

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Vliv deště na útlum signálu bezkabelového optického spoje

Bc. Pavla Hrníčková

Diplomová práce

2011

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavla Hrníčková**
Osobní číslo: **I08335**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Vliv deště na útlum signálu bezkabelového optického spoje**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování:

Proveďte teoretickou analýzu vlivu deště na šíření ne optický signál v pásmech 550, 830, 850 a 1550 nm. Zpracujte útlumová data z experimentálního optického spoje ÚFA AVČR a známých dešťových srážek na Milešovce a navrhněte metodu, jak z dat extrahovat útlum deštěm včetně korelace deště a mlhy. Navrhněte model pro predikci útlumu deštěm a model ověřte experimentem.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

[1] KOLKA Z., WILFERT O., FIŠER O.: Achievable qualitative parameters of optical wireless links. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2007, Roč. 9, č. 8, s. 2419-2423. ISSN 1454-4164.

[2] WILFERT, O., KOLKA, Z., BIOLKOVA, V., KŘIVÁK, P., DORDOVÁ, L., FIŠER, O., NĚMEČEK, J.: Dual optical wireless test link. *Proceedings of the SPIE, Volume 7091 (Free-Space Laser Communications VIII)*, pp. 70910W-70910W-8 (2008).

[3] I. KIM, B. McARTHUR, E. KOREVAAR: Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications, *Proc. of SPIE ? Vol. 4214 Optical Wireless Communications III*, ed. Eric J. Korevaar, February 2001, pp. 26-37.

[4] WILFERT, O.: Optická komunikace laserovými svazky [online]. 2007 [cit.2009-05-10]. Dostupný z WWW:

<http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/seminare/Prezentace_opticke_kom_07.pdf>.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.**
AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání diplomové práce: **12. listopadu 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **29. srpna 2011**


prof. Ing. Simson Karamazov, Dr.
děkan




Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2011

Prohlášení autora

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 26.8.2011

Bc. Pavla Hrníčková

Poděkování

Ráda bych poděkovala rodičům za podporu během celého studia. Dále chci poděkovat vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc. za vynikající odborné vedení a spolupráci. Čas, který spolupráci semnou věnoval, mi byl přínosem a inspirací. Neméně chci poděkovat Ing. Vladimíru Brázdovi za jeho přátelské a cenné rady, které mě nesčetněkrát postrčily a nabudily.

Anotace

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi optického bezkabelového spoje (OBS) a vlivem deště na útlum signálu. V teoretické části je proveden rozbor atmosférických jevů, které mají vliv na útlum signálu. Práce se věnuje problematice indexu lomu vody dešťové kapky. Praktická část se soustředí na zpracování dat z experimentálního optického bezkabelového spoje umístěného na Milešovce, nalezení a experimentální ověření vztahu mezi útlumem OBS a intenzitou srážek. V práci je prezentováno zpracování časových chodů srážek a útlumu OBS na experimentálním spoji. Také je rozebráno několik zajímavých epizod z naměřených hodnot.

Klíčová slova

Optický bezkabelový spoj, útlum, dohlednost, déšť, intenzita srážek, rozptyl, spektrum kapek

Title

The effect of rain on the signal attenuation of Free Space Optical Link

Annotation

This thesis deals with the features of the Free Space Optical Link (FSO) and with the effect of rain on the signal attenuation. In the theoretical part of the thesis there is an analysis of the atmospheric phenomena, which have an effect on the signal attenuation. The thesis deals with issues of the index of refraction of water in the rain drop. Practical part focuses on working with data gained from experimental FSO, placed on Milešovka, finding and experimental confirmation of the relation between the signal attenuation of FSO and rain rate. Working of the time chodů srážek rain and attenuation of FSO on the experimental link is being presented. Also several interesting episodes from measured values is being analysed.

Keywords

Free space optical link, attenuation, visibility, rain, rain rate, scattering, drop size distribution.

Obsah

1.	Úvod.....	12
2.	Optický bezkabelový spoj (OBS).....	13
2.1	Výhody OBS	14
2.2	Nevýhody OBS.....	14
2.3	Metody zvýšení spolehlivosti spoje	15
2.4	Atmosférické vlivy na degradaci spoje	15
3.	Charakter deště.....	16
3.1	Fyzikální charakter dešťové kapky	16
3.2	Tvar dešťových kapek	17
4.	Index lomu	20
4.1	Vlnová délka a frekvence vlny	20
4.2	Index lomu	21
4.3	Index lomu jako funkce vlnové délky	23
4.4	Frekvenční závislost indexu lomu v optickém pásmu	23
4.4.1	Reálná část.....	24
4.4.2	Imaginární část	25
5.	Útlum deštěm a jeho výpočet	27
5.1	Útlum atmosféry	27
5.2	Měrný útlum deštěm.....	27
5.3	Předpověď útlumu deštěm.....	28
5.4	Odvození měrného útlumu	30
5.5	Okamžitý celkový útlum deštěm.....	34
6.	Dohlednost	35
7.	Oblasti aproximace pro zjednodušený výpočet útlumu (rozptylu) 36	
7.1	Zpětný rozptyl	36
7.2	Dopředný rozptyl.....	37
7.3	Dopředné rozptylové funkce $\hat{S}(x, \hat{n})$	39
8.	Experimentální optický spoj.....	41
8.1	Umístění spoje	41
8.2	Vysílač	42
8.3	Přijímač.....	43

9.	Experimentální výpočet útlumu deštěm	44
9.1	Závislost měrného útlumu deštěm na vlnové délce (830nm a 1550nm).....	44
9.2	Aproximace měrného útlumu deštěm.....	51
9.3	Ověření zjištěných vztahů pro útlum deštěm	53
10.	Zpracování experimentálních dat	56
10.1	Zpracování dat ze srážkoměrů	56
10.2	Statistické hodnoty	59
10.3	Distribuční funkce.....	61
11.	Průměrovaný bodový graf	62
12.	Analýza vybraných útlumových epizod.....	63
12.1	Ověření útlumu	66
13.	Závěr	67
14.	Seznam použité literatury	68

Seznam zkratek

AV ČR	Akademie věd České republiky
FSO	Free Space Optics
ITU-R	International Telecommunication Union – Radio communication
OBS	Optický bezkabelový spoj
NIR	Near Infrared
PWD	Present Weather Detector
RMSE	Root Mean Square Error
VUT	Vysoké učení technické
CH1	kanál 1 – 1550 nm
CH2	kanál 2 – 830 nm

Seznam symbolů

V	dohlednost
A	útlum
λ	vlnová délka
k	vlnové číslo
D	průměr kapky,
C	zdánlivý kontrast
E	intenzita elektrického pole
$N(D)$	spektrum velikosti kapek
\hat{n}	komplexní index lomu, $n(\omega)$ – fázová rychlost (reálná část indexu lomu)
κ	index absorpce (imaginární část indexu lomu)
φ_t	divergence paprsku
$\alpha_{h,v}, \alpha_0$	měrný útlum
l_{12}	vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
l_0	pomocná délka
d_{12}	vzdálenost
D_x	průměr paprsku ve vzdálenosti x
L_t	velikost turbulentní poruchy
σ	efektivní odrazná plocha
x	velikostní parametr
Q_t	celková ztrátová plocha, Q_s – odrazná plocha, Q_a – absorpční plocha
$\hat{S}(x, \hat{n}), \hat{f}(D)$	dopředná rozptylová funkce
a_n, b_n	Mieovy koeficienty
τ	koeficient přenosu
v	rychlost šíření světla
r	dráhový redukční faktor

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Konstrukce přijímače/vysílače.....	13
Obrázek 2 - Tvar kapek. (a) Porovnání tvaru dešťových kapek s poloměry $R = 1, 1.5, 2, 2.5$ a 3mm . (b) Tvar nezdeformované kulové kapky o poloměru $a=0.5\text{mm}$, (c) $a=1\text{mm}$, (d) $a=3\text{mm}$, (e) $a=4.5\text{mm}$	18
Obrázek 3 - Průchod vlny z vakua do jiného prostředí.	20
Obrázek 4 - Index lomu vody jako funkce vlnové délky	23
Obrázek 5 - Komplexní index lomu vody pro vlnové délky od 10 nm do 10m	24
Obrázek 6 - Hodnoty podle Segelstein pro reálnou část indexu lomu vody vlnových délek od 10 nm do 10m	25
Obrázek 7 - Rozdělení klimatických zón (14) Evropa a Afrika podle ITU-R.	28
Obrázek 8 - Mechanismus člunkového srážkoměru.....	29
Obrázek 9 - Umístění srážkoměru na observatoři ČHMU Hradec Králové.....	29
Obrázek 10 - Elektronika srážkoměru.	30
Obrázek 11 - Dešťová oblast.	31
Obrázek 12 - Fresnelova zóna.	32
Obrázek 13 - Přístroj PWD21 od firmy Vaisala (VAISALA, 2005)	35
Obrázek 14 - Aproximační oblasti pro zpětný rozptyl	36
Obrázek 15 - Dopředný rozptyl - celková ztrátová plocha Q_t , odrazná plocha Q_s , absorpční plocha Q_a	38
Obrázek 16 - Umístění experimentálního optického spoje na Milešovce.	42
Obrázek 178 - Optický přijímač.	43
Obrázek 18 - Blokové schéma optického spoje.....	43
Obrázek 19 - Graf závislosti měrného útlumu podle Mie na intenzitě srážek na vlnové délce 830nm	45
Obrázek 20 - Graf závislosti měrného útlumu podle Mie na intenzitě srážek na vlnové délce 1550nm	46

Obrázek 21 - Graf rozdílu útlumů vlnových délek 1550 – 830 nm.....	48
Obrázek 22 - Měrný útlum v závislosti na intenzitě srážek pro 1190nm.	49
Obrázek 23 - Rozdíl měrných útlumů 1190-830nm.	49
Obrázek 24 - Měrný útlum v závislosti na intenzitě srážek pro 1400nm.	50
Obrázek 25 - Rozdíl měrných útlumů 1400-830nm.	51
Obrázek 26 - Hodnoty podle Carbonneu a vypočítané v práci.....	53
Obrázek 27 - (a.) Vypočtený útlum deštěm intenzita srážek 1 [mm/h].....	54
Obrázek 28 - (b.) Vypočtený útlum deštěm intenzita srážek 10 [mm/h].	54
Obrázek 29 - (c.) Vypočtený útlum deštěm intenzita srážek 50 [mm/h].....	54
Obrázek 30 - Příklad extrahovaných dat.	56
Obrázek 31 - Hodinové srážky.	57
Obrázek 34 - Interpolovaná data - výstup z programu.	59
Obrázek 35 - Maxima srážek v období 2009-2011.	60
Obrázek 36 - Maxima srážek v období 2009-2011.	60
Obrázek 37 - Distribuční funkce za rok 2009 – 2011.....	61
Obrázek 38 - Průměrovaný bodový graf závislosti intenzity deště na útlumu vypočteném experimentálně a podle uvedeného vztahu v literatuře.	62
Obrázek 39 - Epizoda ze dne 20.1.2009.....	63
Obrázek 40 - Situace na Milešovce ze dne 20.1.2009.....	64
Obrázek 41 - Epizoda ze dne 18.6.2009 - vysoká intenzita srážek.	65
Obrázek 42 - Epizoda ze dne 20.4.2011	65
Obrázek 43 - Epizoda z 24.5.2010.	66

Seznam tabulek

Tabulka 1- Koeficienty tvaru pro různě velké kapky	18
Tabulka 2 - Pádová rychlost dešťových kapek v závislosti na jejich poloměrech	18
Tabulka 3 - Index lomu pro vlnové délky 830nm a 1550nm v různých teplotách.....	22
Tabulka 4 - Index lomu v komplexním tvaru.	26
Tabulka 5 - Zpětný rozptyl – hodnoty parametru x (červená – Rayleigho oblast, zelená – Mie oblast, bílá – optická oblast).....	37
Tabulka 6 - Dopředný rozptyl – hodnoty parametru x (žlutá – optická oblast, bílá – Mie oblast, červená - Rayleighova oblast).....	39
Tabulka 7- Technické parametry vysílače.....	42
Tabulka 8 - Hodnoty vypočítané podle Mie pro vlnovou délku 830nm.	45
Tabulka 9- Tabulka hodnot vypočítaných podle Mie pro vlnovou délku 1550nm.	46
Tabulka 10 - Koeficienty korelace stanovené z výpočtů měrného útlumu podle Mie.	47
Tabulka 11 - Hodnoty korelací.....	47
Tabulka 12 - Hodnoty měrného útlumu 1190nm.	48
Tabulka 13 - Hodnoty měrného útlumu 1400nm.	50
Tabulka 14 - Koeficienty aproximace.	51
Tabulka 15 - Vypočítané hodnoty podle Carbonneu.....	52
Tabulka 16 - Srovnání hodnot vypočítaných podle Carbonneu a hodnoty vypočítané v této práci.	52
Tabulka 17 - Srovnání hodnot útlum Mie a Marshall-Palmer 830nm.....	54
Tabulka 18 - Srovnání hodnot útlum Mie a Marshall-Palmer 1550nm.....	55
Tabulka 19 - Statistické hodnoty za období 2009-2011.....	59

1. Úvod

Prvním historickým krokem (rok 1880) k přenosu informace optickým svazkem, které svým charakterem připomínalo optický bezkabelový spoj, bylo zařízení patentované A. G. Bellem a Ch. S. Tainterem. Zdrojem světla u tohoto průkopnického zařízení bylo Slunce. Jeho paprsky ozařovaly systém zrcadel, z nichž jedno bylo modulační. Zrcadlo bylo vychylováno hlasem, což působilo proměnlivé intenzity na přijímači. Změny detekovaného optického výkonu byly v přijímači přeměněny na elektrický proud a pomocí sluchátek opět na lidský hlas. Pokrok optických bezkabelových spojů navázal na úspěchy v oblastech laserové technologie, laserových diod, fotodiod a optických vláken v 60. letech minulého století.

V této době je optický spoj moderní a stále více využívanou variantou komunikace hlavně pro jeho vysoké přenosové rychlosti a kapacity. Rychlý přenos dat je jedním z nejdůležitějších parametrů komunikace a umožňuje uspokojit i nároky na velký počet připojených uživatelů a kvalitní datový tok k těmto koncovým bodům. Dokáže tedy propojit dvě optické sítě beze ztráty kapacity v případech, kde je použití optického kabelu nemožné.

Signál se v případě použití bezkabelové optiky přenáší volným prostorem, nejvíce pak kvalitu přenosu ovlivňují vlastnosti reálné atmosféry. Vliv na optický spoj je předmětem této práce, a to konkrétně jednoho z hydrometeorů – dešťové kapky.

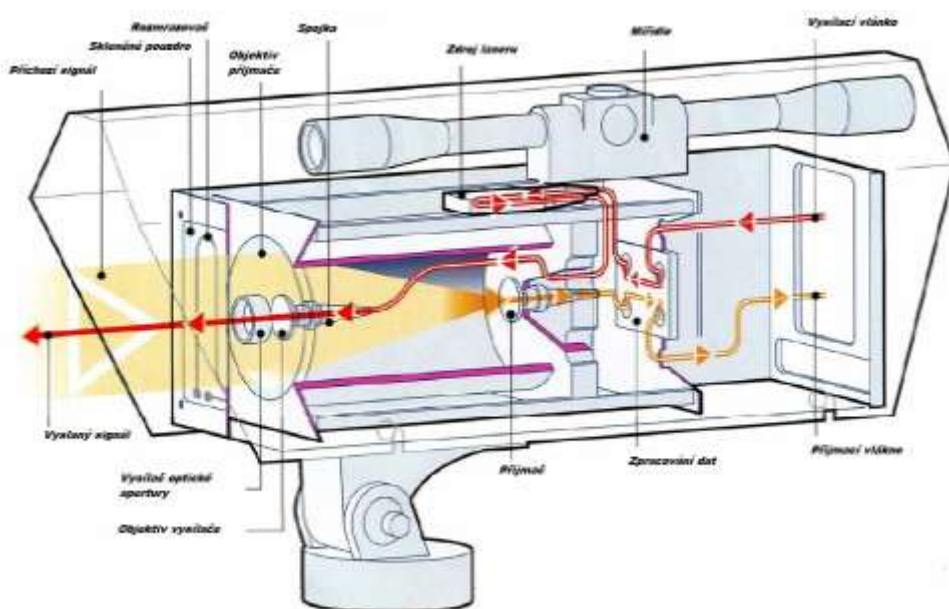
2. Optický bezkabelový spoj (OBS)

Z anglického **Free Space Optics (FSO)**. V oblasti telekomunikací se OBS využívá jako technologie optické komunikace, která využívá světlo šířící se ve volném prostoru k přenášení dat mezi dvěma stacionárními body. Využívá se v případech, kdy je nepoužitelná varianta komunikace pomocí optického kabelu a požadovaná přenosová rychlost je pro mikrovlnný spoj příliš vysoká a kabelový spoj je finančně náročnější.

Jako přenosové médium používá úzký světelný paprsek (optickou nosnou vlnu) o velikosti průměru řádově miliradiány, šířící se ve volné atmosféře, obsahující jeden nebo více vlnově dělených kanálů, jejichž optický výkon je soustředěn do jednoho nebo více úzkých svazků.

Vysvětlení principu je takové, že základem je přijmač a vysílač. Vysílač vyše například pomocí laserové diody signál namodulovaný na optickou nosnou vlnu a přijímač ji optoelektronickým prvkem zpracuje. Signál se přenáší světelným paprskem o vlnové délce 830-1550nm, přičemž nejčastěji se používá vlnová délka 830nm.

Viditelné světlo se pohybuje v pásmu 400–750nm, z čehož vyplývá, že paprsek optického spoje se pohybuje v oblasti infračerveného záření a je *neviditelný*.



Obrázek 1- Konstrukce přijímače/vysílače.

Vliv na člověka je podstatný v případě zásahu lidského oka, kdy může nastat dočasné oslepnutí - v horším případě tento zásah, může na oku způsobit i trvalé následky.

OBS má mnoho výhod, ale současně také řadu nevýhod.

2.1 *Výhody OBS*

- snadná instalace
- licence – spoje jsou nelicencované na rozdíl od radiové komunikace
- šířka pásma odpovídá možnostem vláknové optiky – FSO můžou být článkem optických kabelových sítí
- přenosové rychlosti se nyní pohybují v rozmezí 1,5 Mbps až 2,5 Gbps.
- nízká bitová chybovost
- vysoká bezpečnost dat – díky velmi úzkému svazku paprsků je téměř nemožné signál odposlouchávat. Pro odposlech je nutné do paprsku vstoupit, čímž dojde k přerušení, které se dá snadno na straně přijímače detekovat
- odolnost proti elektromagnetickému rušení
- plně duplexní provoz
- transparentnost protokolu
- vysoká bezpečnost vzhledem k vysoké směrovosti a omezenosti paprsku

Díky těmto vlastnostem se OBS využívá v oblastech, kde je požadována maximální míra zabezpečení (vojenství, státní správa, atd.).

