

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vliv vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav PAVELEC**  
Osobní číslo: **E13N0151P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vliv vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Popište historický vývoj mikrovlnných spojů a antén
2. Analyzujte současný stav trhu v ČR s ohledem na odolnost antén vůči vnějším vlivům
3. Porovnejte a změřte vlastnosti dostupných vf antén
4. Proveďte měření vlivu vnějšího prostředí na parametry antén
5. Proveďte zhodnocení získaných parametrů antén

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. et Ing. Petr Kašpar, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá vlivem vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén. Z počátku čtenáři nastiňuje historický vývoj mikrovlnných antén a spojuje od prvních okamžiků až po současnost. Ve druhé části čtenáře blíže seznamuje s dělením mikrovlnných antén, materiály používanými na jejich výrobu, udávanou odolností vůči vnějším vlivům a v závěru této kapitoly provádí srovnání poskytnutých antén s aktuální nabídkou na tuzemském trhu. Třetí kapitola definuje parametry antén spolu s prostory, ve kterých se tyto parametry obvykle získávají, a naznačuje samotné průběhy měření. Následující část práce se zabývá klimatickými zkouškami dle platných norem a specifikuje konkrétní parametry vybraných zkoušek. V závěrečné kapitole jsou srovnány naměřené parametry propůjčených mikrovlnných antén s hodnotami udávanými výrobcem a také s hodnotami získanými po absolvování dvou zátěžových zkoušek v klimatické komoře.

## **Klíčová slova**

Mikrovlnné antény, mikrovlnné spoje, materiály antén, odolnost antén, parametry antén, klimatické zkoušky

## **Abstract**

The presented diploma thesis deals with the influence of external environment on the microwave antennas parameters. In the beginning the historical development of microwave antennas and circuits are presented to the readers. In the second part readers get acquainted with division of microwave antennas, materials used in their manufacturing, the reported resistance to the external influences and comparisons of the antennas given with the ones offered on the domestic market. The third chapter defines the parameters of antennas along with the spaces in which they are usually obtained, and shows the actual course of the measurement. The next part deals with the climate tests according to the valid standards and specifies certain parameters of the selected tests. In the final chapter gives a comparison of the measured parameters of the lent microwave antennas with the values specified by the manufacturer, as well as with those obtained after completing two stress tests in the climatic chamber.

## **Key words**

Microwave antennas, microwave links, antenna materials, resistance antennas, antenna parameters, climatic tests

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 10.5.2015

Miroslav Pavelec

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. et Ing. Petru Kašparovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále také Ing. Janu Mrázovi, Ph.D. za příkladné vedení při měření v bezodrazové komoře a Ing. Michaelu Kroupovi, Ph.D. za pomoc s realizací klimatických zkoušek. V neposlední řadě děkuji společnosti SIMR WIFI ANTENNAS za poskytnutí mikrovlnných antén.

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 HISTORICKÝ VÝVOJ MIKROVLNNÝCH SPOJŮ A ANTÉN</b> .....	<b>11</b>
1.1 HISTORICKÝ VÝVOJ MIKROVLNNÝCH SPOJŮ .....	11
1.1.1 <i>Počátky mikrovlnných spojů</i> .....	13
1.1.2 <i>Postupný vývoj technologií Wi-Fi, WiMax, Bluetooth</i> .....	13
1.1.3 <i>Postupný vývoj radioreléových spojů</i> .....	16
1.1.4 <i>Postupný vývoj družicových spojů</i> .....	18
1.2 HISTORICKÝ VÝVOJ MIKROVLNNÝCH ANTÉN .....	20
<b>2 ROZDĚLENÍ MIKROVLNNÝCH ANTÉN A ANALÝZA TRHU V ČR</b> .....	<b>22</b>
2.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ MIKROVLNNÝCH ANTÉN .....	22
2.2 VÝROBNÍ MATERIÁLY ANTÉN .....	26
2.3 ODOLNOST ANTÉN VŮČI VNĚJŠÍM VLIVŮM .....	29
2.4 VLASTNOSTI POSKYTNUTÝCH ANTÉN SPECIFIKOVANÉ VÝROBCEM .....	31
2.5 POROVNÁNÍ S NABÍDKOU NA TRHU .....	32
<b>3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MIKROVLNNÝCH ANTÉN</b> .....	<b>34</b>
3.1 PARAMETRY ANTÉN .....	34
3.2 ČÁSTEČNĚ BEZODRAZOVÁ KOMORA FEL ZČU .....	39
3.3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MIKROVLNNÝCH ANTÉN .....	41
3.3.1 <i>Činitel stojatých vln</i> .....	41
3.3.2 <i>Izolace mezi vstupy</i> .....	42
3.3.3 <i>Směrové charakteristiky</i> .....	43
3.3.4 <i>Zisk</i> .....	44
<b>4 VLIVY VNĚJŠÍHO PROSTŘEDÍ</b> .....	<b>45</b>
4.1 KLIMATICKÁ KOMORA FEL ZČU .....	45
4.2 ZKOUŠKY DLE NOREM ČSN EN 60068-1 ED. 2 .....	46
4.2.1 <i>ČSN EN 60068-2-30 ed. 2 - Vlhké teplo cyklické</i> .....	48
4.2.2 <i>ČSN EN 60068-2-14 ed. 2 - Změna teploty</i> .....	50
<b>5 ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH PARAMETRŮ</b> .....	<b>53</b>
5.1 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....	53
5.2 VLIV ŘADY ZKOUŠEK NA PARAMETRY MIKROVLNNÝCH ANTÉN .....	54
5.2.1 <i>Činitel stojatých vln</i> .....	55
5.2.2 <i>Izolace mezi vstupy</i> .....	57
5.2.3 <i>Směrové charakteristiky</i> .....	58
5.2.4 <i>Zisk</i> .....	60
5.3 VLIV RADY ZKOUŠEK NA VÝROBNÍ MATERIÁLY MIKROVLNNÝCH ANTÉN .....	62
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>64</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>66</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>70</b>



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	-	Akrylonitrilbutadienstyren
AMSAT	-	Radio Amateur Satellite Corporation
$A_z$	[dB]	Koeficient zpětného přenosu
BNC	-	Bayonet Locking Connector
BSIG	-	Bluetooth Special Interest Group
ČSN	-	Označení české technické normy
ČSV (SWR)	-	Činitel stojatého vlnění (Standing Wave Ratio)
ČTÚ	-	Český telekomunikační úřad
ČZP	-	Činitel zpětného příjmu
DSSS	-	Direct Sequence Spread Spectrum
DVB-T	-	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
EN	-	Označení evropské normy
FEL	-	Fakulta elektrotechnická
FHSS	-	Frequency Hopping Spread Spectrum
$G$	[dBi]	Zisk antény
GNSS	-	Globální navigační satelitní systém
GP	-	Ground Plane anténa
GPiB	-	General Purpose Interface Bus
IDU	-	InDoor Unit (vnitřní jednotka)
IEEE	-	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
IRNSS	-	Indian Regional Navigation Satellite System
ISO	-	Mezinárodní organizace pro normalizaci
$L_0$	[dB]	Útlum volného prostoru
MATLAB	-	Matrix Laboratory (software pro vědeckotechnické výpočty)
MCX	-	Micro CoaXial connector
MIMO	-	Multiple-Input Multiple-Output
MMCX	-	Micro-Miniature CoaXial connector
NiCd	-	Níkl-kadmíd
ODU	-	OutDoor Unit (vnější jednotka)
OFDM	-	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	-	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PA	-	Polyamid
PCI	-	Peripheral Component Interconnect
PCMCIA	-	Personal Computer Memory Card International Association
PDH	-	Plesiosynchronní digitální hierarchie
PE	-	Polyetylén
PMMA	-	Polymethylmetakrylátem
POM	-	Polyoxymetylen
PP	-	Polypropylen
P-t-M	-	Point-to-Multipoint (spojení bod-více bodů)
P-t-P	-	Point-to-Point (spojení bod-bod, dvoubodové spojení)
PTFE	-	Polytetrafluorethylen
PUR	-	Polyuretan
PVC	-	Polyvinylchlorid
RH	[%]	Relative Humidity (relativní vlhkost)
RP	-	Reverse Polarity
$R_r$	[ $\Omega$ ]	Odpor záření
RR	-	Radioreléový (Radio Relay)
SAC	-	Semi Anechoic Chamber (částečně bezodrazová komora)
SDH	-	Synchronní digitální hierarchie
SMA	-	SubMiniature version A connector
TNC	-	Threaded Neill–Concelman connector
TPE	-	Termoplastické elastomery
UHF (UKV)	-	Ultra High Frequency (ultra krátké vlny)
Wi-Fi	-	Označení pro několik standardů IEEE 802.11
WiMax	-	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	-	Wireless Local Area Network
WMAN	-	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	-	Wireless Personal Area Network
ZČU	-	Západočeská univerzita v Plzni
$\alpha$	[dB]	Útlum odrazu
$\epsilon_r$	-	Relativní permitivita
$\lambda$	[m]	Vlnová délka
$\rho, \Gamma$	-	Činitel odrazu

## ÚVOD

Komunikaci, kterou lidé běžně nazývají dorozumívání, lze vyložit jako sdělování myšlenek, názorů, informací nebo také pocitů. Nejčastějším způsobem dorozumívání člověka je řečí a písmem. Pokud se na komunikaci podíváme z pohledu většiny elektronických zařízení, zjistíme, že spolu také komunikují. Ať již lokálně, například v rámci propojení několika částí obvodu, nebo globálně například skrze internet. Zaměříme-li se na komunikaci skrze internet a naše území, tedy Českou republiku, dospějeme k závěru, že velmi podstatná část komunikace probíhá na mikrovlnných spojích. Pro zajištění dobrého spojení a tedy dobré komunikace u mikrovlnného spoje je zapotřebí souhra všech jeho částí, mezi které s významným vlivem patří antény. To mě přivádí k nutnosti měřit parametry mikrovlnných antén, ale také zjišťovat jejich odolnost vůči prostředí, ve kterém se provozují.

Cílem předkládané diplomové práce je seznámit čtenáře s problematikou vlivu vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén a provést průzkum trhu v segmentu mikrovlnných antén na území České republiky. Následně změřit a zhodnotit parametry mikrovlnných antén poskytnutých společnostmi SIMR WIFI ANTENNAS, které se vystaví zátěžovému testování v klimatické komoře, jež bude simulovat vliv venkovního prostředí na antény.

Text práce je rozdělen do pěti částí, první se zabývá vývojem mikrovlnných antén a spoju od svých počátků až po dnešní technologie, které nás obklopují.

Druhá část práce čtenáři přibližuje základní členění mikrovlnných antén dle konstrukce, dále uvádí materiály používané pro jejich výrobu, celkovou odolnost mikrovlnných antén a provozní limity specifikované výrobcem. Následně popisuje vlastnosti zapůjčených antén a srovnává je s aktuální nabídkou na tuzemském trhu.

Třetí kapitola nastiňuje čtenáři problematiku měření parametrů mikrovlnných antén a v jednotlivých podkapitolách se zaměřuje na měření vybraných parametrů v částečně bezodrazové komoře Frankonia SAC-3 nalézající se v budově Fakulty elektrotechnické ZČU.

Ve čtvrté části se měřené anténní vzorky přesunou do klimatické komory Vötsch Industrietechnik VC 7018, která se nachází v laboratoři klimatických zkoušek taktéž v budově Fakulty elektrotechnické ZČU, kde se vystaví zkouškám vlivu prostředí po stanovený čas dle norem ČSN EN 60068-2-30 ed. 2 a ČSN EN 60068-2-14 ed. 2.

V poslední, páté kapitole, budou zpracována data, která jsme získali měřeními a vizuální prohlídkou antén. Údaje budou navzájem porovnány, dle simulovaného stárnutí vzorků, díky čemu se pokusíme posoudit vliv stárnutí antény na její provozní schopnosti a celkovou životnost pro případ reálného použití ve venkovních podmínkách našeho klimatu.

# 1 HISTORICKÝ VÝVOJ MIKROVLNNÝCH SPOJŮ A ANTÉN

Pro ucelenější pochopení tematiky se diplomová práce v první kapitole zabývá základními milníky z historie mikrovlnných spojů a antén, které postupně posouvaly vývoj až k dnešním dnům.

## 1.1 Historický vývoj mikrovlnných spojů

Ve vymezení rozsahu mikrovlnného pásma se prameny neshodují, ale nejčastěji je udáváno v intervalu od 3 GHz do 300 GHz, tedy s vlnovou délkou od sta milimetrů po jeden milimetr. Vlny s menším kmitočtem (větší vlnovou délkou) se nacházejí v oblasti radiových vln, naopak vlny s vyšším kmitočtem (menší vlnovou délkou) spadají do pásma optických (terahertzových) vln.

Frekvence	3	30	300 kHz	3	30	300 MHz	3	30	300 GHz
Vlnová délka	1	10 km	1	100 m	10	1	100 mm	10	1
Označení	<b>VLF</b>		<b>LF</b>	<b>MF</b>	<b>HF</b>	<b>VHF</b>	<b>UHF</b>	<b>SHF</b>	<b>EHF</b>
Využití	Komunikace s ponorkami		Navigace, AM vysílání, časové signály	AM vysílání	Krátkovlnné vysílání	FM radiové a TV vysílání	TV vysílání, Wi-Fi	Mikrovlnná zařízení, Wi-Fi,	Radiostanice, Vysokorychlostní přenos dat

Obr. 1.1: Rozdělení kmitočtových pásem [1]

Zmíněný rozpor se týká stanovení dolní meze mikrovlnného pásma, kdy některé zdroje uvádějí počátek pásma již od 300 MHz, či 1 GHz. Dle těchto zdrojů by šíření mikrovln probíhalo jak přímou vlnou typickou pro frekvenční pásmo jednotek až stovek GHz, tak pomocí troposférického rozptylu, jenž je obvyklý pro frekvenční oblast stovek MHz až jednotek GHz. Je patrné, že mezi jednotlivými skupinami elektromagnetického záření není hranice ostrá, ale plynulá. Obecně jsou mikrovlnné spoje realizovány přímou vlnou, proto je pásmo ultra krátkých vln (UHF) z mikrovlnného pásma často vynecháváno i přes fakt, že spoje využívající technologii Wi-Fi jsou na kmitočtu 2,4 GHz velmi rozšířeny. Při šíření přímé mikrovlnné vlny nedochází k jejímu ohybu, případně jen velmi malému vlivem zakřivení zemského povrchu, a není ovlivněna ionosférou. Proto je nutné při realizaci

mikrovlnného spoje zajistit přímou viditelnost mezi stranami. To je na větší vzdálenost jen velmi obtížně splnitelné a z tohoto důvodu se do spoje vkládají mezistanice (retranslační stanice). S rostoucím kmitočtem se více projevuje útlum prostředí způsobený především vodními srážkami, na kmitočtech v řádu desítek GHz pak i vlastní rezonancí molekul plynů (kyslíku především) a vodních par. [1]

Následující základní přehled uvádí dostupná mikrovlnná pásma pro digitální komunikaci v České republice. Jako volná jsou označována pásma, u nichž při splnění daných podmínek provozu není nutné individuální povolení Českého telekomunikačního úřadu, které je naopak u regulovaných pásem vyžadováno.

- 2,4 GHz – volné pásmo pro datové spoje bod-bod (dvoubodové, point-to-point, P-t-P) a bod-více bodů (point-to-multipoint, P-t-M).
- 3,5 GHz – regulované pásmo pro datové a telekomunikační spoje převážně P-t-P.
- 5 GHz – volné pásmo pro datové spoje P-t-P a P-t-M.
- 6 GHz – regulované pásmo specifikované pro radioreléové spoje P-t-P především na velmi dlouhé vzdálenosti s vysokými přenosovými kapacitami.
- 7 GHz (8 GHz) – regulované pásmo pro radioreléové point-to-point spoje především na velké vzdálenosti.
- 10 GHz – volné pásmo pro radioreléové spoje P-t-P na krátké i dlouhé vzdálenosti.
- 11 GHz – regulované pásmo pro radioreléové spoje P-t-P na střední a delší vzdálenosti s vyššími přenosovými kapacitami.
- 13 GHz – regulované, univerzálně využitelné pásmo pro radioreléové spoje P-t-P.
- 15 GHz – regulované, univerzálně využitelné pásmo pro radioreléové spoje P-t-P.
- 17 GHz – volné pásmo určené pro spoje P-t-P.
- 18 GHz – regulované, univerzálně využitelné pásmo pro radioreléové spoje P-t-P.
- 23 GHz – regulované pásmo pro radioreléové spoje P-t-P na střední a kratší vzdálenosti s vyššími přenosovými kapacitami.
- 24 GHz – volné pásmo pro datové přenosy P-t-P na krátké vzdálenosti.
- 26 GHz – regulované pásmo pro datové a telekomunikační spoje především P-t-M.
- 38 GHz (32 GHz) – regulované pásmo určené pro radioreléové spoje P-t-P na krátké vzdálenosti s vyššími přenosovými kapacitami.
- 40 GHz – regulované pásmo především pro P-t-M spoje s různými možnostmi využití.
- 71 – 76 GHz a 81 – 86 GHz – volná pásma určená pro P-t-P spoje na krátké vzdálenosti a velmi vysoké přenosové kapacity.

Detailnější specifikace dělení jednotlivých pásem a případné podmínky užití lze nalézt na webových stránkách Českého telekomunikačního úřadu, případně v jejich aplikaci [2]. [3] [4]

### 1.1.1 Počátky mikrovlnných spojů

Nedílnou součástí počátku mikrovlnných spojů je objev samotné elektromagnetické vlny, jež nejprve teoreticky se svým dílem *A Treatise on Electricity and Magnetism* učinil J. C. Maxwell v roce 1873 a následně prakticky prokázal H. R. Hertz se svými pokusy z roku 1887. Následně probíhalo několik pokusů využívající komunikaci v mikrovlnném pásmu, například experimentální spojení mezi Anglií a Francií, ale významný posun možného použití přinesl až objev výkonného generátoru mikrovlnné energie, tzv. magnetronu. O ten se na počátku čtyřicátých let dvacátého století zasloužili vědci J. Randall a H. A. H. Boo z Birminghamské univerzity v Anglii a uplatnění našel v průběhu druhé světové války především v radarových systémech. S postupem vývoje se využití mikrovlnného pásma začalo rychle rozšiřovat, mimo radiolokaci se rozvinula komunikace na velké vzdálenosti jako náhrada metalických vedení především díky svým nesporným výhodám, jakými jsou rychlost, jednoduchost a cena výstavby spoje. Nelze opomenout družicové spoje, radioreléové spoje a technologie, jako jsou Wi-Fi, WiMax, Bluetooth a mnoho dalších využívajících mikrovlny. [1] [5] [6] [7]

### 1.1.2 Postupný vývoj technologií Wi-Fi, WiMax, Bluetooth

Termínem Wi-Fi, který vytvořila *Wireless Ethernet Compatibility Alliance*, je označováno několik IEEE 802.11 standardů definujících bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích (WLAN, WirelessLAN). Samotný název Wi-Fi neměl mít žádný význam, ale svou podobností k Hi-Fi (High Fidelity, vysoká věrnost) časem vznikl analogický název Wireless Fidelity, v překladu tedy bezdrátová věrnost. Ač první standard 802.11 vznikl v roce 1997, samotný princip této technologie byl patentován již během druhé světové války v roce 1942 hudebním skladatelem G. Antheilem a herečkou H. Lamarrovou. Němečtí váleční vědci se v této době zabývali rádiově řízenými torpédami, která ale měla jeden zásadní nedostatek, a to možnost snadného rušení řídicího rádiového signálu nepřitelem. Problém se podařilo odstranit právě G. Antheilemu a H. Lamarrové díky nápadu distribuovat signály náhodně v čase napříč definované série frekvencí, kdy na každé frekvenci mohl být přenos velmi krátký a celkový tok pak více odolný k rušení a odposlechům. S tím bylo nutné vyřešit synchronizaci mezi vysílacím a přijímacím zařízením. Zde Antheile využil své hudební zkušenosti a navrhl

synchronizační mechanismus využívající děrovanou roli papíru, známou z mechanických hudebních pián. V šedesátých a sedmdesátých letech využívala zmíněnou technologii FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), která s menšími úpravami stále existuje, pouze armáda. S postupem elektroniky se možnosti využití rozprostřeného spektra zvyšovaly a nakonec došlo v osmdesátých letech k uvolnění také pro civilní účely. Další krok ve vývoji přinesl S. Larsen, jenž navrhl technologicky složitější generátory rozprostřeného spektra DS-1 a DS-2 vytvářející ze vstupního signálu širokopásmový šum. Pomocí stejného klíče se následně na přijímací straně znovu složil původní signál. Nejvyužívanější metody rozprostírání spektra jsou:

- **FHSS** (Frequency Hopping Spread Spectrum)

Metoda založená na přeskakování mezi několika frekvencemi při přenosu informací. Změna frekvence je dána pseudonáhodnou posloupností, která musí být známa a synchronizována mezi přijímacím a vysílacím zařízením. Existují dvě varianty FHSS, a to FFH (Fast Frequency Hopping), kde ke změně kanálu dochází i při přenosu jednoho bitu, a SFH (Slow Frequency Hopping), kde změna kanálu nastává až po přenesení několika bitů.

- **DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum)

U této metody je každý přenášený bit nahrazen pseudonáhodnou sekvencí bitů, nejčastěji vytvořené Goldovými nebo Barkerovými kódy. Jsou tedy přidány redundantní informace, které zaberou větší část spektra a zlepšují citlivost přenosu vůči rušení. Pro okolí signál vypadá jako šum, ale s klíčem k pseudonáhodné sekvenci je možné data zpět dekodovat.

- **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

Modulační metoda založená na ortogonálním frekvenčním dělení kanálu na tzv. subnosné frekvence. Sériový vstupní datový tok se rozděluje na dílčí paralelní toky, které jsou modulovány na jednotlivé subnosné kmitočty. U přijímače se opačným postupem subnosné kmitočty demodulují na původní sériový datový tok. Výhoda OFDM tedy spočívá v ortogonalitě subnosných kmitočtů, z čehož plyne vyšší spektrální účinnost modulace. [8]

Spolu s OFDM bývá často využívána technologie MIMO (Multiple-input multiple-output), někdy také označovaná jako technologie použití více antén, pocházející z Bellových laboratoří. MIMO využívá vícecestné šíření signálu pro lepší využití šířky pásma, zvýšení datové propustnosti, zvýšení dosahu a případně k omezení přenosových bych. U varianty například MIMO 2x2, systém využívá dvě antény zároveň pro vysílání a protistrana dvě antény zároveň pro příjem. Vstupující signál je tedy multiplexován do dvou výstupů, následně

se signály vysílají a superponují na jakékoliv z přijímacích antén, kde poté přijímač rekonstruuje původní vysílaný signál. [9]

Jak již bylo zmíněno, první standart spadající pod označení Wi-Fi byl publikován v roce 1997 a měl sloužit jako alternativa ke kabelovým ethernetovým sítím LAN (Local Area Network). Stručný přehled vývoje standardu 802.11 je znázorněn v následující tabulce.

	Rok vydání	Pásmo [GHz]	Šířka kanálu [MHz]	Maximální teoretická rychlost [Mbit/s]	MIMO (max.)	Modulace
802.11	1997	2,4	22	2	-	DSSS, FHSS
802.11a	1999	5	20	54	-	OFDM
802.11b	1999	2,4	22	11	-	DSSS
802.11g	2003	2,4	20	54	-	OFDM, DSSS
802.11n	2009	2,4/5	20/40	600	4x4	MIMO-OFDM
802.11ac	2013	5	20/40/80/160	1 000	8x8	MIMO-OFDM
802.11ad	2013	60	2 160	7 000	-	OFDM

**Tab. 1.1:** Základní přehled standardů IEEE 802.11 [10]

Rychlé rozšíření Wi-Fi bylo podpořeno použitím především bezlicenčních pásem 2,4 GHz a 5 GHz, které se však vzhledem k vysokému využívání stávají velmi zarušené. Standard 802.11 se stále vyvíjí a vznikají nové specifikace, nejčastěji v pásmech několika desítek GHz. [10] [11]

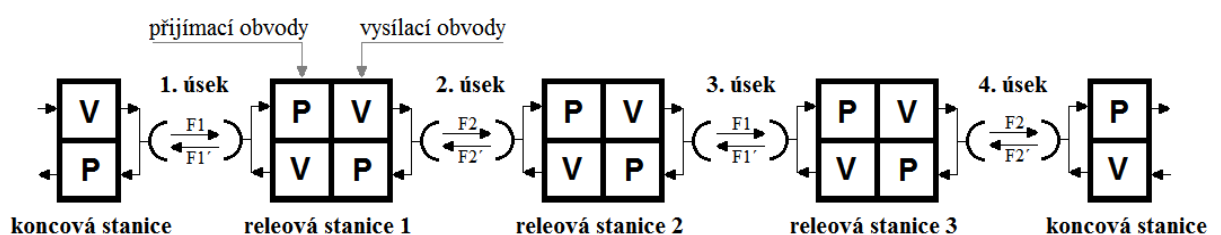
Další dnes velmi rozšířenou bezdrátovou technologií je Bluetooth navržený roku 1994 švédskou společností Ericsson a posléze s ostatními členy (IBM, Toshiba, Intel a Nokia) skupiny BSIG (Bluetooth Special Interest Group) roku 1999 uveřejněn ve verzi 1.0a. Jméno získal po dánském králi Haraldovi Blåtandovi (Bluetooth) Gormsenovi, který svými komunikačními schopnostmi sjednotil válčící kmeny. Základní myšlenka technologie je analogická, má sjednotit a usnadnit vzájemnou komunikaci mezi různými zařízeními. Spadá do kategorie sítí WPAN (Wireless Personal Area Network) a je definována standardem IEEE 802.15.1. Bluetooth pracuje v kmitočtovém pásmu od 2,4 GHz do 2,485 GHz a využívá modulaci FHSS. Teoretické maximální přenosové rychlosti se pohybují dle použité verze od 1 Mbit/s pro Bluetooth 1.2 až po 24 Mbit/s pro verzi Bluetooth 4. Nejnovější specifikace Bluetooth 4.2 byla publikována v prosinci 2014 a zaměřuje se především na snížení energetické náročnosti. Nejčastější využití nalézá v mobilních telefonech a osobních počítačích sloužící pro připojení externích zařízení a o jejím rozšíření svědčí také fakt, že skupina BSIG má dnes již více než deset tisíc členů. [12]



Jako další evoluční krok bezdrátových sítí lze označit technologii WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access), která byla vytvořena s cílem poskytnout jednodušší a levnější bezdrátovou cestu k širokopásmovému přístupu k internetu především v městských aglomeracích. WiMax tedy spadá pod metropolitní bezdrátové sítě WMAN (Wireless Metropolitan Area Network). První verze standardu IEEE 802.16 uveřejněná roku 2002 pracovala s kmitočtovým pásmem od 10 GHz do 66 GHz a vyžadovala přímou viditelnost mezi stranami spoje. O rok později přišla další verze standardu IEEE 802.16a, která díky využívanému frekvenčnímu pásmu od 2,4 GHz do 11 GHz a OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) modulaci již umožňovala realizovat spoje bez přímé viditelnosti. Přenosové rychlosti původní specifikace dosahovaly 134 Mbit/s. Varianta na nižším kmitočtovém pásmu umožňuje jen zhruba poloviční rychlosti, ale velkou výhodou je dosah spoje atakující až 70 km. WiMax může pracovat s organizačními strukturami point-to-point i point-to-multipoint a také se samo-organizující se topologií typu mesh. Novější varianty standardu 802.16(c, d, e, j), se zaměřují hlavně na schopnost spolupráce s ostatními systémy (interoperabilitu) a mobilní sítě. Využití tato technologie nalézá také při realizaci tzv. poslední míle, tedy posledního spoje například od bodu na optické lince k výrobní hale. [13] [14]

### 1.1.3 Postupný vývoj radioreléových spojů

Radioreléový (RR) je označení pro datové komunikační spojení mezi dvěma koncovými body, kde rádiovou trasu obvykle tvoří několik spojů (skoků) sériově řazených za sebou. Název radioreléový spoj pochází z anglického radio relay, kde slovo relay má historickou analogii na koňskou poštovní službu. Po ujetí určité vzdálenosti bylo zapotřebí koně vystřídat za jiné a z této činnosti pochází význam slova relay, neboli přepřahání. Podoba je tedy v nutnosti budování tzv. retranslačních bodů, které z důvodu nepřímé viditelnosti, jakožto nutné podmínky pro mikrovlnné spoje, umožní spojení lokalit, jež by jedním přímým spojením propojeny být nemohly.



