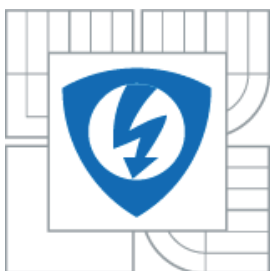




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VIRTUÁLNÍ MĚŘICÍ SYSTÉM PRO NESTANDARDNÍ BEZODRAZOVÉ KOMORY

VIRTUAL MEASUREMENT SYSTEM FOR THE ANECHOIC CHAMBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

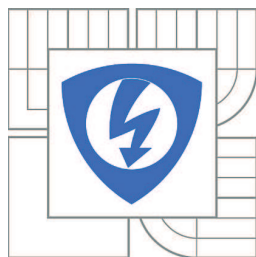
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ VÁŠKO

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ DŘÍNOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Ondřej Váško

ID: 120808

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Virtuální měřicí systém pro nestandardní bezodrazové komory

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně prostudujte možnosti měření elektromagnetického vyzařování v částečně bezodrazových EMC komorách. Dále se zaměřte na analýzu měření v komorách, které jsou plně bezodrazové. Analyzujte i vliv měřicí vzdálenosti na výsledky měření. Navrhněte systém pro přepočítání naměřených výsledků se zahrnutím transformace vzdálenosti, dále uvažujte, že rušivý signál se nešíří pouze přímou cestou. Vezměte v úvahu i polohování měřicí antény v průběhu měření.

Proveďte sadu měření testovacích rušivých signálů v EMC komoře na Ústavu radioelektroniky a to jednak s referenční zemní rovinou a také s eliminací odrazu od této roviny. Výsledky porovnejte s měřeními v profesionálních EMC zkušebnách. Navrhněte program v prostředí Matlab pro přepočítání výsledků, tak aby odpovídali platným standardům.

Navržený program realizujte a vyzkoušejte jeho vlastnosti na konkrétních příkladech rušivých signálů, se kterými je možné se v praxi setkat. Do programu dále zakomponujte i ovládání potřebných měřicích přístrojů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DŘÍNOVSKÝ, J., FRÝZA, T., SVAČINA, J., KEJÍK, Z., RŮŽEK, V., ZACHAR, J., Elektromagnetická kompatibilita - přednášky. Skriptum. Brno: VUT v Brně, 2010.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

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

Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vybranou částí v oblasti elektromagnetické kompatibility. V práci je teoreticky rozebráno, jak dochází k elektromagnetickému rušení a jak se toto rušení může šířit volným prostředím. Pro změření rušivých signálů je v práci proveden rozbor vhodných měřicích antén pro zvolené kmitočtové pásmo. Pro eliminaci okolních rušivých signálů je měření prováděno v absorpčních komorách, kde jsou nežádoucí rušivé signály potlačeny. V práci jsou uvedeny parametry přijímačů rušení a hodnoty limitů pro elektromagnetické rušení. V předkládané diplomové práci je uveden popis výpočtů výšky antény pro nalezení maximální intenzity elektrického pole pro standartní měřicí vzdálenosti. Pro navrhnuté pracoviště s transformovanou měřicí vzdáleností jsou provedeny výpočty intenzity elektrického pole se započtením parametrů měřicí antény a zkoušeného objektu. Výsledkem je stanovení korekčních křivek pro přepočet intenzity elektrického pole.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetické rušení, měřicí systém, bezodrazová komora

ABSTRACT

Master thesis examines a selected part of electromagnetic compatibility. In this work, there is theoretically discussed how electromagnetic interference appears and how is spread through free space environment. To eliminate ambient interference signals, the measurements have been performed in anechoic chamber where the undesirable interference signals were suppressed. In the thesis, there are also described parameters of EMI receivers and limits of electromagnetic interference. The description of calculations of the antenna height for finding maximum intensity of electric field strength for standard measurement distance has been made. For proposed transformed measurement distance, calculations of intensity electric field with addition of parameters measuring antenna and object under test were performed. Correction curves for conversion intensity electric field have been obtained as the result.

KEYWORDS

Electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, measurement system, anechoic chamber

VÁŠKO, O. *Virtuální měřicí systém pro nestandartní bezodrazové komory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 63 s., 0 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Virtuální měřicí systém pro nestandardní komory jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Dřínovskému Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	xi
Úvod	1
1 Elektromagnetická kompatibilita	2
1.1 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů	2
1.2 Elektromagnetická interference	3
2 Měření rušivých signálů	4
2.1 Typy šíření rušení v EMC	4
2.2 Přístroje pro měření rušivých signálů	4
2.3 Měření rušivých signálů pomocí antén	5
2.4 Parametry antén	7
3 Prostředí pro měření rušivých signálů	9
3.1 Měření na volném prostranství (OATS)	9
3.2 Útlum stanoviště	10
3.3 Měření v elektromagnetických stíněných prostorech	12
3.4 Absorpční materiály	13
4 Přehled mezí pro rušení šířené volným prostorem	16
4.1 Třídění ITE	16
4.2 Meze rušení pro kmitočty do 1 GHz	16
4.3 Měřicí přijímače a porovnání jejich detektorů	17
5 Analýza výsledků práce	19
5.1 Výpočet délky přímé a odražené vlny	19
5.2 Výpočet výšky měřicí antény	20
5.3 Fresnelův činitel odrazu	21
5.4 Fázové posuvy vlny	24
5.5 Šíření kulové vlny	26
5.6 Pre-scan měření	28
5.6.1 Měřicí vzdálenost 10 m	28
5.6.2 Měřicí vzdálenost 3 m	32

5.7	Transformované měřicí stanoviště	36
5.7.1	Vertikální polarizace.....	37
5.7.2	Horizontální polarizace.....	42
6	Výpočty se směrovými charakteristikami	46
6.1	Vertikální polarizace	47
6.2	Horizontální polarizace	50
7	Simulace v bezodrazové komoře	54
8	Program pro měření rušivých signálů	57
9	Závěr	60
	Literatura	62
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	63

Seznam obrázků

Obr 1.1.: Obrázek základního řetězce v EMC (převzato z [1])	2
Obr 2.1.: Anténa „Bilog“ v různých typech provedení bikónické části (převzato z [2])..	6
Obr 2.2.: Možné provedení antény HyperLOG (převzato z [7])	7
Obr 3.1.: Pohled na rozměry stanoviště pro měření rušivých signálů (převzato z [5])	9
Obr 3.2.: Doporučené rozměry a tvar zemní plochy normou (převzato z [1])	10
Obr 3.3.: Zobrazení měřicího stanoviště při zjišťování jeho útlumu (převzato z [1])	11
Obr 3.4.: Tvorba bezodrazové stěny materiálem o impedanci volného prostoru (převzato z [1]).....	14
Obr 3.5.: Jednotlivé vrstvy dielektrického materiálu (převzato z [1]).....	14
Obr 3.6.: Boční pohled na absorbér jehlanovitého tvaru (převzato z [5])	15
Obr 5.1.: Zjednodušený náčrt měřicího stanoviště	19
Obr 5.2.: Odraz vlny na rozhraní dvou prostředí – kolmá polarizace (převzato z [9])...	22
Obr 5.3.: Argumentová charakteristika činitele odrazu pro zvolené kmitočtové pásmo	23
Obr 5.4.: Modulová charakteristika činitele odrazu pro zvolené kmitočtové pásmo	24
Obr 5.5.: Závislost intenzity elektrického pole pro stanovené výšky měřicí antény, D = 10m	29
Obr 5.6.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, D = 10m.....	29
Obr 5.7.: Závislost intenzity elektrického pole pro stanovené výšky, D = 10m.....	30
Obr 5.8.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, D = 10m.....	31
Obr 5.9.: Vykreslení závislosti intenzity elektrického pole na frekvenci pro obě polarizace	31
Obr 5.10.: Zobrazení chyby přijaté intenzity elektrického pole v závislosti na frekvenci pro obě polarizace	32
Obr 5.11.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, D = 3m.....	33
Obr 5.12.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, D = 3m.....	33
Obr 5.13.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, D = 3m.....	34
Obr 5.14.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, D = 3m.....	34
Obr 5.15.: Vykreslení závislosti intenzity elektrického pole na frekvenci pro obě polarizace, D = 3m	35
Obr 5.16.: Srovnání chyby přijímané intenzity pole v závislosti na frekvenci pro obě polarizace, D = 3m	35
Obr 5.17.: Upravené rozměry měřicího stanoviště	36
Obr 5.18.: Závislost maximální intenzity elektrického pole na frekvenci, D = 3m.....	37

Obr 5.19.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 3\text{m}$	38
Obr 5.20.: Závislost normovaného dráhového rozdílu na frekvenci, $D = 3\text{m}$	38
Obr 5.21.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 3\text{m}$	39
Obr 5.22.: Závislost intenzity pole na frekvenci pro dvě výšky měřicí antény, $D = 3\text{m}$	39
Obr 5.23.: Závislost chyby přijaté intenzity pro dvě měřicí výšky, $D = 3\text{m}$	40
Obr 5.24.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci pro dvě posunutí, $D = 3\text{m}$	40
Obr 5.25.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci pro dvě posunutí měřicí antény, $D = 3\text{m}$	41
Obr 5.26.: Závislost chyby přijaté intenzity elektrického pole na frekvenci pro dvě posunutí měřicí antény, $D = 3\text{m}$	41
Obr 5.27.: Závislost maximální intenzity elektrického pole na frekvenci, $D = 3\text{m}$	42
Obr 5.28.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 3\text{m}$	42
Obr 5.29.: Závislost normovaného dráhového rozdílu na frekvenci, $D = 3\text{m}$	43
Obr 5.30.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci při dvou výškách měřicí antény, $D = 3\text{m}$	43
Obr 5.31.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci při dvou výškách měřicí antény, $D = 3\text{m}$	44
Obr 5.32.: Zobrazení chyby přijaté intenzity elektrického pole na frekvenci, $D = 3\text{m}$..	44
Obr 6.1.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, pevné výšky měřicí antény	47
Obr 6.2.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, pevné výšky měřicí antény	48
Obr 6.3.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, polohování měřicí anténou	48
Obr 6.4.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, polohování měřicí anténou	49
Obr 6.5.: Závislost korekční křivky Y na frekvenci	49
Obr 6.6.: Závislost korekční křivky Y10 na frekvenci	50
Obr 6.7.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, pevná výška antény	51
Obr 6.8.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, pevná výška	51
Obr 6.9.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, polohování výšky antény	52
Obr 6.10.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, polohování výškou antény	52
Obr 6.11.: Závislost korekční křivky Y na frekvenci	53
Obr 6.12.: Závislost korekční křivky Y10 na frekvenci	53
Obr 7.1.: Návrh komory pro simulaci v programu CST Microwave	54
Obr 7.2.: Signál, kterým je buzen port	54
Obr 7.3.: Průběh intenzity elektrického pole přijatý sondami	55

Obr 7.4.: Šíření vlny v prostoru komory při $f = 100\text{MHz}$ a při $f = 1000\text{MHz}$	56
Obr 8.1.: Nastavení parametrů měřiče rušení	57
Obr 8.2.: Další nastavení přijímače pro měření rušení	58
Obr 8.3.: Nastavení rozsahu frekvenčního měření	58
Obr 8.4.: Výsledný program pro měření rušení	59

Seznam tabulek

Tab 4.1.: Přehled mezí rušení pro jednotlivá kmitočtová pásma u ITE třídy A	16
Tab 4.2.: Přehled mezí rušení pro jednotlivá kmitočtová pásma u ITE třídy B	17
Tab 4.3.: Požadavky šířky pásma u měřicích přijímačů pro různé detektory (převzato z [4]).....	18
Tab 4.4.: Vstupní impedance přijímače (převzato z [4])	18
Tab 4.5.: Časy pro nabíjecí a vybíjecí konstanty u kvazišpičkového detektoru (převzato z [4]).....	18
Tab 5.1.: Doporučené hodnoty výšky měřicí antény pro pre-scan měření	28

Úvod

Práce je pojata jako teoretický rozbor problematiky v oblasti elektromagnetické kompatibility (EMC). Hlavním cílem je zaměření na provedení měření elektromagnetického vyzařování v částečně bezodrazových EMC komorách. V dokumentu je uveden přehled základního rozdělení problematiky EMC. Měření jednotlivých rušivých signálů je prováděno pomocí měřicích antén. V práci je uvedeno několik vhodných typů antén včetně jejich základních vlastností. Pro různá provedení bezodrazových komor jsou v práci shrnuty podstatné parametry.

V práci jsou rozebrány výsledky práce, kde je řešen návrh výpočtu výšky měřicí antény pro získání maximální intenzity pole pro stanovené kmitočtové pásmo pro standartní měřicí vzdálenosti a transformované měřicí stanoviště. Do výpočtů byly zahrnuty i směrové charakteristiky antény.

1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) je schopnost zařízení, systému či přístroje správně fungovat i v prostředí, v němž působí i jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé) a zároveň však svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nesmí nepřípustně ovlivňovat své okolí, tzn. nesmí produkovat signály, jež by byly nepřípustně rušivé pro jiná zařízení (technická či biologická). Elektromagnetická kompatibilita vznikla jako samostatná vědeckotechnická disciplína v šedesátých letech 20. století v USA. Poměrně dlouhou dobu 10 až 15 let byla elektromagnetická kompatibilita předmětem zájmu jen úzkého okruhu odborníků v elektronice, pracujících ve vojenském a kosmickém průmyslu [1].

Název „elektromagnetická kompatibilita“, z něhož pochází i mezinárodní zkratka EMC, vyjadřuje tedy schopnost současné správné funkce, tj. koexistence zařízení nebo systému nacházejících se ve společném elektromagnetickém prostředí bez závažného ovlivňování jejich normálních funkcí. Problematiku EMC lze dělit do mnoha hledisek. Nejzákladnějším dělením je Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů a Elektromagnetická kompatibilita technických systémů [1].

1.1 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

Elektromagnetická kompatibilita technických systémů a zařízení se zabývá vzájemným působením a koexistencí technických prostředků, zejména elektrotechnických a elektronických přístrojů a zařízení. Při zkoumání jednotlivých problémů EMC je třeba mít vždy na paměti, že EMC je oborem výrazně aplikačním a systémovým. Koncepte a principy EMC lze tedy vždy chápat jako jednu oblast praktické aplikace obecných principů elektrotechniky a elektroniky [1]. Při zkoumání EMC u zařízení či systému (technického nebo biologického) se vychází z tzv. základního řetězce EMC znázorněného na obr. 1.1. Tento řetězec zdůrazňuje systémový charakter problematiky EMC, kdy v obecném případě vždy vyšetřujeme všechny tři jeho složky [2].



Obr 1.1.: Obrázek základního řetězce v EMC (převzato z [1])

První oblastí zdrojů elektromagnetického rušení zahrnuje zkoumání obecných otázek mechanismů vzniku rušení, jeho charakteru a intenzity, do které zahrnujeme tzv. přírodní (přírozené) zdroje rušivých signálů. Dále tzv. umělé zdroje rušení, tedy zdroje vytvořené lidskou činností, mezi které jsou zařazeny např. zapalovací systémy, elektrické motory, výroba, přenos a distribuce elektrické energie, elektronická zařízení, elektronické sdělovací prostředky, tepelné a světelné spotřebiče apod. Druhá oblast se zabývá elektromagnetickým přenosovým prostředím a vazbami, tj. způsoby a cestami jakou se šíří energie od zdrojů do objektů – přijímačů rušení. Třetí oblastí je oblast měřičů či přijímačů rušení zabývající se klasifikací typů a podrobnou specifikací rušivých účinků na základě analýzy konstrukčních a technologických parametrů zařízení a z toho plynoucí jejich elektromagnetickou odolností [2].

1.2 Elektromagnetická interference

Elektromagnetická interference (EMI) je proces při kterém se signál generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů či zařízení. Tato oblast se zabývá především identifikací, dále popisem a měřením rušivých signálů společně s identifikací parazitních přenosových cest. Elektromagnetická interference se týká hlavně příčin rušení a jejich odstraňování [1].

2 Měření rušivých signálů

Právě měření rušivých signálů v oblasti elektromagnetické kompatibility patří k nejdůležitějším. Představuje praktické ověření EMC u navrženého systému či zařízení z hlediska jeho vyzařování elektromagnetického záření. Vzhledem k nemožnosti dosažení dokonalé elektromagnetické kompatibility u žádného zařízení či systému, je nutné stanovit a měřením ověřit maximální přípustné hodnoty vyzařování rušivých signálů u daného zařízení [1].

Vzhledem k tomu, že při měření či testování zařízení může zařízení pracovat v mnoha pracovních podmínkách, je třeba, aby měření bylo reprodukovatelné a již získané výsledky mohly být srovnávány s nově naměřenými. Proto veškerá měření, jejich pracovní postupy, metody, podmínky i použité měřicí přístroje jsou specifikovány a předepsány příslušnými mezinárodními normami, případně národními normami a regulačními předpisy. Mějme na vědomí, že problematika EMC je natolik rozsáhlá, že i měřicí zařízení může (a nemusí) být zdrojem a současně přijímačem rušivých signálů. Postup měření rušivých signálů a volba vhodného měřicího zařízení je závislá na způsobu šíření těchto signálů, které mohou vstupovat resp. vystupovat z měřicího zařízení [1].

2.1 Typy šíření rušení v EMC

Přenos vedením – napájecí či datové vedení pro dané zařízení. Měřenými veličinami, kterými v tomto případě charakterizujeme elektromagnetické rušení, mohou být rušivé napětí U_r , rušivý proud I_r či rušivý výkon P_r signálu.

Přenos elektrickou či magnetickou vazbou – blízkým elektromagnetickým polem. Přenos mezi dvěma objekty či zařízeními. Parazitní vazba je zde charakterizována jako intenzita rušivého elektrického pole E_r nebo intenzita rušivého magnetického pole H_r .

Přenos vyzařováním elektromagnetických vln – vzdáleným elektromagnetickým polem. Projevuje se především mezi vzdálenými objekty či zařízeními na vyšších radiových kmitočtech. Charakteristickými měřenými veličinami jsou intenzita rušivého elektrického či magnetického pole, tedy E_r či H_r . Měřenou veličinou může být i hustota vyzařovaného výkonu P_r , což je velikost Poyntingova vektoru rušivého signálu. [1]

2.2 Přístroje pro měření rušivých signálů

Možné přístroje, kterými jsou v oblasti EMC prováděny veškerá měření rušivých signálů, jsou nazývány měřiče rušení. Měřič rušení je zpravidla selektivní mikrovoltmetr, spektrální analyzátor či speciální měřič rušení pro požadovaný frekvenční rozsah. Měřená rušivá veličina je napětí U_r , proud I_r , výkon P_r signálů či intenzity elektrického pole E_r , případně intenzity magnetického pole H_r jsou snímány vhodným senzorem a následně převedeny na napětí U , které je měřičem rušení měřeno. Používanými senzory (snímači) v technice EMC jsou umělá síť LISN, napěťová sonda NS, proudová sonda PS, absorpční kleště AK pro měření vedených rušivých signálů.

Pro měření rušivých signálů způsobené vyzařování se používají různé typy měřicích antén podle požadovaného měřicího rozsahu [1].

Měřič uskutečňuje vlastní měření výstupního rušivého napětí z výstupu senzoru, jeho kvantitativní vyhodnocení a případné srovnání s mezemi vyzařování zkoušeného objektu podle příslušných norem. Mnohem častěji se vyskytují signály s neharmonickým průběhem. Naměřené výsledky jsou proto závislé na použitém měřiči rušení, na jeho šířce pásma, modulové a argumentové charakteristice pro vysokofrekvenční i nízkofrekvenční část, dále pak na nabíjecích a vybíjecích konstantách detektoru. V zájmu reprodukovatelnosti měření musí být použity přístroje, které jsou mezinárodně standardizovány [2].

Velmi často používaným měřičem elektromagnetického rušení, splňující normu [4], je měřič koncipovaný jako speciální selektivní mikrovoltmetr na superheterodenním principu. Na kvalitní měřič rušení jsou kladeny následující požadavky:

- vysoká citlivost a nízký vlastní šum pro možnost měřit i nízké úrovně rušivých napětí;
- možnost spojitého přeladování v širokém kmitočtovém pásmu – minimálně od 9 kHz do 18 GHz;
- velký dynamický rozsah (větší jak 40 dB) a vysoká přebuditelnost, která umožňuje v lineárním režimu měřit vysoké úrovně rušivého napětí;
- různé typy detektorů pro různé typy vyhodnocování rušivých napětí v souladu s normami;
- kvalitní elektromagnetické stínění měřiče i jeho dílčích bloků z důvodu vysoké odolnosti vnitřního i vnějšího rušení [1].

Další měřič rušení je nazýván spektrální analyzátor. Pro použití měření v EMC musí splňovat normu [4]. Jeho předností je zobrazovací displej, na kterém je možno přímo sledovat rušivé napětí v daném kmitočtovém rozsahu. Norma [4] klade za povinnost tomuto analyzátoru splňovat požadavky o definované šířce propustného pásma, vstupní impedanci, selektivitu či účinnost stínění. Některé spektrální analyzátory nejsou vybaveny vstupním preselektorem (jsou širokopásmové), dále nedosahují tak velkého dynamického rozsahu ani tak vysoké citlivosti jako měřiče rušení. Tento nedostatek má za následek zejména zkreslené měření výsledků pro impulsní měření [2].

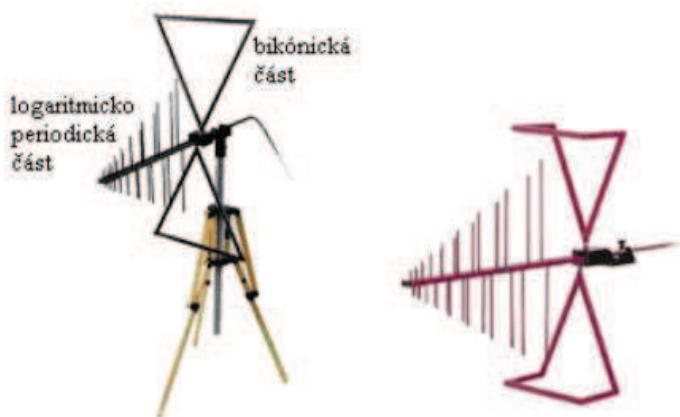
V poslední době je zájmem světových výrobců, aby prováděli při vývoji kombinaci hlavních předností měřičů rušení a spektrálních analyzátorů. Vznikají tak vysoce kvalitní měřicí přijímače se širokopásmovým rozmítáním kmitočtů a přesným zobrazováním kmitočtového spektra. Nové spektrální analyzátory jsou vybaveny vstupním vysokofrekvenčním preselektorem a mohou pracovat na diskretních kmitočtech [1].

2.3 Měření rušivých signálů pomocí antén

Základním předpokladem pro správné měření je to, aby měřicí zařízení přijímalo pouze rušivé signály vysílající zkoušený objekt (ZO) a nebylo ovlivňováno dalšími rušivými zdroji (umělé či přírodní). Další nutnou podmínkou správného a znovu reprodukovatelného měření je uspořádání a prostorové řešení měřicího stanoviště a jeho nejbližšího okolí [1].

Měření rušivých signálů lze provádět od 9 kHz – 6000 MHz. Polarizace elektromagnetického pole v testech EMC je povolena pouze lineární. Pro měření elektromagnetického rušení šířícího se ve volném prostředí má měření význam v oblasti vyšších kmitočtu od 30 MHz výše. Pro různá kmitočtová pásma je nutno využít různých konstrukcí antén. U nejnižšího kmitočtového pásma 9 kHz – 150 kHz, kde rušivé signály způsobuje magnetická složka, je používána **rámová (smyčková) anténa** o maximálních rozměrech 60 x 60 cm. Anténou pro měření rušivých signálů ve frekvenčním pásmu 150 kHz – 30 MHz je používána **tyčová anténa**, tzv. monopól. Délka antény je 1 m a měří rušivé elektrické pole E_r . Měření touto anténou v blízkém poli je nepřesné, kde tuto nepřesnost způsobuje i přímá kapacitní vazba mezi anténou a zdrojem rušení. Proto pro přesnější měření intenzity elektrického pole je nahrazena **symetrickou dipólovou anténou**. V pásmu 30 MHz – 80 MHz se jako měřicí anténa uplatňuje **symetrický půlvlnný dipól**, jehož rezonanční délka je nastavená na kmitočet 80 MHz. Tento typ antény je hojně využíván do kmitočtu 1000 MHz jako referenční neboli kalibrační anténa. Je nutné však použít více dipólů pro různé kmitočtové rozsahy. Nevýhodou může být délka ramene, která musí být nastavena na měřený kmitočet. Nastavení je provedeno změnou délky ramene a je nutno provést přizpůsobení dipólu k napájecí pomocí vhodného přizpůsobovacího obvodu. Pro měření rušivých signálů v kmitočtovém pásmu od desítek MHz – 2000 MHz se používají širokopásmové antény typu **bikónické antény**, **logaritmicko-periodické antény** a **kónicko-logaritmické antény** [1].

Nejrozšířenější měřicí anténou v pásmu 200 MHz – 6000 MHz se stala logaritmicko-periodická anténa, jenž je tvořena řadou vhodně napájených rezonančních unipólů. Délky unipólů a vzájemné vzdálenosti jsou pro sousední prvky v pevném poměru daném podílem logaritmů jejich rezonančních kmitočtů. Anténa přijímá elektrickou složku E_r rušivého elektromagnetického pole s lineární polarizací. Měření probíhá vždy v té rovině, ve které je intenzita rušivého pole největší. Velkou snahou výrobců bylo, aby měření v oblasti EMC pro kmitočtové pásmo 30 MHz – 6000 MHz bylo „pokryto“ jednou anténou. Toto bylo splněno po představení antény „BiLog“, kterou vyrábí např. společnost CHASE.



Obr 2.1.: Anténa „BiLog“ v různých typech provedení bikónické části (převzato z [2])

Anténa HyperLOG je aktivní směrová logaritmicko-periodická anténa, která nejčastěji pracuje v pásmu 400 MHz až několik GHz. Jednou z předností oproti anténě Bilog (obr. 2.1) je její malý rozměr. Typický zisk antény je 44 dBi, možnost bateriového napájení [7].



Obr 2.2.: Možné provedení antény HyperLOG (převzato z [7])

Cílem těchto antén na obr. 2.1 bylo zvětšit širokopásmovost složených antén a zlepšit vybrané elektrické vlastnosti zejména v oblasti nízkých kmitočtů. S tímto zlepšením je spojována pouze bikónická část antény. Je tedy splněno, že pro měření se uplatňuje jedna anténa. Tento typ antény je nutno kalibrovat srovnáním výsledků s laděným půlvlnným symetrickým dipólem. Tento typ antény bude použit i pro měření rušivého pole v této práci, neboť je předpokládáno měření v kmitočtovém pásmu 30 MHz – 1000 MHz [1].

2.4 Parametry antén

Pro měření elektrického pole je vztah mezi velikostí intenzity pole a velikostí výstupního napětí antény udáván pomocí tzv. anténního faktoru (AF)

$$AF = \frac{E_r}{U_r} [1/m] , \quad (2.1)$$

kde E_r představuje intenzitu elektrického pole, U_r velikost rušivého napětí.

Totéž lze zapsat pro magnetické pole

$$AF_H = \frac{H_r}{U_r} \text{ [S/m]}, \quad (2.2)$$

kde H_r představuje intenzitu magnetického pole, U_r velikost rušivého napětí.

