

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

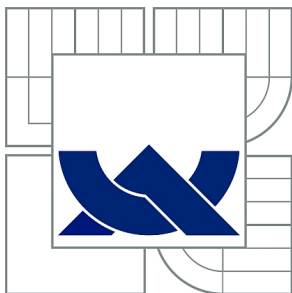
ANTÉNA PRO IMPULZNÍ ŠIROKOPÁSMOVÝ SIGNÁL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

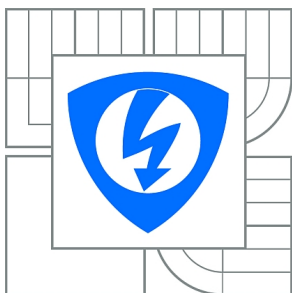
Bc. MARTIN SMUTNÝ

BRNO 2015



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

ANTÉNA PRO IMPULZNÍ ŠIROKOPÁSMOVÝ SIGNÁL

ANTENNA FOR BROADBAND IMPULSE SIGNAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

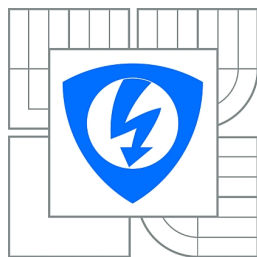
Bc. MARTIN SMUTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR DREXLER, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Martin Smutný

ID: 125634

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Anténa pro impulzní širokopásmový signál

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte principy širokopásmových antén pracujících v pásmu VHF a UHF s poměrem šířky pásma přesahujícím 5:1. Na základě získaných poznatků navrhnete anténu pro pásmo UHF, která bude vhodná pro vysílání/přijem impulzního signálu s dobou trvání stovek pikosekund. Zaměřte se na kompaktnost navrhované antény a širokou směrovost.

Ve vhodném simulačním softwarovém prostředí vytvořte model navržené antény a ověřte její vlastnosti. Navrženou anténu realizujte a měřením ověřte její parametry. Porovnejte změřené parametry antény s vypočtenými a výsledky srovnání diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BURBERRY, R.A. VHF and UHF antennas. London: Peter Peregrinus Ltd., 1992.

[2] KIM, J.N., PARK, S.O. Ultra Wideband Double Discon Antenna Showing 30:1 Bandwidth. In Proceedings of 2003 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC-2003). Seoul, 2003, p. 69-71.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 21.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá řešením problematiky širokopásmových antén pro pásmo VHF a UHF. Zaměřuje se na kompaktní antény, které by byly potenciálně vhodné pro detekci elektromagnetických impulsů generovaných elektrickými výboji v olejovém dielektriku výkonových transformátorů. Jedná se o velice strmé impulzní signály s náběžnou hranou stovky pikosekund. V práci jsou představeny základní parametry antén a vybrány ty, které mají zásadní vliv na možnost použití antény ve zmíněné aplikaci. Z popsanych antén je vybrána nejvhodnější a je diskutován návrh jejích geometrických parametrů. Geometrie zvolené antény je navrhována tak, aby pracovní šířka pásma antény byla od cca 200 MHz do cca 1000 MHz. Nově navržená dvojité diskónická anténa je simulována a jsou optimalizovány její rozměry. Posléze je provedena její výroba a změření klíčových vlastností antény důležitých pro zhodnocení schopnosti detekce výše charakterizovaných impulzních signálů. Porovnání je provedeno s příjmem a charakteristikami monokónické antény. Následuje závěrečné zhodnocení získaných poznatků a změřených údajů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Anténa, UWB, VHF, UHF, impulzní signál, kónická anténa, bikónická anténa, diskónická anténa, dvojité diskónická anténa

ABSTRACT

The thesis describes retrievals of broadband antennas for VHF and UHF. It focuses on a compact antenna, potentially suitable for detecting electromagnetic impulses generated by electrical discharges in the dielectric oil in power transformers. This pulse signals are very steep with hundreds pico seconds rising edge. The thesis presents basic characteristics of antennas and selects those which have a major influence on the possibility of using the antenna in selected application. The appropriate antenna is selected and proposal its geometrical parameters is discussed. The geometry of the selected antenna is designed for working bandwidth from about 200 MHz to about 1000 MHz. The newly designed double discone antenna is simulated and dimensions are optimized. Antenna is made and key characteristics of the antenna important for evaluate the ability of detecting the above-identified pulsed signals is measured. Antenna is compared with gain and characteristic of monocone antenna. Acquired knowledge and measured data are evaluated.

KEYWORDS

Antenna, UWB, VHF, UHF, pulse signal, conical antenna, biconical antenna, discone antenna, double discone antenna

SMUTNÝ, M. *Anténa pro impulzní širokopásmový signál*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015. 55 s., 0 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Anténa pro impulzní širokopásmový signál jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji velice vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Drexlerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat i panu doc. Ing. Jaroslavu Láčíkovi, Ph.D. za jeho cenné rady.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	iv
Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	viii
1 Úvod	9
2 Antény	10
2.1 Princip antén	10
2.2 Základní parametry antén:	11
3 Antény pro pásmo VHF a Uhf	15
3.1 Dipólová anténa a její varianty	15
3.2 Antény VHF, UHF s radiálním vyzařováním	16
3.2.1 S vertikální polarizací:	16
3.2.2 S horizontální polarizací:	16
4 Symetrizace – symetrizační obvody	18
5 Širokopásmové antény	19
5.1 Trychtýřové antény a trychtýřové antény s vloženým žebrem	19
5.2 Šroubovicová anténa	20
5.3 Planární typy UWB antén	20
5.3.1 UWB antény určené úhly:	20
Spirálová anténa (planární)	21
5.3.2 Duální UWB antény:	21
5.4 Kónicko-logaritmická anténa	21
5.5 Parabolická impulzní anténa	22
5.6 Kónický monopol	22
5.7 Bikónická anténa	23
5.8 Dvojitá diskónická anténa	25
6 Teoretický návrh dvojité diskónické antény	27
7 Návrh dvojité diskónické antény	28
7.1 Vlastní návrh dvojité diskónické antény	30

7.2	Zmenšení rozměrů dvojité diskónické antény	35
8	výroba antény	40
9	Měření antény - výsledky	42
10	Závěr	50
11	Literatura	51
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Šíření vlny vedením a její vyzařování	11
Obr. 2: Vyzařovací charakteristika [3]	13
Obr. 3: Varianty dipólů: a, b) tlusté dipóly, c, d, e, f) skládané dipóly, g) bočníkové napájení, h) dipól s bočníkem [3]	15
Obr. 4: Logaritmicko periodická anténa [5]	15
Obr. 5: Typy antén s všesměrovým vyzařováním - horizontální polarizace [5].....	16
Obr. 6: Typy antén s všesměrovým vyzařováním - vertikální polarizace [3].....	17
Obr. 7: Symetrizační obvody – symetrizace: rukávem (a), pahýlem (b), půlvlnnou smyčkou (c) [5]	18
Obr. 8: trychtýřová anténa Obr. 9: trychtýřová anténa s vloženým žebrem	19
Obr. 10: šroubovicová anténa	20
Obr. 11: Spirálová anténa [4] Obr. 12: Realizace spirálové antény [4]	21
Obr. 13: Typy planárních UWB antén: a) rovnoúhlá spirála, b) za předpokladu neomezené délky je určena pouze úhlem Φ , c) anténa s tvarovou úpravou s příčnými elementy, d) anténa s kombinací vlastností [4].....	21
Obr. 14: Kónická logaritmická anténa	22
Obr. 15: Parabolická impulzní anténa [17]	22
Obr. 16: Kónický monopól [4]	23
Obr. 17: Monopólové antény: zleva doprava: monopól, kónická ant., zúžená ant., polokulová ant. [4]	23
Obr. 18: Diskónická anténa [13]	23
Obr. 19: Bikónická anténa (kuželový dipól) [12].	24
Obr. 20: Dipólové antény: zleva doprava: klasický dipól, bikónická ant., zúžená ant., polokulová ant. [4]	24
Obr. 21: Bikónická anténa (trojúhelníkový dipól) [12]	24
Obr. 22: Bikónická anténa vlevo a její vyzařování (kulové vlny) vpravo [16]	24
Obr. 23: Bikónická anténa: elektrické pole E a magnetické pole H (vlevo), napětí a proud na bikónické anténě (vpravo; proud – I, napětí - V) [16]	25
Obr. 24: Aproximace kónické antény: zleva doprava: trojúhelníkový list, motýlek a ...	25
Obr. 25: Spojení dvou diskónických antén [13]	26
Obr. 26: Dvojitá diskónická anténa – geometrie [13].....	27
Obr. 27: Dvojitá diskónická anténa – výchozí model.....	28
Obr. 28: Puvodní budící signál	29
Obr. 29: Nový budící signál – impulzní	29
Obr. 30: Výsledná dvojitá diskónická anténa	31
Obr. 31: Charakteristika přijatého impulzního signálu.....	31
Obr. 32: Parametr S_{11} antény (vstupní činitel odrazu)	32
Obr. 33: Závislost reálné části impedance antény na frekvenci	32
Obr. 34: Závislost imaginární části impedance antény na frekvenci	32
Obr. 35: Úroveň výkonu přijatého anténou	33
Obr. 36: VSWR (PSV) antény	33
Obr. 37: Polární graf - směrová charakteristika antény a příslušný zisk na frekvenci 200 MHz	33
Obr. 38: Polární graf - směrová charakteristika antény a příslušný zisk na frekvenci 700 MHz	34
Obr. 39: Polární graf - směrová charakteristika antény a příslušný zisk na frekvenci	

1000 MHz	34
Obr. 40: Vzhled finální antény	35
Obr. 41: Charakteristika přijatého impulzního signálu optimalizované antény	36
Obr. 42: Parametr S_{11} antény (vstupní činitel odrazu) optimalizované antény	36
Obr. 43: Závislost reálné části impedance optimalizované antény na frekvenci.....	36
Obr. 44: Závislost imaginární části impedance optimalizované antény na frekvenci	37
Obr. 45: Úroveň výkonu přijatého optimalizovanou anténou	37
Obr. 46: VSWR (PSV) optimalizované antény	37
Obr. 47: Polární graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 200 MHz	38
Obr. 48: 3D graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 200 MHz	38
Obr. 49: 3D graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 300 MHz	38
Obr. 50: Polární graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 700 MHz	39
Obr. 51: Polární graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 1000 MHz	39
Obr. 52: Šikmý boční pohled na anténu (vlevo) a boční pohled na anténu (vpravo)	41
Obr. 53: Pohled shora: vnitřní část velkého kónusu (vlevo) a vnitřek malého kónusu s diskem (vpravo).....	41
Obr. 54: Detail na: distanční sloupek mezi kónusy (vlevo) a konektor SMA uvnitř velkého kónusu (vpravo).....	41
Obr. 55: Měřicí pracoviště	42
Obr. 56: Uložení dvojité diskónické antény – DDA (vlevo) a monokónické antény - MA (vpravo).....	43
Obr. 57: Graf závislosti parametru S_{11} DDA na frekvenci	43
Obr. 58: Porovnání simulované a reálné závislosti parametru S_{11} na frekvenci.....	43
Obr. 59: Graf závislosti parametru S_{11} MA na frekvenci.....	44
Obr. 60: Graf závislosti reálné části impedance DDA na frekvenci.....	44
Obr. 61: Graf závislosti imaginární části impedance DDA na frekvenci	45
Obr. 62: Graf závislosti reálné části impedance MA na frekvenci	45
Obr. 63: Graf závislosti imaginární části impedance MA na frekvenci	45
Obr. 64: Generátor s anténou vysílající impulzní signály	46
Obr. 65: Tvar vlny umělého impulzního signálu (vlevo) a jeho spektrum (vpravo)	46
Obr. 66: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro DDA na vzdálenost 120 cm.....	47
Obr. 67: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro MA na vzdálenost 120 cm.....	47
Obr. 68: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro DDA ve vodorovné poloze s osou antény směrem ke generátoru na vzdálenost 500 cm.....	48
Obr. 69: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro DDA ve svislé poloze s diskem nahore na vzdálenost 500 cm	48
Obr. 70: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro DDA ve svislé poloze s diskem dole na vzdálenost 500 cm	48
Obr. 71: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro MA na vzdálenost 500 cm.....	49

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Dělení elektromagnetických vln dle frekvence	11
Tab. 2: Zisk antény od 200 MHz do 1GHz.....	34
Tab. 3: Porovnání změn rozměrů antény v průběhu návrhu.....	35
Tab. 4: Zisk finální antény od 200 MHz do 1 GHz	39

1 ÚVOD

Cílem práce je prostudování principů širokopásmových antén pracujících v pásmu VHF a UHF s poměrem šířky pásma přesahujícím 5:1. Dále na základě získaných poznatků navrhnout, simulovat a realizovat anténu pro pásmo UHF, která bude vhodná pro příjem/vysílání impulzního signálu s dobou trvání stovek pikosekund.

Anténa bude určena k experimentálnímu vysílání a detekci impulzního signálu s velmi strmými přechodovými hranami pro účely výzkumu detekce a lokalizace výbojové aktivity ve výkonových olejových transformátorech. Jedná se ale o velice specifické a velice slabé impulzy s velice ostrou náběžnou hranou – stovky pikosekund. Hlavními vlastnostmi antény by měly být její širokopásmovost, kompaktnost a široká směrovost.

Po výběru nejvhodnějšího typu antény bude posléze vytvořen její návrh a ve vhodném simulačním prostředí bude tento navržený model simulován a budou ověřeny jeho teoretické vlastnosti. Posléze takto navržená a simulovaná anténa bude realizována a měřeními ověřeny její parametry a reálné vlastnosti. Posléze bude provedeno porovnání teoretických a reálných parametrů antény a diskuze získaných výsledků.

Na základě prototypu antény bude v praxi vyvíjen senzor částečných výbojů v dielektriku výkonových transformátorů (typicky u elektráren). Senzor bude sloužit jako detektor množství výbojů v olejovém dielektriku, které vznikají vlivem mikro/makroskopické nehomogenity zhoršující izolační vlastnosti tohoto dielektrika. Jedná se o degradaci vlastností izolace, které vedou k chemickým procesům, jež způsobují vznik dalších plynů, karbonizaci izolace. To vše má za následek rapidní zhoršení izolačních vlastností oleje. Příčinou nutnosti detekce těchto výbojů, které vznikají nehomogenitou oleje přítomností plynů v této olejové izolaci, jsou nežádoucí až destrukční účinky těchto výbojů na transformátorové stanice.

V souhrnu lze postupnou změnu vlastností olejové izolace rozdělit do následujících procesů a stavů:

- vývin plynů
- karbonizace izolace
- rapidní zhoršení izolačních vlastností
- vývin do havarijního stavu, vznik oblouku a potenciální exploze a požár transformátoru

Cílem je tedy navrhnout takovou anténu, která bude schopna tyto výboje detekovat a pomocí jejich detekce zabránit případných škodám.

Požadavky na takovou anténu, jsou:

- anténa pro UHF pásmo,
- příjem impulzního signálu (doba trvání stoky pikosekund). Pracovní frekvence cca od 200 MHz do 1 GHz, tedy šířka pásma 5:1 (4:1).

Návrh antény bude směřován tak, aby splnil výše zmíněné parametry a požadavky, a aby navržená anténa byla co nejvíce kompaktní, s dostatečnou šířkou pásma a s širokou směrovostí umožňující příjem signálu z různých směrů v horizontální rovině.

2 ANTÉNY

Anténa je zařízení určené k příjmu nebo k vysílání rádiových signálů. Je to část vysokofrekvenčního vedení upravená tak, aby účinně vyzařovala/přijímala energii do/z prostoru.

Antény by bylo možno rozdělit na antény přijímací a antény vysílací (v principu věci ale může každá anténa vysílat i přijímat):

- vysílací anténa: je určena k převodu energie elektromagnetického pole ve vedení na energii elektromagnetického pole ve volném prostoru (elektromagnetické vlny)
- přijímací anténa: slouží k převodu energie elektromagnetického pole ve volném prostoru (elektromagnetické vlny) na energii elektromagnetického pole ve vedení
- přijímací a vysílací zároveň: viz obě předchozí vlastnosti zároveň.

2.1 Princip antén

Anténa tvoří hraniční prvek přenosového řetězce a lze si ji představit jako transformátor elektromagnetického vlnění, který buď může mít na primární straně vysokofrekvenční vedení (koaxiální vedení popř. vlnovod) a na sekundární straně volný prostor (nejčastěji vzduch), pak se jedná o vysílací anténu, anebo tomu může být naopak, pak jde o anténu přijímací. Nároky na vysílací a přijímací anténu se mohou lišit. Anténa je tedy zařízení sloužící pro vyzařování nebo příjem elektromagnetických vln radiového spektra. Při přenosu energie tedy vždy dochází ke dvěma transformacím, a sice na přijímací a vysílací straně, mezi nimiž se signál šíří prostorem.

Pokud bude sestaven z cívky a kondenzátoru rezonanční obvod, který následně bude napájen vysokofrekvenční energií, vznikne vlastně generátor elektromagnetického pole. Mezi deskami kondenzátoru se bude vytvářet elektrické pole a okolo závitů cívky se bude generovat pole magnetické. Toto však nebude mít účinek na velkou vzdálenost. Anténa vlastně funguje na principu rezonančního obvodu, kdy je prostor působení elektrického pole kondenzátoru zvětšený tím, že se od sebe oddálí jeho desky, čímž se zmenší kapacita, která ale následně zvětšením ploch desek může růst. Takový kondenzátor si lze představit jako dva vodiče, z nichž je jeden na povrchu a druhý nad povrchem. Existují i antény magnetické, jejichž anténou je smyčka (čili cívka) onoho rezonančního obvodu.

Anténa je tedy otevřený rezonanční obvod. V praxi existuje poměrně široký rozsah frekvencí (resp. vlnových délek) rádiových vln. Pokud je požadováno, aby vznikla účinná anténa, její délka (případně největší rozměr) musí být blízká vlnové délce, na kterou byl obvod navržen. Vlnovou délku λ lze spočítat ze zadané frekvence jednoduše pomocí následujícího vztahu (1):

$$\lambda = \frac{v}{f} [m]. \quad (1)$$

Kde jsou: v – rychlost šíření elektromagnetické vlny (ve vakuu: $v = c = 3 \cdot 10^8$ m/s), f – frekvence [Hz].

V Tab. 1 je uvedeno rozdělení elektromagnetických vln dle ITU podle frekvence do pásem, délka vln pro jednotlivé frekvence a příslušné mezinárodní zkratky těchto pásem.

Mezinárodní zkratka	Frekvenční pásmo	Pásmo vlnových délek	Anglický název
ELF	3 mHz – 3 kHz	1 000 km – 100 km	Extremely Low Frequency
VLF	3 kHz – 30 kHz	100 km – 10 km	Very Low Frequency
LF	30 kHz – 300 kHz	10 km – 1 km	Low Frequency
MF	300 kHz – 3 MHz	1 km – 100 m	Medium Frequency
HF	3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m	High Frequency
VHF	30 MHz – 300 MHz	10 m – 1 m	Very High Frequency
UHF	300 MHz – 3 GHz	1 m – 10 cm	Ultra High Frequency
SHF	3 GHz – 30 GHz	10 cm – 1 cm	Super High Frequency
EHF	30 GHz – 300 GHz	1 cm – 1 mm	Extremely High Frequency

Tab. 1: Dělení elektromagnetických vln dle frekvence

Elektromagnetické vlny vyzařuje každý vodič, kterým prochází střídavý elektrický proud. Anténa je vodič upravený takovým způsobem, aby vyzařoval maximální množství elektromagnetické energie. Ne každé uspořádání vodičů zaručuje maximum vyzařované energie. Například kroucené dvojlinky, používané v telekomunikacích, mají množství vyzařované i přijímané (rušení) energie optimalizované na minimum.

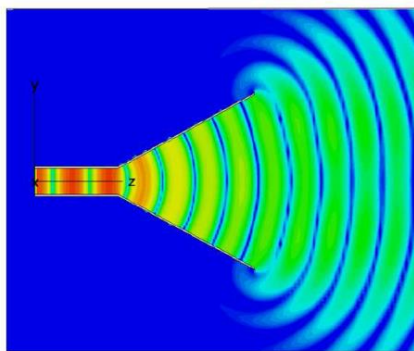
Jako nejjednodušší anténu lze využít syntetický zářič, takzvaný dipól [1] či monopól. Jeho jednoduchý princip vychází z úseku vedení o délce poloviny vlnové délky vysílaného / přijímaného signálu.

Anténa je otevřený rezonanční obvod (viz např. Obr. 1), jehož indukčnost a kapacita jsou realizovány vodičem o délce l , kdy $l \gg d$ [1], kde d je průměr vodiče. Chceme-li, aby anténa byla v rezonanci, musí být délka vodiče celistvým násobkem poloviny vlnové délky, čili ekvivalentem obvodu RLC v rezonanci.

Vzájemnou závislost mezi kapacitou, indukčností a frekvencí v rezonančním obvodu vyjadřuje vztah [1]:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2)$$

kde f je frekvence [Hz], L je indukčnost [H] a C je kapacita [F].



