

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh metodiky s nástrojů pro realizaci spolehlivých  
bezdrátových spojů**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Barbora CHMELÍKOVÁ**  
Osobní číslo: **E13N0116P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**  
Název tématu: **Návrh metodiky a nástrojů pro realizaci spolehlivých bezdrátových spojů**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Zpracujte a navrhnete efektivní postup pro realizaci bezdrátových spojů včetně příslušných nástrojů.

1. Zopakujte a rozšiřte své znalosti v oboru šíření elektromagnetických vln, identifikujte relevantní poznatky.
2. Seznamte se s doporučeními ITU-R podstatnými z hlediska návrhu bezdrátových spojů, identifikujte podstatné.
3. Navrhnete metodiku, která umožní časově a z praktického hlediska efektivní návrh spolehlivých bezdrátových datových spojů. Zahrňte případně do návrhu vlastní softwarové nástroje.
4. Ověřte uplatnitelnost výstupů návrhu měření na konkrétní realizaci.

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


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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Mráz, Ph.D.**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

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

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



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **ANOTACE**

Tato práce se zabývá návrhem pozemního rádiového spoje s přímou viditelností v pásmu mikrovln. Cílem této práce je identifikovat významné problematiky v rámci šíření elektromagnetických vln, které způsobují rozptyl, ohyb či difrakci těchto vln. Dále je třeba sjednotit podstatné vztahy užitečné pro výpočet výkonové bilance spoje a také pro návrh bezdrátových spojů. Tyto poznatky jsou implementovány do softwarového nástroje, který je poté použit při návrhu bezdrátového spoje. Důvodem k vytvoření této práce bylo zjistit, zda existující nastavení určitých spojů je vyhovující z hlediska kvality spojení, popřípadě sestavit datový spoj. Postupy návrhu spoje a výpočty, jež jsou aplikovány do softwarového nástroje, jsou čerpány převážně z doporučení ITU. Použité PtP spoje pracují v pásmech 5, 10 a 17 GHz a pro zjištění potřebných hodnot je použit software dodávaný výrobcem spojů. Tato práce slouží jako souhrn potřebných znalostí při plánování bezdrátového spoje, ve které jsou probrány převážně mechanismy šíření elektromagnetických vln a jejich ztráty vlivem šíření daným prostředím až po kvalitativní a spolehlivostní kritéria výsledného spoje. Softwarový nástroj lze uplatnit při návrhu bezdrátového spoje případně jako pomůcku při výuce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Výkonová bilance spoje, difrakce, vícecestné šíření, mechanismy šíření vln v troposféře, LOS, PtP.

## **ANNOTATION**

This thesis describes the design of terrestrial wireless data links on the line of sight in a microwave band. The aim of this research is to identify the significant issues in the context of propagation of electromagnetic waves, which cause scattering, refraction and diffraction of waves. Furthermore, one has to integrate the important relations useful to calculate the link budget analysis and to design wireless links. These insights are implemented in a software tool, which is then applied in designing a wireless link. The main reason for drawing up this thesis was to determine whether the certain setting of existing wireless links is acceptable in terms of connection quality, or to build a new data link connection. The process design and calculations applied in the software tool are taken mainly from the ITU recommendations. The PtP links used in this thesis operate at frequencies 5, 10 and 17 GHz. A software supplied by the wireless link manufacturer is used to determine the required values. This research serves as an overview of the knowledge necessary for wireless link design. The research mainly explains the electromagnetic waves propagation mechanisms and their losses due to propagation through the given medium, up to the quality and reliability criteria of the resulting wireless link. The software tool can be used for designing the wireless link or for teaching purposes.

## **KEYWORDS**

Link budget analysis, diffraction, multipath propagation, mechanisms of wave propagation in the troposphere, LOS, PtP.

## PROHLÁŠENÍ

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 9.5.2015

Barbora Chmelíková

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Mrázovi Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych ráda poděkovala své rodině, která mě vždy podporovala.

## OBSAH

Úvod.....	7
1    Základy šíření vln .....	8
1.1    Frekvenční spektrum.....	8
1.2    Způsoby šíření vln pro pozemní rádiové spoje .....	8
1.3    Rovinná vlna .....	10
1.4    Fresnelovy zóny .....	11
1.5    Difrakce.....	12
1.6    Rozptyl .....	13
1.7    Šíření ve volném prostoru .....	13
1.8    Vícecestné šíření .....	16
2    Mechanismy šíření vln v troposféře .....	17
2.1    Úniky.....	17
2.1.1    Pomalý a rychlý únik .....	18
2.1.2    Plochý únik .....	18
2.1.3    Frekvenčně selektivní úniky .....	18
2.1.4    Hluboký únik .....	19
2.1.5    Statistické modely.....	19
2.2    Ztráty v atmosféře .....	19
2.2.1    Atmosférická absorpce .....	19
2.2.2    Útlum hydrometeory.....	21
2.2.3    Troposférická refrakce .....	23
2.2.4    Anomální refrakce .....	24
2.2.5    Scintilace.....	25
2.2.6    Ztráty vícecestným šířením.....	26
3    Šíření vln pro pozemní spoje .....	27
3.1    Spoj na přímou viditelnost .....	27
3.2    Šíření nad rovinnou zemí .....	27
3.3    Plocha odrazu .....	29
3.4    Ztráty vlivem difrakce.....	30
4    Výkonová bilance spoje.....	31
4.1    Antény.....	33
4.2    Citlivost přijímače.....	33
5    Postup návrhu mikrovlnného spoje.....	35
5.1    Volba trasy .....	35
5.2    Volba kmitočtového pásma.....	36



6	Realizace .....	38
6.1	Realizace aplikace .....	38
6.1.1	Popis programu .....	40
6.2	Realizace spoje .....	42
6.2.1	Popis 17 GHz spoje .....	42
6.2.2	Spoj 10 GHz .....	48
6.2.3	Spoj 5 GHz .....	50
7	Závěr .....	54
8	Seznam literatury .....	55
9	Seznam symbolů a zkratek .....	57
10	Seznam Obrázků .....	59
11	Seznam tabulek .....	60

## ÚVOD

Bezdrátové pozemní spoje jsou další alternativou nebo rozšířením kabelových spojů. Oproti drátovým spojům mají výhodu v jednodušší implementaci na delší vzdálenosti, avšak s tímto souvisejí také problémy a jevy, které jej naopak omezují. Rádiové milimetrové spoje dosahují vysokých přenosových kapacit díky velké šířce pásma, ale potýkají se s mnoha problémy z hlediska šíření elektromagnetické vlny. Spoje pracující v nižším pásmu centimetrových vln tyto problémy také postihují, avšak ne tak výrazně. Tato pásma nedosahují sice tak vysokých kapacit, jsou ale velmi využívána.

Přijatý výkon v rádiových systémech závisí především na šíření elektromagnetické vlny daným médiem mezi vysílačem a přijímačem. Proto velmi záleží na stavu tohoto přenosového média, kterým je v našem případě spodní vrstva troposféry. Šíření značně ovlivňují dešťové srážky, anomálie v atmosféře a podobné jevy.

Pro systémy využívající bezdrátový přenos dat je proto nutné předem začít s plánováním a vhodným výběrem správného modelu šíření signálu. Veškeré tyto modely šíření elektromagnetické vlny vycházejí z dlouhodobého experimentálního pozorování, statistických modelů a následných aproximačních vztahů. Základem při plánování rádiových spojů a vlastně i standardizací v oboru šíření rádiových vln jsou doporučení ITU. Z těchto doporučení vychází celá tato práce a většinu z těchto modelů obsahuje také vytvořený softwarový program.

# 1 ZÁKLADY ŠÍŘENÍ VLN

V této kapitole jsou shrnuty základní pojmy a poznatky z teorie šíření elektromagnetických vln. Celá tato kapitola vychází z [1] a jsou zde doplněny některé poznatky z [18].

## 1.1 FREKVENČNÍ SPEKTRUM

Přidělování frekvenčních pásem a vysílacích výkonů jednotlivým službám připadá Mezinárodní telekomunikační unii (ITU), aby se zamezilo vzájemnému rušení mezi rádiovými stanicemi. V České republice se o rozdělování frekvenčního spektra na národní úrovni stará Český telekomunikační úřad (ČTÚ). Pro správu frekvenčního spektra je nutné definovat typ služby. Může se jednat o pozemní pohyblivou službu, rozhlasovou službu point-to-area, družicové rádiové služby, nebo v našem případě o pevnou službu mezi pevně stanovenými body point-to-point, kde se budeme pohybovat na SHF frekvencích.

Tab. 1 Frekvenční pásma [4]

Mezinárodní zkratka	Frekvence	Vlnová délka	Český název
ULF	300 Hz – 3 kHz	1000 km - 100 km	Extrémně dlouhé vlny
VLF	3 kHz – 30 kHz	100 km – 10 km	Velmi dlouhé vlny
LF	30 kHz – 300 kHz	10 km – 1 km	Dlouhé vlny
MF	300 kHz – 3 MHz	1 km – 100 m	Střední vlny
HF	3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m	Krátké vlny
VHF	30 MHz – 300 MHz	10 m – 1 m	Velmi krátké vlny
UHF	300 MHz – 3 GHz	1 m – 10 cm	Ultra krátké vlny
SHF	3 GHz – 30 GHz	10 cm – 1 cm	Super krátké vlny
EHF	30 GHz – 300 GHz	1 cm – 1 mm	Extrémně krátké vlny

## 1.2 ZPŮSOBY ŠÍŘENÍ VLN PRO POZEMNÍ RÁDIOVÉ SPOJE

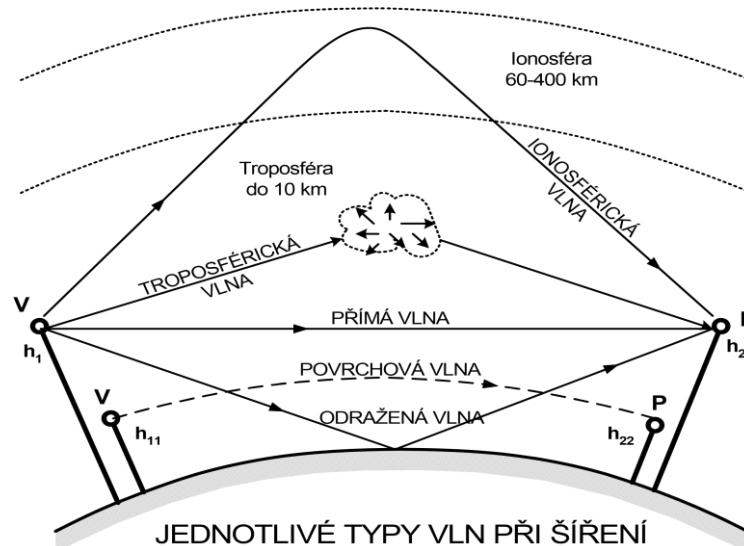
Z hlediska šíření elektromagnetických vln je možné rozdělit vlny podle mechanismu šíření nad zemským povrchem.

- přízemní povrchová vlna
- přímá vlna
- přízemní prostorová vlna

- troposférická vlna
- ionosférická vlna

Mechanismus šíření vlny na rozhraní vodivé země a nevodivého vzduchu se nazývá přízemní povrchová vlna, která se uplatní pouze do jednotek MHz, a je vhodná pro rozhlasové služby a radionavigační aplikace. Přímá vlna se šíří izotropním homogenním prostředím přímočaře, toto je však idealizace, jelikož šířením v atmosféře dochází k rozptylu, difrakci či změně polarizace. Je tedy vhodná pro spoje na krátkou vzdálenost popř. pro spoje z vyvýšených míst. Přízemní prostorová vlna se šíří jako interakce vlny přímé s vlnou odraženou. Tento mechanismus se uplatňuje pro frekvence od desítek MHz a využívá se v mnoha typech rádiových služeb a také i v našem případě. Mechanismus troposférické vlny se používá u spojů na velkou vzdálenost a uplatňuje se na frekvencích od stovek MHz do jednotek GHz. K šíření využívá rozptylu a odrazu na nehomogenitách v troposféře. Poslední ionosférická vlna se šíří pomocí odrazů od ionosféry a je vhodná pro dálkové spoje v pásmu krátkých vln.

Tato práce se zabývá pouze spojením na přímou viditelnost neboli Line-of-Sight (LOS), u kterého se využívá mechanismus šíření přízemní prostorové vlny při nezastíněné spojnici mezi přijímací a vysílací anténou. Příklad NLOS spoje nastane, pokud je spoj zastíněn překážkou.

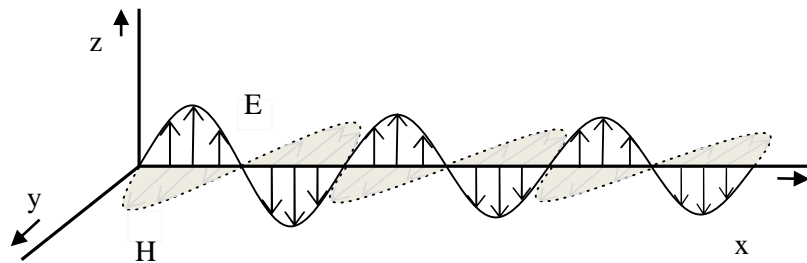


Obr. 1 Mechanismy šíření elektromagnetické vlny v atmosféře

### 1.3 ROVINNÁ VLNA

Elektromagnetická vlna šířící se z bodového zářiče má kulovou vlnoplochu, je ale možné ve velmi velké vzdálenosti od zářiče nahradit čelo vlnoplochy rovinou. Rovinná vlna je výsledkem řešení Maxwellových rovnic v kartézském systému souřadnic. Pro tuto rovinou vlnoplochu platí, že vektory  $E$  a  $H$  jsou ortogonální a kolmé ke směru šíření a nemá žádnou podélnou složku ve směru šíření. Vlnu rovinou využíváme při řešení interakce vlny s překážkami.

Pro harmonickou vlnu platí, že vektor  $E$  má pouze složku  $E_z(x)$ , která má řešení odvozené z vlnové rovnice a popisuje dvě vlny ve směru a v proti směru osy  $x$ .



Obr. 2 Rovinná harmonická vlna šířící se v obecném prostředí [4]

$$E_z(x) = C_1 e^{+jkx} + C_2 e^{-jkx} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}], \quad 1.1$$

kde  $k$  je konstanta šíření a  $C_1$  a  $C_2$  jsou komplexní konstanty. Fázor intenzity magnetického pole je dán poloměrem

$$H_y = \frac{E_z}{Z} \quad [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}], \quad 1.2$$

kde  $Z$  je vlnová impedance prostředí popsána rovnicí:

$$Z = \frac{\omega\mu}{k} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad [\Omega]. \quad 1.3$$

Konstanta šíření je dána vztahem:

$$k = \sqrt{-j\omega\mu(j\omega\varepsilon + \sigma)} = \beta - j\alpha, \quad 1.4$$

kde  $\alpha$  je měrný útlum a  $\beta$  fázová konstanta. Níže je uveden vztah pro rychlost šíření roviné vlnoplochy prostorem o dané permitivitě a permeabilitě:

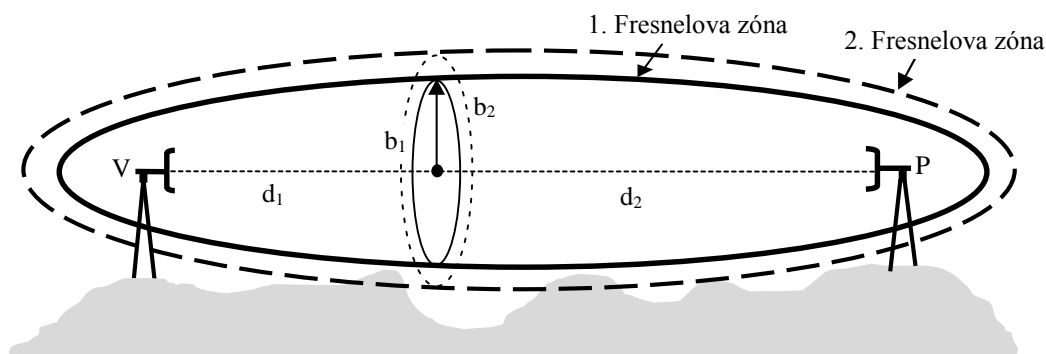
$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}], \quad 1.5$$

## 1.4 FRESNELOVY ZÓNY

Objem, ve kterém se přenáší elektromagnetická energie vlnou, má tvar elipsoidu. V rovině kolmé na směr šíření dostaneme soustředné kružnice, ve kterých se střídají místa se souhlasnou a opačnou fází neboli Fresnelovy zóny. Dvě sousední zóny jsou v opačné fázi a jejich příspěvky se odečítají. Mohou být n-tého řádu. Výsledkem vzájemného působení všech zón je rovnocenné záření, kterým je tvořeno 60 % první Fresnelovy zóny. Největší část energie prochází tedy touto zónou. Proto je vhodné i v případě přímé viditelnosti spoje brát zřetel na nezastínění spoje překážkou do 60-ti % 1. Fresnelovy zóny, v případě nedodržení by došlo ke snížení hladiny přijatého výkonu.

Poloměr n-té Fresnelovy zóny je dán vztahem

$$b_n = \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda n}{d_1 + d_2}} \quad [m] \quad 1.6$$

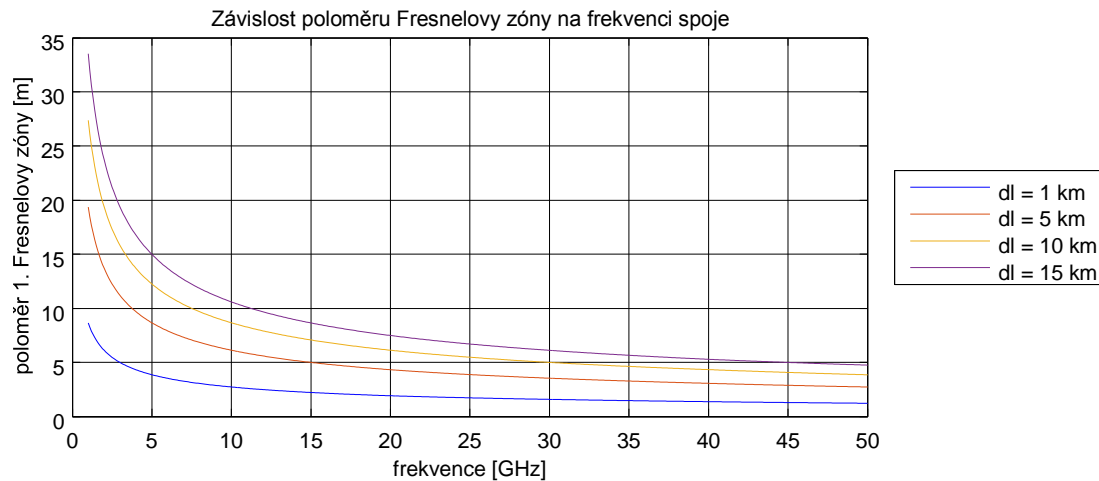


Obr. 3 Fresnelovy zóny

Z čehož vyplývá, že se snižuje poloměr s vyšší použitou frekvencí a zvětšuje se s délkou trasy. Tento vztah je dále upraven tak, že vzdálenosti jsou v jednotkách km a frekvence v řádech GHz. Vztah pro 1. Fresnelovu zónu po úpravách vypadá následovně:

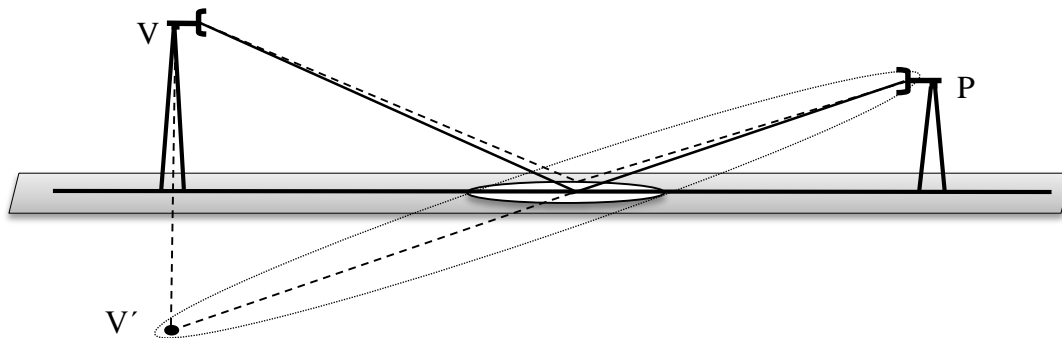
$$b_1 = 17,32 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad [m] \quad 1.7$$

Pro ukázkou je na Obr. 4 znázorněno, jak se mění poloměr 1. Fresnelovy zóny v závislosti na frekvenci a délce spoje.



Obr. 4 Poloměr první Fresnelovy zóny uprostřed spoje

V případě, že se elektromagnetická vlna odráží plošně od velké hladké plochy, řeší se tento případ přes zrcadlový odraz vysílače a přijímače.



