

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Šíření optického signálu v atmosféře

Bc. Vladimír Brázda

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. Vladimír BRÁZDA**
Osobní číslo: **I09396**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Šíření optického signálu v atmosféře**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Proveďte teoretickou analýzu vlivu především mlhy a nízké oblačnosti na optický signál v oblasti vlnových délek používaných optickými bezkabelovými spoji (OBS). Teoretické poznatky aplikujte na experimentální optický spoj ÚFA AVČR na Milešovce a v rámci tohoto úkolu vytvořte databázi útlumu a relevantních meteorologických veličin.

Navrhněte metody oddělující zaznamenané útlumy OBS podle fyzikálního původu (mlha, oblač, vítr apod.) a zaznamenané poklesy signálu z technických příčin. Formulujte model pro predikci útlumu optického signálu v mlze a oblacích.

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.

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:

6. ledna 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

20. května 2011



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 6. ledna 2011

Prohlášení autora

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 23. 5. 2011

Bc. Vladimír Brázda

Poděkování

Rád bych poděkoval rodičům za podporu během celého studia. Dále chci poděkovat vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc za vynikající odborné vedení a spolupráci.

Anotace

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi optického bezkabelového spoje (OBS) a vlivu reálné atmosféry na jeho přenos. V teoretické části je proveden rozbor atmosférických jevů, které mají vliv na útlum signálu. Praktická část se soustředí na zpracování dat z experimentálního optického bezkabelového spoje umístěného na Milešovce a porovnání s předpoklady popsány v části teoretické. Je prezentována dostupnost spoje, vliv slunce na OBS, porovnání šíření optického signálu o různých vlnových délkách a především vliv mlhy na útlum spoje. Je porovnáno několik matematických modelů pro odhad útlumu z dohlednosti a určen dráhový redukční faktor.

Klíčová slova

Optický bezkabelový spoj, útlum, dohlednost, mlha, rozptyl, spektrum kapek

Title

Optical signal transmission through the atmosphere.

Annotation

This diploma thesis deals with the properties of free space optical link (FSO) and with the influence of the real atmosphere on optical signal transmission. The theoretical part is an analysis of atmospheric phenomena that affect signal attenuation. The practical part focuses on data processing while data being from the experimental free space optical link located on the mountain Milešovka and a comparison with the assumptions described in the theoretical part. The presented topics are availability of the link, the influence of the sun on the FSO, comparison of transmission of optical signals with different wavelengths, and especially influence of fog on the link attenuation. Comparisons of several mathematical models to estimate the attenuation from the visibility and a path reduction factor are presented.

Keywords

Free space optical link, attenuation, visibility, fog, scattering, drop size distribution

Obsah

Seznam zkratek.....	9
Seznam symbolů	9
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek.....	12
1 Úvod.....	13
2 Optický bezkabelový spoj	14
2.1 Vlastnosti optických spojů	15
3 Fyzikální vlastnosti atmosféry	18
3.1 Mlha.....	18
3.2 Dohlednost.....	19
3.3 Spektrum velikosti oblačných kapek	20
3.4 Index lomu.....	23
4 Výkonové úrovně na OBS.....	26
4.1 Konstantní útlum OBS vlivem ředění výkonu ve svazku	27
4.2 Útlum průchodem „čistou“ atmosférou	29
4.3 Útlum náhodnými atmosférickými jevy	30
4.3.1 Atmosférické turbulence.....	30
4.3.2 Útlum atmosférickými částicemi.....	31
4.3.3 Výpočet útlumu z dohlednosti.....	36
5 Experimentální optický spoj.....	39
5.1 Umístění spoje	39
5.2 Vysílač.....	40
5.3 Přijímač.....	41
5.4 Útlum vlivem ředění výkonu na Milešovce	43
5.5 Zpracování dat z optického spoje	45
5.6 Zpracování dat dohlednosti	46
6 Analýza experimentálních dat.....	47
6.1 Časový průběh měření útlumu.....	47
6.2 Automatické prahování.....	48
6.3 Dostupnost spoje	49
6.4 Vliv Slunce na optický spoj.....	51
6.5 Porovnání šíření OBS na dvou vlnových délkách	52

6.6	Kombinace dvou dohledoměrů.....	54
6.7	Odhad útlumu z dohlednosti.....	55
6.8	Denní chod.....	58
6.9	Rozptyl útlumu	58
6.10	Dráhový redukční faktor.....	60
7	Závěr.....	63
	Seznam literatury	66
	Seznam vlastních publikací	68

Seznam zkratek

AV ČR	Akademie věd České republiky
EMC	Electromagnetic Compatibility
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
q_w	celkový vodní obsah
D	průměr kapky, $D_{stř}$ – střední průměr kapek
N_0	typická koncentrace
C	zdánlivý kontrast
I_z	svítivost zdroje, I_p – svítivost pozadí
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)
$P_{m,RXA}$	střední hodnota přijatého výkonu
$P_{m,TXA}$	střední hodnota vyzářeného výkonu
$P_{sat,RXA}$	saturační práh přijímače, $P_{0,RXA}$ – citlivostní práh přijímače
Δ	dynamický rozsah přijímače
M	linková rezerva
φ_t	divergence paprsku
α_{tot}	celkový útlum prostředím
α_{12}	útlum vlivem ředění energie

$\tilde{\alpha}_{atm}$	útlum průchodem čistou atmosférou
α_{atm}	útlum způsobený náhodnými atmosférickými jevy
α_0	měrný útlum
L_{12}	vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
L_0	pomocná délka
D_{TXA}	průměr vysílací apertury, D_{RXA} - průměr přijímací apertury
D_L	průměr paprsku ve vzdálenosti L_{12}
D_x	průměr paprsku ve vzdálenosti x
$g(D)$	Gaussova křivka rozložení intenzity paprsku
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	variační koeficient
r	dráhový redukční faktor

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Přístroj PWD21 od firmy Vaisala (VAISALA, 2005)	20
Obrázek 2 - Porovnání spekter oblačných kapek	22
Obrázek 3 - Naměřená spektra oblačných kapek	23
Obrázek 4 - Reálná část indexu lomu vody	24
Obrázek 5 - Imaginární část indexu lomu vody	25
Obrázek 7 - Útlum vlivem ředění výkonu	27
Obrázek 8 - Rozložení výkonu paprsku	28
Obrázek 9 - Gaussovo rozložení výkonu v paprsku ve vzdálenosti L_{12}	28
Obrázek 10 - Propustnost atmosféry	29
Obrázek 11 - Atmosférické turbulence (WILFERT, 2002)	30
Obrázek 12 - Efektivní odrazná plocha (WOLFF, 1997)	32
Obrázek 13 - Celková ztrátová plocha Q_t	33
Obrázek 14 - Měrný útlum určený z dohlednosti.....	38
Obrázek 15 - Umístění spoje na Milešovce	40
Obrázek 16 - Střídání kanálů na optickém spoji	40
Obrázek 17 - Optický vysílač (vlevo) a přijímač (vpravo)	41
Obrázek 18 - Blokové schéma optického spoje	42
Obrázek 19 - Rozložení výkonu vysílaného paprsku diody DL5032	43
Obrázek 20 - Rozložení výkonu na experimentálním spoji u přijímače	44
Obrázek 21 - Zpracování dat optického spoje.....	45
Obrázek 22 - Zpracování dat dohlednosti	46
Obrázek 23 - Časový průběh celkového útlumu α_{tot} na CH2(830nm) v srpnu 2010	47
Obrázek 24 - Časový průběh celkového útlumu α_{tot} na CH2(830nm) v období 9.- 12. srpna 2010	48
Obrázek 25 - Prahy kanálu CH2	49
Obrázek 26 - Dostupnost spoje v jednotlivých měsících roku 2010.....	50
Obrázek 27 - Histogram výskytu útlumu - data za rok 2010	50
Obrázek 28 - Vliv slunce na optický spoj	51
Obrázek 29 - Distribuční funkce útlumů na obou kanálech.....	52
Obrázek 30 - Diference útlumů na vlnových délkách 1550 nm a 830 nm dle vzorce (4.29) na vzdálenost 60 m	53
Obrázek 32 – Porovnání invertovaných dohledností u vysílače a na věži.....	55
Obrázek 33 - Časový průběh útlumu v porovnání s Kimovým vzorcem - 15.listopadu 2010	55
Obrázek 34 - Průměrovaný bodový graf – porovnání vzorců.....	56
Obrázek 35 - Distribuční funkce vypočtených a naměřených útlumů.....	57
Obrázek 36 - Denní chod útlumu a dohlednosti.....	58
Obrázek 37 - Průměrovaný bodový graf – rozptyl útlumu	59
Obrázek 38 - Variační koeficient	60
Obrázek 39 - a) Podhodnocení, b) nadhodnocení útlumu.....	61

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Index lomu vody	25
Tabulka 2 - Parametr x pro oblačné kapky	34
Tabulka 3 - Technické parametry vysílače (KVÍČALA, 2009).....	41
Tabulka 4 - Ukázka dat z optického spoje	42
Tabulka 5 - Ukázka dat z dohledoměru PWD-21	42
Tabulka 6 - Korelační koeficienty mezi útlumem a dohledností	54
Tabulka 7 - Parametry shody mezi naměřeným a vypočteným útlumem.....	57
Tabulka 8 - Redukční faktor	61

1 Úvod

Optický přenos v podobě tak, jak ho známe, se začal rozvíjet v 60. letech minulého století díky vynálezu laseru. V poslední době dochází k značnému rozvoji bezkabelové optické komunikace z důvodu stále se zvyšující poptávky po vysokých přenosových kapacitách pro připojení velkého počtu uživatelů k páteřní optické síti. Přenosové rychlosti tzv. poslední míle jsou degradovány použitím nízkokapacitních kabelových rozvodů. Optické bezkabelové spoje jsou schopny tuto poslední míli výrazně zkrátit a propojit dvě optické kabelové 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. Průzkum vlivu atmosféry na optický signál je relativně mladé odvětví, které je v současné době aktuální. Tato problematika je tématem vědeckých konferencí po celém světě. Výsledky této diplomové práce budou mimo jiné prezentovány na konferenci ConTEL 2011 v rakouském Grazu, která se koná v období 15. - 17. června 2011. Seznam vlastních publikací je uveden na konci práce za seznamem literatury.

Účelem diplomové práce je celkově rozebrat nejdůležitější atmosférické vlivy na spoj, získat a prezentovat poznatky například pro návrh a umístění spoje v praxi jak za použití teoretických rozborů, tak i za použití výsledků z analýzy experimentálních dat z optického bezkabelového spoje umístěného na Milešovce.