Obr. 1: Šíření vlny vedením a její vyzařování

2.2 Základní parametry antén:

Volba vhodné antény závisí na mnoha faktorech. K nejdůležitějším z nich patří pracovní frekvence, mechanismus šíření, požadavky na směrovost, provozní podmínky,

výkon vysílače a ovšem také ekonomické možnosti.

Níže uvedené parametry jsou nejčastější a mnohdy nejdůležitější používané parametry k popisu vlastností antén. Jedná se o: zisk antény, šířku přenášeného pásma, impedanci antény, polarizace vlnění, směrovost, vyzařovací úhel, efektivní délka, činitel zpětného příjmu, činitel směrovosti.

zisk antény G – udává, kolikrát větší výkon přijímací anténa poskytuje buď vůči půlvlnnému dipólu, nebo vůči teoretické dokonale všesměrové anténě, tzv. izotropnímu zářiči [2] ve směru, kde daná anténa září nejvíce. (Anténa je vždy pasivní, takže její kladný zisk je způsoben směrováním energie do daného směru/ů.)

- jednotka je 1 decibel [dB],
- jednotka dBi vyjadřuje zisk antény ve srovnání se ziskem izotropní antény,
- jednotka dBd vyjadřuje zisk antény ve srovnání se ziskem půlvlnného dipólu.

Místo dBd se častěji setkáme jenom s označením dB .

Platí, že: $dBi = dBd + 2,15$ (Zisk půlvlnného dipólu je proti izotropnímu zářiči o 2,15 dB větší, tedy 1,635 násobný.) [18]

šířka přenášeného pásma B – udává šířku přenášeného frekvenčního pásma

Šířka pásma (*bandwidth*) je rozmezí frekvencí, kde anténní parametry (např. vstupní impedance, vyzařovací diagram, atd.) splňují určité přijatelné požadavky:

- pro širokopásmové antény se šířka pásma vyjadřuje jako poměr maximální a minimální frekvence pásma (např. 10:1)
- pro úzkopásmové antény se šířka pásma vyjadřuje v procentech rozsahu vztaženého ke střední frekvenci (např. 7 %)

impedance antény Z – je vlastní impedance antény, měla by být ideálně reálná (tj. bez imaginární složky)

Impedance antény musí být přibližně stejná či nejlépe shodná, jako impedance přírodního vedení - napájení, aby nedocházelo k nárůstu odraženého budícího výkonu. Pokud tato podmínka není splněna, je nutno provést tzv. impedanční přizpůsobení (různé typy a metody). Pokud je anténa v rezonanci, má vstupní impedance pouze reálnou složku.

vstupní činitel odrazu S_{11} : - tento parametr vyjadřuje vstupní činitel odrazu antény ρ ve formě zisku odraženého signálu v dB.

- vstupní činitel odrazu popisuje, jak dobře je anténa přizpůsobena.

V případě ideálního přizpůsobení by bylo ρ rovno nule a veškerá energie přenesená do antény by byla vyzařena nebo spotřebována na ztráty, a energie odražené vlny by tedy byla nulová. Vztah mezi S_{11} v dB a bezrozměrným činitelem odrazu ρ je dán vztahem (3)

$$\rho = 10^{\frac{S_{11}}{20}}. \quad (3)$$

Pro úplnost lze dodat, že impedanční přizpůsobení k napáječi je možné hodnotit podle velikosti poměru stojatých vln (PSV). Přičemž ideálně přizpůsobená anténa má hodnotu PSV rovnu jedné. Tato veličina je také známá pod anglickou zkratkou VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). Pro činitel odrazu ρ a VSWR pak platí vzájemný vztah

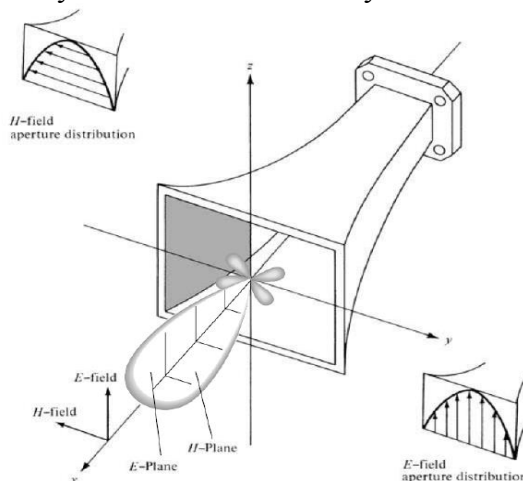
(4):

$$VSWR = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \quad (4)$$

polarizace vlny – vlna má dvě vektorové složky, a to vektor elektrické složky, který je kolmý na složku magnetického pole, což je složka druhá. Obě složky jsou v každém okamžiku na sebe navzájem kolmé, ale mohou se otáčet okolo vektoru šíření. Polarizaci vlny udává průmět trajektorie koncového bodu elektrické složky do roviny kolmé na šíření vlny. Typická polarizace vln generovaných anténami je polarizace lineární a kruhová.

směrovost antény (směrová charakteristika) – je schopnost antény vyzařovat / přijímat elektromagnetické vlny v požadovaném směru

- vyjadřuje se pomocí takzvaných vyzařovacích charakteristik 2D v rovině E a H, což je znázorněno na obrázku Obr. 2, či pomocí 3D vyzařovací charakteristiky



Obr. 2: Vyzařovací charakteristika [3]

Směrovost antény se posuzuje dle tzv. vyzařovacích charakteristik (viz Obr. 2). Vyzařovací charakteristiky se dělí na: vertikální a horizontální

vyzařovací úhel antény – tento úhel je dán tzv. směrovým diagramem

Vypočítává se jako rozdíl úhlů bodů, kde je pokles signálu o 3dB od požadované úrovně či maxima.

efektivní délka antény – efektivní délka antény představuje délku elementárního dipólu, který by vybudil ve směru kolmém na svou osu stejnou intenzitu pole jako příslušná anténa.

efektivní plocha antény A – je fiktivní plocha antény, ze které přijímací anténa získává výkon či kterou vysílací anténa vysílá výkon.

- pro všesměrovou anténu platí: $A = \frac{\lambda^2}{4\pi}$
- pro směrovou anténu platí: $A = G \frac{\lambda^2}{4\pi}$

součinitel směrovosti D – udává, kolikrát musíme zvýšit výkon vysílače při přechodu z

měřené antény (např. směrové) na referenční (všesměrovou), abychom dosáhli v libovolném místě příjmu stejné intenzity jako s anténou měřenou; souvisí přímo se ziskem antény

- Vyjadřuje schopnost antény vyzařovat v daném směru.

účinnost antény η - celková účinnost antény η bere v úvahu ztráty na jejím vstupu (kvůli impedančnímu nepřizpůsobení antény k napáječi) a uvnitř antény (vlivem konečné vodivosti kovů a ztrátám v dielektriku)

V okolí antény dále rozlišujeme zóny udávající charakter elektromagnetického pole:

- a) blízká reaktanční oblast – jedná se o zcela nejbližší kulové okolí antény
 - definováno poloměrem R_1 , kde $R_1 = (0,62 \cdot D^3)/\lambda$, kde λ je délka vlny a D je největší rozměr antény
 - v této oblasti je jalový výkon antény podstatně větší než činný výkon
- b) blízké pole – tzv. Fresnelova oblast
 - jedná se o kulovou oblast vymezenou výše zmíněným poloměrem R_1 až do vzdálenosti R_2 od antény
 - R_2 je definováno jako $R_2 = (2 \cdot D^2)/\lambda$, kde λ je opět délka vlny a D je největší rozměr antény
- c) vzdálené pole – tzv. Fraunhoferova oblast
 - je oblast vně koule o poloměru R_2 . Pokud $\lambda > D$, pak se předcházející vztah modifikuje na $R_2 = [(2 \cdot D^2)/\lambda] + \lambda$
 - Pole je v této oblasti již příčné, tj. jeho složky jsou kolmé na směr šíření. Radiální složky pole jsou zanedbatelné. V této oblasti je úhlová rozložení pole v podstatě nezávislé na vzdálenosti od antény.

3 ANTÉNY PRO PÁSMO VHF A UHF

Názvům pásem VHF a UHF odpovídá český ekvivalent VKV a UKV.

Pro zpřesnění:

VHF (Very High Frequency) – VKV (Velmi Krátké Vlny) – 30 až 300 MHz
- tomu odpovídající jsou vlny o metrové vlnové délce

UHF (Ultra High Frequency) – UKV (Ultra Krátké Vlny) – 0,3 až 3 GHz
- tomu odpovídající jsou vlny o decimetrové vlnové délce

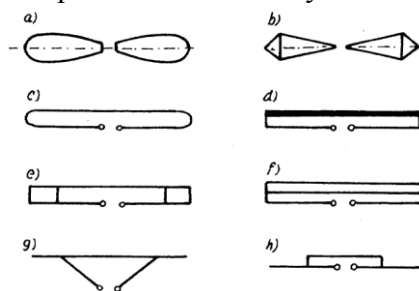
Dominantní mechanismus šíření těchto vln je šíření prostorovou nebo přímou vlnou.

Pro tato pásma existují antény směrové i všesměrové, úzkopásmové i širokopásmové.

3.1 Dipólová anténa a její varianty

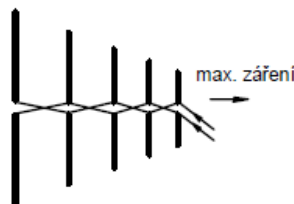
- ❖ Dipól a jeho varianty. Jedná se jednoduchou a levnou anténu. Používá se také ve víceprvkovém provedení; může pak pracovat v širším frekvenčním pásmu. Směrová charakteristika dipólu je směrová - směřuje do předepsaného směru. Činitel směrovosti dipólu $D \approx 6$ (absolutní zisk okolo 8 dB). Dipól tedy není anténou s velkým ziskem. [5]

Na Obr. 3. jsou pro snazší představu zobrazeny některé typy dipólů.



Obr. 3: Varianty dipólů: a, b) tlusté dipóly, c, d, e, f) skládané dipóly, g) bočníkové napájení, h) dipól s bočnickem [3]

- ❖ Synfázní řadové soustavy
- ❖ Úhlový reflektor
- ❖ Yagiho anténa
- ❖ Logaritmicko periodická anténa (zobrazena na Obr. 4)



Obr. 4: Logaritmicko periodická anténa [5]

- ❖ Šroubovicová anténa: šířka pásma cca 1:2

Vlastností všech výše zmíněných typů antén je buď jejich vysoká směrovost, či se jedná o antény prostorné a rozměrné, což je pro naše potřeby nevýhodou. Nebo se jedná o antény s malým ziskem.

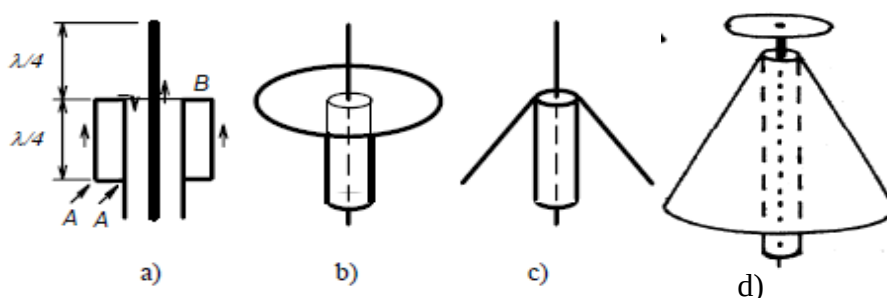
3.2 Antény VHF, UHF s radiálním vyzařováním

3.2.1 S vertikální polarizací:

Vertikální symetrický dipól má všesměrové vyzařování v horizontální rovině (vertikální polarizace). Z důvodu jeho snadnější instalace na stožár a jeho napájení zdola koaxiálním vedením, je zapotřebí upravit jeho konstrukci. [5]

Na Obr. 5 jsou zobrazeny základní antény s vertikální polarizací. Na Obr. 5a) je nakreslen řez uspořádání rukávového dipólu. Napájecí kabel je veden vnitřkem nosného stožáru a na horní rameno dipólu je připojen jeho střední vodič. Druhé rameno dipólu je tvořeno vnějším povrchem trubky většího průměru, která je převlečena přes stožár. Délka trubky je $\lambda/4$ a nahoře je spojena s pláštěm kabelu a její spodní konec je *vysokofrekvenčně izolován* od nosné konstrukce. Pro vysokofrekvenční proudy je spojení na zem možné pouze po vnitřních površích koaxiální dutiny mezi body A-A. Dutina je na konci (nahoře) takzvaně nakrátko a má délku $\lambda/4$. Je tedy v paralelní rezonanci a mezi body A-A je velká impedance. Pro nežádoucí plášťové proudy je spojení se zemí prakticky přerušeno a je takto zajištěna symetrizace dipólu.

Všesměrové vyzařování v horizontální rovině má také nesymetrická anténa (monopól) s umělou zemí (Obr. 5b,c). Umělá země se nahrazuje několika radiálními vodiči, které mohou být skloněné dolů.



Obr. 5: Typy antén s všesměrovým vyzařováním - horizontální polarizace [5]

a) rukávový dipól b), c) monopóly s umělou zemí d) diskonusová anténa – širokopásmová anténa

Pro nás již zajímavějším typem antény je anténa na Obr. 5d. Jedná se o diskonusovou anténu, která svými potřebnými rozměry již není příliš prostorově náročná. Její umělá země je sklopena do tvaru kuželu, vertikální vodič je velmi krátký a je doplněn kapacitní zátěží. Jedná se o poměrně širokopásmovou anténu.

Kapacitní zátěž je prvek, který slouží k uzpůsobení antény tak, že se celý výkon přenáší mezi zdrojem a spotřebičem tam a zpět a žádná energie se nespotřebovává. Má vliv na fázový posuv - podle toho, zda má zátěž indukční nebo kapacitní charakter je tedy fázový posuv kladný nebo záporný. [5]

3.2.2 S horizontální polarizací:

Další skupinou antén s všesměrovým vyzařováním jsou antény s horizontální polarizací. Některé typy těchto antén jsou zobrazeny na Obr. 6.

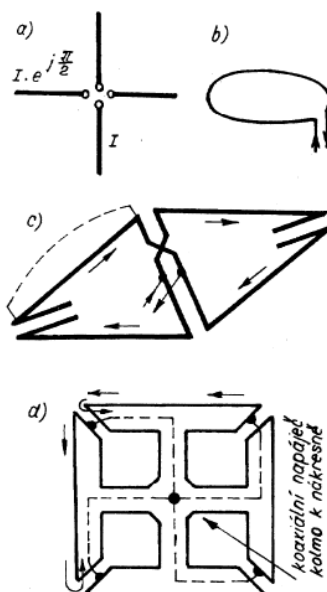
Tento typ je odvozen od horizontální smyčky (Obr. 6b) Takováto smyčka září v horizontální rovině, pokud má po obvodu všude stejný proud. To lze splnit, je-li obvod krátký vůči délce vlny, ale pak má smyčka malý odpor záření a tudíž i malou

účinnost.

Z výše uvedených vlastností vyplývá, že tyto typy antén jsou sice všesměrové a kompaktní, ovšem jejich šířka pásma a účinnost jsou nedostačující.

Všesměrové vyzařování vlny s horizontální polarizací umožňuje turniketová anténa, nakreslená na Obr. 6a (pohled shora). Jsou to dva k sobě kolmé horizontální dipóly buzené tak, že proudy v nich jsou vzájemně fázově posunuty o $\pi/2$. [5]

Dalšími typy antén jsou již zmíněná horizontální smyčka (Obr. 6b), alfredova anténa (Obr. 6c) a souosá smyčka (Obr. 6d).



Obr. 6: Typy antén s všesměrovým vyzařováním - vertikální polarizace [3]

4 SYMETRIZACE – SYMETRIZAČNÍ OBVODY

Většina antén používaných v pásmu VKV jsou antény symetrické. Pro napájení je však vhodné používat koaxiální (nesymetrické) vedení. Z toho důvodu je nutné vložit mezi anténu a napájecí vedení symetrizační obvod, který nedostatek nesymetrického napájení kompenzuje. Některé antény však díky svému konstrukčnímu řešení symetrizační obvod nepotřebují, jedná se například o rukávový dipól.

Symetrizační obvod způsobí zastavení průtoku asymetrického proudu po vnějším povrchu pláště vedení. Tři nejčastější typy používaných symetrizačních obvodů jsou zobrazeny na Obr. 7.

Symetrizace rukávem (Obr. 7a) využívá stejného principu jako rukávový dipól. Rukáv, který je tvořen trubkou většího průměru, je převlečen přes plášť napájecího kabelu a je dole vodivě spojen s jeho vnějším povrchem. Toto provedení spolu s vnějším povrchem pláště a s vnitřním povrchem rukávu tvoří koaxiální vedení, které je dole nakrátko. Bude-li délka takto vzniklého vedení $\lambda/4$, dosáhneme paralelní rezonance a mezi body A-A bude velká impedance.

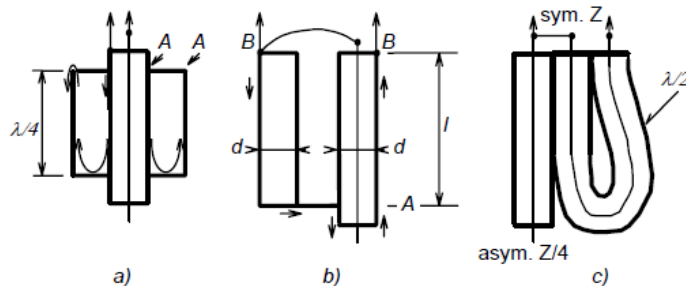
V důsledku vyhraněného povrchového jevu nemůže vysokofrekvenční proud téci napříč materiálem [5], proto asymetrický proud teče z levé svorky na vnější povrch pláště a dál směrem na zem teče už jen po vnitřním povrchu rukávu, přičemž velká impedance mezi body A-A tento proud omezí na minimum.

Symetrizace pahýlem (Obr. 7b) pomocí kompenzace vyloučí asymetrický proud. Jak je vidět na Obr. 7b, cesta na zem vede po vnějším povrchu pláště z obou svorek symetrické zátěže B-B. Proud, který takto vzniknou, jsou vyvolány napětími opačné polarity, jsou tedy protisměrné a vzájemným působením v bodě A se směrem k zemi navzájem zruší.

Z hlediska symetrizačního účinku je délka pahýlu l libovolná. Ovšem aby symetrizační obvod nezatěžoval napáječ, musí být mezi body B-B velká impedance [5]. To je splněno v případě, když $l = \lambda/4$, poté je obvod tvořený vnějším povrchem pláště a pomocnou trubkou v paralelní rezonanci.

Symetrizace půlvlnou smyčkou znázorňuje obrázek Obr. 7c. Tento obvod je řešen tak, že obě ramena symetrické zátěže jsou připojena na střední vodič napájecího kabelu a vzniklá půlvlnná smyčka působí jako fázový invertor. Z logiky věci i z obrázku vyplývá, že proudy svorkami zátěže jsou tedy protisměrné (což je správně).

Tento způsob připojení obou "polovin" zátěže způsobí, že obvod mimo symetrizace napáječe také transformuje impedanci. Budeme-li uvažovat impedanci zátěže Z sériovým spojením impedancí $Z/2$ obou ramen, ke koaxiálnímu vedení budou obě ramena připojena paralelně, tudíž napájecí kabel bude zatěžován impedancí pouze $Z/4$. [5]



Obr. 7: Symetrizační obvody – symetrizace: rukávem (a), pahýlem (b), půlvlnnou smyčkou (c) [5]

Ferity - Další možností potlačení plášťových proudů je použití feritů, nejčastěji ve formě feritových kroužků. Nejznámější využití feritových kroužků na potlačení asymetrických proudů je u napájecích adaptérů pro notebooky, monitory, atd. Pro vyšší frekvence se vlastnosti feritů mění, zejména záleží na jejich permitivitě (nejčastěji $\epsilon_r = 10 \div 20$). Ferity jsou vhodné pro širokopásmové aplikace [20].

5 ŠIROKOPÁSMOVÉ ANTÉNY

Pracovní šířku pásma pro daný typ antény je možné zvětšit pomocí různých technik.

Např. obyčejné dipólové antény mají při přísnějších požadavcích šířku pásma pouze v řádu jednotek procent, která může být rozšířena zvětšením tloušťky vodičů a použitím kompenzačních obvodů – lze tak dosáhnout šířky pásma v řádu desítek procent.

Antény typu: kosočtverečná anténa, Yagiho anténa, Logaritmicko periodická anténa jsou příliš velké či směrové a tudíž nesplňují požadavek kompaktnosti, všesměrovosti.

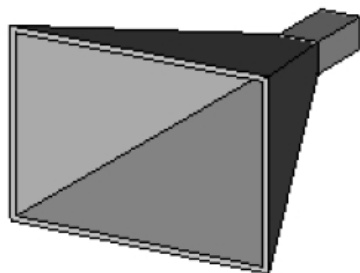
5.1 Trychtýřové antény a trychtýřové antény s vloženým žebrem

Trychtýřové antény a jejich modifikace vložením žeber do jejich ústí jsou vlastně antény vzniklé rozšířením ústí vlnovodu. Rozložení intenzity v ústí trychtýře se přibližně shoduje s rozložením ve vlnovodu a to není z hlediska požadovaného použití optimální z hlediska záření.

