

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VYZAŘOVÁNÍ V ČÁSTEČNĚ A  
PLNĚ BEZODRAZOVÝCH KOMORÁCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ROMAN DENEŠ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VYZAŘOVÁNÍ V ČÁSTEČNĚ A PLNĚ BEZODRAZOVÝCH KOMORÁCH

MEASUREMENTS OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN ANECHOIC AND  
SEMI-ANECHOIC CHAMBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ROMAN DENEŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ DŘÍNOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

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

**Student:** Bc. Roman Deneš

**ID:** 134469

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

### Měření elektromagnetického vyzařování v částečně a plně bezodrazových komorách

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte podrobný rozbor měření elektromagnetického vyzařování v částečně bezodrazových a plně bezodrazových EMC komorách. Zohledněte vliv odražených signálů na výsledky měření. Vyhodnoťte i vliv natočení antény (horizontální, vertikální polarizace) a také vliv natáčení v průběhu měření (měření dle ANSI C63.4-2009). Analyzujte vliv měřicí vzdálenosti na výsledky měření a navrhnete způsob přepočtu mezi měřicími vzdálenostmi 3 m a 10 m.

Prakticky realizujte měření parametrů bezodrazových komor (stanovení normalizovaného útlumu pracoviště NSA, FNSA) včetně vyhodnocení vlivu použitého materiálu otočného stolu. Použijte vhodný SW k zajištění automatizace celého procesu (např. LabView). Opakovaně proveďte měření vybraného elektronického zařízení. Vyjádřete nejistoty pro měření v obou typech bezodrazových komor. Na základě získaných výsledků stanovte opakovatelnost a reprodukovatelnost měření.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DŘÍNOVSKÝ, J., FRÝZA, T., SVAČINA, J., KEJÍK, Z., RŮŽEK, V., ZACHAR, J., Elektromagnetická kompatibilita - přednášky. Skriptum. Brno: VUT v Brně, 2010.
- [2] ČSN EN 55022 ed. 2, Zařízení informační techniky - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření, duben 2007.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 21.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## **ABSTRAKT**

Práce si klade za cíl podrobný rozbor mechanismů šíření elektromagnetických vln v bezodrazových komorách. Při analýze je zohledněn vliv měřící vzdálenosti, konfigurace pracoviště a dalších parametrů. Dále se práce zabývá validací obou typů bezodrazových komor a zkoumá vliv vybraných parametrů na výsledky měření. Na základě teoretického rozboru a praktických měření je provedeno srovnání mezi částečně a plně bezodrazovou komorou, případně třímetrovou a desetimetrovou měřící vzdálenosti. Práce též obsahuje podrobnou analýzu zdrojů nejistot.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Plně bezodrazová komora, částečně bezodrazová komora, elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetické vyzařování, elektromagnetická odolnost, normalizovaný útlum pracoviště, SVSWR, uniformita pole, nejistota měření.

## **ABSTRACT**

This thesis is focused on a detailed analysis of the mechanisms of electromagnetic wave propagation in anechoic chambers. The analysis takes into account the influence of the measurement distance, setup of anechoic chamber and other parameters. Furthermore, the work deals with a validation of both types of anechoic chambers and examines the impact of selected parameters on the measurement results. Based on the theoretical analysis and practical measurement, the comparison between semi and fully anechoic chamber, or a three and ten meter measuring distance was made. This thesis also contains a detailed analysis of sources of the uncertainty.

## **KEYWORDS**

Full anechoic chamber, semi-anechoic chamber, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, electromagnetic susceptibility, normalized site attenuation, SVSWR, field uniformity, measurement uncertainty.

DENEŠ, Roman *Měření elektromagnetického vyzařování v částečně a plně bezodrazových komorách*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 79 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Měření elektromagnetického vyzařování v částečně a plně bezodrazových komorách“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále pak panu Ing. Liboru Palíškovi, Ph.D. ze společnosti Honeywell za odborné konzultace a spoustu praktických rad z oblasti elektromagnetické kompatibility.

Brno .....

.....

(podpis autora)

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

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| Úvod  | 12        |
| <b>1 Teoretický rozbor</b>                              | <b>13</b> |
| 1.1 Elektromagnetická kompatibilita . . . . .           | 13        |
| 1.2 Testovací stanoviště . . . . .                      | 13        |
| 1.2.1 Testovací pracoviště ve volném prostoru . . . . . | 14        |
| 1.2.2 Částečně bezodrazová komora . . . . .             | 15        |
| 1.2.3 Plně bezodrazová komora . . . . .                 | 15        |
| 1.3 Přístrojové vybavení . . . . .                      | 15        |
| 1.3.1 Měřicí antény . . . . .                           | 15        |
| 1.3.2 Přístroje pro měření rušení . . . . .             | 17        |
| 1.3.3 Speciální signálové zdroje . . . . .              | 17        |
| 1.4 Nejistota měření . . . . .                          | 18        |
| 1.4.1 Rozbor nejistot . . . . .                         | 18        |
| 1.4.2 Zdroje nejistot . . . . .                         | 19        |
| 1.4.3 Srovnání . . . . .                                | 21        |
| <b>2 Analýza měřicího pracoviště</b>                    | <b>22</b> |
| 2.1 Šíření signálu v komoře . . . . .                   | 22        |
| 2.2 Výpočet intenzity . . . . .                         | 23        |
| 2.3 Vliv polarizace . . . . .                           | 27        |
| 2.4 Výška měřících antény . . . . .                     | 28        |
| 2.5 Model zkoušeného objektu . . . . .                  | 29        |
| <b>3 Rozbor parametrů měření</b>                        | <b>31</b> |
| 3.1 Natočení antény . . . . .                           | 31        |
| 3.2 Výškový krok měřící antény . . . . .                | 36        |
| 3.3 Materiál stolu . . . . .                            | 38        |
| 3.3.1 Elektromagnetická interference . . . . .          | 39        |
| 3.3.2 Elektromagnetická susceptibilita . . . . .        | 41        |
| <b>4 Validace bezodrazových komor</b>                   | <b>44</b> |
| 4.1 Normalizovaný útlum pracoviště (NSA) . . . . .      | 44        |
| 4.2 Poměr stojatého vlnění pracoviště (SVSWR) . . . . . | 47        |
| 4.2.1 Částečně bezodrazová komora . . . . .             | 48        |
| 4.2.2 Plně bezodrazová komora . . . . .                 | 50        |
| 4.2.3 Srovnání SVSWR v SAR a FAR . . . . .              | 51        |
| 4.3 Uniformita pole . . . . .                           | 52        |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>5</b> | <b>Srovnání měření v SAR a FAR</b>         | <b>57</b> |
| 5.1      | Srovnání v rozsahu do 1 GHz . . . . .      | 57        |
| 5.2      | Srovnání v rozsahu od 1 GHz . . . . .      | 59        |
| <b>6</b> | <b>Srovnání měřící vzdálenosti</b>         | <b>62</b> |
| 6.1      | Analýza měřící vzdálenosti . . . . .       | 62        |
| 6.2      | Návrh přepočtu vzdálenosti . . . . .       | 63        |
| 6.2.1    | Zavedení korekce . . . . .                 | 64        |
| 6.2.2    | Úprava metody . . . . .                    | 64        |
| <b>7</b> | <b>Opakovatelnost a reprodukovatelnost</b> | <b>67</b> |
| <b>8</b> | <b>Nejistota</b>                           | <b>69</b> |
| <b>9</b> | <b>Závěr</b>                               | <b>70</b> |
|          | <b>Literatura</b>                          | <b>74</b> |
|          | <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>    | <b>76</b> |
|          | <b>Seznam příloh</b>                       | <b>77</b> |
| <b>A</b> | <b>Seznam použitých přístrojů</b>          | <b>78</b> |
| <b>B</b> | <b>Obsah přiloženého CD</b>                | <b>79</b> |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Půsorys OATS . . . . .   | 14 |
| 1.2  | Anténa 3142E BiConiLog (ETS - Lindgren) . . . . .                        | 16 |
| 1.3  | Anténa 3117-PA Double-Ridged Waveguide Horn (ETS - Lindgren) . . . . .   | 16 |
| 2.1  | Šíření signálu v komoře . . . . .  | 22 |
| 2.2  | Šíření signálu v komoře ( $r = 3$ m) . . . . .                           | 25 |
| 2.3  | Šíření signálu v komoře ( $r = 10$ m) . . . . .                          | 26 |
| 2.4  | Naměřený průběh signálu v komoře ( $r = 3$ m) . . . . .                  | 26 |
| 2.5  | Odraz od zemnicí plochy . . . . .  | 27 |
| 2.6  | Ideální výška měřicí antény ( $r = 3$ m) . . . . .                       | 28 |
| 2.7  | Ideální výška měřicí antény ( $r = 10$ m) . . . . .                      | 29 |
| 2.8  | Průběhy pro vyzařovací charakteristiky dipólu s definovaným náklonem     | 29 |
| 2.9  | Průběhy pro náhodné vyzařovací charakteristiky EUT . . . . .             | 30 |
| 3.1  | Normované směrové charakteristiky BiLog antény 3147 [12] . . . . .       | 32 |
| 3.2  | Normované směrové charakteristiky trychtýřové antény 3117 [12] . . . . . | 32 |
| 3.3  | Pokles intenzity v závislosti na výšce antény ( $r = 3$ m) . . . . .     | 33 |
| 3.4  | Pokles intenzity v závislosti na frekvenci ( $r = 3$ m) . . . . .        | 34 |
| 3.5  | Srovnání měření s náklonem a bez náklonu antény . . . . .                | 35 |
| 3.6  | Závislost chyby na měřícím kroku ( $r = 10$ m) . . . . .                 | 37 |
| 3.7  | Závislost chyby na měřícím kroku ( $r = 3$ m) . . . . .                  | 37 |
| 3.8  | Naměřená závislost chyby na měřícím kroku ( $r = 3$ m) . . . . .         | 38 |
| 3.9  | Vliv stolu - interference (30 MHz - 1 GHz) . . . . .                     | 40 |
| 3.10 | Vliv stolu - interference (1 GHz - 18 GHz) . . . . .                     | 41 |
| 3.11 | Vliv stolu - susceptibilita (80 MHz - 1 GHz) . . . . .                   | 42 |
| 3.12 | Vliv stolu - susceptibilita (1 GHz - 3 GHz) . . . . .                    | 43 |
| 4.1  | NSA - vertikální polarizace . . . . .                                    | 46 |
| 4.2  | NSA - horizontální polarizace . . . . .                                  | 47 |
| 4.3  | SVSWR - horizontální polarizace (SAR) . . . . .                          | 49 |
| 4.4  | SVSWR - vertikální polarizace (SAR) . . . . .                            | 49 |
| 4.5  | SVSWR - horizontální polarizace (FAR) . . . . .                          | 50 |
| 4.6  | SVSWR - vertikální polarizace (FAR) . . . . .                            | 50 |
| 4.7  | Srovnání SVSWR v SAR a FAR . . . . .                                     | 51 |
| 4.8  | Uniformita pole - ukázka kalibrace v 16ti bodech . . . . .               | 53 |
| 4.9  | Uniformita pole - horizontální polarizace . . . . .                      | 54 |
| 4.10 | Uniformita pole - vertikální polarizace . . . . .                        | 55 |
| 5.1  | Srovnání SAR a FAR (Simulace) . . . . .                                  | 57 |
| 5.2  | Srovnání SAR a FAR do 1 GHz - vertikální polarizace . . . . .            | 58 |
| 5.3  | Srovnání SAR a FAR do 1 GHz - horizontální polarizace . . . . .          | 59 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5.4 | Srovnání SAR a FAR od 1 GHz - vertikální polarizace . . . . .   | 60 |
| 5.5 | Srovnání SAR a FAR od 1 GHz - horizontální polarizace . . . . . | 61 |
| 6.1 | Srovnání měřicí vzdálenosti - vertikální polarizace . . . . .   | 62 |
| 6.2 | Srovnání měřicí vzdálenosti - horizontální polarizace . . . . . | 63 |
| 6.3 | Nákres upraveného měřicího stanoviště . . . . .                 | 65 |
| 7.1 | Opakovatelnost a reprodukovatelnost měření . . . . .            | 68 |

# SEZNAM TABULEK

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Srovnání nejistoty měření na různých pracovištích . . . . .            | 21 |
| 3.1 | Rozsah úhlů přímé a odražené vlny pro obě měřící vzdálenosti . . . . . | 31 |
| 3.2 | Nejistoty vlivem směrovosti antény dle [6] . . . . .                   | 35 |
| 3.3 | Odhad nejistoty vlivem materiálu stolu dle [6] . . . . .               | 39 |
| 8.1 | Srovnání jednotlivých nejistot pracoviště . . . . .                    | 69 |
| 8.2 | Nejistota vlivem nedokonalost pracoviště . . . . .                     | 69 |
| A.1 | Seznam použitých přístrojů . . . . .                                   | 78 |

# ÚVOD

V dnešní době, kdy jsou elektronické systémy přítomny téměř v každém zařízení, nabývá pojem elektromagnetická kompatibilita stále větší důležitosti. Koexistence všech elektronických systému je nezbytná. Každý výrobce musí věnovat velkou pozornost testování svých výrobků s ohledem na dodržení všech EMC standardů.

Tato práce nabízí detailní pohled na měření v bezodrazových komorách. V první části je provedeno stručné rozdělení měřících komor a přístrojového vybavení. Dále pak zevrubný rozbor mechanismu šíření elektromagnetické vlny v obou typech bezodrazových komor, přičemž je brán v potaz vliv polarizace měřící antény a zemnicí plochy.

Následně je věnována pozornost rozboru vybraných parametrů měření u kterých lze předpokládat výrazný dopad na výsledky měření. Mezi ně se řadí nastavitelnost výškového kroku měřící antény, možnost využití funkce náklonu antény a v neposlední řadě vliv materiálu použitého stolu.

Bezodrazové komory musí splňovat při každém typu měření určité parametry, aby byla zajištěna opakovatelnost a reprodukovatelnost měření jednak v konkrétní komoře, avšak především pro zachování porovnatelnosti mezi jednotlivými pracovišti. Z toho důvodu práce obsahuje validaci částečně i plně bezodrazové komory pro měření elektromagnetické interference i odolnosti. Mezi měřené parametry patří normalizovaný útlum pracoviště, poměr stojatého vlnění pracoviště a uniformita pole.

Ověřování výrobku lze provádět na několika typech pracoviště s využitím postupů popsaných v různých normách. Tyto postupy měření se mnohdy liší. Nabízí se tedy otázka srovnání jednotlivých přístupů. Práce se zabývá srovnáním výsledků získaných v částečně a plně bezodrazových komorách a také při různých měřících vzdálenostech. Dané modelové situace jsou nejprve simulovány pomocí matematického modelu v programu matlab a následně ověřeny při praktickém měření.

Práce se dále věnuje teoretickému rozboru nejistot měření a jejich stanovení při různých situacích. Jsou zde nastíněny různé zdroje nejistot, které měření v bezodrazových komorách provázejí. Taktéž je rozebrán vliv opakovatelnosti a reprodukovatelnosti při využití rozličných konfigurací měřícího pracoviště.

V závěru práce jsou shrnuty výhody a nevýhody užití různých konfigurací pracoviště. Taktéž jsou uvedena určitá doporučení vyplývající z výsledků práce.

# 1 TEORETICKÝ ROZBOR

## 1.1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) je schopnost zařízení vykazovat správnou funkci i v prostředí s přítomností rušivých signálů, ať už přírodních či umělých, a zároveň nezpůsobovat svou činností rušení jiných zařízení. EMC se tedy zabývá vzájemnou koexistencí elektronických systémů.

EMC lze rozdělit do dvou oblastí. První oblastí je elektromagnetická susceptibilita (EMS), neboli odolnost zařízení proti rušení. Jelikož nikdy nelze odstranit všechny potenciální zdroje rušení, je třeba zajistit funkčnost každého zařízení i v jejich přítomnosti. EMS se tedy zabývá především hledáním způsobů, jak zvýšit odolnost daného zařízení proti rušení. Typicky se jedná o odolnost proti elektrostatickým výbojům, rušení z rozvodné sítě či poklesům napájecího napětí.

Druhou neméně podstatnou oblastí EMC je elektromagnetická interference (EMI). Jedná se o proces při kterém je vlivem nevhodného návrhu určitého zařízení narušena správná činnost jiných zařízení. K rušení může docházet několika způsoby. Typicky se jedná o rušení po vedení, které je dominantní pro nižší kmitočty a rušení vyzářováním, které se uplatňuje především u vyšších kmitočtů.

Každé zařízení, které je uváděno na trh v rámci evropské unie a je označeno značkou CE, musí splňovat podmínky stanovené v evropských normách, případně jejich národních prepisech. V ČR se jedná o české technické normy (ČSN). V příslušných normách je definována hranice pro úroveň vyzářování a odolnosti. Mezi těmito hranicemi je ponechána určitá rezerva, která zaručuje, že se přístroje splňující danou normu nebudou vzájemně ovlivňovat. Danou problematiku podrobně mapují například materiály [1] a [10].

## 1.2 Testovací stanoviště

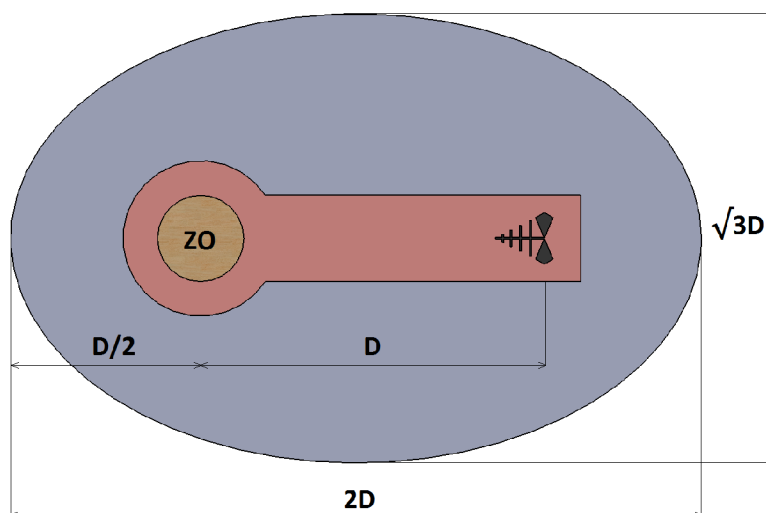
Pro testování elektromagnetické kompatibility, konkrétně emisí, je nutné zajistit prostor, který je prostý jakýchkoliv rušivých elementů. V blízkosti testovacího pracoviště se nesmí nacházet žádné předměty od kterých by mohlo docházet k odrazu elektromagnetické vlny. V ideálním případě by též mělo být absolutně potlačené rušivé elektromagnetické pozadí, čehož v praxi nelze plně dosáhnout.

V následujícím textu jsou prezentovány tři základní typy stanoviště pro měření. Každé z nich má své charakteristické znaky a využívá se v různých situacích.

### 1.2.1 Testovací pracoviště ve volném prostranství

Testovací pracoviště ve volném prostranství (OATS) je nejjednodušší možné uspořádání. Jak lze pozorovat na obrázku 1.1, je nutné zajistit pouze naprosto volný prostor ve tvaru elipsy o rozměrech  $2D \times \sqrt{3}D$  a zemnicí plochu mezi zkoušeným zařízením a měřicí anténou. Přičemž zkratka  $D$  označuje měřící vzdálenost. Při této konfiguraci je zajištěno, že případný odraz od předmětů mimo definované prostranství urazí minimálně dvojnásobnou vzdálenost. Odražená vlna bude mít tedy intenzitu minimálně o 6 dB nižší.

Nevýhodou OATS je výrazné šumové pozadí, které v závislosti na kmitočtu může nabývat hodnot okolo  $50 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  [9]. Dále je nutné splnit podmínku, že okolní rušivé pozadí je minimálně o 20 dB menší, než vyzařování zkoušeného objektu (EUT). Metody měření jsou důkladně rozebrány například v [9].



Obr. 1.1: Půsorys OATS

Velkou výhodou OATS jsou pořizovací náklady pracoviště. Odpadá zde nutnost mnohamilionové investice na výstavbu bezodrazové komory. Pakliže se OATS nachází na dostatečně izolovaném místě, vykazuje výborné vlastnosti pro měření a blíží se k tzn. zlatému standardu. Při praktické realizaci v blízkosti zástavby je však velmi problémová úroveň okolního šumu. V daném případě se pak měření stává náročnějším a může vykazovat horší opakovatelnost a reprodukovatelnost. Další nevýhodou je závislost na povětrnostních podmínkách. Z toho důvodu je testování na běžném OATS vhodné především na předcertifikační měření.

## 1.2.2 Částečně bezodrazová komora

Z výše uvedeného textu je zřejmé, že použití OATS pro certifikované testování není příliš vhodné. Vlivem elektromagnetického rušivého pozadí má měření horší opakovatelnost a reprodukovatelnost. Z tohoto důvodu se měření přesunulo z otevřeného prostranství do uzavřených prostor s přesně definovanými parametry.

Částečně bezodrazová komora (SAR) je místnost definovaných rozměrů, která má všechny stěny obloženy absorpčními materiály. Díky absorpčním materiálům komora modeluje absolutně volný prostor, který je prostý jakéhokoli rušivého pozadí. V praxi je definována kmitočtově závislá stínící účinnost komory, která se pohybuje okolo 80 dB až 100 dB. Podlaha komory je pokryta vhodným vodivým materiálem s dobrou odrazivostí. Ze zkoušeného objektu (EUT) se šíří přímá vlna a vlna odražená od zemní plochy. V místě měření se sčítá přímá a odražená vlna s různou fází. Je tedy nutné polohovat anténu v rozsahu 1 metr až 4 metry, aby bylo nalezeno maximum intenzity (součet vln se stejnou fází).

Pro měření v kmitočtovém rozsahu 30 MHz až 1 GHz je měření v částečně bezodrazové komoře stále preferovaným způsobem. Tato práce si mimo jiné dává za cíl srovnání měření v SAR a FAR z pohledu reprodukovatelnosti měření a výsledné nejistoty.

## 1.2.3 Plně bezodrazová komora

Plně bezodrazová komora (FAR) se od částečně bezodrazové komory liší pouze v pokrytí podlahy absorberem. Nedochozí tedy k odrazu elektromagnetické vlny od podlahy a není nutné výškově polohovat měřicí anténu. Komora je využívána pro měření v kmitočtovém pásmu nad 1 GHz, kde je nutné doplnit SAR o přídatné absorberem mezi měřicí anténou a EUT. V omezené míře se též používá i pro kmitočtové pásmo 30 MHz až 1 GHz, kde však stále dominuje SAR.

# 1.3 Přístrojové vybavení

## 1.3.1 Měřicí antény

Pro měření rušivých signálů v pásmu 30 MHz až 1 GHz se využívá několika typů širokopásmových antén: bikónické antény, logaritmicko-periodické antény, kónicko-periodické (spirálové) antény, případně jejich kombinace [11].

Typickou anténou pro měření v kmitočtovém pásmu 30 MHz až 300 MHz je bikónická anténa. Jedná se o modifikovanou verzi klasického dipólu, který je vhodně rozšířen, případně zkrácen, pro dosažení větší šířky pásma. Nevýhodou bikónické antény je velmi nízká efektivita při nízkých kmitočtech.



Nejrozšířenější anténou pro měření rušivých signálů v pásmu 200 MHz až 1 (6) GHz se stala logaritmicko-periodická anténa. Jedná se o víceprvkovou anténu složenou z řady vhodně umístěných unipólů. Jednotlivé elementy jsou napájeny s fázovým posuvem  $180^\circ$ . Jejich velikost a vzájemná vzdálenost se logaritmicky zmenšuje směrem k přední části antény.

Všechny výše uvedené typy antén reagují na elektrickou složku elektromagnetického pole a je u nich využívána lineální polarizace. Při měření rušivých elektromagnetických polí se zpravidla kombinuje bikónická a logaritmicko-periodická anténa ve výslednou anténu typu BiLog (Obr. 1.2). S touto anténou je možné pokrýt celé kmitočtové pásmo 30 MHz až 1 (6) GHz.



Obr. 1.2: Anténa 3142E BiConiLog (ETS - Lindgren)

Pro měření v pásmu gigahertzových kmitočtů (1 GHz až 40 GHz) se využívají zejména trychtýřové antény. Trychtýřové antény jsou ze své podstaty velmi úzkopásmové, využívá se tedy různých konstručních úprav. Příkladem může být model 3117-PA (Obr. 1.3) od firmy ETS-lindgren, který pokrývá kmitočtové pásmo 1 GHz až 18 GHz.



Obr. 1.3: Anténa 3117-PA Double-Ridged Waveguide Horn (ETS - Lindgren)

Antény pro vyšší kmitočtové pásmo jsou zpravidlo vybaveny předzesilovačem umístěným přímo na měřicí anténě. Tím lze dosáhnout lepšího poměru signál/šum.

V případě měření elektromagnetické odolnosti se využívá obdobných antén, které jsou vhodně konstrukčně upraveny tak, aby byly schopny snášet výrazné výkonové zatížení.