Obr. 5 Plocha odrazu pomocí 1. Fresnelova elipsoidu

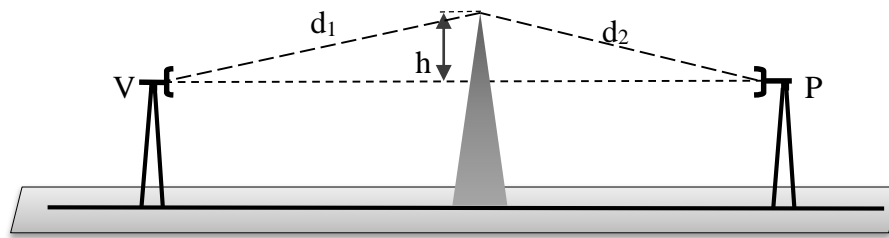
Jelikož lze tuto analýzu aplikovat jen v případě hladkého povrchu, v členitém prostředí by teoretické řešení bylo velmi složité.

## 1.5 DIFRAKCE

Při návrhu spoje by se mělo zajistit, aby překážky nezasahovaly alespoň do 60 % 1. Fresnelovy zóny. Proto je vhodné zjistit při návrhu spoje průchodnost trasy a pro každou překážku vypočítat, zda nezasahuje do této zóny, jinak dojde k útlumu signálu.

V případě vedení spoje kopcovitým terénem může dojít k ohybu na „ostré“ překážce, která je větší v porovnání s vlnovou délkou. Jedná se o elementární příklad difrakce. Díky tomuto lze přijímat signál i v optickém stínu překážky a nemusí docházet k výpadku spoje. Pomocí Huygensova principu lze vysvětlit difrakci vlny na překážce.

Míra zastínění LOS mezi přijímačem a vysílačem je definována normovaným parametrem  $v$ , který je možné vyjádřit vzhledem k 1. Fresnelově zóně:



Obr. 6 Ilustrace parametrů pro výpočet difrakce

$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} = \frac{\sqrt{2} \cdot h}{b_1} \quad 1.8$$

## 1.6 ROZPTYL

Dopadá-li elektromagnetická vlna na částici s rozměrem mnohem menším, než je vlnová délka dopadající vlny, a s jinými materiálovými parametry, než je okolní prostředí, dochází k rozptylu této vlny vlivem sekundárního záření vybuzeném v tomto tělese, například na dešťové kapce. Při difuzním odrazu dochází také k rozptylu šířené vlny. V případě rozptylu na více částicích se bere v potaz mnohonásobný rozptyl a rozptylová funkce má navíc závislost na objemové hustotě částic.

## 1.7 ŠÍŘENÍ VE VOLNÉM PROSTORU

Jako elementární příklad bude sloužit šíření kulové vlny vyzářené z bodového zdroje ve volném beztrátovém homogenním izotropním prostoru. Pokud jsou obě antény ve vzdáleném poli, tudíž od sebe vzdáleny o  $r > \frac{2d^2}{\lambda} + \lambda$ , kde  $d$  je největší příčný rozměr aktivní části antény, potom střední hodnota Poyntigova vektoru bude dána vztahem:

$$S = \frac{P_c}{4\pi r^2} = \frac{E_{ef}^2}{120\pi} [W \cdot m^{-2}], \quad 1.9$$

kde  $P_c$  je celkový vyzářený výkon a  $r$  je vzdálenost od zdroje. V případě směrové antény je vztah upraven o zisk  $G_v$  a výkon vysílače  $P_v$

$$S = \frac{P_v G_v}{4\pi r^2} [W \cdot m^{-2}]. \quad 1.10$$



Efektivní intenzita elektrického pole  $E_{ef}$  ve vzdálenosti  $r$  od zdroje klesá nepřímo úměrně se vzdáleností.

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30P_c}}{r} = \frac{\sqrt{30P_v G_v}}{r} [V \cdot m^{-1}] \quad 1.11$$

Pro amplitudu intenzity elektrického pole platí:

$$E = \sqrt{2} \cdot E_{ef} = \frac{\sqrt{60P_v G_v}}{r} [V \cdot m^{-1}] \quad 1.12$$

Součin  $P_v G_v$  je definován jako efektivní izotropický vyzářený výkon  $EIRP$ . Mějme dále přijímací anténu se ziskem  $G_p$  s efektivní plochou (aperturou)  $A_{ef}$  antény,

$$A_{ef} = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) \cdot G_p [m^2], \quad 1.13$$

Výkon  $P_p$  na vstupu přijímací antény bez okolních ztrát vyjádříme pomocí rov. 1.10 a rov. 1.13 jako:

$$P_p = S \cdot A_{ef} = \frac{P_v G_v}{4\pi r^2} \cdot \frac{G_p \lambda^2}{4\pi} = P_v G_v G_p \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 [W] \quad 1.14$$

Poměrem výkonů přijímače a vysílače je dána rovnice ideálního přenosu neboli Friisův vztah:

$$\frac{P_p}{P_v} = G_v G_p \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2. \quad 1.15$$

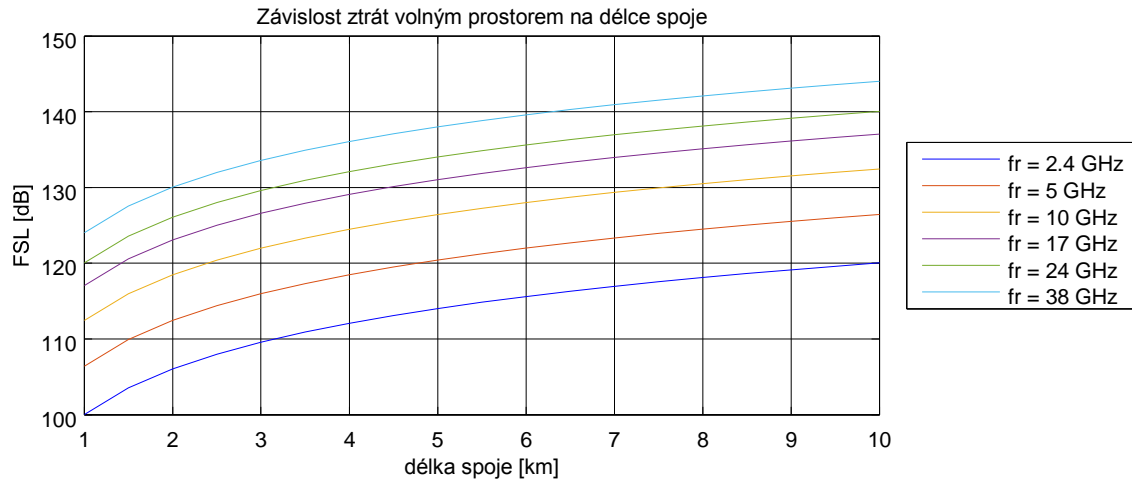
Potom ztráty volným prostorem  $L_{FSL}$  definují pouze pokles výkonu mezi dvěma idealizovanými izotropickými anténami a jsou dány vztahem:

$$L_{FSL} = 20 \cdot \log\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right) [dB] \quad 1.16$$

Jak je vidět, ztráty se zvětšují se vzdáleností a frekvencí. Tento útlum lze vyjádřit zjednodušeně pro frekvenci v GHz a vzdálenost v km rovnicí:

$$\begin{aligned} L_{FSL} &= 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi}{c_0}\right) + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(r) \\ &= 92,4 + 20 \cdot \log(f_{GHz}) + 20 \cdot \log(r_{km}) [dB] \end{aligned} \quad 1.17$$

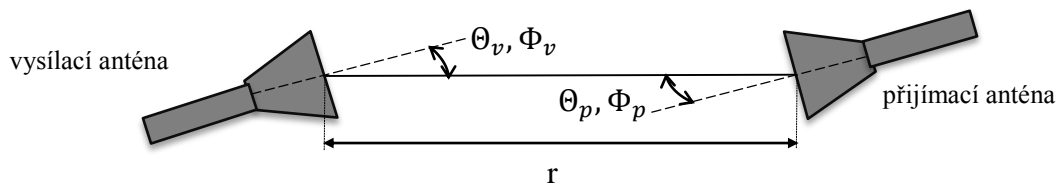
Elektromagnetická vlna však podléhá mnoha dalším ztrátám daným určitými vlastnostmi přenosového média a prostorovým uspořádáním spoje.



Obr. 7 Závislost ztrát volným prostorem na délce spoje pro různé frekvence

Dále může nastat případ, kdy nejsou obě antény vůči sobě ideálně pootočený. Zisk antény bere v úvahu účinnost a směrové vlastnosti antény, tudíž

$$G_v = \eta_v \cdot D_v(\Theta_v, \Phi_v). \quad 1.18$$



Obr. 8 Příklad, kdy nejsou antény vůči sobě přímo pootočený

Apertura přijímací antény v daném směru příjmu  $(\Theta_p, \Phi_p)$  je popsána vztahem:

$$A_{efp} = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) \cdot \eta_p \cdot D_p(\Theta_p, \Phi_p) \text{ [m}^2\text{]}. \quad 1.19$$

Potom vztah výkonové hustoty pro obecně neizotropickou anténu bude pro daný směr vysílání  $(\Theta_v, \Phi_v)$ :

$$S = \frac{P_v \cdot \eta_v \cdot D_v(\Theta_v, \Phi_v)}{4\pi r^2} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}. \quad 1.20$$

Přijímaný výkon  $P_p$  anténou přijímače v tomto přenosovém prostředí je tedy popsán následovně:

$$\begin{aligned} P_p &= S \cdot A_{efp} = \frac{P_v \cdot \eta_v \cdot D_v(\Theta_v, \Phi_v)}{4\pi r^2} \cdot \left(\frac{\lambda^2}{4\pi}\right) \cdot \eta_p \cdot D_p(\Theta_p, \Phi_p) \\ &= \eta_v \eta_p \cdot \frac{P_v \cdot D_v(\Theta_v, \Phi_v) \cdot D_p(\Theta_p, \Phi_p)}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2} |\rho_v \cdot \rho_p^*|^2 \text{ [W]}, \end{aligned} \quad 1.21$$

kde  $|\rho_V \cdot \rho_p^*|$  jsou polarizační ztráty dané vektory polarizace vysílané a přijímané vlny. Po úpravě tohoto vztahu můžeme dostat rovnici radiolokačního dosahu.

## 1.8 VÍCECESTNÉ ŠÍŘENÍ

Při vzájemné reakci elektromagnetické vlny s atmosférou nebo zemí dochází k vícecestnému šíření. K přijímací anténě se dostane jak přímá, tak i odražená druhotná vlna, která se sčítá s vlnou přímou. Tato druhotná vlna může vznikat také vlivem refrakce či rozptylu v troposféře. Při vícecestném šíření mají jednotlivé paprsky různou délku, tudíž i náhodnou fázi, amplitudu a časové zpoždění. V přijímači dochází k vektorovému sčítání intenzit pole jednotlivých odražených vln. Při rozšíření přijímaného impulzu do delšího časového úseku může dojít k mezi symbolové interferenci a degradovat tím spojení s omezením využití šířky frekvenčního pásma. Vícecestné šíření závisí také na typu prostředí, kde se mohou vyskytovat terénní překážky, na kterých může dojít k odrazu, ohybu či stínění. Důsledkem je poté únik vícecestným šířením. Útlum vícecestným šířením nastane, pokud je současně přijatá přímá vlna v protifázi s vlnou odraženou.

## 2 MECHANIZMY ŠÍŘENÍ VLN V TROPOSFÉŘE

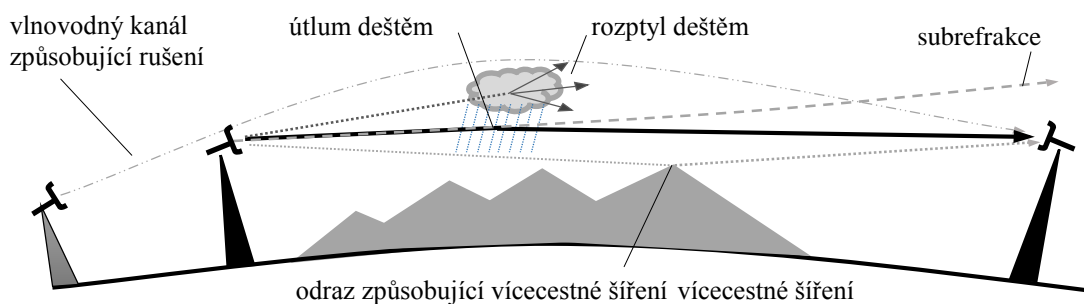
Tato kapitola se zabývá podstatnými jevy v atmosféře, které mají negativní vliv na rádiové spoje v mikrovlnném pásmu. Vychází z doporučení ITU [11], které obsahuje detailní návrh radioreléového spoje typu LOS a z knihy [1].

### 2.1 ÚNIKY

Únik je náhodné kolísání útlumu ovlivňující signál, jenž se šíří určitým přenosovým médiem, v našem případě atmosférou, která má časově proměnné parametry. Únik se může měnit s časem, geografickou polohou a rádiovou frekvencí, jedná se tedy o náhodný proces, vlivem kterého dochází ke změnám přijímaného výkonu. Únik je matematicky modelován jako časově proměnná změna amplitudy a fáze vysílaného signálu.

Ztráty vzniklé šířením vlny mezi přijímací a vysílací anténou:

- ztráty volným prostorem - stálé
- difrakční ztráty vlivem zastínění překážkou – terén, vegetace, zástavba
- útlum atmosférickými plyny
- ztráty vícecestným šířením
- ztráty rozptylem vlivem anomální refrakce
- ztráty vlivem scintilací
- ztráty vlivem změny odchodu a dopadu vlny
- útlum hydrometeory
- ztráty v ionosféře



Obr. 9 Příklad úniků během šíření elektromagnetické vlny prostředím [9]

### **2.1.1 POMALÝ A RYCHLÝ ÚNIK**

Jelikož jsou parametry přenosového prostředí časově proměnné lze rozdělit spoje na spoje s časově konstantními parametry, které se mohou případně velice pomalu měnit, a na spoje s časově proměnnými parametry, kde dochází k rychlým změnám. Pomalé úniky s periodou změny amplitudy v řádech hodin jsou vyvolány dlouhodobými změnami počasí nebo troposférickým rozptylem. Pomalé úniky jsou velmi málo frekvenčně závislé, mluvíme tedy o frekvenčně plochem úniku. Pomalý únik se vyskytuje na dlouhých trasách spojů na přímou viditelnost. Rychlý únik s periodou změn v řádech vteřin až minut je zapříčiněn převážně vícecestným šířením. Tyto úniky mají frekvenčně selektivní charakter, mluvíme tedy o selektivním úniku.

### **2.1.2 PLOCHÝ ÚNIK**

V celé šířce frekvenčního pásma kanálu jsou uvažovány konstantní parametry a šířka pásma přenášeného signálu je mnohem menší než koherentní šířka pásma kanálu, tudíž na všech frekvenčních složkách signálu dojde ke stejné velikosti úniku, mluvíme tedy o plochem úniku. Například dešťová srážka způsobí konstantní útlum na celém frekvenčním pásmu daného přenosu. Útlum deštěm je závislý na kmitočtu spoje. Další příklad plochého úniku je zastínění překážkou, tento útlum není závislý na kmitočtu spoje. Negativní dopad mají zejména na analogové spoje, kde vlivem úniku klesá jejich spolehlivost. Proto je nutné zvýšit výkon na vysílači o rezervu na únik.

### **2.1.3 FREKVENČNĚ SELEKTIVNÍ ÚNIKY**

Skládáním přímého a odraženého paprsku, ať už od země nebo v atmosféře, vznikají úniky, které jsou frekvenčně silně závislé. Označují se tedy jako úniky frekvenčně selektivní a vzhledem k proměnnému charakteru atmosféry podléhají také časovým a frekvenčním změnám. Negativní dopad mají zejména na digitální spoje, kde způsobují výpadek části frekvenčního spektra. Proto je nutné testovat spoje bitovou chybovostí (BER).

V šířce pásma kanálu se mění parametry média a koherentní šířka pásma kanálu je mnohem menší než šířka pásma přenášeného signálu, tudíž má proměnlivý útlum ve frekvenčním pásmu daného přenosu. Příkladem selektivního úniku je vícecestné šíření, kdy v případě, že vlny mají stejnou amplitudu ale opačnou fázi, tudíž se odečítají,

může dojít k hlubokému úniku. Stačí malá změna vlnové délky nebo vzdálenosti antén nebo dráhového rozdílu vln a hloubka úniku se radikálně mění.

#### **2.1.4 HLUBOKÝ ÚNIK**

Při hlubokém úniku dochází k úplné ztrátě přenášené informace a nelze ji už obnovit, dochází k destruktivní interferenci. Možným řešením jsou diverzní přijímače, použití prokladače (interleaver) a zabezpečení kódu.

#### **2.1.5 STATISTICKÉ MODELY**

Pro různé typy úniky existují teoretické nebo empirické statistické modely, například pro předpověď rychlého úniku slouží Rayleighův nebo Rice model kanálů. Rayleighův model lze použít, pokud neexistuje spojení na přímou viditelnost a spoj se nachází v hustě zastavěné oblasti. V takovémto případě se parametry signálu mění podle Rayleighova rozložení pravděpodobnosti. Pokud existuje spojení na přímou viditelnost a vysílače jsou na kopcích, lze využít Riceův model kanálu, kde poté parametry signálu odpovídají Riceovu rozdělení pravděpodobnosti. V případě pomalého úniků, tudíž v případě zastínění spoje terénní překážkou, se využívá logaritmicko-normální model kanálu.

### **2.2 ZTRÁTY V ATMOSFÉŘE**

Vlivem atmosférických plynů, troposférické refrakce a interakce vlny s hydrometeory či jinými anomáliemi, dochází k depolarizaci, difrakci a refrakci vlny, což vede ke ztrátám. Jak již bylo řečeno, tyto jevy mají negativní dopad na spolehlivost spoje.

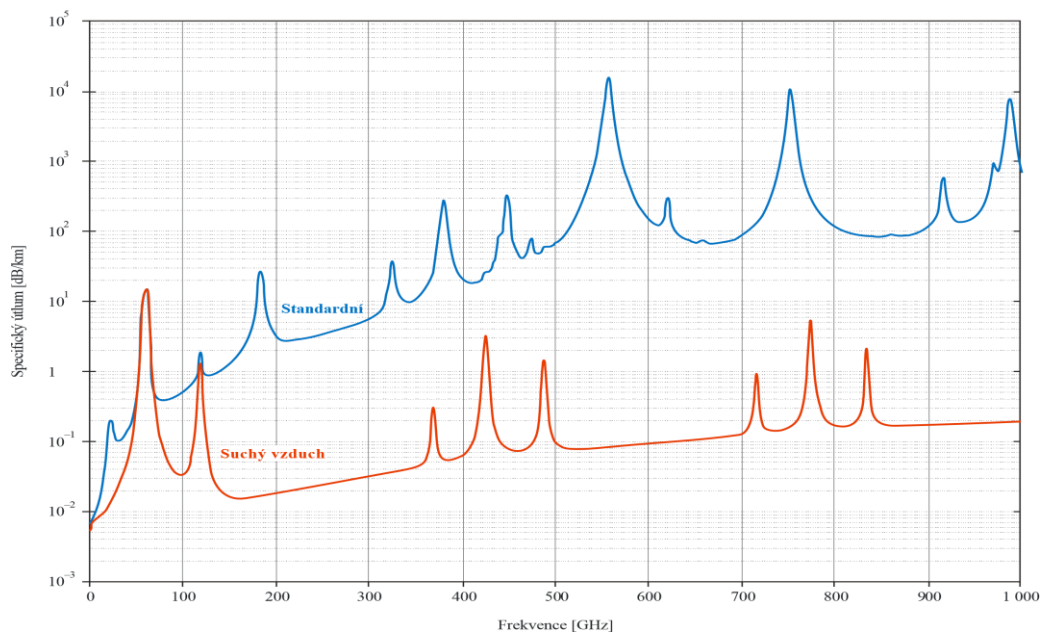
#### **2.2.1 ATMOSFÉRICKÁ ABSORPCE**

Absorpce plyny nastává na určitých frekvencích, na kterých přechází molekuly mezi stabilními energetickými stavy. Jestliže je vysílaný kmitočet v blízkosti těchto frekvencí, dochází k útlumu šířících se elektromagnetických vln. Tudíž pro telekomunikační služby se využívají tzv. rádiová okna mezi frekvencemi, na nichž dochází k vysokým ztrátám způsobeným absorpcí plyny. Další útlum elektromagnetických vln je způsoben vzájemnou kolizí molekul. Tento jev je závislý na teplotě a hustotě molekul. Absorpční spektrum je získáno ze spektrografie. Rozšíření spektrálních čar v tomto spektru je mimo jiné způsobeno Dopplerovým jevem, kdy

chaotický, teplotně závislý pohyb molekul nenulovou rychlostí vede k Dopplerovskému šíření spektrálních čar. Pro konstantní stav atmosféry (hustota, teplota, tlak) podél trasy s malým sklonem, vyjádříme měrný specifický útlum  $\gamma$  v dB/km následně,

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w \text{ [dB/km]}, \quad 2.1$$

kde  $\gamma_o$  je specifický útlum způsobený suchým vzduchem a  $\gamma_w$  je specifický útlum vodní páry. Tento výpočet specifického útlumu slouží pouze jako odhad skutečné hodnoty, jelikož se jedná pouze o zjednodušený algoritmus aproximace skutečného průběhu.

