

Vyzařovací charakteristiky antén v pásmu 5GHz

Bc. Lukáš Kovačik

Diplomová práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav elektroniky a měření

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Kovačík**
Osobní číslo: **A18306**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Vyzařovací charakteristiky antén v pásmu 5 GHz**
Téma práce anglicky: **The Radiation Patterns of Antennas Operating on the 5 GHz Frequency Band**

Zásady pro vypracování

1. Nastudujte problematiku elektromagnetického pole v rozsahu nutném pro porozumění funkce antén.
2. Seznamte se s běžnými konstrukcemi antén určených pro frekvenční pásmo 5 GHz.
3. Seznamte se s laboratorním pracovištěm pro měření vyzařovacích diagramů antén.
4. Vyberte alespoň 2 vhodné antény a změřte jejich vyzařovací diagramy.
5. Porovnejte naměřené výsledky s diagramy udávanými výrobcem a zhodnotte výsledek svého laboratorního měření.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény: encyklopedická příručka*. 3., rozš. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-166-7.
2. MATUSZCZYK, Jacek. *Antény prakticky*. 3. české vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-178-0.
3. PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2006. ISBN 978-0471755005.
4. MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. ISBN 978-80-7232-436-1.
5. MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole- základy teorie*. 1. vydání. Praha: BEN- technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 80-86056-43-0.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Pospíšilík, Ph.D.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce: 9. prosince 2019
Termín odevzdání diplomové práce: 29. května 2020



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan

Ing. Milan Navrátil, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 9. prosince 2019

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 11.8.2020

Lukáš Kovačík v. r.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením vyzařovacích charakteristik antén v pásmu 5 GHz. Anténní technika v tomto vysílacím pásmu patří v dnešní době k nejrozšířenějším internetovým vysokokapacitním mikrovlnným nosičem datové informace. Teoretická část práce je věnována popisu fyzikálních vlastností elektromagnetického pole, měřicího vybavení a v poslední řadě rozboru antén, které budou cílem vyhodnocení. V praktické části došlo k seznámení s měřícím vybavením bezodrazové komory, zpracování naměřených dat a porovnání vyzařovacích charakteristik s údaji, které jsou garantovány výrobcem antén.

Klíčová slova: vyzařovací charakteristika, anténa, bezodrazová komora

ABSTRACT

This thesis is about antenna radiation characteristics measurements in 5GHz range. The technology in the radiation range is the most widespread highcapacity microwave internet data carrier nowadays. Theoretical part of this thesis is dedicated to a description of physical properties of electromagneticfield, measuring equipment and the desription of those particular antennas, which are evaluated.In the practical part of this thesis we become familiar with measuring equipment of the non-reflective chamber, processed the results and compared radiation characteristics with details of the antenna, that are guaranteed by the manufacturer

Keywords: radiation characteristics, antenna, non-reflective chamber

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Martinu Pospíšilíkovi, Ph.D. za velkorysý přístup, cenné rady a odborné vedení při zpracování této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat firmě AVONET s. r. o. za propůjčení anténních zařízení za účelem měření.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická, nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZÁKLADNÍ POJMY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	11
1.1 VELIČINY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	11
1.2 ELEKTRICKÉ POLE	11
1.2.1 Intenzita elektrického pole	12
1.2.2 Elektrická indukce.....	12
1.3 MAGNETICKÉ POLE	12
1.3.1 Magnetická indukce	12
1.3.2 Intenzita magnetického pole	13
1.4 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE	13
1.4.1 Lorenzova síla	13
1.4.2 První Maxwellova rovnice	14
1.4.3 Druhá Maxwellova rovnice.....	14
1.4.4 Třetí Maxwellova rovnice	15
1.4.5 Čtvrtá Maxwellova rovnice.....	16
1.5 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ	17
1.6 ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM	17
1.6.1 Mikrovlnné záření	18
2 BĚŽNÉ TYPY POUŽÍVANÝCH ANTÉN	19
2.1 VŠESMĚROVÉ ANTÉNY	19
2.2 PANELOVÉ ANTÉNY	19
2.3 SEKTOROVÉ ANTÉNY	20
2.4 PARABOLICKÉ ANTÉNY	22
2.5 HORN ANTÉNA	23
3 TYPY BEZODRAZOVÝCH KOMOR.....	24
3.1 SEMIANECHOICKÁ KOMORA	24
3.2 ANECHOICKÁ KOMORA	25
3.3 PŘÍSLUŠENSTVÍ BEZODRAZOVÝCH KOMOR	26
3.3.1 Měřicí přijímač.....	26
3.3.2 Generátor VF signálů	27
3.3.3 Dielektrické absorbéry	28
3.3.4 Otočný stůl	29
3.3.5 Konzole a stativy	29
4 VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY	30
4.1 POPIS GRAFU VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY	30

5	ANTÉNY PRO MĚŘENÍ	31
5.1	JIROUS JSC–16–60 MIMO	31
5.1.1	Technické parametry	32
5.1.2	Vyzařovací charakteristiky.....	32
5.2	RF ELEMENTS HORN GEN2 TP-S60	35
5.2.1	Technické parametry antény a twistportu	36
5.2.2	Vyzařovací charakteristika.....	37
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	38
6	ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	39
6.1	SEZNÁMENÍ SE ZKUŠEBNÍM PRACOVÍŠTĚM A MĚŘÍCÍM VYBAVENÍM	39
6.1.1	Bezodrazové komory Frankonia	39
6.1.2	Měřicí přijímač ESU8 od Rohde-Schwarz.....	40
6.1.3	VF generátoru Rohde & Schwarz SMR20.....	40
6.2	NASTAVENÍ MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU R&S EMC 32	41
6.3	NASTAVENÍ VF GENERÁTORU ROHDE & SCHWARZ SMR20	43
6.4	MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍCH CHARAKTERISTIK.....	44
6.4.1	Měření RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60	45
6.4.2	Měření Jirous JSC–16–60 MIMO	51
7	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	57
7.1	VYHODNOCENÍ RF ELEMENTS HORN GEN2 TP-S60	57
7.2	VYHODNOCENÍ JIROUS JSC–16–60 MIMO.....	58
7.3	POROVNÁNÍ OBOU MĚŘENÝCH ANTÉN	59
	ZÁVĚR	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK.....	68
	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

ÚVOD

Téma mikrovlnných antén a měření jejich charakteristik, jsem si vybral na základě svých zkušeností a pracovního zaměření. Jako technik výstavby sítě se pohybuji v problematice antén téměř denně. Svou práci jsem zaměřil na měření charakteristik komerčně vyráběných antén. Na trhu je dnes k dostání velké množství anténních zařízení, jejich kvalitu lze posoudit podle několika aspektů. Mezi nejdůležitější z nich, patří právě vyzařovací charakteristiky, které jsou ovšem často pouze simulací, než-li výsledkem reálného měření.

Cílem práce je tedy vyhodnocení dvou vybraných anténních zařízení a ověřit důvěryhodnost referenčních grafů s výsledky, které byly získány měřením v bezodrazové komoře.

Teoretická část práce bude věnována popisu elektromagnetického pole, jejího vzniku a vztahům potřebných pro vysvětlení šíření elektromagnetických vln v prostoru. Další část je věnována rozboru nejčastěji používaných typů antén, včetně popisu jejich vlastností. Velmi důležitou problematikou z pohledu měření nalezneme v kapitole číslo tři, která pojednává o měřicím vybavení, přístrojích a příslušenství jímž jsou vybaveny bezodrazové komory. Komory slouží k analyzování elektromagnetických vlastností z pohledu elektromagnetické kompatibility. Krátce jsou zde popsány nejdůležitější části grafu samotné vyzařovací charakteristiky. Poslední kapitola teoretické části je věnována podrobnému popisu vybraných sektorových antén a vyobrazení udávaných charakteristik. Jejich reálné hodnoty budou měřeny v praktické části.

V praktické části dochází k seznámení s měřicí laboratoří, včetně všech zařízení a programového vybavení, sloužící k vyhodnocení elektromagnetického vlnění porovnávaných antén. První kapitola praktické části udává parametry komory, všech přístrojů a nastavení měřicího programu. Dále je zde popsán postup měření, zpracování výsledků a konečné vyhodnocení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ POJMY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

V této kapitole si postupně rozebereme a definujeme jednotlivé základní pojmy, které souvisí s elektromagnetismem. [1,2]

Mezi zdroje elektromagnetické pole, které se indukují ve svém okolí můžeme zařadit náboje na elektrodách, proudy ve vodičích, permanentní magnety, ale i mnou zkoumané anténní systémy. Všechny tyto zdroje elektromagnetického pole se můžou v čase měnit. [1,2]

1.1 Veličiny elektromagnetického pole

První nejdůležitější veličinou elektrotechniky je elektrický náboj, označení této skalární veličiny je Q . Pro tuto veličinu platí zákon zachování hmoty, náboj je nevytvořitelný a nezničitelný. Jednotkou je 1 coulomb [C]. Náboj má kvantový charakter a je roven násobku elementárního náboje se značí e a jeho hodnota je $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

Dále zde patří skalární veličina, označovaná jako Elektrický proud I s jednotkou ampér [A]. Je definovaný uspořádaným pohybem elektrických nábojů, který je závislý na průřezu vodiče S , kterým protékají náboje Q za jednotku času t . [1,2]

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

Elektromagnetické pole má dvě složky: elektrické pole a magnetické pole, které jsou charakterizována vektorovými veličinami. [1,2]

1.2 Elektrické pole

„Vzájemné silové působení elektrických nábojů se uskutečňuje prostřednictvím elektrických polí. Elektrické pole existuje okolo každého elektricky nabitého tělesa a projevuje se silovým působením na jiná elektrovaná tělesa. Elektrické pole mají tedy i protony a elektrony. Při popisu elektrického pole využíváme vektorové veličiny.“ [3]

1.2.1 Intenzita elektrického pole

Jedná se o vektorovou veličinu definovanou jako sílu \vec{F}_e působící na jednotkový bodový náboj Q , nabyté částice se můžou nacházet v klidovém stavu, ale i v pohybu. Intenzita elektrického pole se značí E a je dána vztahem (2) a jednotkou je [V/m]. [2]

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{Q} \quad (2)$$

1.2.2 Elektrická indukce

V reálné prostředí musíme počítat i s vektorem intenzity elektrického pole \vec{E} . Musíme brát do úvahy i elektrické vlastnosti prostředí ϵ , kterou nazýváme permitivita. Elektrickou indukci značíme D a vypočítáme ji pomocí vztahu (3), jednotkou je [C/m²]. [2]

$$\vec{D} = \epsilon * \vec{E} \quad (3)$$

1.3 Magnetické pole

Magnetické pole vzniká kolem pohybujících se elektrických nábojů. V případě elektromagnetů jde o pohyb volných elektronů (nosičů elektrického náboje) tvořený elektrickým proudem. [1,2]

U permanentních magnetů je magnetické pole vytvářeno pohybujícími se elektrony okolo atomového jádra. Pokud jsou směry těchto miniaturních (elementárních) magnetů náhodné, magnetická pole jednotlivých atomů se vyruší a materiál nevykazuje magnetické vlastnosti. Pokud jsou všechny uspořádané v jednom směru, navzájem se sčítají a materiál trvale (permanentně) vytváří magnetické pole. [1,2]

1.3.1 Magnetická indukce

Jedná se o vektorovou veličinu definovanou jako sílu F_m kterou působící magnetické pole na náboj Q pohybující se rychlostí v . Značíme ji B a implicitně ji definujeme vztahem (4) a jednotkou je tesla [T]. [1]

$$\vec{F}_m = Q(v * B) \quad (4)$$

1.3.2 Intenzita magnetického pole

Jedná se o vektorovou veličinu označenou H , která je s vektorem magnetické indukce B vázaná vztahem (5), kde veličina μ charakterizuje magnetické vlastnosti prostředí a nazývá se permeabilita. Jednotkou je [A/m]. [2]

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (5)$$

1.4 Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole vzniká, vzájemným spojením magnetického pole s elektrickým polem. [2]

Maxwellovi rovnice jsou axiomy elektromagnetických polí, které vznikly zobecněním Faradayových experimentů. Jsou v nich popisovány spojitosti a závislosti magnetického pole a elektrického pole. Máme dány čtyři případy Maxwellových rovnic, které dále formulujeme v integrálním tvaru, kde popisují elektromagnetické pole v prostorové oblasti a v diferenciálním tvaru, kde popisují elektromagnetické pole v bodu této oblasti. [2]

1.4.1 Lorenzova síla

Je součet sil působících na náboj v elektromagnetickém poli, který se pohybuje rychlostí v . Výpočet provedeme pomocí vztahu (6). [1]

$$F = F_e + F_m = Q(E + v * B) \quad (6)$$

F – Lorenzova síla

F_e – Síla působícího elektrického pole

F_m – Síla působícího magnetického pole

Q – Náboj

E – Intenzita elektrického pole

v – Rychlost

B – Magnetická indukce

1.4.2 První Maxwellova rovnice

Tato rovnice se také někdy značí jako zákon celkového proudu či zobecnění Ampérova zákona. První Maxwellova rovnice (7) je v integrálním tvaru definována takto:

$$\oint_c \vec{H} d\vec{l} = I + \frac{d\vec{\psi}}{dt} \quad (7)$$

Elektrický proud $I = \int_S \vec{j} * d\vec{S}$ (8)

Magnetický tok $\vec{\psi} = \int_S \vec{D} * d\vec{S}$ (9)

Obíháním vektoru \vec{H} jakkoli orientované uzavřené křivce c je rovna celkovému součtu proudu I a posuvného proudu $\frac{d\vec{\psi}}{dt}$, kde oba tyto proudy jsou navzájem spojeny s křivkou c , která je orientována pravotočivě. [1]

V diferenciálním tvaru je první Maxwellova rovnice (10) definována takto:

$$\text{rot}\vec{H} = J + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (10)$$

„Rotace vektoru intenzity magnetického pole \vec{H} je rovna hustotě vodivého proudu J a veličině $\frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$, kterou nazýváme hustota posuvného magnetického (Maxwellova) proudu.“ [1]

1.4.3 Druhá Maxwellova rovnice

Druhá Maxwellova rovnice je nazývána mnohdy Faradayovým indukčním zákonem, který popisuje princip vzniku elektrického napětí v uzavřeném elektrickém obvodu, jež se nachází v okolí magnetického pole, které způsobuje změnu magnetického indukčního toku. [1]

Druhá Maxwellova rovnice (11) je v integrálním tvaru definována takto:

$$\oint_c \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\vec{\phi}}{dt} \quad (11)$$

Magnetický indukční tok
$$\vec{\phi} = \int_S \vec{B} * dS \quad (12)$$

Otáčením vektoru \vec{E} po jakkoli orientované křivce c je rovna záporné derivaci magnetického indukčního toku spojeného s křivkou c , která obepíná plochu S , plocha i křivka jsou orientována pravotočivě. [1]

V diferenciálním tvaru je druhá Maxwellova rovnice (13) definována takto:

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (13)$$

„Rotace vektoru intenzity elektrického pole \vec{E} je rovna časové derivaci vektoru magnetické indukce \vec{B} “ [1]

1.4.4 Třetí Maxwellova rovnice

Třetí Maxwellova rovnice vychází z Gaussova zákona elektrostatiky, který říká, že tok elektrického pole svazuje uzavřenou plochu s elektrickým nábojem, který je v ní uzavřen. [1,4]

Třetí Maxwellova rovnice (14) je v integrálním tvaru definována takto:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = Q \quad (14)$$

Elektrický náboj
$$Q = \int_V \rho dV \quad (15)$$

„Elektrický tok je libovolnou vně orientovanou uzavřenou plochou \vec{S} , je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti V ohraničené plochou \vec{S} .“ [1]

V diferenciálním tvaru je třetí Maxwellova rovnice (16) definována takto:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (16)$$

„Divergence vektoru elektrické indukce \vec{D} je rovna objemové hustotě náboje ρ .“ [1]

1.4.5 Čtvrtá Maxwellova rovnice

Tato Maxwellova rovnice definuje zákon spojitosti indukčního toku.

Čtvrtá Maxwellova rovnice (17) je v integrálním tvaru definována takto:

$$\oint_S B \, dS = 0 \quad (17)$$

Rovnice definuje, že magnetický tok B procházející jakoukoliv uzavřenou plochou S se rovná nulové hodnotě. [1]

V diferenciálním tvaru je čtvrtá Maxwellova rovnice (18) definována takto:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (18)$$

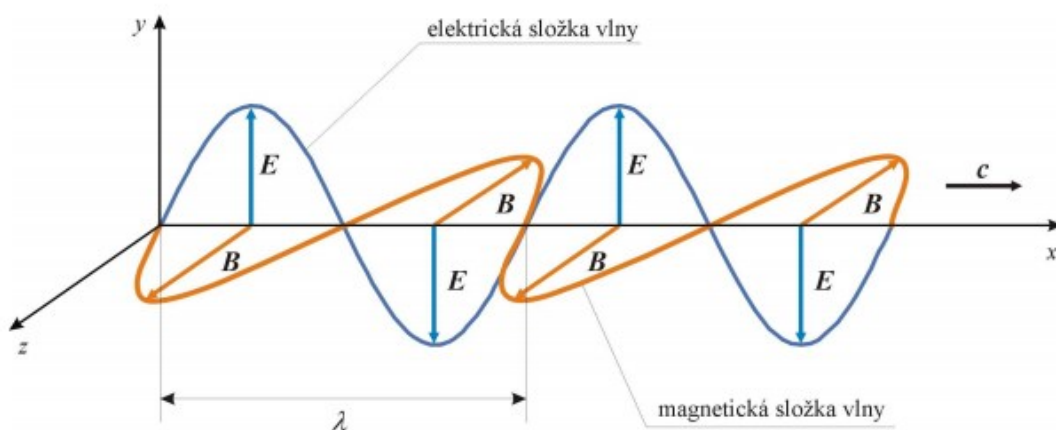
„Divergence vektoru magnetické indukce \vec{B} je rovna nule.“ [1]

1.5 Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění znázorněné na *Obr. 1* někdy nazývané také elektromagnetické záření, skládá se ze dvou navzájem neoddělitelných složek. Vektor intenzity elektrického pole \mathbf{E} zde charakterizuje elektrickou složku, vektor magnetické indukce \mathbf{B} pak magnetickou složku vlny. Vektorové složky elektromagnetického vlnění \mathbf{E} a \mathbf{B} jsou na sebe navzájem kolmé, mají stejnou fázi a kmitají ve směru šíření vlny, kolmo na sebe se stejnou frekvencí.