### 1.3.2 Přístroje pro měření rušení

Jako měřič rušení je možné využít měřicí přijímač nebo spektrální analyzátor. Dle normy ČSN CISPR 16-1 [4] je nutné věnovat pozornost především následujícím parametrům přístroje [11]: možnost spojitého přeladování v celém kmitočtovém pásmu, vysoká citlivost a nízký vlastní šum, velký dynamický rozsah, různé typy detektorů (špičkový, kvazi-špičkový, střední hodnoty).

Z pohledu parametrů je měřicí přijímač výhodnější volbou, jelikož téměř ve všech bodech překonává spektrální analyzátor, viz [14]. Nevýhodou měřicího přijímače je však jeho pořizovací cena a poměrně úzká oblast použití. Spektrální analyzátor je oproti tomu velmi komplexní přístroj, který má mnohem větší oblast použitelnosti. Z hlediska parametrů je i spektrální analyzátor plně dostačující volba.

V dnešní době je již standardem, že je celý měřicí řetězec ovládán pomocí vhodného softwaru přímo z uživatelského rozhraní na PC. Díky softwarovému vybavení není problém automatizovat celý proces a aplikovat všechny potřebné korekce, jako například kmitočtově závislý anténní faktor. Taktéž je možné implementovat limity definované příslušnými normami a zjednodušit tak proces vyhodnocování výsledků, který bez vhodné softwarové podpory může zabrat srovnatelný čas jako měření samotné.

Vhodným softwarem je například TILE! [13] od společnosti ETS Lindgren. Program je principiálně velmi blízký masově využívanému programu labVIEW. Ostatně ovladače k jednotlivým přístrojům pochází přímo z labVIEW. Je však uzpůsobený pro použití v oblasti elektromagnetické kompatibility.

### 1.3.3 Speciální signálové zdroje

Speciální signálové zdroje jsou využívány jako jakési etalony pro kalibraci pracoviště. Využívají se zpravidla pro kalibraci OATS. Jedná se o generátory přesných signálů v určitém kmitočtovém pásmu. Na trhu jsou v podstatě dva typy těchto signálových zdrojů. Prvním je širokopásmový zdroj bílého šumu (Comparison Noise Emitter, CNE). Další alternativou je hřebenový generátor (Emissions Reference

Source, ERS), který generuje signaly s určitým odstupem, typicky jednotky MHz.

Signálové generátory jsou velmi přesně zkalibrovány výrobcem a je možné je použít pro zjištění nedokonalosti pracoviště. Pro dané pracoviště se provede standardní měření a jeho výsledky se porovnají s daty od výrobce. Rozdíl těchto dvou hodnot se následně využije jako korekce při měření. Použitím speciálních signálových zdrojů při kalibraci pracoviště se detailně zabývá například [9].

Speciální signálové zdroje jsou vhodným testovacím zařízením (EUT) pro srovnání měření v různých typech komor (SAR, FAR) či při různých měřících vzdálenostech. Díky přesně definovaným vlastnostem a stabilitě je nejistota vnesená samotným EUT minimální.

## 1.4 Nejistota měření

### 1.4.1 Rozbor nejistot

Nejistota měření je parametr pevně spjatý s výsledky měření. Definuje interval ve kterém se naměřená hodnota pohybuje po uplatnění všech možných vlivů na měření. Tento interval je definován s určitou pravděpodobností pokrytí. Níže je formulováno několik nezbytných termínů a detailně rozebrány jednotlivé zdroje nejistot se kterými je možné se při měření v bezodrazových komorách setkat [6, 15, 16, 17].

**Kombinovaná standardní nejistota** je určena vztahem

$$\mu_c(y) = \sqrt{\sum_i c_i^2 * \mu^2(x_i)}, \quad (1.1)$$

kde  $c_i$  je citlivostní koeficient a  $\mu(x_i)$  standardní nejistota jednotlivých příspěvků. Jednotlivé příspěvky mohou mít různé rozložení hustoty pravděpodobnosti, přičemž rozlišujeme 4 základní typy rozdělení pravděpodobnosti.

#### 1. Obdélníkové rozdělení

Využívá se všude, kde nejsou známy informace o rozložení hustoty pravděpodobnosti. Pravděpodobnosti výskytu je v celém rozsahu  $\pm a$  stejná. Typicky se jedná o nejistotu nastavení měřící vzdálenosti, specifikaci přijímače či korekci antény.

$$\mu(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (1.2)$$

## 2. Trojúhelníkové rozdělení

Využívá se v případě, že pravděpodobnost výskytu výrazných odchylek je velmi malá. Například vliv nedokonalosti měřícího pracoviště.

$$\mu(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (1.3)$$

## 3. U - rozdělení

V tomto případě je pravděpodobnost výskytu výrazných odchylek naopak výrazná. Typicky přizpůsobení antény či vliv teploty.

$$\mu(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (1.4)$$

## 4. Normální rozdělení

Normální neboli Gaussovo rozdělení patří mezi nejvýznamnější rozdělení pravděpodobnosti. Toto rozložení je typické pro většinu měření a jsou jím modelovány vesměs všechny náhodné děje. Při měření v bezodrazových komorách je gaussovým rozložením charakterizována například opakovatelnost měření či nejistota kalibrace antény, respektive AF.

$$\mu(x_i) = \frac{a}{\sigma}, \quad (1.5)$$

kde  $\sigma^2$  označuje rozptyl hodnot. Pokud není uvedeno jinak, užívá se standardně  $\sigma = \sqrt{3}$ .

**Rozšířená nejistota** se pak určí pomocí vztahu

$$U_{LAB} = U(y) = k * \mu_c(y), \quad (1.6)$$

pro rozšířenou nejistotu se vždy využívá normální rozdělení, přičemž koeficient rozšíření je typicky  $k = 2$ .

V další části kapitoly jsou podrobněji rozebrány jednotlivé dílčí nejistoty, které vstupují do měření. Jedná se o nejistoty  $U_{CISPR}$  definované normou CISPR 16-4-2 [6]. Reálné nejistoty konkrétní laboratoře  $U_{LAB}$  se od těchto hodnot mohou lišit. Neměly by je však výrazně překračovat.

### 1.4.2 Zdroje nejistot

#### 1. Anténní faktor

Odhad nejistoty anténního faktoru je proveden na základě kalibračního protokolu dodaného výrobcem. Kalibrace antény probíhá v přesně definovaných

podmínkách, které se zpravidla blíží volnému prostoru. Velikost anténního faktoru se mění v závislosti na výšce antény od země, vodivosti země, polarizaci či vzdálenosti od měřeného objektu. Všechny tyto skutečnosti se projeví na přizpůsobení antény a vnesou do měření předem nedefinovanou nejistotu. Nejistota AF je typicky pod 1 dB pro frekvence pod 80 MHz. S rostoucí frekvencí nejistota AF klesá a při frekvenci nad 300 MHz dosahuje hodnot pod 0,5 dB.

## 2. Korekce antény

Nejvýznamnější složkou nejistoty spojenou s užitím antény je její směrovost. V závislosti na měřicí vzdálenost a použitím měřícím postupem může změna směrovosti vnášet standardní nejistotu měření až 1,8 dB (vertikální polarizace, LPDA). Nezanedbatelný vliv na výslednou nejistotu má také pozice fázového středu (0,58 dB, pouze pro LPDA), příčná polarizace (0,52 dB, pouze LPDA) a symetrie (okolo 0,3 dB, pouze bikónická anténa).

## 3. Korekce přijímače

Kombinovaná standardní nejistota korekce přijímače je přibližně 1,35 dB a sestává z následujících dílčích částí: sinusové napětí, amplitudová odezva, odezva na opakující kmitočet pulsů a blízkost prahové úrovně šumu.

## 4. Nejistota přizpůsobení

Na výslednou nejistotu měření má výrazný vliv také impedanční přizpůsobení celého měřicího řetězce. Příspěvek k výsledné nejistotě vlivem nepřizpůsobení měřicí antény a přijímače můžeme označit jako  $\Delta U_r$ . Rovnice má pak tvar

$$\Delta U_r = 20 \log \left( 1 \pm \frac{PSV_A - 1}{PSV_A + 1} * \frac{PSV_P - 1}{PSV_P + 1} \right), \quad (1.7)$$

příčemž  $PSV_A$  a  $PSV_P$  označují příslušné poměry stojatých vln na výstupu antény a vstupu přijímače. Norma CISPR 16-1-4 [4] předepisuje maximální  $PSV_A = PSV_P = 2$ , což odpovídá maximální nejistotě přibližně +0,9 dB / -1,0 dB. Dosáhnout takového přizpůsobení není u běžných antén problém. Problém nastává až při kmitočtu okolo 100 MHz, kde je i u kvalitních antén tato hranice výrazně překročena. PSV zde může dosahovat hodnot až několika desítek. V tomto případě se doporučuje použití útlumového článku, který zlepšuje impedanční přizpůsobení.

## 5. Korekce měřicího stanoviště

Norma CISPR 16-4-2 [6] připouští maximální nejistotu nedokonalosti stanoviště  $\pm 4$  dB. Další složky jako například nepřesnost měřicí vzdálenosti či výšky stolu jsou téměř zanedbatelné. Za zmínku však stojí vliv materiálu otočného

stolu. Norma [4] též popisuje metodu pro posouzení vlivu materiálu otočného stolu až do kmitočtu 18 GHz. Nejistota vlivem materiálu otočného stolu se pohybuje v rozsahu 0,5 dB až 2 dB v závislosti na kmitočtu. Jako nejistotu nedokonalosti pracoviště lze využít odchylku naměřených hodnot NSA oproti hodnotám teoretickým. Tato odchylka nikdy nesmí překročit výše zmíněnou hranici 4 dB.

### 1.4.3 Srovnání

Jak již bylo naznačeno výše, nejistoty pro měření v různém prostředí (OATS, SAR, FAR) či vzdálenosti (3 m, 10 m) dosahují mírně odlišných hodnot. Tabulka 1.1 obsahuje srovnání rozšířených nejistot pro různé konfigurace pracoviště [6].

| Pracoviště | Kmitočet       | Rozšířená nejistota |
|------------|----------------|---------------------|
| OATS, SAR  | 30 MHz - 1 GHz | 6,3 dB              |
| FAR        | 30 MHz - 1 GHz | 5,3 dB              |
| FAR        | 1 GHz - 6 GHz  | 5,2 dB              |
| FAR        | 6 GHz - 18 GHz | 5,5 dB              |

Tab. 1.1: Srovnání nejistoty měření na různých pracovištích

Na závěr je nutné dodat, že se jedná o nejistoty stanovené normou, nikoliv o konkrétní nejistoty určitého pracoviště. V závislosti na kvalitě přístrojového vybavení, komory a zkušenostech pracovníků je možné dosáhnout nejistot výrazně nižších nebo naopak vyšších.

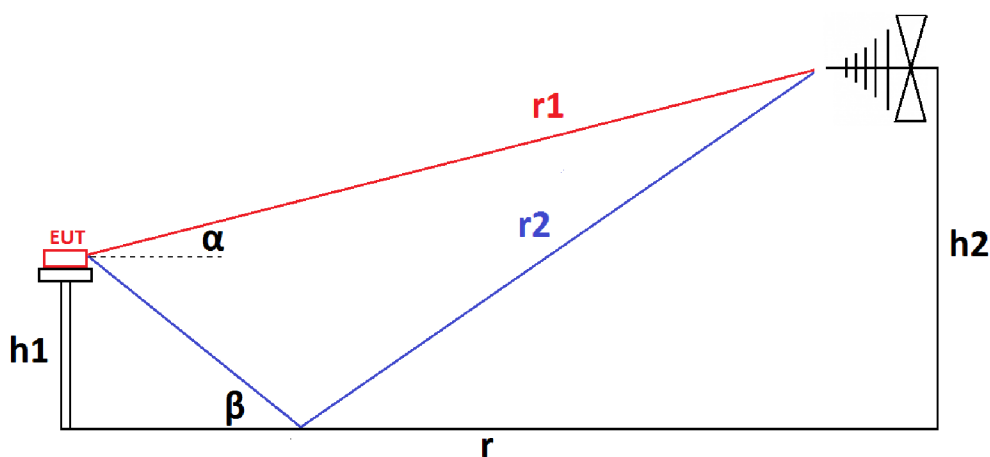
## 2 ANALÝZA MĚŘÍCIHO PRACOVISTĚ

V této kapitole je provedena důkladná analýza šíření signálu v komoře, která je nutná pro srovnání různých konfigurací měřících pracovišť.

První část se věnuje mechanismu šíření vln od zkoušeného objektu (EUT) k měřící anténě. Dále pak odvození výpočtu intenzity v konkrétních bodech měřícího pracoviště. Při výpočtu je uvažován vliv polarizace. Na závěr kapitoly je rozebrán teoretický model zkoušeného objektu, který je dále použit ve zbytku práce.

### 2.1 Šíření signálu v komoře

Při šíření signálu v částečně bezodrazové komoře (SAR) či na otevřeném prostranství (OATS) jsou brány v potaz pouze dva dominantní způsoby šíření elektromagnetické vlny. Jedná se o přímou vlnu a vlnu odraženou od zemnicí plochy. Výsledná intenzita je pak dána součtem obou vln. Na obrázku níže (Obr. 2.1) je znázorněn náčrt zmíněné situace. Při reálném měření v bezodrazové komoře dochází i navzdory velkému útlumu absorberů k odrazům od stěn. Tyto odrazy však mají útlum v řádu desítek decibelů, je tedy možné je v matematickém modelu zcela zanedbat. Vytvoření dostatečně věrného modelu, který by uvažoval i tyto odražené signály, by bylo v prostředí matlab extrémně časově náročné, přičemž vliv na výsledky by byl zanedbatelný. Pro měření v plně bezodrazové komoře je využít identický model. Odražená vlna je v tomto případě pochopitelně zanedbána a uvažuje se pouze vlna přímá.



Obr. 2.1: Šíření signálu v komoře

Aby bylo možné vypočítat hodnotu intenzity v každém bodě při změně výšky měřící antény, je nutné znát pro každý bod vzdálenost EUT od měřící antény a

to jak pro přímou vlnu (rovnice 2.1), tak pro vlnu odraženou od zemnicí plochy (rovnice 2.2),

$$r1 = \sqrt{(h2 - h1)^2 + r^2}, \quad (2.1)$$

$$r2 = \sqrt{(h2 + h1)^2 + r^2}, \quad (2.2)$$

kde  $h1$  je výška stolu na kterém je EUT umístěno,  $h2$  je nastavená výška měřící antény a  $r$  je měřící vzdálenost. Všechny tři zmíněné parametry jsou při konkrétním výpočtu známé.

Úhly pod kterými se obě vlny šíří nejsou pro první aproximaci důležité, jelikož je zde modelována pouze situace, kdy EUT i měřící anténa mají charakter izotropního zářiče, respektive přijímače. V další části práce jsou však využity. Úhel šíření přímé vlny  $\alpha$  (rovnice 2.3) a odražené vlny  $\beta$  (rovnice 2.4) jsou vypočteny následovně:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h2 - h1}{r1}\right), \quad (2.3)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{h2 + h1}{r2}\right), \quad (2.4)$$

příčemž všechny vstupní hodnoty jsou známé z výše uvedených vztahů, případně z nákresu daného pracoviště.

## 2.2 Výpočet intenzity

Směrem od EUT se obecně šíří kulová vlna. Zpravidla se pro zjednodušení uvažuje zdroj záření (EUT) jako izotropní zářič. V tomto případě se jedná o uniformní kulovou vlnu. Šíření této vlny ve známém prostředí (SAR, FAR, OATS) je možné poměrně jednoduše vypočítat.

Všechny vztahy však počítají s šířením vlny ve vzdálené zóně, kde jsou na sebe vektory elektrické a magnetické složky intenzity kolmé, příčemž jsou obě tyto složky kolmé též na směr šíření. V blízké zóně, která je definovaná pomocí následujícího vztahu (rovnice 2.5) nelze toto zjednodušení použít. Daná rovnice udává minimální vzdálenost při které lze uplatnit níže uvedené vztahy bez toho, aby byla do výpočtu vnesena výrazná chyba

$$R > \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (2.5)$$

kde  $D$  je největší rozměr EUT či měřící antény a  $\lambda$  je vlnová délka. Nutno podotknout, že ve všech případech nelze zajistit měření ve vzdálené zóně. Jedná



se především o menší měřicí vzdálenost (3 m) a nižší kmitočet (řádově pod 100 MHz).

V tomto případě nelze přesně určit jak výrazný je vliv blízké vzdálenosti na přesnost výpočtu.

Intenzita pole přímé a odražené vlny ve vzdálenosti  $r$  je určena následujícím vztahem (rovnice 2.6)

$$E_{1,2} = \frac{\sqrt{30 * P_{\Sigma} * D(\varphi, \varrho)}}{r_{1,2}}, \quad (2.6)$$

kde  $P_{\Sigma}$  je vyzářený výkon a  $D(\varphi, \varrho)$  je činitel směrovosti EUT. Pokud není uvedeno jinak, pak činitel směrovosti odpovídá izotropnímu zářiči ( $D = 1$ ). V daném vztahu též figuruje poměr permeability ku permitivitě. Vzhledem k tomu, že jsou obě konstanty v daném prostředí rovny jedné, není nutné je ve vztahu uvádět.

Jak již bylo zmíněno dříve, výsledná intenzita je rovna součtu intenzity přímé a odražené vlny. V závislosti na kmitočtu a dráze přímé a odražené vlny, dochází k součtu těchto vln s různou fází. Z toho důvodu je nutné si nejdříve definovat vlnové číslo  $k$ :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2.7)$$

které udává o kolik radiánů se změní fáze za jeden metr.

Celková intenzita  $E$  je pak dáva vztahem

$$E = \left| E1 + \rho * E2 * e^{ik\Delta r} \right|, \quad (2.8)$$

kde  $\rho$  odpovídá činiteli odrazu od zemnicí plochy,  $i$  značí imaginární číslo a  $\Delta r$  je rozdíl drah přímé a odražené vlny.

Dle rozboru v následující kapitole (Obr. 2.5) je absolutní hodnota činitele odrazu pro vertikální i horizontální polarizaci rovna jedné. U horizontální polarizace však dochází ke změně fáze o  $180^\circ$ , takže se přímá a odražená vlna sčítají v protifázi.

Pro intenzitu pole při vertikální a horizontální polarizaci je tedy možno psát:

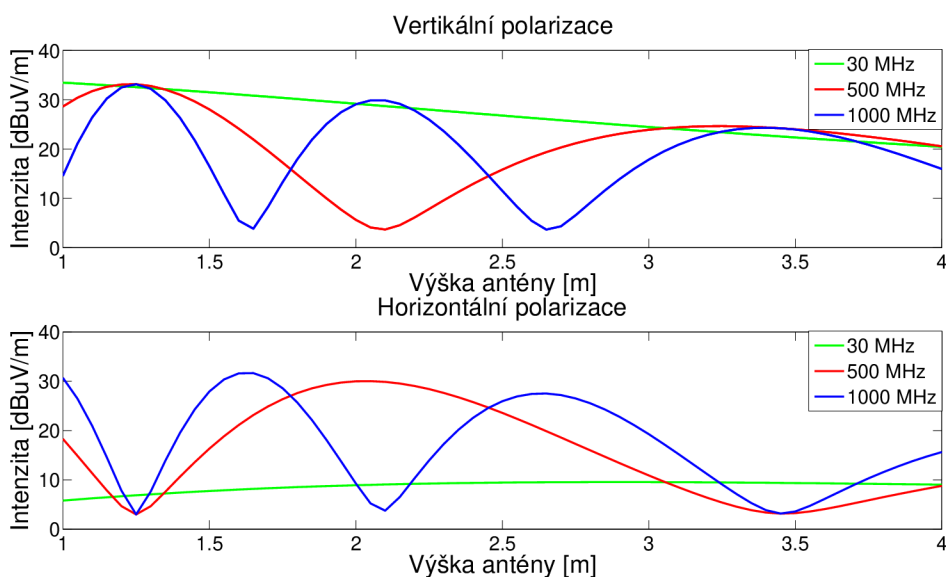
$$E_V = \left| E1 + E2 * e^{ik\Delta r} \right|, \quad (2.9)$$

$$E_H = \left| E1 - E2 * e^{ik\Delta r} \right|. \quad (2.10)$$

Na obrázku 2.2) lze pozorovat změnu velikosti intenzity v závislosti na nastavení výšky měřicí antény. Uvedený obrázek je platný pro měřicí vzdálenosti 3 m. Intenzita

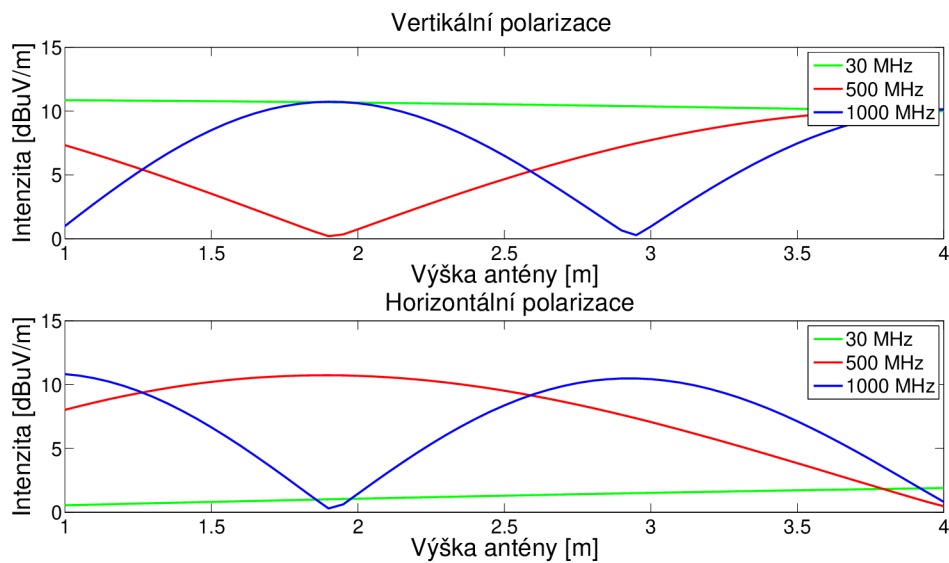
je vykreslena v absolutní jednotce, aby byl průběh názornější. Při použití decibelové stupnice (která je obvyklejší) by dané zobrazení ztrácelo svou vypovídající hodnotu.

Na obrázku lze pozorovat především tři jevy. Prvním je střídání maxima a minima výsledné intenzity pole v závislosti na tom, zda se přímá a odražená vlna sečtou ve fázi či v protifázi. Dále pak rychlost střídání maxim a minim intenzity v závislosti na kmitočtu. A v neposlední řadě také pokles maxima intenzity se vzrůstající výškou měřicí antény. To je způsobeno výrazně delší dráhou přímé a odražené vlny. Průběhy vertikální a horizontální polarizace jsou posunuty o  $180^\circ$ , což je patrné již z výše uvedených vztahů.



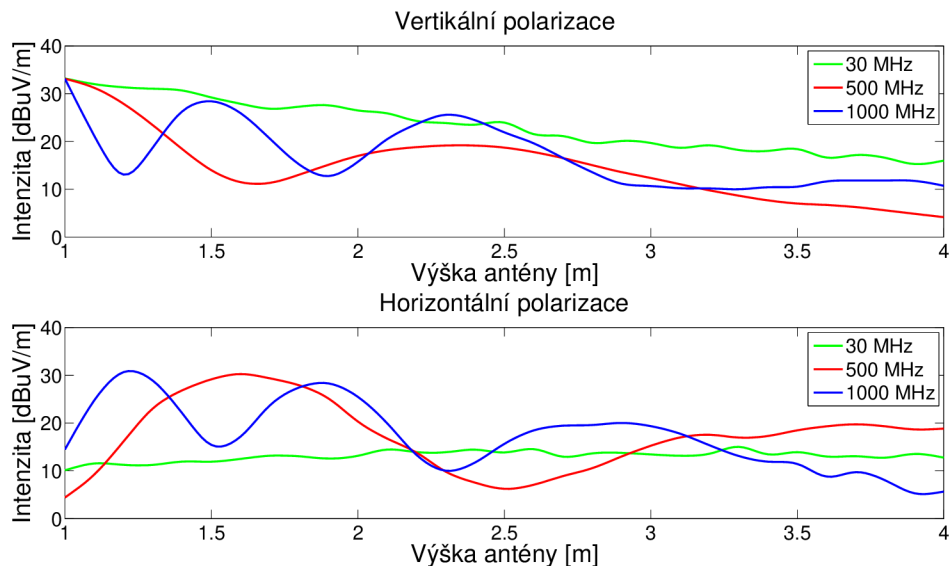
Obr. 2.2: Šíření signálu v komoře ( $r = 3$  m)

Při měřicí vzdálenosti 10 metrů je výsledná intenzita samozřejmě menší (přibližně o 10 dB). Taktéž si lze povšimnout méně častého střídání maxim a minim výsledné intenzity pole. Maximální intenzita není tak výrazně ovlivněna nastavenou výškou měřicí antény jako v případě měřicí vzdálenosti 3 m.



Obr. 2.3: Šíření signálu v komoře ( $r = 10$  m)

Výše uvedený teoreticky odvozený předpoklad byl v průběhu měření ověřen (Obr. 2.4). Střídání maxim a minim probíhá dle teoretického modelu, avšak v tomto konkrétním případě by pro přesné srovnání bylo nutné zavést na ose x offset přibližně 0,4 metru. Taktéž je z grafu patrný výraznější pokles intenzity s rostoucí výškou antény. Mechanismus šíření lze považovat za potvrzený.