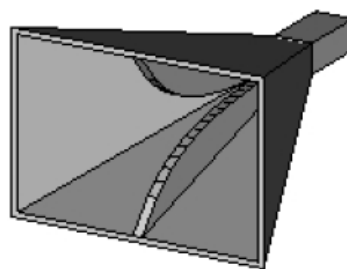
Aby nedošlo k nežádoucí deformaci hlavního laloku směrové charakteristiky, nesmí se trychtýř rozšiřovat příliš "zprudka". To v praxi znamená, že trychtýř s přijatelnou délkou má poměrně malé ústí (několik vlnových délek) [5].

Tento typ antény má malý zisk a jeho charakteristika široký hlavní lalok. Lepší parametry vyžadují větší ústí a úměrně tomu i délku trychtýře, která je většinou pro praxi neúnosná (až několik tisíc vlnových délek). Proto se trychtýřové antény používají hlavně tam, kde jejich malý zisk stačí a kde se uplatní jejich konstrukční jednoduchost a tedy i nízká cena. Často se s nimi setkáme jako s primárními zářiči v ohnisku reflektorových antén. [5]

Klasická trychtýřová anténa je zobrazena na Obr. 8. Jedná se o trychtýřovou anténu na bázi obdélníkového vlnovodu. Její teoretická šířka pásma je 2:1. [6] Pro rozšíření pracovního pásma takové antény je možné vložit do ní žebra (viz Obr. 9) a tím přidat do vlnovodu kapacitní susceptanci a tak snížit mezní frekvenci dominantního vidu, čímž rozšíříme pracovní pásmo vlnovodu. Takovou úpravou je možné docílit šířky pásma antény více než 10:1. [6]



Obr. 8: trychtýřová anténa



Obr. 9: trychtýřová anténa s vloženým žebrem

Tento typ trychtýřové antény s vloženým žebrem by byl vhodný, jenže jak je zmíněno již výše, tento typ nevyhovuje svými vyzařovacími vlastnostmi. Jedná se o anténu se směrovou vyzařovací charakteristikou, a to od ústí apertury dále v ose vlnovodu (viz Obr. 1).

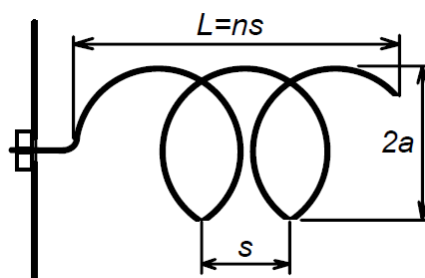
5.2 Šroubovicová anténa

Šroubovicová anténa patří mezi širokopásmové antény, ale její teoretická šířka pásma je 1:2 [7].

Na Obr. 10 je šroubovicová anténa nakreslena. Tvoří ji několik závitů šroubovice, buzené nesymetricky vůči kovové desce (reflektoru). Je-li obvod jednoho závitu přibližně roven délce vlny, pak hlavní lalok charakteristiky směřuje od reflektoru ve směru podélné osy a vstupní impedance je reálná, asi 140 ohmů. Anténa budí kruhově polarizovanou vlnu [5].

Důležité je, že hustotou závitů (úhlem stoupání) lze ovlivňovat směr vyzařování - pro úhel stoupání cca 14 stupňů anténa vyzařuje ve směru osy šroubovice, zatímco pro malé úhly stoupání vyzařuje do stran, podobně jako dipól.

Jedná se tedy o směrovou anténu, pro požadované použití tedy nevhodnou.



Obr. 10: šroubovicová anténa

5.3 Planární typy UWB antén

Planární antény mají jak výhody, tak jisté nevýhody, nejvíce však záleží na tom, pro jaký účel chceme anténu použít. Mikropáskové antény jsou oproti běžným (např. drátovým) rozměrově menší (nízký profil) a jsou i lehčí. Při výrobě je možné použít zavedenou technologii na vytváření plošných spojů, proto je výroba poměrně levná. Vyleptání antény je možné přímo na plošný spoj společně s vysokofrekvenčním obvodem, což je ekonomicky výhodné. Používají se v řádu stovek megahertzů až desítek gigahertzů. Další výhodou je fakt, že po úpravách struktury některých částí antény můžeme dosáhnout i extrémních šířek pásma (viz níže).

Nevýhodou těchto typů antén je nízký zisk, nízká výkonová zatížitelnost. Nízký zisk je dán faktem, že ve většině případů září do prostoru jedné poloviny.

Vlastnost, kdy planární typy antén vyzařují pouze do jedné poloviny, by bylo možné obejít dvěma totožnými anténami obrácenými zády k sobě, stále zde ale zůstává nedostatek ohledně nízkého zisku.

5.3.1 UWB antény určené úhly:

UWB (Ultra wideband = extrémní šířka pásma) antény určené úhly, vychází z předpokladu, že tvar antény je určen úhly. Vzhledem k tomu, že vlastnosti antény závisí na poměru rozměrů k délce vlny, je možné zbavit se frekvenční závislosti tím,

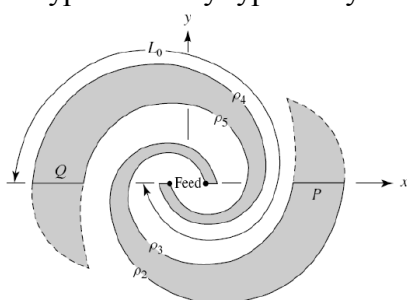
že tvar antény nebude určen délkovými rozměry, ale pouze úhly – jedná se o tzv. samokomplementární strukturu, to znamená, že jejich geometrický tvar je popsán jen úhly. Dosahují šířek pásma 1:40 až 1:1000 [10].

Při neomezené délce těchto antén by měly mít neomezenou šířku pásma. Délka antén nemůže být neomezená, proto je nutné délky ramen pro dané frekvenční pásmo vhodně ukončit (omezit).

Spirálová anténa (planární)

Geometrie planární spirálové antény je popsána svými úhly (Obr. 11). Její nejnižší pracovní frekvence závisí na délce ramen, tj. délka ramene by měla být srovnatelná s délkou vlny na nejnižší pracovní frekvenci frekvenčního pásma. Kdežto nejvyšší pracovní frekvence závisí na provedení antény ve středu spirály, tj. v místě napájení. V pracovním pásmu má anténa vstupní impedanci a vyzařovací diagram téměř nezávislý na pracovní frekvenci.

Jak vypadá takový typ antény v reálném provedení je zobrazeno na Obr. 12.

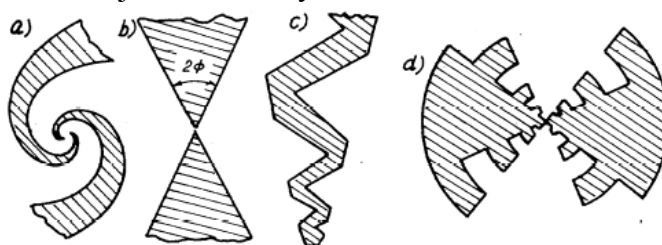


Obr. 11: Spirálová anténa [4]



Obr. 12: Realizace spirálové antény [4]

Další příklady UWB antén jsou zobrazeny na Obr. 13.



Obr. 13: Typy planárních UWB antén: a) rovnoúhlá spirála, b) za předpokladu neomezené délky je určena pouze úhlem Φ , c) anténa s tvarovou úpravou s příčnými elementy, d) anténa s kombinací vlastností [4]

5.3.2 Duální UWB antény:

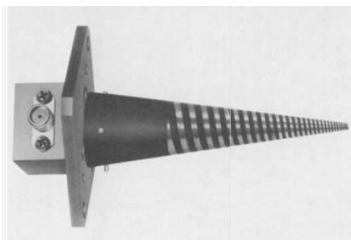
Duální UWB antény využívají vlastností komplementárních, konkrétně jejich duality. Jedná se o komplementární dvojici antén, u nichž je plocha zabraná vodičem u jedné antény totožná s tvarem i rozměry s plochou vyříznutou (s volnou plochou) z vodiče antény druhé. Příkladem komplementární dvojice je páskový dipól a protáhlá štěrbina vyříznutá v nekonečně rozlehlé vodivé desce.

5.4 Kónicko-logaritmická anténa

Anténa kónicko-logaritmická, nebo také anténa logaritmická spirálová kuželová, vznikne rozšíření spirálové antény o jeden rozměr. Skládá se tedy ze dvou plechů stočených na plochu kužele. Dosáhne se tak větší zisk a větší šířka pásma [10].

Vyzařovací maximum této antény se nachází nad vrcholem kužele, přičemž směr vyzařování antény je dán směrem její osy. Jedná se tedy o směrovou anténu.

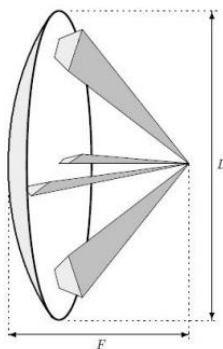
Provedení takové antény je zobrazeno na Obr. 14 (převzato z [10]).



Obr. 14: Kónická logaritmická anténa

5.5 Parabolická impulzní anténa

Parabolická impulzní anténa je jistou modifikací klasické parabolické antény. Jedná se o širokopásmovou směrovou anténu [17], která se používá k vysílání impulzních signálů. Vzhled tohoto typu antény a její geometrie je zobrazena na Obr. 15. Anténa je definována zejména parametry F , což je ohnisková vzdálenost a parametrem D , což je průměr reflektoru [17].



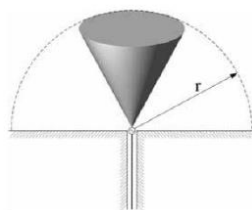
Obr. 15: Parabolická impulzní anténa [17]

Tato anténa odráží přijímaný signál do svého ohniska. Čím větší je plocha paraboly, tím silnější bude signál v jejím ohnisku. Díky tomu může dosahovat většího zisku, roste tím ale její směrovost a tím i nároky na přesné nastavení. Vhodná volba velikosti antény závisí na EIRP a energetických zónách (vyzařovací diagram zdroje signálu, který chceme přijímat).

EIRP (anglicky = equivalent isotropically radiated power), česky ekvivalentní izotropně vyzářený výkon je celkový výkon, který by bylo nutné vyzářit izotropní anténou (které vyzařuje do všech směrů prostoru stejně), aby bylo v daném směru dosaženo jisté intenzity záření. Používá se k vyjádření intenzity rádiového záření vysílaného směrem, kterým je anténa (typicky směrová) namířena.

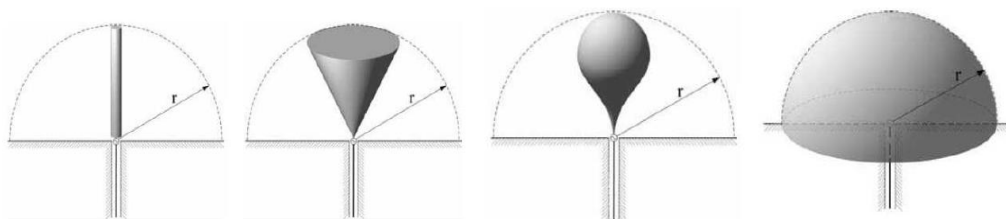
5.6 Kónický monopol

Kónická anténa (monopól) vznikne spojením kónusu, tj. kužele s nekonečně rozlehlou zemí. V praxi ale nekonečně rozlehlá zem není možná, proto je omezena na desku o min. průměru jako výška kužele (Obr. 16). Dosahuje šířky pásma 1:10.



Obr. 16: Kónický monopól [4]

Na Obr. 17 jsou zobrazeny další monopólové antény:

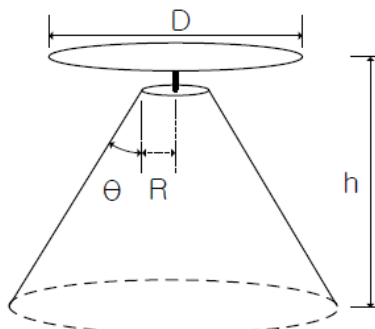


Obr. 17: Monopólové antény: zleva doprava: monopól, kónická ant., zúžená ant., polokulová ant. [4]

Klasický monopól je nevhodný svou šířkou pásma. Zúžená a polokulová anténa jsou pro aplikaci nevýhodné svými geometrickými rozměry a tvarem komplikujícím výrobu.

Omezení dolního limitu šířky pásma antény je v důsledku konečné délky kužele a na horní hranici šířky pásma má vliv poloměr R kužele, kdy R (Obr. 18) je poloměr bočního řezu užší části většího kužele [14].

Velikost zemního disku může být dalším faktorem změny impedance, ale není kritická, pokud je velikost disku D (Obr. 18) dostatečně velká.

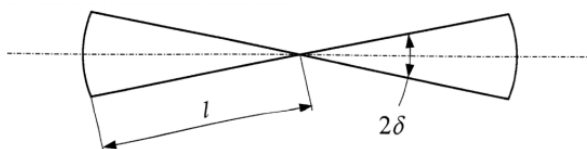


Obr. 18: Diskónická anténa [13]

5.7 Bikónická anténa

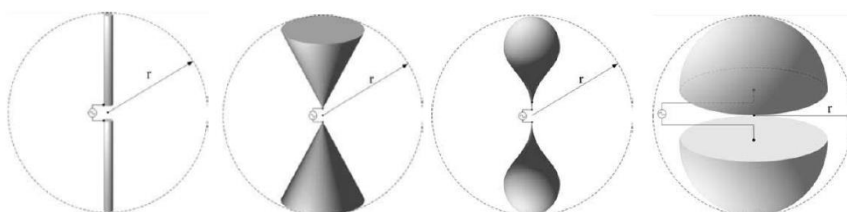
Bikónická anténa je anténa kónická, doplněná o svůj zrcadlový protějšek. Jedná se o anténu dipólového typu se šířkou pásma dosahující až 1:20 [10]

Tato anténa, rovněž nazývaná kuželovým dipólem, je (jak název vypovídá) složena ze dvou souměrných kuželů, jejichž vrcholy jsou umístěny proti sobě. Toto lze pozorovat na Obr. 19, kde l je délka kuželů na povrchu a 2δ je úhel, který svírají stěny kužele. V závislosti na délce l , vzhledem k vlnové délce λ , se rozlišují různé druhy této antény. Platí-li vztah $l \gg \lambda$ a je-li úhel $\delta \approx 45^\circ$, tak se tato anténa nazývá trychtýřovou dvoukuželovou. Pokud platí, že $l \ll \lambda$ a je-li úhel $\delta > 5^\circ$, hovoří se při symetrickém tvaru o kuželovém dipólu. [12]



Obr. 19: Bikónická anténa (kuželový dipól) [12].

Různé typy dipólových antén podobných anténě bikónické jsou na Obr. 20.

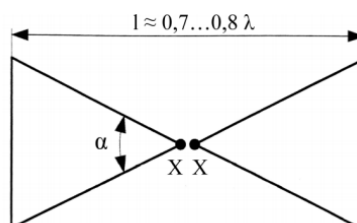


Obr. 20: Dipólové antény: zleva doprava: klasický dipól, bikónická ant., zúžená ant., polokulová ant. [4]

Klasický dipól je nevhodný svou šířkou pásma, **bikónická anténa** se jeví jako vhodný kandidát pro zamýšlené použití, zúžená anténa není vhodná z hlediska svých geometrických rozměrů pro náročnost výroby, taktéž jako anténa polokulová.

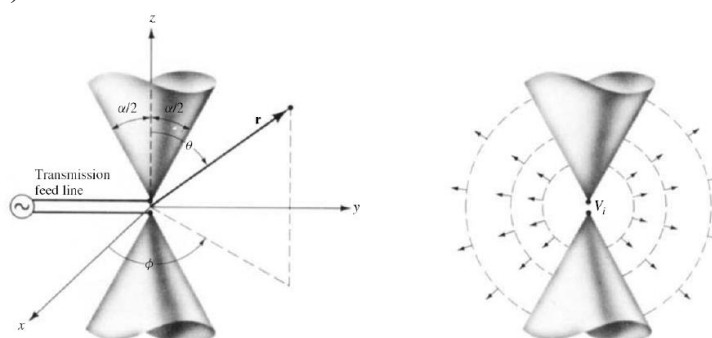
Tak jako monopólové verze těchto antén, tak i tyto antény lze konstruovat pomocí geometrických aproximací.

Dále existuje plochý, neboli trojúhelníkový dipól (angl. fan dipol či bow-tie antenna), který tvoří tzv. přibližně celovlnný dipól a skládá se z plochých trojúhelníkových vodičů mající shodný vrcholový úhel a jejichž souměrné napájení je realizováno v místech jejich vrcholů (body X) – viz Obr. 21.



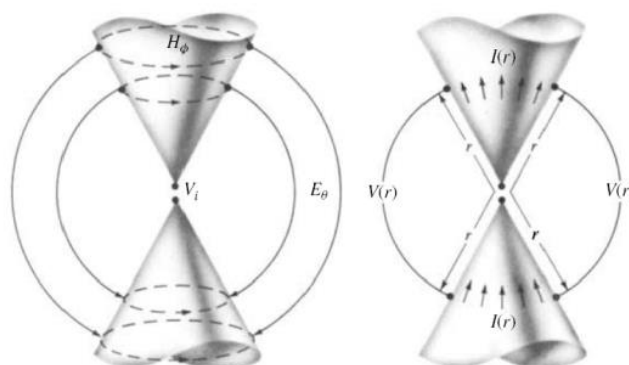
Obr. 21: Bikónická anténa (trojúhelníkový dipól) [12]

Vyzařovací bikónické antény (Obr. 22 vpravo) pro $L < l$ je velmi podobný vyzařovacímu diagramu symetrickému monopólu, kde L je délka antény a l je délka vlny (vlnová délka).



Obr. 22: Bikónická anténa vlevo a její vyzařování (kulové vlny) vpravo [16]

Na Obr. 23 vlevo je dále zobrazeno rozložení elektrického a magnetického pole bikónické antény. A na Obr. 23 vpravo je znázorněno rozložení napětí a proudu na bikónické anténě. Přičemž napětí a proud zde mají anglické označení, tedy proud – I a napětí – V .



Obr. 23: Bikónická anténa: elektrické pole E a magnetické pole H (vlevo), napětí a proud na bikónické anténě (vpravo; proud – I , napětí – V) [16]

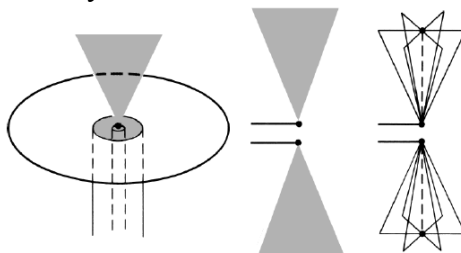
Vstupní impedance bikónické antény nekonečné délky umístěné ve volném prostoru je [11]:

$$Z_{vst} = 120 \ln[\cotg(\alpha/4)] \quad (5)$$

Ze vzorce (5) vyplývá, že vstupní impedance je funkcí úhlu kužele. Širokopásmové vlastnosti antény mohou být získány, pokud úhel α (na Obr. 22 vlevo) leží mezi 60° a 120° [11].

Nevýhodou kónických a bikónických antén je poměrně rozměrná 3D konstrukce, která často omezuje či nedovolí jejich praktickému použití, proto se někdy používají jejich geometrické aproximace, ty vykazují velmi podobné chování, jen jsou méně širokopásmové.

Příklady geometrických aproximací, jako například trojúhelníkový list, motýlek a drátová aproximace jsou zobrazeny na Obr. 24.



Obr. 24: Aproximace kónické antény: zleva doprava: trojúhelníkový list, motýlek a drátová aproximace bikónické antény [4]

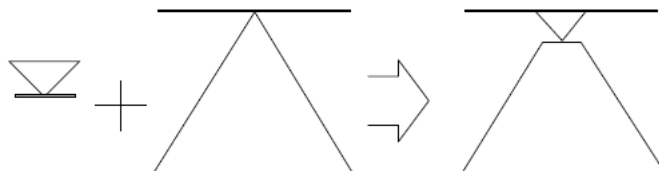
Přesto jsou ale rozměry těchto antény ve srovnání s anténami vše zmíněnými o dost menší (nepočítáme-li antény planární).

5.8 Dvojitá diskónická anténa

Dvojitá diskónická anténa je typ antény vzniklý úpravou výše zmíněné bikónické antény. Tento typ antény se skládá ze dvou diskónických antén (viz Obr. 25), které mají dva rozdílné rozměry. Jedna malá diskónická anténa pokrývá vysokofrekvenční pásmo, druhá velká diskónická anténa pokrývá nízkofrekvenční rozsah. Jejich výchozí body jsou otočeny navzájem proti sobě.

Díky své konstrukci dosahuje dvojitá diskónická anténa značné šířky pásma a lze ji proto použít např. v aplikacích zaměřených na monitorování širokého radiového spektra [9].