2 Optický bezkabelový spoj

Bezdrátový optický systém je moderní technologie využívající laserový paprsek k přenosu dat volným prostorem. Tato technologie využívá velkého potenciálu světla, díky kterému je možno přenášet data, zvuk i obraz ve vysokých přenosových rychlostech, které odpovídají rychlostem vláknové optiky, ovšem bez nutnosti použití optického kabelu. Optický přenos v podobě tak, jak ho známe, se začal rozvíjet v 60. letech minulého století díky vynálezu laseru.

Pro optické bezdrátové spoje se používá zkratka *OBS*, v angličtině *FSO* (*Free Space Optics*). Soustavu tvoří *vysílač* (*transmitter*) a *přijímač* (*receiver*). Pokud zařízení obsahuje oba prvky zároveň, označuje se *transceiver*. Vysílač využívá laserovou diodu k vysílání úzkého optického svazku (paprsku), na němž jsou namodulována data. Přijímač díky optoelektronickému prvku data přijme a zpracuje. Využívají se zpravidla fotodiody. Paprsek u vysílače i přijímače prochází čočkami, které ho usměrňují a zvyšují zisk.

Divergence svazku se pohybuje v řádu miliradiánů, spoje mají tedy velmi vysokou směrovost. Pro představu – optický svazek s divergencí 5 mrad se ve vzdálenosti 100 m rozprostře do kruhu o průměru 50 cm. OBS pracují v neviditelném infračerveném pásmu *NIR* (*near infrared*) na vlnových délkách 700 - 1600 nm.

OBS pracují buď v simplexním nebo duplexním provozu.

- Simplexní provoz - jednosměrný spoj, vysílač vysílá signál přijímači
 - použití v aplikacích, kde není potřeba přenos oběma směry
- Duplexní provoz – tzv. plný duplex – přenos oběma směry najednou
 - na obou stranách transceivery
 - nejčastější, použití např. ethernet

2.1 Vlastnosti optických spojů

Zatímco dnešní rádiové spoje dosahují rychlosti v řádu stovek Mbit/s, přenosová rychlost optických spojů se pohybuje v řádu jednotek Gbit/s. Technologie se stále vyvíjí a již dnes se pracuje na spojích, které překročí rychlost **10 Gbit/s** díky *vlnovému multiplexu*, což je optická obdoba rádiového kmitočtového multiplexu.

Optické kmitočty leží mimo licenční pásmo regulované Českým telekomunikačním úřadem, tudíž *zatím* není potřeba **žádné povolení k provozu**.

Použití FSO je též ideální z hlediska **EMC**. V případě dalších spojů v blízkosti lze díky vysoké směrovosti snadno volit rozmístění tak, aby se jednotlivé spoje nerušily.

Nutností je **přímá viditelnost** mezi vysílačem a přijímačem, z toho plyne několik vlastností. Spoje jsou náchylné na krátkodobé přerušení svazku různými předměty, proto se umisťují většinou na střechy budov. K občasnému přerušení i přesto dochází, nejčastěji prolétajícími ptáky, což lze ale snadno detekovat.

Nutnost přímé viditelnosti se stává výhodou, pokud jde o **bezpečnost**. Spoj totiž prakticky nelze odposlouchávat. Jedinou možností je do paprsku vstoupit, čímž dojde právě k přerušení, které je detekovatelné. Navíc je možno použít kryptovací zařízení.

Vysoká směrovost klade nároky na přesné zaměření vysílače a přijímače. Aby byl spoj spolehlivý je nutné vzít v potaz **drobné vychýlení paprsku**, které může mít několik příčin:

- Ohyb paprsku při průchodu atmosférou - tento aspekt bude podrobněji zkoumán dále v textu.
- Nedostatečná pevnost uchycení vysílače - pohyb jeho konstrukce o milimetry způsobí při větší vzdálenosti vychýlení paprsku o metry.
- Výkyvy výškových budov – běžně se pohybují v řádu centimetrů. Kvůli tomu se již u moderních optických spojů zavádí systém zvaný *Autotracking*. Je to princip zpětné vazby - jde o aktivní natáčení paprsku podle potřeby tak, aby dopadl za aktuálních podmínek přímo na aperturu přijímače.

Laserové paprsky obecně jsou nebezpečné pro lidské oko, proto je výkon jednotlivých vysílacích prvků omezen na maximální vysílací výkon (řádově mW) tak, aby nemohlo dojít k poškození zdraví.

Oproti rádiovým spojům nejsou optické spoje vhodné na velké vzdálenosti. Měrný útlum α_0 je na optických kmitočtech větší než na rádiových a kombinace s nuceným nízkým vysílacím výkonem omezuje vzdálenost spolehlivého přenosu na **jednotky km** (výjimečně i desítky dB). Obecně u optických spojů platí, že čím menší vzdálenost, tím větší dostupnost.

Velký vliv na útlum spoje má aktuální stav počasí. Zatímco rádiovým spojům nejvíce vadí hustý déšť, déšť s kroupami, déšť se sněhem a sněžení, u optických spojů způsobuje největší útlum **mlha a nízká oblačnost**. Rozbor vlivu mlhy na útlum optického spoje je hlavní téma této práce.

Dostupnost spoje je v praxi důležitá veličina. Stručně je to procento času, kdy je spoj funkční, vztažené na určitý časový úsek (zpravidla rok nebo měsíc). V praxi se vyžaduje obvykle dostupnost **99,99%** (tzv. na čtyři devítky) nebo dokonce **99,999%** (tzv. na pět devítek). Aby se docílilo žádané dostupnosti, je kladen důraz na různé druhy zabezpečení.

Důležité je především přizpůsobit délku spoje místním atmosférickým podmínkám. Pokud hrozí časté a husté mlhy, neměla by být dráha spoje delší než několik set metrů.

Zvýšení dostupnosti komunikace je úměrné finančním prostředkům k tomuto účelu vynaložených. Je několik možností, jak zvýšit dostupnost (KAISER DATA, 2008), (URBAN, 2001):

- záložní zdroj – při výpadku elektrické sítě, mělo by být standardně
- vícesvazkové šíření signálu – větší odolnost vůči atmosférickým vlivům i krátkodobým přerušením paprsku
- zálohování rádiovým spojením – možnost přepnutí při husté mlze, která rádiovému spoji příliš nevádí. Kombinace rádiového a optického spoje se nazývá tzv. *hybridní spoj*

- kaskádní řazení spojů – lze dosáhnout prakticky jakékoliv vzdálenosti
 - při výpadku jednoho zařízení nefunguje veškerá komunikace
- síťová mesh struktura – redundantní propojení většího množství transceiverů mezi sebou
 - použití především v zástavbě
 - tzv. *access router* zajišťuje výběr optimální trasy dat do přístupového bodu
 - při rozsáhlejší síti eliminace výpadků jednotlivých zařízení, krátkodobých přerušení svazku i vlivu mlhy
 - prakticky jediná možnost jak dosáhnout dostupnosti „na pět devítek“

3 Fyzikální vlastnosti atmosféry

3.1 Mlha

Jak již bylo řečeno, na optický spoj má největší vliv mlha. Mlha vzniká kondenzací vodních par v malých výškách nad zemí za podmínky, že teplota vzduchu klesne pod tzv. rosný bod. Rosný bod je teplota, kdy je relativní vlhkost vzduchu stoprocentní. Pokud je teplota vyšší, relativní vlhkost se zmenšuje. Pokud je nižší, dochází ke kondenzaci – vzniku mlhy. Hodnota rosného bodu je závislá na aktuální absolutní vlhkosti vzduchu. Čím je absolutní vlhkost vzduchu větší, tím je rosný bod vyšší a tím spíše může dojít ke kondenzaci.

Mlhu rozlišujeme na dva druhy podle způsobu jejího vzniku:

- Radiační mlha vzniká nejčastěji v druhé polovině noci a je způsobena ochlazováním vzduchu, který přiléhá k zemskému povrchu.
- Advekční mlha je způsobena přesouváním vlhkého teplého vzduchu nad studený zemský povrch. Na rozdíl od radiační mlhy může advekční mlha vzniknout v kteroukoliv denní dobu.

Mlha je definována jako velké množství vodních kapek, které snižují dohlednost pod 1 km. *Dohlednost $V[m]$* je fyzikální veličina, pomocí které můžeme mlhu kvantitativně popsat. Zmínka o dohlednosti bude v další kapitole.

Existují různé druhy mlhy, které se dělí podle vzniku. Fyzikálně jsou ovšem všechny stejné až na speciální typ – smog, který v sobě obsahuje navíc částice prachu a částice způsobené emisí vesměs škodlivých látek v dopravě.

Rozdíl mezi mlhou a oblakem je v tom, že mlha se drží v minimální blízkosti u země, kdežto oblak nikoli (ŘEZÁČOVÁ, 2007). Stanovení zda se vyskytuje mlha či nízká oblačnost záleží na poloze pozorování, například na kopci se může vyskytovat mlha ale z polohy pod kopcem se tato mlha jeví jako nízká oblačnost. Toto je jev typický pro advekční mlhu, která se ve spektru kapek (viz dále v textu) téměř neliší. Radiační mlha se spektrem kapek liší již o něco více. Dále se mlha od oblaku liší malým rozdílem v typickém vodním obsahu q_w , kde mlha dosahuje hodnot **0.05 - 0.5 g.m⁻³**, zatímco typický vodní obsah oblačných kapek je řádově **0.1 – 1 g.m⁻³**.

Oblačné kapky mají průměr **2-80 μm** . Kapky s větším průměrem jsou již kapky srážkové, ať už se jedná o mrholení či déšť. Oblačné kapky mají kulatý tvar, takže pro jejich popis stačí určit hodnotu průměru D . Typická koncentrace N_0 , což je počet kapek obsažených v jednotce objemu, se pohybuje v řádu **10^2 kapek v cm^3** . Střední průměr kapek $D_{\text{stř}}$ je mezi **10-20 μm** .