2.2 *Nevýhody OBS*

➤ **Signál OBS může být degradován útlumem**

- atmosférické absorpce
- déšť
- mlha (1 ~ 1000 dB / km útlum)
- sníh (několik dB)

➤ **Větrné turbulence (způsobují redistribuci signálu)**

- znečištění / smog
- sluneční paprsky (např. při západu slunce) – „ovlivňují“ přijímač nebo i vysílač
- nevhodné pro velké vzdálenosti – použití zpravidla do 5 km. Největší efektivita je do 1km.
- nutností je přímá viditelnost – nikdy se ale nevyhneme občasnému přerušení paprsku, např. prolétajícím ptákem.

Technologie se ale vyvíjejí a dnes je již možné provozovat spoj na vzdálenost desítek kilometrů. Přerušení, která vznikají a jsou takového charakteru, že trvají velmi krátce, současné technologie umožňují detekovat a ztracená data opětovně poslat.

2.3 Metody zvýšení spolehlivosti spoje

Pro zvýšení spolehlivosti OBS se začíná uplatňovat řada nových metod:

1. Použití více svazků
2. Použití více optických nosných (WDM)
3. Tvarování svazku
6. Automatické směrování
7. Mikrovlákná záloha (hybridní spoj)
8. Adaptivní optika
9. Polygonální uspořádání sítě

2.4 Atmosférické vlivy na degradaci spoje

Spoj na reálné účinky atmosféry reaguje poněkud rozdílně oproti radiovému spoji. U radiového spoje způsobuje největší útlum hustý déšť, sníh a déšť s kroupami. Na optický spoj má největší vliv mlha a v horských oblastech také nízká oblačnost. To radiovému spoji tolik nevadí, proto se v případě mlhy využívá zálohování OBS paralelním rádiovým spojem.

Mlha je z hlediska složení a prostorového rozvržení velmi blízká oblaku, avšak leží bezprostředně nad zemí a výrazně omezuje viditelnost na vzdálenost kratší než 1 km. Vzniká kondenzací vodní páry v přízemní vrstvě vzduchu. Skládá se z malých vodních kapiček nebo drobných ledových krystalků rozptýlených ve vzduchu. Mezi mlhou a oblakem je rozdíl ve velikostech kapiček vody. Mlha je složena z kapiček o průměru 2-18 μm . Při průchodu paprsku mlhou dochází ke dvěma jevům, které způsobují útlum. Kapičky vody se chovají jako ztrátové dielektrikum a paprsek utlumí vlivem větší hodnoty komplexní permitivity. Dále dochází při průchodu kapičkami k rozptylu paprsku a na aperturu antény přijímače tak dopadne jen část vyslané energie.

Na OBS má také velký vliv déšť a turbulence větru. V oblastech s turbulencemi větru se projevuje nehomogenita indexu lomu a paprsek se může ohýbat. Z tohoto důvodu paprsek nezasáhne přesně aperturu antény přijímače a výsledek se projeví jako útlum.

3. Charakter deště

Děšť je tvořen hydrometeory, které řadíme mezi kapalně vertikální srážky, tedy srážky vypadávající z oblaků.

Děšť hraje hlavní roli v hydrologickém cyklu. Vypařená vlhkost oceánu je přenášena nad jeho částí a nad pevninu. Zde pak tato vlhkost kondenzuje a vznikají tu oblaka, z nichž vypadávají srážky v podobě deště. Tento cyklus uzavírají řeky. Ty odvádějí dešťovou vodu zpět do moří a oceánů.

Jednoduché dešťové prostředí je část troposféry nad rovným zemským povrchem a je vyplněna suchým vzduchem (konstantní šíření bez uvažování kapek deště je $\hat{V} = \frac{2\pi}{\lambda}$).

Součástí tohoto prostředí jsou různě veliké kapky určitého tvaru, padající volným pádem k zemi a jsou vlivem větru unášeny i různě nakláněny a deformovány. Zastoupení dešťových kapek je popsáno tzv. spektrem kapek.

Pádová rychlost kapek dosahuje nejvýše 10 m/s. Dešťové kapky lze považovat za nehybné vzhledem k rychlosti šířícího se optického signálu. Výskyt kapek je náhodným jevem.

Z hlediska interakce kapek s elektromagnetickou vlnou jsou významné kapky od poloměru 0,025 cm. Kapky o poloměru nad 0,35cm jsou málo četné a nestabilní (tříští se).

Homogenní jednoduché dešťové prostředí je taková část dešťového prostředí, kde je v každém elementu prostoru stejné spektrum kapek. [1]

3.1 Fyzikální charakter dešťové kapky

Dešťové kapky mají kulovitý tvar, který je proudícím vzduchem jen nepatrně deformován. V animovaných filmech a na dětských kresbách jsou kapky kresleny s ostrou špičkou, což je tvar odkapávající kapky. V takovémto tvaru kapka ovšem zůstane jen zlomek sekundy. Velké kapky jsou odspodu ploché nebo dokonce lehce prohnuté po směru pádu.

Dešťové kapky mají průměr mezi 0,5 a 7 mm, větší jsou nestabilní a tříští se. Nejčastěji ale z oblaků vypadávají kapky o velikosti 1 až 2 mm. Největší dešťové kapky na Zemi byly zaznamenány nad Brazílií a Marshallovými ostrovy v roce 2004, některé z nich dosahovaly až 10 mm.

Existují dva principy způsobující energetické ztráty šířící se vlny v dešti. Energie se v kapkách částečně absorbuje a mění se v teplo, část energie se z kapky rozptýlí a vyzařuje vlivem indukovaných proudů nežádoucími směry, může vzniknout také nežádoucí stáčení polarizační roviny.

3.2 Tvar dešťových kapek

Představa kapek, že vypadají jako slza nebo pruh je mylná. Tento dojem je zapříčiněn vlastností retinální (sítnicové) perzistence (= stálost, odolnost, přetrvávání oka). Padající dešťové kapky vypadají spíše jako zploštělý elipsoid. Drobné dešťové kapky jsou téměř kulaté a větší kapky jsou ve spodní části zploštělé. Tento tvar je výsledkem rovnováhy mezi protichůdnými silami. Povrchové napětí usiluje o minimalizaci kontaktní plochy mezi vzduchem a dešťovou kapkou. Vzniká tak kulatý tvar. Aerodynamický tlak usiluje o horizontální roztažení kapky a dává jí tak tvar elipsoidu. V letech 1987 a 1990 byl představen komplexnější a přesnější model zakřivení pravidelné koule, založený na váženém součtu kosinu, s využitím následující rovnice:

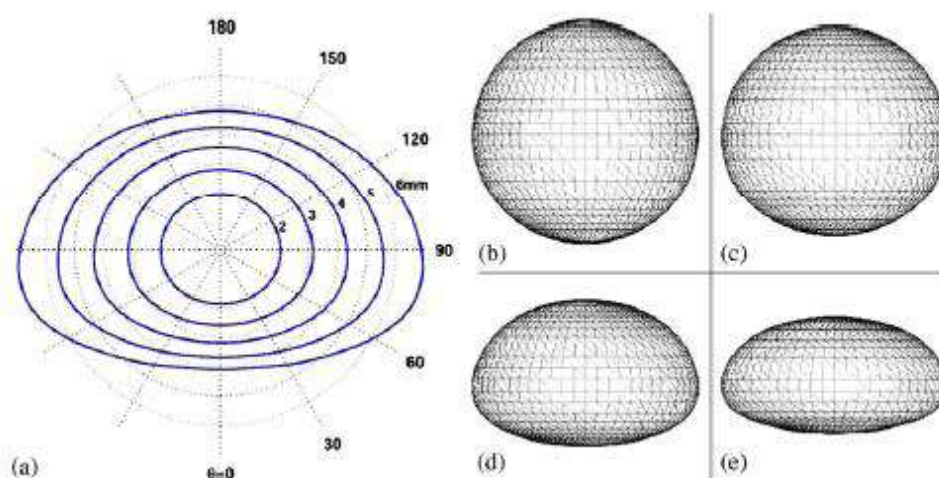
$$r(\theta) = a(1 + \sum_{N=0}^{10} C_n \cos(n\theta)) \quad (3.1)$$

Kde a je poloměr nezakřivené koule, umístěné ve středu hmoty kapky. Úhel θ udává elevaci, při $\theta = 0$ směřuje svisle dolů. C_n je koeficient tvaru, které jsou zpracovány v tabulce.

Tabulka 1- Koeficienty tvaru pro různě velké kapky. Převzato z [2]

a (mm)	Shape co-efficients ($c_n \times 10^4$) for $n =$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5	-28	-30	-83	-22	-3	2	1	0	0	0	0
1.0	-134	-118	-385	-100	-5	17	6	-1	-3	-1	1
3.0	-843	-472	-2040	-240	299	168	-21	-73	-20	25	24
4.5	-1328	-403	-2889	-106	662	153	-146	-111	18	81	31

Dále je uveden na obrázku typický tvar těchto kapek vázaný na vztah a poloměr a .



Obrázek 2 - Tvar kapek. (a) Porovnání tvaru dešťových kapek s poloměry $R = 1, 1.5, 2, 2.5$ a 3 mm. (b) Tvar nezdeformované kulové kapky o poloměru $a=0.5$ mm, (c) $a=1$ mm, (d) $a=3$ mm, (e) $a=4.5$ mm. Zdroj [2].

Určit a uvažovat tvar dešťových kapek je důležité pro jednoznačné odvození rozptylu. Uvažování tvaru kapky je vhodné i k výpočtu depolarizace.

Tabulka 2 - Pádová rychlost dešťových kapek v závislosti na jejich poloměrech. Převzato z [2]

Spherical drops		Ellipsoidal drops			
Radius (mm)	Speed (m/s)	Radius (mm)	Speed (m/s)	Radius (mm)	Speed (m/s)
0.1	0.72	0.5	4.0	2.5	9.2
0.15	1.17	0.75	5.43	2.75	9.23
0.2	1.62	1.0	6.59	3.0	9.23
0.25	2.06	1.25	7.46	3.25	9.23
0.3	2.47	1.5	8.1	3.5	9.23
0.35	2.87	1.75	8.58	3.75	9.23
0.4	3.27	2.0	8.91	4.0	9.23
0.45	3.67	2.25	9.11		

Rychlost pádu dešťových kapek je závislá na poloměru. Hodnoty uvedené v tabulce č. 2 představují rychlosti dešťových kapek, které dosáhly mezní rychlosti při vyrovnání gravitace a třecích sil. Této rychlosti je dosaženo brzy. Je to rychlost, kterou má kapka při dopadu na zem.

Tabulka rozlišuje dva tvary kapek, ale obecnější přístup k pádové rychlosti je takový, že rychlost je přibližně úměrná $D^{0,67}$ (0.67-tá mocnina průměru kapky D) až do maximální rychlosti 9 m/s pro největší kapky, zjednodušeně $\sim \sqrt{D}$. Pohyb směrem dolů kapek lze vůči šíření elektromagnetických vln zanedbat. Kapky se vzhledem k šířící se elektromagnetické vlně jeví jako nehybné objekty.

Dá se hovořit ještě o starších teoriích tvaru kapky. A to z roku 1971 kdy rovnici o tvaru padající kapky odvodil na základě znalosti fyzikálních vlastností vody a vzduchu Pruppacher a Pitter. Teoreticky odvozený tvar kapky byl předpovídán na základě rozboru fotografií. Dle autorů Pruppachera a Kletta v roce 1980 se dají kapky specifikovat podle jejich velikosti.

Velmi malé o poloměru do 0,02 cm jsou **kulové**, větší kapky o poloměru do 0,15 cm se zplošťují a dolní základna je pro větší poloměry rovná, pro poloměry nad 0,15 cm se dolní základna prohýbá dovnitř. Skutečný tvar kapek bývá pro odvození rozptylujících se vlastností elektromagnetických vln různě aproximován. Nejjednodušeji koulí, kdy ale ovšem nelze studovat depolarizační jevy. Dokonaleji se aproximuje rotačním elipsoidem nebo ještě lépe zploštělým sféroidem.

$$a = \sqrt[3]{x_0^2 \cdot y_0} \quad (3.2)$$

Kde a poloměr a x_0 a y_0 poloosy zploštěného sféroidu.

4. Index lomu

Tato kapitola se věnuje jednomu z důležitých faktorů vlivu deště na OBS. Je to bezrozměrná fyzikální veličina popisující šíření světla a všeobecně elektromagnetického záření v látkách.

4.1 Vlnová délka a frekvence vlny

Vstoupí-li elektromagnetická vlna do libovolného hmotného prostředí, její frekvence se nezmění.

Spolu s frekvencí se zachová perioda T , která je s frekvencí f spojena rovnicí

$$T = \frac{1}{f} \quad (4.1)$$

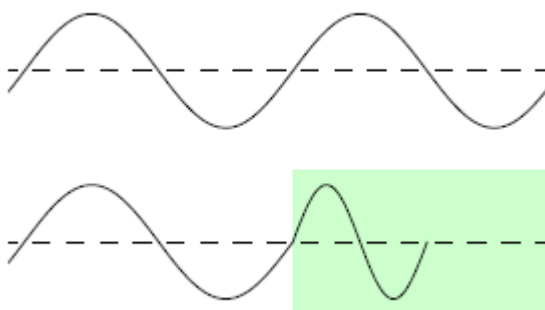
Uhlová frekvence ω , dána vztahem

$$\omega = 2\pi f, \quad (4.2)$$

zůstává také beze změn.

S poklesem fázové rychlosti vlny při vstupu do hmotného prostředí se zmenšuje vlnová délka. Vytváří-li se jednotlivé vlnky ve stejném tempu a vlna se nedostane tak daleko, vlnky musí být kratší.

Závislost indexu lomu na frekvenci vlny nazýváme **disperzí**. Ve většině případů platí, že s rostoucí frekvencí roste index lomu prostředí a tedy klesá fázová rychlost vlny, tzv. **normální disperze**. Při normální disperzi hmotné prostředí více ovlivňuje vlny o vyšších frekvencích.



Obrázek 3 - Průchod vlny z vakua do jiného prostředí.

Hmotné prostředí na obrázku má index lomu roven 2, velikost fázové rychlosti klesla na polovinu, na polovinu se také zkrátila vlnová délka.

Zabýváme-li se vlnami v hmotných prostředích, bývá zvykem namísto vlnové délky λ vlnu charakterizovat její frekvenci f nebo uhlovou frekvenci ω , které jsou pro konkrétní vlnu ve všech prostředích stále stejné.

4.2 Index lomu

Index lomu (značí se n nebo N) je bezrozměrná fyzikální veličina popisující šíření světla a všeobecně elektromagnetického záření v látkách.

V nejjednodušším případě – pro průhledné a čiré látky – lze index lomu n považovat za konstantu, vztahující se k celému rozsahu viditelného světla. V tom případě je index lomu vždy větší než 1 a rychlost šíření světla v dané látce v je určena vztahem:

$$v = \frac{c}{n} \quad (4.3)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu. Takto definovaný index lomu se označuje jako *absolutní index lomu*.

Absolutní index lomu je vztahen k vakuu: udává, kolikrát je velikost rychlosti světla v daném prostředí menší než velikost rychlosti světla ve vakuu.

Absolutní index lomu lze snáze uvést ve fyzikálních tabulkách - stačí výčet prostředí a k němu přiřadit hodnotu absolutního indexu lomu.

U relativního indexu lomu by bylo nutné uvádět různé kombinace prostředí (voda - sklo, voda - plexisklo, voda - olej; sklo - plexisklo, sklo - olej, sklo - voda;).

Index lomu je obecně funkcí druhu látky, hustoty látky, případně i koncentrací jedné látky v druhé. Hodnota indexu lomu ale závisí také na vlnové délce záření procházejícího daným prostředím. Hodnoty indexu lomu transparentních látek lze najít v různých tabulkách.

Šíří-li se světlo z optického prostředí s indexem lomu n_1 , v němž má velikost rychlosti v_1 , do prostředí s indexem lomu n_2 , kde má velikost rychlosti v_2 , platí:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{c}{n_1} : \frac{c}{n_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.4)$$

Při porovnávání dvou optických prostředí o různém indexu lomu rozlišujeme:

1. prostředí opticky řidší - prostředí s menším indexem lomu
2. prostředí opticky hustší - prostředí s větším indexem lomu

Tak např. voda je opticky hustší než vakuum (má ve srovnání s vakuem větší index lomu), ale je opticky řidší než většina běžných skel (tj. voda má menší index lomu než běžná skla).

Při přechodu z opticky hustšího prostředí do prostředí opticky řidšího je relativní index lomu menší než jedna. Naopak při přechodu z prostředí opticky řidšího prostředí do prostředí opticky hustšího je relativní index lomu větší než jedna.

Při průchodu světelného paprsku dešťovou kapkou se index lomu skokově mění. Dochází k rozptylu paprsku a k absorpci v molekulách vody. Index lomu je zásadní veličinou, která je uvažována při zkoumání prostupu světelného paprsku vodou.

Tabulka 3 - Index lomu pro vlnové délky 830nm a 1550nm v různých teplotách.

Teplota	830nm	1550nm
Hale et al. 1973 - 25 °C	n = 1.329 dn/dλ = -0.920 μm ⁻¹	n = 1.318
Daimon et al. 2007 - 24.0 °C	n = 1.32773 dn/dλ = -0.0165 μm ⁻¹	n = 1.32322 dn/dλ = -0.0150 μm ⁻¹
2007 - 21.5°C	n = 1.32797 dn/dλ = -0.0165 μm ⁻¹	n = 1.32344 dn/dλ = -0.0151 μm ⁻¹
2007 - 20.0 °C	n = 1.3281 dn/dλ = -0.0166 μm ⁻¹	n = 1.32356 dn/dλ = -0.0152 μm ⁻¹
2007 - 19.0 °C	n = 1.32819 dn/dλ = -0.0166 μm ⁻¹	n = 1.32364 dn/dλ = -0.0152 μm ⁻¹

[3]

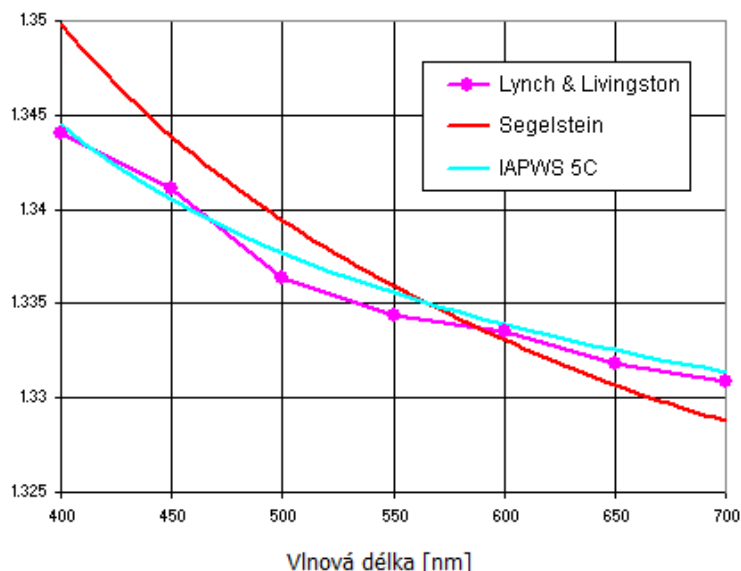
Z tabulky je vidět, že hodnoty indexu lomu se s teplotou mění jen o tisícinky u obou vlnových délek. Tyto změny nejsou tak výrazné a lze tedy pro výpočty útlumu používat průměrnou hodnotu. Stejně závěry jsou patrné i z hodnot vypočtených derivací indexu podle vlnové délky. Ani tyto hodnoty se od sebe výrazně neliší.