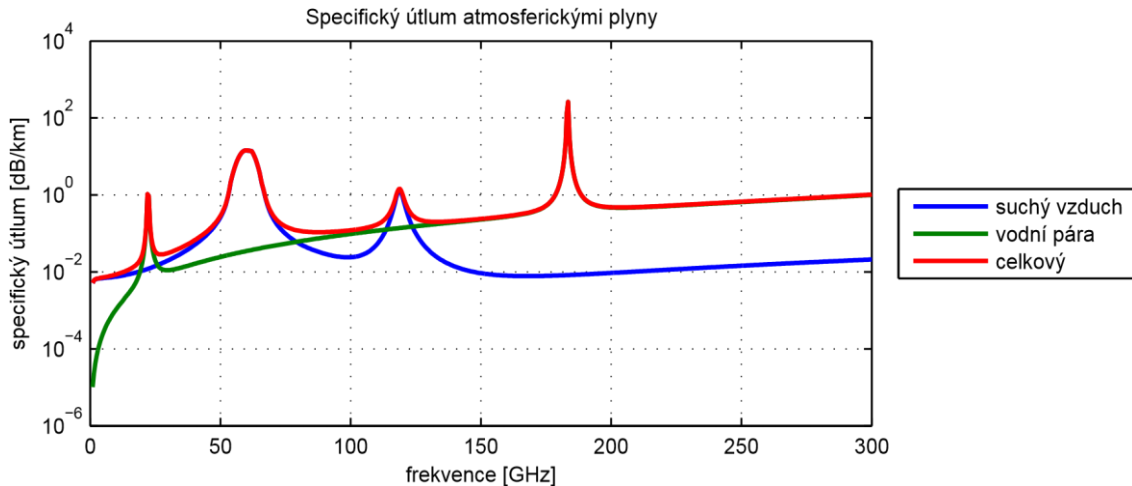


Obr. 10 Průběh specifického útlumu způsobeného absorpcí atmosférickými plyny

Pro pozemní spoje o délce trasy  $r_0$  je útlum atmosférickými plyny dán

$$L_{Gass} = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \text{ [dB]}. \quad 2.2$$

Na Obr. 11 je uveden konkrétní případ pro frekvence 1 – 300 GHz při teplotě 15°C, 50 % vlhkosti a tlaku 1013 hPa. Do cca 300 GHz se nachází pouze několik absorpčních čar.



Obr. 11 Specifické útlumy pro suchou a vlhkou atmosféru a jejich součet

Z tohoto příkladu je patrné, že pro spoje použité v této práci nepřesáhne specifický útlum hodnotu 0,01 dB/km. Pro výpočet útlumu atmosférickými plyny slouží metodika z doporučení [12] a je vhodné vzít v potaz toto doporučení při návrhu spoje s kmitočty nad 20 GHz.

### 2.2.2 ÚTLUM HYDROMETEORY

Dešťová srážka, kroupy, oblaky, sníh nebo mlha mohou pohlcovat energii elektromagnetické vlny. Vlivem těchto hydrometeorů dochází k rozptylu a depolarizaci vlny. Dešťová kapka se chová jako polovodiivé prostředí. V ní šířící se vlna naindukují posuvné proudy, ty se poté stávají zdrojem sekundárních vln, čímž dochází k rozptylu energie. Útlum šířící se vlny způsobí konečná vodivost kapek. Pro frekvence nad cca 10 GHz jsou tyto ztráty značné a omezují použitelnou vzdálenost mezi stanicemi. Jelikož se jedná o náhodné jevy, řeší se daná problematika pomocí statistiky v čase a prostoru.

Je možné danou problematiku řešit mikroskopický přístupem, kde je řešena interakce elektromagnetické vlny s dešťovou kapkou daných rozměrů a poté pro větší počet kapek rozložených dle statistiky v daném objemu. Anebo druhý postup odvozený z dlouhodobých měření závislosti intenzit srážek a odpovídajícího útlumu, kdy pomocí těchto veličin vychází empirické modely pro konkrétní destinace a pro pravděpodobnost dostupnosti spoje. Tato metoda je popsána v doporučení [11]. Útlum způsobený mlhou je pro kmitočty do 100 GHz při návrhu spoje zanedbatelný a útlum způsobený krupobitím lze zanedbat, pokud výskyt krupobití v dané oblasti je menší než 0,001 % času za rok. [11].



### STATISTICKÉ MODELY ÚTLUMU DEŠTĚM

Ztráty způsobené deštěm ovlivňují spoje už nad kmitočtem 5 GHz a s rostoucím kmitočtem spoje jsou výraznější, proto je nutné s nimi při návrhu počítat. Dle doporučení [11] lze pomocí statistických modelů intenzit deště pro danou lokalitu spoje vypočítat útlum způsobený deštěm. Postup výpočtu je převzat z [7].

Odhad útlumu způsobeného deštěm pro trasu o délce  $d$ , který je překročen v 0,01 % času, lze tedy vypočítat následovně:

$$L_{0,01} = \gamma_R \cdot d_{ef} = k \cdot R_{0,01}^\alpha \cdot d_{ef} \text{ [dB]}. \quad 2.3$$

kde  $d_{ef}$  je efektivní délka spoje,  $R_{0,01}$  [mm/h] je intenzita deště překročená v 0,01 % času v dané klimatické oblasti a  $\gamma_R$  je specifický útlum deštěm.

Efektivní délka spoje je menší než skutečná délka spoje, jelikož dešťová srážka ovlivňuje pouze část spoje a je největší v jeho středu,

$$d_{ef} = \frac{1}{0,477 \cdot d^{0,633} \cdot R_{0,01}^{0,073 \cdot \alpha} \cdot f^{0,123} - 10,579 \cdot (1 - e^{(-0,024 \cdot d)})} \text{ [km]}, \quad 2.4$$

kde  $d$  je délka spoje,  $f$  frekvence v GHz a  $\alpha$  je exponent z předchozí rovnice. Maximální doporučená velikost  $d_{ef}$  je 2,5 km.

Specifický útlum deštěm se spočte pro danou polarizaci, frekvenci, elevaci spoje  $\theta$  a intenzitu deště  $R$  následně:

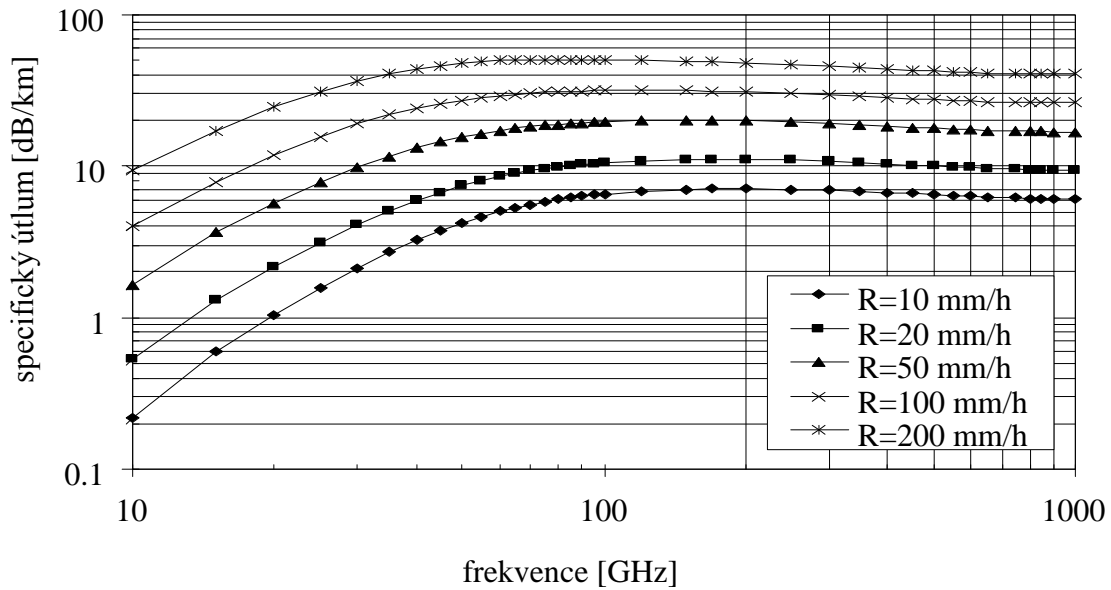
$$\gamma_R = k \cdot R^\alpha \text{ [dB/km]}. \quad 2.5$$

Koeficienty  $k$  a  $\alpha$  se spočtou následujícími vzorci,

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau]}{2}, \quad 2.6$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau]}{2k}, \quad 2.7$$

polarizační sklon  $\tau$  je pro horizontální polarizaci  $\tau = 0$  rad, pro vertikální  $\tau = \pi/2$  rad a pro kruhovou  $\tau = \pi/4$  rad. Postup výpočtu a jednotlivé hodnoty koeficientů  $k_H$ ,  $\alpha_H$ ,  $k_V$  a  $\alpha_V$ , lze náleť v doporučení [7], jež vycházejí z dlouhodobých měření a jsou závislé na použité frekvenci spoje.



Obr. 12 Frekvenční závislost specifického útlumu s různou intenzitou deště  $R$  [15]

Útlum překročený pro jiná procenta času  $p$  v rozsahu 0,001 - 1 % může být přepočítán následně a je poměrně přesný pro frekvence do 100 GHz a do vzdálenosti 60 km,

$$L_p = C_1 \cdot p^{-(C_2 + C_3 \cdot \log_{10} p)} \cdot L_{0,01} \quad [dB], \quad 2.8$$

kde koeficienty  $C$  jsou dány

$$C_0 = 0,12 + 0,4 \cdot \left[ \log_{10} \left( \frac{f}{10} \right)^{0,8} \right], \quad \text{pro } f \geq 10 \text{ GHz} \quad 2.9$$

$$C_0 = 0,12, \quad \text{pro } f < 10 \text{ GHz}$$

$$C_1 = (0,07^{C_0}) \cdot [0,12^{(1-C_0)}], \quad 2.10$$

$$C_2 = 0,855 \cdot C_0 + 0,546 \cdot (1 - C_0), \quad 2.11$$

$$C_3 = 0,139 \cdot C_0 + 0,043 \cdot (1 - C_0) \quad 2.12$$

Tato model je platný pro trasy do 60 km, a pro frekvence do 100 GHz.

### 2.2.3 TROPOSFÉRICKÁ REFRAKCE

Vlivem změny indexu lomu prostředí k indexu lomu atmosféry dochází v troposféře k útlumu, díky změně směru šíření elektromagnetické vlny. Index lomu troposféry  $n$  nabývá hodnot od 1,000325 u povrchu Země do cca 1,000110 na horní hranici troposféry a je dán následovně

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6}, \quad 2.13$$

kde  $N$  je refraktivita. Jak tedy vyplývá, je refraktivita u povrchu  $N = 325$  a na horní hranici troposféry  $N = 110$ . Lze ji odvodit z absolutní teploty  $T$  [°K], atmosférického tlaku  $p$  [hPa] a tlaku vodních par  $e$  jako

$$N = N_{dry} + N_{wet} = \frac{77,6}{T} \left( p + \frac{4810e}{T} \right). \quad 2.14$$

Jiný výpočet refraktivity  $N$ , který je dán výškou  $h$  [km] nad zemí, refraktivitou  $N_0$  v nulové výšce a  $h_0$  [km] měřítkem výšky

$$N = N_0 e^{-\frac{h}{h_0}}. \quad 2.15$$

$N_0$  a  $h_0$  jsou stanoveny pomocí statistiky pro různá podnebí a světový průměr je  $N_0 = 315$  a  $h_0 = 7,35$  km. Přesnější hodnoty lze nalézt v [8]. Pro nejnižší část troposféry, je tento vztah zjednodušen a potom tedy výškový profil refraktivity je dán gradientem  $dN/dh$ . Ten se mění v závislosti na povětrnostních podmínkách, stavu troposféry, na denní a roční době a geografické poloze.

Průběh indexu lomu s výškou není vždy lineární. Kolísání ztrát šířením způsobené těmito změnami má za následek úniky. Jak plochého, kde vlivem refrakce dojde k poklesu šířící se energie nebo selektivního vlivem mnohocestného šíření. Refraktivita klesá s výškou o  $-40$  dN/km, což vede k ohýbání vlny směrem k zemi a umožňuje vytvořit spoj až za horizont. Při  $-40$  dN/km výškového gradientu refraktivity se vlna ohýbá standardně pomalu k zemi, při nižších hodnotách se ohýbá rychleji a mluvíme tedy o superrefrakci a naopak při větším indexu se ohýbá směrem vzhůru a jedná se o subrefrakci. V těchto „nestandardních“ případech dochází k plochým únikům nebo mohou mít i za následek frekvenčně selektivní únik, jenž je způsoben mnohacestným šířením, kdy se vlna šíří po různých drahách vlivem změny výškového gradientu a lomu vlny v atmosféře

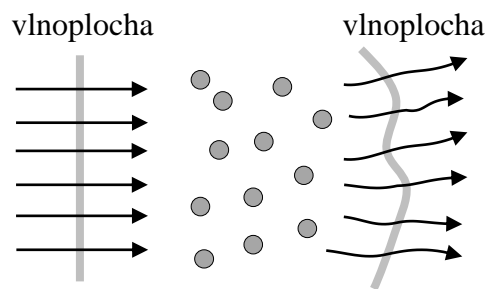
## 2.2.4 ANOMÁLNÍ REFRAKCE

K anomální refrakci dochází za speciálních podmínek, kdy vrstvy atmosféry se stejnou hustotou nejsou rovnoběžné s povrchem Země. Index refraktivity je modifikován změnami teploty, tlaku a vlhkosti. V takovýchto případech může docházet k vytvoření oblasti nad zemí s velkým záporným gradientem, vytvoří superrefraktivní vrstvu, což umožňuje šíření přízemního vlnovodného kanálu. Nebo je gradient kladný, a tak dochází k zápornému lomu vlny směrem od země a vytvoří silně

subrefraktivní vrstvu. Dále může nastat případ, kdy takováto vrstva vznikne výše nad zemí a umožní šíření vlny vyvýšeným vlnovodným kanálem.

### 2.2.5 SCINTILACE

Nerovnoměrné ohřátí země a povětrnostní děje způsobují vířivý pohyb vzduchu. Vznikající turbulence s rozdílnou rychlostí pohybu vzdušných mas způsobují vznik míst s odlišnou teplotou, tlakem a vlhkostí, tudíž i odlišným indexem lomu než je střední hodnota okolí. Vlivem turbulentního media tedy může docházet ke změnám indexu refraktivity, což má za následek rozptyl elektromagnetické vlny do všech směrů. To vede k rychlému kolísání amplitudy a fáze vlny, která prochází tímto turbulentním mediem, čemuž se říká troposférická scintilace. Dojde takto k lokálním únikům. Úroveň signálu se změní málo, tudíž tento únik nemusí způsobit výpadek. V letním období dochází častěji k scintilacím vlivem zvětšení teploty a vlhkosti vzduchu.



Obr. 13 Vznik scintilace vlivem deformace vlnoplochy troposférickým rozptylem [1]

Ve troposféře jsou tyto turbulentní oblasti časté buďto blízko zemského povrchu, významnější pro pozemní spoje, či v mracích. V případě milimetrových vln jsou scintilace závislé na indexu atmosférické refrakce podél trasy šíření signálu, na vlnové délce signálu a na délce trasy. Zvyšují se s rostoucí frekvencí a délkou trasy a klesají s klesající šířkou svazku vyzařovací charakteristiky antény. Postihuje hlavně spoje o frekvenci 10 GHz a výše dle [14].

Amplitudová scintilace je charakterizována parametrem popisujícím poměr okamžité hodnoty amplitudy signálu k střední úrovni  $\chi$  [dB] a parametrem určujícím rozptyl scintilace  $\sigma^2$  [dB<sup>2</sup>]. Největší vliv má hlavně na satelitní spoje, kde pro nízké elevace prochází signál přes více těchto turbulentních oblastí dle [14].

## 2.2.6 ZTRÁTY VÍCECESTNÝM ŠÍŘENÍM

Do výpočtu ztrát vícecestným šířením jsou zahrnuty mechanismy výše uvedené, scintilace a anomální refrakce a zároveň vedoucí k rozostření šířícího se rádiového paprsku. Metoda pro predikci ztrát vlivem vícecestného šíření je určena především pro prvotní plánování spoje a její výpočet je uveden v doporučení [11]. Je použitelná pro spoje na větší vzdálenost a to alespoň 5 km. Pro výpočet je potřebný nejprve geoklimatický faktor  $K$ , jenž je různý pro různé geografické oblasti. Použitá metoda je jen pro malá procenta času.  $K$ -faktor se spočte následovně

$$K = 10^{-4,4-0,0027 \cdot dN_1} \cdot (10 + s_a)^{-0,46}, \quad 2.16$$

kde  $dN_1$  je gradient indexu refraktivity pro spodních 65 km atmosféry, který není překročen v 1 % roku. Koeficient  $s_a$  určuje drsnost terénu pro určitou geografickou oblast. Výpočet velikosti inklinace dráhy  $\varepsilon_p$  je uveden níže

$$|\varepsilon_p| = \frac{|h_{tx} - h_{rx}|}{d} \text{ [mrad]} \quad 2.17$$

kde  $h_{TX}$  a  $h_{RX}$  jsou nadmořské výšky antén a  $d$  [km] je délka spoje. Potom lze pro plánování spoje vypočítat dostupnost spoje, resp procento času  $p$ , kdy je překročena hloubka úniku  $A$ .

$$p = K \cdot d^{3,1} \cdot (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,29} \cdot f^{0,8} \cdot 10^{-0,00089 \cdot h_L - \frac{A}{10}} \text{ [%]}. \quad 2.18$$

kde  $f$  je frekvence v GHz a  $h_L$  je nadmořská výška nejnižší antény. Odchylka této metody činní cca 5,7 dB, kdy pro přes mořské spoje je nejvyšší (cca 7,3 dB) dle [11].

Tyto rovnice jsou odvozeny z mnoha měření v různých geoklimatických oblastech a pro frekvence od 450 MHz až do 37 GHz, ale je platná i pro frekvence do 45 GHz. S rostoucí vzdáleností trasy spoje se zvětšuje i hloubka úniku a je tedy vícecestné šíření výraznější, jelikož dochází k častějšímu ohybu rádiového paprsku. Tato metoda bohužel není úplně přesná a nebere v potaz pro delší spoje měnící se gradient refraktivity a zároveň neuvažuje změny podmínek šíření v různých ročních obdobích, obojí poté vede ke změně geoklimatického faktoru.

Jelikož je možné dosáhnout i zisku při vícecestném šíření, touto metodou výpočtu nezískáme výsledný zisk. Je třeba použít jiný postup pro výpočet zisku, který lze opět nalézt v [11].

### 3 ŠÍŘENÍ VLN PRO POZEMNÍ SPOJE

Jak již bylo dříve zmíněno, elektromagnetické vlny se šíří nad zemským povrchem buďto jako přízemní povrchová, přímá, přízemní prostorová, troposférická, či ionosférická vlna. V této práci je hlavní prostorová vlna na přímou viditelnost. Tato kapitola opět vychází z [1].

#### 3.1 SPOJ NA PŘÍMOU VIDITELNOST

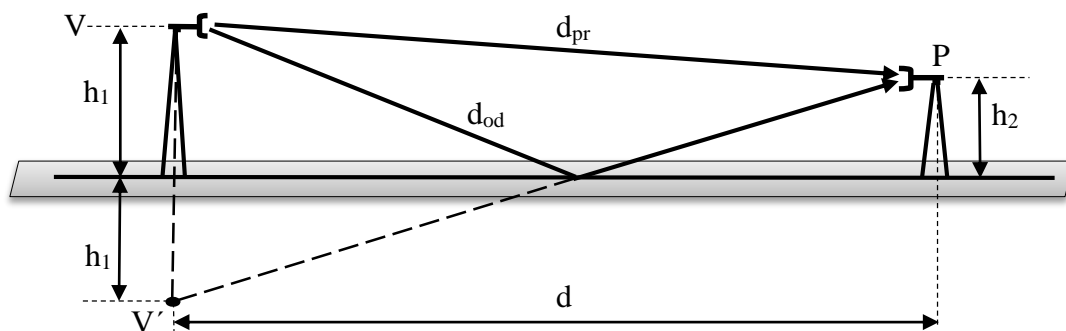
Spoj na přímou viditelnost LOS, je spoj, mezi jehož dvěma anténami se ve výšce  $h_1$  a  $h_2$  nevyskytuje žádné zastínění překážkou, tudíž existuje přímá spojnice mezi těmito dvěma body. Na tomto principu jsou založeny rádio reléové PtP spoje. Nahlížíme-li na něj jako na spoj ve volném prostoru, platí pro něj výše uvedené vztahy rov. 1.1, rov. 1.6, rov. 1.14. Nesmí také dojít k zastínění 60 % poloměru 1. Fresnelovy zóny. Pokud ano, dojde ke snížení úrovně přijatého signálu a i k zhoršení spolehlivosti spoje.

