram helix antény frekvencia 590 MHz - *simulácia*



Obr. 51 Smerový diagram helix antény frekvencia 650 MHz - simulácia



Obr. 52 Smerový diagram helix antény frekvencia 755 MHz - simulácia

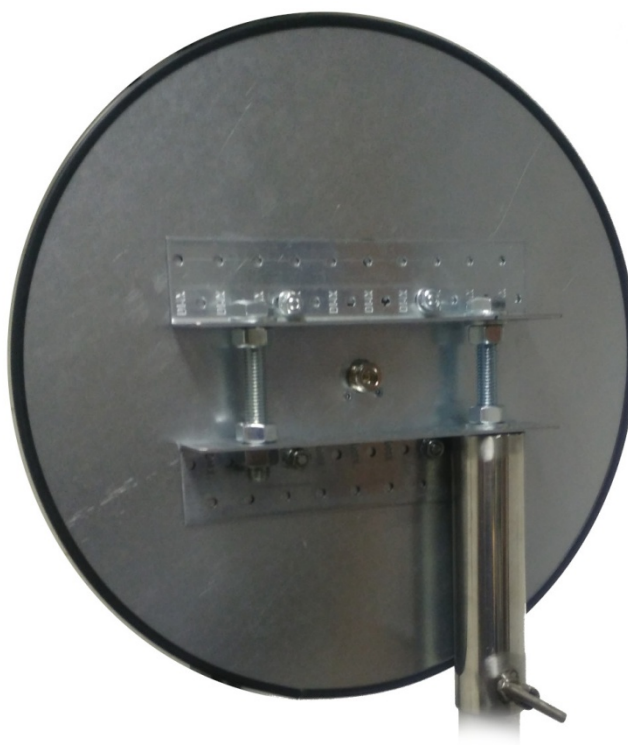
#### 4.2.6 Finálny výrobok

Konštrukčné riešenie je zhotovené z bežne dostupných materiálov, je tak značne zjednodušená výroba a znížená cena konečného výrobku. Reflektor je vystrihnutý z pozinkovaného plechu o hrúbke 1 mm. Tým je zabezpečená jeho dobrá vodivosť a pevnosť. Okraj reflektora je zaoblený gumovou lemovkou. Konštrukčný prvok, na ktorom je drôt navinutý bolo potrebné vybrať s nízkou permitivitou, tak aby čo najmenej ovplyvňoval parametre antény. Preto je vytvorený z PVC rúry o vonkajšom priemere 140 mm. Prvotné riešenia obsahovali držiak kombinovaný zo silonových prvkov, tieto boli avšak pre značne vysokú cenu a pracnú úpravu odstránené. Prototypové riešenie malo drôt prichytený k rúre pomocou tzv. sťahovacích pásov. Finálny výrobok má uchytenie riešené z materiálu Komatex (PVC), z ktorého boli na CNC fréze odfrézované drážky na uchytenie drôtu. 3D model držiakov je možné nájsť v elektronickej prílohe. Uchytenie všetkých konštrukčných prvkov v poli antény je riešené pomocou plastových skrutiek.



Obr. 53 Finálna verzia helix antény - predný pohľad

Celkový držiak antény sa nachádza na opačnej strane reflektora ako helix špirála, kvôli možnosti ovplyvnenia vlastností antény. Bol zhotovený z kovových uholníkov a nerezovej rúry s vnútorným priemerom 35mm. Umožňuje nasadenie na statív, ktorý zaručuje dostatočnú stabilitu a možnosť umiestniť antény do dostatočnej výšky. Kovový držiak taktiež výrazne spevnil celkovú mechanickú konštrukciu antény.



Obr. 54 Finálna verzia helix antény - držiak

Impedančný transformátor bol zhotovený v 2 prevedeniach, prototypová verzia antény bola osadená  $\lambda/4$  úsekom koaxiálneho káblu, finálna verzia mikropáskovým vedením. Osadenie mikropáskového transformátoru do stredu helix antény je značne zložitejšie a náročnejšie na presnosť, zlepši ale výrazne osový pomer.



Obr. 55 Impedančný transformátor helix antény

# ZÁVER

V diplomovej práci je dosiahnuté zhrnutie základných teoretických poznatkov potrebných na celkový návrh zariadenia. Bližšie sú špecifikované požadované parametre jednotlivých komponentov. Podrobnejšie je popísané zapojenie celého anténneho systému a jeho pripojenie k existujúcim zariadeniam - prijímačom. U každého z komponentov je vytvorený rozbor možných riešení a následne vybrané riešenie, ktoré je možné s čo najnižšími nákladmi a dostatočnou reprodukovateľnosťou malosériovo vyrábať. Každé zo zariadení by malo mať taktiež mechanickú konštrukciu a odolnosť vhodnú na dané použitie.

Prvotne bol vytvorený prototypový návrh zariadenia - anténneho rozbočovača a dvoch rôznych typov antén v softvare CST Microwave Studio. Týmto bola overená praktická použiteľnosť zariadení a ich predpokladané parametre. Modely týchto zariadení boli postupne upravované, tak aby na ich základe bolo možné vyrobiť prvé prototypy zariadení.