Obr. 2.4: Naměřený průběh signálu v komoře ( $r = 3$  m)

## 2.3 Vliv polarizace

Vliv polarizace antény je při výpočtech nutné řešit především s ohledem na zemní plochu. Za pomoci níže uvedených vztahů (rovnice 2.11, 2.12 a 2.13) z [8], které jsou graficky znázorněny na obrázku 2.5, je patrný vliv polarizace na odraz od zemní plochy.

První rovnice popisuje odraz pro vertikální polarizaci

$$R_V = \frac{\varepsilon_{kr} * \sin(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2(\varphi)}}{\varepsilon_{kr} * \sin(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2(\varphi)}}, \quad (2.11)$$

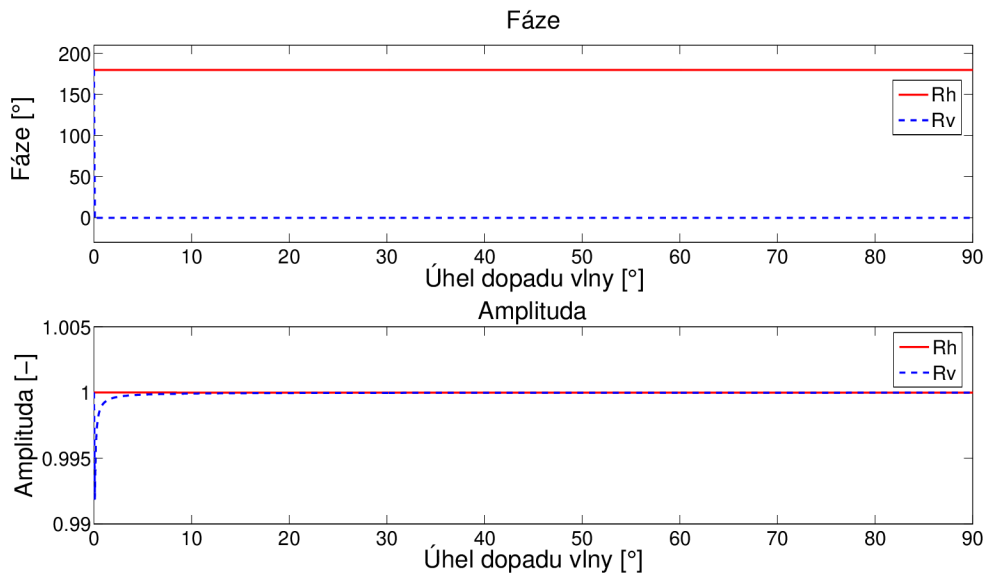
kde  $R_V$  je činitel odrazu pro vertikální polarizaci,  $\varepsilon_{kr}$  je komplexní permitivita a  $\varphi$  je úhel dopadnu vlny na zemní plochu. U horizontální polarizace je situace podobná

$$R_H = \frac{\sin(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2(\varphi)}}{\sin(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2(\varphi)}}, \quad (2.12)$$

kde  $R_H$  je činitel odrazu pro horizontální polarizaci. Na závěr je též nutné zmínit vztah pro výpočet komplexní permitivity

$$\varepsilon_{kr} = \varepsilon_r - i * 60 * \lambda * \sigma, \quad (2.13)$$

kde  $\sigma$  je měrná elektrická vodivost,  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita a  $\lambda$  je délka vlny.



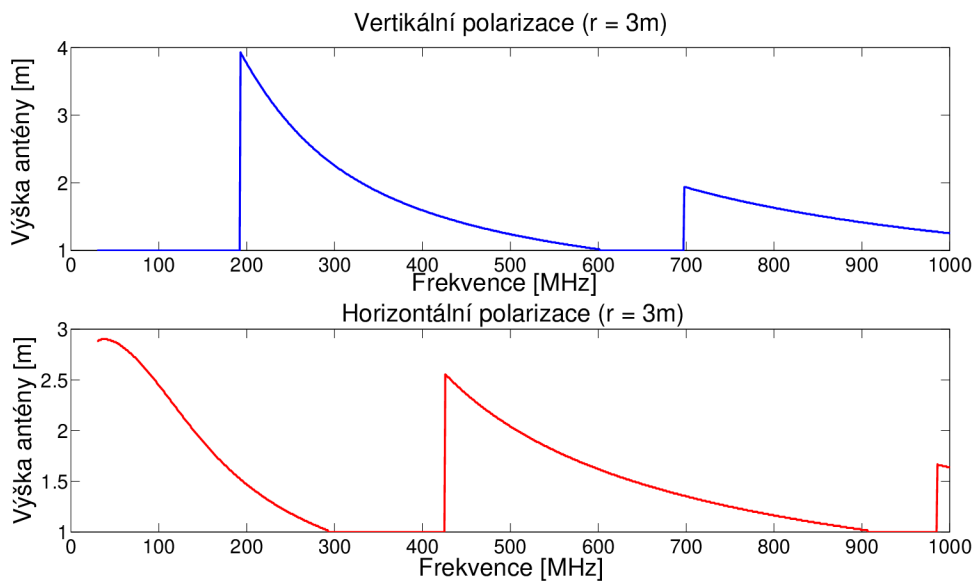
Obr. 2.5: Odraz od zemní plochy

Z grafu je patrné, že amplituda při odrazu zůstane stejná u obou polarizací. U vertikální polarizace dojde k velmi mírnému poklesu pro nízké úhly dopadu vlny, tento případ však v praxi nenastane. Mnohem důležitějším parametrem je fáze. U vertikální polarizace se fáze nemění. Naopak u horizontální polarizace dojde k otočení fáze. Při výpočtech intenzity lze tedy uvažovat  $R_V = 1$  a  $R_H = -1$ .

## 2.4 Výška měřících antény

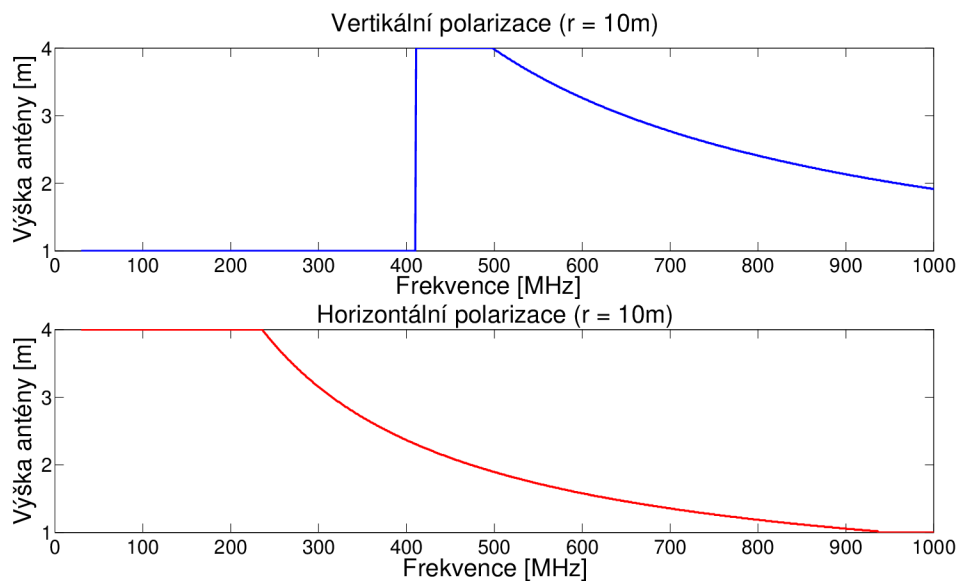
Pomocí výpočtu maxim intenzity z předchozí kapitoly lze vypočítat ideální výšku měřící antény (Obr. 2.6 a 2.7). V této výšce by měla být vždy naměřena maximální intenzita. Při vyšších kmitočtech se ideální měřící výška přesouvá níže.

Pomocí této křivky by bylo možné měřit pouze jednu (maximální) hodnotu pro každý kmitočet. Tato teorie však naráží na problém s praktickou realizací. Změna výšky měřící antény je výrazně časově náročnější než proměření EUT v celém kmitočtovém pásmu. Je tedy výhodnější v několika definovaných krocích provést měření v celém kmitočtovém pásmu. Níže uvedené průběhy však mohou být nápomocny k určení těchto měřích bodů a obecně k pochopení vlastností měřící soustavy.



Obr. 2.6: Ideální výška měřící antény ( $r = 3$  m)

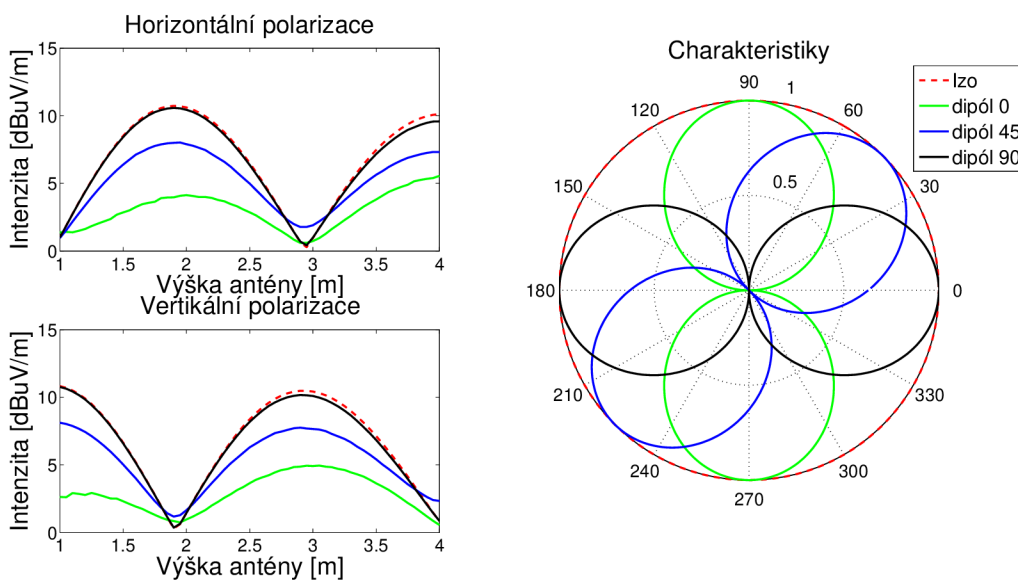
Při výpočtu není uvažován pokles intenzity a vliv směrové charakteristiky EUT ve vyšších polohách antény. Při uvažování těchto vlivů by došlo ke snížení průměrné ideální výšky antény.



Obr. 2.7: Ideální výška měřící antény ( $r = 10\text{ m}$ )

## 2.5 Model zkoušeného objektu

Ve všech výše zmíněných situacích byl jako model EUT použit izotropní zářič. Reálné vyzařovací charakteristiky však mohou být různé. Obecně se předpokládá, že se vyzařovací charakteristiky EUT blíží izotropnímu zářiči, případně běžnému dipólu.



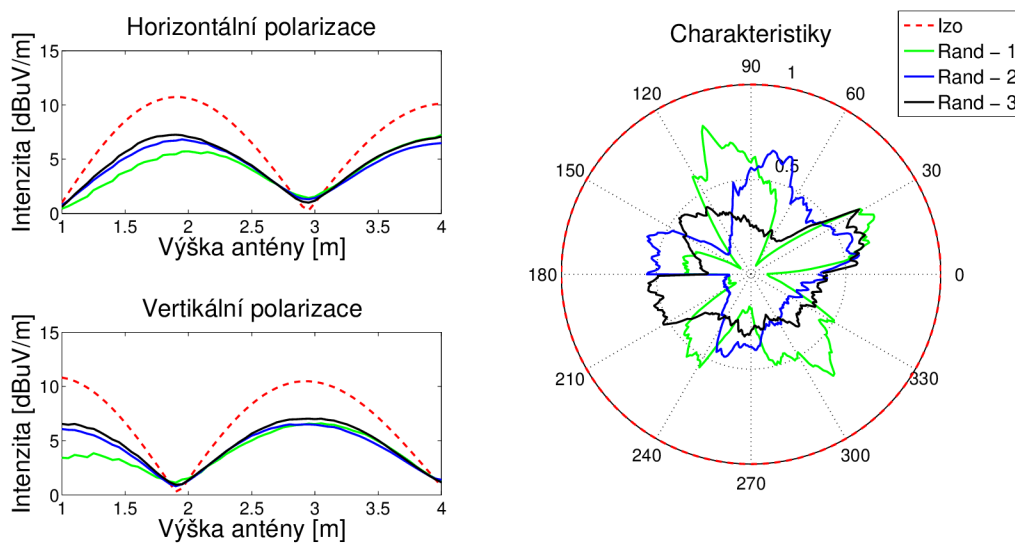
Obr. 2.8: Průběhy pro vyzařovací charakteristiky dipólu s definovaným náklonem

Na obrázku 2.8 je znázorněn vliv použití směrové charakteristiky dipólu s různým úhlem natočení na intenzitě. V simulaci je použit půlvlnný dipól.

Jak je z grafu patrné, závislost intenzity na výšce antény je stejná jako pro izotropní zářič. Liší se pouze velikost amplitudy. V případě, že dipól září přímo směrem k měřicí anténě (úhel  $90^\circ$ ) jsou směrové charakteristiky téměř identické jako u izotropního zářiče. Změnou úhlu směrem k  $0^\circ$  či  $180^\circ$  dochází k výraznému poklesu amplitudy. Tento pokles je nejvýraznější právě při vertikálním natočení dipólu ( $0^\circ$  a  $180^\circ$ ).

Další možností jak modelovat vyzařovací charakteristiku EUT je využití náhodného modelu. Kombinací několika náhodných průběhů vygenerovaných v matlabu pomocí funkce rand bylo dosaženo poměrně reálných směrových charakteristik. Jednotlivé mezivýsledky byly vždy filtrovány pomocí exponenciální kumulace.

Z grafu je patrné, že je opět dodržena stejná závislost intenzity na výšce měřicí antény. Ačkoliv jsou vykreslené průběhy výrazně odlišné, výsledná intenzita všech tří modelů je dosti podobná.



Obr. 2.9: Průběhy pro náhodné vyzařovací charakteristiky EUT

Z výše uvedeného vyplývá, že použití zjednodušeného modelu EUT (izotropního zářiče) dostatečně věrně postihuje i reálná EUT. Rozdíl se projevuje pouze ve velikosti amplitudy. Charakteristické znaky pro různá pracoviště či vzdálenosti však zůstanou zachovány.

## 3 ROZBOR PARAMETRŮ MĚŘENÍ

Některé aspekty měření jsou pevně dané a nelze je nijak ovlivnit. Mezi ně se řadí například měřicí vzdálenost, rozsah výškového skenu, výška stolu, apod. Dále je zde mnoho aspektů, které lze nějakým způsobem ovlivnit. Tyto vlivy mohou mít výrazný efekt na výsledky měření.

Tato kapitola se zabývá rozбором vybraných vlivů na výsledky měření. Mezi tyto vlivy se řadí možnost natočení (náklonu) antény, nastavení kroku při výškovém skenu měřicí antény a v neposlední řadě vliv materiálu stolu.

### 3.1 Natočení antény

Doposud byla měřicí anténa vždy vnímána jako izotropní zářič. Nezáleželo tedy na reálné směrové charakteristice. Reálná anténa však má určitou směrovost a při nastavování výšky dochází ke změně úhlu pod kterým dopadá přímá a odražená vlna. V tabulce 3.1 jsou uvedeny minimální a maximální úhly dopadu přímé a odražené vlny pro obě měřicí vzdálenosti.

| Měřicí vzdálenost | 3 [m]        | 10 [m]        |
|-------------------|--------------|---------------|
| Přímá vlna        | 3,8° - 46,9° | 1,1° - 17,7°  |
| Odražená vlna     | 31° - 58°    | 10,2° - 25,6° |

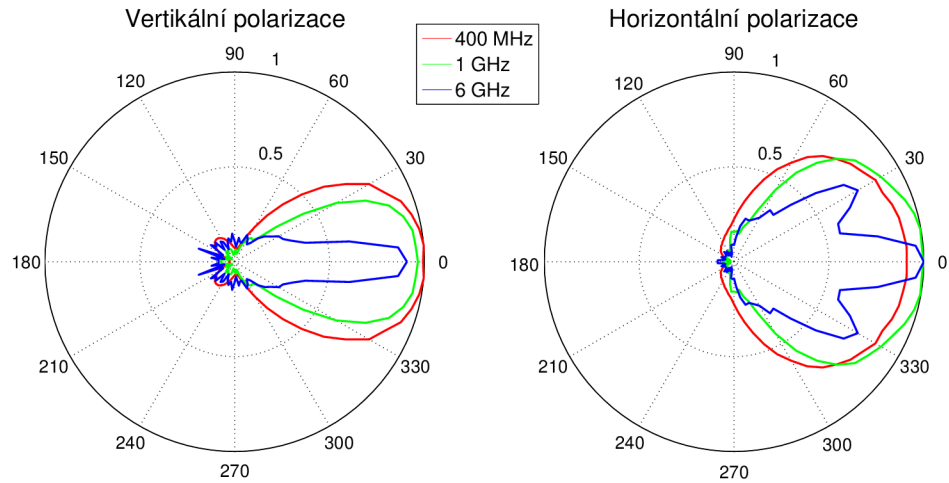
Tab. 3.1: Rozsah úhlů přímé a odražené vlny pro obě měřicí vzdálenosti

Z tabulky je patrné, že největší vliv na měření bude mít směrová charakteristika při měřicí vzdálenosti 3 metry. Maximální úhly zde dosahují hodnot přibližně 47° pro přímou vlnu a 58° pro vlnu odraženou. Je však nutné si uvědomit, že tyto úhly odpovídají měřicí výšce 4 metry. Při srovnání s průběhem ideální měřicí výšky (Obr. 2.6 a 2.7) či tabulky doporučených měřících výšek [dle 3] je zřejmé, že se v běžné praxi takových úhlů nedosahuje.

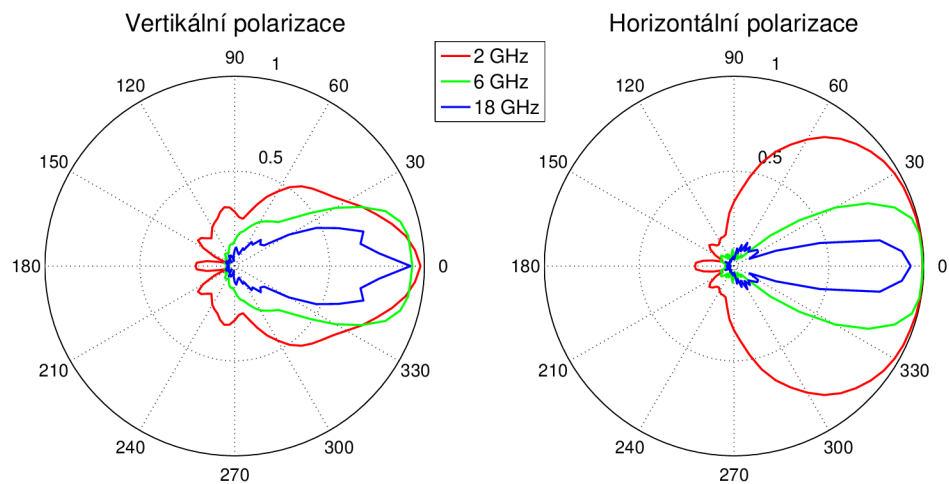
Na obrázku 3.1 je vykreslena směrová charakteristika antény BiLog 3147 od firmy ETS Lindgren. Zdrojová data byla získána z webu společnosti [12] ve formátu *.pat* a zpracována pomocí programu EMQuest Viewer. Směrové charakteristiky jsou vykresleny pro 3 kmitočty (400 MHz, 1 GHz a 6 GHz), což odpovídá celému kmitočtovému rozsahu antény. S rostoucím kmitočtem má anténa užší hlavní lalok. U horizontální polarizace na kmitočtu 6 GHz dokonce dochází k tvorbě dvou postranních laloků



Pro ukázkou je níže vykreslena ještě trychtýřová anténa 3117 (Obr. 3.2). Tato anténa se běžně využívá pro pokrytí kmitočtového pásma 1 GHz až 18 GHz.



Obr. 3.1: Normované směrové charakteristiky BiLog antény 3147 [12]



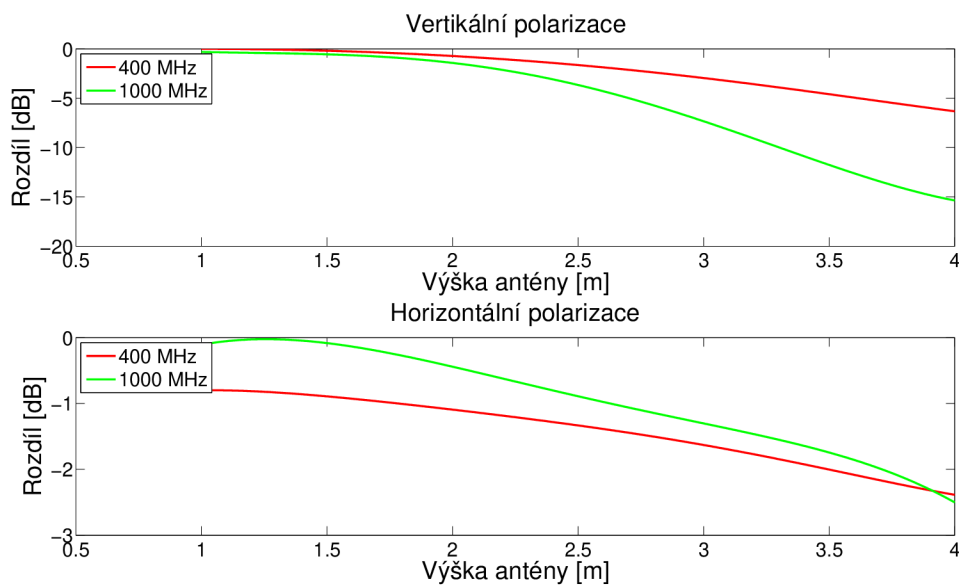
Obr. 3.2: Normované směrové charakteristiky trychtýřové antény 3117 [12]

V závislosti na výšce měřící antény lze vykreslit odchylku způsobenou vlivem reálné směrové charakteristiky (Obr. 3.3). Pokles u horizontální polarizace není příliš

výrazný. Vertikální polarizace však vykazuje především pro vyšší kmitočty (1 GHz) velmi výraznou chybu dosahující až -15 dB.

Při reálném měření nemá směrová charakteristika tak extrémní dopad, jelikož nejvýraznější pokles je ve výšce 4 metry, kde naměřené hodnoty vykazují poměrně výrazný pokles vlivem prodloužení vzdálenosti, kterou musí přímá i odražená vlna urazit.

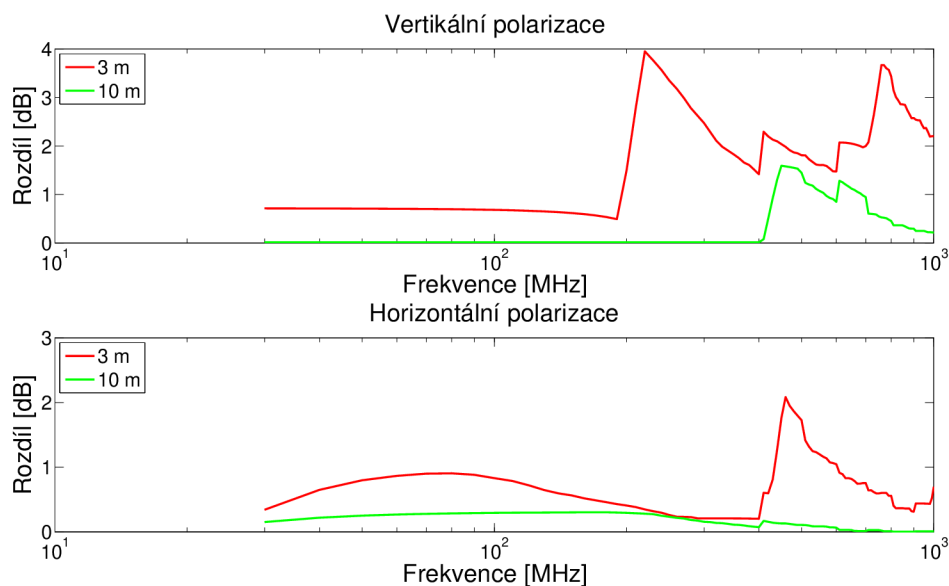
Simulovaný průběh (Obr. 3.3) odpovídá měřicí vzdálenosti 3 metry. V případě prodloužení měřicí vzdálenosti na 10 metrů je vliv směrových charakteristik antény minimální. U horizontální polarizace se neprojeví prakticky vůbec a vertikální polarizace vykazuje pouze drobnou chybu, kterou lze zanedbat.



Obr. 3.3: Pokles intenzity v závislosti na výšce antény ( $r = 3$  m)

Obrázek 3.4 zobrazuje vliv směrové charakteristiky na přích celým kmitočtovým rozsahem. K dispozici jsou průběhy pro obě polarizace a měřicí vzdálenosti.