Obr. 1.2: Blokové schéma RR spoje [6]

Jde tedy o point-to-point řazený bezdrátový přenos analogových nebo digitálních signálů na vzdálenosti až několik desítek kilometrů sloužící jako náhrada metalických nebo optických kabelových vedení na místech, kde realizace kabelového vedení není výhodná. Využití nalézají radioreléové spoje například při distribuci rozhlasového a televizního signálu mezi studii, při realizaci příčkových propojení mezi základnovými stanicemi mobilních vysílačů, páteřní připojení uživatelů telekomunikačních a datových služeb, nebo jako záloha kabelových vedení pro případ jejich přerušení.

Radioreléové spoje je možné rozdělit dle kapacity přenosu na nízko a středně kapacitní s rychlostí od 2 Mbit/s do 34 Mbit/s používané často jako jednoduché příčky k páteřním infrastrukturám označované obvykle zkratkou PDH (Plesiosynchronní digitální hierarchie). Spoje nad 34 Mbit/s jsou vysokokapacitní, využívané pro páteřní spoje obvykle označované SDH (Synchronní digitální hierarchie). Digitální RR spoje jsou běžně provozovány v duplexním režimu, kdy spoj na dvou kmitočtových intervalech z daného pásma vysílá i přijímá na obou stranách současně (obr. 1.2). Topologie sítě s RR spoji může být dle potřeb hvězdicová, stromová, kruhová, nebo jejich kombinace. Stanice radioreléového spoje je nejčastěji tvořena parabolickou anténou, poté vnější jednotkou ODU (OutDoor Unit) obsahující mikrovlnný přijímač, vysílač a pomocné obvody. Za ODU následuje vnitřní jednotka IDU (InDoor Unit) mající kromě obvodů pro spolupráci s ODU také rozhraní sloužící k připojení na návazné komunikační infrastruktury. IDU dále zajišťuje konfigurační konzolu, dálkový dohled a napájení. V důsledku snahy uspořít nejen za pronájem prostor se dostávají do popředí sdružené koncepce RR spojů, kde je vnitřní i vnější jednotka spojena do jedné a umístěna přímo u parabolické antény. Sdružená koncepce se nejčastěji využívá v městských aglomeracích jako již zmíněná tzv. poslední míle.

Velkou výhodou oproti typicky Ethernetovým pojitkům (např. Wi-Fi) je absence degradace přenosové rychlosti při sériovém propojování několika spojů do řetězce. K té dochází na retranslačních bodech, kde je přenášený signál dekódován na Ethernet a po předání zase zpět kódován pro přenos. U RR spojů je tento krok vynechán a na retranslačních bodech se jen opakují přenášené signály (trakty E2, nebo E3) bez dekódování a zpětného kódování. Nedochozí proto ke ztrátě komunikační průchodnosti a průchodnost není omezena ani počtem za sebou jdoucích spojů v trase. [4] [6]

V současné době jsou na trhu dostupné RR spoje pro všechna tzv. volná i regulovaná kmitočtová pásma, na nichž je jejich provoz dle Českého telekomunikačního úřadu umožněn. V České republice vyrábí a vyvíjí RR spojů hned několik společnosti, například ALCOMA a.s., SUMMIT DEVELOPMENT, spol. s r.o., nebo TESLA a.s.

### 1.1.4 Postupný vývoj družicových spojů

Historie družicové komunikace započala vypuštěním sovětského satelitu Sputnik 1 v roce 1957, který po dobu dvaceti jedna dnů během svého pobytu na oběžné dráze ve výšce 227 km až 945 km přenášel k Zemi naměřené telemetrické informace skrze čtyři prutové antény na frekvenci v rozmezí 20 MHz až 40 MHz. O rok později byla vypuštěna americká družice SCORE, jež celému světu zprostředkovala vánoční pozdrav presidenta D. D. Eisenhowera. Data byla do palubního magnetofonu nejprve nahrána vysíláním ze Země na kmitočtu 132,905 MHz a 132,435 MHz a následně ve správný okamžik vysílána zpět na frekvencích 107,97 MHz a 107,94 MHz. Jednalo se tedy o první satelit umožňující komunikaci oběma směry. Další variantou je tzv. pasivní komunikace, kdy signály směřující k satelitu se pouze odrazí od jeho hliníkové reflexní plochy zpět k Zemi. Ten se však z důvodu deformací odrazivých ploch a slabé výkonové úrovně vracejícího se signálu příliš neujal. Výhodnější a dnes stále využívaný způsob je komunikace aktivní, kdy se přijímaný signál ze Země (up-link) převede do jiného kmitočtového pásma, zesílí a následně odešle zpět (down-link).

První satelit využívající pasivní komunikace byl americký Echo vypuštěný roku 1960 za účelem zajištění telefonních, telegrafních a faxových služeb nad uzemním USA. Stejněho roku byl na oběžnou dráhu vynesena také americký satelit Courier 1B, který jako první využíval aktivní komunikace a to již v pásmu mikrovln. Přijímal, zesiloval a odesílal zpět signál na frekvenci až 7 GHz skrze tyčové antény umístěné v rovníkové oblasti družice. Za zmínku stojí také využití solárních článků pro dobíjení NiCd akumulátorových baterií. Další významné kroky vývoje v oblasti komunikačních družic shrnuje následující přehled:

- 1962 – první družice pro přenos televizního signálu, Telstar (USA)
- 1964 – první družice na stacionární oběžné dráze, Syncom (USA)
- 1965 – první radioamatérská komunikační družice, OSCAR-III (AMSAT)
- 1965 – první komunikační družice systému Molnija (SSSR)
- 1983 – první civilní družice vypuštěná pro komunikaci s dalšími satelity (USA)
- 1996 – první komunikační družice na oběžné dráze jiné planety - Mars (USA)

V horizontu posledních dvaceti let probíhá velmi rychlý vývoj především v oblasti tzv. geostacionárních družic pohybujících se ve výšce okolo třiceti šesti tisíc kilometrů, kdy doba obletu je rovna době otočení Země kolem své osy. Družice se tedy nalézají vždy na stejném místě vůči zeměkouli a umísťují se obvykle nad rovník. Vzhledem k omezeným energetickým možnostem družic se musí volit taková kmitočtová pásma, jež mají v atmosféře

minimální útlum a umožňují dosažení co nejvyšší přenosové kapacity. Jejich přehled je uveden v tabulce 1.1. Například v pásmu C (C-band) se ve směru od Země vysílá na frekvenci v okolí 6 GHz, zpět od satelitu poté v okolí 4GHz.

Název pásma	Frek. rozsah [GHz]	Služby
P	0,3 - 1	Armáda, mobilní navigace
L	1 - 2	Mobilní komunikace, audio vysílání, radiolokace
S	2 - 4	Mobilní navigace
C	4 - 8	Fixní komunikace
X	8 - 12,5	Armáda
Ku	12 - 18	Fixní video vysílání
K	18 -26	Fixní komunikace
Ka	26 - 40	Fixní audio vysílání, mezisatelitní komunikace

**Tab. 1.2:** Kmitočtová pásma využívaná v satelitních komunikacích [15]

Nejčastěji se využívají parabolické antény a je proto výhodné používat vyšší frekvenční pásma, která umožní nasazení parabolických antén s menším průměrem, kdy například v pásmu Ku jsou průměry antén v rozmezí šedesáti až sta centimetrů. Za pomoci družicových spojů je možné vytvářet komunikační kanály s rychlostmi až několik stovek megabitů za sekundu, ale je zapotřebí počítat se zpožděním signálu, které se dle místa vysílání na Zemi pohybuje v intervalu od 250 do 300 milisekund, v případě cesty signálu také zpět k odesílateli přibližně 500 až 600 milisekund. Spoje mohou být realizované jako dvoubodové (point-to-point), nebo vícebodové, které se dělí na variantu s jedním zdrojem signálu a více příjemci (broadcasting), využívané například satelitní televizi, a na variantu s více zdroji a jedním příjemcem označovanou jako vícenásobný přístup (multiple access).

Z velkého množství aplikací využívajících satelitní komunikaci lze zmínit například analogové a digitální televizní a rozhlasové vysílání, poskytování hlasových, datových a faxových služeb a také poskytování přístupu k internetu.

Nelze nezmínit poziční a navigační služby poskytované navigačními družicemi, které jsou umístěny na nižších oběžných drahách oproti komunikačním družicím a využívají kmitočtová pásma L a S. První globální navigační satelitní systém (GNSS) americké produkce s názvem Transit z roku 1960 sloužil především pro určování polohy plavidel. Po skončení jeho životnosti vznikl systém NAVSTAR GPS primárně určený pro vojenské účely, ale od roku 1983 byl uvolněn i pro civilní využití. Alternativy k americkému systému jsou ruský Glonass, čínský Beidou (Compass), indický IRNSS, nebo evropský systém Galileo. [6] [7] [15] [16] [17]

## 1.2 Historický vývoj mikrovlnných antén

Anténa je obecně definována jako zařízení tvořící článek radiokomunikačního řetězce, jenž transformuje elektromagnetické vlnění šířící se vedením na elektromagnetické vlnění šířící se ve volném prostoru (vysílací anténa) a naopak, elektromagnetické vlnění šířící se ve volném prostoru na vlnění šířící se vedením (přijímací anténa). [18]

Vývoj nejen mikrovlnných antén, ale i antén určených pro jiná kmitočtová pásma, byl a pravděpodobně stále bude založen především na praktických zkušenostech jejich tvůrců, kteří v závislosti na svých znalostech vyvíjí a upravují antény tak, aby dané parametry byly co nejlepší pro následné konkrétní použití. V porovnání s dřívějšími experimentátory však mají dnešní výzkumníci velkou výhodu v podobě výpočetní techniky usnadňující nejen výpočty, ale také umožňující simulace prováděných úprav a návrhů.

Nejčastěji se uvádí začátek vývoje antén spolu se začátky rádia, ale faktem je, že se anténám podobná zařízení vyskytovala již několik desítek let dříve. J. Henry, vynálezce telegrafu, již v roce 1842 zjistil, že současně při přeskoku jiskry vznikl v paralelním obvodu, nacházejícím se ve vedlejší místnosti, proud vychylující magnetku. O třicet tři let déle upozoroval T. A. Edison vyzařování elektromagnetického vlnění do dálky vzniklé zakmitáváním při klíčování. To využil pro svůj sdělovací systém, jenž si nechal patentovat v roce 1885 a který pracoval se svislými unipólovými anténami. Systematicky budít, vysílat a přijímat elektromagnetické vlny však začal až H. R. Hertz v roce 1887. Pro vysílání využíval dipólovou anténu z měděného vodiče, k jejímu konci připevnil kovové koule, mezi kterými probíhal jiskrový výboj, čímž budil anténu. Obdélníková cívka s jedním závitem a jiskřištěm v jedné straně sloužila jako přijímací anténa, kde výboj v jiskřišti pozorovatelný v zatemněné místnosti představoval příjem. Hertz tímto potvrdil teorie J. C. Maxwella stanovené o dvacet let dříve. Za zmínku stojí symetrická anténa nazývaná Hertzův elementární dipól, která se dodnes využívá při teoretických výpočtech záření antén a také skutečnost, že Hertz již tehdy využíval pro své experimenty dipól s reflektorem ve tvaru parabolického válce.

Na tyto objevy navázal jeho následovník G. Marconi využívající pro první pokusy také parabolických válců, ale již na centimetrových vlnách. Dále experimentoval se sírovými čočkami, trychtýři, kruhovými i čtvercovými vlnovody. Vertikální zářič nad zemí, neboli Marconiho anténu, u svých pokusů používal také A. S. Popov a je ekvivalentem dnešních antén typu GP. O objevení směrového vyzařování otevřeného ústí vlnovodu (dutinového rezonátoru) se zasloužili J. C. Bose, O. Lodge, J. A. Fleming. Roku 1897 Lodge navrhl

a patentoval dvoukružový dipól, zařadil do antény středovou zatěžovací cívku, také využil laděný  $LC$  obvod na vstupu antény a samostatnou protiváhu. Tím bylo umožněno ladění a přizpůsobování antén a také snížení ztrát v zemi. První dvouprvkovou fázovou řadu sestrojil v roce 1906 A. Artom a ve stejném roce Marconi realizoval dlouhohrátovou anténu s mírně směrovou charakteristikou, ze které se posléze vyvinuly antény s postupnou vlnou. Konkrétně V-anténa, kosočtverečná anténa (rhombická) z roku 1931 (E. Bruce) a Beverageova anténa (H. H. Beverage) z roku 1923. Další významný objev přinesla Franklinova anténa (C. S. Franklin), nebo-li souřadová řada půlvlnných svislých dipólů později doplněna reflektory. Roku 1927 představil S. Uda svou anténu, která postupem času dostala jméno Yagi-Uda (někdy označovaná jen jako Yagiho anténa), díky anglicky psané publikaci H. Yagiho. Následně byl v roce 1931 s využitím parabolických antén realizován první experimentální mikrovlnný spoj, a to mezi Francií a Anglií. Dalším podstatným objevem před druhou světovou válkou bylo navržení rezonanční šterbinové antény, na kterém spolupracovali s americkými také sovětský vědci.

Druhá světová válka urychlila přechod do mikrovlnného pásma díky vytvoření výkonného magnetronu, který byl již dostatečně výkonný pro potřeby většího dosahu. Tím se nastartoval rychlý vývoj různých reflektorových antén, šterbinových antén a jejich řad, vlnovodných a trychtýřových zářičů a jejich řad, antén s podélným vyzařováním a čočkových antén. Pomineme-li šterbinové, jednalo se o typy antén, se kterými se prováděly pokusy již na začátku minulého století. V padesátých letech se objevily tzv. antény se zpětným zářením spadající mezi reflektorové parabolické a Yagi-Uda antény. Také se začalo pracovat na konstrukci fázových řad pro centimetrové vlny umožňují vychylování paprsku směrových antén bez mechanických součástí.

Následující dekáda přinesla aktivní (elektronické) přijímací antény, s dostatečnou citlivostí v malých rozměrech, využívající polovodičové součástky. Další využití mikrovlnných antén ve velkém měřítku přinesla Wi-Fi technologie. Úpravou konstrukce antén výrobci dosáhli potřebných pracovních pásem vyhrazených pro tuto technologii. Směrové antény jsou nejčastěji zastoupeny postupně vyvíjenými šterbinovými, patch, mikropáskovými, reflektorovými anténami se zpětným ozařovačem a reflektorovými offsetovými anténami. Všesměrové antény jsou obvykle tvořeny kolineárními anténami, jež vychází z návrhu lineární antény. K posunutí frekvenčního pásma výše u antény Yagi-Uda dopomohlo zmenšení jejích rozměrů. Stoupající oblibě se dnes těší duální (dvoupolarizační) antény, soustředující v jednom korpusu antény potřebné komponenty pro provoz na horizontální i vertikální polarizaci, čímž de facto nahrazují dvě samostatné antény. [5] [19]

## 2 ROZDĚLENÍ MIKROVLNNÝCH ANTÉN A ANALÝZA TRHU V ČR

Před tím, než si ve druhé polovině této kapitoly popíšeme zapůjčené mikrovlnné antény a porovnáme je s konkurenční nabídkou dostupnou na českém trhu, si nejprve nastíníme základní rozdělení mikrovlnných antén, výrobní materiály, z nichž jsou mikrovlnné antény nejčastěji produkovány, a uvedeme si také deklarovanou odolnost antén vůči vnějším vlivům.

### 2.1 Základní rozdělení mikrovlnných antén

Mikrovlnné antény můžeme dělit podle různých kritérií. Například z pohledu umístění antény uvnitř zařízení jako interní (mobilní telefon, notebook), nebo mimo zařízení jakožto externí. Další dělení je možné dle prostředí, ve kterém je anténa používána, na venkovní (outdoor), kde je anténa vystavena působení klimatických jevů, a na vnitřní (indoor) provozované uvnitř budov. Antény lze dělit také podle pracovního kmitočtového pásma, např. pro provoz na frekvenci 2,4 GHz, 5 GHz či 10 GHz, případně podle šířky pásma na antény úzkopásmové a širokopásmové. Možné je také rozčlenění antén na vysílací a přijímací, které není dáno odlišným principem činnosti (platí teorém reciprocity), ale pouze rozdílným umístěním v komunikačním řetězci.

Jednoznačně nejpoužívanější klasifikace, kterou probereme dále, je dle tvaru vyzařovacího diagramu na všesměrové, sektorové a směrové antény. Toto rozdělení úzce souvisí se způsobem konstrukce jednotlivých typů antén.

- **Všesměrové antény**

Horizontální vyzařovací úhel u všesměrových antén činí  $360^\circ$ , vyzařují tedy v této rovině, jak napovídá název, do všech směrů. Ve vertikální rovině je naopak vyzařovací úhel tohoto typu antén úzký, obvykle v rozsahu  $6^\circ$  až  $20^\circ$ . Tento fakt je zapotřebí brát v úvahu v případě, že protistrana bude umístěna v jiné výšce oproti všesměrové anténě. V pásmu 2,4 GHz dosahují všesměrové antény zisku od jednotek dBi, které jsou obvykle dostačující pro provoz uvnitř budov, kde je tento typ antén nejvíce využíván, až k 15 dBi u antén určených k venkovní instalaci. U 5 GHz pásma zisk dosahuje hodnot nejvýše 13 dBi. Konstrukčně do této kategorie spadají například antény kolineární prutové, flíčkové, nebo může být všesměrová anténa vytvořena sestavou sektorových antén, které dohromady vytvoří úhel vyzařování  $360^\circ$ . [20] [21] [22]

- **Sektorové antény**

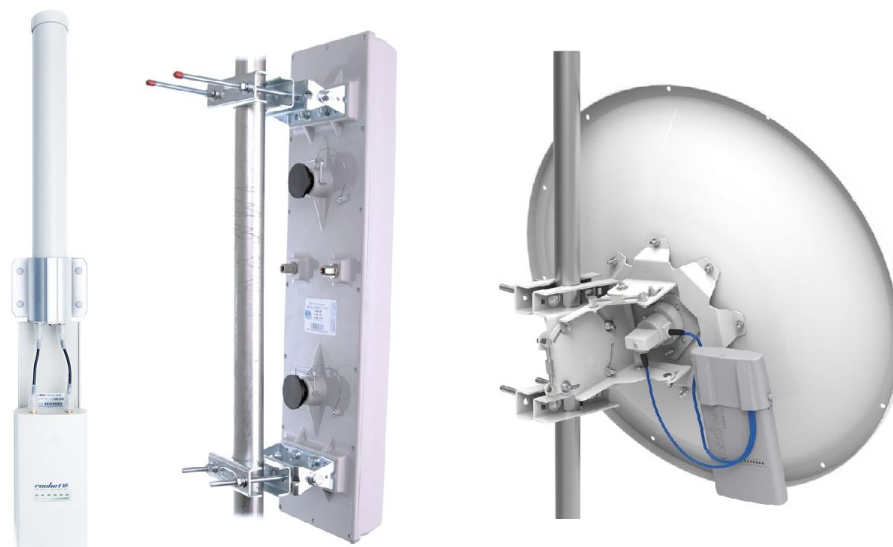
Vyzařovací charakteristika antén tohoto typu je omezena na určitou část prostoru, neboli sektor. Variabilita výběru velikosti vyzařovacího úhlu v horizontální rovině je značná. Nejčastěji se vyskytuje v intervalu od 30° do 120°, pro vertikální rovinu pak od 4° do 40°. Určitou podkategorií sektorových antén, v případě velmi úzkého vyzařovaného svazku spíše směrových antén, jsou antény panelové, které se odlišují stejným vyzařovacím úhlem v obou rovinách. Lze je snadno identifikovat díky obvyklému čtvercovému tvaru, oproti obdélníkovému, který povětšinou mají sektorové antény. Vzhledem k omezenému vyzařovacímu úhlu sektorových antén, je možné dosáhnout větších hodnot zisku oproti anténám všesměrovým. Začíná od 8 dBi a končí na hodnotách okolo 23 dBi. Antény s omezeným vyzařovacím úhlem se využívají v lokalitách, kde není zapotřebí, či z pohledu rušení okolí žádoucí, použít všesměrovou anténu. Konstrukčně do této kategorie spadají například antény mikropásmové, stěrbinové, či dipólové řady. [20] [21] [22]

- **Směrové antény**

U směrových antén je vyzařovací úhel velmi malý, typicky v obou rovinách stejně velký. Podíváme-li se opět na průřez nabídkou na našem území pro antény pracující v pásmu 2,4 GHz, zjistíme, že vyzařovací úhly jsou zpravidla v intervalu od 6° do 12° se zisky antén mezi 10 dBi a 24 dBi. V pásmu 5 GHz poté v rozmezí 3° až 14° se ziskem s horní hranicí dosahující 34 dBi. Do kategorie směrových antén se řadí také antény typu Yagi–Uda, které velikostí vyzařovacích úhlů dosahující hodnot až 50°, čímž vybočují oproti ostatním typům. Dalším typem směrových antén jsou plošné antény, trychtýřové antény, reflektorové antény se zpětným ozařovačem a reflektorové offsetové, kdy reflektor je tvořen buď plným, nebo mřížovým paraboloidem. Klasické využití směrových antén nalezneme u dvoubodových spojů (point-to-point), nebo vícebodových (point-to-multipoint), kde tvoří koncové přijímací body a vysílací bod realizuje například sektorová, či všesměrová anténa.

Existují antény, které konstrukčně a parametrově prochází skrze více kategorií uvedeného třídění, ale zde popsané základní rozdělení je v praxi nejpoužívanější a pro potřeby práce dostačující.





**Obr. 2.1:** Všeměrová duální MIMO anténa Ubiquiti AMO-5G13 (vlevo), sektorová dální MIMO anténa MaxLink 02-SE-MM-21 (uprostřed), parabolická duální MIMO anténa MikroTik MTAD-5G-30D3-PA (vpravo) [20]

Nedílnou součástí antén jsou konektory umožňující jejich snadné připojení k přívodnímu vedení a tedy k celému komunikačnímu řetězci. Konektorů pro tyto účely existuje celá řada, a proto si několik nejpoužívanějších typů nyní představíme. Popis *male* označuje část spoje s dříkem (*male pin*) a převlečnou maticí, *female* poté se zdířkou (*female pin*) a závitem po obvodu. Písmena *RP* (někdy jen *R*) před názvem konektoru značí *Reverse Polarity*, což v praxi znamená přehození dříku za zdířku u *male* a u *female* části naopak výměna zdířky za dřík. Impedance všech uvedených typů konektorů činí  $50 \Omega$ .

- **Konektor typu N**



**Obr. 2.2:** Konektor typu N (v pořadí zleva: N-FEMALE, N-MALE, RP-N-FEMALE, RP-N-MALE) [24]

Ve srovnání s ostatními konektory je typ N poměrně robustní. Používá se především na venkovních (outdoor) anténách, kde jeho větší rozměry usnadňují manipulaci, a obvykle také na anténách, jež mají vyšší hodnoty zisku. Díky velmi dobré vysokofrekvenční těsnosti a malé ztrátovosti je vhodný pro signály s kmitočtem do 11 GHz. [23] [24] [25] [27]

- **Konektor typu TNC**



**Obr. 2.3:** Konektor typu TNC (v pořadí zleva: TNC-FEMALE, TNC-MALE, RP-TNC-FEMALE, RP-TNC-MALE) [24]

Oproti předchozímu typu je TNC (Threaded Neill–Concelman) konektor rozměrově menší. V podstatě se jedná o typ BNC (Bayonet Locking Connector) využívaný pro měřicí techniku, jen s tím rozdílem, že zajištění je realizováno šroubením, které poskytuje spoji lepší parametry na mikrovlnných frekvencích oproti bajonetovému. Kmitočtový rozsah, pro který je TNC konektor vhodné používat, začíná od jednotek Hz až po 11 GHz. [23] [24] [25] [27]

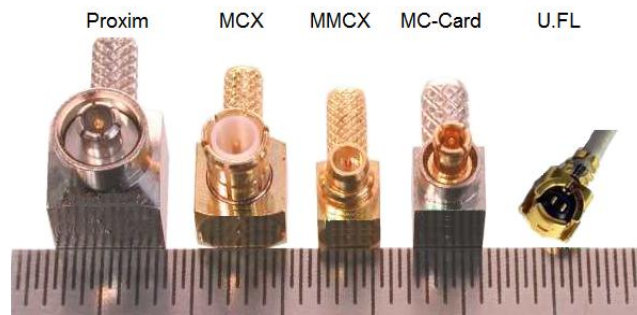
- **Konektor typu SMA**



**Obr. 2.4:** Konektor typu SMA (v pořadí zleva: SMA-FEMALE, SMA-MALE, RP-SMA-FEMALE, RP-SMA-MALE) [24]

Konektor SMA (SubMiniature version A) je ve srovnání s předešlým opět menších rozměrů. Jde o nejrozšířenější konektor využívaný jak ve vnitřním (indoor) prostředí u zařízení s odnímatelnou anténou, tak ve venkovním (outdoor) prostředí, kde se stal nejpoužívanějším konektorem u antén s pracovním kmitočtem 5 GHz. Horní hranice frekvenčního rozsahu SMA konektoru dosahuje hodnot 18 GHz, s geometrickými úpravami poté až hranice 100 GHz. [23] [24] [25] [27]

- **Konektory typu Proxim, MCX, MMCX, MC-Card, U.FL**



**Obr. 2.5:** Konektory typu Proxim, MCX, MMCX, MC-Card, U.FL [26]

Tyto konektory jsou díky malým rozměrům využívány pro připojení antény přímo na desku plošného spoje, nebo jako přechod mezi rozměrnějšími konektory (N, RP-SMA) volenými pro venkovní instalace a samotným aktivním zařízením, například miniPCI vysílací kartičkou. Tyto propojovací části vedení se nazývají *pigtaily*. Typ MCX (Micro CoaXial) je dnes nahrazen menší variantou MMCX (Micro-Miniature CoaXial) a nalézá uplatnění například v GPS či DVB-T systémech, kde slouží pro připojení antény k PCMCIA kartě. Výhodou zmenšené verze je možnost protáčení konektorového spoje o 360°. Model MC-Card slouží jako alternativa k MMCX. Konektor U.FL (označován také IPEX, IPAX, IPX, AMC, MHF nebo UMCC) je nejčastěji využíván na již zmíněných miniPCI kartičkách. Všechny tyto typy konektorů jsou schopny efektivně pracovat se signály do frekvence 6 GHz. [10] [23] [24] [25] [27]

## 2.2 Výrobní materiály antén

Při výrobě antén se využívají materiály, jenž lze v souvislosti s jejich vodivými vlastnostmi rozřadit do dvou skupin.