U anténneho rozbočovača sa pri výrobe prvého prototypu vyskytol problém s nepresne udanou permitivitou zakúpeného substrátu FR4. Vypočítané rozmery preto nekorešpondovali s vlastnosťami substrátu a spôsobili výrazné zhoršenie parametrov oproti návrhu pomocou simulácie. Ďalšie kusy plošných spojov boli vyrobené zo substrátu v dielni UREL, ktorého približná hodnota permitivity bola známa. Tieto kusy dosahovali s veľkou presnosťou rovnakých parametrov ako výsledky simulácie. Bola hľadaná vhodná škatuľka na umiestnenie oboch dosiek rozbočovača. Prieskumom trhu bola zistená dostupnosť a cena rôznych typov, nakoniec bola ako najlacnejšia a dostačujúca vybraná racková krabica od predajcu EZK. Jej použitie bolo overené simuláciou a jej vnútorné rozmery boli upravené priečkou, tak aby po umiestnení plošného spoja rozbočovača nemohlo dôjsť k vytvoreniu vlnovodu. Následne boli skonštruované podložky pod výstupné SMA konektory na 3D tlačiarňu a umiestnené BNC konektory na predný panel zariadenia.

Všesmerová anténa bola zhotovená s použitím koaxiálneho vodiča typu RG-58. Dosahuje dobré hodnoty činiteľa odrazu a nāvázne aj pomeru stojatých vln. Zisk bol zistený iba pomocou simulácie a dosahuje hodnotu teoretického predpokladu daného typu antény. Smerové charakteristiky boli zmerané, ale iba orientačne, pretože nebolo možné určiť presný zisk antény. Keďže konštrukcia a simulačný model antény je pomerne jednoduchý, je možné ľahko upraviť anténu a vyrábať viacero modelov pre všetky dostupné frekvenčné pásma od rôznych výrobcov. Tým, že anténa obsahuje symetrizačný člen - balun a nepotrebuje využívať zemnú dosku prijímača, je možné anténu umiestniť s použitím dlhšieho koaxiálneho káblu na požadované miesto do dostatočnej výšky a jej menší zisk kompenzovať vhodným umiestnením. Pre sériovú výrobu je plánované zostrojiť verziu s integrovaným konektorom, tak aby anténa dosiahla ešte kompaktnejšie rozmery.

Pre realizáciu smerovej antény bola vybraná anténa typu helix, ktorá má určité vlastnosti vhodné pre dané použitie. Podľa simuláciou zistených parametrov dosahovala dobrých parametrov, zisk približne 10 dBi v celom požadovanom pásme, uhol vyžarovania približne 60° a osový pomer 3-4 dB. Anténa opäť nebola zmeraná v komore, keďže jej výbava neobsahovala kruhovo polarizovanú meráciu antény a dostatočné rozmery pre použité pásmo. Z merania činiteľa odrazu ale bola zistená dobrá

použitelnosť antény v prípade použitia koaxiálneho vedenia ako impedančného transformátoru, aj keď pásmo, ktoré malo byť dosiahnuté bolo nakoniec mierne užšie. Pre dosiahnutie výborných parametrov aj na vyššom pásme je v budúcnosti plánované zostrojiť druhú verziu antény s menším priemerom helix závitnice a k tomu prispôbeným impedančným transformátorom. V prípade použitia mikropáskového impedančného transformátoru boli zistené nie najlepšie hodnoty impedančného prispôbenia, pravdepodobne nastala chyba pri výrobe. Problém pravdepodobne spôsobil opäť zlý substrát a jeho neznáma hodnota permitivity.

Pre každý komponent sú v prílohe uvedené konštrukčné rozmery pomocou ktorých je možné jednoducho vyrobiť dané zariadenie. Všetky tri zariadenia boli navrhované s možnosťou jednoduchej malosériovej výroby bez špeciálnej výbavy. Prieskumom trhu bol zistený záujem o daný typ zariadení a preto je zámerom vyrobiť malú sériu z každého komponentu.

V budúcnosti, pre rozšírenie ponuky výrobkov, je plánovaný vývoj Logaritmickeo-periodickej antény na substráte a iného anténneho príslušenstva ako napríklad pásmových filtrov, ktoré značne pomáhajú vyhnúť sa problémom s momentálnym veľkým rušením využívaných pásiem LTE internetom. Na trhu sa dajú takéto antény, zosilňovače a filtre kúpiť, avšak sú určené pre príjem televízneho vysielania a sú teda navrhnuté na použitie s rozvodmi, ktoré majú impedanciu  $75 \Omega$ . To ich značne znevýhodňuje na použitie s bezdrôtovými systémami o ktorých pojednáva táto diplomová práca a ktoré sa využívajú v zvukárskej praxi. Tie sú, až na pár možných výnimiek, prispôbené na použitie príslušenstva s impedanciou  $50 \Omega$ . Takéto príslušenstvo sa v daných frekvenčných pásmach bežne v obchodoch s anténou technikou nedá zakúpiť a väčšina firiem preto siaha po nákupe špecializovaných typov zariadení od výrobcov daného bezdrôtového systému, ktoré bývajú zbytočne značne predražené, pričom sa jedná o bežné zariadenia len prispôbené na inú impedanciu.

Reálne testy potvrdili dobrú funkčnosť daných zariadení v požadovaných frekvenčných pásmach a lepšie parametre antén v porovnaní s bežne dodávanými typmi od výrobcov bezdrôtových systémov.