Magnetická antény jsou obvykle kalibrovány přes ekvivalentní elektrické pole. Pro rovinnou vlnu ve vzduchovém prostředí je elektrická a magnetická složka vázána přes charakteristickou impedanci Z_0

$$Z_0 = \frac{E_r}{H_r} = 120\pi. \quad (2.3)$$

Po dosazení do AF ze vztahu (2.3) lze psát

$$AF[\text{dB/m}] = AF_E[\text{dB/m}] = AF_H[\text{dBS/m}] + 20 \cdot \log Z_0 = AF_H[\text{dBS/m}] + 51,5 \text{ dB}. \quad (2.4)$$

Výhodou při užití anténního faktoru je to, že při výpočtu intenzity pole E_r [dBV/m] je nutné velikost rušivého napětí U_r [dBV] sčítat s hodnotou anténního faktoru dle (2.5)

$$E_r[\text{dBV/m}] = U_r[\text{dBV}] + AF[\text{dB/m}]. \quad (2.5)$$

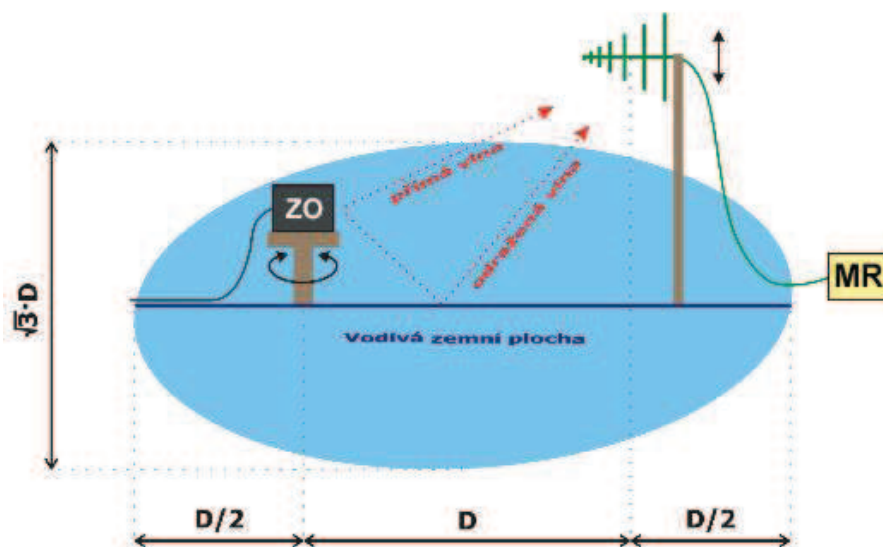
Skutečná hodnota anténního faktoru závisí na mnoha dalších parametrech na měřicím stanovišti. Parametry, na nichž hodnota AF závisí, jsou např. výška přijímací antény nad zemí, odrazivosti signálů od země, přítomnosti jiných signálů, polarizaci antén nebo měřicí vzdálenosti zdroje rušení a měřicí antény apod.

3 Prostředí pro měření rušivých signálů

Pro měření rušivých signálů v EMC jsou přípustné dvě prostředí, které musí splňovat normu [4] a [5]. Základní rozdělení je na prostředí na volném prostranství OATS (open area test site) a prostředí v elektromagneticky stíněných komorách. Stíněné komory jsou dále děleny na částečně bezodrazové komory SAC (semi-anechoic chamber) a plně bezodrazové komory FAC (fully anechoic chamber). Velkou nevýhodou stíněných komor oproti měření rušivých elektromagnetických signálů ve volném prostředí je jejich vysoká pořizovací cena [1].

3.1 Měření na volném prostranství (OATS)

Dosažené výsledky měření na volném prostranství jsou zcela závislé na místě měření. Dle normy [5] musí mít měřicí stanoviště tvar půdorysné elipsy s nutností dodržení minimálních rozměrů uvedených na obr. 3.1.

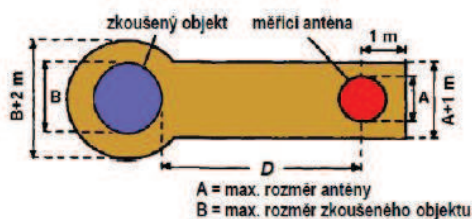


Obr 3.1.: Pohled na rozměry stanoviště pro měření rušivých signálů (převzato z [8])

Měřicí vzdálenost D , předepsána normou, musí nabývat hodnot 3 m, 10 m, 30 m nebo 100 m. Celková délka měřicího stanoviště je pak dvakrát větší než vzdálenost mezi zkoušeným objektem (ZO) a měřicí anténou. Tvar elipsy zemní plochy je určen proto, že každá vlna vyslaná zkoušeným objektem a následně přijatá měřicí anténou, která se odrazí od kraje zemní plochy, urazí přesně dvojnásobnou dráhu v porovnání s přímou vlnou. Dokonalá plocha za okrajem elipsy způsobí, že měřicí anténa přijme tuto vlnu s poloviční intenzitou oproti intenzitě vlny přímé. V praxi je vyzkoušeno, že právě na okrajích měřicího stanoviště (elipsy) nebývají dokonale odrazná místa. Proto je

intenzita odražené vlny často menší než 6 dB vůči vlně přímé. Toto vyplývá z definice, kde platí, že intenzita vzdáleného pole antény je nepřímo úměrná dráze vlny od zdroje rušení [1], [9].

Jako vodivá zemní plocha se používá kovová plocha. „Stálá“ zemní plocha je nutností z tohoto důvodu, aby odražená vlna měla stále stejné podmínky odrazu a mohlo být provedeno případné další měření za stejných podmínek. V případě nepoužití zemní plochy je nezbytná kontrola odrazných vlastností půdy a povětrnostních podmínek během měření. Toto opatření je z důvodu reprodukovatelnosti měření. Doporučený tvar a minimální zemní plochy udané normou [4] jsou zobrazeny na obr. 3.2.



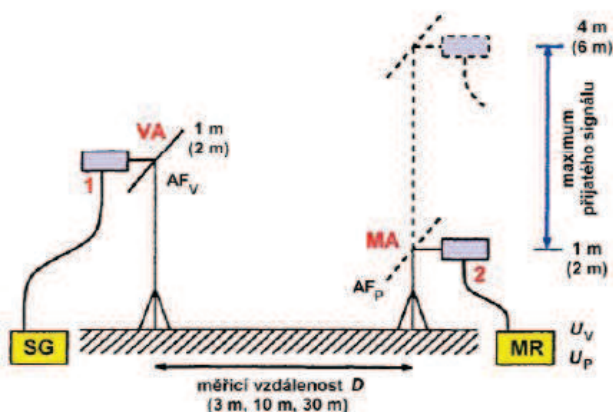
Obr 3.2.: Doporučené rozměry a tvar zemní plochy normou (převzato z [1])

V praxi je měření prováděno na takovou vzdálenost dle normy jakou povolují podmínky terénu. Zkušební stanoviště musí být na rovném terénu a nesmí v něm být budovy, elektrická vedení, stromy ani jiné elektromagnetické odrazné plochy. Není dovoleno měření provádět ani tam, kde jsou podzemní měření či potrubí, dokonce se v místě měření nesmí vyskytovat silná elektromagnetická pole. Je žádoucí, aby „okolní“ rušení byla nejméně 20 dB pod měřicí úroveň od zkoušeného objektu. Není-li toto splněno, je nutné mapovat okolní spektrum rušivých polí a zahrnout do výsledků měření. Zkoušený objekt (do celkového objemu 1 m^3) musí být umístěn na nekovovém otočném stole ve výšce 80 cm nad zemí. Při měření je nutno ZO otočit do polohy, kdy je měřené rušivé napětí U_r anténou maximální [1].

V místě příjmu získáváme výslednici přímé a odražené vlny (odraz od zemní plochy) elektromagnetického rušení. Vzájemná fáze vln a tedy i výsledné intenzity vln je závislá na výšce přijímací antény. V oblasti EMC se při měření snažíme postihnout tzv. **nejhorší případ**, kde je nutno dle obr. 3.1 nastavit takovou výšku měřicí antény v závislosti na měřicí vzdálenosti D , aby byla změřena maximální hodnota rušivého napětí U_r . Celé měření se provádí pro obě polarizace měřicí antény, případně v té, kde je hodnota rušivého napětí vyšší [1].

3.2 Útlum stanoviště

Způsobnost zkušebního stanoviště je ověřována dle útlumu stanoviště SA (site attenuation). Tato hodnota vyjadřuje, zda hodnota stanovená teoretickým výpočtem daného stanoviště (SA_t) a praktickým měřením na stanovišti (SA_m) v daném kmitočtovém rozsahu je vyhovující podle normy [5]. Tato norma dovoluje maximální přípustnou odchylku $|SA_m - SA_t| \leq 4 \text{ dB}$. Při měření je nutné pracovat na stanoviště dle obr. 3.3 [1].



Obr 3.3.: Zobrazení měřicího stanoviště při zjišťování jeho útlumu (převzato z [1])

Měření útlumu stanoviště dle obr. 3.3 probíhá tak, že nejprve je místo zkoušeného objektu k signálnímu generátoru (SG) připojena vysílací anténa (VA) umístěná ve výšce 1 m nebo 2 m napevno. Při prvním měření jsou oba napájecí kabely odpojeny z míst 1 a 2 a spojeny pomocí spojky k sobě – dojde k přímému spojení signálního generátoru a měřiče rušení (MR). Je změřeno napětí U_v . Druhé měření je provedeno způsobem, že napájecí kabely jsou připojeny k vysílací anténě, respektive k měřicí anténě (MA). S měřicí anténou je polohováno v rozsahu 1 – 4 m (pro měřicí vzdálenosti 3 a 10 m) do doby, než je pomocí měřiče rušení nalezena nejvyšší hodnota napětí U_p . Polarizace obou antén musí být při měření stejná (vůči zemní rovině). Normou [5] je doporučováno měření nejprve provádět v horizontální polarizaci. Citlivost této polarizace je menší na případné nerovnosti (anomalie) zemní plochy. Proto se výsledná vhodnost posuzuje podle měření ve vertikální rovině (někdy náročnější) [1], [5]. Útlum stanoviště je pak roven:

$$SA_m = 20 \cdot \log \left(\frac{U_v}{U_p} \right) [dB]. \quad (3.1)$$

Pro teoretický výpočet útlumu stanoviště lze vyjít z následujícího vztahu:

$$P_r = P_v \cdot G_{VA} \cdot G_{MA} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2, \quad (3.2)$$

kde P_r , P_v představují činný výkon rušivého signálu přijatý anténou a činný výkon vysílače (zdroje rušení), G_{VA} , G_{MA} jsou zisky vysílací a měřicí antény, λ je vlnová délka a r je vzdálenost měřicí antény od zdroje rušení.

Vztah (3.2) udává souvislost mezi výkonem vysílaného signálu P_v a výkonem signálu na výstupu měřicí antény P_r . Lze z toho určit útlum stanoviště mezi vysílací a přijímací anténou:

$$SA_t = 10 \cdot \log \frac{P_v}{P_r} = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 - 10 \cdot \log(G_{VA} \cdot G_{MA}), \quad (3.3)$$

kde D představuje měřicí vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou.

Vztah je dále upraven a přepsán:

$$SA_t [\text{dB}] = 20 \cdot \log D[\text{m}] + 20 \cdot \log f[\text{MHz}] - G_{VA} [\text{dB}] - G_{MA} [\text{dB}] - 27,6 - R [\text{dB}], \quad (3.4)$$

kde R představuje korekční činitel vyjadřující vliv odražené vlny na útlum stanoviště a má tvar:

$$R = 10 \cdot \log \left(1 - \frac{D}{D_R} \right) [\text{dB}]. \quad (3.5)$$

Pro různé vzdálenosti D a výšky měřicí antény nabývají hodnoty korekčního činitele R , při praktických výpočtech se využívá střední hodnoty R pro danou měřicí vzdálenost D , D_R je celková dráha odražené vlny.

Pro měření útlumu zkušebního pracoviště se využívají laděné symetrické dipóly s délkou ramene pro příslušný kmitočet. Dipóly se používají jak na vysílací straně, tak na přijímací. Tyto dipóly mají zisk $G_{VA} = G_{MA} = 2,15 \text{ dB}$. Po dosazení zisků do vztahu (3.4) dostaneme teoretický útlum stanoviště:

$$SA_t [\text{dB}] = 20 \cdot \log D[\text{m}] + 20 \cdot \log f[\text{MHz}] - 31,9 - R [\text{dB}], \quad (3.6)$$

kde D je měřicí vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou, f měřicí frekvence a R je korekční činitel.

Ke vztahu (3.6) je v praxi přidávána hodnota $0,5 \text{ dB}$. V této hodnotě je zahrnut průměrný odhad vložných útlumů symetrizačních členů obou dipólů [1], [5].

3.3 Měření v elektromagnetických stíněných prostorech

Nevýhodou měření ve volném prostranství je v dnešní době velká přítomnost vnějších elektromagnetických rušivých polí. Ty mohou být natolik silné, že překrývají měřené úrovně signálů a tím znemožňují měření. Signály, které mohou způsobovat rušení v místě měření, mohou být signály z TV a rozhlasových vysílačů, radiolokátorů, radiotelefonů nebo wifi sítě. Pro potlačení těchto rušivých signálů a příjmu pouze rušivých signálů ze zkoušeného objektu se doporučuje měření provádět v tzv. elektromagneticky stíněných komorách [2], [5].

Elektromagneticky stíněná komora je uzavřený prostor, který nám zajišťuje příjem pouze signálů šířících se zkoušeného objektu vně komory. Tento uzavřený prostor je obložen pomocí ocelových desek včetně dveří či větracích otvorů apod. Každý otvor „navíc“ snižuje celkovou účinnost stínění. Kvalitní komory musí dosáhnout útlumu $80 - 120 \text{ dB}$ pro vnější signály. Zcela dokonalou konstrukcí tento útlum lze dosáhnout až

pro 5 dekád frekvenčního rozsahu (např. 10 kHz – 1 GHz). Dalšími požadavky pro měření rušivých signálů jsou rozměry komory, kde je nutno zajistit potřebnou šířku komory z důvodu dosažení eliptického tvaru pro měřicí vzdálenosti D a výšky komory z důvodu polohování měřicí antény v rozsahu 1 – 4 m, případně 2 – 6 m [1], [5].

Problém stíněné komory je to, že tvoří „uzavřený“ dutý kovový kvádr a tím vlastně představuje tzv. dutinový rezonátor. Tento rezonátor může rezonovat na nekonečně mnoho diskrétních kmitočtech, kde rezonanční kmitočty můžeme určit dle následujícího vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}, \quad (3.7)$$

kde f_0 je rezonanční kmitočet v Hz, a , b , c jsou rozměry komory, m , n , p jsou vidová čísla určující rezonanční vid, tedy uspořádání pole v dutině [1].

Rezonanční kmitočty způsobují to, že měření je zkresleno a výsledky jsou nepoužitelné. Měření by bylo ovlivněno i umístěním a orientací samotné měřicí komory (a ne pouze vzdáleností ZO a měřicí antény, vyzařováním ZO). Odstranění lze provést tak, že komoře je snížen vlastní činitel jakosti Q tím, že provedeme útlum pro jednotlivé rezonanční vidy. Nalezením místa s nejvyšší intenzitou elektrického pole pro jednotlivé vidy a umístěním ztrátového materiálu do toho místa. Dosáhneme tak vyšších ztrát „dutinového rezonátoru“ pro daný kmitočet.

Mnohonásobné odrazy uvnitř komory vznikají tím, že kovové stěny komory jsou téměř dokonalou odraznou plochou pro elektromagnetické signály. Signály, které pak přijímá anténa, jsou různě fázově zpožděny (přicházejí po různých drahách) kvůli odrazům a tím je způsobena nezanedbatelná chyba měření. Tato chyba měření, nebo-li neurčitost měření, může být libovolně velká. Je to způsobeno tím, že nelze nijak určit „odrazivost“ vlnění. Sčítání nebo odečítání fázových posuvů nelze nijak predikovat [2].

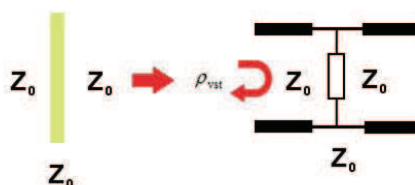
Jak bylo již zmíněno, důležité jsou rozměry komory. Pro zmenšení vlivu vnitřních odrazů je potřeba zajistit dostatečné rozměry. Pokud rozměry komory přesahují měřicí vzdálenost D , tak lze snížit počet vnitřních odrazů v komoře. Dráhy odražených vln jsou delší, jejich velikost intenzity v místě příjmu je nižší a klesá i vliv neurčitosti měření. Dalším způsobem pro eliminaci chyby měření je použití směrových antén s vysokým potlačením jejich bočních laloků a přesné nasměrování na zkoušený objekt. Poslední způsob jak zmenšit odrazivost je vytvořit obložení absorpčním materiálem na odrazných plochách. Vzniká tak absorpční bezodrazová komora. Pro měření rušivých signálů v EMC se využívají pouze částečně bezodrazové komory, kde jsou absorpčním materiálem obloženy všechny části komory mimo podlahy [1], [3].

3.4 Absorpční materiály

Pomocí absorpčních materiálů je třeba zajistit bezodrazovost v prostoru komory. Toto je technicky stejné jako zajistit přizpůsobení přenosového vedení, které zakončujeme charakteristickou impedancí Z_0 . Charakteristická impedance volného prostoru je $120\pi = 377 \Omega$. Materiál s touto impedancí existuje, ale přinesl nežádoucí výsledky.

Elektricky to znamená, že podle obr. 3.4 je nutno do vedení se Z_0 zapojit další impedanci Z_0 . Z toho plyne, že vstupní činitel ρ_{vst} nebude nulový, ale nabývá hodnoty dle následujícího vztahu:

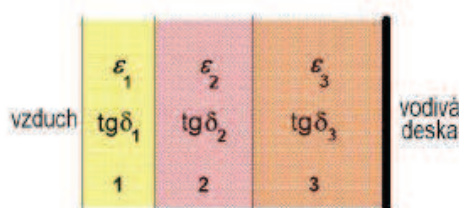
$$\rho_{\text{vst}} = \frac{Z_0 \parallel Z_0 - Z_0}{Z_0 \parallel Z_0 + Z_0} = -\frac{1}{3} \quad (3.8)$$



Obr 3.4.: Tvorba bezodrazové stěny materiálem o impedanci volného prostoru (převzato z [1])

Protože velikost odraženého výkonu je úměrný hodnotě $|\rho|^2$, odráží se 1/9 výkonu dopadající vlny zpět do prostoru komory k měřicí anténě. Zbývající energie je pohlcena. Z toho plyne, že tato komora není ani bezodrazová, ani stíněná vůči vnitřní nebo vnějším signálům.

Absorpční materiály přeměňují energii dopadající elektromagnetické vlny na teplo a to využitím dielektrických nebo magnetických ztrát. Dnes jsou více využívány dielektrické ztrátové materiály. Použitá dielektrika těchto materiálů by se svojí relativní permitivitou ϵ_r měla blížit relativní permitivitě volného prostoru. Složení těchto materiálů je z polystyrénu, polypropylenu a polyuretanu, které se sytí elektrovedivými a grafitovými plnidly. Výhodou dielektrických materiálů je jejich nízká hmotnost, lehké opracování a snadné spojování lepením. Vhodným způsobem sycení je dosaženo toho, že tyto materiály mohou pohlcovat hustotu výkonu až 100 W/m^2 či intenzity pole 200 V/m . Dále je při vytváření dielektrických materiálů potřeba dbát na to, aby byly přizpůsobeny na „vstupu“ [1].



Obr 3.5.: Jednotlivé vrstvy dielektrického materiálu (převzato z [1])

Materiály jednotlivých vrstev absorbéru musí mít nízkou relativní permitivitu ϵ_r , přičemž musí být dodrženo $\epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1$. Opakem jsou činitele ztrát tohoto materiálu $\text{tg } \delta$, které musí být velké a je vhodné také dodržet následující podmínku $\text{tg } \delta_3 > \text{tg } \delta_2 > \text{tg } \delta_1$. První dvě vrstvy provádějí impedanční přizpůsobení absorbéru k volnému prostoru, třetí vrstva absorbuje většinu energie dopadající elektromagnetické vlny. Méně používané absorbéry jsou dnes feritové a to především z důvodů vyšší hmotnosti a vysoké ceny.

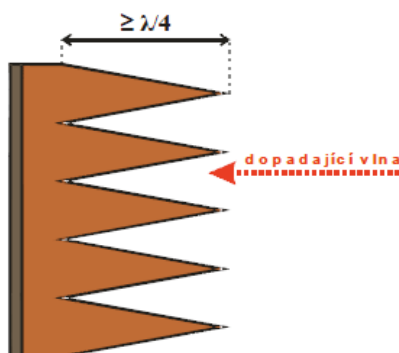
Tyto absorbéry jsou vyráběny na bázi feromagnetických materiálů a na nízkých kmitočtech mají menší tloušťku [1].

Více využívané širokopásmové absorbéry jsou dnes obkladové prvky ve tvaru jehlanu či kužele z polystyrénu či polyuretanu se sycením, viz obr. 3.5. Délka absorbéru dle obr. 3.5 bývá zpravidla $\lambda/4$ (v závislosti na koeficientu potlačení) na nejnižším pracovním kmitočtu v komoře. Např. pro kmitočet 100 MHz je délka absorbéru 75 cm. Pokud by byly použity tyto absorbéry, tak útlum na vyšších kmitočtech by byl vynikající neboť délka absorbéru je několikanásobkem λ kmitočtu. Bezodrazovost absorbérů je posuzována útlumem odrazu RL [1]:

$$RL = 10 \cdot \log \frac{P_{\text{odr}}}{P_{\text{dop}}} = 20 \cdot \log |\rho_{\text{vst}}| \text{ [dB]}, \quad (3.9)$$

kde P_{dop} představuje výkon dopadající vlny, P_{odr} výkon odražené vlny a ρ_{vst} je činitel odrazu absorbéru na daném kmitočtu.

Je-li délka absorbérů rovna $\lambda/4$ nejnižšího pracovního kmitočtu, je útlum na tomto kmitočtu roven cca -20 dB. U praktických konstrukcí se úhel jehlanů konstruuje na 25°. Tím dochází k tomu, že vlny se mezi absorbéry několikrát odrazí a jsou mnohonásobně utlumeny [1], [8].



Obr 3.6.: Boční pohled na absorbér jehlanovitého tvaru (převzato z [5])

Bezodrazové absorpční komory jsou dnes velmi vhodným prostředím pro měření v EMC technice. Komory či haly jsou často kombinovány plochými a pyramidálními absorbéry. Absorpční haly jsou realizovány buď jako částečně bezodrazové komory (SAC) nebo plně bezodrazové komory (FAC). Rozdíl mezi těmito komorami je ten, že u částečně bezodrazové komory jsou absorbéry na stěnách a stropě. Toto prostředí simuluje volné prostranství s odrazem od zemní roviny. Plně bezodrazové komory mají dielektrickými materiály (absorbéry) obloženy všechny stěny včetně podlahy, simuluje se zde volný neomezený prostor. U kvalitních bezodrazových komor je potřeba zajistit i stínění všech prostor jakými jsou dveře či větrací průchody [1].

Nevýhodou plně bezodrazových komor proti stíněným komorám a volným prostranstvím je pořizovací cena a rozměry, jenž jsou zmenšovány absorbéry [2].

4 Přehled mezí pro rušení šířené volným prostorem

Zařízení informační techniky (ITE) je takové zařízení, jehož prvotní funkcí je (bud' samostatně nebo v kombinaci) vstup, ukládání, vyhledávání, přenos, zpracování, přepojování nebo řízení datových a telekomunikačních zpráv a může být vybaveno jedním nebo více koncovými porty provozovanými typicky pro přenos informací. Vstupní napětí nesmí přesáhnout hodnotu 600 V [3].

Definice se vztahuje na zařízení pro zpracování dat, kancelářské stroje, obchodní elektronická zařízení a telekomunikační zařízení. Na libovolné zařízení (nebo část zařízení ITE), jehož prvotní funkcí je radiový přenos nebo příjem se podle Radikomunikačního řádu ITU norma [3] nevztahuje.

4.1 Třídění ITE

Třída A je kategorie všech ostatních ITE, která odpovídají mezím rušení třídy A, avšak ne třídy B. U těchto zařízení musí být značeno následující upozornění. V domácím prostředí může tento výrobek způsobovat vysokofrekvenční rušení. Může se vyžadovat, aby uživatel přijal příslušná opatření.

Třída B je kategorie přístrojů, které vyhovují mezím rušení pro třídu B, jsou především určena pro prostředí domácnosti. Do kategorie může být zahrnuto zařízení bez pevného místa použití (přenosné zařízení napájené z vestavěných baterií), zařízení napájené z telekomunikační sítě či osobní počítač a připojená pomocná zařízení [3].

4.2 Meze rušení pro kmitočty do 1 GHz

Zkoušený objekt musí vyhovovat dle uvedené tab. 4.1 pro uvedenou měřicí vzdálenost $D = 10$ m dle normy [3]. V případě kolísání hodnoty napětí na měřicím přijímači v blízkosti mezí, musí být údaj sledován po dobu 15 s na každém měřeném kmitočtu. Dále je nutno zaznamenat nejvyšší hodnotu s výjimkou nahodilých krátkých extrémů [3].

Tab 4.1.: Přehled mezí rušení pro jednotlivá kmitočtová pásma u ITE třídy A

Meze rušením při šíření zářením pro třídu A, měřicí vzdálenost $D = 10$ m	
Kmitočtový rozsah [MHz]	Kvazivrcholové meze [dB μ V/m]
30 - 230	40
230 - 1000	47
Poznámka 1: Pro kmitočtové rozhraní pásem platí nižší meze	
Poznámka 2: V případě výskytu rušení se mohou vyžadovat i další opatření	

Tab 4.2.: Přehled mezí rušení pro jednotlivá kmitočtová pásma u ITE třídy B (převzato z [4])

Meze rušením při šíření zářením pro třídu B, měřicí vzdálenost $D = 10$ m	
Kmitočtový rozsah [MHz]	Kvazivrcholové meze [dB μ V/m]
30 - 230	30
230 - 1000	37
Poznámka 1: Pro kmitočtové rozhraní pásem platí nižší meze	
Poznámka 2: V případě výskytu rušení se mohou vyžadovat i další opatření	

V případě, že nelze provést měření pole na vzdálenost 10 m vzhledem k vysokým úrovním okolního šumu nebo z jiných důvodů, měření zkoušeného objektu ve třídě B je povoleno provést na menší vzdálenost, například 3 m. Při následném přepočtu dat (normalizování) na specifikovanou vzdálenost by měl být použit nepřímý úměrný přepočet s hodnotou 20 dB/dekádu (dle normy [3]). Přepočet s touto hodnotou dovoluje posouzení vyhovění stanoveným mezím. Pro měřicí vzdálenost $D = 3$ m je na kmitočtech okolo 30 MHz nutno brát v potaz blízké pole antény [3].

4.3 Měřicí přijímače a porovnání jejich detektorů

Měřicí přijímače uskutečňují samotné měření výstupního rušivého napětí z výstupu snímače (nejčastěji antény). Snímač rušivého signálu je připojen na vstup tohoto zařízení. Pokud by bylo rušivé napětí, které by mělo časově harmonický průběh, mohlo by být měřeno napětí přijímačem pracujícím v lineárním režimu. Na jeho výstupní svorky bychom připojili vhodný indikátor, např. nízkofrekvenční milivoltmetr.

Většinou bývají rušivé signály časově neharmonické, jejichž kmitočtové spektrum obsahuje mnoho kmitočtových složek. Výsledky měření pak závisí na vhodném výběru měřicího přijímače, na jeho šířce pásma, na průběhu modulové a argumentové charakteristiky jeho vysokofrekvenční i nízkofrekvenční části, na elektrických vybíjecích a nabíjecích konstantách detektorů. Tento přijímač musí splňovat požadavky normy [4], které jsou uvedeny v tab. 4.3 až tab. 4.5 [2].

Tab 4.3.: Požadavky šířky pásma u měřicích přijímačů pro různé detektory (převzato z [4])

Měřicí přijímač se špičkovým detektorem a průměrujícím detektorem (9 kHz – 18 GHz)		
Frekvenční rozsah / pásmo	Šířka pásma pro pokles 6dB (B ₆)	Šířka propustného pásma měřiče rušení pro B ₆
9 kHz - 150 kHz / pásmo A	100 - 300 Hz	200 Hz
0,15 MHz - 30 MHz / pásmo B	8 - 10 kHz	9 kHz
30 MHz - 1000 MHz / pásmo C a D	100 - 500 kHz	120 kHz
1 GHz – 18 GHz / pásmo E	0,3 - 2 MHz	1 MHz

Tab 4.4.: Vstupní impedance přijímače (převzato z [4])

Požadavky PSV na vstupní impedanci přijímače		
Kmitočtový rozsah	Útlum [dB]	PSV
9 kHz - 1 GHz	0	2,0 - 1
9 kHz - 1 GHz	≥10	1,2 - 1
1 GHz - 18 GHz	0	3,0 - 1
1 GHz - 18 GHz	≥10	2,0 - 1

Vstupní port měřicího přijímače musí být nesymetrický. Pro nastavení přijímače dle CISPR v daném rozsahu, hodnota vstupní impedance musí být 50 Ω a PSV nesmí přesáhnout hodnoty dle tab. 4.4. Symetrická vstupní impedance pro kmitočtový rozsah 9 kHz – 30 MHz: vstupní transformátor je používán pro symetrická měření. Pro rozsah 9 – 150 kHz je preferována vstupní impedance 600 Ω [4].