Pokud budeme používat vlnovou délku jinou než sloupcovou (např. 830 nm) můžeme změnu spočítat z derivace uvedené v tabulce.

Nejlepším zdrojem dat index lomu je Piotr Flatau v REFLIB (Refractive Index Library) dostupných na [4].

4.3 Index lomu jako funkce vlnové délky

V odborné literatuře se názory na to, že index lomu je prakticky známá hodnota a je udaná s velkou přesností, dost liší. Jak je ukázáno na obrázku odborné literatury se v této závislosti významně rozcházejí.



Obrázek 4 - Index lomu vody jako funkce vlnové délky. Použité zdroje[6] [5].

4.4 Frekvenční závislost indexu lomu v optickém pásmu

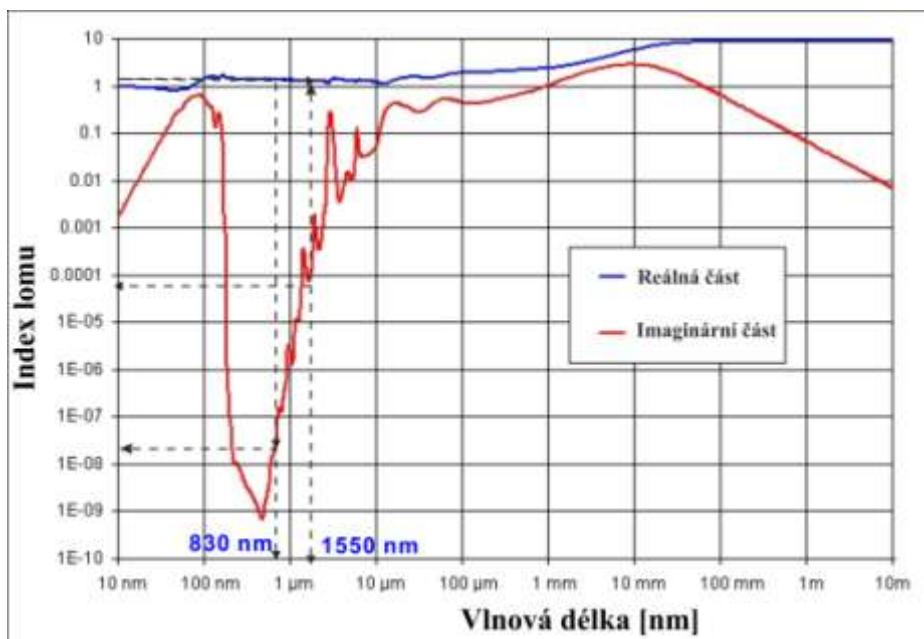
Komplexní index lomu je uměle vytvořená veličina - abychom dobře reprezentovali ztráty - proto je frekvenčně závislý.

Jako všechny optické konstanty je tedy i index lomu obecně komplexní funkcí frekvence (resp. vlnové délky),

$$N(\omega) = n(\omega) + i \kappa(\omega), \quad (4.5)$$

má tedy reálnou a imaginární část.

Reálná část tohoto čísla je "obyčejný" index lomu, zatímco imaginární část je mírou absorpce. Pokud je imaginární část nulová, látka nepohlcuje (neabsorbuje) světelné paprsky.



Obrázek 5 - Komplexní index lomu vody pro vlnové délky od 10 nm do 10m Převzato z [6].

Imaginární část indexu lomu může být ignorována ve viditelné oblasti spektra (např. 400 až 700 nm), Obrázek zdůrazňuje, že toto zjednodušení nelze uplatnit na ultrafialové a infračervené vlnové délky.

4.4.1 Reálná část

Látky se často vyznačují přítomností několika oblastí průhlednosti v elektromagnetickém spektru. V každé z nich je $n(\omega)$ téměř konstantní, přičemž tyto konstantní hodnoty rostou směrem k větším frekvencím.

Frekvenčně závislý index lomu popisuje rychlost šíření světla v látce, avšak navíc je třeba rozlišovat mezi fázovou a grupovou rychlostí. Zatímco fázová rychlost popisuje rychlost šíření ploch se stejnou fází vlnění, grupová rychlost se vztahuje k obálce amplitudy, neboli k rychlosti šíření signálu (informace).

Fázová rychlost

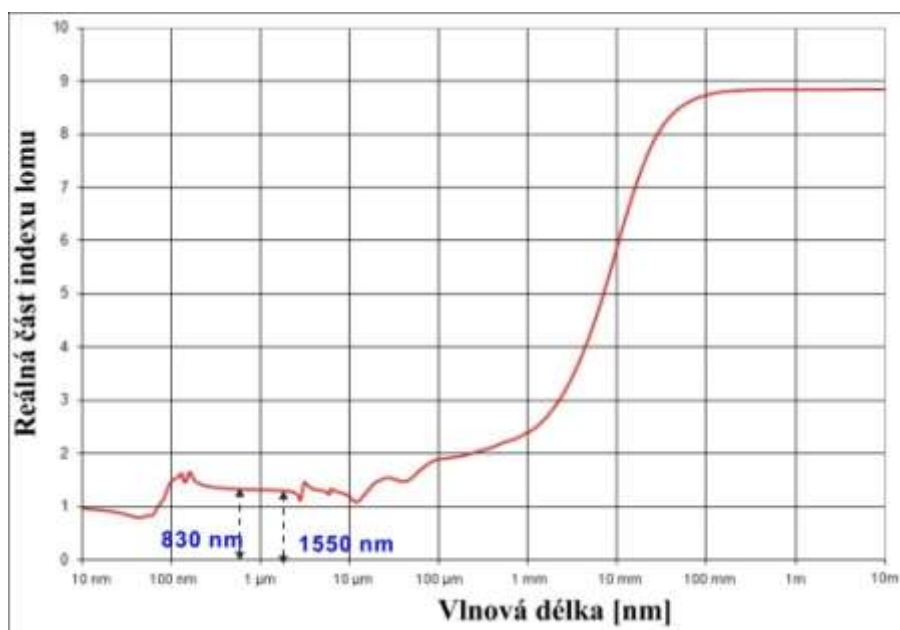
$$v(\omega) = \frac{c}{n(\omega)} \quad (4.6)$$

a grupová rychlost

$$v_g(\omega) = \frac{c}{n(\omega)} + \omega \frac{dn}{d\omega} \quad (4.7)$$

(jmenovatel se také označuje pojmem grupový index lomu).

Grupová rychlost obecně závisí na vlnové délce, takže vlny různých frekvencí se mohou šířit různě rychle. Není-li vlna monofrekvenční, tj. skládá-li se z více harmonických postupných vln o různých frekvencích, pak vlny vytvářejí skupiny – grupy, kterým se v češtině říká vlnový balík nebo vlnové klubko. Grupová rychlost udává rychlost šíření celého balíku. Vlny s větší fázovou rychlostí zdánlivě vznikají na konci balíku, šíří se po něm dopředu a na předním konci zanikají. Grupová rychlost nemůže přesáhnout hodnotu c . Naproti tomu fázová rychlost, která není spojena s přenosem informace, může nabývat téměř libovolných hodnot, vyšších než c nebo dokonce záporných.



Obrázek 6 - Hodnoty podle Segelstein pro reálnou část indexu lomu vody vlnových délek od 10 nm do 10m.

Obr.6 je zvětšená verze obr. 5 a ukazuje pouze reálnou část indexu lomu dané Segelsteinem (pomocí lineárního měřítka pro vertikální osu).

4.4.2 Imaginární část

Index absorpce, $\kappa(\omega)$ udává míru útlumu procházejícího záření v dané látce pohlcením (absorpcí). Lze z něj určit např. absorpční délku $d_a(\omega)$ pomocí vztahu

$$d_a = \frac{c}{2\omega\kappa} \quad (4.8)$$

Urazí-li v dané látce záření o úhlové frekvenci ω vzdálenost d_a , poklesne jeho intenzita na hodnotu $1/e$, tj. asi na 36,8 %.

Tabulka 4 - Index lomu v komplexním tvaru.

	reálná	imaginární
1550nm	1,310923	$1,3488 \cdot 10^{-4}$
830nm	1,325457	$2,041 \cdot 10^{-7}$

[3]

Komplexní tvar indexu lomu je tedy $1,325457 + i 2,041 \cdot 10^{-7}$.

5. Útlum deštěm a jeho výpočet

Děšť je nejčastější typ atmosférických srážek v mírných klimatických podmínkách. To způsobuje různé degradace při frekvencích vyšších než 10 GHz, kde vlnová délka se blíží k velikosti kapek.

Zajímáme se o útlum vln procházejících deštěm, depolarizaci, rozptyl nežádoucími směry, možné přerušení, a také o odraz od dešťového jádra.

Útlum deštěm je způsoben absorpcí energie dešťovou kapkou (např. se energie absorbuje na teplo) a rozptylem různými směry. Přesné řešení okamžitého útlumu uvažuje každou kapku odděleně. Uvažují se její vlastnosti, a to je její velikost, tvar a index lomu (komplexní index lomu).

5.1 Útlum atmosféry

Atmosféra je plynná substance obepínající zemské těleso a tvořící přechod od zemského tělesa do meziplanetárního prostoru. Atmosféru členíme podle tří kritérií:

- změny teploty vzduchu s výškou;
- elektrických vlastností vzduchu; a
- z hlediska vlastnosti promíchávání vzduchu.

Hlavními plyny v atmosféře jsou dusík N₂ (78,04 %), kyslík O₂ (20,95 %), argon Ar (0,93 %) a oxid uhličitý CO₂ (r. 2003: 0,0376 %; r. 1968: 0,03 %; r. 1800: 0,026 %). Roční nárůst CO₂ je 0,00016 % (1,6 ppm).

Paprsek se šíří atmosférou, jejíž vlastnosti podstatně ovlivňují kvalitu přenosu. Působením povětrnostních podmínek se mění index lomu atmosféry. Při šíření světelného paprsku atmosférou dochází k útlumu a fluktuacím.

5.2 Měrný útlum deštěm

Měrný útlum způsobuje několik aspektů:

- útlum absorpcí
- útlum rozptylem

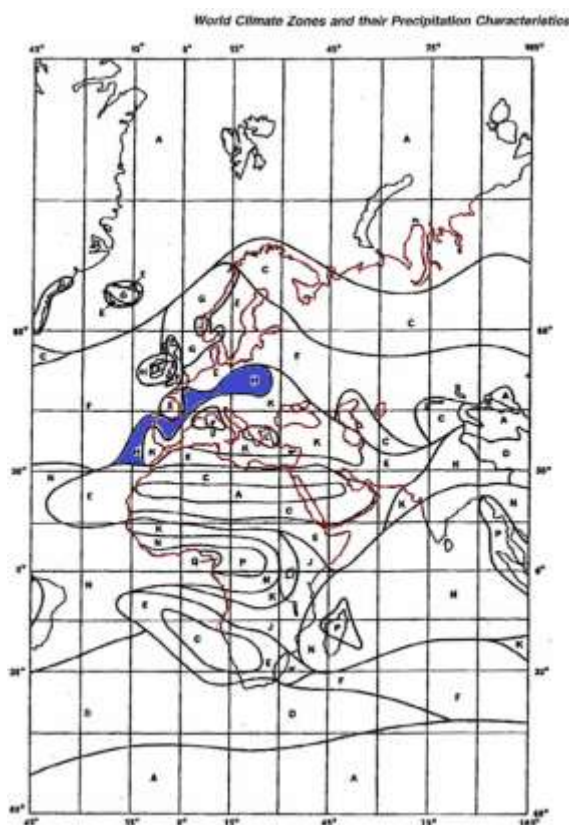
Jakmile paprsek prochází skrz kapku vody, část energie se rozptýlí do všech stran a část energie se ztratí přeměnou na teplo, tzn. že dojde k částečné absorpci.

U výpočtu měrného útlumu se setkáváme se zanedbáváním vícenásobného rozptylu elektromagnetických vln na dešťových kapkách. Dochází totiž k tomu, že jednou rozptýlené pole je asi o řád slabší než pole původní. Pro vyšší kmitočty (zhruba nad 30 GHz) je vlnová délka srovnatelná s velikostí dešťové kapky a predikce útlumu by měla zahrnout i vícenásobný rozptyl a měla by se s rozptylem vypořádat. V praxi přesnost výpočtu s jednoduchým rozptylem můžeme brát jako dostačující.

5.3 Předpověď útlumu deštěm

Obecně se rozdělení dešťů dá provádět na základě univerzální křivky publikované v roce 1988 institucí CCIR, nyní ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector). Tato křivka rozděluje celý svět do 14 dešťových pásem – zón. Pro tyto pásma má CCIR k dispozici distribuční křivky okamžitých intenzit dešťů.

Nejnovější materiály ITU-R již používají novější a přesnější rozdělení světa do dešťových zón. Toto starší používám hlavně z instruktivních důvodů.



Obrázek 7 - Rozdělení klimatických zón (14) Evropa a Afrika podle ITU-R.

Území naší republiky bylo zařazeno do zóny H. Např. hladině překročení 0,01 % v zóně H odpovídá intenzita srážek 32 mm/h.

Ústav fyziky a atmosféry Akademie věd České republiky provádí na základě modelů a vedení pana doc. Ing. Fišera Csc. rozsáhlý výzkum dešťů a jeho intenzity. Toto měření provádí pomocí přístrojů tzv. člunkových srážkoměrů (laicky řečeno překlopných dešťoměrů), které mají vynikající parametry citlivosti. Hodnoty citlivosti se pohybují v hodnotách 0,2 nebo 0,1 mm na jedno překlopení člunku. Což odpovídá intenzitě srážek 12mm/h nebo 6 mm/h.



Obrázek 8 - Mechanismus člunkového srážkoměru.



Obrázek 9 - Umístění srážkoměru na observatoři ČHMU Hradec Králové.



Obrázek 10 - Elektronika srážkoměru.

Pod pojmem předpověď útlumu deštěm rozumíme časovou distribuční funkci útlumu deštěm na dráze spoje. Uvádí se i několik synonym pro tento pojem a těmi jsou distribuční funkce, rozdělení útlumu deštěm nebo predikce útlumu deštěm apod.

Slouží k návrhu parametrů spoje, které odpovídají požadované statistické spolehlivosti spoje. Jedná se o řadu dvojic, kterou tvoří číselné hodnoty útlumu a odpovídající pravděpodobnost převýšení (anglicky „exceedance probability“).

Množství předpovědních metod deterministicky převažuje prostorový průběh intenzity srážek k intenzitě ve středu srážkové oblasti. Toto se využívá zejména pro statistické výpočty, kde vlivem centrálního limitního teorému jsou jednotlivé odchylky od modelu eliminovány. Z vlastních měření nebo z publikací víme, že např. intenzita srážky 10mm/h je v určitém místě překročena s pravděpodobností 0,1% a uvažovaný model přiřadí intenzitě srážky $R = 10 \text{ mm/h}$ její dráhový profil $R(l)$.

Určení celkového útlumu deště nám podstatně ulehčuje práci s výpočty. Nemusíme znát okamžitý dráhový profil intenzity srážek, který se složitě zjišťuje, ale stačí znalost rozdělení intenzity srážek v konkrétním bodě oblasti, kde je umístěn směrový spoj.

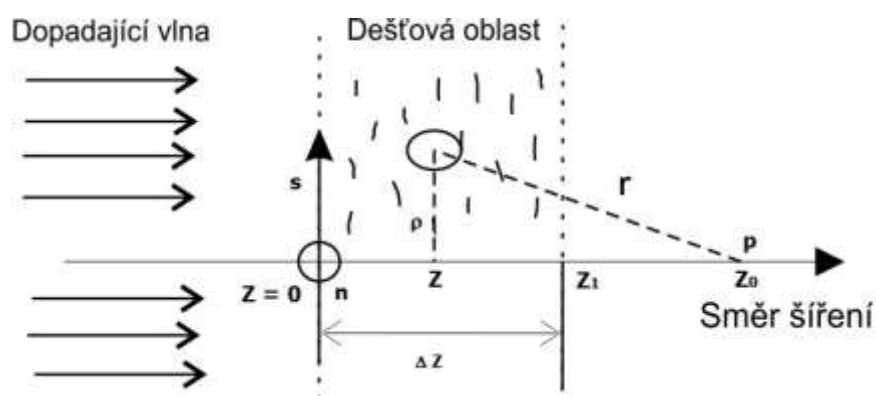
5.4 Odvození měrného útlumu

Při odvození předpokládáme, že dopadající vlna je rovinného typu, což je aproximace kulové vlny ve velké vzdálenosti od vysílače. Proto jí můžeme považovat za vlnu rovinnou.

Vzorce pro měrný útlum vychází z teorií podle Rogerse a Olsena (1976).

Nejprve je nutné specifikovat pomocný pojem dešťová oblast.

Dešťová oblast je ohraničená dvěma rovnoběžnými rovinami kolnými k ose z , která následuje směr šíření rovinné elektromagnetické vlny. Kolmé roviny protínají tuto osu v bodech $z = 0$ a $z = z_1$. Na ose je umístěn pozorovací bod P o souřadnicích $(0, 0, z_0)$. Přičemž platí, že souřadnice z_0 je mnohonásobně větší než souřadnice z_1 . V dešťové oblasti předpokládáme prostředí o permitivitě a permeabilitě vakua.



Obrázek 11 - Dešťová oblast.

Dále uvažujeme

$$\rho^2 = n^2 + s^2 \leq F^2 \quad (5.1)$$

kde F je poloměr 1. Fresnelovy zóny

ρ je vzdálenost kapky od osy z .

Pro doplnění pojmů jednoduše definujeme, co je to Fresnelova zóna. Je to prostor, kterým se při šíření na přímou viditelnost šíří elektromagnetická energie a jakákoliv dráha $d_1 + d_2$ není delší než $\frac{\lambda}{2}$ proti nejkratší možné dráze. Ve Fresnelově zóně by neměly být žádné překážky.