Jedná se o příčné vlnění, které se odráží, láme a interferuje v závislosti na prostředí, kterým se elektromagnetická vlna šíří. Ve vaku se šíří rychlostí $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tato rychlost je stejná pro všechny elektromagnetické vlny, bez ohledu na jejich frekvenci nebo vlnovou délku.

[5,6]



Obr. 1 Elektromagnetické vlnění [5]

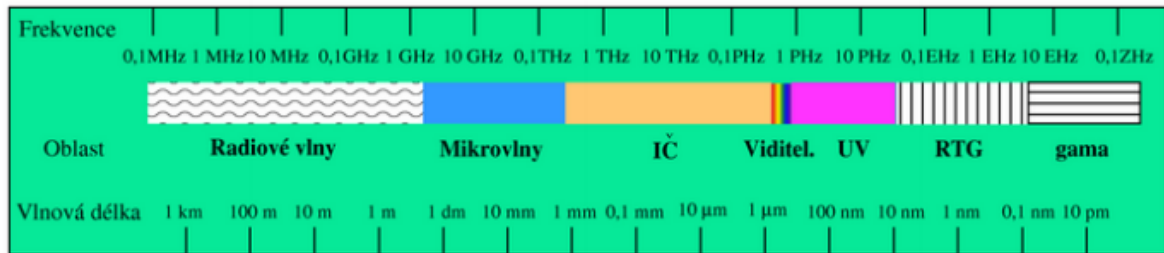
1.6 Elektromagnetické spektrum

Spektrum elektromagnetického záření je tvořeno elektromagnetickým zářením, složených z různých vlnových délek. Rozlišujeme velkou řadu elektromagnetického záření, které je dané frekvencí či vlnovou délkou. Jednotlivé druhy záření znázorňuje (*Obr. 2*). [5,6]

Různé druhy záření se mezi sebou navzájem prolínají a jedna oblast navazuje na druhou, případně se překrývá. [5,6]

Pro účely naší práce budou nejdůležitější vlny mikrovlnného záření, které využívají frekvencí v rozsahu 300 MHz až 300GHz. Vlnová délka je dána od 1 mm až 1m. Z toho vyplývá, že toto záření je velmi závislé na okolním prostředí, ve kterém se vlny záření šíří.

[5,6]



Obr. 2 Elektromagnetické spektrum [6]

1.6.1 Mikrovlnné záření

Mikrovlnné záření se nachází mezi spektrem radiových vln a infračerveným zářením. Jejich název je odvozen podle velikosti jejich elektromagnetické vlny, která dosahuje v některých několik málo milimetrů. [5,6]

Mezi nejčastější využití tohoto záření patří bezdrátová datová komunikace mezi zařízeními využívají technologie WIFI. [5,6]

Díky mikrovlnnému záření je možné při použití úzce směrových parabolických antén, přenášet data na velké vzdálenosti, v řádech několik kilometrů.

Nevýhodou tohoto záření je malá propustnost přes překážky, která se při zvyšující se frekvenci ještě zmenšuje. Proto je důležité při stavbě bezdrátového spoje, zaručit přímou čistou viditelnost. [5,6]

Mezi další využití mikrovlnného záření patří:

- Tepelná úprava potravin (pomocí mikrovlnné trouby)
- Sterilizace nástrojů ve zdravotnictví
- Radarová technika ve vojenství
- Urychlení chemických reakcí

[6]

2 BĚŽNÉ TYPY POUŽÍVANÝCH ANTÉN

2.1 Všesměrové antény

Konstrukčně se jedná o tyčovou anténu, která je mnohdy umístěna na otočném kloubu, pro snadné polohování vyzařovacího směru antény. [7]

Z podstaty všesměrové antény vyplývá, že vyzařovací úhel v horizontálním úhlu je 360° . Ovšem v případě vertikálního směru je vyzařovací úhel nejčastěji 10° v rozmezí pouze několik málo jednotek. [7]

Z hlediska dnešního použití se tyto typy antén používají nejčastěji u klientských routerů, kde potřebujeme pokrýt co největší prostor např. rodinného domu, haly a zahrady. [7]



Obr. 3 Všesměrové antény [8]

2.2 Panelové antény

Tyto antény jsou konstrukčně řešeny jako soustava vodivých desek (ozařovačů) na plošném spoji, které jsou pravidelně uspořádány v řadě za sebou a vzájemně vodivě propojeny napájecí a fázovacím vedením. Nejčastější tvar takové antény je čtverec nebo obdélník. [7]

Ozařovače na plošném spoji mají oválný, kruhový, čtvercový tvar. Jedná se o tvar dipólu, což je základní tvar antény, určený pro příjem a vysílání signálů. [7]

Co se týká vyzařovacích charakteristik, u tohoto typu antén, bývá u obou polarizací stejný. [7]

Výhodou těchto antén je velmi malá směrovost, která je dána velmi širokým hlavním lalokem. Proto se tyto antény často používají jako přijímací klientské jednotky. [7]

Mezi nevýhody lze zařadit výrazný zadní lalok a boční lalok, proto se tyto antény nehodí pro využívání sektorových antén a páteřních spojů. Jelikož by kvůli tomuto zadnímu a bočnímu laloku docházelo k nežádoucímu rušení. [7]



Obr. 4 Panelová anténa [9]

2.3 Sektorové antény

Konstrukce sektorových antén připomínají často obdélníkové panelové antény, která jsou ovšem vhodněji odrušena v zadní části antény, jejich tělo bývá štíhlejší a zároveň i delší. [7]

Vyzařovací charakteristika sektorových antén bývá v ideálním stavu vodorovně plochá. Má široký vyzařovací úhel ve vodorovném směru antény, což umožňuje pokrýt co největší oblast jednou jedinou anténou. Kdežto ve svislé rovině, je vyzařovací úhel velice úzký, a to převážně z důvodu, že není potřeba pokrývat celý vertikální prostor před anténou (oblohu a zem), ale pouze vymezenou např. obydlenou část. [7]

Sektorové antény velmi často používají kombinaci vertikální a horizontální polarizace, tyto polarizace jsou dány orientací jednotlivých ozařovačů uvnitř antény. [7]

Mezi výhody těchto antén můžeme zařadit přesně daný vyzařovací úhel v horizontálním směru, nejčastěji v rozmezí 30° - 120° a snaha o eliminaci bočních a zadních laloků. [7]

Nevýhodou je menší ziskovost antén, která je dána velikostí antény a vyzařovacím úhlem.

Nejčastější využití sektorových antén je v podobě vysílacích antén, které jsou umístěny na stožárových vysílačích, střeách domů či uvnitř budov. Sektorové antény slouží k dodávání mikrovlnného signálu v přesné výšcei klientských jednotek. [7]



Obr. 5 Sektorové antény

2.4 Parabolické antény

Principem těchto kruhových antén je soustředění mikrovlnného paprsku do jednoho ohniska, pokud je do tohoto ohniska umístěn zdroj mikrovlnného záření, dojde k odrazu paprsků od parabolického reflektoru a vznikne úzce směrový svazek záření. [7]

Na rozdíl od výše zmíněných konstrukcí se parabolické antény skládají z několika důležitých částí. Hlavním prvkem je nejčastěji plechový reflektor vyrobený ze slitin oceli nebo hliníku. Neméně důležitým je také vlnovodý ozařovač s odrazovým zrcátkem a radonový kryt. Tento kryt je vyroben nejčastěji z plastových polymerních materiálů či látek. Tento radonový kryt zabraňuje vnějšímu poškození náchylného zrcátka a vlnovodu ozařovače. [7]

Nespornými výhodami parabolických antén je ziskovost a směrovost daná velkou plochou samotné antény, která může v některých případech dosahovat v průměru několik metrů. [7]

Nevýhodou je naopak zmíněná velikost a s tím spojená váha samotné antény. Proto musíme při výběru tohoto typu počítat s větší zastavenou plochou na vysílači či náchylnostem otočení v případě povětrnostních vlivů. [7]

Parabolické antény díky jejich vlastnostem nejčastěji používáme na páteřní spoje typu bod-bod, kdy na každé straně se nachází jedna parabolická anténa namířená proti sobě. Díky tomu můžeme tyto radiové spoje používat až na vzdálenost několik kilometrů. [7]



Obr. 6 Parabolická anténa

2.5 Horn anténa

Konstrukční řešení antény typu horn, někdy nazývaná trychtýřová, roh anténa, se skládá z kovového kuželového vlnovodu. Tento vlnovod slouží k usměrnění radiových vln do uceleného svazku. [10]

Tento typ antén se používá nejen k šíření radiových vln v pásmu 5 GHz, ale jejich frekvenční rozsah je od 300MHz až po 20GHz. Proto se využívají například u radarů, satelitních přijímačů aj. [10]

Velkou výhodou těchto antén je velká odolnost vůči okolnímu rušení, jelikož tělo antén bývá vyrobeno z materiálu, který brání prostupu jiných frekvenčních signálů, než který samy přenášejí. Další výhodou je směrovost přenášených signálových vln. [10]



Obr. 7 Anténa RF elements Horn Gen2 [11]

3 TYPY BEZODRAZOVÝCH KOMOR

Pokud chceme posuzovat elektromagnetické pole nějakého zařízení, v našem případě měření vyzařovacích charakteristik antén, je nutné provádět měření v prostředí, ve kterém nehrozí:

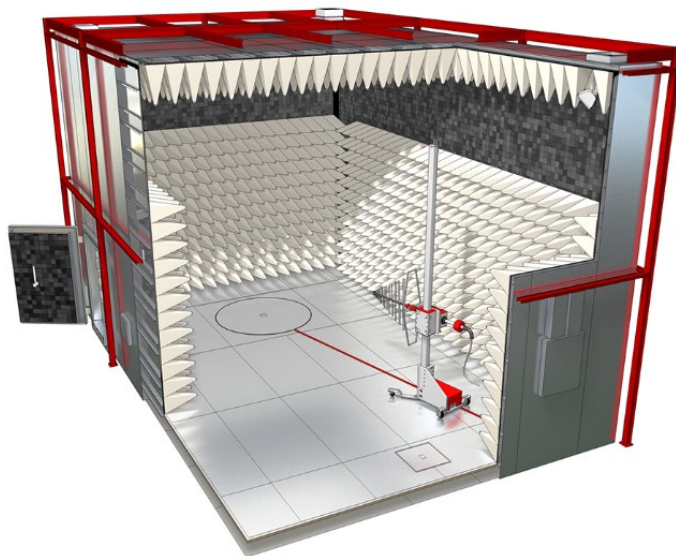
- Rušení s dalšími elektromagnetickými poli
- Odrazy elektromagnetického pole posuzovaného zařízení, tj. nevznikají stojaté vlny
- Změna vlastnosti v čase, nelze zaručit zcela ideální prostředí, ovšem v průběhu měření zůstanou podmínky stejné. [12]

Pro dodržení těchto podmínek, byly zkonstruovány bezodrazové komory. [12]

Rozlišujeme dva typy bezodrazových komor:

3.1 Semianechoická komora

Jedná se o částečně bezodrazovou komoru, která umožňuje měření interferencí v rozsahu frekvencí 30MHz až 1 GHz. [12]



Obr. 8 Semianechoická komora [13]

Komora simuluje měření na volném venkovním prostranství, kde není žádné rušivé elektromagnetické pole. [12]

Vnější stínění nepropustí záření dovnitř, způsobuje ovšem odrazy. Proto se používají absorbéry. [12]

Měřené zařízení vybudí elektromagnetické pole uvnitř komory. Anténa zachytí jen přímou vlnu a vlnu odraženou od podlahy. [12]

Minimální měřicí vzdálenost je 3 metry; geometrie měřicího pracoviště je přesně stanovena příslušnými normami. [12]

3.2 Anechoická komora

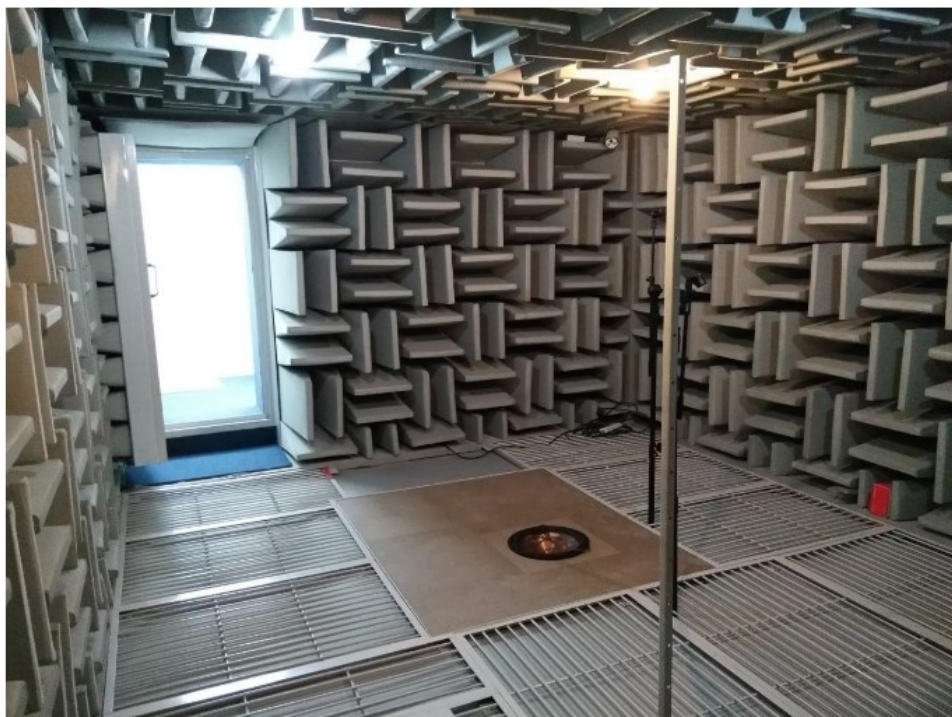
Pro měření vyzařovacích diagramů antén a zkoušky odolnosti potřebujeme eliminovat odraz od podlahy. Zatlumením získáme anechoickou zcela bezodrazovou komoru. [12]

Odrazivá podlaha se rovněž pokryje absorbéry. [12]

Uvnitř komory lze vybudit elektromagnetické pole výkonem řádově ve stovkách W (odpovídá desítkám V/m). [12]

Standartním vybavením komor bývá otočný stůl. Umožňuje otáčet zařízením během měření EMI i EMS. [12]

Pokud na točnu umístíme anténu, můžeme měřit její vyzařovací charakteristiky ve všech směrech. [12]



Obr. 9 Anechoická komora [14]

3.3 Příslušenství bezodrazových komor

Součástí bezodrazových komor je velké množství speciálního vybavení, bez kterého by specifické měření nebylo možné provést. [12]

3.3.1 Měřicí přijímač

Jedná se o nejdůležitějším zařízení pro měření a následné vyhodnocení elektromagnetických signálů. Funguje na podobném principu jako spektrální analyzátor, který se vyznačuje tím, že přijímá signál v celé šířce pásma a poté za pomoci Fourierovy transformace počítá aktuální spektrum. Nevýhoda spektrálního analyzátoru se projeví v případě, převládá-li v přijímaném signálu jedna frekvence. V tomto případě se může stát, že dojde k přebuzení vstupu a ostatní složky signálu zaniknou v šumu. [12]

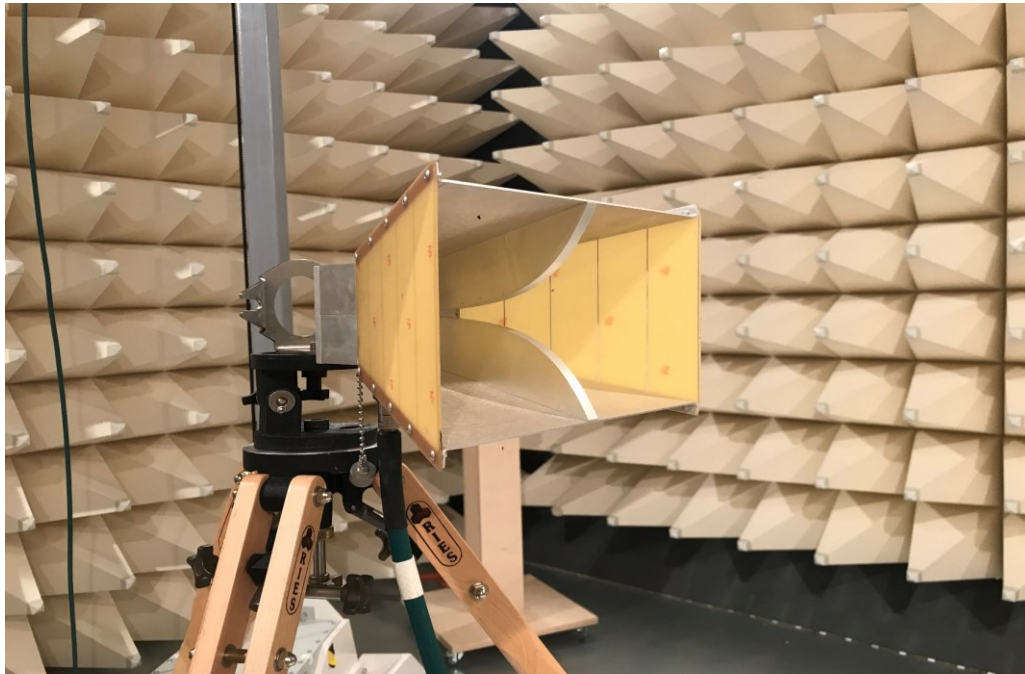
Nedostatky spektrálního analyzátoru řeší měřicí přijímač tím, že přijímá pouze nastavenou výseč frekvenčního pásma. Kdy nastavení výseče je dáno příslušnými normami. Výstupy přijímače jsou demodulovány a vyhodnoceny přepínatelnými detektory. Výsledná naměřená hodnota je dána nastavením detektoru a časového průběhu signálu. [12]

Součástí měřicího přijímače jsou měřicí(přijímací) antény, existuje velké množství používaných antén.