Dle příslušné publikace [13] je její teoretický VSWR je menší než 2,5 v pásmu od 282 MHz do 8,93 GHz, čemuž odpovídá šířka pásma cca 30:1. To je mnohem lepší parametr, než u jakékoli jiné kónické antény stejné velikosti.



Obr. 25: Spojení dvou diskónických antén [13]

Bikónická anténa může vykazovat dobré vlastnosti v nízkofrekvenčním pásmu pouze v případě, že její výška je dostatečná. Ale šířka pásma bikónické antény je omezena vysokofrekvenční oblastí, kvůli konstrukčním problémům fyzické realizace a podpory antény, tak jako realizace konstrukce napájení [13]. Vlastnosti širokopásmových všesměrových antén se zkoumají pomocí bikónických antén [13], ale problémem je zde v konstrukčních rozměrech bikónických antén.

Např. při testování, širokopásmové všesměrové antény mající šířku pásma od 0.5 GHz do 18 GHz by výška měla být asi 600 mm ($1/2$ vlnové délky). Kvůli tomu je provozní frekvence nižší, protože realizace takové antény je obtížnější.

Diskónická anténa má výhodu v tom, že může snížit svůj rozměr na délku rovnou polovině délky bikónické antény (přibližně čtvrtina vlnové délky). Obecně diskónická anténa, která má konečný kužel (monokón), dosahuje poměr šířky pásma jen 10:1, protože konečný kužel způsobuje odraz proudu od základny kužele [13].

Dále bude v kapitolách zaměřeno na návrh a realizaci nového typu diskónické antény, a to dvojitě diskónické antény (angl. double discone antenna), která vykazuje velkou šířku pásma.

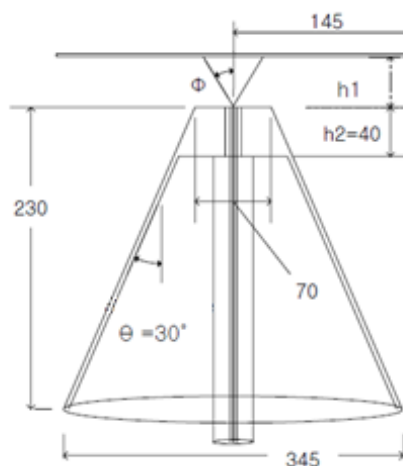
Z výše uvedených různých typů antén a jejich vlastností pro požadované parametry nejvíce vyhovuje anténa dvojitá diskónická anténa (double discone). Dvojitá diskónická má dle článku [13] lepší vyzařovací charakteristiku, proto je pro plánované využití nejvhodnější.

V dalších kapitole (kap.6) bude zaměřeno podrobněji na vlastnosti dvojitě diskónické antény, důležité parametry a její matematický návrh.

6 TEORETICKÝ NÁVRH DVOJITÉ DISKÓNICKÉ ANTÉNY

V této kapitole bude zaměřeno na návrh dvojité diskónické antény. Jak je vidět na Obr. 26, horní část kónického pláště diskónické antény by měla být zkrácena, z důvodu uchycení koaxiálního napájecího adaptéru. Mimo to je důležité, že poloměr řezu R (70 mm na Obr. 26) je nepřímo úměrný šířce frekvenčního pásma [13]. Z toho lze předpokládat, že druhá diskónická anténa bude mít vyšší frekvenční pásmo. Potom jsou obě antény sestaveny vzhůru nohama k sobě (viz Obr. 25 a Obr. 26).

Jelikož se jedná o anténu, pro niž nebyly k nalezení vhodné postupy návrhu geometrických rozměrů, budeme vycházet z prototypu antény, která je uvedena v odborném článku zabývajícím se konkrétní dvojitou diskónickou anténou [13]. Tato anténa pracující od frekvence 282 MHz a vykazující šířku pásma 30:1 byla navržena a optimalizována pomocí simulace. Pro novou navrhovanou anténu budeme vycházet z geometrických rozměrů prototypu uvedeného v [13]. Geometrie dvojité diskónické antény pro pásmo 282 MHz do 8.93 GHz je na Obr. 26 [13].



Obr. 26: Dvojitá diskónická anténa – geometrie [13]

Jak je vidět na Obr. 26, navrhovaná anténa se tedy skládá ze dvou rozdílně velkých diskónických antén. Velká diskónická anténa je navrhována tak, aby pokryla nižší frekvence – tj. stovky MHz až nízké jednotky GHz. Malá diskónická anténa je určena úhlem a výškou kónusu. Úhel, jak vyplývá z [13] pro malý kužel je doporučen 50° a výška 30 mm. Oba tyto parametry je třeba optimalizovat počítačovou simulací, aby bylo dosaženo pokrytí nejvyšších frekvencí.

Sklon kónusu velké antény je dle [13] 30° a doporučená výška asi $1/4$ vlnové délky, tu určíme pomocí vzorce (4):

$$\lambda = c / f, \quad (6)$$

kde λ je požadovaná vlnová délka, c je rychlost světla $3 \cdot 10^8$ a f je požadovaná frekvence.

Po dosazení pro dolní mez 200 MHz tedy dostáváme, že $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 200 \cdot 10^6$, vyjde nám vlnová délka $\lambda = 1,5$ m.

Výška tedy bude:

$$h_2 = \lambda / 4, \quad (7)$$

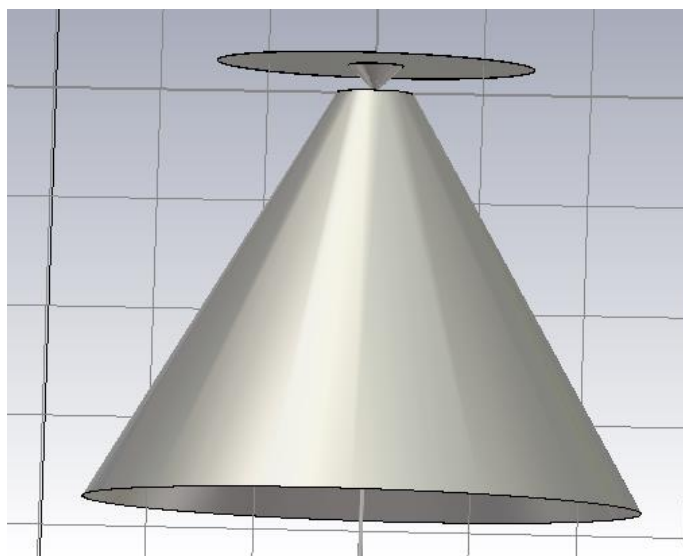
kde h_2 je výška kónusu velké antény. Po dosazení dostáváme, že $h_2 = 1\,500 \text{ mm} / 4 = 375 \text{ mm}$. Poloměry disků zůstanou v uvedených rozměrech.

7 NÁVRH DVOJITÉ DISKÓNICKÉ ANTÉNY

Skutečný návrh dvojité diskónické antény (dále jen antény) vychází z výše zmíněného prototypu a z dostupných doporučení zmíněných k této anténě.

K modelování fyzických rozměrů antény, jejich úpravu, simulování a měření vlastností antény, byl použit program CST STUDIO SUITE 2014 – CST MICROWAVE STUDIO 2014.

Nejprve byl nakreslen základní model s výchozími rozměry, vycházejících z části 7 – *Teoretický návrh dvojité diskónické antény*, který je zobrazen na Obr. 27.



Obr. 27: Dvojitá diskónická anténa – výchozí model

Tento model je specifikován základními parametry o výše zmíněných dimenzích, jedná se o:

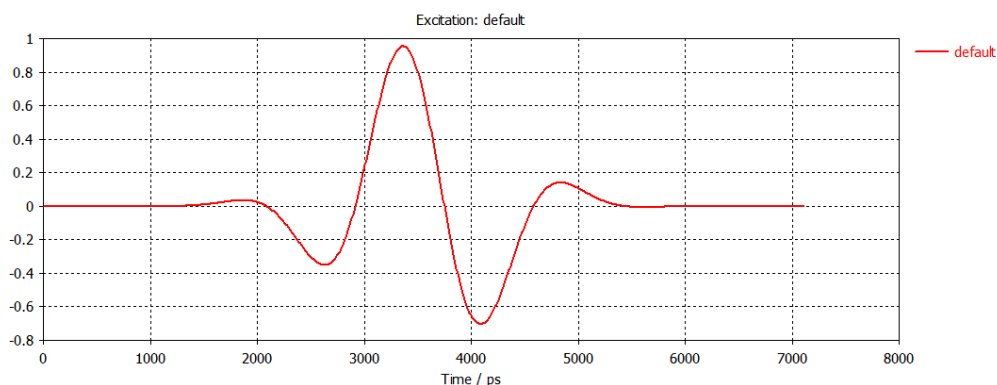
poloměr zemního disku	$rd = 145 \text{ mm}$,
poloměr podstavy malého kónusu	$rm = 25 \text{ mm}$,
výška malého kónusu	$hm = 25 \text{ mm}$,
poloměr podstavy velkého kónusu	$rv = 250 \text{ mm}$
(dopočteno dle doporučení na úhel 30°),	
výška velkého kónusu	$hv = 376 \text{ mm}$
(dle doporučení na $\frac{1}{4}$ vlnové délky),	
poloměr zakrácení velkého kužele	$ru = 35 \text{ mm}$,
tloušťka použitého materiálu	$t = 0,4 \text{ mm}$.

Jako materiál je uvažován materiál PEC z programu CST (dokonale vodivý materiál), v reálu bude materiálem pocínovaný plech. Tloušťka materiálu a materiál byly zvoleny po konzultaci s doc. Ing. Jaroslavem Láčíkem, Ph.D [19]. Jedná se o materiál a tloušťku, jejichž volba je vhodná pro zamýšlené frekvenční pásmo (200 MHz – 1 GHz) a zároveň vhodný pro prototypovou výrobu.

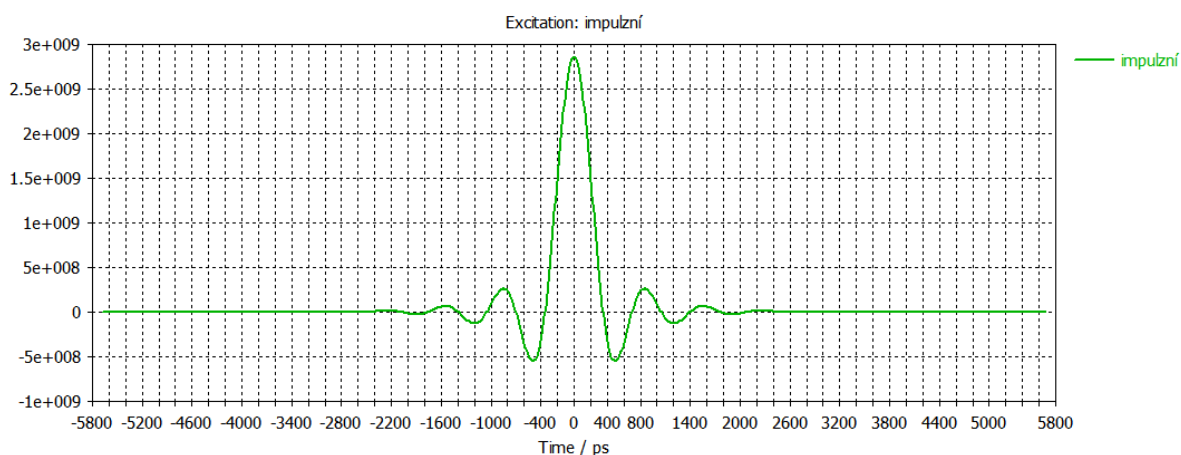
Buzení-napájení antény v programu je provedeno pomocí koaxiálního kabelu, jehož rozměry jsou voleny podle kabelu RG-58 (RG-40) a jsou následující: průměr středního vodiče 0,6 mm, průměr dielektrika 3 mm, vnější stínění (Al fólie + oplet z Cu

drátů) 0,1 mm, vnější průměr včetně PVC 4,95 mm. PVC při simulaci má na výsledek nulový vliv, proto z důvodu zkrácení doby simulací je simulováno pouze koaxiální buzení bez PVC.

Pro analýzu v časové oblasti je jako výchozí budící signál v programu nastaven univerzální opakující se impulz, který ale nemá charakteristiku námi požadovaného impulzního signálu. Proto bylo před dalším pokračováním zapotřebí vhodně nadefinovat nový budící signál. Ten byl zvolen jako impulzní signál s náběžnou hranou 300 ps. Původní signál je zobrazen na Obr. 28 a nový signál na Obr. 29.



Obr. 28: Původní budící signál



Obr. 29: Nový budící signál – impulzní

Zkoumanými vlastnostmi a parametry navrhované a modelované antény byly hlavně: charakteristika přijatého impulzního signálu, parametr S_{11} (vstupní činitel odrazu), hodnota impedance (reálné i imaginární části) antény v závislosti na frekvenci, výkon přijatý anténou, VSWR (česky PSV = poměr stojatých vln), směrová charakteristika a zisk antény.

Základní požadavky na optimalizovanou anténu jsou následující:

- ✓ nízké zkreslení přijatého impulzního signálu,
- ✓ S_{11} – menší než -10 dB,
- ✓ „stálá“ hodnota referenční impedance ($50\ \Omega$) v závislosti na frekvenci,
- ✓ nezáporný přijatý výkon,
- ✓ VSWR s poměrem lepším než 2 (výchozí prototyp má VSWR 2,5),

- ✓ široká vyzařovací charakteristika,
- ✓ zisk antény vyšší než 1,5 dB.

7.1 Vlastní návrh dvojité diskónické antény

Prvotní simulací bylo zjištěno, že počáteční hrubý model není dobře přizpůsoben a jeho vlastnosti nesplňují základní požadavky.

Za pomoci simulací byl posléze zkoumán vliv změn jednotlivých parametrů, jako jsou výšky jednotlivých kónusů a jejich poloměry, průměr disku a tloušťka materiálu na vlastnosti antény.

Simulacemi bylo zjištěno, že:

- výška velkého kónusu má zásadní vliv na šířku frekvenčního pásma. Čím větší je výška velkého kónusu, tím nižší je dolní hranice frekvenčního pásma antény. Nadměrná výška však zároveň způsobuje zhoršení VSWR.
- Poloměr podstavy velkého kónusu má vliv částečně na frekvenční pásmo, ale hlavně na VSWR a to tak, že zmenšením poloměru podstavy je možné zlepšit poměr VSWR. Nadměrné zmenšení má však negativní vliv na směrovost a zisk antény.
- U malého kónusu nebyla procentuální změna rozměrů příliš znatelná. Ale tendence změn parametrů byly shodné jako u změn u velkého kónusu. Zmenšením poloměru docházelo k drobnému zlepšení VSWR (na úkor směrovosti a zisku) a zvýšením výšky docházelo k posunu horní frekvenční hranice z šířky pásma antény směrem dolů.
- Tloušťka použitého materiálu (PEC/pocínovaný plech) ovlivňovala celkový zisk antény. Nejlépe zisk vychází pro tloušťku 0,4 mm.
- Velikost disku z důvodu omezení povrchových proudů a snížení VSWR, aby byl co největší, proto jeho poloměr je volen totožně s poloměrem podstavy velkého kónusu.

Výška má tedy zásadní vliv na pracovní šířku frekvenčního pásma (spojeno s vlnovou délkou), poloměr podstav má značný vliv na VSWR a vyzařovací charakteristiku (směrovost antény). Tloušťka materiálu antény na celkový zisk a velikost disku na povrchové proudy s VSWR.

Tato zjištění proběhla manuálně pomocí změn parametrů modelu antény v programu CST.

Na základě poznatku o vlivu těchto parametrů byla navržena a simulována modifikovaná anténa s potřebnými parametry tak, aby spodní pracovní frekvence byla 200 MHz.

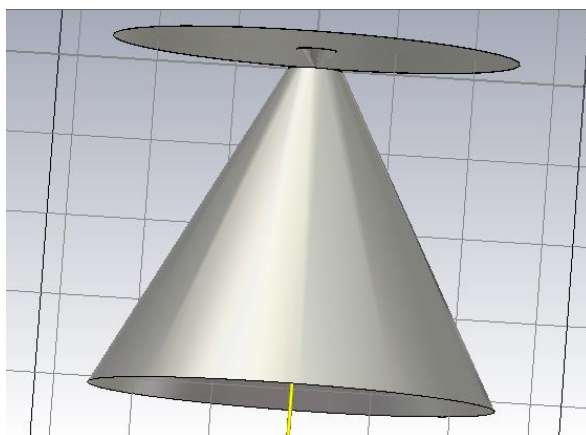
Optimalizace nových rozměrů antény bylo dosaženo pomocí integrovaného optimalizátoru v programu CST, kdy vstupními parametry byly geometrické rozměry antény (výšky, poloměry kónusů a poloměr disku), za současného přidání vnějších podmínek. Podmínkami byly co největší přijatý výkon antény (z generovaného budícího impulzního signálu) dále o co nejnižší poměr VSWR (s horní hranicí 2,5) a parametr S_{11} (s maximem -10 dB). Prvotní optimalizace proběhla manuálním hrubým zkoumáním rozptylu parametrů, pro jednotlivé rozměry a po zjištění vhodného rozptylu parametrů proběhla softwarová optimalizace. Dosažené výsledky byly tyto:

poloměr zemního disku

$rd = 255 \text{ mm},$

poloměr podstavy malého kónusu	$rm = 25 \text{ mm},$
výška malého kónusu	$hm = 25 \text{ mm},$
poloměr podstavy velkého kónusu	$rv = 255 \text{ mm}$
výška velkého kónusu	$hv = 375 \text{ mm}$
poloměr zakrácení velkého kužele	$ru = 35 \text{ mm},$
tloušťka použitého materiálu	$t = 0,4 \text{ mm}.$

Takto nově vzniklá anténa je zobrazena na Obr. 30.

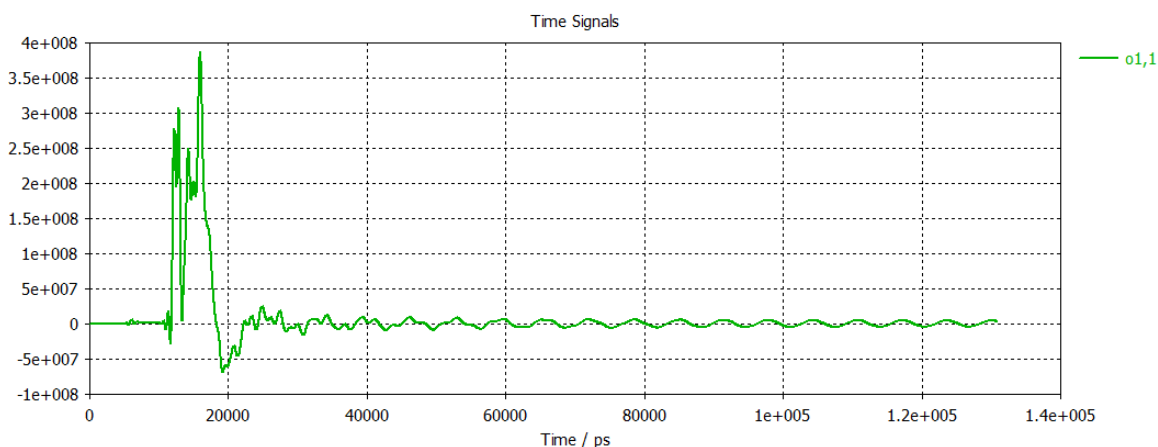


Obr. 30: Výsledná dvojité diskónická anténa

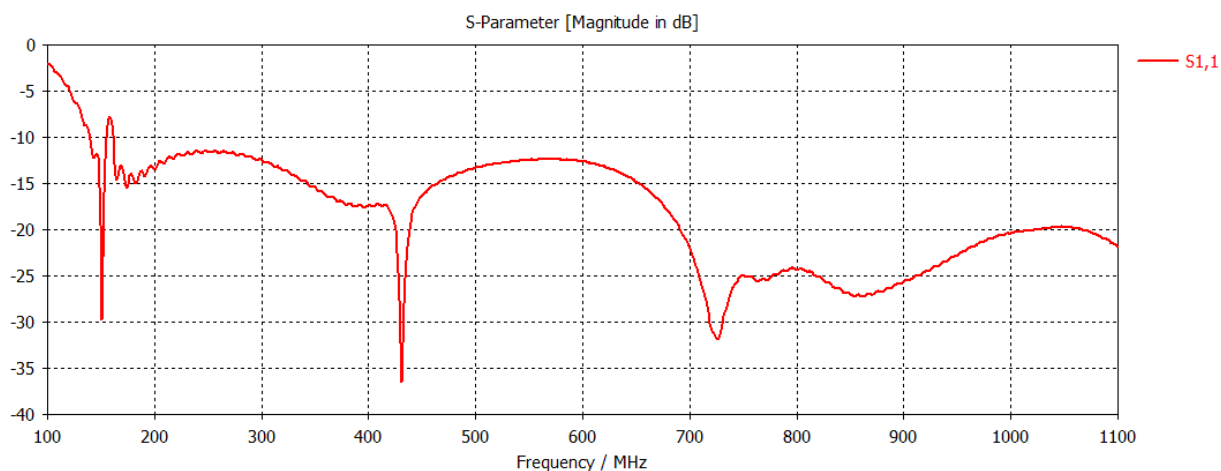
Tento nově vzniklý model antény byl simulován a změřen za použití simulace v časové oblasti (opět v programu CST).