Do první spadají izolační materiály. Pro tyto účely jsou využívány organické syntetické pevné izolanty, nejčastěji pak izolanty z podskupiny termoplastů. Využití nachází při výrobě ochranných krytů, izolátorů, izolačních vložek a povrchových ochran anténních komponent.

Jeden z nejrozšířenějších a nejlevnějších zástupců této podskupiny je polyvinylchlorid (PVC). Je dobře tvarovatelný a vyráběný v několika variantách podle použitých příměsí. Modifikace bez změkčovadel využívaná v anténní technice se nazývá Novodur a nalezneme ji ve tvaru trubky nebo prutu sloužící jako obal, izolace, kostra nebo například jako vnější kryt všesměrových antén některých výrobců. Verze obsahující změkčovadla se pro své samozhášivé vlastnosti používá jako izolace (oplášťování) kabelů vhodných pro instalaci uvnitř budov. Relativní permitivita  $\epsilon_r$  tohoto materiálu se pohybuje při standardní teplotě

20 °C v závislosti na frekvenci od 2,5 do 3,1. PVC je do 45 °C tepelně stálý, při překročení 85 °C začíná měknout a od 150 °C jej lze tvarovat.

Dalším velmi rozšířeným zástupcem je polyetylén (PE), jenž má charakteristický voskově lesklý povrch. Z tohoto typu se vyrábí polotvrdé pruty a trubky, dále se využívá jako izolace u různých druhů kabelů díky dobrým elektroizolačním vlastnostem. Relativní permitivita  $\epsilon_r$  se při standardní teplotě pro frekvence do 10 GHz drží okolo hodnoty 2,2. Snadno vzplane a hoří, díky své hmotnosti plave na hladině. U nízkotlakého způsobu výroby je PE schopen odolávat teplotám do 200 °C a zachovává si mechanické vlastnosti do -40 °C.

Polypropylen (PP) je se svými vlastnostmi podobný polyetylénu, avšak je tvrdší, při vyšších teplotách více odolává, naopak při nízkých teplotách méně. Využití nalézá taktéž při výrobě trubek, prutů, velmi dobrých izolačních materiálů a v kabelovém průmyslu. Relativní permitivita PP odpovídá předešlému PE. Polypropylen je hořlavý a velmi lehký. Nanesením na kovy lze vytvořit trvanlivé povlaky díky dobré korozivní odolnosti PP. Od teploty 170 °C dochází k měknutí a při teplotách nad 200 °C k rozkladu.

Dnes se stále větší oblibě těší, i přes vyšší cenu, také polytetrafluorethylen (PTFE), známý pod obchodním jménem TEFLON. Jedná se o fyzikálně a chemicky velmi odolný, šedobílý, vzhledově voskovitý termoplast s výbornými dielektrickými vlastnostmi. Nenavlhá a velmi dobře odolává dalším atmosférickým vlivům, a proto se využívá mimo jiné k vytváření ochranných povrchů na různých materiálech. S velmi malým koeficientem tření je vhodný k výrobě samomazných ložisek a kluzných spojů, ale je citlivý na změnu teplot z důvodu roztažnosti (dilatace). Významné uplatnění nalézá jako kvalitní izolace v kabelových vodičích a konektorech. Za stejných teplotních podmínek jako u předešlých materiálů je relativní permitivita  $\epsilon_r$  v rozsahu 2 až 2,1. Vlastnosti tohoto materiálu lze upravovat výplněmi (např. sklo, grafit, apod.) a lze jej využívat při teplotách -200 °C až 250 °C.

Materiál polyamid (PA-6) má světle žlutou (až bílou) barvou, v tenkých vrstvách pak čirou. Komerčně označován jako SILON. Vyznačuje se výbornou pevností v tahu, rázovou houževnatostí a stabilitou na ultrafialovém světle. Nevýhodou PA-6 je nasákavost vodou a vysoká teplotní roztažnost. Využívá se k výrobě ložisek, ozubených kol a také jako izolátor v anténních sestavách. Lze snadno obrábět a jeho vlastnosti modifikovat příměsmi. Oproti ostatním plastům má ostrý bod tání, a to při teplotě 221 °C. Odlišuje se také vyšší hodnotou relativní permitivity, která se pohybuje při teplotě 20 °C v závislosti na frekvenci mezi hodnotami 4 až 5.

V dnešní době pravděpodobně nejvyužívanější plast s názvem akrylonitrilbutadienstyren (ABS) má v neupraveném stavu lesklou bílou barvu. Jeho základní vlastnosti tvoří vysoká pevnost v tahu, tvrdost a tuhost povrchu v širokém spektru teplot, rázová pevnost při teplotách až  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nenasákavost, odolnost proti oděru, rozměrová stálost a chemická odolnost. Výhodou ABS je schopnost snadného mísení s jinými látkami, díky čemuž mohou být upraveny jeho vlastnosti podle aktuálních požadavků. Například zvýšení ne příliš dobré odolnosti proti ultrafialovému záření a povětrnostním vlivům koextruzí s polymethylmetakrylátem (PMMA). Upravit lze také samozhášivé a elektroizolační schopnosti. Relativní permitivita se obvykle nachází v intervalu od 2,4 do 3,8 (pro PMMA poté od 2,5 do 3,7). V závislosti na příměsích jej lze používat od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Podíváme-li se na dnešní situaci na trhu, zjistíme, že většina výrobců využívá tento materiál nejen pro venkovní ochranné díly antén, ale vzhledem k poměrně nízké ceně také všude tam, kde to vlastnosti tohoto materiálu umožní.

Za povšimnutí stojí také polyoxymetylen (POM), především z pohledu konstrukčního materiálu schopného nahradit ocelové komponenty. Výhodami tohoto materiálu, jak již bylo nastíněno, jsou vysoká mechanická pevnost, rázová pevnost do  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pevnost v tahu, stabilita rozměrů při změně okolní teploty, nízká navlhavost, dobré elektroizolační schopnosti, samozhášivost, odolnost vůči chemikáliím a nízký třecí součinitel.

Pro úplnost zmíním reaktoplasty polyuretan (PUR) a sklolaminát s obchodním názvem Filon, jež někteří výrobci využívali především jako vnější ochranné díly venkovních všesměrových antén. A také termoplastické elastomery (TPE), aplikované na antény pro vnitřní provoz (mají nižší tepelnou a mechanickou odolnost), jsou směsí vyrobené z tvrdých termoplastických polymerů, například PP, v kombinaci s měkkým gumovým materiálem a přísadami, jako je olej, nebo jiná plniva. [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34]

Do druhé skupiny zařadíme elektricky vodivé materiály, které obvykle slouží také jako konstrukční. Nejvyužívanějšími vodiči jsou kovy, konkrétně měď, hliník, mosaz (slitina mědi a zinku), dural (slitina hliníku, hořčíku, mědi a dalších prvků dle druhu duralu), různé typy ocelí, bronz (slitina mědi a cínu) a z drahých kovů především zlato.

Měď a mosaz jsou nejčastěji využívanými materiály aktivních prvků antén díky dobrým elektrickým a technologickým vlastnostem a v neposlední řadě také díky přijatelné finanční dostupnosti. Čistý hliník je dnes nahrazován durallem, který jej překonává v pevnosti a v tvrdosti při nepatrném zvýšení hmotnosti. Dural nachází uplatnění v pasivních prvcích antén. Příkladem jsou reflektory parabolických, nebo sektorových antén a také zakončení

zářičů. Mosaz, obvykle její niklovaná varianta, se využívá pro výrobu těla konektorů, na jejich povrch je nanášena ochranná vrstva zlepšující mechanické a chemické vlastnosti konektorového spoje. Jako materiál ochranných vrstev, nacházející uplatnění nejen u konektorů, se nejčastěji využívá zlacená beryliová bronz. Ochranu zajišťuje také niklování, stříbření nebo chromování. Je velmi důležité, aby ochranné povlaky na aktivních prvcích byly homogenní a neporézní, jelikož v pásmu mikrovln obvykle vedou veškerý proud, a jejich tloušťka by měla být několikanásobná oproti hloubce vniku. Úchyty, držáky a montážní sady antén jsou typicky vyráběny z oceli s povrchovou úpravou. Z oceli jsou vyráběny také mřížové parabolické reflektory, zřídka plné parabolické reflektory, kde se pro úsporu hmotnosti častěji volí hliníkové slitiny. V malém zastoupení je využívána nekorodující ocel především pro reflektory sektorových antén a držáky, případně instalační sady antén určených do korozivně působících prostředí. Nevýhodou nerezové oceli je vyšší útlum. [28] [32] [34]

### 2.3 Odolnost antén vůči vnějším vlivům

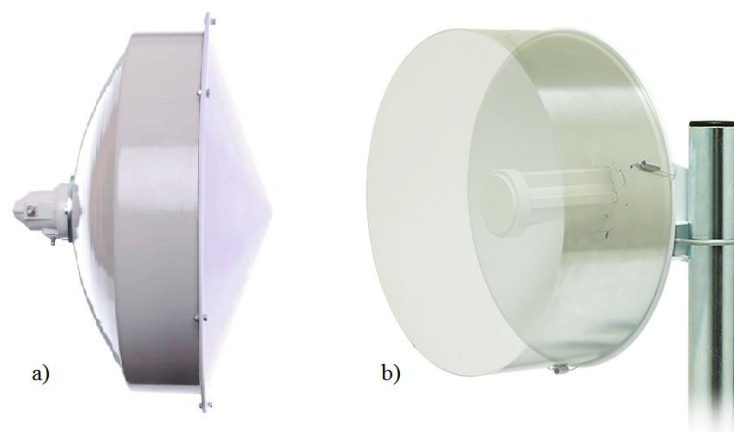
Odolnost antén vůči vnějším vlivům lze také chápat jako schopnost antén odolávat klimatickým vlivům, které jsou zastoupeny působením tepla, vlhka a tlaku s různou intenzitou. Klimatické vlivy lze rozčlenit do dvou kategorií, a to na vnitřní panující uvnitř budov, jež jsou obvykle mírnější oproti druhé kategorii, do které spadají venkovní klimatické vlivy. Dle zařazení antény výrobci volí materiály a zpracování tak, aby klimatickými vlivy v dané kategorii nebyla ovlivněna funkčnost a životnost antény. Zpravidla ty, které jsou určeny pro venkovní provoz, je možné používat i ve vnitřním prostředí, naopak antény určené pro vnitřní provoz využívat ve venkovním prostředí bez následků na jejich funkčnost dlouhodobě nelze.

Antény určené pro vnitřní provoz nezatěžují klimatické vlivy s takovým rozsahem jako modely navržené pro venkovní provoz a zátěže jako vítr či námraza lze ve své podstatě vyloučit. Z pohledu teplotní odolnosti jsou nejkvalitnější vnitřní antény schopny pracovat v rozsahu hodnot od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  po  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , v průměru ale tato skupina zvládá nejčastěji hodnoty v rozmezí  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Relativní vlhkost může dosahovat hodnot až 90 %, ale pouze za předpokladu, že nebude docházet ke kondenzaci vody.

Venku provozované antény mají v průměru provozní teploty vyšší v obou směrech, od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ale najdou se i výrobci, jejichž produkty mají definovanou pracovní teplotu v obdobném rozsahu jako antény pro vnitřní provoz. Rozdíl nastává v odolnosti proti vlhkosti, jelikož ve venkovním prostředí musí antény vydržet přímo i nepřímo dopadající

děšť. Výrobci k zamezení vniku vody používají na dosedacích plochách pryžová těsnění a silikonová lepidla. Pokud materiály přicházející do kontaktu s vlhkostí nejsou svými vlastnostmi odolné vůči jejímu působení, nanáší se na jejich povrchy odolné vrstvy. U ocelí se nejčastěji aplikuje žárovou nebo galvanickou technologií vrstva zinku, případně se pokrývá vrstvou práškové vypalovací barvy. Pro zamezení koroze hliníku se obvykle nanáší chromátová vrstva, která mimo jiné zlepšuje i přilnavost barvy a omezuje její snadné odlupování z hliníkových povrchů. Alternativou k ochraně barvou je nanesení vrstvy plastu, například polyetylénu, který zamezí korozi podkladového materiálu. Někteří výrobci na antény aplikují vrstvu vysoce hydrofobního nátěru, jenž znemožní ulpívání vody na povrchu a tudíž vzniku koroze. Zabraňuje také tvorbě námrazy, která ve výsledku může svou přidanou hmotností přetížit anténní úchyt. Jak již bylo dříve zmíněno, pro ochranu dnes nejvyužívanějšího plastu ABS proti působení ultrafialového záření se nanáší povrchová vrstva laku, tmelu, nebo polymethylmetakrylátu (PMMA), který také zvyšuje schopnost odolávat povětrnostním vlivům.

Na antény instalované ve venkovním prostředí působí také vítr, jenž při dostatečné intenzitě může způsobit jejich poškození, nebo vychýlení z požadovaného směru záření. Z toho důvodu výrobci udávají maximální rychlost působícího větru, kterou jsou jejich produkty schopny vydržet. U všesměrových venkovních antén se maximální rychlosti větru pohybují okolo 170 km/h, směrové parabolické a sektorové antény odolávají rychlostem až 200 km/h, někteří výrobci deklarují dokonce 250 km/h. Aby se snížilo větrem způsobené zatížení antény, které je závislé na jejím tvaru, vybavují výrobci parabolické antény dielektrickými, pro elektromagnetické vlny průzračnými, kryty, takzvanými radomy, jež snižují aerodynamický odpor antény a dále zlepšují odolnost proti námraze, ulpívání sněhu, teplotním výkyvům a vlhkosti.

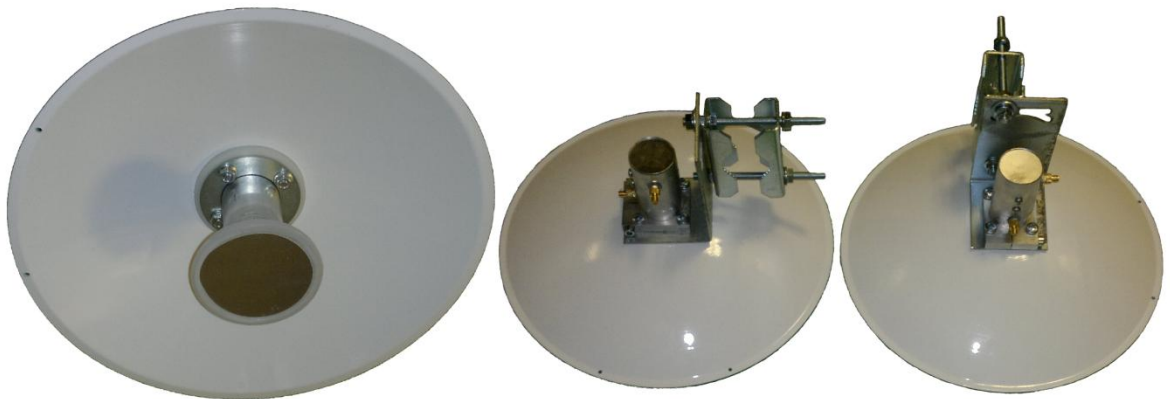


**Obr. 2.6:** Parabolická anténa a) límčová s radomem, b) s radomovým límcem [35] [36]

V případě rozměrných parabolických antén se místo radomu, dnes nejčastěji vyráběného z povrchově ošetřeného ABS plastu, používá speciální plachta. Některé typy radomů jsou spojeny rozebíratelně, nebo nerozebíratelně s límcem parabolické antény (obr. 2.6b), který omezuje rušení z okolí a do okolí antény, případně může být límec pevnou součástí samotné paraboly (obr. 2.6a). [20] [21] [22] [34]

## 2.4 Vlastnosti poskytnutých antén specifikované výrobcem

Od společnosti SIMR WIFI ANTENNAS nám bylo zapůjčeno celkem osm parabolických mikrovlnných antén. Čtyři modely WAVEANT WA265XPN2-RSMA a čtyři WAVEANT WA225XPN2-RSMA pro frekvenční pásmo 5GHz.



Obr. 2.7: WAVEANT WA225XPN2-RSMA

Na zářiči antény nalezneme hliníkové slitiny a též SILON (PA-6) sloužící jako izolační materiál. Oba tyto materiály jsou strojově opracovány. Parabolický reflektor vyrobený také z hliníkových slitin je na povrchu práškově lakován z důvodu omezení oxidace. Dále je anténa osazena dvěma RP-SMA *male* konektory s TEFLONOVOU (PTFE) izolací. Při sestavení antény je používáno lepidlo Loctite a konstrukční silikonový tmel odolávající teplotám od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  po  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Díky zvoleným materiálům jsou antény lehké, konkrétně menší 22 dBi model váží 1 kg. Montáž zařízení umožňuje držák z galvanicky zinkované oceli polohovatelný ve vertikální rovině v úhlu  $\pm 20^{\circ}$ .

Parabolické duální MIMO antény s výkonem  $26\text{ dBi} \pm 1\text{ dBi}$ , respektive s výkonem  $22\text{ dBi} \pm 1\text{ dBi}$  mají pracovní pásmo od 5,4 GHz do 5,9 GHz. Jsou dvoupolarizační, umožňují tedy provoz současně na vertikálním i horizontálním vstupu a technologii MIMO. Hodnotu ČSV (SWR) udává výrobce nižší než 1,4 u obou vstupů a modelů. Anténa s vyšším ziskem má průměr paraboly 500 mm a vyzařovací úhel  $7^{\circ}$  stejný pro obě polarizace. Varianta



s nižším výkonem, tedy 22 dBi, má průměr paraboly 300 mm a vyřazovací úhel  $9^\circ$  taktéž pro obě polarizace. Impedance obou typů antén je  $50 \Omega$  a maximální vstupující výkon 10 W. Grafy jednotlivých parametrů antén naměřených výrobcem jsou porovnány s námi získanými údaji v páté kapitole. [20] [53]

## 2.5 Porovnání s nabídkou na trhu

V této části porovnáme antény WAVEANT s konkurencí na tuzemském trhu. K srovnání byly vybrány antény Jirous JRC-24 MIMO, Jirous JRC-29 MIMO, MaxLink 02-PR-M24-D, Ubiquiti AF-5G23-S45 a MikroTik MTAD-5G-30D3, jejichž parametry a zacílení na trhu se nejvíce blíží poskytnutým vzorkům. Dostupné parametry udávané výrobcí a prodejci jsou shrnuty v následující tabulce.

	WAVEANT WA265XPN2-RSMA (odlišné hodnoty pro 22 dBi variantu)	Jirous JRC-29 MIMO (odlišné hodnoty pro 24 dBi variantu)	MaxLink 02-PR-M24-D	Ubiquiti AF-5G23-S45	MikroTik MTAD-5G-30D3
Frekvenční pásmo [GHz]	5,4 - 5,9	5,4 - 5,9	4,9 - 5,9	5,1 - 5,9	4,7 - 5,875
Zisk [dBi]	26 (22)	29 (24)	24	23	30
Vyřazovací úhel - H [ $^\circ$ ]	7 (9)	6 (9)	8	10	3
Vyřazovací úhel - V [ $^\circ$ ]	7 (9)	6 (9)	8	10	3
Izolace mezi vstupy [dB]	> 30 (28)	> 28	-	> 35	> 40
Předožadní poměr [dB]	-	> 42 (> 32)	> 30	> 30	> 30
Maximální výkon [W]	10	-	-	-	100
Polarizace	duální	duální	duální	duální X	duální
SWR (ČSV) [-]	< 1,4	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,4
Impedance [ $\Omega$ ]	50	50	50	50	50
Typ konektoru	RP-SMA male	N female	RP-SMA f.	RP-SMA f.	RP-SMA f.
Větrná odolnost [km/h]	-	-	-	200	201
Průměr reflektoru [mm]	500 (300)	650 (380)	420	378	700
Hmotnost [kg]	1,7 (1)	3,75 (2,5)	1,35	3,4	5,7
Volnost úchyty - V [ $^\circ$ ]	$\pm 20$	$\pm 20$	$\pm 20$	$\pm 20$	$\pm 20$
Průměrná cena s DPH [Kč]	1 152 (951)	2 314 (2 100)	2 003	2 908	3 027

Tab. 2.1: Porovnání vybraných parametrů antén jednotlivých výrobců

U políček vyplněných pomlčkou nebyly požadované údaje zjištěny. Podívám-li se na frekvenční (pracovní) pásma antén, lze vidět shodu u modelů výrobců WAVEANT a Jirous. Zbývající antény mají širší pracovní pásma a největšího rozsahu, konkrétně od 4,7 GHz do 5,875 GHz, dosahuje model od společnosti MikroTik. Hodnoty zisku přibližně korespondují s šířkou vyzářovacího úhlu antén. Nejvyšší minimální hodnoty izolace mezi vstupy deklaruje MikroTik a následně Ubiquiti. Nám zapůjčené antény deklarují nižší hodnoty oproti dvěma předchozím, ale vůči modelu společnosti Jirous dosahují o 2 dB výše, respektive na stejnou úroveň u 22 dBi varianty. Velikostí předozadního poměru vybočují nad průměr antény Jirous. U antén, jež jsme testovali, výrobce minimální hodnotu předozadního poměru přímo neuvádí, ale můžeme přibližně vycházet z hodnot, které výrobce naměřil (obr. P.12 a obr. P.9), tedy zhruba 37 dB a 25 dB pro 26 dBi a 22 dBi varianty. Nejpřísněji stanovují maximální hodnoty ČSV antén společnosti MikroTik a WAVEANT, s velikostí menší než 1,4. Zbývající výrobci tolerují hodnotu ČSV o desetinu vyšší. Z tabulky dále vyplývá, že antény společnosti WAVEANT jsou z vybrané konkurence na našem trhu cenově nejdostupnější, ale svými parametry nikterak nevybočují. Nesmíme však zapomenout, že vyšší cena u společností Jirous a Ubiquiti je dána radomem, který je součástí balení, a u společnosti Ubiquiti a MikroTik dvěma kusy propojovacích kabelů, tzv. pigtailů. [20] [21] [22] [32] [37] [38] [39]

### 3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MIKROVLNNÝCH ANTÉN

Tato kapitola se v první části zabývá popisem základních parametrů mikrovlnných antén, ve druhé částečně bezodrazovou komorou FEL ZČU a ve třetí samotným měřením vybraných parametrů, které jsme na získaných anténách provedli z důvodu zjišťování vlivu vnějšího prostředí na tyto parametry.

#### 3.1 Parametry antén

Anténní parametry je možné rozdělit do dvou pomyslných kategorií. První by obsahovala parametry z pohledu vnějšího chování, tedy jak se anténa chová ve volném prostoru, který ji obklopuje. Druhá poté z pohledu samotného elektromagnetického obvodu, ve kterém je anténa koncový článek. V následující části je několik základních parametrů antén představeno.

- **Zisk**

Zisk antény, jenž charakterizuje její účinnost, je dán relativní hodnotou vztaženou k dané referenční anténě. Zisk je kmitočtově závislý, udává se obvykle v decibelech a je tvořen logaritmickým poměrem napětí nebo výkonu na zátěži, připojené k měřené anténě a posléze k referenční anténě umístěné na stejné pozici.

$$G = 20 \log \frac{E_1}{E_0} = 10 \log \frac{P_1}{P_0} \text{ [dB]} \quad (3.1)$$

Jinak řečeno zisk stanovuje, kolikrát je zapotřebí zvýšit výkon referenční antény vzhledem k anténě měřené pro dosažení stejné intenzity pole v místě měření. Za referenční považujeme buď tzv. izotropickou anténu vyzařující vysokofrekvenční energii rovnoměrně do všech směrů (izotropická anténa je nerealizovatelná) se ziskem  $G = 0 \text{ dB}_i$ , nebo půlvlnný dipól se ziskem  $G = 0 \text{ dB}_d$ , případně  $2,14 \text{ dB}_i$ . Mezi referenčními anténami nám tedy vznikne rozdíl  $2,14 \text{ dB}$ . U směrových antén lze zisk s dostatečnou přesností odečíst z diagramu záření, konkrétně z vyzařovacího úhlu, který je možné určit v obou rovinách z vyzařovacích charakteristik na úrovni  $-3 \text{ dB}$  (polovičním výkonu) vzhledem k příjmu ve směru osy hlavního laloku (obr. 3.1). [28] [40]

- **Rezonanční frekvence**

Anténa realizuje otevřený rezonanční obvod, ve kterém je indukčnost a kapacita tvořena vodičem o délce  $L$  mnohonásobně větší, než je jeho průměr  $d$ . Pokud je délka vodiče celistvým násobkem poloviny vlnové délky ( $1/2 \lambda$ ), je anténa v rezonanci, tedy ekvivalentem  $RLC$  obvodu v rezonanci. Rezonanční frekvence je ovlivněna výškou antény nad zemí, jelikož dochází k uplatnění kapacity mezi deskami „otevřeného“ kondenzátoru. Závislost mezi frekvencí, indukčností a kapacitou v rezonančním obvodu popisuje Thomsonův vztah. [28] [41]

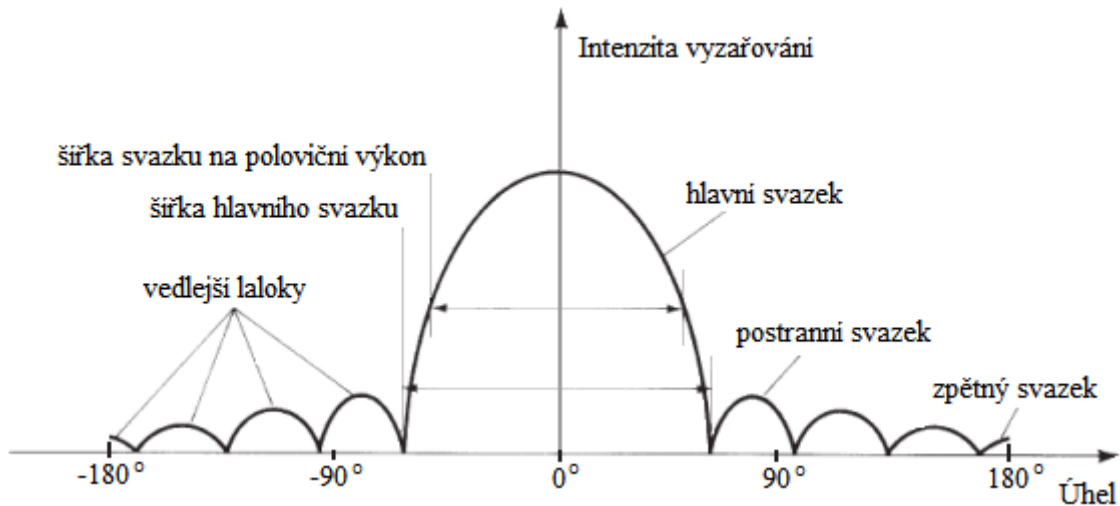
- **Šířka pásma**

Šířku pásma lze definovat jako interval kmitočtů, ve kterém se anténa chová standardně vzhledem ke své specifikaci. Vymezuje se poklesem zisku o 3 dB od hodnoty na vlastní rezonanční frekvenci antény. Vymezení je tvořené především vznikajícím impedančním nepřizpůsobením, a tedy poklesem zisku, při vzdalování se od rezonanční frekvence. V praxi je šířka pásma závislá především na konstrukci a typu antény a je potřeba uvážit fakt, že šířka frekvenčního pásma a zisk se chovají protichůdně, tj. jestliže hodnoty jednoho parametru rostou, hodnoty druhého klesají. [28] [42]

- **Vyzařovací charakteristiky (směrové charakteristiky)**

Pojem vyzařovací charakteristika se váže k vysílací anténě, směrová charakteristika poté k přijíací anténě, ale z principu reciprocity a duality je mezi těmito charakteristikami shoda. Charakteristiky se znázorňují graficky v prostorových souřadnicích, obvykleji dvourozměrně jako plošný řez v polárních či pravoúhlých souřadnicích vyjadřující závislost intenzity elektrického pole (rovina E), nebo závislost intenzity magnetického pole (rovina H). Antény, které mají značně vykreslené maximum, řadíme mezi směrové, naopak antény s digramem zhruba kruhovým (alespoň v jedné z rovin) mezi všesměrové. Vrchol hlavního svazku je ideálně při úhlu  $0^\circ$ . [28] [42] [43] [44]

S vyzařovací charakteristikou se také váže pojem směrovost. Ta popisuje schopnost antény přijímat, nebo vysílat elektromagnetické vlny v závislosti na jejich směru s různou intenzitou.