Tab. 1 Tabulka měřících antén, Modifikováno autorem z: [15]

Druh antény	Rozsah kmitočtů
rámová (smyčková) anténa	9 kHz - 30 MHz
prutová anténa (monopól)	9 kHz - 30 MHz
symetrické (laděné) dipóly	30 MHz - 1000 MHz
Bikónická anténa	20 MHz - 300 MHz
logaritmicko-periodická anténa	200 MHz - 3000 MHz
kónicko-logaritmická anténa	200 MHz - 3000 MHz
složená širokopásmová anténa	30 MHz - 2000 MHz
trychtýřové antény	1 GHz - 40 GHz

Ovšem pro naše účely bude dostačující použití trychtýřové antény zachycené na *Obr. 10*, která je označována jako HL 906 a její frekvenční rozsah je od 1 GHz do 16 GHz. Princip trychtýřové antény byl již popsán ve druhé kapitole. [12]



Obr. 10 Měřicí trychtýřová anténa HL 906

3.3.2 Generátor VF signálů

Generátor vysokofrekvenčních signálů využíváme při generování zkušebních signálů, které využíváme při zkouškách odolnosti vůči vysokofrekvenčnímu poli a zkouškách odolnosti vůči vysokofrekvenčnímu rušení indukovanému elektrického vedení. [12]

Všechny zkoušky prováděné vysokofrekvenčním generátorem signálů jsou specifikovány normami ČSN EN 61000-4-3 a ČSN EN 61000-4-6. [12]

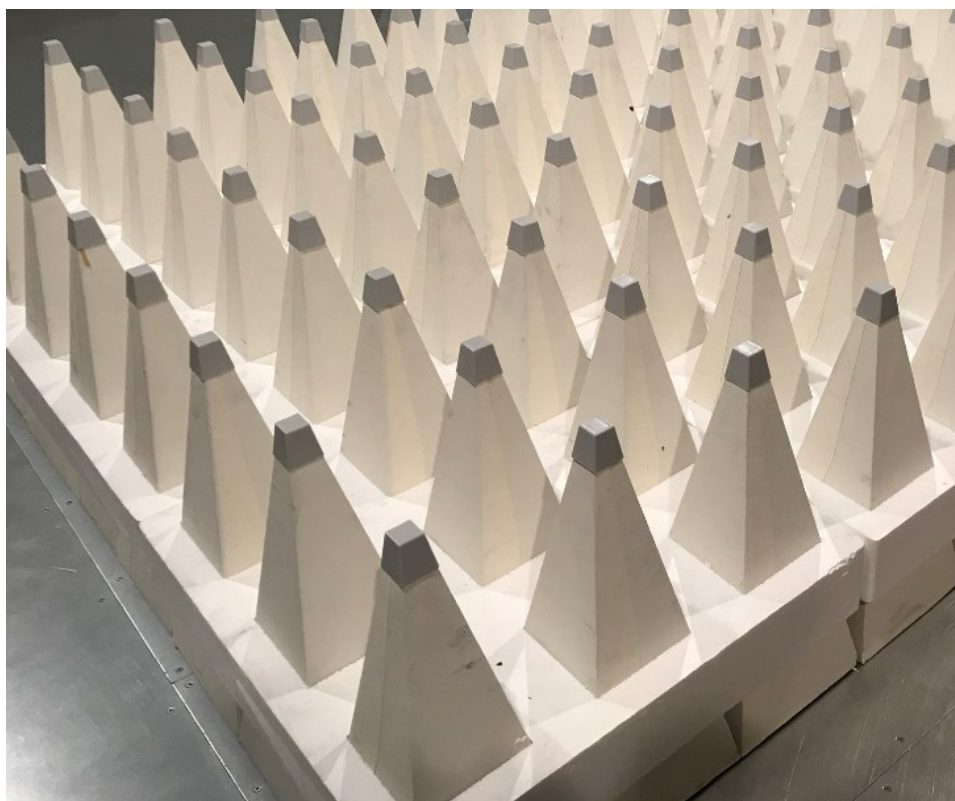
Pro úspěšné měření je potřeba doplnit generátor potřebným příslušenstvím mezi které patří výkonové zesilovače, antény či proudové sondy. [12]

Každý vf generátor musí umožňovat nastavení amplitudové modulace vysokofrekvenčních signálu. [12]

3.3.3 Dielektrické absorbéry

Hlavním úkolem absorbérů (*Obr. 11*) je tlumení elektromagnetické vlny, která naráží na stěnu absorbérů a díky grafitovým či feritovým přísadám obsažených v jeho stěnách, dochází v ideálním případě k pohlcení celé elektromagnetické vlny. Tvar absorbérů také napomáhá k pohlcení záření. Nejčastější tvar absorbérů je jehlan či pyramida, které prodlužují konečnou absorpční trasu zachycené vlny. [12]

V důsledku eliminace záření s vysokým vyzařovacím výkonem může docházet k zahřívání samotných absorbérů, proto je důležité, aby tyto pohlcovače záření byly tepelně odolné, ale zároveň měly malou hmotnost, z důvodu časté manipulace. Kvůli hmotnosti se nejčastěji používá tvrzené polyuretanové pěny. [12]



Obr. 11 Dielektrické absorbéry

Absorbéry pokrývají všechny stěny, strop a podlahu bezodrazové komory. [12]

3.3.4 Otočný stůl

Jedná se o speciální dřevěný stůl s nízkým obsahem vlhkosti, sestavený bez použití kovových spojovacích materiálů. Ty by totiž mohly negativně ovlivnit výsledek měření. [12]

Celý stůl je umístěn na otočném kruhu, díky čemuž je možné měřit vyzařovací charakteristiky v rozsahu 360°. [12]

3.3.5 Konzole a stativy

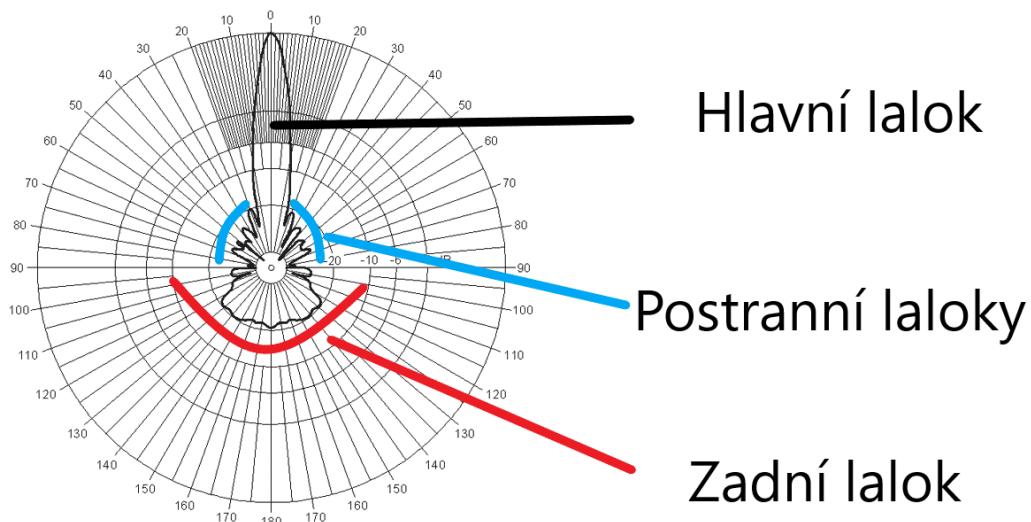
Stativ slouží k umístění antén do stejné výškové hladiny, aby nedocházelo odrazům a stojatým vlnám.

Jelikož se snažíme co nejvíce přiblížit reálnému prostředí, pro měření používáme příslušenství, které se standardně montuje v anténní praxi.

V našem případě jde o kovový stativ, který znázorňuje anténní stožár a konzoly.

4 VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY

Jelikož v některých případech nestačí nebo by bylo velmi složité korektně vyjádřit všechny parametry anténního zařízení. Často výrobce ke svým produktům přikládá i graficky znázorněné parametry vyzářovací charakteristiky. Tyto parametry jsou v ideálním případě výsledkem reálného měření a hodnoty tohoto měření jsou vyneseny do kruhového polárního grafu, který je znázorněn na *Obr. 12*. [16]



Obr. 12 Graf vyzářovací charakteristiky, Modifikováno autorem z: [16]

4.1 Popis grafu vyzářovací charakteristiky

Hlavní kruhová osa grafu (*obr. 12*) reprezentuje prostor kolem antény v úhlu 360° a přímky vedoucí kolmo z kruhové osy ke středu znázorňují intenzitu vyzářovaného signálu udávanou v dBm. [16]

Z funkčního hlediska nás v grafu zajímají pouze tři části vyzářovací charakteristiky:

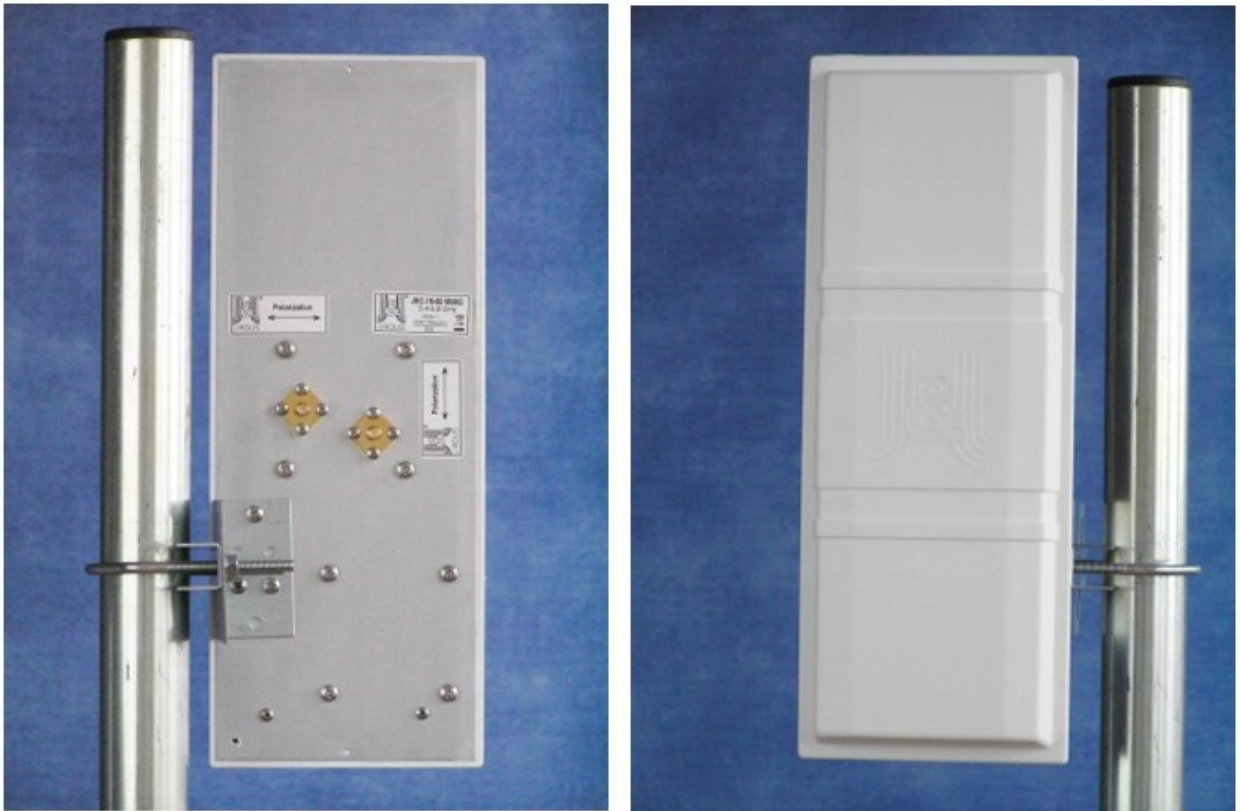
- Hlavní lalok – Jedná se o nejdůležitější a nejdominantnější část charakteristiky, která by měla mít co nejvyšší intenzitu signálu. Určujeme podle něj typ a použití antén.
- Postranní lalok – Tímto názvem jsou označovány všechny defekty charakteristiky, které nesouvisejí s hlavním lalokem. Jsou nežádoucí a podle jejich intenzity signálu se určuje kvalita antén.
- Zadní lalok – Stejně jako u postranního laloku, se jedná o nežádoucí část charakteristiky a výrobce se snaží o její eliminaci. Obvykle se nachází 180° za hlavním lalokem.

5 ANTÉNY PRO MĚŘENÍ

Pro měření vyzařovacích charakteristik byly vybrány dvě sektorové antény. Na kterých budeme porovnávat jednotlivé vyzařovací parametry.

V této kategorii jsem vybral antény od dvou různých výrobců a ve dvou různých provedeních. Jedná se o sektorovou anténu od výrobce Jirous s označením JSC-16-60 MIMO a sektorovou anténu v provedení horn od výrobce RF ELEMENTS s označením Horn Gen2 TP-S60. [17,18]

5.1 Jirous JSC-16-60 MIMO



Obr. 13 Pohled na sektorovou anténu Jirous JSC-16-60 MIMO, Modifikováno autorem z: [17]

Jedná se o dvoupolarizační sektorovou anténu s vertikální a horizontální polarizací, anténa má integrovanou přepěťovou ochranu a podle výrobce je vhodná do zarušené oblasti. [17]

Anténa je vybaveny dvojicí RSMA konektorů v zadní části, které slouží k připojení vř generátoru. Odstínění v zadní části zajiřtuje hliníkový plech, který eliminuje vytváření zadních laloků. [17]

Vyzařovací úhel uvedené anténní jednotky je 60°, díky čemuž se výborně hodí k vyrývání obydlených oblastí. [17]

5.1.1 Technické parametry

Frekvenční pásmo: 5,4 - 5,85 GHz

Zisk: 16,0 dBi \pm 0,6

PSV: \leq 1,5

Vyzařovací úhel :

- v azimutu -3dB 60°
- v azimutu -6dB 90°
- v elevaci -3dB 8,5°

Izolace mezi vstupy: 30 dB

Druhy konektorů: R - SMA, N - Female

Provedení konektorů: zlacený kontakt, dielektrikum PTFE (Teflon®)

Lepení krytů: technologie "Di-Fix" - doživotní záruka pevnosti

Rozměry (bez konektoru): 128 x 326 x 30 mm

Kryt: UV stabilizovaný plast ABS

Záda: plech z hliníkové slitiny + galvanický povlak

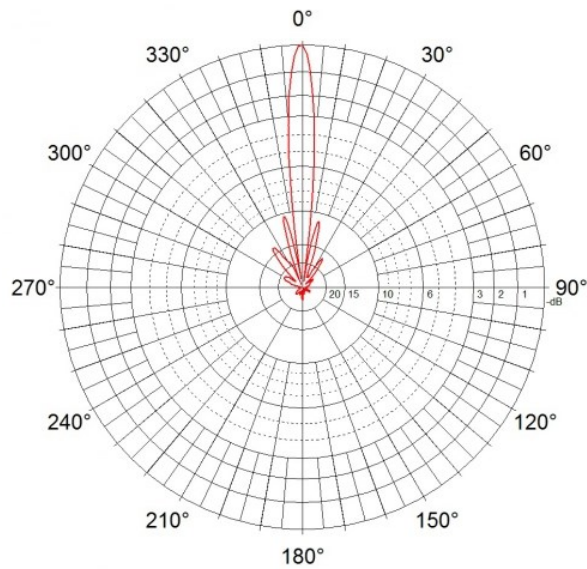
Držák na stožár: \varnothing 19 - 54 mm, plynule nastavitelný oběma směry

[17]

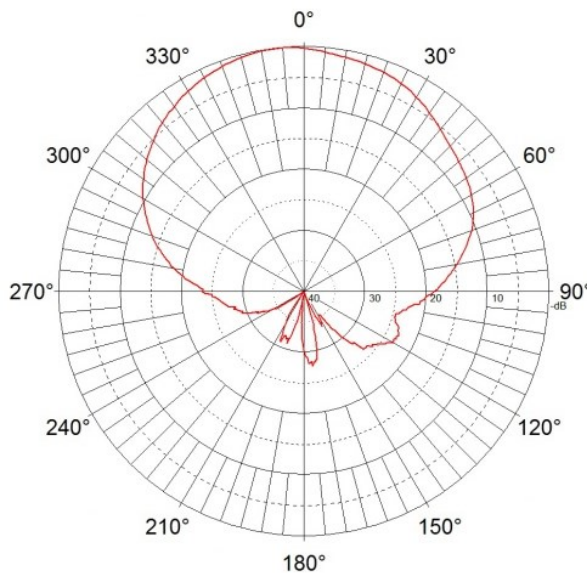
5.1.2 Vyzařovací charakteristiky

Výrobce na svých stránkách zveřejňuje vyzařovací charakteristiky v horizontální i vertikální polarizaci. Podle tvaru charakteristik, lze usoudit, že vyobrazené charakteristiky jsou výsledkem reálných měření.