3.2 Dohlednost

Intenzita mlhy se numericky popisuje pomocí meteorologické veličiny *dohlednost* $V[m]$ (z angličtiny visibility). V odborných textech se objevují dvě definice:

„Dohlednost je vzdálenost, v níž je kontrast daného objektu a jeho pozadí právě roven prahu kontrastové citlivosti oka pozorovatele.“ (BEDNÁŘ, 1993)

„Dohlednost je vzdálenost x , kde zdánlivý kontrast $C(x)$ klesne na 2 %“ (KRUSE, 1962), kde

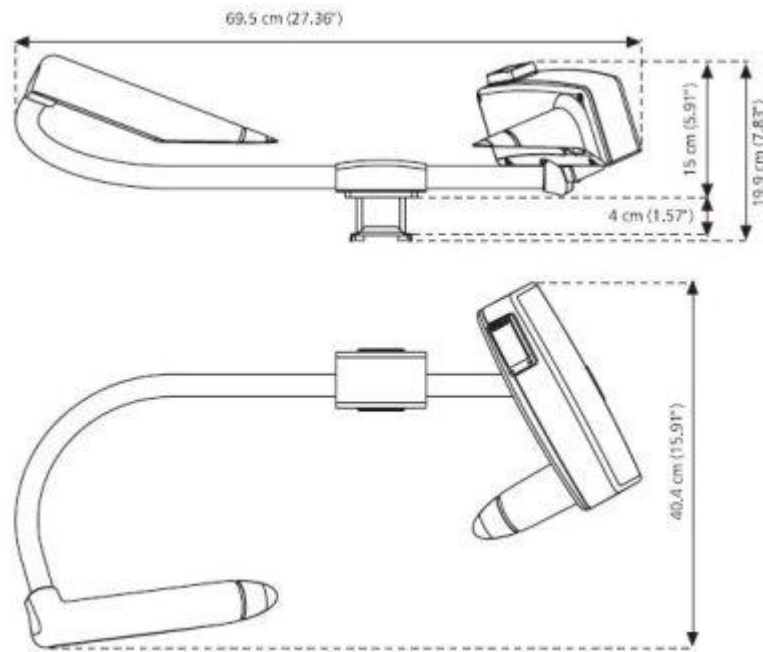
$C(x)$ je zdánlivý kontrast zdroje pozorovaného ve vzdálenosti x .

$$C(x) = \frac{I_z(x) - I_p(x)}{I_p(x)}, \text{ kde} \quad (3.1)$$

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

V odborných textech se objevuje dohlednost i jako pokles kontrastu na 5 %. Z historických důvodů se dohlednost ještě dodnes měří subjektivně, kdy pozorovatel na základě zkušeností určí aktuální dohlednost v pravidelných časových intervalech.

Postupem času byly vyvinuty přístroje na měření dohlednosti. Nejznámější výrobce je finská firma Vaisala, mezi jejíž produkty patří řada přístrojů 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. Velmi stručně lze vysvětlit princip 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. Nákres přístroje je na Obr. 1.



Obrázek 1 - Příklad PWD21 od firmy Vaisala (VAISALA, 2005)

3.3 Spektrum velikosti oblačných kapek

Četnost kapek o různých průměrech v jednotce objemu popisuje tzv. spektrum velikosti oblačných kapek $N(D)$.

Spektrum kapek je definováno tak, že součin $N(D) \cdot dD$ udává počet kapek o průměru mezi D a $D+dD$ v objemu 1 m^3 .

V oblaku jsou obsaženy kapky všech velikostí a jejich jednotlivá koncentrace se mění s časem i v prostoru. Je nemožné tento jev popsat exaktním matematickým modelem, proto je nezbytné tyto rychlé změny koncentrace zanedbat. Různé druhy oblak a mlh mají různou strukturu a tím pádem různé spektrum. Pokud není k dispozici přístroj, který by v daném místě měřil aktuální stav koncentrace, je jediným východiskem uvažovat univerzální konstatní spektrum. Spektrum kapek má přibližně gama rozdělení o obecné rovnici (ŘEZÁČOVÁ, 2007)

$$N(R) = A \cdot R^\beta \cdot \exp(-B \cdot R^\gamma) [\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}], \quad (3.2)$$

kde $N(R)$ je spektrum kapek, R je ekvivalentní poloměr kapky, A, B, β, γ jsou parametry, které je potřeba určit.

Nejrozšířenějším matematickým modelem spektra je tzv. Khrgianovo-Mazinovo rozdělení, které je odvozeno z gama rozdělení dosazením hodnot $\beta=2$, $\gamma=1$.

$$N(R) = A \cdot R^2 \cdot \exp(-B \cdot R) [cm^{-3} \mu m^{-1}], \quad (3.3)$$

Parametry A a B lze určit pomocí celkové koncentrace kapek N_0 a pomocí středního poloměru kapek $R_{stř}$, pro které platí

$$N_0 = \int_0^{\infty} N(R) \cdot dR = \frac{2 \cdot A}{B^3}, \quad (3.4)$$

$$R_{stř} = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} R \cdot N(R) \cdot dR = \frac{3}{B}, \quad (3.5)$$

V literatuře se používá vyjádření ne pomocí poloměru ale pomocí ekvivalentního průměru kapky D. Dostáváme

$$N(D) = \frac{A}{4} \cdot D^2 \cdot \exp\left(-\frac{B \cdot D}{2}\right) [cm^{-3} \mu m^{-1}], \text{ kde} \quad (3.6)$$

$$B = \frac{6}{D_{stř}} \quad (3.7)$$

$$A = \frac{B^3 \cdot N_0}{2}. \quad (3.8)$$

Pro vyjádření spektra tedy nyní stačí zvolit parametry N_0 a $D_{stř}$. Pro hodnoty $N_0=100cm^{-3}$ a $D_{stř}=15\mu m$ dostáváme konečnou rovnici ve tvaru

$$N(D) = 0.4 \cdot D^2 \cdot \exp(-0.2 \cdot D) [cm^{-3} \mu m^{-1}], \quad (3.9)$$

Podobným určením spektra se již v minulosti zabývali mnozí vědci. Například (DEIRMENDJIAN, 1975) stanovil koeficienty tak, že rovnice má tvar

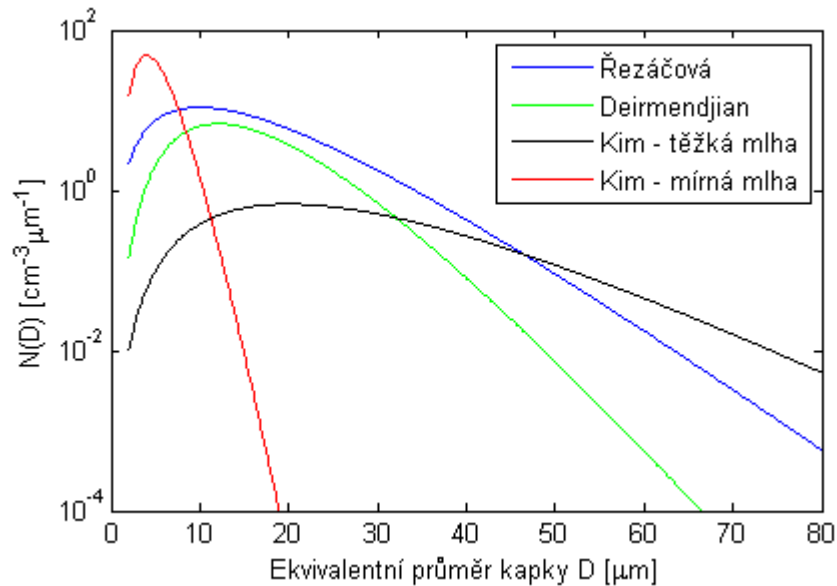
$$N(D) = 0.0171 \cdot D^4 \exp(-0.33 \cdot D) [cm^{-3} \mu m^{-1}]. \quad (3.10)$$

Další, kdo se zabýval stejnou tematikou, je (KIM, 2001). Autor zde rozlišuje mlhu na „těžkou“ a „mírnou“. Pro oba případy platí jiné spektrum:

těžká mlha $N(D) = 1.69 \cdot 10^{-3} \cdot D^3 \exp(-0.15 \cdot D) [cm^{-3} \mu m^{-1}] \quad (3.11)$

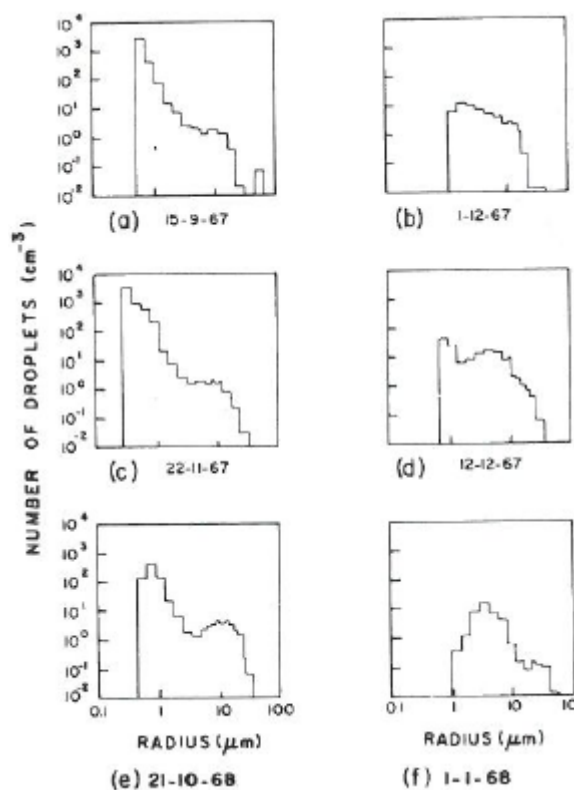
mírná mlha $N(D) = 4.746 \cdot D^6 \exp(-1.5 \cdot D) [cm^{-3} \mu m^{-1}] \quad (3.12)$

Porovnání těchto spekter je zobrazeno na Obr. 2. Hodnoty se liší až o jeden řád, což potvrzuje, že jednotné spektrum nemůže být jednoznačně určeno. Nicméně je patrné, že spektrum odvozeno dle (ŘEZÁČOVÁ, 2007) se zdá být optimálním řešením.



Obrázek 2 - Porovnání spekter oblačných kapek

Pro porovnání s reálnými měřeními je na Obr. 3 zobrazeno 6 různých spekter oblačných kapek naměřených v různé dny v období od 15.9.1967 – 1.1.1968 (PRUPPACHER, 1980)



Obrázek 3 - Naměřená spektra oblačných kapek

3.4 Index lomu

Při průchodu světla kapičkou vody dochází ke skokové změně indexu lomu. Následkem toho dochází k rozptylu paprsku a zároveň k jeho absorpci v molekulách vody. Index lomu je tedy z hlediska šíření optického signálu zásadní veličina a je potřeba si ji definovat.

Index lomu n je bezrozměrná fyzikální veličina, která popisuje rychlost šíření světla v dané látce. Platí vztah

$$n = \frac{c}{v} [-], \quad (3.13)$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu (přibližně $3 \cdot 10^8$ m/s),

v je rychlost šíření světla v dané látce.

