

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analýza vybraných vlivů na radiový přenos

Petr Márai

Bakalářská práce  
2013

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Márai**  
Osobní číslo: **I10296**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
Název tématu: **Analýza vybraných vlivů na radiový přenos**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

V teoretické části proveďte analýzu jednotlivých vlivů na radiový přenos (radiokomunikační rovnice), zahrnující jednotlivé druhy útlumů, vliv šíření při zemském povrchu, vliv atmosféry, vícecestné šíření, atd. Součástí BP bude u jednotlivých vlivů odkazy na literaturu se zaměřením na doporučení ITU.

V praktické části vytvořte SW modul umožňující podle zadaných vstupních parametrů radiového přenosu určit parametry výstupní. Součástí SW bude i grafický výstup umožňující zobrazit závislost vstupního výkonu na vzdálenosti od zdroje s ohledem na vybrané vlivy na radiový přenos (zobrazení bude umožňovat pro více nastavení vstupních parametrů zobrazovat více závislostí do jednoho grafu). Součástí praktické části bude i ověření SW v porovnání s reálným měřením výstupního výkonu na vzdálenosti.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

1. Haslett, Ch. **Essentials of Radio Wave Propagation**, Cambridge University Press, 2007, UK
2. Richards, John A. **Radio Wave Propagation: An Introduction for the Non-Specialist**, Springer, 2008
3. Sizun, H., **Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications (Signals and Communication Technology)**, Springer, 2005
4. Dobeš, J., Žalud, V. **Moderní radiotechnika**, BEN, Praha 2006
5. ITU Recommendation, [www.itu.int](http://www.itu.int)

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

**21. prosince 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**10. května 2013**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10. 5. 2013

Petr Márai

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce, panu Ing. Janu Pidaničovi, Ph.D. za informace, materiály, připomínky a čas, který mi věnoval během vytváření této práce. Dále bych poděkoval rodině za podporu při studiu a doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc. za poskytnutí dodatečných materiálů.

## **Anotace**

Cílem této bakalářské práce je analyzovat pozemní radiové spoje, které se používají k přenosu informace mezi pevnými nepohyblivými stanicemi. Při výrobě radiového spoje nás zajímají parametry pro přenos a vlivy, které na přenos působí. Cílem tedy je nastudovat právě tyto vlivy, které působí na spoj, patřičně je simulovat v Matlabu a vytvořit výpočtový SW.

## **Klíčová slova**

Radiový spoj, negativní vliv, radiokomunikační rovnice, útlum, elektromagnetická vlna

## **Title**

Software analysis of radio signal propagation

## **Annotation**

The objective of this work is to analysis the ground radio communications, which are used to transfer information between fixed immobile stations. In the production of radio connections, we are interested in the parameters of transmission and the effects in which transmission operates. So the objective is to study these influences and adequately simulated them in the Matlab and to create a calculated SW.

## **Keywords**

Radio link, negative influence, radiocommunication equation, attenuation, electromagnetic wave

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>9</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Základy šíření elektromagnetických vln</b> .....	<b>11</b>
1.1 Kulová vlnoplocha.....	11
1.2 Efektivní izotropický vyzářený výkon .....	13
1.3 Převody jednotek .....	13
<b>2 Radiokomunikační rovnice</b> .....	<b>15</b>
2.1 Popis rovnice .....	15
2.2 Hustota vyzařovaného výkonu .....	15
2.3 Zisk antény .....	15
2.4 Útlum.....	15
2.5 Sestavení radiokomunikační rovnice.....	16
<b>3 Typ a rozdělení vln</b> .....	<b>17</b>
3.1 Rozdělení dle frekvence .....	17
3.2 Rozdělení dle použití .....	18
<b>4 Útlumy</b> .....	<b>20</b>
4.1 Šíření volným prostorem .....	20
4.2 Vícecestné šíření.....	21
4.3 Vícecestné šíření u mikrovlnných spojů.....	25
4.4 Difrakce .....	26
4.5 Zakřivení Země.....	28
4.6 Atmosférická refrakce .....	29
4.7 Ionosférická refrakce .....	29
4.8 Atmosférický útlum.....	31
4.9 Vegetace .....	32
4.10 Únik energie do terénu .....	35
4.11 Nerovný povrch.....	39
<b>5 Výpočetní program</b> .....	<b>40</b>
5.1 Úvod .....	40

5.2 Popis hlavního okna .....	40
5.3 Popis modulu pro výpočet útlumu ve volném prostoru.....	41
5.4 Popis modulů pro výpočet vícecestného šíření .....	42
5.5 Popis modulu pro výpočet útlumu na ostré překážce .....	43
5.6 Popis modulu pro výpočet útlumu způsobený vegetací .....	44
5.7 Popis modulu pro výpočet útlumu způsobený únikem energie do terénu .....	45
5.8 Popis modulu pro výpočet poklesu horizontu .....	46
5.9 Popis modulu pro výpočet max. a min. frekvence pro odraz od ionosféry .....	46
5.10 Popis modulu pro výpočet radiokomunikační rovnice .....	47
<b>6 Praktická část.....</b>	<b>50</b>
6.1 Popis stanoviště .....	50
6.2 Grafy naměřených a vypočítaných hodnot .....	50
<b>Závěr .....</b>	<b>53</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>54</b>
<b>Příloha A – Překlad všech použitých anglických výrazů.....</b>	<b>56</b>
<b>Příloha B – Zdrojové kódy programu AiRL.....</b>	<b>58</b>
<b>Příloha C – Uživatelský manuál.....</b>	<b>59</b>



## Seznam zkratek

ITU	International telecommunication union
UFA	Ústav fyziky atmosféry
FdM	Fade Margin
LUF	Lowest usable frequency
MUF	Maximum usable frequency
EIRP	Effective isotropic radiated power
SW	Software
AiRL	Attenuation in Radio Link
Wi-Fi	Wireless Fidelity
GRWAVE	Ground wave
GUIDE	Graphical user interface development environment

## Seznam obrázků

Obr. 1 Šíření vlny pomocí elektrického a magnetického pole .....	11
Obr. 2 Šíření vlny od bodového zářiče .....	12
Obr. 3 Grafické znázornění druhů vln .....	19
Obr. 4 Útlum volným prostorem s rostoucí vzdáleností .....	20
Obr. 5 Geometrie vlny přímé a odražené .....	21
Obr. 6 Intenzita pole prostorové vlny s rostoucí vzdáleností .....	23
Obr. 7 Závislost činitele tlumení na vzdálenosti ( $f=2,4$ GHz, $R=1$ , $\beta=3,14$ - horizontální polarizace ( $180^\circ$ )) .....	24
Obr. 8 Vybrané jevy .....	26
Obr. 9 Radiový spoj s ostrou překážkou .....	27
Obr. 10 Činitel tlumení na ostré překážce .....	28
Obr. 11 Proces ionizace [5] .....	29
Obr. 12 Složení ionosféry a závislost koncentrace elekt. na vzdálenosti od povrchu [5] ..	30
Obr. 13 Útlum kyslíkem a vodními kapkami závislý na frekvenci [21] .....	32
Obr. 14 Útlum vegetací při 2 prostředích .....	33
Obr. 15 Specifický útlum závislý na frekvenci [22] .....	34
Obr. 16 Praktická ukázka ze stránek ITU-R [23] .....	38
Obr. 17 Simulace spádových křivek .....	39
Obr. 18 Obrazovka při spuštění programu .....	40
Obr. 19 Okno pro útlum volným prostorem .....	41
Obr. 20 Popis modulu pro výpočet vícecestného šíření – intenzity .....	42
Obr. 21 Popis modulu pro výpočet vícecestného šíření – útlumu .....	43
Obr. 22 Vykreslený modul pro útlum na ostré překážce .....	44
Obr. 23 Modul pro výpočet útlumu způsobený vegetací .....	44
Obr. 24 Modul pro výpočet úniku energie do terénu .....	45
Obr. 25 Výpočet poklesu horizontu .....	46
Obr. 26 Modul pro výpočty MUF a LUF .....	47
Obr. 27 Modul radiokomunikační rovnice .....	48
Obr. 28 Vykreslení špatného zadání .....	49
Obr. 29 Ukázka měření [26] .....	50
Obr. 30 Porovnání dat při frekvenci 2.4 GHz .....	51
Obr. 31 Porovnání dat při frekvenci 5 GHz .....	52

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdělení frekvenčních pásem .....	17
Tabulka 2 Naměřené konstanty v různých městech .....	34
Tabulka 3 Tabulka překladů použitých anglických výrazů .....	56

## Úvod

Radioelektronika je jedna z nejvíce se rozvíjejících technických oblastí, zejména u bezdrátových komunikací. Nejedná se pouze o Wi-fi sítě, ale také o Bluetooth, rádio, televizní přenos apod. Při přenosu dat může vzniknout mnoho problémů, jako je zkreslení, rušení signálu, vznik vícenásobných odrazů atd.

Nežádoucími jevy, které působí negativně na přenos signálu, se zabývá tato bakalářská práce. Vlivů působících na vysílaný signál je velmi mnoho a působí na ně mnoho odlišných faktorů, které lze mnohdy velice obtížně empiricky určit či statisticky odhadnout.

Působení jednotlivých nežádoucích vlivů na vstupní signály se liší s parametry vstupních signálů, mezi něž patří zejména frekvence. Dalším z nejvýznamnějších parametrů je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem a také druh prostředí, v kterém se přenos uskutečňuje. Prostor lze rozdělit na vnitřní (uvnitř budov), venkovní nebo kombinované. Podle prostředí je také rozdělený typ vln. Jelikož je většina budov železobetonová, je zde problém přenášet signály o malé vlnové délce.

V teoretické části budou popsány jednotlivé negativní vlastnosti, které mohou vzniknout při přenosu a následně podrobně popsány jejich vlastnosti a vztahy. Většina popsaných vlivů a jejich vlastností je definována Mezinárodním telekomunikačním úřadem (ITU) se sídlem v Ženevě [13]. Tento úřad se stará o normy, které by měli být dodrženy při plánování a navrhování spojů a také s problémy, které se vyskytují při realizaci.

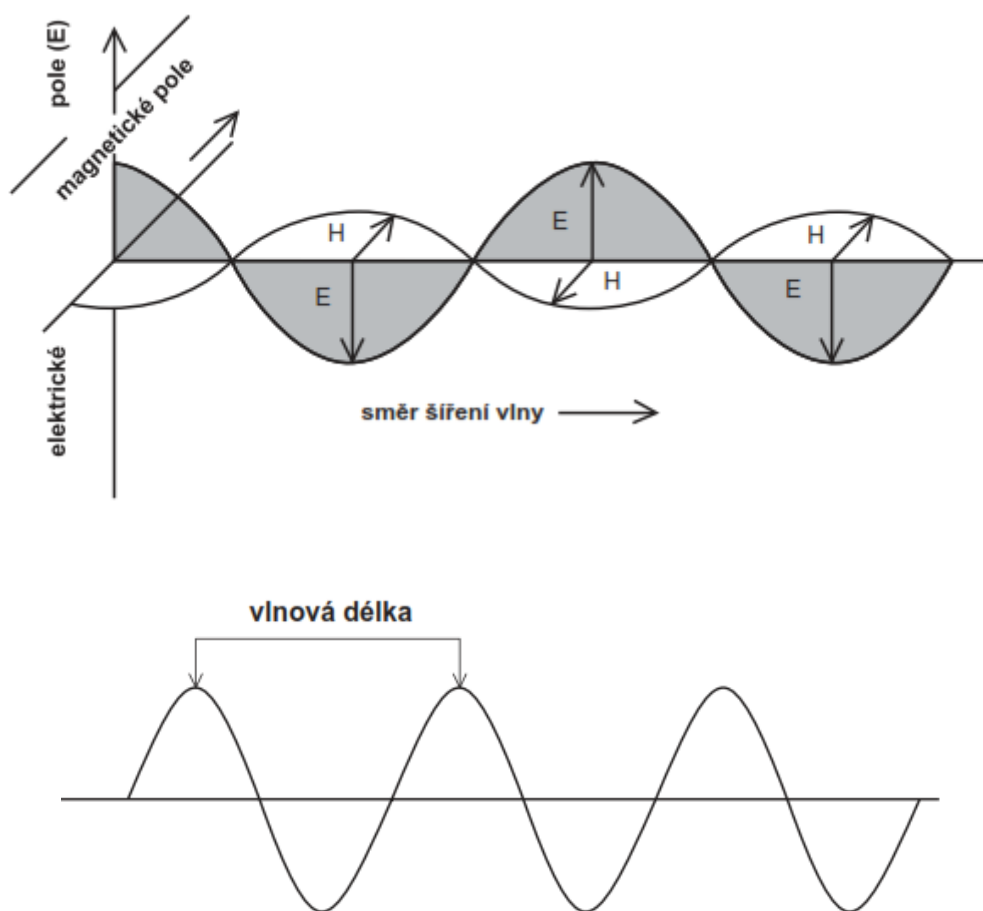
Při psaní této bakalářské práce jsem vycházel zejména z norem výše uvedeného ITU, protože v české literatuře neexistuje mnoho knih zabývajících se těmito problémy. Mnoho odborných termínů je uvedeno v originálním znění, a to z důvodu snadného dohledání dalších informací pro čtenáře. Tabulka s uvedenými překlady je přiložena v příloze.

Hlavním bodem této bakalářské práce je vytvoření softwaru, simulujícího vybrané nežádoucí vlivy, který umožňuje kromě simulace také jejich grafické zobrazení. Program byl vyvinut v prostředí Matlab. Pro ověření vypočtených dat pro vybraný vliv je v poslední kapitole práce umístěno porovnání simulačních a naměřených dat.

# 1 Základy šíření elektromagnetických vln

Zadání práce je zaměřeno především na útlum při šíření radiovým a satelitním spojem. Musíme nejdříve vědět, jak se taková radiová vlna přenáší. Elektromagnetické pole je popsáno Maxwellovými rovnicemi, které je možné zapsat v integrálním a diferenciálním tvaru. V rovnicích vystupují 4 veličiny, pomocí kterých definujeme elektromagnetickou vlnu. Jedná se o  $\vec{D}$  – indukci elektrického pole,  $\vec{B}$  – indukci magnetického pole,  $\vec{E}$  – intenzitu elektrického pole,  $\vec{H}$  – intenzitu magnetického pole. Pro stanovení hustoty vyzařovaného pole využijeme veličin  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$ . Stanovíme Poyntingův vektor, který vyjadřuje součin těchto veličin

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}. \quad (1.1)$$



Obr. 1 Šíření vlny pomocí elektrického a magnetického pole

## 1.1 Kulová vlnoplocha

Vlna je vyzařována izotropním zářičem, který umístíme do bezztrátového homogenního izotropního prostředí. Zde stanovíme Poyntingův vektor (1.1), který vyjadřuje plošnou

hustotu výkonu. Jelikož se jedná o izotropní zářič, vlna se šíří do všech směrů ve tvaru koule. Tento jev se nazývá kulová vlnoplocha a můžeme ji stanovit jako

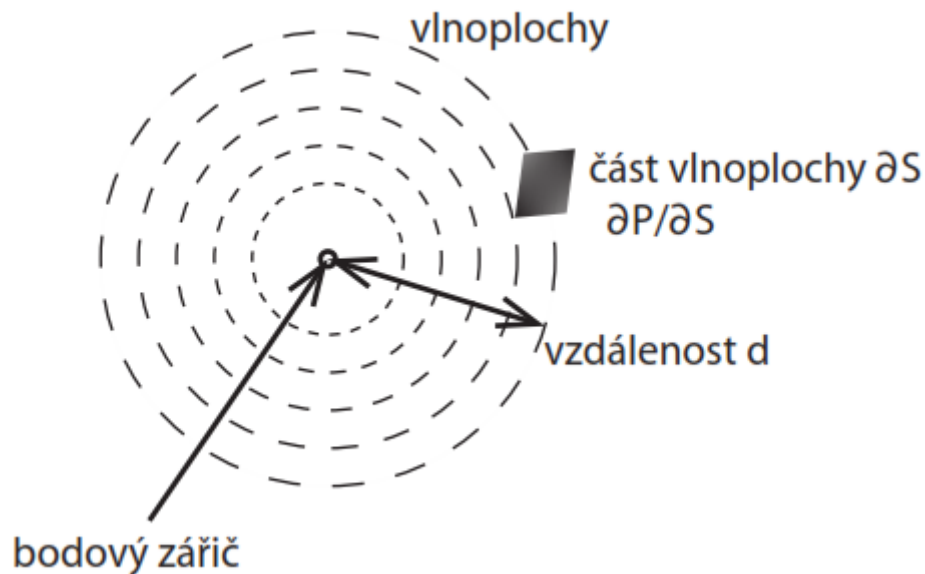
$$S = \frac{P_v}{4\pi d^2} \left[ \frac{W}{m^2} \right], \quad (1.2)$$

kde  $P_v$  vysílaný výkon  $[W]$ ,

$S$  výkon na jednotku plochy  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$  ve vzdálenosti  $d$ ,

$d$  vzdálenost od zářiče  $[m]$ .

Vlnoplochou rozumíme dvě plochy elektromagnetické vlny, na níž jsou fáze elektromagnetické vlny vždy stejné. Jelikož se tedy jedná o kulovou vlnoplochu, je výkon podělen plochou koule. Ve velkých vzdálenostech nastává mezní případ kulové vlny a to je vlna rovinná. Z uvedeného vztahu je patrné, že energie klesá s kvadrátem vzdálenosti od zdroje. Pro představu je zde uveden následující obrázek.



**Obr. 2 Šíření vlny od bodového zářiče**

Z výše uvedených vztahů můžeme vyjádřit střední hodnotu Poyntingova vektoru v jedné periodě se vzdáleností  $d$  výrazem

$$S = \frac{P_v}{4\pi d^2} = E_{ef} H_{ef} = \frac{E_{ef}^2}{120\pi} \left[ \frac{W}{m^2} \right]. \quad (1.3)$$

Změna je pouze ta, že uvažujeme místo vektoru pouze střední hodnotu. Hodnota  $120\pi$  je impedance vzduchu, která je odvozená ze vztahů pro  $\vec{D}$  a  $\vec{B}$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{8,854 \cdot 10^{-12}}} \doteq 120\pi \doteq 377[\Omega], \quad (1.4)$$

kde  $\mu_0$  permeabilita vakua  $\left[\frac{H}{m}\right]$ ,  
 $\varepsilon_0$  permitivita vakua  $\left[\frac{F}{m}\right]$ .