Aby se určilo, zda se jedná o LOS spoj, zjišťuje se, zda všechny překážky vyskytující se podél spoje nezasahují příliš do 1. Fresnelovy zóny.

Pro delší spoje je ještě nutné brát v potaz troposférickou refrakci vlny a zakřivení Země.

#### 3.2 ŠÍŘENÍ NAD ROVINNOU ZEMÍ

Přízemní prostorová vlna se nešíří pouze přímou vlnou, ale i vlnou odrazenou od země. V tomto případě nejsou uvažovány terénní nerovnosti a žádné překážky. V místě přijímací antény dochází tedy ke sčítání přímé a odražené vlny. Vycházíme poté z geometrie a řešíme následně přes zrcadlový odraz vysílače a přijímače.



Obr. 14 Šíření přímé a odražené vlny nad rovinnou zemí [1]

Pokud je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem mnohonásobně větší než výška obou antén, lze dráhy přímé a odražené vlny vyjádřit následně:

$$d_{pr} = \sqrt{d^2 + (h_1 - h_2)^2} \approx d + \frac{(h_1 - h_2)^2}{2d} \quad [m] \quad 3.1$$

$$d_{od} = \sqrt{d^2 + (h_1 + h_2)^2} \approx d + \frac{(h_1 + h_2)^2}{2d} \quad [m] \quad 3.2$$

Rozdíl obou drah a fázový rozdíl jsou dány:

$$\Delta d = d_{od} - d_{pr} = \frac{2h_1h_2}{d} \quad [m] \quad 3.3$$

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d = \frac{4\pi h_1h_2}{\lambda d} \quad [m] \quad 3.4$$

Výsledná přijatá intenzita elektrického pole má následující tvar v případě, že délka spoje  $d \gg \Delta d$ , a tudíž  $\Delta d \rightarrow 0$ .

$$E = \frac{E_0}{d_{od}} \sqrt{1 + R^2 + 2 \cdot R \cdot \cos\left(\Psi + \frac{4\pi h_1h_2}{\lambda d}\right)} \quad [V \cdot m^{-1}] \quad 3.5$$

Definujme činitel tlumení  $F$  jako poměr přijaté intenzity  $E$  k intenzitě vypočítané pro případ šíření ve volném prostoru  $E_{ef}$  (rov. 1.11). Zjednodušený vztah činitele tlumení pro malé elevační úhly a pro dobře vodivou zem, kde činitel odrazu je roven  $R = 1$  a  $\Psi = \pi$ , je dán následovně

$$F = \frac{E}{E_{ef}} = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi h_1h_2}{\lambda d}\right) \right| \quad 3.6$$

Pokud je argument funkce sinus menší než  $20^\circ$ , lze tento vztah zjednodušit

$$F \doteq \frac{4\pi h_1h_2}{\lambda d} \quad 3.7$$

Spádová křivka má od vysílací antény přibližně stejný charakter jako při šíření ve volném prostoru až do zlomu, kdy poté klesá rychleji. Tento zlom se nazývá Fresnelův zlom a jedná se o vzdálenost  $d_0$ , při které je  $\Delta d = \lambda/2$ .

$$d_0 = \frac{4h_1h_2}{\lambda} \quad [m] \quad 3.8$$

### 3.3 PLOCHA ODRAZU

V případě radioreléového spoje, kdy se vlna nešíří pouze vlnou přímou, ale i odraženou od zemského povrchu, je vhodné znát elektrické, popř. geometrické parametry plochy, podél níž je veden spoj.

Rádiová vlna se odráží plošně. Tato plocha má přibližně tvar elipsy (Obr. 5), jejíž poloměry jsou dány následovně,

$$b = \frac{\sqrt{\lambda \cdot d}}{2} \quad [m] \quad 3.9$$

$$a \approx \frac{b \cdot d}{2 \cdot (h_1 + h_2)} \quad [m]. \quad 3.10$$

kde  $d$  je délka trasy spoje a  $h_1$  a  $h_2$  jsou výšky antén. Poloměr  $a$  je délka hlavní poloosy a je rovnoběžný s trasou spoje.

Nicméně zemský povrch není pouze hladký a nedochází tudíž pouze k odrazu danému Snellovým zákonem odrazu, ale dojde i k odrazu difuznímu, kdy se energie rozptýlí do všech směrů. Množství energie a její směr poté závisí na úhlu dopadu a na členitosti odrazné plochy. Činitel odrazu  $R$  je nutno vynásobit korekčním koeficientem  $R_d < 1$  dle [1]

$$R_d = e^{-\frac{\Delta\phi^2}{2}}. \quad 3.11$$

Pro rozhodování o hladkosti daného povrchu slouží Rayleighovo kritérium drsnosti, které porovnává maximální možnou fázovou odchylku  $\Delta\phi$  s limitní fázovou odchylkou.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin\gamma \leq \frac{\pi}{2}. \quad 3.12$$

Popřípadě je možné se setkat ještě s jiným kritériem a to  $\Delta\phi \leq \pi/2$ , pro které poté platí

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{32 \cdot \sin\gamma}, \quad 3.13$$

kde  $\gamma$  je úhel dopadu vlny dle [1].

Pro další určení odrazu elektromagnetické vlny od země, je potřeba znát její charakteristickou permitivitu a vodivost. Množství vody obsažené v daném povrchu značně ovlivňuje odraz vlny, poněvadž ovlivňuje jak vodivost povrchu, tak jeho



permitivitu. Grafy frekvenční závislosti permitivit nebo vodivostí pro různé typy zemského povrchu lze získat z ITU-R P.527.

### 3.4 ZTRÁTY VLIVEM DIFRAKCE

Ztráty vlivem difrakcí mohou být vypočítány pomocí doporučení [10]. Modely šíření vlny z tohoto doporučení jsou platné pro frekvence 1 GHz a patří sem:

- model šíření přes sférický povrch Země, neboli za horizont
- model šíření přes izolovanou ostrou překážku
- model šíření přes izolovanou kulatou překážku
- model šíření přes vícero překážek.

V této práci je použit model přes izolovanou ostrou překážku. Pro tento tvar překážky je možné použít principy již zmíněné v kapitole 1.5. Vztah pro přídavné ztráty způsobené difrakcí podle [10] je roven

$$L_d = 6,9 + 20 \cdot \log\left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1\right) \quad [dB], \quad 3.14$$

platným pouze pro  $v > -0,78$ , kde  $v$  je míra zastínění překážkou podle rov. 1.8. Praktičtější se však jeví aproximativní vztahy v závislosti na míře zastínění překážkou  $v$  podle [1].

Pro

$$v \geq 1 \quad L_d = 0 \quad [dB], \quad 3.15$$

$$0 \leq v < 1 \quad L_d = 20 \cdot \log(0,5 + 0,62v) \quad [dB], \quad 3.16$$

$$-1 \leq v < 0 \quad L_d = 20 \cdot \log(0,5 \cdot e^{0,95v}) \quad [dB], \quad 3.17$$

$$-2,4 \leq v < -1 \quad L_d = 20 \cdot \log\left(0,4 - \sqrt{0,1184 - [0,1 \cdot v + 0,38]^2}\right) \quad [dB], \quad 3.18$$

$$v < -2,4 \quad L_d = 20 \cdot \log\left(-\frac{0,225}{v}\right) \quad [dB], \quad 3.19$$

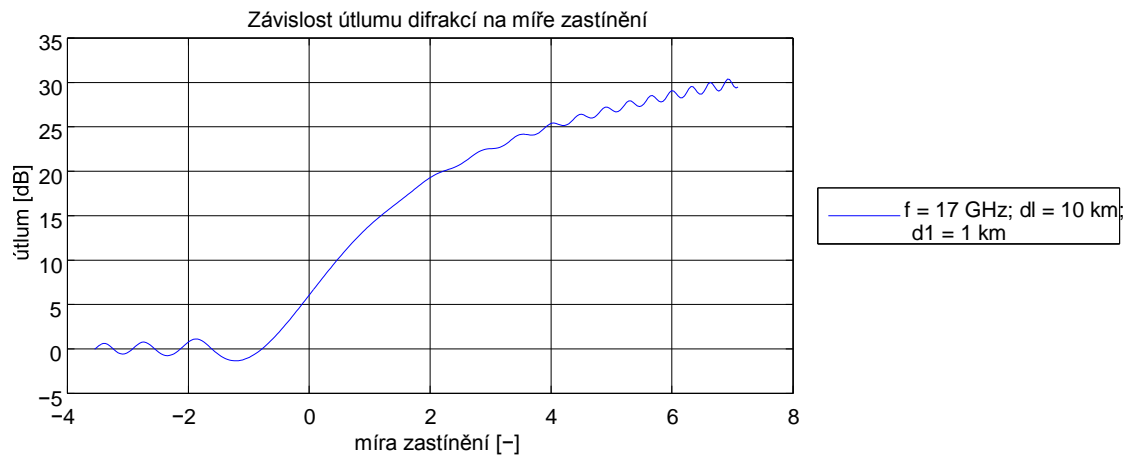
Tyto vztahy vycházejí z rovnice

$$\frac{E_d}{E_0} = F(v) = \frac{(1+j)}{2} \cdot \int_v^\infty e^{\left[\frac{-j\pi t^2}{2}\right]} dt \quad 3.20$$

kde  $E_d$  je intenzita elektrického pole vlny za překážkou a  $E_0$  je intenzita elektrického pole volného prostoru. Vztahy výše uvedené jsou tedy pouze aproximace tohoto integrálu.

Útlum difrakcí je potom dán vztahem

$$L_d = 20 \cdot \log_{10}|F(v)| \quad [dB]. \quad 3.21$$



Obr. 15 Útlum difrakcí na ostré překážce v závislosti na míře zastínění

Jak je z Obr. 15 patrné, nemusí vždy docházet ke ztrátám, při záporné míře zastínění (resp.  $v < -1,4$ ), tudíž když překážka nezasahuje do 60% 1. Fresnelovy zóny, může dojít k zesílení úrovně signálu.

## 4 VÝKONOVÁ BILANCE SPOJE

Výpočet výkonové bilance spoje spočívá v určení minimální výkonové úrovně přijímaného užitečného signálu. Při složení těchto výpočtů se vycházelo z [17] a [18].

Při zjišťování výkonové úrovně přijímaného užitečného signálu jsou zahrnuty do výpočtu veškeré ztráty a zisky, které ovlivňují vysílaný šířící se signál. Ať už se jedná o parametry, jako je zisk antén či vysílaný výkon, nebo jiné, které nelze stanovit přesně kvůli jejich charakteru, a pouze odhadujeme jejich hodnotu.

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{total} \quad [dBm] \quad 4.1$$

kde  $P_{RX}$  je výkonová úroveň přijatého signálu za zhoršených podmínek, například za deště,  $G_{TX}$  a  $G_{RX}$  jsou zisky antén na vysílací a přijímací straně,  $P_{TX}$  je úroveň vysílacího výkonu a  $L_{total}$  jsou celkové ztráty, které jsou součtem všech ztrát šířením či přídavných ztrát zařízení, například napáječe

$$L_{total} = L_{FSL} + L_{0,01} + L_{Gass} + L_d + L_{ost} \quad [dB] \quad , \quad 4.2$$

kde  $L_{FSL}$  jsou ztráty způsobené šířením vln ve volném prostoru,  $L_{0,01}$  jsou ztráty šíření vln deštěm,  $L_{Gass}$  ztráty způsobené absorpcí vln v plynech atmosféry,  $L_d$  ztráty difrakcí vlny vlivem zastínění překážkou a  $L_{ost}$  jsou ztráty zařízení. V případě oblastí, kde nedochází k častým dešťovým srážkám, je vhodné spočítat útlum způsobený vícecestným šířením adešťovými srážkami, z nich poté vybrat větší hodnotu a tu vložit do výpočtu  $L_{total}$ . Útlum dešťovou srážkou či útlum více cestným šířením je možné zahrnout pouze statisticky a jedná se pouze o odhad.

Při návrhu spoje musí být zajištěno, aby přijímaná úroveň signálu byla vyšší, než je citlivost přijímače  $P_{sen}$  při požadované chybovosti BER. Nejčastěji je použita chybovost BER  $10^{-6}$ , ale je možná i hodnota  $10^{-3}$ . Musí tedy platit

$$P_{RX} > P_{sen} \quad 4.3$$

z čehož poté vyplývá výpočet rezervy na únik  $LM$ , kdy přijatá úroveň užitečného signálu musí být vždy větší než citlivost přijímače. Z tohoto důvodu je vhodné mít v záloze určitou rezervu, aby i při nevhodných podmínkách pro šíření elektromagnetické vlny, bylo vždy možné přijatý signál odlišit od šumového pozadí. Pro minimální rezervu na únik by mělo platit

$$LM = P_{RXC} - P_{sen} \quad [dB] \quad 4.4$$

kde  $P_{RXC}$  je výkonová úroveň přijatého signálu za normálních podmínek.

$$P_{RXC} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - FSL + L_{Gass} + L_d + L_{ost} \quad [dBm] \quad 4.5$$

Při správném určení této rezervy se zvyšuje dostupnost a kvalita spoje při únikovém stavu, kdy se nejvíce v mikrovlnném kmitočtovém pásmu objeví vliv dešťové srážky. Pokud je rezerva příliš nízká mohou nastat výpadky spojení popř. přepnutí spoje na nižší modulační úroveň, tím dojde zároveň ke snížení datové propustnosti spoje. Na druhou stranu se při zvolení vysoké hodnoty zvyšují zbytečně náklady na zařízení spoje. Zároveň musí pro rezervu spoje platit

$$LM \geq L_{0,01} \quad 4.6$$

Pokud je útlum vícecestným šířením větší než útlum deštěm, tak i rezerva na únik musí být větší než tento útlum. Některé zdroje uvádějí hodnotu  $LM$  alespoň 20 dB jako například v [18], podstatné je, aby  $LM$  byla větší než útlum deštěm či vícecestným šířením.

## 4.1 ANTÉNY

Pro bezdrátové spoje typu PtP je potřeba, aby anténa byla vysoce směrová s co možná nejvyšší účinností a s malými postranními laloky ve vyzařovacím diagramu. Dalším požadavkem u obousměrných spojů je vysoké potlačení křížové polarizace. Nejpoužívanějším typem je u mikrovlnných spojů parabolická anténa dle [17].

Hlavním parametrem antény je její zisk. Ten je definován jako poměr vstupního výkonu  $P_{ino}$  bezdrátové referenční antény ke vstupnímu výkonu  $P_{in}$  reálné hodnocené antény za podmínky shodné intenzity vyzařování v daném směru a vzdálenosti. Přibližný odhad zisku parabolické antény je dán vztahem

$$G = \frac{P_{ino}}{P_{in}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \eta \cdot S = \left(\frac{2\pi D}{\lambda}\right)^2 \cdot \eta, \quad 4.7$$

kde  $D$  je průměr parabolické antény a  $\eta$  je účinnost využití apertury. Nejčastěji je zisk antény vyjádřen jak izotropický zisk, kdy je referenční anténou izotropický zářič a poté je zisk vyjádřen v jednotkách dBi. Dále je možné vyjádření zisku vůči půlvlnnému dipólu, který je o cca 2 dB větší než zisk izotropický nebo zisk vztažený vůči elementárnímu monopólu nad vodivou zemí. Zisk udávaný v technické dokumentaci je vztažen k hlavnímu vyzařovacímu laloku.

## 4.2 CITLIVOST PŘIJÍMAČE

Jak se signál vzdaluje od vysílače, klesá jeho výkonová hustota a slabé signály proto nemusí být zpracovány, může tak dojít k výpadku spoje. Přijímač není schopen rozlišit přijímaný užitečný signál, pokud je velikost šumu přidaného přijímačem větší, než je velikost užitečného signálu. Citlivost přijímače  $P_{sen}$  udává minimální úroveň signálu, kterou je přijímač ještě schopen na svém vstupu zpracovat beze ztrát. Nižší úroveň citlivosti přijímače umožňuje lépe detekovat slabší signál a zvětšuje takto dosah spoje. Citlivost přijímače je závislá na šumu vnitřního systému a úzce souvisí s použitou modulací a chybovostí BER. Efektivnější modulační metody potřebují vyšší poměr SNR. Hodnotu citlivosti přijímače lze získat od výrobce spoje a měla by být tedy co nejnižší. Příklad citlivosti přijímače s modulací QAM a různým počtem stavů pro 17 GHz spoj MP360 od výrobce ALCOMA je uveden níže.

Tab. 2 Citlivost přijímače 17 GHz spoje ALCOMA MP360 s šířkou pásma 28 MHz [19]

Modulace QAM	Přenosová rychlost [Mbit/s]	Citlivost [dBm] pro BER $10^{-6}$
16	77	-83
32	100	-79
64	123	-76
128	158	-71
256	168	-67,3

S větším počtem stavů klesá citlivost přijímače, proto pokud je spoj veden na delší vzdálenost nebo pokud je spoj v zarušené oblasti, je vhodnější použít méně stavovou modulaci, spoj bude takto odolnější, nicméně bude k dispozici nižší přenosová rychlost. Proto je vhodné najít kompromis mezi přenosovou rychlostí a použitelnou vzdáleností. U spojů PtP se využívá převážně vícestavová QAM modulace dle [17].

## 5 POSTUP NÁVRHU MIKROVLNNÉHO SPOJE

V této kapitole je uvedeno, jak jednotlivé výše uvedené vlivy omezují návrh bezdrátového spoje a jak je možné se jim vyhnout. Tato kapitola vychází z postupů návrhů spoje uvedených v [17] a [18].

### 5.1 VOLBA TRASY

Ve většině případů je požadováno společné propojení dvou míst a podle toho také se navrhuje daný spoj. Hlavním kritériem je zajištění přímé viditelnosti antén na těchto dvou místech a následně zjištění, zda není v okolí trasy překážka, která by zasahovala do 60 % 1. Fresnelovy zóny. Může se jednat o strom, budovu, či dokonce okraj budovy, na kterém je umístěná anténa. Jakákoliv taková překážka způsobí ztráty. Nedoporučuje se také vést spoj nad hladinou jezera či jiného takto hladkého povrchu. Dochází zde k častějšímu vícecestnému šíření, které se projevuje spíše na nižších frekvencích. V případě, že se nelze vyhnout či nějakým způsobem eliminovat vliv těchto překážek, je možné toto řešit buďto další stanicí neboli retranslací, pomocí které se lze vyhnout překážce, nebo pokud je to možné a daná překážka pouze nepatrně zhoršuje úroveň přijímaného signálu, zvýší se na vysílači vysílací výkon. Dále lze tento problém řešit změnou výšky antén za pomoci stožárů. Zjistit, zda je daná trasa vhodná pro vedení spoje, je možné pomocí fyzického obhlédnutí dalekohledem či fotoaparátem a také pomocí map, či programů umožňující 3D zobrazení lokace, např. StreetView.

Maximální použitelnou vzdálenost spoje omezují ztráty ať už volným prostorem, které jsou nejvýraznější a jsou vždy přítomné, či ztráty, které nastávají pouze za zhoršených podmínek počasí. Například pro vyšší frekvence je maximální vzdálenost velmi omezená vlivem absorpcí plynů a případnými ztrátami hydrometeory. Při plánování trasy je proto vhodné předem zjistit, zda navrhovaný systém je schopen fungovat na takovou vzdálenost, tudíž zda přijímanou úroveň signálu je ještě schopen rozlišit od okolního šumu.

Příklad jak se snižuje maximální dosah spoje při vyšším počtu stavů QAM modulace, nebo tedy také při zvyšování přenosové rychlosti, je dán v tabulce. Jedná se pouze o teoretickou maximální vzdálenost, kde se při výpočtu berou v potaz jen ztráty způsobené šířením volným prostorem a rezerva na únik je použita doporučená dle [17]. Další parametry byly použity ze spoje ALCOMA MP360 pro kmitočet 17 GHz.

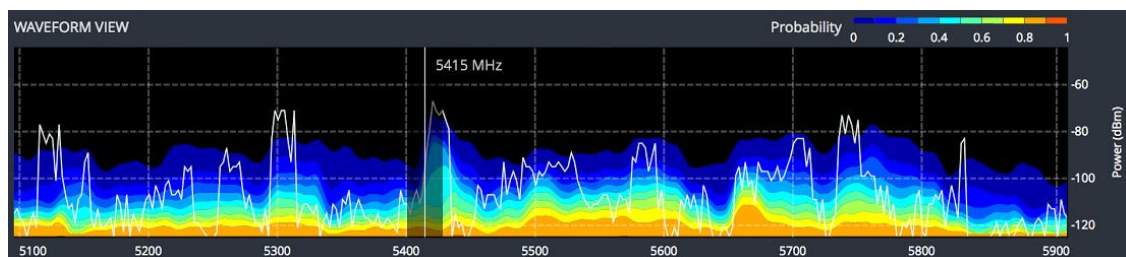
Tab. 3 Maximální vzdálenost spoje při různé citlivosti přijímače

QAM		32	64	256
P <sub>sen</sub>	[dBm]	-79	-76	-67,3
P <sub>TX</sub>	[dBm]	4	4	4
LM	[dB]	20	20	20
G <sub>TX</sub>	[dBi]	38	38	38
G <sub>RX</sub>	[dBi]	38	38	38
P <sub>RX</sub>	[dBm]	-59	-56	-47,3
L <sub>FSL</sub>	[dB]	139	136	127,3
d <sub>MAX</sub>	[km]	12,52	8,86	3,25

Jak je vidět v tabulce, při větším počtu stavů modulace se snižuje maximální dosah spoje, resp. je vyšší citlivost přijímače, a proto tedy je takto vzdálenost omezena.