Dá se spočítat z parametrů popisujících každou látku:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}, \quad (3.14)$$

kde ϵ_r je relativní permitivita,

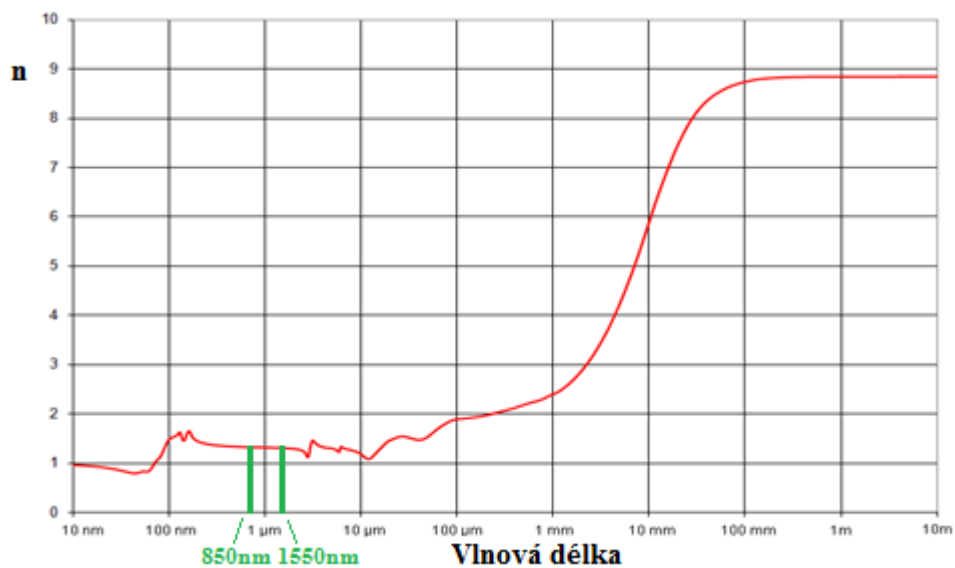
μ_r je relativní permeabilita.

Protože reálné materiály v přírodě nejsou ideální, je index lomu komplexní a závislý na frekvenci.

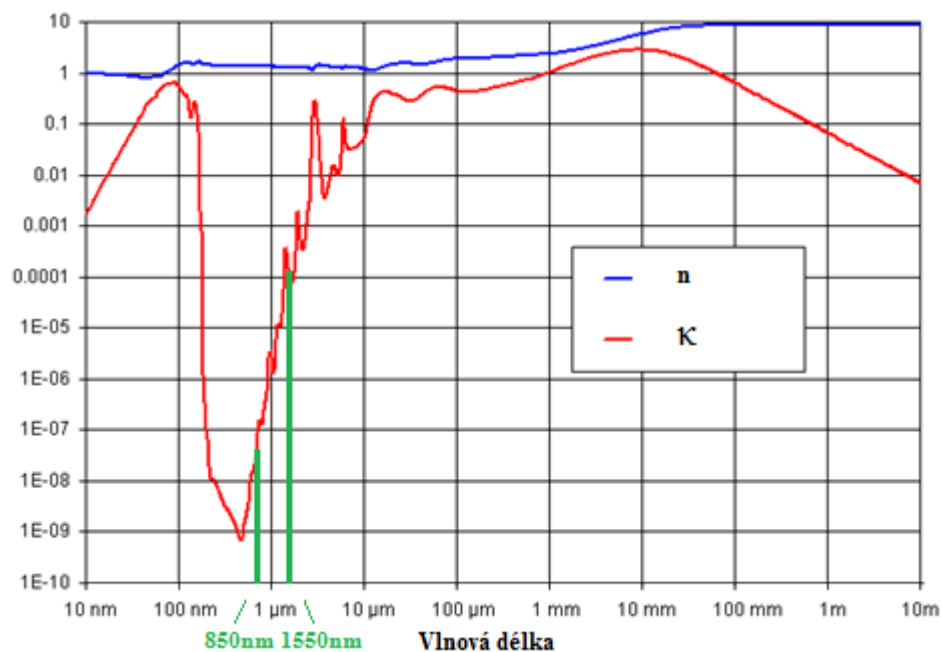
$$\hat{n} = n(\omega) + i\kappa(\omega) \quad (3.15)$$

Reálná část určuje tzv. *fázovou rychlost*, tedy rychlost šíření ploch se stejnou fází. Imaginární člen $\kappa(\omega)$ se nazývá tzv. *index absorpce* a udává míru útlumu pohlcením v dané látce.

Tento výzkum je zaměřen na šíření optického signálu v atmosféře, kde největší vliv mají kapičky vody. Nejvíce nás tedy zajímá index lomu vody. (SEGELSTEIN, 1981)



Obrázek 4 - Reálná část indexu lomu vody



Obrázek 5 - Imaginární část indexu lomu vody

Zatímco index lomu vzduchu je velmi blízký indexu lomu vakua ($n=1.0026$), index lomu vody se již liší výrazněji. Hodnoty pro důležité vlnové délky jsou uvedeny v Tab. 1.

Tabulka 1 - Index lomu vody

	Reálná část - $n(\omega)$	Imaginární část - $\kappa(\omega)$
$\lambda=850\text{nm}$	1.324718	2.929E-07
$\lambda=1550\text{nm}$	1.310923	1.348E-04

4 Výkonové úrovně na OBS

Komunikační rovnice pro optické bezkabelové systémy má tvar

$$P_{m,RXA} = P_{m,TXA} - \alpha_{tot} [dB], \quad (4.1)$$

kde

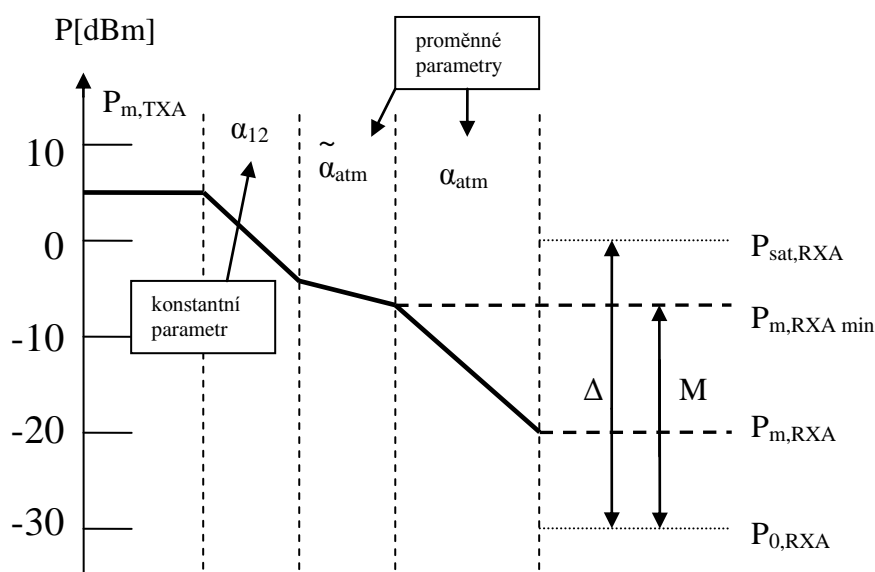
- $P_{m,RXA}$ je střední hodnota přijatého výkonu na apertuře přijímače
- $P_{m,TXA}$ je střední hodnota vyzářeného výkonu na apertuře vysílače
- α_{tot} je celkový útlum prostředím mezi vysílačem a přijímačem

Celkový útlum prostředím α_{tot} můžeme rozdělit na:

- α_{12} - útlum vlivem ředění energie
- $\tilde{\alpha}_{atm}$ - útlum průchodem „čistou“ atmosférou
- α_{atm} - útlum způsobený náhodnými atmosférickými jevy.

$$\alpha_{tot} = \alpha_{12} + \tilde{\alpha}_{atm} + \alpha_{atm} [dB] \quad (4.2)$$

Postupně budou rozebrány jednotlivé členy této rovnice. Obr. 6 znázorňuje výkonové úrovně optického spoje. Vlevo na diagramu je úroveň u vysílače, poté paprsek prochází atmosférou a utlumený ho přijímá přijímač.



Obrázek 6 - Výkonové úrovně optického spoje (KVÍČALA, 2009)

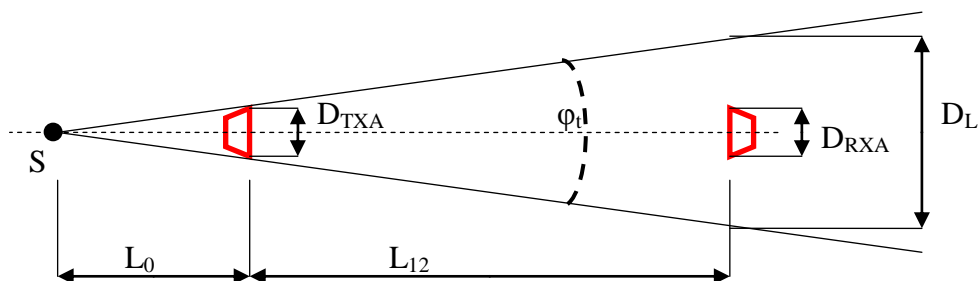
$P_{m,RXAmin}$ je střední hodnota přijatého výkonu pro čistou atmosféru. $P_{sat,RXA}$ a $P_{0,RXA}$ jsou saturační a citlivostní práh přijímače. Jejich rozdíl určuje *dynamický rozsah přijímače* Δ . Pokud nastane na spoji útlum takový, že úroveň signálu u přijímače klesne pod citlivostní práh, nastane výpadek komunikace.

Rozdíl mezi přijatým výkonem pro ideální čistou atmosféru a prahem citlivosti přijímače je tzv. *linková rezerva* M .

4.1 Konstantní útlum OBS vlivem ředění výkonu ve svazku

Volným prostorem se optická vlna šíří formou nejčastěji Gaussovských rozbíhavých paprsků s divergencí φ_t několik miliradiánů. Se vzdáleností kvůli divergenci klesá hustota energie záření, což je hlavní aspekt, který způsobuje **útlum vlivem ředění výkonu** α_{12} .

Obecně je α_{12} poměr výkonu na straně vysílače a na straně přijímače za podmínky „čisté“ atmosféry. Paprsek se ve vzdálenosti L_{12} rozptýlí do kruhu o průměru desítek centimetrů až jednotky metrů. Průměr přijímací apertury se volí v jednotkách centimetrů, přijímač tedy nemůže přijmout veškerý vyslaný výkon.