Z těchto vztahů vyjádříme  $E_{ef}^2$  z důvodu vyjádření hodnoty elektrického pole ve vzdálenosti  $d$

$$E_{ef}^2 = \frac{120\pi P_v}{4\pi d^2} = \frac{30P_v}{d^2} \left[\frac{V}{m}\right]. \quad (1.5)$$

Po odmocnění vztahu (1.5) dostaneme vztah pro efektivní hodnotu elektrického pole  $E_{ef}$  na povrchu koule s poloměrem  $d$

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30P_v}}{d} \left[\frac{V}{m}\right]. \quad (1.6)$$

Výsledný vztah může být rozšířen o směrovost antény, tedy rozšířený o zisk antény  $G_v$ . Intenzita elektrického pole je zde uvedena jako efektivní hodnota, pokud bychom se zajímali o maximální hodnotu, stačí vynásobit rovnici  $\sqrt{2}$  a místo 30 se ve vztahu objeví 60. Nejčastěji se vyskytuje v literatuře efektivní hodnota, tak ji zde ponecháme a rozšíříme o  $G_v$  a dostaneme

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30 \cdot P_v \cdot G_v}}{d} \left[\frac{V}{m}\right]. \quad (1.7)$$

## 1.2 Efektivní izotropický vyzářený výkon

Je celkový výkon, který je nutné vyzářit izotropní anténou, aby bylo v konkrétním směru dosaženo požadované intenzity pole. Zkratka EIRP – Effective isotropic radiated power je složena z výkonu vyslaným anténou a ziskem antény

$$EIRP = P_v G_v [dBW]. \quad (1.8)$$

## 1.3 Převody jednotek

Nejčastěji používanou jednotkou u radiového a satelitního přenosu je Watt [W], který je jednotkou výkonu  $P$ . Výkon je dán součinem napětí a proudu. V dnešní době se můžeme setkat s obrovskými výkony či naopak velmi malými. Důvod zavedení logaritmických

jednotek je schopnost pohodlně reprezentovat tyto velké dynamické rozdíly. Zlogaritmováním výkonu dostaneme

$$P_{dBW} = 10 \log_{10}(P[W]) \text{ [dBW]}. \quad (1.9)$$

Zpětně jej získáme odlogaritmováním rovnice (tedy rozšířením celé rovnice exponenciálou)

$$P_W = 10^{\frac{1}{P[dBW]}} [W]. \quad (1.10)$$

V případě, že máme k dispozici jednotku  $mW$  a ne  $W$ , je potřeba vztah přepočítat, a to následujícím způsobem, z kterého už bude patrný postup pro menší/větší jednotky

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \frac{P[W]}{10^{-3}} \text{ [dBm]}. \quad (1.11)$$

Jednotku čteme „decibel nad miliwattem“. Často dochází k záměnám mezi  $dB$  a  $dBW$ , první případ vyjadřuje poměr např. 2 výkonů, kde se  $W$  zkrátí, druhý případ je zlogaritmováním jednoho výkonu.

## 2 Radiokomunikační rovnice

### 2.1 Popis rovnice

Jestliže chceme vyjádřit výkon na přijímači, musíme znát faktory, které působí na přenos signálu. Rovnice nám tedy vyjadřuje energetickou bilanci radiového spoje. Jestliže začneme u vysílací antény, zajímá nás vysílací výkon, zisk antény, vysíláním informace dochází ke ztrátám a na straně přijímače dostaneme výkon, který můžeme zvětšit o zisk přijímací antény.

### 2.2 Hustota vyzařovaného výkonu

Velikost hustoty vyzařovaného výkonu dává informaci, jaký výkon dopadá na plochu  $S = 1 \text{ m}^2$  ve vzdálenosti  $d$  od vysílače. V případě, že použijeme směrovou anténu, můžeme ovlivnit výkon vysílání. Hustota vyzařovaného výkonu

$$\frac{\partial P}{\partial S} = P_v \frac{1}{4\pi d^2} \left[ \frac{W}{\text{m}^2} \right]. \quad (2.1)$$

Tento vztah je stejný jako vztah (1.2). Nejdůležitějším poznatkem je, že výkon klesá s druhou mocninou vzdálenosti od vysílače.

### 2.3 Zisk antény

Udává, kolikrát bude anténa vyzařovat výkon do určitého směru víc, než kdyby vyzařovala do všech směrů. Laicky by se dalo říci, že je to poměr výkonu jednoho směru k výkonu všech směrů. Zisk vysílací antény je tedy směrování antény k přijímači a zisk přijímací antény je nasměrování k vysílací anténě. Tento zisk můžeme vyjádřit

$$G_v = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{ef} [-], \quad (2.2)$$

kde  $\lambda$  vlnová délka  $[m]$ ,

$A_{ef}$  efektivní plocha antény  $[m]$ .

Je potřeba upozornit, že se nejedná o zisk, jako zesílení. Efektivní plocha antény je definována jako poměr výkonu na přizpůsobené zátěži  $P_z$  k dopadající výkonové hustotě. Obecně efektivní plocha není rovna fyzikální ploše, ale záleží na rozložení intenzity elektromagnetického pole v ploše apertury.

### 2.4 Útlum

Při přenosu uvažujeme neexistenci bezeztrátového prostředí. Útlum je ztráta či únik energie, který může vznikat z různých důvodů. V případě ideálního přenosu (mezi vysílačem a přijímačem) přijímač přijme 100% vysílaného výkonu, tj. nedojde k žádnému



útlumu. Toto je však nereálné, proto se tento jev vyskytuje také v radiokomunikační rovnici. Vzhledem k tomu, že většina z výše uvedených úniků je nestálá a časově proměnná, vzniká hodně problémů. Tyto problémy se snaží vyřešit řada institucí a úřadů (ITU, UFA). Pro zjednodušení rovnice vybereme útlumy, které se projevují na přenosu největší mírou. Mezi ně patří útlum šíření volným prostorem (free-space loss), útlum vícecestným šířením (multipath), útlum atmosférickou refrakcí (atmospheric refraction) a ionosférickou refrakcí (ionospheric refraction), dále budeme uvažovat únik energie do terénu (attenuation to field), ztráty ohybem (diffraction loss), rozptyl na nerovnostech (scattering on field), poslední je útlum atmosférickými plyny (atmospheric gases). Jelikož je tato práce zaměřena především na tyto ztráty, budou jednotlivé ztráty rozepsány v dalších kapitolách podrobněji.

## 2.5 Sestavení radiokomunikační rovnice

Z výše popsaných bloků jsme schopni sestavit energetickou bilanci radiového spoje

$$P_p = \frac{\partial P}{\partial S} A_{ef} = P_v G_v \frac{1}{4\pi R^2} A_{ef} \frac{1}{L_c} = P_v G_v G_p \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{L_c} [W]. \quad (2.3)$$

Alternativně můžeme vyjádřit rovnici v logaritmických jednotkách a dostaneme

$$P_{pdB} = P_{vdB} + G_{vdB} + G_{pdB} + 20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right) - L_{cdB} [dBW]. \quad (2.4)$$

### 3 Typ a rozdělení vln

#### 3.1 Rozdělení dle frekvence

Veškeré parametry, které byly použity v (2.3) závisí na frekvenci. Nejjednodušeji je popíšeme následující tabulkou.

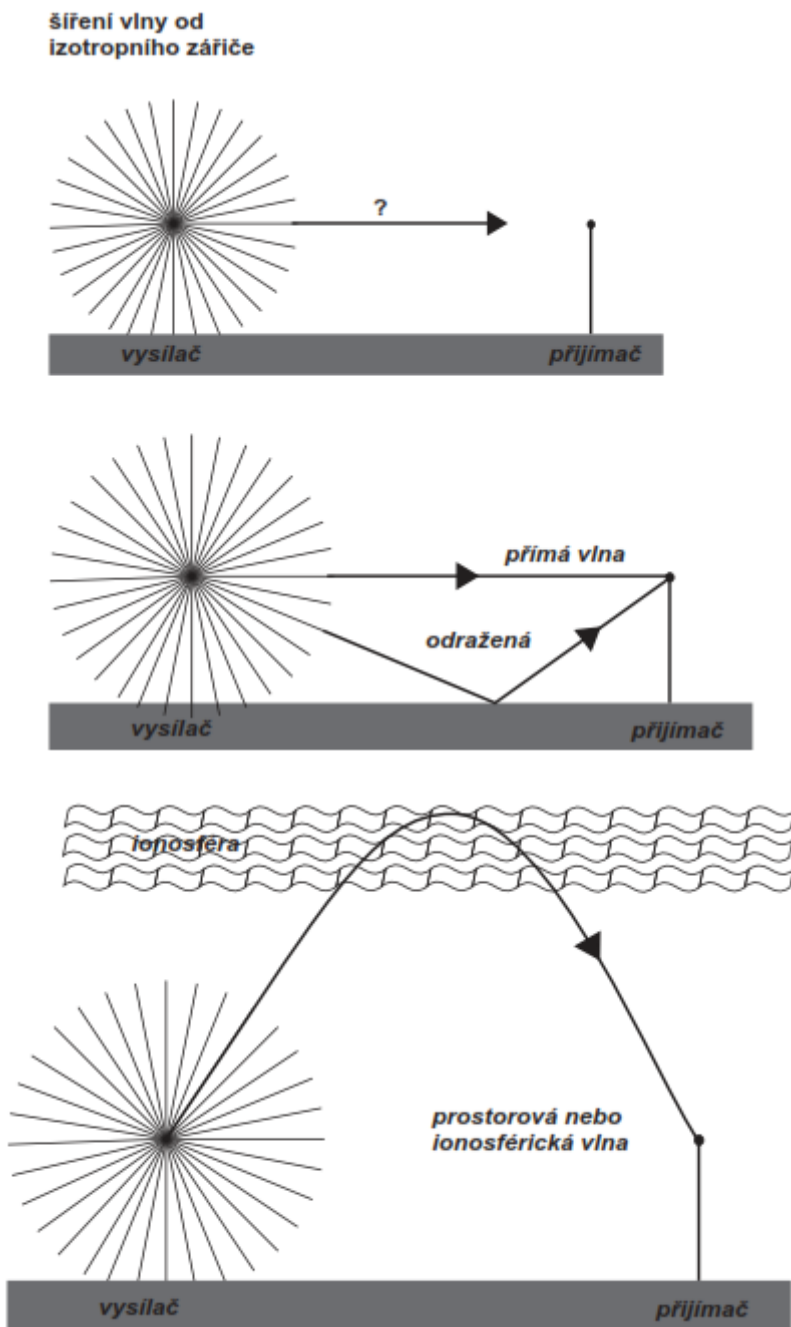
Tabulka 1 Rozdělení frekvenčních pásem

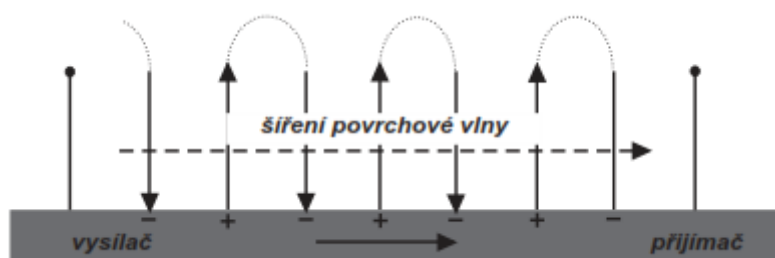
Mezinárodní zkratka	Frekvence [MHz]	Vlnová délka [m]	Český název	Anglický název
VLF	0,003-0,03	100000-10000	Velmi dlouhé vlny	Very Low Frequency
LF	0,03-0,3	10000-1000	Dlouhé vlny	Low Frequency
MF	0,3-3	1000-100	Střední vlny	Medium Frequency
HF	3-30	100-10	Krátké vlny	High Frequency
VHF	30-300	10-1	Velmi krátké vlny	Very High Frequency
UHF	300-3000	1-0,1	Ultra krátké vlny	Ultra High Frequency
SHF	3000-30000	0,1-0,01	Mikrovlny	Super High Frequency
EHF	30000-300000	0,01-0,001	Mikrovlny	Extremely High Frequency

Volbou frekvence je dáno chování vlny, jedná se o tzv. dělení podle vlnové délky. Centimetrové a milimetrové vlny se používají na přímé vzdálenosti, zde se nejvíce uplatňuje útlum deště, mlhy, atmosférických plynů a vegetací. Decimetrové vlny se používají pouze na přímou vzdálenost a využívají je mobilní a přenosové radiokomunikace. Velmi krátké vlny a ultra krátké vlny se přenáší pouze jako přímé vlny a vlny odražené, takže se využívají pro přenos mezi pevnými radiostanicemi. Krátké vlny se využívají do vzdáleností menší než několik desítek kilometrů, avšak dají se využít pro šíření odrazem od ionosféry, takže se využívaly především pro rozhlasové vysílání. Příjem středních vln se využíval dříve při rozhlasovém vysílání s využitím amplitudové modulace, jejich dosah se blíží stovkám až tisícům kilometrů, proto se později zavedla frekvenční modulace, která má menší dosah, ale její vlastnosti, jako je například odolnost vůči šumu, jsou lepší než u amplitudové modulace. Kilometrové vlny, nebo také dlouhé vlny se používají především na radiokomunikaci u ponorek, protože hlavním faktorem využití těchto vln je spolehlivost.

### 3.2 Rozdělení dle použití

Existují vlny ionosférické, troposférické a přízemní. Přízemní vlna se dále dělí na prostorovou a povrchovou. Prostorová vlna může být přímá, odražená, rozptýlená, ohýbaná a s refrakcí. Toto dělení nám umožňuje větší přesnost při řešení problematiky dané vlny, protože každý typ vlny má své různé vlastnosti.





**Obr. 3 Grafické znázornění druhů vln**

Na obrázku vidíme 3 druhy přenosu. První část obrázku ukazuje šíření od izotropního zářiče k přijímači bez jakéhokoliv vlivu. Druhá část obrázku znázorňuje přímou vlnu, třetí část obrázku je prostorová vlna a poslední částí obrázku je přízemní vlna. Jak už bylo výše napsáno, výběrem jednoho typu vln jsou dány různé vlastnosti přenosového systému, a tím i pro nás důležitý typ útlumu. Pro vlnu přímou budeme uvažovat útlum při šíření volným prostorem, vícecestným šířením a atmosférický útlum, který zahrnuje rozptyl dešťovými kapkami a případnou absorpci atmosférickými plyny. Mechanismus pro vlnu přímou pracuje v jednotkách až desítkách GHz, vyžadují vyvýšené antény, a proto tedy přímou viditelnost. Pro vlnu povrchovou dostaneme útlum při úniku energie do terénu, rozptylu na nerovnostech, vícecestným šířením, útlum vegetací (voda na listech tvoří nevodivé zábrany) a také případný útlum deštěm. Zde se mechanismus pohybuje na megahertzových frekvencích a používají se zde vertikální antény. Vlny se zde šíří na rozhraní dvou rozdílných prostředí. Jedním je země a druhým je vzduch. Mechanismus pro šíření odrazem od ionosféry je asi nejsložitějším, jelikož se zde vyskytuje velké množství proměnných. Podle aktuálního času a časového období roku se mění vrstvy ionosféry, proto se využívá tzv. frekvenčních režimů, které se přepínají podle konkrétního času a trasy spoje. Je však vhodné použít takovýto systém při šíření na nepřímou vzdálenost (tisíce kilometrů, skoro na druhou stranu Země). Ionosféra se pohybuje přibližně od 60 km do 400 km od povrchu Země a je zde typická kmitočtová oblast kolem 30 MHz. Na obrázku není vyznačena troposférická vlna, protože využívá tzv. troposférický rozptyl, z čehož vyplývá, že na přijímači dostaneme velmi malé výkony. Troposféra je pro představu přibližně v 10 km od povrchu a další nevýhodou je, že se v této oblasti vytváří počasí, takže se často mění teplota, vlhkost, velikost dešťových kapek apod. Ionosféra má tyto parametry stálé, ale jak už bylo řečeno, mění se její vrstvy. V dalších kapitole se zaměříme na rozepsání útlumů, jejich výpočtům a vlastnostem.