Měřicí vzdálenost 10 metrů nevykazuje žádné výrazné odchylky. Oproti tomu třímetrová měřicí vzdálenost je směrovou charakteristikou ovlivněna poměrně výrazně, především pak při vyšších kmitočtech. Jak lze usuzovat již z předchozího obrázku (Obr. 3.3), vertikální polarizace vykazuje výraznější chybu (4 dB) oproti polarizaci horizontální (2 dB). V daném případě již má smysl zvažovat kroky vedoucí k odstranění tohoto negativního vlivu na výsledky měření.



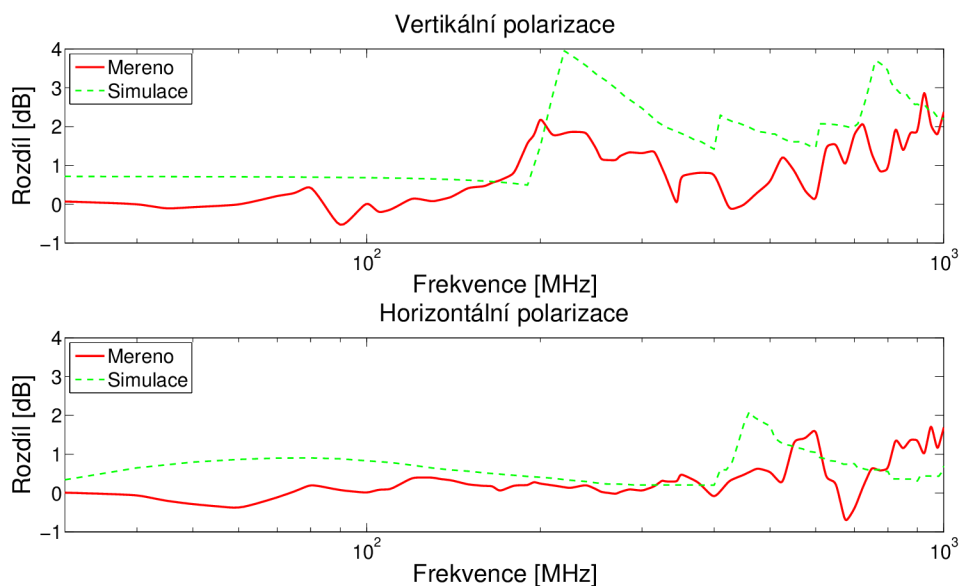
Obr. 3.4: Pokles intenzity v závislosti na frekvenci ( $r = 3$  m)

K eliminaci vlivu směrové charakteristiky lze využít dva přístupy. Prvním je natočení antény směrem k EUT, takže anténa vždy přijímá maximální možnou intenzitu. Tímto je negativní vliv směrové charakteristiky naprosto elimitovan. Daný přístup je typický spíše pro americké normy, v Evropě se příliš neprojektuje. Měřící stanoviště musí být vybaveno vhodným aparátům pro natáčení antény, což může být technicky poměrně náročné a finančně nákladné. Další potenciální nevýhodou je posuv fázového středu antény.

Přímá a odražená vlna dopadají na anténu pod jinými úhly, což může způsobit dodatečné nepřesnosti. Proto je vhodné natočit anténu směrem mezi přímou a odraženou vlnu. Jelikož je vyzařovací charakteristika symetrická, tak se rozdíl úhlů mezi přímou a odraženou vlnou neuplatní. Pro dosažení co nejlepšího výsledku lze tento přístup rozhodně doporučit.

Další možností jak omezit vliv směrové charakteristiky je využití softwarové korekce. Měřící anténa je zpravidla zkalibrovaná a její vyzařovací charakteristiky jsou známé. Pomocí vhodně nastavené korekční křivky (Obr. 3.4) lze tedy vliv antény korigovat a to bez nutnosti fyzicky natáčet anténu. Bohužel tímto způsobem nelze zmírnit rozdíl naměřené intenzity plynoucí z rozdílu úhlů dopadu přímé a odražené vlny.

Praktické srovnání naměřených výsledků s náklonem a bez náklonu antény je zobrazeno na obrázku 3.5. V horizontální polarizaci měření poměrně přesně odpovídá simulovanému průběhu. Při vertikální polarizaci má měření obdobný průběh jako simulace, avšak odchylka dosahuje menších hodnot.



Obr. 3.5: Srovnání měření s náklonem a bez náklonu antény

Vlivem směrovosti antény dochází k nárůstu výsledné nejistoty měření. Tabulka 3.2 přehledně zobrazuje nejistoty vlivem směrovosti antény pro jednotlivá pracoviště a kmitočtové rozsahy. Z tabulky je patrné, že směrovost má výraznější efekt až od kmitočtu 200 MHz, především pak pro vertikální polarizaci.

|                                | SAR (H)<br>[dB] | SAR (V)<br>[dB] | FAR<br>[dB] |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 30 MHz - 200 MHz (bez náklonu) | 0               | 1               | -           |
| 30 MHz - 200 MHz (s náklonem)  | 0               | 0,5             | 0,5         |
| 200 MHz - 1 GHz (bez náklonu)  | 1               | 3,2             | -           |
| 200 MHz - 1 GHz (s náklonem)   | 0,5             | 0,75            | 1           |

Tab. 3.2: Nejistoty vlivem směrovosti antény dle [6]

Při porovnání výsledků měření s náklonem a bez náklonu lze předpokládat, že se rozdíl mezi naměřenými hodnotami bude pohybovat v rámci odhadované nejistoty. Taktéž lze předpokládat, že v případě měření s náklonem bude dosaženo vyšší naměřené hodnoty. Tyto skutečnosti byly potvrzeny praktickým měřením (Obr. 3.5).

## 3.2 Výškový krok měřicí antény

Tato kapitola se zabývá nastavením optimálního kroku měřicí antény. S velikostí kroku přímo souvisí časová náročnost měření, je tedy vhodné měřit s maximálním výškovým krokem, aby bylo dosaženo optimálního měřicího času. S rostoucím krokem však vzrůstá chyba měření, jelikož může dojít k vynechání některého maxima. Otázkou tedy zůstává - jaký je maximální možný výškový krok při zachování minimálního vlivu na výsledky měření?

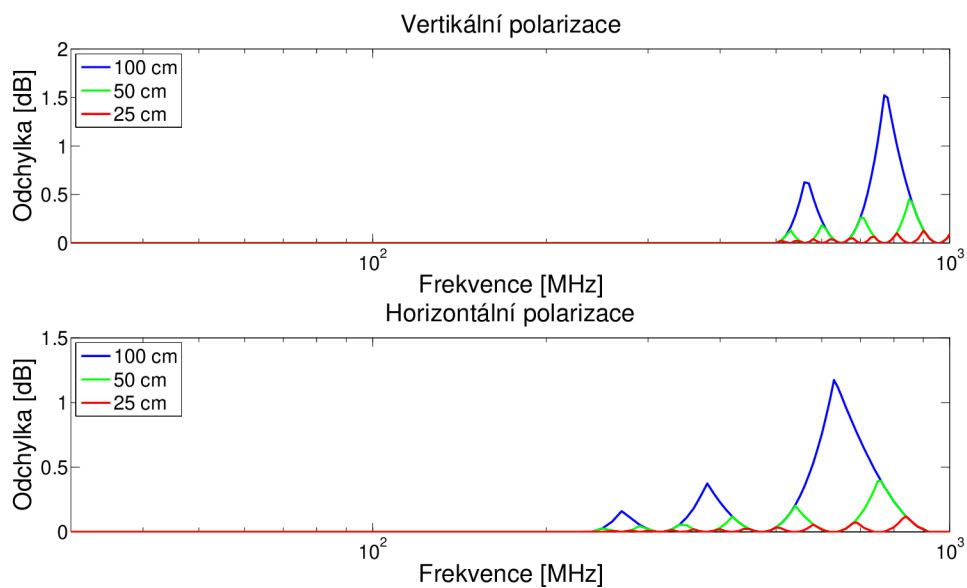
V předchozích kapitolách bylo naznačeno, že v závislosti na kmitočtu není problémem určit maximum intenzity. Bylo by tedy možné měřit pouze v jednom bodě na každém kmitočtu. Výška měřicí antény pro tento případ je uvedena na Obr. 2.6 a Obr. 2.7. V praxi je tento přístup nepoužitelný, jelikož změna výšky antény je časově výrazně náročnější než změna kmitočtu. Je tedy vhodné zvolit více kroků a v těchto bodech proměřit celý kmitočtový rozsah.

Z obdobné analýzy také vychází doporučení pro výšku měřicí antény u předcertifikačního měření. Norma ČSN 55016-2-3 [3] definuje vždy 2 až 3 výškové body pro měření v konkrétním kmitočtovém pásmu s definovanou polarizací a měřicí vzdáleností. Daná norma taktéž říká, že při dodržení těchto podmínek nedojde k chybě měření větší než 3 dB.

Vzhledem k rychlosti dnešních přijímačů nehraje rozsah měřených kmitočtů výraznou roli. V daném případě lze body z předcertifikačního měření jednoduše nahradit měřeními od 1 metru do 2,5 metru s krokem 50 cm.

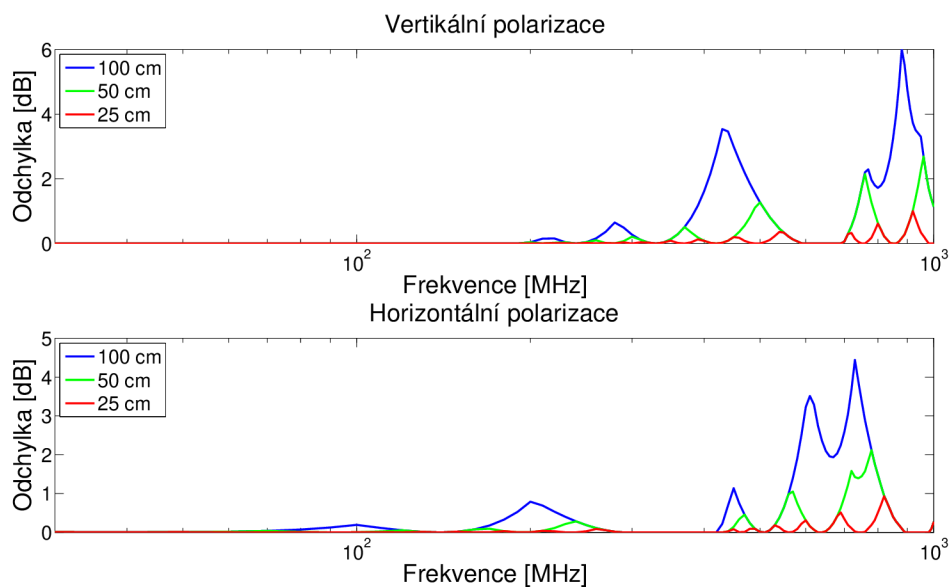
Na obrázcích 3.6 a 3.7 jsou pro vertikální a horizontální polarizaci vyneseny závislosti odchylky měření na nastaveném kroku. Jako reference je použita simulace s velmi malým krokem (5 cm).

Z obou obrázků je patrné, že velikost výškového kroku je u kratší měřicí vzdálenosti daleko výraznější. Pro desetimetrovou vzdálenost (Obr. 3.6) dosahuje chyba při kroku 1 metr odchylky přibližně 1,5 dB. Při volbě kroku 50 cm a méně je již odchylka pod hranicí 0,5 dB. Optimálním krokem s ohledem na rychlost a přesnost je tedy v tomto případě 50 cm.



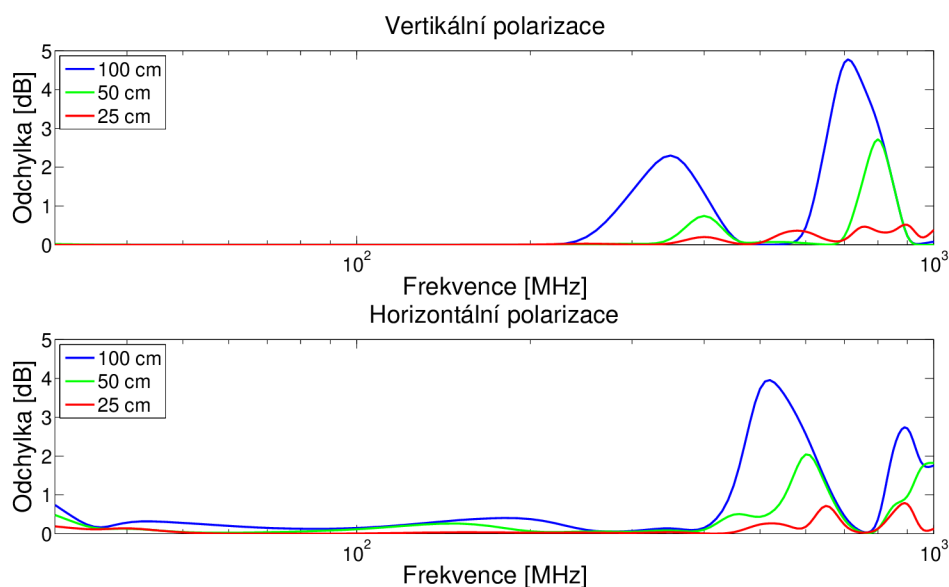
Obr. 3.6: Závislost chyby na měřícím kroku ( $r = 10 \text{ m}$ )

Oproti tomu ve třímetrové měřící vzdálenosti je odchylka s krokem 1 metr okolo 4 dB pro horizontální polarizaci a téměř 6 dB pro polarizaci vertikální. Snížením kroku na 50 cm se odchylka zmenší na hodnotu okolo 2 dB, což stále není zanedbatelné. Pro dosažení odchylky pod 1 dB je nutné volit krok menší než 25 cm.



Obr. 3.7: Závislost chyby na měřícím kroku ( $r = 3 \text{ m}$ )

Praktická měření ve třímetrové měřicí vzdálenosti prokázala platnost matematického modelu prezentovaného výše. Reference zde byla získána obdobně jako v předchozím případě a to měřením s krokem 5 cm. Jako EUT byly použity referenční signálové zdroje. Výsledek (Obr. 3.8) udává průměrnou odchylku po změření referenčního EUT ve třech polohách.



Obr. 3.8: Naměřená závislost chyby na měřícím kroku ( $r = 3$  m)

### 3.3 Materiál stolu

Výrazný vliv na výsledky měření v bezodrazové komoře má materiál použitého stolu. Z historického hlediska je nejběžněji používaným materiálem dřevo, které se vyznačuje vysokou pevností a poměrně malou permitivitou. Vliv na výsledky měření by tedy měl být poměrně malý.

V poslední době se však stále více využívá alternativních materiálů, především pak polystyrenu, s cílem snížit vliv stolu na výsledky měření. Z pohledu elektrických vlastností se dá očekávat, že polystyrenový stůl bude oproti stolu dřevěnému výrazně méně ovlivňovat měření. Jeho nevýhodou je však nízká pevnost a mechanická odolnost obecně. Není tedy vhodný pro testování větších EUT.

Následující podkapitoly se zabývají rozborem vlivu dřevěného a polystyrenového stolu na výsledky měření. Srovnání bylo provedeno jak při měření vyzařování, tak i v případě odolnosti.

### 3.3.1 Elektromagnetická interference

Norma CISPR 16-4-2 [6], popisující zdroje nejistot měření, přisuzuje vlivu materiálu stolu nejistoty v rozsahu 0 dB až 2 dB s nulovou střední hodnotou a obdélníkovým rozložením pravděpodobnosti. Velikost nejistoty roste spolu s kmitočtem. Velikost zmíněných nejistot je přehledně uvedena v tabulce 3.3.

| Kmitočtový rozsah | Nejistota [dB] |
|-------------------|----------------|
| 0 MHz - 200 MHz   | 0              |
| 200 MHz - 1 GHz   | 0,5            |
| 1 GHz - 6 GHz     | 1,5            |
| 6 GHz - 18 GHz    | 2              |

Tab. 3.3: Odhad nejistoty vlivem materiálu stolu dle [6]

Vliv nejistoty se z daných údajů nezdá příliš velký. Avšak jiné zdroje [16] uvádějí, že při kmitočtech nad 500 MHz může nejistota měření dosahovat hodnot až 6 dB.

Pro srovnávací měření byly použity speciální signálové zdroje (viz tabulku v příloze A.1). Kmitočtový rozsah od 30 MHz do 1 GHz pokryl signálový zdroj CGO 505, který v daném rozsahu plošně vysílal impulsy s krokem 5 MHz. Od kmitočtu 1 GHz byl tento zdroj nahrazen zdrojem CGO 51000, který v rozsahu 1 GHz až 18 GHz vysílal impulsy s krokem 1 GHz.

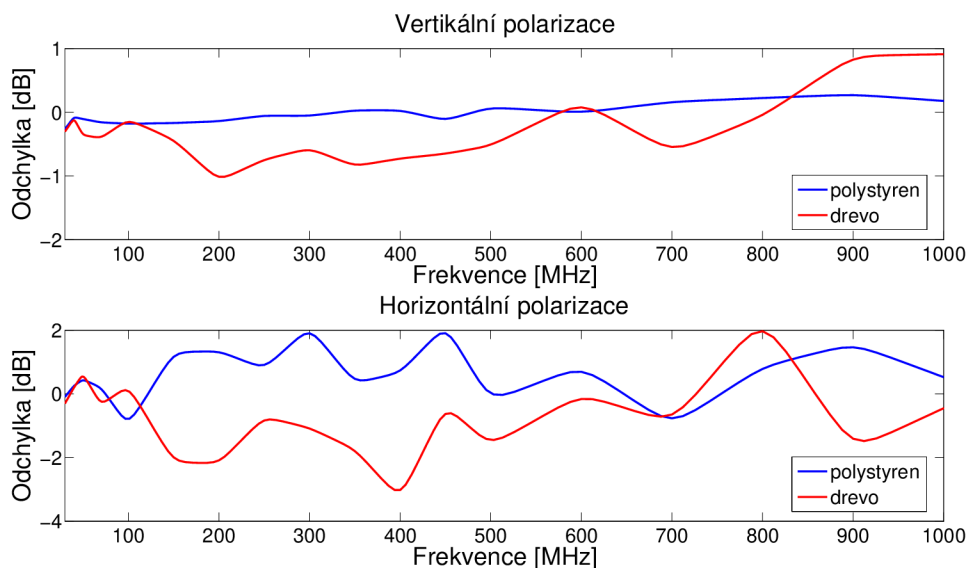
V kmitočtovém rozsahu do 1 GHz byl použit standardní měřicí postup v částečně bezodrazové komoře. S přijímací anténou byl proveden sken v rozsahu od 1 metru do 4 metrů. Na podlaze nebyly přítomny absorbery. Referenční měření bylo provedeno na polystyrenovém stojanu tvořeném kvádrem s průřezem 20x10 cm a základnou 25x25 cm. Výška odpovídala standardu, tzn. 80 cm. Po odměření referenční hodnoty byl použit polystyrenový stůl a následně stůl dřevěný. Měření proběhlo ve třech polohách. Každé z výše uvedených měření bylo 3x opakováno. Výsledné hodnoty jsou tvořeny průměrem z jednotlivých poloh.

Jako alternativní reference byl použit dielektrický stojan, který běžně slouží k uchycení sondy pro měření pole. Pro přehlednost zde výsledky tohoto měření nejsou uvedeny, ačkoliv jsou tyto data použita pro srovnání výsledků.

V případě vertikální polarizace měl polystyrenový stůl zanedbatelný vliv na výsledky měření (viz Obr. 3.9). Odchyłka je v rámci nejistoty daného měření zanedbatelná. V případě dřevěného stolu je již znatelná drobnější změna s maximální



odchylkou 1 dB a střední hodnotou přibližně -0.3 dB.



Obr. 3.9: Vliv stolu - interference (30 MHz - 1 GHz)

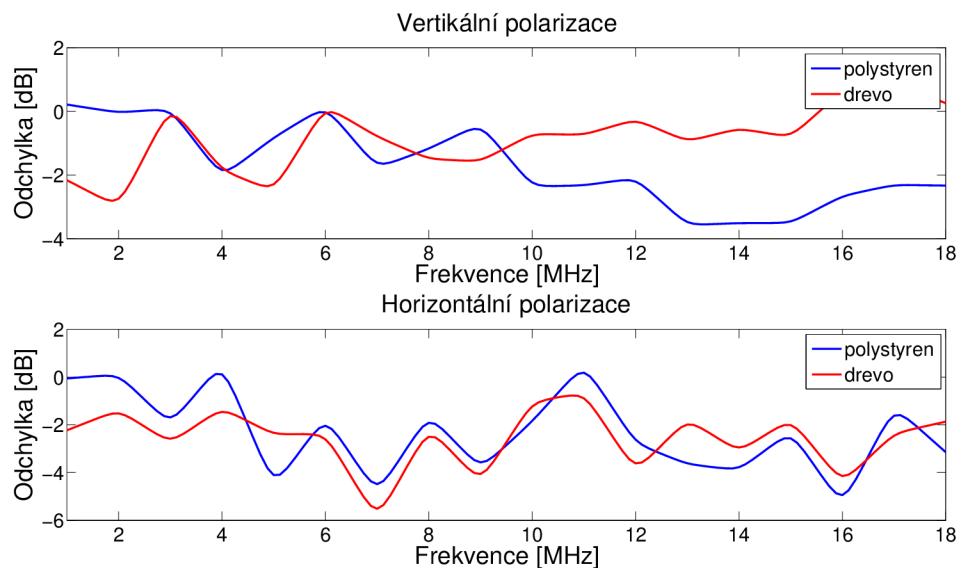
Horizontální polarizace v daném kmitočtovém pásmu však vykazuje výraznější fluktuaci. Odchylka u polystyrenového stolu zde dosahuje až +2 dB. Obdobný průběh vykazovalo i měření se signálovým generátorem umístěným na dielektrickém stojanu. Ve výsledku je s největší pravděpodobností vliv polystyrenového stolu i v tomto případě okolo  $\pm 1$  dB. Dřevěný stůl vykazuje výraznější odchylku a to v rozsahu  $\pm 3$  dB se střední hodnotou okolo -0,75 dB.

Měření v kmitočtovém rozsahu 1 GHz - 18 GHz bylo realizováno s přídatnými absorbermi mezi přijímací anténou a signálovým generátorem. Měřicí výška byla nastavena na 1 metr a neprobíhalo skenování.

Při jednotlivých měřeních docházelo mnohdy k výrazným lokálním odchylkám pro jednu z poloh. Jelikož se daná situace u ostatních poloh neopakovala, byly tyto extrémy z měření vyloučeny a jsou pouze zmíněny v doprovodném textu.

Z Obr. 3.10 je patrné, že v kmitočtovém rozsahu do 6 GHz je vliv stolu při vertikální polarizaci s oběma materiály podobný. Oba vykazují odchylky od 0 dB do -2 dB. S rostoucím kmitočtem se zvyšuje útlum polystyrenového stolu. U dřevěného stolu dochází k mírnému zlepšení, což je vzhledem k materiálu překvapivé.

V daném měření se především pro kmitočty do 3 GHz vyskytovaly poměrně výrazné lokální odchylky dosažující až  $\pm 10$  dB (dřevěný stůl) a +10 dB (polystyrenový stůl). Toto lze přisoudit částečnému odrazu elektromagnetické vlny od povrchu stolu a vzniku konstruktivní či destruktivní interference.



Obr. 3.10: Vliv stolu - interference (1 GHz - 18 GHz)

Stejně jako v předchozím případě se i u horizontální polarizace lze setkat především s útlumem, než-li vznikem nějaké formy konstruktivní interference. Pro oba stoly je zde průběh velmi podobný (Obr. 3.10). Útlum se zde pohybuje v rozsahu od 0 dB až po -5 dB se střední hodnotou přibližně -2.5 dB. Lokálně zde odchylka u dřevěného stolu v jedné z poloh dosahovala až -10 dB.

Výraznější vliv na vyšších kmitočtech je s velkou pravděpodobností také způsoben absencí skenování v prostoru. Při jistých kmitočtech mohou v místě měření vznikat minima a maxima, která výrazně ovlivní výsledky měření.