Průměrující detektory u měřicích přijímačů nejsou často používanými pro širokopásmové impulsní rušení. Tento typ detektorů se využívá pro měření úzkopásmového rušivého signálu [4].

Tab 4.5.: Časy pro nabíjecí a vybíjecí konstanty u kvazišpičkového detektoru (převzato z [4])

Měřicí přijímač s kvazišpičkovým detektorem		
Frekvenční rozsah	Nabíjecí konstanta	Vybíjecí konstanta
9 kHz - 150 kHz / pásmo A	45 ms	500 ms
0,15 MHz - 30 MHz / pásmo B	1 ms	160 ms
30MHz - 1000 MHz / pásmo C a D	1 ms	550 ms

5 Analýza výsledků práce

5.1 Výpočet délky přímé a odražené vlny

Pro výpočet nejvyšší intenzity elektrického pole v místě příjmu bylo nejprve nutné spočítat takovou výšku měřicí antény, kdy dorazí přímá (c_p) a odražená vlna ($c_1 + c_2$) vyslaná vlna ze zkoušeného objektu ve stejné fázi dle obr. 5.1. Vlnovou délku analyzovaného kmitočtu lze stanovit dle následujícího vztahu:

$$\lambda = \frac{c}{f} [\text{m}], \quad (5.1)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu v $[\text{m/s}]$, f $[\text{Hz}]$ je měřicí kmitočet.

Dle obr. 5.1 můžeme vidět, že dráhu přímé vlny, kterou urazí elektromagnetická vlna, lze spočítat následujícím vztahem:

$$c_p = \sqrt{(V_A - V_S)^2 + D^2}, \quad (5.2)$$

kde V_A je výška měřicí antény, V_S je výška zkoušeného objektu, D je měřicí vzdálenost.

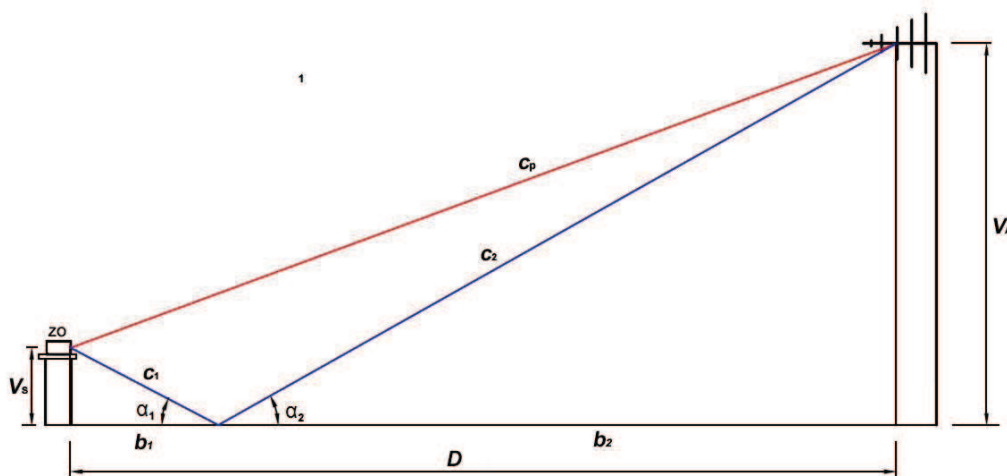
Současně je součet základů trojúhelníků roven měřicí vzdálenosti D :

$$D = b_1 + b_2, \quad (5.3)$$

$$b_1 = D - b_2, \quad (5.4)$$

$$b_2 = D - b_1, \quad (5.5)$$

kde b_1 a b_2 jsou délky základů trojúhelníka.



Obr 5.1.: Zjednodušený náčrt měřicího stanoviště

Protože úhel dopadu α_1 a úhel odrazu α_2 musí být stejný, jsou oba trojúhelníky podobné a jejich poměr mezi rozměry musí být stejný. Vyjádříme si jej následovně:

$$\frac{V_S}{V_A} = \frac{b_1}{b_2}. \quad (5.6)$$

Sloučením výrazu (5.4) a (5.6) vypočítáme délku b_2 :

$$\begin{aligned} \frac{V_S}{V_A} &= \frac{b_1}{b_2}, \\ \frac{V_S}{V_A} &= \frac{D - b_2}{b_2}, \\ b_2 \cdot \frac{V_S}{V_A} &= D - b_2, \\ b_2 \cdot \left(\frac{V_S}{V_A} + 1 \right) &= D, \\ b_2 \cdot \left(\frac{V_S + V_A}{V_A} \right) &= D, \\ b_2 &= D \cdot \left(\frac{V_A}{V_A + V_S} \right). \end{aligned} \quad (5.7)$$

Obdobně spočítáme vzdálenost b_1 (místo odrazu vlny) dle následujícího vztahu:

$$b_1 = D \cdot \left(\frac{V_S}{V_A + V_S} \right). \quad (5.8)$$

Celkovou dráhu odražené vlny ($c_1 + c_2$), kterou urazí elektromagnetická vlna, lze spočítat jako součet drah dopadající a odražené vlny následujícím způsobem:

$$c_1 = \sqrt{V_S^2 + b_1^2}, \quad (5.9)$$

$$c_2 = \sqrt{V_A^2 + b_2^2}, \quad (5.10)$$

$$c_1 + c_2 = \sqrt{V_S^2 + b_1^2} + \sqrt{V_A^2 + b_2^2}. \quad (5.11)$$

5.2 Výpočet výšky měřicí antény

Proto, abychom našli maximální intenzitu elektrického pole v místě příjmu, je nutno pohybovat měřicí anténou v rozmezí výšek V_A od 1 do 4 m pro měřicí vzdálenost $D = 3$ a 10 m. Navážeme na výpočty z předešlé kapitoly, kde známe polohu místa odrazu od

zemní vodivé plochy pro odraženou vlnu.

Abychom provedli vyjádření neznámé V_A , musíme použít následující vztah:

$$\lambda = (c_1 + c_2) - c_p, \quad (5.12)$$

dále použijeme vztahy (5.7), (5.8), (5.9) a (5.10)

$$\begin{aligned} \lambda &= \sqrt{V_S^2 + b_1^2} + \sqrt{V_A^2 + b_2^2} - \sqrt{D^2 + (V_A - V_S)^2}, \\ k\lambda &= \sqrt{\frac{D^2 \cdot V_S^2}{(V_A + V_S)^2} + V_S^2} + \sqrt{\frac{D^2 \cdot V_A^2}{(V_A + V_S)^2} + V_A^2} - \sqrt{D^2 + (V_A - V_S)^2}, \\ k\lambda &= \sqrt{\frac{D^2}{(V_A + V_S)^2} + 1} \cdot V_S + \sqrt{\frac{D^2}{(V_A + V_S)^2} + 1} \cdot V_A - \sqrt{D^2 + (V_A - V_S)^2}, \\ k\lambda &= (V_A + V_S) \cdot \sqrt{\frac{D^2}{(V_A + V_S)^2} + 1} - \sqrt{D^2 + (V_A - V_S)^2}, \end{aligned}$$

kde po nutných úpravách vyjádříme výšku měřicí antény V_A jako:

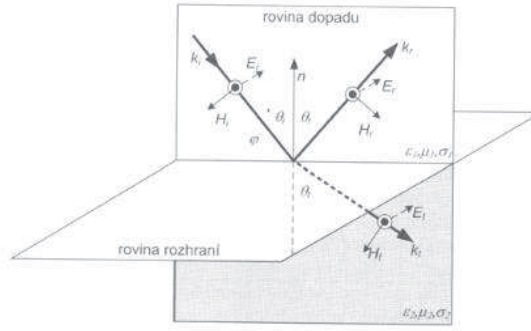
$$V_A = \sqrt{\frac{4 \cdot (k\lambda)^2 \cdot (V_S^2 + D^2) - (k\lambda)^4}{16 \cdot V_S^2 - 4 \cdot (k\lambda)^2}}, \quad (5.13)$$

kde k je násobek interference, λ je dráhový rozdíl přímé a odražené vlny.

5.3 Fresnelův činitel odrazu

Činitel odrazu je třeba zahrnout do výpočtu zcela jistě. Dopadající vlna se odráží od zemní vodivé plochy, neboť na hladké, rovinné a nekonečně rozlehlé ploše rozhraní dvou prostředí s odlišnými materiálovými parametry může dojít k odrazu a lomu, respektive refrakci vlny ve smyslu geometrické optiky. Zákony odrazu a lomu zůstávají v platnosti i tehdy, pokud je plocha rozhraní konečná ale mnohonásobně větší než délka vlny, pokud se zajímáme jen o pole v blízkosti ozářené strany, relativně daleko od okrajů [10].

V případě, že rovinná vlna dopadá na rozhraní dvou prostředí s odlišnými materiálovými parametry ϵ , μ , σ podle obr. 5.2, dopadající vlna se v místě odrazu odráží a zároveň částečně pronikne do druhého prostředí. Úhel dopadu θ_i a úhel odrazu θ_r jsou měřeny od kolmice směrem k rovině rozhraní. Vlnové vektory $\mathbf{k}_i$ a $\mathbf{k}_r$ jsou vektory dopadající a odražené vlny [8].



Obr 5.2.: Odraz vlny na rozhraní dvou prostředí – kolmá polarizace (převzato z [11])

Dle Snellova zákona o úhlu lomu a odrazu musí platit následující vztah:

$$\theta_i = \theta_r, \quad (5.14)$$

$$k_1 \cdot \sin \theta_i = k_2 \cdot \sin \theta_t, \quad (5.15)$$

kde k_1 a k_2 jsou konstanty šíření [10].

Při výpočtu odražené vlny je nutno vynásobit intenzitu dopadající vlny příslušným Fresnelovým koeficientem odrazu R , které byly odvozeny za předpokladu rovnosti tečných složek pole na rozhraní, a proto je důležitá orientace vektoru pole E dopadající vlny. Je nutno rozlišovat kolmou a rovnoběžnou polarizaci, kde v případě, že je rovinou rozhraní zemský povrch, pak je kolmá polarizace ekvivalentní horizontální polarizaci a rovnoběžná polarizace je ekvivalentní vertikální polarizaci [10].

Pro kolmou a rovnoběžnou polarizaci vycházíme z následujících vztahů:

$$R_{\perp} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cdot \cos \theta_i - Z_1 \cdot \cos \theta_t}{Z_2 \cdot \cos \theta_i + Z_1 \cdot \cos \theta_t}, \quad (5.16)$$

$$R_{\parallel} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cdot \cos \theta_t - Z_1 \cdot \cos \theta_i}{Z_2 \cdot \cos \theta_t + Z_1 \cdot \cos \theta_i}, \quad (5.17)$$

kde Z_1 je impedance roviny dopadu, Z_2 je impedance roviny rozhraní.

Pro praktické aplikace lze vztahy (5.16) a (5.17) přepsat do vztahu, kde získáme obecně komplexní tvar činitele odrazu R (má amplitudu a fázi). Toto je žádoucí z důvodu, abychom zjistili závislost úhlu odrazu na frekvenci. Upravený činitel odrazu R pro horizontální polarizaci má následující tvar

$$R_H = \frac{\sin \varphi - \sqrt{\epsilon_{kr} - \cos^2 \varphi}}{\sin \varphi + \sqrt{\epsilon_{kr} - \cos^2 \varphi}}, \quad (5.18)$$

obdobně pro vertikální polarizaci

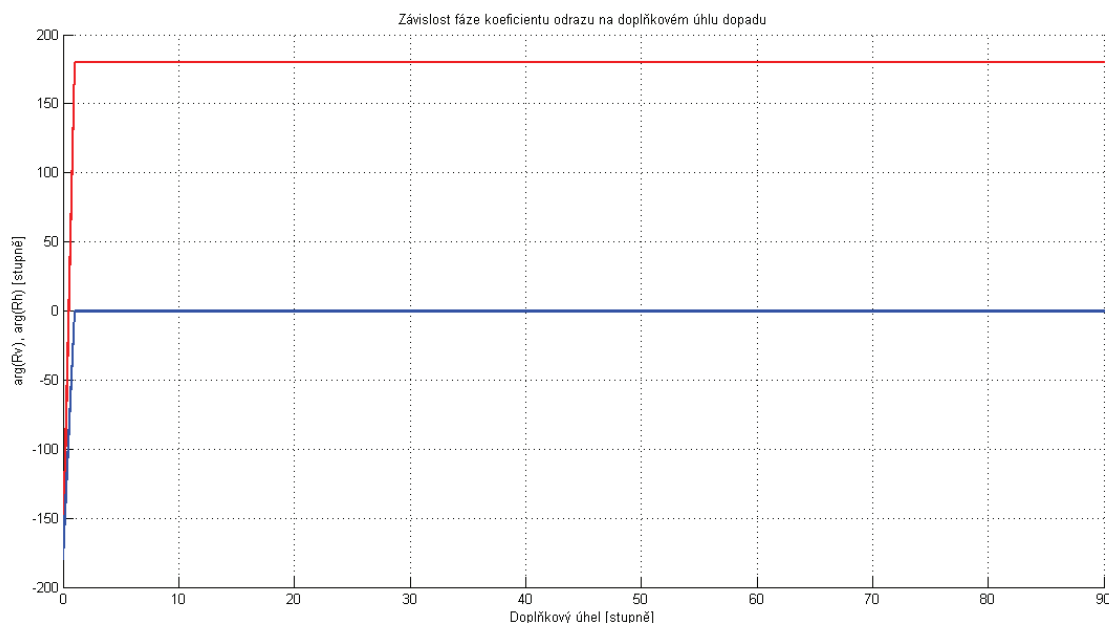
$$R_V = \frac{\varepsilon_{kr} \cdot \sin \varphi - \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2 \varphi}}{\varepsilon_{kr} \cdot \sin \varphi + \sqrt{\varepsilon_{kr} - \cos^2 \varphi}}, \quad (5.19)$$

kde φ je úhel dopadu měřený od roviny rozhraní, ε_{kr} je komplexní permitivita definována podle následujícího vztahu:

$$\varepsilon_{kr} = \varepsilon_r - j \cdot 60 \cdot \lambda \cdot \sigma, \quad (5.20)$$

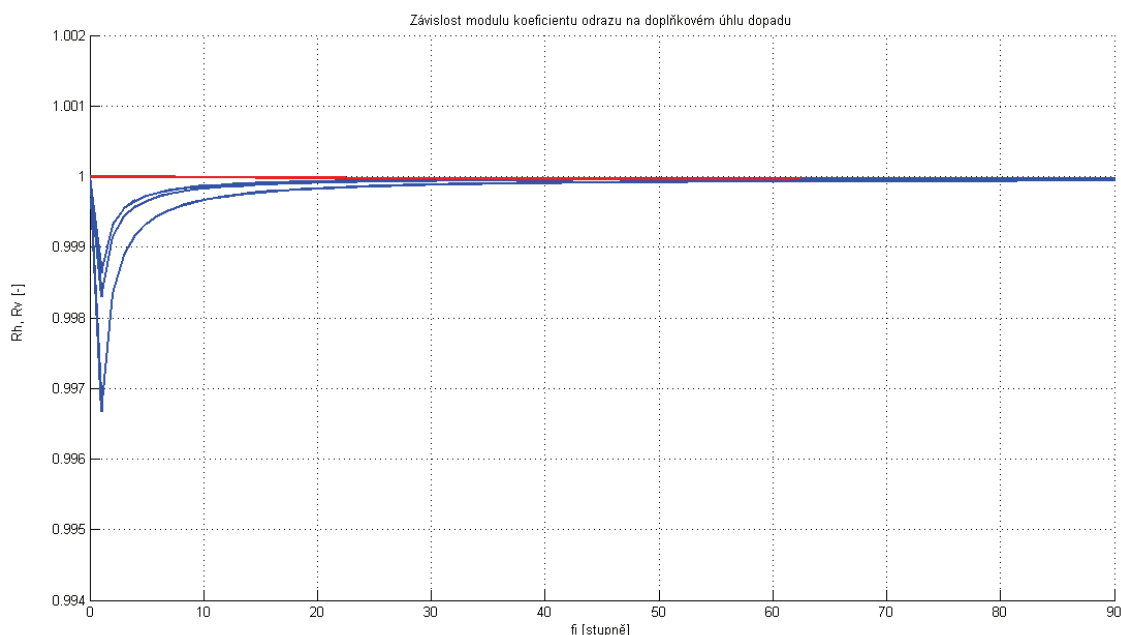
kde ε_r je relativní permitivita, σ [S/m] je vodivost materiálu na rovině rozhraní a λ je vlnová délka vlny.

V komoře pro měření rušivých signálů anténami je použita jako zemní deska pocínovaná kovová deska, která má velmi vysokou vodivost σ a malou relativní permitivitu ε_r . Do výpočtu argumentové charakteristiky činitele odrazu R pro horizontální a vertikální polarizaci dle vztahu (5.18) a (5.19) byly použity následující parametry: $\varepsilon_r = 1$, $\sigma = 8,7 \cdot 10^6$ S/m.



Obr 5.3.: Argumentová charakteristika činitele odrazu pro zvolené kmitočtové pásmo

Z obr 5.3 plyne, že argument činitele odrazu je frekvenčně nezávislý a ve zvoleném kmitočtovém pásmu od 30 do 1000 MHz. Pro horizontálně polarizovanou elektromagnetickou vlnu je nutné přičítat / odečítat fázi 180° u odražené vlny, u vertikální polarizace 0° z důvodu, že úhly odrazu α_2 nabývají hodnot $10,2 - 25,6^\circ$ pro měřicí vzdálenost $D = 10$ m. Pro $D = 3$ m pak $\alpha_2 = 31 - 58^\circ$ pro obě polarizace antény (obr. 5.1).



Obr 5.4.: Modulová charakteristika činitele odrazu pro zvolené kmitočtové pásmo

Na obr. 5.4 jsou zobrazeny pro vertikální polarizaci celkem tři křivky. Kromě výpočtu činitele odrazu pro kov byl také proveden pro hliník a měď, jejichž hodnoty modulu funkce odrazu jsou menší jak kovu. Pro námi zvolené parametry zemní vodivé desky dochází k téměř stoprocentnímu odrazu pro horizontální polarizaci. Při vertikálním natočení antény vůči této rovině je téměř veškerá intenzita elektrického pole také odražena zpět do prostoru při jakékoliv volbě materiálu zemní desky.

5.4 Fázové posuvy vlny

Dle argumentové charakteristiky na obr. 5.3 je vidět, že fázové posuvy, které elektromagnetická vlna nabude při vertikální polarizaci je 0° pro celé kmitočtové pásmo, při horizontální polarizaci 180° . Vycházíme z následujících vztahů pro výpočet k násobku interference a frekvence f pro horizontální polarizaci.

$$\varphi_p = -\frac{360}{\lambda} \cdot c_p, \quad (5.21)$$

$$\varphi_o = \left(-\frac{360}{\lambda} \cdot (c_1 + c_2) \right) - 180, \quad (5.22)$$

kde φ_p a φ_o jsou fázové posuvy přímé a odražené vlny, λ je vlnová délka a c_p a $(c_1 + c_2)$ jsou dráhy přímé a odražené vlny.

Kmitočty pro nalezení maximální intenzity elektrického pole (vlny ve fázi) získáme dle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi &= 360 \cdot k, \\
 \varphi_p - \varphi_o &= 360 \cdot k, \\
 \left(-\frac{360}{\lambda} \cdot c_p\right) - \left(-\frac{360}{\lambda} \cdot (c_1 + c_2)\right) - 180 &= 360 \cdot k, \\
 \frac{360}{\lambda} \cdot ((c_1 + c_2) - c_p) &= (360 \cdot k) - 180, \\
 \frac{1}{\lambda} \cdot ((c_1 + c_2) - c_p) &= k - \frac{1}{2}, \\
 \frac{f}{c} \cdot ((c_1 + c_2) - c_p) &= k - \frac{1}{2}, \\
 f = c \cdot \frac{k - \frac{1}{2}}{(c_1 + c_2) - c_p} &= c \cdot \frac{k - \frac{1}{2}}{\lambda}, \tag{5.23}
 \end{aligned}$$

kde f je frekvence, k je násobek interference, c je rychlost světla ve vakuu, λ rozdíl drah přímé a odražené vlny.

Násobek interference k lze zapsat následujícím způsobem:

$$k = \left(\frac{f \cdot \lambda}{c}\right) + \frac{1}{2}. \tag{5.24}$$

Obdobně lze napsat vztah pro vertikální polarizaci, kde nedochází k žádnému fázovému posuvu:

$$f = \frac{c \cdot k}{(c_1 + c_2) - c_p} = \frac{c \cdot k}{\lambda}. \tag{5.25}$$

Výpočet k násobku interference lze zapsat jako:

$$k = \left(\frac{f \cdot \lambda}{c}\right). \tag{5.26}$$

5.5 Šíření kulové vlny

Při měření je nutné uvažovat tzv. vzdálenou zónu antény, kterou udává vztah (5.27) ve které se šíří kulová vlna. Jejím zdrojem je anténa.

Vzdálená zóna antény:

$$R > \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (5.27)$$

kde D je největší rozměr antény vyzařovací části antény, λ je vlnová délka.

Zjednodušený vztah pro uniformní kulovou vlnu můžeme zapsat podle následujícího vztahu:

$$E(r) = \frac{C}{r} \cdot e^{-jkr}, \quad (5.28)$$

kde C je konstanta závisající na zdroji záření, r je vzdálenost od zdroje, k je vlnové číslo.

Vlnová délka λ [m] udává dráhu, kterou vlnoplocha s fází φ_0 urazí za dobu, odpovídající časové periodě vlny T [s]:

$$\lambda = v_f \cdot T = \frac{v_f}{f}, \quad (5.29)$$

kde v_f je fázová rychlost, f je frekvence.

Ze vztahu (5.29) vyplývá, že fázový posuv mezi dvěma body ve směru šíření, které jsou vzdáleny λ , je 2π radiánů. Jelikož reálná část vlnového čísla udává, o kolik radiánů se změní fáze na jednom metru ve směru šíření, lze k (vlnové číslo) vyjádřit pomocí vlnové délky jako:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (5.30)$$

V bezeztrátovém prostředí (reálné vlnové číslo k) klesá amplituda ve směru šíření nepřímo úměrně s první mocninou vzdálenosti r a fáze se mění dle (5.28) až (5.30). V případě, že výkon, který prochází libovolnou kulovou plochou se středem ve zdroji, musí být v bezeztrátovém prostředí konstantní. Plocha kulového povrchu je dána následujícím vztahem [12]:

$$S = 4\pi r^2. \quad (5.31)$$

Dále předpokládejme, že uniformní kulovou vlnu produkuje izotropní bodový zářič a zároveň, že výkon procházející libovolnou kulovou plochou se středem ve zdroji je roven vyzářenému výkonu P_Σ , pak můžeme zapsat následující vztah:

$$P_\Sigma = \frac{1}{2} \cdot \frac{E^2}{Z_0} \cdot 4\pi r^2, \quad (5.32)$$

kde po dosazení vztahu (5.28) do (5.32) můžeme vypočítat zdrojovou konstantu C

$$C^2 = P_{\Sigma} \cdot \frac{Z_0}{2\pi}, \quad (5.33)$$

kde Z_0 je charakteristická impedance, která je v bezeztrátovém prostředí charakterizována následujícím vztahem:

$$Z_0 = 120\pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}, \quad (5.34)$$

kde μ_r je relativní permeabilita prostředí, ε_r je relativní permitivita prostředí.

Pak lze vztah (5.33) přepsat následovně:

$$C = \sqrt{60 \cdot P_{\Sigma}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}. \quad (5.35)$$

Efektivní intenzitu elektrického pole kulové vlny ve vzdálenosti r od zdroje lze vypočítat na základě vztahu (5.28) a (5.35) následujícím vztahem:

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{\Sigma} \cdot D(\varphi, \vartheta)}}{r} \cdot \sqrt[4]{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}, \quad (5.36)$$

kde $D(\varphi, \vartheta)$ je směrový činitel zdroje, činitel směrovosti izotropního zářiče je roven jedné.

Ovšem skutečné zdroje nikdy nejsou zcela izotropní. Proto má intenzita kulové vlny v různých směrech má různou velikost, tzn. vlna není uniformní [12].

Intenzita přímé a odražené vlny byla počítána dle vztahu 5.28, kde jako zdrojová konstanta C je zvolena hodnota intenzity $E_{\max} = 1$ V/m (120 dBμV/m) a uvažován jako zdroj na vysílací straně izotropní zářič, na přijímací straně izotropní přijímač. U intenzity odražené vlny je nutno započítat tzv. činitel odrazu $R_{V,H}$, který udává fázový posuv mezi dopadající (c_1) a odraženou vlnou (c_2) dle obr. 5.1. Velikost fázového posuvu činitele odrazu lze odečíst z argumentové charakteristiky podle obr. 5.3, velikost modulu činitele odrazu je možnost odečíst na obr. 5.4.

5.6 Pre-scan měření

V normě [6] je možno nalézt přehledovou tabulku tab. 5.1 pro tzv. předskanovací měření rušivých signálů (pre-scan) v závislosti na měřicí vzdálenosti D , kmitočtovém pásmu a polarizaci antény. Tabulka je stanovena pro pásmo 30 – 1000 MHz.

Tabulku 5.1 byla využita k tomu, že pro kmitočtové pásmo a danou polarizaci, byly provedeny výpočty intenzity elektrického pole pro doporučené výšky měřicí antény.

Tab 5.1.: Doporučené hodnoty výšky měřicí antény pro pre-scan měření

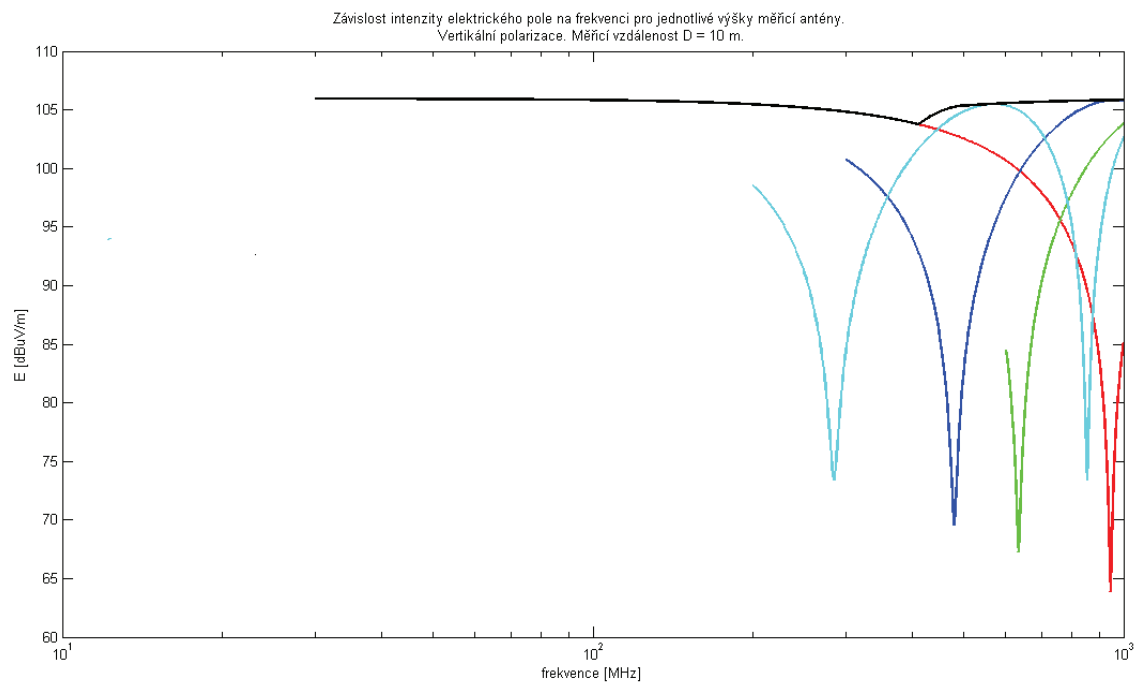
Měřicí vzdálenost D [m]	Polarizace antény	Kmitočtový rozsah [MHz]	Doporučovaná výška antény pro různé kmitočtové rozsahy min / max [m]
3	horizontální	30 - 100	2,5
		100 - 250	1 / 2
		250 - 1000	1 / 1,5
	vertikální	30 - 100	2,5
		100 - 250	1 / 2
		250 - 1000	1 / 1,5 / 2
10	horizontální	30 - 100	4
		100 - 200	4 / 2,5
		200 - 400	1,5 / 2,5 / 4
		400 - 1000	1 / 1,5 / 2,5
	vertikální	30 - 100	1
		100 - 200	1 / 3,5
		200 - 400	1 / 2 / 3,5
		400 - 1000	1 / 1,5 / 2 / 3,5

Pozn.: vyznačená měřicí vzdálenost $D = 10$ m je nejvíce doporučovaná vzdálenost v EMC. Doporučené výšky měřicí antény byly odvozeny pro výšku zkoušeného objektu 0,8 m nebo 2 m pro maximální chybu 3 dB (intenzity elektrického pole).