Obr. 3.1: Směrový diagram s popisem laloků [44]

- **Činitel zpětného příjmu**

Nazývaný také předozadní poměr. Určuje schopnost antény eliminovat příjem signálu z nežádoucího směru. Získává se jako poměr napětí naměřeného na vstupních svorkách antény ve směru maximálního (požadovaného) příjmu  $U_{max}$  a napětí  $U_{zad}$  naměřeného na vstupních svorkách antény ve směru nežádoucího příjmu, nebo opačného, než je směr příjmu maximální (tedy ve  $180^\circ$ ). Udává se v logaritmickém měřítku. [42] [43]

$$B = 20 \log \frac{U_{max}}{U_{zad}} \text{ [dB]} \quad (3.2)$$

- **Účinnost vyzařování antény**

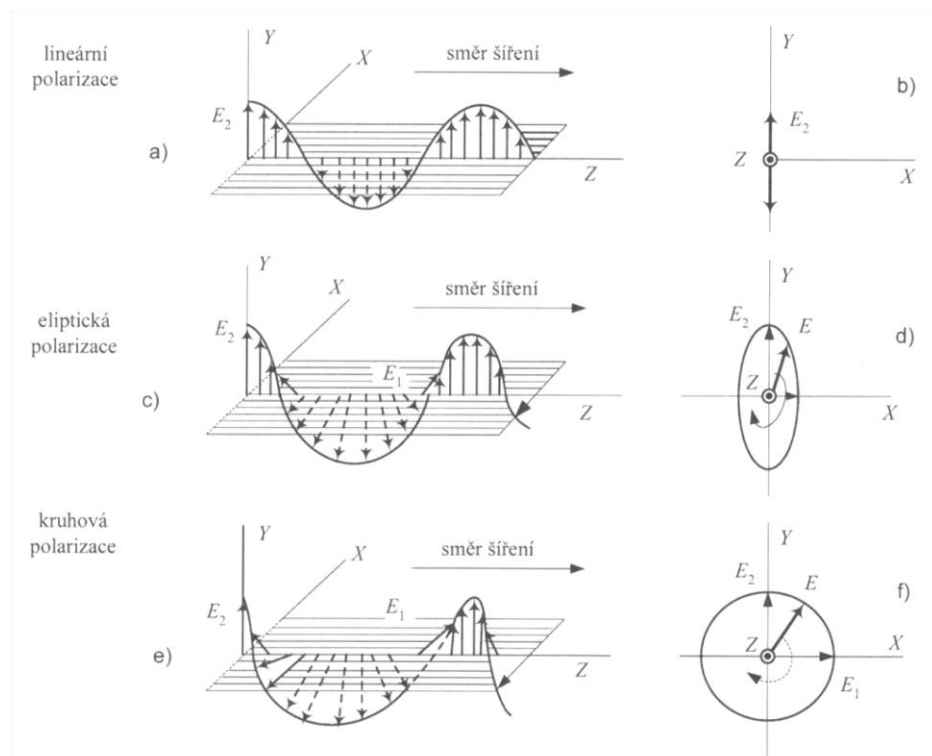
Účinnost vyzařování antény nám definuje, kolik činného výkonu anténa vyzáří  $P_\Sigma$  ku hodnotě činného výkonu  $P_{vst}$ , který je do antény dodán, tedy jaké jsou ztráty při tomto procesu. [40]

$$\eta = \frac{P_\Sigma}{P_{vst}} \quad (3.3)$$

- **Polarizace**

Polarizace elektromagnetické vlny popisuje natočení vektoru intenzity elektrického pole v prostoru. Vektory intenzity elektrického pole  $E$  a magnetického pole  $H$  jsou v případě rovinné vlny na sebe kolmé. Posuzujeme-li polarizaci elektromagnetické vlny vzhledem k zemskému povrchu, pak rozlišujeme vertikální a horizontální polarizaci. Pro vertikální

polarizaci je vektor elektrického pole kolmý k zemi. Nedochozí-li ke změně orientace elektrické složky v prostoru, ale jen ke změně velikosti vektoru  $E$  na ose  $X$ , či pro vertikální polarizaci na ose  $Y$  (obr. 3.2a), při vysílání ve směru osy  $Z$ , nazýváme tuto polarizaci lineární. Lineární polarizace je využívána u většiny antén a ty, jež umožňují provoz na obou polarizacích, tedy horizontální a vertikální zároveň, se nazývají duální, nebo také dvoupolarizační. Pokud vektor elektrického pole  $E$  mění svoji orientaci v prostoru, jedná se o polarizaci eliptickou, či kruhovou (obr. 3.2c, e). Vektor  $E$  je v případě eliptické polarizace tvořen složkami  $E_1$  a  $E_2$  odlišné velikosti, které jsou na sebe kolmé a mezi sebou mají určitý fázový posun. Pro případ kruhové polarizace je fázový posun mezi stejně velkými složkami  $E_1$  a  $E_2$   $90^\circ$ . Jak je patrné z obr. 3.2d, f, fáze složky  $E_2$  se zpožďuje oproti fázi složky  $E_1$ , jedná se tedy o levotočivou polarizaci, kterou vztahujeme ke směru šíření vlny, a smysl otáčení elektrické složky posuzujeme z pohledu od příjemce. [42] [45]



Obr. 3.2: Polarizace a) lineární, c) eliptická, e) kruhová [42]

- **Izolace mezi polarizacemi**

Tento parametr definuje míru prostupu elektrické energie z jedné polarizace antény do druhé, tedy z vertikálního vstupu do horizontálního a naopak. Lze jej vyjádřit jako poměr výkonu vstupujícího, například do horizontální polarizace antény, ku výkonu, jenž byl prozářen do vertikální polarizace a na ní také naměřen. Obvykle se izolace mezi polarizacemi

udává v decibelech. V technických publikacích duálních antén je tento parametr častěji nazýván jako izolace mezi vstupy (port-to-port isolation) antény. [18]

- **Vstupní impedance**

Vstupní impedance udává poměr mezi napětím a proudem na vstupních (napájecích) svorkách antény. Charakter impedance antény, který může být kapacitní, nebo induktivní, a velikost reálné a imaginární složky impedance antény se mění s vlnovou délkou a geometrickým uspořádáním antény. Součástí reálné složky impedance je ztrátový odpor (mění vysokofrekvenční energii v tepelné ztráty) a vyzařovací odpor (odpor záření) antény  $R_r$ , jenž je možné určit z výkonu vyzařeného z antény  $P$  a efektivní hodnoty proudu  $I$  procházející anténou dle následujícího vztahu.

$$R_r = \frac{2P}{I^2} [\Omega] \quad (3.4)$$

Pokud je proud  $I$  uvažován v místě připojení antény, v případě rezonance tvoří odpor záření celou reálnou složku vstupní impedance, velikost ztrátových odporů je tedy zanedbatelná.

Vstupní impedance je frekvenčně závislá, důležitá je také výška umístění antény nad zemí, především v rozmezí od nuly do  $1/2 \lambda$  nad povrchem pro daný kmitočet, kdy dochází k největším změnám impedance (vyzařovacího odporu). Při umístění antén ve větších výškách nad povrchem je vyzařovací odpor již poměrně konstantní. Pro co nejefektivnější přenos elektromagnetické energie mezi vedením a anténou je zapotřebí mezi nimi zajistit dobré impedanční přizpůsobení. [28] [42] [40]

- **Činitel stojatých vln**

Činitel stojatých vln (ČSV), případně poměr stojatých vln (PSV), neboli anglicky Standing Wave Ratio (SWR), definuje míru přizpůsobení antény k napájecí a vysílači. Získá se poměrem maximální a minimální amplitudy stojaté vlny. U vysokofrekvenčního vedení vzniká nedokonalým impedančním přizpůsobením mezi anténou a napájecím vedením odražená vlna  $B$ , jež putuje zpět k vysílači, čímž se snižuje účinnost přenosu. ČSV se získá následně uvedeným vztahem, kde  $F$  je výkon přenášené vlny,  $B$  výkon odražené,  $Z_a$  reálná impedance a  $Z_l$  impedance napáječe.

$$\text{ČSV} = \frac{1 + \sqrt{B/F}}{1 - \sqrt{B/F}} = \frac{Z_l}{Z_a} = \frac{Z_a}{Z_l} [-] \quad (3.5)$$

ČSV může nabývat hodnot od 1 do  $\infty$ , kdy při ČSV = 1 se jedná o dokonalé impedanční přizpůsobení, při němž je všechen výkon přenášen do antény. Této hodnoty dosahují pouze velmi dobře sestavené antény zpravidla jen na svém rezonančním kmitočtu. Při hodnotě ČSV = 3 dochází k odrazu 25 % výkonu [28]. Kvalitu impedančního přizpůsobení je možné vyjádřit také pomocí činitele odrazu  $\rho$ , jenž vyjadřuje poměr amplitudy vlny odražené a přicházející v místě styku dvou vlnových impedancí [42]. Vztah mezi ČSV a  $\rho$  je následující:

$$\text{ČSV} = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} [-] \text{ a } |\rho| = \frac{\text{ČSV} - 1}{\text{ČSV} + 1} [-] \quad (3.6)$$

### 3.2 Částečně bezodrazová komora FEL ZČU

Při měření parametrů antén ve volném prostoru je jeden z největších problémů nežádoucí přítomnost okolních elektromagnetických polí. Vzhledem k délce některých měření, může potíže způsobit také změna meteorologické situace. Z důvodu eliminování nejen těchto problémů se měření obvykle provádí v elektromagneticky stíněných komorách, které napodobují volný prostor a neobsahují rušivé signály.

V přízemí budovy FEL ZČU se nalézá částečně bezodrazová komora Frankonia SAC-3. Označení částečně bezodrazová vyplývá z absence absorpčních materiálů pouze na podlaze komory, čímž komora simuluje volné prostranství, jehož součástí jsou odrazy od zemní roviny. Pokud je absorpční materiál na všech stěnách, stropě a také na podlaze, jedná se o zcela bezodrazovou komoru, která vytváří ničím neomezený prostor. Konstrukce komory je z vnitřní strany zcela pokryta zároveň pozinkovanými ocelovými plechy o tloušťce 2 mm a vytváří tak využitelný prostor s délkou 8480 mm, šířkou 4955 mm a výškou 5750 mm. Osazeny ocelovými plechy jsou také vstupní dveře, jež mají po svém obvodu pro propojení s okolními stíněním pružné kontakty ze slitiny mědi a beryllia. Ošetřeny jsou i obslužné a větrací otvory a síťové a signálové kabely jsou opatřeny oddělovacími filtry. Tím je dosaženo potřebné elektromagnetické těsnosti a efektivního stínění komory. Dle protokolu z měření společností Frankonia po instalaci komory jsou splněny udávané hodnoty účinnosti stínění s rezervou 3,9 dB v celém rozsahu provozních frekvencí. [43] [56] [57]

Kmitočet	10 kHz	100 kHz	1 MHz	100 MHz	1 GHz	18 GHz
Účinnost stínění [dB]	80	100	100	120	120	100

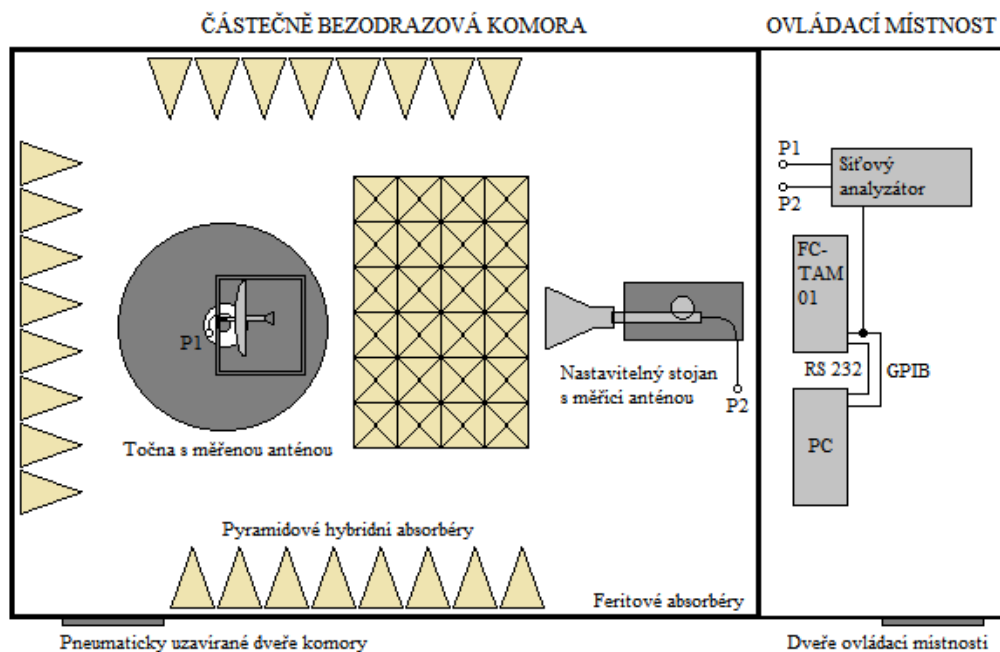
Tab. 3.1: Zaručovaný útlum stínění komory Frankonia SAC-3 [43]



Uvnitř komory jsou použity absorpční materiály, které přeměňují dopadající elektromagnetické záření na teplo díky dielektrickým či magnetickým ztrátám. [43]

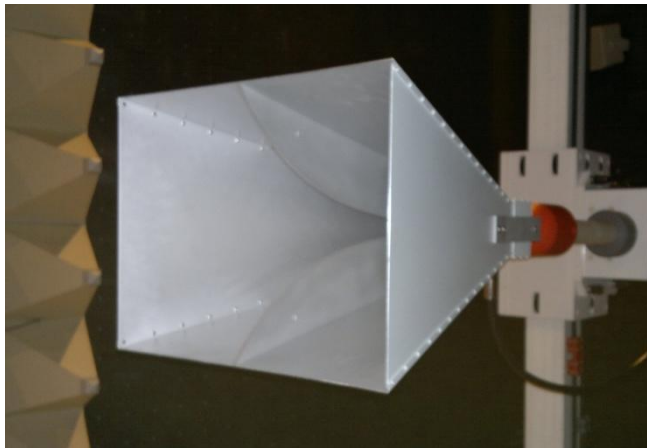
První je feritový absorbér Franko<sub>Sorb</sub> F006 s tloušťkou 22 mm a rozměry 600 mm na 600 mm. Je instalován na všech stěnách, stropě i dveřích. Na podlaze komory se nenachází, ale je možnost jej rozmístit na plochu mezi měřenou a měřicí anténou. Reflektivita (odrazivost) tohoto materiálu, která udává poměr mezi dopadajícím a odraženým výkonem v logaritmickém stupnici, dosahuje nejnižších hodnot v pásmu od 10 MHz do 1 GHz. Charakteristiku v tomto rozsahu zobrazuje obr. P.1 nalézající se v přílohách. [54]

Druhý absorpční materiál je zastoupen pyramidovými hybridními absorbéry Franko<sub>Sorb</sub> H450, jež jsou vytvořeny spojením feritových absorbérů s pyramidovými impedančně přizpůsobenými tenkovrstvými absorbéry. Výška pyramidy, kterou napovídá modelové označení, činí 450 mm s rozměry základny 300 mm na 300 mm. Těmito absorbéry je zcela pokryta stěna proti měřicí anténě, stěna za měřicí anténou pak nikoli. Boční stěny a strop komory je osazeny částečně. U podlahy máme jako v předešlém případě možnost jejich vyskládání mezi měřenou a měřicí anténou. Z obrázku 3.5 je patrné, že jsme tuto možnost využili. Reflektivitu hybridních pyramidových absorbérů znázorňuje obr. P.2 umístěný v přílohách, ze kterého je patrná největší výhoda hybridních absorbérů, tj. dobré útlumové vlastnosti od 30 MHz až po přibližně 20 GHz. [55]



**Obr. 3.5:** Grafické znázornění uspořádání přístrojů v částečně bezodrazové komoře FEL ZČU v pohledu shora

Komora je dále vybavena točnou o průměru dva metry a nastavitelným anténním stojanem. Obě zařízení komunikují skrze rozhraní GPIB s kontrolérem Franconia FCTAM 01, čímž je umožněno jejich řízení (obr. 3.5). Instalovaný audiovizuální systém umožňuje monitoring probíhajících měření z ovládací místnosti. Vzhledem k osazení stěny za měřicí anténou pouze feritovými absorbéry je vhodné pro měření na frekvencích větších než 1 GHz použít měřicí trychtýřovou anténu s hřebenovým vlnovodem, tzv. ploutvovou (obr. 3.4), která je ostře směrová s velkým odstupem postranních laloků. Hlavní předností tohoto typu antény jsou velmi dobré širokopásmové vlastnosti a využívá se především v pásmu centimetrových a milimetrových vln.



Obr. 3.4: Měřicí trychtýřová anténa s hřebenovým vlnovodem Schwarzbeck BBHA 9120 E

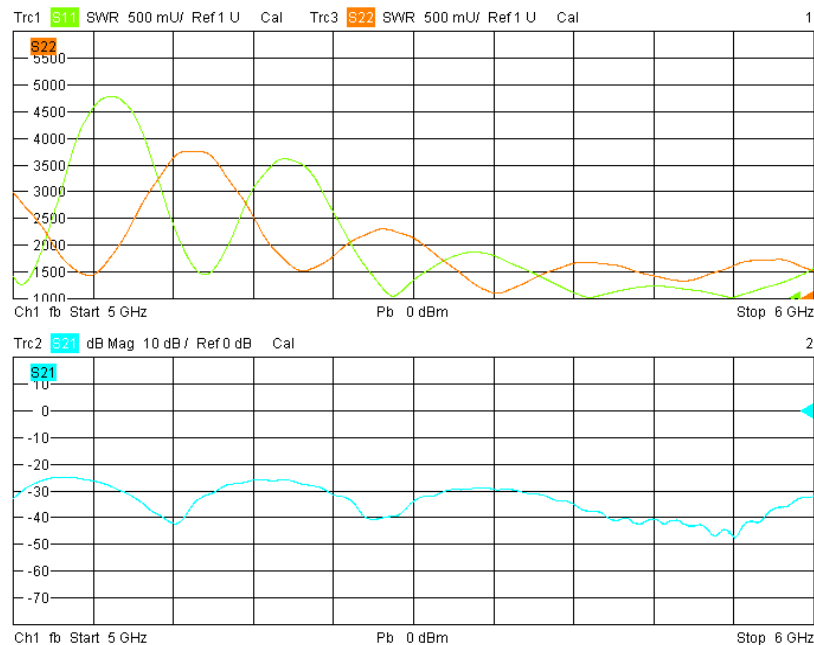
### 3.3 Měření parametrů mikrovlnných antén

Pro účely zjišťování vlivu vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén byly vybrány čtyři parametry, které byly změřeny v částečně bezodrazové komoře. Konkrétně se jedná o činitel stojatých vln, směrové charakteristiky, zisk a izolaci mezi vstupy, jejichž postup měření si přiblížíme v následujících podkapitolách. Měření všech parametrů bylo prováděno na vektorovém síťovém analyzátoru Rohde & Schwarz (R&S) ZVB 8 umožňující zkoumání signálů od 300 kHz do 8 GHz.

#### 3.3.1 Činitel stojatých vln

Nejprve byl na vektorovém síťovém analyzátoru nastaven režim měření pro získání hodnot ČSV, tedy parametr  $S_{11}$  zajišťující měření činitele odrazu  $\Gamma$  (gama) pro vertikální vstup a parametr  $S_{22}$  zajišťující měření činitele odrazu  $\Gamma$  pro horizontální vstup antény. Frekvenční rozsah jsme omezili na interval od 5 GHz do 6 GHz s krokem 5 MHz

a výkonovou úroveň generátoru jsme nastavili na 0 dBm. Následně byly připojeny do obou vstupů R&S ZVB 8 koaxiální kabely s impedancí 50  $\Omega$ . Abychom neměřili hodnoty ČSV také pro koaxiální vedení, ale pouze pro anténu, bylo zapotřebí provést před samotným měřením kalibraci pomocí kalibrační sady a to pro zakončení koaxiálního kabelu naprázdno, nakrátko a při impedančním přizpůsobení. Poté jsme kalibrační sadu odpojili a nahradili ji zkoumanou anténou, jež byla nasměrována šikmo na stěnu částečně bezodrazové komory pro co nejlepší simulaci volného prostředí. Měření proběhlo pro obě polarizace a získaná data byla uložena ve formátu .csv na USB flash disk, spolu s vykreslenými grafy průběhů ČSV přímo z měřicího přístroje (obr. 3.6) ve formátu .png, sloužící pro následnou kontrolu námi vykreslených grafů v prostředí MATLAB.



Obr. 3.6: Průběhy ČSV pro obě polarizace antény (horní) a izolace mezi vstupy (dolní) z R&S ZVB 8

### 3.3.2 Izolace mezi vstupy

Měření izolace mezi vstupy antény probíhalo díky možnostem vektorového síťového analyzátoru R&S ZVB 8 spolu s měřením ČSV. Získané hodnoty parametru  $S_{21}$ , neboli činitele přenosu (prostupu)  $T$  (tau), byly uloženy do společného souboru formátu .csv jako další sloupec. Pro následnou možnost kontroly námi vykreslených průběhů v prostředí MATLAB byl opět zaznamenám graf naměřených hodnot přímo z měřicího přístroje (obr. 3.6) ve formátu .png.

### 3.3.3 Směrové charakteristiky

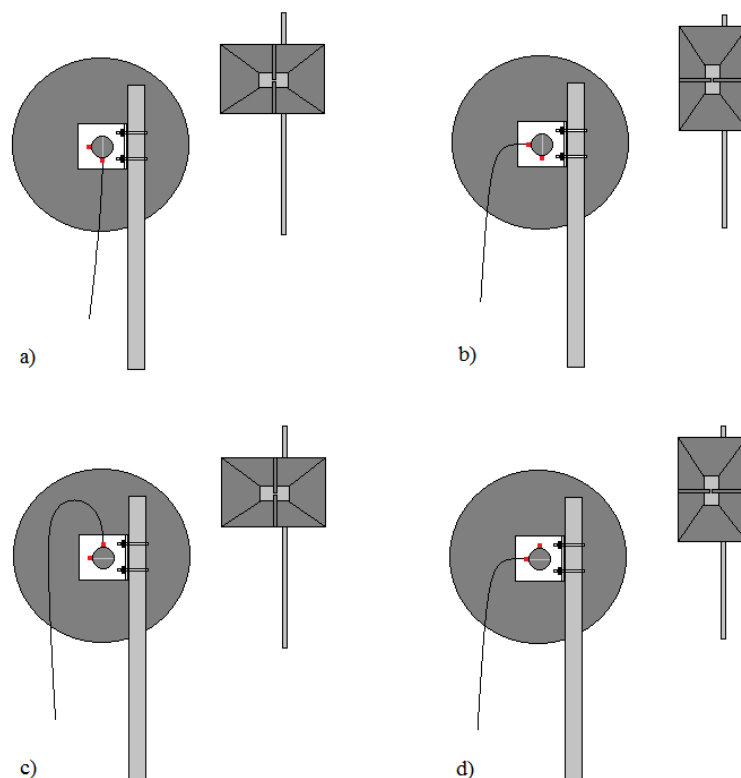
Při měření směrových charakteristik jsme kromě vektorového síťového analyzátoru R&S ZVB 8 využívali točnu řízenou kontrolérem Franconia FCTAM 01, nastavitelný anténní stojan, trychtýřovou měřicí anténu s hřebenovým vlnovodem Schwarzbeck BBHA 9120 E a počítač v ovládací místnosti. Pro manuální ovládání točny a anténního stojanu byl počítač připojen k FCTAM 01 sériovým rozhraním RS 232, pro automatické řízení pak skrze sběrnici GPIB, kterou byl propojen také počítač se síťovým analyzátozem (obr. 3.5). Měření bylo prováděno v tzv. vzdáleném poli, jež tak lze označit, pokud je největší rozměr antény  $D \gg \lambda$ . Pak je vzdálené pole uvažováno od vzdálenosti větší než  $2D^2/\lambda$ .