Měření prokázalo, že vliv materiálu stolu je při nízkých kmitočtech poměrně malý. S rostoucím kmitočtem však může pro oba materiály způsobit výrazný útlum. Průměrná odchylka v rámci několika poloh je pro oba materiály obdobná, avšak v případě dřevěného stolu docházelo k výraznějším lokálním maximům v rámci změny polohy signálového generátoru. Tento rozdíl by pravděpodobně odstranilo výškové skenování přijímací anténou dle [18]

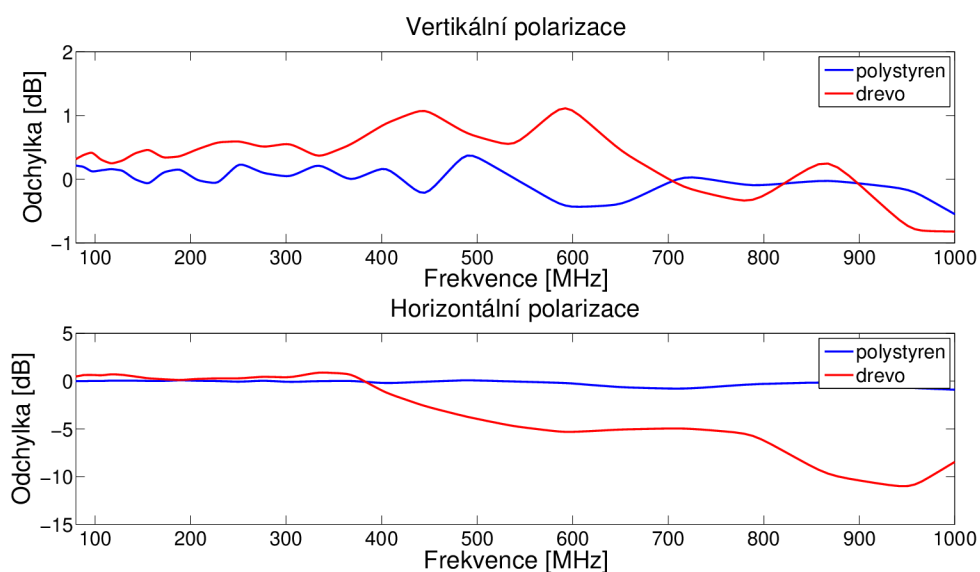
### 3.3.2 Elektromagnetická susceptibilita

Při testování odolnosti výrobků je klíčové v daném prostoru udržet co nejvíce homogenní pole. Jakýkoliv předmět navíc může způsobit lokální odchyly v intenzitě

pole působící na EUT. Z toho důvodu je vhodné, aby i při tomto typu testu byl použit materiál stolu s co nejmenším vlivem na výslednou homogenitu pole.

Měření probíhalo obdobně jako v předchozím případě, avšak referenční signálové zdroje byly nahrazeny izotropní sondou HI-6153. Referenční měření bylo provedeno se sondou usazenou v dielektrickém stojanu bez přítomnosti některého ze stolů. Následně bylo provedeno měření pro oba stoly ve dvou polohách. V první poloze byla sonda umístěna ve stojanu těsně za stolem a ve druhé poloze sonda ležela přímo uprostřed stolu. Zemní plochu pokrývaly absorbery v rozložení 3x3.

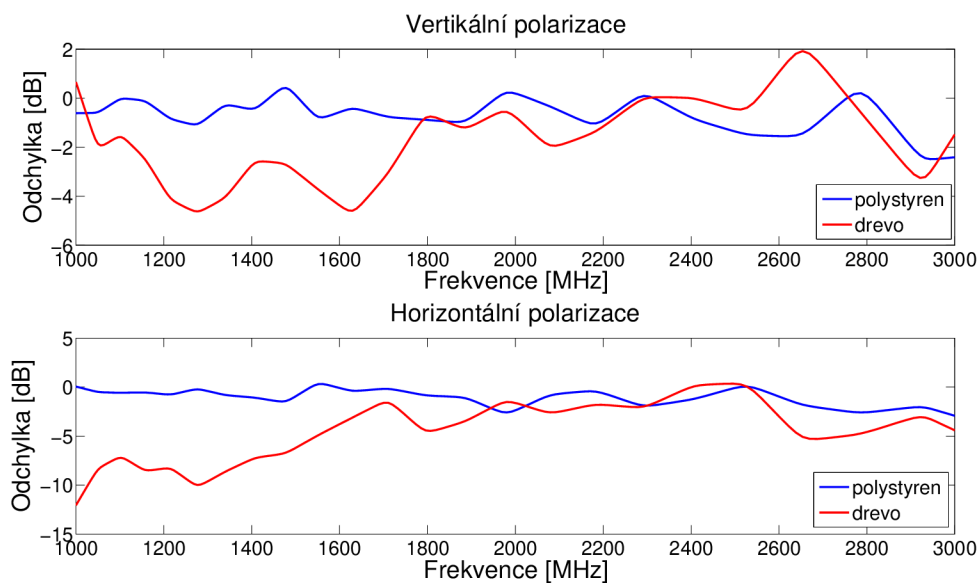
Pro obě polarizace vykazoval polystyrenových stůl minimální vliv na výslednou intenzitu pole (viz Obr. 3.11). Oproti tomu dřevěný stůl dramaticky měnil intenzitu pole. Ve vertikální polarizaci docházelo k poměrně malé odchylce nepřesahující 1.5 dB. Avšak u horizontální polarizace od kmitočtu 400 MHz docházelo k velmi výraznému poklesu intenzity. Při kmitočtu blízkému se k hodnotě 1 GHz dosahoval pokles intenzity více než 10 dB.



Obr. 3.11: Vliv stolu - susceptibilita (80 MHz - 1 GHz)

V navazujícím kmitočtovém rozsahu byl vliv materiálu stolu obdobný. Polystyrenový stůl opět vykazoval minimální vliv (Obr. 3.12).

Dřevěný stůl v horizontální polarizaci vykazoval při kmitočtu od 1 GHz útlum okolo 10 dB. Útlum postupně klesal téměř až k nulové hodnotě. Ke konci kmitočtového rozsahu docházelo opět k poklesu na hodnotu okolo -5 dB.



Obr. 3.12: Vliv stolu - susceptibilita (1 GHz - 3 GHz)

V případě vertikální polarizace jsou výsledky příznivější. Dřevěný stůl zde pro kmitočty do 2 GHz vykazuje pokles okolo 4 dB (Obr. 3.12). Ve zbytku kmitočtového rozsahu nejsou odchylky tak výrazné jako v předchozím případě.

Měření odolnosti bylo poměrně konzistentní a jednotlivé měřící body vůči sobě nevykazovaly příliš velké odchylky jako tomu bylo při měření interference.

Oproti měření elektromagnetické interference jsou rozdíly mezi jednotlivými použitými stoly velmi výrazné. Vliv polystyrenového stolu se pro tento typ měření zdá téměř zanedbatelný. Oproti tomu dřevěný stůl v některých případech vykazuje útlum až 10 dB.

## 4 VALIDACE BEZODRAZOVÝCH KOMOR

Kvalita a přesnost naměřených výsledků je přímo úměrná kvalitě testovacího pracoviště. Dosažení velmi přesných výsledků by vyžadovalo budování nákladných testovacích prostor a využití mnohdy komplikovaných a zdlouhavých metod měření, což je v praxi nerealizovatelné. Z toho důvodu normy (CISPR, EN, ANSI, FCC) definují měřící postupy a parametry testovacích pracovišť, které je nutné dodržet, aby bylo vyhověno požadavkům. Snížení nároků z dokonalého pracoviště (tzn. zlatého standardu) na běžné bezodrazové komory s sebou samozřejmě nese zvýšení nejistoty u naměřených výsledků, což je však přijatelná daň za snížení časových i finančních nároků na realizaci měření. V tomto ohledu je kladen důraz především na to, aby všechny laboratoře splňovaly stejné parametry a využívaly stejných postupů. Otázka, zda je daný postup absolutně správný tímto ustupuje do pozadí. Důležitá je především porovnatelnost naměřených výsledků mezi jednotlivými laboratořemi [19].

Výše zmíněné normy tedy definují parametry pracoviště včetně maximální odchylky, které tyto parametry mohou dosahovat. Je však třeba mít na paměti, že každá odchylka od definovaných vlastností pracoviště, vnáší do výsledků měření určitou nejistotu.

V následující části této kapitoly je podrobně rozebráno měření jednotlivých parametrů částečně a plně bezodrazové komory včetně diskuse naměřených výsledků. Mezi realizovaná měření patří normalizovaný útlum pracoviště (NSA) měřený v částečně bezodrazové komoře v kmitočtovém rozsahu do 1 GHz, poměr stojatého vlnění pracoviště (SVSWR) měřený v částečně i plně bezodrazové komoře v kmitočtovém rozsahu od 1 GHz do 18 GHz a na závěr uniformita pole v různých konfiguracích v rozsahu 80 MHz až 3 GHz.

Normalizovaný útlum pracoviště v plně bezodrazové komoře (FNNSA) nebylo možné změřit, jelikož výrobce bezodrazové komory do data odevzdání diplomové práce nedodal symetrizační člen pro napájení antény, která je pro měření nezbytná. Realizace měření s běžnou bikónickou anténou by nesplňovala nutné požadavky na maximální velikost antény a výsledky měření by byly zavádějící. Z toho důvodu bylo od měření po konzultaci upuštěno.

### 4.1 Normalizovaný útlum pracoviště (NSA)

Jedním z nejdůležitějších parametrů bezodrazových komor je útlum pracoviště (site attenuation, SA), respektive normalizovaný útlum pracoviště (normalized site atte-

uation, NSA). Jedná se o parametr, který definuje rozdíl mezi ideálním, absolutně volným prostranstvím s dokonale vodivou zemnicí plochou a SAR.

Reálně naměřená hodnota NSA v komoře musí vyhovět chybě maximálně  $\pm 4$  dB oproti teoretické hodnotě. Měření probíhá tak, že se nejprve pomocí kabelu spojí generátor a přijímač pro získání referenční úrovně. Poté se kabel připojí k anténám a měření probíhá pouze za pomoci antén. Metoda definuje vzdálenost mezi anténami, výšku vysílací antény a rozsah výšky pro skenování přijímací anténou. Výsledná hodnota NSA je pak dána následujícím vztahem (rovnice 4.1):

$$NSA = V_{direct} - V_{site} - AF_T - AF_R, \quad (4.1)$$

kde  $V_{direct}$  je změřená hodnota při přímo spojených anténách,  $V_{site}$  je změřená hodnota za pomoci antén,  $AF_T$  a  $AF_R$  jsou anténní faktory vysílací a přijímací antény.

Ze vzorce je patrné, že přesnost AF u obou antén je pro správné vyhodnocení NSA naprosto nezbytná. Hodnoty AF jsou u každé antény uvedeny v jejím data-sheetu, je však vhodné použít data z kalibračního listu konkrétní antény, jelikož se hodnoty mohou lišit i v řádu jednotek decibelů. Nejistota kalibrace antény je přímo přenesena do nejistoty měření NSA. Anténa musí být vždy zkalibrována při měřící vzdálenosti ve které je použita. V ideálním případě i pro obě polarizace, jelikož vertikální polarizace je mnohem náchylnější na vliv zemnicí plochy.

Postup měření je následující. Vysílací anténa je umístěna do jedné z pěti definovaných pozic (střed měřícího pracoviště a dále ve vzdálenosti 1 metr od středu na všechny čtyři strany - viz [18]). Přijímací anténa je umístěna ve vzdálenosti 3 metry od aktuální pozice vysílací antény. Za pomoci přijímací antény se provede skenování ve výšce od 1 metru po 4 metry s krokem 10 cm. Postup se opakuje pro dvě různé výšky vysílací antény a obě polarizace. Definované výšky vysílací antény pro vertikální polarizaci jsou 1 metr a 1.5 metru, pro horizontální polarizaci pak 1 metr a 2 metry.

Jako přijímací anténa byla v celém kmitočtovém rozsahu použita anténa 3142E-PA, která je kombinací logaritnicko periodické a bikónické antény. Na vysílací straně byla v kmitočtovém rozsahu 30 MHz až 300 MHz využita bikónická anténa 3109, která byla následně nahrazena logaritnicko periodickou anténou SAS-510-2. Celou měřící sestavu doplňuje signálový generátor EMGen a přijímač Rohde & Schwarz ESR7. Použité přístroje jsou souhrně uvedeny v příloze A.1

Pro automatizaci celého měřícího systému byl využit software TILE! [13]. Program v průběhu měření zajišťoval nastavení definované úrovně na výstupu signá-

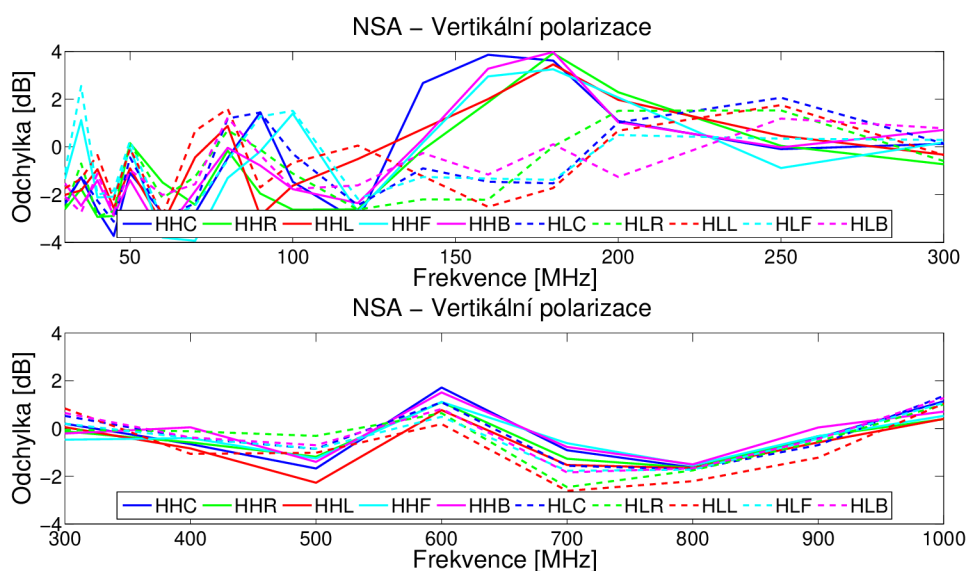
lového generátoru (-10 dBm), odečet hodnot z přijímače, ovládání věže s přijímací anténou a také přepínání jednotlivých měřících tras za pomoci zabudovaných vysokofrekvenčních relé.

Na závěr proběhlo měření celé trasy s přímo spojenými kabely pro určení referenční úrovně, která byla následně odečtena od naměřených hodnot.

Výsledky měření NSA pro vertikální polarizaci jsou znázorněny na obrázku 4.1, pro horizontální polarizaci pak na obrázku 4.2.

Ve všech případech se výsledky nacházely v dovolené toleranci  $\pm 4$  dB, ačkoliv na některých kmitočtech prakticky s nulovou rezervou. Je však nutno dodat, že měření probíhalo za přítomnosti poměrně velké vyzařovací antény určené na testy elektromagnetické imunity. Účel testování byl především ověřit parametry komory při reálném provozu, kdy anténa na testy imunity bude s největší pravděpodobností též přítomna.

Na obrázku 4.1 si lze povšimnout výrazného nárůstu odchylky při vertikální polarizaci na kmitočtu okolo 180 MHz. Při srovnání výsledků s akreditovanou laboratoří č. 0612 ze Seibersdorfu, je odchylka přibližně o 2 dB vyšší. Odstranění antény na měření odolnosti v tomto případě nemělo žádný vliv. Chybu měření lze tedy přisoudit přijímací anténě, jelikož okolo kmitočtu 180 MHz přestává fungovat logaritmicko-periodická část a funguje pouze bikónická část, jejíž fázový střed je posunut o téměř 60 cm dále od vysílací antény.

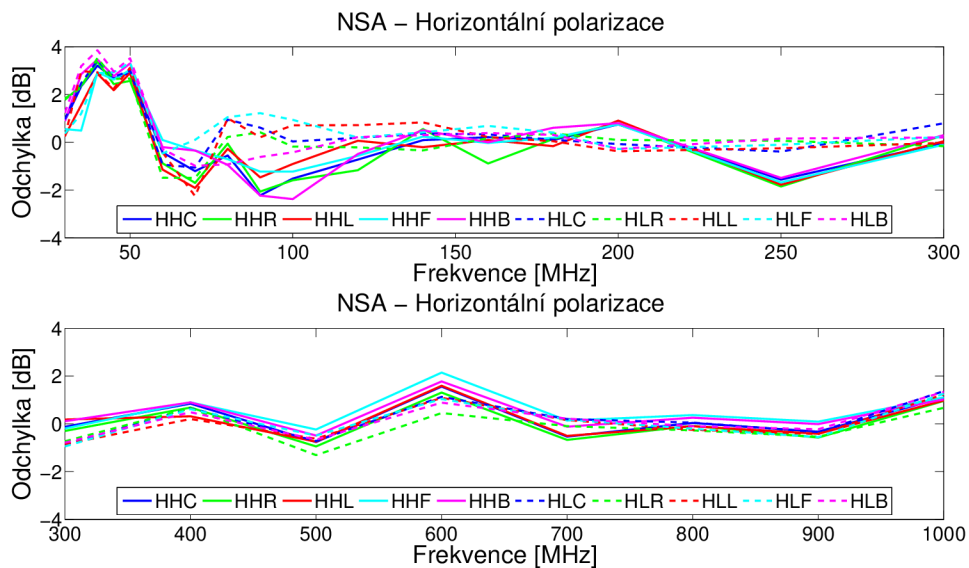


Obr. 4.1: NSA - vertikální polarizace

Při sestavování měřicího pracoviště bylo rovněž nutné věnovat zvýšenou pozornost napájecímu kabelu vyzařovací antény. Kabel by měl vést nejméně 1 metr za anténu. Pokud toto není dodrženo a kabel visí podél stojanu s bikónickou anténou, dochází k buzení kabelu vyzařovací anténou a výraznému poklesu vyzářeného výkonu. U vertikální polarizace při kmitočtu okolo 70 MHz byl zaznamenán pokles vyzářeného výkonu až o 10 dB. V případě horizontální polarizace nebyl efekt tak výrazný a pokles se pochyboval okolo 3 dB.

Vyšší kmitočtové pásmo od 300 MHz do 1 GHz je pro obě polarizace bezproblémové. Vzhledem k tomu, že obě výšky a obě polarizace mají dosti podobný průběh, lze usuzovat, že jsou výsledky mírně zkresleny AF vyzařovací antény. Jelikož od dané antény nebyl k dispozici kalibrační list, jsou využity hodnoty AF z datasheetu.

Horizontální polarizace obecně vykazuje menší odchylku od teoretických hodnot (viz Obr. 4.2). Výraznější odchylku lze pozorovat pouze u kmitočtů do 50 MHz. Kmitočtové pásmo nad 300 MHz vykazuje již velmi malou odchylku.



Obr. 4.2: NSA - horizontální polarizace

## 4.2 Poměr stojatého vlnění pracoviště (SVSWR)

K validaci pracoviště pro kmitočty nad 1 GHz se využívá metody SVSWS. Princip metody spočívá v zajištění prostorové homogenity v rámci definovaného prostoru pro EUT. Prostor mezi měřicí anténou a EUT, které je v tomto případě nahrazeno



speciální anténou, je vyplněn absorberem. Postup validace pracoviště je totožný pro plně i částečně bezodrazovou komoru.

Validace pracoviště se provádí v pěti bodech - střed pracoviště a dále pak ve vzdálenosti 75 cm směrem na obě strany a dopředu. Měřicí výška pro tyto body je 1 metr. V přední pozici se kontrola provádí taktéž ve výšce 2 metry. Referenční anténa (model 3183, Lindgren) a měřicí anténa (model 3117, Lindgren) jsou vždy ve stejné výšce. Kmitočtový rozsah validace je od 1 GHz do 18 GHz. Norma [4] doporučuje krok 50 MHz, případně menší. Z důvodu časové náročnosti byl krok upraven následujícím způsobem: v rozsahu 1 GHz až 3 GHz byl ponechán doporučený krok 50 MHz, v rozsahu 3 GHz až 6 GHz byl krok zvýšen na 100 MHz a pro zbytek kmitočtového rozsahu byl nastaven krok 200 MHz.

Postup měření je následující. Přijímací anténa se umístí do vzdálenosti 3 metry před přední hranu definovaného prostoru měřicího pracoviště. Referenční zdroj signálu se umístí na danou testovací pozici. Provede se odečet hodnot a zdroj signálu se následně posouvá do pěti definovaných pozic ve vzdálenosti 2, 10, 18, 30 a 40 cm od referenční pozice směrem od měřicí antény (pro pozici ve střední a přední části testovacího pracoviště), respektive směrem k měřicí anténě (pro pozice po stranách pracoviště). Naměřené hodnoty se následně normují dle vzorce 4.2 (viz [4]), aby se eliminoval vliv útlumu způsobeného prodloužením vzdálenosti mezi měřicí anténou a referenčním zdrojem signálu.

$$M_{norm} = M + 20 * \log \left( \frac{d_M}{d_{ref}} \right), \quad (4.2)$$

kde  $M$  označuje naměřenou hodnotu v daném bodě,  $M_{norm}$  je normovaná hodnota,  $d_M$  je vzdálenost měřeného bodu od antény a  $d_{ref}$  je vzdálenost referenčního (nejbližšího) bodu od antény .

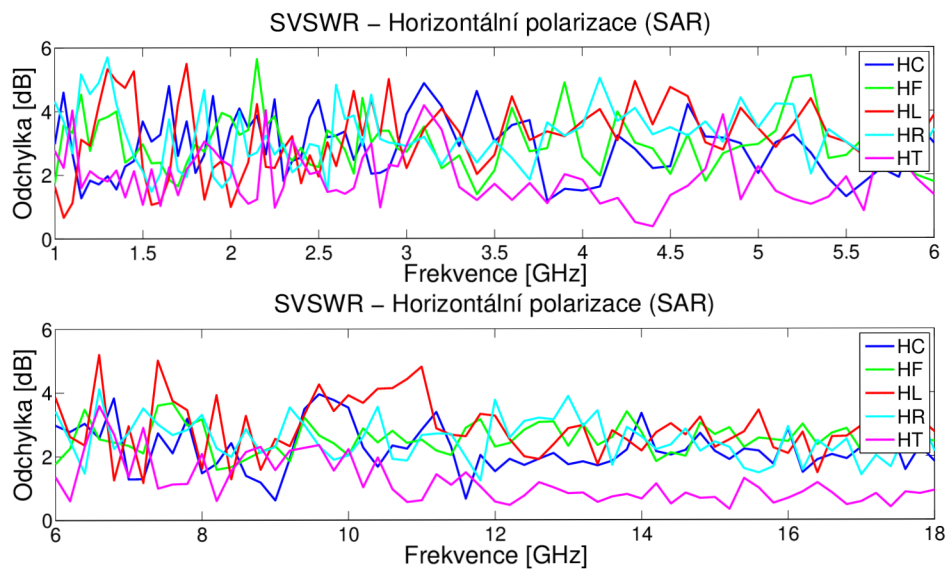
Rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou po normování nesmí překročit hranici 6 dB. Vyhodnocuje se vždy pouze skupina 6 bodů v rámci referenční pozice.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny výsledky měření SVSWR pro částečně a plně bezodrazovou komoru. Dále pak diskuse výsledků a porovnání obou typů komor.

### 4.2.1 Částečně bezodrazová komora

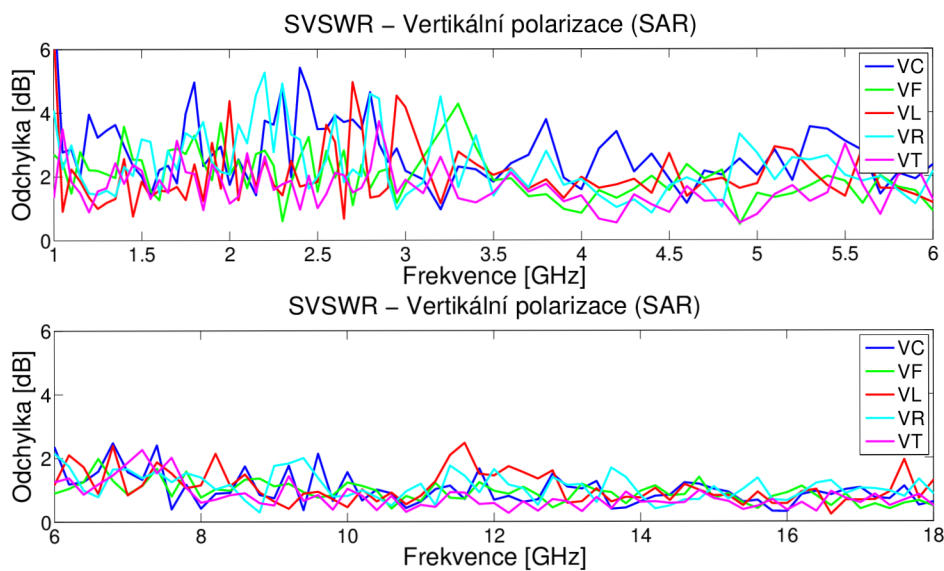
Na obrázcích 4.3 a 4.4 jsou k dispozici výsledky měření SVSWR v částečně bezodrazové komoře. Výsledky jsou přehledně děleny do jednotlivých grafů pro vertikální a horizontální polarizaci.

Odchylka při horizontální polarizaci dosahovala do kmitočtu 6 GHz hodnot do 5 dB (Obr. 4.3). S rostoucím kmitočtem pak klesala až k hodnotě okolo 3 dB.