Výpočet poloměru Fresnelovy zóny prvního řádu:

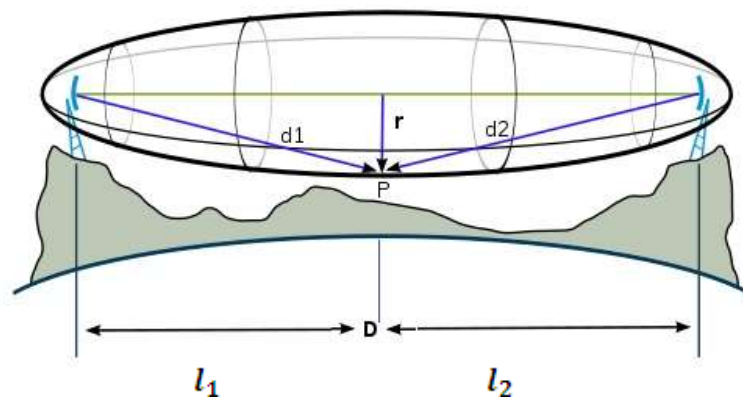
$$r = \sqrt{\lambda \frac{l_1 l_2}{d_1 + d_2}} \quad (5.2)$$

kde:

λ vlnová délka

d_1 vzdálenost od jedné antény

- d_2 vzdálenost od druhé antény
- l_1 vzdálenost od jedné antény k bodu pozorování
- l_2 vzdálenost od druhé antény k bodu pozorování.



Obrázek 12 - Fresnelova zóna.

Pro „tloušťku“ dešťové oblasti platí označení Δz a koeficient přenosu pro tuto oblast $\tau(\Delta z)$.

Pro intenzitu elektromagnetického pole $E(p)$ v bodě pozorování platí (obrázek č.11)

$$E(z_o) = E^s(z_o) + E^o(z_o) \quad (5.3)$$

$$E^s(z_o) = E^i(z) \mathbf{f}(D) \frac{e^{jkr}}{r} \quad (5.4)$$

$$E^i(z) = E^i(0) e^{jkz} \quad (5.5)$$

$$E^s(z_o) \sim E^i(0) \mathbf{f}(D) \frac{e^{jkr}}{r} \quad (5.6)$$

$$E^o(z_o) = E^i(0) e^{jkz_o} \quad (5.7)$$

$$E^s(z_o) \sim E^o(z_o) f(D) \frac{e^{jk(r-z_o)}}{z_o} \quad (5.8)$$

$$r = (\rho^2 + z_o^2)^{0.5} \sim z_o \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\rho^2}{z_o^2}\right) \quad (5.9)$$

$$r - z_o \sim \frac{\rho^2}{2z_o} \quad (5.10)$$

$$E(z_o) = E^o(z_o) + E^o(z_o) \int_0^\infty \left\{ \int_0^{z_1} \mathbf{f}(D) N(D) \mathbf{I} dz \right\} dD \quad (5.11)$$

$$E(z_o) = E^o(z_o) \left[1 + j \frac{2\pi}{k_o} z_1 \mathbf{C}\right] \quad (5.12)$$

$$\mathbf{C} = \int_0^\infty \mathbf{f}(D) N(D) dD \quad (5.13)$$

Uvažujeme systém nekonečně mnoho za sebou řazených vrstev o tloušťce Δz jejíž výsledným koeficientem přenosu je dán součinem individuálních koeficientů přenosu.

$$\tau = \left\{ \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left(1 + j \frac{2\pi}{k_o} \Delta z \mathbf{C}\right)^{\frac{1}{\Delta z}} \right\}^L = e^{j \frac{2\pi}{k_o} \mathbf{C} L} \quad (5.14)$$

Pro měrný útlum α byl odvozen vzorec dle [2]

$$\alpha_{h,v} = 8.686 \cdot 10^3 \cdot \frac{2\pi}{k} \cdot \text{Im} \int f_{h,v}(D) \cdot N(D) dD \quad (5.15)$$

kde

$f_{h,v}$ je komplexní rozptylová funkce dešťové kapky, udávající vztah mezi dopadající a rozptýlenou elektromagnetickou vlnou

D je efektivní průměr dešťové kapky [mm]

k je vlnové číslo [m^{-1}]

$N(D)$ je spektrum dešťových kapek (drop size distribution, DSD)

Pro průměrné deště lze spektrum deště aproximovat Marshall-Palmerovým vztahem (4.16) s parametrem R (intenzita deště – rain rate, rain intensity)

$$N(D, R) = 8000 \cdot e^{\frac{-4,1 \cdot D}{R^{0,21}}} \quad (5.16)$$

$N(D)dD$ udává počet kapek o efektivním průměru kapky v intervalu (D až $D+dD$) v jednotce objemu. Běžná jednotka je cm^{-4} .

Praxí bylo ověřeno několik důležitých přibližných tvrzení o útlumu deštěm:

- útlum na horizontální polarizaci je horší (vyšší), než na vertikální polarizaci
- útlum spojený s kruhovou polarizací je dán aritmetickým průměrem útlumu na vertikální a horizontální polarizaci
- útlum počítaný pro kulový model dešťových kapek (podle teorie Mie) odpovídá přibližně útlumu na kruhové polarizaci.

5.5 Okamžitý celkový útlum deštěm

Okamžitý celkový útlum se označuje A , na spoji je dán dráhovou integrací útlumu měrného

$$A = \int_0^L \alpha(l) dl \quad (5.18)$$

kde L je délka směrového optického spoje.

Tento model pro výpočet útlumu se používá nejčastěji pro statistické výpočty. Obvykle pro roční nebo v horším případě pro měsíční předpověď útlumu.

6. Dohlednost

Odborná literatura uvádí dvě definice, které popisují dohlednost. Je tedy definována v prvním případě jako „vzdálenost, v níž je kontrast daného objektu a jeho pozadí právě roven prahu kontrastové citlivosti oka pozorovatele.“ [7]

V druhém případě je známa definice tak, že dohlednost je „vzdálenost x , kde zdánlivý kontrast $C(x)$ klesne na 2 %“ [8], kde $C(x)$ je zdánlivý kontrast zdroje pozorovaného ve vzdálenosti x :

$$C(x) = \frac{I_z(x) - I_p(x)}{I_p(x)}, \text{ kde} \quad (6.1)$$

$I_z(x)$ a $I_p(x)$ jsou svítivosti zdroje a pozadí ve vzdálenosti x .

Odborná literatura k druhé definici uvádí také hodnotu 5 %. Z historických důvodů se dohlednost stále dá měřit subjektivně z místa pozorovatele. Tento subjektivní pocit je dán zkušeností a je měřen v pravidelných časových intervalech.

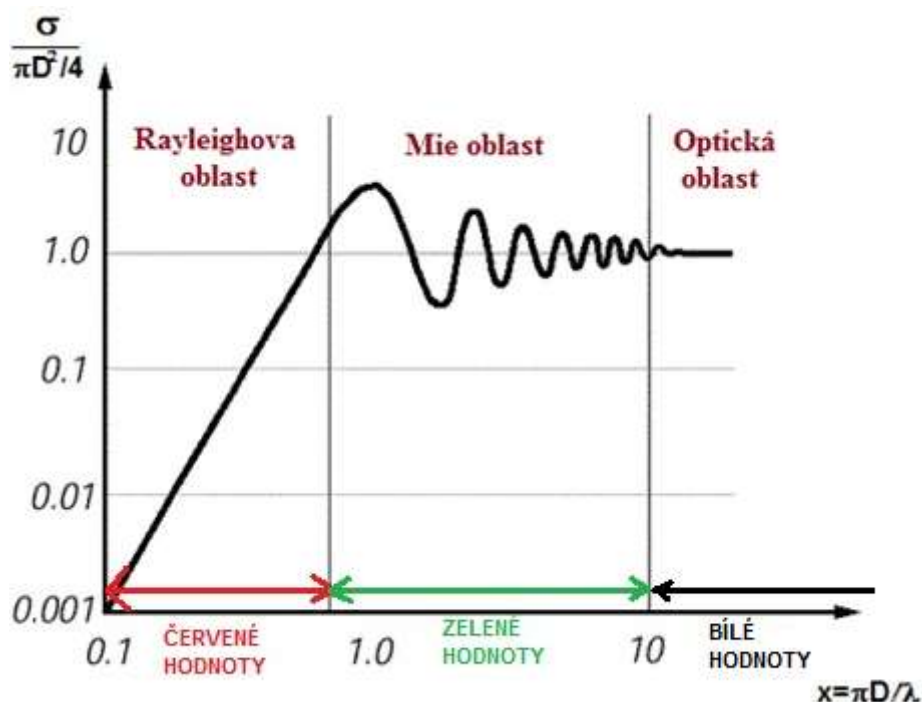
Pokrokem ve vývoji elektroniky byly vyvinuty přístroje na měření dohlednosti. Nejznámější v této době je firma Vaisala, která přišla na trh s řadou přístrojů s označením PWD (Present Weather Detector). Tyto přístroje pracují na principu rozptylu optického signálu v kapičkách vody obsažených ve vzduchu. Skládají se z vysílače a přijímače, jejichž osy jsou vzájemně vychýleny v horizontálním i vertikálním směru. Pracuje zjednodušeně tak, že pokud je jasné počasí, paprsek z vysílače se nijak nerozptýlí, přijímač nezaznamená žádný rozptýlený signál a vyhodnotí maximální dohlednost. Pokud se objeví mlha, optický signál se o kapičky vody rozptýlí. Čím je nižší dohlednost, tím víc se signál rozptýlí a tím větší výkon dopadne na senzor přijímače.



Obrázek 13 - Přístroj PWD21 od firmy Vaisala (VAISALA, 2005)

7. Oblasti aproximace pro zjednodušený výpočet útlumu (rozptylu)

7.1 Zpětný rozptyl



Obrázek 14 - Aproximační oblasti pro zpětný rozptyl

Efektivní odrazná plocha je mírou schopnosti cíle odrážet radarové signály ve směru k přijímači, tj. míra podílu energie zpětného rozptylu na steradián (jednotkový prostorový úhel), ve směru na radar (od cíle) s hustotou výkonu, který je zachycen na cíl.

[8]

Poměr efektivní odrazné plochy σ se skutečnou velikostí dešťové kapky se mění v závislosti na veličině „velikostní parametr“ x , což je poměr velikosti průměru dešťové kapky D s vlnovou délkou záření λ .

$$x = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \quad (7.1)$$

Diagram zpětného rozptylu (Obr. 14) je rozdělen na 3 oblasti. Pokud je průměr kapky mnohem menší než vlnová délka ($x \ll 1$), je efektivní odrazná plocha v porovnání s velikostí průměru kapky lineárně závislá na parametru x . Z lineární závislosti můžeme tedy vycházet pro výpočet jednoduchých vztahů útlumu. Tato oblast se nazývá Rayleighova oblast, pojmenovaná po britském fyzikovi Lordu Rayleighovi. Platí zde matematický model Rayleighova rozptylu.

Naopak pokud bude průměr kapky mnohem větší než vlnová délka, je efektivní odrazná plocha rovna skutečnému obsahu kapky. K tomu dochází hlavně při velmi krátkých vlnových délkách, tato oblast se tedy uplatňuje v optické komunikaci.

Z hlediska výpočtu je nejvíce problematickou oblastí ta, kde průměr kapky zhruba odpovídá vlnové délce.

Tabulka 5 - Zpětný rozptyl – hodnoty parametru x (červená – Rayleigho oblast, zelená – Mie oblast, bílá – optická oblast).

D[mm] \ λ [nm]	550	830	1190	1550	250000
děšť					
0,1	571	379	264	203	1,26
0,5	2856	1893	1320	1013	6,28
1	5712	3785	2640	2027	12,57
4	22848	15140	10560	8107	50,27
7	39984	26495	18480	14188	87,96
mlha a oblak					
0,002	11,42	7,57	5,28	4,05	0,03
0,01	57,12	37,85	26,40	20,27	0,13
0,02	114	75,70	52,80	40,54	0,25
0,06	343	227	158	122	0,75

Z tabulky pro zpětný rozptyl lze vidět, že rozptyl OBS signálu na dešťových kapkách se pohybuje v „optickém“ pásmu. Proto pro výpočet rozptylu použijeme již známé vzorce. Zeleně zvýrazněné hodnoty parametru x vypovídají o tom, že pro nejmenší průměr mlžných nebo oblačných kapek se rozptyl pohybuje v oblasti Mie pro vlnové délky nad 830nm. Rozptyl se zvyšující se vlnovou délkou snižuje. Na frekvenci 12 GHz se pohybuje vypočtený rozptyl pro mlžné a oblačné kapičky v hodnotách řádově mnohem menších než 1 ($\ll 1$, tj. $< 0,1$), tedy v Rayleighově oblasti (červeně zvýrazněné hodnoty). To přináší velké zjednodušení ve výpočtech zpětného rozptylu.

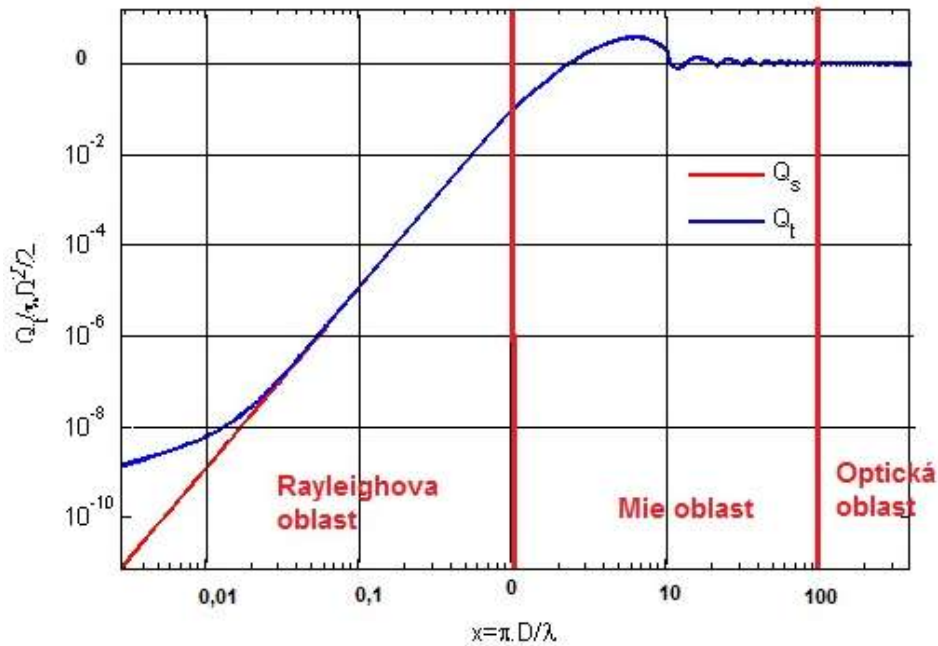
7.2 Dopředný rozptyl

Celková ztrátová plocha Q_t (total absorption cross-section) násobená výkonem dopadajícím na kapku se rovná celkovému ztracenému výkonu záření. Jedná se tedy o dopředný rozptyl.

Celkovou ztrátovou plochu lze vyjádřit jako součet [10]

$$Q_t = Q_s + Q_a \quad (7.2)$$

kde Q_s je **odrazná plocha**, která vyjadřuje výkon rozptýlený a Q_a je **absorpční plocha**, která vyjadřuje výkon ztracený absorpcí v částici.



Obrázek 15 - Dopředný rozptyl - celková ztrátová plocha Q_t , odrazná plocha Q_s , absorpční plocha Q_a [11].

Po shlédnutí obou diagramů můžeme konstatovat, že jsou si velice podobné. Můžeme tedy konstatovat, že oba parametry - efektivní odrazná plocha σ a celková ztrátová plocha Q_t - jsou závislé na hodnotě x . Rozdíl nastává jen v optické oblasti x , kdy odpovídá vztahu (7.3), který je přibližný.

$$Q_t \approx \frac{\pi \cdot D^2}{2} \quad (7.3)$$

Z tohoto opět vyplývá, že rozptyl určený pomocí Q_s způsobuje na vlnových délkách většinu celkového útlumu. Pro hodnoty $x > 0,1$ se průběhy Q_s a Q_t prakticky překrývají, proto je můžeme považovat za shodné. Teprve až pro rádiové kmitočty ($x < 0,1$) se začne projevovat i absorpce.

Tabulka 6 - Dopředný rozptyl – hodnoty parametru x (žlutá – optická oblast, bílá – Mie oblast, červená - Rayleighova oblast).

D[mm] \ λ [nm]	550	830	1190	1550	250000
děšť					
0,1	571	379	264	203	1,26
0,5	2856	1893	1320	1013	6,28
1	5712	3785	2640	2027	12,57
4	22848	15140	10560	8107	50,27
7	39984	26495	18480	14188	87,96
mlha a oblak					
0,002	11,42	7,57	5,28	4,05	0,03
0,01	57,12	37,85	26,40	20,27	0,13
0,02	114	75,70	52,80	40,54	0,25
0,06	343	227	158	122	0,75

Z tabulky vyplývá, že dešťové kapky v rámci dopředného rozptylu se pohybují v optické oblasti (žlutě zvýrazněné hodnoty). Také je vidět, že naproti zpětnému rozptylu jsou mlžné a oblačné kapky nejmenších průměrů v Mie oblasti.

7.3 Dopředné rozptylové funkce $\hat{S}(x, \hat{n})$

Dopředné rozptylové funkce udávající intenzitu rozptýlené energie podle vzorce:

$$\hat{E}_s = \hat{E}_i \cdot \hat{S}(x, \hat{n}) \frac{e^{-jkr}}{jkr}, \quad (7.4)$$

kde \hat{E}_s je rozptýlená elektrická intenzita [V/m]

\hat{E}_i je dopadající elektrická intenzita [V/m]

x je parametr,

$$x = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \quad (D \text{ je průměr kapky, } \lambda \text{ je vlnová délka})$$

\hat{n} je komplexní index lomu

k je vlnové číslo, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

[10]

Algoritmus pro výpočet $\hat{S}(x, \hat{n})$ je založen na Besselových funkcích. Je volně přístupný na internetu jako jednoduchá aplikace. Rozptylová funkce $\hat{S}(x, \hat{n})$ je závislá na parametru x .

Rozptylové funkce lze dostat při použití vztahu:

[12]

$$\hat{f}(D) = -j \frac{\lambda}{2\pi} \hat{S}^* \quad (7.5)$$

Funkce $\hat{f}(D)$ má parametr D jedná se o průměr kapky. Příspěvek k útlumu kapek s určitou velikostí lze vyjádřit součinem $\hat{f}(D) \cdot N(D) \cdot dD$. Integrováním přes všechny průměry kapek se dostáváme k vyjádření měrného útlumu vlivem rozptylu o dešťovou kapku, což je hlavní hledisko způsobující útlum: [12]

$$\alpha_0 = 8.686 \cdot 10^3 \cdot \lambda \cdot \text{Im} \int \hat{f}(D) \cdot N(D) dD \quad [\text{dB/km}] \quad (7.6)$$

K určení měrného útlumu pomocí tohoto vztahu je tedy potřeba znát spektrum kapek $N(D)$. Pokud se nelze spokojit s určením průměrného měrného útlumu použitím průměrného spektra kapek, je třeba znát aktuální spektrum.