## 5.2 VOLBA KMITOČTOVÉHO PÁSMO

Volba kmitočtového pásma souvisí s možnou vzdáleností a přenosovou rychlostí mikrovlnného spoje. Při volbě je nutno brát také v potaz, jaký vliv mají metrologické podmínky v daném kmitočtovém pásmu, jelikož snižují použitelnou vzdálenost spoje. Kmitočtové pásmo je ještě rozděleno na pásma „volná“ a regulovaná. Volná pásma nejsou zpoplatňována a není zde evidence spojů. Budování spojů v tomto pásmu je na základě Všeobecných oprávnění dle ČTÚ. Není zde zajištěna ochrana proti rušení od okolních spojů, proto je vhodné předem prozkoumat okolí, zda se v místě, kde má být spoj provozován, nevyskytuje jiný spoj ve stejném kmitočtovém pásmu. Pro zjištění volného kanálu lze použít buďto vestavěný spektrální analyzátor, který je v dohledovém softwarovém systému dodávaném výrobcem spoje, nebo samostatný spektrální analyzátor.



Obr. 16 Spektrum ze spektrálního analyzátoru ve webovém rozhraní od Ubiquiti Networks

V případě provozu spoje v regulovaném pásmu, je třeba nejdříve od ČTÚ zajistit povolení k provozu spoje na přiděleném kmitočtovém kanálu v dané lokalitě, poté

se hradí poplatky za využívání přiděleného kmitočtového kanálu. Výhodou je zajištěná ochrana proti rušení.

V této práci jsou použity spoje PtP využívající volná pásma a zároveň se jedná o venkovní spoje. Vnitřní spoje mají přiřazeny jiné kmitočtové rozsahy. Dále se ještě dané kmitočtové pásmo dělí do kanálů, jejichž šířky jsou navrženy tak, aby bylo pokryto celé kmitočtové spektrum. Kmitočtový kanál je určen frekvencí v jeho středu.

Tab. 4 Přehled volných kmitočtových pásem

Frekvence středu kanálu [GHz]	2,4÷2,4835	5,470÷ 5,725	10,308÷ 10,574	17,1÷17,3	24	71÷76	81÷86
-------------------------------------	------------	-----------------	-------------------	-----------	----	-------	-------

Frekvence v pásmu 2,4 a 5 GHz jsou v městských zástavbách pro spoje PtP často nepoužitelné z důvodu velkého rušení, ať už z interních WIFI zařízení, či velkého počtu venkovních AP vysílačů (PtMP) využívajících těchto kmitočtů, a proto se používají spíše mimo město. Pokud chceme budovat spoj v aglomeraci, je vhodnější použít vyšší kmitočty nebo kmitočty ze zmiňovaných regulovaných pásem.



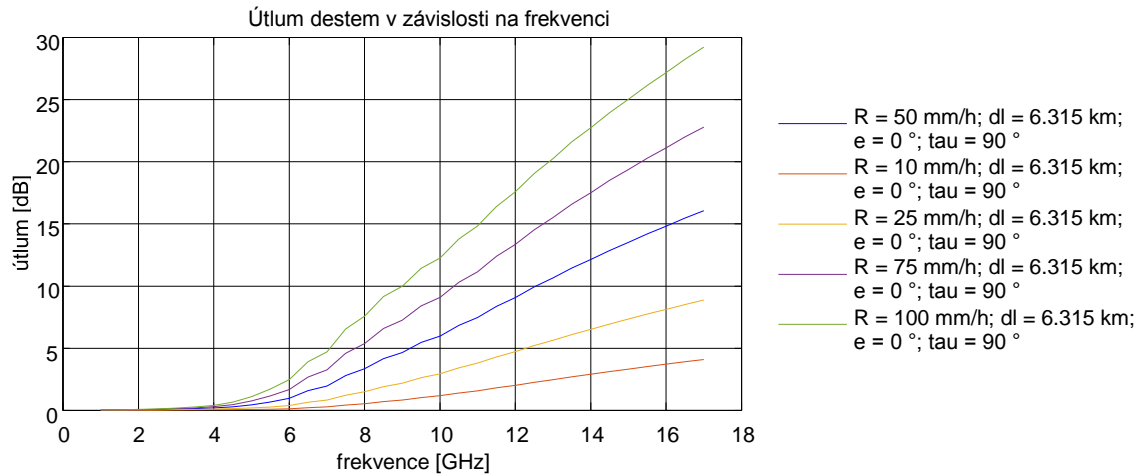
## 6 REALIZACE

V této kapitole je na základě předchozích poznatků navrhnut a popsán softwarový nástroj, který je poté použit při posuzování bezdrátových mikrovlnných spojů.

### 6.1 REALIZACE APLIKACE

Program pro výpočet výše rozebírané problematiky šíření elektromagnetických vln byl realizován v prostředí Matlab 2013a, ve kterém byly aplikovány veškeré podstatné výpočty, a zároveň pro snadnější manipulaci bylo vytvořeno uživatelské rozhraní v nadstavbě GUIDE, což je prostředí pro tvorbu a design GUI. Nicméně je možné použít jednotlivé funkce v m-files pro výpočty mimo uživatelské rozhraní, jelikož jsou napsány tak, aby je bylo možné spustit i přes příkazovou řádku v Matlabu. Jedna funkce je vždy pro výpočet a k ní náleží funkce pro grafické zobrazení závislosti daných veličin. Dále jsou pro výpočty potřebné dva soubory, jejichž data jsou získána z doporučení ITU [7] a [12]. Aplikace je zkompileovaná Matlab kompilátorem a pro její spuštění je potřebný balíček MCR. Tento program je rovnou spustitelný a běží pouze pod operačním systémem Windows. Funkce pro výpočty ztrát a Fresnelovy zóny jsou uvedeny v příloze-

Funkce Att\_Rain.m pro výpočet útlumu dešťovou srážkou byly použity vzorce z rov. 2.3 až rov. 2.7. Výstupem této funkce je útlum dešťovou srážkou rain, efektivní délka spoje def a specifický útlum YR. K tomuto výpočtu je třeba soubor dataRain.txt, který obsahuje koeficienty  $k$  a  $\alpha$  a je vyňat z [7]. V aplikaci tento výpočet může vypadat jako na Obr. 19 Popis nástrojů grafu v aplikaci, kde jsou navíc popsány nástroje programu. Výstup grafu pomocí aplikace a funkce grafRain.m je uveden na Obr. 17. K výpočtu útlumu pro jinou dostupnost spoje souží funkce Att\_RainLp.m a její výpočet vychází z rov. 2.8 až rov. 2.12.



Obr. 17 Výstup grafu z programu do vektorového formátu

Pro výpočet hloubky úniku či dostupnosti spoje pomocí funkce `FadeDepth.m` a `multipath.m` je potřeba soubor `SaTableWorld.csv` získán z [11], ve kterém je obsažen parametr  $s_a$  pro většinu geografických lokací. Tento výpočet je možné použít pouze pro vzdálenosti větší než 5 km a je uveden v rov. 2.18. Graf poté zobrazuje funkce `GrafMultipath.m`.

Výpočet útlumu absorpce atmosférickými plyny funkcí `Att_Gas.m` byl pro uživatele zjednodušen o zadávání relativní vlhkosti vzduchu namísto hustoty vodní páry, jelikož je tento parametr hůře dostupný. Pro výpočet útlumu absorpce atmosférickými plyny je potřeba k chodu soubor `waterVapour.csv`, kde je vztah teploty k saturační hustotě páry a následně je ve funkci přepočítán s použitím relativní vlhkosti vzduchu na potřebnou hodnotu hustoty vodní páry. Z toho důvodu je zadávání teploty omezeno na rozsah  $-15 \div 40$  °C. Hodnoty z tohoto souboru a výpočet pro určení relativní vlhkosti vzduchu vycházejí z [27]. Model pro rozsah frekvencí 1 – 300 GHz uvedený v rov. 2.1 a rov. 2.2 je použit pro výpočet ztrát dešťovou srážkou. Grafickou závislost zobrazuje funkce `GrafAttGass.m`, jejíž výstup je uveden na Obr. 11.

Při zadávání parametrů do funkce `DiffractionL.m` pro výpočet útlumu difrakcí se vychází z Obr. 6, kde  $h$  může být i záporné, pokud překážka nezasahuje do přímé spojnice. Pro výpočet ztrát difrakcí je použit integrál z rov. 3.20 a rov. 3.21. Graf je zobrazen pomocí funkce `GrafDiff.m`, jejíž průběh je uveden na Obr. 15.

O výpočet poloměru Fresnelovy zóny se stará funkce `fresnel_zone.m`, kde je použita rov. 1.6. Graf zobrazuje funkce `fresnel_grag.m`, který je na Obr. 4. Funkce

FZrozlozeni.m zobrazuje graficky 1. Fresnelovu zónu a zároveň určí, zda překážka zasahuje do této zóny a pokud ano, jaké je převýšení (Obr. 20).

Pro výpočet ztrát volným prostorem slouží funkce FSL.m, kde je použita rov. 1.16 a graf, který je na Obr. 7, zobrazuje funkce GrafFSL.m, Funkce FSLdelka.m je pro výpočet maximální délky spoje.

### 6.1.1 POPIS PROGRAMU

Úvodní obrazovka obsahuje výpočet výkonové bilance spoje, kde jsou předdefinovány hodnoty standardní atmosféry a zeměpisné souřadnice pro město Plzeň. Uživatel poté musí doplnit potřebné údaje. Tyto údaje se následně vyplní i v dalších položkách menu a uživatel dále nemusí znovu zadávat ty samé hodnoty.

The screenshot shows the main interface of the program. It features a 'Menu' tab on the left with options like 'Výkonová bilance spoje', 'Fresnelova zóna', 'Dešťová srážka', etc. The main area contains several input panels:

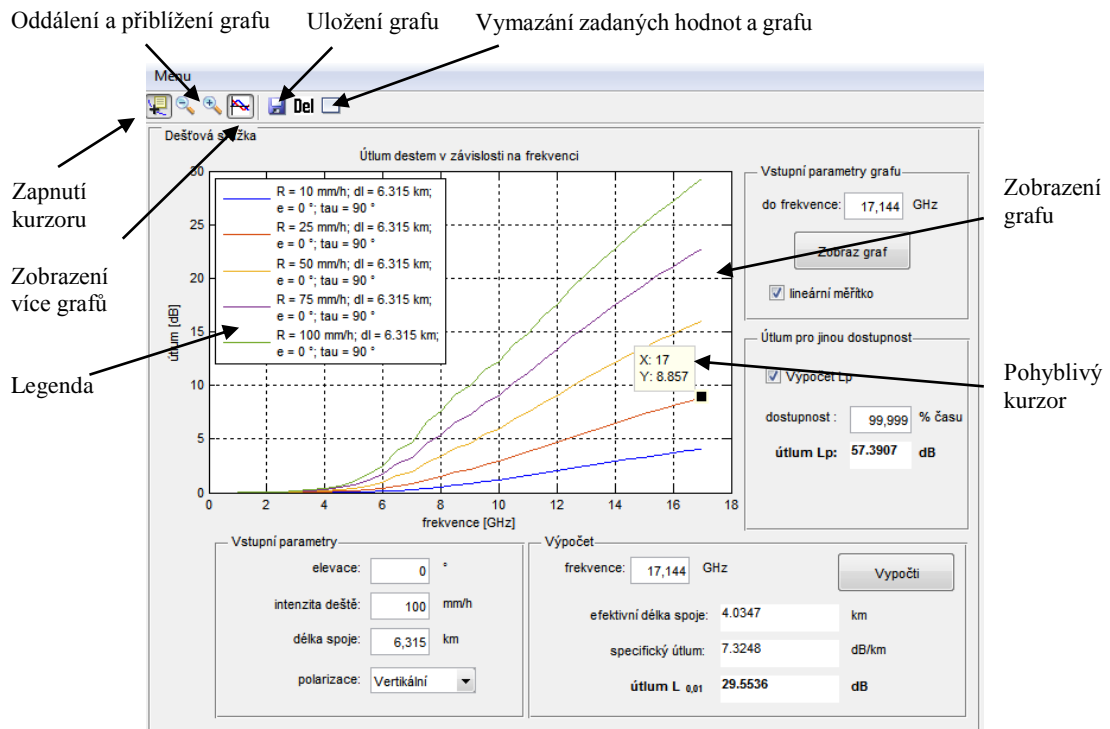
- Úroveň vysílacího výkonu Tx:** 0 dBm, **citlivost přijímače:** 0 dBm
- zisk vysílací Tx antény:** 0 dBi, **zisk přijímací Rx antény:** 0 dBi
- Útlum vlivem deště:**
  - teplota: 15 °C
  - atmosferický tlak: 1013 hPa
  - vlhkost vzduchu: 50 %
  - intenzita deště: 50 mm/h
  - elevace: 0 °
  - polarizace: Vertikální
- Ztráty v zařízení a šum:**
  - vysílače Tx: 0 dB
  - přijímače Rx: 0 dB
- Útlum překážkou:**
  - převýšení: 0 m
  - vzdálenost překážky: 0 km
- Útlum vícecestným šířením:**
  - zeměpisná šířka: 50 °
  - zeměpisná délka: 13 °
  - výška antény Tx-nm: 310 m
  - výška antény Rx-nm: 310 m
  - gradient refraktivity: -200 dN/km
- Výstupní parametry:**
  - úroveň přijatého výkonu Rx: 0 dBm
  - rezerva na únik: 0 dB
  - ztráty: 0 dB pro zadanou dostupnost spoje 99,99 %

A 'Vypočti' button is located in the bottom right of the main area.

Obr. 18 Úvodní obrazovka programu

V položkách menu se nachází výpočty Fresnelovy zóny, útlumu dešťovou srážkou, absorpcí atmosférickými plyny, difrakcí, vícecestným šířením a volným prostorem. V každé z těchto položek je možné vypočítat útlum pro určenou hodnotu nebo zobrazit grafickou závislost, jako je tomu na Obr. 19. U zobrazení závislosti v položkách Difrakce a Vícecestné šíření trvá vykreslení grafu déle než v jiných položkách, což je zapříčiněno výpočtem integrálu a v druhém případě nutností vyčtení dat z přiložených

souborů. Nápověda je zde ve formě popisku u daného parametru. U některých grafů je možné změnit logaritmické měřítko na lineární.



Obr. 19 Popis nástrojů grafu v aplikaci

Jak je vidět na Obr. 19, v horní liště programu se nacházejí nástroje pro práci s grafem jako zobrazení kurzoru pro pohyb po křivce grafu a určení přesné hodnoty, dále nástroj pro přiblížení a oddálení grafu, možnost zobrazení více křivek, uložení grafu do zvoleného typu souboru a možnost vymazání zadaných parametrů na defaultní hodnoty. Při ukládání do souboru pdf, eps a ps je problém s diakritikou u popisků os, který nelze bohužel odstranit ani pomocí změny kódování textu či změny písma, problém je v nastavení ghostscriptu, což je překladač pro PostScript jazyk, kde je špatně nastaveno kódování textu.

Viditelným problémem programu je vykreslování mezi jednotlivými položkami menu. Jelikož Matlab nemá k dispozici podobný druh menu, řešení bohužel není optimalizováno a dochází k pomalejšímu vykreslování jednotlivých oknem.

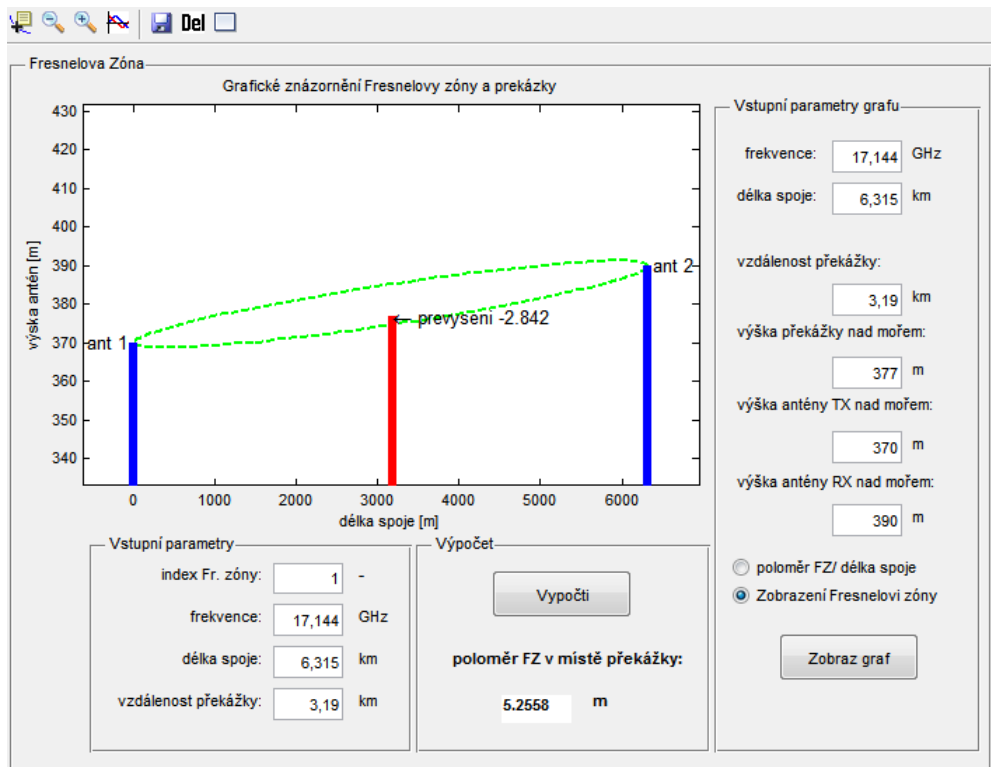
Popis jednotlivých položek a detailnější popis funkčnosti bude uveden na konkrétním příkladu v následujících kapitolách.

## 6.2 REALIZACE SPOJE

K účelům této práce byly použity tři spoje od výrobců ALCOMA a Mikrotik. Jednalo se o venkovní ODU jednotky a to modely ALCOMA MP360 pro frekvenci 17 GHz a ALCOMA MP165 pro frekvenci 10 GHz. Tato zařízení jsou vzhledem k vysoké kvalitě používána hlavně pro páteřní spoje. Spoj 5 GHz od Mikrotik najde uplatnění spíše jako klient-ap. Všechny antény byly parabolické. K zjištění přijímané úrovně signálu byl použit dohledový systém dodaný od výrobců. Pomocí tohoto softwaru se také nastavují parametry vysílače a přijímače. K přístupu do Mikrotik RouterOS bylo použito grafické rozhraní WinBox, které běží pod operačním systémem Windows. ALCOMA dodává dohledový systém zvaný ASD Client pro správu a nastavení jak lokální, tak vzdálené stanice. Vysílací i přijímací strana má stejné modely pojítek. Cílem práce je zhodnotit dosavadní řešení, uvést možná vylepšení a zdůvodnit dané nastavení parametrů.

### 6.2.1 POPIS 17 GHz SPOJE

Tento spoj je veden z Černic do Plzně na budovu, na které se nachází lokální stanice, která je 60 m vysoká. Anténa je dále umístěná na příhradovém stožáru, který je vysoký 10 m. Nadmořská výška daného subjektu při připočtení výšky budovy a stožáru činí 370 m n. m. Celková délka trasy je 6,315 km. Vzdálená stanice se nachází v Černicích, nadmořská výška objektu je 390 m n. m. Jelikož je spoj takto dlouhý, není třeba přepočítávat vzdálenost mezi dvěma anténami vzhledem k rozdílné výšce, rozdíl činí pouze desítky centimetrů. Trasa je vedena přes park a je možné, že některé stromy mohou zasahovat do 1. Fresnelovy zóny a tím tedy zeslabit signál. Na trase se dále vyskytuje dle mapy vyvýšenina vzdálená 3,2 km od vzdálené stanice, což činí výšku překážky 377 m n. m. Sice tato budova nezasahuje do přímé viditelnosti, avšak zasahuje již do 1. Fresnelovy zóny. Výpočet poloměru Fresnelovy zóny v místě překážky pomocí aplikace je zobrazen na Obr. 20. Zároveň je v grafu hodnota převýšení, která se poté zadá do výpočtu útlumu difrakcí.