## 4 Útlumy

### 4.1 Šíření volným prostorem

Tímto vlivem se zabývá ITU-R P. 341 [16]. Jak už název napovídá, jedná se o útlum, která vzniká při šíření elektromagnetické vlny, pokud se při přenosu nevyskytuje žádná překážka, nevykazují ztráty energie způsobené odrazem, rozptylem atd. Energie se vyšle z vysílací antény v podobě kulových vlnoploch. Pro představu a jako příklad si můžeme uvést žárovku, když se budeme vzdalovat, po několika stech metrech až kilometrech světlo nevidíme. Útlum roste s kvadrátem vzdálenosti od zdroje

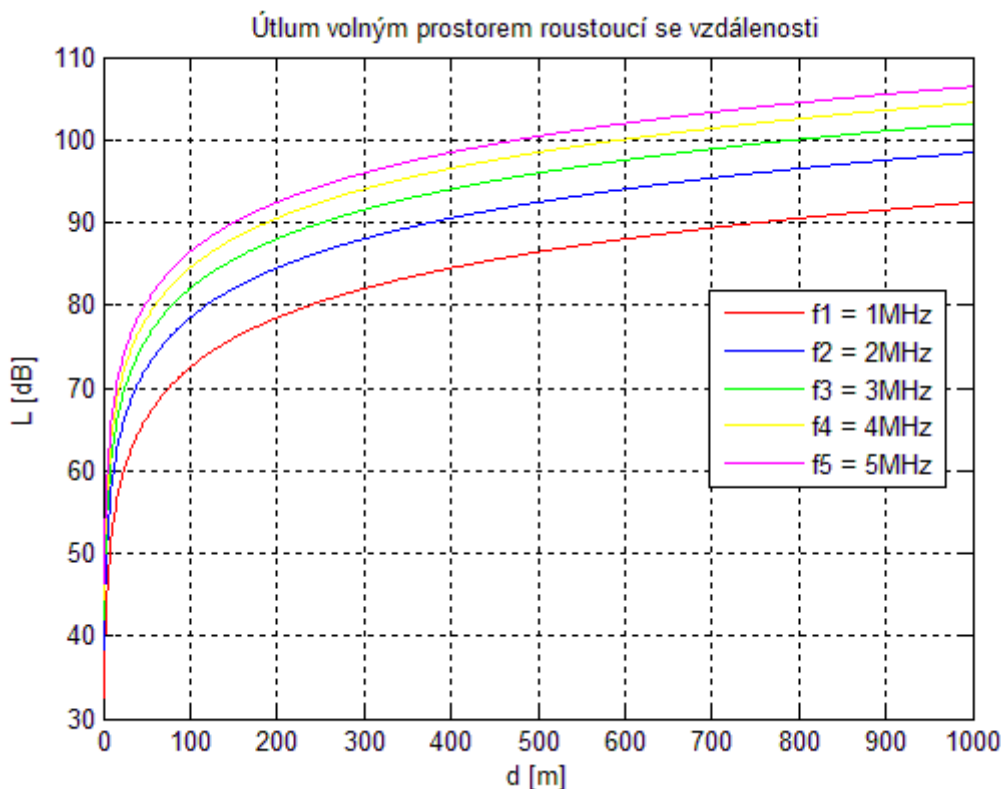
$$L_{fs} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 [-]. \quad (4.1)$$

Tento vztah dostaneme jednoduše z rovnice (2.3) dosazením jednotkových zisků a poměrem  $P_p / P_v$ . V logaritmických jednotkách jej vyjádříme

$$L_{fs} = 32.446 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d [dB], \quad (4.2)$$

kde  $f$  frekvence [MHz],

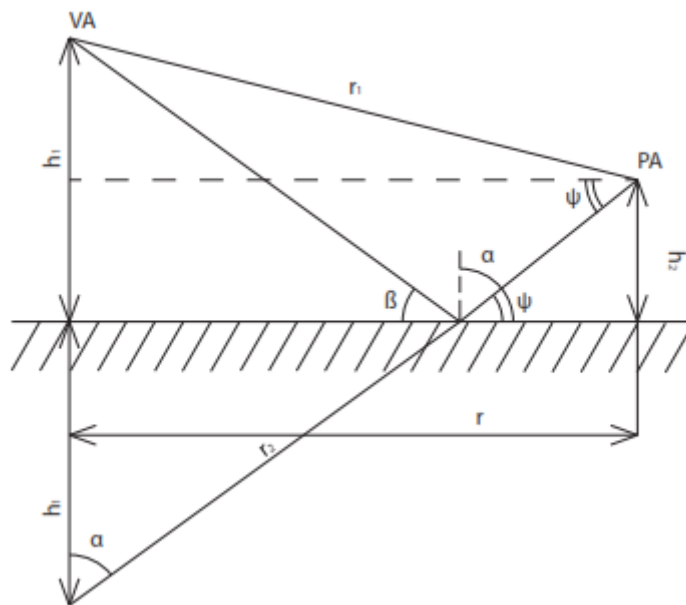
$d$  viditelná vzdálenost [km].



Obr. 4 Útlum volným prostorem s rostoucí vzdáleností

## 4.2 Vícecestné šíření

Tímto vlivem se zabývá ITU-R P. 1407 [17]. Z překladu multipath propagation – vícecestné šíření. Tento útlum řadíme do části radiokomunikační rovnice, která se nazývá rezerva na únik – fade margin – FdM. Do této rezervy patří vícecestné šíření a útlum deštěm. Jestliže vyšleme signál z vysílací antény na přijímací a budeme uvažovat, že v přenosu signálu existuje libovolná překážka, dopadne na přijímací anténu více signálů s různou fází a velikostí. Uplatňuje se v případě, že vzdálenost  $R$  a výška nad terénem  $h$ , je mnohem větší než vlnová délka  $\lambda$ . Tento faktor je pro nás důležitý, jelikož vlna může mít jinou fázi než vlna přímá, takže nám zeslabuje vyslaný signál, pokud jej patřičně neodfiltrujeme na přijímací straně. Pro šíření na krátké vzdálenosti můžeme zanedbat nerovný povrch a předpokládat, že je zemský povrch rovinný (viz. následující obrázek).



Obr. 5 Geometrie vlny přímé a odražené

VA značí vysílací anténu a PA přijímací anténu, zbytek označení je zřejmý. K výpočtu dráhového rozdílu nebo k výpočtu intenzity elektrického pole využijeme Fresnelových koeficientů pro refrakci. Komplexní amplituda součtové vlny (vlny přímé a odražené) je dána následujícím vztahem podle [1]

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sqrt{60P_1G_1}}{r_1} e^{-jkr_1} \rho_1 + \frac{\sqrt{60P_1G_2}}{r_2} e^{-jkr_2} \rho_2 R \left[ \frac{V}{m} \right], \quad (4.3)$$

kde  $\rho_1, \rho_2$  polarizační vektory  $[-]$ ,

$R$  komplexní činitel odrazu  $[-]$ ,

$k$  vlnové číslo  $[m^{-1}]$ .

Komplexní činitele odrazu rozlišujeme podle typu polarizace. Pro vertikální platí

$$R_v = \frac{n^2 \sin \Psi - \sqrt{n^2 - \cos^2 \Psi}}{n^2 \sin \Psi + \sqrt{n^2 - \cos^2 \Psi}} [-] \quad (4.4)$$

a pro horizontální polarizaci platí

$$R_h = \frac{\sin \Psi - \sqrt{n^2 - \cos^2 \Psi}}{\sin \Psi + \sqrt{n^2 - \cos^2 \Psi}} [-], \quad (4.5)$$

kde  $n$  je  $n = \varepsilon - j60\sigma\lambda$ ,

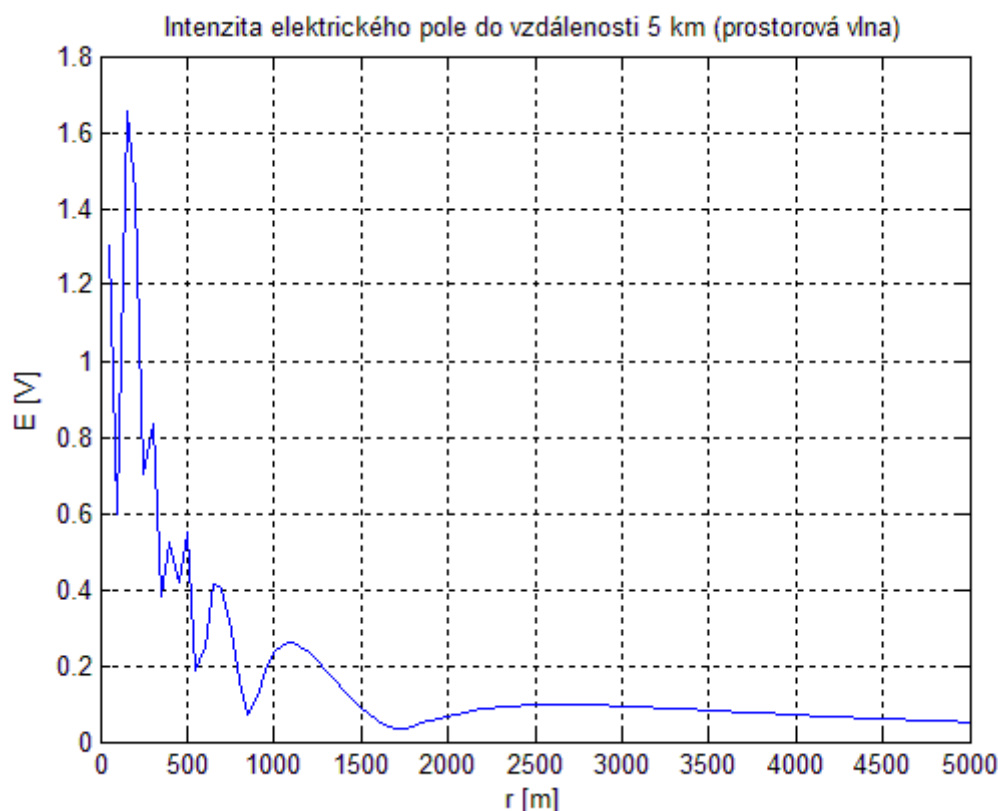
$\sigma$  vodivost odrazného prostředí (půda, mokrá zem)  $\left[\frac{S}{m}\right]$ ,

$\varepsilon$  permitivita odrazného prostředí  $\left[\frac{F}{m}\right]$ ,

$\psi$  úhel dopadu  $[^\circ]$ ,

$\lambda$  vlnová délka  $[m]$ .

Pro případ, že by úhel dopadu byl mnohem větší než 1, druhý člen u obou polarizací vyjde 1, čímž se nám vztahy mnohem více zjednoduší. Po vypočtení dosadíme do vzorce intenzity elektrického pole a můžeme získat např. 2 intenzity pro vlnu přímou a jednu vlnu odraženou.



**Obr. 6 Intenzita pole prostorové vlny s rostoucí vzdáleností**

Obecný vztah pro vícecestné šíření neexistuje, protože závisí na mnoha faktorech. Například může být ovlivněno úhly odrazu a dopadu od odrazné překážky, vyslání pod určitým úhlem, polarizací. Rozdělení podle typu vícecestného šíření pak může nastat v různých prostředích, např. rodinné baráky, paneláky apod. Proto musíme raději použít při návrhu spoje rezervu a počítat s ní na krátké vzdálenosti – do několika jednotek kilometrů. Nejlepším způsobem je samozřejmě vybrat prostředí bez překážek, a tím se zbavit těchto nežádoucích vlivů. V doporučeních ITU-R se můžeme dočíst, jaké vztahy platí pro výpočet dopadající energie (pouze suma energií) a pod jakým úhlem mohou vlny dopadat.

Jestliže chceme vypočítat pouze vlnu přímou a odraženou, budeme uvažovat homogenní zem. Pokud je vzdálenost mnohem větší než výšky antén, můžeme vyjádřit vzdálenosti vlny přímé a odražené pomocí Pythagorovy věty z Obr. 5 Geometrie vlny přímé a odražené, jako

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (h_1 - h_2)^2} \cong r + \frac{h_1^2 - 2h_1h_2 + h_2^2}{2r} \quad [m] \quad (4.6)$$

a

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (h_1 + h_2)^2} \cong r + \frac{h_1^2 + 2h_1h_2 + h_2^2}{2r} \quad [m]. \quad (4.7)$$



Rozdíl těchto vzdáleností určíme jako  $\Delta r$

$$\Delta r = r_2 - r_1 \cong \frac{2h_1 h_2}{r} \quad [m] . \quad (4.8)$$

Činitel tlumení pak můžeme vyjádřit z rovnice (4.3) podle [1] jako

$$F = \sqrt{1 + 2|R| \cos\left(\beta + \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}\right) + |R|^2} \quad [-], \quad (4.9)$$

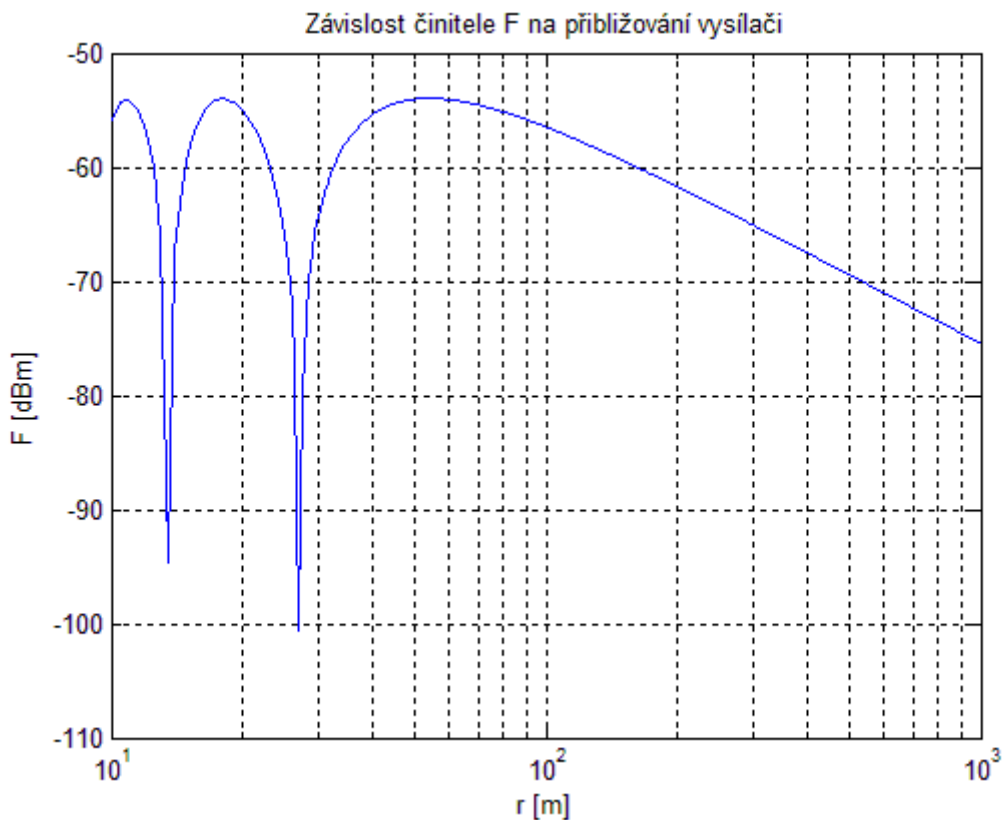
kde  $R$  činitel tlumení  $[-]$ ,

$\beta$  úhel polarizace  $[\circ]$ .

a pro výslednou intenzitu elektrického pole platí

$$E = E_1 F \left[ \frac{V}{m} \right]. \quad (4.10)$$

Úroveň signálu se mění podle vzdálenosti  $r$ , a proto jsme schopni sestavit graf, závislosti činitele tlumení na vzdálenosti od vysílače.



Obr. 7 Závislost činitele tlumení na vzdálenosti ( $f=2,4$  GHz,  $R=1$ ,  $\beta=3,14$  - horizontální polarizace ( $180^\circ$ ))

### 4.3 Vícecestné šíření u mikrovlnných spojů

Tímto vlivem se zabývá ITU-R P. 530 [18]. Mikrovlnné spoje mají nevýhodu v prostředí zástavby, jelikož se zde často odráží a tlumí. K vícecestnému šíření dochází v malém procentu času, proto nejsou paprsky od sebe časově vzdáleny. Pro městskou zástavbu byly vytvořeny empirické modely, které popisují chování a výpočty. Doporučení ITU-R má více rovnic pro výpočet výpadku spoje. Pro rychlé plánování spoje je tu rovnice (4.11)

$$p_{mp} = Kd^3(1 + |\varepsilon|)^{-1.2} \times 10^{-0.033f - 0.001h_1 - \frac{A}{10}} [-], \quad (4.11)$$

- kde  $d$  délka cesty [km],  
 $f$  frekvence [GHz],  
 $\varepsilon$  sklon cesty [mrad],  
 $h$  výška nad mořem (nižšího přijímače) [m],  
 $A$  útlum [dB],  
 $K$  geoklimatický faktor (ITU-R P. 453) [-].

Ještě pro doplnění, sklon vypočteme

$$\varepsilon = \frac{h_v - h_n}{d} [-], \quad (4.12)$$

- kde  $h_v, h_n$  výška antén nad terénem [m],  
 $d$  vzdálenost mezi anténami [km].

Útlum můžeme vypočítat na základě empirických modelů, které sice patří mezi nejstarší, ale nejpoužívanější, protože se dají jednoduše aplikovat

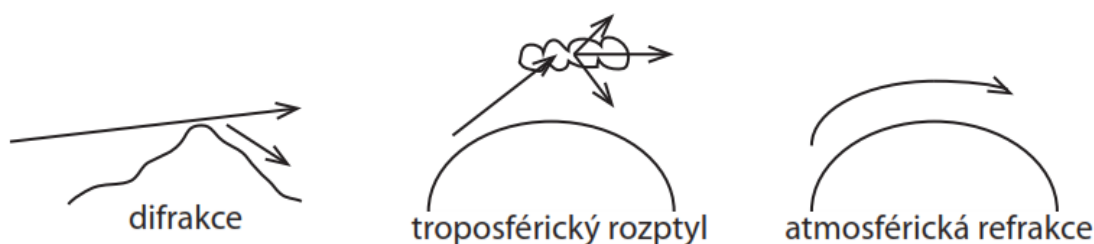
$$L_p(d) = L_0(d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) [dB], \quad (4.13)$$

- kde  $L_0$  je referenční útlum [dB] pro referenční vzdálenost  $d_0$  od vysílací antény,  
 $n$  činitel spádové křivky (pro různá prostředí nabývá různých hodnot) [-],  
 $d$  vzdálenost pro makrobuňku [km], pro mikrobuňku [m].

Útlum  $L_0$  získáme měřením nebo odhadnutým výpočtem jako ztráty volným prostorem pro  $d_0$ . Činitel  $n$ , jak už bylo výše popsáno, závisí na prostředí. Pro volný prostor je hodnota rovna 2, pro město 2,5-4, uvnitř budov bez přímé viditelnosti 4-6.

#### 4.4 Difrakce

Tímto vlivem se zabývá ITU-R P. 526 [19]. Difrakce znamená ohyb, pokud vyšleme vlnu na nerovný kopcovitý terén, kde překážky jsou větší než je vlnová délka, pak se vlny nešíří pouze po přímočarých trajektoriích, ale ohýbají se okolo překážek. Následující obrázek pomůže pro představu.