Změřené vlastnosti této simulované antény v programu CST jsou vyobrazeny níže.

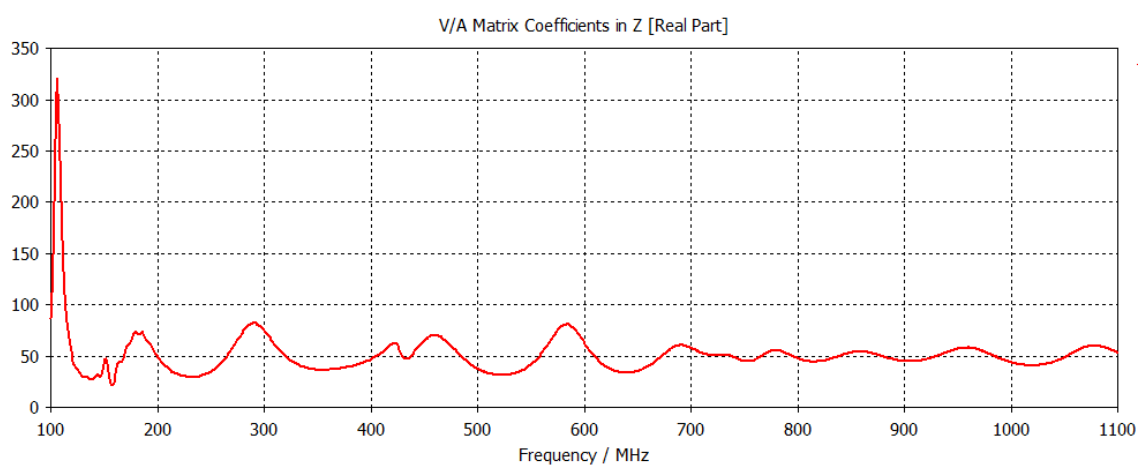
Na Obr. 31 je zobrazen příjem generovaného impulzního signálu anténou. Na Obr. 32 je znázorněn parametr S_{11} antény v závislosti na frekvenci. Dále na Obr. 33 je vidět závislost reálné části impedance antény na pracovní frekvenci a na Obr. 34 závislost její imaginární části impedance na frekvenci. Na Obr. 35 je vyobrazen celkový přijatý výkon anténou na základě buzení výše specifikovaným impulzním signálem. Další důležitý parametr VSWR je vidět v grafu na Obr. 36. A na závěr jsou na obrázcích Obr. 37, Obr. 38 a Obr. 39 zobrazeny polární grafy, na kterých lze vidět směrové charakteristiky antény a příslušný zisk na dané frekvenci, pro frekvence 200 MHz, 700 MHz a 1000 MHz. Pro všechny simulace byla anténa svisle s diskem nahoře.



Obr. 31: Charakteristika přijatého impulzního signálu

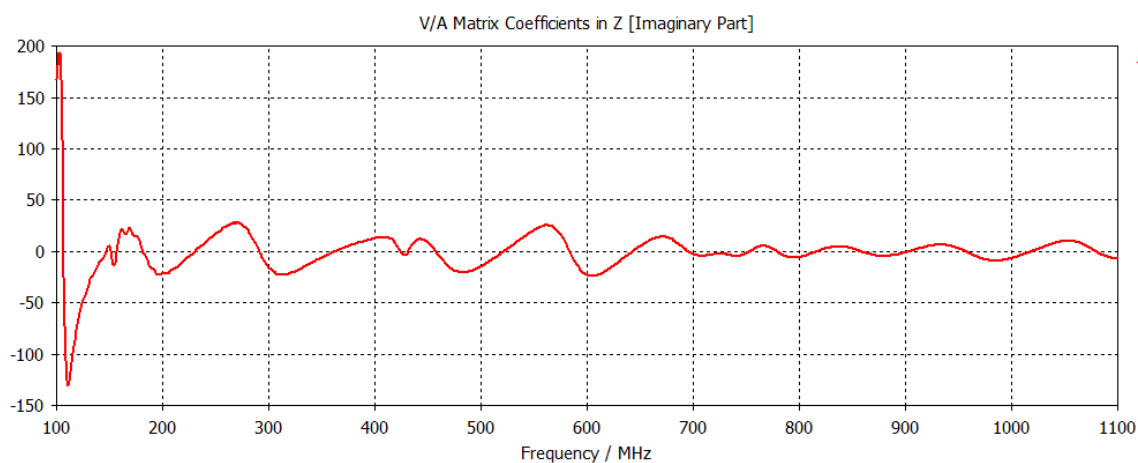


Obr. 32: Parametr S_{11} antény (vstupní činitel odrazu)

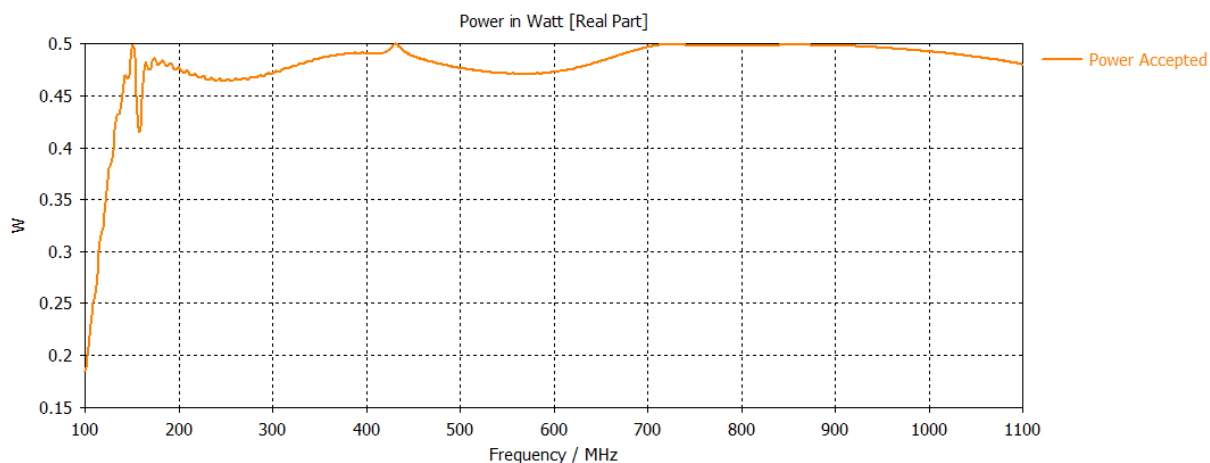


Obr. 33: Závislost reálné části impedance antény na frekvenci

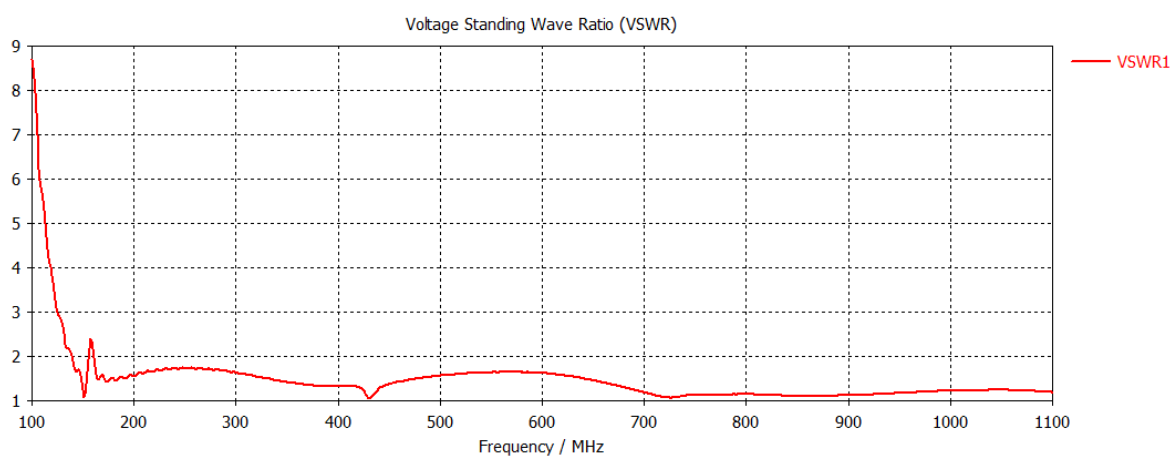
Jak je vidět na Obr. 33, tak impedance se pohybuje okolo 50Ω . Charakteristiky impedance reálných komponent (koaxiální kabel, koaxiální konektory) jsou uváděny s přesností $\pm 2\%$. Zjištěná odchylka v simulaci je $+25/-20 \Omega$.



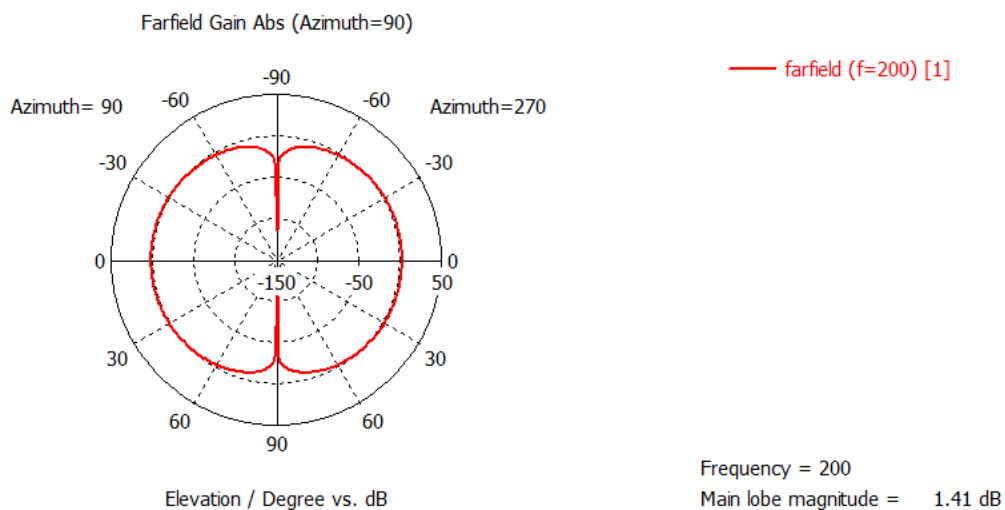
Obr. 34: Závislost imaginární části impedance antény na frekvenci



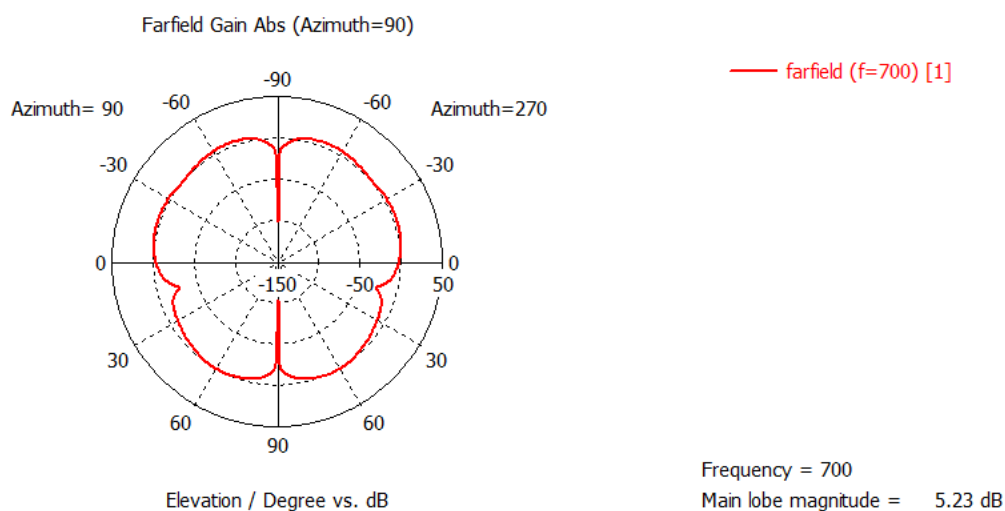
Obr. 35: Úroveň výkonu přijatého anténou



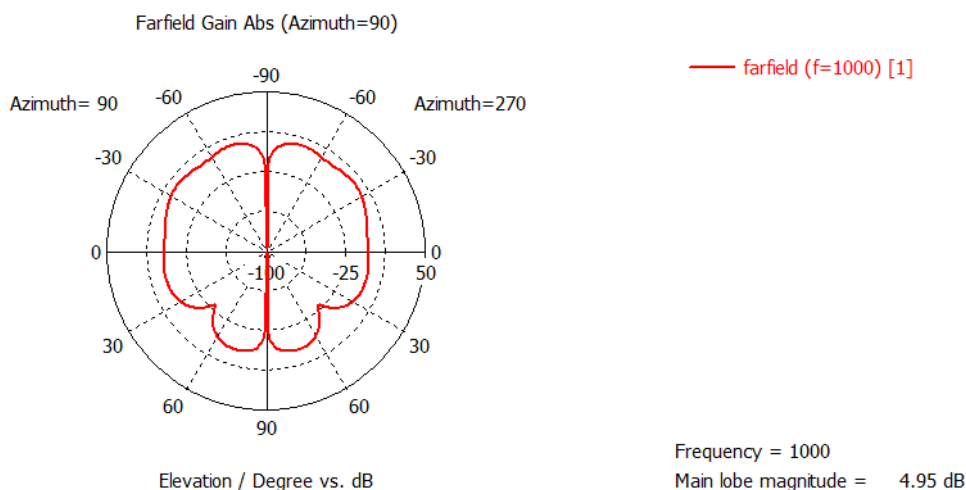
Obr. 36: VSWR (PSV) antény



Obr. 37: Polární graf - směrová charakteristika antény a příslušný zisk na frekvenci 200 MHz



Obr. 38: Polární graf - směrová charakteristika antény a příslušný zisk na frekvenci 700 MHz



Obr. 39: Polární graf - směrová charakteristika antény a příslušný zisk na frekvenci 1000 MHz

Souhrn zisku antény pro jednotlivé frekvence je zobrazen v Tab. 2.

Frekvence [MHz]	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Zisk [dB]	1,41	1,77	3,44	3,80	5,53	5,23	4,69	5,27	4,96

Tab. 2: Zisk antény od 200 MHz do 1GHz

Simulacemi získané teoretické údaje jsou velice příznivé. Jak charakter přijatého signálu, na kterém je zřetelně znát náběžná hrana impulzu, tak i přijatý výkon anténou. Co se týče zisku antény, ten je nižší pro nižší frekvence a spolu s frekvencí narůstá, vzhledem k tomu, že se ale jedná o všesměrovou anténu a tudíž má svůj celkový zisk rozprostřen ve všech směrech. Překvapivě málo vyšlo i VSWR, jehož hodnota se pohybuje do 1,9. VSWR pro výchozí anténu se přitom pohybuje až k hranici 2,5.

Přes uspokojivé výsledky, jsou rozměry antény dosti velké, proto je třeba přistoupit ke zmenšení rozměrů antény.

7.2 Zmenšení rozměrů dvojité diskónické antény

Jak je uvedeno v kapitole 8.1 (Vlastní návrh dvojité diskónické antény), tak takto by vypadala výsledná anténa a její charakteristika v případě, že by jedním z parametrů při realizaci nebyla i celková kompaktnost antény. Proto byly dále za pomoci parametrické analýzy v programu CST měněny největší rozměry antény s cílem zachování či minimálního zhoršení (případně i zlepšení) vlastností antény. Jednalo se hlavně o výšku a poloměr velkého kónusu s důrazem na výše uvedené a měřené parametry.

Bylo zjištěno, že velký kónus může být znatelně zúžen, za předpokladu drobného prodloužení jeho výšky. Posléze pomocí optimalizátoru v tomto programu (CST) byly detailně optimalizovány výsledné rozměry antény.

Bylo tak docíleno jejího značného zmenšení. Nové fyzické rozměry antény tedy jsou:

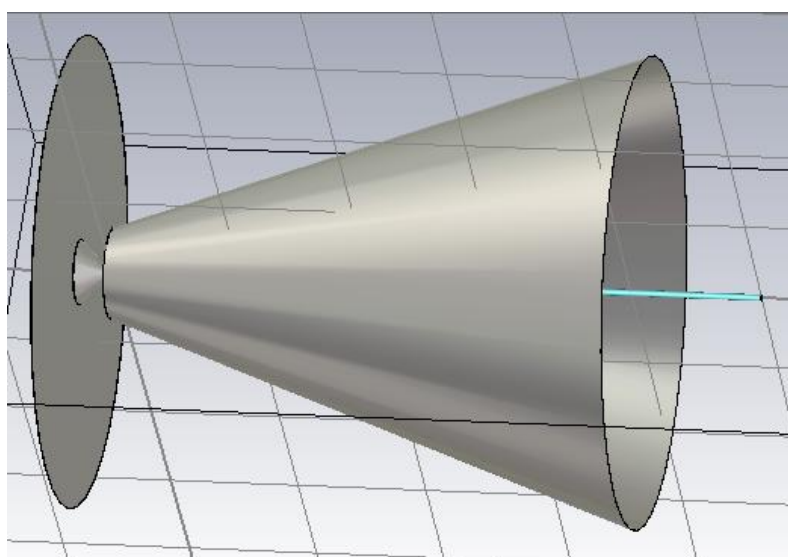
poloměr zemního disku	$rd = 180 \text{ mm},$
poloměr podstavy malého kónusu	$rm = 25 \text{ mm},$
výška malého kónusu	$hm = 25 \text{ mm},$
poloměr podstavy velkého kónusu	$rv = 180 \text{ mm}$
výška velkého kónusu	$hv = 410 \text{ mm}$
poloměr zakrácení velkého kužele	$ru = 35 \text{ mm},$
tloušťka použitého materiálu	$t = 0,4 \text{ mm}.$

Pro porovnání změn rozměrů antény v procesu je použita následující tabulka Tab. 3.

rozměr→	rd	rm	hm	rv	hv	ru	t
Výchozí anténa	145	25	25	250	376	35	0,4
Nová anténa	255	25	25	255	375	35	0,4
Zmenšená anténa	180	180	25	25	410	35	0,4

Tab. 3: Porovnání změn rozměrů antény v průběhu návrhu

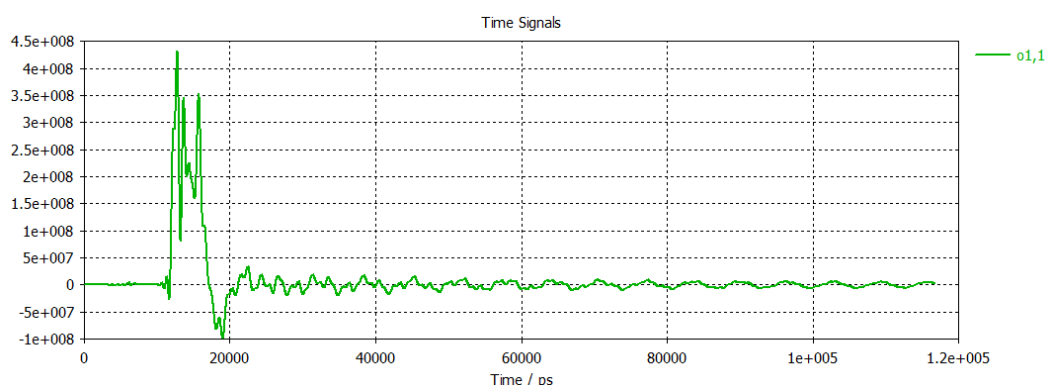
Finální vzhled antény je zobrazen na Obr. 40.



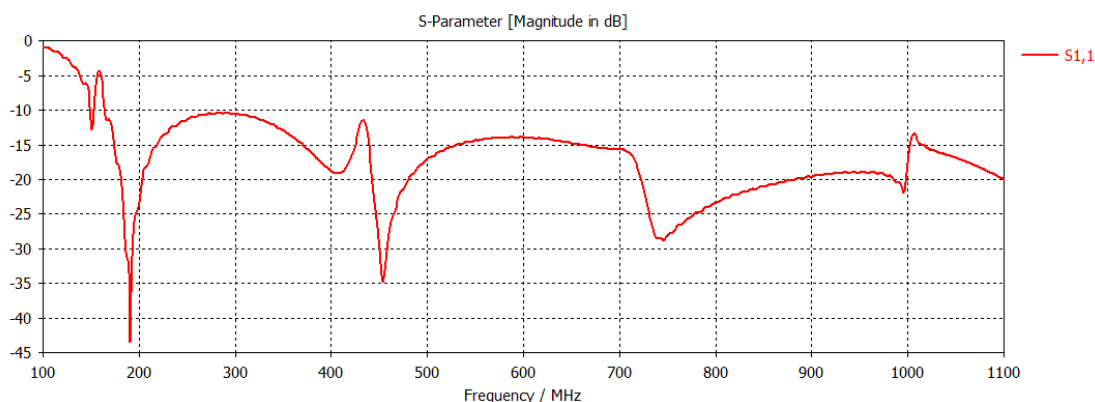
Obr. 40: Vzhled finální antény

Změřené vlastnosti této optimalizované antény byly opět simulované v programu CST a jsou vyobrazeny níže.