Na točnu jsme umístili dřevěný stůl, jenž jsme využili ke kompenzaci výšky anténního stojanu, na který byly postupně instalovány měřené antény tak, aby se nacházely vždy ve středu točny. Na nastavitelný stojan byla umístěna měřicí anténa. Před samotným připojením antén k měřicímu vybavení byla znovu provedena kalibrace vektorového síťového analyzátoru, protože bylo použito oproti předchozímu měření jiné propojovací vedení, a dále byl nastaven parametr  $S_{12}$  zajišťující měření zpětného přenosového koeficientu mezi měřenou a od ní 3,5 m vzdálenou měřicí anténou. Následně probíhala inicializace točny a anténního stojanu skrze RS 232, při které musí být pozastavena komunikace prostřednictvím GPIB. Inicializace nastaví točnu a anténní stojan do defaultních pozic a po dokončení inicializace převezme ovládání hlavní skript *smchar\_isk.m* v prostředí MATLAB, který řídí následné měření směrových charakteristik skrze sběrnici GPIB.

Při spuštění měřicího skriptu nás počítač vyzval k zadání výšky měřicí antény na anténním stojanu tak, aby byla v jedné rovině s měřenou anténou, tedy v úrovni 1,8 m. Po vyrovnání výšek jsme provedli konečné vycentrování měřené antény do středu točny a nasměrování zářiče měřené antény do středu měřicí antény pomocí laserového měřiče vzdálenosti. Poté jsme komoru uzavřeli a pokračovali s měřením z počítače v ovládací místnosti. Určili jsme kmitočtový rozsah měření 4 GHz až 8 GHz (s krokem 2 MHz). Před spuštěním samotného měření jsme zadali hodnotu časové brány 0 až 29 ns, která eliminuje vliv vln odražených od stěn komory na měření. Při měření se točna pohybuje od  $-180^\circ$  do  $180^\circ$  s krokem  $1^\circ$ .

Po dokončení všech tři sta šedesáti dílčích měření pro každý stupeň natočení antény jsme získaná data uložili ve formátu *.mat* a následně funkcí *smchar\_opf.m* vykreslili směrovou charakteristiku v kartézském diagramu s logaritmičnými souřadnicemi ve formátu *.fig*, umožňující další zpracování v prostředí MATLAB.

S uloženými daty jsme provedli změnu konfigurace měřené, případně měřící antény a znovu spustili hlavní skript *smchar\_isk.m*. U antén s pracovním označením 1401, 1402 a 1408 jsme provedli měření směrových charakteristik pro vertikální vstup antény v rovině H a pro horizontální vstup antény v rovině E (obr. 3.7a, b). U zbývajících pěti antén jsme provedli kompletní měření, kdy k již zmíněným přibýlo po pootočení zářiče o  $90^\circ$  ve směru hodinových ručiček měření pro horizontální vstup antény v rovině H a pro vertikální vstup antény v rovině E (obr. 3.7c, d). Tedy antény s pracovním označením 1403, 1404, 1405, 1406 a 1407 jsme měřili ve čtyřech konfiguracích zobrazených na obr. 3.7.



**Obr. 3.7:** Konfigurace měřené (pohled zezadu) a měřící (pohled zepředu) antény při získávání směrových charakteristik a hodnot zisku: a) vertikální vstup antény v rovině H (vH), b) horizontální vstup antény v rovině E (hE), c) horizontální vstup antény v rovině H (hH), d) vertikální vstup antény v rovině E (vE)

### 3.3.4 Zisk

Z dat získaných při měření směrových charakteristik je možné pro libovolný úhel vygenerovat průběhy zisku antény v závislosti na kmitočtu pomocí funkce *zisk\_os\_prac.m*. Grafy jsme opět uložili ve formátu *.fig* umožňující další zpracování.

## 4 VLIVY VNĚJŠÍHO PROSTŘEDÍ

Mikrovlnné antény jsou díky místům, na kterých jsou provozovány, vystaveny velmi náročnému a proměnnému prostředí. Ať již na vrcholcích hor, kde v zimě klesá teplota dlouhodobě a hluboce pod bod mrazu, nebo ve středních polohách, které antény zatěžují častými přechody teploty přes bod mrazu. Opačným extrémem jsou střechy budov v letních dnech, kdy teplota v jejich okolí může překonávat 60 °C, dle lokality a okolních podmínek [46]. Neopomenutelnou roli má také vlhkost, která může způsobovat oxidaci a v kombinaci s přechodem teploty do záporných hodnot také námrazy. Abychom vliv vnějšího prostředí, které může na mikrovlnné antény působit, nasimulovali co nejlépe, byly antény umístěny do klimatické komory a zatíženy klimatickými testy dle platných technických norem. Jak je patrné z obr. P.5 umístěného v přílohách, do klimatické komory se vzhledem k rozměrům nevešly antény s pracovním označením 1405 a 1408, které tedy našly využití jako kontrolní vzorky správnosti měření v částečně bezodrazové komoře.

### 4.1 Klimatická komora FEL ZČU

Laboratoř klimatických zkoušek Západočeské univerzity v Plzni je vybavena klimatickou komorou od společnosti Vötsch Industrietechnik. Konkrétně se jedná o model VC 7018, který umožňuje mimo jiné simulovat vliv prostředí na zkoumané předměty dle platných normalizovaných zkoušek.



**Obr. 4.1:** Klimatická komora FEL ZČU

Teplotní rozsah klimatické komory začíná na  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  a končí na  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  s rozsahem relativní vlhkosti (RH) od 10 % do 98 %. V případě zkoušek suchým teplem je simulovaná teplota schopna dosáhnout  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Za zmínku stojí režim muflové pece s teplotou až  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , nebo simulace kombinovaného dlouhodobého stárnutí izolantů se současným působením teploty (až  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a střídavého (24 kV), či pulzního napětí ( $\pm 5\text{ kV}$ ). [47]

## 4.2 Zkoušky dle norem ČSN EN 60068-1 ed. 2

Norma ČSN EN 60068-1 ed. 2 tvoří základní normu pro soubor norem ČSN EN 60068-2 ed. 2, které popisují zkoušení vlivů prostředí na technické výrobky. Jedná se o mezinárodní normu převzatou od evropské normy IEC 60068-1, jež popisuje obecné postupy pro výběr typu klimatické zkoušky a upřesňuje možnosti přizpůsobování zkoušek vlivu prostředí. Skupiny zkoušek, které vytváří normu ČSN EN 60068-2 ed. 2, se označují velkými písmeny a jsou jimi například zkoušky:

- A: Chladem
- B: Suchým teplem
- C: Vlhkým teplem (konstantním)
- D: Vlhkým teplem (cyklickým)
- K: Korozivním prostředím
- N: Změnou teploty
- R: Vodou

Pro naše měření je podstatná skupina D: Vlhké teplo cyklické (ČSN EN 60068-2-30 ed. 2) a N: Změna teploty (ČSN EN 60068-2-14 ed. 2), které jsou více přiblížené v následujících kapitolách. Tyto zkoušky jsou provedeny za sebou a tvoří řadu zkoušek, u které je testovaný objekt vystaven postupně dvěma, případně více vlivům prostředí. Doba mezi dílčími zkouškami je volena tak, aby nedošlo k podstatnému ovlivnění testovaného objektu (vzorku), a obvykle se mezi jednotlivými zkouškami (expozicemi) provádí aklimatizace před a aklimatizace po zkoušce.

Pokud není přesně stanoveno pořadí jednotlivých zkoušek u řady zkoušek, je možné na volbu pořadí nahlížet ze čtyř základních pohledů:

- Nejprve nejpřísnější zkoušky, které umožní získat informace o sklonu k poruchám. Ne však zkoušky, které by znemožnily testovanému objektu odolat následujícím zkouškám, tzv. destruktivní zkoušky. Ty se zařazují na konec řady.
- Nejprve nejměkčí zkoušky, aby bylo možné získat co nejvíce údajů před poškozením testovaného objektu.
- Zvolení pořadí zkoušek, které zajistí nejprůkaznější informace. Například navázání jednotlivých zkoušek za sebou tak, že se při následující projeví poškození z předešlé.
- Zvolení pořadí zkoušek, které co nejlépe simuluje reálné prostředí.

U našeho testování nebylo pořadí zkoušek důležité, jelikož se řada zkoušek prováděla dvakrát a vzniklé poruchy na konci první řady by se projevíly při druhé řadě zkoušek.

U řady zkoušek se měření parametrů testovaného objektu obvykle provádí před každou expozicí a následně také po každé expozici. V našem případě proběhla řada zkoušek v klimatické komoře dvakrát a měření v částečně bezodrazové komoře vždy před a po dokončení celé řady zkoušek. Tedy před první řadou zkoušek v klimatické komoře, následně mezi první a druhou řadou zkoušek a na závěr po druhé řadě zkoušek v klimatické komoře.

Každá ze zkoušek vlivu prostředí nacházející se v této normě může být složena z následující struktury:

- aklimatizace před zkouškou
- počáteční kontrola a měření
- expozice
- aklimatizace po zkoušce
- konečná kontrola a měření

Aklimatizace před a po zkoušce zajišťuje stabilizování testovaného objektu před měřením a samotnou zkouškou. Expozice je zde chápána jako vystavení testovaného objektu, nebo vzorku působení vlivu prostředí. Tuto strukturu si však většina zkoušek upravuje tak, aby co nejlépe odpovídala jejímu charakteru. [48]



#### 4.2.1 ČSN EN 60068-2-30 ed. 2 - Vlhké teplo cyklické

Jak již napovídá název zkoušky, jedná se o zatížení testovaného objektu cyklickou změnou teploty při vysoké relativní vlhkosti, za které obecně dochází na povrchu objektu ke kondenzaci. Cílem zkoušky je otestovat korozivní ochranu a těsnost jednotlivých dílů i antény jako celku. [49]

Zkouška umožňuje výběr ze dvou stupňů přísnosti, které jsou dány horní teplotou a počtem cyklů:

- horní teplota 40 °C a počet cyklů: 2, 6, 12, 21, 56
- horní teplota 55 °C a počet cyklů: 1, 2, 6

Po dohodě s výrobcem testovaných antén jsme vybrali stupeň přísnosti s teplotou 55 °C a počet cyklů jsme, z důvodu lepšího otestování a využití rezervovaného času klimatické komory, zvolili deset, přestože se tento počet neshoduje s normou, která při této teplotě doporučuje nejvýše šest cyklů.

- **počáteční měření**

Před začátkem klimatické zkoušky byly u antén změřeny žádané parametry v částečně bezodrazové komoře (kapitola 3.3). Také byl zkontrolován a fotograficky zdokumentován stav antén pro možnosti dalšího srovnání.

- **expoze**

Testované elektricky nezatížené antény jsme spolu s připevněnými kovovými instalačními úchyty umístili do klimatické komory (obr. P.5 v přílohách) co nejrovnoměrněji, aby teplota uvnitř komory byla co nejkonstantnější, a pokud možno, aby poloha antén odpovídala jejich poloze v reálném použití. Také je zapotřebí umožnit stékání kondenzované vlhkosti pryč ze vzorků. Konektory antény jsme ochránili před vnikem vlhkosti izolační vulkanizační páskou (obrázky ve složce *Fotografie* v elektronických přílohách). Hodnoty teploty a relativní vlhkosti jsou v normě popisovány jako toleranční pásma, které hodnoty nesmí opustit. Proto následný popis průběhu obou veličin bude vždy udávat hodnoty ve středu tolerančního pásma, abychom zajistili dodržení normy pro případné drobné výkyvy hodnot v klimatické komoře.

Nejprve je zapotřebí dosáhnout teplotní rovnováhy mezi vzorky a prostředím komory. To nám zajistí nastavení teploty v klimatické komoře na hodnotu  $25\text{ °C} \pm 3\text{ K}$  a relativní vlhkosti  $60\% \pm 15\%$  po dobu jedné hodiny. Po dosažení teplotní stability se relativní vlhkost (RH)

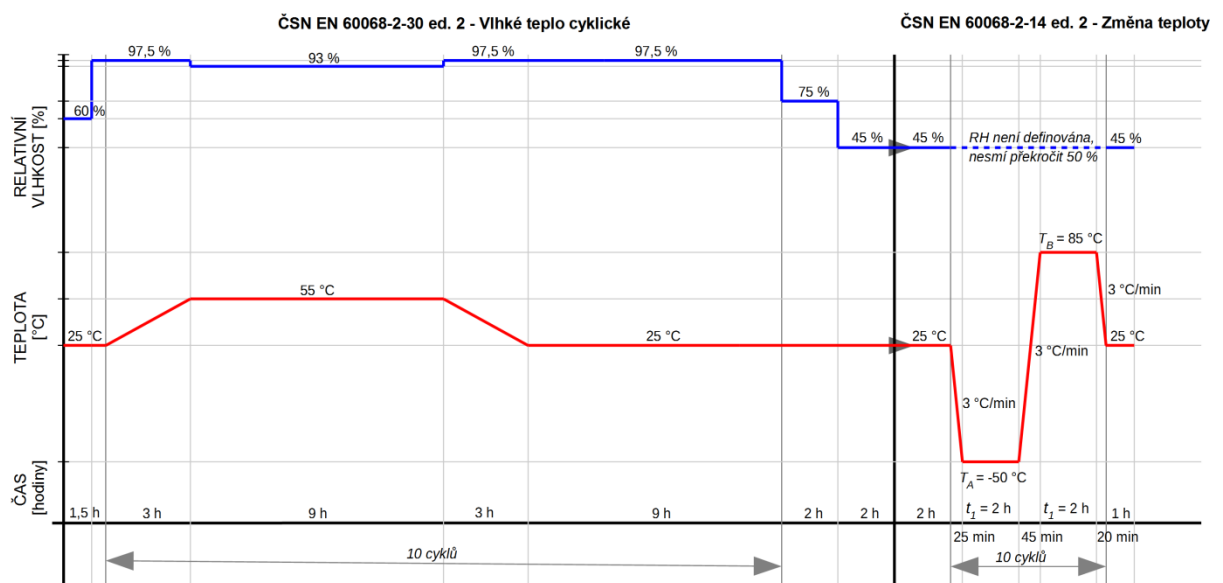
zvýší na hodnotu  $97,5 \% \pm 2,5 \%$  při zachování stávající teploty za dobu třiceti minut. Nyní začíná první cyklus zkoušky. Teplota roste z  $25 \text{ °C} \pm 3 \text{ K}$  na  $55 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$  po dobu  $3 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$  a RH se udržuje  $97,5 \% \pm 2,5 \%$ . Při ustalování teploty na hodnotě  $55 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$  může posledních patnáct minut relativní vlhkost klesnout maximálně k  $90 \%$ . Po ustálení teploty na hodnotě  $55 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$  a dosažení RH  $93 \% \pm 3 \%$  je tento stav udržován po dobu  $9 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$ . Následně dochází ke snižování teploty na hodnotu  $25 \text{ °C} \pm 3 \text{ K}$  za dobu  $3 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$ , která se udržuje do konce 24h cyklu. RH může během prvních patnácti minut po zahájení snižování teploty klesnout maximálně k  $90 \%$  a po zbytek 24 h cyklu musí být na hodnotě  $97,5 \% \pm 2,5 \%$ . Cyklus se následně provede znovu, celkem desetkrát. Průběh zkoušky přibližuje obrázek 4.2.

- **aklimatizace po zkoušce**

Před ukončením zkoušky, tedy po dokončení posledního desátého cyklu při teplotě  $25 \text{ °C} \pm 3 \text{ K}$ , dojde ke snížení relativní vlhkosti na  $75 \% \pm 2 \%$  za maximálně jednu hodinu a tuto hodnotu necháme stabilizovat po dobu dvou hodin od začátku snižování RH. Tím je splněna aklimatizace po zkoušce. Následně za stejných časových podmínek znovu poklesne relativní vlhkost, nyní na minimální hodnotu z intervalu udávaného normou, tj.  $45 \%$ . Stále při teplotě  $25 \text{ °C} \pm 3 \text{ K}$ .

- **konečná měření**

Nyní konečná měření neproběhla, jelikož následuje druhá zkouška z řady zkoušek.



Obr. 4.2: Průběh řady zkoušek

#### 4.2.2 ČSN EN 60068-2-14 ed. 2 - Změna teploty

Zkouška změnou teploty se využívá pro zjištění, zda je testovaný předmět schopný odolat a případně fungovat při změně teploty okolního prostředí. Je tvořena konkrétně dlouhým obdobím při vysoké a nízké teplotě s definovanou rychlostí přechodu mezi těmito hodnotami a počtem cyklů zkoušky. Jeden cyklus je složen z přechodu teploty laboratoře na první zvolenou hodnotu, následně přechodem na druhou zvolenou hodnotu a poté zpět na teplotu laboratoře. [50]

Zkouška změnou teploty se dělí do tří podskupin dle požadovaného použití. Naše požadavky na hodnocení nejlépe splňovala podskupina s označením Nb, která pro vykonání zkoušky nevyžaduje více klimatických komor, komoru s rychlou změnou teploty, nebo kapalinové lázně a nezpůsobuje testovaným vzorkům extrémně silný tepelný šok.

Stupně přísnosti zkoušky změnou teploty jsou tvořeny dvojicí teplot  $T_A$  a  $T_B$ , definovanou rychlostí změny teploty vzduchu v komoře, dobou expozice  $t_I$  na teplotách  $T_A$  a  $T_B$  a počtem cyklů. Hodnoty, jež lze volit pro  $T_A$ , jsou uvedeny v ČSN EN 60068-2-1 ed. 2 a znázorňuje je tabulka 4.1, hodnoty pro teplotu  $T_B$  uvádí norma ČSN EN 60068-2-2 a zobrazuje je tabulka 4.2. Tolerance pro tyto hodnoty jsou stanoveny na  $\pm 2$  K.

+5 °C	-10 °C	-25 °C	-40 °C	-55 °C
-5 °C	-20 °C	-33 °C	-50 °C	-65 °C

**Tab. 4.1:** Volitelné teploty pro  $T_A$  [51]

+30 °C	+55 °C	+100 °C	+250 °C	+800 °C
+35 °C	+60 °C	+125 °C	+315 °C	+1000 °C
+40 °C	+65 °C	+155 °C	+400 °C	
+45 °C	+70 °C	+175 °C	+500 °C	
+50 °C	+85 °C	+200 °C	+630 °C	

**Tab. 4.2:** Volitelné teploty pro  $T_B$  [52]

Pro změnu teploty vzduchu v klimatické komoře mezi 10 % a 90 % teplotního intervalu máme dle normy na výběr z následujících preferovaných rychlostí:

- 1 K/min  $\pm$  0,2 K/min
- 3 K/min  $\pm$  0,6 K/min
- 5 K/min  $\pm$  1 K/min
- 10 K/min  $\pm$  2 K/min
- 15 K/min  $\pm$  3 K/min

Čas doby expozice  $t_I$  může být zvolen v závislosti na tepelné kapacitě testovaného objektu z rozsahu 10 min, 30 min, 1 h, 2 h a 3 h. Nejvyšší hodnota se volí v případě, kdy specifikace dobu nestanovuje. Poslední částí nastavení stupně přísnosti je počet cyklů, které norma udává dva, není-li stanoveno jinak. Při našem zkoušení jsme zvolili počet cyklů deset, také z důvodu výrobcem požadovaného lepšího otestování a využití rezervovaného času klimatické komory. S přihlédnutím k limitům konstrukčního silikonového tmelu použitého k utěsnění antén jsme vybrali teplotu  $T_A = -50 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$  a  $T_B = 85 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$ . Rychlost změny teploty v komoře  $3 \text{ K/min} \pm 0,6 \text{ K/min}$  a dobu expozice  $t_I = 2 \text{ h}$ , která umožní s dostatečnou rezervou vyrovnat teplotu antén s prostředím klimatické komory.

- **počáteční měření**

Počáteční měření nyní nebyla provedena, jelikož zkouška změnou teploty navazuje na zkoušku vlhkým teplem cyklickým, čímž tvoří řadu zkoušek.

- **expoze**

Při testování několika vzorků zároveň je důležité zachovat volné proudění vzduchu uvnitř komory, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozložení teploty. Vzhledem k faktu, že antény jsou takto rozmístěny v klimatické komoře již od předchozí zkoušky, je tento požadavek splněn.

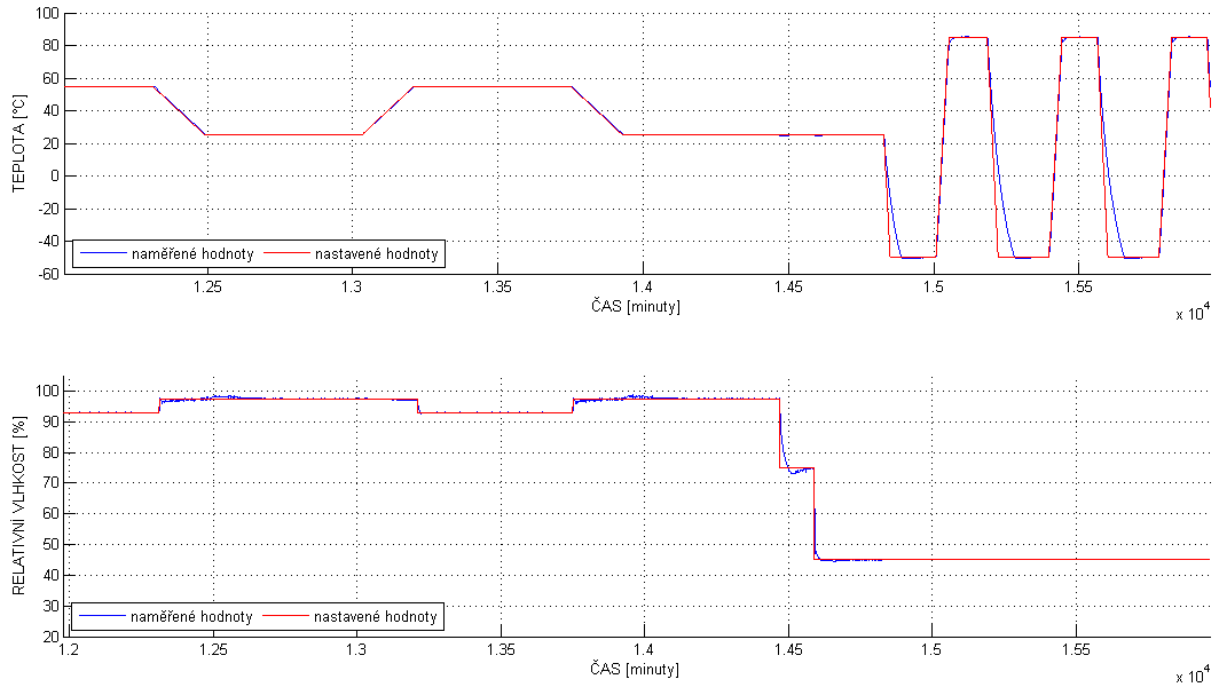
Nejprve stabilizujeme testované objekty na teplotu a relativní vlhkost laboratoře, tj. na  $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ K}$  a RH 45 % po dobu dvou hodin. Poté po dobu teplotních změn není relativní vlhkost definována, pouze je dle ČSN EN 60068-2-2 zavedena podmínka, že nesmí překročit hranici 50 %. Nyní začíná první cyklus zkoušky. Teplota uvnitř komory začne klesat definovanou rychlostí  $3 \text{ K/min} \pm 0,6 \text{ K/min}$  na hodnotu  $T_A = -50 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$ , na které setrvá po dobu  $t_I = 2 \text{ h}$ , a posléze začne růst stejnou rychlostí o hodnotu  $135 \text{ °C}$  na teplotu  $T_B = 85 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$ , kde setrvá stejně dlouho dobu  $t_I = 2 \text{ h}$ . Po uplynutí dvou hodin teplota klesne na  $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ K}$  znovu rychlostí  $3 \text{ K/min} \pm 0,6 \text{ K/min}$ , čímž je ukončen první cyklus, který je následně proveden ještě devětkrát. Průběh zkoušky přibližuje obrázek 4.2.

- **aklimatizace po zkoušce**

Po ukončení desátého cyklu jsou testované vzorky před vyjmutím z klimatické komory aklimatizovány na teplotu laboratoře  $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ K}$  a relativní vlhkost 45 % po dobu jedné hodiny, aby bylo umožněno dosáhnout teplotní rovnováhy.

- **konečná měření**

Po dokončení řady klimatických zkoušek putují antény do částečně bezdrazové komory, kde proběhne další série měření jejich parametrů.



**Obr. 4.3:** Výšeč průběhů získaných z dat naměřených klimatickou komorou

## 5 ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH PARAMETRŮ

V poslední kapitole diplomové práce si představíme výsledky měření prováděných v částečně bezodrazové komoře FEL ZČU a zhodnotíme vliv klimatických zkoušek na měřené parametry a výrobní materiály mikrovlnných antén.

### 5.1 Zpracování naměřených dat

Zpracování naměřených dat probíhalo zcela v prostředí MATLAB. Získané výsledné hodnoty CSV a izolace mezi vstupy přímo z měření ve formátu *.csv* byly importovány a za pomoci skriptů *SWR\_csv.m* (případně později s *SWR\_csv\_opr.m*) a *izolace\_csv.m* vykresleny do souborů ve formátu *.fig*, jenž umožnil vytvoření výsledných srovnávacích grafů. Před samotným importem do prostředí MATLAB však bylo zapotřebí změnit v souborech *.csv* formátování obsahu, tedy zaměnit desetinou čárku za desetinou tečku a oddělovací mezeru mezi sloupci nahradit čárkou. U směrových charakteristik a zisku antén byly průběhy exportovány přímo po každém měření, také do *.fig* formátu za pomoci skriptů *smchar\_opf.m* a *zisk\_os\_prac.m* (případně později se *zisk\_os\_prac\_uprav.m*).

Ve skriptech směrových charakteristik se pracuje s naměřenými hodnotami zpětného přenosového koeficientu (parametr  $S_{12}$ ), odpovídající danému úhlu natočení měřené antény, jenž se následně převede na absolutní hodnotu ( $|S_{12}|$ ) a poté dle vztahu 5.1 na hodnoty v dB, kde  $A_z$  je výsledný zpětný přenosový koeficient vyjádřený v decibelech.

$$A_z = 20 \log |S_{12}| \text{ [dB]} \quad (5.1)$$

Toho se dále využívá při dopočítání hodnot zisku antén na zvoleném kmitočtu ve vztahu 5.2, v němž  $G_p$  udává zisk měřené antény,  $L_0$  útlum volného prostoru a  $G_v$  zisk měřicí antény, který v našem případě na kmitočtu 5,6 GHz činí 18,43 dBi (obr. P.3 v přílohách).

$$G_p = A_z + L_0 - G_v \text{ [dBi]} \quad (5.2)$$

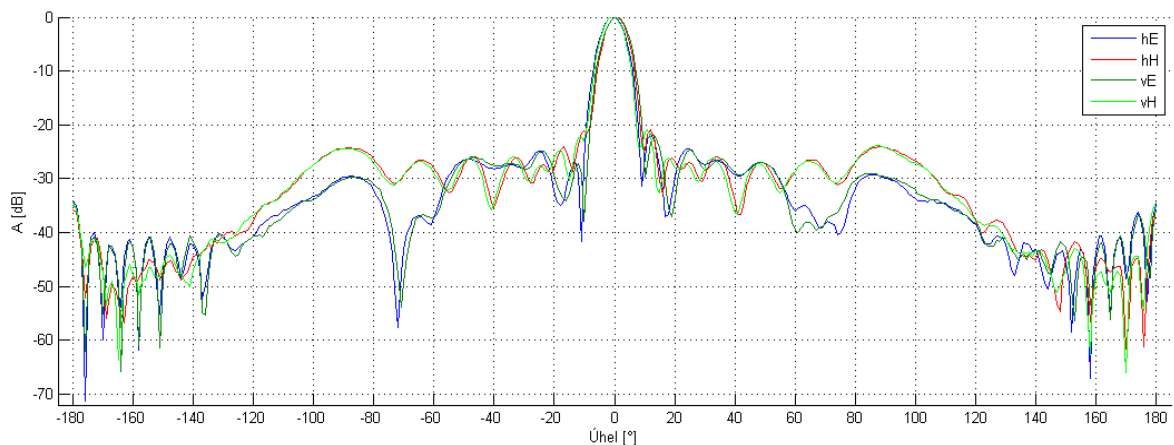
Výpočet útlumu volného prostoru  $L_0$  uvádí následující vztah, kde  $R$  je vzdálenost mezi měřicí a měřenou anténou, která byla v našem případě 3,5 m, a  $\lambda$  zastupující ve vzorci vlnovou délku.

$$L_0 = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \text{ [dB]} \quad (5.3)$$

Všechny použité skripty jsou přiloženy v elektronické příloze ve složce *Měřicí a výpočetní skripty*.