Obr. 8 Vybrané jevy

Díky tomuto jevu, můžeme přijímat signál nebo vlnění i v tzv. stínu překážky, ale samozřejmě bude vlna porušená, nebo fázově posunutá. Nejjednodušším případem je difrakce světla na hraně materiálu, tato difrakce se nazývá optická či Fresnelova. Míru zastínění vyjádříme parametrem  $v$

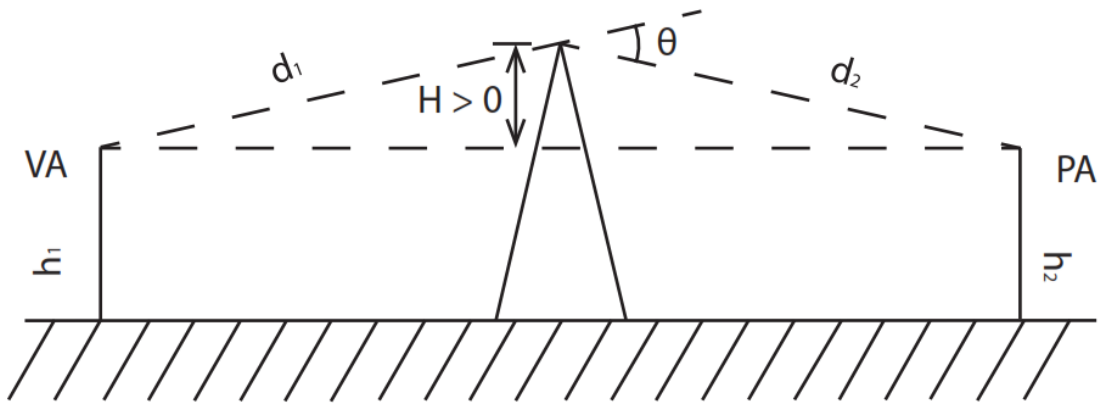
$$v = H \sqrt{\left[ \frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \right]} \quad [-], \quad (4.14)$$

kde  $H$  efektivní výška překážky [ $m$ ],

$d_1, d_2$  vzdálenost vysílače a přijímače od překážky [ $m$ ],

$\lambda$  vlnová délka [ $m$ ].

Efektivní výška překážky je výška, která se určuje od vrcholu překážky po spojnici vysílač-přijímač, může nabývat dvou hodnot, a to kladných nebo záporných. Kladných hodnot bude nabývat právě tehdy když, je nadmořská výška vrcholu větší než nadmořská výška spojnice vysílač-přijímač. Graficky na následujícím obrázku.



**Obr. 9 Radiový spoj s ostrou překážkou**

Jelikož nechceme, aby na trase existovala překážka, je potřeba zvýšit antény, aby vlna nebyla ničím lomena. Zóna, kde se nenachází žádná překážka, se nazývá Fresnelova zóna, ve které je přenášeno 90% energie. Řešení vyjádříme jako poměr intenzit v místě přijímače a intenzitě ve volném prostoru

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1+j}{2} \int_v^{\infty} e^{-j\frac{\pi}{2}s^2} ds [-]. \quad (4.15)$$

Pro praxi je důležitější zjednodušený vztah, či podmínky, které nám umožňují rychlejší aplikaci výpočtů a návrhu spoje. Proto jsou uvedeny následující aproximační podmínky dle ITU-R P. 526

$$v \geq 1 \quad L_d = 0 [dB] \quad (4.16)$$

$$0 \leq v < 1 \quad L_d = 20 \log_{10}(0.5 + 0.62v) [dB] \quad (4.17)$$

$$-1 \leq v < 0 \quad L_d = 20 \log_{10}(0.5e^{0.95v}) [dB] \quad (4.18)$$

$$-2.4 \leq v < -1 \quad L_d = 20 \log_{10} \left( 0.4 - \sqrt{0.1184 - [0.1v + 0.38]^2} \right) [dB] \quad (4.19)$$

$$v < -2.4 \quad L_d = 20 \log_{10} \left( -\frac{0.225}{v} \right) [dB] \quad (4.20)$$

$$v \geq 1 \quad L_d = 6,9 + 20 \log_{10} \left( \sqrt{(v-0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) [dB] \quad (4.21)$$



**Obr. 10 Činitel tlumení na ostré překážce**

Graf je vykreslen při míře zastínění od -5 do 1, jelikož se Fresnelův integrál počítá do nekonečna, je potřeba snížit tuto mez z hlediska numerické náročnosti. Proto byla při vykreslení mez stanovena do 25, jelikož menší už má vliv na tvar křivky od míry zastínění 1. Z obrázku vyplývá, že při vhodně zvolené překážce, může dojít dokonce k zesílení signálu.

#### 4.5 Zakřivení Země

Abychom si ujasnili problematiku refrakce (zakřivení), může nám pomoci představa, jak refrakce působí. Pro výpočet zakřivení je potřeba znát poloměr a obvod Země. Pokud budeme při výpočtu uvažovat poloměr 6378 km a obvod 40 075 km (obě hodnoty jsou vztaženy k rovníku), pak pokles horizontu nám vyjadřuje horizontální zakřivení  $h$  [25]:

$$h = \left( \frac{r}{\cos \alpha} \right) - r = \left( \frac{6378}{\cos(x * 0,009^\circ)} \right) - 6378 \text{ [km]}, \quad (4.22)$$

kde  $x$  vzdálenost od bodu výpočtu [km],

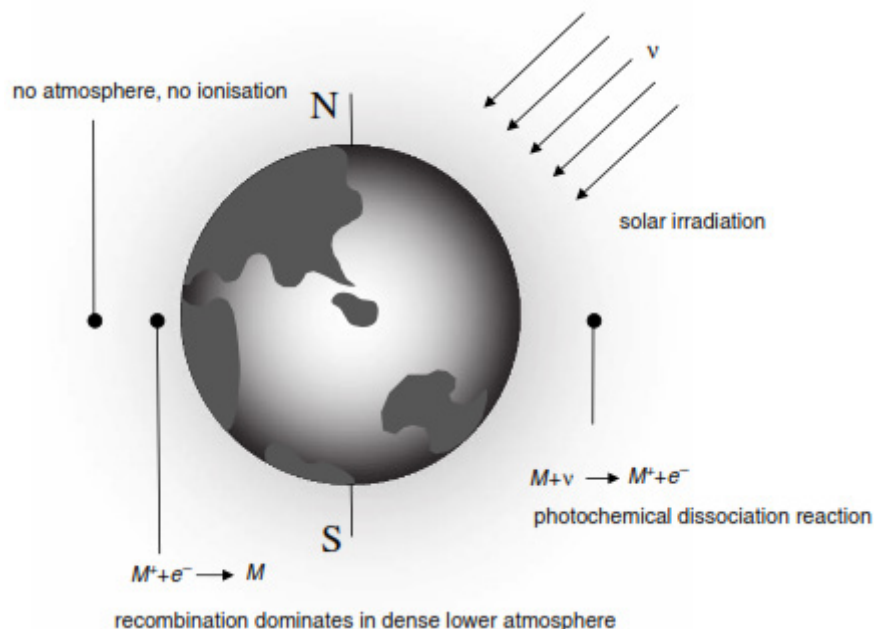
0,009° hodnota stupně zakřivení po 1 km.

## 4.6 Atmosférická refrakce

Atmosféra se dělí na několik vrstev podle vlastností. Z hlediska teploty a výška se dělí od nejnižší troposféry (10-12 km), stratosféry (12-50 km), mezosféry (50-80 km), termosféry (80-700 km) a exosféry (700-800 km). Vyjmenované sféry jsou závislé a proměnlivé na čase a samozřejmě závisí na poloze přijímače a vysílače. Nejdůležitějšími z nich jsou pro využití přenosu dat troposféra a ionosféra, jelikož díky těmto sféram, můžeme uskutečňovat přenos na velké vzdálenosti od vysílače, s čímž samozřejmě souvisí útlumy způsobené meteorologickou situací, velikosti ionizace (vrstvy ionosféry) a jsou závislé na čase. Jelikož Země není rovinná a je kulatá a s určitou vzdáleností klesá horizont, tak vzniká ve velkých vzdálenostech určitá potřeba znát výšku nebo velikost antén, abychom při využití přenosu dat na přímou vzdálenost mohli uskutečnit tento přenos. Popisovat budeme pouze ionosférickou refrakci, jelikož troposférická se skoro nevyužívá (popsáno v kapitole 3.2).

## 4.7 Ionosférická refrakce

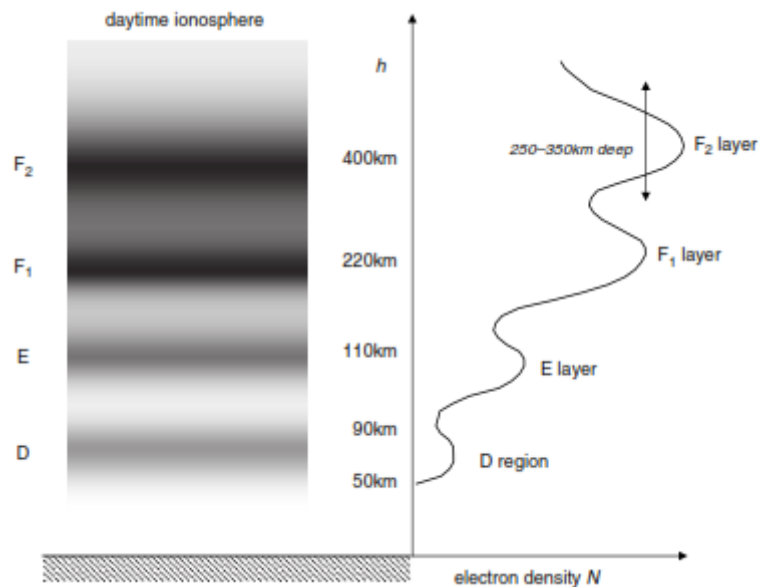
Tímto vlivem se zabývá ITU-R P. 434 [20]. Ionizace je proces, při kterém z neutrálního atomu nebo molekuly vznikne ion. Tento proces zajišťuje Slunce a sluneční záření, z toho vyplývá i hlavní vlastnost této sféry a tou je závislost na poloze Země ke Slunci. Ionosféra je tedy obal atmosféry, po které můžeme uskutečňovat přenos použitím těchto ionů. Proces ionizace na dalším obrázku.



Obr. 11 Proces ionizace [5]

Takže nejen roční období určují vlastnost vrstev ionosféry, ale i den a noc a hlavně velikost dopadajících slunečních či kosmických paprsků. Ionosféra se skládá z plynů a vzhledem k vzdálenosti od Země je jejich velikost různá a každý plyn má jiné vlastnosti. Tím dochází ke zvrstvení. Směrem od povrchu Země nazýváme tyto vrstvy D, E, F. Vrstva D je nejnižší

a je ve vzdálenosti 60-90 km a používá se k odrazům dlouhých a velmi dlouhých vln. Tato vrstva existuje pouze v denních hodinách a v nočních úplně vymizí vlivem rekombinace nosičů. Své maximum dosahuje v letních měsících a naopak minimum v zimních. Vrstva E leží ve výšce 90 až 130 km, odráží střední vlny a v noci, když vymizí vrstva D i dlouhé vlny. Maximum opět dochází v letních měsících. Vrstva F se dělí na 2 „podvrstvy“, a to F1 a F2. Jelikož v této vrstvě dochází k pomalé rekombinaci, tak tato vrstva přetrvává i v noci. F2 se vyskytuje celý rok, maxima dosahuje kolem poledne a zmenšuje se po celou noc a minima dosahuje před úsvitem. Průběh vrstvy F je tedy značně ovlivněn sluneční a kosmickou činností (erupce, skvrny, bouře apod.). Proto nám může vypadávat signál u např. TV se satelitním příjmem. Vrstvy ionosféry jsou znázorněny na dalším obrázku.



**Obr. 12 Složení ionosféry a závislost koncentrace elektronů na vzdálenosti od povrchu [5]**

Předpokládáme, že ionosféra je tvořena z několika malých vrstev, interakce paprsku a ionizované vrstvy vede k odrazu. V důsledku je toho je potřeba znát index lomu

$$n = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}} \quad [-], \quad (4.23)$$

kde  $N$  koncentrace elektronů  $\left[ \frac{el}{m^3} \right]$ ,

$f$  frekvence  $[Hz]$ .

Zlomek pod odmocninou se nazývá relativní permitivita atmosféry a je menší než 1, ve chvíli, kdy se rovná 0, nemůže dojít k odrazu a můžeme tak stanovit minimální frekvence (LUF) pro odraz zpět k přijímači

$$f_0 = \sqrt{81N} = 9\sqrt{N} \quad [Hz]. \quad (4.24)$$

Pro určení maximální frekvence (MUF) využijeme zákonu lomu, kde úhel dopadu se rovná úhlu odrazu (Snellův zákon lomu). Tato frekvence nám říká, jakou maximální můžeme vyslat, aby se ještě odrazila zpět

$$1 \cdot \sin \varphi_0 = n_1 \cdot \sin \varphi_1 = \dots = n_m \cdot \sin \varphi_m \quad , \quad (4.25)$$

kde  $\varphi$  úhel dopadu na ionosféru [ $^\circ$ ].

Aby se vlna mohla vrátit do atmosféry, musí být úhel roven  $\frac{\pi}{2}$  ( $90^\circ$ ). Pak platí

$$1 \cdot \sin \varphi_0 = n_k \cdot 1 = \sqrt{1 - \frac{81N}{f^2}} \quad (4.26)$$

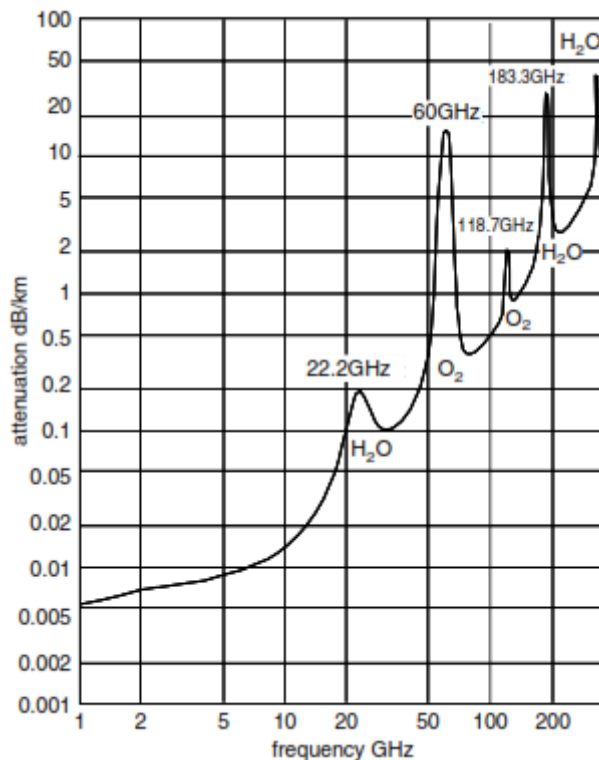
a z tohoto vztahu můžeme vyjádřit  $f$ , což je maximální možná frekvence. Pro tuto frekvenci tedy platí

$$f_{max} = \frac{81N}{\cos \varphi_0} \quad [Hz]. \quad (4.27)$$

## 4.8 Atmosférický útlum

Tímto vlivem se zabývá ITU-R P. 676 [21]. Atmosféra významně neovlivňuje šíření vln s frekvencí nižší než 12 GHz, což odpovídá vlnové délce  $\lambda = 0,025 \text{ m}$ , nicméně kyslík a vodní páry útlum způsobují, i když je velmi malý, ale způsobují (většinou do desetin  $db/km$ , což se dá ve většině případů zanedbat). ITU-R se zabývá tímto problémem a samozřejmě vydaly doporučení v tabulkových hodnotách, takže pro návrh jednodušších spojů lze tyto tabulky využít. Proč nás zajímá útlum způsobený deštěm? Protože při frekvencích vyšších, než 12 GHz je vlnová délka tak malá, že při velikost dešťových kapek vzniká rozptyl a absorpce a může zde dojít ke stočení polarizovaných vln. Výpočty jsou založeny na statisticky závislém vyhodnocení.





Obr. 13 Útlum kyslíkem a vodními kapkami závislý na frekvenci [21]

Pro doplnění, útlum je závislý také na hustotě deště, je rozdíl, když poprchává, nebo když prší 50mm/cm<sup>3</sup>.

## 4.9 Vegetace

Tímto vlivem se zabývá ITU-R P. 833 [22]. Tento útlum je také složitý na přesné definování, záleží velmi na zeleni – rozměrech a typu listů, dále na velikosti porostů, protože každá zeleň bude mít jiné vlastnosti vzhledem k vlnové délce. Když prší, tak listy nasáknou vodou, a to způsobí nevodivou plochu o velikosti listu. Tato plocha může působit depolarizačně nebo rozptylově. Pro výpočty útlumu vegetací existují modely, které popisují složité vegetační podmínky. Například v hustých lesích nejsou signály na mobilech, protože je zde velká hustota stromů, obzvláště na jaře a v létě. Maximální útlum dle doporučení ITU-R je

$$L_{av} = L_m \left[ 1 - e^{-\frac{d\gamma}{L_m}} \right] [dB], \quad (4.28)$$

kde  $L_m$  maximální útlum, když je jeden přijímač obklopen vegetací [dB],

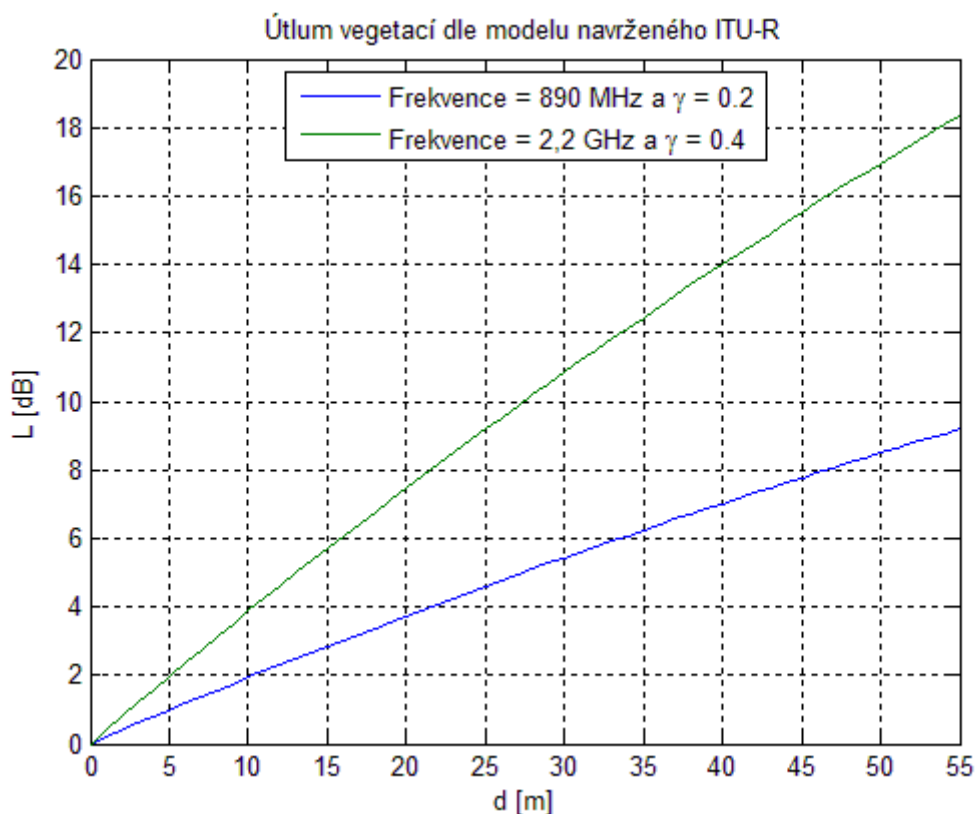
$\gamma$  zvláštní útlum pro velmi krátké trasy porostem  $\left[ \frac{dB}{m} \right]$ ,

$d$  délka cesty do vegetace [m].