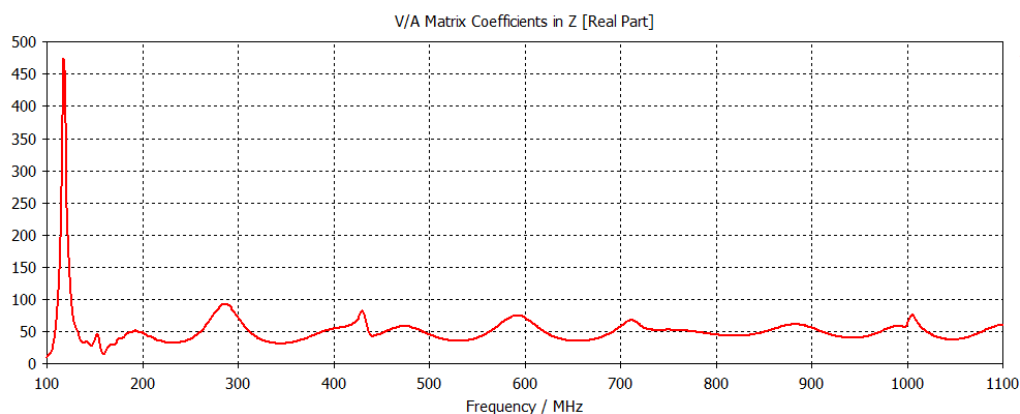
Na Obr. 41 je zobrazen příjem generovaného impulzního signálu anténou. Na Obr. 42 je znázorněn parametr S_{11} antény v závislosti na frekvenci. Dále na Obr. 43 je vidět závislost reálné části impedance antény na pracovní frekvenci a na Obr. 44 její imaginární část. Na Obr. 45 je vyobrazen celkový přijatý výkon anténou na základě buzení výše specifikovaným impulzním signálem. Další důležitý parametr VSWR je vidět v grafu na Obr. 46. A na závěr jsou na obrázcích Obr. 47, Obr. 50 a Obr. 51 zobrazeny polární grafy, na kterých lze vidět směrové charakteristiky antény a příslušný zisk na dané frekvenci, pro frekvence 200 MHz, 700 MHz a 1000 MHz. Na obrázcích Obr. 48 a Obr. 49 jsou zobrazeny pro názornost 3D grafy vyzařování antény pro 200 a 300 MHz.



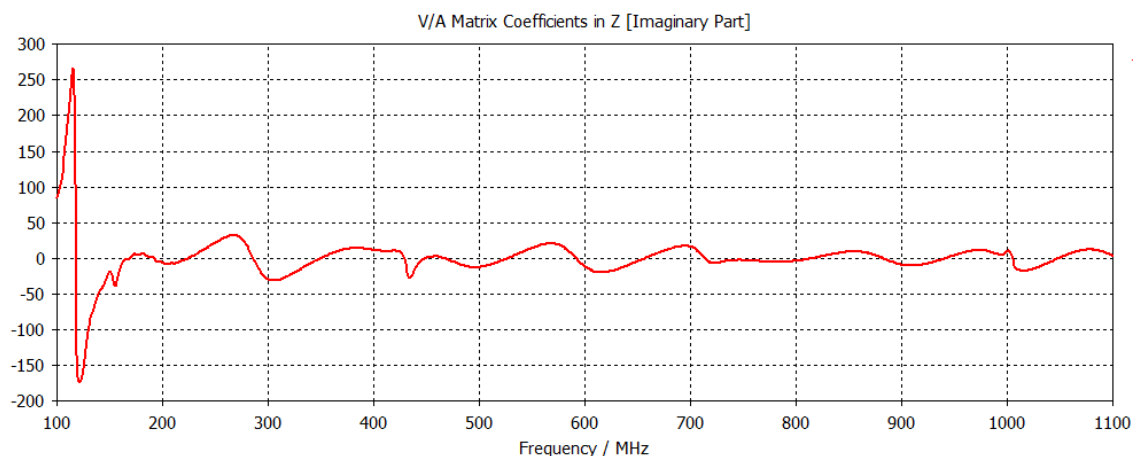
Obr. 41: Charakteristika přijatého impulzního signálu optimalizované antény



Obr. 42: Parametr S_{11} antény (vstupní činitel odrazu) optimalizované antény

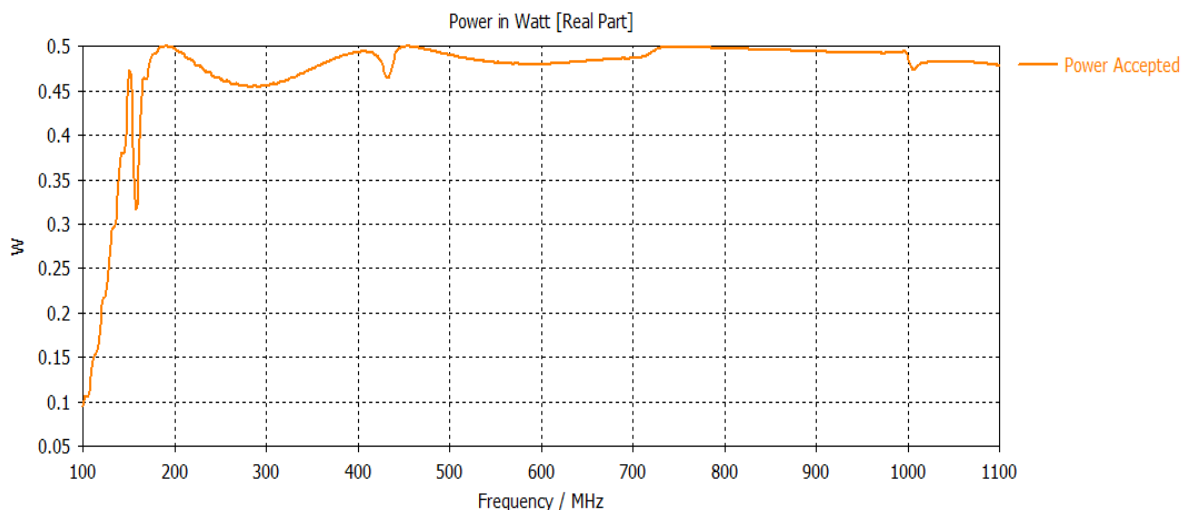


Obr. 43: Závislost reálné části impedance optimalizované antény na frekvenci

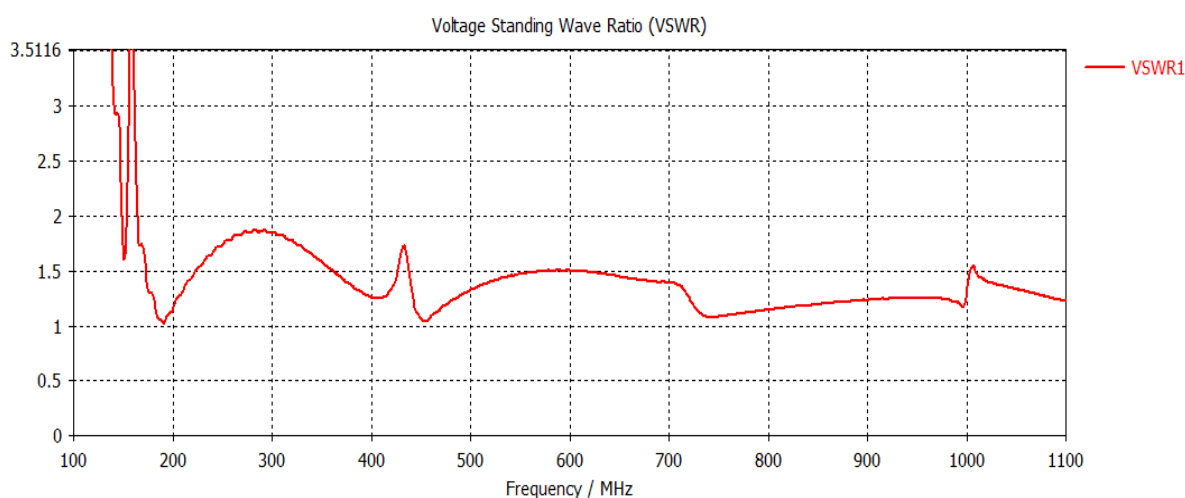


Obr. 44: Závislost imaginární části impedance optimalizované antény na frekvenci

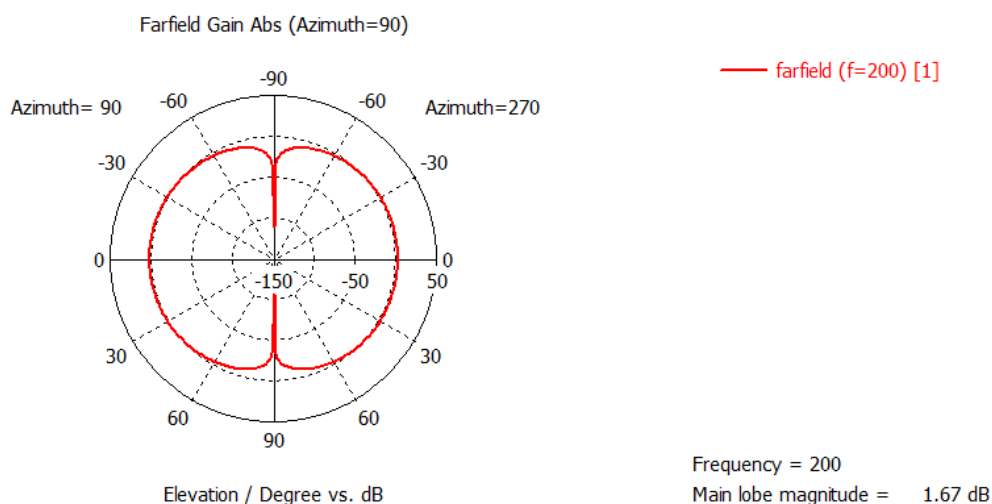
Stejně jako na Obr. 33, tak i na Obr. 43 se impedance pohybuje okolo hodnoty 50 Ω. Charakteristiky impedance reálných komponent (koaxiální kabel, koaxiální konektor) jsou uváděny s přesností $\pm 2\%$. Zjištěná odchylka v simulaci je $\pm 25 \Omega$.



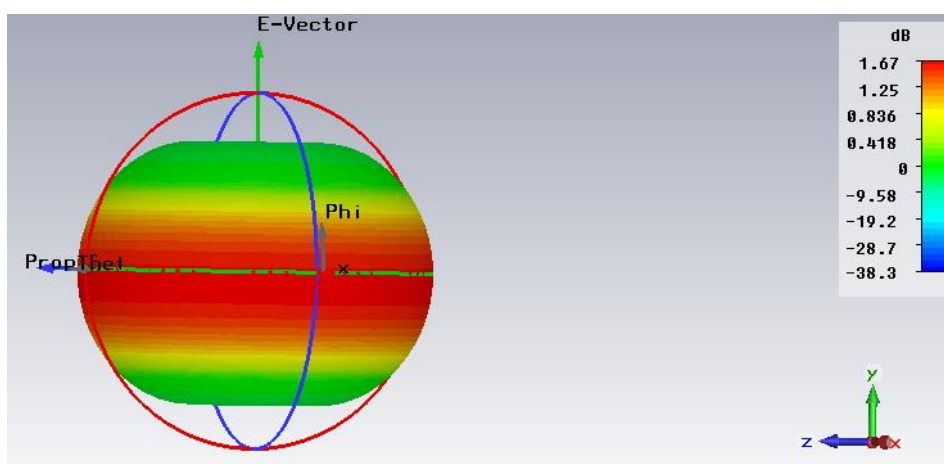
Obr. 45: Úroveň výkonu přijatého optimalizovanou anténou



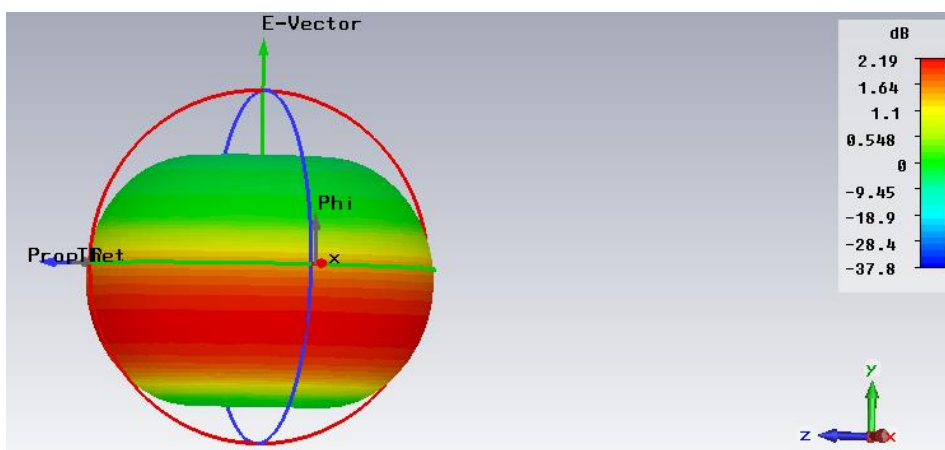
Obr. 46: VSWR (PSV) optimalizované antény



Obr. 47: Polární graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 200 MHz

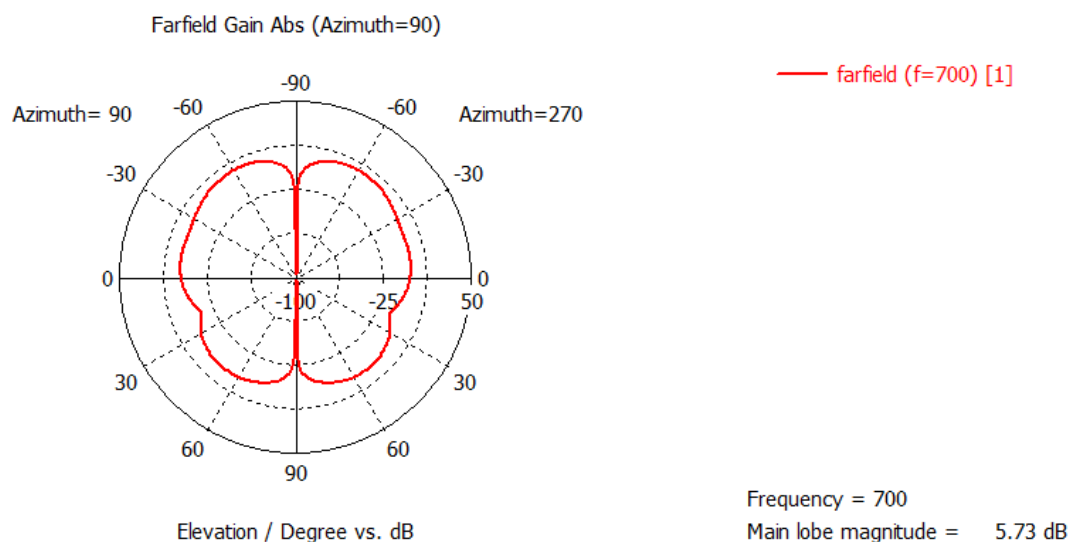


Obr. 48: 3D graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 200 MHz

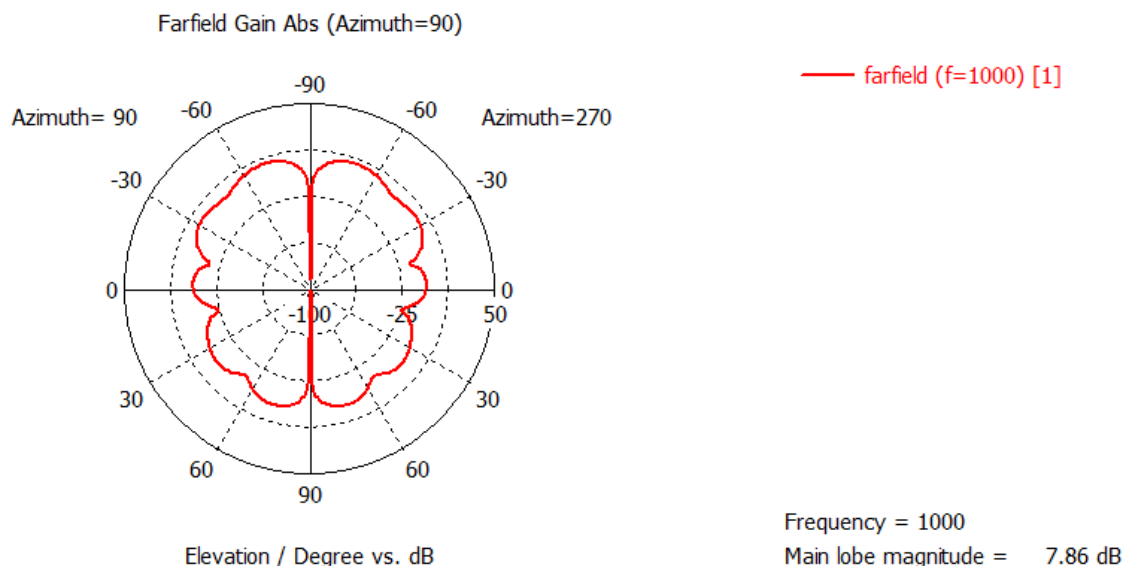


Obr. 49: 3D graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 300 MHz

Ve směru osy y vede střed osy antény (výška), přičemž anténa je orientována diskem nahoru, ve směrech os x a z je orientována šířka antény (poloměry).



Obr. 50: Polární graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 700 MHz



Obr. 51: Polární graf - směrová charakteristika optimalizované antény a její příslušný zisk na frekvenci 1000 MHz

Souhrn zisku antény pro jednotlivé frekvence je zobrazen v Tab. 4.

Frekvence [MHz]	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Zisk [dB]	1,67	2,19	3,64	3,73	4,50	5,67	5,94	7,06	7,77

Tab. 4: Zisk finální antény od 200 MHz do 1 GHz

Jak vyplývá z výsledků v tabulce Tab. 2 a Tab. 4, je zřejmé, že modifikovaná anténa má mimo menších rozměrů i celkově lepší zisk.

Posléze, po všech simulacích výše uvedených, takto navržené a optimalizované antény, následuje vlastní výroba a měření reálných parametrů antény.

8 VÝROBA ANTÉNY

Na výrobu antény byly po konzultaci s doc. Ing. Jaroslavem Láčíkem, Ph.D. [19], použity následující materiály:

- pocínovaný plech o tloušťce 0,4 mm - na vlastní výrobu trychtýřů
 - Jak je již zmíněno výše, jedná se o materiál a tloušťku zvolenou tak, že je vhodná pro zamýšlené frekvenční pásmo (200 MHz – 1 GHz) a zároveň vhodný pro prototypovou výrobu.
- polyamid - polyamidové tyče o průměru 20 mm a polyamidová deska o tloušťce 10 mm - pro výrobu podpůrné a nosné konstrukce.

Dále byly použity:

- koaxiální kabel – RF240 s charakteristickou impedancí 50 Ω - pro připojení buzení antény
- SMA konektor – jako mezikus mezi anténou a koaxiálním kabelem
 - konektor pro buzení/napájení antény
- N konektor - pro vnější připojení antény.

Provedení napájení antény: anténa-SMA-koaxiální kabel-redukce SMA/N (redukce s volným N konektorem bude upevněna na přístupném místě na anténě pro snadné připojení).

Vlastní výroba probíhala nejprve vystřížením, stočením a sletováním kónusů antény dle následujících rozměrů: poloměr zemního disku 180 mm, poloměr podstavy malého kónusu 25 mm, výška malého kónusu 25 mm, poloměr podstavy velkého kónusu 180 mm, výška velkého kónusu 410 mm, poloměr zakrácení velkého kužele 35 mm.

Výroba kónusů byla provedena stočením plechu do požadovaného tvaru kuželu a spoj spájen. Lepší variantou by bylo nechat kužele vysoustružit, ovšem jedná se o nákladnou variantu a proto pro prototyp bude dostačující použitá varianta, nehledě na to, že při rozměrech, které anténa má, by v provedení vysoustruženém byl prototyp i znatelně hmotnější.

Dále byl do plošky zakrácení velkého kónusu vyvrtán otvor o průměru tloušťky dielektrika konektoru, tedy 4 mm. Do tohoto otvoru byl napájen SMA konektor, a to tak, že stínění je připojeno k plášti velkého kónusu a dielektrikum prostupuje otvorem tak, že jeho výška je shodná s tloušťkou plechu (0,4-0,5 mm). Střední vodič SMA konektoru je spojen s vrcholem (do vrcholu) malého kónusu.

Po mechanickém sestavení antény bylo třeba dále nutno vyrobit podpůrnou a nosnou konstrukci, aby nedošlo k deformaci kuželů a namáhání v místě připojení napájení.

Zamezení namáhání v místě napájení je provedeno distančním sloupkem z polyamidu, ve kterém je vyvrtán otvor pro prostup napájení a vyfrézován otvor pro vrchol malého kónusu. Tento díl je vsazen mezi kónusy.