5.6.1 Měřicí vzdálenost 10 m

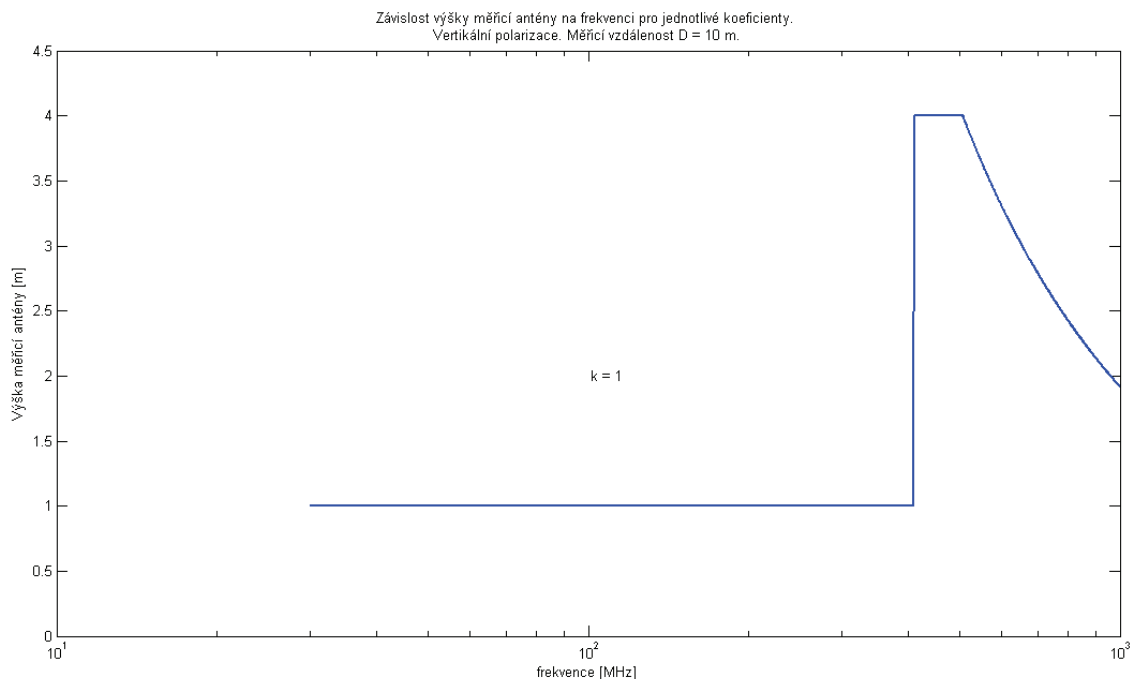
Pro měřicí vzdálenost 10 m je stanovena výška měřicí antény v rozmezí 1 – 4 m. Při zjišťování maximální intenzity elektrického pole může nastat případ, kdy je výška antény požadována nad horní mez povoleného rozmezí. Technicky není možno anténu polohovat nad tuto mez. U vertikální polarizace byla dle obr. 5.5 zjištěna odečtem maximální výška $V_A = 4$ m pro kmitočet $f = 506$ MHz. Od tohoto kmitočtu výše je anténa polohována v rozmezí 1 – 4 m. Pro kmitočty nižší než tento bylo postupováno

pro získání maximální intenzity elektrického pole v místě příjmu pomocí výšek antény dle doporučení v tab. 5.1.



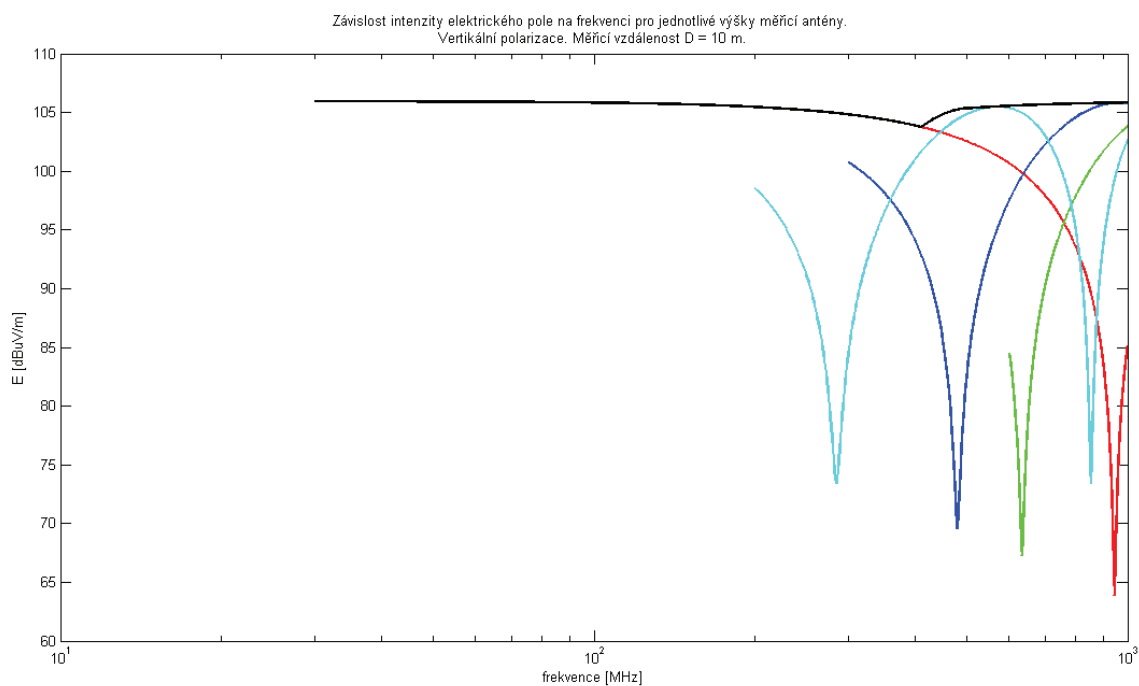
Obr 5.5.: Závislost intenzity elektrického pole pro stanovené výšky měřicí antény, $D = 10$ m

Na obr. 5.5 je vykreslena závislost intenzity elektrického pole pro všechny výšky dle tab. 5.1. Z těchto intenzit je nalezena maximální intenzita na každém kmitočtu a následně určena výška měřicí antény V_A , obr 5.6.

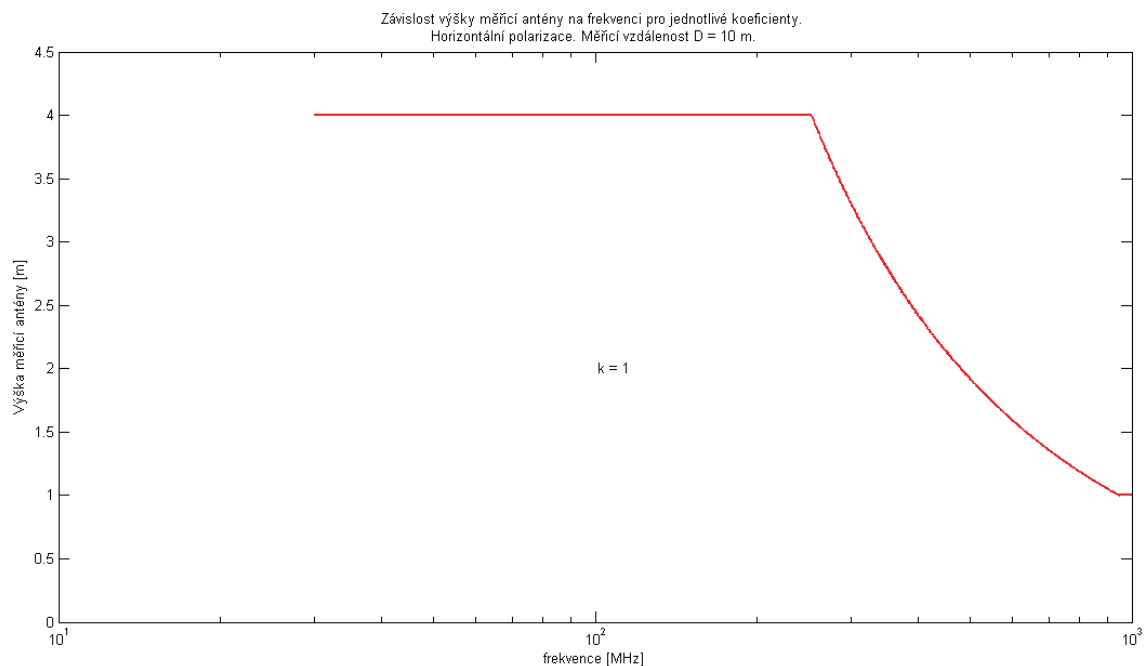


Obr 5.6.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 10$ m

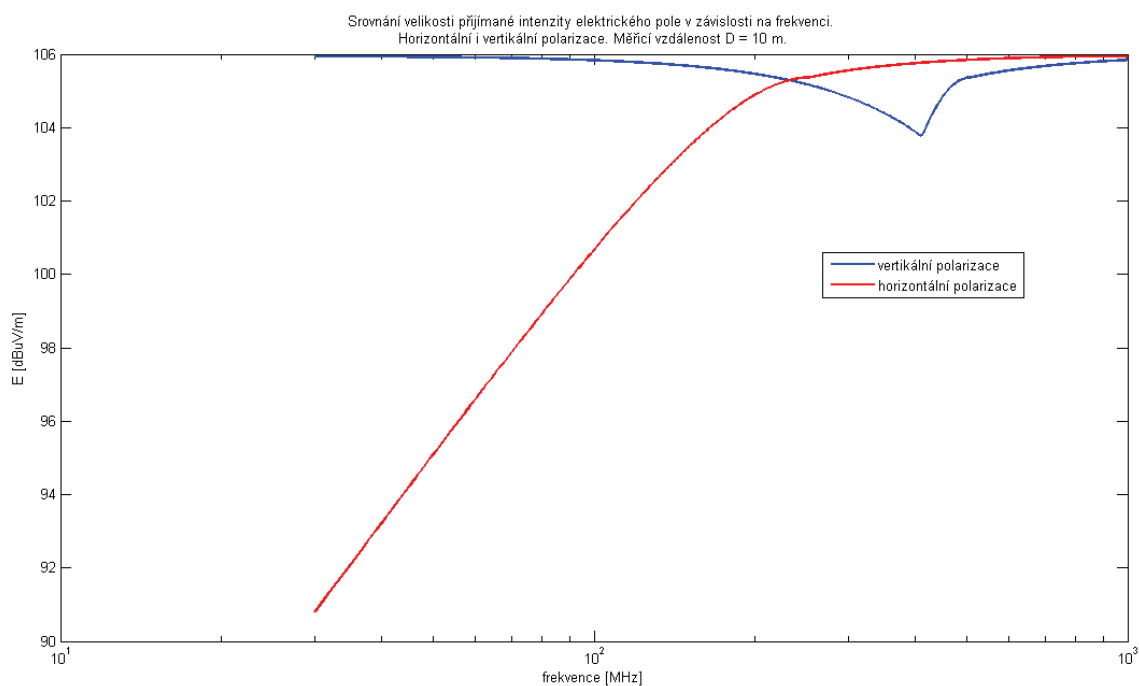
V případě horizontální polarizace pro měřicí vzdálenost $D = 10$ m byla zjištěna výška měřicí antény V_A vyšší jak 4 m pro $f = 30 - 236$ MHz. Pro doporučené výšky dle tab. 5.1 byl proveden výpočet intenzity elektrického pole a následně stanovena výška V_A obr. 5.8 taková, která odpovídala největší intenzitě pole v místě příjmu.



Obr 5.7.: Závislost intenzity elektrického pole pro stanovené výšky, $D = 10$ m

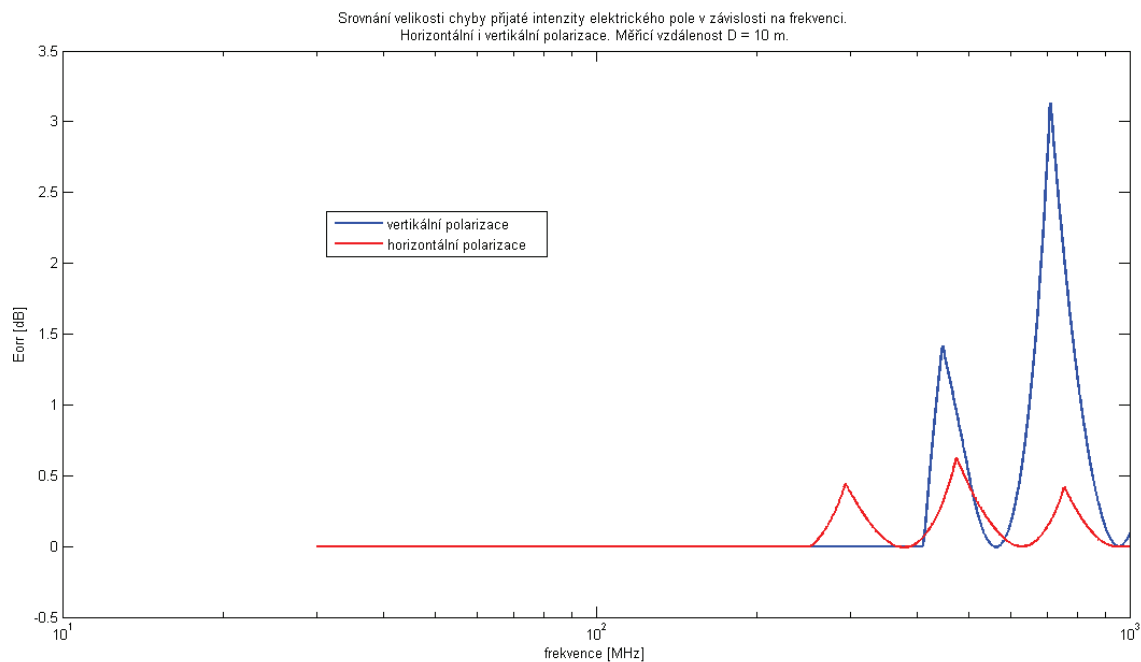


Obr 5.8.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 10$ m



Obr 5.9.: Vykreslení závislosti intenzity elektrického pole na frekvenci pro obě polarizace

Stanovení chyby přijaté intenzity elektrického pole E_{orr} bylo provedeno odečtením hodnot „obálky“ pro jednotlivé intenzity od maximální intenzity pole (viz obr. 5.9). Chybu pro obě polarizace antény zobrazuje obr. 5.10.

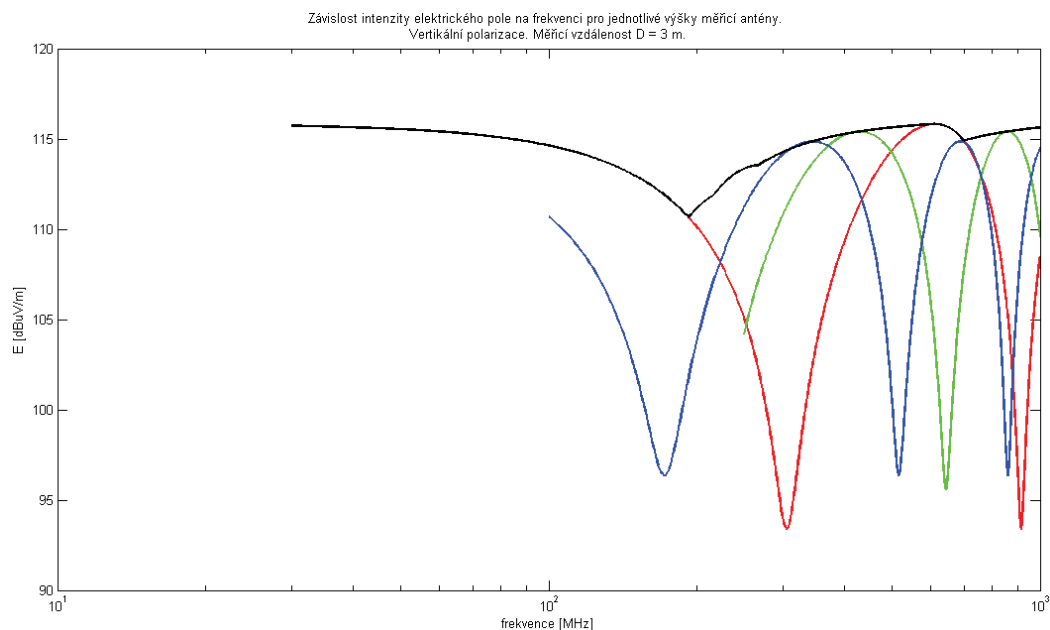


Obr 5.10.: Zobrazení chyby přijaté intenzity elektrického pole v závislosti na frekvenci pro obě polarizace

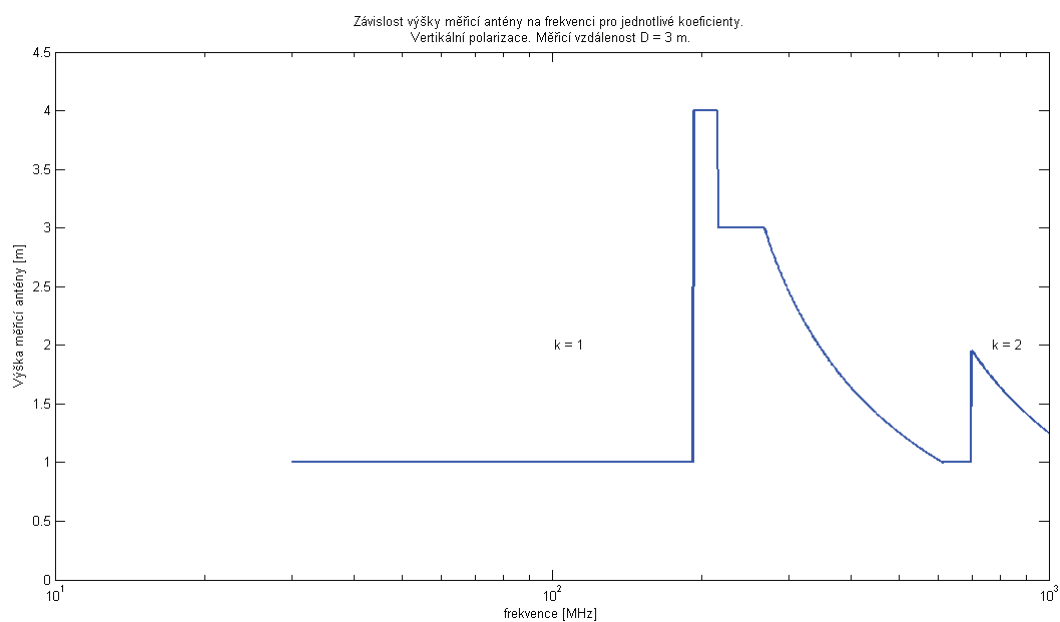
Z výše uvedeného obrázku 5.10 je vidět, že maximální dosažená chyba mírně přesahuje hodnotu 3 dB pro vertikální polarizaci, což s ohledem na tab. 5.1 považovat jako vyhovující.

5.6.2 Měřicí vzdálenost 3 m

Pro měřicí vzdálenost $D = 3$ m byly pro výpočty intenzity elektrického pole v místě příjmu použity doporučené výšky antény dle tab. 5.1 a následně zjištěny hodnoty chyby přijaté intenzity elektrického pole pro obě polarizace.

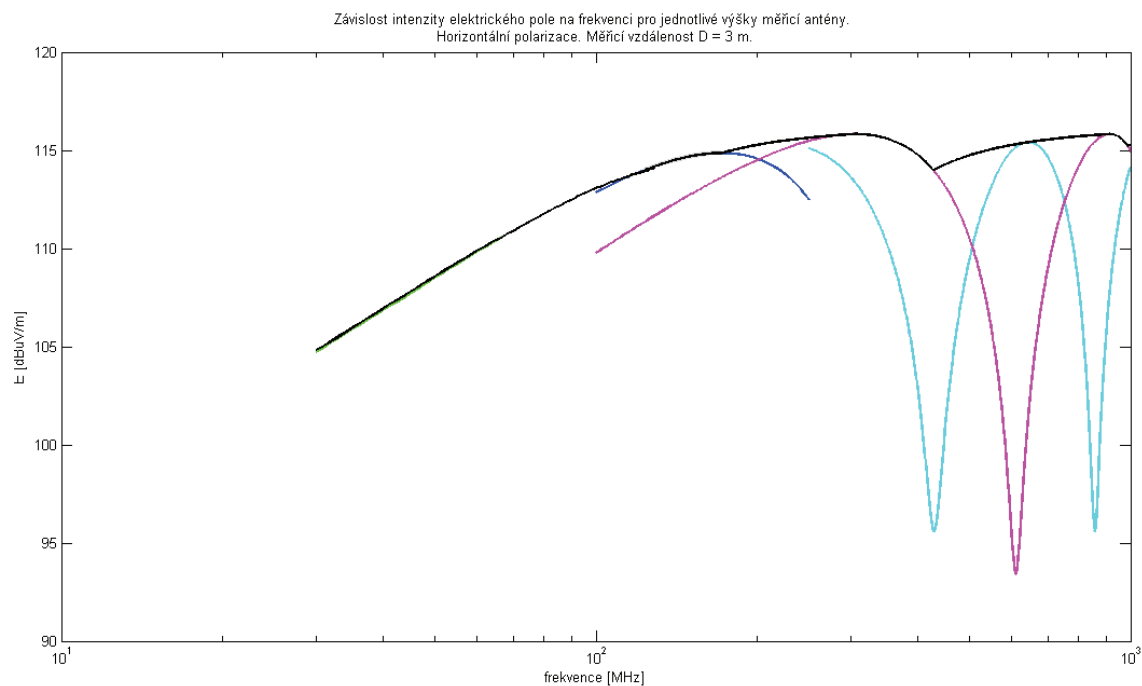


Obr 5.11.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, $D = 3$ m

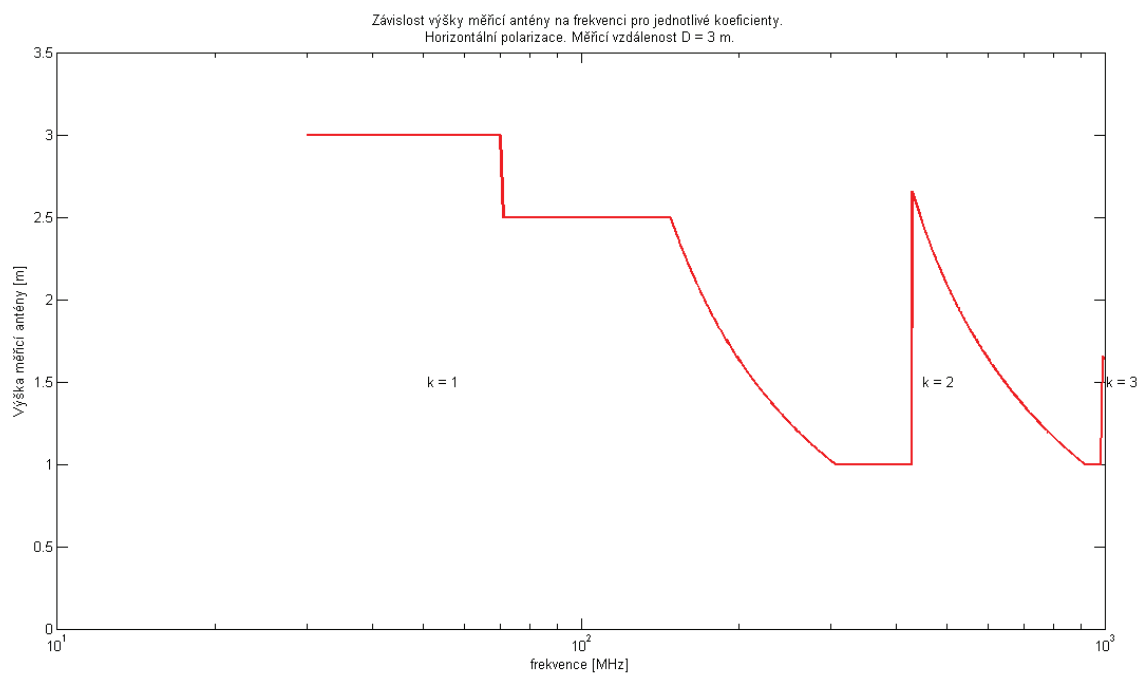


Obr 5.12.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 3$ m

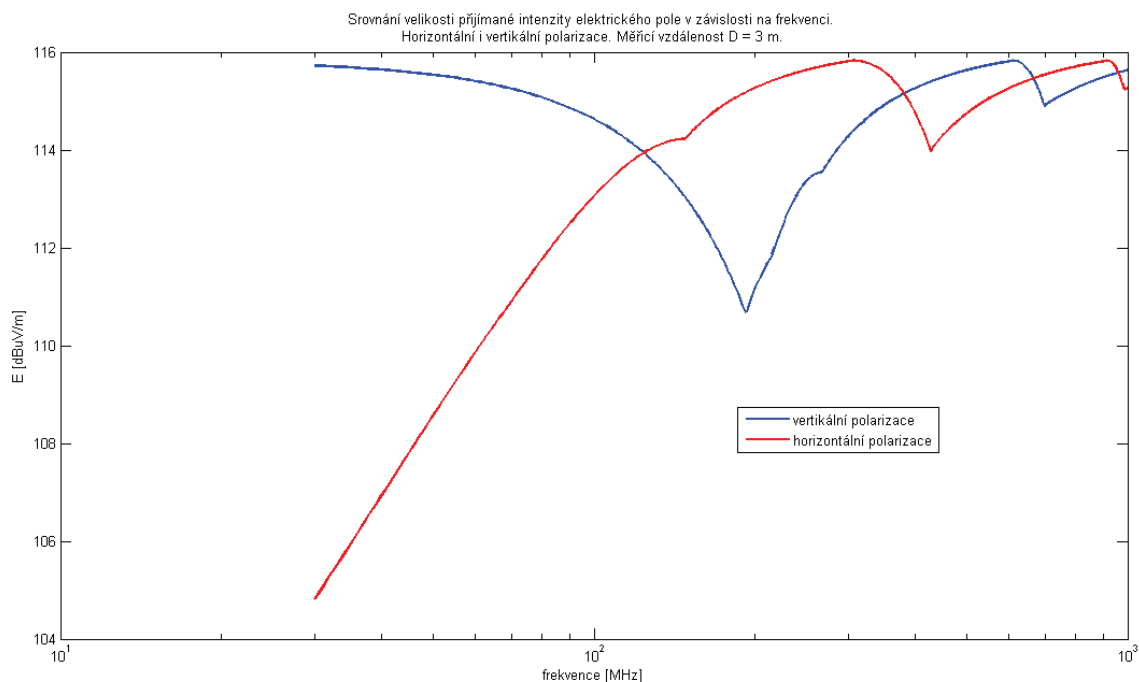
U vertikální polarizace se pro celé kmitočtové pásmo anténa pohybovala v maximální výšce $V_A = 4$ m. Z obr. 5.12 je vidět, že po klesnutí výšky antény na minimum dochází k navýšení k násobku interference. To znamená, že intenzita elektrického pole E je pro dvojnásobný dráhový rozdíl přímé a odražené vlny (2λ) vyšší jak pro λ .