Pro celkovou ztrátovou plochu Q_t platí vztah [13]:

$$Q_t = \frac{\lambda^2}{2\pi} * \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} ((2n+1) \cdot (a_n + b_n)^*) \quad (7.7)$$

kde a_n a b_n jsou Mieovy koeficienty [14] z jeho algoritmu pro výpočet rozptylové funkce. Mezi Q_t a $\hat{S}(x, \hat{n})$ je vztah popsán následující rovnicí

$$Q_t = \frac{4\pi}{k^2} \cdot \text{Re} \hat{S} \quad (7.8)$$

kde k je vlnové číslo $k=2\pi/\lambda$.

Měrný útlum lze z Q_t určit opět integrálem přes všechny průměry kapek. [15]

$$\alpha_0 = 4.343 \int Q_t(D) \cdot N(D) dD \quad [\text{dB/km}] \quad (7.9)$$

8. Experimentální optický spoj

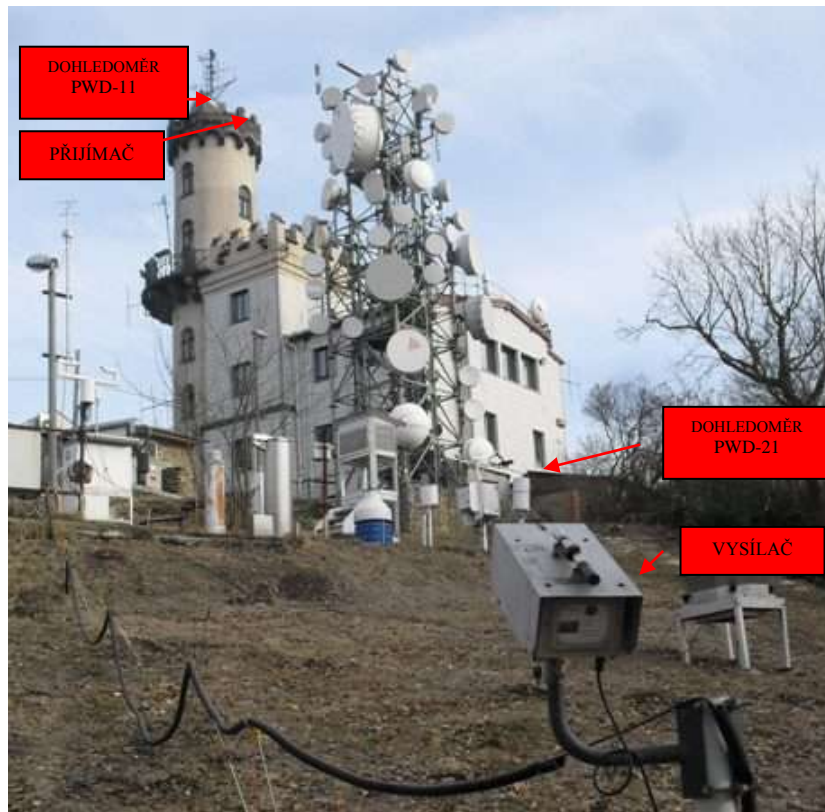
8.1 Umístění spoje

V této práci budou zpracována data z experimentálního bezkabelového optického spoje ATMO TL - 02_DUAL zkonstruovaného na VUT v Brně. Byl vyroben přímo za účelem měření útlumu, protože bezdrátové spoje běžně dostupné na trhu zpravidla neposkytují data o přijatém výkonu.

Spoj je umístěn na Milešovce, nejvyšší hoře Českého středohoří s nadmořskou výškou 837 m.n.m. Milešovka má výrazný kuželovitý tvar a převyšuje okolní terén o 400 m. Tyto aspekty jsou hlavními důvody, proč je to jedno z míst s nejvýraznějším počasím v České republice, a kde se počasí dokáže poměrně rychle měnit. Milešovka má hned několik primátů [UFA] – největrnější místo v ČR s průměrným větrem přibližně 8.5 m/s a s bezvětřím pouze 8 dní v roce, nejčastěji zaznamenávané bouřky atd. Velmi často se zde vyskytují i husté mlhy, což dělá z této hory ideální místo pro studium vlivu atmosférických jevů na optický spoj.

V roce 1903-1904 byla na Milešovce vybudována meteorologická observatoř, která v roce 1964 přešla pod správu Ústavu fyziky atmosféry AVČR, pod který spadá až dodnes. Od roku 1905 zde probíhá měření v pravidelných intervalech, v roce 1998 je observatoř vybavena automatickou meteorologickou stanicí od firmy Vaisala.

Spoj je orientovaný na jiho-jihovýchod na vzdálenost 60 m s vertikálním převýšením 29 m. Pracuje v simplexním provozu, kdy se v pravidelných intervalech střídá vysílání na dvou vlnových délkách – 830 nm a 1550 nm. Umístění spoje je zobrazeno na obr.č.16.



Obrázek 16 - Umístění experimentálního optického spoje na Milešovce.

8.2 Vysílač

Vysílač obsahuje dva oddělené optické zdroje. Jsou použity Gaussovské laserové diody s vlnovými délkami 830nm a 1550nm. Vysílání na obou kanálech zajišťuje mikroprocesor a střídá se s pravidelnou nastavitelnou periodou. Fluktuace mlhy má relativně dlouhodobý charakter, proto byla zvolena perioda 15 s pro každý kanál.

Technické parametry vysílače jsou uvedeny v tab. 7.

Tabulka 7- Technické parametry vysílače.

Kanál	CH2	CH1
Laserová dioda	DL5032	RLT1550-15G
Vlnová délka λ	850 nm	1550 nm
Vyzářený výkon $P_{m,TXA}$	5 mW	7 mW
Divergence svazku φ_t	10 mrad	
Průměr vysílací apertury D_{TXA}	25,4 mm	

8.3 Přijímač

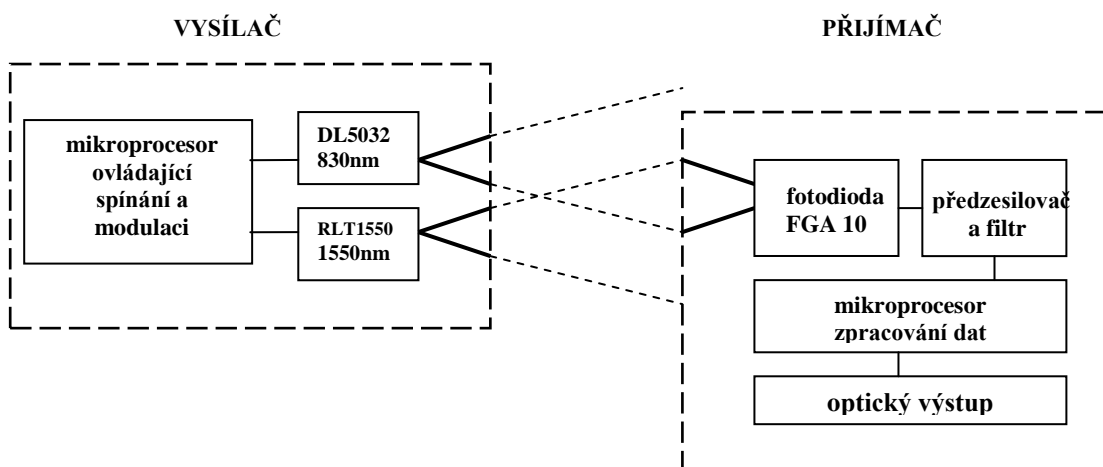
V přijímači je kvůli schopnosti reagovat na široké spektrum vlnových délek použita InGaAs fotodioda FGA10. Následuje předzesilovač a modul pro ukládání a vyhodnocování naměřených dat. Průměr apertury přijímače je 60mm. Pro zpracování signálu byl vybrán logaritmický detektor s dynamickým rozsahem 45 dB. Informace z přijímače je přenášena optickým kabelem na server, kde jsou všechna data ukládána.



Obrázek 17 - Optický vysílač.



Obrázek 178 - Optický přijímač.



Obrázek 18 - Blokové schéma optického spoje.

9. Experimentální výpočet útlumu deštěm

Pro experiment je využíván program, zhotovený v rámci diplomové práce, který prezentuje výpočty podle Mie teorie. Jedná se o analytické řešení Maxwellových rovnic pro rozptyl elektromagnetického záření na kulových dielektrických objektech (v našem případě uvažujeme dielektrikum). Jak je dokázáno níže.

Při rozhodování, zda je daná látka dielektrikum nebo vodič vycházíme z podílu hustoty vodivého proudu J_v a hustoty posuvného proudu J_p .

$$\frac{\sigma}{\omega} = 2m_r \cdot m_i \quad (9.1)$$

$$\sigma = 2\omega m_r \cdot m_i \quad (9.2)$$

$$J_v = \sigma \cdot E \quad (9.3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (9.4)$$

$$J_p = |j\omega\varepsilon_r E| = \omega\varepsilon_r E \quad (9.5)$$

$$p = \left| \frac{J_v}{J_p} \right| = \frac{E\sigma}{\omega\varepsilon_r E} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_r} = \frac{2\omega m_r \cdot m_i}{\omega\varepsilon_r E} = \frac{2m_r \cdot m_i}{m_r^2 - m_i^2} \quad (9.6)$$

kde

J_p je hustota posuvného proudu

J_v je hustota vodivého proudu

ε_r je relativní permitivita

ε_0 je permitivita vakua ($8.854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$).

Podíl vychází pro index lomu mnohonásobně menší než 0,1. Z toho vyplývá, že voda je dielektrikum.

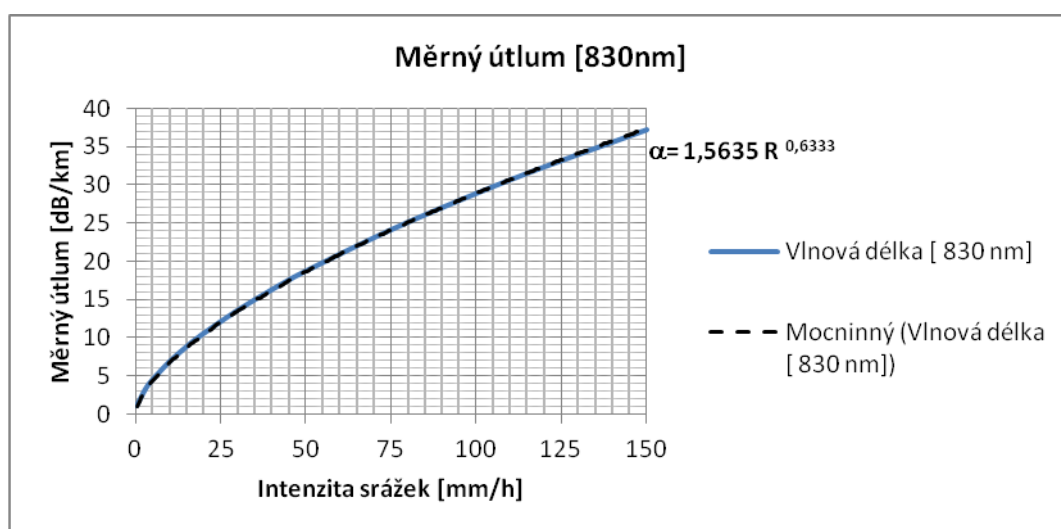
Pro objekty mnohem větší nebo mnohem menší než vlnová délka rozptýleného záření jsou jednoduché a představují vynikající aproximaci, která postačuje k popisu chování systému.

9.1 Závislost měrného útlumu deštěm na vlnové délce (830nm a 1550nm)

Tato část se věnuje rozboru závislostí získaných pomocí algoritmu dle teorie podle Mie. [16]

Tabulka 8 - Hodnoty vypočítané podle Mie pro vlnovou délku 830nm.

Intenzita srážek [mm/h]	Měrný útlum [dB/km]	Frekvence [GHz]
0,5	1	361445,78
1	1,56	
3	3,14	
5	4,35	Vlnová délka [nm]
10	6,74	830
15	8,72	
20	10,45	
30	13,5	
40	16,19	
50	18,64	
75	24,06	
100	28,82	
120	32,31	
150	37,16	

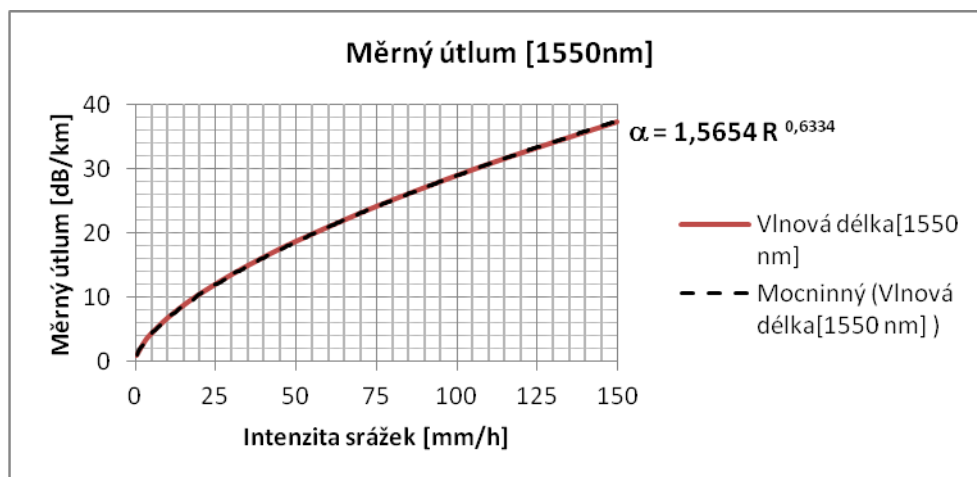


Obrázek 19 - Graf závislosti měrného útlumu podle Mie na intenzitě srážek na vlnové délce 830nm.

Graf závislosti měrného útlumu podle Mie na intenzitě srážek na vlnové délce 830 nm. Graf je proložený mocninou aproximací druhého řádu.

Tabulka 9- Tabulka hodnot vypočítaných podle Mie pro vlnovou délku 1550nm.

Intenzita srážek [mm/h]	Měrný útlum [dB/km]	Frekvence [GHz]
0,5	1	193548,39 Vlnová délka [nm] 1550
1	1,56	
3	3,15	
5	4,35	
10	6,76	
15	8,73	
20	10,47	
30	13,53	
40	16,22	
50	18,67	
75	24,09	
100	28,87	
120	32,36	
150	37,21	



Obrázek 20 - Graf závislosti měrného útlumu podle Mie na intenzitě srážek na vlnové délce 1550nm.

Graf závislosti měrného útlumu podle Mie na intenzitě srážek na vlnové délce 1550 nm. Graf je proložený mocninou aproximací.

Na obou grafech je vynesena závislost vypočteného měrného útlumu na intenzitě srážek. Touto závislostí bylo proloženo několik aproximačních křivek, a to exponenciální, logaritmická, lineární, polynomická druhého a třetího stupně, v poslední řadě mocninná aproximace. Nejvhodnější možnou korelací je již v grafu znázorněná mocninná aproximace – překvapivě 100 %.

Tento výsledek zcela potvrzuje předpoklad publikovaný odbornou literaturou, že vztah mezi intenzitou srážek a útlumem je mocninný, a to:

$$\alpha = a \cdot R^b \quad (9.5)$$

Nalezla jsem uvedené mocninné aproximace pro měrný útlum deštěm:

$$\alpha = 1,5635 R^{0,6333} \text{ (830nm) [dB/km]}, \quad (9.6)$$

$$\alpha = 1,5654 R^{0,6334} \text{ (1550nm) [dB/km]}. \quad (9.7)$$

Tabulka 10 - Koeficienty korelace stanovené z výpočtů měrného útlumu podle Mie.

	<i>a</i>	<i>b</i>
830nm	1,5635	0,6333
550nm	1,5654	0,6334

Jednotlivé korelace:

Tabulka 11 - Hodnoty korelací.

Vlnová délka	Korelace
830 nm	100%
1550 nm	100%
1190 nm	100%
1400 nm	100%

Pokud by z nějakého důvodu nebylo možné použít mocninnou aproximaci, jako nejvíce pravděpodobnou a vyhovující aproximaci lze doporučit aproximovat polynomem třetího stupně s korelací 99,85 %.

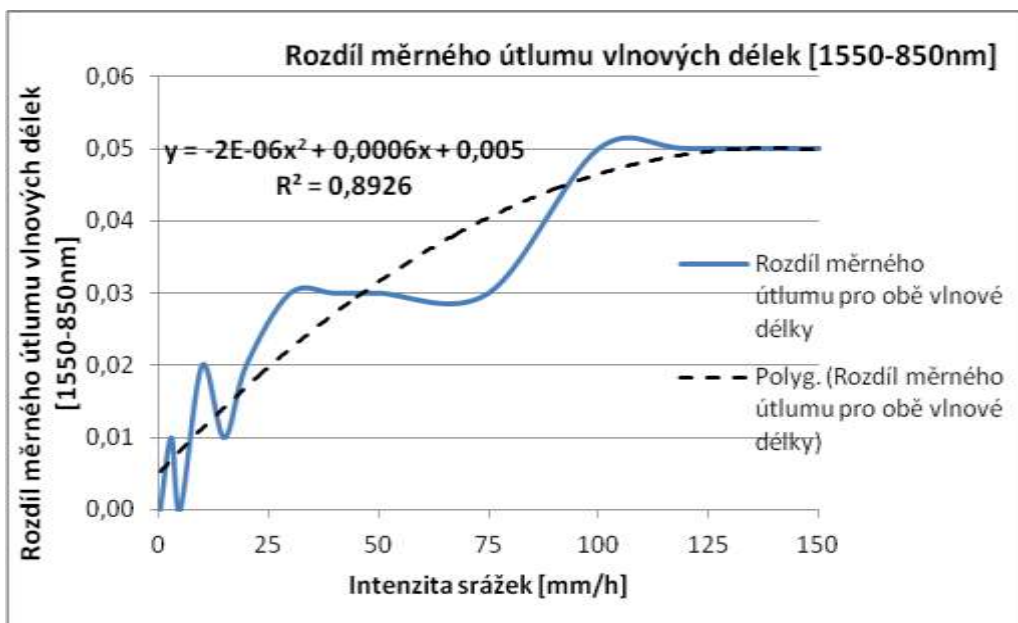
Rovnice pro vlnové délky

$$y = 9E-06x^3 - 0,0029x^2 + 0,4667x + 1,8108 \text{ (850nm)}, \quad (9.8)$$

$$y = 9E-06x^3 - 0,0029x^2 + 0,4675x + 1,8143 \text{ (1550nm)}, \quad (9.9)$$

kde *y* je měrný útlum v závislosti na intenzitě srážek a *x* je intenzita srážek.

Proložení se hodně překrývají s vypočtenými hodnotami, proto pro názornost následuje další graf rozdílu měrných útlumů na vlnové délce 1550 a 850 nm.