Hodnota  $L_m$  je dána hustotou, druhem vegetace a vertikální částí antény. Vypočteme jej

$$L_m = 0.18f^{0.752} [-], \quad (4.29)$$

kde  $f$  frekvence [Hz].



Obr. 14 Útlum vegetací při 2 prostředích

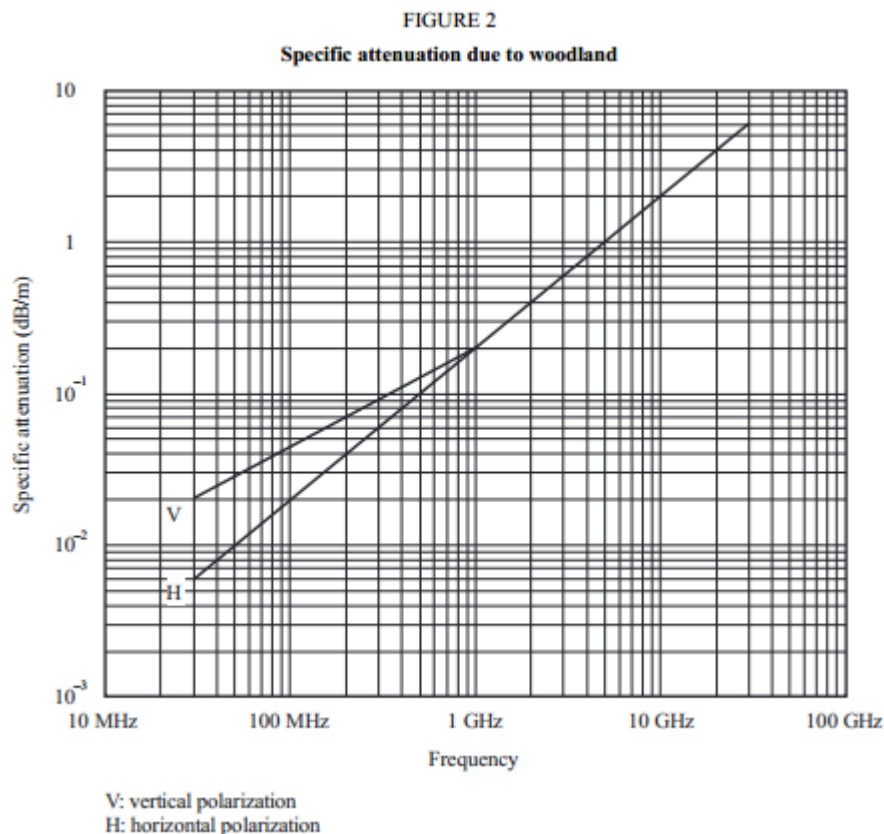
Vyskytuje se v literatuře ještě jedna varianta maximálního útlumu a to je dáno následující rovnicí

$$L_m = L_1 f^\alpha [-], \quad (4.30)$$

kde  $L_1$  konstanta [-],

$\alpha$  konstanta [-].

Obě výše zmíněné konstanty byly získány experimentálním měřením. Například v parku v Riu de Janeiru přinesly hodnoty  $L_1 = 0,18 \text{ dB}$  a  $\alpha = 0,752$ . Specifický útlum  $\gamma$  je dán hustotou a výškou vegetace. Závislost tohoto útlumu na frekvenci ukazuje další obrázek.



Obr. 15 Specifický útlum závislý na frekvenci [22]

U tohoto obrázku je vidět rozdíl mezi vertikální a horizontální polarizací, jelikož se k nižším kmitočetům uplatňuje útlum způsobený kmeny stromů. Jednotlivé konstanty byly průměrně stanoveny pro jednotlivé krajiny s různým charakterem vegetace. Jsou uvedeny na následující tabulce.

Tabulka 2 Naměřené konstanty v různých městech

Místo	$L_1$ [dB]	$\alpha$ [-]
Rio de Janeiro	0,18	0,752
Mulhouse	1,15	0,43
St. Peterburg	1,37	0,42

Ve městě Rio de Janeiro v Brazílii byl naměřen menší útlum, protože frekvence byla zvolena 900-1800 MHz, kde stromy sahají do výšky 15 m. Přijímací anténa byla ve výšce 2,4 m. Ve městě Mulhouse ve Francii byla použita frekvence 900-2200 MHz, stromy byli ve výšce 15 m a bylo to měřeno na ploše 5 km. Ve městě St. Peterburg v Rusku se měřilo na frekvenci 105,9-2117,5 MHz s výškou stromů od 12-16 m a mezera mezi stromy byla průměrně 3 m, tedy hustota 20-30 stromů na 100 m<sup>2</sup>. Útlum je také závislý na větru, jelikož se listy a kmeny různě nahýbají, ale tento faktor zanedbáme.

## 4.10 Únik energie do terénu

Tímto vlivem se zabývá ITU-R P. 368 [23]. U přízemní povrchové vlny nás nejvíce zajímá právě tento útlum. Předpokládáme, že anténa je umístěna v elektricky malé výšce nad Zemí (elektrická výška je míra měřená v počátku vlnových délek vlny). Zanedbáme zde difrakční jevy a podobné, takže předpokládáme, že terén je rovinný. Parametry tedy závisí na vlastnostech půdy. Jak bylo v kapitole 4.2 napsáno, jedná se o vertikální polarizaci, jelikož polarizace horizontální, by měla vzhledem k zrcadlení s povrchem Země nulovou složku. Tento útlum zkoumal jako první vědec Sommerfield v roce 1909. Dále pro inženýrské potřeby byl únik přepočítán Šulejkinem v roce 1923. Nezávisle na něm byl Sommerfieldův vztah upraven holandským vědcem B. Van der Polem, který stanovil finální podobu, který byl téměř totožný s výpočtem Šulejkina. Výpočet je dán intenzitou elektrické složky v místě příjmu

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30 \cdot P_v \cdot G_v}}{d} |F|, \quad (4.31)$$

kde  $F$  činitel tlumení  $[-]$ .

Činitel tlumení  $F$  je roven 1 pro dokonale vodivý povrch země. Obecně je závislý na vlnové délce  $\lambda$ , vzdálenosti  $d$ , relativní permitivitě  $\epsilon_r$  a vodivosti země  $\sigma$ . Pro pásmo dlouhých a velmi dlouhých vln pro dobře vodivý povrch platí Nortonova aproximace

$$|F| \approx \frac{2 + 0,3p}{2 + p + 0,6p^2} [-], \quad (4.32)$$

kde  $p$  numerická vzdálenost  $[m]$ .

Numerickou vzdálenost vypočteme

$$p = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{\cos b}{x} [m], \quad (4.33)$$

kde  $b$  úhel dopadu  $[^\circ]$ ,

$x$  elektrický parametr prostředí.

Úhel dopadu vypočteme

$$b = \tan^{-1} \frac{\epsilon_r + 1}{x} \quad (4.34)$$

a  $x$  vypočteme

$$x = 60\sigma\lambda. \quad (4.35)$$

Pro suchou půdu platí, že relativní permitivita a vodivost jsou  $\varepsilon_r = 4 [-]$ ,  $\sigma = 10^{-3} \left[ \frac{S}{m} \right]$ .

Složením těchto vztahů dostaneme

$$|F| \approx \frac{2 + 0,3p}{2 + p + 0,6p^2} \approx \frac{2 + 0,3 \cdot \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{\cos \tan^{-1} \frac{\varepsilon_r + 1}{60\sigma\lambda}}{60\sigma\lambda}}{2 + \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{\cos \tan^{-1} \frac{\varepsilon_r + 1}{60\sigma\lambda}}{60\sigma\lambda} + \left( 0,6 \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{\cos \tan^{-1} \frac{\varepsilon_r + 1}{60\sigma\lambda}}{60\sigma\lambda} \right)^2} [-]. \quad (4.36)$$

Vztah pro numerickou vzdálenost má dvě varianty - pro horizontální, nebo vertikální polarizaci. Rovnice (4.36) je pro vertikální polarizaci a ten můžeme zjednodušit následujícími způsoby. Když platí podmínka

$$h \leq \frac{\lambda}{4} a d \gg \lambda a \varepsilon \gg 1, \quad (4.37)$$

dostaneme zjednodušený vztah pro numerickou vzdálenost

$$p = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\varepsilon_r + 1)^2 + x^2}} [m]. \quad (4.38)$$

Vztah (4.38) se liší v literaturách podle jednotlivých podmínek. Například, když je vodivý proud větší, než posuvný, nastává zde podmínka

$$60\sigma\lambda \gg \varepsilon_r \quad (4.39)$$

a vztah zjednodušíme na

$$p = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2}} [m]. \quad (4.40)$$

Naopak, když převládá proud posuvný nad vodivým, podmínka je tedy opačná než (4.39) a dostaneme vztah

$$p = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\varepsilon_r + 1)^2}} [m]. \quad (4.41)$$

Existuje mnoho případů a tvarů těchto rovnic, řešení je mnohem složitější, využívá se tedy tzv. spádových křivek, které vznikly experimentálními měřeními a ty se používají místo výpočtů. Jsou obsaženy v doporučeních ITU-R. Na simulaci těchto křivek je možno využít

program GRWAVE, který je také publikován na stránkách ITU-R a je volně k dispozici. Intenzitu lze nakonec přepočítat na ztráty šířením v dB podle vztahu

$$L = 142 + 20 \log_{10} f - E \text{ [dB]}, \quad (4.42)$$

kde  $f$  frekvence [MHz],

$E$  intenzita elektrického pole  $\left[ \frac{\mu V}{m} \right]$ .

Ve výpočtovém programu budeme počítat s následující rovnicí, která se v literatuře vyskytuje nejčastěji

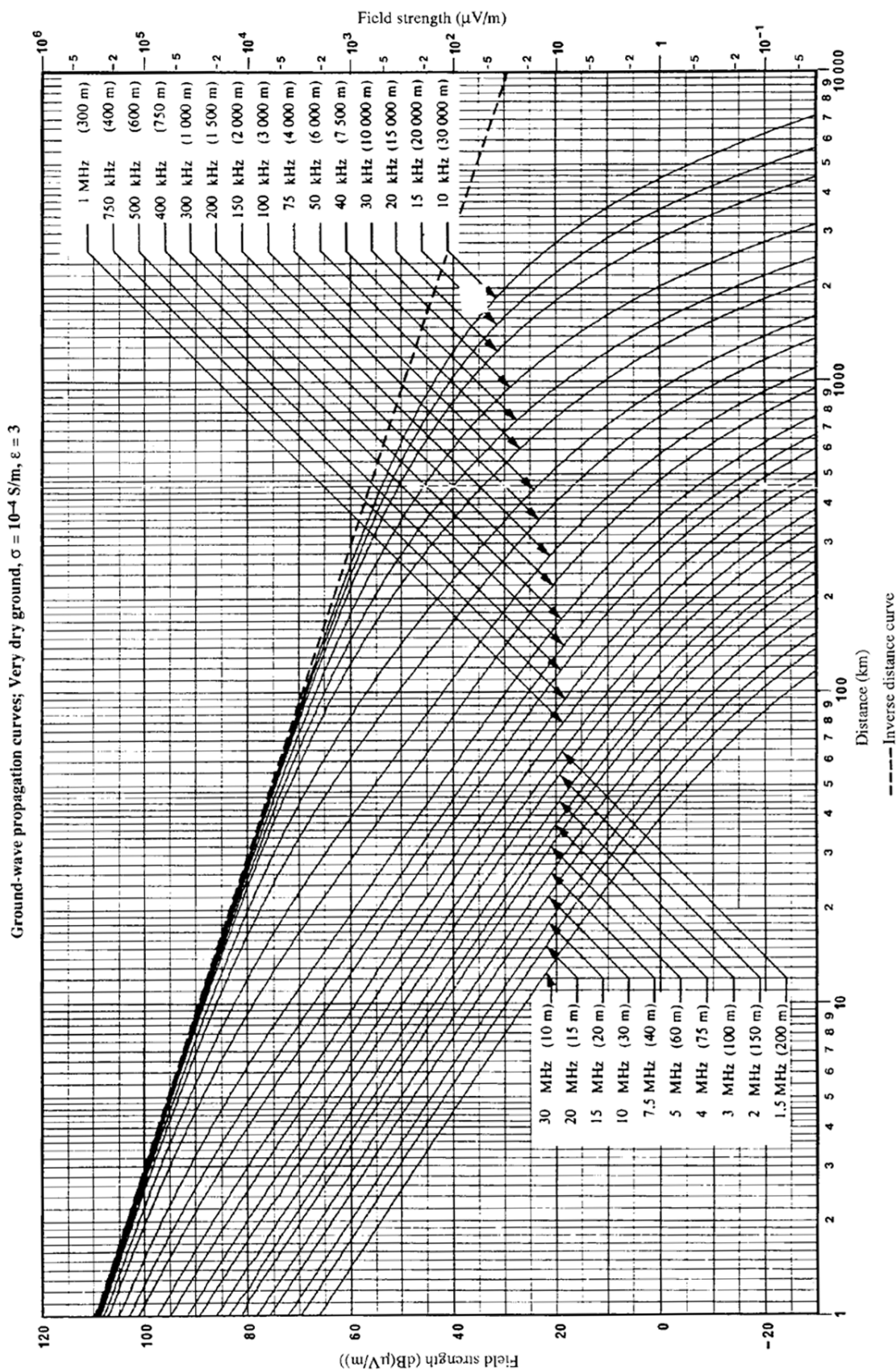
$$p = \frac{\pi r}{\lambda} \left| \frac{\varepsilon_{kr} - 1}{\varepsilon_{kr}^2} \right| = \frac{\pi r}{\lambda} \frac{\sqrt{(\varepsilon_{kr} - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2}}{\varepsilon_{kr}^2 + (60\lambda\sigma)^2} [m], \quad (4.43)$$

kde  $\varepsilon_{kr}$  komplexní permitivita [-].

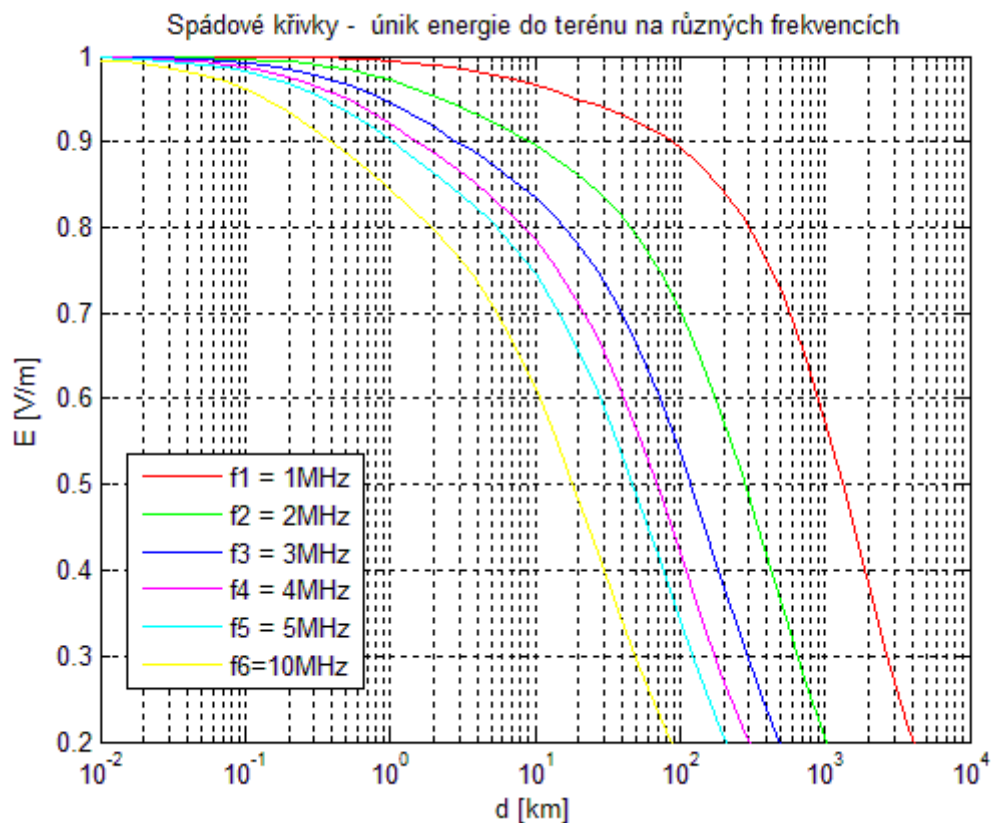
Komplexní permitivita se uplatňuje v prostředích s nenulovou permitivitou a vypočteme ji

$$\varepsilon_{kr} = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma. \quad (4.44)$$

Ještě přiložíme příklad spádové křivky z doporučení ITU-R a z vlastní simulace.



Obr. 16 Praktická ukázka ze stránek ITU-R [23]



Obr. 17 Simulace spádových křivek

#### 4.11 Nerovný povrch

Tímto vlivem se zabývá ITU-R P. 1410 [24]. Jestliže nebudeme uvažovat rovinnou plochu pro přenos mezi vysílací a přijímací anténou, nabízí se nám otázka, co se stane se signálem při nerovném povrchu. Signál se může rozptýlit do prostoru a přijímací anténa nepřijme žádný signál. Odrazu od nerovného povrchu se nazývá difúzní rozptyl – diffuse scattering a stává se také zdrojem vlnění. Abychom se vyhnuli takovému rozptylu, musíme umístit antény do dostatečné výšky, aby mezi anténami nebyla překážka. Mezní velikost drsnosti se nazývá Rayleighovo kritérium, které nám říká, že fázový posuv může být menší než 45°.