# LITERATÚRA

- [1] Understanding Power Splitters [online]. Mini-Circuits, 2015 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://ww2.minicircuits.com/app/AN10-006.pdf>
- [2] Vlnovod. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016, 6. 1. 2016 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnovod>
- [3] The A.R.R.L. antenna book. West Hartford, Conn.: American Radio Relay League, 2007. Radio amateur's library. ISBN 0-87259-987-6. ISSN 1048-1699..
- [4] *Helix antenna design and construction details* [online], John Coppens ON6JC/LW3HAZ. Dostupné z: <http://jcoppens.com/ant/helix/calc.en.php>
- [5] SMUTNÝ, Martin. *Anténa pro impulzní širokopásmový signál*. 2015.
- [6] *Online Calculator .:. Helix antenna: Sophisticated Helix Antenna Design. Www.changpuak.ch* [online]. 2016 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: [http://www.changpuak.ch/electronics/calc\\_12a.php](http://www.changpuak.ch/electronics/calc_12a.php)
- [7] Helical Antenna (Helix Antenna). The Antenna Theory Website [online]. Pete Bevelacqua, 2011 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/antennas/travelling/helix.php>
- [8] Whip antenna. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Whip\\_antenna](https://en.wikipedia.org/wiki/Whip_antenna)
- [9] ABCD567. Help with coaxial collinear antenna. In: *EHam.net: ham radio on the net* [online]. 2016 [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: <http://www.eham.net/ehamforum/smf/index.php/topic,38371.60.html>
- [10] Sennheiser EW 500-945 G3 E-Band. In: Thomann GmbH [online]. 2017 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: [https://www.thomann.de/cz/sennheiser\\_ew\\_500\\_945\\_g3\\_e\\_band.htm](https://www.thomann.de/cz/sennheiser_ew_500_945_g3_e_band.htm)
- [11] SENNHEISER. Radio Microphone Frequency Ranges. V2.0. 2013.
- [12] PA805 Directional Antenna. *Shure* [online]. 10.4.2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://www.shure.eu/products/accessories/iem\\_system-accessories/pa805](https://www.shure.eu/products/accessories/iem_system-accessories/pa805)
- [13] HA-8089 Helical Antenna. *Shure* [online]. 10.4.2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://www.shure.eu/products/accessories/wireless\\_system-accessories/ha-8089](https://www.shure.eu/products/accessories/wireless_system-accessories/ha-8089)
- [14] S8089-Helical-Brochure: Sheet # MAS 05-0039. In: *Professional Wireless Systems, A Masque Sound Company*. [online]. 2006 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.professionalwireless.com/wp-content/uploads/2016/03/S8089-Helical-Brochure.pdf>
- [15] Quarter Wave Transformer Impedance Calculator. *Everything RF* [online]. 2015, 2015 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/quarter-wave-transformer-impedance-calculator>
- [16] LÁČÍK, Jaroslav. Mikrovlnná technika: P6: Rezonátory z úseku vedení, dutinové rezonátory, buzení vlnovodů a rezonátorů. UREL FEKT VUT Brno, 2012.

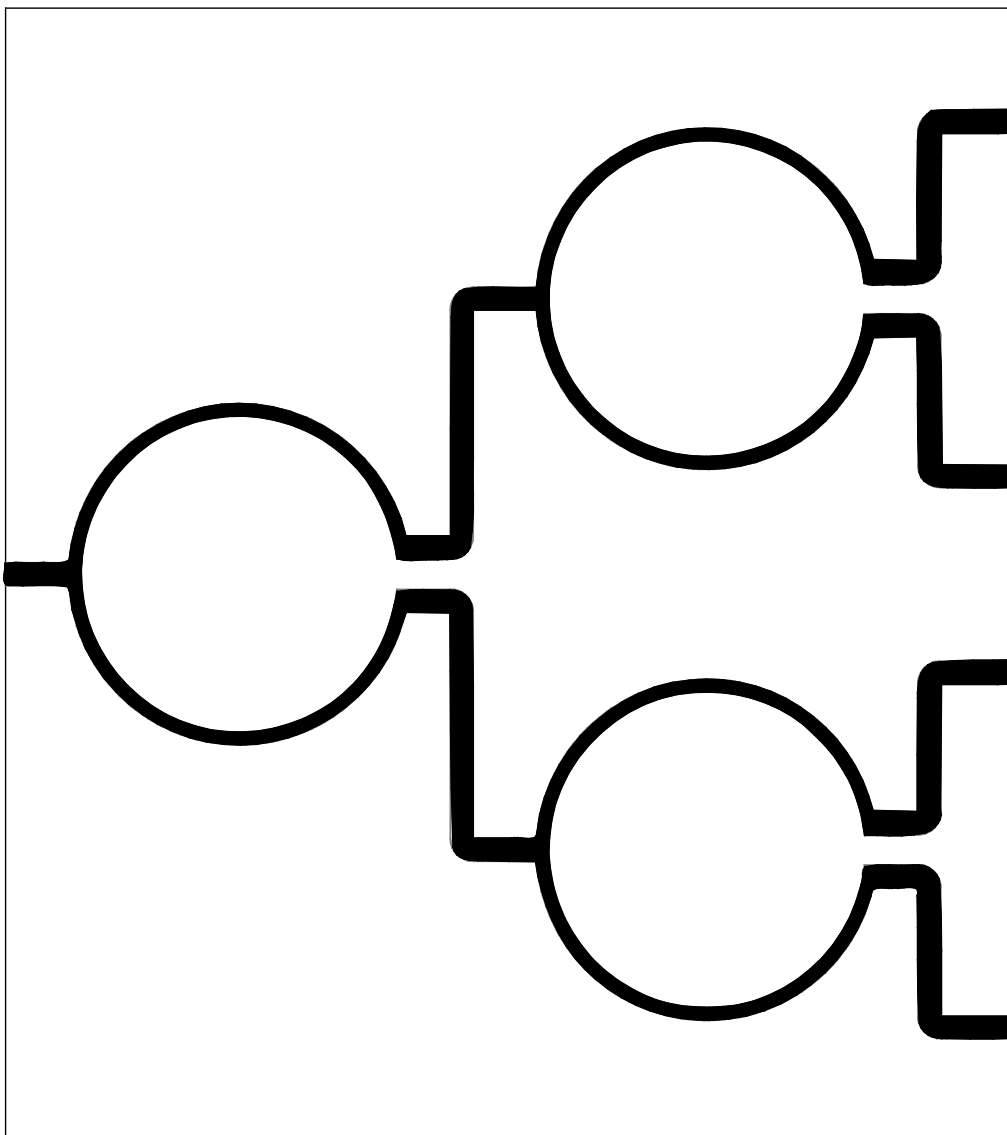
# ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