Obrázek 7 - Útlum vlivem ředění výkonu

kde L_{12} je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem,

L_0 je pomocná délka - vzdálenost mezi aperturou vysílače a bodem S, což je teoretický bod zdroje záření.

φ_t je divergence svazku

D_{TXA} a D_{RXA} jsou průměry vysílací a přijímací apertury

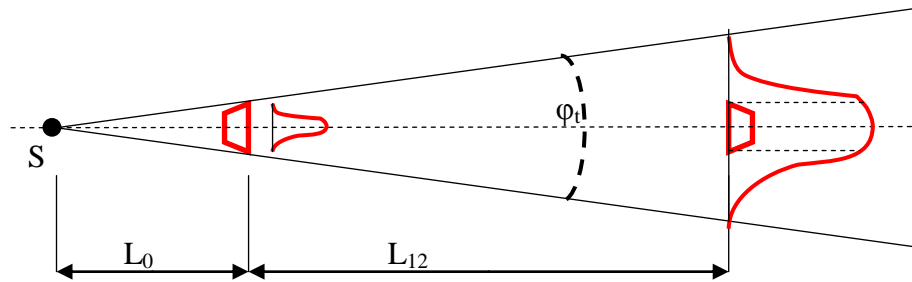
D_L je průměr paprsku ve vzdálenosti L_{12}

Z Pythagorovy věty lze odvodit, že pro pomocnou délku platí přibližně

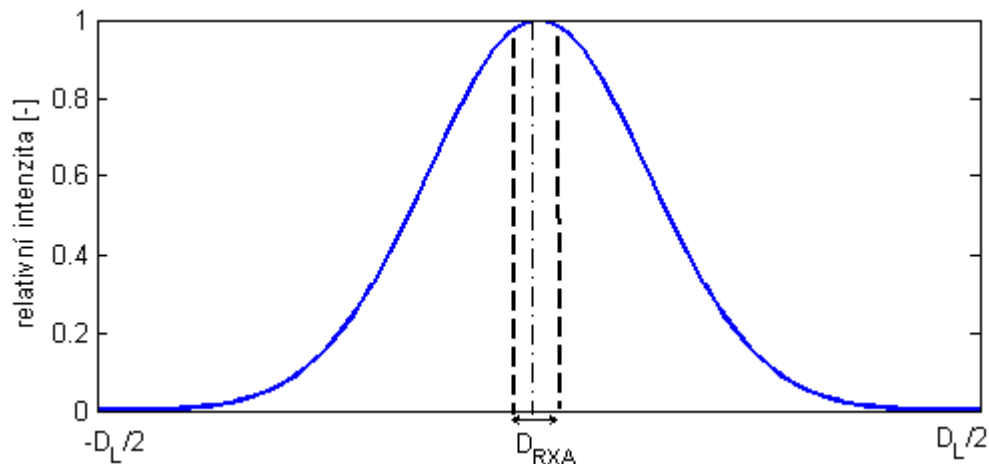
$$L_0 \approx \frac{D_{TXA}}{\varphi_t} \quad (4.3)$$

Průměr rozptýleného paprsku dle Obr. 7 lze určit:

$$D_L = 2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_t}{2}\right) \cdot \left(L_{12} + \frac{D_{TXA}}{\varphi_t}\right) \quad (4.4)$$



Obrázek 8 - Rozložení výkonu paprsku



Obrázek 9 - Gaussovo rozložení výkonu v paprsku ve vzdálenosti L_{12}

Pro stanovení útlumu vlivem ředění výkonu uvažujeme bezztrátový přenos, celkový výkon paprsku ve vzdálenosti L_{12} je tedy shodný s výkonem u vysílače, pouze je rozložený do širšího prostoru. Útlum vlivem ředění výkonu je poměr výkonu přijatého signálu k výkonu signálu vyslaného. Na základě Obr. 9 je tento vztah vyjádřen poměrem integrálů:

$$\alpha_{12} = \frac{\int_{D_{RxA}/2}^{D_L/2} g(D) \cdot dD}{\int_0^{D_{RxA}/2} g(D) \cdot dD} \quad (4.5)$$

kde $g(D)$ je Gaussova křivka odpovídající rozložení intenzity paprsku.

Pro vyjádření v decibelové míře dostáváme vztah:

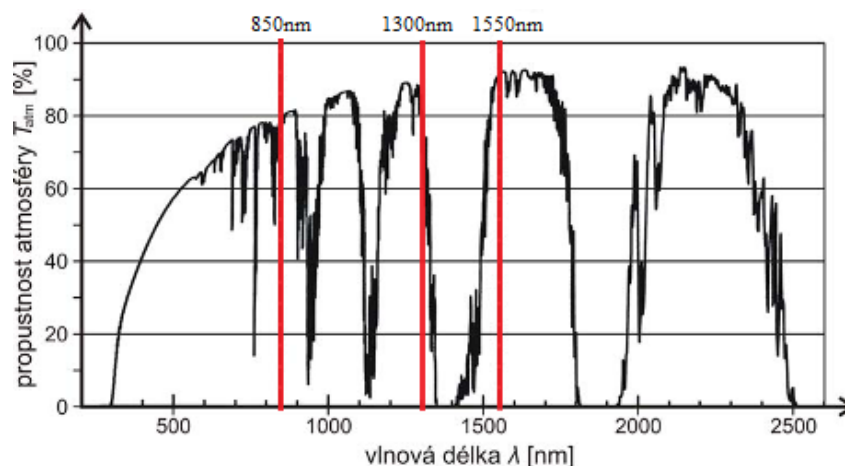
$$\alpha_{12} = 10 \cdot \log \left(\frac{\int_{D_{RXA}/2}^{D_L/2} f(D) \cdot dD}{\int_0^{D_{RXA}/2} f(D) \cdot dD} \right) [dB] \quad (4.6)$$

Graf na Obr. 9 je symetrický podle nuly na ose x, stačí tedy počítat pouze kladnou část od 0 do $D_L/2$. Tento výpočet platí za předpokladu, že je paprsek dokonale zaměřen na přijímací aperturu.

Podobné odvození je v článku (Recommendation ITU-R, 2007) kde je vyjádřen útlum jako poměr ploch paprsku u přijímače a u vysílače, neuvažuje se tedy rozdíl od vztahu (4.6) s rozložením výkonu paprsku.

4.2 Útlum průchodem „čistou“ atmosférou

Pojem „čistá“ atmosféra právem patří do uvozovek, jedná se totiž o stav, kdy není snížena dohlednost, čili je jasno. Vzduch ale není nikdy čistý doslova - obsahuje různé plyny, poletují v něm pevné částice, hmyz a má i svojí vlhkost, tedy obsahuje nějaké minimální množství vodních částic. To vše způsobí optickému signálu mírný útlum. Tento útlum se mění v závislosti na aktuálních podmínkách a to jak krátkodobě v rámci několika minut, kdy se mění útlum o desetiny dB, tak dlouhodobě v řádu týdnů, kdy se mění průměrná úroveň útlumu až o jednotky dB. Na následujícím grafu je vykreslena propustnost atmosféry v závislosti na vlnové délce optického paprsku. (KVÍČALA, 2009)



Obrázek 10 - Propustnost atmosféry

Na základě grafu na Obr. 10 se začaly používat pro přenos vlnové délky v oblastech nejvyšší propustnosti (tzv. *okna*):

- 850nm
- 1300nm
- 1550nm

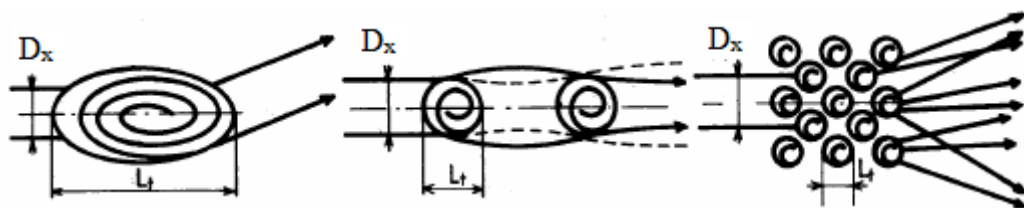
4.3 Útlum náhodnými atmosférickými jevy

4.3.1 Atmosférické turbulence

Termické turbulence vznikají při interakci studených a teplých mas vzduchu v atmosféře. Způsobují náhodné **změny indexu lomu**, které následně vyvolávají redistribuci směru šíření signálu. Jsou časově velmi nestálé, proto je obtížné je nějakým způsobem zahrnout do výpočtu.

Způsob interakce závisí na velikosti turbulentní poruchy L_t vzhledem k šířce paprsku D_x ve vzdálenosti x . Mohou nastat 3 situace (WILFERT, 2002):

- $D_x \ll L_t$ – turbulentní porucha se chová jako objekt, ve kterém se paprsek láme a odklání se jiným směrem. Pokud není použit *Autotracking*, může dojít k přerušení komunikace (viz kap. Vlastnosti optických spojů).
- $D_x \approx L_t$ – turbulence se chová jako čočka, která změní divergenci svazku, nikoliv jeho směr. Nemívá na přenos zásadní důsledky.
- $D_x \gg L_t$ – větší množství menších turbulentních poruch způsobí rozptyl paprsku různými směry. Dochází k velkému útlumu.



Obrázek 11 - Atmosférické turbulence (WILFERT, 2002)

Hlubším rozbohem vlivu turbulencí na optický spoj se zabývá disertační práce kolegy Ing. J. Peška.

4.3.2 Útlum atmosférickými částicemi

Pokud budeme uvažovat homogenní neměnnou atmosféru, je možné vyjádřit útlum způsobený atmosférickými částicemi jako funkci vzdálenosti

$$\alpha_{atm} = \alpha_0 L_{12} [dB], \quad (4.7)$$

kde

- α_0 je měrný útlum způsobený částicemi v dB/km
- L_{12} je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem

4.3.2.1 Měrný útlum

Měrný útlum α_0 způsobuje několik aspektů.

- útlum absorpcí v částicích
- útlum rozptylem na částicích

Paprsku kladou ve volném prostoru největší překážku vodní částice. Jakmile paprsek prochází skrz kapku vody, část energie se rozptýlí do všech stran a další část energie se ztratí přeměnou na teplo, čili dojde k částečné absorpci.