Obr. 20 Výpočet 1. Fresnelovy zóny pomocí vlastní aplikace

Frekvenční pásmo 17 GHz není zatím příliš využívané, proto je zde menší pravděpodobnost rušení od okolních spojů. Dále se jedná o full duplex provoz s duální polarizací, vertikální i horizontální zároveň. V tomto spoji je nastavena automatická regulace výkonu ATPC, která v závislosti na aktuálních podmínkách upravuje vysílací výkon v určených mezích, takže zároveň může minimalizovat rušení v rádiovém spektru. Výpočty linky je nutné provést v obou směrech jak od lokální stanice do vzdálené, tak naopak. Jelikož se jedná o full duplex provoz, jsou zde nastavené různé frekvence, polarizace a vysílací výkonová úroveň. Spoj MP360 umožňuje adaptivní modulaci ACM, avšak zde je pevně nastavena 32 QAM z důvodu robustnosti spoje. Rozsah nastavení vysílacího výkonu pro danou šířku pásma a modulaci je v rozmezích 0 - 23 dB. Je možné jej nastavovat pomocí dohledového systému stejně jako většinu ostatních parametrů.

Tab. 5 Nastavení spoje MP360 17 GHz

Typ spoje	MP360	17 GHz
Modulace	32 QAM	
Přenosová rychlost	100	Mb/s
Šířka pásma	28	MHz
Délka spoje	6,315	km

Směr	Local-remote	Remote-local	jednotky
Frekvence	17,144	17,284	GHz
P <sub>TX</sub>	4	8	dBm
G <sub>TX</sub>	38	38	dBi
G <sub>RX</sub>	38	38	dBi
Psen	-79	-79	dBm

### HODNOCENÍ SPOJE

U frekvencí nad 10 GHz jsou pro spoje ztráty způsobené deštěm velmi vysoké a nelze je tedy opomenout. Proto u tohoto spoje se vypočítá, jak velký útlum nastane, pokud se elektromagnetická vlna bude šířit deštěm. Výpočet je proveden pro oba směry, jelikož se využívá pro duplexní přenos jiné polarizace, která má nemalý vliv na tyto ztráty. Pro výpočet je zadána dostupnost spoje 99,99 %. Pro nižší dostupnost bude útlum menší. Příklad zadávání parametrů do programu je uveden na Obr. 21.

Obr. 21 Výpočet útlumu dešťovou srážkou pro 0,01 % času pomocí vlastní aplikace

Obr. 22 Výpočet útlumu dešťovou srážkou pro jinou dostupnost pomocí vlastní aplikace

Ztráty způsobené vícecestným šířením jsou v tomto případě velmi malé. Program vypočítá po zadání geografických parametrů a dostupnosti spoje, útlum způsobený vícecestným šířením resp. hloubku úniku.

Vstupní parametry					
zeměpisná šířka:	<input type="text" value="50"/>	°	frekvence:	<input type="text" value="17,144"/>	GHz
zeměpisná délka:	<input type="text" value="13"/>	°	délka spoje:	<input type="text" value="6,315"/>	km
výška antény Tx-nm:	<input type="text" value="370"/>	m	gradient refraktivity:	<input type="text" value="-200"/>	dN/km
výška antény Rx-nm:	<input type="text" value="390"/>	m	dostupnost spoje:	<input type="text" value="99,99"/>	%
				<input type="button" value="Vypočti"/>	
				<b>hloubka úniku:</b>	
				<b>3.6116 dB</b>	

Obr. 23 Výpočet hloubky úniku vlivem vícecestného šíření pomocí vlastní aplikace

Ztráty způsobené absorpcí atmosférickými plyny jsou ještě na tomto kmitočtu malé. Výpočet pro směr Local - Remote je uveden níže a pro opačný směr je útlum roven 0,1272 dB. Zadány jsou defaultní standardní hodnoty atmosféry.

Vstupní parametry		Výpočet			
teplota:	<input type="text" value="15"/>	°C	frekvence:	<input type="text" value="17,144"/>	GHz
atmosferický tlak:	<input type="text" value="1013,25"/>	hPa	<input type="button" value="Vypočti"/>		
délka spoje:	<input type="text" value="6,315"/>	km	specifický útlum:	<input type="text" value="0.01272"/>	dB/km
vlhkost vzduchu:	<input type="text" value="50"/>	%	útlum:	<input type="text" value="0.080329"/>	dB

Obr. 24 Výpočet útlumu absorpcí atmosférickými plyny pomocí vlastní aplikace

Útlum difrakcí činí pouze 1,5 dB a jeho výpočet za pomocí programu je zobrazen na Obr. 25.

Vstupní parametry		Výpočet			
převýšení:	<input type="text" value="-2"/>	m	<input type="button" value="Vypočti"/>		
frekvence:	<input type="text" value="17,144"/>	GHz	míra zastínění:	<input type="text" value="-0.53817"/>	-
délka spoje:	<input type="text" value="6,315"/>	km	útlum:	<input type="text" value="1.5857"/>	dB
vzdálenost překážky:	<input type="text" value="3,2"/>	km			

Obr. 25 Výpočet útlumu způsobeného difrakcí na ostré překážce pomocí vlastní aplikace

Výpočet ztrát volným prostorem pomocí programu je zobrazen na Obr. 26, velikost těchto ztrát se liší v řádu deseti pro oba směry.

Výpočet FSL		
frekvence:	<input type="text" value="17,144"/>	GHz
délka spoje:	<input type="text" value="6,315"/>	km
<input type="button" value="Vypočti"/>		
<b>FSL : 133.1315 dB</b>		

Obr. 26 Výpočet ztrát šířením volným prostorem pomocí vlastní aplikace

Výsledné hodnoty útlumu pro oba směry jsou uvedeny v tabulce. Jak je vidět, pro horizontální polarizaci vychází útlum větší než v případě vertikální polarizace. Pro určení rezervy na únik je nutno vypočítat útlum způsobený deštěm i vícecestným šířením a poté vzít v potaz větší z hodnot. V tomto případě je výrazně vyšší útlum způsobený deštěm.



Tab. 6 Výpočet výkonové bilance spoje pro oba směry 17 GHz spoje

		Local – Remote	Remote - Local	
		Vertikální	horizontální	
Frekvence		17,144	17,284	GHz
$L_{0,01}$	$R_{0,01} = 50 \text{ mm/h}$	16,2343	19,4512	dB
$L_{\text{multi}}$	$p = 99,99 \%$	3,612	0	dB
$L_d$		1,586	1,57	dB
$L_{\text{gass}}$		0,08	0,081	dB
$L_{\text{FSL}}$		133,132	133,267	dB
$L_{\text{total}}$		151,0323	154,3692	dB
$P_{\text{TX}}$		4	8	dBm
$G_{\text{TX}}$		38	38	dB
$G_{\text{RX}}$		38	38	dB
$P_{\text{sen}}$		-79	-79	dBm
$P_{\text{RX}}$ - za zhoršených podmínek		-71,0323	-70,3692	dBm
$P_{\text{RX}}$ - za normálních podmínek		-54,798	-50,853	dBm
rezerva na únik		24,203	28,147	dB

Přijatá výkonová úroveň na vzdálené stanici za deště by tedy měla být -71 dBm, pro opačný směr -70,5 dB. Jak je z tabulky patrné, přijatá úroveň je pořád vyšší než citlivost přijímače. Doporučená rezerva na únik od výrobce spoje je 20 dB [17] a zároveň dohledový systém hlásí chybu v případě, že je rezerva nižší. U tohoto spoje rezerva vychází mnohem vyšší než doporučená. Dle těchto parametrů by bylo vhodné snížit alespoň na polovinu vysílací výkon na obou stranách, aby tato stanice případně nerušila okolní systémy.

Program dále umožňuje rovnou kompletní výpočet rezervy, úrovně přijatého výkonu a ztrát deštěm či vícecestným šířením.

Výkonová bilance spoje

Vstupní parametry

frekvence: 17,144 GHz    úroveň vysílacího výkonu Tx: 4 dBm    citlivost přijímače: -79 dBm  
 délka spoje: 6,315 km    zisk vysílací Tx antény: 38 dBi    zisk přijímací Rx antény: 38 dBi

Útlum absorpcí plynu    Útlum vlivem deště    Ztráty v zařízeních a šum

teplota: 15 °C    intenzita deště: 50 mm/h    vysíláče Tx: 0 dB  
 atmosferický tlak: 1013,25 hPa    elevace: 0 °    přijímače Rx: 0 dB  
 vlhkost vzduchu: 50 %    polarizace: Vertikální

Útlum překážkou    Útlum vícecestným šířením

převýšení: -2 m    zeměpisná šířka: 50 °    zeměpisná délka: 13 °  
 vzdálenost překážky: 3,2 km    výška antény Tx-nm: 370 m    výška antény Rx-nm: 390 m  
 gradient refraktivity: -200 dN/km

Výstupní parametry

úroveň přijatého výkonu Rx: -54.7975 dBm      
 rezerva na únik: 24.2025 dB  
 ztráty: 16.2343 dB    pro zadanou dostupnost spoje 99,99 %

Obr. 27 Výpočet výkonové bilance spoje pomocí vlastní aplikace

Pokud jsou ztráty vyšší než možná rezerva spoje, program na toto upozorní zbarvením pole s hodnotou rezervy na únik. Také je možné nastavit výpočet pro jinou dostupnost spoje, v tomto případě jsou větší nároky na rezervu spoje.

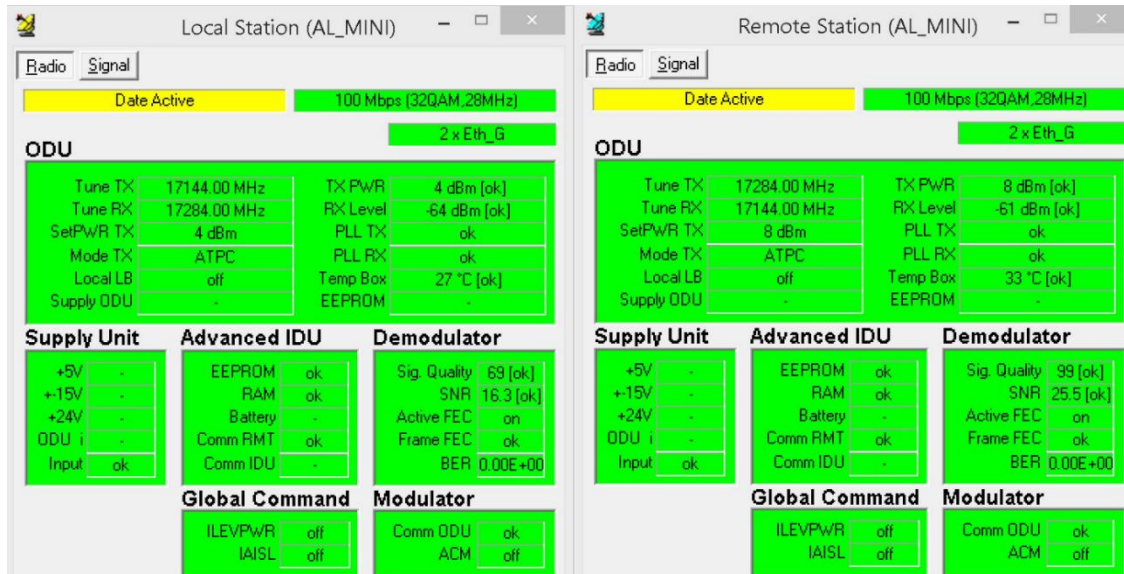
Výstupní parametry

úroveň přijatého výkonu Rx: -54.7975 dBm      
 rezerva na únik: 24.2025 dB  
 ztráty: 31.5258 dB    pro zadanou dostupnost spoje 99,999 %

Obr. 28 Varování aplikace v případě nedostatečné rezervy na únik

## NAMĚŘENÉ HODNOTY SPOJE

Jelikož se jedná o spoj od firmy ALCOMA, která dodává ke svým spojům dohledový systém, byla přijatá úroveň signálu vyčtena z tohoto programu. Ten umožňuje zároveň monitorování lokální i vzdálené stanice.



Obr. 29 Dohledový systém ASD Client 17 GHz spoje

Zaznamenané hodnoty za jeden týden, kdy nepršelo, jsou uvedeny v příloze na Obrázek 1 a Obrázek 2. Přijatá výkonová úroveň na lokální stanici se pohybuje v rozmezí  $-62 \div -65$  dB a na vzdálené od  $-61$  dB do  $-64$  dB. Přijímaná úroveň na lokální stanici je až o  $-13$  dB nižší než teoretická hodnota. Tento pokles má z poloviny na svědomí rušení. Ačkoliv na začátku bylo zmíněno, že 17 GHz pásmo není tolik využíváno, bohužel v tomto případě tomu tak není. Jak je z obrázku patrné, kvalita přijatého signálu (Sig. Quality) je zde výrazně nižší oproti opačnému směru, kde rozdíl teoretické a naměřené činí  $-6$  dB. Jelikož je přijímaná úroveň v obou případech mnohem nižší oproti teoretické, je hodnota vysílacího výkonu takto zvýšena. Další možností, proč je přijímaná úroveň takto nízká, může být chybné nasměrování antény na vedlejší lalok vyzařovací charakteristiky druhé antény [17].

## 6.2.2 SPOJ 10 GHz

Lokální stanice je opět na stejné budově v Plzni jako 17 GHz spoj a vzdálená stanice se nachází v ulici Hrádecká v Plzni. Vzdálenost činí 3,257 km a výška vzdálené stanice je 351 m n.m. Do trasy nezasahuje žádná viditelná překážka, avšak v okolí se nacházejí další panelové budovy, ty však nezasahují do 1. Fresnelovy zóny, jejíž poloměr v místě, kde se nachází střecha budovy, činí 1 m.

Spoje v pásmu 10 GHz jsou podstatně rozšířenější než spoje na vyšších kmitočtech, avšak oproti nim nejsou tolik ovlivňovány dešťovými srážkami. Výpočty linky je nutné provést v obou směrech jak od lokální stanice do vzdálené, tak naopak,

jelikož se také jedná o full duplex spoj. V tomto spoji není nastavena automatická regulace výkonu ATPC.

Tab. 7 Nastavení spoje MP165 10 GHz

Typ spoje	MP165	10 GHz
Modulace	128 QAM	
Přenosová rychlost	158	Mb/s
Šířka pásma	28	MHz
Délka spoje	3,257	Km

Směr	Local-remote	Remote-local	jednotky
Frekvence	10,378	10,546	GHz
P <sub>TX</sub>	5	6	dBm
G <sub>TX</sub>	34	34	dBi
G <sub>RX</sub>	34	34	dBi
P <sub>sen</sub>	-72	-72	dBm

### HODNOCENÍ SPOJE

Postup výpočtů je stejný jako v předchozím případě a výsledky jsou uvedené v tabulce.

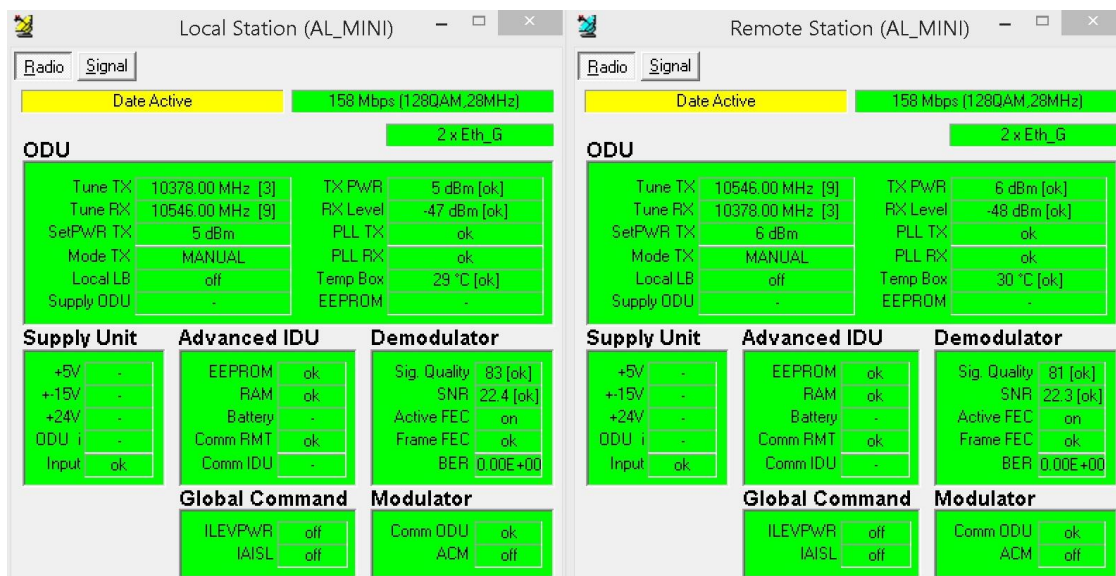
Tab. 8 Výpočet výkonové bilance spoje pro oba směry 10 GHz spoje

		Local - Remote	Remote - Local	
		vertikální	horizontální	
Frekvence		10,378	10,546	GHz
L <sub>0,01</sub>	R <sub>0,01</sub> = 50 mm/h	4,333	5,518	dB
L <sub>gass</sub>		0,023	0,023	dB
L <sub>FSL</sub>		123,020	123,160	dB
L <sub>total</sub>		127,376	128,701	dB
P <sub>TX</sub>		5	6	dBm
G <sub>TX</sub>		34	34	dBi
G <sub>RX</sub>		34	34	dBi
P <sub>sen</sub>		-72	-72	dBm
P <sub>RX</sub> - za zhoršených podmínek		-54,376	-54,701	dBm
P <sub>RX</sub> - za normálních podmínek		-50,049	-49,188	dBm
rezerva na únik		21,950	22,8116	dB

Jelikož se jedná o spoj kratší než 5 km, ztráty vícecestným šířením jsou 0, zároveň také i ztráty difrakcí, jelikož se zde nevyskytovala žádná překážka.

## NAMĚŘENÉ HODNOTY SPOJE

Tento spoj je také od firmy ALCOMA. Je zde pevně nastavena výkonová vysílací úroveň v obou směrech a také pevně nastavena přenosová rychlost. Zaznamenané hodnoty jsou na Obr. 30. V příloze jsou uvedené charakteristiky přijaté úrovně signálu na lokální a vzdálené stanici naměřené za jeden týden v období bez deště. Ty se pohybují pro lokální stanici v rozmezí  $-46 \div -49$  dB a pro vzdálenou rovněž. Získané hodnoty vycházejí podobně jako vypočítané, pohybujeme se ještě ve výrobní toleranci  $\pm 3$  dB. Rezerva na únik nevychází zbytečně velká, je lehce nad hranicí 20 dB, již doporučuje výrobce.



Obr. 30 Dohledový systém ASD Client 10 GHz spoje

## 6.2.3 SPOJ 5 GHz

Tento spoj byl vytvořen pouze za účelem ozkoušení v rámci této práce, poté byl odstraněn. Spoj byl veden z konce Červeného Hrádku na okraj Kyšic, vzdálenost činila 2 km a vedl pouze přes pole. Na trase se nevyskytovala žádná překážka. Cena tohoto spoje je výrazně nižší než v případě obou výše zmíněných. Výška antén činila 435 m n.m. a 360 m n.m.. Pro 5 GHz pásmo platí standard 802.11a, které využívá OFDM s modulacemi BPSK až 64-QAM. Přenosové rychlosti se pohybují od 6 Mb/s až do 54 Mb/s. Základní hardware spoje představuje Mikrotik RouterBoard RB435 a RB532, což je v podstatě základní deska s procesorem, pamětí a možností rozšíření přes PCI slot o WIFI kartu a připojenou anténu pomocí miniPigtailu. Toto zařízení může také fungovat jako router nebo i firewall. Podstatnou částí je zde miniPCI wifi karta. V tomto spoji je pro obě strany karta Atheros AR5413. Jedná se o half duplex spoj s jedinou

vysílací/přijímací frekvencí, a proto budeme výpočty provádět pouze pro jeden směr. Spoj má nastavenou adaptivní modulaci, mění se druh modulace nosné v čase podle aktuálního stavu kanálu. Na tomto spoji byla vyzkoušena technologie „turbo“, pracující s dvojnásobnou šířkou pásma a tudíž umožňující dvojnásobnou přenosovou rychlost. K výpočtu přidáme dále útlum způsobený miniPigtailem, který v nejhorsím případě činí 2 dB.

Tab. 9 Nastavení 5 GHz spoje

Modulace	BPSK - 64 QAM	
Přenosová rychlost	Adaptivní	Mb/s
Šířka pásma	40	MHz
Délka spoje	2	km

Frekvence	5,470	GHz
$P_{TX}$	18	dBm
$G_{TX}$	22	dBi
$G_{RX}$	22	dBi
$P_{sen}$ pro 54 Mb/s	-70	dBm
$P_{sen}$ pro 6 Mb/s	-90	dBm

Tab. 10 Výpočet výkonové bilance spoje 5 GHz

		Local – Remote	
		Horizontální	
Frekvence		5,470	GHz
$L_{0,01}$	$R_{0,01} = 50$ mm/h	0,506	dB
$L_{gass}$		0,015	dB
$L_{FSL}$		113,222	dB
$L_{ostTX}$		2	dB
$L_{ostRX}$		2	dB
$L_{total}$		117,743	dB
$P_{TX}$		18	dBm
$G_{TX}$		22	dBi
$G_{RX}$		22	dBi
$P_{sen}$ pro 54 Mb/s		-70	dBm
$P_{sen}$ pro 6 Mb/s		-90	dBm
$P_{RX}$ - za zhoršených podmínek		-55,743	dBm
$P_{RX}$ - za normálních podmínek		-55,237	dBm
rezerva na únik pro 54 Mb/s		18,763	dB
rezerva na únik pro 6 Mb/s		38,763	dB

Z výpočtů je patrné, že se zde uplatňují pouze ztráty volným prostorem. Rezerva na únik je spočítaná pro dvě krajní hodnoty, jelikož systém využívá adaptivní modulaci, kde pro různou modulaci má přijímač jinou citlivost.