<b><math>\epsilon_r</math></b>	relatívna permitivita
<b><math>\text{tg } \delta</math></b>	stratový činiteľ
<b><math>h</math></b>	hrúbka substrátu
<b><math>t</math></b>	hrúbka pokovenia substrátu
<b>AR</b>	Axial Ratio - osový pomer antény
<b><math>\lambda</math></b>	vlnová dĺžka
<b>DPS</b>	doska plošného spoja
<b>balun</b>	transformátor symetrického vedenia na nesymetrické (balanced-unbalanced)
<b><math>c</math></b>	rýchlosť svetla vo vákuu ( $3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
<b>G</b>	zisk antény, zväčša uvádzaný v dBi (voči izotropnému žiariču)
<b>bodypack</b>	vreckový prijímač alebo vysielateľ v tvare malej krabičky nositeľný na oblečení

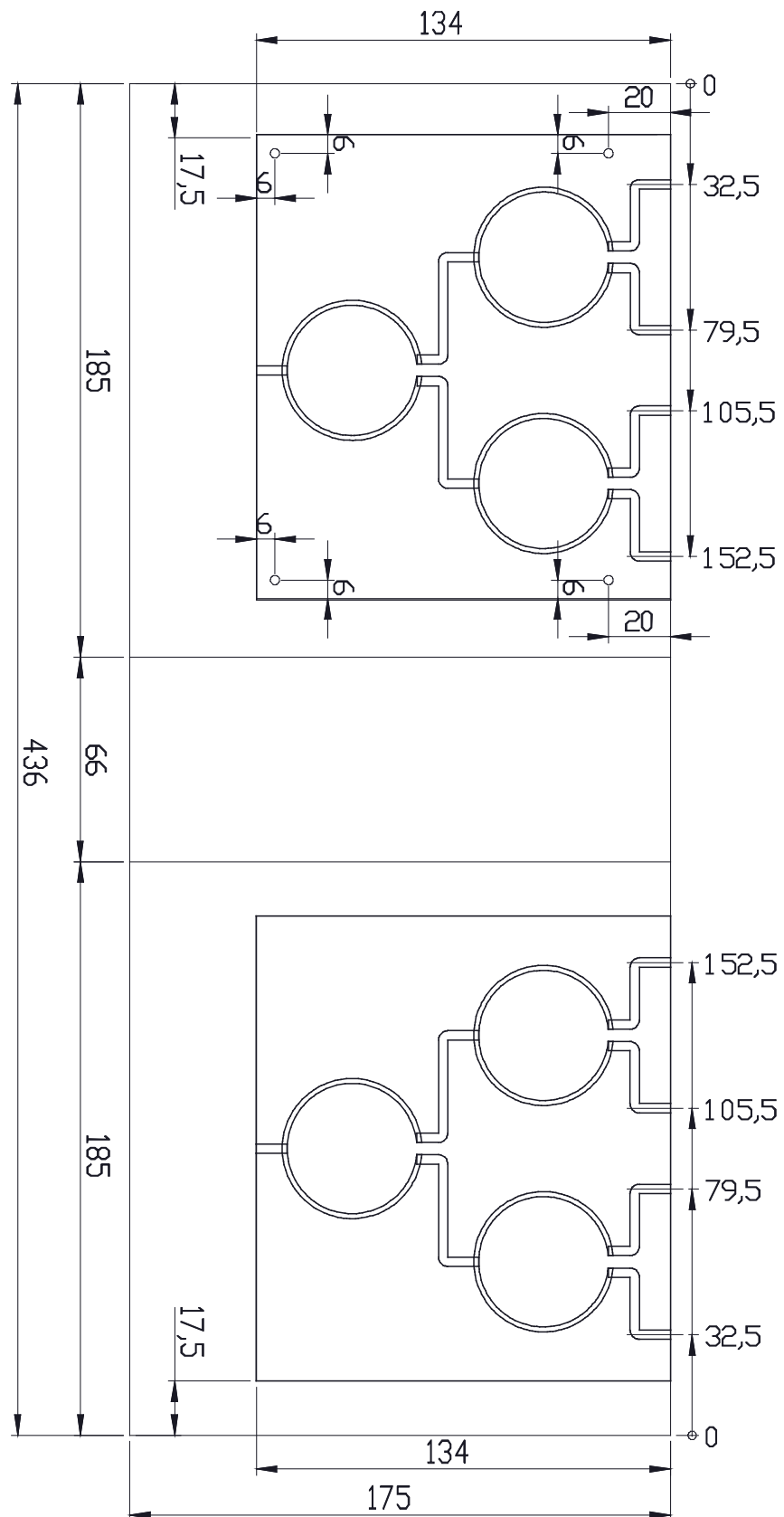
# A VÝROBNÉ PODKLADY ANTÉNNEHO SYSTÉMU

## A.1 Podklad plošného spoja pre splitter (M 1:1)

dostupný aj v elektronickej prílohe

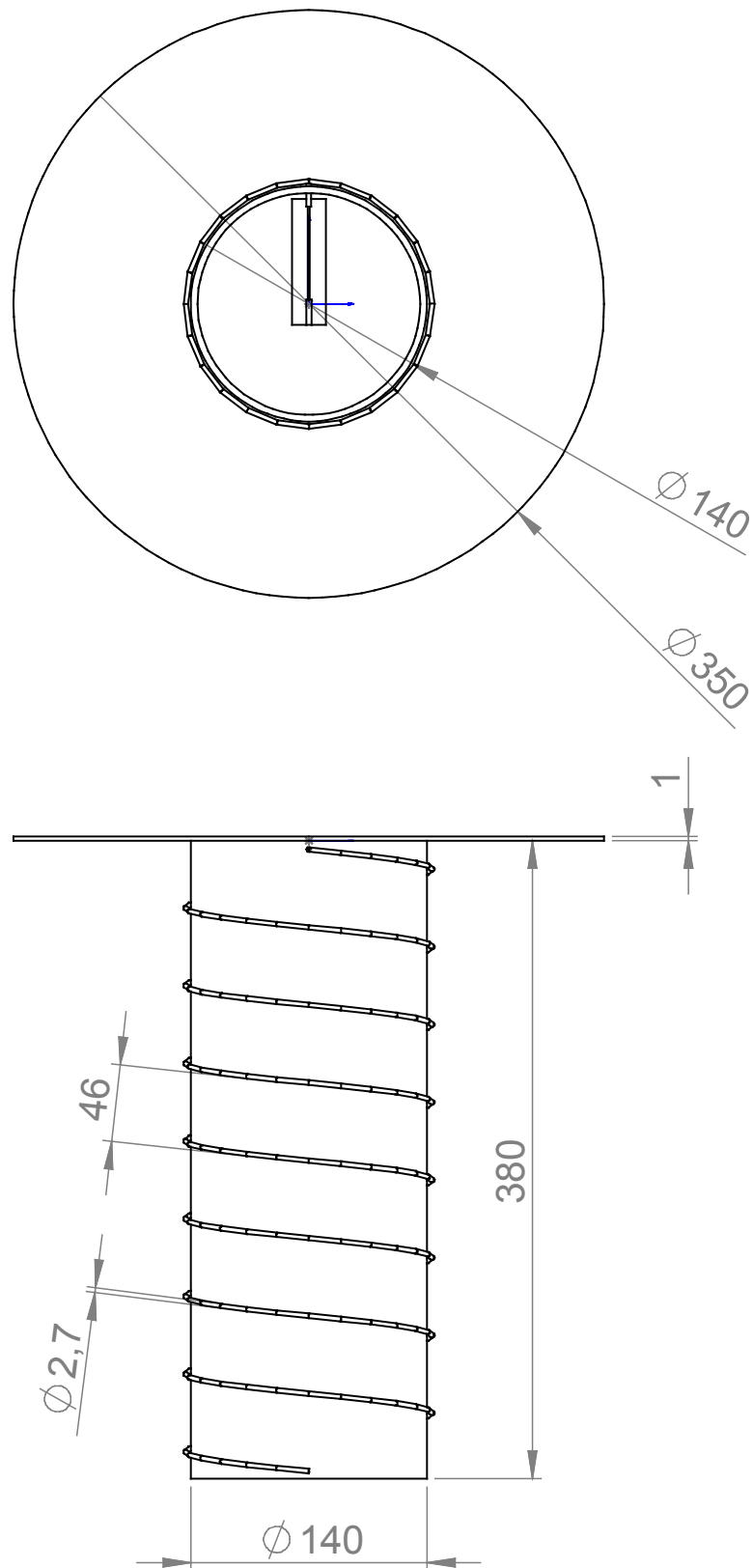


## A.2 Náčrt umiestnenia plošného spoja splittera v rackovej krabici



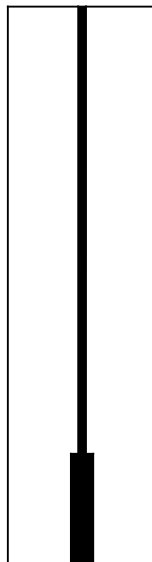
### A.3 Základné rozmery helix antény pre výrobu

Podrobný 3D model antény dostupný v elektronickej prílohe.