Ochrana proti případné deformaci kónusů a disku je provedena vnější konstrukcí z polyamidu, kdy proti zemnímu disku a proti podstavě velkého kónusu jsou umístěny dvě mezikruží, které brání horizontální i vertikální deformaci tvaru antény. Tato mezikruží jsou spojena polyamidovými tyčemi, které je drží v pevné vzdálenosti u sebe.

Výsledný skelet i anténa jsou zobrazeny v různých pohledech na obrázcích Obr. 52 až Obr. 54.

Jelikož je pro napájení použito koaxiální (nesymetrické) vedení, vznikl předpoklad,

že by na vedení mohly existovat plášťové (asymetrické) proudy. Samotné vedení by se tak stalo součástí antény a mohlo by nežádoucím způsobem ovlivňovat její parametry. Některé možnosti symetrizace jsou uvedeny v kapitole 5 (Symetrizace – symetrizační obvody). Z tohoto důvodu byly pro potlačení plášťových proudů použity feritové kroužky instalované na koaxiální kabel v blízkosti antény a jejího napájení.



Obr. 52: Šikmý boční pohled na anténu (vlevo) a boční pohled na anténu (vpravo)



Obr. 53: Pohled shora: vnitřní část velkého kónusu (vlevo) a vnitřek malého kónusu s diskem (vpravo)



Obr. 54: Detail na: distanční sloupek mezi kónusy (vlevo) a konektor SMA uvnitř velkého kónusu (vpravo)

9 MĚŘENÍ ANTÉNY - VÝSLEDKY

Měření antény proběhlo v nestíněném, relativně volném prostoru i v semi-anechoické stíněné komoře za použití vektorového obvodového analyzátoru Rhode&Schwarz ZVL6, osciloskopu Agilent DSO9254A, a generátoru periodického impulzního signálu. Pro porovnání byla použita monokónická anténka v současnosti používaná v systému pro detekci a lokalizaci aktivity částečného výboje (dále jen MA).

Měřicí pracoviště je ukázáno na Obr. 55 a detail připojené dvojité diskónické antény (dále jen DDA) a antény monokónické (MA) je zobrazen na Obr. 56 (měření mimo komoru).

Měření proběhlo pouze pro parametr S_{11} , závislost impedance antény na frekvenci a pro příjem impulzního signálu a to z důvodu, že pro zamýšlené použití není reálná směrová charakteristika zásadní a postačuje pouze jejich teoretická podoba.

Dalším faktem, proč proběhlo měření pouze výše uvedených parametrů je i ten, že v dobu kdy se zpracovávala tato práce a probíhalo měření vyvíjené antény, nebylo na ústavu VUT k dispozici vhodné měřicí prostředí, které by umožnilo efektivní změření např. směrových charakteristik, zisku, apod. bez vnesení přílišného zkreslení a chyb do výsledků měření vlivem okolních faktorů, měřicího pracoviště a vlivem okolí (odrazy, šum, rušení,...). Na Ústavu radioelektroniky FEKT VUT v Brně je k dispozici bezodrazová komora pro měření těchto parametrů, ale s reálným výsledkem měření garantovaným pro kmitočty teprve od 900 MHz výše.

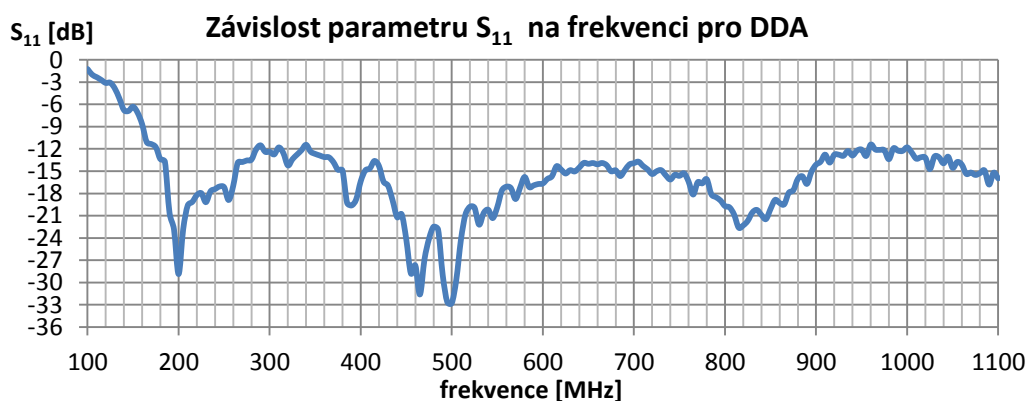


Obr. 55: Měřicí pracoviště



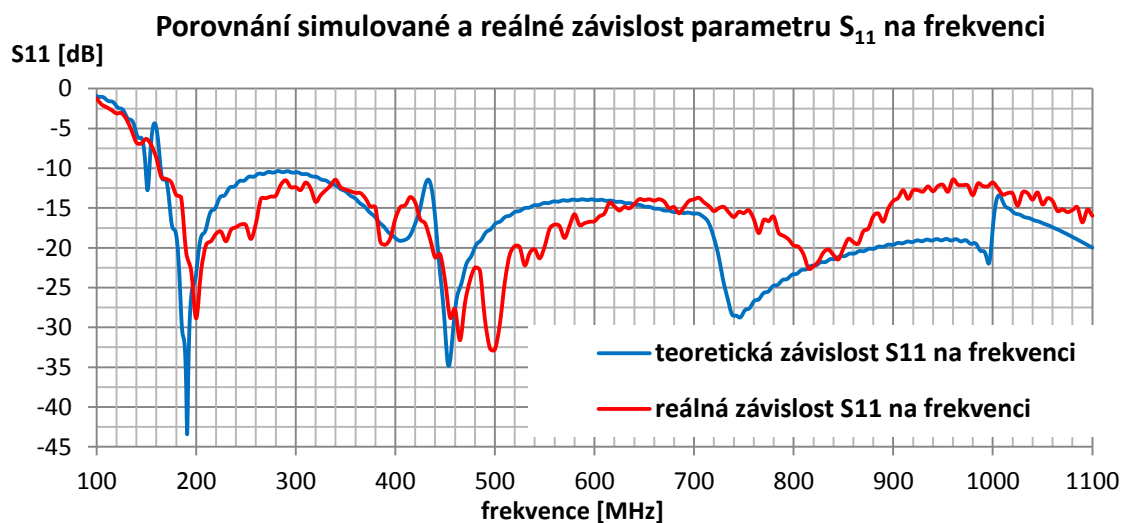
Obr. 56: Uložení dvojité diskónické antény – DDA (vlevo) a monokónické antény - MA (vpravo)

Nejprve proběhlo měření parametru S_{11} (vstupní činitel odrazu) obou antén V grafu na Obr. 57 je znázorněna kmitočtová závislost pro DDA a závislost pro MA je zobrazena v grafu na Obr. 59.

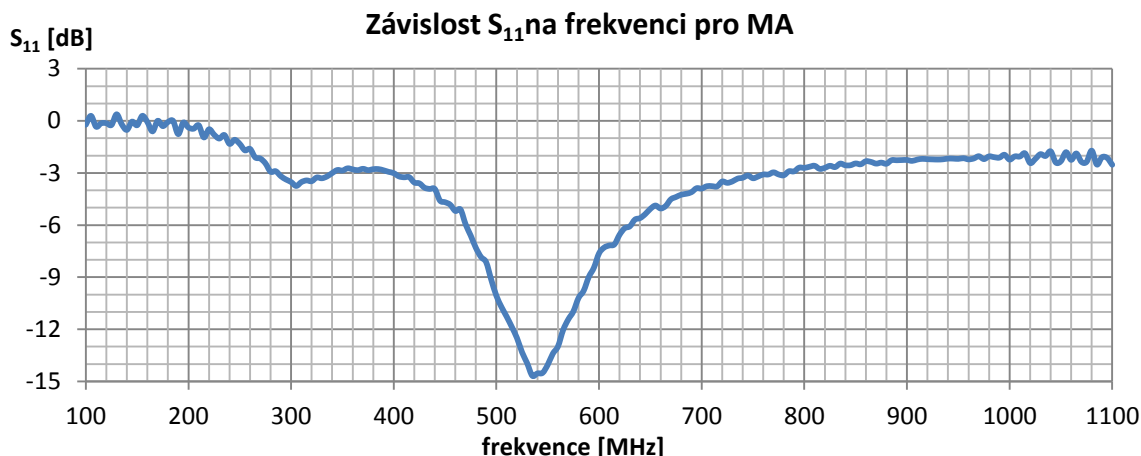


Obr. 57: Graf závislosti parametru S_{11} DDA na frekvenci

Porovnání simulované a skutečné závislosti parametru S_{11} na frekvenci je zobrazeno na Obr. 58:



Obr. 58: Porovnání simulované a reálné závislosti parametru S_{11} na frekvenci

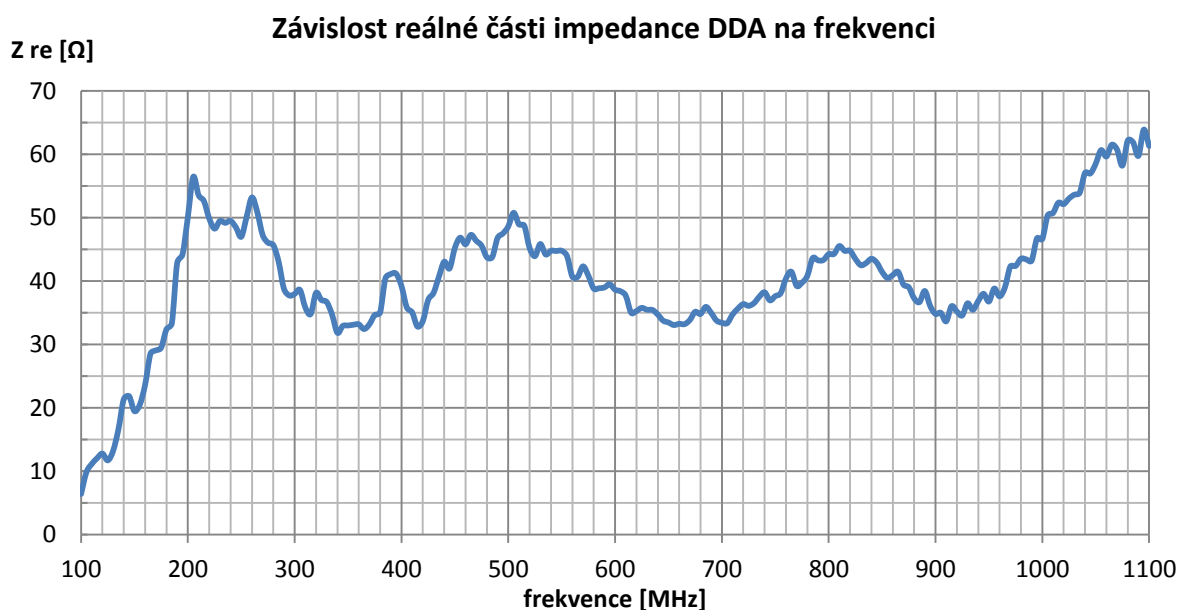


Obr. 59: Graf závislosti parametru S_{11} MA na frekvenci

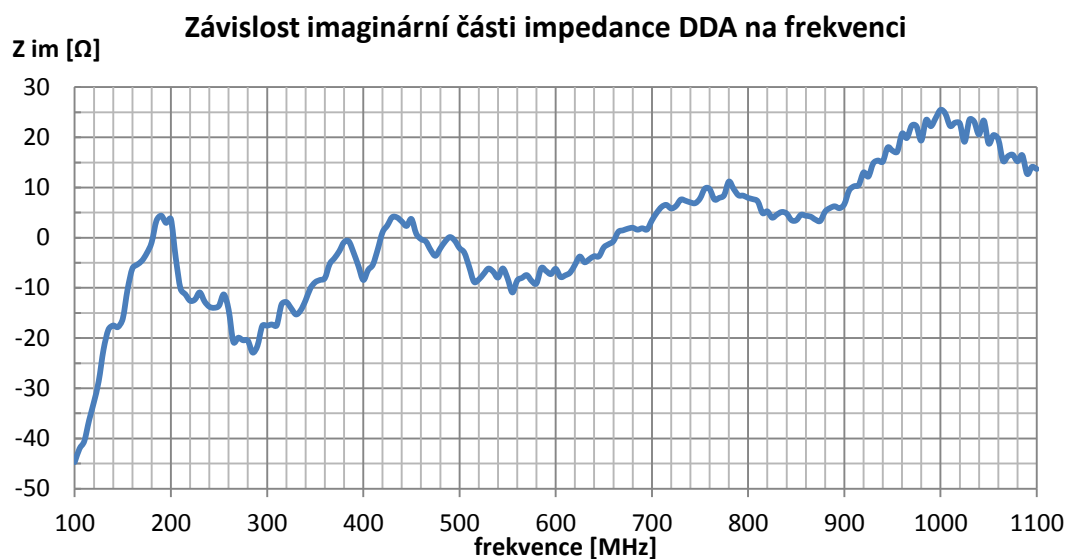
Jak je názorné z grafu na Obr. 57, je DDA v požadovaném frekvenčním pásmu od 200 MHz do 1000 MHz přizpůsobená, považujeme-li za dostatečné tlumení odrazu hodnotu -10 dB. Vstupní činitel odrazu (parametr S_{11}) má pro DDA hodnotu -12 dB a méně, tudíž na anténě dochází k zanedbatelným odrazům energie, která na ni dopadá. To ale nelze říci o porovnávací anténě (MA), která se jeví jako přizpůsobená pouze v úzkém frekvenčním pásmu, cca od 510 MHz do 580 MHz, viz Obr. 59.

Také lze konstatovat dle vyobrazení na Obr. 58, že výsledný reálný vstupní činitel odrazu dosahuje lepších hodnot, než teoretický výsledek dosažený simulací.

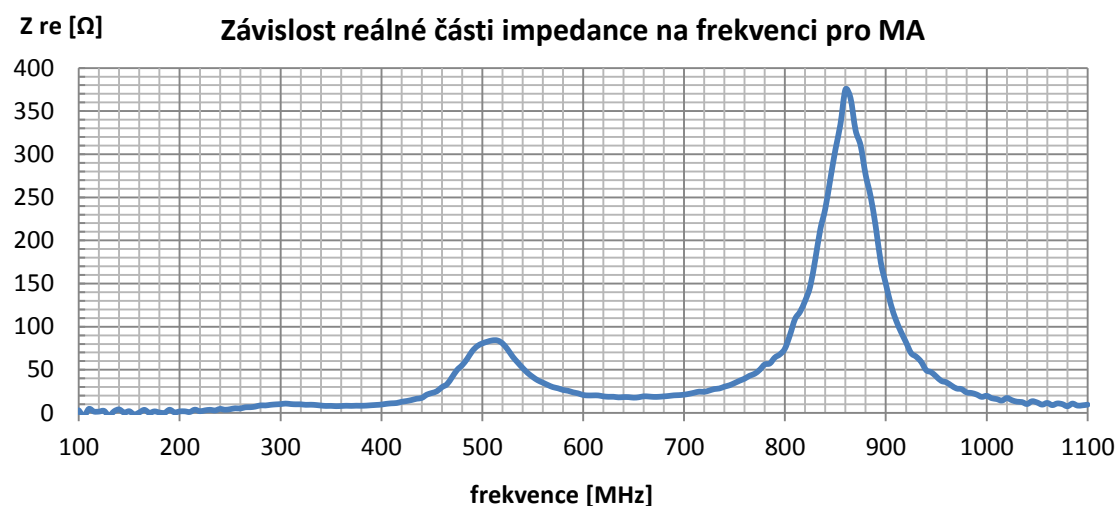
Dále následovalo měření závislosti impedance obou antén na frekvenci. Výsledky jsou znázorněny v grafech na Obr. 60 reálná část impedance a Obr. 61 imaginární část impedance pro DDA a na Obr. 62 a Obr. 63 je znázorněna reálná a imaginární část impedance pro MA.



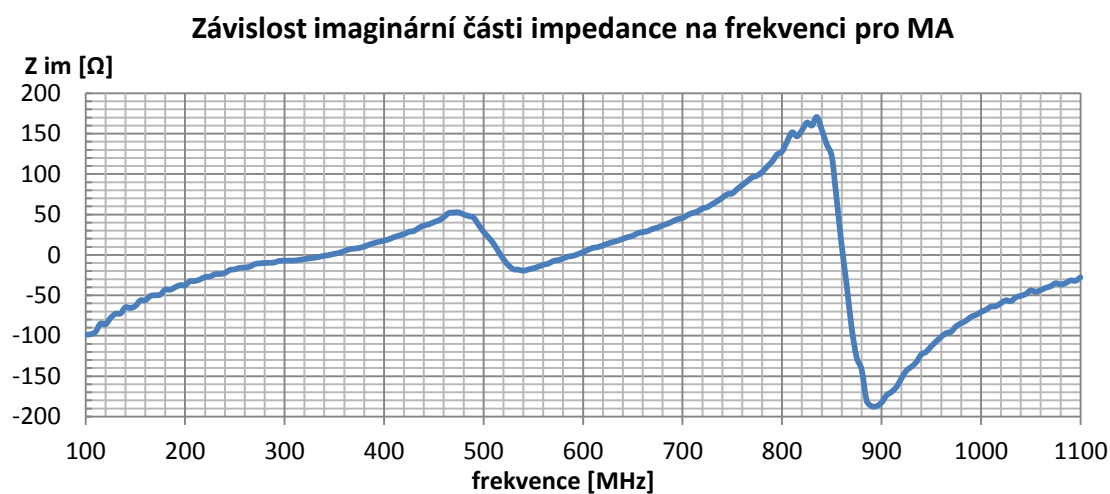
Obr. 60: Graf závislosti reálné části impedance DDA na frekvenci



Obr. 61: Graf závislosti imaginární části impedance DDA na frekvenci



Obr. 62: Graf závislosti reálné části impedance MA na frekvenci



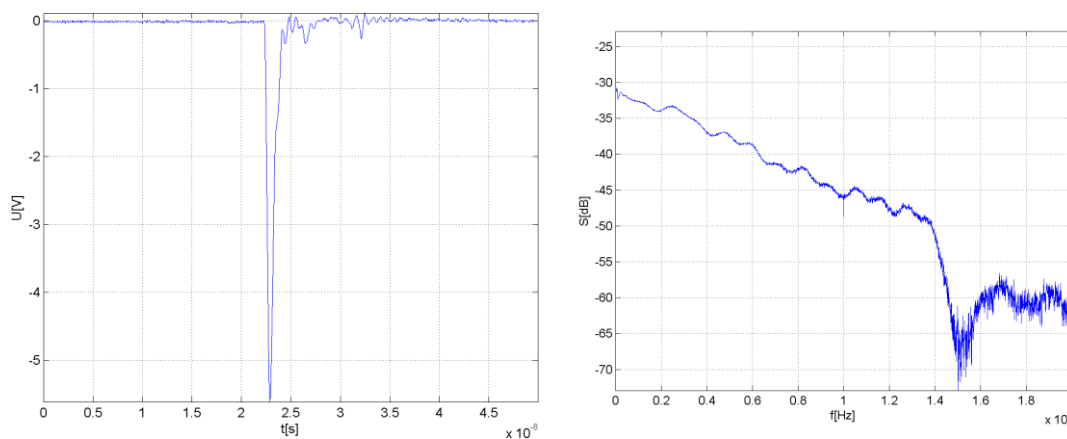
Obr. 63: Graf závislosti imaginární části impedance MA na frekvenci

Jak je vidět z grafu pro DDA na Obr. 60, reálná impedance antény se pohybuje převážně okolo $40\ \Omega$ s průměrným rozpětím $\pm 5\ \Omega$, kdežto z grafu pro MA na Obr. 62 je zřejmé, že anténa je velmi špatně přizpůsobena a její impedance se s kmitočtem rapidně mění a hodnoty $50\ \Omega$ dosahuje pouze v úzkém pásmu, tj. zde od 480 MHz do 560 MHz.

Další částí měření bylo ověřování příjmu impulzního signálu, generovaného testovacím generátorem. Generátor s monokónickou anténou je zobrazen na Obr. 64, přičemž na Obr. 65 vlevo je zobrazen tvar generované vlny umělého impulzního signálu a jeho spektrum je na Obr. 65 vpravo. Uspořádání měřicího pracoviště (zobrazeno na Obr. 55) při měření bylo v jedné rovině, a to: měřící přístroje-měřená anténa-vysílací anténa. Aby nedocházelo k interakci antény s kovovými částmi, bylo k podložení antén použito papírových krabic.