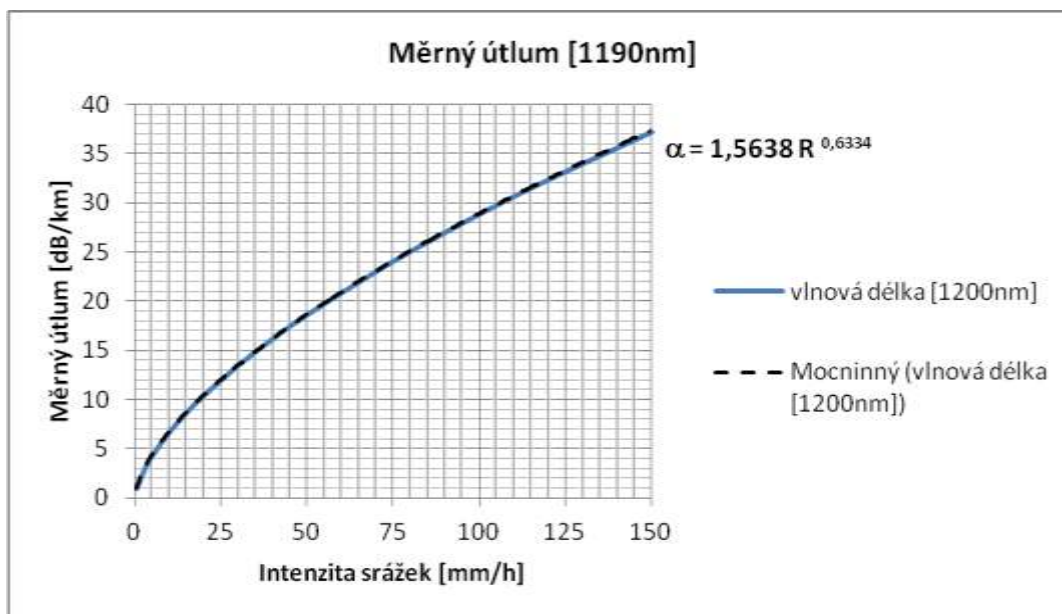
Obrázek 21 - Graf rozdílu útlumů vlnových délek 1550 – 830 nm.

Rozdíl měrného útlumu pro vlnové délky 1550 a 830 nm nepatrně přesahuje 0,05dB/km. Křivka je proložena polynomickým trendem druhého řádu, kde je korelace 89 %. Dá se říci, že rozdíl v podstatě roste s intenzitou srážek. Hodnota 0,05dB/km je zanedbatelná a nehraje roli. Je prakticky nezměřitelná. V technické praxi rozdíl menší než 0,3 dB/km zanedbatelný je.

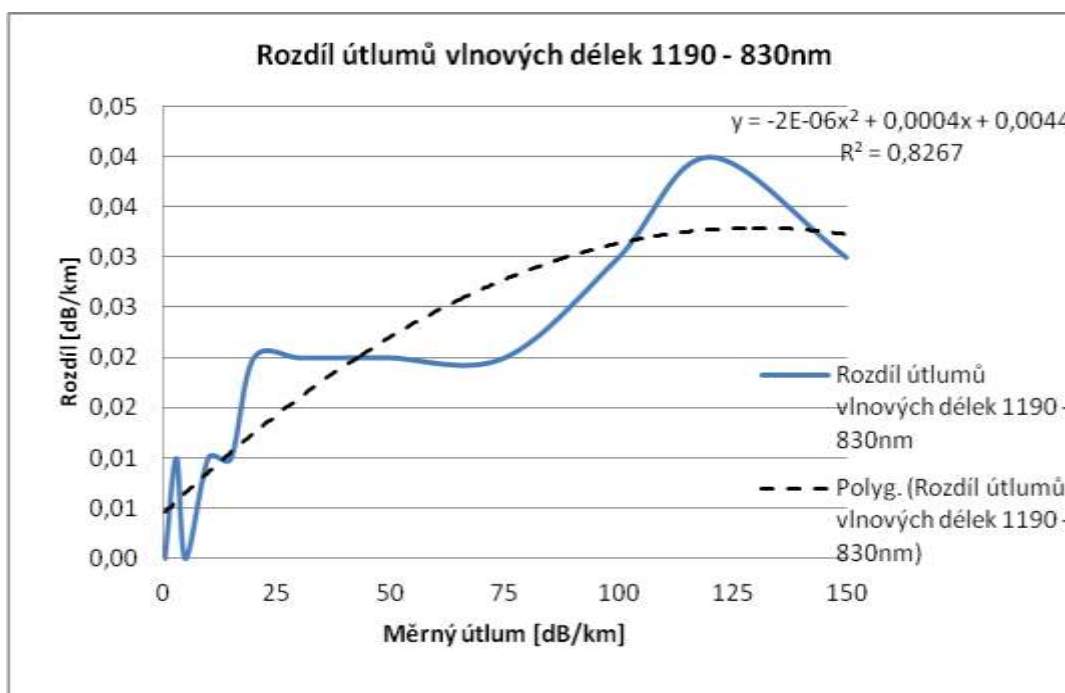
Pro ověření, zda je rozdíl útlumu opravdu zanedbatelný, jsou uvedené další závislosti pro jiné vlnové délky a jejich rozdíly.

Tabulka 12 - Hodnoty měrného útlumu 1190nm.

střední vlnová délka [nm] 1190		Frekvence [GHz] 252100,84
Intenzita srážek [mm/h]	Měrný útlum [dB/km]	
0,5	1	
3	3,15	
5	4,35	
10	6,75	
15	8,73	
20	10,47	
30	13,52	
40	16,21	
50	18,66	
75	24,08	
100	28,85	
120	32,35	
150	37,19	



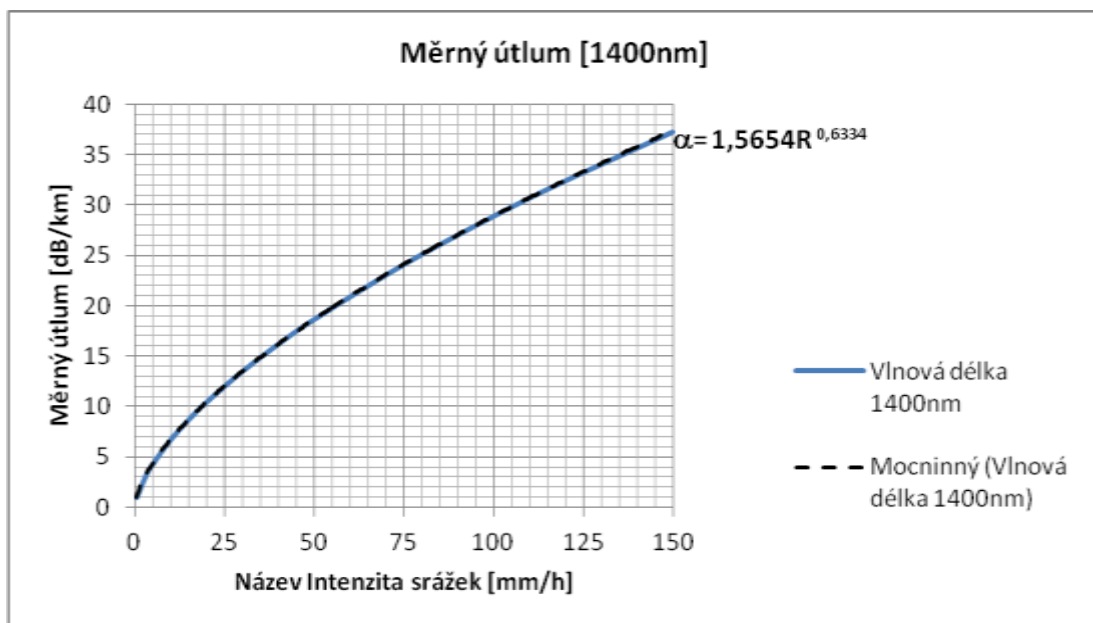
Obrázek 22 - Měrný útlum v závislosti na intenzitě srážek pro 1190nm.



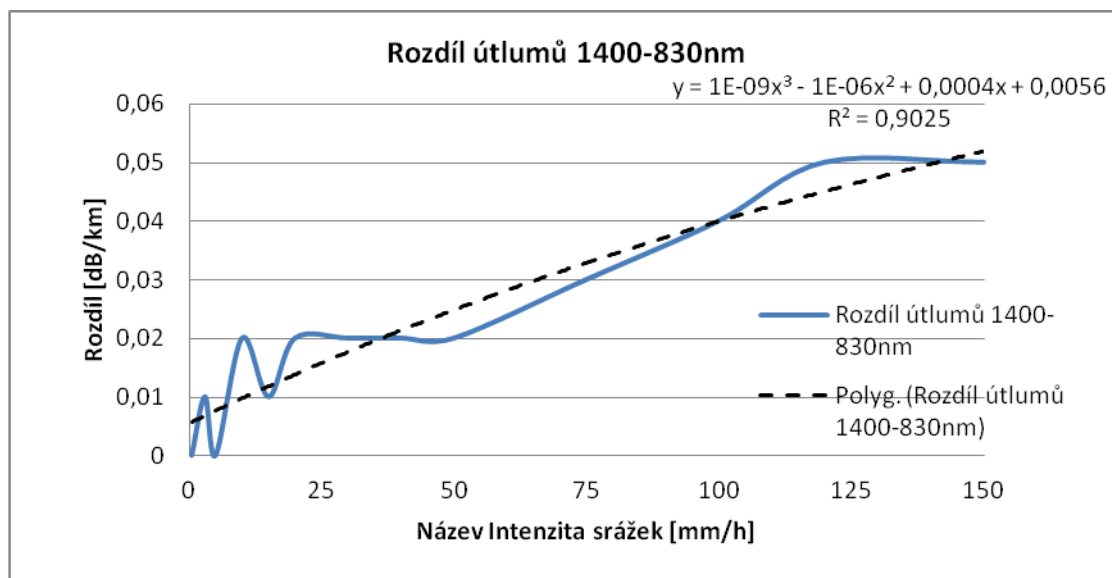
Obrázek 23 - Rozdíl měrných útlumů 1190-830nm.

Tabulka 13 - Hodnoty měrného útlumu 1400nm.

Intenzita srážek [mm/h]	Měrný útlum [dB/km]	
0,5	1	Vlnová délka [nm] 1400
3	3,15	
5	4,35	
10	6,76	Frekvence [GHz] 214285.71
15	8,73	
20	10,47	
30	13,52	
40	16,21	
50	18,66	
75	24,09	
100	28,86	
120	32,36	
150	37,21	



Obrázek 24 - Měrný útlum v závislosti na intenzitě srážek pro 1400nm.



Obrázek 25 - Rozdíl měrných útlumů 1400-830nm.

Z uvedených grafů vyplývá, že již výše zmíněná závislost útlumu na vlnové délce je zanedbatelná. Rozdíly na vlnových délkách jsou v řádech setin a téměř nezměřitelné.

9.2 Aproximace měrného útlumu deštěm

Měrný útlum znamená, že je brán na kilometr. Obvykle se pro technické aplikace měrný útlum aproximuje jednoduchým vztahem, kde jsou dány dva koeficienty závislé na kmitočtu, polarizaci, teplotě. Dalším parametrem je průměrná intenzita srážek.

$$\alpha = a \cdot R^b \quad \left[\frac{dB}{km} \right] \quad (9.5)$$

Kde R je průměrná jednodominutová intenzita srážek [mm/h],

a , b jsou závislé konstanty, které jsou tabelovány.

Z uvedených grafů pro jednotlivé vlnové délky pomocí mocninné aproximace vycházejí rovnice (viz. tabulka 14):

Tabulka 14 - Koeficienty aproximace.

		a	b
830 nm	$\alpha = 1,5625 R^{0,6334}$	1,5625	0,6334
1550 nm	$\alpha = 1,564 R^{0,6336}$	1,564	0,6336
1190 nm	$\alpha = 1,5638 R^{0,6334}$	1,5638	0,6334
1400 nm	$\alpha = 1,5654 R^{0,6334}$	1,5654	0,6334

Vzorec získaný podle Carbonneau[18]:

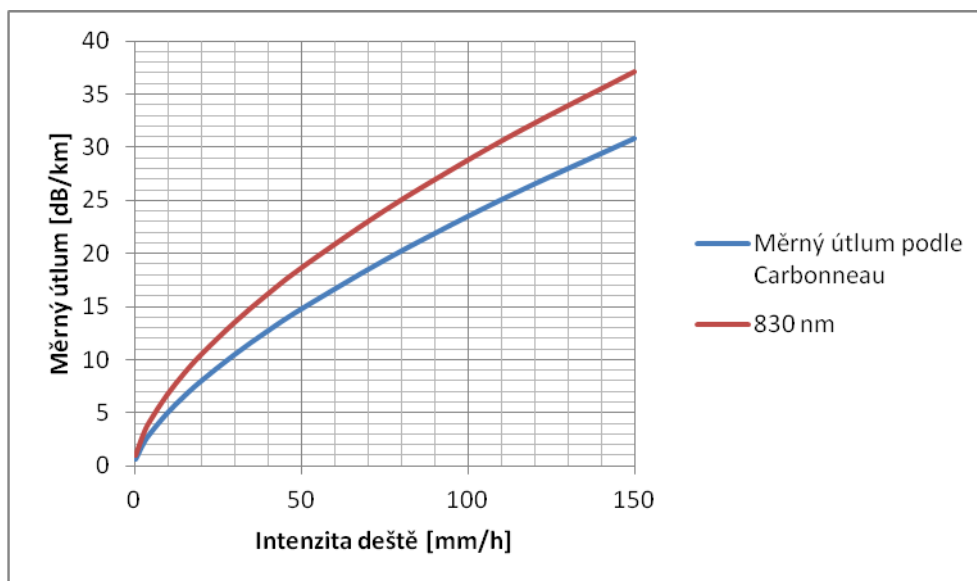
$$\alpha_{1,rain} = 1,076 \cdot R^{0,67} \left[\frac{dB}{km} \right] \quad (9.10)$$

Tabulka 15 - Vypočítané hodnoty podle Carbonneau.

Intenzita R [mm/h]	Měrný útlum □ [dB/km]
0,5	0,676273195
3	2,24638149
5	3,163167386
10	5,03283012
15	6,603792442
20	8,007599954
30	10,50711564
40	12,74067582
50	14,79524544
75	19,41347665
100	23,54031507
120	26,5989018
150	30,88825791

Tabulka 16 - Srovnání hodnot vypočítaných podle Carbonneau a hodnoty vypočítané v této práci.

Intenzita R [mm/h]	Měrný útlum [dB/km]	Měrný útlum [dB/km]
0,5	0,6762732	1
3	2,24638149	3,14
5	3,16316739	4,35
10	5,03283012	6,74
15	6,60379244	8,72
20	8,00759995	10,45
30	10,5071156	13,5
40	12,7406758	16,19
50	14,7952454	18,64
75	19,4134767	24,06
100	23,5403151	28,82
120	26,5989018	32,31
150	30,8882579	37,16



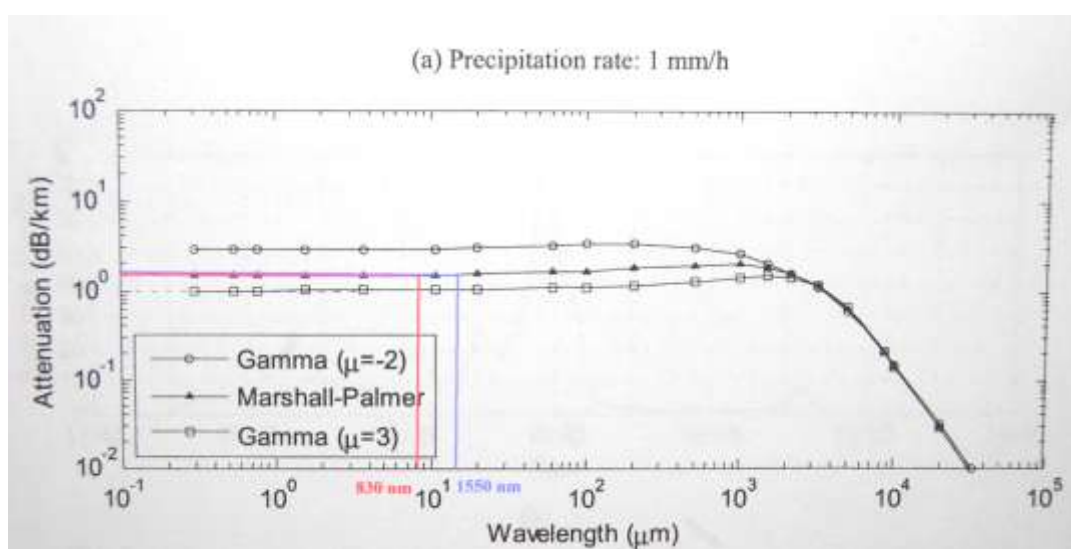
Obrázek 26 - Hodnoty podle Carbonneau a vypočítané v práci.

Útlum, který navrhujeme, je o několik decibelů větší než u Carbonneau avšak literatura uvádí srovnatelné hodnoty s těmi vypočtenými v této práci.

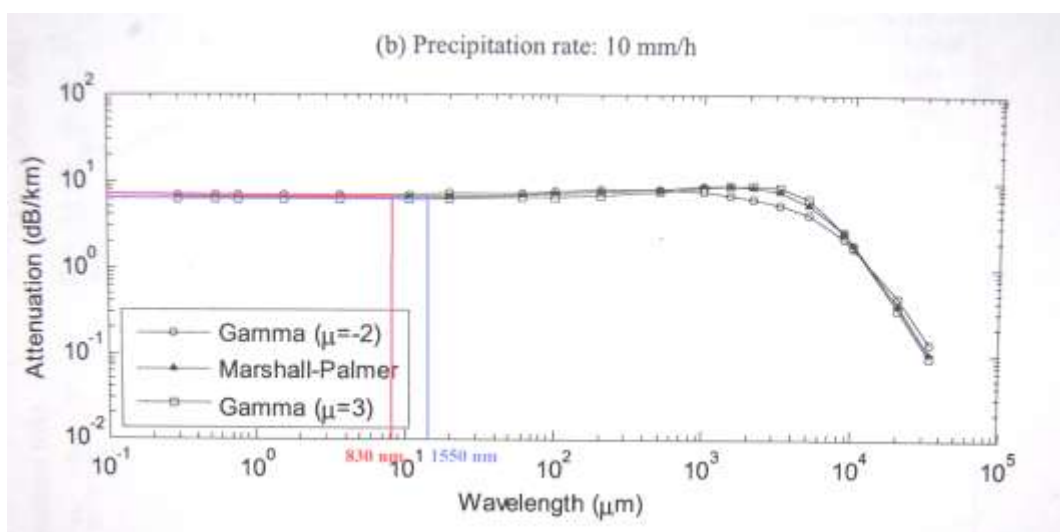
Hodnoty získané podle Mie se téměř shodují s uvedeným vzorcem podle Carbonneau. Největší shoda je v koeficientu b , který se liší o setiny. Rozdíl koeficientu a podle Carbonneau a koeficientu vypočítaného podle teorie Mie není tak velký, aby tento fakt byl brán za velkou chybu.