## 5.2 Vliv řady zkoušek na parametry mikrovlnných antén

Pro zobrazení výsledků měření přímo v textu diplomové práce jsme vybrali vždy jednoho zástupce od každého z obou modelů antén, a to z důvodu velkého množství dat. Kompletní výsledky jsou k dispozici ve složce *Zpracovaná data* umístěné v elektronické příloze. Vybírány byly antény, jejichž průběhy se nejvíce vzdalovaly předpokládaným výsledkům. Dále jsme se u směrových charakteristik a hodnot zisku omezili na zobrazení výsledků měření pouze v konfiguracích hE (horizontální vstup antény v rovině E) a vH (vertikální vstup antény v rovině H), neboť se nám měřením potvrdil předpoklad, podle kterého jsou u osově symetrických antén průběhy v konfiguracích hE a vE, respektive v vH a hH, téměř identické (obr. 5.1).

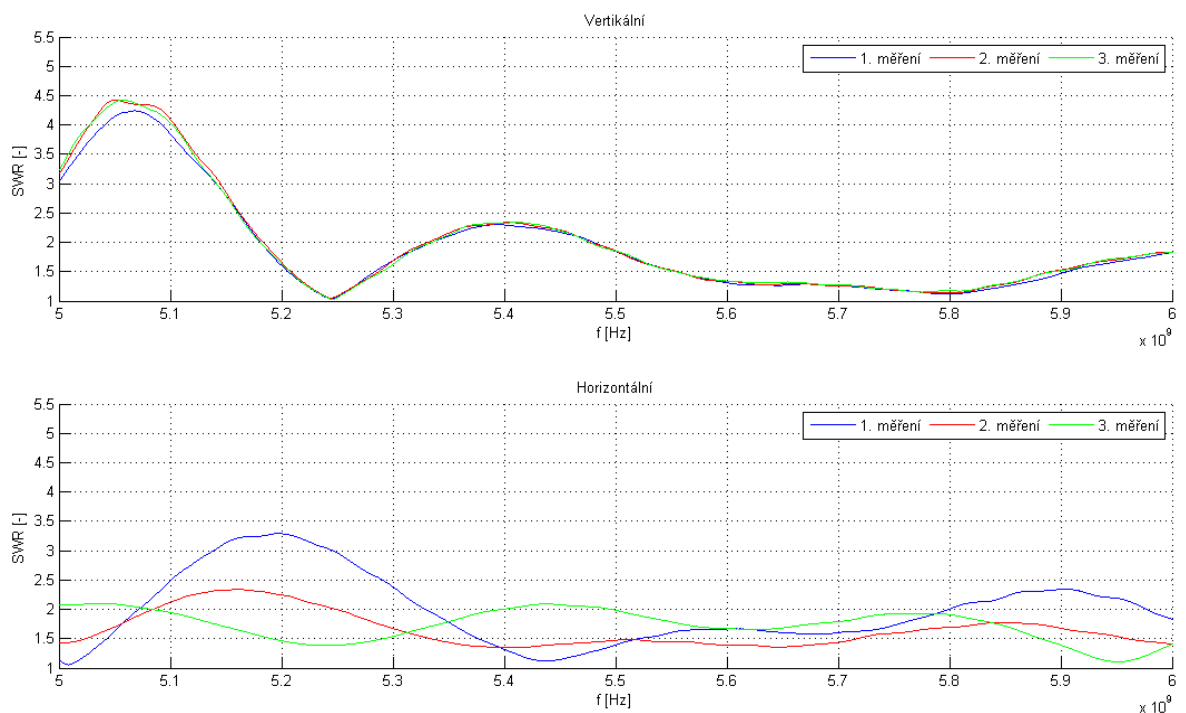


**Obr. 5.1:** Porovnání průběhů všech konfigurací antény s pracovním označením 1406

K porovnání s hodnotami udávanými výrobcem jsme využili data z prvního měření, tedy před prvním umístěním antén do klimatické komory. Průběhy předložené výrobcem jsou umístěny v tištěných přílohách a také v elektronických, ve složce *Data od výrobce*.

### 5.2.1 Činitel stojatých vln

U antény s pracovním označením 1401 došlo ke změnám hodnot ČSV po absolvování klimatických zkoušek pouze u horizontálního vstupu. Nejvýraznější odchylky nastaly v okolí kmitočtu 5,2 GHz, kdy došlo k poklesu ČSV přibližně o hodnotu jedna. Druhý, méně výrazný, pokles je patrný v okolí frekvence 5,9 GHz. Zaměříme-li se na pracovní pásmo antény definované výrobcem (5,4 GHz až 5,9 GHz), nelze ani u třetího měření potvrdit deklaraci výrobce o hodnotě ČSV nižší než 1,4, vzhledem k překonání této hranice zhruba o dvě desetiny na kmitočtu v blízkosti 5,8 GHz. Na tomto kmitočtu vertikální vstup dosahuje téměř hodnoty ČSV rovné jedna, ale směrem k dolní mezi pracovního pásma dochází k nárůstu až na hodnotu téměř 2,5, a proto i tento vstup nesplňuje stanovený limit. Antény s pracovním označením 1402 a 1404 mají průběhy velmi podobné předcházející anténě. K největším změnám došlo u vzorku s označením 1403, avšak pouze u horizontálního vstupu (obr. 5.2), kde po klimatických testech došlo k částečnému narovnání křivky, která se pohybuje v rozmezí hodnot ČSV od 1,5 do 2. Pravděpodobnou příčinou je nepatrný prostup vlhkosti v okolí konektoru tohoto vstupu antény.

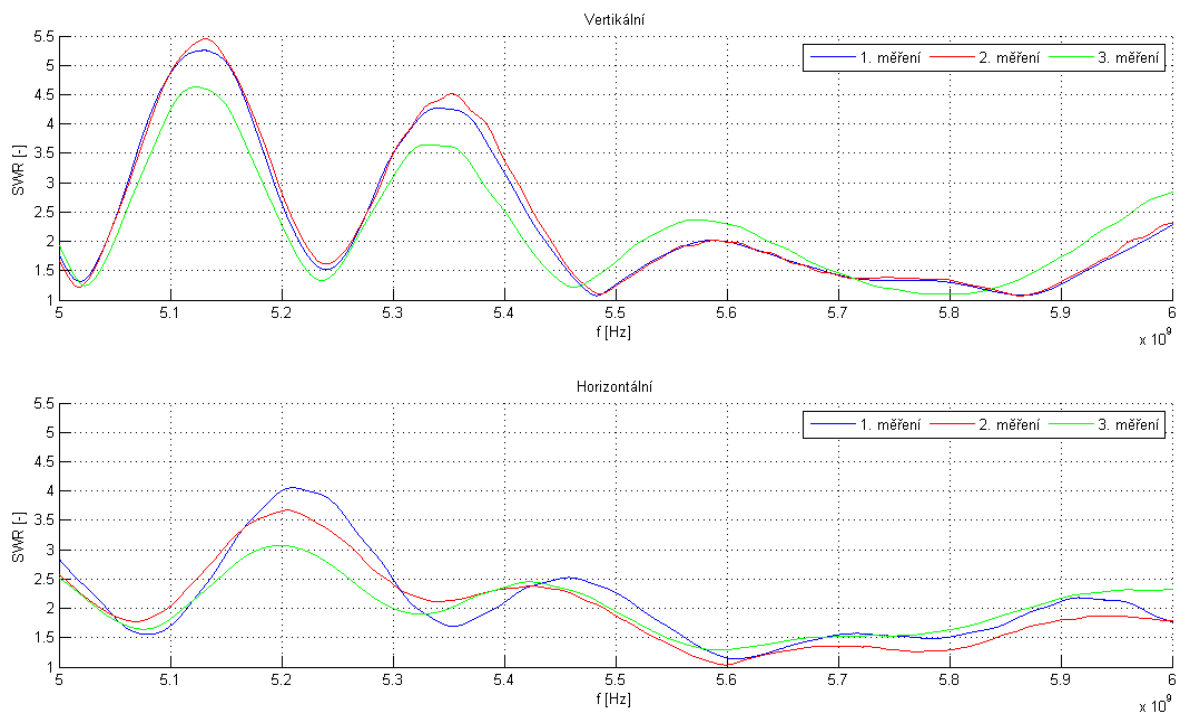


**Obr. 5.2:** Průběhy ČSV antény s pracovním označením 1403



U antén s označením 1405 a 1408, jež neprošly klimatickým testováním, nedošlo k žádným výrazným změnám. Ty se naopak odehrály u antén s označením 1406 a 1407, u kterých vlivem teplotních výkyvů došlo k poškození zaizolování závitu plastové části zářiče. Určitý vliv také mělo neutěsnění konektorů horizontálních vstupů antény u všech 26 dBi modelů. U vertikálních vstupů obou naposledy zmíněných modelů došlo k mírnému poklesu rezonančního kmitočtu (obr. 5.3). Ve spodní části pracovního pásma antény 1406 došlo k nárůstu ČSV o hodnotu zhruba 0,5, u vzorku 1407 byl nárůst v celém pracovním pásmu přibližně poloviční. Hodnoty ČSV horizontálního vstupu antény s označením 1406 se výrazně nezměnily a naopak u horizontálního vstupu antény 1407 došlo ke znatelnému poklesu.

Porovná-li průběhy ČSV naměřené výrobcem (obr. P.6 a obr. P.10 v přílohách) s našimi průběhy z prvního měření, je patrné, že se průběhy příliš neliší. Za zmínku však stojí fakt, že stejně jako námi naměřené hodnoty ČSV všech antén, tak i hodnoty naměřené výrobcem nesplňují v pracovním pásmu antén udávanou maximální velikost ČSV ( $< 1,4$ ).



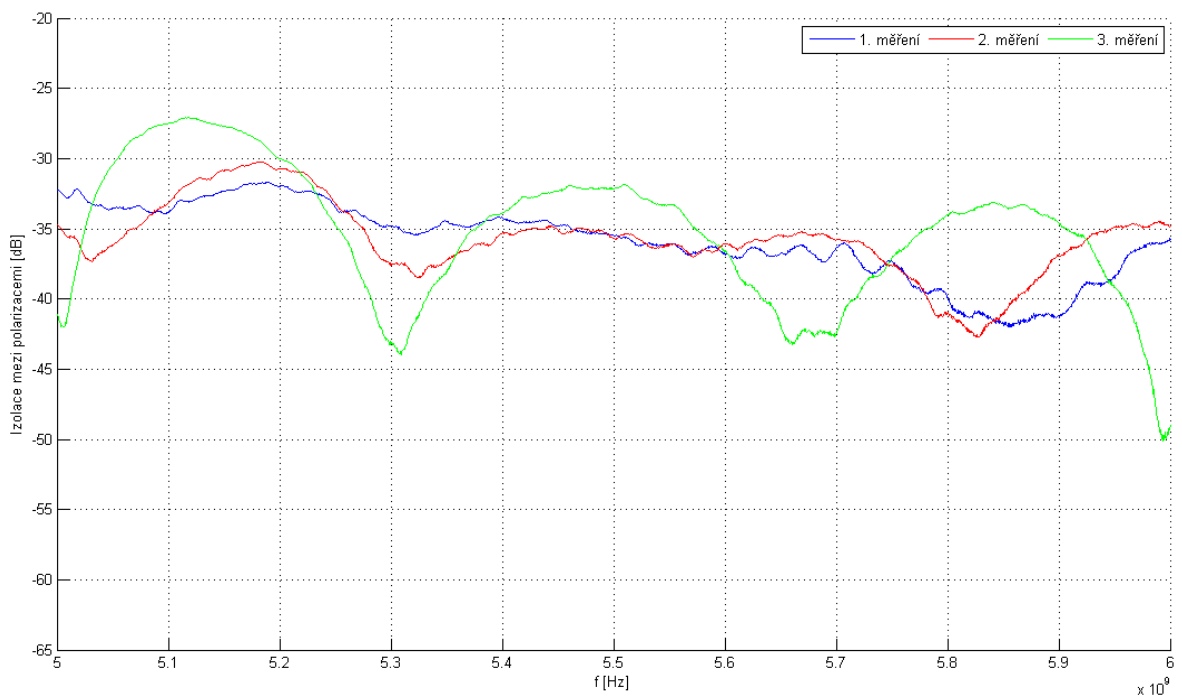
**Obr. 5.3:** Průběhy ČSV antény s pracovním označením 1406

Třetí měření ČSV pro horizontální vstup antén jsme museli opakovat, jelikož nám vadný měřicí kabel vnesl do průběhů chybu, která je patrná na obrázku P.15 umístěném v přílohách.

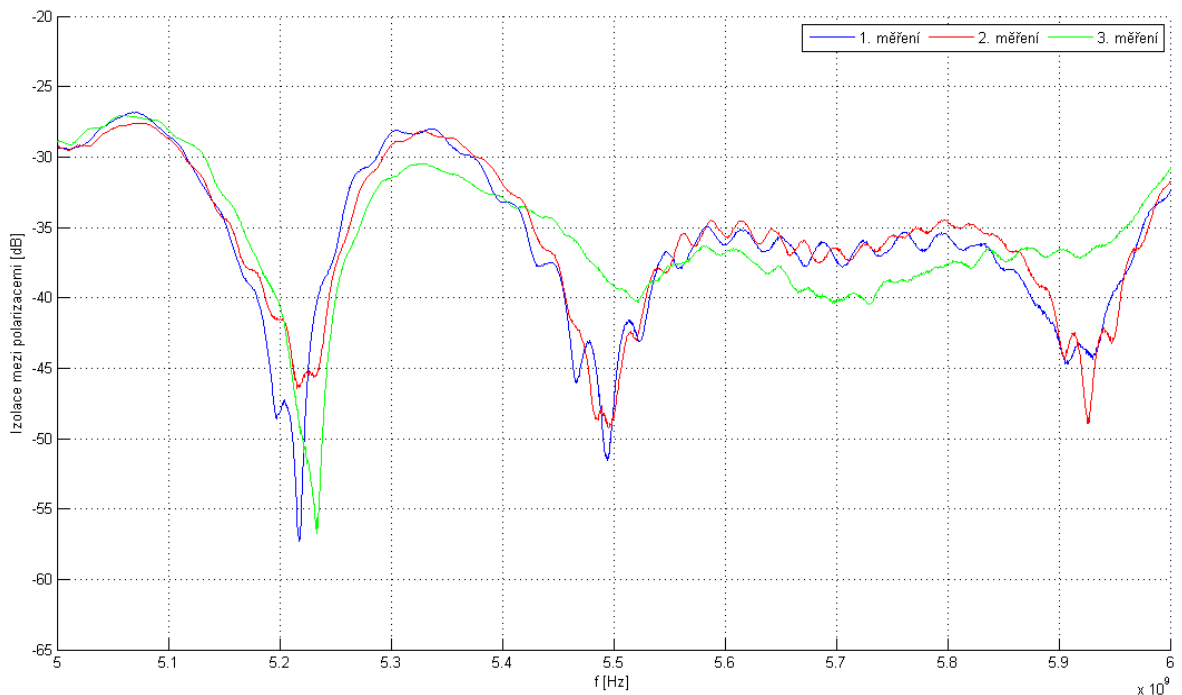
## 5.2.2 Izolace mezi vstupy

K nejznatelnějším výkyvům hodnot izolace mezi vstupy antén došlo u vzorků s označením 1404 a 1406. U prvního zmíněného (obr. 5.4) došlo ke zvlnění průběhu, které pro nižší frekvence našeho měření bylo znatelné již po prvním klimatickém testování. Omezíme-li se na hodnoty pouze z pracovního pásma antén (5,4 GHz až 5,9 GHz), lze u všech 22 dBi verzí považovat minimální hodnotu izolace stanovenou výrobcem na 28 dB za splněnou. Průběh izolace mezi vstupy v pracovním pásmu u antény označené 1406 (obr. 5.5) se po absolvování klimatických zkoušek naopak narovnal a vzhledem k minimálním hodnotám se izolace v pracovním pásmu také mírně zvýšila. Stejně jako 22 dBi modely, tak i všechny 26 dBi antény splnily v pracovním pásmu mezní hodnotu izolace mezi vstupy 30 dB, udávanou výrobcem.

Pokud porovnáme průběhy izolace mezi vstupy z prvního měření s průběhy výrobce (obr. P.7 a obr. P.11 v přílohách), lze je označit za přibližně shodné.



**Obr. 5.4:** Průběhy izolace mezi vstupy antény s pracovním označením 1404



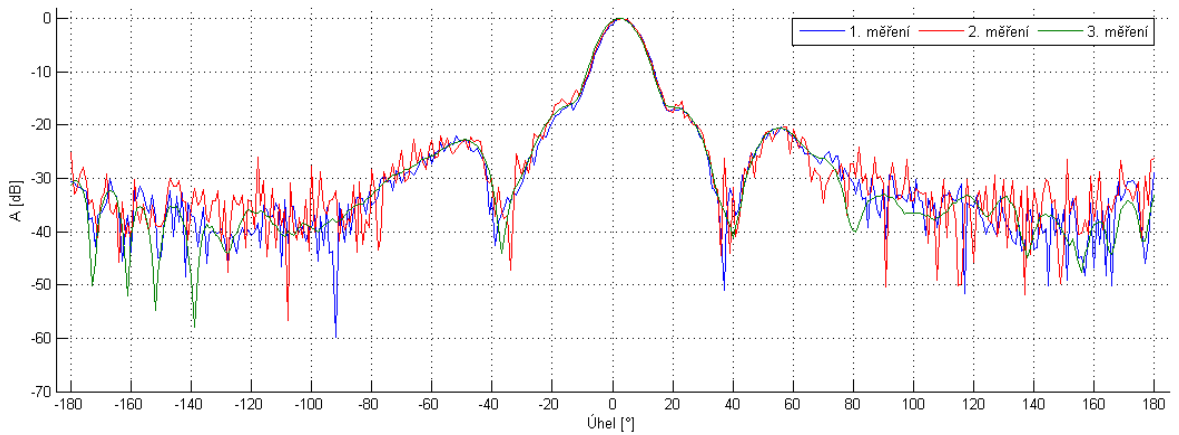
Obr. 5.5: Průběhy izolace mezi vstupy antény s pracovním označením 1406

### 5.2.3 Směrové charakteristiky

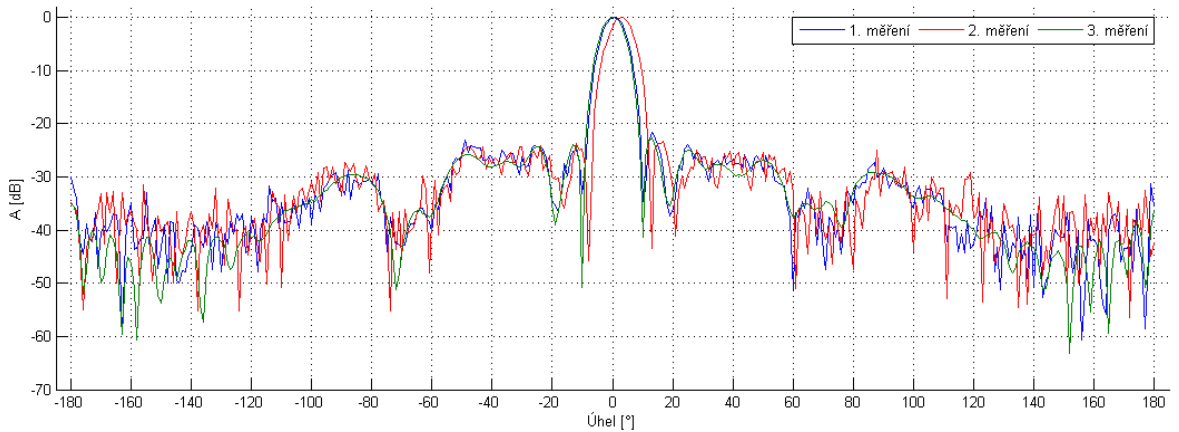
Na směrových charakteristikách měřených antén je patrné, že nedošlo k žádnému významnému ovlivnění působením klimatických testů. Tvary vyzařování hlavních (úhly záření) i postranních laloků se nezměnily, nebo jsou změny jen velmi malé.

U 22 dBi antén jsou v konfiguraci hE (obr. 5.6) mnohem méně patrné postranní laloky oproti konfiguraci vH (obr. 5.8). Také je znatelný širší vyzařovací úhel o přibližně  $3^\circ$ , jenž potvrzuje rovněž měření výrobce (obr. P.9 v přílohách). Dále je na obr. 5.6 viditelný odklon hlavního laloku antény 1403 o přibližně  $3^\circ$  v konfiguracích hE a vH, oproti konfiguracím hH a vE, kde je maximum hlavního laloku v  $0^\circ$ . O něco méně výrazné je toto vychýlení také u antény 1404. Také u 26 dBi antén se naše měření shoduje s měřením výrobce (obr. P.12 v přílohách).

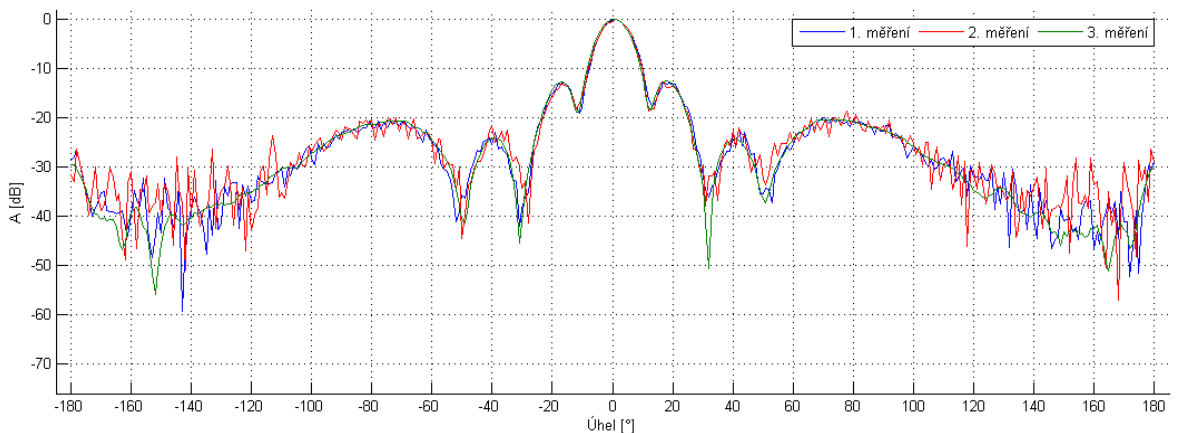
Na obr. 5.7 je patrné posunutí směrových charakteristik doprava, způsobené u druhého měření prokluzem točny v částečně bezodrazové komoře, jenž se s postupem měření zvyšoval. Prokluz byl zapříčiněn uvolněným hnacím řemenem točny. Před třetím měřením byl řemen dotažen a následně se průběhy směrových charakteristik vrátily do hodnot odpovídajících prvnímu měření.



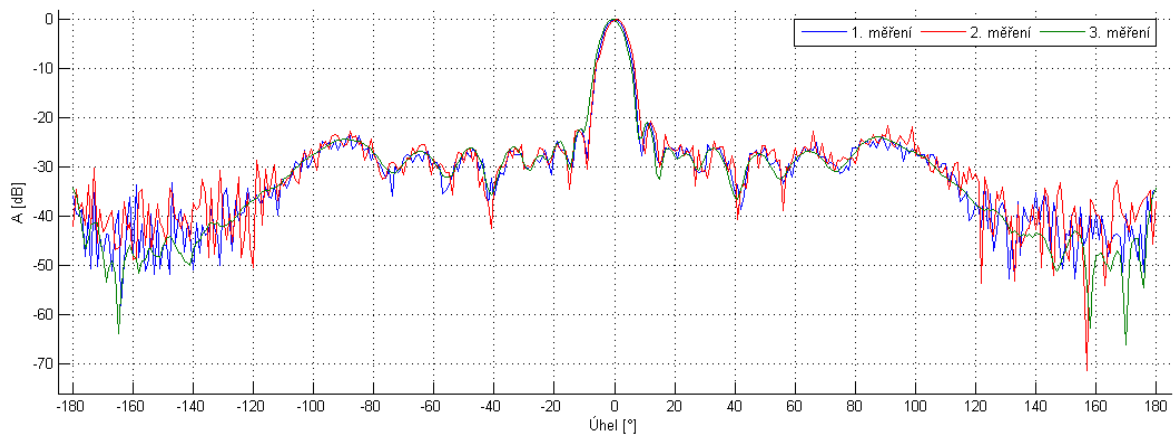
**Obr. 5.6:** Směrové charakteristiky antény s pracovním označením 1403 v konfiguraci hE na kmitočtu 5,6 GHz



**Obr. 5.7:** Směrové charakteristiky antény s pracovním označením 1407 v konfiguraci hE na kmitočtu 5,6 GHz



**Obr. 5.8:** Směrové charakteristiky antény s pracovním označením 1402 v konfiguraci vH na kmitočtu 5,6 GHz



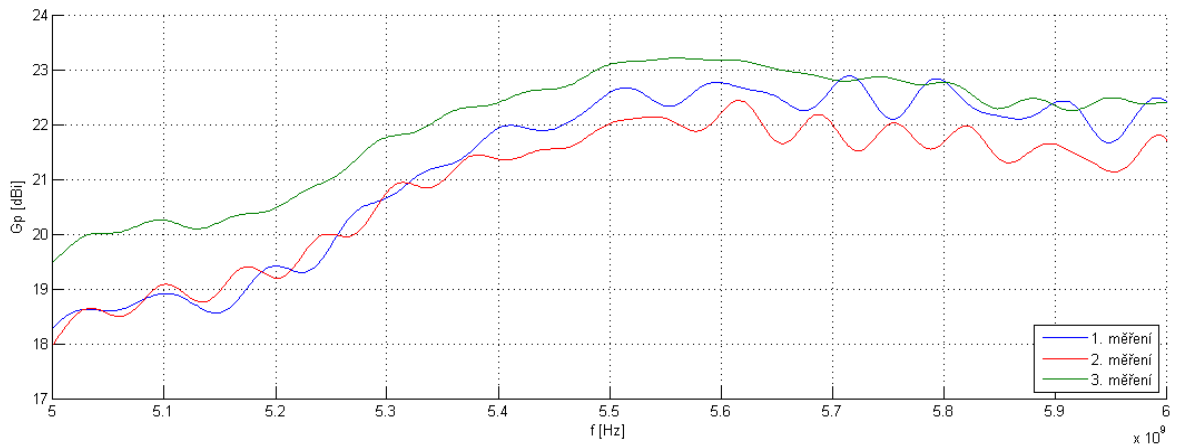
**Obr. 5.9:** Směrové charakteristiky antény s pracovním označením 1406 v konfiguraci vH na kmitočtu 5,6 GHz

V hodnotách velikosti vyzařovacích úhlů antén je neshoda mezi údaji poskytnutými výrobcem (obr. P.12 a obr. P.9) a jednotlivými prodejci [20] [21], kteří uvádí pro 26 dBi úhel  $7^\circ$  oproti výrobcem naměřeným  $8^\circ$ , u 22 dBi antén poté  $9^\circ$  oproti  $11^\circ$ , respektive  $14^\circ$  u konfigurace hE. Námi získané výsledky měření se shodují s údaji výrobce.