Obr. 4.3: SVSWR - horizontální polarizace (SAR)

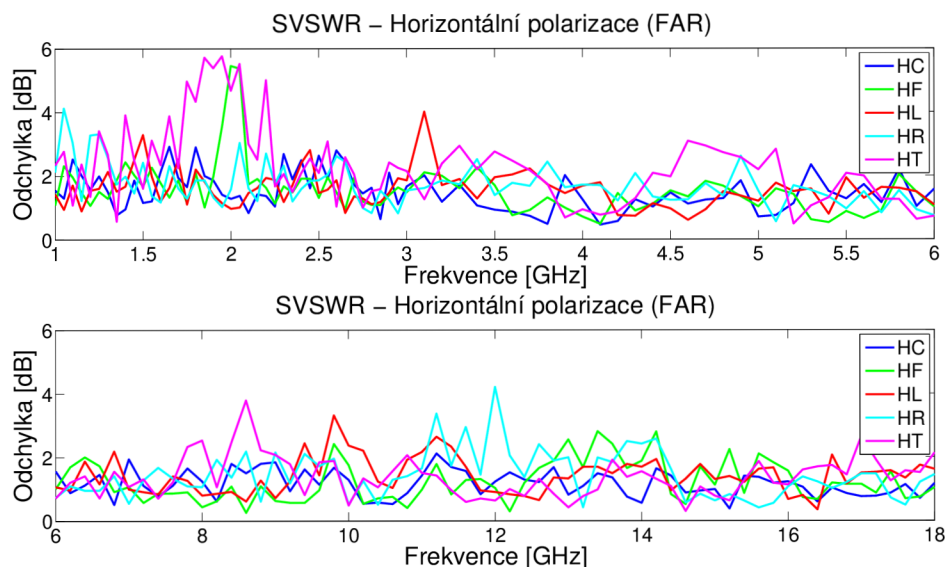
V případě vertikální polarizace se vyšší odchylka v řádu 4 až 5 dB vyskytovala pouze v rozsahu 1500 MHz až 3000 MHz (Obr. 4.4). Dále postupně klesala a od hranice 6 GHz se pohybovala pouze okolo 1.5 dB. V jedné poloze při kmitočtu 1 GHz odchylka překročila hodnotu 7 dB, což lze brát spíše lokální anomálií.



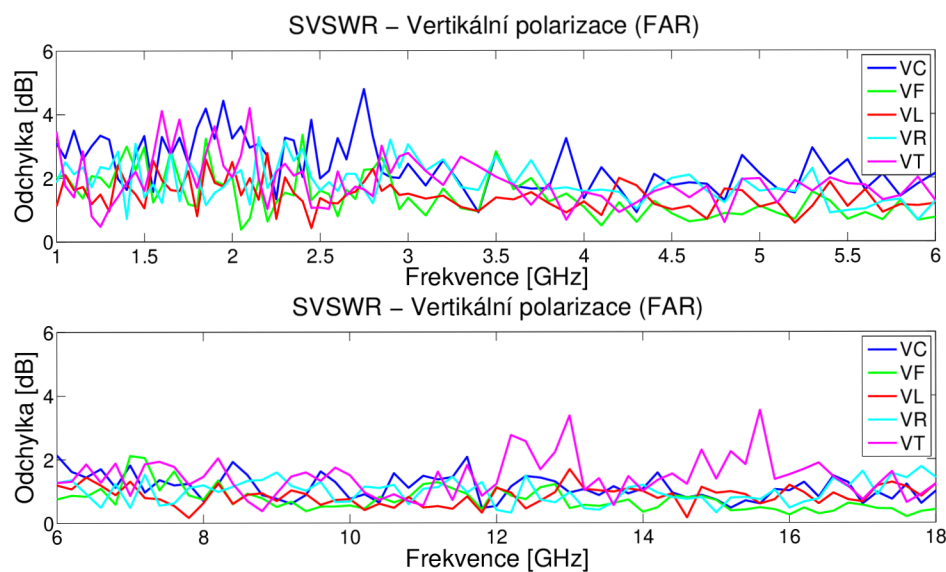
Obr. 4.4: SVSWR - vertikální polarizace (SAR)

## 4.2.2 Plně bezodrazová komora

Validace plně bezodrazového pracoviště obecně vykazovala lepší výsledky. S výjimkou několika bodů okolo kmitočtu 2 GHz dosahuje i horizontální polarizace do 6 GHz odchylku pouze do 3 dB (Obr. 4.5). Při vyšším kmitočtu se hodnoty ještě mírně zlepšily a odchylka se ustálila na hodnotě přibližně 2 dB.



Obr. 4.5: SVSWR - horizontální polarizace (FAR)



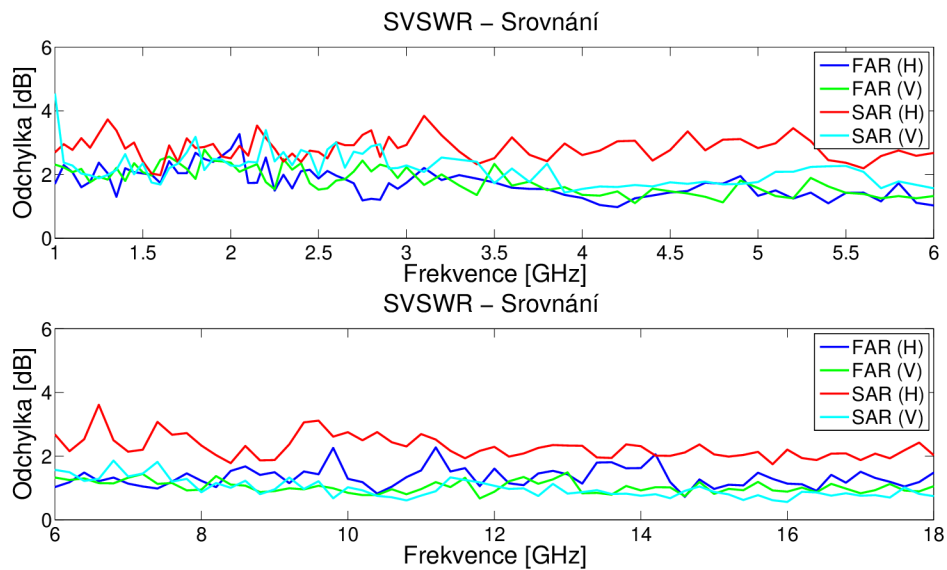
Obr. 4.6: SVSWR - vertikální polarizace (FAR)

Stejně jako v případě výsledků částečně bezodrazové komory jsou i v tomto případě výsledky pro vertikální polarizaci příznivější než-li u polarizace horizontální. Nejkritičtější část je opět v kmitočtovém rozsahu 1 GHz až 3 GHz (Obr. 4.6). V kmitočtovém rozsahu 3 GHz až 18 GHz se až na pár výjimek odchylka ustálila na hodnotě pod 2 dB.

### 4.2.3 Srovnání SVSWR v SAR a FAR

Jelikož jednotlivé dílčí výsledky obsahují poměrně velké množství průběhů, je vhodné na závěr provést srovnání v přehlednější formě. Na obrázku ?? jsou k dispozici čtyři průběhy zobrazující průměrnou hodnotu odchylky pro všech pět poloh v dané konfiguraci a polarizaci.

Z obou průběhů je patrný rozdíl mezi vertikální a horizontální polarizací, především pak u částečně bezodrazové komory. Průměrná odchylka při horizontální polarizaci zde činila více než 2,8 dB pro kmitočtové pásmo do 6 GHz. Dále pak povolna klesala až k hodnotě lehce převyšující 2 dB. Ve všech ostatních případech dosahovala průměrná odchylka hodnoty přibližně 1,5 dB.



Obr. 4.7: Srovnání SVSWR v SAR a FAR

Obecně lze říci, že pro oba typy komor i obě polarizace je nejkritičtější pásmo v rozsahu 1 GHz až 3 GHz, kde se průměrné odchylky pohybují v rozsahu okolo 3 dB a maximální odchylky jsou ještě o 2 dB vyšší. Od kmitočtu 3 GHz dochází k mírnému zlepšení a kmitočtový rozsah 6 GHz až 18 GHz, s výjimkou částečně bezodrazové komory při horizontální polarizaci, vykazuje průměrnou odchylku okolo 1 dB.

## 4.3 Uniformita pole

Klíčovým parametrem při měření elektromagnetické susceptibility je uniformita pole. Ta určuje homogenitu nastavené testovací úrovně na definované ploše. Pro splnění požadavků [7] je nutné, aby minimálně na 75 % definované plochy byla v průběhu měření nastavena testovací úroveň s tolerancí 0 dB až + 6 dB. Tímto je zaručeno, že se výsledná intenzita působící na zkoušený objekt pohybuje v rozsahu od normou určené testovací úrovně až po její dvojnásobek.

Kalibrace uniformity pole typicky probíhá v 16-ti bodech, které jsou od sebe vzájemně vzdáleny 50 cm. Spodní okraj tohoto čtverce je ohraničen výškou 80 cm od zemní plochy, což odpovídá výšce stolu užívaného při testování. Parametry testovacího pracoviště při kalibraci by se měly co nejvíce blížit reálné testovací sestavě, jelikož i poměrně drobná změna pracoviště (změna kabelů, posunutí absorberů, apod.) může mít výrazný vliv na výsledky měření. Jediná odchylka od běžné testovací konfigurace je absence stolu a přítomnost izotropní sondy použité pro měření intenzity pole v definovaných místech.

Kalibrace pole se provádí pro obě polarizace v typicky užívané testovací vzdálenosti. V tomto případě ve vzdálenosti 3 metry. Vzdálenost je určena od špičky logaritmicko-periodické antény použité v kmitočtovém rozsahu 80 MHz až 1 GHz, respektive od přední roviny trychtýřové antény při kmitočtu nad 1 GHz. Oproti běžnému testování se nevyužívá modulace. Z tohoto důvodu je při kalibraci vhodné zvýšit úroveň na 1,8 násobek běžné testovací úrovně, čímž se zároveň otestuje, zda je výkonový zesilovač schopen dodat patřičný výkon i při zapnuté modulaci.

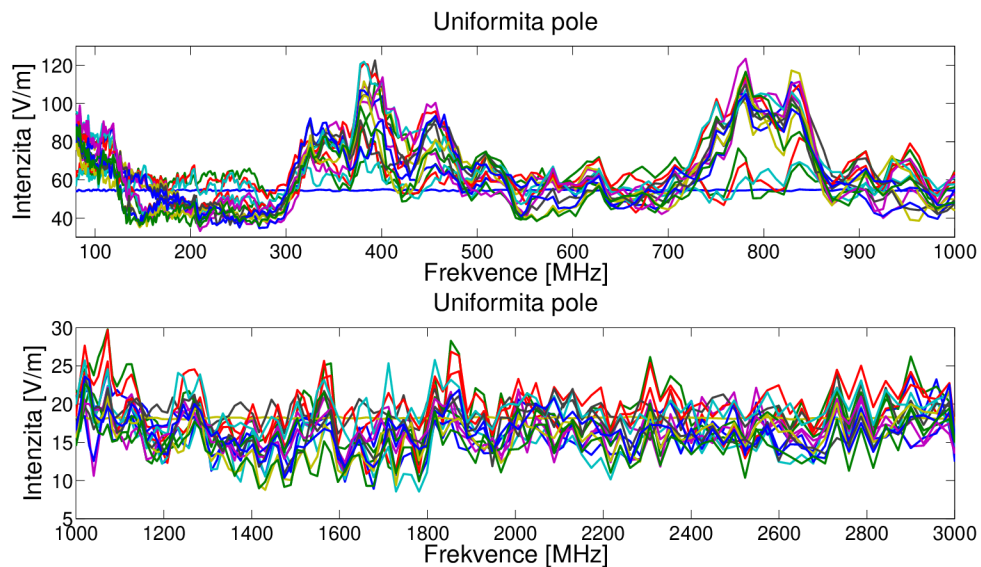
V zásadě lze pro kalibraci homogenity pole využít dvou metod. První z nich je *metoda konstantní intenzity*. Výkon dodávaný zesilovačem se pro každý kalibrovaný bod nastaví přesně na takovou hodnotu, aby výsledná intenzita v daném bodě odpovídala požadované úrovni. Jednotlivé výkony se pro každý kalibrovaný bod zaznamenávají a následně vyhodnotí. Druhou metodou je *metoda konstantního výkonu*, která byla využita při praktické realizaci. Měření prvního bodu je provedeno identicky jako v předchozí metodě, avšak pro všechny ostatní body je na výstupu zesilovače dodáván stejný výkon jako u prvního bodu. Následně se vyhodnotí odchylky naměřených intenzit z jednotlivých bodů. Přičemž platí, že 12 z 16 bodů musí dosahovat intenzity v toleranci 0 dB až 6 dB oproti referenční úrovni. Referenční úroveň je definována jako nejmenší intenzita z oněch 12 bodů. Tato úroveň nikdy nesmí klesnout pod udávanou testovací mez.

Pro všechna měření byly využity antény 3150 a 3106 (Lindgren), výkonové zesilovače, signálový generátor EMGen, a izotropní sonda HI-6153. Přehledný seznam

všech použitých přístrojů je k dispozici v příloze A.1. Jelikož se při běžném testování využívá stejná sestava, nejsou parametry antén, kabelů či zesilovačů podstatné z pohledu výsledné nejistoty měření. Na výslednou nejistotu kalibrace má vliv v podstatě pouze specifikace sondy a nejistota její kalibrace.

Celá sestava byla ovládána pomocí softwaru *TILE!* [13], který zajistil automatizaci celého měření a díky předdefinované funkcionalitě také vyhodnocení výsledků, určení odchylky při jednotlivých kmitočtech a také výpočet vhodného propustného výkonu pro následné reálné testování výrobků.

Na obrázku 4.8 je znázorněn typický průběh kmitočtové závislosti intenzity v 16 bodech pole při horizontální polarizaci. Testovací úroveň v rozsahu do 1 GHz je nastavena na 54 V/m, což je 1,8 násobek úrovně 4 (30 V/m). V rozsahu 1 GHz až 3 GHz je nastavena testovací úroveň 3 (10 V/m).



Obr. 4.8: Uniformita pole - ukázka kalibrace v 16ti bodech

Následující podkapitoly se zabývají rozбором naměřených výsledků pro jednotlivé konfigurace měřícího pracoviště. Při realizaci měření je vhodné umístit do středu mezi vysílací anténu a testovací prostor absorbery, které zabraňují odrazu elektromagnetické vlny od zemní plochy. Užití absorberů sice není z pohledu normy [7] nezbytné, ačkoliv sama norma zmiňuje skutečnost, že při jejich absenci nelze zaručit dosažitelnost požadované homogenity pole.

Teoreticky lze předpokládat, že při použití většího množství absorberů bude výsledná homogenita pole lepší, jelikož nebude docházet k odrazu elektromagnetické

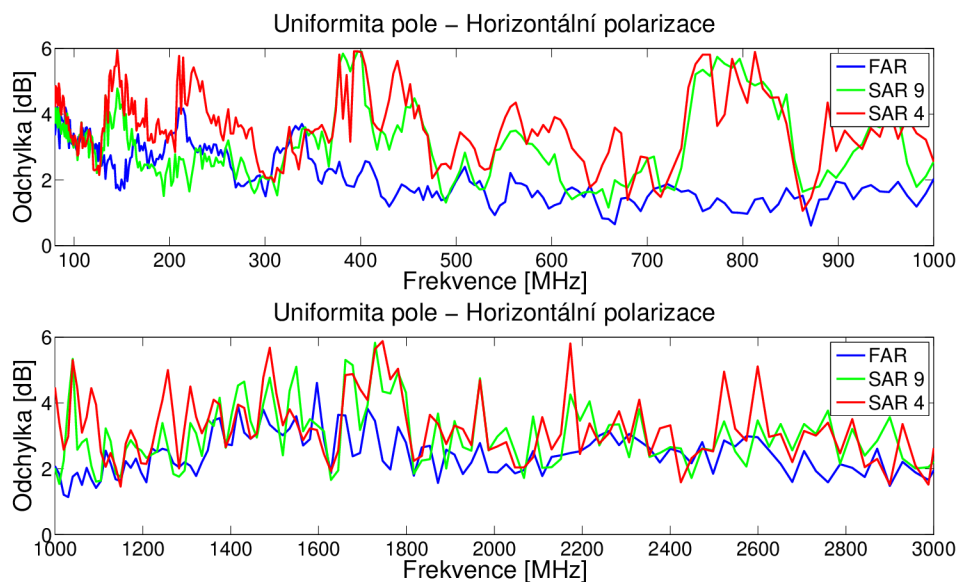
vlny od zemní plochy. Z tohoto pohledu je vhodné doporučit užití většího množství absorberů. Tento požadavek je však jistou komplikací při realizaci praktického měření, jelikož je nutné do bezodrazové komory přesunout velké množství absorberů.

Realizovaná měření si mimo jiné kladou za cíl určení vhodného množství absorberů, které bude kompromisem mezi optimálními parametry a náročností při sestavování testovacího pracoviště.

V následujících grafech jsou vyobrazeny výsledky ze 4 různých variant testovacího pracoviště. První alternativa je realizována bez užití absorberů. Při další iteraci byly využity 4 absorberů (čtverec 2x2), 9 absorberů (čtverec 3x3) a následně využití plně bezodrazové komory. Jednotlivé absorberů byly umístěny na pojízdném vozíku s feritovým dnem s rozměry 50x50 cm.

Měření v kmitočtovém pásmu 80 MHz až 1 GHz ukázalo (Obr. 4.9), že horizontální polarizace je z pohledu udržení přijatelné homogenity pole náročnější. Realizace se čtyřmi a devíti absorberů je již na samé hranici přijatelnosti. Při absenci absorberů odchylka dosahovala hodnot až 10 dB. Z toho důvodu byla tato křivka z grafu odebrána pro zachování větší přehlednosti.

Oproti tomu je vertikální polarizace (Obr. 4.10) v průměru o 1 dB lepší a obecně ve většině kmitočtového pásma vykazuje dostatečnou rezervu. Vyhovuje dokonce i měření bez využití absorberů.

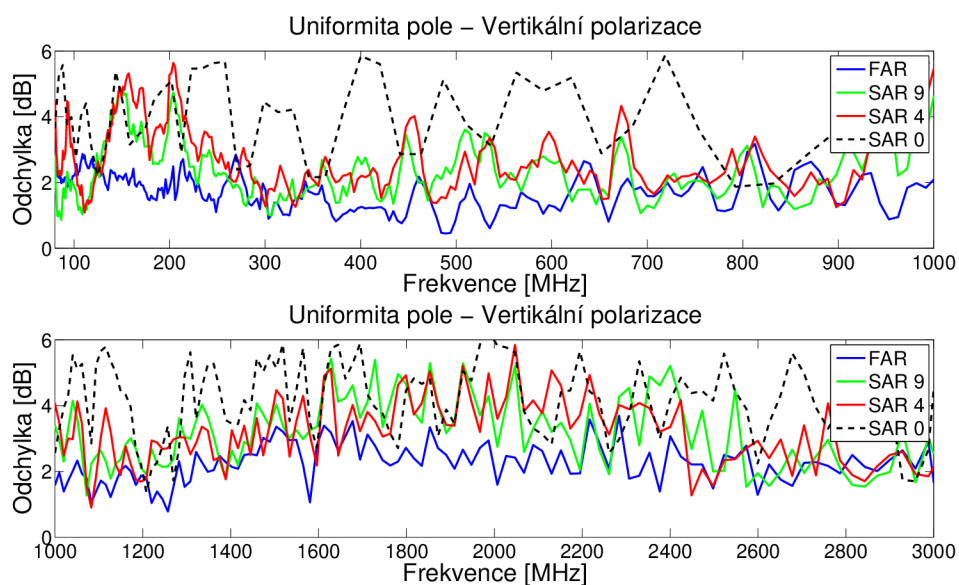


Obr. 4.9: Uniformita pole - horizontální polarizace

Měření v částečně bezodrazové komoře doplňuje jeden průběh z plně bezodrazové komory (FAR). Z daného průběhu je patrné, že při obou polarizacích je odchylka výrazně menší oproti všem alternativám realizovaným v částečně bezodrazové komoře. Odchylka zde dosahuje v průměru okolo 2 dB, což je o více než 1,5 dB lepší výsledek, než při realizaci měření s využitím čtyř či devíti absorberů.

Teoretickým předpokladem při realizaci kalibrace pole v kmitočtovém rozsahu 1 GHz až 3 GHz bylo, že při použití směrovější trychtýřové antény bude rozdíl mezi odchylkou při různých konfiguracích menší. Tento předpoklad se plně nepotvrdil a výsledné rozestupy zůstávají spíše podobné (Obr. 4.9 a 4.10). Snad jen s výjimkou konfigurace bez užití absorberů, kde se při obou polarizacích podařilo až na drobné výjimky dodržet povolenou toleranci 6 dB.

Oproti nižšímu kmitočtovému rozsahu zde vykazuje vertikální i horizontální polarizace s ohledem na průměrnou odchylku obdobné hodnoty. U horizontální polarizace je odchylka v celém kmitočtovém rozsahu podobná (Obr. 4.9), oproti tomu ve vertikální polarizaci je znatelný nárůst přibližně ve středu kmitočtového pásma (Obr. 4.10).



Obr. 4.10: Uniformita pole - vertikální polarizace

Z pohledu realizace testu či přípravy testovacího pracoviště je užití plně bezodrazové komory výrazně časově náročnější. V případě, že je během testu nutné mít k zařízení přístup a provádět drobné změny nastavení, je měření výrazně méně komfortní. Z toho důvodu je vhodnější pro tento typ testů využívat částečně bezodrazovou komoru v kombinaci s absorberem.



Realizace se čtyřmi a devíti absorberů se pro obě polarizace jeví dosti podobně. S klidem lze tedy volit užití pouze 4 absorberů umístěných ve středu mezi vyzařující anténou a zkoušeným objektem. Z pohledu parametrů a komfortu při realizaci měření vychází tato alternativa nejlépe.

Obecně lze pro oba kmitočtové rozsahy uplatnit stejné závěry. Realizace testovacího pracoviště s 9 absorberů vykazuje drobnější zlepšení oproti alternativě se 4 absorberů, ale jedná se o poměrně malý rozdíl. S ohledem na náročnost přípravy pracoviště, průběh samotného testování a dosažitelné parametry lze považovat obě alternativy za rovnocenné.

## 5 SROVNÁNÍ MĚŘENÍ V SAR A FAR

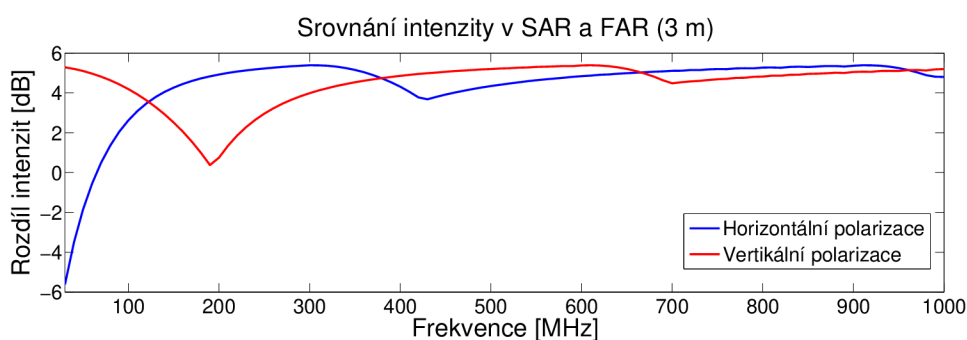
Srovnání obou typů komor je vhodné rozdělit do dvou kategorií dle kmitočtového rozsahu, jelikož se měřící postupy u jednotlivých rozsahů výrazně liší.

### 5.1 Srovnání v rozsahu do 1 GHz

V kmitočtovém rozsahu 30 MHz až 1 GHz probíhá v částečně bezodrazové komoře sken od 1 metru do 4 metrů. V případě plně bezodrazové komory se měření zjednoduší pouze na jednu výšku. Ta se nachází v polovině měřicího prostoru, tzn. ve 2 metrech. EUT by v tomto případě bylo být zvednuto taktéž do stejné výšky.

Při srovnání měření v částečně a plně bezodrazové komoře se vychází ze skutečnosti, že u FAR nedochází k odrazu elektromagnetické vlny od zemnicí plochy. Výsledná intenzita by tedy měla být menší o 6 dB. Z následujících obrázků je však patrné, že toto neplatí ve všech případech.

Na obrázku 5.1 je znázorněn rozdíl intenzity v částečně a plně bezodrazové komoře při měřicí vzdálenosti 3 metry. Simulace vychází z referenční úrovně plně bezodrazové komory, která má na všech kmitočtech stejnou hodnotu. Oproti tomu v částečně bezodrazové komoře dochází ke sčítání přímé a odražené vlny a tím i vzniku konstruktivní interference. Jak je ovšem z grafu patrné, při některých kmitočtech není dosaženo úplného součtu obou vln a rozdíl nedosahuje předpokládané hodnoty 6 dB.