Obr 5.13.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, $D = 3$ m

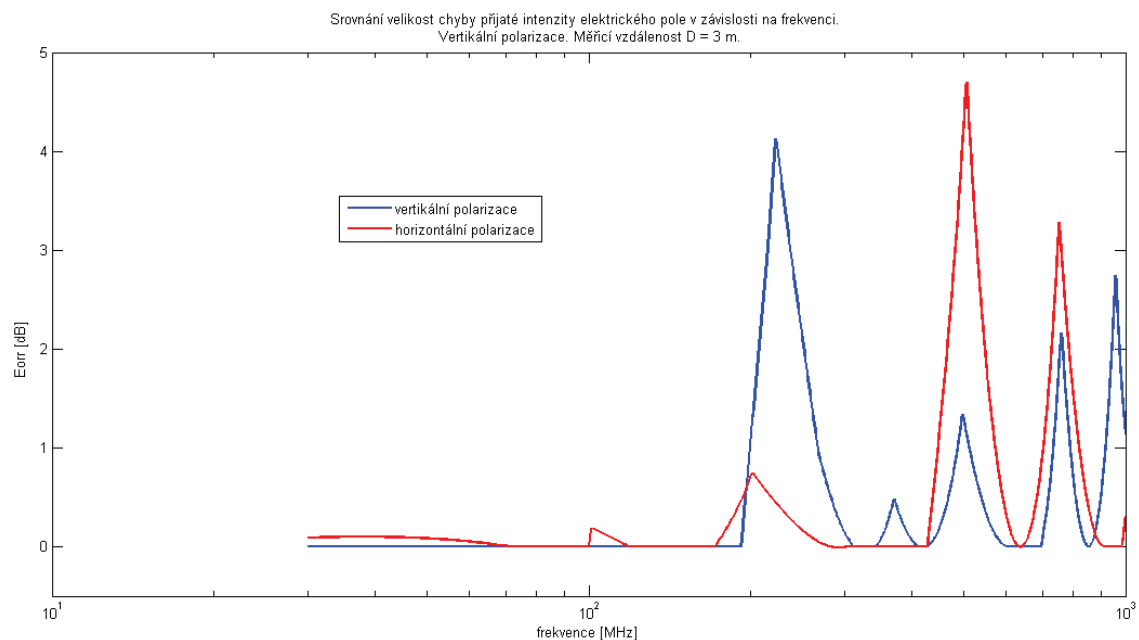


Obr 5.14.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 3$ m



Obr 5.15.: Vykreslení závislosti intenzity elektrického pole na frekvenci pro obě polarizace, $D = 3$ m

Jednotlivé „zaseknutí“ antény ve výšce $V_A = 1$ m souvisí s poklesem přijímané intenzity pole dle obr. 5.15. Jakmile je anténa polohována, intenzita opět narůstá. U horizontální polarizace došlo dokonce k zaseknutí antény na minimum dvakrát, tzn. došlo k výpočtům intenzity elektrického pole pro 3λ .



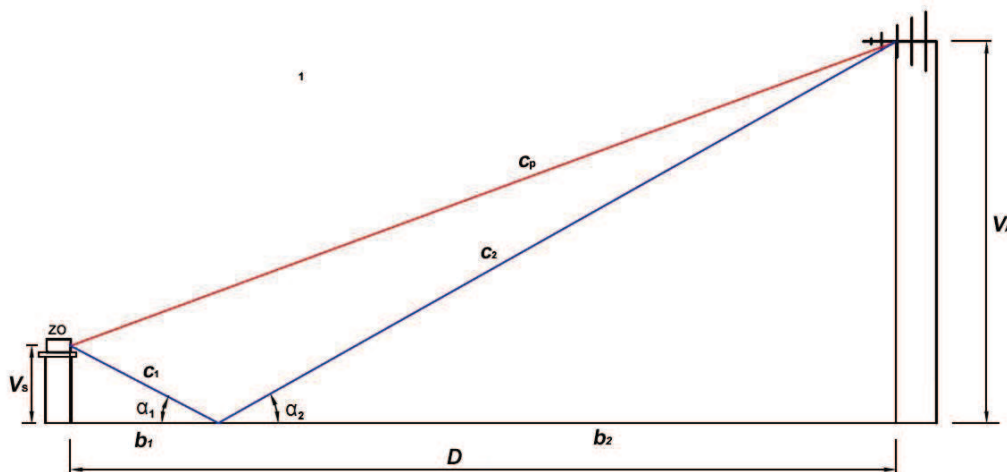
Obr 5.16.: Srovnání chyby přijímané intenzity pole v závislosti na frekvenci pro obě polarizace, $D = 3$ m

Při pohledu na obr. 5.16 je zřejmé, že pro měřicí vzdálenost $D = 3$ m přesahuje chyba maximální intenzity přijímaného pole E_{ort} hodnotu 3 dB. K těmto hodnotám jsme dospěli odečtením hodnot obálky jednotlivých intenzit pro zvolené výšky od maximální získané intenzity na daném kmitočtu.

5.7 Transformované měřicí stanoviště

Pro transformaci systému na přepočtení výsledků z měřicí vzdálenosti $D = 10$ m do měřicí vzdálenosti $D = 3$ m bylo jako jedno z možných provedení navrženo zmenšení měřicího stanoviště $D = 10$ m, které odpovídá normě [3], na následující stanoviště dle obr 5.17 s parametry:

$D = 3$ m, $V_S = 0,24$ m, $V_{A\text{min}} = 0,3$ m, $V_{A\text{max}} = 1,2$ m. Tato transformace byla provedena za účelem, aby úhel α_2 odražené vlny byl stejný jako pro měřicí vzdálenost $D = 10$ m.



Obr 5.17.: Upravené rozměry měřicího stanoviště

Pro výše změnžené měřicí stanoviště nelze pracovat s doporučenými výškami pro vyhledání maximální intenzity v místě příjmu. Byla zavedena nová metoda, nazvaná jako „precizní metoda“, pro vyhledávání výšky měřicí antény při získání maximální přijaté intenzity pole. Metoda je založena na výpočtu intenzity elektrického pole na každém kmitočtu dle následujícího kódu:

```
for i = 1:length(vysky)
    for j = 1:length(f)
        V = vysky(i); %do V zapiseme jednotlivé výšky
        b2_temp = (D*V) / (Vs+V); %vypocet mista odrazu vlny
        b1_temp = D - b2_temp;

        c1_temp = sqrt(Vs^2+b1_temp.^2); %vypocty
        c2_temp = sqrt(V.^2+b2_temp.^2); %vypocty

        %delky prime vlny a odrazene vlny
        cp_temp = sqrt((D).^2+(V-Vs).^2); %prima vlna
```

```

%Součet delek odrazených vln
co_temp = sqrt(Vs.^2+b1_temp.^2)+sqrt(b2_temp.^2+V.^2);

%vypocet intenzity pole
%vypocet intenzity prime vlny
Ep_temp = (Emax./cp_temp).*(exp(((1i.*2.*pi).*cp_temp)./lambda(j)));

%vypocet intenzity odražené vlny
Eo_temp = (Emax./co_temp).*(exp(((1i.*2.*pi).*co_temp)./lambda(j)));

%Součet intenzity pole
IntenzitaVysky(i,j) = abs(Ep_temp + Eo_temp);

end
end

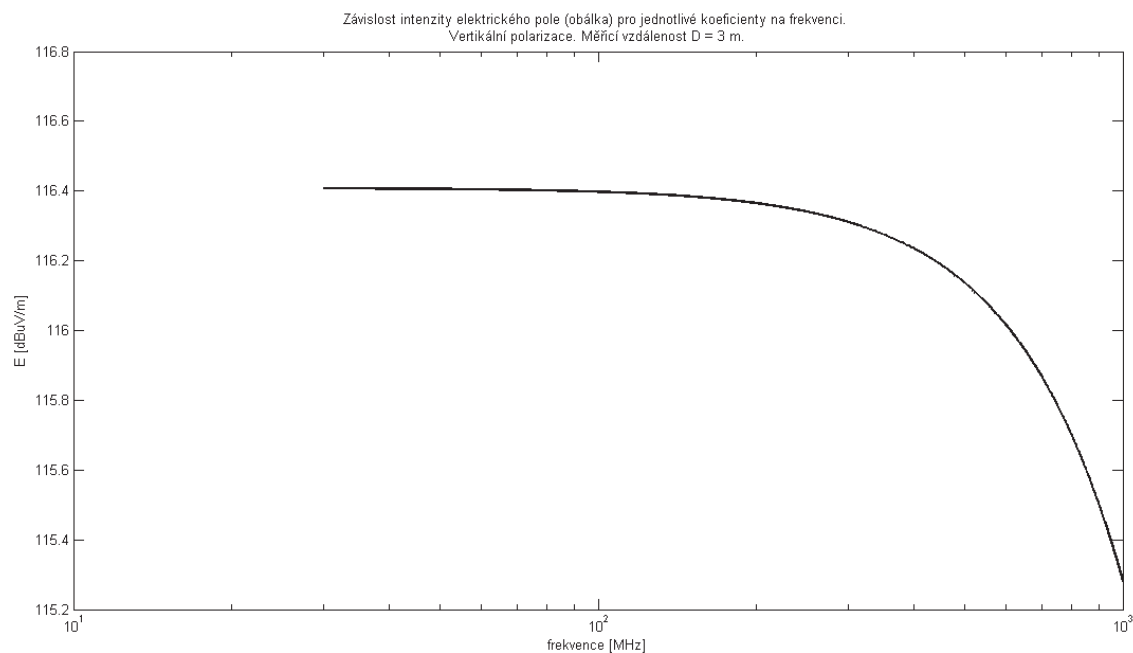
```

Po zpracování tohoto kódu byla výpočty získána matice výsledků s intenzitami elektrického pole na každém kmitočtu pro zvolený počet výšek. Bylo pracováno s výškovým krokem 0,01 m. Dále na každém kmitočtu byla vyhledána maximální intenzita pole, která byla přijímaná měřicí anténou a stanoveny odpovídající výšky měřicí antény V_A .

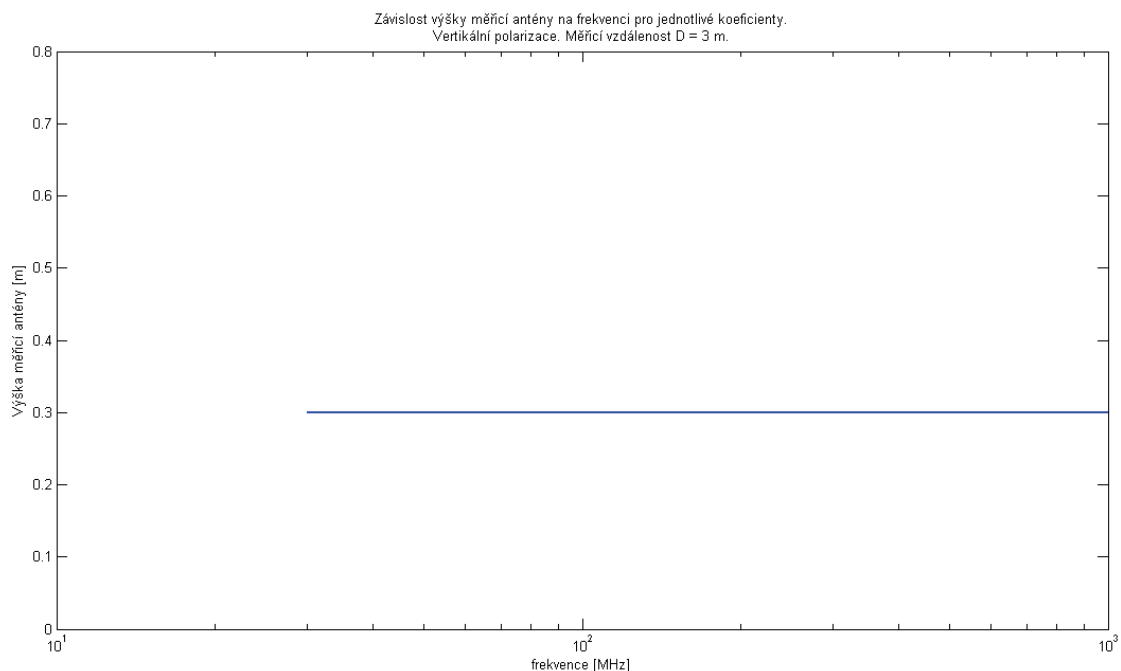
Nadále jsou výpočty prováděny s výstupní intenzitou elektrického pole $E_{\max} = 1 \text{ V/m}$, izotropním vysílačem a izotropním přijímačem v kmitočtovém pásmu 30 – 1000 MHz.

5.7.1 Vertikální polarizace

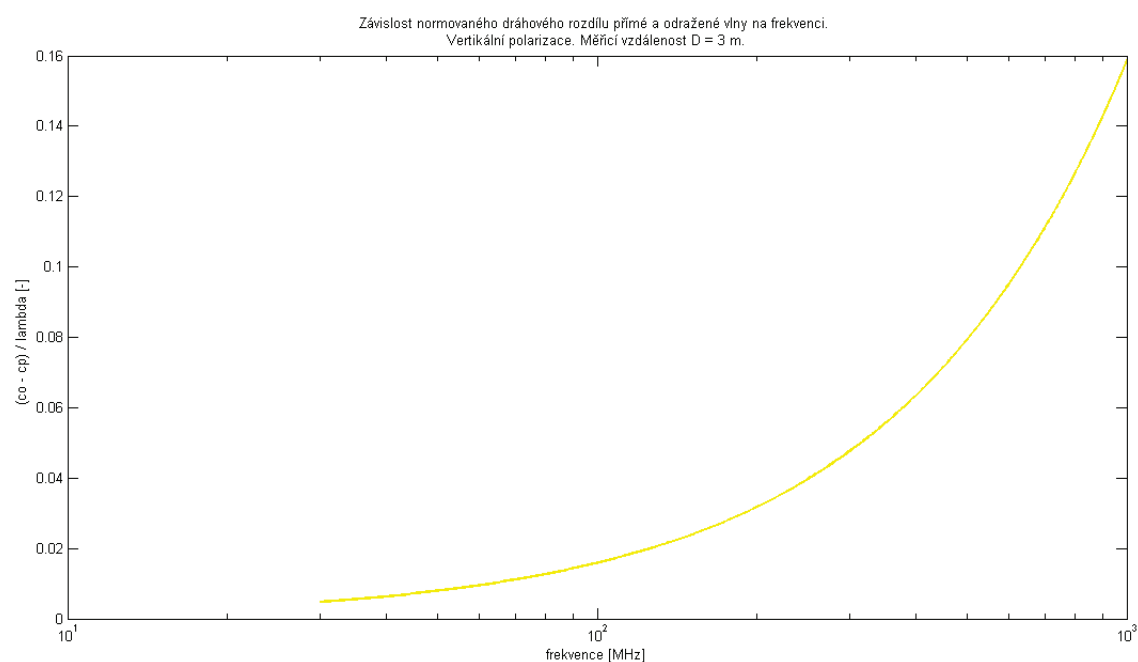
Při této polarizaci nedochází při odrazu od zemní vodivé plochy k otočení fáze odražené vlny. Výpočty výšky měřicí antény byly prováděny dle „precizní metody“.



Obr 5.18.: Závislost maximální intenzity elektrického pole na frekvenci, $D = 3 \text{ m}$

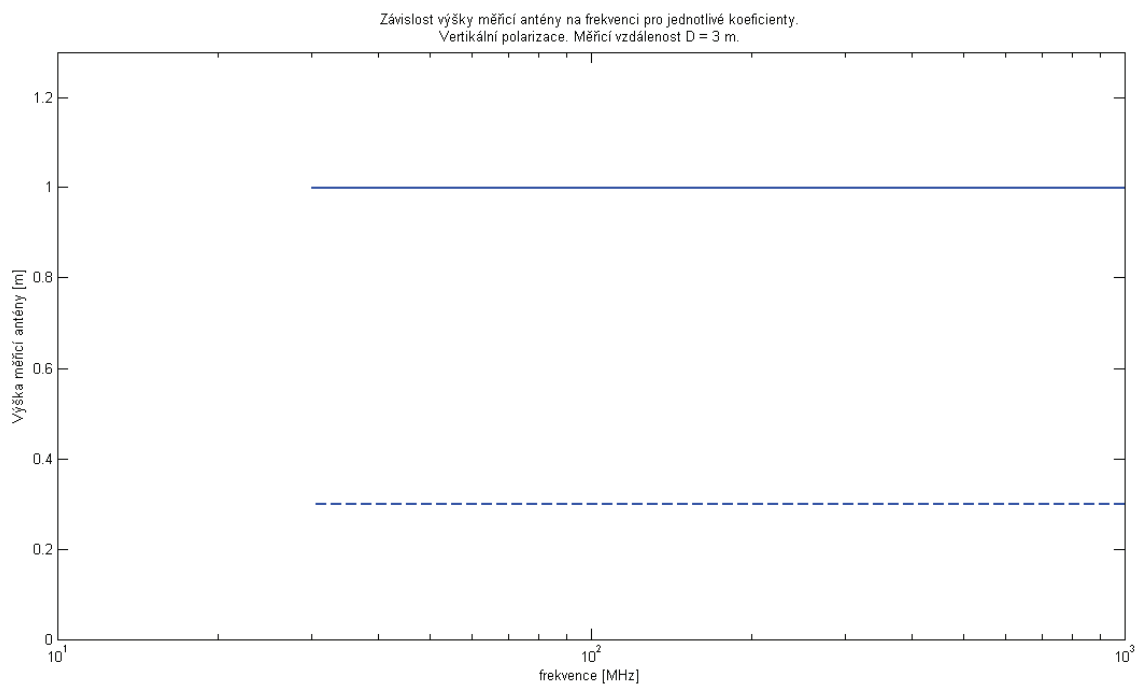


Obr 5.19.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 3$ m

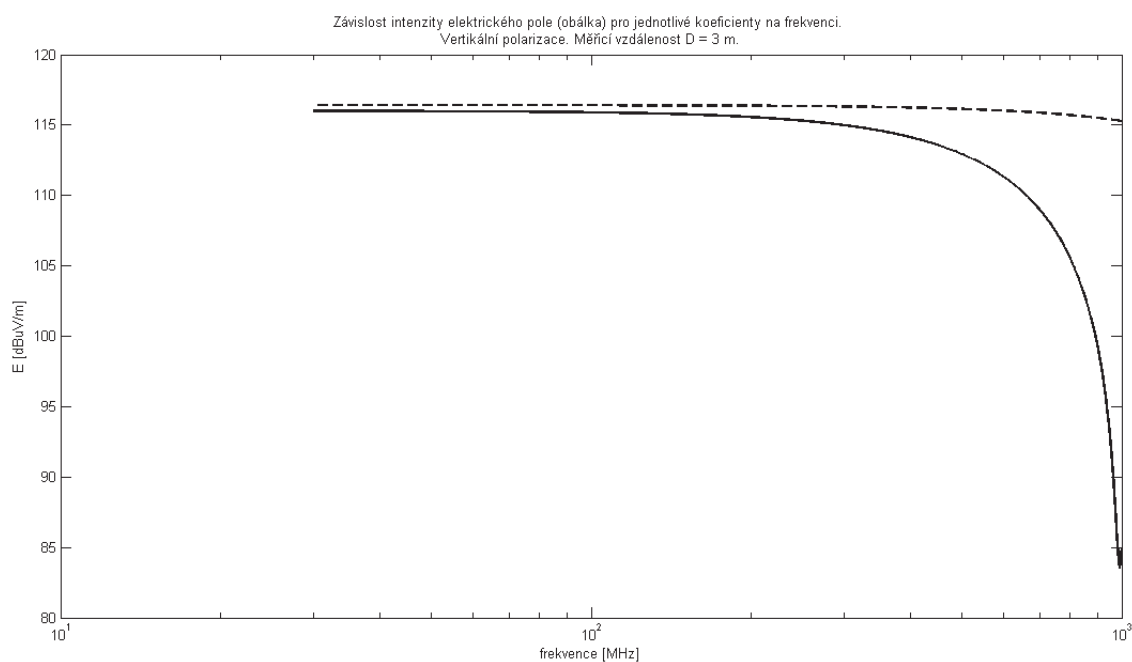


Obr 5.20.: Závislost normovaného dráhového rozdílu na frekvenci, $D = 3$ m

Z předešlých výpočtů „precizní metodou“ byla získána výška měřicí antény $V_A = 0,3$ m pro celý kmitočtový rozsah. K poklesu intenzity přijímaného pole zde téměř nedošlo, obr. 5.18. Výsledek není zcela vhodný z důvodu, že pro praktická měření je uvažována anténa Bilog s rozměry 0,98 m (š) x 1,525 m (d). V případě, že tato anténa bude polarizována vertikálně, jen nutná výška antény nejméně 1 m na vodivou plochu. Další výpočet byl proveden při umístění měřicí antény $V_A = 1$ m pro celé kmitočtové pásmo.

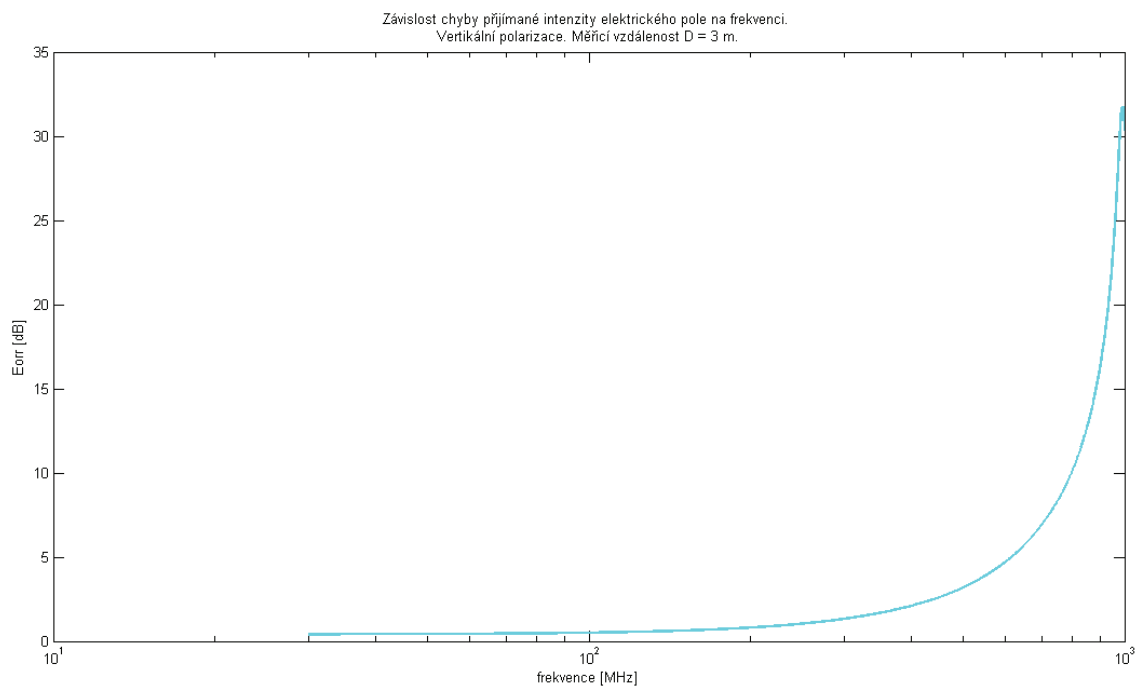


Obr 5.21.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 3$ m



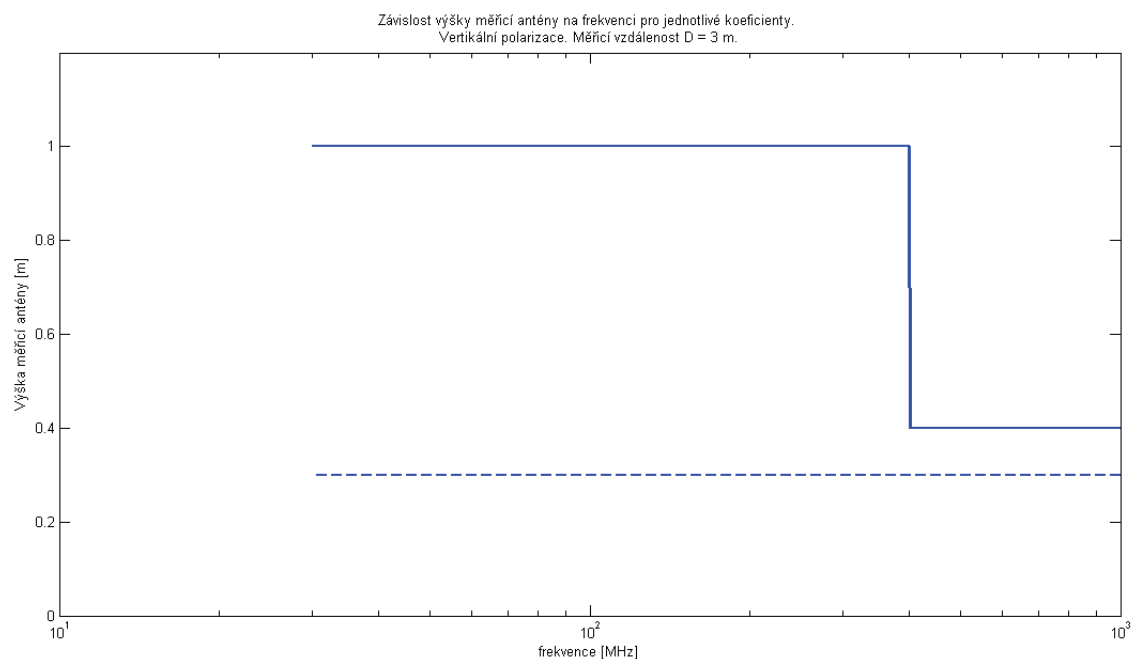
Obr 5.22.: Závislost intenzity pole na frekvenci pro dvě výšky měřicí antény, $D = 3$ m

Na obr. 5.21 je zobrazeno vykreslení výšek antény při $V_A = 0,3$ m a $V_A = 1$ m (plná čára), kde v obr. 5.22 jsou zobrazeny intenzita pole při daných výškách. Intenzita pole při posunuté výšce měřicí antény do 1 m klesá velmi výrazně nad kmitočet 400 MHz. Rozdíl intenzit elektrického pole dosahuje téměř k 32 dB, což je nepřijatelná chyba a je nutno jej řešit. Rozdíl přijaté intenzity pole (chybu) zobrazuje obr. 5.23.