#### NAMĚŘENÉ HODNOTY SPOJE

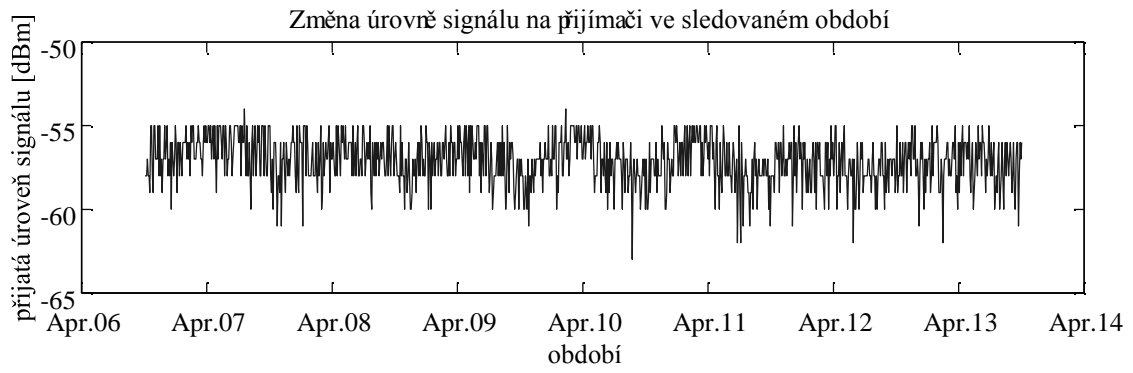
V programu Winbox, je možné jednoduše zprovoznit script, resp. příkaz, pomocí něhož lze zaznamenávat parametry spoje v libovolném časovém okamžiku. V období měření se nevyskytovaly srážky. Příkaz je uveden níže

```
interface wireless monitor 1 interval 00:00:5 file log1.txt append
```

Výstup vypadá následovně

```
# apr/ 6/2015 11:57:25 by RouterOS 6.27
# software id = 2xxx-xxxJ
#
      ;;; 4920-6100, 5400
      status: connected-to-ess
      channel: 5470/40/a-turbo
wireless-protocol: nv2
      tx-rate: 72Mbps
      rx-rate: 108Mbps
      ssid: M5_KYS
      bssid: 00:xx:xx:xx:xx:72
      radio-name: 00xxxxxxxx72
      signal-strength: -57dBm
tx-signal-strength: -58dBm
      noise-floor: -87dBm
      signal-to-noise: 30dB
      tx-ccq: 50%
      rx-ccq: 100%
authenticated-clients: 1
      current-distance: 3
      wds-link: no
      bridge: no
      routeros-version: 6.27
      last-ip: xx.xx.xx.xx
      current-tx-powers:
6Mbps:25(25/25), 9Mbps:25(25/25), 12Mbps:25(25/25),
18Mbps:25(25/25), 24Mbps:25(25/25), 36Mbps:25(25/25),
      48Mbps:25(25/25), 54Mbps:25(25/25)
      notify-external-fdb: no
```

Zde výkonová úroveň přijatého signálu odpovídá teoretické, respektive je ještě v toleranci, s menšími výkyvy jak je patrné z Obr. 31, které se i tak nedostanou ani blízko k citlivosti přijímače -70 dB.



Obr. 31 Výkonová úroveň přijímaného signálu 5 GHz spoje



## 7 ZÁVĚR

Všechny cíle práce byly splněny. Většina podstatných poznatků z oboru šíření elektromagnetické vlny v prostoru byla uvedena. Jednalo se konkrétně o způsob šíření elektromagnetické vlny a šíření ve volném prostoru, difrakci, rozptyl, Fresnelovu zónu, vícecestné šíření a ztráty způsobené těmito jevy. Převážně se jednalo o ztráty způsobené dešťovými srážkami, absorpcí atmosférickými plyny, překážkou a vícecestným šířením. Metodika návrhu a predikce ztrát spoje vychází z knih Prof. Ing. Pavla Pecháče, Ph.D a je upravena o nejnovější doporučení ITU. Protože se jedná o modely, které jsou založeny na dlouhodobých měřeních a statistiky s mnoha omezeními platnosti, jsou veškeré výpočty ztrát teoretické.

Na těchto modelech je vybudován program, jenž slouží pro návrh bezdrátového spoje. Graficky zobrazuje závislosti ztrát na délce či frekvenci spoje apod., které lze poté uložit do příslušného souboru. Především umožňuje kompletní výpočet výkonové bilance spoje. Vlastní software je naprogramován celý pomocí programu Matlab a je spustitelný pouze pod operačním systémem Windows. Program nicméně obsahuje některé nedokonalosti a chyby převážně z hlediska optimalizace. Uživatelské rozhraní programu je vytvořeno tak, aby bylo co nejvíce „user friendly“, ačkoliv Matlab v tomto ohledu není nejlepší volbou a má mnohá omezení, byl především vybrán kvůli potřebným výpočtům.

Dále je v práci popsáno jak postupovat při volbě trasy a kmitočtového pásma. Je zde uvedeno, jak jednotlivé jevy mají vliv na jejich použitelnost.

Veškeré znalosti, postup návrhu a vlastní softwarový nástroj byly poté ověřeny na konkrétních realizovaných bezdrátových spojích, konkrétně spojích v pásmu 5 GHz, 10 GHz a 17 GHz. Pro měření byly použity softwarové nástroje výrobců spojů ALCOMA a Mikrotik. Kde tedy v případě zařízení Mikrotik se jednalo o software WinBox, na který byl v rámci měření použit zautomatizovaný script pro zaznamenání parametrů spoje do textového souboru, který byl následně zpracován programem Matlab. Pro všechny tyto spoje byly vypočítány ztráty šířením a výkonová bilance, tyto hodnoty byly poté porovnány s naměřenými hodnotami. U 5 GHz a 10 GHz spoje jsou výsledky srovnatelné, problém byl u 17 GHz spoje, kde se neshodovala naměřená přijatá výkonová úroveň signálu s vypočítanou, kde rozdíl činil -10 dB a možné příčiny takto velkého rozdílu byly uvedeny.

## 8 SEZNAM LITERATURY

- [1] 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.
- [2] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací*. 1. vyd. Praha: BEN, 2004, 215 s. ISBN 80-730-0133-0.
- [3] ZAPLATÍLEK, Karel. *MATLAB pro začátečníky*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 151 s. ISBN 80-730-0175-6.
- [4] MILOŠ MAZÁNEK, Pavel Pechač. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-800-1030-325.
- [5] *ITU-R P.835-5 : Reference standard atmospheres* [online]. [02/2012] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
- [6] *ITU-R P.837-6 : Characteristics of precipitation for propagation modelling* [online]. [02/2012] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
- [7] *ITU-R P.838-3 : Specific attenuation model for rain for use in prediction methods* [online]. [03/2005] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
- [8] *ITU-R P.453-9 : The radio refractive index: its formula and refractivity data* [online]. [2009] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
- [9] *ITU-P.452-15 : Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz* [online]. [2013] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
- [10] *ITU-R P.526-13 : Propagation by diffraction* [online]. [11/2013] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
- [11] *ITU-R P.530-15 : Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems* [online]. [09/2013] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
- [12] *ITU-R P.676-10 : Attenuation by atmospheric gases* [online]. [09/2013] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
- [13] MELLO, Luiz da Silva, Marlene S. PONTES a ARAPOGLOU. *Comparison of the Performance of Rain Attenuation Prediction Methods for Terrestrial Links*. Rio de Janeiro, Brazil, [2010]. Vědecký článek. Center for Telecommunication Studies PUC-Rio.
- [14] AGUNLEJIKA, O., T.I RAJI a O.A ADELEKE. *Tropospheric Scintillation Prediction For Some Selected Cities In Nigeria's Tropical Climate*. Ogbomoso, Nigeria, © December 2009. Vědecký článek. Ladoke Akintola University of Technology, Ogbomoso.
- [15] KVICERA, Vaclav a Martin GRABNER. *Rain Attenuation on Terrestrial Wireless Links in the mm Frequency Bands*. Czech Republic, 2010. Vědecký článek. Czech Metrology Institute.

- [16] KVICERA, Vaclav a Martin GRABNER. *Atmospheric Refraction and Propagation in Lower Troposphere*. Czech Republic, 2011. Vědecký článek. Czech Metrology Institute.
- [17] ALCOMA A.S. *Mikrovlnný datový spoj ALxxF MP600/360/165 pro pásmo 11 a 13 GHz Návod k instalaci a obsluze*. Praha 10, 30. 1. 2015.
- [18] ALCOMA A.S. *Principy digitální mikrovlnné komunikace*. Praha 10, 16. 11. 2012.
- [19] ALCOMA A.S. *Prospekt - Alcoma podporované módy MP360* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.alcoma.cz/>
- [20] Engineering Tools GmbH. *Engineering Tools* [online]. [2015] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.engineering-tools.ch/rain/gradient.php?long=50&lat=13&rainrate=Calculate&sprache=english>
- [21] VARAGNOLO, Damiano. *How To Make Pretty Figures With Matlab*. 15.1.2010. Dostupné z: <http://staff.www.ltu.se/~damvar/Matlab/HowToMakePrettyFiguresWithMatlab.pdf>
- [22] COMPLEX SYSTEMS. *WLM54AG 6A-23 MINIPCI*. © 2007. Dostupné z: <http://www.pcengines.ch/pdf/wlm54ag23.pdf>
- [23] Propagation Tutorial - Introduction. *Radio Communication Information* [online]. © Mike Willis May 5th, 2007 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.mike-willis.com/Tutorial/PF1.htm>
- [24] Radar Basics - Anomalous Propagation of Electromagnetic Waves. *Radar Basics* [online]. [Online since November 1998] [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/07.waves/wa17.en.html>
- [25] Print ONLY plot on MATLAB GUI. In: *Print ONLY plot on MATLAB GUI - Stack Overflow* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://stackoverflow.com/questions/28609347/print-only-plot-on-matlab-gui>
- [26] How to plot an Ellipse. In: *How to plot an Ellipse - MATLAB Answers - MATLAB Central* [online]. © 1994-2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/86615-how-to-plot-an-ellipse>
- [27] Relative Humidity. *Relative Humidity* [online]. 1998 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/relhum.html#c4>

## 9 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

PtP	Point to point
PtMP	Point to Multipoint
ITU	Mezinárodní telekomunikační unii
LOS	Line of Sight
ČTU	Český telekomunikační úřad
NLOS	Non Line of Sight
E	Intenzita elektrického pole
H	Intenzita magnetického pole
Ez	Intenzita elektrického pole ve směru osy z
Hy	Intenzita magnetického pole ve směru osy y
Z	Vlnová impedance prostředí
$\mu$	Permeabilita prostředí
$\sigma$	Konduktivita prostředí
$\omega$	Úhlové frekvence
$\varepsilon$	Permitivita prostředí
j	Imaginární jednotka
c0	Rychlost světla
bn	Poloměr n-té Fresnelovy zóny
$\lambda$	Vlnová délka
f	Frekvence
v	Míra zastínění
S	střední hodnota Poyntigova vektoru
EIRP	Efektivní izotropický vyzářený výkon
LFSL	Ztráty při šíření volným prostorem
BER	Bitová chybovost
$\gamma$	Celkový specifický měrný útlum
$\gamma_O$	Specifický měrný útlum plynného složení atmosféry
$\gamma_W$	Specifický měrný útlum vodních par v atmosféře
LGass	Útlum atmosférickými plyny
L0,01	Útlumu způsobený šířením deštěm
$\gamma_R$	Specifický útlum deštěm
def	Efektivní délka spoje
R0,01	Intenzita deště překročená v 0,01 % času
$\tau$	Polarizační sklon
Lp	útlumu způsobený deštěm pro jiná procenta času
n	Index lomu troposféry
N	Refraktivita
T	Absolutní teplota
p	Atmosférický tlak
e	Tlak vodních par
K	Geoklimatický faktor
dN1	Gradient indexu refraktivity pro spodních 65 km atmosféry
sa	Koeficient určující drsnost terénu
$\varepsilon_p$	Inklinace dráhy
A	Hloubka úniku
p	Procento času, kdy je překročena hloubka úniku
F	Činitel tlumení

Ld	Ztráty způsobené difrakcí
PRX	Výkonová úroveň přijatého signálu za zhoršených podmínek
PTX	Úroveň vysílacího výkonu
GRX	Zisky antény na přijímací straně
GTX	Zisky antény na vysílací straně
Ltotal	Celkové ztráty
Lost	Ztráty zařízení
Psen	Citlivost přijímače
LM	Rezerva na únik
PRXC	Výkonová úroveň přijatého signálu za normálních podmínek
$\eta$	Účinnost využití apertury
G	Zisk antény
QAM	Kvadrurní amplitudová modulace
SNR	Odstup signál šum signal to noise ratio
AP	Přístupový bod Acces point
GUI	Grafické uživatelské rozhraní
MCR	Matlab Compiler Run
ODU	Venkovní jednotka Outdoor unit
ATPC	Automatický regulace vysílacího výkonu
ACM	Adaptivní kódování a modulace
OFDM	Ortogonální multiplex s frekvenčním dělením
BPSK	Binární – fázové klíčování
PCI	Peripheral Component Interconnect

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Mechanismy šíření elektromagnetické vlny v atmosféře .....	9
Obr. 2 Rovinná harmonická vlna šířící se v obecném prostředí [4] .....	10
Obr. 3 Fresnelovy zóny .....	11
Obr. 4 Poloměr první Fresnelovy zóny uprostřed spoje .....	12
Obr. 5 Plocha odrazu pomocí 1. Fresnelova elipsoidu .....	12
Obr. 6 Ilustrace parametrů pro výpočet difrakce .....	13
Obr. 7 Závislost ztrát volným prostorem na délce spoje pro různé frekvence .....	15
Obr. 8 Příklad, kdy nejsou antény vůči sobě přímo pootočený .....	15
Obr. 9 Příklad úniků během šíření elektromagnetické vlny prostředím [9] .....	17
Obr. 10 Průběh specifického útlumu způsobeného absorpcí atmosférickými plyny.....	20
Obr. 11 Specifické útlumy pro suchou a vlhkou atmosféru a jejich součet.....	21
Obr. 12 Frekvenční závislost specifického útlumu s různou intenzitou deště $R$ [15].....	23
Obr. 13 Vznik scintilace vlivem deformace vlnoplochy troposférickým rozptylem [1]	25
Obr. 14 Šíření přímé a odražené vlny nad rovinnou zemí [1] .....	27
Obr. 15 Útlum difrakcí na ostré překážce v závislosti na míře zastínění .....	31
Obr. 16 Spektrum ze spektrálního analyzátoru ve webovém rozhraní od Ubiquiti Networks.....	36
Obr. 17 Výstup grafu z programu do vektorového formátu .....	39
Obr. 18 Úvodní obrazovka programu .....	40
Obr. 19 Popis nástrojů grafu v aplikaci .....	41
Obr. 20 Výpočet 1. Fresnelovy zóny pomocí vlastní aplikace .....	43
Obr. 21 Výpočet útlumu dešťovou srážkou pro 0,01 % času pomocí vlastní aplikace ..	44
Obr. 22 Výpočet útlumu dešťovou srážkou pro jinou dostupnost pomocí vlastní aplikace .....	44
Obr. 23 Výpočet hloubky úniku vlivem vícecestného šíření pomocí vlastní aplikace ...	45
Obr. 24 Výpočet útlumu absorpcí atmosférickými plyny pomocí vlastní aplikace.....	45
Obr. 25 Výpočet útlumu způsobeného difrakcí na ostré překážce pomocí vlastní aplikace .....	45
Obr. 26 Výpočet ztrát šířením volným prostorem pomocí vlastní aplikace .....	45
Obr. 27 Výpočet výkonové bilance spoje pomocí vlastní aplikace .....	47
Obr. 28 Varování aplikace v případě nedostatečné rezervy na únik .....	47
Obr. 29 Dohledový systém ASD Client 17 GHz spoje.....	48
Obr. 30 Dohledový systém ASD Client 10 GHz spoje.....	50
Obr. 31 Výkonová úroveň přijímaného signálu 5 GHz spoje.....	53

## 11 SEZNAM TABULEK

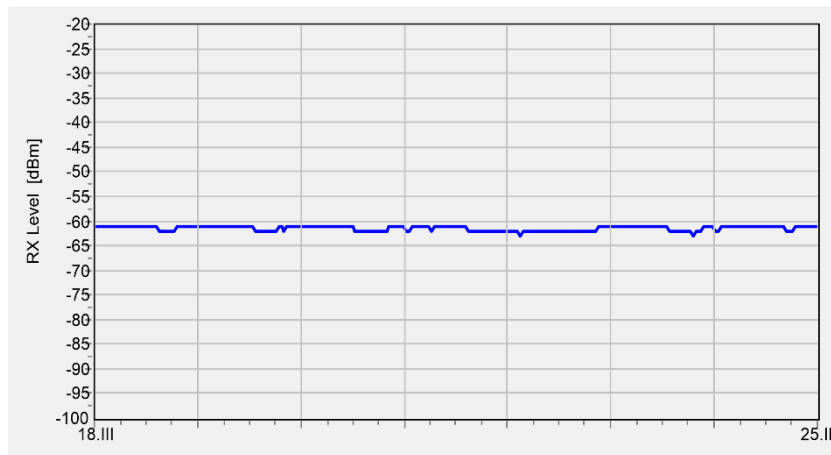
Tab. 1 Frekvenční pásma [4] .....	8
Tab. 2 Citlivost přijímače 17 GHz spoje ALCOMA MP360 s šířkou pásma 28 MHz [20] .....	34
Tab. 3 Maximální vzdálenost spoje při různé citlivosti přijímače.....	36
Tab. 4 Přehled volných kmitočtových pásem .....	37
Tab. 5 Nastavení spoje MP360 17 GHz .....	44
Tab. 6 Výpočet výkonové bilance spoje pro oba směry 17 GHz spoje .....	46
Tab. 7 Nastavení spoje MP165 10 GHz .....	49
Tab. 8 Výpočet výkonové bilance spoje pro oba směry 10 GHz spoje .....	49
Tab. 9 Nastavení 5 GHz spoje .....	51
Tab. 10 Výpočet výkonové bilance spoje 5 GHz .....	51

## PŘÍLOHY

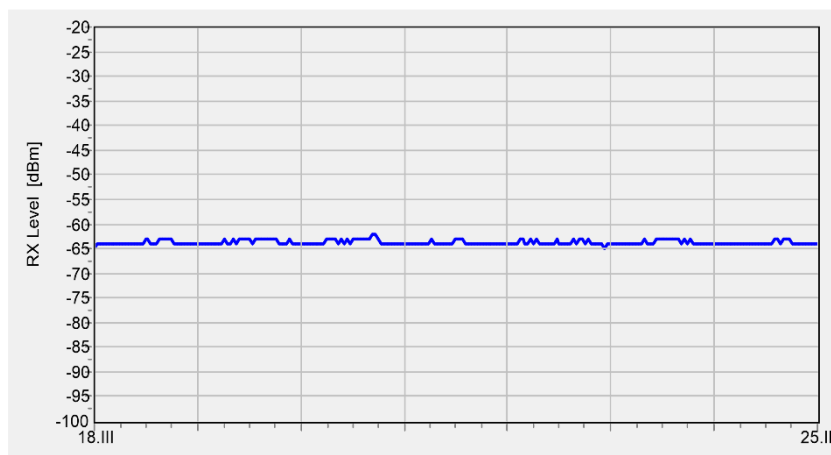
### ELEKTRONICKÁ PŘÍLOHA

- Elektronická verze této diplomové práce
- Zdrojový kód programu a potřebné textové soubory
- Spustitelný program

### SPOJ 17 GHz



Obrázek 1 Výkonová úroveň přijatého signálu na vzdáleném přijímači pro směr Local-Remote - spoj 17 GHz

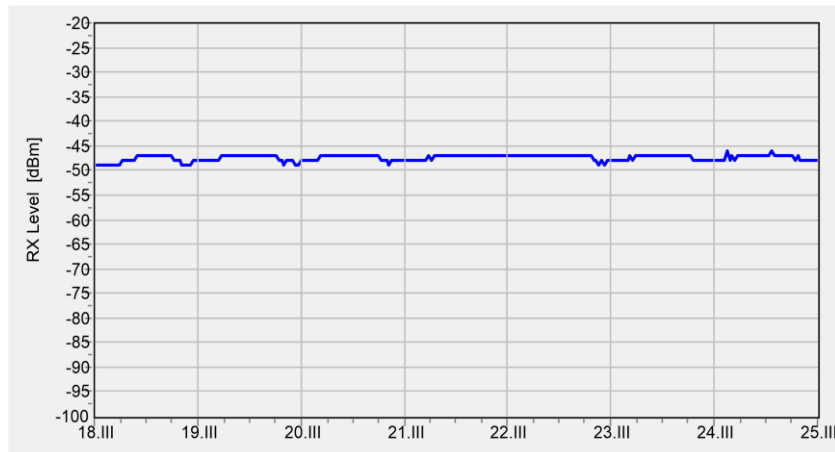


Obrázek 2 Výkonová úroveň přijatého signálu na lokálním přijímači pro směr Remote-Local - spoj 17 GHz