4.3.2.2 Útlum absorpcí v částicích

Útlum absorpcí v dané látce udává imaginární část komplexního indexu lomu - **index absorpce $\kappa(\omega)$** , který je pro každou látku charakteristický. Index absorpce vody je pro optické vlnové délky následující (viz Tab. 1):

$$\lambda = 850\text{nm} \quad \Rightarrow \quad \kappa = 2.929\text{E-}07$$

$$\lambda = 1550\text{nm} \quad \Rightarrow \quad \kappa = 1.348\text{E-}04$$

V porovnání s hodnotami na vlnových délkách používaných pro rádiovou komunikaci je útlum absorpcí na optických kmitočtech velmi nízký a v porovnání s útlumem způsobeným rozptylem prakticky zanedbatelný.

4.3.2.3 Útlum rozptylem na částicích

Pro dimenzionální popis částic, které mají vliv na přenos, se používá několik veličin:

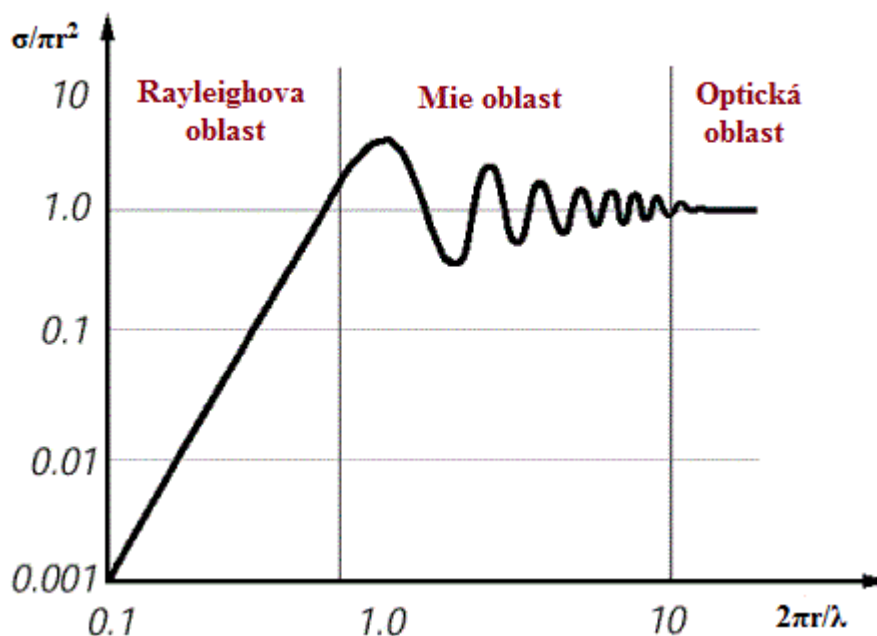
Efektivní odrazná plocha σ (RCS – Radar Cross-Section)

Efektivní odrazná plocha má veliký význam v radiolokační technice. Je definována tak, že efektivní odrazná plocha částice násobená dopadajícím výkonem se rovná celkovému výkonu vyzářeného izotropickým zářičem, který září ve zpětném směru se stejným výkonem jako ta částice.

Poměr efektivní odrazné plochy σ se skutečnou velikostí částice se mění v závislosti na veličině x , což je poměr velikosti částice s vlnovou délkou záření.

$$x = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \quad (4.8)$$

kde D je průměr částice a λ je vlnová délka.



Obrázek 12 - Efektivní odrazná plocha (WOLFF, 1997)

Tento diagram (Obr. 12) je rozdělen na 3 oblasti. Pokud je částice mnohem menší než vlnová délka ($x \ll 1$), je efektivní odrazná plocha v porovnání s velikostí částice lineárně závislá na parametru x . Tato oblast se nazývá Rayleighova oblast, pojmenovaná po britském fyzikovi Lordu Rayleigh. Platí zde matematický model Rayleighova rozptylu.

Naopak pokud budou částice mnohem větší než vlnová délka, je efektivní odrazná plocha rovna skutečnému obsahu kapky. K tomu dochází hlavně při velmi krátkých vlnových délkách, tato oblast tedy platí pro optickou komunikaci.

Z hlediska výpočtu je nejvíce problematická oblast, kde velikost kapky zhruba odpovídá vlnové délce.

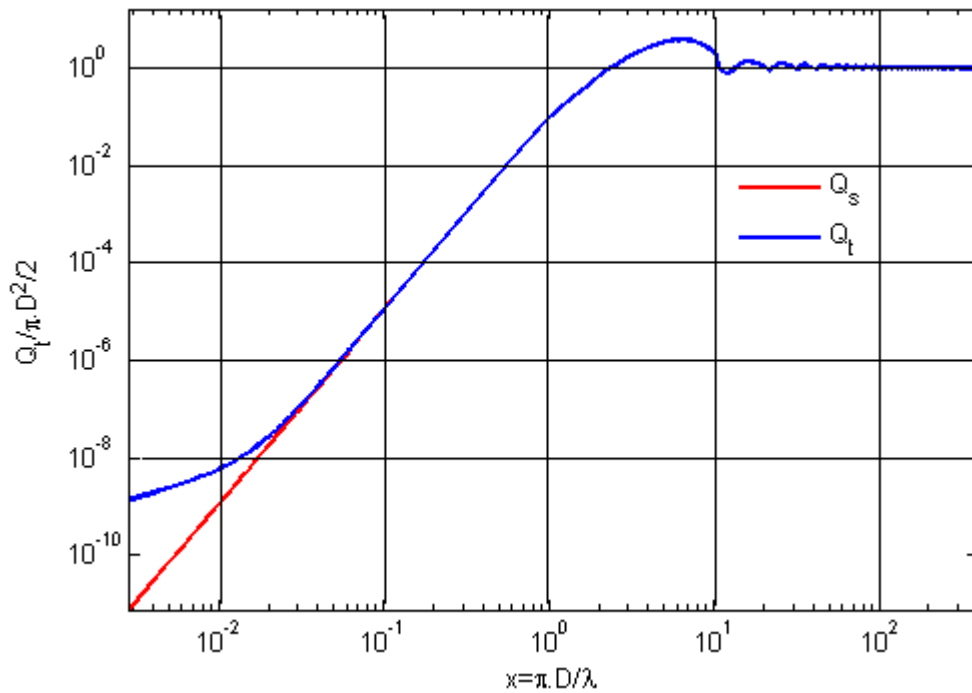
Celková ztrátová plocha Q_t

Celková ztrátová plocha (total absorption cross-section) násobená výkonem dopadajícím na částici se rovná celkovému ztracenému výkonu záření. Jedná se tedy o dopředný rozptyl, který nás v topologii vysílač-přijímač zajímá.

Celkovou ztrátovou plochu lze vyjádřit jako součet (GUNN, 1954)

$$Q_t = Q_s + Q_a \quad (4.9)$$

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



Obrázek 13 - Celková ztrátová plocha Q_t

Vidíme jasnou podobnost s grafem efektivní odrazné plochy (Obr. 12). Podobně jako σ je i Q_t závislá na parametru x ale s tím rozdílem, že v **optické oblasti** se Q_t blíží hodnotě

$$Q_t \approx \frac{\pi \cdot D^2}{2} \quad (4.10)$$

Potvrzuje se, že rozptyl charakterizovaný pomocí Q_s způsobuje na optických vlnových délkách drtivou většinu celkového útlumu. Pro hodnoty $x > 0.1$ je průběh Q_s prakticky shodný s Q_t . Teprve až pro rádiové kmitočty ($x < 0.1$) se začne projevovat i absorpce.

Z tabulky 2 vyplývá, že problematika průchodu optického paprsku skrz oblačné kapky se dle grafu na Obr. 13 nachází v optické oblasti, kde platí předcházející vzorec (4.10).

Tabulka 2 - Parametr x pro oblačné kapky

průměr kapky [μm]	850 nm	1300 nm	1550 nm
2	7.39	4.83	4.05
5	18.48	12.08	10.13
10	36.96	24.17	20.27
20	73.92	48.33	40.54
50	184.80	120.83	101.34
80	295.68	193.33	162.15

Problematiku rozptylu pro libovolný parametr x matematicky vyřešil německý fyzik Gustav Mie, jenž vycházel z Maxwellových rovnic. Výsledkem je výpočet *dopředné rozptylové funkce* $\hat{S}(x, \hat{n})$ udávající intenzitu rozptýlené energie podle vzorce: (FIŠER, 1993)

$$\hat{E}_s = \hat{E}_i \cdot \hat{S}(x, \hat{n}) \frac{e^{-jkr}}{jkr}, \quad (4.11)$$

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

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

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

\hat{n} je komplexní index lomu

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

Algoritmus pro výpočet $\hat{S}(x, \hat{n})$ je založen na Besselových funkcích a je volně ke stažení z internetu. Rozptylová funkce $\hat{S}(x, \hat{n})$ je závislá na parametru x . Jiné vyjádření rozptylové funkce (UZUNOGLU, 1977) dostáváme při použití vztahu:

$$\hat{f}(D) = -j \frac{\lambda}{2\pi} \hat{S}^* \quad (4.12)$$

Parametrem rozptylové funkce $\hat{f}(D)$ je průměr kapky D . Příspěvek k útlumu kapek s určitou velikostí lze vyjádřit součinem $\hat{f}(D) \cdot N(D) \cdot dD$. Integrálem přes všechny průměry kapek se dostáváme k vyjádření měrného útlumu vlivem rozptylu o atmosférické částice, což je hlavní aspekt způsobující útlum: (FIŠER, 2010)

$$\alpha_0 = 8.686 \cdot 10^3 \cdot \lambda \cdot \text{Im} \int \hat{f}(D) \cdot N(D) dD \quad [\text{dB/km}] \quad (4.13)$$

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 měřené např. dopplerovským oblačným radarem.

Pro celkovou ztrátovou plochu Q_t platí vztah (GUNN, 1954):

$$Q_t = \frac{\lambda^2}{2\pi} * \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \left((2n+1) \cdot (a_n + b_n)^* \right) \quad (4.14)$$

kde a_n a b_n jsou Mieovy koeficienty (MÄTZLER, 2002) z jeho algoritmu pro výpočet rozptylové funkce. Mezi Q_t a $\hat{S}(x, \hat{n})$ je tedy určitý vztah popsáný následující rovnicí

$$Q_t = \frac{4\pi}{k^2} \cdot \text{Re} \hat{S} \quad (4.15)$$

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

Měrný útlum lze z Q_t určit opět integrálem přes všechny průměry oblačných kapek (OLSEN, 1978)

$$\alpha_0 = 4.343 \int Q_t(D) \cdot N(D) dD \quad [\text{dB/km}] \quad (4.16)$$

4.3.3 Výpočet útlumu z dohlednosti

Používanějším a nejpřesnějším způsobem je odvození měrného útlumu z dohlednosti. Dohlednost velmi dobře vystihuje intenzitu mlhy a měří se snadněji než spektrum kapek, proto jsou dohledoměry levnější. Odvození vychází z Beer-Lambertova zákona:

$$I(V) = I(V \rightarrow \infty) \cdot e^{-\alpha_0 x} \quad (4.17)$$

kde $I(V)$ je svítivost při dohlednosti V , α_0 je měrný útlum v poměrných jednotkách a x je vzdálenost. Vztah (4.17) je odvozen pro vlnovou délku světla $\lambda=550$ nm.