Na *Obr. 14 a 15* můžeme pozorovat úzký hlavní lalok, který je u panelových sektorových antén obvyklý. Dále se objevují mírné defekty v postranním a zadním vyzařovacím laloku. Výrobce provedl měření ve vertikální i horizontální polarizaci, při postavení antény elevaci.[17]

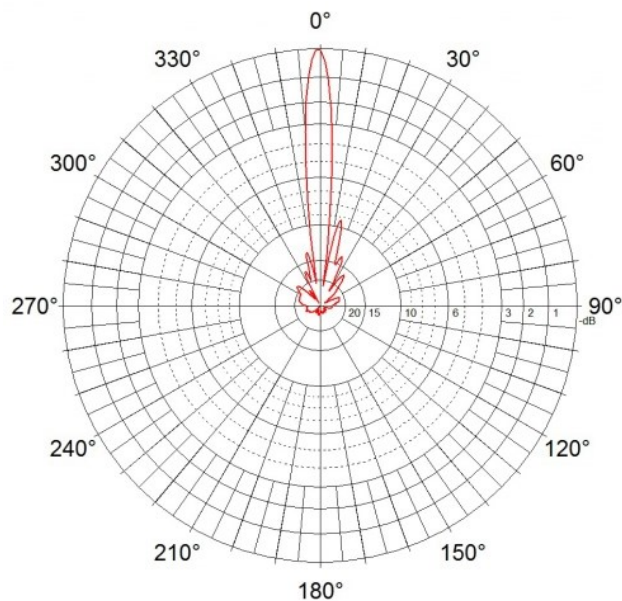


Obr. 15 Horizontální vyzařovací charakteristika v elevaci [17]



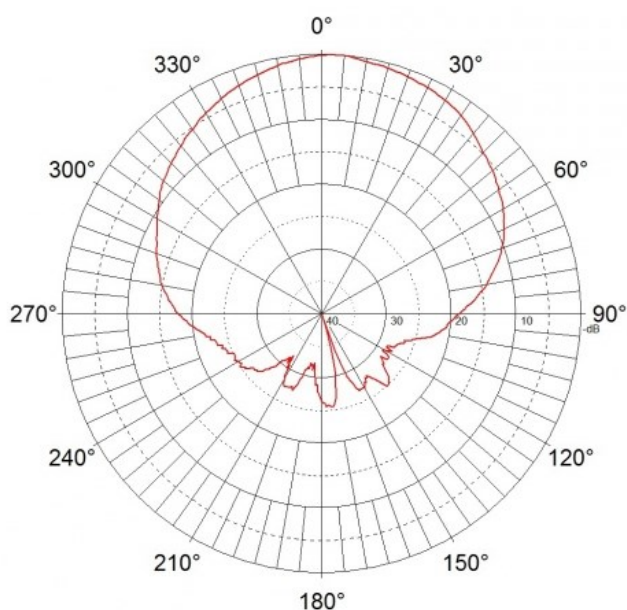
Obr. 14 Horizontální vyzařovací charakteristika v azimutu [17]

Vyzařovací charakteristika, kterou výrobce udává ve vertikální a horizontální polarizaci, při postavení antény v azimutu může vidět na *Obr. 16 a 17*. [17]



Obr. 16 Vertikální vyzařovací charakteristika v elevaci [17]

Zde je na grafu (*Obr. 17*) znázorněn téměř symetrický oválný hlavní lalok, který zasahuje až do zadního laloku doplněn o mírné anomálie v zadní části charakteristiky. Charakteristika vyobrazuje očekávané hodnoty, které požadujeme u antén sektorového typu. [17]



Obr. 17 Vertikální vyzařovací charakteristika v azimutu [17]

5.2 RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60



Obr. 18 Pohled na anténu RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60 a Twistport TPA-SM, Modifikováno autorem z: [18]

Jedná se o symetrickou sektorovou anténu typu Horn, což je anténa kruhového tvaru s postupně se zužujícím vlnovodem. Podle výrobce jsou jejich antény dokonalým anténním zařízením, který eliminuje slabiny dosavadních anténních technologií. [18]

Mezi zdokonalení patří potlačení zadních a postranních laloků. Symetrické antény mají jeden hlavní lalok kruhového tvaru, který je v horizontální i vertikální polarizaci stejný. Což umožňuje nasazení většího počtu antén na jednom vysílači, aniž by docházelo k vzájemnému ovlivňování okolních antén nežádoucím rušením. [18]

Jelikož anténa jako taková je pouze vlnovodem, je potřeba ji osadit vhodným adaptérem, který bude reprezentovat funkci ozařovače ve vertikálním a horizontálním směru. Výrobce nazývá adaptér TwistPortem. [18]

Pro naše účely byl vybrán nejvíce vyhovující TwistPort s názvem TPA-SMA. Tento je vybaven dvojicí RSAM konektorů pro připojení vř generátoru. RSMA typ propojovacích konektorů byl pro naše účely nejvhodnější, jelikož nebylo potřeba speciálních redukcí na propojení antény a generátoru. Vyzařovací úhel antény je 60°. [18]

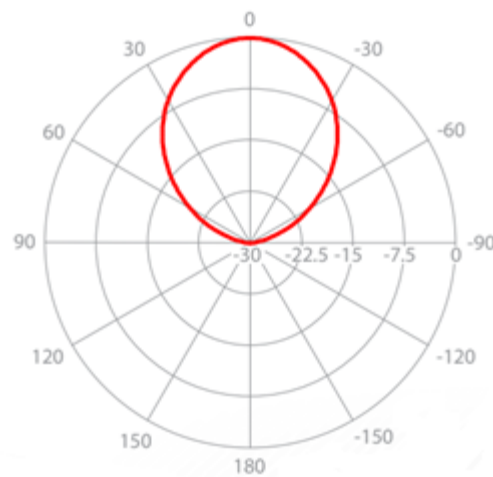
5.2.1 Technické parametry antény a twistportu

Frekvenční pásmo:	5,18 – 6,4 GHz
Zisk:	13,2 dBi
Vyzařovací úhel :	
• v azimutu -3dB	H 41°/V 41°
• v elevaci -3dB	H 41°/V 41°
• v azimutu -6dB	H 60° / V 60°
• v elevaci -6dB	H 60° / V 60°
Izolace mezi vstupy:	32 dB
Druhy konektorů:	R - SMA
Provedení konektorů:	zlacený kontakt
Rozměry (bez konektoru):	128 x 326 x 30 mm
Kryt:	UV stabilizovaný plast ABS, Polycarbonát, Polypropylene, Hliník, Nerezová ocel
Záda:	plech z hliníkové slitiny + galvanický povlak
Držák na stožár:	ø 30 - 80 mm, s plynule nastavitelný oběma směry

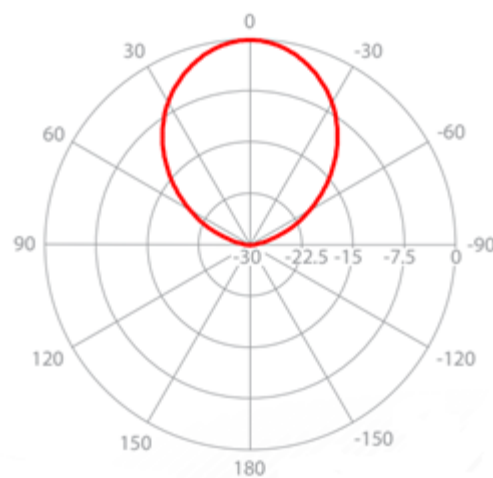
5.2.2 Vyzařovací charakteristika

Jak již bylo uvedeno výše při popisu antény, výrobce zaručuje potlačení postranních a zadních vyzařovacích laloků. Tento fakt je vyobrazen i na vyzařovacích charakteristikách zobrazených na *Obr. 20 a 21*. Je zde vidět, že obě polarizace jsou vertikální i horizontální směru naprosto totožné, bez poruch v hlavním vyzařovacím laloku. [18]

Podle tvaru charakteristiky, se nejspíše nebude jednat o vyzařovací charakteristiky, které byli vyhodnoceny reálným měřením, ale jsou spíše simulací teoreticky očekávaných anténních parametrů. [18]



*Obr. 20 Vertikální vyzařovací charakteristika v elevaci i azimutu
Modifikováno autorem z:[18]*



*Obr. 19 Horizontální vyzařovací charakteristika v elevaci i azimutu,
Modifikováno autorem z:[18]*

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI

Úvodem do praktické části je seznámení s měřícím zařízením a laboratorním pracovištěm bezodrazové komory, ve které bude probíhat měření. Veškeré měření bylo prováděno v prostorách Vědecko-technického parku Informační a komunikační technologie Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

6.1 Seznámení se zkušebním pracovištěm a měřícím vybavením

Před samotným měřením došlo k seznámení s měřícím vybavením a zkušebním pracovištěm. Zkušební komora byla reprezentována bezodrazovou komorou Frankonia SAC-3 spolu s měřícím systémem R&S EMC 32. Mezi další vybavení patří měřicí přijímač ESU8 od firmy Rohde & Schwarz, vysokofrekvenční generátor SMR20 také od firmy Rohde & Schwarz SMR20 a měřicí trychtýřová anténa HF 906, která již byla popsána v předchozích kapitolách . [19]

6.1.1 Bezodrazové komory Frankonia

Bezodrazová komora Frankonia SAC-3 spolu s měřícím systémem R&S EMC 32 slouží k měření antén a EMC. Přístrojové vybavení, kterým je komora vybavena, pokrývá obě oblasti EMC-měření elektromagnetické interference (EMI) a testování elektromagnetické odolnosti (EMS). Technické parametry a skupina prováděných EMC testů jsou uvedeny v následujících odstavcích. [19]

6.1.1.1 Parametry komory:

- Vnitřní rozměr bezodrazové komory: délka–šířka–výška (cca. 6,5 x 4,5 x 5,0 metrů)
- Měřicí rozsah pro EMI a EMS (test range): $R = 3$ metry
- Kmitočtový rozsah komory: 26 MHz až 18 GHz
- Stínicí účinnost: $SE \geq 80$ dB (1 GHz)
- Velikost testovaných zařízení: cca. 1 x 1,5 metru pro umístění na stole
- Testování EMI/EMS po vedení: od 150 kHz do 30 MHz (nebo až do 230 MHz)
- Testování EMI/EMS zářením: 9 kHz až 30 MHz (magnetická složka pole)
- 30 MHz až 6000 MHz (intenzita elektrického a magnetického pole)

- Skupina prováděných testů (EMI): EN 55011, 55013, 55014, 55015 a 55022

6.1.1.2 *Přístrojové vybavení pro EMI*

- Vazební síť Rohde-Schwarz ENV216 (230V/16A)
- Vazební proudové transformátory pro monitorování asymetrického rušení na 230V napájecím přívodu(10kHz až do 500 MHz)

[19]

6.1.2 **Měřicí přijímač ESU8 od Rohde-Schwarz**

Vyhodnocení zkušebního měření probíhalo přes měřicí přijímač s označením ESU8 od firmy Rohde-Schwarz. [20]

Parametry přijímače jsou:

- Frekvenční měřicí rozsah od 20 Hz - 8 GHz
- Středová frekvence 100 MHz
- Šířka pásma 120 kHz/6 dB (rozlišovací schopnost) a 10 kHz (mezifrekvenční)
- RF útlum 10 dB/auto
- Referenční úroveň -20 dBm
- Výkonové omezení 100 dB log

[20]

6.1.3 **VF generátoru Rohde & Schwarz SMR20**

Pro generování referenčního vysokofrekvenčního signálu, byl použit generátor od firmy Rohde & Schwarz s označením SMR20.

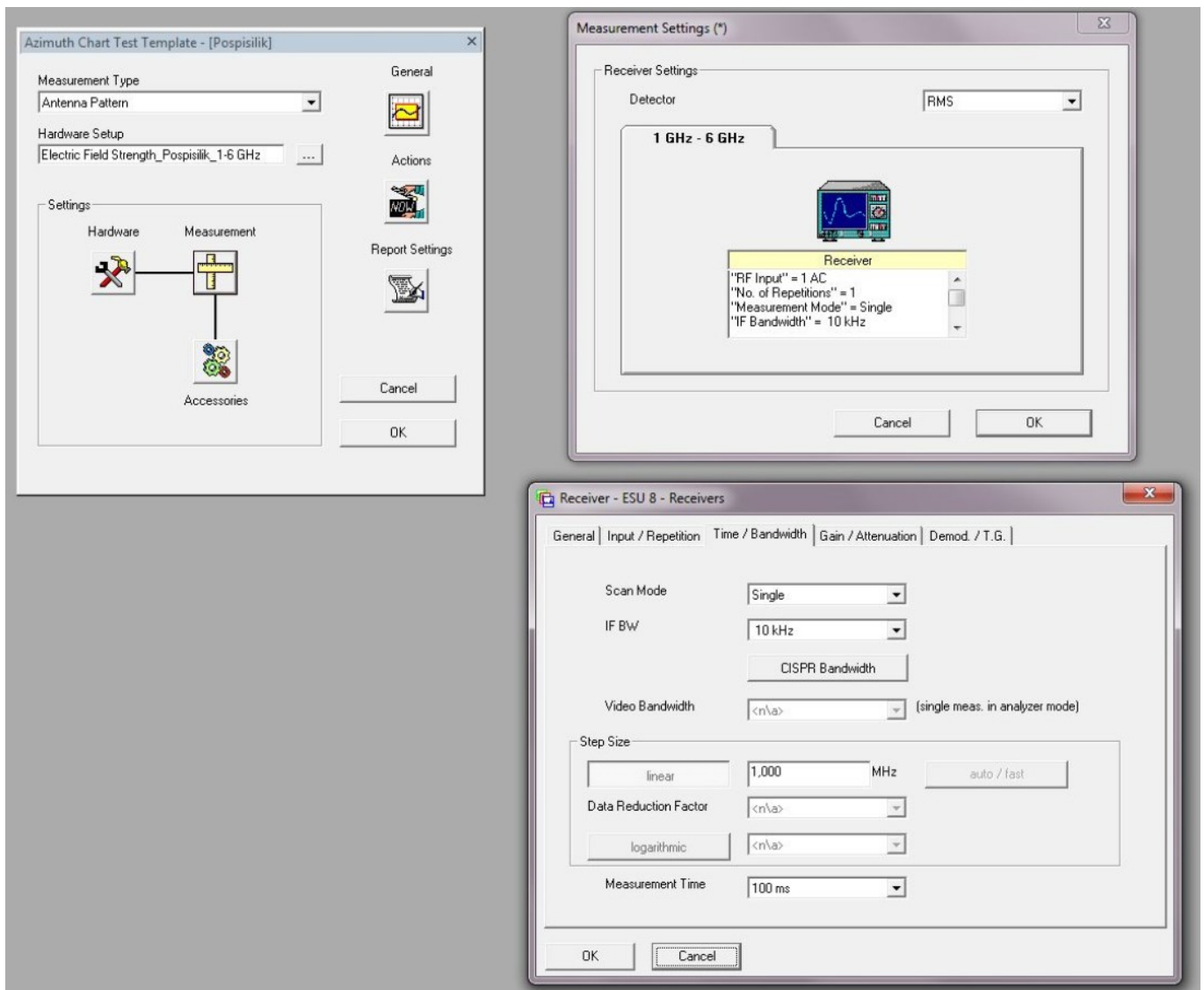
Jehož parametry jsou:

- Frekvenční rozsah od 1 GHz - 20 GHz
- Výkonový rozsah -20dBm až 13 dBm (podle vysílacího módu)
- Rozlišovací schopnost 1 kHz
- Impedance zdroje 50 Ω

[21]

6.2 Nastavení měřicího systému R&S EMC 32

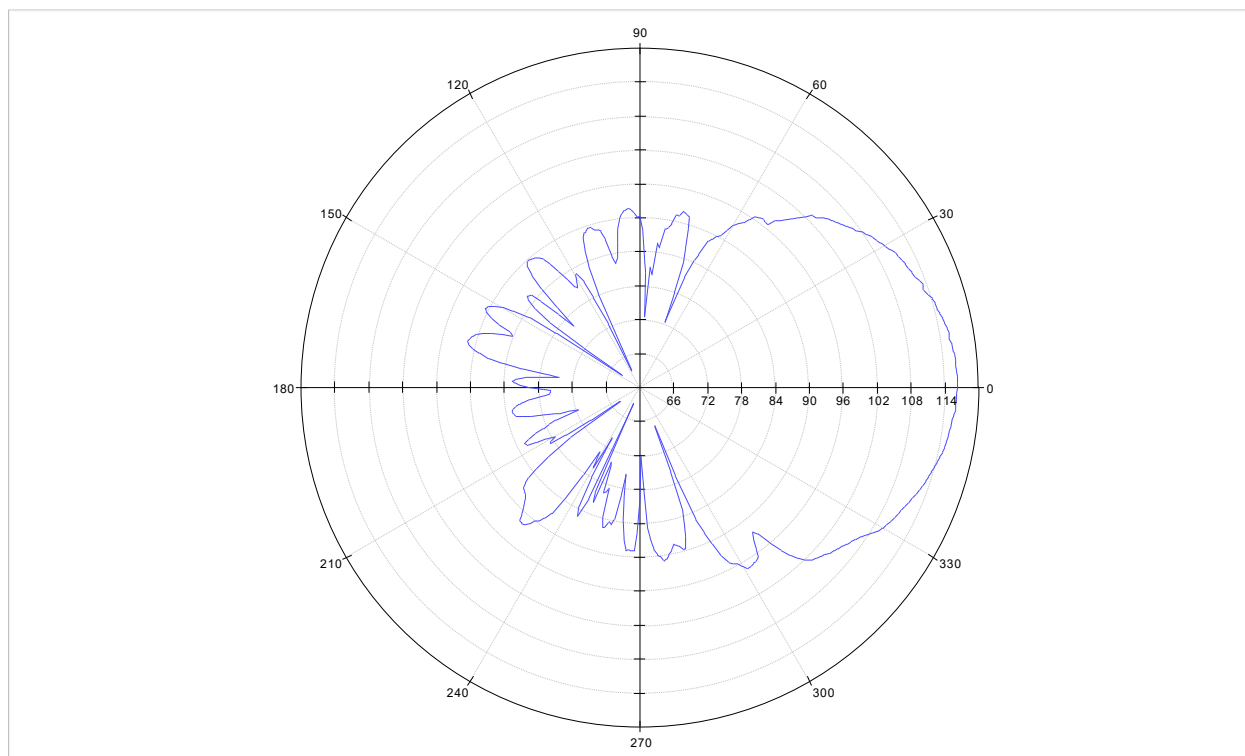
Před samotným měřením bylo nutné nastavit v programu R&S EMC 32 parametry zobrazené na *Obr. 21*, podle kterých budou měřené charakteristiky vyhodnocovány.