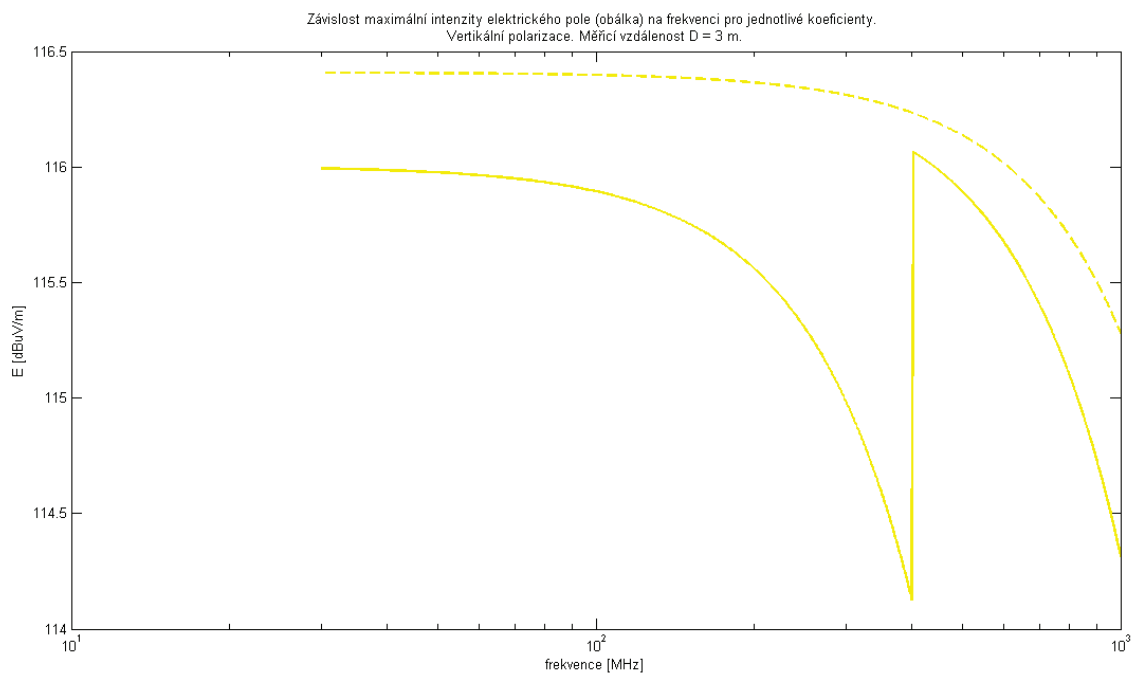


Obr 5.23.: Závislost chyby přijaté intenzity pro dvě měřicí výšky, $D = 3$ m

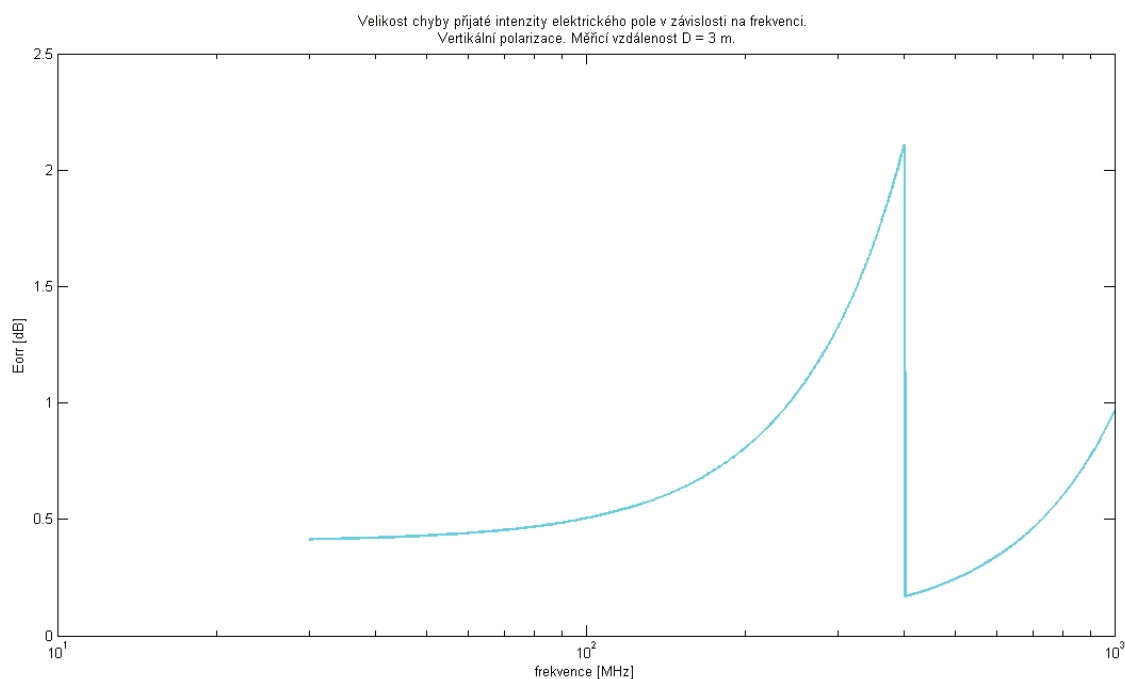
Nově navrhnuté řešení v umístění antény bylo umístění antény do výšky 0,4 m pro kmitočtové pásmo nad 400 MHz. Zde je jako měřicí anténa uvažována anténa HyperLOG [7], která svými menšími rozměry dovoluje provádět měření v této výšce. Provedené výpočty dokazují, že posunutí antény směrem dolů snižuje chybu přijaté intenzity elektrického pole v porovnání s maximální přijatou intenzitou elektrického pole.



Obr 5.24.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci pro dvě posunutí, $D = 3$ m



Obr 5.25.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci pro dvě posunutí měřicí antény, $D = 3$ m



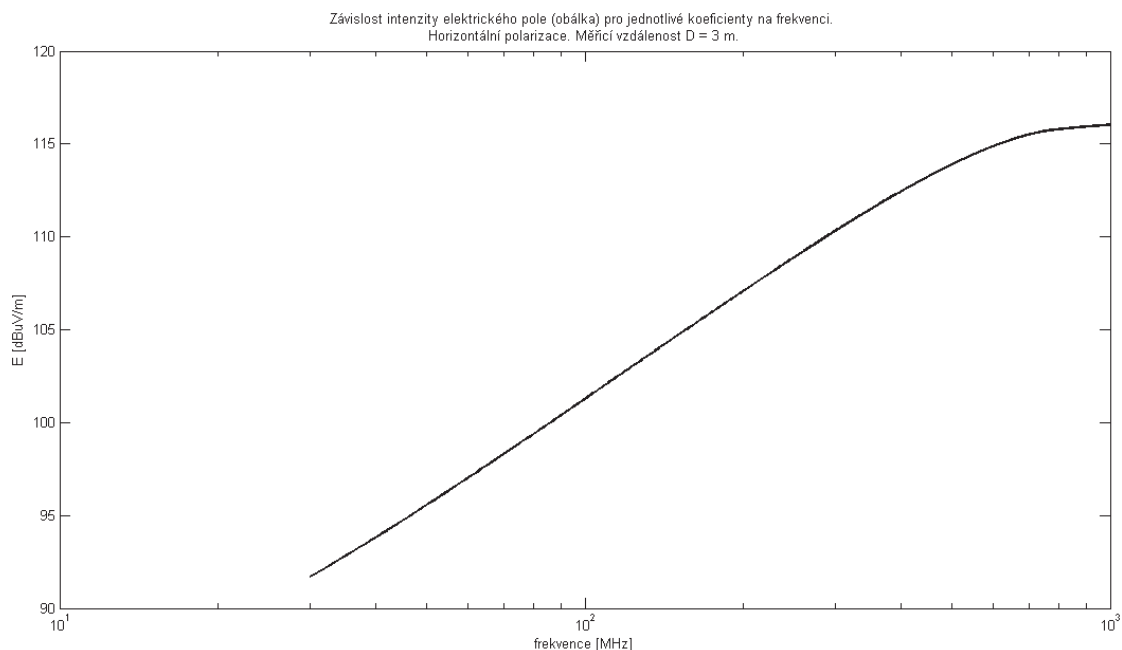
Obr 5.26.: Závislost chyby přijaté intenzity elektrického pole na frekvenci pro dvě posunutí měřicí antény, $D = 3$ m

Nejvyšší chybu přijaté intenzity elektrického pole při změně měřicí antény pro kmitočty vyšší jak 400 MHz zobrazuje obr. 5.26, kde hodnota chyby dosahuje hodnoty 2,2 dB. Tento výsledek je přijatelný pro další práci.

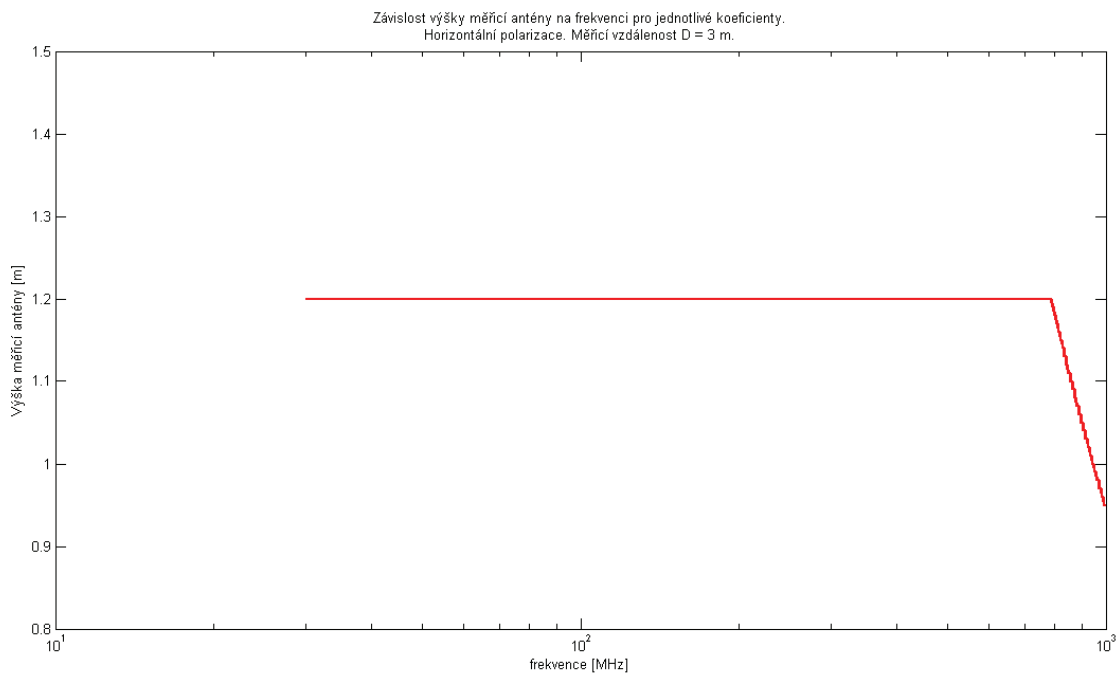
5.7.2 Horizontální polarizace

Hlavním rozdílem oproti vertikální polarizované vlně je skutečnost, že při této polarizaci dochází k otáčení fáze o 180° u odražené vlny při odrazu od zemní vodivé roviny.

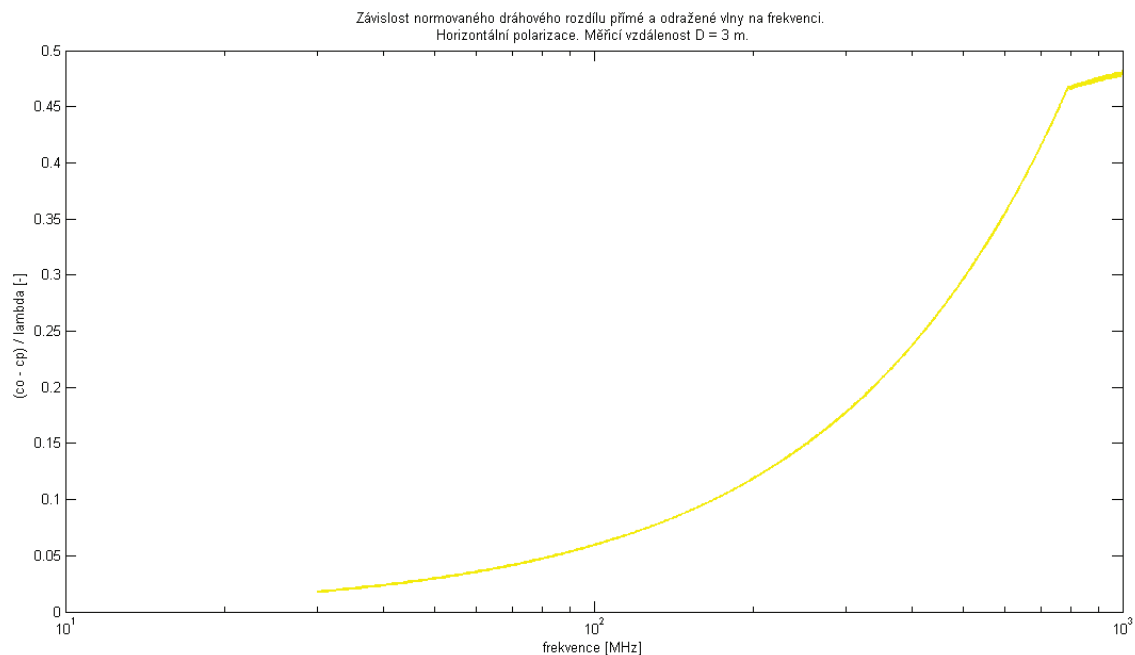
Pomocí „precizní metody“ byly provedeny výpočty výšky měřicí antény V_A při maximální intenzitě přijímaného elektrického pole touto anténou.



Obr 5.27.: Závislost maximální intenzity elektrického pole na frekvenci, $D = 3$ m

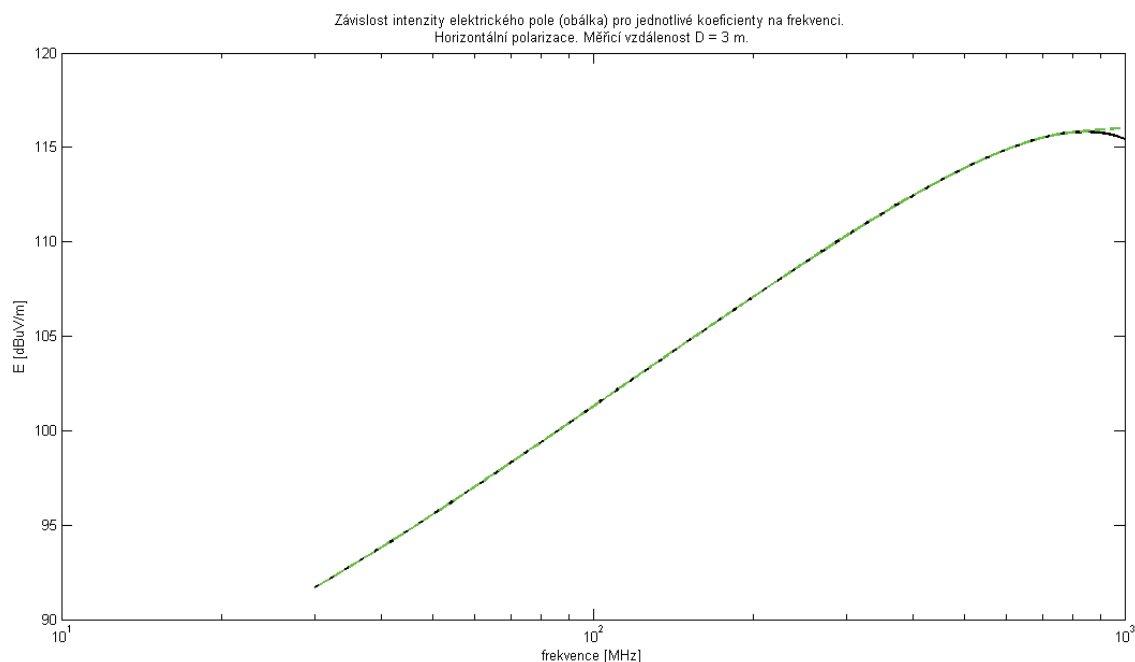


Obr 5.28.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, $D = 3$ m

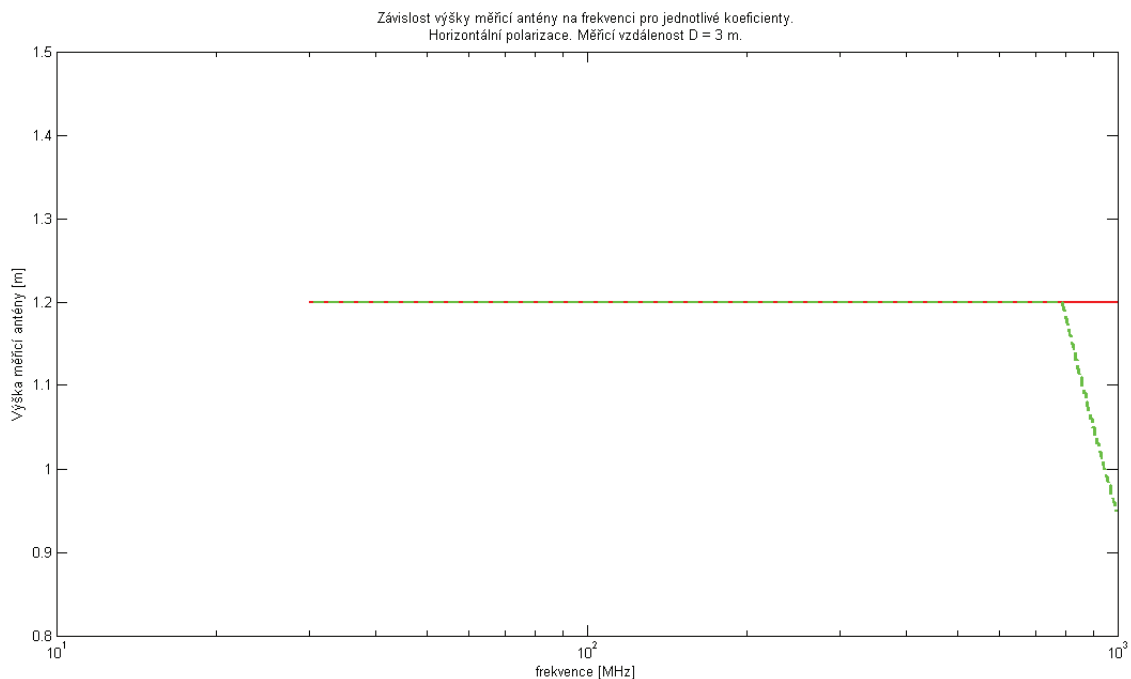


Obr 5.29.: Závislost normovaného dráhového rozdílu na frekvenci, $D = 3$ m

Ze závislosti výšky měřicí antény na frekvenci dle obr. 5.28 je vidět, že V_A je v téměř celém kmitočtovém rozsahu rovna jedné výšce. Navrhovaným řešením, jak nehýbat anténou po dobu měření, je umístění měřicí antény do $V_A = 1,2$ m pro celý kmitočtový rozsah.

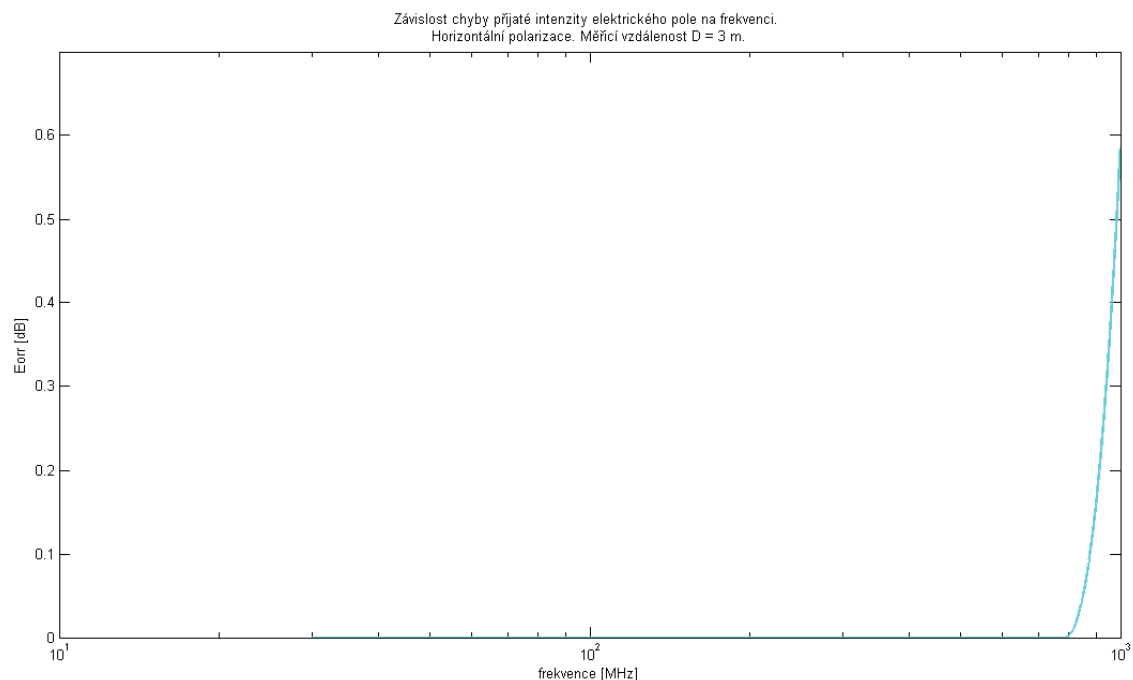


Obr 5.30.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci při dvou výškách měřicí antény, $D = 3$ m



Obr 5.31.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci při dvou výškách měřicí antény, $D = 3$ m

Z důvodu lepší přehlednosti je zde použita pro původně nalezenou maximální intenzitu elektrického pole zelená čárkovaná čára. Na obr. 5.30 je zobrazena maximální intenzita elektrického pole, plná černá čára zobrazuje intenzitu při výšce měřicí antény $V_A = 1,2$ m pro celé pásmo. Na obr. 5.31 je vykreslena původní a posunutá výška měřicí antény (červená čára).



Obr 5.32.: Zobrazení chyby přijaté intenzity elektrického pole na frekvenci, $D = 3$ m

Jak dokumentuje obr. 5.32, tak konstantní výška měřicí antény $V_A = 1,2$ m nezavádí do výpočtů chybu vyšší jak 0,7 dB. Tento výsledek je velmi dobrý z důvodu, že anténa je v dostatečné výšce nad vodivou rovinou a nemusíme být brán ohled na její rozměry. Výsledek je využit pro další práci.

6 Výpočty se směrovými charakteristikami

Předchozí výpočty maximální přijímané intenzity elektrického pole anténou jsou prováděny bez započítání směrovosti antény a zkoušený objekt (ZO) byl považován jako izotropní zářič. Jak již název kapitoly napovídá, dále jsou provedeny výpočty se započítáním směrových charakteristik pro přijímací anténu Bilog. Zkoušenému objektu, který vysílá přímou a odraženou vlnu, je vybráno několik parametrů činitele směrovosti.

Především výpočty intenzity elektrického pole pomocí „precizní metody“ v kapitole 5.7 jsou upraveny následovně:

- frekvenční logaritmická osa, 10 bodů na dekádu;
- započítání směrovostí přijímací antény pro přímou a odraženou vlnu;
- započítání koeficientů tlumení e_1 , e_2 zdroje;
- nalezení korekční křivky Y .

V programu CST Microwave byla vymodelována a provedena simulace směrových charakteristik antény Bilog (obr. 2.1) v kmitočtovém pásmu od 30 – 1000 MHz. Tyto charakteristiky byly využity k získání hodnot směrovostí $D(\varphi, \theta)$ pro požadované úhly dopadu přímé a odražené vlny na přijímací anténu. Při získávání hodnot směrovosti byla používána lineární aproximace hodnot, neboť jinak by to bylo velmi pracné.

Protože ZO se při měření otáčí vůči měřicí anténě, byly zvoleny tzv. tlumící koeficienty e_1 pro přímou vlnu a e_2 pro odraženou vlnu. Tyto koeficienty simulují situaci, kdy ZO vyzařuje pouze část své maximální intenzity elektrického pole směrem k anténě. Hodnoty e_1 i e_2 nabývají náhodně zvolených hodnot a lineárním krokem následovně: $e_1 = [0, 0.25, 0.5, 0.75, 1]$, $e_2 = [0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9]$. Počet kombinací těchto koeficientů je 25. Výstupní intenzita $E_{\max} = 1$ V/m (120 dBμV/m).

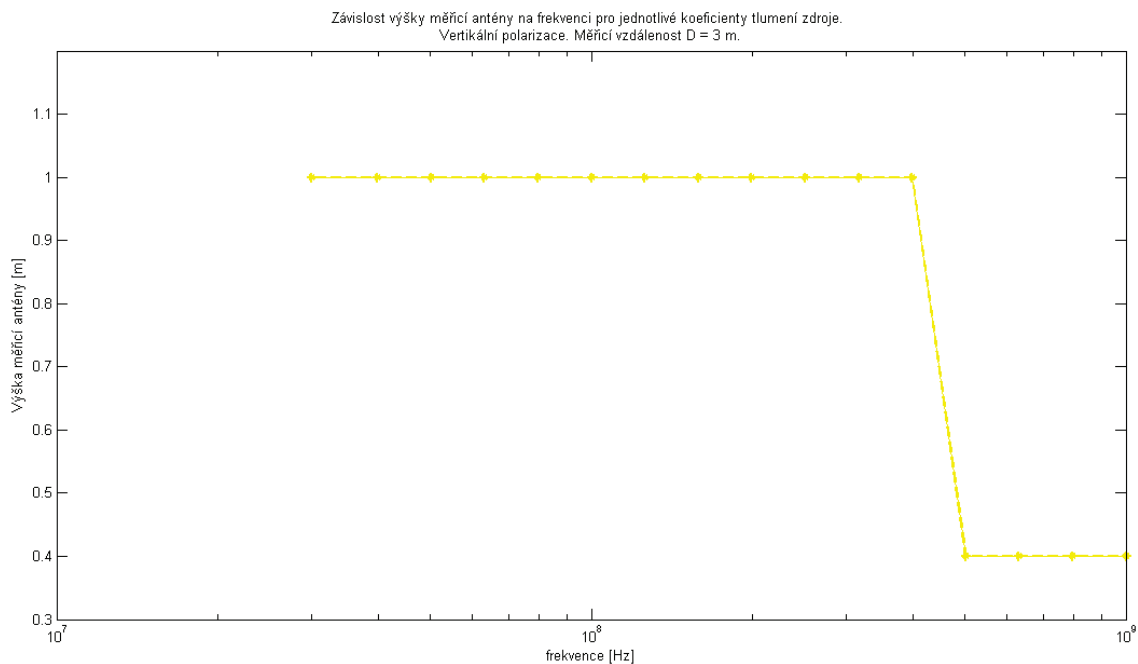
Pro každou kombinaci koeficientů e_1 a e_2 byl proveden výpočet intenzity elektrického pole podle následujícího kódu:

```
for y = 1:length(e2) %vypocet s koeficienty tlumeni, odrazena vlna
    for z = 1:length(e1) %vypocet s koeficienty tlumeni, prima vlna
        for i=1:length(vysky) %vypocet pres vsechny vysky
            for j=1:length(f) %vypocet pres vsechny frekvence
                % prima vlna tlumeni
                Ep_temp_2(i,j,z) = (e1(z).*Ep_temp_1(i,j));
                %odrazena vlna tlumeni
                Eo_temp_2(i,j,y) = (e2(y).*Eo_temp_1(i,j));
                %soucet vln po tlumeni
                IntenzitaVysky_4(i,j,y,z) = abs(Ep_temp_2(i,j,z) +
                                                Eo_temp_2(i,j,y));
            end
        end
    end
end
```

Vektor `IntenzitaVysky_4` je 4-D s hodnotami intenzit elektrického pole s rozměrem 91 x 16 x 5 x 5 buněk. Tento vektor je vypočítán z 2-D vektoru `IntenzitaVysky_3` (91 x 16 buněk), který je rozšířen kombinací tlumících koeficientů e_1 a e_2 . Celkový počet frekvencí v měřeném kmitočtovém rozsahu je 16. Dále byly získány z tohoto vektoru odpovídající výšky měřicí antény.

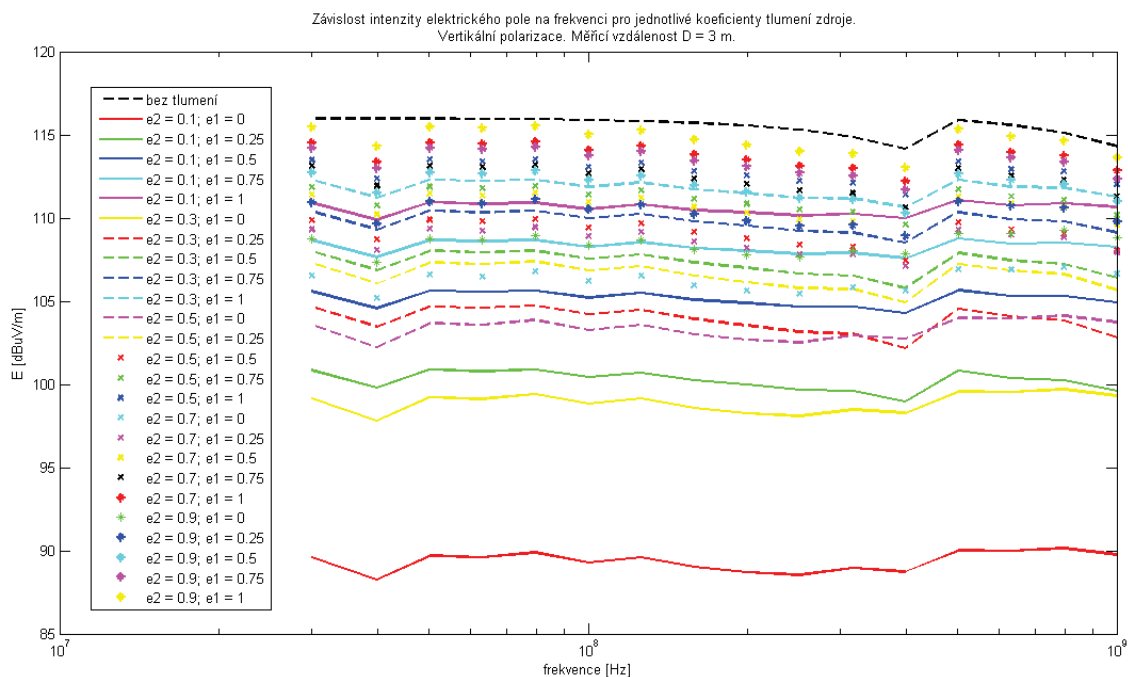
6.1 Vertikální polarizace

U této polarizace bylo dále vycházeno z výsledků v kapitole 5.7.1, kde byla jako řešení s nejmenší chybou přijímané intenzity pole stanovena konfigurace antény dle obr 5.24 (plná čára). Pro tuto výškovou konfiguraci (obr. 6.1) je proveden výpočet intenzity pole dle výše uvedeného kódu (str. 43) a získána závislost intenzity elektrického pole na frekvenci pro jednotlivé tlumící koeficienty e_1 a e_2 (obr. 6.2).