Koeficient přenosu τ je podíl svítivosti při nějaké dohlednosti V a svítivosti při dohlednosti blížící se nekonečnu.

$$\tau = \frac{I(V)}{I(V \rightarrow \infty)} = e^{-\alpha_0 x} \quad (4.18)$$

Pro elektromagnetické pole je koeficient přenosu definován jinak než pro optiku, a sice jako poměr elektromagnetických intenzit $\tau = E_l/E_0$, kde E_0 je počáteční elektromagnetická intenzita a E_l je intenzita v místě pozorování. Vztah pro elektromagnetické pole tedy zahrnuje i útlum šířením vlnným prostorem kdežto vztah (4.18) vyjadřuje pouze vliv snížené dohlednosti.

Po zlogaritmování a následné úpravě rovnice (4.18) dostáváme

$$\alpha_0 = -\frac{\log \tau}{x \cdot \log e} \quad (4.19)$$

Dohlednost je z definice v kapitole 3.2 definována jako pokles intenzity na 2 % nebo na 5 %. Pokud tedy za τ dosadíme tyto hodnoty, vzdálenost x bude představovat dohlednost V .

Pro hodnotu $\tau = 2$ % platí vztah

$$\alpha_0 = \frac{3.91}{V} [\text{km}^{-1}] \quad (4.20)$$

Pro hodnotu $\tau = 5\%$ platí vztah

$$\alpha_0 = \frac{3.00}{V} [\text{km}^{-1}] \quad (4.21)$$

Pro přepočet na jednotky dB/km je odvození následující. Pro útlum ve vzdálenosti x platí:

$$A = e^{-\alpha_0 \cdot x} [-]. \quad (4.22)$$

Musí tedy platit rovnice:

$$10^{-\frac{\alpha_{0,dB} \cdot x}{10}} = e^{-\alpha_0 \cdot x}. \quad (4.23)$$

Po zlogaritmování a následné úpravě dostáváme vztah:

$$\alpha_{0,dB} = 4.343 \cdot \alpha_0 \quad (4.24)$$

Pro výpočet útlumu z dohlednosti v jednotkách dB/km platí výsledný vztah:

$$\alpha_0 = \frac{16.98}{V} [\text{dB/km}] \text{ pro } \tau = 2\%, \lambda = 550\text{nm}, \quad (4.25)$$

$$\alpha_0 = \frac{13.03}{V} [\text{dB/km}] \text{ pro } \tau = 5\%, \lambda = 550\text{nm}, \quad (4.26)$$

P.W.Kruse odvodil v roce 1962 vzorec pro $\tau = 2\%$, kde zohlednil i libovolnou vlnovou délku světla (experimentálně) (KRUSE, 1962):

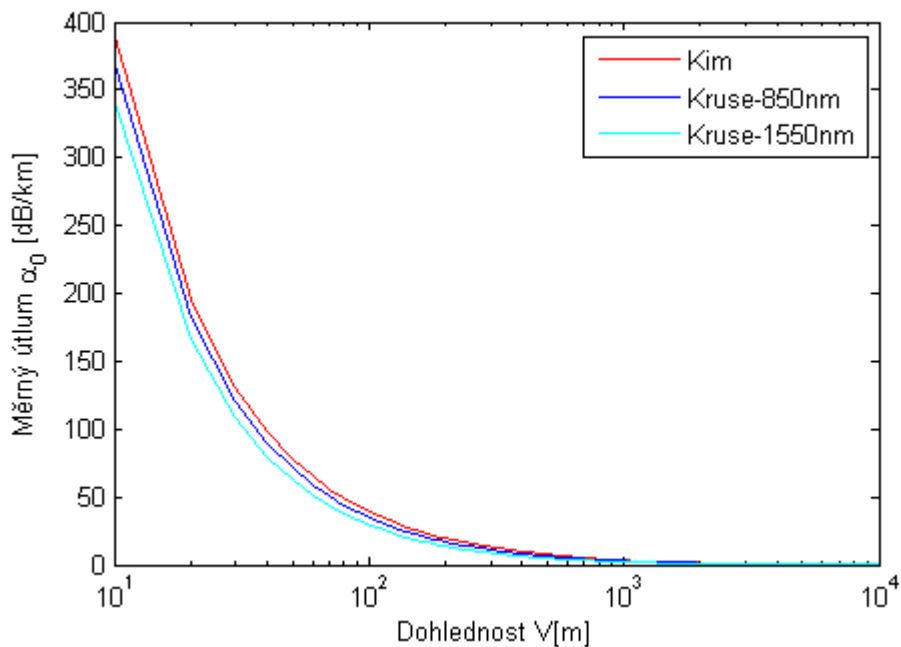
$$\alpha_0 = \frac{3.91}{V} \cdot \left(\frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q} [\text{km}^{-1}], \quad (4.27)$$

kde λ_{nm} je vlnová délka v nm a koeficient q je závislý na dohlednosti:

$$\begin{aligned} q &= 1.6 && \text{pro } V > 50 \text{ km} \\ &= 1.3 && \text{pro } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ &= 0.585 V^{1/3} && \text{pro } V < 6 \text{ km} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Podle rovnice (4.27) je útlum nepřímo úměrný dohlednosti a se zvyšující se vlnovou délkou mírně klesá. I.I.Kim ale na základě experimentálních dat dokázal, že při husté mlze, kde dohlednost klesá pod 500 m na vlnové délce nezávisí. Upravil výpočet koeficientu q na tvar (KIM, 2001):

$$\begin{aligned}
 q &= 1.6 && \text{pro } V > 50 \text{ km} && (4.29) \\
 &= 1.3 && \text{pro } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\
 &= 0.16V + 0.34 && \text{pro } 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\
 &= V - 0.5 && \text{pro } 0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\
 &= 0 && \text{pro } V < 0.5 \text{ km}
 \end{aligned}$$



Obrázek 14 - Měrný útlum určený z dohlednosti

5 Experimentální optický spoj

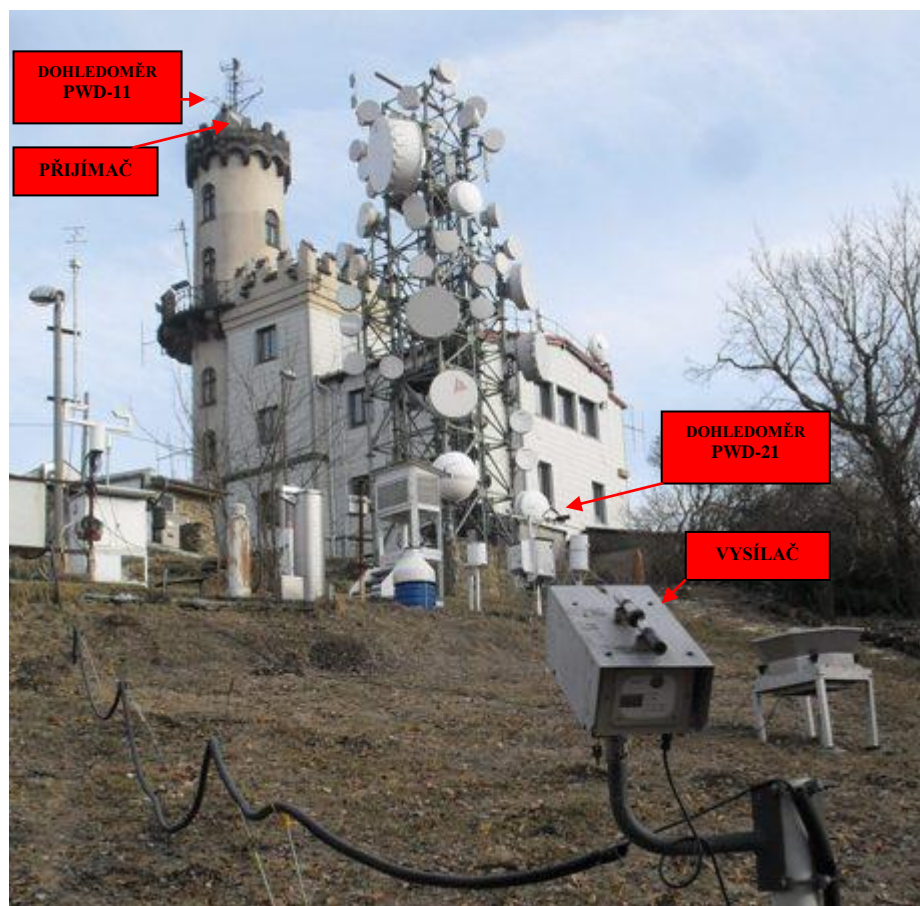
5.1 Umístění spoje

V této práci jsou zpracována data z experimentálního bezdrátového optického spoje ATMO TL - 02_DUAL zkonstruovaného na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Byl vyroben přímo k účelu měření útlumu, jelikož bezkabelové spoje běžně dostupné na trhu 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 nejdřsnějším počasím v České republice. Milešovka má hned několik primátů (ÚSTAV FYZIKY ATMOSFÉRY, 2006) – 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 atmosferických jevů na optický spoj. Díky tvaru hory jde z drtivé většiny o mlhy advekční, fyzikální rozdíly ve spektru kapek mezi mlhou a oblačností jsou tedy zanedbatelné.

V roce 1903-1904 byla na Milešovce vybudována meteorologická observatoř, která v roce 1964 přešla pod správu Ústavu fyziky atmosféry AV ČR, pod který spadá až dodnes. Od roku 1905 zde probíhá měření v pravidelných intervalech, observatoř je vybavena širokým spektrem měřicích přístrojů. Pro tuto práci jsou nejdůležitější dva dohledoměry od firmy Vaisala. Novější typ PWD-21 je umístěn několik metrů od vysílače a je schopen určit dohlednost v intervalu 10 - 20 000 m. V roce 2009 byl na věž blízko k přijímači umístěn další dohledoměr typu PWD-11 , který měří dohlednost v intervalu 10 – 2 000 m.