## 5 Výpočetní program

### 5.1 Úvod

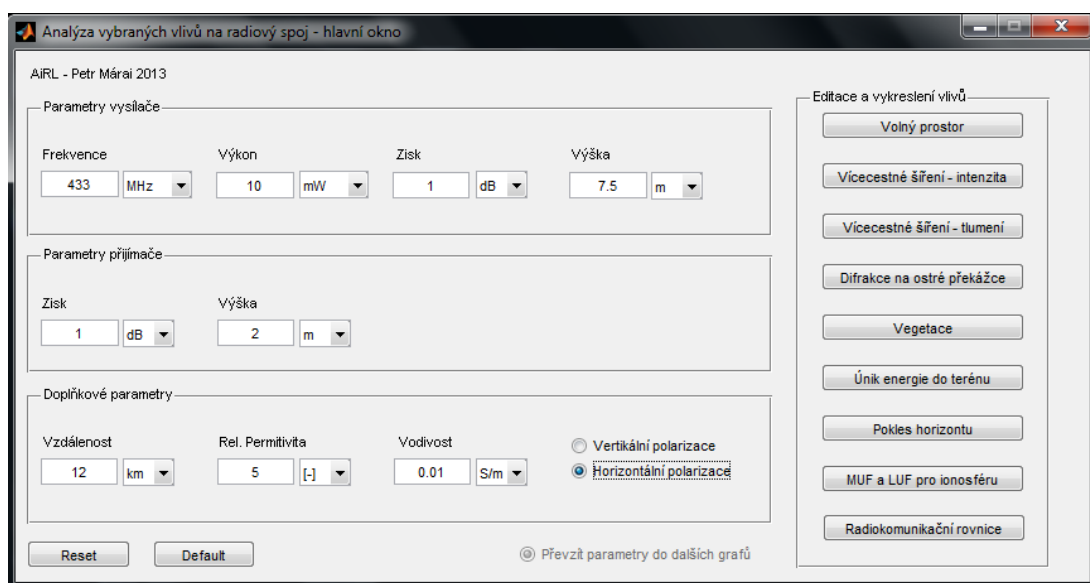
Program je vytvořen jako doplněk k teorii a ověření uvedených vzorců a myšlenek. Tvůrčím jazykem programu je Matlab, který je využíván především pro matematické a vědeckotechnické výpočty. Vše je vytvořeno v grafickém prostředí GUIDE. Vytvořený program obsahuje i grafické prostředí, které zjednodušuje ovládání a je názorné pro potřeby výuky, pro které byl program primárně vytvářen. Program je pojmenován AiRL – Attenuation in Radio Link. Struktura je tvořena tak, že z hlavního okna, můžeme kliknutím přejít na vybraný vliv a dále s ním pracovat. V programu byly využity následující vlivy:

- útlum volným prostorem
- průběh intenzity elektrického pole při vícecestném šíření
- průběh tlumení vlny při vícecestném šíření
- průběh elektrické intenzity při lomu na ostré překážce
- útlum způsobený vegetací
- únik energie do terénu
- pokles horizontu způsobený zakřivením Země
- maximální a minimální frekvence, kterou je možno vyslat, aby se odrazila zpět k Zemi
- výpočet radiokomunikační rovnice.

K programu je v příloze vytvořen jednoduchý manuál pro snadné použití. Všechna editační pole jsou ošetřena, proti nevyžádanému či žádnému zadání.

### 5.2 Popis hlavního okna

Hlavní okno je takové centrum programu, z kterého se dá dostat na vlivy, výpočty a grafy.

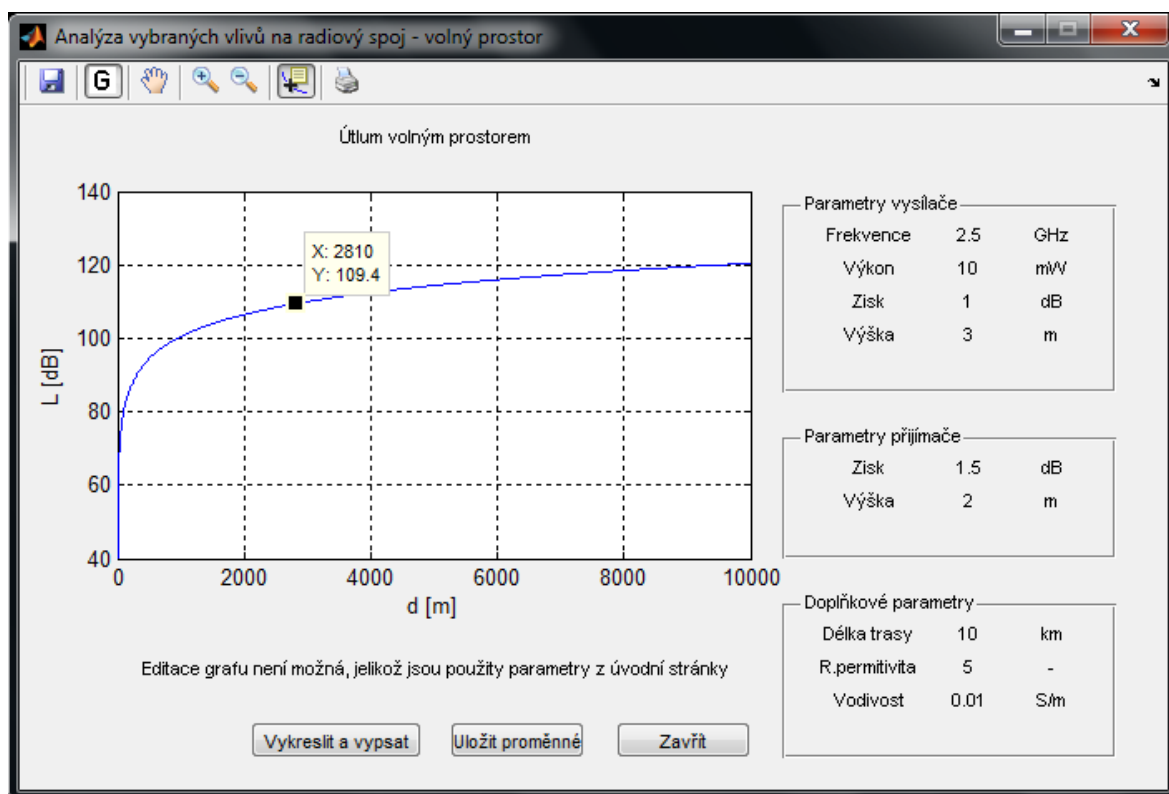


Obr. 18 Obrazovka při spuštění programu

Z obrázku je patrné, že si můžeme zadat libovolné parametry, které budou použity v následujících výpočtech. Dále je také umožněno vybrat si pro ulehčení zadání jednotky, se kterou chceme pracovat. Tlačítkem reset se vynulují veškeré parametry, naopak tlačítkem default se nastaví přednastavená čísla s typickými hodnotami. Po vyplnění editačních polí a zvolení jednotek si vybereme vliv, který působí na spoj. Kliknutím na vybraný vliv se otevře modul, ve kterém dojde k výpočtu a zobrazení výsledků konkrétního vlivu. Dále dojde k výpisu parametrů použitých při výpočtu, případně k zadání parametrů dalších. Ve všech modulech je možnost uložit graf (přípona .png), dostupné jsou i další běžné operace. Dále, pro pozdější využití, je možnost uložení proměnných, které se vykreslují ve dvou formátech, a to v textovém souboru (přípona .txt), nebo v souboru, který využívá Matlab (přípona .mat).

### 5.3 Popis modulu pro výpočet útlumu ve volném prostoru

Z hlavního okna se otevře modul, ve kterém se ze zadaných parametrů vypočte útlum volným prostorem a vykreslí. Tato část programu nepotřebuje doplňkový parametr, takže se graf přímo vykreslí po stisknutí tlačítka Vykreslit a vypsát. Vzorce použité pro výpočet jsou uvedeny v teoretické části práce.

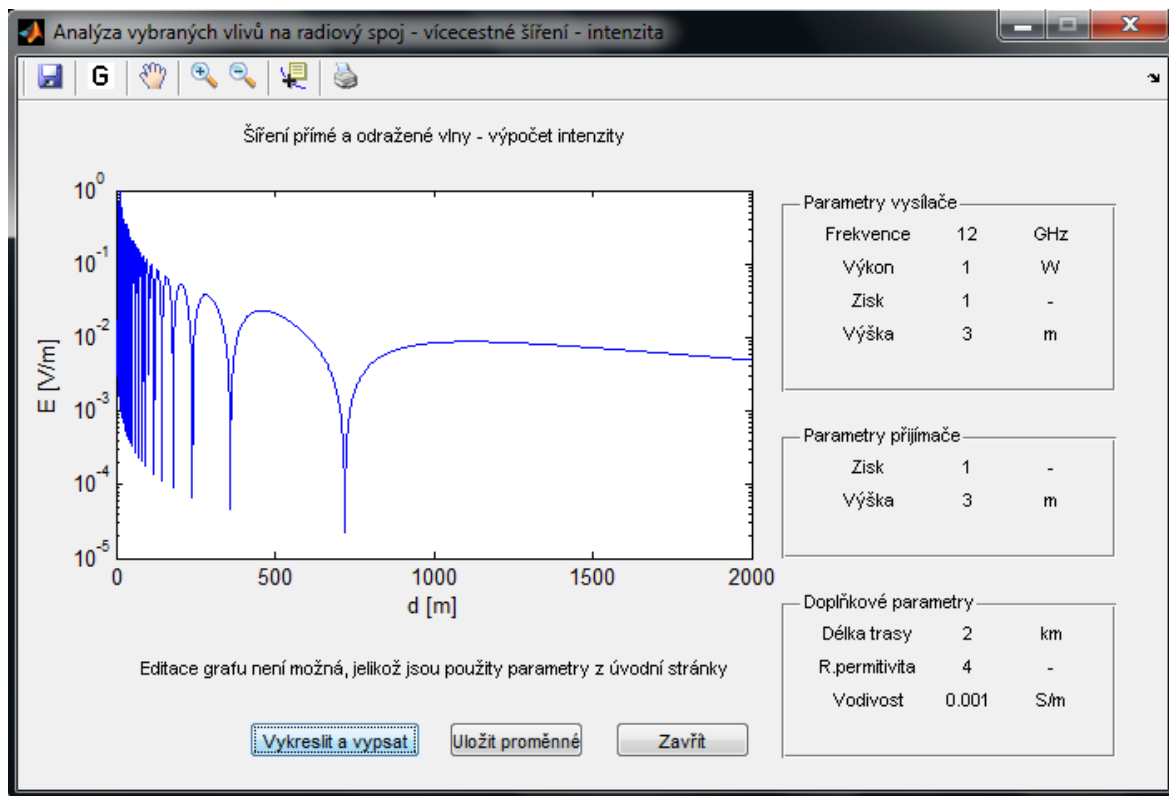


Obr. 19 Okno pro útlum volným prostorem

V pravé části modulu se nachází parametry, které byly použity pro výpočet. Jsou zde uvedeny pro snazší orientaci a přehlednost.

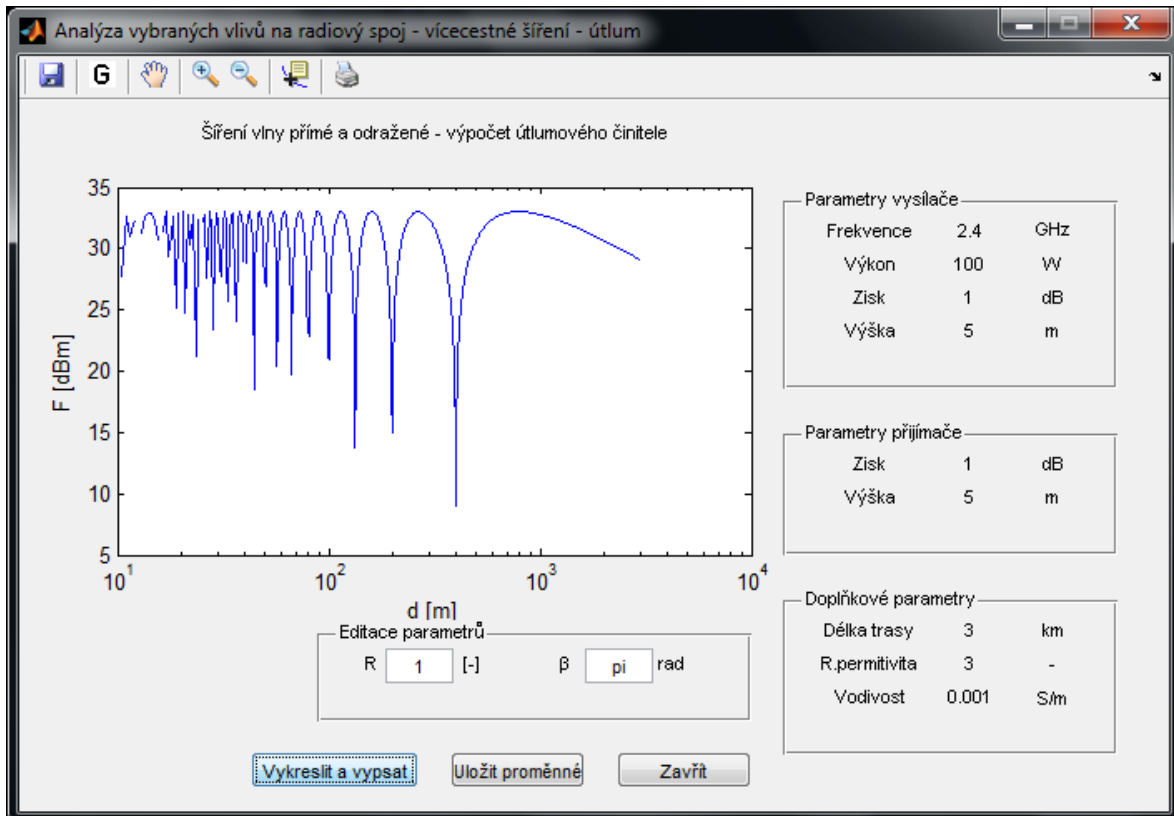
## 5.4 Popis modulů pro výpočet vícecestného šíření

U vícecestného šíření je těžký výpočet, jelikož záleží na mnoha parametrech, proto je tento jev rozdělen do 2 výpočetních modulů. Jeden je zaměřen na průběh intenzity elektrického pole a druhý je zaměřen na průběh tlumení. U obou výpočtů je potřeba zvolit druh polarizace v hlavním okně.



Obr. 20 Popis modulu pro výpočet vícecestného šíření – intenzity

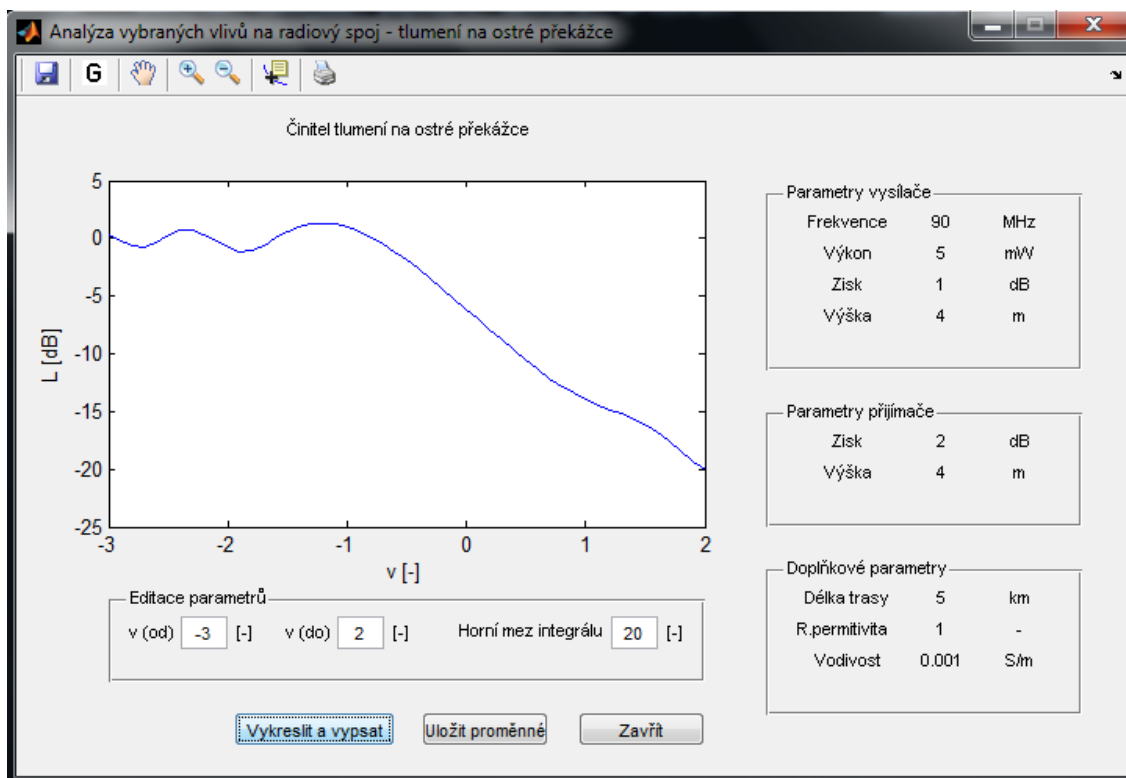
U tohoto modulu nebylo také potřeba nic doplňovat, takže se graf přímo vykreslil. U modulu pro výpočet tlumení už jsou potřeba 2 doplňkové parametry. Jedním z nich je  $R$ , což je komplexní činitel odrazu a  $\beta$  úhel odrazu. Graf se tedy vykreslí po zadání těchto parametrů, které jsou také ošetřeny proti špatnému zadání.