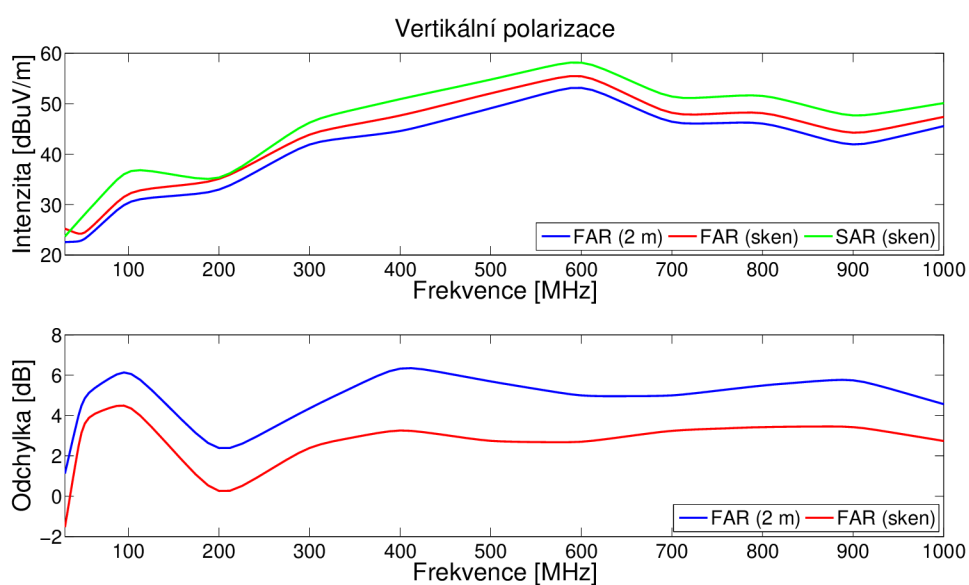


Obr. 5.1: Srovnání SAR a FAR (Simulace)

U vertikální polarizace nastává pokles okolo kmitočtu 200 MHz, kdy je intenzita v obou typech komor srovnatelná. Ve zbytku kmitočtového rozsahu se rozdíl blíží přibližně 5 dB. U horizontální polarizace a kmitočtu do přibližně 100 MHz dochází

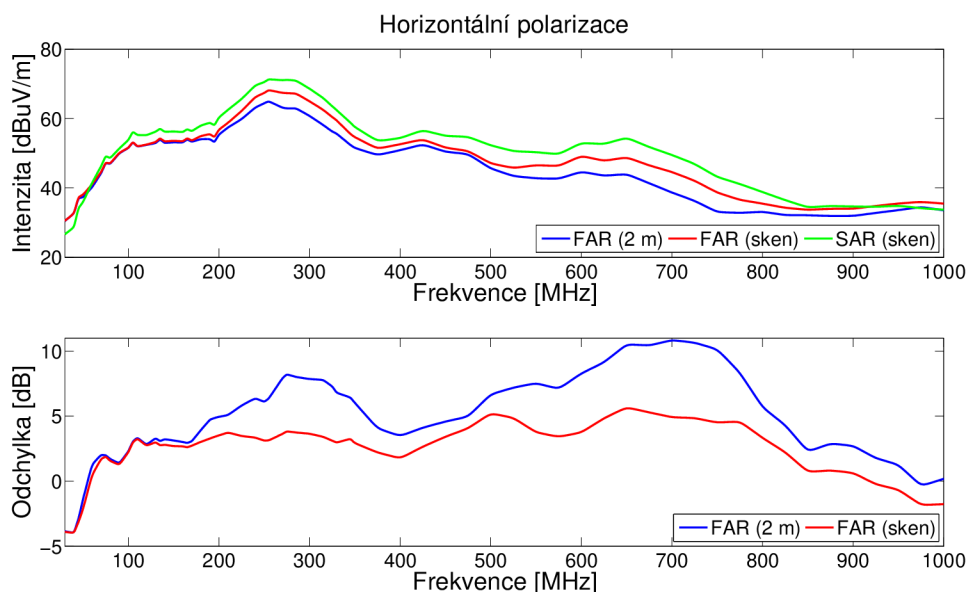
naopak v celém rozsahu skenovaných výšek dokonce k poklesu intenzity oproti měření v plně bezodrazové komoře. To lze přičíst na vrub destruktivní interferenci. Pro zbytek kmitočtového rozsahu dosahuje rozdíl hodnot okolo 5 dB.

Při praktické realizaci bylo měření v plně bezodrazové komoře rozšířeno z jedné fixní výšky i na výškový sken obdobně jako u částečně bezodrazové komory. Výsledky měření pro vertikální polarizaci jsou uvedeny na obrázku 5.2. Rozdíl u jednotlivých typů komor odpovídá matematickému modelu popsanému výše. Zajímavým faktem zůstává rozdíl měření v plně bezodrazové komoře. Při skenování bylo dosaženo přibližně o 2 dB vyšší intenzity, což je zajímavé především s ohledem na to, že jako EUT byly použity referenční signálové zdroje, které jsou téměř všesměrové.



Obr. 5.2: Srovnání SAR a FAR do 1 GHz - vertikální polarizace

Srovnávací měření SAR a FAR v horizontální polarizaci beze zbytku potvrdilo teoretický předpoklad pro kmitočty do 100 MHz. Naměřená hodnota v částečně bezodrazové komoře byla nižší než v plně bezodrazové komoře. Při skenování prostoru ve FAR má i zbytek kmitočtového rozsahu průběh shodný s teorií. Ovšem pro měření v jedné výšce dosahuje rozdíl lokálně až 10 dB. To lze přisoudit vlivu směrové charakteristiky použitého EUT.



Obr. 5.3: Srovnání SAR a FAR do 1 GHz - horizontální polarizace

Měření v částečně i plně bezodrazové komoře s sebou nese několik výhod i nevýhod. Při měření v částečně bezodrazové komoře lze pokrýt díky zemnicí ploše větší rozsah vyzařovacích úhlů EUT, čímž se minimalizuje riziko vynechání některého výrazného směru záření. Měření je však poměrně zdlouhavé. Oproti tomu měření v plně bezodrazové komoře je zpravidla rychlejší, jelikož zde odpadá nutnost výškově polohovat anténu. Pro ověření lze však doporučit alespoň krátký výškový sken pomocí špičkového detektoru. V praxi se lze setkat například se EUT, které mají kovový plášť a vyzařují pouze v určitém směru (např. vzhůru). Pokud je měření provedeno pouze v jedné výšce, mohou být výsledky více než nepřesné.

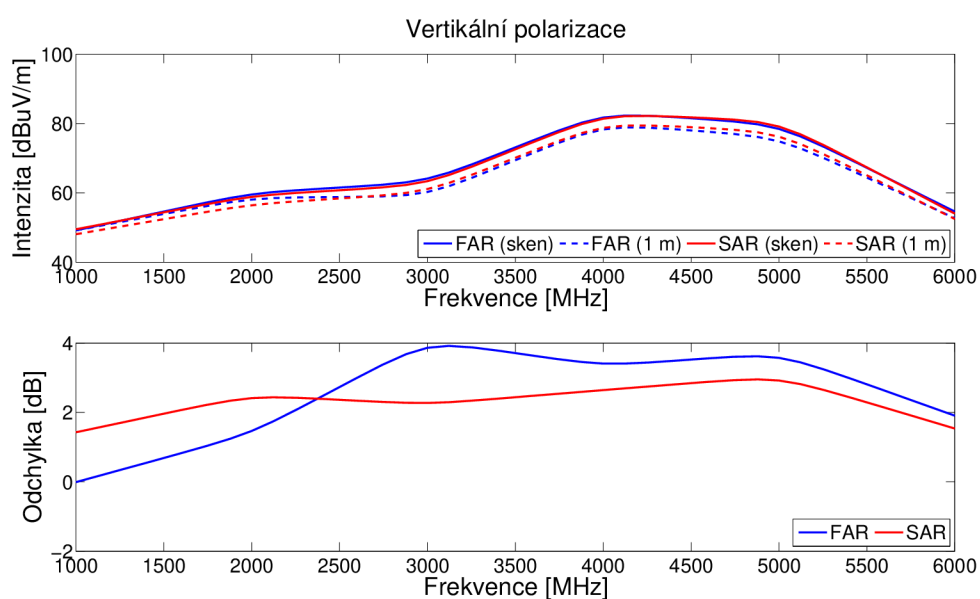
Z pohledu vyjadřování nejistot je měření ve FAR výhodnější, viz [6]. Díky plnému pokrytí absorberů se komora více blíží absolutně volnému prostoru. Odpadá též vliv zemnicí plochy na měřicí anténu. Především při nízkých výškách je měřicí anténa v SAR poměrně výrazně ovlivněna přítomností zemnicí plochy.

## 5.2 Srovnání v rozsahu od 1 GHz

V kmitočtovém rozsahu nad 1 GHz je měření v částečně i plně bezodrazové komoře identické. Částečně bezodrazovou komoru je však nutné doplnit o absorberů mezi přijímací anténu a EUT, čímž danou komoru přetvoříme na jakousi zjednodušenou plně bezodrazovou komoru. Evropské normy uvádějí pro obě alternativy (SAR i FAR) výšku měřicí antény 1 metr. EUT se musí nacházet ve 3 dB svazku

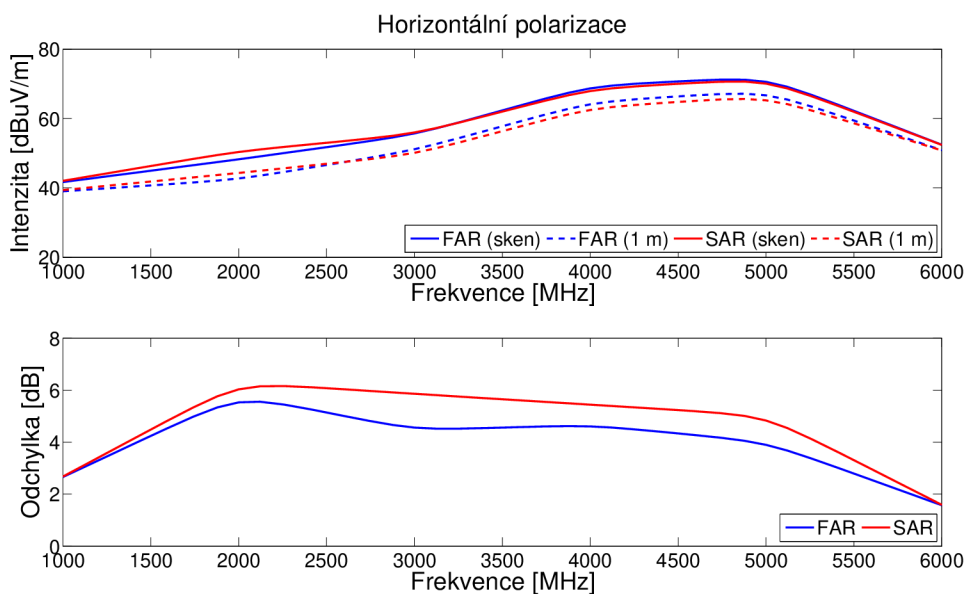
přijímací antény. Oproti tomu americké normy uvádějí nutnost skenu od 1 metru do 4 metrů. Doporučeno je též provádět náklon přijímací antény. Toto měření je popisováno pouze pro částečně bezodrazovou komoru, jelikož v dané normě není plně bezodrazová komora schválena.

Při praktickém měření lze očekávat, že výsledky z obou typů komor budou obdobné, jelikož konfigurace obou pracovišť je přibližně stejná. Tuto skutečnost potvrzují naměřené průběhy na obrázcích 5.4 a 5.5. Jednotlivé průběhy pro SAR a FAR jsou srovnatelné. Jako zajímavější se jeví srovnání evropského a amerického přístupu k měření. Jak je z obou grafů patrné, dosahují rozdíly mezi výsledky získanými ve výšce 1 metr a při použití výškového skenu výrazných rozdílů.



Obr. 5.4: Srovnání SAR a FAR od 1 GHz - vertikální polarizace

V daném případě je to poměrně překvapivé, jelikož jako EUT byly opět použity referenční signálové zdroje, které jsou ve své podstatě všesměrové. Z měření vyplývá, že výškový sken má i v tomto kmitočtovém rozsahu své místo a to i u všesměrových zařízení.



Obr. 5.5: Srovnání SAR a FAR od 1 GHz - horizontální polarizace

Z provedených měření v obou kmitočtových rozsazích lze poměrně snadno odvodit, jaký typ měření je nejpřesnější a lze s ním dosáhnout nejlepších výsledků. Zvýšená přesnost naměřených výsledků se však vždy negativně podepíše na časové náročnosti měření. Pro předcertifikační měření lze volit jisté ústupky a užití jednodušší konfigurace. Případně je možné volit kompromis v podobě měření v několika výškových bodech. Vlivem nastavení výškového kroku se podrobněji zabývá kapitola 3.2.

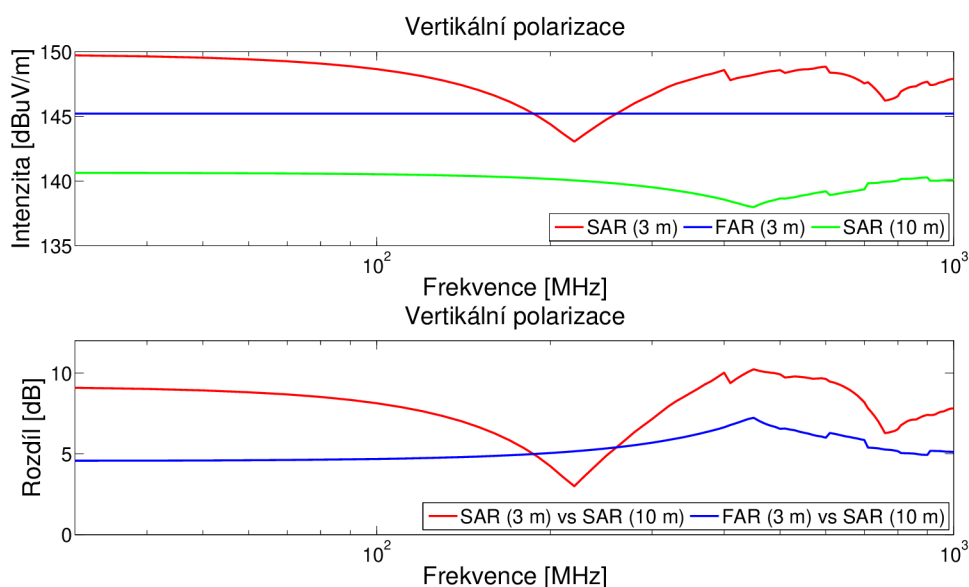
## 6 SROVNÁNÍ MĚŘÍCÍ VZDÁLENOSTI

### 6.1 Analýza měřící vzdálenosti

Velikost intenzity je přímo úměrná vzdálenosti měřící antény od EUT. Proto lze předpokládat, že rozdíl naměřené intenzity ve vzdálenosti 3 metry a 10 metrů bude přibližně 10 dB. S tímto předpokladem pracují v podstatě všechny normy. Rozdíl limitů pro jednotlivé testy pro měřící vzdálenost 3 metry a 10 metrů je zpravidla 10 dB. Pro ověření tohoto předpokladu bylo provedeno několik simulací v programu matlab. Simulace byla provedena samostatně pro vertikální a horizontální polarizaci.

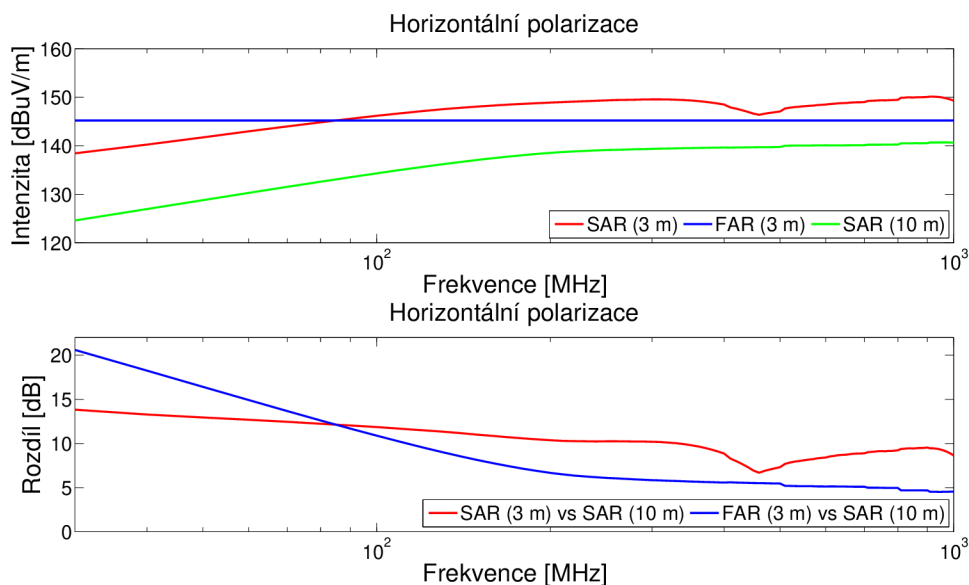
Na obrázcích 6.1 a 6.2 je znázorněna simulace měření pro třímetrovou SAR, třímetrovou FAR a desetimetrovou SAR. Uvedené průběhy jsou bez náklonu měřící antény. Jako model EUT je použit izotropní zářič.

Pro třímetrovou SAR ve vertikální polarizaci (Obr. 6.1) je patrný výrazný pokles okolo kmitočtu 200 MHz. Při daných rozměrech komory nedojde k plnému součtu obou vln. Z toho důvodu není přepočten mezi třímetrovou a desetimetrovou měřící vzdáleností roven 10 dB v celém kmitočtovém rozsahu. V případě desetimetrové SAR se obdobná situace opakuje okolo kmitočtu 500 MHz. Zde je ovšem pokles poměrně nevýrazný. Při simulaci FAR nedochází k interferenci přímé a odražené vlny, průběh je tedy konstantní v celém kmitočtovém rozsahu.



Obr. 6.1: Srovnání měřící vzdálenosti - vertikální polarizace

Při horizontální polarizaci (Obr. 6.2) dochází ve spodní části kmitočtového rozsahu pro obě SAR k destruktivní interferenci. Součet přímé a odražené vlny je menší než jednotlivé složky. V případě desetimetrové SAR se tento efekt projevuje výrazněji. Z toho důvodu je rozdíl obou třímetrových komor oproti desetimetrové SAR pro nižší kmitočty velmi výrazný a dosahuje hodnot více než 15 dB.



Obr. 6.2: Srovnání měřící vzdálenosti - horizontální polarizace

Z obou obrázků je patrné, že zavedená zjednodušení rozhodně neplatí v celém kmitočtovém rozsahu. Otvírá se zde tedy možnost využití alternativního přepočtu.

## 6.2 Návrh přepočtu vzdálenosti

Na evropském trhu je stále preferovaným způsobem měření v desetimetrové, částečně bezodrazové komoře. Tento typ komory je oproti třímetrové komoře výrazně nákladnější a to jak z pohledu financí, tak zastavěné plochy. Cena desetimetrové komory se pohybuje přibližně okolo 2 až 3 násobku ceny menší komory. Zanedbatelné nejsou ani nároky na prostor. Vzhledem ke své velikosti se komora nemusí vlézt na stávající pracoviště, což může mít za následek dodatečné náklady na budování nových prostor.

Z toho důvodu vznikl požadavek na realizaci měření v třímetrové komoře a jejich následný přepočet na komoru desetimetrovou. Vychází se z předpokladu, že je provedeno předcertifikační měření v menší komoře a následné finální měření u některého z oznámených subjektů. Jelikož je měření u oznámených subjektů poměrně



nákladná záležitost, je kladen důraz na co nejpřesnější měření za pomoci dostupné menší komory.

Úkolem této kapitoly je najít vhodnou metodu za pomoci které bude možné s dostatečnou přesností určit výsledky měření v desetimetrové komoře a to pouze na základě měření v komoře třímetrové.

V následující části jsou rozebrány dvě různé metody, které byly k přepočtu použity. Jednotlivé způsoby přepočtu bohužel nebylo možné prakticky realizovat z důvodu nedostupnosti desetimetrového pracoviště.

### 6.2.1 Zavedení korekce

Využitím korekčních křivek (Obr. 6.1 a 6.2) z předchozího bodu je možné poměrně snadno provést přepočet měřící vzdálenosti ze 3 metrů na 10 metrů.

V dané metodě je jako EUT použit model izotropního zářiče, což nemusí vždy přesně odpovídat realitě. V kapitole 2.5 je však za pomoci matematického modelu prokázáno, že i za použití zjednodušeného modelu lze dosáhnout uspokojivých výsledků.

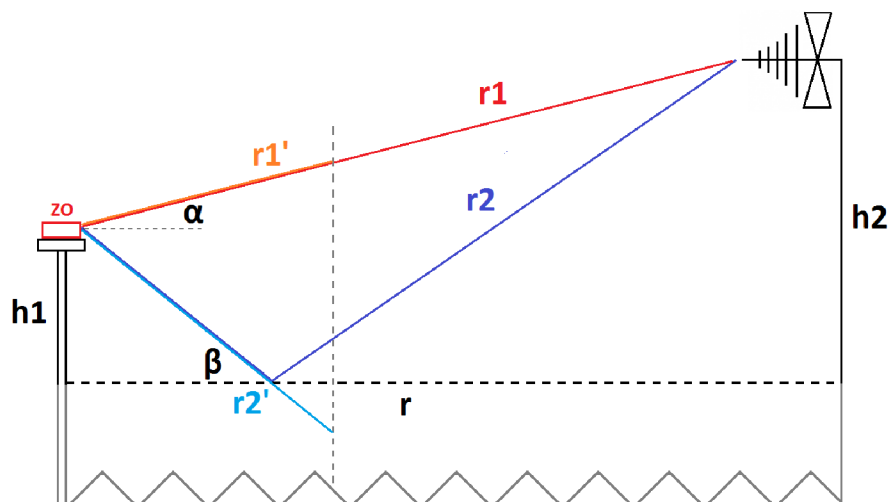
K určení nejistoty přepočtu byly provedeny opakované simulace s užitím modelu EUT z kapitoly 2.5. Průměrná odchylka od udávaného průběhu dosahovala hodnot okolo 0,7 dB. Jelikož daná chyba má obecně náhodný charakter se střední nulovou hodnotou, nelze zavést jakékoliv dodatečné korekce. Nejistota přepočtu byla na základě zmíněných simulací odhadnuta na 1 dB.

### 6.2.2 Úprava metody

Dalším přístupem, jak velmi přesně měřit teoreticky dosažitelné hodnoty v desetimetrové SAR je vhodná úprava měřícího postupu. Ve třímetrové FAR lze naměřit vyzařování ve všech potřebných směrech a vhodnou matematickou úpravou dopočítat hodnoty v desetimetrové komoře. Na následujícím obrázku (Obr. 6.3) je znázorněno upravené měřící pracoviště.

Jedinou potencionální nepřesností, se kterou se tato metoda potýká, je vliv blízkého pole. Jelikož nelze obecně definovat dominantní složku vyzařování EUT, mohlo by dojít k předem nedefinované chybě.

Princip přepočtu je uveden na obrázku 6.3. Pro daný přepočet je nutné měřit odděleně přímou a odraženou vlnu. Pomocí poměru dráhy vlny změřené ve třech metrech a v deseti metrech je možné určit dodatečný útlum. Ten je roven přibližně 10 dB. Rozdíl drah mezi přímou a odraženou vlnou definuje fázový posuv se kterým se obě vlny sečtou.



Obr. 6.3: Nákres upraveného měřícího stanoviště

Úprava pracoviště je poměrně jednoduchá. Celé pracoviště je nutné posunout o definovanou výšku směrem vzhůru. Toto se v praxi provede zvýšením výšky otočného stolu či podložením EUT vhodným materiálem, který nebude mít vliv na výsledky měření. Minimální posuv je 0,64 metru, avšak s určitou rezervou je vhodné volit posuv přibližně 1 metr. Tímto způsobem lze přímo měřit i vlnu, která by se v desetimetrové SAR odrazila od zemnicí plochy ve vzdálenosti méně než 3 metry od EUT. V navrhnutém modelu by tedy byla pod úrovní podlahy s absorberky.

Měření lze v zásadě realizovat dvěma způsoby. Prvním je proměření v celém výškovém rozsahu s definovaným krokem. Maximální měřicí výška je 1,76 metru a minimální pak -0,64 metru (vzhledem k EUT). Naměřené výsledky jsou pak uloženy do dvourozměrné matice. Každý řádek reprezentuje jeden výškový bod. Každý sloupec pak jednu frekvenci. Počet sloupců závisí na frekvenčním kroku. Výsledky měření se importují do vhodného softwaru (např. Matlab), kde se provede přepočítání a vykreslení výsledků měření.

Druhou alternativou je importování celého mechanismu přepočtu do měřícího systému. Pomocí vhodného softwaru (např. LabView či TILÉ!) lze rovnou sestavit celou měřicí proceduru. Nároky na obsluhu tedy zůstanou stejné. Zvýší se pouze měřicí čas a to na dvojnásobek. Zvýšená časová náročnost plyne z nutnosti pro každý jeden bod vždy odděleně změřit přímou a odraženou vlnu.

Při praktické realizaci lze využít určitého zjednodušení. Útlum vlivem vzdálenosti je téměř konstantně 10 dB. Rozdíl mezi SAR a FAR by měl dosahovat maximálně 6 dB při součtu vln ve stejné fázi. Výsledky naměřené ve třímetrové FAR jsou tedy

vždy minimálně o 4 dB vyšší oproti desetimetrové SAR. Pokud je skenován celý rozsah výšek zmíněný výše (-0,64 až 1,76 metru vzhledem k EUT) s dostatečně jemným krokem, neexistuje způsob jak daný předpoklad vyvrátit.

V případě předcertifikačních testů v třímetrové FAR lze tedy jednoduše využít normou zmiňované limity pro desetimetrovou SAR snížené o 4dB.