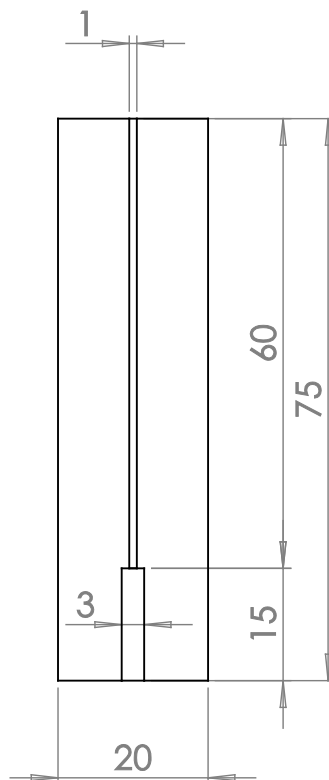


#### A.4 Podklad plošného spoja pre impedančný transformátor helix antény - vhodný pre tlač (M 1:1)

dostupný aj v elektronickej prílohe

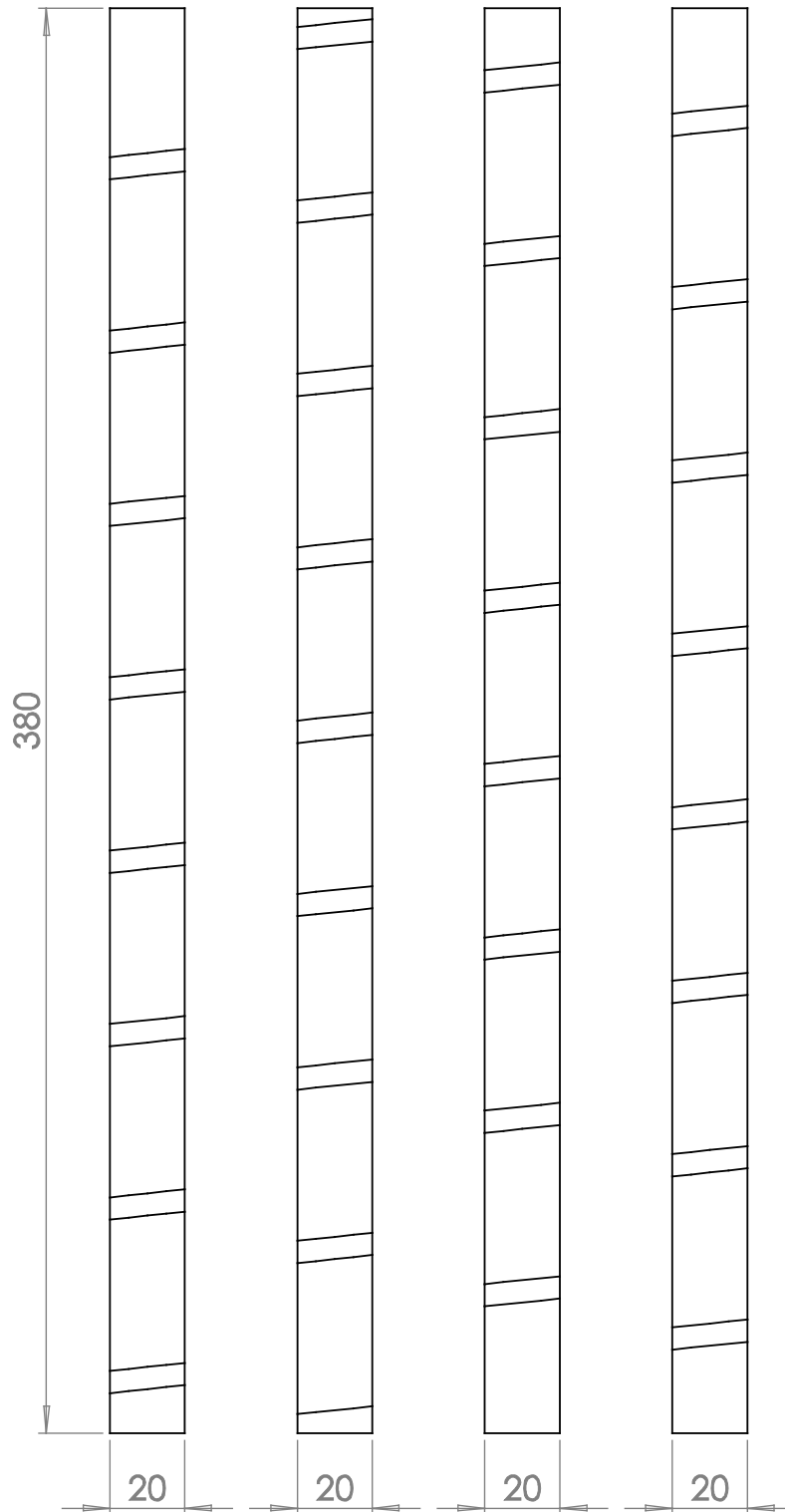


#### A.5 Podklad plošného spoja pre impedančný transformátor helix antény - kóty

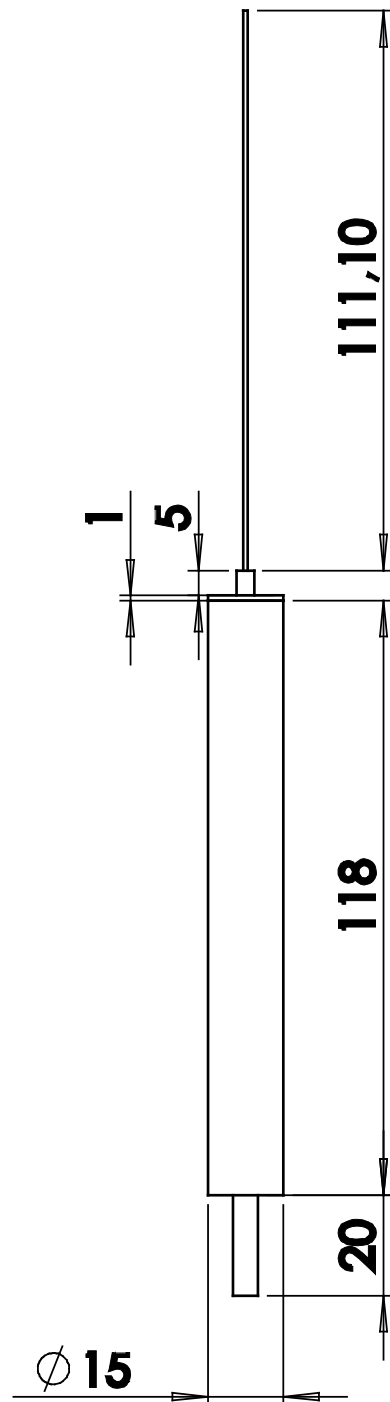


## A.6 Držiaky drôtu helix antény (M1:2)

dostupné ako 3D modely v elektronickej prílohe - možnosť vyfrézovať alebo vytlačiť na 3D tlačiarňi



**A.7 Rozmery koaxiálnej  $\lambda/4$  antény pre prototypovú výrobu (M1:2)**





## B ZOZNAM SÚČIASTOK

Základný zoznam súčiastok s približným cenovým rozpočtom pre stavbu anténneho systému.