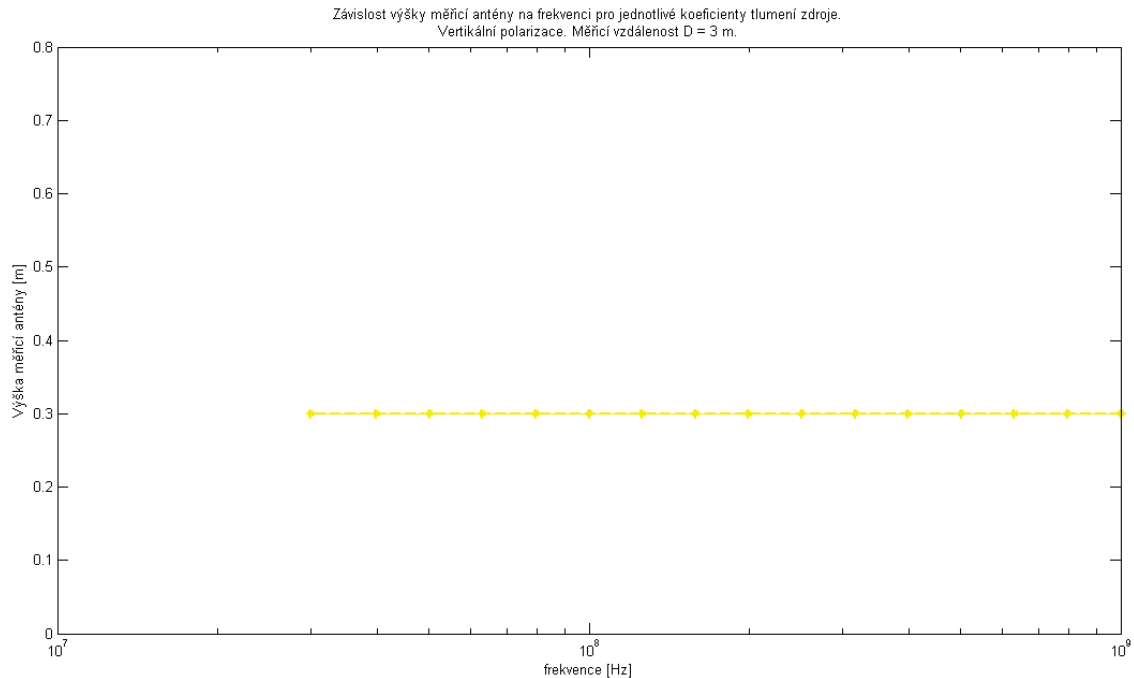
Obr 6.1.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, pevné výšky měřicí antény

Na obr 6.1 je zobrazeno pouze několik čar pro jednotlivé výšky, neboť se jednotlivé výšky překrývají.

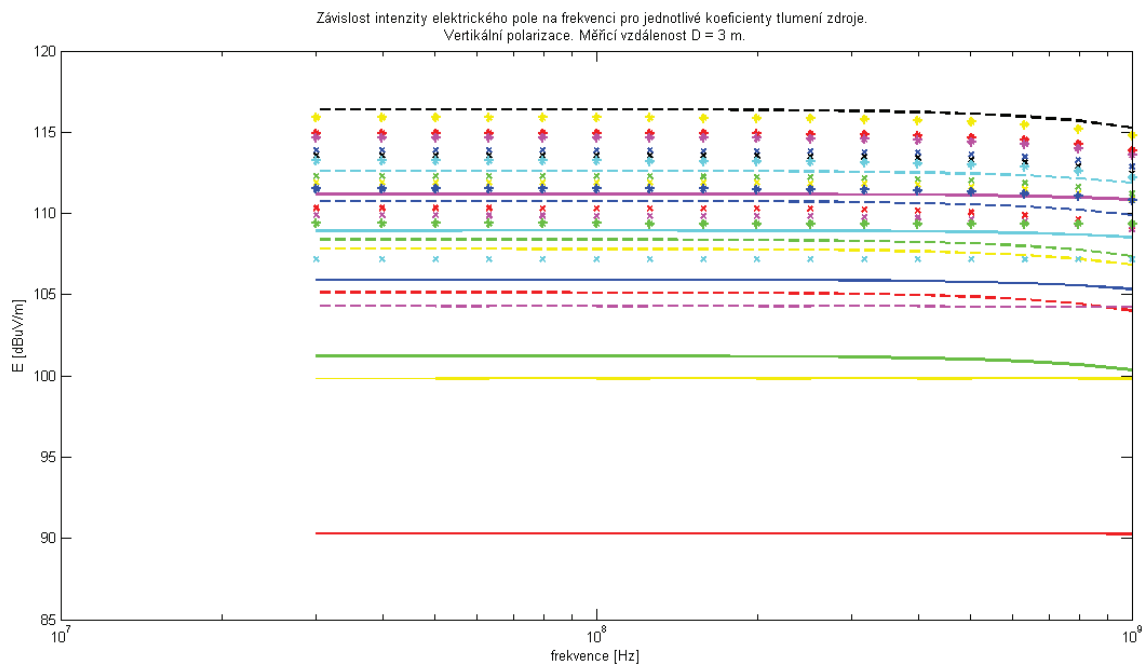


Obr 6.2.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, pevné výšky měřicí antény

Další simulací, která byla provedena se stejnými tlumícími koeficienty, byl výpočet maximální intenzity elektrického pole, kde se výška měřicí antény V_A pohybovala od 0,3 – 1,2 m.



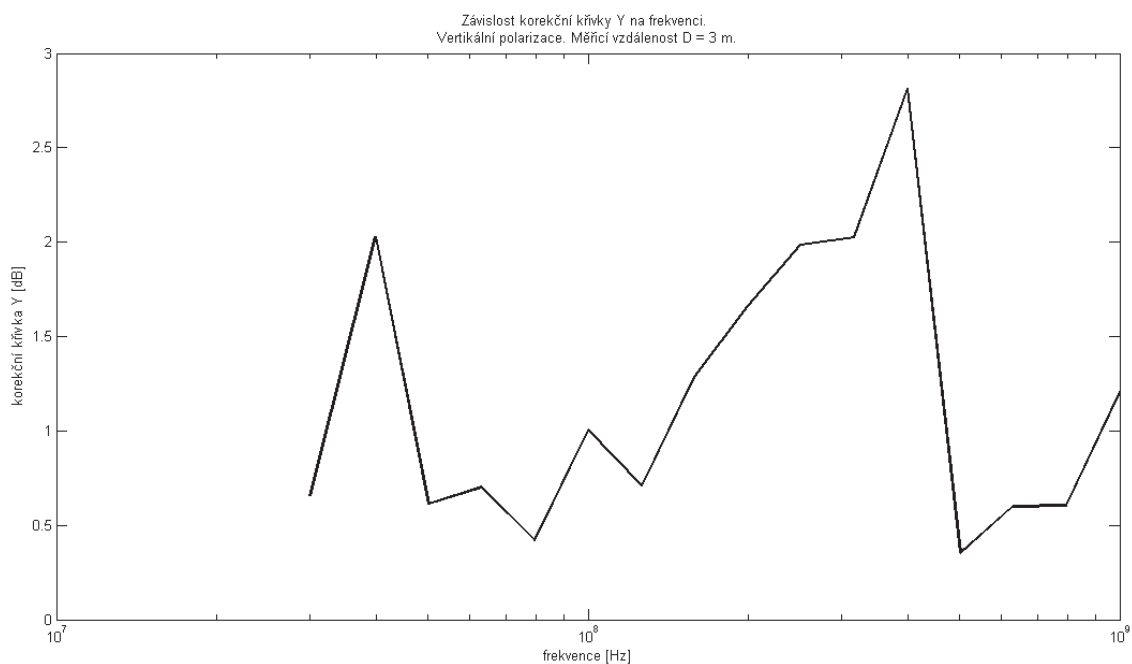
Obr 6.3.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, polohování měřicí anténou



Obr 6.4.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, polohování měřicí anténou

I přesto, že anténa byla polohována, její výška zůstala přes celý kmitočtový rozsah neměnná (obr. 6.3). Na obr. 6.4 je vykreslena závislost intenzity elektrického pole na frekvenci. Je možno si všimnout, že hodnoty intenzity téměř neklesají.

Způsob, jakým najít maximální možnou chyby přijímané intenzity pole, bylo zvoleno nalezení rozdílu sobě odpovídajících křivek intenzity (křivky se stejnými tlumícími koeficienty). Z těchto rozdílů byla na každé frekvenci nalezena maximální hodnota (nalezen tzv. nejhorší případ) a vykreslena její závislost na frekvenci (obr. 6.5).

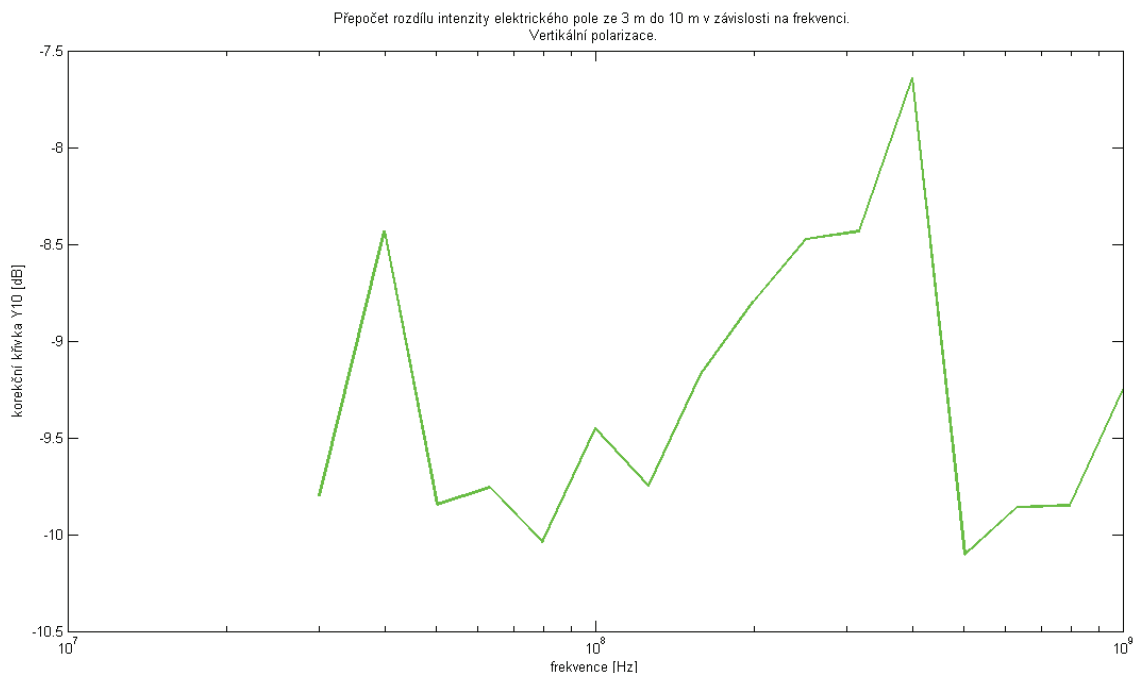


Obr 6.5.: Závislost korekční křivky Y na frekvenci

Pro vzdálenou zónu antény platí vztah 5.27. Pro tuto zónu byl proveden přepočet intenzity výsledného elektrického pole z měřicí vzdálenosti $D = 3$ m do měřicí vzdálenosti $D = 10$ m dle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned} E_{\max} &= 10^6 \mu\text{V/m} = 120 \text{ dB}\mu\text{B}\mu\text{V}, \\ E_x [\mu\text{V/m}] &= \frac{E_{\max} [\mu\text{V/m}] \cdot 3}{x[\text{m}]} = \frac{10^6 \cdot 3}{10} = 3 \cdot 10^5 \mu\text{V/m}, \\ E [\text{dB}\mu\text{V/m}] &= 20 \cdot \log(3 \cdot 10^5) = 109,54 \text{ dB}\mu\text{V/m}, \\ \Delta E &= E_{\max} - E = 120 - 109,54 = 10,46 \text{ dB}. \end{aligned} \quad (6.1)$$

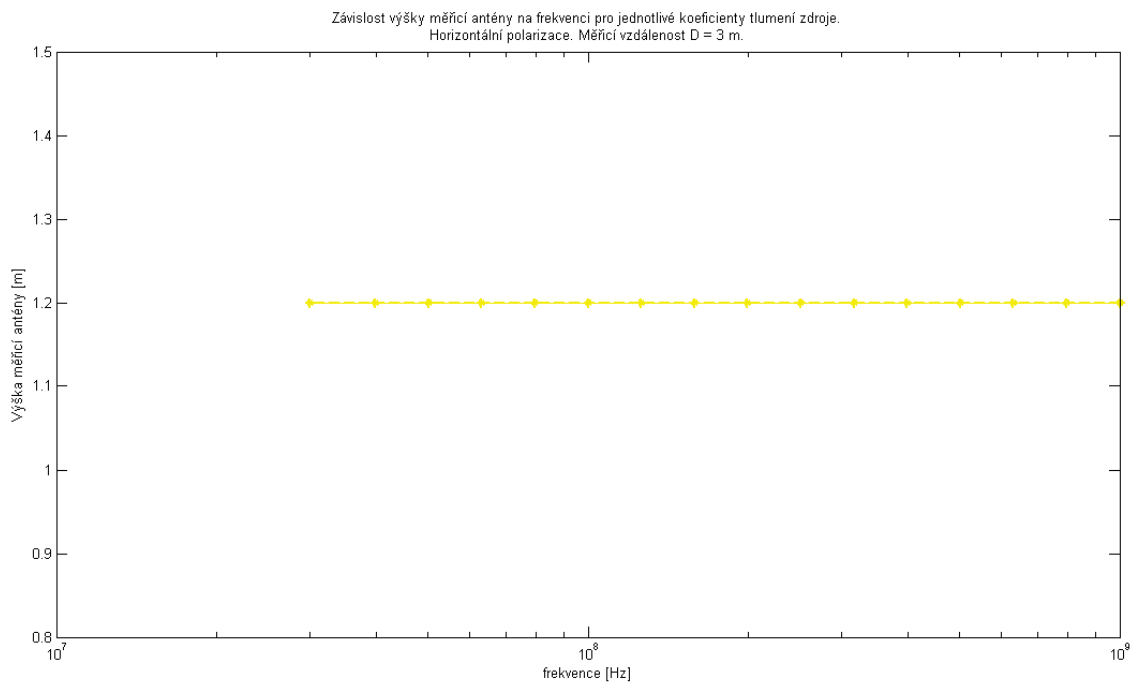
Získaná hodnota rozdílu intenzity pole (ΔE) ve vztahu (6.1) byla použita pro odečtení od korekční křivky Y dle obr. 6.5. Nově vzniklá korekční křivka Y_{10} říká, jakou hodnotu je nutno přičíst k naměřené intenzitě (rušivého) pole v měřicí vzdálenosti $D = 3$ m (transformované stanoviště), abychom získali přibližnou hodnotu intenzity elektrického pole v měřicí vzdálenosti $D = 10$ m.



Obr 6.6.: Závislost korekční křivky Y_{10} na frekvenci

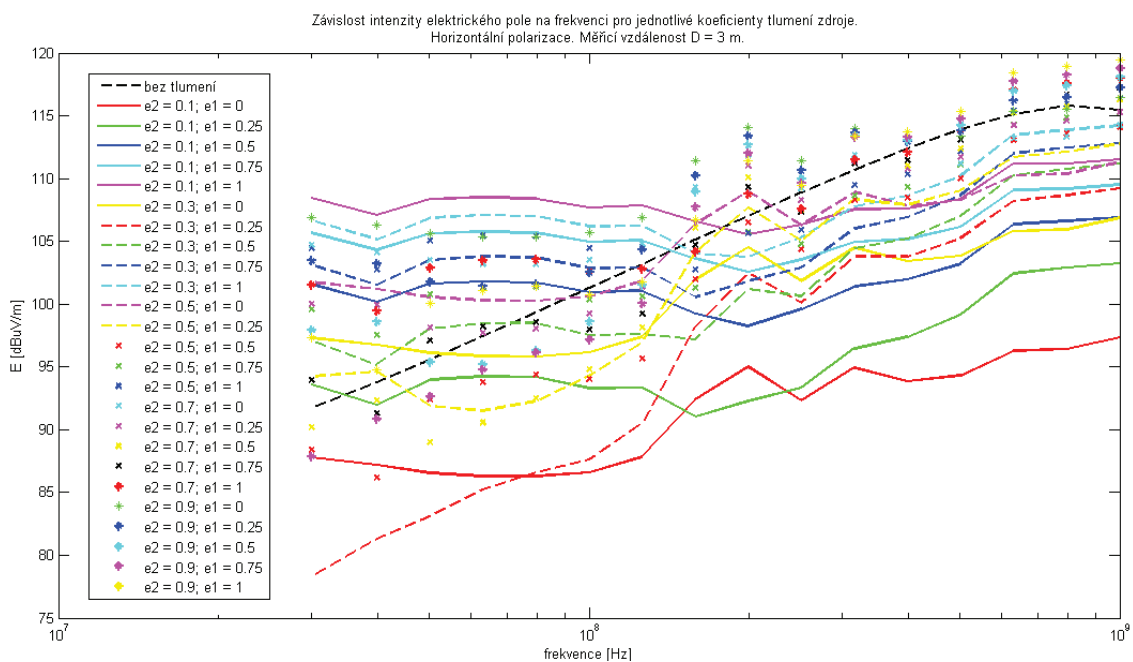
6.2 Horizontální polarizace

Při výpočtech s tlumícími koeficienty e_1 a e_2 je vycházeno ze závěru výškové konfigurace určené v kapitole 5.7.2. Zde byla jako nejvhodnější výška měřicí antény V_A nalezena výška 1,2 m v celém kmitočtovém pásmu (obr. 5.31). Pro tuto V_A je proveden výpočet intenzity elektrického pole pro všechny kombinace tlumících koeficientů. Jednotlivé křivky závislosti intenzity pole na frekvenci jsou vykresleny na obr 6.7.



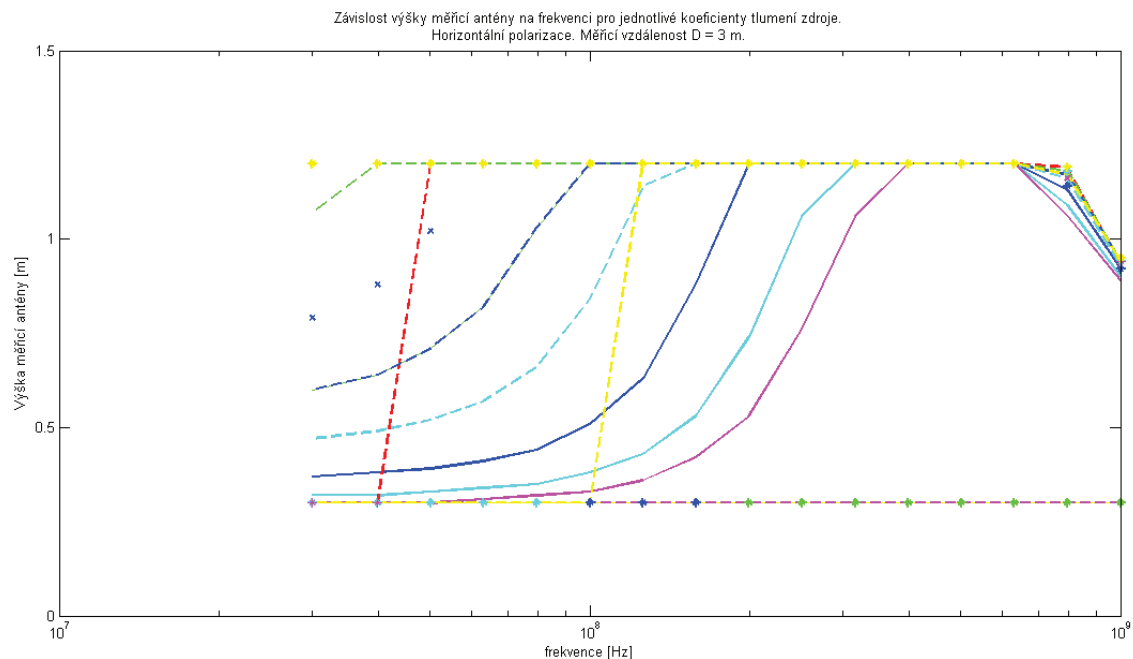
Obr 6.7.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, pevná výška antény

V obr. 6.6 nejsou zobrazeny všechny křivky výšky měřicí antény z důvodu, že se překrývají.

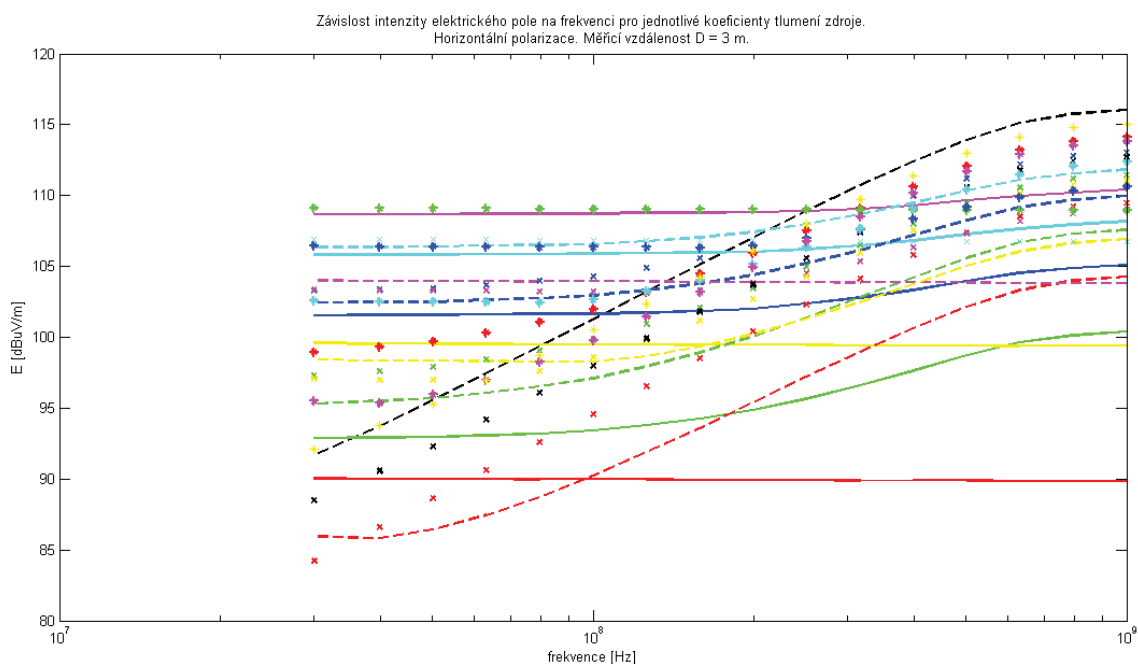


Obr 6.8.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, pevná výška

Aby bylo možné najít tzv. nejhorší případ chyby přijímané intenzity pole anténou, byly provedeny výpočty intenzity elektrického pole při polohování výšky antény v rozsahu 0,3 – 1,2 m.

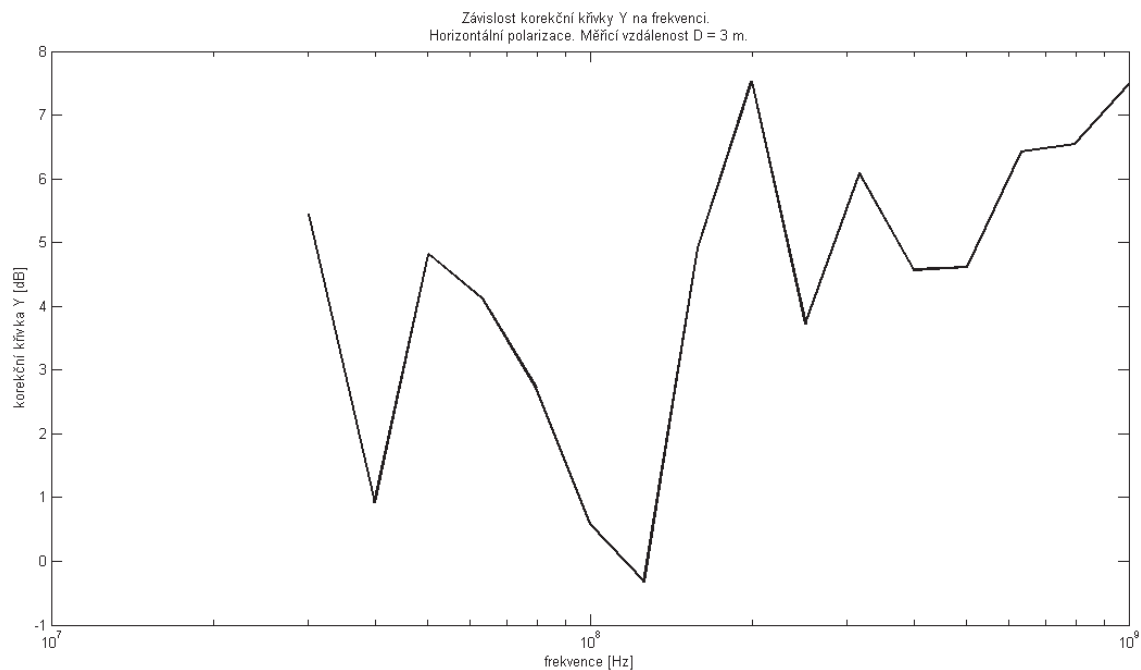


Obr 6.9.: Závislost výšky měřicí antény na frekvenci, polohování výšky antény



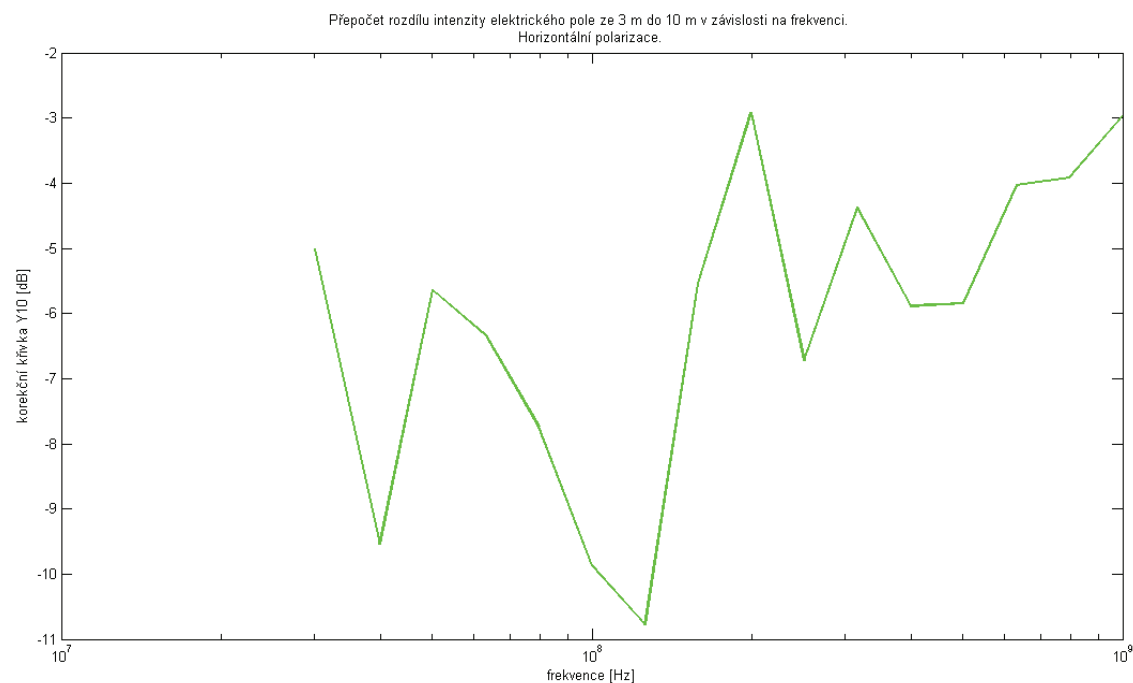
Obr 6.10.: Závislost intenzity elektrického pole na frekvenci, polohování výškou antény

K nalezení tzv. nejhoršího případu bylo postupováno jako u vertikální polarizace. Odečtením vzájemně souvisejících křivek intenzity elektrického pole (dle obr. 6.7 a 6.9) pro obě konfigurace výšky měřicí antény. Bylo tím získáno celkem 25 rozdílových křivek intenzity pole, z nichž na každém kmitočtu byla vybrána křivka s nejvyšší hodnotou. Nalezená korekční křivka Y je zobrazena na obr. 6.10.