## 7 OPAKOVATELNOST A REPRODUKOVATELNOST

Primárním účelem existence přesně popsanych postupů měření v jednotlivých normách je dosažení maximální možné opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření. Pojem opakovatelnost měření se vztahuje na jedno pracoviště a jednoho pracovníka. V případě reprodukovatelnosti měření se již jedná o srovnání výsledků mezi více pracovníky, případně napříč několika pracovišti.

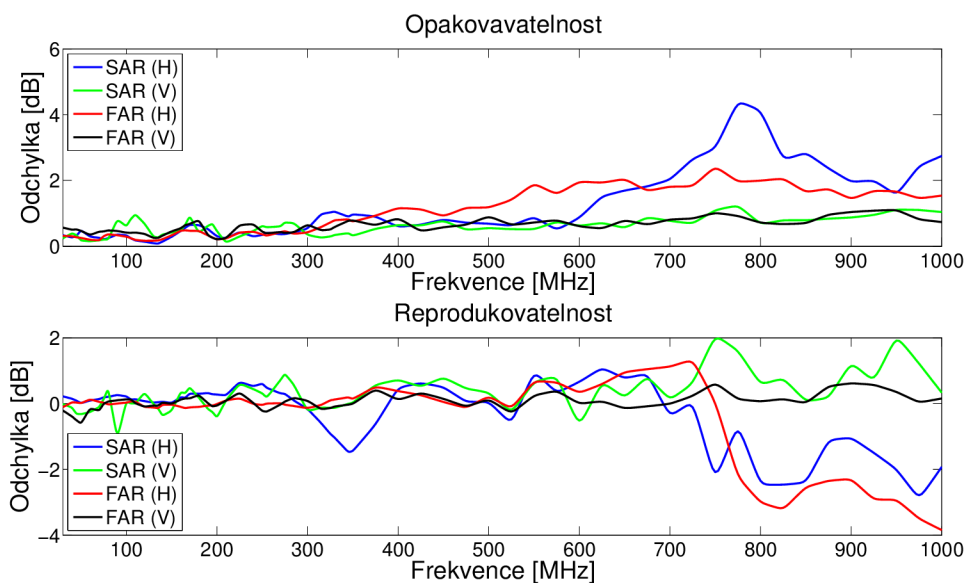
Srovnávací měření bylo realizováno za pomoci referenčních signálových generátoru a skutečných EUT z řad výrobků společnosti Honeywell. Jelikož je vyzařování reálný EUT zatíženo poměrně velkou nejistotou plynoucí z různorodosti pracovních módů, aktuální zátěži EUT a podobně, nelze tyto výsledky ve srovnání jednotlivých pracovišť využít. Reálná EUT typicky ruší pouze na několika kmitočtech, což je další důvod, proč jsou pro porovnání v celém kmitočtovém pásmu nevhodné. Z toho důvodu jsou následující výsledky založeny pouze na měření provedených referenčními signálovými zdroji.

V rámci srovnání bylo provedeno měření v částečně i plně bezodrazové komoře s náklonem i bez náklonu měřící antény. Každé měření bylo opakováno 10x v obou polarizacích pro určení opakovatelnosti. Celé měření bylo posléze opakováno jiným pracovníkem za účelem zjištění reprodukovatelnosti měření. Kmitočtový rozsah měření se pohyboval od 30 MHz do 1 GHz.

Pro prvních 5 měření se EUT nacházelo uprostřed stolu s náhodnou odchylkou  $\pm 5$  cm. Pro následujících 5 měření byl rozsah pohybu EUT po stole zvýšen na přibližně  $\pm 50$  cm. Výjimku tvořilo měření v SAR u prvního operátora, kde bylo provedeno všech 10 měření v rozsahu  $\pm 5$  cm od referenční pozice.

Opakovatelnost měření byla vyhodnocena pomocí směrodatné odchylky jednotlivých průběhů (viz Obr. 7.1). Jednotlivé zobrazené průběhy jsou vždy průměrem všech měření v dané konfiguraci. V případě SAR se jedná o měření s náklonem a bez náklonu. Ve FAR se ke dvěma zmíněným přidává ještě měření ve fixní výšce 2 metry.

Z výsledků je patrné, že vertikální polarizace v obou komorách vykazuje velmi malou směrodatnou odchylku. Měření je tedy velmi dobře opakovatelné. V případě horizontální polarizace jsou výsledky o poznání horší. Ve FAR je odchylka 2x větší a v případě SAR se odchylka lokálně blíží až ke 4 dB. Ve všech zmíněných případech se opakovatelnost měření zhoršuje s rostoucím kmitočtem.



Obr. 7.1: Opakovatelnost a reprodukovatelnost měření

Reprodukovatelnost měření byla vyhodnocena jako odchylka průměrných hodnot jednotlivých měření dvěma operátory. V případě vertikální polarizace ve FAR je reprodukovatelnost výborná. Rozdíl naměřených hodnot je přibližně 0,5 dB. U SAR jsou výsledky také příznivé. Po většinu kmitočtového rozsahu odchylka nepřekročila 1 dB.

Horizontální polarizace u obou typů komor však vykazuje poměrně výraznou odchylku, což není vzhledem k velké odchylce jednotlivých měření překvapivé. Od kmitočtu přibližně 750 MHz dosahoval rozdíl průměrné hodnoty 2,5 dB.

Pro všechna měření byl využit dřevěný stůl, což především v případě horizontální polarizace mohlo způsobit zvýšení odchylky jednotlivých měření. Z výsledků z kapitoly 3.3 lze usuzovat, že v případě použití polystyrenového stolu by odchylka jednotlivých měření mohla být přibližně poloviční.

## 8 NEJISTOTA

Tato kapitola má za úkol určit nejistotu měření v komoře společnosti Honeywell na základě naměřených dat a porovnat ji s nejistotou stanovanou v příslušné normě [6].

Teoretickým rozbořem nejistot měření se podrobně zabývá kapitola 1.4.

Tabulka 8.1 srovnává nejistoty částečně a plně bezodrazové komory ve vertikální i horizontální polarizaci. První část uvažuje doporučení dle [6] pro třímetrovou měřící vzdálenost. V další části jsou výsledné nejistoty upraveny vzhledem k reálným parametrům konkrétní komory.

|                                   | Návrh dle [6]   |                 |             | Konkrétní pracoviště |                 |             |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|----------------------|-----------------|-------------|
|                                   | SAR (V)<br>[dB] | SAR (H)<br>[dB] | FAR<br>[dB] | SAR (V)<br>[dB]      | SAR (H)<br>[dB] | FAR<br>[dB] |
| 30 MHz - 200 MHz<br>- bez náklonu | 5,17            | 5,06            | -           | 4,53                 | 4,2             | -           |
| 30 MHz - 200 MHz<br>-s náklonem   | 5,07            | 5,06            | 5,02        | 4,42                 | 4,2             | 4,86        |
| 200 MHz - 1 GHz<br>-bez náklonu   | 6,41            | 5,44            | -           | 5,52                 | 4,65            | -           |
| 200 MHz - 1 GHz<br>-s náklonem    | 5,38            | 5,35            | 5,34        | 4,27                 | 4,54            | 4,36        |

Tab. 8.1: Srovnání jednotlivých nejistot pracoviště

Vypočtená nejistota na konkrétním pracoviště je v průměru o 0,8 dB nižší, než udává norma. Výpočty se liší pouze u dvou parametrů a to nejistoty kalibrace AF, která je v konkrétním případě pouze 1,57 dB (pro  $k = 2$ ), oproti normou doporučené hodnotě 2 dB.

Dále je upravena nejistota vlivem nedokonalosti pracoviště (viz tab. 8.2) u které norma předpokládá čerpání maximální možné odchylky 4 dB. V tomto případě byla uvažována vždy nejvyšší odchylka pro danou polarizaci a kmitočtový rozsah. Použité hodnoty NSA, respektive FNSA byly určeny z měření provedeného akreditovanou laboratoří č. 0612 ze Seibersdorfu.

|                  | SAR (V)<br>[dB] | SAR (H)<br>[dB] | FAR<br>[dB] |
|------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 30 MHz - 200 MHz | 3               | 2,5             | 4           |
| 200 MHz - 1 GHz  | 1,5             | 2,5             | 2           |

Tab. 8.2: Nejistota vlivem nedokonalost pracoviště

## 9 ZÁVĚR

V první části práce je stručně nastíněna problematika elektromagnetické kompatibility (EMC) a její rozdělení. Dále je věnována pozornost vlastnostem bezodrazových komor a použitému přístrojovému vybavení. Důležitou částí práce je rozbor nejistot. A to jak z pohledu teoretického, při shrnutí obecných zákonitostí práce s nejistotami. Tak i o něco praktičtějšího, při rozboru konkrétních zdrojů nejistot při měření.

Dále se práce věnuje analýze měřícího pracoviště. Je zde podrobně popsán princip šíření elektromagnetického vlnění a výpočet intenzity elektrického pole pro různé měřící vzdálenosti. Uvažován je i vliv polarizace antén a přítomnost zemnicí desky. Taktéž je rozebrán model zkoušeného objektu, který je matematicky modelován tak, aby se co nejvíce přiblížil reálnému testovanému zařízení. V závěru kapitoly lze nalézt rozbor výšky měřící antény.

Třetí kapitola se věnuje rozboru vybraných parametrů na výsledky měření. Je zde provedena analýza vlivu natočení měřící antény. Z výsledků je patrné, že reálná měřící charakteristika můžeme do měření vnést chybu až několik decibelů. Z toho důvodu stojí za to věnovat čas minimalizaci tohoto vlivu.

Dále je pomocí programu Matlab provedena simulace měření s rozličným nastavením výškového kroku měřící antény. Z výsledků je patrné, že velikost výškového kroku je kritická především u třímetrové měřící vzdálenosti, jelikož chyba dosahuje přibližně 3x vyšších hodnot oproti desetimetrové měřící vzdálenosti. V případě kroku 100 cm dosahuje chyba měření na některých kmitočtech až 6 dB. Při snížení kroku na 50 cm chyba poklesne na přijatelnější hodnotu okolo 2 dB. Pro dosažení chyby pod 1 dB je nutné volit výškový krok antény maximálně 25 cm. Simulace byla prakticky ověřena ve třímetrové komoře.

Výrazný vliv na výsledky měření má taktéž materiál použitého stolu. Pro měření byly k dispozici stoly ze dvou materiálů. Klasický dřevěný stůl a polystyrenová alternativa. Předpoklad, že polystyrenový stůl má menší vliv na výsledky měření se potvrdil prakticky ve všech variantách, které byly testovány. Vliv stolu byl zkoumán pro obě odvětví elektromagnetické kompatibility - interference i susceptibility. V případě elektromagnetické interference vnášel stůl do měření především zvýšenou nejistotu. Ačkoliv průměrné hodnoty získané měřením na několika pozicích neprokázaly v mnoha případech zásadní dopad na měření, tak lze při zkoumání jednotlivých průběhů pozorovat výrazné lokální odchylky. V kmitočtovém rozsahu do 1 GHz vykazovalo měření při horizontální polarizaci poměrně výrazné odchylky oproti teoretickému předpokladu. Vertikální polarizace nebyla ani jedním ze materiálů výrazně ovlivněna. U kmitočtového rozsahu 1 GHz až 18 GHz dochází v naprosté většině

případů k poklesu intenzity a to maximálně o 5 dB.

V případě elektromagnetické susceptibility byly jednotlivé naměřené průběhy konzistentnější a vykazovaly jasnější trend. Polystyrenový stůl zde pro celý kmitočtový rozsah a obě polarizace vykazuje minimální vliv. To však nelze říct o stolu dřevěném. Ve vertikální polarizaci do kmitočtu 1 GHz je vliv stolu poměrně malý (do 1 dB). S rostoucím kmitočtem však klesá intenzita až k - 5 dB oproti referenční hodnotě. Horizontální polarizace vykazuje ještě výraznější pokles. Především okolo kmitočtu 1 GHz dosahuje pokles až 10 dB.

Z naměřených dat je patrné, že polystyrenový stůl je pro oba typy měření vhodnější a lze jej doporučit pro všechna měření. Výjimku tvoří měření velkých a těžkých EUT, kde polystyren naráží na svou materiálovou odolnost a omezenou nosnost.

Stěžejní část práce tvoří validace pracoviště na kterém byla realizována jednotlivá měření. Validace částečně bezodrazové komory do kmitočtu 1 GHz byla provedena měřením normalizovaného útlumu pracoviště. Kritickou částí se ukázalo měření ve vertikální polarizaci pro kmitočty do 200 MHz. Povolené tolerance bylo využito téměř bez rezervy. Výraznou odchylku okolo kmitočtu 180 MHz lze s největší pravděpodobností přisoudit nepřesnosti použitých anténních faktorů. Další výraznější odchylku vykazuje horizontální polarizace na nízkých kmitočtech do 70 MHz. Všechny ostatní průběhy se pohybují v toleranci přibližně  $\pm 2$  dB.

Od kmitočtu 1 GHz bylo pro validaci obou typů komor využito měření parametru SVSWR. Všechny měřené hodnoty splnily povolenou mez 6 dB. Odchytky jednotlivých měření klesaly s rostoucím kmitočtem. Nejvýraznější odchylku vykazovala částečně bezodrazová komora při horizontální polarizaci. Ostatní varianty na tom byly přibližně stejně.

Na závěr validačního procesu byla provedena kalibrace pole pro měření elektromagnetické susceptibility. Měření proběhlo pro 4 varianty a to plně bezodrazovou komoru a částečně bezodrazovou komoru vybavenou postupně devíti a čtyřmi absorberů. Na závěr bylo spíše informativně provedeno měření s úplnou absencí absorberů. Dle předpokladu dosáhla nejlepších parametrů plně bezodrazová komora. Částečně bezodrazová komora s užitím čtyř a devíti absorberů vykazovala velmi podobnou odchylku. Varianta s úplnou absencí absorberů vyhověla hranici 6 dB pouze pro vertikální polarizaci. V horizontální polarizaci se odchylka pohybovala mezi 5 až 10 dB, což je již nepřijatelné.

Při srovnání částečně a plně bezodrazové komory byla provedena simulace v programu Matlab, která prokázala, že rozdíl mezi SAR a FAR není konstatně 6 dB, ale mění se v závislosti na kmitočtu. Vertikální polarizace vykazuje výrazný pokles okolo kmitočtu 200 MHz, kde rozdíl dosahuje prakticky nulové hodnoty. V případě



horizontální polarice lze pro kmitočty do 100 MHz dokonce ve FAR naměřit vyšší hodnoty než v SAR, jelikož je v tomto rozsahu SAR zatížena destruktivní interferencí. Tyto skutečnosti byly prokázány praktickým měřením.

Srovnání obou typů komor bylo provedeno i na kmitočtu nad 1 GHz, kde se využívá jiných postupů. Částečně bezodrazová komora ve které byly použity absorbery mezi měřicí anténou a EUT, dosahovala obdobných výsledků jako plně bezodrazová komora. Taktéž bylo prokázáno, že pomocí výškového skenu od 1 metru do 4 metrů lze dosáhnout vyšších naměřených hodnot a to i v případě použití všesměrových referenčních signálových zdrojů. V případě užití reálných EUT u kterých lze při daných kmitočtech očekávat větší směrovost, lze očekávat rozdíl ještě výraznější.

Následující kapitola se zabývala analýzou měřicí vzdálenosti včetně diskuse možných způsobů přepočtu mezi jednotlivými měřicími vzdálenostmi. Z výsledků je evidentní, že nelze ve všech případech využít jednoduché poučky o rozdílu 10 dB mezi třímetrovou a desetimetrovou komorou. U obou měřících vzdáleností v částečně bezodrazové komoře lze narazit na kmitočet, při kterém nedojde k úplnému součtu přímé a odražené vlny ve fázi. V těchto bodech se rozdíl měření v jednotlivých komorách liší od stanovené hodnoty 10 dB. V případě vertikální polarizace se jedná kmitočtový rozsah okolo 200 MHz, respektive 500 MHz v případě desetimetrové komory. U horizontální polarizace situaci navíc komplikuje fakt, že u obou měřících vzdáleností v částečně bezodrazové komoře dochází ve spodní části kmitočtového rozsahu k čistě destruktivní interferenci přímé a odražené vlny. Rozdíly naměřených výsledků v třímetrové částečně i plně bezodrazové komoře jsou oproti desetimetrové komoře více než 15, respektive 20 dB.

V dané kapitole jsou rozebrány možnosti přepočtu měřících vzdáleností, respektive úprava měřícího pracoviště. Vzhledem k tomu, že desetimetrová komora nebyla pro měření k dispozici, nebylo možné provést praktickou zkoušku nastíněné metodiky.

Nejsnažším způsobem přepočtu je užití korekčních křivek z obrázků 6.1 a 6.2. S určitou přidanou nejistotou lze dosáhnout poměrně uspokojivých výsledků. Otázkou však zůstává, zda není vhodnější brát při daném měření v potaz spíše normou určené limity pro danou sestavu.

Zajímavější alternativou se jeví možnost užití alternativní konfigurace pracoviště. V dané sestavě je teoreticky možné naměřit hodnoty, kterých by bylo dosaženo v desetimetrové SAR. S určitým zjednodušením lze ve třímetrové FAR měřit EUT ze všech úhlů, které by se mohly promítnout do desetimetrové měřicí vzdálenosti a pak jednoduše využít limity pro desetimetrovou komoru, které jsou sníženy o 4 dB. Není důvod se domnívat, že zařízení, které projde tímto typem testu by mohlo při závěrečném měření u oznámeného subjektu v desetimetrové komoře dosahovat vyšších hodnot.

Předposlední kapitola práce se zabývala určením opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření v jednotlivých typech komor. Z výsledků je patrné, že vertikální polarizace má z pohledu opakovatelnosti i reprodukovatelnosti výrazně lepší vlastnosti. Odchylka se téměř ve všech případech drží pod hranicí 1 dB. Horizontální polarizace vykazuje od kmitočtu 500 MHz výrazné zhoršení opakovatelnosti měření. Částečně bezodrazová komora dosahuje lokálně odchylky až 4,5 dB. Reprodukovatelnost měření v horizontální polarizaci je do kmitočtu 700 MHz obdobná jako v případě vertikální polarizace. Při vyšším kmitočtu však roste odchylka až k hodnotám okolo 3 dB.

Závěrečná kapitola shrnuje rozbor nejistot z kapitoly 1.4 do přehledné tabulky. Je zde srovnání vzorových hodnot nejistot dle [6] s konkrétní kalkulací pro komoru společnosti Honeywell.

Na závěr lze dodat, že na základě realizovaných měření nelze stanovit při které polarizaci dochází k menší chybě měření. Některé parametry vykazují větší citlivost při vertikální polarizaci, jiné naopak při polarizaci horizontální.

Při srovnání jednotlivých měření realizovaných v plně a částečně bezodrazové komoře lze usoudit, že výsledky v plně bezodrazové komoře jsou obecně konzistentnější a vykazují menší rozptyl. Na druhou stranu částečně bezodrazová komora splňuje veškeré potřebné parametry a není důvod se obávat, že by pro měření byla výrazně horší. Měření v plně bezodrazové komoře je obecně komplikovanější a časově náročnější. Při běžné provozu se tedy částečně bezodrazová komora jeví jako schůdnější alternativa.

## LITERATURA

- [1] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, Tomáš FRÝZA, Jiří SVAČINA, Zdeněk KEJÍK, Václav RŮŽEK a Jiří ZACHAR. *Elektromagnetická kompatibilita: Přednášky*. Brno: Skriptum, 2010.
- [2] ČSN EN 55022 ed. 2. *Zařízení informační techniky - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření*. Duben 2007.
- [3] ČSN EN 55016-2-3, ed.3. *Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti: Část 1-4: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Antény a zkušební stanoviště pro měření rušení šířeného zářením*. 2011.
- [4] ČSN CISPR 16-1. *Specifikace metod a přístrojů pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti proti vysokofrekvenčnímu rušení - Část 1: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti proti vysokofrekvenčnímu rušení*, Česká technická norma, Český normalizační institut. Praha, červenec 2004.
- [5] ČSN CISPR 16-2. *Specifikace metod a přístrojů na měření rádiového rušení a odolnosti proti rádiovému rušení - Část 2: Metody měření rušení a odolnosti*, Česká technická norma, Český normalizační institut. Praha, říjen 2003.
- [6] CISPR 16-4-2. *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods: Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling - Measurement instrumentation uncertainty*. 2011.
- [7] CISPR 16-4-3. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-3: Zkušební a měřicí technika - Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - Zkouška odolnosti*. 2006
- [8] VAŠKO, Ondřej. *Virtuální měřicí systém pro nestandardní bezodrazové komory*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] VÍDEŇKA, Rostislav. *Některé otázky předcertifikačních testů EMC*. Brno, 2009. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility: Část 1 - Základní pojmy a členění oboru EMC*. *Elektrorevue* [online]. Brno, 2000 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00025/index.html>
- [11] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility: Část 4: Způsoby a metody měření rušivých signálů*. *Elektrorevue* [online]. Brno, 2000 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01021/index.html>

- [12] *Ets-lindgren: AntennaPatterns* [online]. 2015 [cit. 2015-5-15]. Dostupné z: <http://www.ets-lindgren.com/AntennaPatterns>
- [13] *Ets-lindgren: TILE!* [online]. 2015 [cit. 2015-5-15]. Dostupné z: <http://www.ets-lindgren.com/tile>
- [14] WILIAMS, T. *EMC for Product Designers, Fourth edition*. Elsevier Ltd, ISBN-13: 978-0-75-068170-4, 2007.
- [15] ISO/IEC Guide 98-3:2008. *Uncertainty of measurement: Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. 2008.
- [16] STECHER, Manfred a Matthias WUSCHEK. International Exhibition and Conference on Electromagnetic Compatibility: Duesseldorf, 11 - 13 March 2014.
- [17] ISO/IEC Guide 99. *International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. 2007.
- [18] ANSI C63.4. *C63.4-2014 - American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*. 2014.
- [19] S FOEGELLE, Michael. *Site Validation Theory 101: Techniques and Methods* [online]. 2000 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.ets-lindgren.com/pdf/SiteValThe.pdf>

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

|         |  |
|---------|--|
| EMC     | Electromagnetic compatibility, elektromagnetická kompatibilita   |
| EMI     | Electromagnetic interference, elektromagnetické rušení   |
| EMS     | Electromagnetic susceptibility, elektromagnetická odolnost   |
| OATS    | Open area test site, zkušební pracoviště ve volném prostoru  |
| FAR     | Full anechoic room, plně bezodrazová komora  |
| SAR     | Semi anechoic room, částečně bezodrazová komora  |
| SA      | Site attenuation, útlum stanoviště   |
| NSA     | Normalized site attenuation, normalizovaný útlum stanoviště  |
| FNSA    | Normalizovaný útlum stanoviště (FAR)   |
| SVSWR   | Site voltage standing wave ratio, poměr stojatého vlnění pracoviště  |
| AF      | Anténní faktor   |
| ZO, EUT | Zkoušené zařízení, equipment under test  |
| LPDA    | Logaritmicko-periodická anténa   |
| PSV     | Poměr stojatých vln  |
| CNE     | Comparison noise emitter   |
| ERS     | Emission reference source  |
| CE      | Conformité Européenne, prohlášení o shodě  |
| CISPR   | Comité international spécial des perturbations radioélectriques, mezinárodní výbor pro radiovou interferenci v rámci EIC |
| ANSI    | American National Standards Institute  |
| FCC     | Federal Communications Commission  |
| EN      | European Norms   |

# SEZNAM PŘÍLOH

|                              |    |
|------------------------------|----|
| A Seznam použitých přístrojů | 78 |
| B Obsah přiloženého CD       | 79 |

## A SEZNAM POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ

| Popis                | Výrobce, model                             |
|----------------------|--|
| Přijímač             | Rohde & Schwarz, ESR7 (7 GHz)              |
| Analyzátor           | Rohde & Schwarz, FSV40                     |
| Generátor            | Lindgren, EMGen (6 GHz)                    |
| Generátor            | Anritsu, MG 3682B (20 GHz)                 |
| Zesilovač            | Lindgren, 80 MHz – 1 GHz (1000 W)          |
| Zesilovač            | Lindgren, 800 MHz – 3.1 GHz (300 W)        |
| Anténa               | Lindgren, 3142E (30 MHz – 6 GHz)           |
| Anténa               | Lindgren, 3117 (1 GHz – 18 GHz)            |
| Anténa               | Lindgren, 3109 (20 – 300 MHz)              |
| Anténa               | Lindgren, 3150 (30 MHz – 1 GHz)            |
| Anténa               | Lindgren, 3106 (200 MHz – 3 GHz)           |
| Anténa               | Lindgren, 3183 (1 GHz – 18 GHz)            |
| Anténa               | A.H. Systems , SAS-510-2 (290 MHz – 2 GHz) |
| Izotropní sonda      | Lindgren, HI-6153 (10 MHz – 40 GHz)        |
| Ref. signálový zdroj | Com-power, CGO 505                         |
| Ref. signálový zdroj | Com-power, CGO 51000                       |

Tab. A.1: Seznam použitých přístrojů

## **B OBSAH PŘILOŽENÉHO CD**

Na přiloženém CD se nachází jednotlivé dílčí průběhy včetně naměřených dat. Dále pak skripty z programu Matlab, které byly využity při teoretické analýze. CD také obsahuje fotodokumentaci jednotlivých realizovaných měření.