### B.1 Zoznam súčiastok Wilkinsonovho deliča

- 2ks plošný spoj - cuprextid FR4 - 150 x 150 mm
- 6ks rezistor SMD2010 100R 1%
- 2ks konektor typ BNC do panelu - krimpovací na RG316
- 8ks konektor typ SMA do DPS
- 2ks konektor typ SMA - krimpovací na kábel RG316
- 30cm koaxiálny kábel RG316
- 1ks 19" rack skrinka 1U
- 8ks plastový distančný stĺpik M3, 17 mm
- 8ks plastová matica M3
- 8ks plastová skrutka M3x6

celkové náklady 60€

### B.2 Zoznam súčiastok koaxiálnej $\lambda/4$ antény

- 0,5m koaxiálny kábel RG58
- 0,12m medená rúra 15x1 mm
- 1ks zátka na medenú rúru 15 mm
- 1ks konektor typ BNC - na kábel, RG58, 50  $\Omega$
- 1ks obal antény - 3D tlač

celkové náklady 10€

### **B.3 Zoznam súčiastok helix antény**

- 4m medený drôt - 6 - 16 mm<sup>2</sup>
- 1ks kruhový plech - priemer 350 mm, hrúbka 0,55 - 1 mm
- 1ks rúra PVC 140x3,6x1000
- 1ks zátka PVC 125 mm
- 4ks plastový materiál na pripevnenie drôtu
- 1ks plošný spoj 20x75 mm
- 1ks konektor typ N - pájkovací, na panel, 50 Ω
- kovový montážny materiál

celkové náklady 30€

### **B.4 Príslušenstvo - kabeláž**

- kábel RG-58, prípadne lepší
- konektory typ BNC na kábel, 50 Ω
- konektory typ SMA na kábel, 50 Ω
- konektory typ N na kábel, 50 Ω

celkové náklady 25€

## C FOTODOKUMENTÁCIA



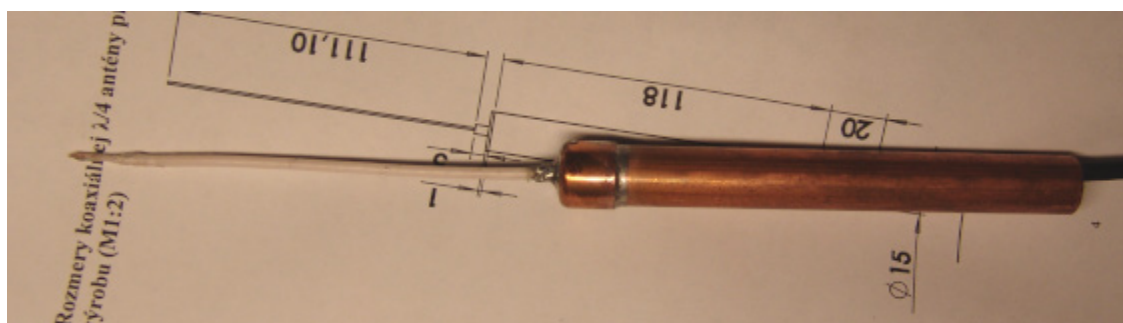
Fotografia 1 Testovanie prvotného prototypu signálového rozbočovača s prijímačmi Sennheiser