Obr. 21 Popis modulu pro výpočet vícecestného šíření – útlumu

## 5.5 Popis modulu pro výpočet útlumu na ostré překážce

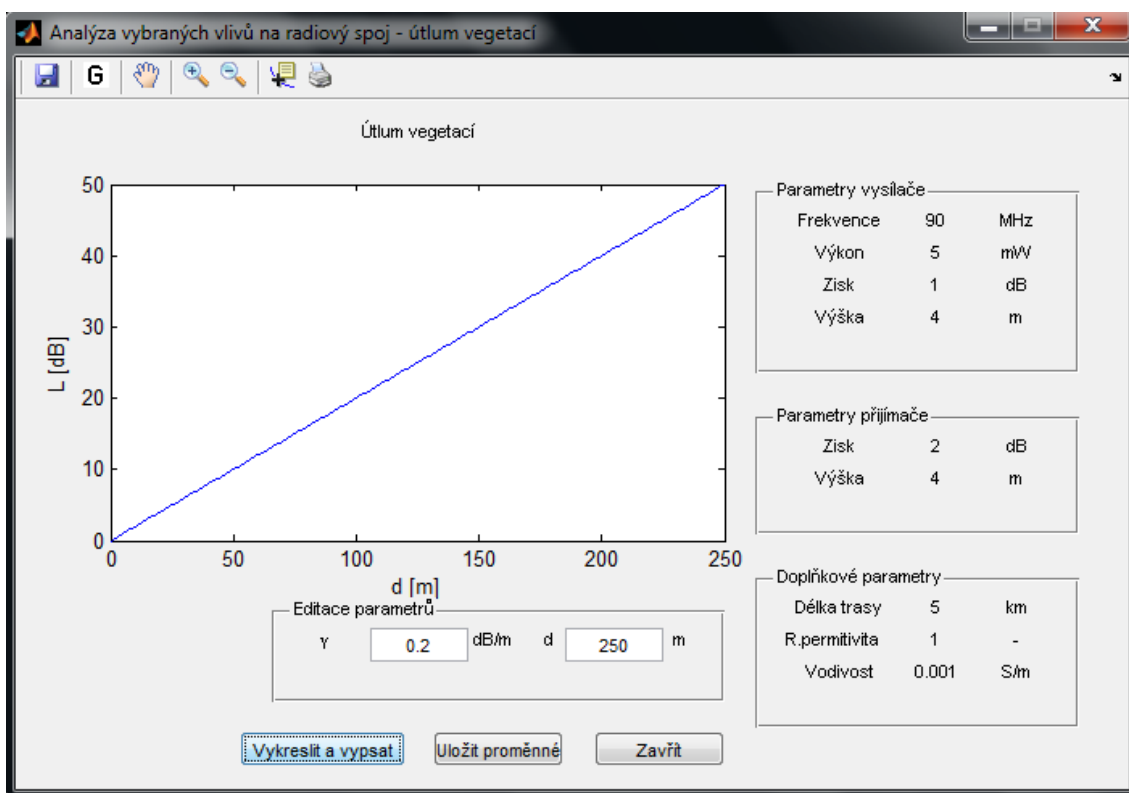
Pro výpočet tohoto útlumu je použit Fresnelův integrál, který udává závislost útlumu na míře zastínění. Meze tohoto integrálu jsou ohraničeny. Spodní mez je dána mírou zastínění a horní mez je nekonečno. Aby se graf mohl vykreslit, je potřeba proměnný parametr, kterým je právě míra zastínění  $v$ . V programu se zadá velikost  $v$ , se kterou se má počítat. Krok vektoru  $v$  je předdefinován na hodnotu 0.1. Čím větší se zvolí horní mez a krok, tak bude křivka méně zvlněná od hodnoty  $v=0$  směrem ke kladným hodnotám  $v$ . Jak bylo v teorii napsáno, v počátku grafu se objevuje kladný útlum, čímž se ověřuje, že v určitém místě zastínění překážka dokonce zesiluje. V níže uvedeném obrázku je tento jev pozorován na hodnotě  $v = -1.2$  a  $v = -2.4$ .



Obr. 22 Vykreslený modul pro útlum na ostré překážce

## 5.6 Popis modulu pro výpočet útlumu způsobený vegetací

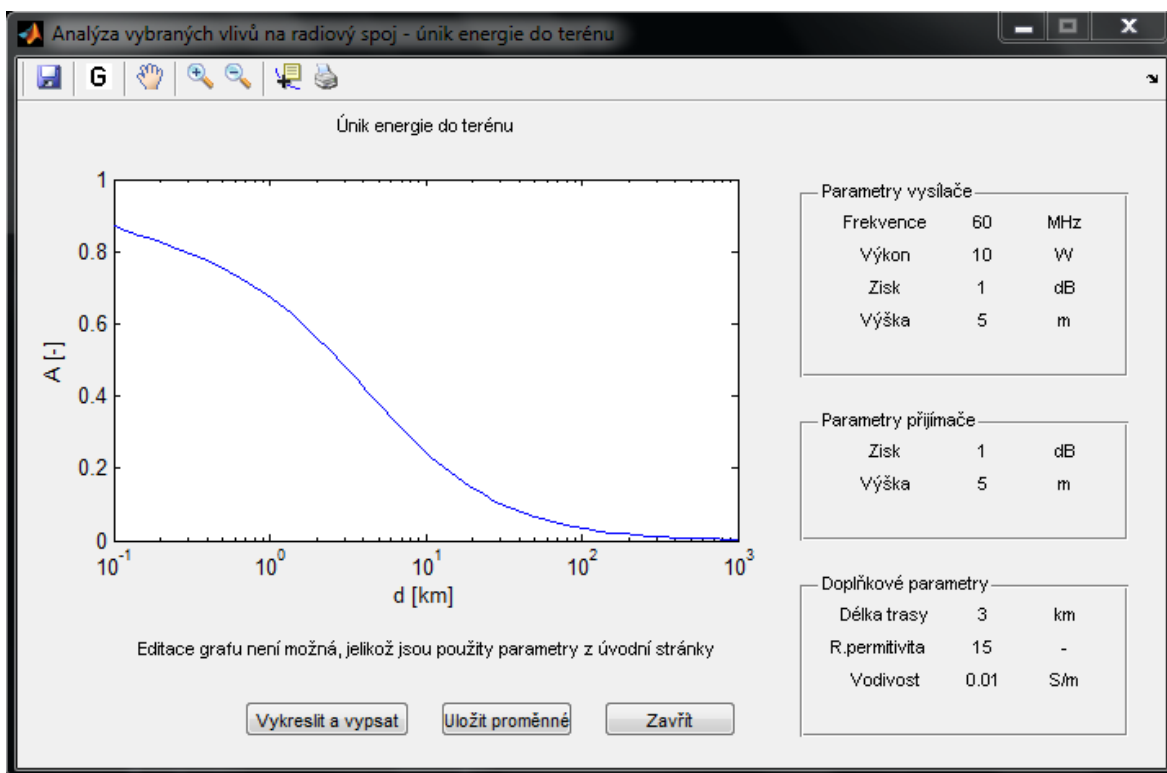
Modul pro výpočet útlumu vegetací je vyfocen níže. Doplnit jsou potřeba 2 parametry.



Obr. 23 Modul pro výpočet útlumu způsobený vegetací

Jedním z parametrů je hloubka do vegetace  $d$  a druhým z nich je  $\gamma$ , což je specifický útlum pro daný typ vegetace. Při změně parametru  $\gamma$  se útlum zvýší, takže chceme tento parametr co nejmenší. Tento parametr je stanoven na Obr. 15. Specifický útlum závislý na frekvenci [22]. Hloubka do vegetace znamená, jak daleko se nachází přijímač od začátku vegetace. Platí, že čím větší hloubka, tím větší útlum. Při zadání libovolných čísel bude závislost vždy lineární.

## 5.7 Popis modulu pro výpočet útlumu způsobený únikem energie do terénu

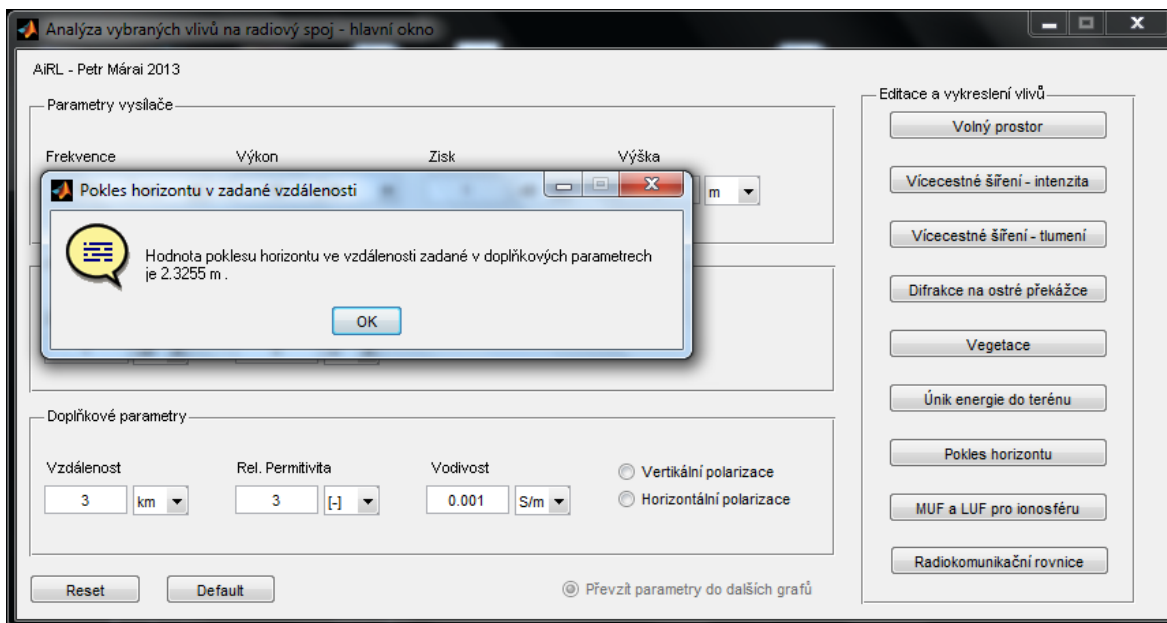


Obr. 24 Modul pro výpočet úniku energie do terénu

Tento modul je opět počítán ze vzorců, které jsou uvedeny v Únik energie do terénu. Opět není potřeba doplnit další parametr, protože si výpočet vystačí s parametry z hlavního okna.

## 5.8 Popis modulu pro výpočet poklesu horizontu

Tento modul je přenesen do upozorňujícího dialogu. Tento modul se může hodit při výpočtech s přímou viditelností nebo radiovým stínem. Výpočet je složen pouze ze zadané vzdálenosti v hlavním okně (v jaké vzdálenosti chceme provést výpočet).

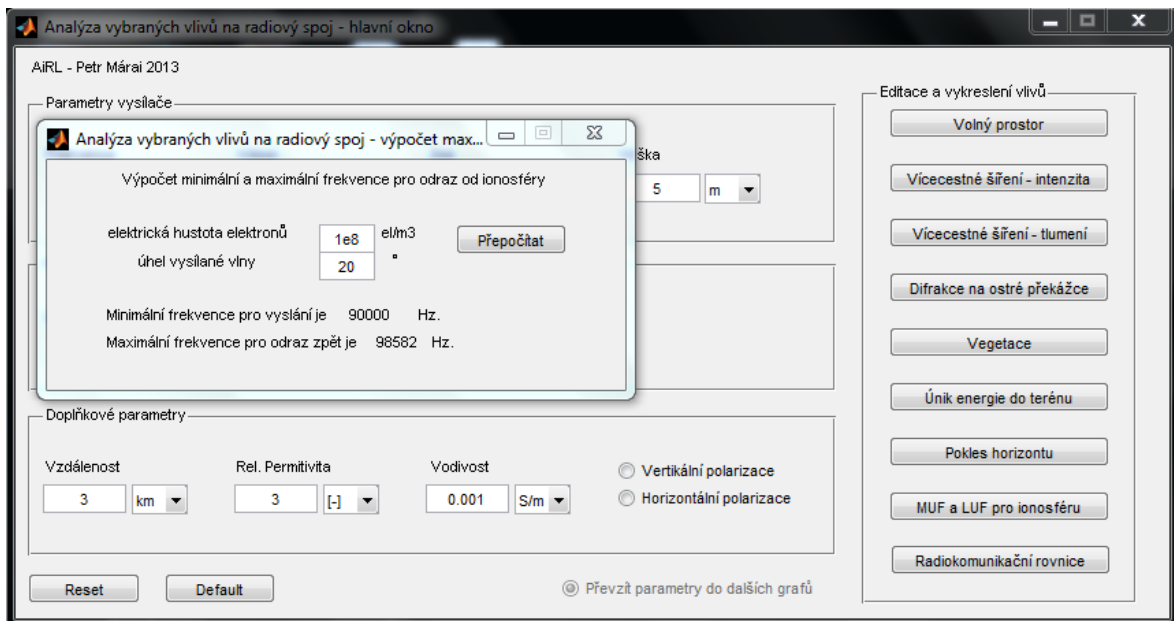


Obr. 25 Výpočet poklesu horizontu

Z výše uvedeného obrázku se výpočet provedl při vzdálenosti 3 km, tj. po třech kilometrech poklesl horizont o 2.3255 metru.

## 5.9 Popis modulu pro výpočet maximální a minimální frekvence pro odraz od ionosféry

Při výpočtu MUF a LUF nás zajímají 2 parametry, a to počet elektronů na metr krychlový a úhel vysílané vlny. Počet elektronů závisí na tom, jaký je den v roce a jestli je den či noc. Proto je tento parametr velmi proměnný. Vypočtenou frekvenci bychom mohli teoreticky použít např. jako rádio. Dříve se takto používal radiový rozhlas při AM modulaci.



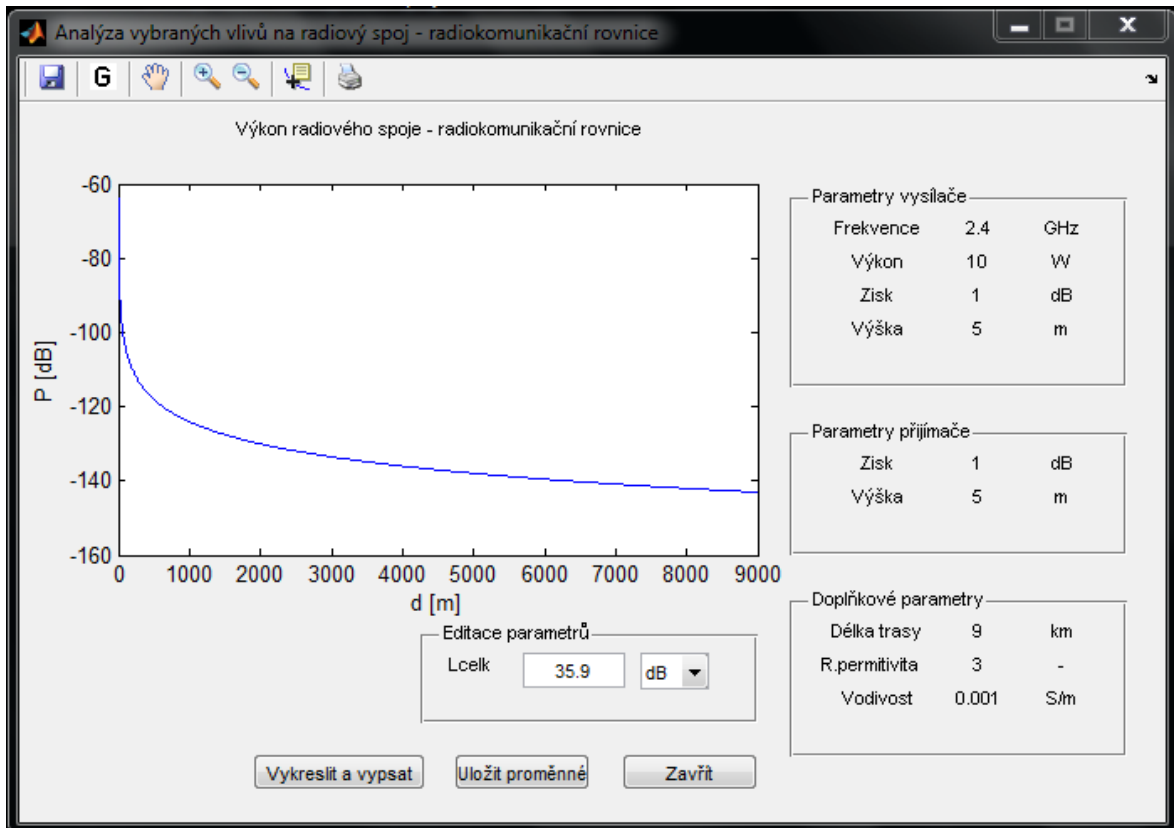
Obr. 26 Modul pro výpočty MUF a LUF

Pro příklad bylo zvoleno  $100M \frac{el}{m^3}$ , což je prakticky nereálné. V praxi dosahují tyto hodnoty  $10k - 10M \frac{el}{m^3}$ .

## 5.10 Popis modulu pro výpočet radiokomunikační rovnice

Modul je vytvořen podobně jako ostatní s tím rozdílem, že je potřeba doplnit jeden parametr a příslušnou jednotku. Volba jednotky převede ostatní parametry do požadovaného tvaru. Rovnice má 2 tvary – v základních jednotkách nebo v decibelech. Pokud je požadovaný výstup ve Watech, je třeba zvolit u celkového útlumu znak  $[-]$ . Naopak pokud chceme, aby požadovaný výstup byl v decibelech, je potřeba zvolit znak  $[dB]$ .