9.3 Ověření zjištěných vztahů pro útlum deštěm

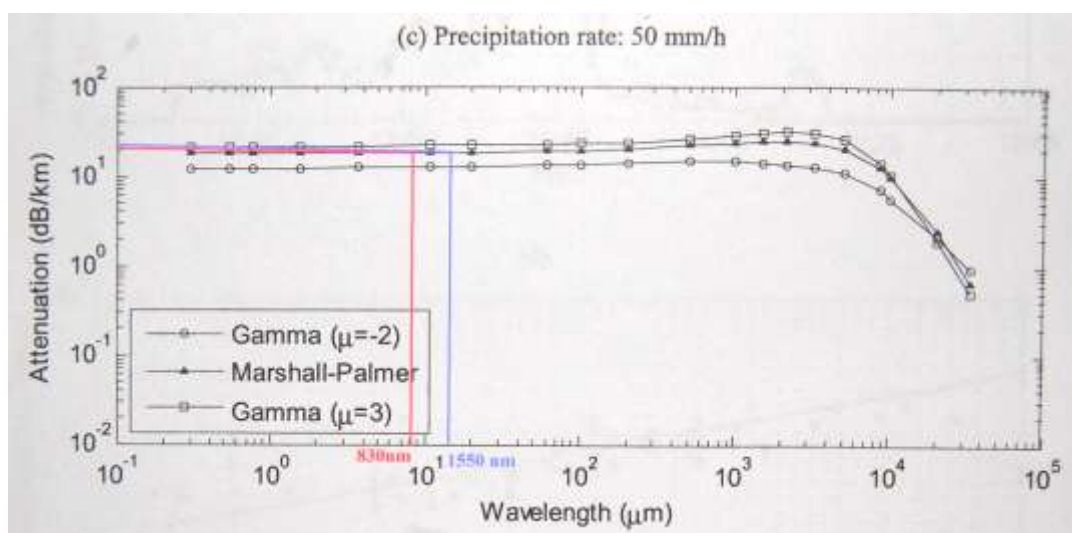
V roce 2007 publikoval R. Nebuloni a C. Capsoni křivky vypočtených útlumů v závislosti na vlnové délce pro tři různá spektra. Podle Marshall-Palmera na obrázcích a., b., a c. jsou i dvě gama spektra s parametry $\mu = -2$ a $\mu = 3$.



Obrázek 27 - (a.) Vypočtený útlum deštěm intenzita srážek 1 [mm/h].



Obrázek 28 - (b.) Vypočtený útlum deštěm intenzita srážek 10 [mm/h].



Obrázek 29 - (c.) Vypočtený útlum deštěm intenzita srážek 50 [mm/h].

Tabulka 17 - Srovnání hodnot útlum Mie a Marshall-Palmer 830nm.

		830nm	
R	α [dB/km]	Marshall-Palmer	Mie
	1 [mm/h]	1,6	1,56
	10 [mm/h]	6,5	6,74
	50 [mm/h]	18	18,64

Tabulka 18 - Srovnání hodnot útlum Mie a Marshall-Palmer 1550nm.

		1550nm	
R	α [dB/km]	Marshall-Palmer	Mie
	1 [mm/h]	1,6	1,56
	10 [mm/h]	6,5	4,35
	50 [mm/h]	18	18,67

Hodnoty v tabulkách (sloupce) jsou odhadnuté podle publikovaného článku [10]. Hodnoty korespondují s vypočtenými hodnotami podle Mie, což je velice úspěšný poznatek.

10. Zpracování experimentálních dat

V této kapitole je popsáno, jakým způsobem se zpracovala surová data.

10.1 Zpracování dat ze srážkoměrů

Data z dešťoměrů jsou získávána z průběžného měření v deseti nebo patnácti minutových intervalech 24 hodin denně.

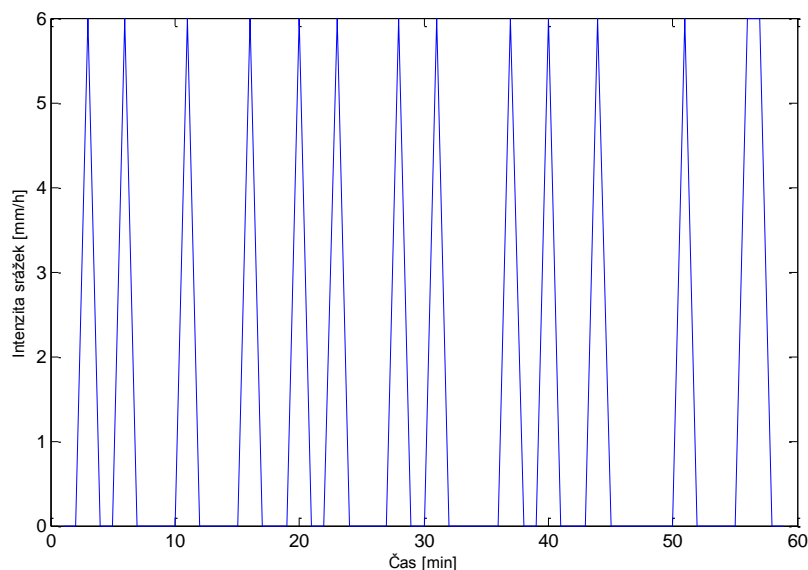
Jsou získávána z formátu .fbl. Tento soubor obsahuje i jiná průběžná měření. Z tohoto souboru jsou do formátu .xls extrahovány potřebné hodnoty měření.

DAT	CAS	SRAZKY	SRA01	SRA02	SRA03	SRA04	SRA05	SRA06	SRA07	SRA08	SRA09	SRA10
18.3.2011	02:20	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
18.3.2011	02:30	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
18.3.2011	02:40	0,5	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1
18.3.2011	02:50	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
18.3.2011	03:00	0,4	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
18.3.2011	03:10	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
18.3.2011	03:20	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
18.3.2011	03:30	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
18.3.2011	03:40	0,4	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1
18.3.2011	03:50	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
18.3.2011	04:00	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
18.3.2011	04:10	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
18.3.2011	04:20	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18.3.2011	04:30	0,4	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0

Obrázek 30 - Příklad extrahovaných dat.

V rámci této práce jsme navrhli program, který z těchto dat vybírá zajímavé dny, ve kterých se dá podle získaných dat předpokládat, že výrazně přšelo, a tím pádem došlo k ovlivnění optického spoje. Program zohledňuje taková kritéria jako např., že danou hodinu musí napršet nejméně 0,3 mm, aby byla zajímavá.

Z této metody měření překlopnými srážkoměry vycházejí všechny hydrometeorologické ústavy. Ve struktuře dat je zaznamenán počet překlopení člunku v každé kalendářní minutě, jelikož k překlopení člunku musí napršet 0,1 mm srážek, je třeba údaje o počtu překlopení člunku násobit číslem 60, abychom dostali pro danou minutu intenzitu srážek ve standardní jednotce mm/h. Neuvažuje se to, že mezi těmito překlopeními může stále pršet o malé intenzitě. Jedním z dalších nedostatků je ten, že se neví, v které části této konkrétní minuty byl člunek překlopen. Z nedostatků metody vyplývá, že intenzita srážky byla konstantní v dané minutě, což v praxi vůbec nemusí být pravda. To je vidět i na následujícím grafu jedné ze zajímavých hodin.



Obrázek 31 - Hodinové srážky.

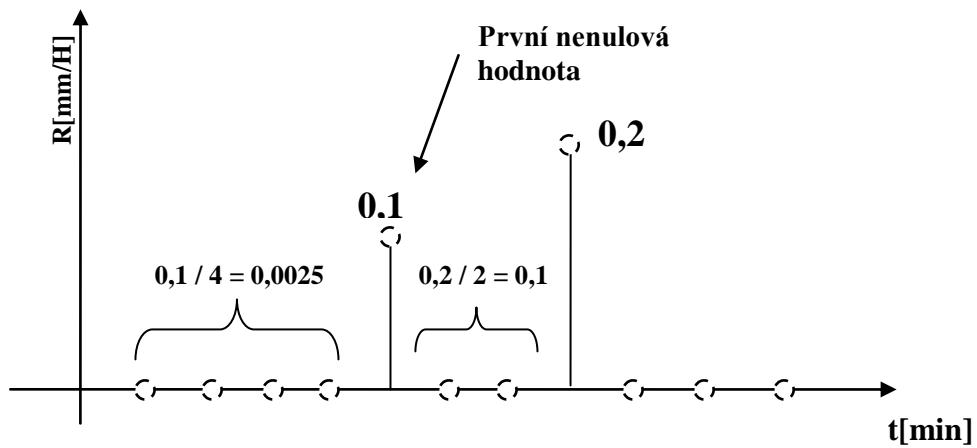
Aby bylo opravdu znatelné, jak danou hodinu přšelo, je nutné data odhadovat a provádět interpolaci.

V dalším kroku zpracování dat z dlouhodobého hlediska se všechna data ze srážkoměru spojila. A to v období od 1.1.2009 do 31.5.2011. Další zpracování dat je prováděno v tomto intervalu. Z dat v tomto formátu jsou vybrány výpadky a nepočítá se tedy s nimi.

V rámci této práce byl navrhnutý program, který dle zadaných kritérií interpoluje data a vynechává výpadky za celé experimentální měření (29 měsíců) na Milešovce.

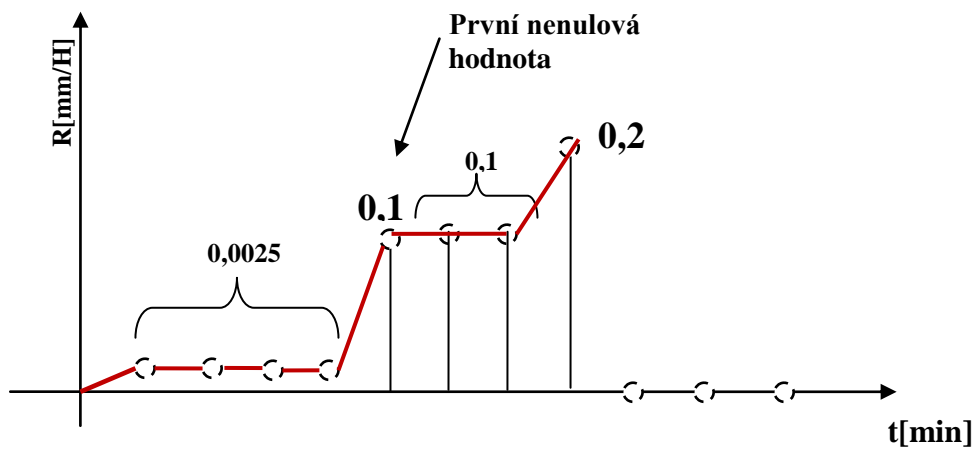
Interpolování dat bylo prováděno zkoumáním naměřených hodnot následujícím způsobem. Při procházení naměřených hodnot se počítají všechny nenulové hodnoty a ukládají se do proměnné do té doby, než program zjistí první nenulovou hodnotu. Tato nenulová hodnota se vydělí počtem napočítaných nulových hodnot. Výsledek tohoto podílu se zpětně rozdělí na místa nulových hodnot. Tento cyklus je omezen podmínkou. Zpět od nenulové hodnoty se uvažují jen měření do 30 minut. Výsledek interpolování je vidět na obrázku (obr. 34).

Následující obrázky znázorňují, jakým způsobem byla interpolace dat provedena.

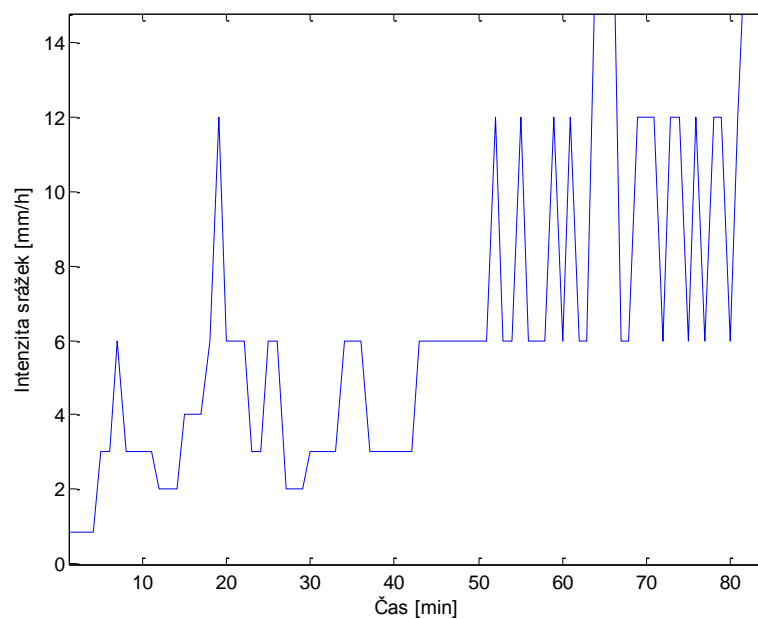


Obrázek 32 - Situace před interpolací dat.

Po dělení počtu a doplnění hodnot za nulové hodnoty vypadá potom výše uvedená situace podle obrázku (obr. 33).



Obrázek 33 - Situace po interpolování.



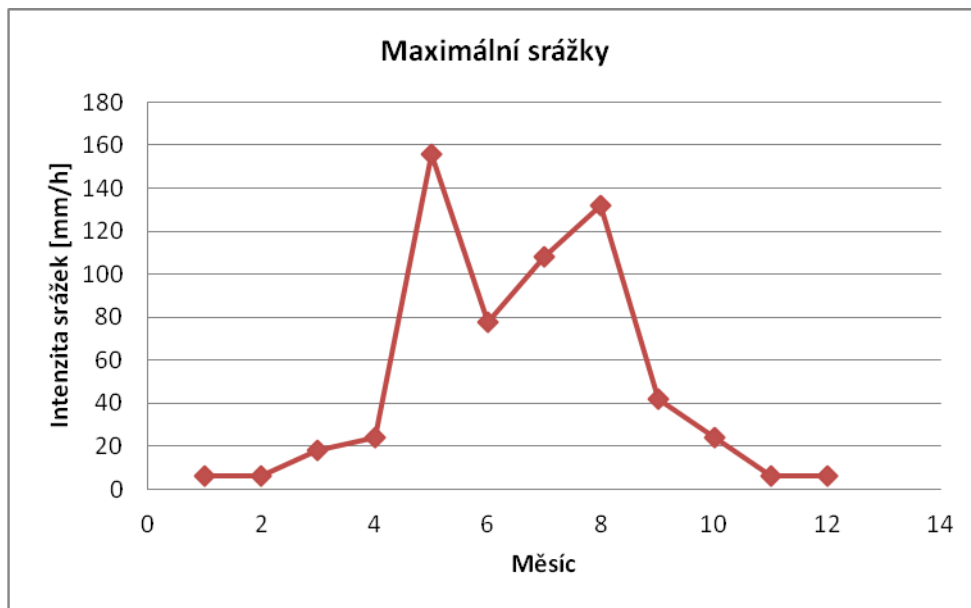
Obrázek 34 - Interpolovaná data - výstup z programu.

10.2 Statistické hodnoty

Následující tabulka uvádí několik statistických hodnot, které vyplývají z dlouhodobého měření srážkoměru umístěného na Milešovce.

Tabulka 19 - Statistické hodnoty za období 2009-2011.

	Maximální srážka [mm/h]	procento dnů kdy pršelo [%]	Počet dní
leden	6	9,14	3
únor	6	8,49	2
březen	18	7,57	2
duben	24	3,49	1
květen	156	7,4	2
červen	78	7,03	2
červenec	108	8,3	3
srpen	132	8,58	3
září	42	6,82	2
říjen	24	7,39	2
listopad	6	10,72	3
prosinec	6	14,87	5



Obrázek 35 - Maxima srážek v období 2009-2011.



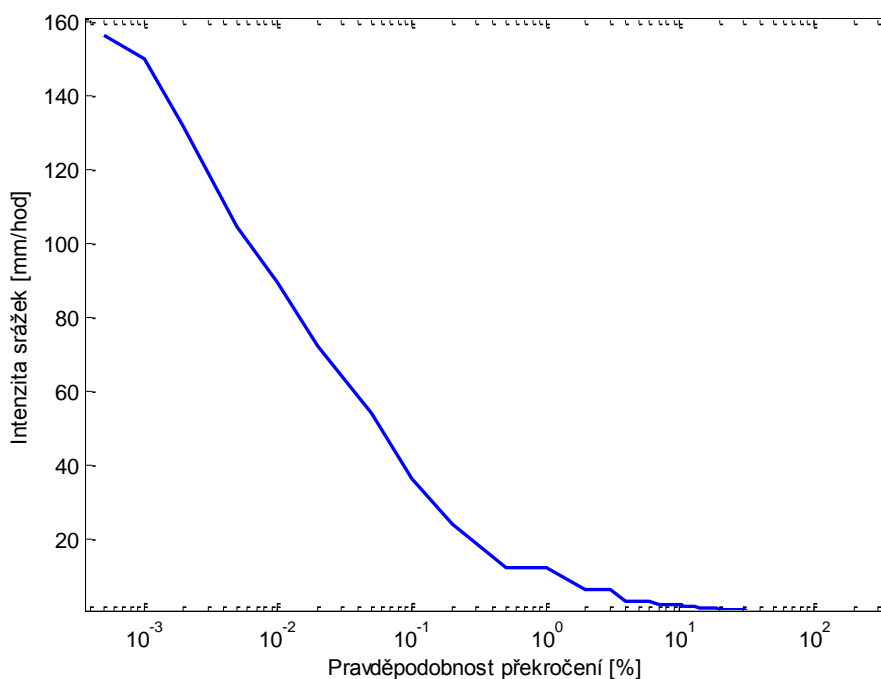
Obrázek 36 - Maxima srážek v období 2009-2011.

Z tabulky a grafů je patrné, že měsíce, kdy nejméně prší, jsou měsíce zimní. Dá se tedy předpokládat, že v tomto období sněží. Falešné hodnoty u měsíců květen a srpen mohou být způsobeny čištěním srážkoměru. Nejčastěji tyto hodnoty vznikají tak, že se na přístroji nahromadí nečistoty, listí a voda se nedostane až na člunek. Když se čistí, stane se, že takto nahromaděná voda se dostane do srážkoměru, a proto se několikrát v krátkých okamžicích překlopí, čímž vznikají tato maxima.

10.3 Distribuční funkce

Distribuční funkce je funkce, která každému reálnému číslu (nebo měřené veličině) přiřazuje pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnoty, která je menší nebo rovna tomuto číslu. V šíření vln se zpravidla používá doplněk distribuce.

Distribuční funkce srážek je použitelná pro předpověď útlumu na optickém spoji v dešti.