Fotografia 2 Finálny výrobok - splitter - predný panel



Fotografia 3 Finálny výrobok - splitter - zadný panel



Fotografia 4 Koaxiálna anténa bez obalu



Fotografia 5 Koaxiálna anténa testovaná pri reálnom použití



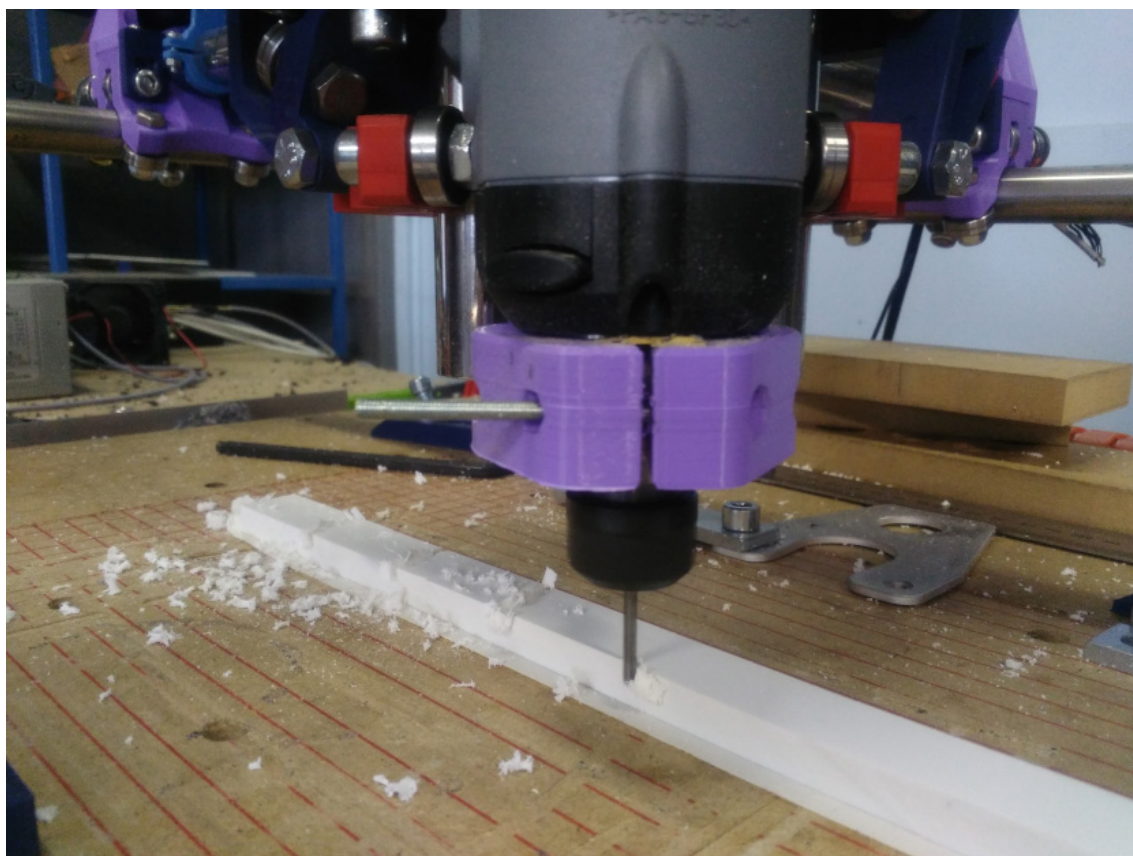
Fotografia 6 Prvá konštrukčná verzia helix antény



Fotografia 7 Druhá konštrukčná verzia helix antény testovaná pri reálnom použití



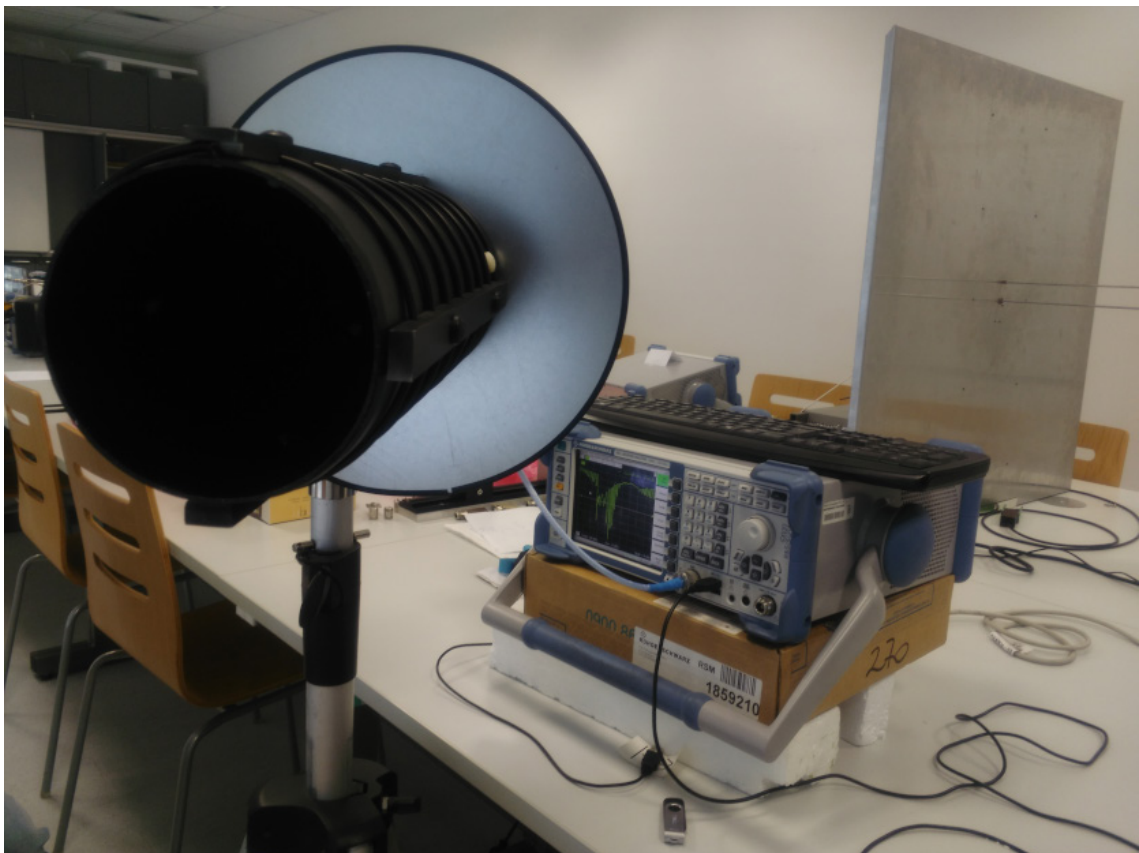
Fotografia 8 Impedančný transformátor helix antény s osadeným N-konektorom



Fotografia 9 Frézovanie držiaku drôtu helix antény



Fotografia 10 Osadenie držiakov drôtu na PVC rúru



Fotografia 11 Meranie finálnej verzie helix antény