Obr. 21 Nastavení měřicího programu R&S EMC 32

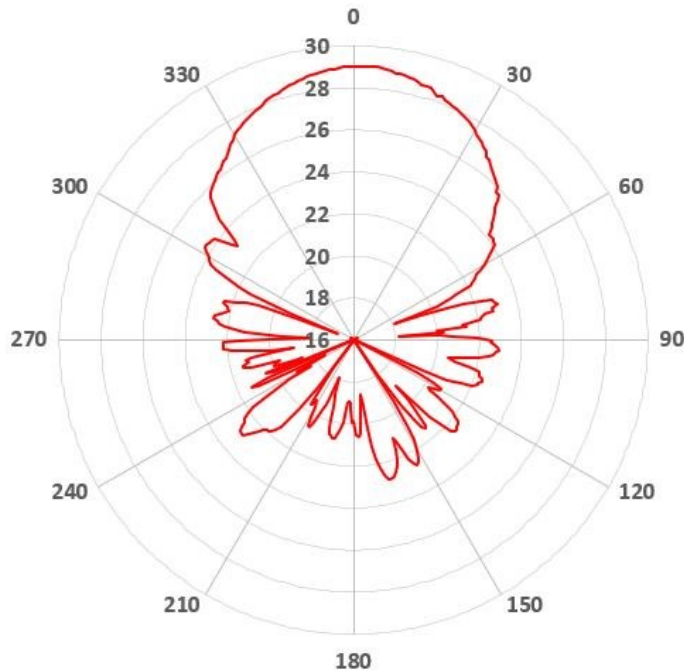
V průběhu měření bylo možné v reálném čase sledovat naměřené hodnoty a tvar vyzařovací charakteristiky (Obr. 22).

Azimuth Chart: Horizontal



Obr. 22 Data vyhodnocená programem R&S EMC 32

Naměřené hodnoty byly uloženy do souborů, ze kterých byly dále zpracovány. Výsledné hodnoty byly dány do poměru 1:4, aby byly při vyhodnocení lépe porovnatelné s referenčními grafy, udávané výrobcí. Zpracované výsledky byly vykresleny do grafu (Obr. 23).



Obr. 23 Změřená a zpracovaná data v poměru 1:4

6.3 Nastavení vf generátoru Rohde & Schwarz SMR20

Při měření vyzářovacích charakteristik byly na vysokofrekvenčním generátoru následující hodnoty, zobrazené i na Obr. 24:

Vyzářovací frekvence: 5,6 GHz

Výstupní výkon generátoru: 10 dBm

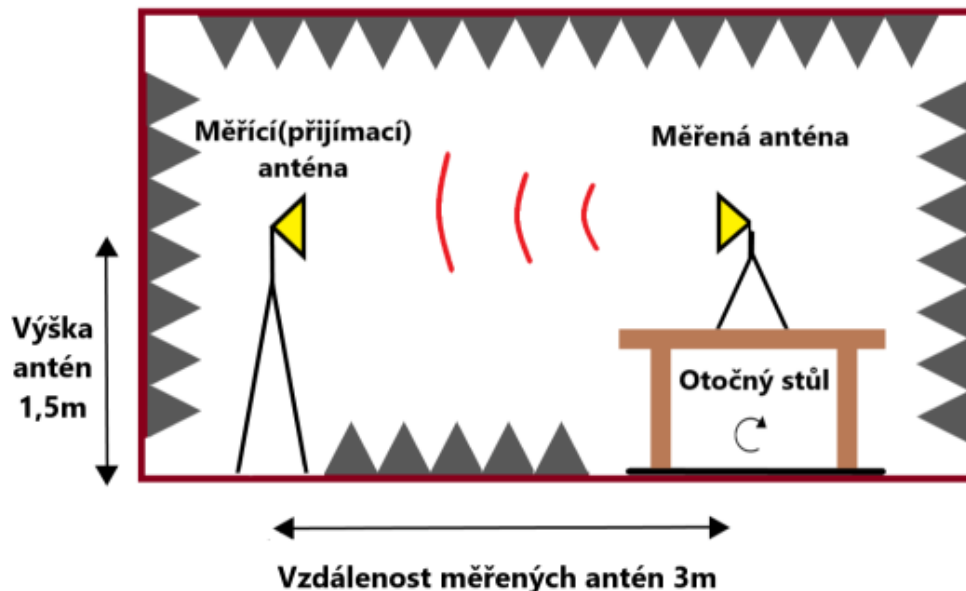


Obr. 24 Nastavení vysokofrekvenčního generátoru Rohde & Schwarz SMR20

6.4 Měření vyzařovacích charakteristik

Měření probíhalo v bezodrazové anechoické komoře znázorněné na *Obr. 25*, která simuluje ideální venkovní prostředí bez jakéhokoliv rušení. Výsledek měření tedy nebude ovlivněn. Stěny, podlaha i strop byly obleženy dielektrickými absorbéry, které pohlcují elektromagnetické vlny.

Přijímací měřicí anténa byla uchycena na dřevěném teleskopickém stativu ve výšce 150 cm. Vysílací anténa byla uchycena na hliníkovém stativu. Pokud bylo třeba, stativ byl doplněn o ocelový výložník, na který se antény standartně montují. Stativ byl umístěn na otočném dřevěném stole, který se v průběhu měření otáčí o 360° v 1° kroku. Vzdálenost mezi vysílací a měřicí anténou byla 3 m, což určuje norma ČSN EN 55016-2-1.



Obr. 25 Náskres měření v bezodrazové komoře

Pro každou z antén bylo třeba provést čtyři měření. U každého měření bylo nutné správné natočení měřené antény k měřicímu přijímači.

S námi vybranými MIMO anténami, které mají Vertikální i Horizontální polarizaci, jsme provedly následující měření:

- Měření Horizontální polarizace v azimutu
- Měření Horizontální polarizace v elevaci
- Měření Vertikální polarizace v azimutu
- Měření Vertikální polarizace v elevaci

6.4.1 Měření RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60

Než-li jsme zahájili měření vyzařovacích charakteristik antény výrobce RF ELEMENTS, bylo nutné vybavit anténu tzv. twist portem, jelikož anténa jako taková je pouze vlnovodem a nedá se připojit k VF generátoru.

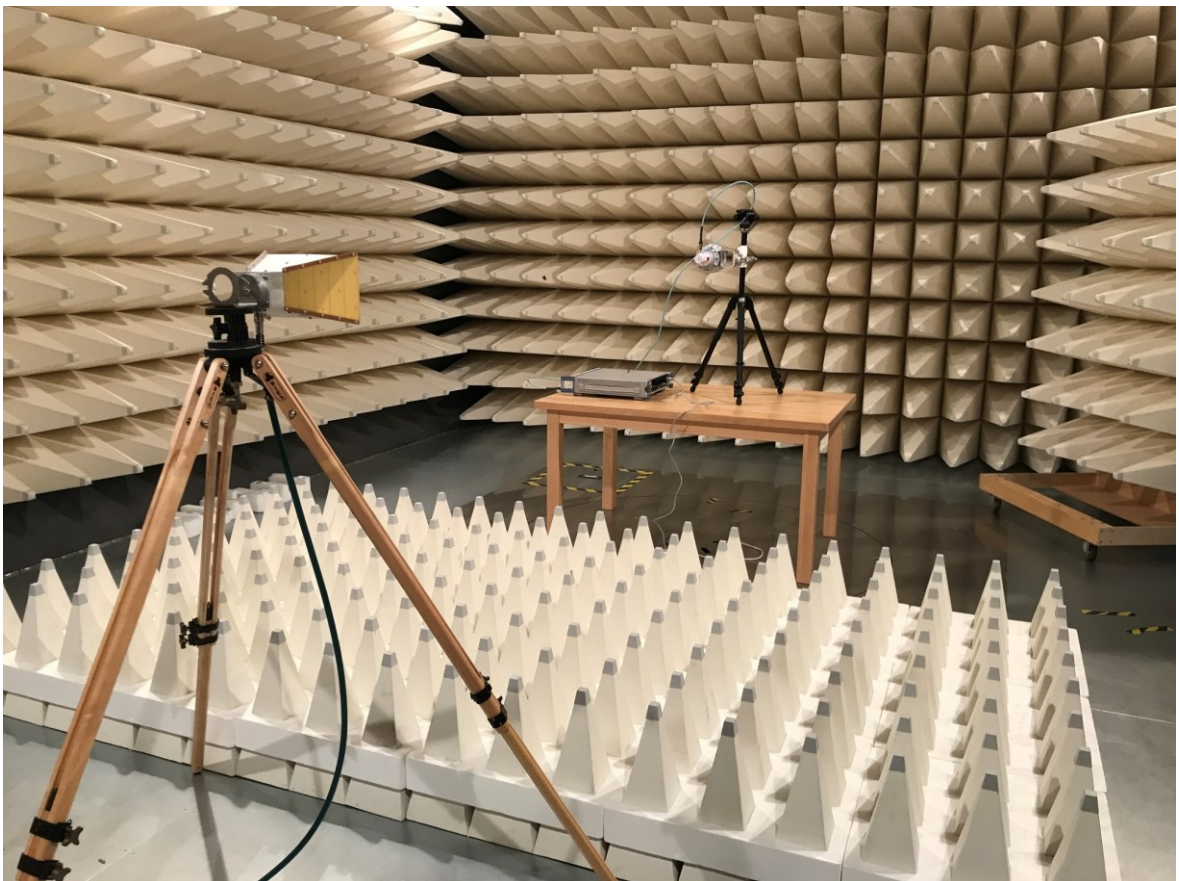
Twistport umožňuje připojení skrze dva RSMA porty, které vyzařují ve vertikálním i horizontálním směru. Výsledné vysílací parametry si určuje sama obsluha, zapojením jednotlivých portů.

Pro naše měření jsme vždy použili jeden z portů a upravili i polohu antény k poloze antény měřícího přijímače.

6.4.1.1 Horizontální polarizace v azimutu

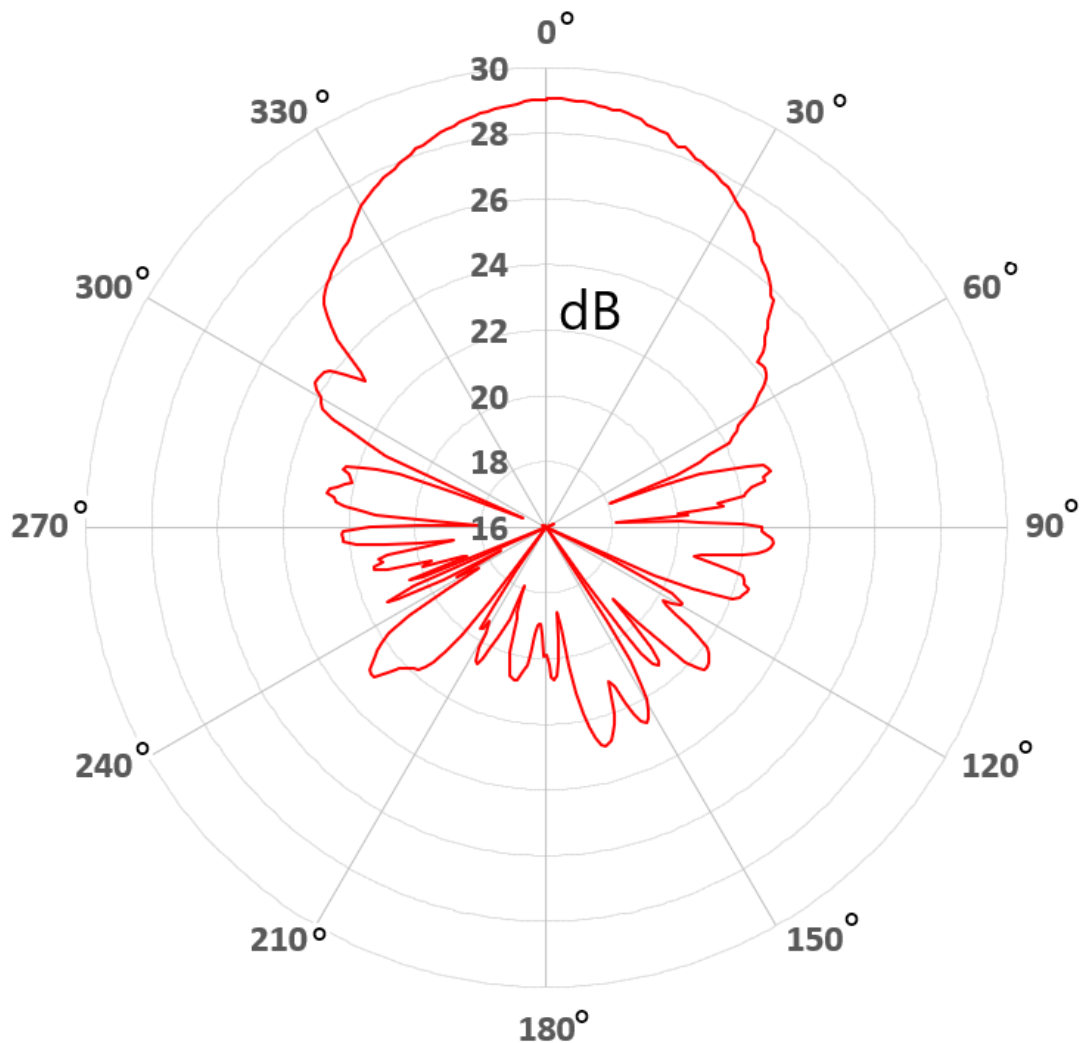
Při měření uvedené vyzařovací charakteristiky byl vysokofrekvenční generátor připojen na port horizontální polarizace antény a montáž antény byla v azimutu.

Situaci vidíme na *Obr. 26*.



Obr. 26 Pozice antén při měření Horizontální polarizace v azimutu pro výrobce RF elements

Z naměřených hodnot byl vytvořen polární graf *Obr. 27*, s vykreslenou vyzářovací charakteristikou.

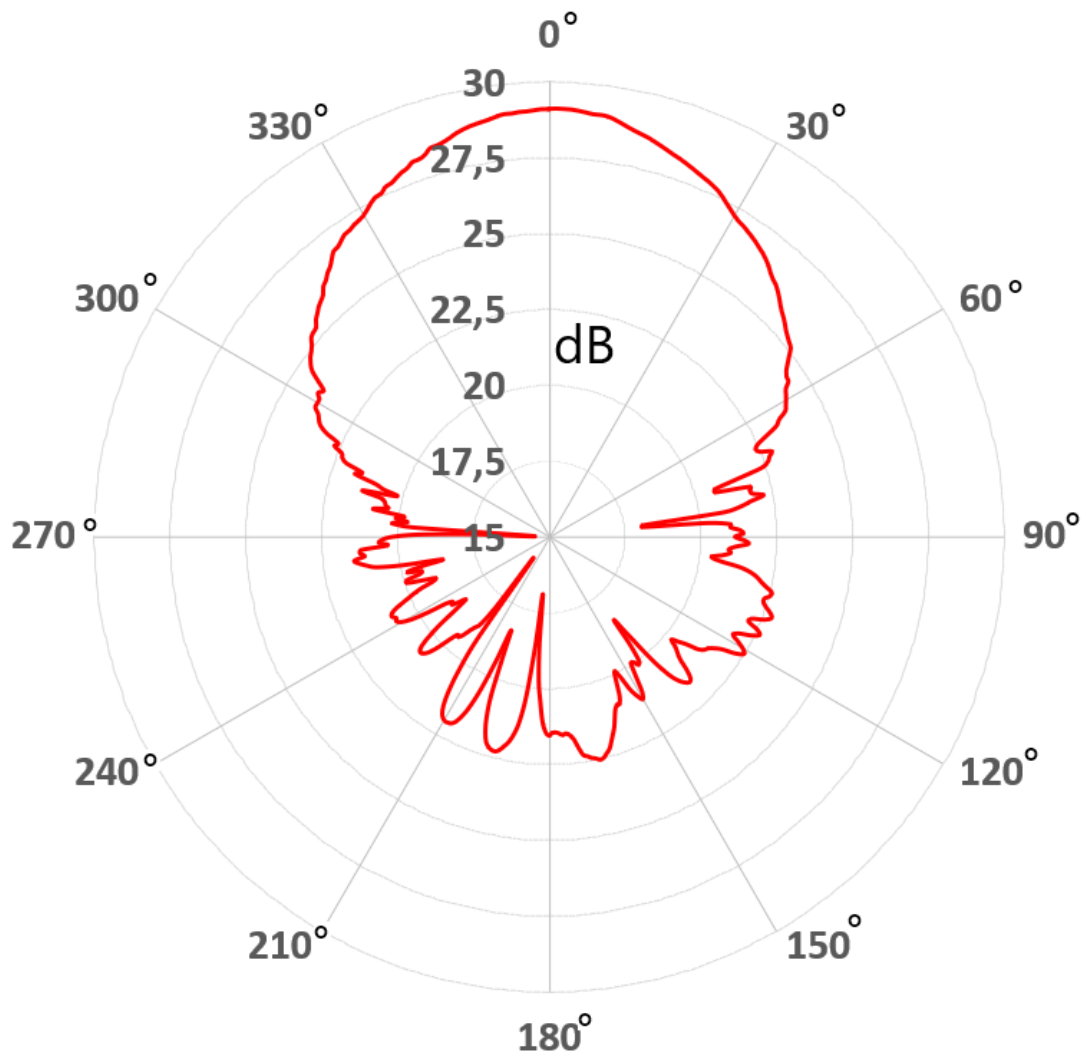


Obr. 27 Vyzářovací charakteristika Horizontální polarizace v azimutu pro výrobce RF elements

Tvar hlavního laloku je téměř symetrický bez výrazných poruch. Přesto, že se výrobce snaží eliminovat výskyt postranních a zadních laloků, v grafu vyzářovací charakteristiky, byly tyto nedostatky při měření zjištěny.

6.4.1.2 Horizontální polarizace v elevaci

Měření vyzařovací charakteristiky horizontální polarizace v elevaci bylo zahájeno připojením vysokofrekvenčního generátoru na port horizontální polarizace antény a anténa byla namontována pro měření v elevaci.