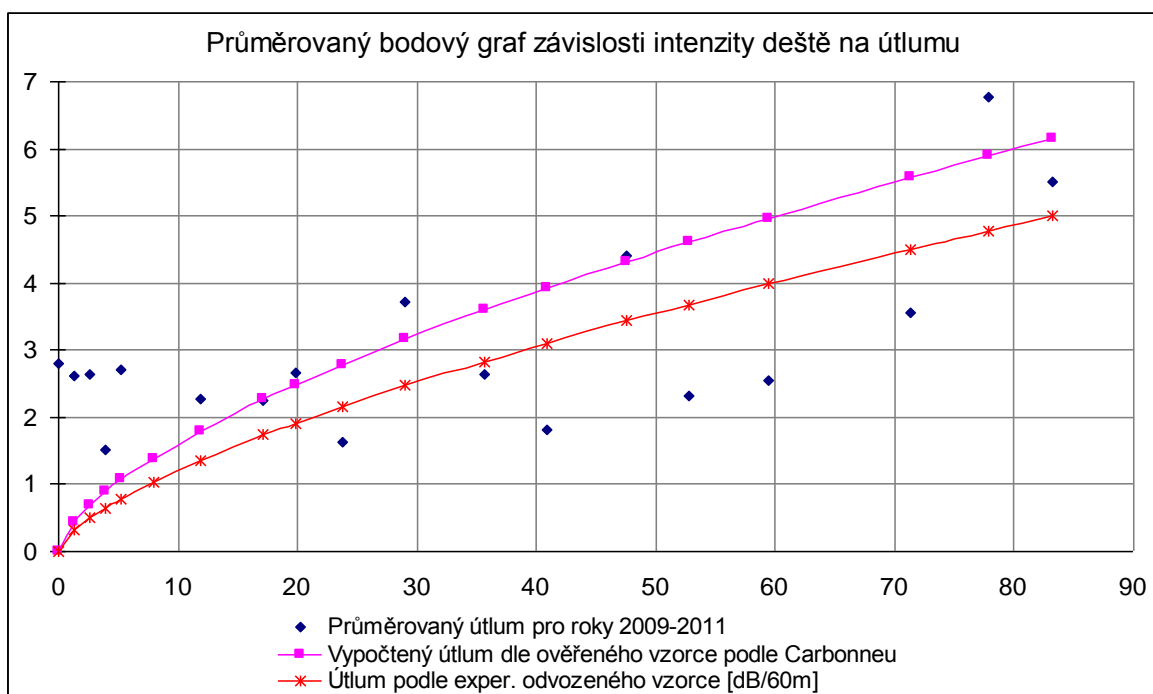
Obrázek 37 - Distribuční funkce za rok 2009 – 2011.

Střední hodnota pro Českou Republiku je 32 mm/h na hladině převýšení 10⁻² %, oproti tomu na Milešovce je střední hodnota 80 mm/h. Distribuční funkce tedy ověřuje fakt, že Milešovka je místem s nejhorším počasím v České republice.

11. Průměrovaný bodový graf

Hodnoty útlumu jak naměřeného, tak vypočteného jsou vztaženy k délce optického spoje na Milešovce (60 m). Lze tedy vidět, že velmi silný déšť způsobuje na spoji útlumy kolem 5 až 6 dB na 60 m. Silný déšť tedy na větší vzdálenost přijímače a vysílače optického spoje způsobuje značné útlumy v řádu desítek dB.

Z důvodu přehlednosti je vykreslen průměrovaný bodový graf, který se od klasického bodového grafu liší tím, že osa x je rozdělena do intervalů, v nichž je spočítán průměr experimentálně zjištěného útlumu na optickém spoji. Průměrovaný graf je proto přehlednější.



Obrázek 38 - Průměrovaný bodový graf závislosti intenzity deště na útlumu vypočteném experimentálně a podle uvedeného vztahu v literatuře.

Z tohoto průměrovaného bodového grafu závislosti intenzity deště na útlumu vypočteném experimentálně a podle uvedeného vztahu v literatuře je vidět, že se z dlouhodobého hlediska neliší a rozdíly mezi vypočtenými hodnotami jsou malé.

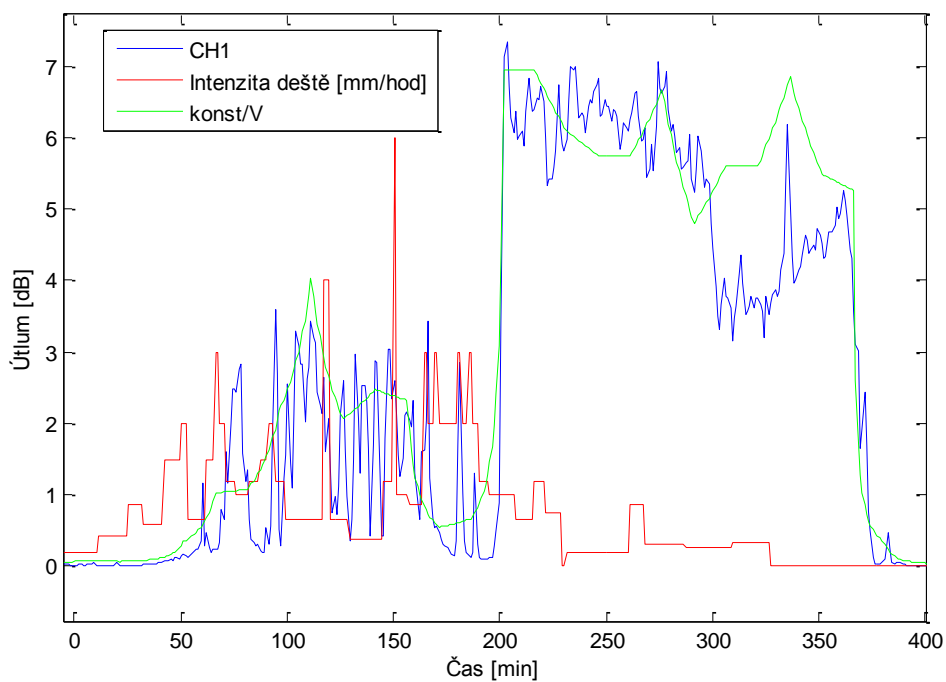
Patrný je jasný trend, že s rostoucí intenzitou deště roste útlum na optickém spoji. Naměřené hodnoty odpovídají odvozenému vzorci (č. 9.6) dle teorie podle Mie. Z dat jsou vybrány výpadky.

12. Analýza vybraných útlumových epizod

V této kapitole je vybráno několik zajímavých událostí. Pro kompletní analýzu je nutné používat všechna data, která můžeme ze spoje získat. Naměřený útlum spoje, intenzita srážek ze srážkoměru a data o dohlednosti z dohledoměru. Tyto hodnoty bylo nutné synchronizovat v čase.

Na jednotlivých grafech jsou vidět časové odezvy útlumu, převrácená hodnota viditelnosti (konst/V), která je přímo úměrná útlumu mlhou (obr. 39) nebo deštěm v dalších epizodách a intenzitě srážek.

Jednotlivé epizody byli vybrány, tak že je na spoji jednoznačně určitelný útlum způsobený deštěm.



Obrázek 39 - Epizoda ze dne 20.1.2009.



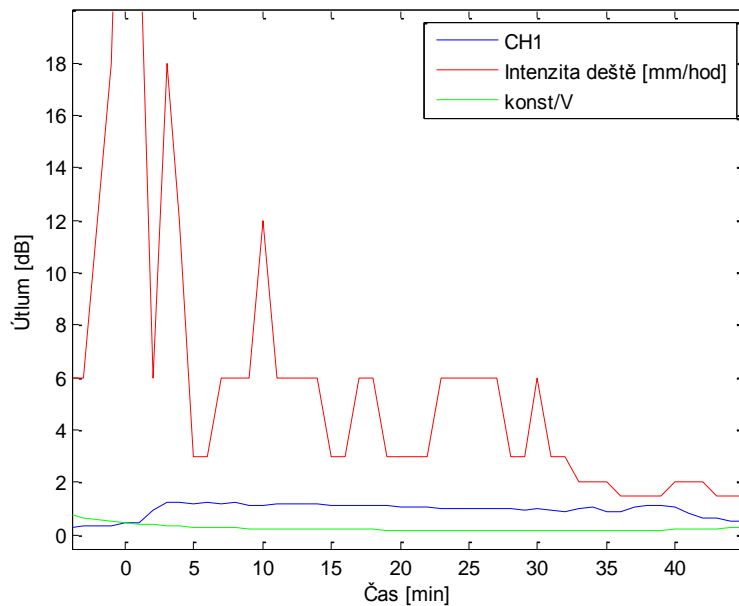
Obrázek 40 - Situace na Milešovce ze dne 20.1.2009.

Na fotografiích je vidět stav počasí z 20.1.2009. Vlevo na fotografii je patrné, že dohlednost je snížena sněhem. Na obrázku (obr. 41) je tento stav zaznamenán v čase od 0 do 195 minuty, kdy by se podle grafu intenzity deště zdálo, že prší. Dle dat ze srážkoměru byl tedy zaznamenán déšť, ale z fotografií (obr. 40) usuzujeme na sníh. Vzhledem k teplotě, která v tento den na Milešovce byla $0,5^{\circ}\text{C}$, se jedná o tající sníh. Na optickém spoji byl díky možnému padajícímu tajícímu sněhu zaznamenán útlum kolem 2 dB. Útlum byl tedy způsobený tajícím sněhem kombinovaným s deštěm.

Změna počasí v 200 minutě, která je vidět na fotografii (obr. 40) vpravo, způsobila sníženou dohlednost. Důsledkem této změny je vzrostlý útlum na hodnotu průměrně 5dB.

Časová osa v grafech je relativní, vztažená pro názornost k 0. Reálný čas předchozí epizody je 16h z 20.1.2009.

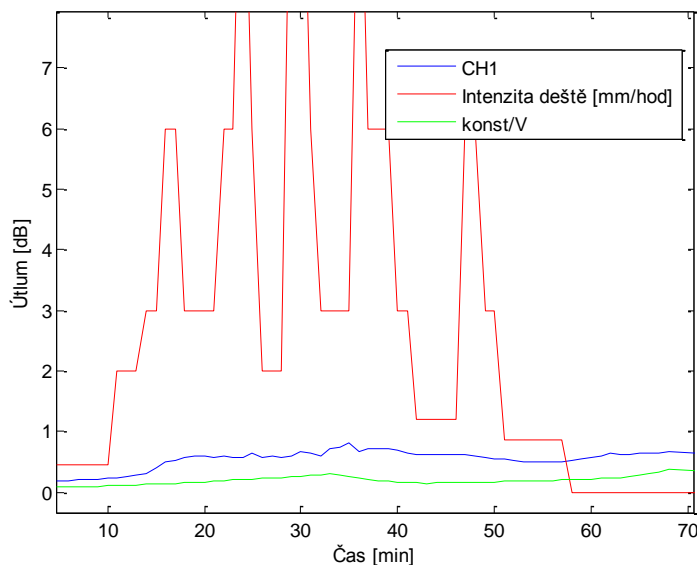
Na dalším obrázku je jedna z vybraných epizod, která je zajímavá velkou intenzitou srážek.



Obrázek 41 - Epizoda ze dne 18.6.2009 - vysoká intenzita srážek.

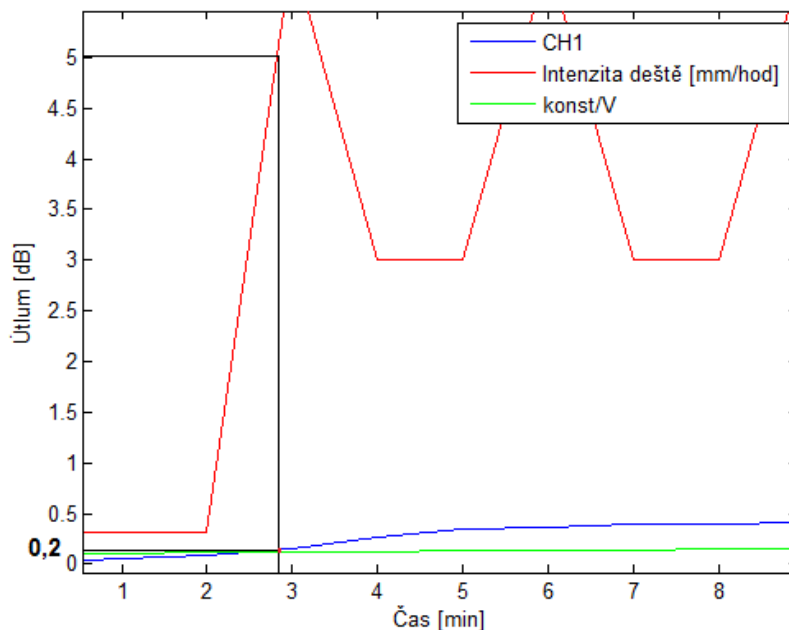
Tato epizoda je klasickým příkladem toho, jaký vliv má déšť na OBS. Z tohoto grafu je vidět, že útlum je způsobený deštěm. Dohlednost je totiž dobrá, a proto není útlum způsobený mlhou. Je zaznamenána vysoká intenzita srážek a nepředpokládáme vznik deště a mlhy zároveň.

Obrázek (obr. 42) ukazuje, že takto může vypadat další příklad deště, dobré dohlednosti a malého útlumu.



Obrázek 42 - Epizoda ze dne 20.4.2011

12.1 Ověření útlumu



Obrázek 43 - Epizoda z 24.5.2010.

Vzorec získaný z [18]:

$$\alpha_{1,rain} = 1,076 \cdot R^{0.67} \left[\frac{dB}{km} \right] \quad (9.10)$$

Hodnota odečtená z grafu pro intenzitu srážek 5 mm/h

$$\alpha_{1,rain} = 0,2 \text{ dB}$$

na 60m spoje.

Dosazení

$$\alpha_{1,rain} = 1,076 \cdot 5^{0.67} \cdot 0,06 = 0,2 \text{ dB}$$

přepočítané na 60 m spoje.

Počítaný útlum je vztažený na 60 m optického spoje na Milešovce.

Lze tedy konstatovat, že vzorec uvedený literaturou se shoduje s daty, která jsou dlouhodobě naměřená.

13. Závěr

V diplomové práci bych ráda závěrem shrnula všechna důležitá fakta obsažená jednak v teoretické a jednak v praktické části práce.

V první části je obecně popsáno, jak vypadá a co to je optický bezkabelový spoj. Jsou zmíněny jeho výhody, ale také nevýhody. Další kapitoly jsou věnovány diskuzi o fyzikálním charakteru deště, např. diskuze o velikosti kapek, jež má vliv na útlum. Věnovala jsem se také teoretickému odvození vzorce pro útlum deštěm pro OBS, kde vstupním parametrem byla intenzita srážek.

Útlum závisí na indexu lomu vody dešťové kapky, kterému je věnovaná rozsáhlá kapitola, ve které je celá problematika indexu lomu pro pásma OBS řešena.

Nedílnou součástí práce je diskuze o aproximačních oblastech, které podle poměru velikosti částice (dešťové kapky, mlhy) umožňují velmi zjednodušit výpočet útlumu, ale i zpětného odrazu, který má význam v radarové meteorologii.

Z rozptylových funkcí podle Mie a z rozdělení průměru velikosti kapky podle Marshall-Palmer jsem odvodila jednoduchý, ale prakticky použitelný aproximační vztah pro měrný útlum optického signálu v dešti $\alpha = 1,5625 R^{0,6334}$.

Praktická část byla věnována zpracování naměřených časových chodů srážek a útlumu OBS na experimentálním spoji při Milešovce.

Zhotovila jsem program pro odhad časového průběhu intenzity srážek z meteorologického stanoviště Milešovka. Ze záznamů, které jsou k dispozici a nejsou vhodné pro tyto účely, bylo nutné provést interpolaci dat, která je popsána v kapitole o zpracování dat. Dále jsou vybrána důležitá statistická data, jako je maximum, distribuční funkce a jiné z naměřených dat za zkoumané období v délce cca dva a půl roku. Tyto základní statistiky slouží pro odhady útlumu (útlum je úměrný intenzitě srážek).

Za hlavní přínos diplomové práce považuji nalezení a experimentální ověření vztahu mezi útlumem OBS a intenzitou srážek.

Konečná kapitola je věnovaná vybraným epizodám, které byly již popsány. Kromě útlumu deštěm se podařilo analyzovat a zachytit i epizodu, kde byl útlum způsoben tajícím sněhem.

14. Seznam použité literatury

- [1] FIŠER O. Kandidátská disertační práce, 1986
- [2] ROUSSEAU Pierre, JOLIVET Vincent, GHAZANFARPOUR Djamchid. *Realistic real-time rain rendering*. Computers and Graphics 30, 2006.507–518s.
- [3] Databáze indexu lomu: <http://refractiveindex.info>
- [4] LYNCH, D. K. AND LIVINGSTON, W., "*Color and light in nature*", Cambridge University Press, 1995 (1st ed.) and 2001 (2nd ed.), ISBN 0 521 77504 3 – v tabulce č. 4.3
- [5] SEGELSTEIN, D., 1981: "*The Complex Refractive Index of Water*", M. S. Thesis, University of Missouri--Kansas City
- [6] <http://reflib.wikispaces.com> are licensed under a Creative Commons Attribution Share-Alike 2.5 License.
- [7] BEDNÁŘ, Jan et al. 1993. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*, MŽP Praha, 1993
- [8] JACQUES RICHER, RADAR CROSS SECTION (RCS), dostupný na <http://jricher.com/EWhdbk/rcs.pdf>, 2010.
- [9] KRUSE, P.W.; MCGLAUHLIN, L.D.; MCQUISTAN, R.B. 1962. *Elements of Infrared Technology: generation, transmission and detection*. [s.l.] : J.Wiley & Sons, 1962.
- [10] GUNN, K. L. S.; EAST, T. W. R. 1954. *The microwave properties of precipitation particles*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. October 1954, vol. 80, No. 346, s. 522–545.
- [11] VLADIMÍR BRÁZDA, *Šíření optického signálu v atmosféře*, str. 33, 2009.
- [12] UZUNOGLU, EVANS, HOLT. 1977. *Scattering of electromagnetic radiation by precipitation particles and propagation characteristics of terrestrial and space communication systems*. Proc. IEE, 1977, 124, 417, No. 5
- [13] FIŠER, O., SCHEJBAL, V. 2010. *Comparison of Formulas Estimating Fog Attenuation on Free Space Optics Links*. In EuCAP 2010. Barcelona (Spain), 12-16 April 2010.

- [14] MÄTZLER, Christian. [online]. 2002 [cit. 2011-05-27]. *MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption*. Dostupné z WWW: <http://arrc.ou.edu/~rockee/NRA_2007_website/Mie-scattering-Matlab.pdf>.
- [15] OLSEN, Roderic L.; ROGERS, David V.; HODGE, Daniel B. 1978. *The aRb Relation in the Calculation of Rain Attenuation*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. MARCH 1978, vol. AP-26, No. 2, s. 318-323.
- [16] CAPSONI C., NEBULONI R., “*Effect of Rain on Free Space optic*”, Politecnico di Milano, Piazza L. da Vinci 32, 2007.
- [17] J.S. Marshall and W.M. Palmer: "The distribution of raindrops with size," *Journal of Meteorology*, Vol. 5 (1948), pp. 165-166.
- [18] T. CARBONNEAU AND D. Wisley (1998) Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded market place, in SPIE Conference on Optical Wireless Communications, 1998, pp. 119–128.