Obr. 64: Generátor s anténou vysílající impulzní signály

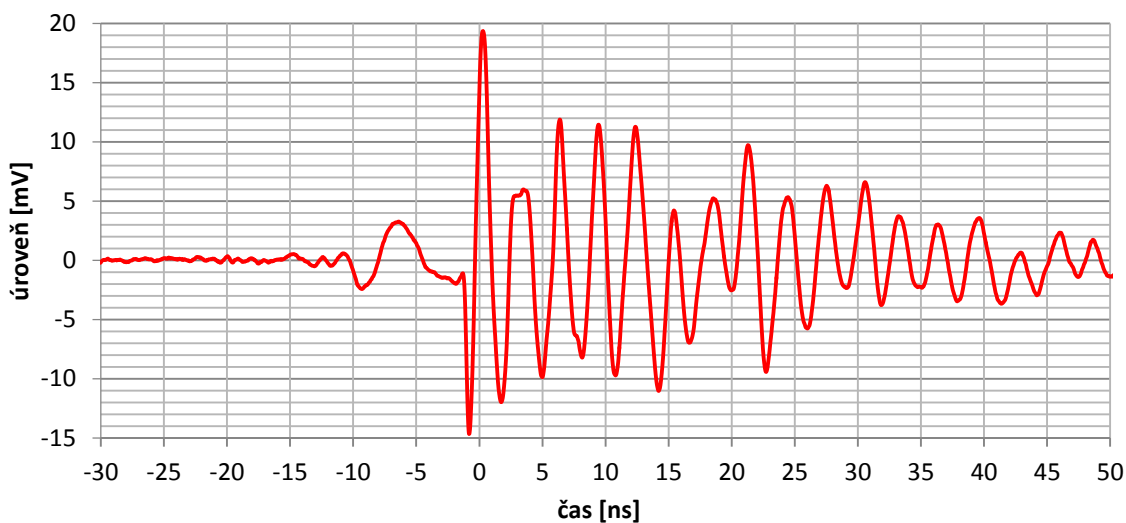


Obr. 65: Tvar vlny umělého impulzního signálu (vlevo) a jeho spektrum (vpravo)

Následovalo měření příjmu impulzního signálu oběma anténami, a to sice pro dvě vzdálenosti – 120 cm a 500 cm od vysílající antény. Pro DDA byl navíc měřen pro vzdálenost 500 cm vliv příjmu impulzního signálu pro různé polohy přijímací antény – DDA svisle s diskem dole, svisle s diskem nahoře a vodorovně.

Výsledky měření jsou vyobrazeny v grafech níže. Na Obr. 66 je příjem impulzního signálu DDA pro vzdálenost 120 cm a na Obr. 67 je výsledek stejného měření, ale pro MA.

Přijem impulzního signálu DDA na vzdálenost 120 cm

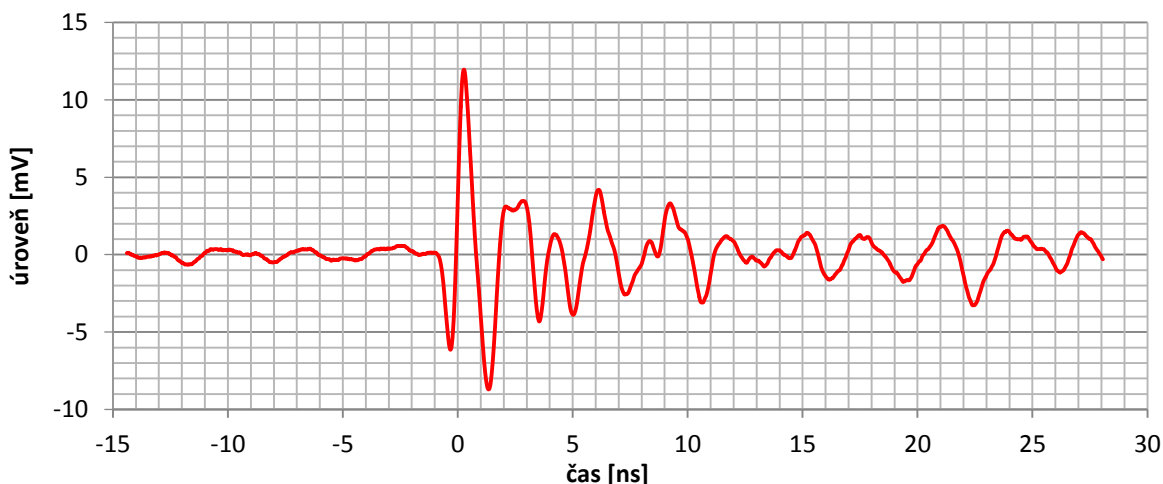


Obr. 66: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro DDA na vzdálenost 120 cm

Jak je vidět na Obr. 66, tak je zde naprosto zřetelně jasná ostrá náběžná hrana impulsu s vrcholovou hodnotou téměř dvojnásobnou oproti příjmu za pomoci MA viz Obr. 67. Je zde ale patrnější větší zvlnění za tímto pulzem, což je způsobenou zřejmě velkou plochou antény a tím způsobenou disperzí kmitočtových složek impulzního signálu. Tento jev je patrný i u MA, avšak vzhledem k její znatelně menší ploše není až tak výrazný.

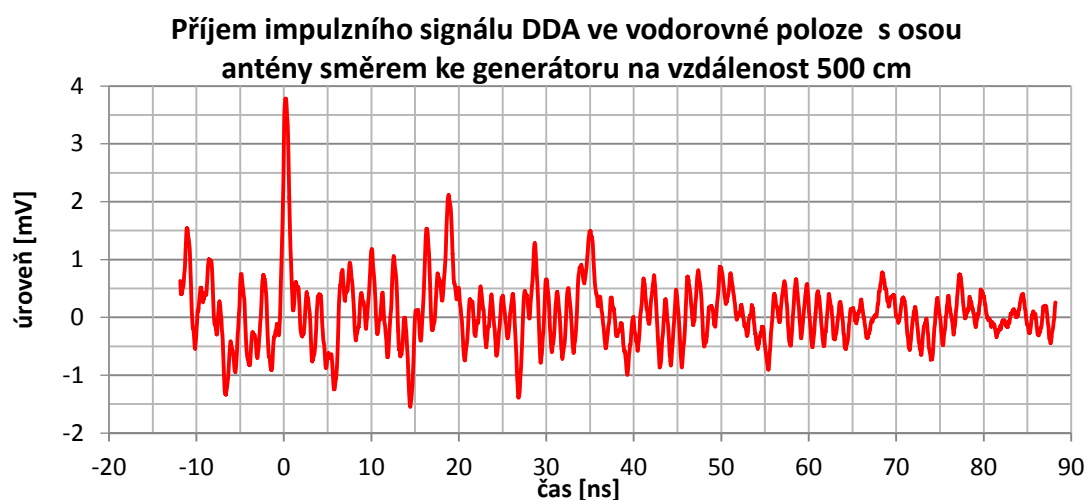
Co se týče detekce impulzních signálů (jejich frontálních částí), je DDA pro příjem vhodnější z hlediska vyšší citlivosti.

Přijem impulzního signálu pro MA na vzdálenost 120 cm

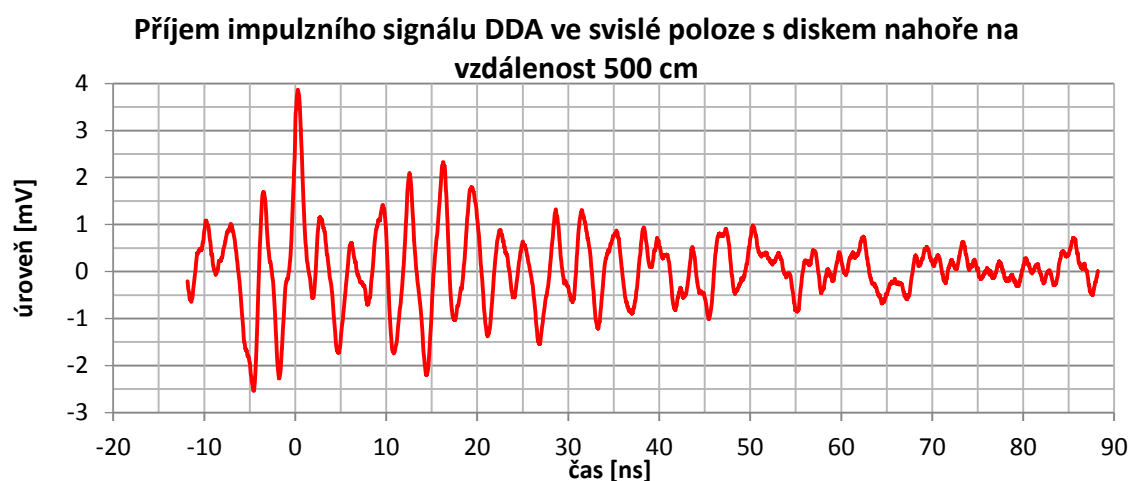


Obr. 67: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro MA na vzdálenost 120 cm

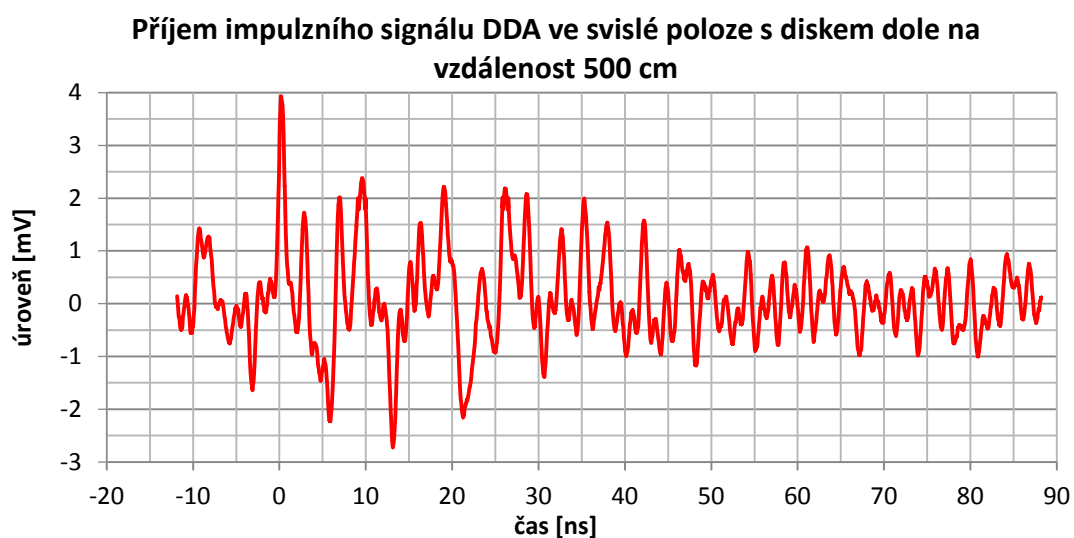
Dále proběhlo totožné měření, nyní ale na vzdálenost 500 cm od vysílací antény. Na obrázcích Obr. 68, Obr. 69 a Obr. 70 je zobrazen výsledek příjmu impulzního signálu pomocí DDA na vzdálenost 500 cm od vysílací antény, a to ve třech výše uvedených polohách (pro polohu svislou s diskem dole, polohu svislou s diskem nahoře a pro polohu vodorovnou s osou antény směrem ke generátoru). Pro porovnání je na Obr. 71 zobrazen příjem impulzního signálu pomocí MA pro vzdálenost 500 cm.



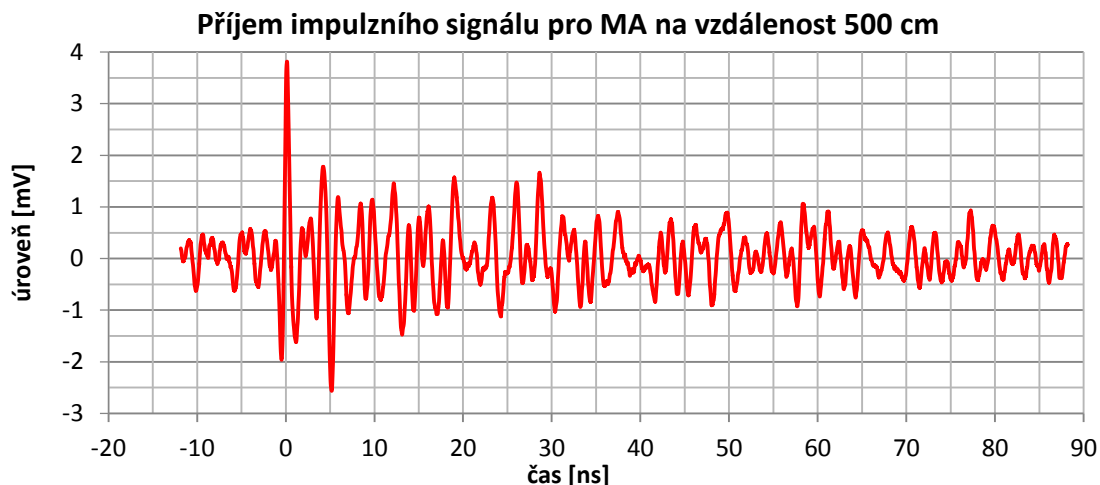
Obr. 68: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro DDA ve vodorovné poloze s osou antény směrem ke generátoru na vzdálenost 500 cm



Obr. 69: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro DDA ve svislé poloze s diskem nahoře na vzdálenost 500 cm



Obr. 70: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro DDA ve svislé poloze s diskem dole na vzdálenost 500 cm



Obr. 71: Průběh příjmu impulzního signálu v čase pro MA na vzdálenost 500 cm

Při měření parametrů antén nebyl vliv přítomnosti feritových kroužků potvrzen. Při zvolené konstrukci antény tudíž zřejmě nedocházelo k nežádoucímu vlivu připojení nesymetrického napájení.

Jak je vidět z průběhů příjmu impulzního signálu pomocí DDA (dvojitá diskónická anténa, též anglicky double discon antenna) v jejích různých polohách, je patrné, že nejlepšího příjmu dosahuje anténa ve vodorovné poloze s osou antény směrem ke generátoru. Ve vodorovné poloze anténa dosahuje čistého a zřetelného příjmu impulzního signálu se značným odstupem od rušivého pozadí. I v jiných polohách se anténa osvědčila, ačkoli zde je již vliv nežádoucího signálu pozadí znatelnější. I tak je impuls zřetelný a jeho úroveň je zhruba dvojnásobná od úrovně šumu.

Porovnávací MA (monokónická anténa) se pro daný případ (vzdálenost, daný impulzní signál) také jeví jako vhodná pro příjem, avšak blízké časové okolí impulsu není tak čisté jako u DDA.

Proběhlo i porovnávací měření v bezodrazové komoře a výsledky měření byly velice podobné naměřeným údajům při měření ve volném prostoru.

10 ZÁVĚR

Byly prostudovány různé typy a principy širokopásmových antén s širokou směrovostí a na základě zjištěných poznatků byla pro požadované použití zvolena jako nevhodnější dvojitá diskónická anténa.

Jelikož se jedná o prototypovou a poměrně málo známou anténu, bylo vycházeno při jejím návrhu ze známého prototypu a pomocí simulací byl zjištěn vliv změn jejích geometrických rozměrů na její vlastnosti, především na vyzařovací charakteristiku a šířku pásma. Na základě takto získaných poznatků byl navržen nový prototyp. Takto vzniklý prototyp byl posléze simulován v programu CST. Po výchozí simulaci byla provedena optimalizace rozměrů antény.

Posléze na základě finálních simulací a odladění proběhla vlastní výroba antény. Po výrobě následovalo změření reálných vlastností takto vzniklé antény a zkoumán vliv její schopnosti přijímat impulzní signál s náběžnou hranou stovek pikosekund.

Jak vyplývá z výsledků měření, je dvojitá diskónická anténa (DDA) dobře přizpůsobená a v požadovaném frekvenčním pásmu a splňuje všechny požadované parametry. Z hlediska funkčnosti, jak dle simulací, tak i reálných měření je tato anténa vhodná pro použití k detekci impulzních signálů.

11 LITERATURA

- [1] MATUSZCZYK, J. *Antény: prakticky*, Praha: Technická literatura BEN, 2005.
- [2] Anténa [online]. [cit. 24. srpna 2014]. Dostupné na [www: http://cs.wikipedia.org/wiki/Ant%C3%A9na/](http://cs.wikipedia.org/wiki/Ant%C3%A9na/).
- [3] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z.: *Antény a šíření elektromagnetických vln*. Skriptum FE VUT v Brně, 1989.
- [4] BALANIS, A., C., *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd Edition. New Jersey: J. Wiley and Sons, 2005.
- [5] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Skriptum FEI VUT Brno. VUTIUM Brno, 1999
- [6] MAZÁNEK, M., PECHAČ, P., VOKURKA, J., *Antény a šíření vln*. Skriptum FEL ČVUT v Praze, 2002.
- [7] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., RAIDA, Z., *Elektromagnetické vlny a vedení*. Skriptum FEI VUT v Brně, 1999.
- [8] MAZÁNEK, M., PECHAČ, P., *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03032-6.
- [9] URBAN, R., KOŘÍNEK, T., PECHAČ, P. *Broadband spectrum survey measurements for cognitive radio applications*, *Radioengineering*, 2012, vol. 21, no. 4, p. 1101-1109. Dostupné na [www: http://www.radioeng.cz/fulltexts/2012/12_04_1101_1109.pdf](http://www.radioeng.cz/fulltexts/2012/12_04_1101_1109.pdf)
- [10] LUKEŠ, Z. *Moderní anténní systémy* [online]. Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně [cit. 21.11.2014]. Dostupné na [www: http://www.radio.feec.vutbr.cz/kosy/soubory/update01/04/02_lukes_pwp.pdf](http://www.radio.feec.vutbr.cz/kosy/soubory/update01/04/02_lukes_pwp.pdf)
- [11] CHEOLBOK, K., *Ultra-Wideband Antenna: Microwave and Millimeter Wave Technologies Modern UWB antennas and equipment*, Igor Mini (Ed.), ISBN: 978-953-7619-67-1, InTech, 2010. [cit.22.11.2014]. Dostupné na [www: http://www.intechopen.com/books/microwave-and-millimeter-wave-technologies-modern-uwband-antennas-and-equipment/ultra-wideband-antenna](http://www.intechopen.com/books/microwave-and-millimeter-wave-technologies-modern-uwband-antennas-and-equipment/ultra-wideband-antenna)
- [12] PROCHÁZKA, M., *Antény – encyklopedická příručka*, 3. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-166-7.
- [13] KIM, J. N., PARK, S. O., *ULTRA WIDEBAND DOUBLE DISCON ANTENNA SHOWING 30:1 BANDWIDTH* [online], Asia-Pacific Microwave Conference 2003, [cit. 23.11.2014]. Dostupné na [www: http://ma.kaist.ac.kr/conference/34.pdf](http://ma.kaist.ac.kr/conference/34.pdf)

- [14] CONSTANTINE, A., Balanis, *Antenna Theory: analysis and design*. USA, 1997, p. 442-463.
- [15] STUTZMAN, W. L., THIELE, G. A., *Antenna Theory and Design* (2012), Wiley, ISBN 9780470576649, [online], [cit. 27.11.2014]. Dostupné na www: <http://books.google.cz/books?id=xhZRA1K57wIC>
- [16] LÁČÍK, J., *Návrh antén a rádiových spojů: P6.2 Širokopásmové antény – přednášková prezentace (2014)*, [cit. 20.11.2014], Dostupné na www: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=263483>
- [17] MAGNUSSON, K., *The Impulse-Radiating Antenna* [online]. Karlstads Universitet, 2009, [cit. 10.12.2014], Dostupné na www: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:228585/FULLTEXT01.pdf>
- [18] JANATA, J., *Radioamatérský občasník: Antény* [online], [cit. 7.05.2015]. Dostupné na www: http://www.ok1cjb.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=448:3-020&catid=1:anteny-kv&Itemid=10
- [19] LÁČÍK, J., *podle ústního sdělení doc. Ing. Jaroslava Láčíka, Ph.D.* (UREL FEKT VUT v Brně, Technická 12, 616 00 Brno) dne 14. dubna 2015.
- [20] ICHELN, C.; KROGERUS, J.; VAINIKAINEN, P. *Use of Balun Choke in Small-Antenna*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004., vol.53, no.2, p. 489- 506, ISSN 0018-9456.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

B	šířka pásma
C	kapacita
D	průměr
d	průměr
dB	decibel
dBd	decibel vztažený k dipólovému zářiči
dBi	decibel vztažený k izotropnímu zářiči
EIRP	ekvivalentní izotropně vyzářený výkon (anglicky = equivalent isotropically radiated power)
F	Farad – jednotka kapacity
f	frekvence
G	zisk
H	Henry – jednotka pro indukčnost
h	výška
hm	výška malého disku
hv	výška velkého kónusu
Hz	Hertz – jednotka pro frekvenci
h1	výška kónusu malé antény
h2	výška kónusu velké antény
L	indukčnost
l	délka
R	poloměr
rd	poloměr disku
rm	poloměr malého disku
ru	poloměr ustřižení velkého kónusu
rv	poloměr velkého kónusu
t	tloušťka materiálu
t _r	doba trvání náběžné hrany
UHF	Ultra High Frequency (=UKV)
UKV	Ultra Krátké Vlny (=UHF)
VHF	Very High Frequency (=VKV)
VKV	Velmi Krátké Vlny (=VHF)
Z	impedance
α	úhel (alfa)
δ	úhel (delta)
ϵ_r	permitivita (epsilon)
η	účinnost (éta)
λ	délka vlny (vlnové délka lambda)
μ	permeabilita (mí)
φ	sklon úhlu kónusu malé antény (fi)
Ω	Ohm – jednotka impedance/odporu (omega)
[]	označení jednotky / citace