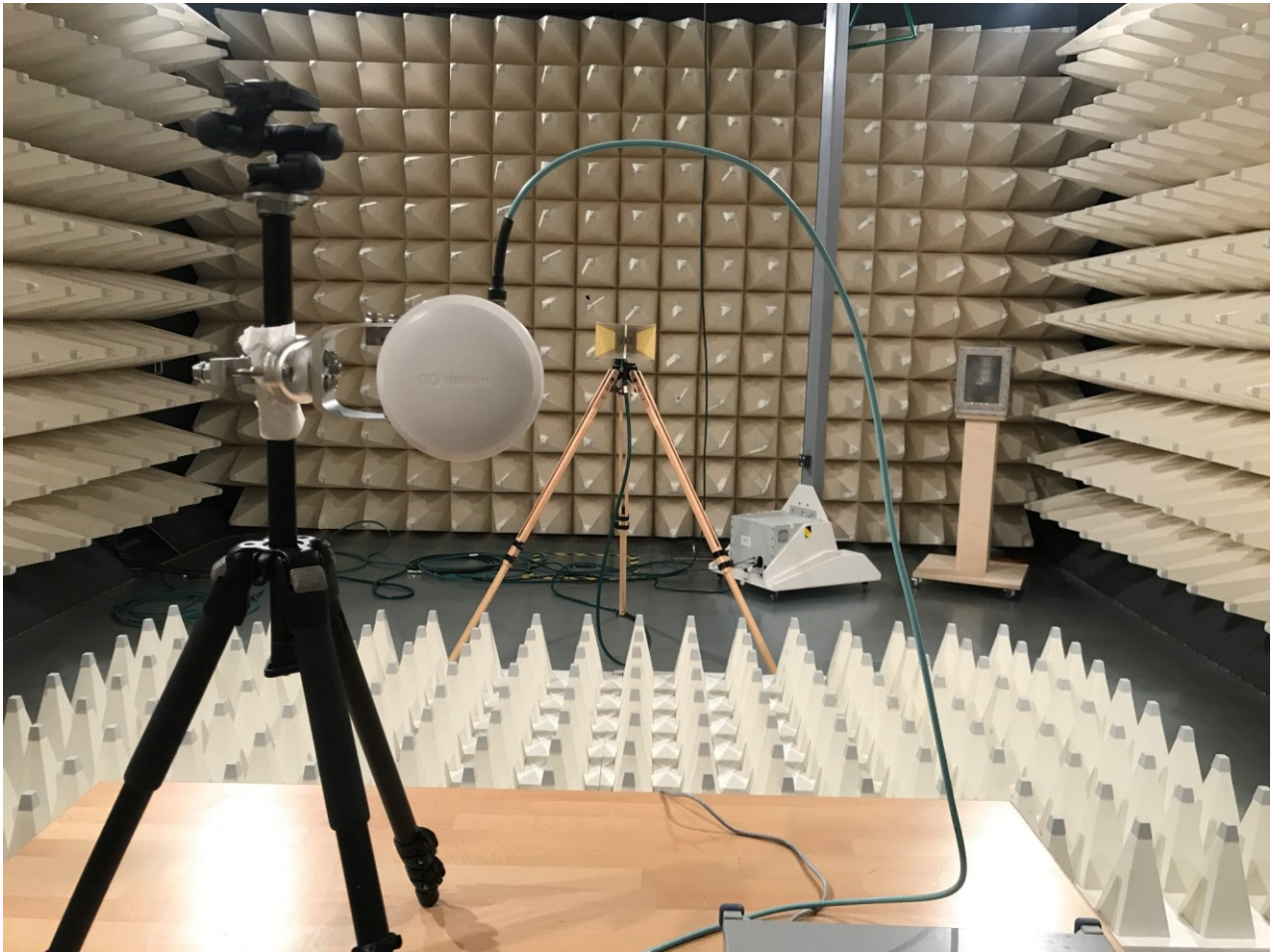


Obr. 28 Vyzařovací charakteristika Horizontální polarizace v elevaci pro výrobce RF elements

Na Obr. 28 je vykreslen vyzařovací diagram z naměřených hodnot.

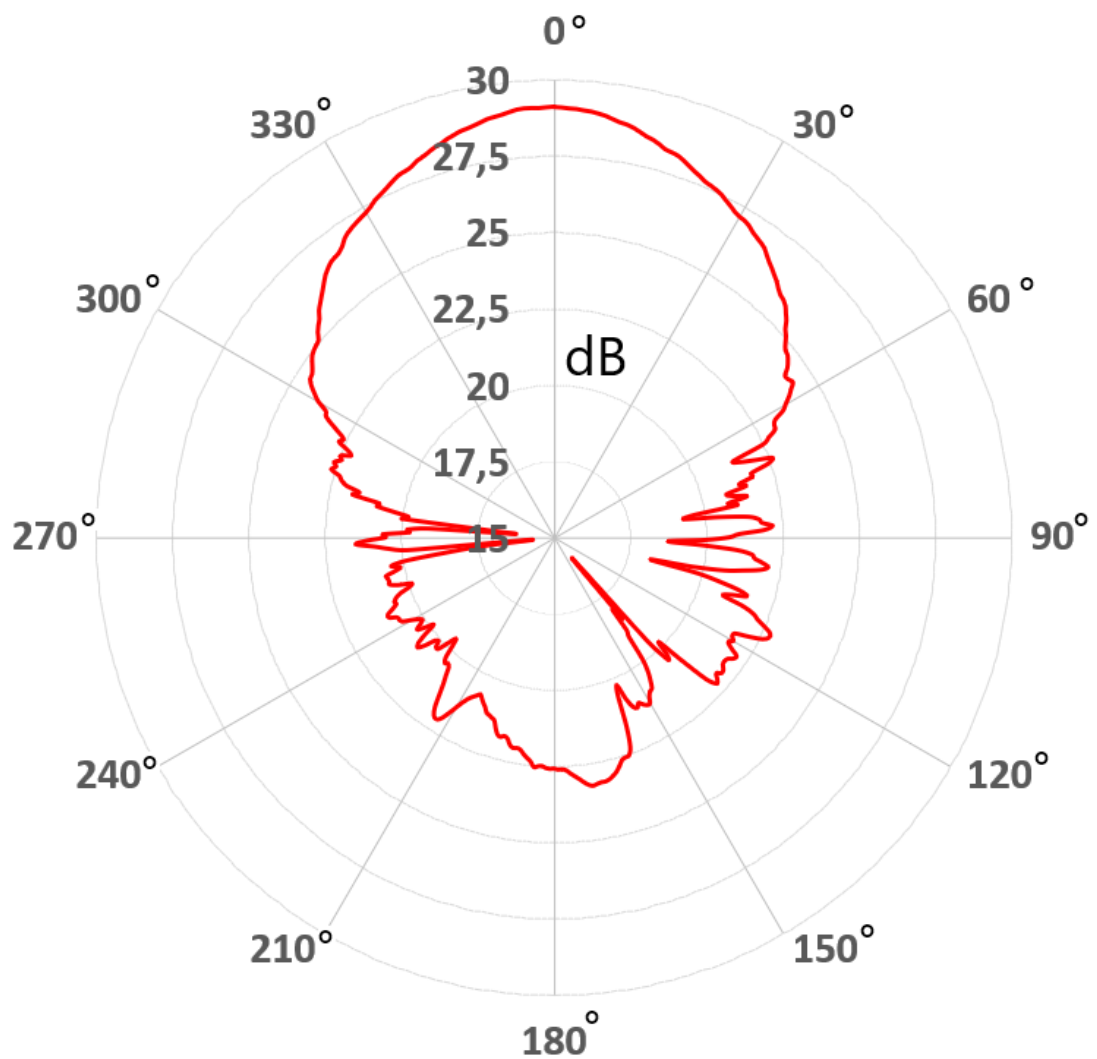
6.4.1.3 Vertikální polarizace v azimutu

Při měření této vyzářovací charakteristiky byl vysokofrekvenční generátor připojen na port horizontální polarizace antény a montáž antény byla v azimutu. Vše je zachyceno na *Obr. 29*.



Obr. 29 Pozice antén při měření Vertikální polarizace v azimutu pro výrobce RF elements

Na Obr.30 je znázorněna vyzařovací charakteristika antény RF elements. Hlavní lalok je oválně symetricky, postranní laloky byly s velmi malou četností a intenzitou. Velmi výrazný je zde zadní lalok, který by mohl být v zdrojem výrazného rušení.

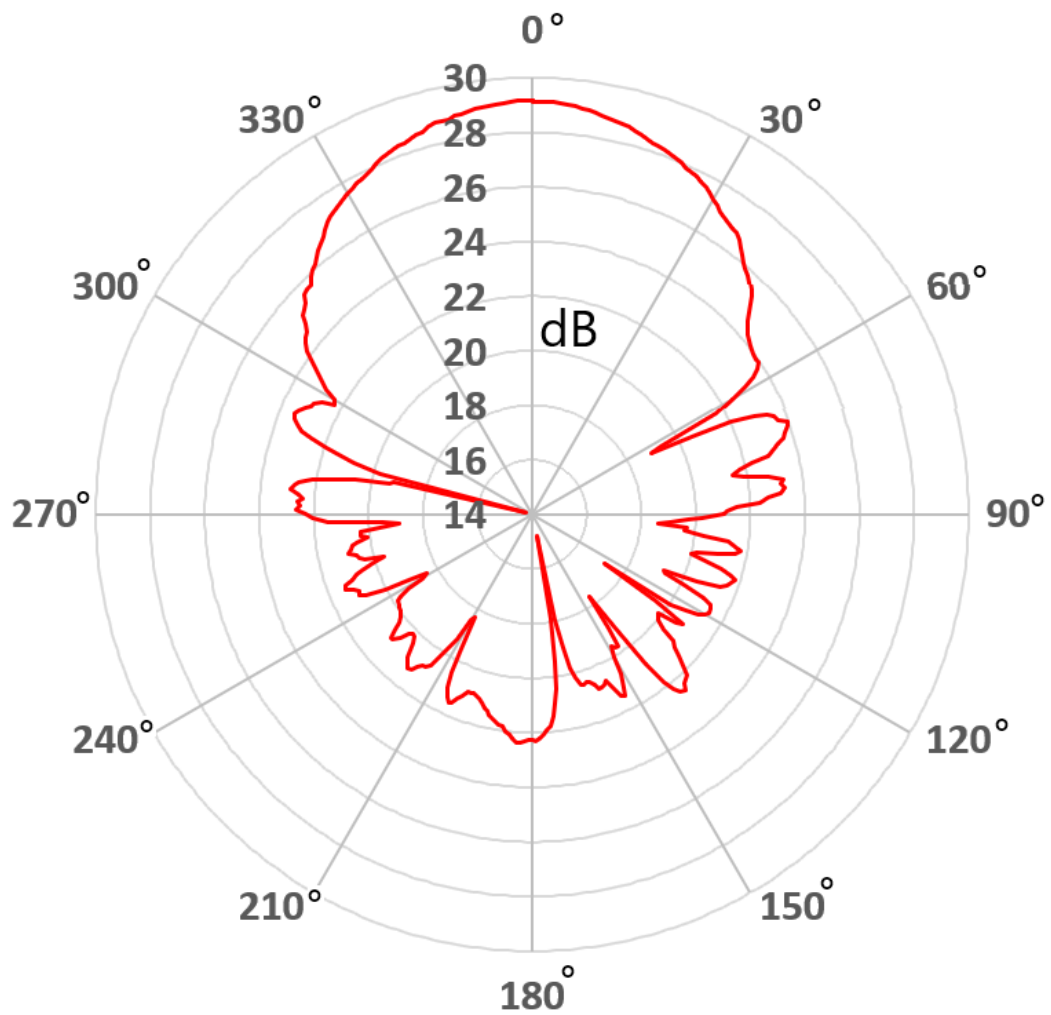


Obr. 30 Vyzařovací charakteristika Vertikální polarizace v azimutu pro výrobce RF elements

6.4.1.4 Vertikální polarizace v elevaci

V tomto nastavení byla anténa namontována v elevaci a port vertikální polarizace byl propojen s generátorem signálů pomocí příslušných koaxiálních kabelů.

Výsledkem měření je charakteristika (Obr. 31).



Obr. 31 Vyzařovací charakteristika Vertikálnípolarizace v elevaci pro výrobce RF elements

6.4.2 Měření Jirous JSC–16–60 MIMO

Sektorová antény s označením JSC–16–60 MIMO od výrobce Jirous, je vybavena dvěma RSMA konektory pro připojení vř generátoru.

Anténa může vysílat samostatně v horizontálním nebo vertikální polarizaci, ale umožňuje vysílání v obou polarizacích zároveň.

Při měření vyzařovacích charakteristik, byla měřena každá polarizace samostatně a z naměřených hodnot sestrojeny grafy.

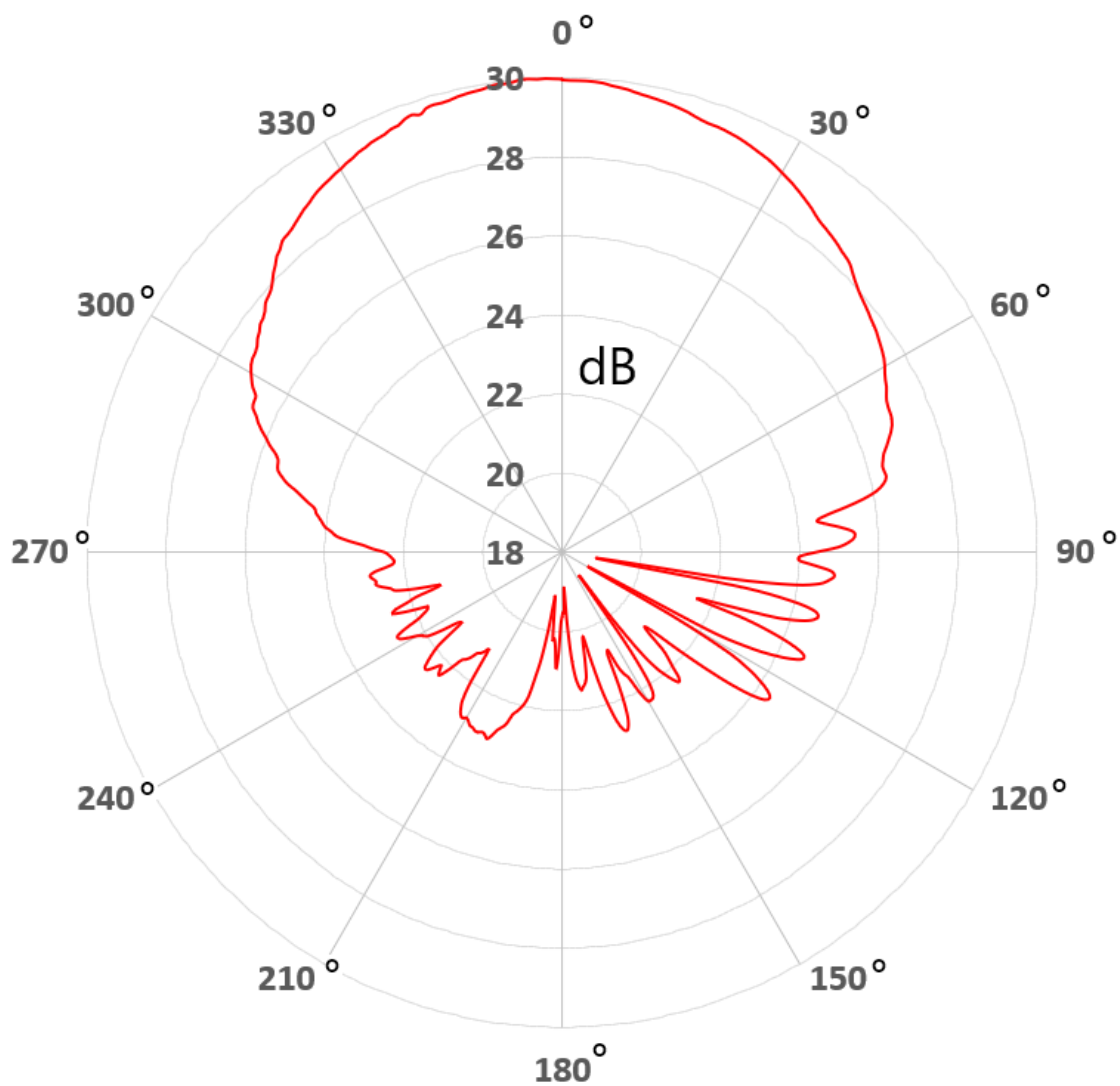
6.4.2.1 Horizontální polarizace v azimutu

Při posouzení anténní vyzařovací charakteristiky sektorové antény JSC – 16 – 60 MIMO byl vysokofrekvenční generátor připojen na port horizontální polarizace antény a montáž antény byla v azimutu. Rozmístění antén v bezodracové komoře zachycuje *Obr. 32*.