Obr 6.11.: Závislost korekční křivky Y na frekvenci

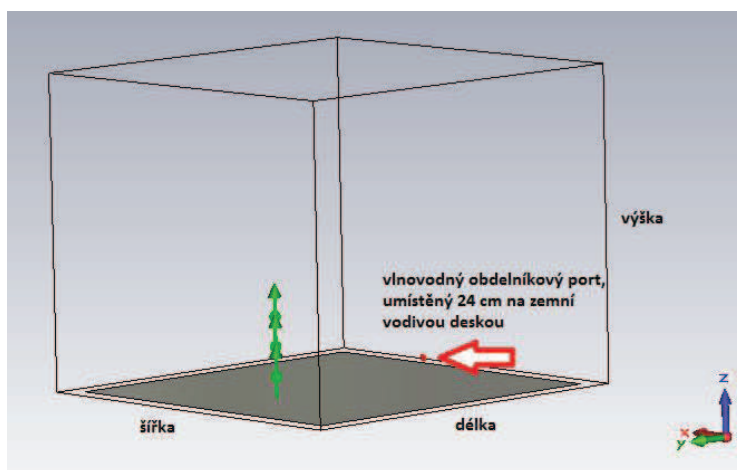
Přibližně přepočítaná hodnota naměřené intenzity elektrického pole v měřicí vzdálenosti $D = 3$ m do měřicí vzdálenosti $D = 10$ m byla provedena dle vztahu (6.1). Pro korekční křivku Y_{10} provedeme odečet konstanty $\Delta E = 10.46$ dB. Výsledek je zobrazen na obr. 6.12.



Obr 6.12.: Závislost korekční křivky Y10 na frekvenci

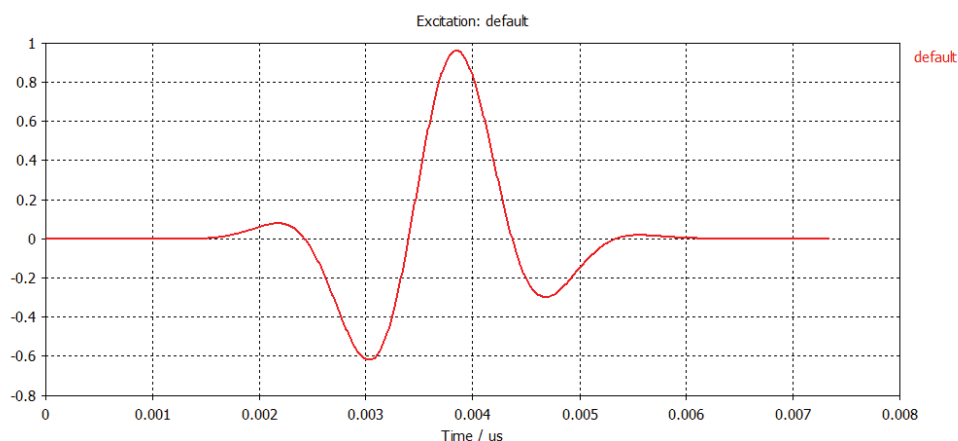
7 Simulace v bezodrazové komoře

Návrh částečně bezodrazové komory byl proveden v programu CST Microwave. Stěny této komory byly zvoleny jako open (add space) ve všech směrech, jako zemní plocha byla zvolena deska z PEC (perfect electric conductor). Izotropní zářič byl realizován pomocí waveguide portu, kde tento port má obdélníkový tvar. Obdélníkové rozměry byly zvoleny z důvodu buzení elektromagnetické vlny ve směru osy z . Osa y je osou, ve které je umístěn port a měřicí sondy. Celkem 3 sondy byly rozmístěny ve výškách 1,2 m (červená), 0,75 m (zelená) a 0,3 m (modrá), byly umístěny do měřicí vzdálenosti $D = 3$ m dle obr. 7.1.



Obr 7.1.: Návrh komory pro simulaci v programu CST Microwave

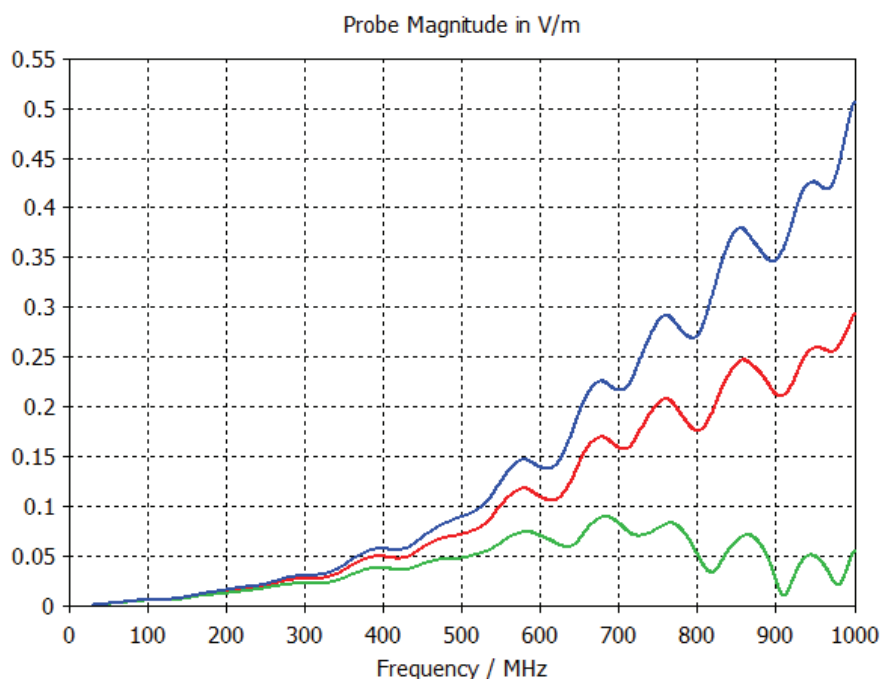
Port, který představoval izotropní zářič, byl buzen gaussovským signálem dle obr. 7.2. Kmitočtový rozsah simulace byl nastaven od 30 – 1000 MHz, v simulaci bylo nastaveno sledování elektrického pole na vybraných kmitočtech 100, 300, 500 a 1000 MHz. Na těchto kmitočtech bylo sledováno, jak se vlna šíří v prostoru komory, zda nabývají jednotlivé vlnoplochy kulového tvaru.



Obr 7.2.: Signál, kterým je buzen port

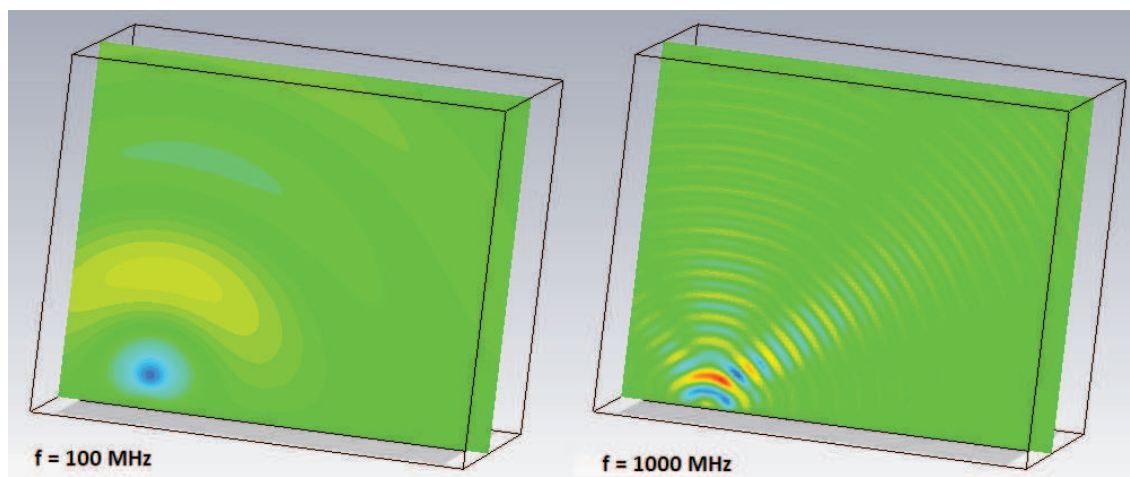
Při pokusu o objektivní porovnání výsledků s kapitolou 5.7 nebylo zcela možné výsledky porovnat. V zmiňované kapitole nebyla při teoretických výpočtech definována velikost izotropního zářiče, pouze výstupní intenzita elektrického pole $E_{\max}$. Byl proveden výpočet poměru intenzit elektrického pole E_2 / E_1 teoretických výsledků na zvoleném kmitočtu, kde $E_1 = E_{\max}$.

V simulaci lze jako jeden z budících signálů nastavit puls dle obr. 7.2. Z několika experimentálních pokusů přiblížit se co nejvíce teoretickému poměru E_2 / E_1 (v $\mu\text{V/m}$) se jako nejprůběhnější řešení jevil případ s velikostí portu 100 x 120 mm, kde činitel odrazu byl od -58 do -32 dB pro celé kmitočtové pásmo. Intenzita elektrického pole přijatá sondami vypadala následovně:



Obr 7.3.: Průběh intenzity elektrického pole přijatý sondami

Průběh výsledku na obr. 7.3 není stejný v porovnání s teoretickým výpočtem dle obr. 5.27. Chybu přisuzuji nemožnosti stejného nastavení hodnoty výstupní intenzity elektrického pole $E_{\max}$ v teoretických výpočtech a simulaci. Poměrové posouzení intenzit pole E_2 / E_1 není vhodné řešení. Na obr. 7.4 je možno vidět průběh šíření vlny pro nízké kmitočty a vysoké kmitočty.

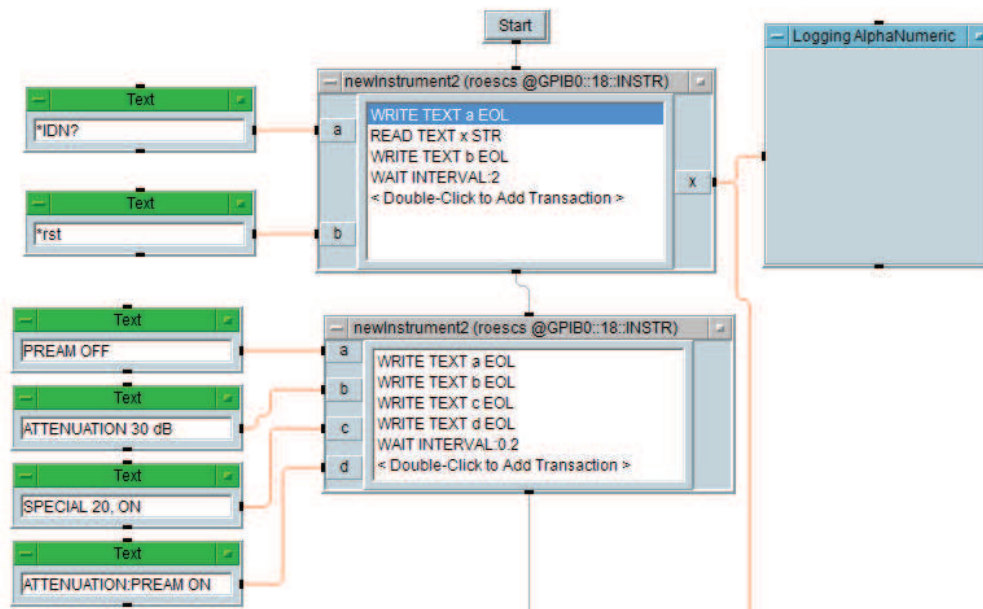


Obr 7.4.: Šíření vlny v prostoru komory při $f = 100\text{MHz}$ a při $f = 1000\text{MHz}$

Dále bylo testováno, jaký vliv mají rozměry (délka, šířka) komory na intenzitu přijatého pole. Rozšíření komory o 1 m na každé straně nemá žádný vliv, naopak prodloužení komory o stejnou délku na každé straně má vliv takový, že intenzita přijímaného pole se o více jak 40% zmenší.

8 Program pro měření rušivých signálů

Po dohodě s vedoucím práce bylo naprogramování této úlohy provedeno v grafickém prostředí VEE Pro od firmy Agilent. V úloze bylo provedeno základní nastavení všech parametrů pro měření rušivých signálů dle normy [4] v kmitočtovém rozsahu 30 - 1000 MHz. Měření bylo provedeno v částečně bezodrazové komoře.

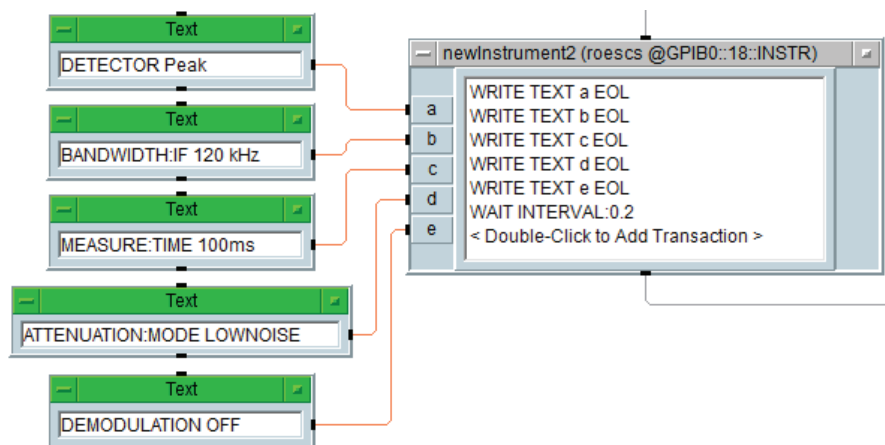


Obr 8.1.: Nastavení parametrů měřiče rušení

Jako měřicí přijímač rušení byl použit přístroj EMI TEST RECEIVER ESCS 30, který splňuje požadavky pro měření rušení normou [4]. Šířka pásma měřiče rušení je standardizována, její přehled je uveden v tab. 4.3.

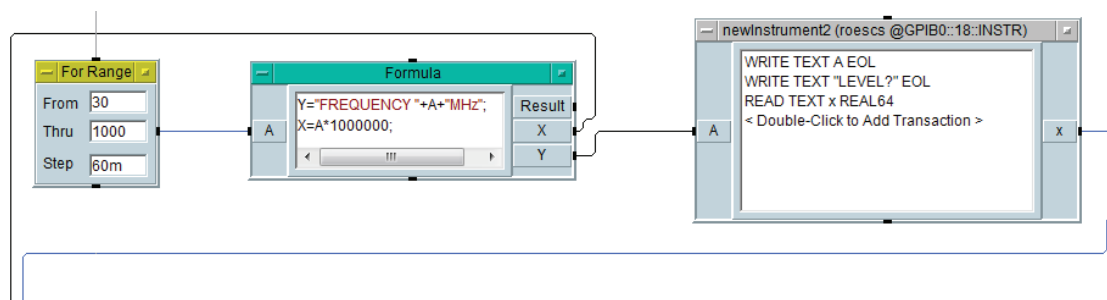
Vývojový diagram programu je sestaven z následujících příkazů, které jsou zadávány měřicímu přijímači. Identifikace zařízení příkazem ***IDN?**, dále byl proveden restart tohoto zařízení pomocí ***RST**. V nastavení bylo nutné provést vypnutí vstupního předzesilovače příkazem **PREAM OFF**, nastavení vstupního atenuátoru na hodnotu **ATTENUATION 30 dB** kvůli ochraně směšovače, zobrazení jednotek dBm bylo provedeno příkazem **SPECIAL 20, ON** [13].

Dle obr. 8.2 je pokračováno v nastavení typu detektoru. Ten byl zvolen jako špičkový detektor (Peak), který je doporučován pro předskanovací měření. Šířka pásma měřiče zvolena dle tabulky 4.3 pro pásmo C pomocí příkazu **BANDWIDTH:IF 120 kHz**. Příkaz **MEASURE:TIME 100 ms** udává čas měření úrovně signálu na jedné frekvenci. Mód atenuátoru nastaven na **LOWNOISE** a příkazem **DEMODULATION OFF** je deaktivován demodulátor přijímače [13].



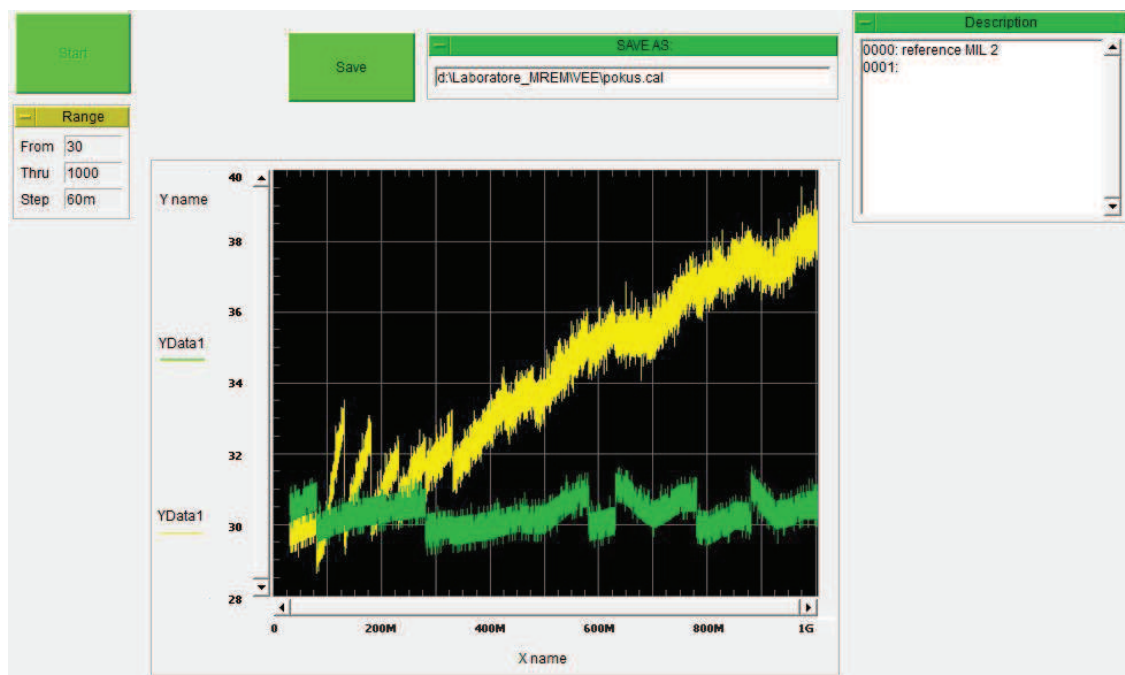
Obr 8.2.: Další nastavení přijímače pro měření rušení

Na obr. 8.3 je provedeno nastavení frekvenčního rozsahu celého měření s patřičným krokem v cyklu **For Range**, jenž vychází ze šířky pásma měřicího přijímače. Pomocí **Formuly** je provedeno načtení frekvence a následně jeho úprava na správný formát, vpravo je proveden zápis frekvence do měřicího přijímače a zjištěna úroveň rušení příkazem **LEVEL?** na měřeném kmitočtu [13].



Obr 8.3.: Nastavení rozsahu frekvenčního měření

Posledním bodem v programu bylo vytvoření ukládání naměřených hodnot do souboru (ve formátu *.cal), aby mohly být hodnoty použity pro vykreslení. Na obr. 8.4 je vidět celý program, kde je možno zvolit umístění souboru, pomocí grafu *X vs Y plot* jsou zobrazeny aktuálně naměřené hodnoty rušení.



Obr 8.4.: Výsledný program pro měření rušení

9 Závěr

V diplomové práci byl proveden teoretický rozbor měření rušivých signálů pomocí antén. Byl vytvořen stručný přehled a popis antén, které jsou vhodné pro měření rušivých signálů u zvoleného kmitočtového rozsahu. Pro měření intenzity elektrického pole je možno použít spektrální analyzátor či přijímač rušení - nejčastěji selektivní mikrovoltmetr, které splňují požadované normy pro vybrané parametry měřičů rušení.

V práci je proveden výpočet výšky měřicí antény, na které je získána maximální intenzita elektrického pole, při uvažování izotropního zářiče a izotropního přijímače. Při šíření kulové vlny mezi zkoušeným objektem a měřicí anténou byl proveden výpočet Fresnelova činitele odrazu, který dokázal, že pro horizontální vlnu dochází při odrazu od zemní vodivé plochy a otočení fáze o 180° u signálu.

Pro izotropní zářič i přijímač, kde zářič vyzařuje výstupní elektrické pole s intenzitou $E_{\max} = 1 \text{ V/m}$. Pro tyto výstupní pole byly provedeny výpočty intenzity pole na straně přijímací antény pro doporučené výšky měřicí antény dle normy (pre-scan měření), kde byla zjišťována chyba přijaté intenzity pole anténou vůči maximální intenzitě. Pro měřicí vzdálenost 10 m chyba vyhovovala doporučení normou, pro menší měřicí vzdálenost 3 m byla zjištěna vyšší chyba přijímané intenzity, jež nevyhovuje normě.

Navrhované transformované měřicí stanoviště vychází z měřicí vzdálenosti 10 m. Pro toto stanoviště byly vypočítány hodnoty maximální intenzity elektrického pole pomocí Precizní metody, kdy anténa byla polohována v celém jejím výškovém rozsahu. Pro nejvyšší hodnoty intenzity přijímaného pole byly pro obě polarizace nalezeny výšky měřicí antény. U vertikální polarizace byla pro celé kmitočtové pásmo jako nejlepší měřicí výška určena 0,3 m. Tato výška s ohledem na rozměry měřicí antény nemohla být akceptována. Dále byl proveden návrh pro úpravu měřicích výšek 1 m a 0,4 m pro kmitočet vyšší jak 400 MHz, kde byla vyhodnocena také chyba přijímané intenzity elektrického pole anténou nepřesahující hodnotu 2,2 dB. U horizontální polarizace na transformovaném stanovišti byla nalezena jako nejlepší měřicí výška 1,2 m téměř v celém kmitočtovém rozsahu. Pevná výška měřicí antény u této polarizace je stanovena na 1,2 m, chyba přijaté intenzity elektrického pole dosahovaly maximálně hodnoty 0,7 dB.

Dále byly provedeny výpočty přijímané intenzity pole se směrovými charakteristikami antény měřicí antény Bilog. Jako zářič byl uvažován neznámý objekt (výstupní intenzita elektrického pole $E_{\max} = 1 \text{ V/m}$), který byl charakterizován útlumovými koeficienty přímé a odražené vlny, které vysílal. U vertikální polarizace, kde jsou navrženy dvě pevné měřicí výšky antény, byla zjištěna maximální chyba 3 dB přijímané intenzity elektrického pole. Získané výpočty u horizontální polarizace dokazují, že při izotropním vysílání a přijímání nemusí být nalezena maximální intenzita elektrického pole. Získaná maximální chyba přijímané intenzity pole anténou zobrazuje obr. 6.11 pro zvolené tlumivé koeficienty e_1 a e_2 .

Nalezené křivky maximální chyby přijímané intenzity elektrického pole byly přepočítány z měřicí vzdálenosti 3 m do měřicí vzdálenosti 10 m podle výpočtu 6.1 pro obě polarizace. Výsledkem je závislost korekční křivky Y_{10} na frekvenci.

U navrhovaného transformovaného měřicího stanoviště jsou nevýhodné zejména jeho příliš malé výšky pro umístění zkoušeného objektu a antény. Je tedy nutné použít menší měřicí antény při měření zejména vertikální polarizace. Naopak výhodou může být měření v podstatně levnějších prostorách a při správném použití korekčních dat také poměrně přesně stanovené hodnoty elektrické intenzity pole rušivých signálů.

Simulace transformovaného stanoviště byla provedena v programu CST Microwave, kde měly být ověřeny teoretické výsledky pro izotropní zářič a izotropní přijímač. Výsledky simulace jsou odůvodněny přímo v kapitole. Byl sestaven program v grafickém prostředí VEE Pro od firmy Agilent pro měření rušivých signálů pomocí antény ze zkoušeného objektu. V bezodrazové komoře bylo provedeno zkušební měření, kdy byla ověřena funkčnost programu.

Literatura

- [1] DŘÍNOVSKÝ, J., FRÝZA, T., SVAČINA, J., KEJÍK, Z., RŮŽEK, V., ZACHAR, J., *Elektromagnetická kompatibilita – přednášky*. Brno: Vysoké učení technické 2010, 230 stran.
- [2] SVAČINA, J., *Základy elektromagnetické kompatibility, Část 1 – základní pojmy a členění v oboru EMC* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2000 – [cit. 13. prosince 2012]. Dostupné na [www: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00025/index.html>](http://www.elektrorevue.cz/clanky/00025/index.html).
- [3] Česká technická norma ČSN EN 55022, *Zařízení informační techniky – Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení – Meze a metody měření*. Česká technická norma, úřad pro technickou normalizaci, meteorologii a státní zkušebnictví, Duben 2007.
- [4] Česká technická norma ČSN EN 55016-1-1, ed.3, *Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – měřicí přístroje*. Česká technická norma, úřad pro technickou normalizaci, meteorologii a státní zkušebnictví, Září 2007.
- [5] Česká technická norma ČSN EN 55016-1-4, 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*. Česká technická norma, úřad pro technickou normalizaci, meteorologii a státní zkušebnictví, Únor 2008.
- [6] Česká technická norma 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 – Metody měření rušení a odolnosti – Měření rušení šířeného zářením*. Česká technická norma, úřad pro technickou normalizaci, meteorologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [7] Active-Antennas for the whole frequency range from 400MHz up to 6GHz. *Aaronia AG* [online]. 2012, 26.4 [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.aaronia.com/Datasheets/Antennas/Active-LogPer-Antenna-40X.pdf> >
- [8] HAIS, J. *Měřicí antény v EMC*. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechniky – Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, 2008.
- [9] CHATTERTON, P. A., HOULDEN, M. A., *EMC - Electromagnetic Theory to Practical Design*. John Wiley, New York 1991.
- [10] LÁČÍK, J., *Pomocný učební text pro kurz Navrhování rádiových spojů*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009, 14 stran.
- [11] PECHAČ, P., ZVÁNOVEC, S., *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. Praha: BEN, 2007.
- [12] RAIDA, Z., *Šíření vln ve volném prostoru* [online]. Brno: Vysoké učení technické – [cit. 2013-05-14]. Dostupné z http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lecture/lect_01.pdf >.
- [13] Agilent Technologies, *VEE Pro Help (součást programového prostředí VEE 9)*.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

EMC	(Electromagnetic compatibility); elektromagnetická kompatibilita
EMI	(Electromagnetic interference); elektromagnetické rušení
OATS	(Open area test site); zkušební stanoviště na volném prostranství
SAC	(Semi-anechoic chamber); částečně bezodrazová komora
FAC	(Fully anechoic chamber); plně bezodrazová komora
SA	(Site attenuation); útlum stanoviště
NSA	(Normalized site attenuation); normalizovaný útlum stanoviště
RL	(Return Loss); útlum odrazem
ITE	(Information technology equipment); zařízení informační techniky
ITU	(International telecommucation union); mezinárodní telekomunikační unie
CISPR	(Comité international spécial des perturbations radioélectriques); mezinárodní výbor pro radiovou interferenci v rámci IEC
PSV	poměr stojatých vln
PEC	(perfect electric conductor); perfektní elektrický vodič
ZO	zkoušený (proměřovaný) objekt