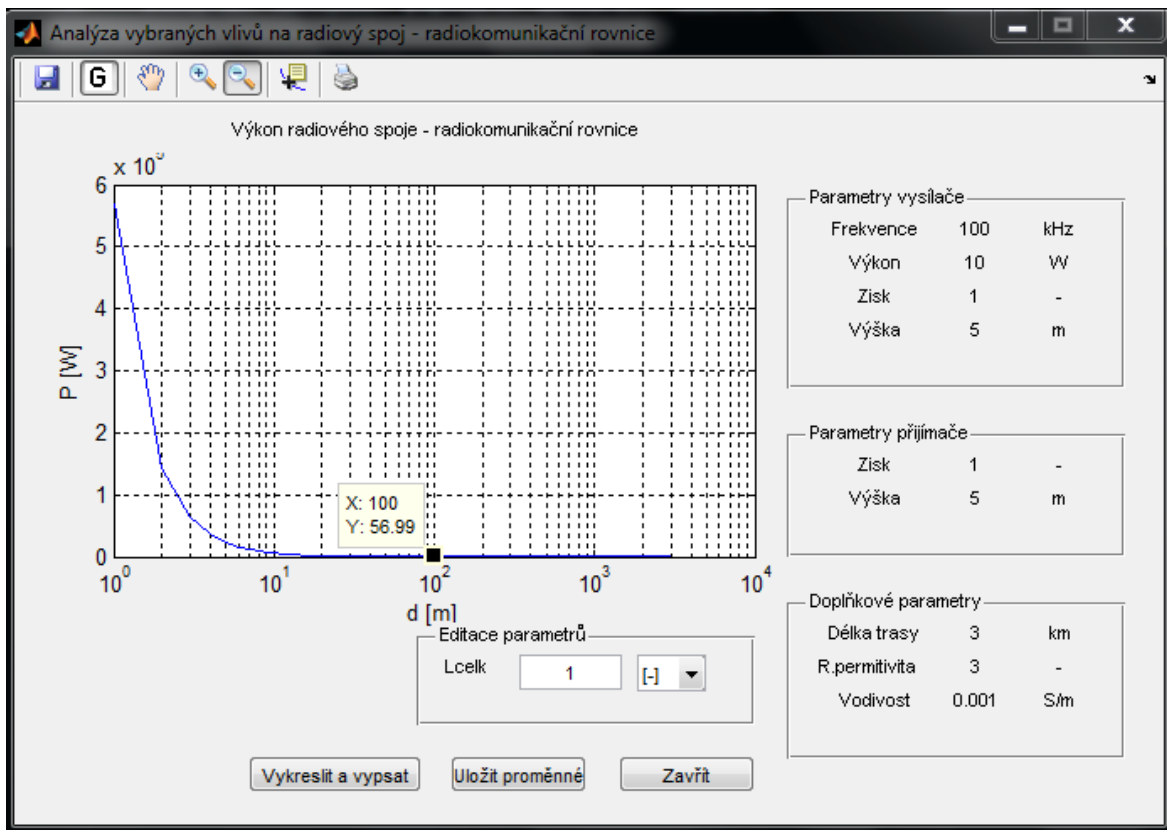




Obr. 27 Modul radiokomunikační rovnice

Důležitým poznatkem při vykreslování závislosti přijatého výkonu na vzdálenosti je závislost na zvoleném kmitočtu nebo vzdálenosti. Jestliže zvolíme frekvenci  $f = 100\text{kHz}$  a vykreslení do vzdálenosti  $d = 100\text{m}$  nastane problém v počátku grafu. Tento problém je dán tím, že při malém kmitočtu vzniká velká vlnová délka a v malé vzdálenosti, podle rovnice (4.45), vznikne velký přijatý výkon. Pro názornost doplnění čísel do rovnice:

$$P_p = P_v G_v G_p \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \frac{1}{L_c} = 10 * 1 * 1 * \left( \frac{3000}{4 * \pi * 100} \right)^2 * \frac{1}{1} \doteq 56,99\text{W} \quad (5.1)$$



Obr. 28 Vykreslení špatného zadání

Přijmout 56,99W je samozřejmě nesmyslné, když vyslaný výkon je 10W. Proto je potřeba dát si pozor, jaké frekvence a jakou vzdálenost zadáváme. Technologie využívající frekvenci 2,4GHz (např. Wi-fi nebo Bluetooth), využívají krátké vzdálenosti pro přenos informací, ale na mnohem větší frekvenci. Protože je zvolena vyšší frekvence, klesla vlnová délka a i při malé vzdálenosti je přijatý výkon v pořádku. Jelikož můžeme použít nekonečně mnoho frekvencí a nekonečně mnoho vzdáleností, není možnost tento problém jakkoliv ošetřit.

## 6 Praktická část

V této kapitole dojde k porovnání simulovaného vlivu vícecestného šíření s reálným měřením. Nejdříve dojde k popisu měřicího pracoviště a následně k porovnání naměřených a simulovaných dat.

### 6.1 Popis stanoviště

Toto měření se většinou realizuje na volných plochách, kde nemůže být uplatněn jiný vliv (startovní plocha na letišti). K měření jsou potřeba 2 antény (vysílač, přijímač) a PC pro zpracování dat.

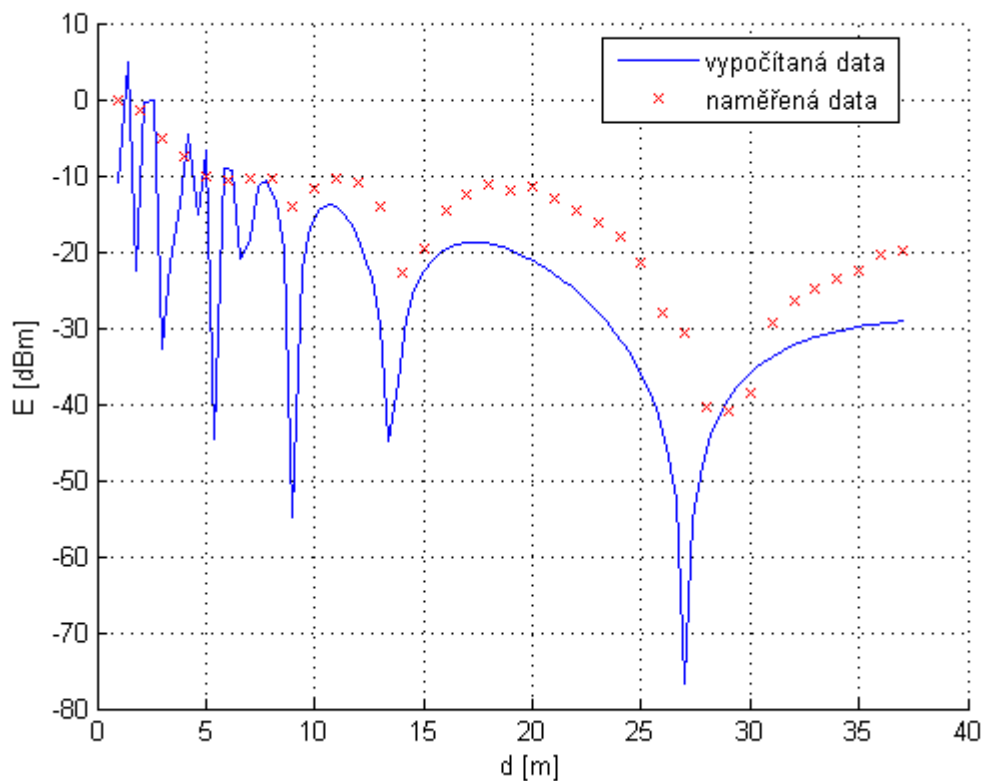


Obr. 29 Ukázka měření [26]

Měření je provedeno do vzdálenosti 37 m s krokem 1m. Antény byly ve výšce 1,3 m. Měření bylo provedeno na nejčastěji používaných frekvencích (Wi-Fi), a to 2.4GHz a 5GHz.

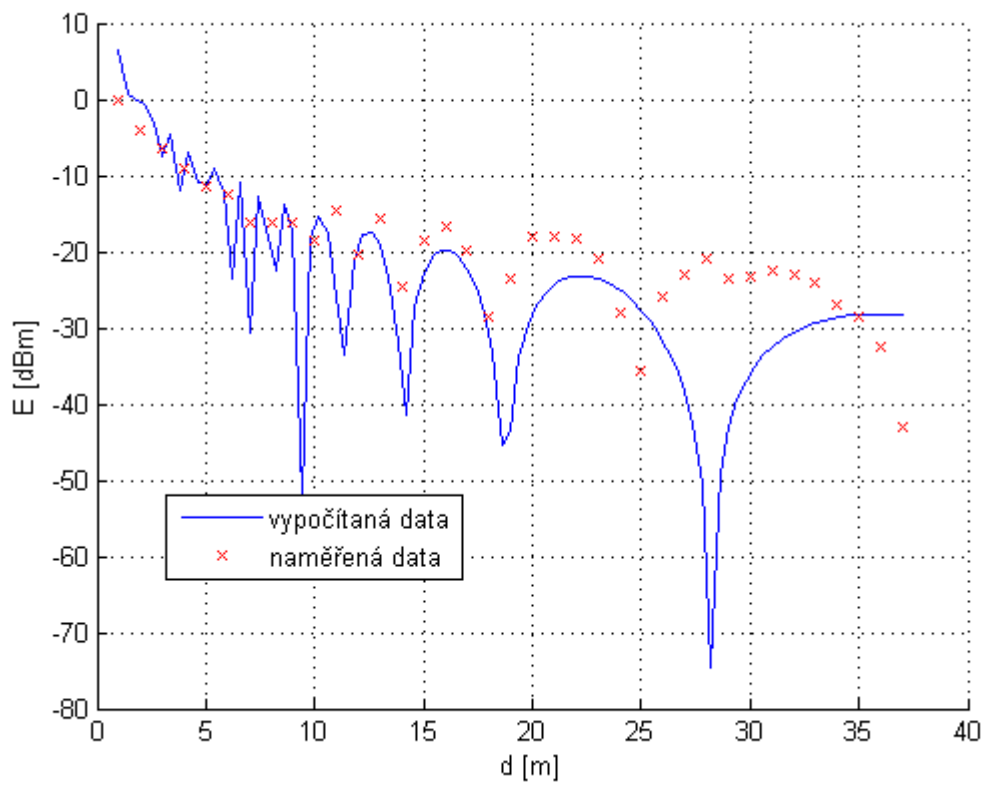
### 6.2 Grafy naměřených a vypočítaných hodnot

Naměřená data byla využita od studenta Ing. Jiřího Kočárníka [26]. Vypočítaná data jsou podle vzorce (5.2).



**Obr. 30 Porovnání dat při frekvenci 2.4 GHz**

Změřená data odpovídají teoretickým datům. Odchyłka může být způsobena nepřesností ve výkonu antény, v asfaltu, na kterém bylo provedeno měření nebo také nepřesným nasměrováním antén. Na Obr. 30 Porovnání dat při frekvenci 2.4 GHz jsou zpočátku (vypočítaných dat) vidět rychlé skoky, které jsou způsobeny větším krokem. Při zvolení menšího kroku by došlo k zašumění. Data pro 5 GHz jsou podobná, s tím rozdílem, že klesá úroveň výkonu pomaleji a naměřená data se liší o 1-2 metry (nesedí na vypočtených hodnotách).



Obr. 31 Porovnání dat při frekvenci 5 GHz

## Závěr

V bakalářské práci byly shrnuty základy teorie šíření elektromagnetických vln. Tyto teoretické znalosti umožnily vytvořit výpočtový program, který slouží ke snadnému odhadu vybraných nežádoucích vlivů.

Jednotlivé vlivy, které působí na radiový spoj, se podařilo patřičně simulovat a ověřit tak vzorce a postupy výpočtů. U některých vlivů jsou v simulačním programu nutná omezení pro výpočet. Například u ohybu na ostré překážce je výpočet časově náročný. U radiokomunikační rovnice byl zajímavý výsledek, že při vhodném zadání parametrů rovnice nefunguje. Zde jsem došel k závěru, že rovnice funguje jen pro určité frekvence a určité vzdálenosti a je tím rovnice podmíněna.

Teorie šíření vln je velmi rozšířeným odvětvím elektrotechniky, ale jednotlivé vlivy, které působí na spoj bohužel tak známé nejsou. Důvody jsou zejména obtížné empirické určení jednotlivých vlivů či jejich složité či téměř nemožné změření.

Práce s ITU-R byla také obtížná, na jejich stránkách mají uvedenu většinu obtížných výpočtů, ale ty jednodušší zde vůbec nejsou uvedeny nebo naopak, jednoduché vzorce zde uvedeny jsou, ale vzorce potřebné pro simulaci zde chybí.

Teoretické výpočty v porovnání s praktickým měřením vycházely velmi podobně. Pro potřebu přesného měření by měření měla být v bezodrazové komoře, kde nepůsobí další možné vlivy. Měření bylo provedeno na nepoužívaném letišti v Chrudimi, kde se na asfaltu nacházejí trhliny a nerovnosti, které mohou způsobovat patřičné odchylky v měření oproti teoretické hodnotě.

Program je modulární, a proto lze dále rozvíjet a obohatit o další vlivy. Případně by se dal přidat i výpočet pro konkrétní mapový podklad.

## Literatura

- [1] MAZÁNEK, Miloš, Pavel PECHAČ a Jan VRBA. *Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008, 103 s. ISBN 978-80-01-03997-7.
- [2] COLE David. *Terrestrial land mobile radiowave propagation in the VHF/UHF bands*. Vyd. 1. Geneva, Switzerland: Radiocommunication Bureau, 2002, 103 s. ISBN 92-610-9971-8.
- [3] PECHAČ, Pavel. *Šíření vln v zástavbě*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 108 s. ISBN 80-730-0186-1.
- [4] VOKURKA, Jaroslav. *Teorie elektromagnetického pole: určeno pro stud. fak. elektrotechn.* 1. vyd. Praha: ČVUT, 1991, 195 s. ISBN 80-010-0516-X.
- [5] A.RICHARDS, A.John. *Radio wave propagation: an introduction for the non-specialist*. 1st ed. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-354-0771-241.
- [6] HASLETT, Christopher. *Essentials of radio wave propagation*. New York: Cambridge University Press, 2008, xi, 201 p. ISBN 05-218-7565-X.
- [7] SIZUN, Hervé. *Radio wave propagation for telecommunication applications*. Berlin: springer, 2005, xxi, 414 s. ISBN 35-404-0758-8.
- [8] COLLIN, Robert E. *Antennas and radiowave propagation*. New York: McGraw-Hill, c1985, xii, 508 p. ISBN 00-701-1808-6.
- [9] PAVLOVIČ, Dušan. *Analýza vlivu vegetace na útlum šířícího se signálu*. 2009, Pardubice. Dostupné z: [https://dspace.upce.cz/bitstream/10195/34744/1/PavlovicD\\_Analyza%20vlivu\\_OF\\_2009.pdf](https://dspace.upce.cz/bitstream/10195/34744/1/PavlovicD_Analyza%20vlivu_OF_2009.pdf). Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Fišer CSc.
- [10] Šíření elektromagnetických vln. [online]. [cit. 2013-02-21]. Dostupné z: <http://www.sev.wz.cz/>
- [11] Effective radiated power. RAAB, Frederick. [online]. [cit. 2013-02-21]. Dostupné z: <http://www.500kc.com/downloads/RN06-32.pdf>
- [12] RAJDA, Zbyněk. Počítačové řešení komunikačních systémů. [online]. [cit. 2013-02-21]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=22078](http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=22078)
- [13] ITU-R recommendation, [www.itu.int](http://www.itu.int)
- [14] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 199 s. ISBN 978-80-7300-223-7.

- [15] MILOŠ MAZÁNEK, Pavel Pechač. *Antény a šíření vln*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1998. ISBN 80-010-1855-5.
- [16] *Rec. ITU-R P.341: The concept of transmission loss for radio links*. Geneva, 1999. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.341-5-199910-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.341-5-199910-I!!PDF-E.pdf)
- [17] *Rec. ITU-R P.1407: Multipath propagation and parameterization of its characteristics*. Geneva, 2009. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1407-4-200910-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1407-4-200910-I!!PDF-E.pdf)
- [18] *Rec. ITU-R P.530: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. Geneva, 2012. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-14-201202-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-14-201202-I!!PDF-E.pdf)
- [19] *Rec. ITU-R P.526: Propagation by diffraction*. Geneva, 2012. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-12-201202-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-12-201202-I!!PDF-E.pdf)
- [20] *Rec. ITU-R P.434: ITU-R Reference ionospheric characteristics and methods of basic MUF, operational MUF and Ray-path prediction*. Geneva, 1995. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.434-6-199510-W!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.434-6-199510-W!!PDF-E.pdf)
- [21] *Rec. ITU-R P.676: Attenuation by atmospheric gases*. Geneva, 2012. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-9-201202-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-9-201202-I!!PDF-E.pdf)
- [22] *Rec. ITU-R P.833: Attenuation in vegetation*. Geneva, 2012. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-7-201202-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-7-201202-I!!PDF-E.pdf)
- [23] *Rec. ITU-R P.368: Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz*. 9. vyd. Geneva, 2010. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.368-9-200702-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.368-9-200702-I!!PDF-E.pdf)
- [24] *Rec. ITU-R P.1410: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 to 60 GHz*. 5. vyd. Geneva, 2012. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1410-5-201202-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1410-5-201202-I!!PDF-E.pdf)
- [25] Výpočet horizontu. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://prvopodstata.blog.cz/1102/horizont>
- [26] KOČÁRNÍK, BC., Jiří. *Měření a analýza přenosových charakteristik bezdrátových spojů v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz*. Pardubice, 2011. Diplomová. Univerzita Pardubice.



## Příloha A – Překlad všech použitých anglických výrazů

Tabulka 3 Tabulka překladů použitých anglických výrazů

Výraz v anglickém jazyce	Výraz v českém jazyce
Fade Margin	Rezerva na únik
Lowest usable frequency	Nejnižší použitelná frekvence
Maximum usable frequency	Nejvyšší použitelná frekvence
Effective isotropic radiated power	Efektivní izotropický vyzářený výkon
Attenuation in Radio Link	Útlum v radiovém spoji
Wireless Fidelity	Bezdrátová věrnost
Graphical user interface development environment	Grafické uživatelské rozhraní vývojového prostředí
Free-space loss	Útlum volným prostorem
Multipath propagation	Vícecestné šíření
Atmospheric refraction	Atmosférická refrakce
Ionospheric refraction	Ionosférická refrakce
Attenuation to field	Útlum do terénu
Diffraction loss (on knife edge)	Útlum difrakcí (na ostré překážce)
Scattering on field	Rozptyl
Losses by atmospheric gases	Útlum atmosférickými plyny
International telecommunication union-radiowave	Mezinárodní telekomunikační úřad – radiové vlny
Solar irradiation	Solární radiace
Photochemical dissociation reaction	Fotochemická disociační reakce
Recombination dominates in dense lower atmosphere	Rekombinace dominuje v nižší vrstvě atmosféry
Attenuation	Útlum
Daytime ionosphere	Denní ionosféra
Electron density	Elektronová hustota

Layer	Vrstva
Specific attenuation due to woodland	Specifický útlum skrz les
Ground wave	Pozemní vlna
Field strength	Intenzita pole
Ground wave propagation curves	Křivky pro šíření pozemní vlnou

## **Příloha B – Zdrojové kódy programu AiRL**

**CD**

## **Příloha C – Uživatelský manuál**

**CD**