Obr. 32 Pozice antén při měření Horizontální polarizace v azimutu pro výrobce Jirous

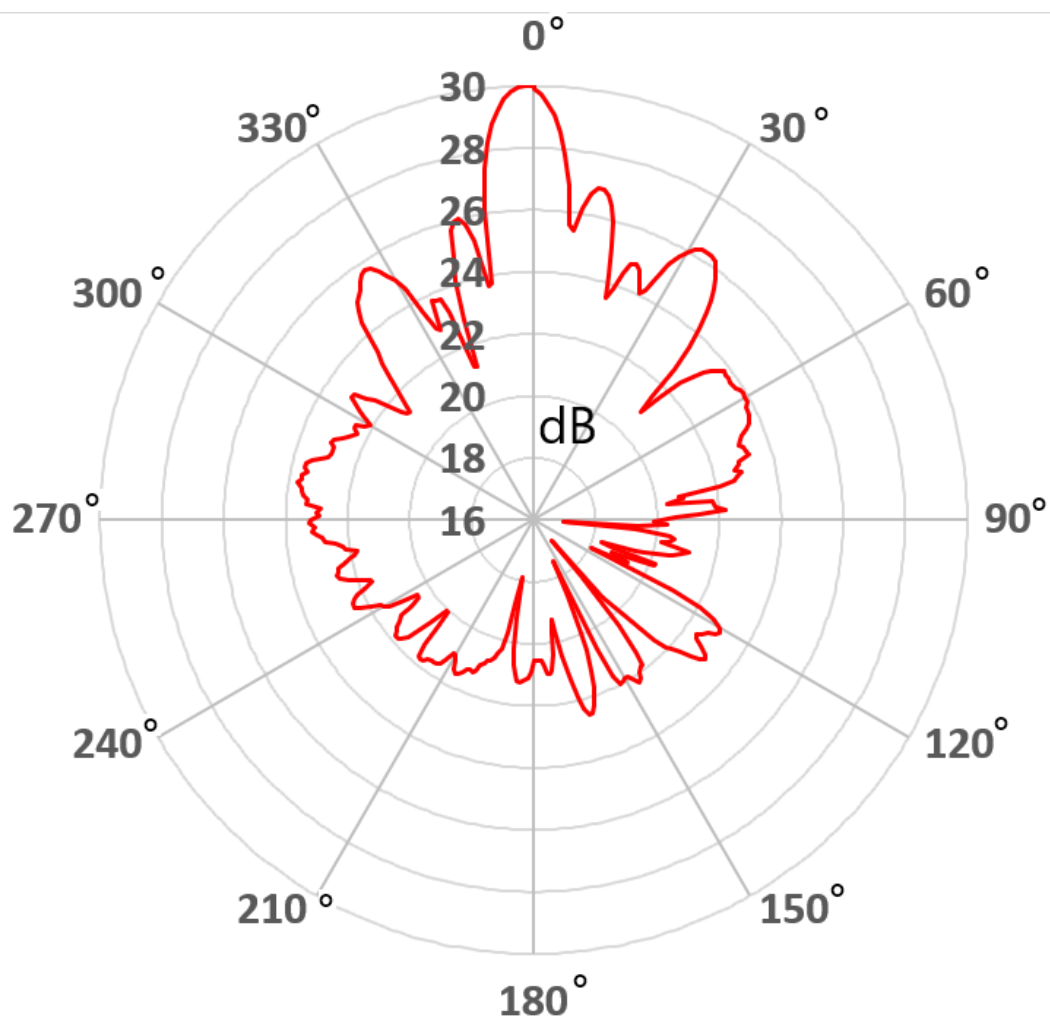
Naměřené hodnoty byly zpracovány a zaneseny do polárního grafu vyzářovací charakteristiky Obr. 33.



Obr. 33 Vyzářovací charakteristika Horizontální polarizace v azimutu pro výrobce Jirous

6.4.2.2 Horizontální polarizace v elevaci

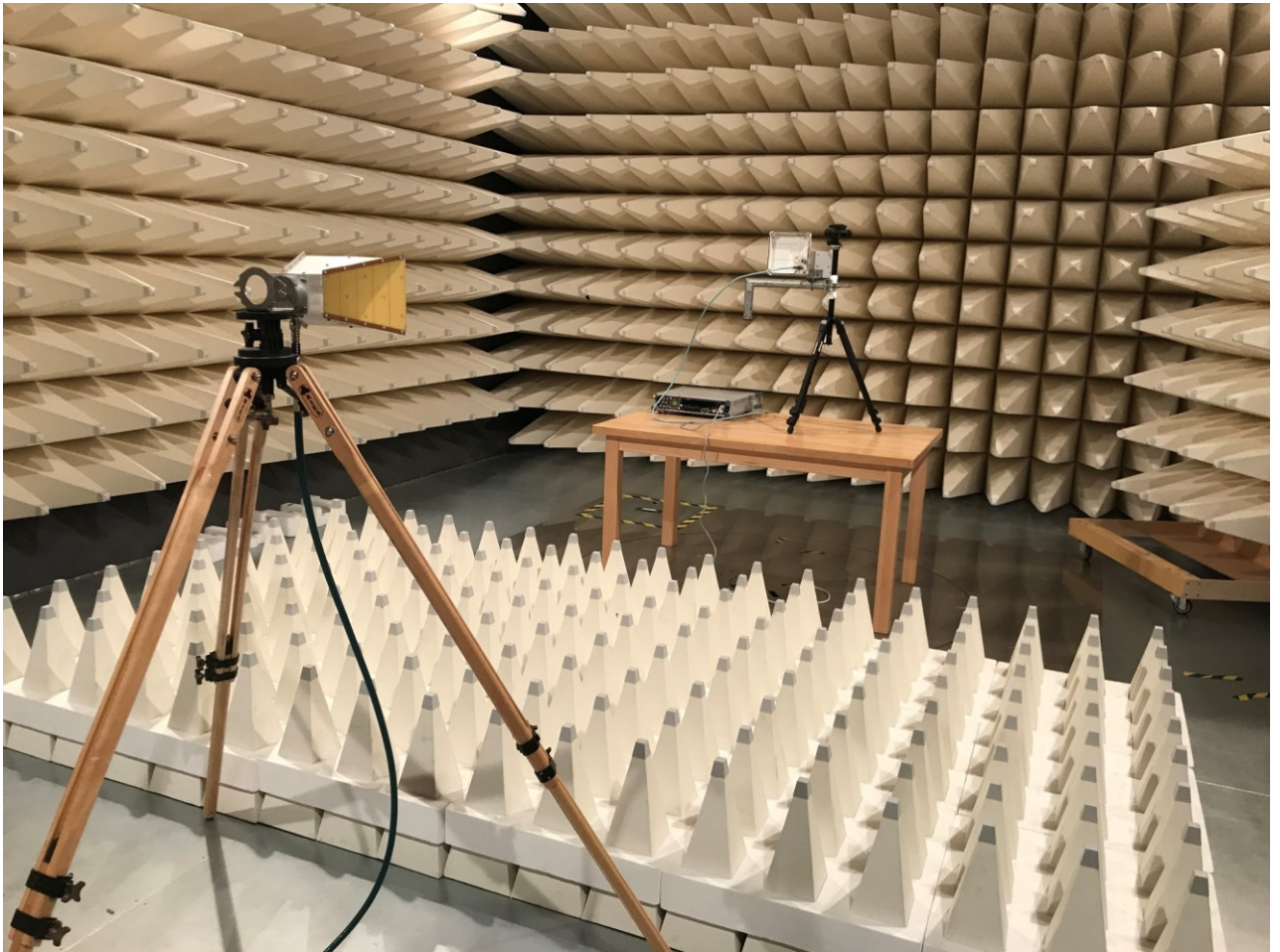
Hodnoty vyzařovací charakteristiky při nastavení antény pro měření v elevaci a využitím portu horizontální polarizace byly vykresleny do grafu *Obr. 34*.



Obr. 34 Vyzařovací charakteristika Horizontální polarizace v elevaci pro výrobce Jirous

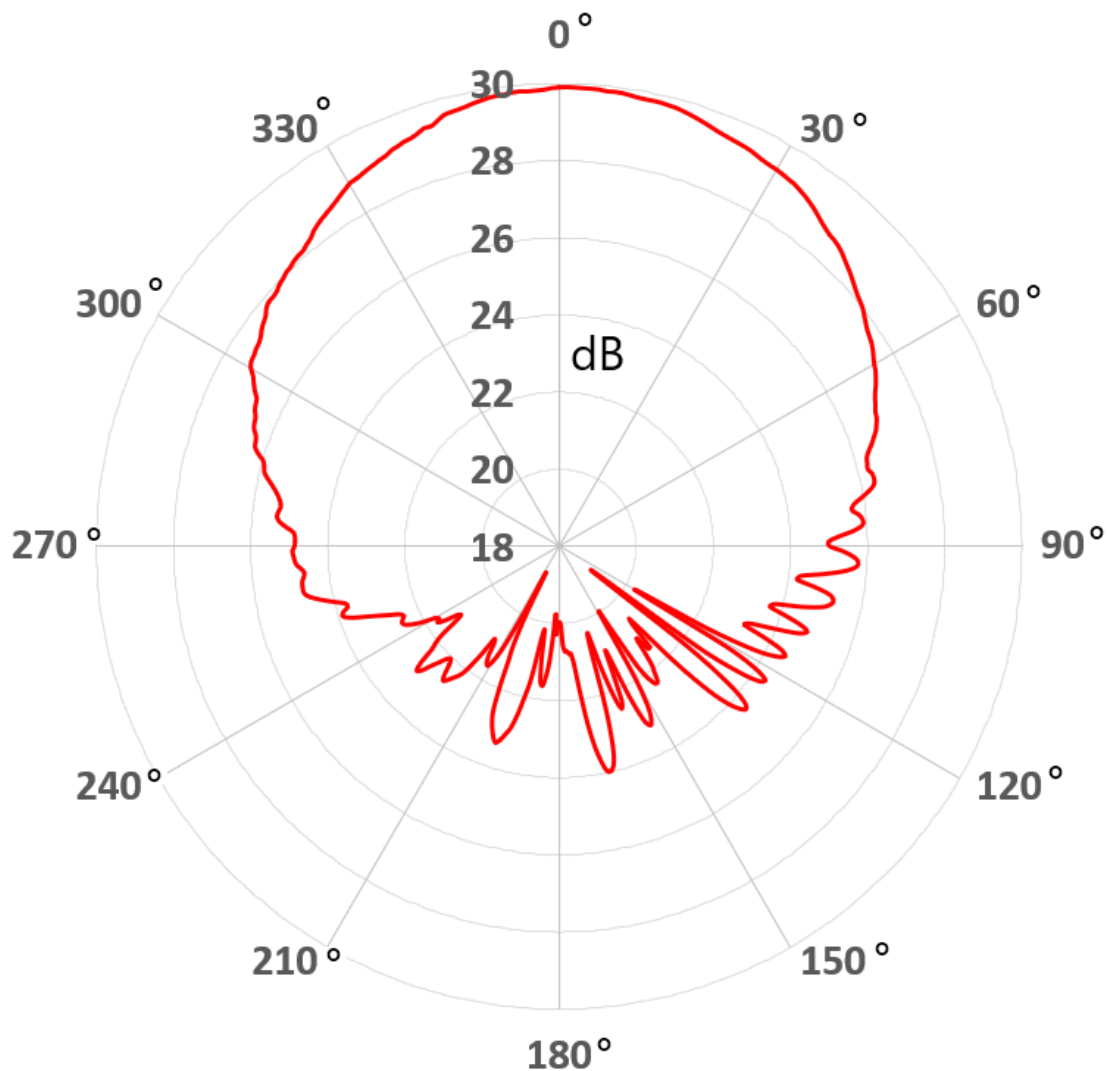
6.4.2.3 Vertikální polarizace v azimutu

Vyhodnocení výše uvedené vyzářovací charakteristiky jsme provedli připojením vysokofrekvenčního generátoru na port horizontální polarizace antény. Anténa byla namontována v azimutu *Obr. 35*.



Obr. 35 Pozice antén při měření Vertikální polarizace v azimutu pro výrobce Jirous

Vykreslená vyzařovací charakteristika sektorové antény Jirous má velmi výrazný hlavní lalok, postarnní laloky byly překryty nebo sloučeny s hlavním lalokem. Zadní lalok této vyzařovací charaktiky je poměrně členitý a má malou intenzitu signálu.

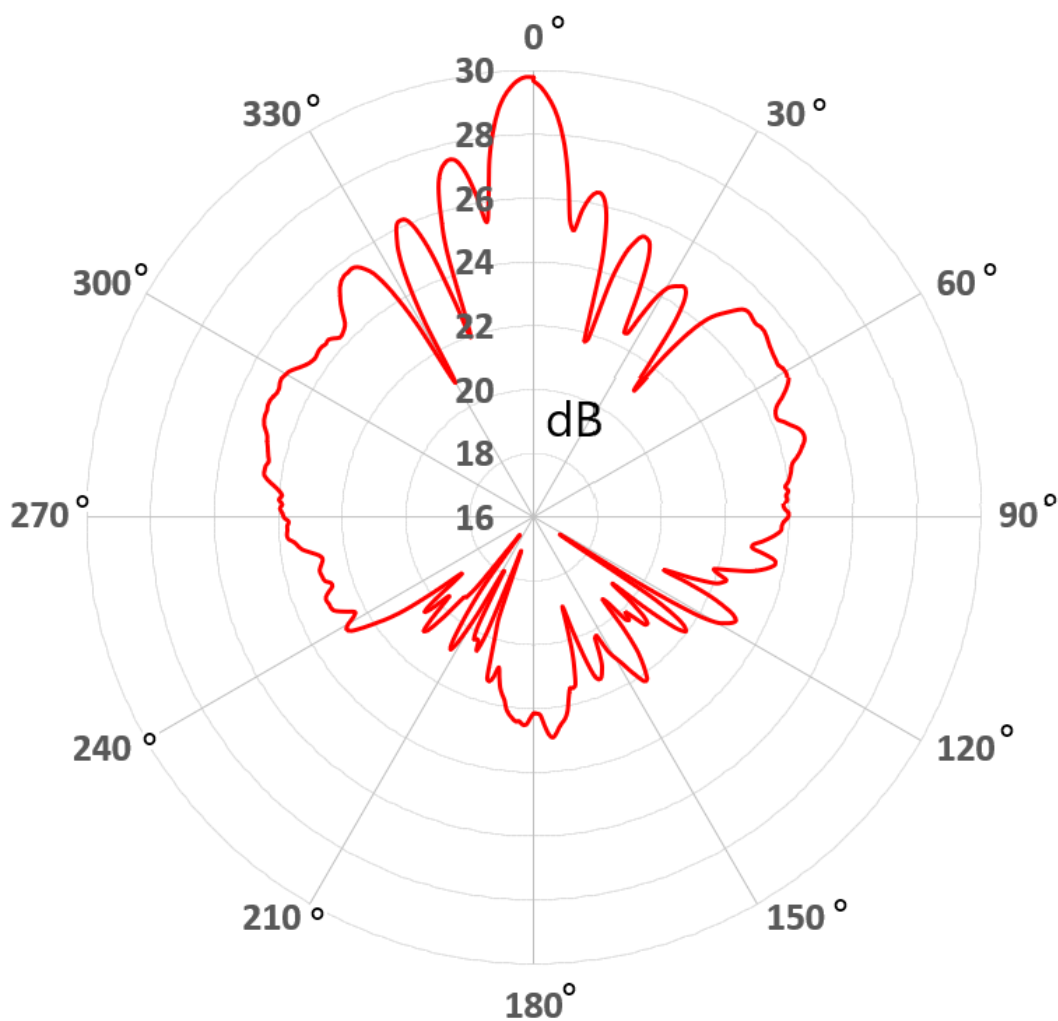


Obr. 36 Vyzařovací charakteristika Vertikální polarizace v azimutu pro výrobce Jirous

6.4.2.4 Vertikální polarizace v elevaci

Poslední měření jsme provedli v nastavení pro měření antény v elevaci a vysílací polarizace byla vertikální.

Vyzařovací diagram má úzký hlavní lalok, obklopený výraznými postranními laloky s poměrně vysokou intenzitou signálu.



Obr. 37 Vyzařovací charakteristika Vertikální polarizace v elevaci pro výrobce Jirous

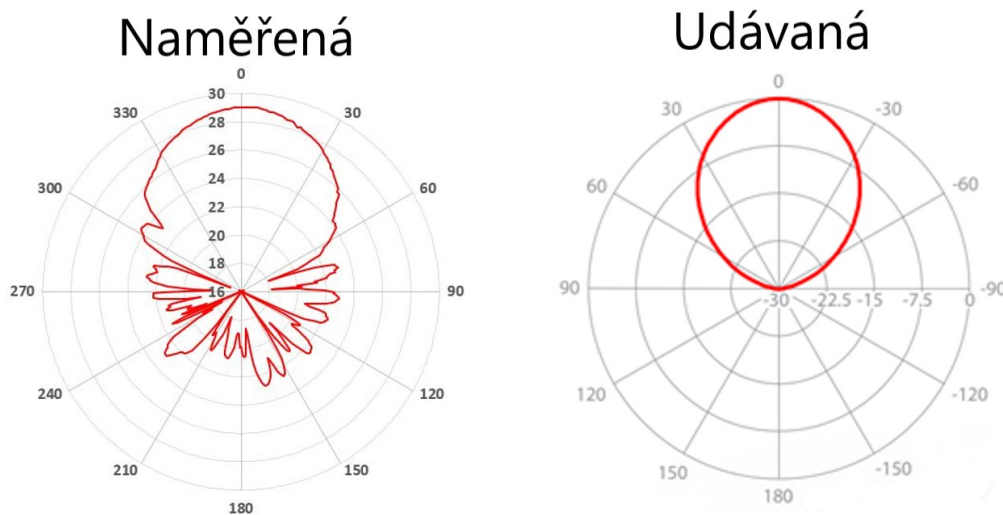
7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Kapitola je věnována vyhodnocení naměřených vyzařovacích charakteristik, které budeme porovnávat s referenčními charakteristikami výrobců.

Vyhodnocovat budeme mezi sebou i měřené antény, jelikož měření probíhalo za stejných vzájemně neměnných podmínek a výsledky budou mít tak vysokou vypovídající hodnotu.

7.1 Vyhodnocení RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60

Pro porovnání byla vybrána vyzařovací charakteristika horizontální polarizace v azimutu. Z charakteristik udávaných výrobcem a naměřených, lze usoudit, že referenční charakteristiky jsou pouze simulací ideálního modelu antény, což se také při měření potvrdilo.



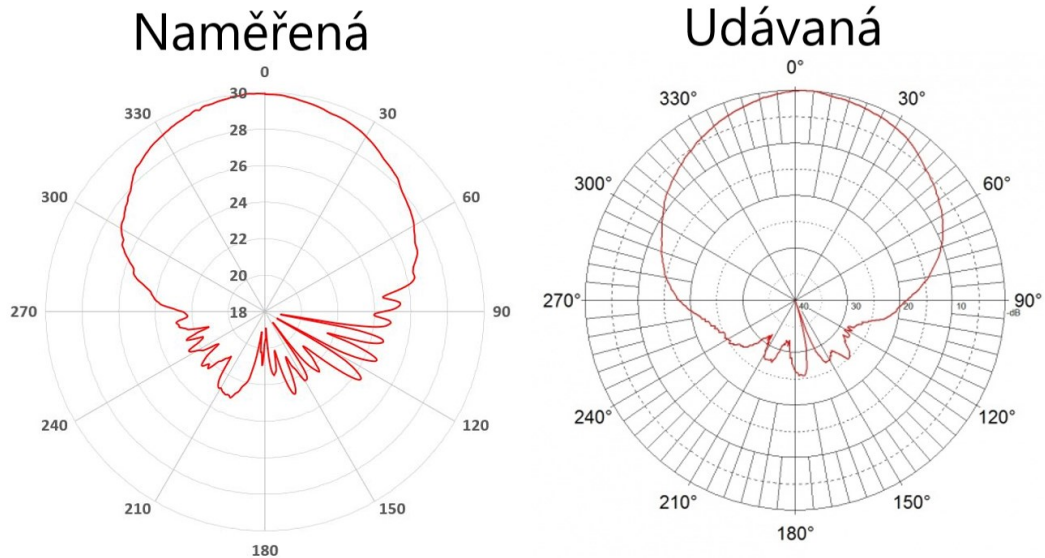
Obr. 38 Porovnání naměřených a udávaných vyzařovacích charakteristik antény RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60, Modifikováno autorem z: [18]

V grafech *Obr. 38* lze pozorovat deformace vyzařovací charakteristiky. Tyto defekty se týkají hlavně postranních laloků v úhlu 90° až 60° a zadního laloku v úhlu 270° až 300° .