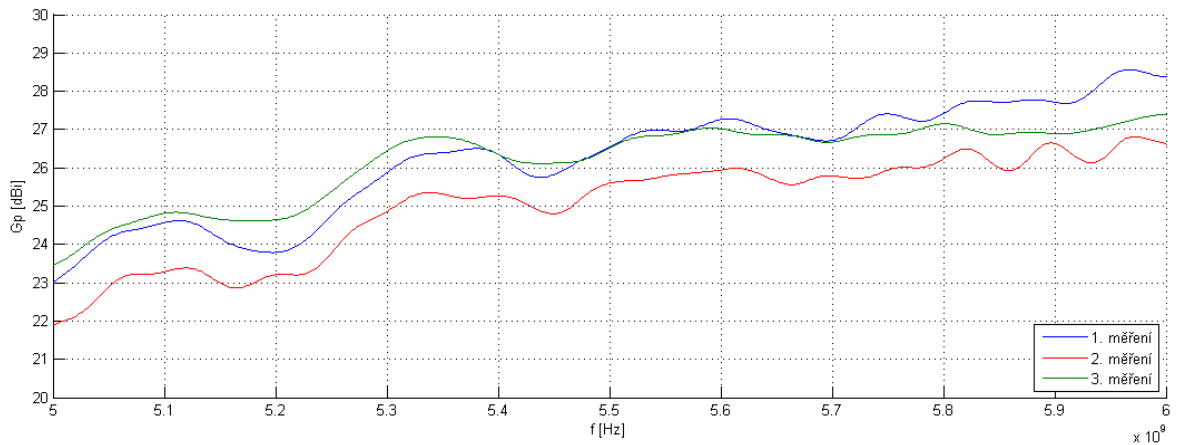
## 5.2.4 Zisk

Obdobně jako u směrových charakteristik se hodnoty zisku příliš nezměnily. Rozdíly mezi jednotlivými měřeními nepřesahují v pracovním pásmu antén 1,5 dBi. Na kmitočtech pod pracovním pásmem, tedy pod 5,4 GHz, je při třetím měření patrný mírný nárůst zisku, celkově však na těchto frekvencích dochází oproti pracovnímu pásmu k poklesu. Na průbězích měření výrobce není pokles příliš znatelný a křivka se zdá téměř rovná, to je však způsobeno malou citlivostí v svislé osy (obr. P.8 a obr. P.13 v přílohách). V celkovém srovnání průběhy přibližně odpovídají našim měřením.

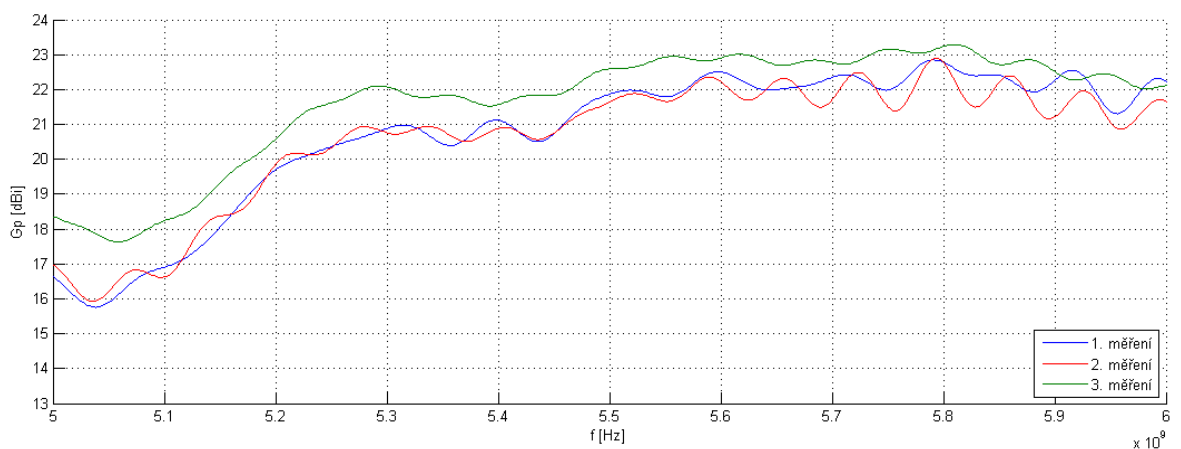
Vzhledem k faktu, že se průběhy zisku dopočítávají z hodnot měření směrových charakteristik v  $0^\circ$ , způsobil posun směrových charakteristik, zapříčiněný prokluzem točny, také posun hodnot zisku u druhého měření. Proto byl upraven skript pro výpočet zisku tak, aby u druhého měření nevybíral data na  $0^\circ$ , ale zvolil data s nejvyššími hodnotami bez ohledu na směr vyzařování. Obrázek P.16 v přílohách demonstruje výsledek úpravy za pomoci skriptu *zisk\_os\_prac\_opr.m*, který je umístěn ve složce *Měřicí a výpočetní skripty* v elektronických přílohách.



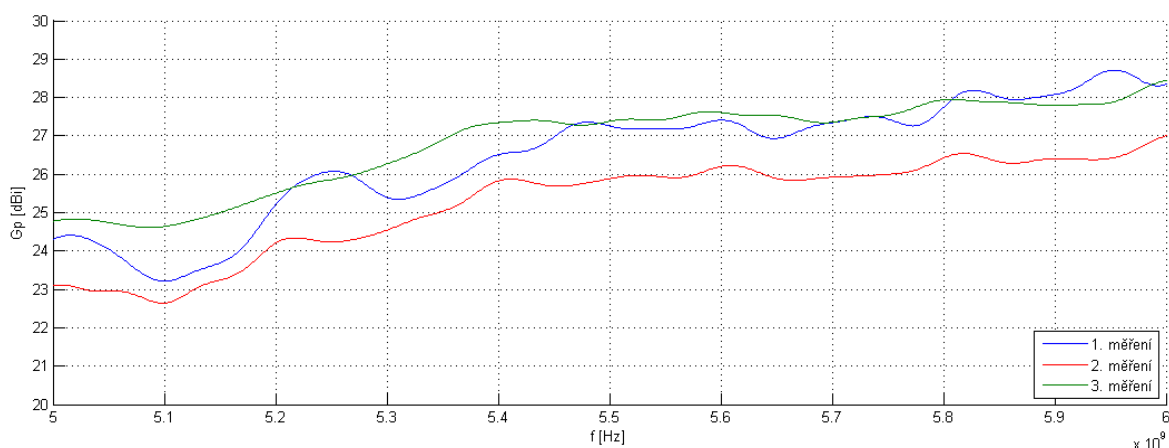
**Obr. 5.10:** Průběhy zisku antény s pracovním označením 1401 v konfiguraci hE



**Obr. 5.11:** Průběhy zisku antény s pracovním označením 1406 v konfiguraci hE



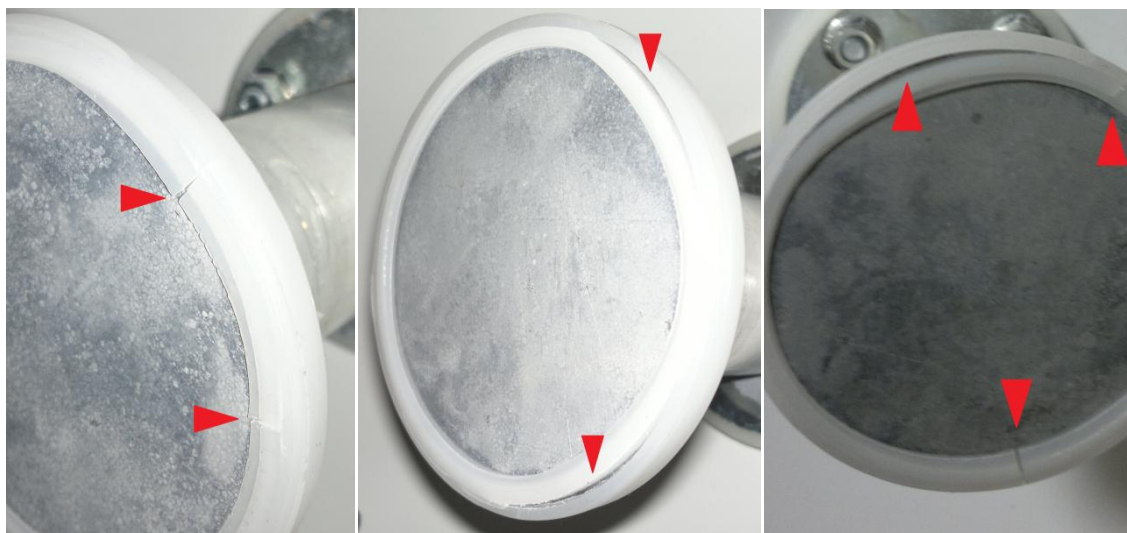
**Obr. 5.12:** Průběhy zisku antény s pracovním označením 1404 v konfiguraci vH



Obr. 5.13: Průběhy zisku antény s pracovním označením 1407 v konfiguraci vH

### 5.3 Vliv rady zkoušek na výrobní materiály mikrovlnných antén

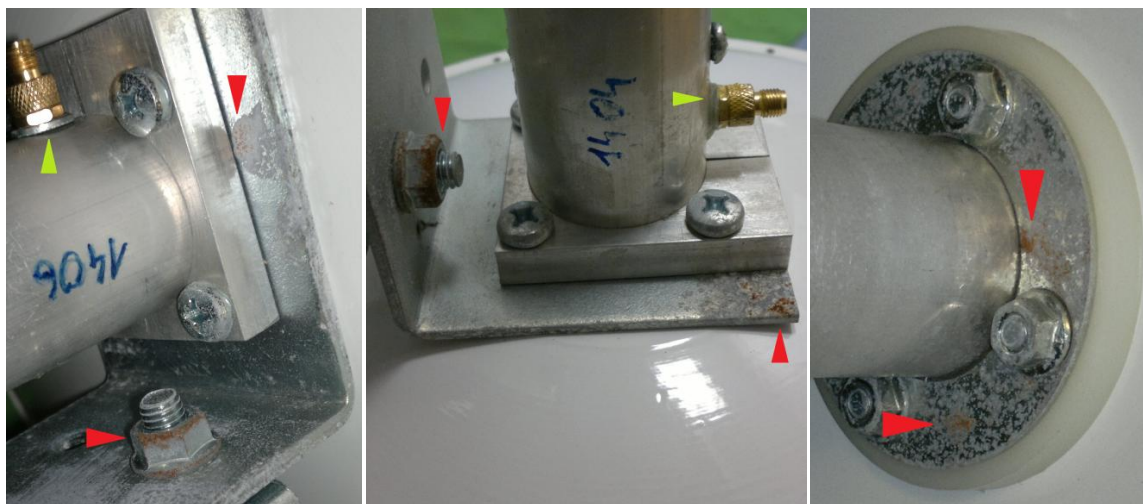
V průběhu klimatických zkoušek došlo u všech testovaných antén (kromě antén s označením 1405 a 1408, které neabsolvovaly klimatické zkoušky) k poškození dílu zářiče vyrobeného ze SILONU. Pravděpodobnou příčinou je značná teplotní roztažnost SILONU, kdy při vysokých teplotách mohlo docházet k materiálovému pnutí především u tenkých okrajů. Vzniklé poškození prezentuje následující obrázek.



Obr. 5.14: Poškození antén vzniklé v průběhu klimatických testů

K poškození přispěla pravděpodobně také nasákavost SILONU vodou, která při průběhu klimatických zkoušek v teplotách pod 0 °C mohla na materiálu způsobit vznik trhlin. Praskliny v plastové části však průnik vlhkosti do těla antény neumožnily, jelikož jsou pouze povrchové, jak dokládá obr. P.14 v přílohách, kde je díl vyfocen z vnitřní strany.

Částečný průnik vlhkosti však již mohlo umožnit poškozené těsnění závitů, kterým je platový díl spojen s anténou. K poškození nejspíše došlo při rychlém střídání teplot, a to především u antén s pracovním označením 1406 a 1407. U 26 dBi antén mohlo dojít k průniku vlhkosti také nezatěsněným konektorem horizontálního vstupu (zelený ukazatel na obr. 5.15 vlevo). Oproti tomu 22 dBi antény mají zaizolované konektory oba (zelený ukazatel na obr. 5.15 uprostřed).



**Obr. 5.15:** Oxidace konstrukčních částí antén vzniklá v průběhu klimatických testů

Vlivem vysoké relativní vlhkosti došlo k mírné povrchové oxidaci konstrukčních pokovených ocelových částí antén. Nejvýznamněji v místech, kde je patrné poškození ochranné vrstvy způsobené ať již při sestavování či instalaci antény (červený ukazatel na obr. 5.15 vlevo), nebo kazy při samotném pokovování. Při dlouhodobém vystavení klimatickým vlivům by následně mohlo dojít ke zhoršení případné demontáže antény z důvodu oxidace styčných ploch, ale s největší pravděpodobností nedojde k ovlivnění parametrů antén.



## ZÁVĚR

Cílem předkládané diplomové práce bylo seznámit čtenáře s problematikou vlivu vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén a provést průzkum trhu v segmentu mikrovlnných antén na území České republiky. Následně změřit a zhodnotit parametry mikrovlnných antén poskytnutých společnostmi SIMR WIFI ANTENNAS, které byly vystaveny zátěžovému testování v klimatické komoře, jež simulovalo vliv venkovního prostředí na antény.

Při tvorbě práce jsem se přesvědčil, že problematika anténní techniky ale také klimatických testů jsou velmi rozsáhlá a náročná témata, která vyžadují prostudování velkého množství literatury.

První část práce nastiňuje historický vývoj mikrovlnných spojů, především radioreléových spojů, satelitních spojů a technologií bezdrátových sítí. Následně stručně představuje také historii mikrovlnných antén.

Druhá část přibližuje čtenáři základní členění mikrovlnných antén, materiály používané pro jejich výrobu a celkovou odolnost antén spolu s provozními limity specifikovanými výrobcí. Dále popisuje vlastnosti zapůjčených antén a srovnává je s aktuální nabídkou na tuzemském trhu.

Na začátku třetí kapitoly jsou definovány parametry antén. Poté je popsána částečně bezodrazová komora Frankonia SAC-3 Fakulty elektrotechnické ZČU, ve které byla provedena měření vybraných, pro účely zjišťování vlivu vnějšího prostředí podstatných, parametrů. Samotná měření nám zkomplikovaly problémy s měřicí technikou, popsané v kapitole 5.2, které se však podařily odstranit.

Mezi jednotlivými měřeními, z celkového počtu tří, v částečně bezodrazové komoře byly prováděny klimatické zkoušky, kterými se zabývala čtvrtá kapitola práce. Nejprve však tato kapitola popisuje klimatickou komoru Vötsch Industrietechnik VC 7018 Fakulty elektrotechnické ZČU, ve které byly klimatické zkoušky realizovány dle platných norem ČSN EN 60068-2-30 ed. 2 a ČSN EN 60068-2-14 ed. 2. První zmíněná norma představuje zkoušku působením cyklického vlhkého tepla, druhá zkoušku rychlou změnou teploty. Po dohodě s výrobcem antén byla zvolena vysoká přesnost zkoušek. Jak se ukázalo po získání průběhů teplot přímo z klimatické komory (obr. 4.3), dosahování záporných teplot s rychlostí změny  $3 \text{ K/min} \pm 0,6 \text{ K/min}$ , bylo pro klimatickou komoru příliš strmé, a proto by bylo vhodnější u budoucích zkoušek zvolit nižší rychlost teplotní změny.

Závěrečná část diplomové práce se zaměřila na zhodnocení dat získaných z měření. Vlivem klimatických zkoušek došlo ke změnám hodnot ČSV, jež jsou popsány v kapitole 5.2, především u antén s pracovním označením 1403, 1406 a 1407. Zajímavostí je, že ani jedna z antén nesplňuje v pracovním pásmu, před i po klimatických zkouškách, hodnoty ČSV udávané výrobcem. Naopak splněny byly u všech antén deklarované hodnoty parametru izolace mezi vstupy antény, i po změnách v průběžích vlivem klimatických zkoušek, jež byly nejvíce patrné u antén s pracovním označením 1404 a 1406. Směrové charakteristiky antén se téměř nezměnily, stejně tak i hodnoty zisku, kdy rozdíl mezi křivkami z jednotlivých měření nepřesahuje v pracovním pásmu antén 1,5 dBi.

Souhrnně lze říci, že působení přísných klimatických zkoušek na antény nezpůsobilo významné změny měřených parametrů, které by znemožnily, či zásadně omezily jejich provoz. Došlo však k poškození SILONOVÉ části zářiče, jež je upřesněno v kapitole 5.3. Toto poškození nemělo významný dopad na průnik vlhkosti a případné ovlivnění parametrů antén, ale z dlouhodobého hlediska vznik takovýchto problémů nelze zcela vyloučit. Naopak u poničené izolace závitového spoje plastové části zářiče s anténou již prostup vlhkosti pravděpodobně umožněn byl. Stejný závěr lze konstatovat i o nezaizolovaných horizontálních konektorech 26 dBi antén, jejichž izolace, v podobě silikonového tmelu, byla opomenuta nejspíše chybou při výrobě.

S přihlédnutím k výše zmíněným problémům lze výrobcí doporučit změnu materiálu plastových dílů, například za konkurencí často využívaný ABS s povrchovou úpravou zlepšující jeho odolnost proti ultrafialovému záření.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Principy digitální mikrovlnné komunikace. In: *ALCOMA* [online]. 2012 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z:  
<http://www.alcoma.cz/upload/download/Manu%C3%A1l%20%28CZ%29%20Principy%20digit%C3%A1ln%C3%AD%20mikrovln%C3%A9%20komunikace%202.1.pdf>
- [2] Využití rádiového spektra. In: *Český telekomunikační úřad* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://spektrum.ctu.cz>
- [3] *Český telekomunikační úřad* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.ctu.cz>
- [4] Stručná teorie mikrovlnných spojů. In: *KAISER DATA* [online]. [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.bezdratove-telekomunikace.cz/katalog-pojitek/o-radiovych-spojich/>
- [5] Microwave Communications - An Historical Perspective. In: *IEEE Xplore* [online]. 2003 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1132829&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D1132829](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1132829&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1132829)
- [6] MUNDIL, Jaromír. *Vliv vnějšího prostředí na parametry mikrovlnných antén*. Plzeň, 2009. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] Mikrovlnné a družicové spoje. In: *eArchiv.cz* [online]. 2011 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/a92/a206c110.php3>
- [8] OFDM. In: *Katedra měření* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z:  
<http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38ssl/ofdm.pdf>
- [9] IEEE 802.11n — Jak na rychlé Wi-Fi doma i venku. In: *Pctuning* [online]. 2010 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/16921-ieee-802-11n-jak-na-rychle-wi-fi-doma-i-venku?start=3>
- [10] *Wikipedia - anglická* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)
- [11] Historie Wi-Fi: od FHSS k bezdrátu. In: *SVĚT HARDWARE* [online]. 2009 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.svethardware.cz/historie-wi-fi-od-fhss-k-bezdratu/27860>
- [12] Základy technologie Bluetooth: původ a rozsah funkcí. In: *pcworld.cz* [online]. 2009 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://pcworld.cz/hardware/Zaklady-technologie-Bluetooth-puvod-a-rozsah-funkci-6635>
- [13] Přenosy dat ve standardu IEEE 802.16 (WiMAX). In: *Access server* [online]. 2008 [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocianku=2008050005>

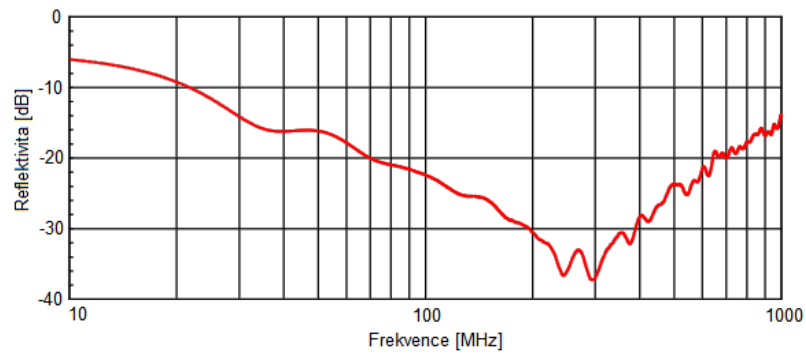
- [14] Technologie WiMAX: na poli nejlepšího bezdrátu. In: *CHIP.cz* [online]. 2006 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.chip.cz/soubory/dokumenty/62517e9d06de8a889fb7fe4efc8d92c2.pdf>
- [15] Družicové telekomunikační spoje. In: *Access server* [online]. 2010 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020002>
- [16] Abeceda satelitního příjmu: Kmitočty vhodné pro použití v satelitních komunikacích. In: *Parabola.cz* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.parabola.cz/abc/tabulka-kmitoctova-pasma/>
- [17] Jak fungují satelity IV: Historie satelitního vysílání. In: *DigiZone.cz* [online]. 2008 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.digizone.cz/clanky/jak-funguji-satelity-iv-historie-satelitniho/>
- [18] 145-1993 - IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. In: *IEEE Xplore* [online]. 2002 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=286098>
- [19] *Konstrukční elektronika a radio*. Praha: Amaro, s.r.o, 2002, LI/2002, č. 3. ISSN 1211-3557. Dostupné z: <http://www.anteny-info.cz/docs/extern/Obr.49.%20KE%203-2002%20%C5%A0roubovice.pdf>
- [20] *i4wifi* [online]. 2005 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://www.inwifi.cz/>
- [21] *wifi.aspa* [online]. 2001 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://wifi.aspa.cz/>
- [22] *DISCOMP* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz>
- [23] Konektory. In: *Marigold.cz* [online]. 2012 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.marigold.cz/wifi/doku.php/konektory>
- [24] FABRIZIO, Simon. Visual guide to antenna connector types. In: *Broadbandbuyer.co.uk* [online]. 2014 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.broadbandbuyer.co.uk/features/2512-visual-guide-to-antenna-connector-types/>
- [25] Guide to Antenna Cables & Connectors. In: *TELCO ANTENNAS* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <https://www.telcoantennas.com.au/site/guide-antenna-cables-connectors>
- [26] ANTEN. In: *Techcn* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://techcn.free.fr/ANTEN.htm>
- [27] Konektory používané ve wifi-technice. In: *Digitální střepiny* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://it.cestuji.info/wifi-konektory.php>
- [28] MATUSZCZYK, Jacek. *Antény prakticky: Encyklopedická příručka*. 3. české vyd. Praha: BEN, 2005, 239 s. ISBN 80-730-0178-0.