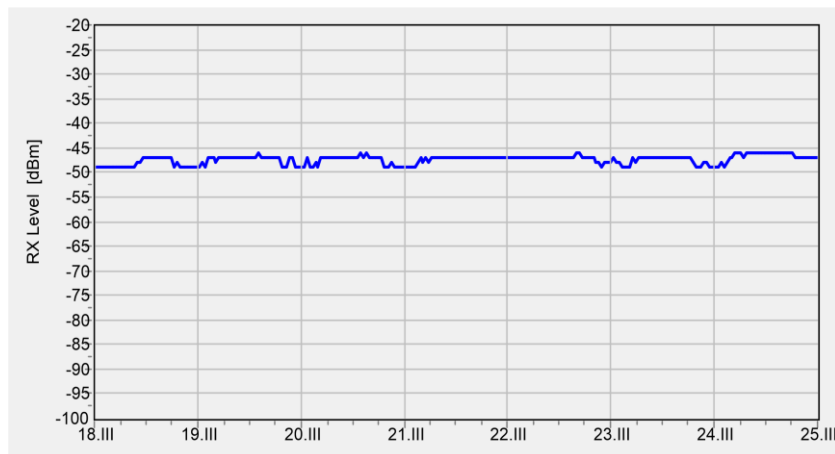




Obrázek 3 Stožár, na němž je umístěn 17 i 10 GHz spoj ALCOMA - lokální stanice

**SPOJ 10 GHZ**

Obrázek 4 Výkonová úroveň přijatého signálu na vzdáleném přijímači pro směr Local-Remote - spoj 10 GHz



Obrázek 5 Výkonová úroveň přijatého signálu na lokálním přijímači pro směr Remote- Local - spoj 10 GHz

**FUNKCE PRO VÝPOČET ÚTLUMU DEŠŤOVOU SRÁŽKOU**

```
function [ rain, def, YR ] = Att_Rain( dl,fr,R,elev,tau)
%Utlum způsobeny destovou srážkou
% Pouze pro frekvence do 100 GHz a do delky spoje 60 km platny
% dl      - delka spoje [km]
% fr      - frekvence spoje [GHz]
% R       - intenzita deště pro dostupnost 99,99% casu [mm/h]
% elev    - elevace [°]
% tau     - polarizace [°]      (v-90)
%                               (H-0)
%                               (kruhova - 45)
%
%nacte data ze souboru a ulozi je do C
data = fopen('dataRain.txt');
C = textscan(data, '%f %f %f %f %f', 1000, 'headerlines', 1);
fclose(data);
%-----ziskani hodnot-----
all_fr=C{1,1};
s=numel(all_fr);

switch tau
    case 90      % vertikalni polarizace
        kv=C{1,4};
```

```

        aV=C{1,5};
        kH=zeros(s,1);
        aH=zeros(s,1);
    case 0 % Horizontalni polarizace
        kH=C{1,2};
        aH=C{1,3};
        kV=zeros(s,1);
        aV=zeros(s,1);
    case 45 % Kruhova polarizace
        kH=C{1,2};
        aH=C{1,3};
        kV=C{1,4};
        aV=C{1,5};
    otherwise
        disp('spatne zadana polarizace');
        kH=zeros(s,1);
        aH=zeros(s,1);
        kV=zeros(s,1);
        aV=zeros(s,1);
    end
end
%-----vypocet-----
if fr==0
    k=0;
    a=0;
else
    for i=1:s
        if fr==all_fr(i)
            k=(kH(i)+kV(i)+(kH(i)-kV(i))*((cosd(elev)^2)*(cosd(2*tau))))/2;
            a=((kH(i)*aH(i))+kV(i)*aV(i))+((kH(i)*aH(i))-
            (kV(i)*aV(i)))*((cosd(elev)^2)*(cosd(2*tau)))/(2*k);

            elseif fr>all_fr(i) && fr<all_fr(i+1) %prumerne hodnoty
                kH_a=(((fr-all_fr(i))/(all_fr(i+1)-all_fr(i)))*(kH(i+1)-
                kH(i)))+kH(i);
                aH_a=(((fr-all_fr(i))/(all_fr(i+1)-all_fr(i)))*(aH(i+1)-
                aH(i)))+aH(i);
                kV_a=(((fr-all_fr(i))/(all_fr(i+1)-all_fr(i)))*(kV(i+1)-
                kV(i)))+kV(i);
                aV_a=(((fr-all_fr(i))/(all_fr(i+1)-all_fr(i)))*(aV(i+1)-
                aV(i)))+aV(i);

                k=(kH_a+kV_a+(kH_a-kV_a)*((cosd(elev)^2)*(cosd(2*tau))))/2;
                a=(kH_a*aH_a+kV_a*aV_a+(kH_a*aH_a-
                kV_a*aV_a)*((cosd(elev)^2)*(cosd(2*tau)))/(2*k);
            end
        end
    end
end
%-----
YR=k*R^a; %specifiky utlum
def=d1*r( d1,fr,R,a); %efektivni delka spoje
rain=(YR*def); %utlum destovou srazkou
end
%-----
function [ r ] = r( d1,fr,R,a )
%Efektivni delka dle ITU
% maximalni efektivni delka 2,5 km
% d1 - delka spoje [km]
% fr - frekvence spoje [GHz]
% R - intenzita deste pro 0.01% casu [mm/h]
% a - koeficient [-]
de=1/(0.477*(d1^0.633)*(R^(0.073*a))*(fr^0.123)-10.579*(1-exp(-0.024*d1)));

if de > 2.5
    r=2.5;
else
    r=de;
end
end
end

```

#### FUNKCE PRO VÝPOČET ÚTLUMU ABSORPCÍ ATMOSFÉRICKÝMI PLYNY

```

function [gass,Yo, Yw, Yt]=Att_Gass( d1,fr,ptot,t,v )
%Utlum absorpci plyny ITU-R P.676
% d1 - delka spoje [km]
% fr - frekvence spoje [GHz]
% ptot - atmosfericky tlak [hPa]

```

```

% t      - teplota [°C] <-15,40>
% v      - relativní vlhkost vzduchu [%] <0,100>

data=fopen('waterVapour.csv');
C = textscan(data, '%s %s %s', 'Delimiter', ';');
fclose(data);
teplota=num2str(t);
%----- saturacní hustota vodní páry
sat=0;
if ismember(C{1},teplota)==1
    teplota=num2str(t);
    saturated=C{2}{ismember(C{1},teplota)};
    sat=str2double(saturated);
else
    tep=strsplit(teplota,'. ');
    tep1=str2double(tep(1));
    tep2=tep1+1;

    sat1=str2double(C{2}{ismember(C{1},tep(1))});
    sat2=str2double(C{2}{ismember(C{1},num2str(tep2))});

    sat=(t-tep1)*(sat2-sat1)+sat1;
end
%-----hustota vodních par
p=(v*sat)/100;
rp = ptot/1013;
rt = 288/(273+t);
%-----
Yo = dry_air(rp,rt, fr);
Yw = water(rp,rt,p,fr);
Yt=(Yo+Yw);
gass=((Yo+Yw).*d1);
end

function [lambda0] = dry_air(rp,rt, fr)
%Vypocet specifického utlumu - suchým vzduchem
% rt, rp      - pomocné hodnoty
% fr          - frekvence spoje [GHz]

%-----
function [fi]=fi(rp,rt,a,b,c,d)
%pomocná funkce
%
fi=(rp^a)*(rt^b)*exp(c*(1-rp)+d*(1-rt));
end
%-----
E1 = fi(rp , rt , 0.0717,-1.8132, 0.0156,-1.6515);
E2 = fi(rp , rt , 0.5146,-4.6368,-0.1921,-5.7416);
E3 = fi(rp , rt , 0.3414,-6.5851, 0.2130,-8.5854);
E4 = fi(rp , rt , -0.0112, 0.0092,-0.1033,-0.0009);
E5 = fi(rp , rt , 0.2705,-2.7192,-0.3016,-4.1033);
E6 = fi(rp , rt , 0.2445,-5.9191, 0.0422,-8.0719);
E7 = fi(rp , rt , -0.1833, 6.5589,-0.2402, 6.131);

Y54 = 2.192*fi(rp , rt , 1.8286,-1.9487, 0.4051,-2.8509);
Y58 = 12.59*fi(rp , rt , 1.0045, 3.5610, 0.1588, 1.2834);
Y60 = 15.0*fi(rp , rt , 0.9003, 4.1335, 0.0427, 1.6088);
Y62 = 14.28*fi(rp , rt , 0.9886, 3.4176, 0.1827, 1.3429);
Y64 = 6.819*fi(rp , rt , 1.4320, 0.6258, 0.3177,-0.5914);
Y66 = 1.908*fi(rp , rt , 2.0717,-4.1404, 0.4910,-4.8718);

delta = -0.00306*fi(rp , rt , 3.211,-14.94, 1.583,-16.37);
if fr<=54
    lambda0=((((7.2*(rt^2.8))/((fr^2)+(0.34*(rp^2)*(rt^1.6)))))+((0.62*E3)/...
        (((54-fr)^(1.16*E1))+((0.83*E2))))*(fr^2)*(rp^2)*(10^(-3)));
elseif fr>54 && fr<=60
    lambda0=exp(((log(Y54)/24)*(fr-58)*(fr-60))-((log(Y58)/8)*(fr-54)*(fr-60))...
        +((log(Y60)/12)*(fr-54)*(fr-58)));
elseif fr>60 && fr<=62
    lambda0=Y60+((Y62-Y60)*((fr-60)/2));
elseif fr>62 && fr<=66
    lambda0=exp(((log(Y62)/8)*(fr-64)*(fr-66))-((log(Y64)/4)*(fr-62)*(fr-66))...
        +((log(Y66)/8)*(fr-62)*(fr-64)));

```

```

elseif fr>66 && fr<=120
lambda0=((3.02*(10^(-4))*(rt^3.5))+((0.283*(rt^3.8))/(((fr-118.75)^2)+...
(2.91*(rp^2)*(rt^1.6))))+(0.502*E6*(1-(0.0163*E7*(fr-66)))))/...
(((fr-66)^(1.4346*E4)+(1.15*E5))))*(fr^2)*(rp^2)*(10^(-3));

elseif fr>120 && fr<=350
lambda0=((3.02*(10^(-4)))/(1+(1.9*(10^(-5))*(fr^1.5))))+((0.283*(rt^0.3))/...
(((fr-118.75)^2)+(2.91*(rp^2)*(rt^1.6))))*(fr^2)*(rp^2)*(rt^3.5)*...
(10^(-3))+delta;
end
end

function [ lambdaaw ] = water( rp,rt,p,fr)
%Vypocet specifickeho utlumu - vodnimi parami
% rt, rp - pomocne hodnoty
% fr - frekvence spoje [GHz]
% p - hustota vodni pary [g/m3]

n1=0.955*rp*(rt^0.68) * 0.006*p;
n2=0.735*rp*(rt^0.5) * 0.0353*p*(rt^4);
%-----
function gf = gf( f,f1 )
%Pomocna funkce
%
gf=1+((f-f1)/(f+f1))^2;
end
%-----
lambdaaw=((3.98*n1*exp(2.23*(1-rt)))/(((fr-22.235)^2)+9.42*(n1^2)))*...
gf(fr,22)+((11.96*n1*exp(0.7*(1-rt)))/(((fr-183.31)^2)+11.14*...
(n1^2)))+(0.081*n1*exp(6.44*(1-rt)))/(((fr-321.226)^2)+...
(6.29*(n1^2)))+(3.66*n1*exp(1.6*(1-rt)))/(((fr-325.153)^2)+9.22*...
(n1^2)))+(25.37*n1*exp(1.09*(1-rt)))/((fr-380)^2)+((17.4*n1*...
exp(1.46*(1-rt)))/((fr-448)^2))+((844.6*n1*exp(0.17*(1-rt)))/...
((fr-557)^2))*gf(fr,557)+((290*n1*exp(0.41*(1-rt)))/((fr-752)^2))*...
gf(fr,752)+((8.3328*(10^4)*n2*exp(0.99*(1-rt)))/((fr-1780)^2))*...
gf(fr,1780))*((fr^2)*(rt^2.5)*(p*10^(-4)));
end

```

### FUNKCE PRO VÝPOČET ÚTLUMU DEŠŤOVOU SRÁŽKOU PRO JINÁ PROCENTA

```

function [ Lp ] = Att_RainLp( dos, f, L0 )
%Vypocita utlum zpusobeny destovou srazkou prekroceny pro jina procenta
%casu p v rozmezich 0.01 - 1 %
% dos - dostupnost spoje [%] casu
% f - frekvence [GHz]
% L0 - utlum destovou srazkou pro dostupnost 99,99% [dB]
p=100-dos;
if (0.001<=p)&& (p<=1)
if f>=10
c0=0.12+0.4*(log10(f/10)^0.8);
else
c0=0.12;
end
C1=(0.07^c0)*(0.12^(1-C0));
C2=0.855*C0 + 0.546*(1-C0);
C3=0.139*C0 + 0.043*(1-C0);

Lp=(C1*p^(-C2-C3*(log10(p))))*L0;
else
Lp=0;
end
end

```

### FUNKCE PRO VÝPOČET ZTRÁT DIFRAKČÍ

```

function [ dif,Fv,v]=DiffractionL( h,d1,d,f)
%Elementarni vypocet ztrat na ostrem britu vlivem difrakce vlny
% h1 - prevyseni [m]
% - v pripade, ze prekazka nezastini spoj
% + v pripade, ze prekazka zastini spoj
% d1 - vzdalenost prekazky [km]
% d - delka spoje [km]
% f - frekvence [GHz]

```

hi=100; %horni mez integralu, 200 presnejsi, ale pomalejsi vypocet

```

if d1>=d || d1==0 || f==0
    Fv=0;
    dif=0;
    v=0;
else
    lambda=(3*10^8)/(f*10^9);
    d1m=(10^3)*d1;
    d2m=(10^3)*(d-d1);

    v=sqrt((2/lambda)*(1/d1m + 1/d2m))*h; %mira zastineni
    Fv=((1+1i)/2)*integral(@inside,v,hi); %Fresnel Integral
    dif=-20*log10(abs(Fv)); %ztrata/zisk
end

end

function [ y ] = inside( s )
%pomocna funkce
y=exp((-1i*pi*(s.^2))/2);
end

```

### FUNKCE PRO VÝPOČET HLOUBKY ÚNIKU

```

function FM =FadeDepth(s,d,hr,he,dN1,d1,f,p,data)
%Výpočet hloubky uniku pro danou spolehlivost spoje
%
% Odchylka této metody je přibližně 5,7 dB a je platná pro frekvence
% alespoň 45 GHz.
% s - zeměpisná šířka
% d - zeměpisná délka
% hr - výška anteny 1 nad morem [m]
% he - výška anteny 2 nad morem [m]
% d1 - délka spoje [km]
% f - frekvence spoje [GHz]
% dN1 - gradient refraktivity pro spodních 65 m nepřekročen v 1% času
% - dN1=-200; Střední Evropa cca -400 až -200 [dN/km]
% p - dostupnost (např. 99.99) [%]
% data - 1 - vyhledá data "šířka" a "délka" ze souboru
% - 0 - data "šířka" a "délka" jsou zadána v "s" a "d"

%Metoda pro malé procenta času

if d1<5 %pro vzdálenost menší než 5 km je rovno 0
    FM=0;
%-----drsnost povrchu [m]-----
else
    M = csvread('saTableWorld.csv');
    sirka=0;
    delka=0;
    if data==1
        [Zsirka,Zdelka]=size(M);

        for j=1:Zdelka
            if d==M(1,j)
                delka=j;
            end
        end

        for i=1:Zsirka
            if s==M(i,1)
                sirka=i;
            end
        end

    elseif data==0
        sirka=s;
        delka=d;
    end

    sa=M(sirka,delka); %drsnost povrchu [m]
    if sa==0
        sa=1;
    end

%-----geoklimatický faktor-----
K=(10^(-4.4-0.0027*dN1))*(10+sa)^(-0.46);

```

```

%-----inclinace [mrad]-----
Ep=abs(hr-he)/d1;
%-----hloubka uniku-----
hl=min(he,hr);
pw=100-p;
A=10*((log10((k*(d1^3.4)*((1+abs(Ep))^-1.29))*(f^0.8))/pw))+0.00089*hl);

if A>=0
    FM=A;
else % zisk nevplyva z tohoto vypoctu
    FM=0;
end
end
end

```

### FUNKCE PRO VÝPOČET FRESNELOVY ZÓNY

```

function [ bn ] = fresnel_zone( n, f, d, d1)
%Vypocet polomeru n-te Fresnelovy zony
%n      - index Fresnelovy zony [-]
%f      - frekvence [GHz]
%d1     - vzdalenost prekazky [km]
%d      - delka spoje [km]

lambda=(3*10^8)/(f*10^9);
if d1 ==0 %v pripade, ze neni prekazka
    d1m=((10^3)*d)/2;
    d2m=d1m;
else
    d1m=(10^3)*d1;
    d2m=(10^3)*(d-d1);
end
if d==0
    bn=0;
else bn=sqrt((d1m*d2m*n*lambda)/(d1m+d2m));
end
end

```

### FUNKCE PRO VÝPOČET ZTRÁT ŠÍŘENÍM VOLNÝM PROSTOREM

```

function [ fsl ] = FSL( fr,d )
%Vypocet free space loss
%fr - frekvence [GHz]
%d1 - vzdalenost spoje [km]

lambda=(3*10^8)/(fr*10^9);
dkm=(10^3)*d;
fsl=20*log10((4*pi()*dkm)/lambda);
end

```

### FUNKCE PRO VÝPOČET MAXIMÁLNÍ DÉLKY SPOJE

```

function [ dkm ] = FSLdelka(fr,Psen,GTX,GRX,PTX,Fade)
%Vypocet naximalni mozne delky spoje, pro zadanych technickych parametrech
% fr      - frekvence spoje [GHz]
% Psen    - citlivost primace [dBm]
% GTX     - zisk vysilaci anteny [dBi]
% GRX     - zisk prijimaci anteny [dBi]
% PTX     - uroven vysilaciho vykonu [dBm]
% Fade    - rezerva na unik [dB]

PRX=Psen+Fade;
fsl=PTX+GTX+GRX-PRX;
lambda=(3*10^8)/(fr*10^9);
q=10^(-fsl/20);
d=lambda/(q^4*pi());
dkm=d/(10^3); %v [km]
end

```

### FUNKCE PRO VÝPOČET UNIKU SPOJE VLIVEM VÍCECESTNÉHO ŠÍŘENÍ

```

function Pw=multipath(s,d,hr,he,dn1,d1,f,A,data)
%Vypočet pravděpodobnosti uniku spoje vlivem vícecestného šíření
%repr.dostupnosti spoje
%
```

```

% Odchylka teto metody je priblizne 5,7 dB a je platna pro frekvence
% alespon 45 GHz.
% s - zemepisna sirka
% d - zemepisna delka
% hr - vyska anteny 1 nad morem [m]
% he - vyska anteny 2 nad morem [m]
% dl - delka spoje [km]
% f - frekvence spoje [GHz]
% A - hloubka uniku [dB]
% dn1 - gradient refraktivity pro spodnich 65 m neprekrocen v 1% casu
% dn1=-200; Stredni Evropa cca -400 az -200
% - [N/km]
% data - 0 - vyhleda data "sirka" a "delka" ze souboru
% - 1 - data "sirka" a "delka" jsou zadana v "s" a "d"

%Metoda pro male procenta casu
if dl<5 %pro vzdalenost mensi nez 5 km je rovno 0
    Pw=0;
%-----drsnost povrchu [m]-----
else
    M = csvread('saTableworld.csv');
    sirka=0;
    delka=0;
    if data==1
        [Zsirka,Zdelka]=size(M);
        for j=1:Zdelka
            if d==M(1,j)
                delka=j;
            end
        end
        for i=1:Zsirka
            if s==M(i,1)
                sirka=i;
            end
        end
    elseif data==0
        sirka=s;
        delka=d;
    end
    sa=M(sirka,delka);
    if sa==0
        sa=1;
    end
%-----geoklimaticky faktor-----
    k=(10^(-4.4-0.0027*dn1))*(10+sa)^(-0.46);
%-----inclinace [mrad]-----
    Ep=abs(hr-he)/dl;
%-----pravdepodobnost prekroceni hloubky uniku-----
    hl=min(he,hr);
    pw=k*(dl^3.4)*((1+Ep)^(-1.29))*(f^0.8)*10^(-0.00089*hl-(A/10));
    Pwa=100-pw;
    if Pwa <=0 %pokud vyjde zaporne
        Pw=0;
    else
        Pw=Pwa;
    end
end
end

```