Referenční charakteristiky tudíž neodpovídají naměřeným hodnotám a parametry výrobce lze brát v tomto případě pouze jako orientační. Což je také popsáno v literatuře [22].

7.2 Vyhodnocení Jirous JSC–16–60 MIMO

Stejně jako u první antény, vyhodnocení naměřených a udávaných charakteristik jsme provedli v nastavení horizontální polarizace v azimutu.



Obr. 39 Porovnání naměřených a udávaných vyzařovacích charakteristik antény Jirous JSC–16–60 MIMO, Modifikováno autorem z: [17]

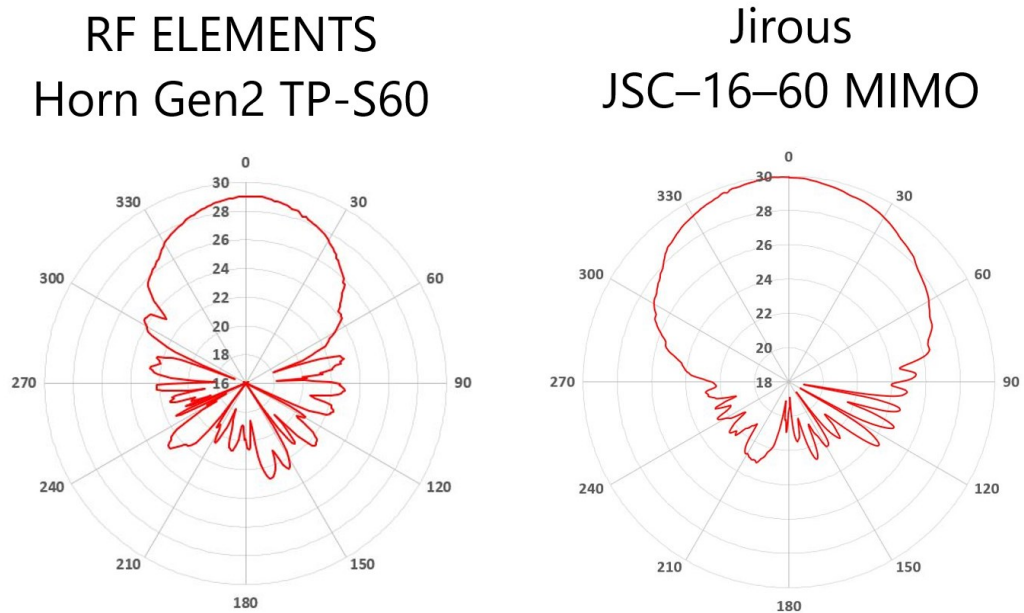
U této antény byly naměřené hodnoty podobné tvaru vyzařovacích charakteristik udávané výrobcem. Rozdílné intenzity signálu postranních i zadních laloků, mohou být dány jinými parametry bezodrazové komory. Dále také použitím jiných dielektrických absorbérů a dalších příslušenství využitých při měření.

Do vyhodnocení musíme zavést také nejistoty, které vznikají při každém praktickém měření a negativně ovlivňují výsledek.

V konečném hodnocení, ale můžeme říct, že parametry udávané výrobcem jsou věrohodné a zakládají se na reálném měření, nikoliv pouze simulaci.

7.3 Porovnání obou měřených antén

Vzájemné porovnání měřených antén provedené také pro nastavení v azimutu a vysílací polarizace byla horizontální.



Obr. 40 Porovnání naměřených vyzařovacích charakteristik antén RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60 a Jirous JSC-16-60 MIMO

Z grafů zobrazených na *Obr. 40* můžeme usoudit, že vyzařovací charakteristika antény od výrobce RF elements má více oválný tvar hlavního laloku, což určuje lepší směrovost sektorové antény. Naopak boční a zadní laloky jsou u této antény deformovány výrazněji, nežli je tomu u antény od výrobce Jirous.

Co se týká intenzity signálů, tak vyšší ziskovost byla naměřena u antény JSC-16-60 MIMO.

Z pohledu praktického použití, bude lepší volbou anténa RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60. Díky užšímu tvaru hlavního laloku, bude docházet ke kvalitnějšímu vykryvání požadovaného rádiusu a možnosti použít více sektorových antén na jednom vysílacím bodu.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá měřením a porovnáním vyzařovacích charakteristik antén ve volném pásmu 5 GHz. Teoretická část staví na fyzikálních aspektech antén, a to z hlediska elektromagnetického pole. Tato teorie je důležitá pro pochopení dějů, které se v této oblasti objevují. Další kapitoly jsou věnovány konstrukcím antén, popisují druhy bezodrazových komor, včetně jejich vybavení a rozebrány jsou i vyzařovací charakteristiky. Poslední kapitola je věnována anténám, které budou součástí měření v praktické části. Jedná se o sektorovou anténu RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60. Je to anténa trychtýřové konstrukce, kde výrobce slibuje symetrickou vyzařovací charakteristiku bez postranních a zadních laloků. Druhou měřenou je sektorová anténa od výrobce Jirous s označením JSC-16-60 MIMO, jedná se o úzkou panelovou anténu, která se podle výrobce skvěle hodí do zarušených oblastí.

Praktická část je věnována zkušebnímu měřicímu zařízení, reprezentované bezodrazovou komorou Frankonia SAC-3. Ta se nachází v prostorách Vědecko-technického parku Informační a komunikační technologie Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. V komoře byl umístěn stativ s měřicí anténou HF 906, která přijímala signál z měřených antén namontovaných na stativu uprostřed otočného stolu. K portům měřeným anténám byl připojen vysokofrekvenční generátor od firmy Rohde & Schwarz s označením SMR20. Po nastavení měřících parametrů v programu R&S EMC 32, bylo možné přejít k samotnému měření charakteristik.

Pro každou z antén bylo třeba provést čtyři měření. Jelikož se v našem případě jedná o MIMO antény, které jsou vybaveny vertikální i horizontální polarizací. U každého měření bylo nutné správné natočení měřené antény k měřicímu přijímači, dané azimutem a elevací antén. Výsledné hodnoty byly zpracovány do polárních grafů, ve kterých byly vykresleny vyzařovací charakteristiky pro jednotlivá měření. Poslední část praktické části je věnována vyhodnocení anténních parametrů. V případě antény od výrobce RF ELEMENTS byl pozorován výrazný rozdíl mezi referenční a naměřenou charakteristikou. Tento rozdíl je dán pravděpodobně simulací udávané charakteristiky. V případě antény Jirous byly potvrzeny parametry garantované výrobcem a rozdíly byly pouze minimální. Pokud porovnáme měřené antény mezi sebou, tak z hlediska vyzařovacích parametrů lépe vychází anténa Gen2 TP-S60, jelikož její charakteristika je symetrická, a navíc lépe směrová. Z pohledu intenzity vyzařovaných signálů, byla vyšší ziskovost naměřena u antény JSC-16-60 MIMO.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAYER, Daniel. *Aplikovaný Elektromagnetismus: Úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole*. České Budějovice: Kopp, 2012. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [2] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole: základy teorie*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-860-5643-0.
- [3] ELEKTRICKÉ POLE. *Techmania* [online]. Plzeň: Techmania Science Center, 2020 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/elektricke-pole>
- [4] Gaussův zákon elektrostatiky. *OnlineSchool.cz* [online]. Brno: Radek Zeman, 2020 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/fyzika/gaussuv-zakon-elektrostatiky/>
- [5] *Elektromagnetické vlny* [online]. Sušice, 2014 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: http://www.gymsusice.cz/images_users/predmety/fyzika/f_texty-elmagneticke_vlny_1.pdf. Učební pomůcka. Gymnázium, Sušice. [5] Antény pro WiFi - 2. část. *FCC průmyslové systémy* [online]. Praha 8: FCC průmyslové systémy, 2020 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <http://www.fccps.cz/anteny-pro-wifi-2-cast>
- [6] *Elektromagnetické spektrum* [online]. Liberec, 2006 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: http://www.gymsusice.cz/images_users/predmety/fyzika/f_texty-elmagneticke_vlny_1.pdf. Poznámky & ilustrace. GYMNÁZIUM F. X. ŠALDY.
- [7] ANTÉNY PRO WIFI - 2. ČÁST. *FCC průmyslové systémy* [online]. Praha: FCC průmyslové systémy, 2020 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://www.fccps.cz/anteny-pro-wifi-2-cast>
- [8] Projekt Turris – pomozte nám vybrat antény. *CZ.NIC* [online]. Praha: CZ.NIC, z. s. p. o., 2020, 29.10.2013 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: https://blog.nic.cz/wp-content/uploads/2013/10/anteny_na_blog_600.jpg
- [9] MaxLink anténa panelová 10dBi 2,4GHz, 5m H155, RSMA male. *TSBOHEMIA.CZ* [online]. Moravská Ostrava: CyberSoft, 2020 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: https://interlink-static1.tsbohemia.cz/maxlink-antena-panelova-10dbi-2-4ghz-5m-h155-rsma-male_i133273.jpg
- [10] The Horn Antenna. *Antenna-Theory.com* [online]. antenna-theory.com, 2015 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/horn.php>

- [11] Anténa RF elements Horn Gen2 TP-S50. *I4wifi* [online]. Brno: 100MEGA Distribution, 2020 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: https://www.img4.cz/i4wifi/inc/_img/BEN/HG3/HG3_o1.jpg
- [12] POSPÍŠILÍK, Martin. *Introduction to Electromagnetic Compatibility for Electronic Engineers... and not only for them* [online]. 1. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2019 [cit. 2020-08-06]. ISBN 978-80-7454-876-5. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/45878/Introduction_to_Electromagnetic_Compatibility_2019.pdf?sequence=6&isAllowed=y
- [13] Frankonia SAC-5 Square Semi Anechoic 5m EMC Chamber with traditional square design. *Reliant EMC* [online]. Prescott Valley: RELIANT EMC, 2012 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.reliantemc.com/images/product%20images/Frankonia/Frankonia%20SAC-5%20Square%20Semi%20Anechoic%205m%20EMC%20Chamber%20with%20traditional%20square%20design%20-%20420.png>
- [14] Anechoická komora. *M.sk.jhnoisereduce.com/* [online]. Dongguan: Dongguan Jinghuan Environment Equipment Co., 2020, Dec 25, 2018 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://m.sk.jhnoisereduce.com/Content/upload/2018263075/201812251442118069334.jpg>
- [15] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky*. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Připojujeme se k Evropské unii. ISBN 80-214-1873-7.
- [16] Existuje anténa, která by byla nejlepší? (2.). *Lupa.cz* [online]. Praha: Internet Info, 1998 – 2020 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/existuje-antena-ktera-by-byla-nejlepsi-2/>
- [17] Dvoupolarizační sektorová anténa JSC-16-60 MIMO. *Antény Jirous.cz* [online]. Praha: jirous.com, 2020 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://cz.jirous.com/anteny-5ghz-panel-sektor/jsc-16-60mimo>
- [18] Wireless Broadband. *RF elements* [online]. Bratislava: RF elements s.r.o, 2020 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://rfelements.com/products/wireless-broadband/>
- [19] Přístrojové vybavení. *Cebia-tech* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2000–2018 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://cebia.utb.cz/pristrojove-vybaveni>
- [20] *R&S® ESU EMI Test Receiver* [online]. Munich, 2015 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://cdn.rohde->

[schwarz.com/pws/dl/downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/e/esu_1/ESU_OperatingManual_en_FW574.pdf](https://www.rohde-schwarz.com/pws/dl/downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/e/esu_1/ESU_OperatingManual_en_FW574.pdf). Operating Manual. 5 Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG.

[21] *Microwave Signal Generator* [online]. Munich, 2014 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl/downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/s/smr_1/SMR_20_40_Quickstart_en.pdf. Quick Start Guide. 5 Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG.

[22] MATUSZCZYK, Jacek. *Antény prakticky*. 3. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-178-0.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropské normy
E	Intenzita elektrostatického pole
e	Elementární náboj
F	Lorenzova síla
F_e	Síla působícího elektrického pole
F_m	Síla působícího magnetického pole
μ	Permeabilita
ϵ	Permitivita
Q	Elektrický náboj
c	Křivka
C	Coulomb
U	Elektrické napětí
V	Volt
v	Rychlost
I	Elektrický proud
A	Ampér
N	Newton
P	Elektrický výkon
B	Magnetická indukce
H	Intenzita magnetického pole
T	Tesla

t	Čas
l	Délka
ψ	Tok elektrického pole
D	Elektrická indukce
S	Plocha
J	Hustota vodivého proudu
Φ	Magnetický indukční tok
ρ	Objemová hustota
W	Watt
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
m	Metr
cm	Centimetr
mm	Milimetr
dB	Decibel
dBm	Decibel na metr
log	Logaritmus
UV	Ultrafialové záření
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
N	Koaxiální konektor typu N
R-SMA	Koaxiální konektor RSMA
PSV	Poměr stojatých vln
VF	Vysokofrekvenční
Horn	Trychtýřová anténa

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Elektromagnetické vlnění [5]</i>	17
<i>Obr. 2 Elektromagnetické spektrum [6]</i>	18
<i>Obr. 3 Všesměrové antény [8]</i>	19
<i>Obr. 4 Panelová anténa [9]</i>	20
<i>Obr. 5 Sektorové antény</i>	21
<i>Obr. 6 Parabolická anténa</i>	22
<i>Obr. 7 Anténa RF elements Horn Gen2 [11]</i>	23
<i>Obr. 8 Semianechoická komora [13]</i>	24
<i>Obr. 9 Anechoická komora [14]</i>	25
<i>Obr. 10 Měřicí trychtýřová anténa HL 906</i>	27
<i>Obr. 11 Dielektrické absorbéry</i>	28
<i>Obr. 12 Graf vyzařovací charakteristiky, Modifikováno autorem z: [16]</i>	30
<i>Obr. 13 Pohled na sektorovou anténu Jirous JSC–16 –60 MIMO, Modifikováno autorem z: [17]</i>	31
<i>Obr. 15 Horizontální vyzařovací charakteristika v azimutu [17]</i>	33
<i>Obr. 14 Horizontální vyzařovací charakteristika v elevaci [17]</i>	33
<i>Obr. 16 Vertikální vyzařovací charakteristika v elevaci [17]</i>	34
<i>Obr. 17 Vertikální vyzařovací charakteristika v azimutu [17]</i>	34
<i>Obr. 18 Pohled na anténu RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60 a Twistport TPA-SM, Modifikováno autorem z: [18]</i>	35
<i>Obr. 20 Horizontální vyzařovací charakteristika v elevaci i azimutu, Modifikováno autorem z:[18]</i>	37
<i>Obr. 19 Vertikální vyzařovací charakteristika v elevaci i azimutu Modifikováno autorem z:[18]</i>	37
<i>Obr. 21 Nastavení měřícího programu R&S EMC 32</i>	41
<i>Obr. 22 Data vyhodnocená programem R&S EMC 32</i>	42
<i>Obr. 23 Změřená a zpracovaná data v poměru 1:4</i>	43
<i>Obr. 24 Nastavení vysokofrekvenčního generátoru Rohde & Schwarz SMR20</i>	43
<i>Obr. 25 Návrh měření v bezodrazové komoře</i>	44
<i>Obr. 26 Pozice antén při měření Horizontální polarizace v azimutu pro výrobce RF elements</i>	45
<i>Obr. 27 Vyzařovací charakteristika Horizontální polarizace v azimutu pro výrobce RF elements</i>	46
<i>Obr. 28 Vyzařovací charakteristika Horizontální polarizace v elevaci pro</i>	47

<i>Obr. 29 Pozice antén při měření Vertikální polarizace v azimutu pro výrobce RF elements</i>	48
<i>Obr. 30 Vyzařovací charakteristika Vertikální polarizace v azimutu pro výrobce RF elements</i>	49
<i>Obr. 31 Vyzařovací charakteristika Vertikální polarizace v elevaci pro výrobce RF elements</i>	50
<i>Obr. 32 Pozice antén při měření Horizontální polarizace v azimutu pro výrobce Jirous...</i>	51
<i>Obr. 33 Vyzařovací charakteristika Horizontální polarizace v azimutu pro</i>	52
<i>Obr. 34 Vyzařovací charakteristika Horizontální polarizace v elevaci pro výrobce Jirous</i>	53
<i>Obr. 35 Pozice antén při měření Vertikální polarizace v azimutu pro výrobce Jirous</i>	54
<i>Obr. 36 Vyzařovací charakteristika Vertikální polarizace v azimutu pro výrobce Jirous ..</i>	55
<i>Obr. 37 Vyzařovací charakteristika Vertikální polarizace v elevaci pro výrobce Jirous....</i>	56
<i>Obr. 38 Porovnání naměřených a udávaných vyzařovacích charakteristik, Modifikováno autorem z: [18]</i>	57
<i>Obr. 39 Porovnání naměřených a udávaných vyzařovacích charakteristik, Modifikováno autorem z: [17]</i>	58
<i>Obr. 40 Porovnání naměřených vyzařovacích charakteristik antén RF ELEMENTS Horn Gen2 TP-S60 a Jirous JSC-16-60 MIMO</i>	59

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Tabulka měřících antén, Modifikováno autorem z: [15].....</i>	<i>26</i>
---	-----------

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Měřená a vyhodnocená data měření.zip