- [29] Plasty. In: *PaedDr. Pazdera Lev* [online]. 2008 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://pazderalev.webnode.cz/vyuka/technicke-materialy/plasty/>
- [30] ABS Thermoplast. In: *PS* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/ABS/>
- [31] POM C – Derlin, Ertacetal, Tecaform. In: *KAJMAN K* [online]. 2006 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://kajmank.cz/pom-tecaform/>
- [32] O společnosti Jirous s.r.o. In: *WI-FI ANTÉNY* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://cz.jirous.com/>
- [33] TPE – Termoplastický elastomer. In: *RESINEX* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/tpe.html>
- [34] *Konstrukční elektronika a radio*. Praha: Amaro, s.r.o, 1999, XLVIII/1999, č. 5. ISSN 1211-3557. Dostupné z: <http://om6bb.bab.sk/files/HAM%20Kniznica/Magaziny/Amaterske%20radio%20pro%20Konstruktery/1999-05.pdf>
- [35] MaxLink MaxDish MIMO anténa parabola dvoupolarizační extreme s límcem + radom 24dBi 5GHz. In: *wifi.aspa* [online]. 2014 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://wifi.aspa.cz/maxlink-maxdish-mimo-antena-parabola-dvoupolarizacni-extreme-s-limcem-radom-24dbi-5ghz-z105890/>
- [36] Radom s límcem pro UBNT 22dBi. In: *TOMI CZECH* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://www.t-cz.com/radom-s-limcem-pro-ubnt-22dbi\\_d15476.html](http://www.t-cz.com/radom-s-limcem-pro-ubnt-22dbi_d15476.html)
- [37] *BScom* [online]. 2003 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.bscom.cz>
- [38] MANT30 PA. In: *Routerboard* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://routerboard.com/MTAD-5G-30D3-PA>
- [39] AirFiber X. In: *UBIQUITI* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <https://www.ubnt.com/airfiber/airfiber5x/>
- [40] Slovník pojmů. In: *UREL* [online]. 2010 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=A-5>
- [41] Měření na anténách. In: *OKIIKE* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://oklike.c-a-v.com/soubory/ant\\_mereni.htm](http://oklike.c-a-v.com/soubory/ant_mereni.htm)
- [42] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény: Encyklopedická příručka*. 3., rozšíř. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000, 287 s. ISBN 80-730-0166-7.
- [43] MRÁZ, Jan. *Radiotechnická měření v bezodrazové komoře*. Plzeň, 2005. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

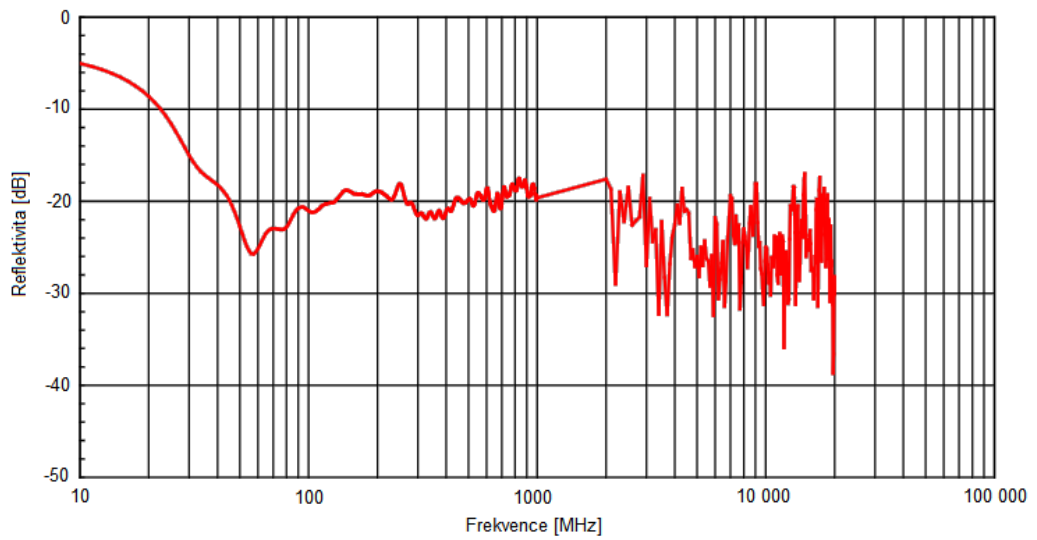
- [44] Vyzařovací diagram. In: *Elmag.org* [online]. 2009 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://old.elmag.org/doku.php/k317:simulace\\_elmag\\_poli:vyzarovaci\\_diagram](http://old.elmag.org/doku.php/k317:simulace_elmag_poli:vyzarovaci_diagram)
- [45] Polarizace. In: *Elmag.org* [online]. 2009 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://old.elmag.org/doku.php/k317:simulace\\_elmag\\_poli:polarizace](http://old.elmag.org/doku.php/k317:simulace_elmag_poli:polarizace)
- [46] HEJHÁLEK, Jiří. Reflexní fólie – účinná ochrana střechy proti slunci. In: *SUNFLEX* [online]. 2009 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://www.sunflex.cz/docs\\_files/901.pdf](http://www.sunflex.cz/docs_files/901.pdf)
- [47] Klimatické a tepelné zkoušky. In: *RICE* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://www.rice.zcu.cz/cz/services/ETL/services/clima\\_tests.html](http://www.rice.zcu.cz/cz/services/ETL/services/clima_tests.html)
- [48] ČSN EN 60068-1 ed. 2. *Zkoušení vlivů prostředí: Část 1: Obecně a návod*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [49] ČSN EN 60068-2-30 ed. 2. *Zkoušení vlivů prostředí: Část 2-30: Zkoušky - Zkouška Db: Vlhké teplo cyklické (cyklus 12 h + 12 h)*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [50] ČSN EN 60068-2-14 ed. 2. *Zkoušení vlivů prostředí: Část 2-14: Zkoušky – Zkouška N: Změna teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [51] ČSN EN 60068-2-1 ed. 2. *Zkoušení vlivů prostředí: Část 2-1: Zkoušky - Zkouška A: Chlad*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [52] ČSN EN 60068-2-2. *Zkoušení vlivů prostředí: Část 2-2: Zkoušky - Zkouška B: Suché teplo*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [53] Produkty 5,4-5,9 GHz. In: *SIMR WIFI ANTENNAS* [online]. 2013 [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: <http://www.simr antennas.com/produkty.php>
- [54] Datasheet Ferrite Absorber Franko Sorb F006. In: *FRANKONIA* [online]. 2013 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user\\_upload/documents/Catalogues/Absorbers/FrankoSorb%20F006.pdf](http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user_upload/documents/Catalogues/Absorbers/FrankoSorb%20F006.pdf)
- [55] Datasheet Hybrid Absorber Franko Sorb H450 - A2. In: *FRANKONIA* [online]. 2013 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user\\_upload/documents/Catalogues/Absorbers/FrankoSorb%20H450-A2.pdf](http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user_upload/documents/Catalogues/Absorbers/FrankoSorb%20H450-A2.pdf)
- [56] Anechoic Chambers & RF-Shielded Rooms. In: *FRANKONIA* [online]. 2012 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.frankoniagroup.com/cms/en/products/anechoic-chamber-and-rf-shielded-rooms/>
- [57] Elektrotechnická laboratoř - ETL. In: *RICE* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.rice.zcu.cz/cz/services/ETL/>

## SEZNAM PŘÍLOH

- Obr. P.1:** Reflektivita feritového absorbéru Franko<sub>Sorb</sub> F006
- Obr. P.2:** Reflektivita hybridního pyramidového absorbéru Franko<sub>Sorb</sub> H450
- Obr. P.3:** Zisk měřicí antény v závislosti na kmitočtu
- Obr. P.4:** Měření v částečně bezodrazové komoře FEL ZČU
- Obr. P.5:** Umístění antén v klimatické komoře
- Obr. P.6:** Průběhy hodnot ČSV 22 dBi antény poskytnuté výrobcem
- Obr. P.7:** Průběh hodnot izolace mezi vstupy 22 dBi antény poskytnuté výrobcem
- Obr. P.8:** Hodnoty zisku 22 dBi antény poskytnuté výrobcem
- Obr. P.9:** Směrové charakteristiky 22 dBi antény poskytnuté výrobcem
- Obr. P.10:** Průběhy hodnot ČSV 26 dBi antény poskytnuté výrobcem
- Obr. P.11:** Průběh hodnot izolace mezi vstupy 26 dBi antény poskytnuté výrobcem
- Obr. P.12:** Směrové charakteristiky 26dBi antény poskytnuté výrobcem
- Obr. P.13:** Hodnoty zisku 26 dBi antény poskytnuté výrobcem
- Obr. P.14:** Část zářiče ze SILONU z vnitřní strany
- Obr. P.15:** Průběh hodnot ČSV, s chybou u třetího měření, způsobenou vadným koaxiálním kabelem a opravný průběh u antény s pracovním označením 1407
- Obr. P.16:** Průběh hodnot zisku, s chybou u druhého měření, způsobenou prokluzem točny v částečně bezodrazové komoře a opravný průběh s odstraněnou chybu točny u antény s pracovním označením 1408



Obr. P.1: Reflektivita feritového absorbéru FrankoSorbs F006 [54]

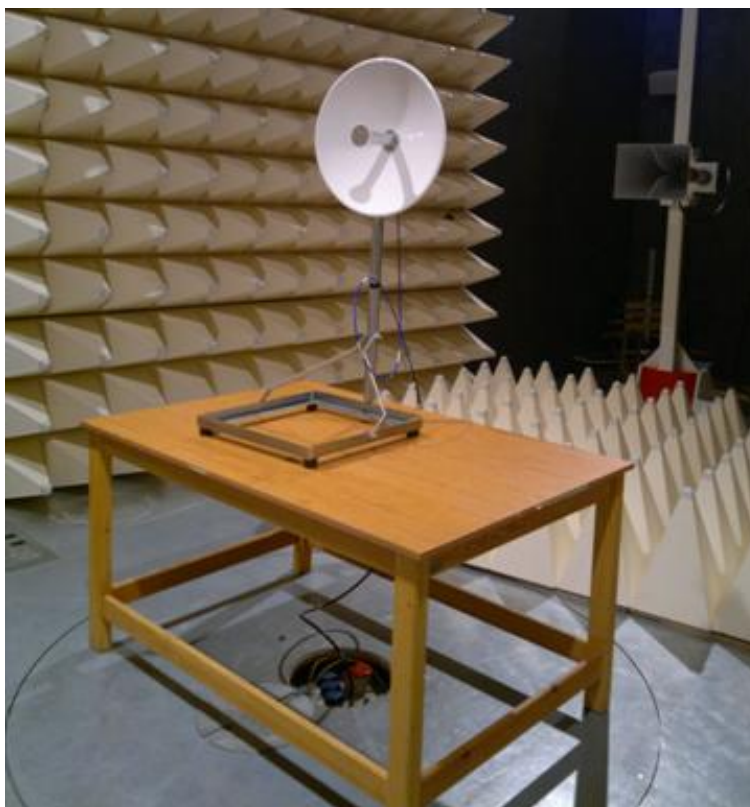


Obr. P.2: Reflektivita hybridního pyramidového absorbéru FrankoSorbs H450 [55]

SCHWARZBECK BBHA 9120 E (0899) D 69250 Schönnau Germany		Gain Isotr. dBi	Ant.- Factor dB/m
Freq. MHz			
450	5.73	17.55	
500	6.66	17.54	
600	8.59	17.19	
700	9.48	17.64	
800	10.29	17.99	
900	11.30	18.01	
1000	12.48	17.74	
1100	12.19	18.86	
1200	12.13	19.67	
1300	12.13	20.37	
1400	12.24	20.90	
1500	12.91	20.83	
1600	13.52	20.78	
1700	13.78	21.05	
1800	13.95	21.37	
1900	14.88	20.92	
2000	14.88	21.36	
2100	15.30	21.36	
2200	14.73	22.34	
2300	15.05	22.40	
2400	15.35	22.47	
2500	15.42	22.76	
2600	15.44	23.08	
2700	15.83	23.02	
2800	16.03	23.14	
2900	15.90	23.56	
3000	15.54	24.23	
3200	14.60	25.72	
3400	14.19	26.66	
3600	14.61	26.73	
3800	15.91	25.90	
4000	17.02	25.24	
4200	17.45	25.24	
4400	17.69	25.40	
4600	17.58	25.89	
4800	15.78	28.06	
5000	17.06	27.14	
5200	17.49	27.05	
5400	18.02	26.85	
5600	18.43	26.76	
5800	18.61	26.88	
6000	18.77	27.01	
Freq.	Gain Isotr.	Ant.- Factor	

Obr. P.3: Zisk měřící antény v závislosti na kmitočtu

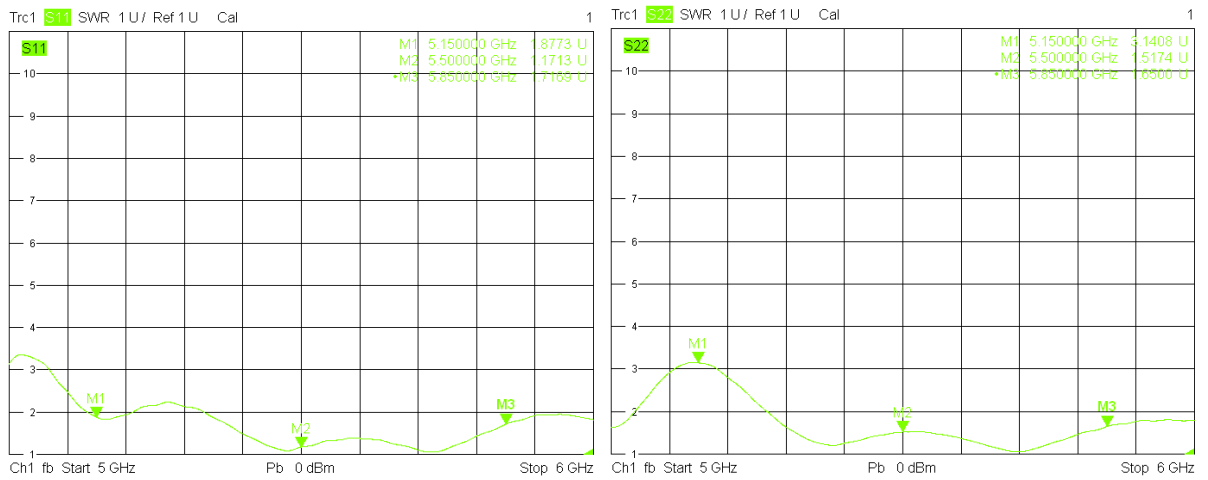




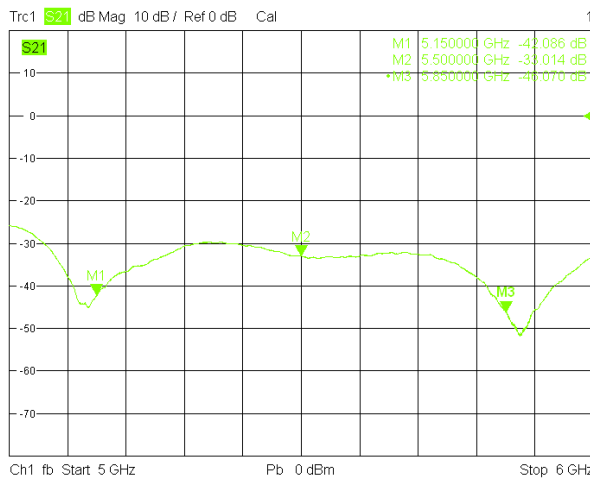
**Obr. P.4:** Měření v částečně bezodrazové komoře FEL ZČU



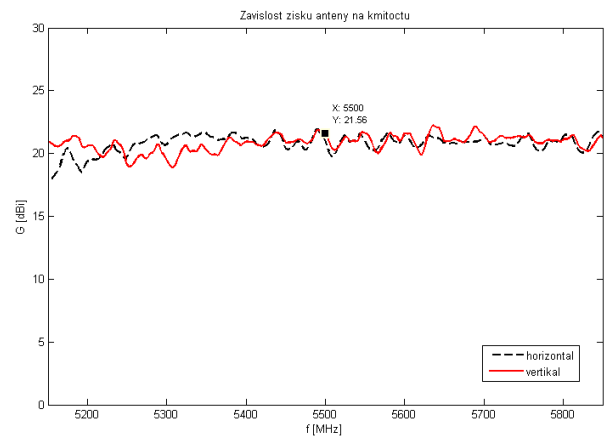
**Obr. P.5:** Umístění antén v klimatické komoře



**Obr. P.6:** Průběhy hodnot ČSV (vertikální vstup antény vlevo, horizontální vstup antény vpravo) 22 dBi antény poskytnuté výrobcem [53]



**Obr. P.7:** Průběh hodnot izolace mezi vstupy 22 dBi antény poskytnuté výrobcem [53]



**Obr. P.8:** Hodnoty zisku 22 dBi antény poskytnuté výrobcem [53]

Diagram pro  $f = 5600$  MHz. Vyzarovaci uhel je 14 stupnu. Cinitel potlacení zpetneho prijmu: 25.00 dB. Potlacení vedlejsich svazku: 17.12 dB.

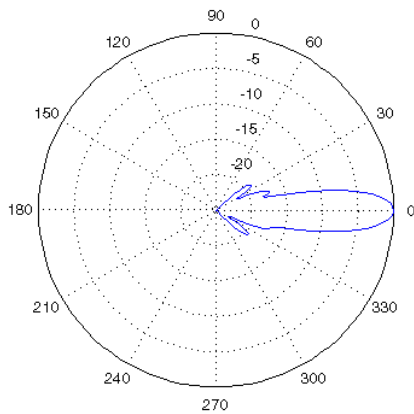
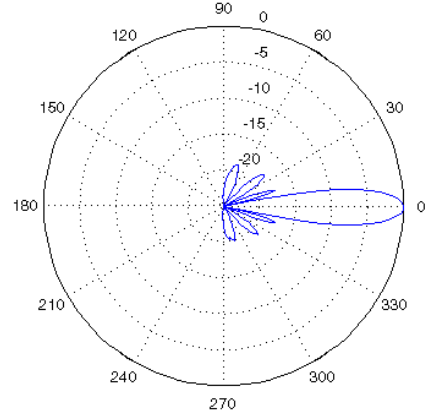
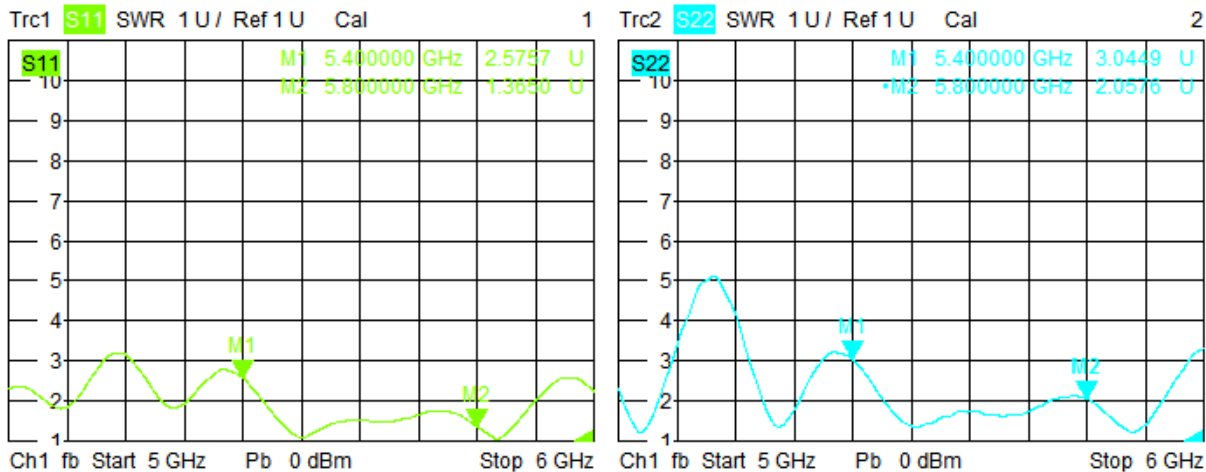


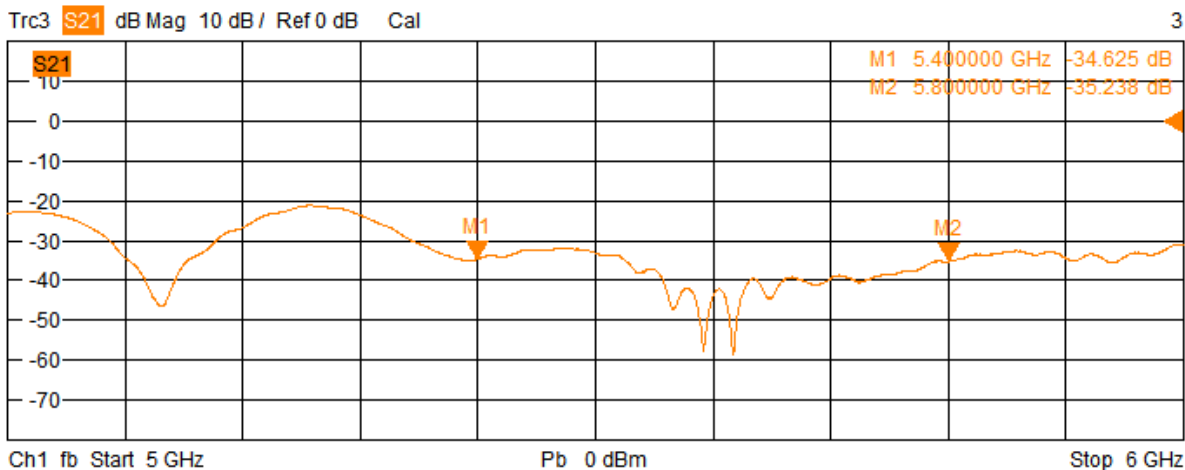
Diagram pro  $f = 5600$  MHz. Vyzarovaci uhel je 11 stupnu. Cinitel potlacení zpetneho prijmu: 25.00 dB. Potlacení vedlejsich svazku: 17.93 dB.



**Obr. P.9:** Směrové charakteristiky (hE konfigurace vlevo, vH konfigurace vpravo) 22 dBi antény poskytnuté výrobcem [53]

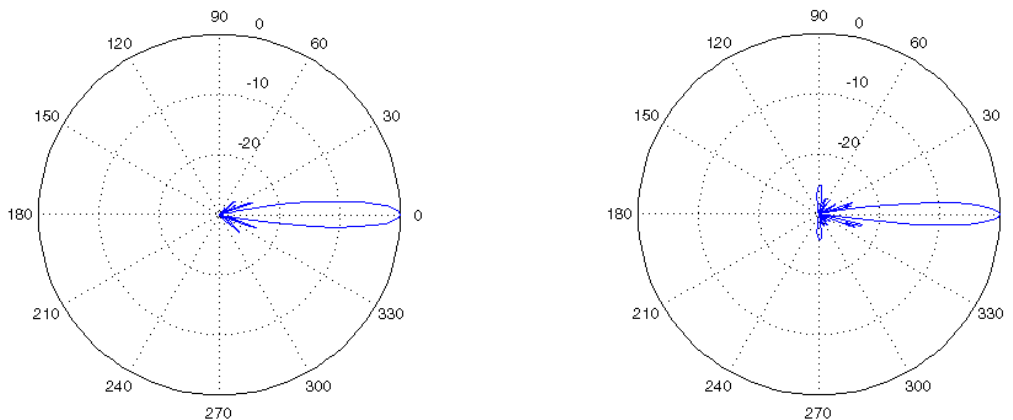


**Obr. P.10:** Průběhy hodnot ČSV (horizontální vstup antény vlevo, vertikální vstup antény vpravo) 26 dBi antény poskytnuté výrobcem [53]

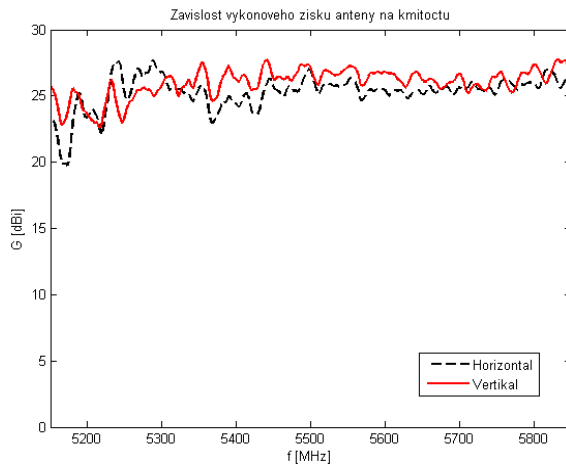


**Obr. P.11:** Průběh hodnot izolace mezi vstupy 26 dBi antény poskytnuté výrobcem [53]

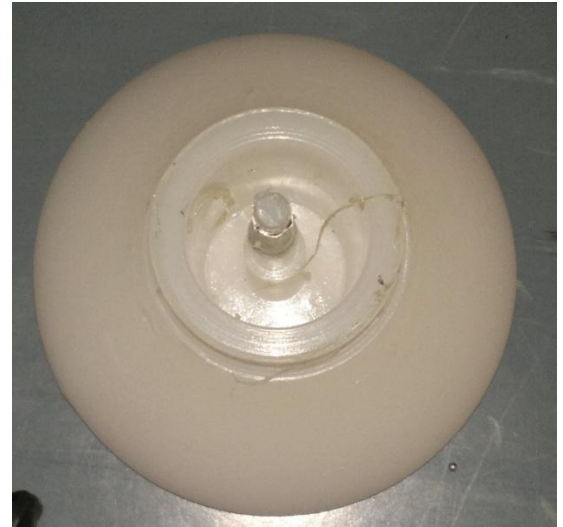
Diagram pro  $f = 5600$  MHz. Vyzarovací uhel je 8 stupnu. Cínilatel potlacení zpětneho prijmu: 37.56 dB. Potlacení vedlejších svazku: 23.44 dB. Cínilatel potlacení zpětneho prijmu: 37.08 dB. Potlacení vedlejších svazku: 22.60 dB.



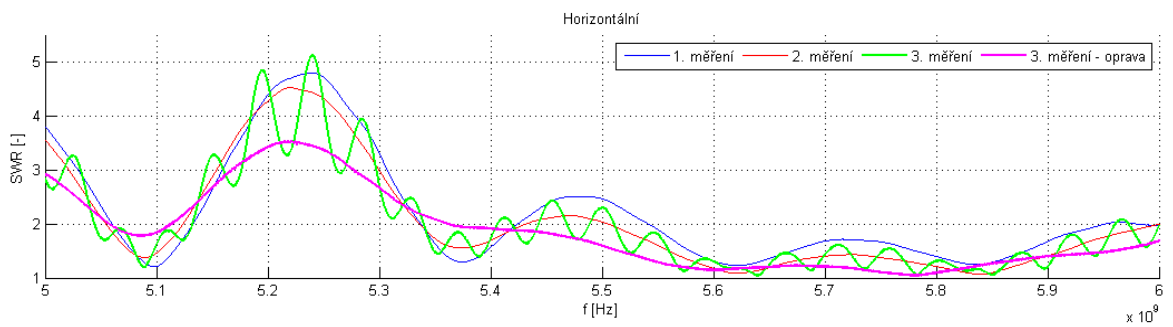
**Obr. P.12:** Směrové charakteristiky (hE konfigurace vlevo, vH konfigurace vpravo) 26dBi antény poskytnuté výrobcem [53]



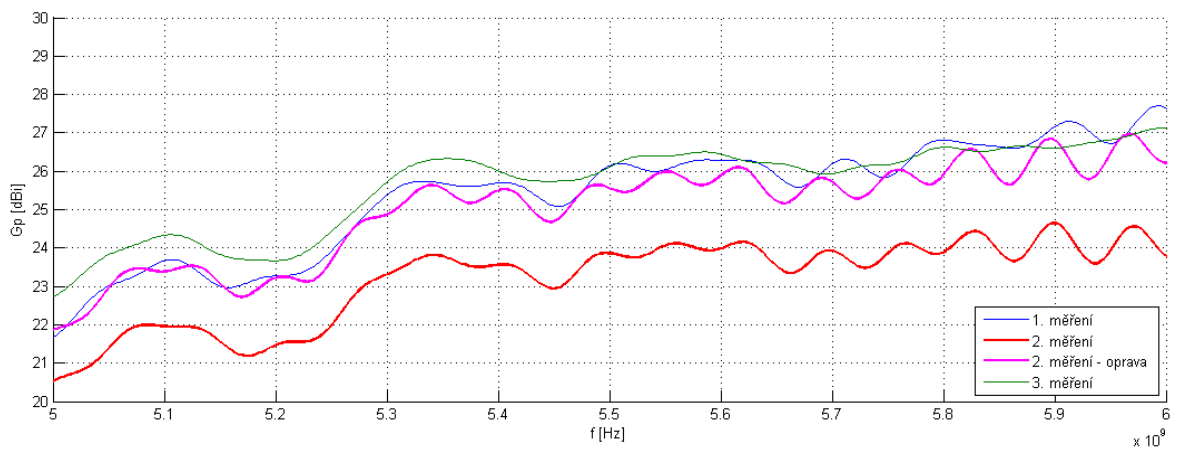
**Obr. P.13:** Hodnoty zisku 26 dBi antény poskytnuté výrobcem [53]



**Obr. P.14:** Část zářiče ze SILONU z vnitřní strany



**Obr. P.15:** Průběh hodnot ČSV, s chybou u třetího měření, způsobenou vadným koaxiálním kabelem (zelená křivka) a opravný průběh (růžová křivka) u antény s pracovním označením 1407



**Obr. P.16:** Průběh hodnot zisku, s chybou u druhého měření, způsobenou prokluzem točny v částečně bezodrazové komoře (červená křivka) a opravný průběh s odstraněnou chybou točny (růžová křivka) u antény s pracovním označením 1408