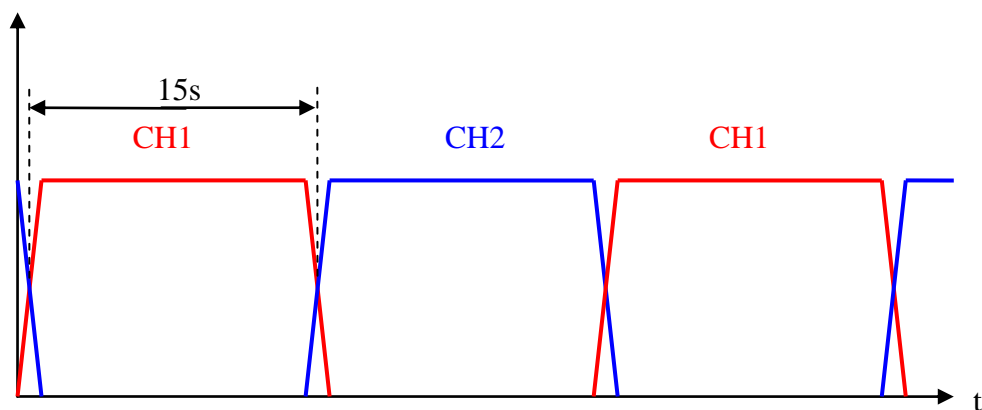
Spoj je orientovaný na jiho-jihovýchod na vzdálenost 60 m s vertikálním převýšením 29 m. Pracuje v simplexním provozu, kdy se v pravidelných intervalech střídá vysílání na dvou vlnových délkách – 830 nm a 1550 nm. Umístění spoje je zobrazeno na Obr. 15.



Obrázek 15 - Umístění spoje na Milešovce

5.2 Vysílač

Vysílač obsahuje dva oddělené optické zdroje. Jsou použity Gaussovské laserové diody s vlnovými délkami 1550 nm (CH1) a 830 nm (CH2). 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. 3.



Obrázek 16 - Střídání kanálů na optickém spoji

Tabulka 3 - Technické parametry vysílače (KVÍČALA, 2009)

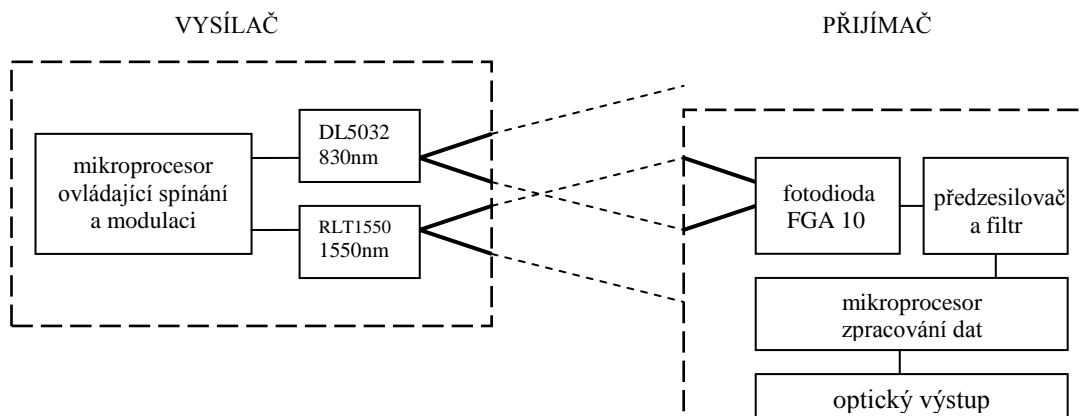
Kanál	CH2	CH1
Laserová dioda	DL5032	RLT1550-15G
Vlnová délka λ	850 nm	1550 nm
Vyzářený výkon $P_{m, TXA}$	5 mW	7 mW
Divergence svazku φ_t	10 mrad	
Průměr vysílací apertury D_{TXA}	25,4 mm	

5.3 Přijímač

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



Obrázek 17 - Optický vysílač (vlevo) a přijímač (vpravo)



Obrázek 18 - Blokové schéma optického spoje

Spoj je vyroben za účelem zkoumání útlumu signálu. Výslednou informací je jeden řádek v textovém souboru, který obsahuje časový údaj, identifikaci kanálu, hodnotu útlumu v dB a směrodatnou odchylku vzniklou při průměrování v daném vysílacím intervalu.

Tabulka 4 - Ukázka dat z optického spoje

2010	10	16	03	41	57	CH 1	A	19.69	D	0.07
2010	10	16	03	42	12	CH 2	A	19.46	D	0.10
2010	10	16	03	42	27	CH 1	A	19.69	D	0.08
2010	10	16	03	42	42	CH 2	A	19.46	D	0.09
2010	10	16	03	42	57	CH 1	A	19.69	D	0.07
2010	10	16	03	43	12	CH 2	A	19.47	D	0.09
2010	10	16	03	43	27	CH 1	A	19.69	D	0.07
2010	10	16	03	43	42	CH 2	A	19.48	D	0.11

Měření dohlednosti je zaznamenáváno každých 15 minut ve formě průměrné dohlednosti za celý předchozí měřicí interval. Výstupní data jsou ve formátu tabulkového procesoru:

Tabulka 5 - Ukázka dat z dohledoměru PWD-21

DAT	CAS	PW_VIS10
6.3.2010	01:15	20000
6.3.2010	01:30	20000
6.3.2010	01:45	18847
6.3.2010	02:00	18280
6.3.2010	02:15	17257
6.3.2010	02:30	16765
6.3.2010	02:45	9011
6.3.2010	03:00	487
6.3.2010	03:15	1108
6.3.2010	03:30	1018
6.3.2010	03:45	1476
6.3.2010	04:00	947

5.4 Útlum vlivem ředění výkonu na Milešovce

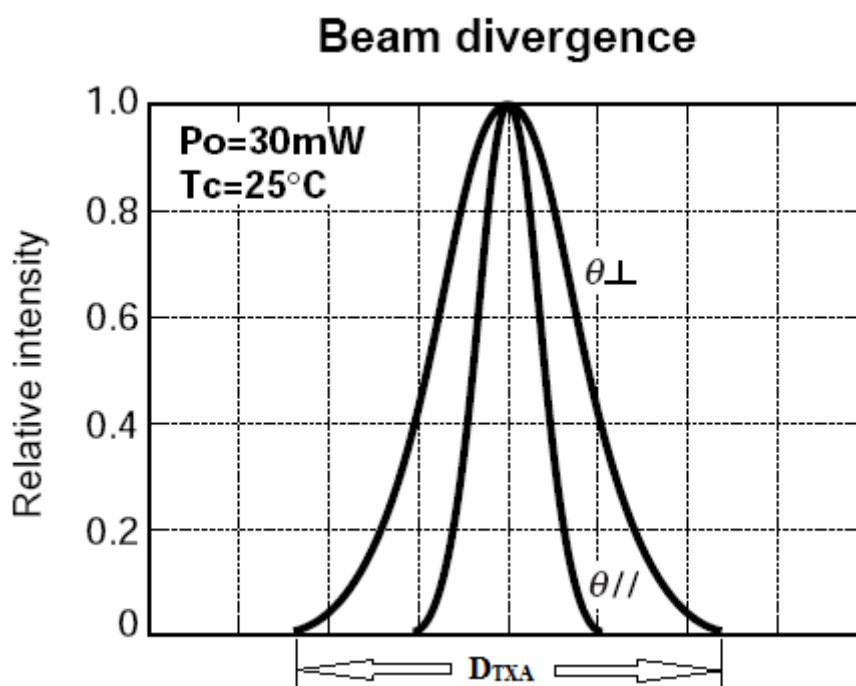
Teoreticky lze určit útlum šířením volným prostorem dle vzorce (4.5). Parametry spoje na Milešovce jsou následující:

- $L_{12} = 60m = 0.06km$
- $D_{TXA} = 25.4mm = 2.54 \cdot 10^{-2} m$
- $D_{RXA} = 60mm = 0.06m$
- $\varphi_t = 10mrad = 0.01rad$

Pomocí vztahu pro D_L (4.4) určíme průměr kruhu, do kterého se rozprostře paprsek u přijímače ve vzdálenosti $L_{12} = 60 m$.

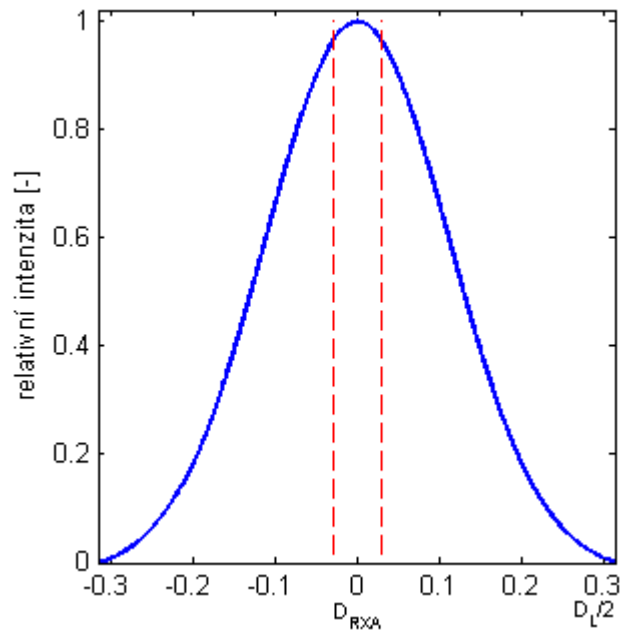
$$D_L = 2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_t}{2}\right) \cdot \left(L_{12} + \frac{D_{TXA}}{\varphi_t}\right) = 2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{0.01}{2}\right) \cdot \left(0.06 + \frac{2.54 \cdot 10^{-2}}{0.06}\right) =$$
$$= 0.6254m = \underline{62.54cm} \quad (5.1)$$

V datasheetu diody DL5032 (CH2) je uveden tvar rozložení výkonu vysílacího paprsku (viz Obr. 19).



Obrázek 19 - Rozložení výkonu vysílaného paprsku diody DL5032

Porovnání rozložení výkonu u přijímače s průměrem přijímací čočky je zobrazeno na Obr. 20.



Obrázek 20 - Rozložení výkonu na experimentálním spoji u přijímače
 Výpočtem dle vzorce (4.5) pro útlum v poměrných jednotkách dostáváme:

$$\alpha_{12} = \frac{\int_{D_{RXA}/2}^{D_L/2} g(D) \cdot dD}{\int_0^{D_{RXA}/2} g(D) \cdot dD} = \frac{\int_{0.03127}^{0.3127} g(D) \cdot dD}{\int_0^{0.03127} g(D) \cdot dD} = \underline{3.5719} \quad (5.2)$$

V decibelové míře vyjádřeno:

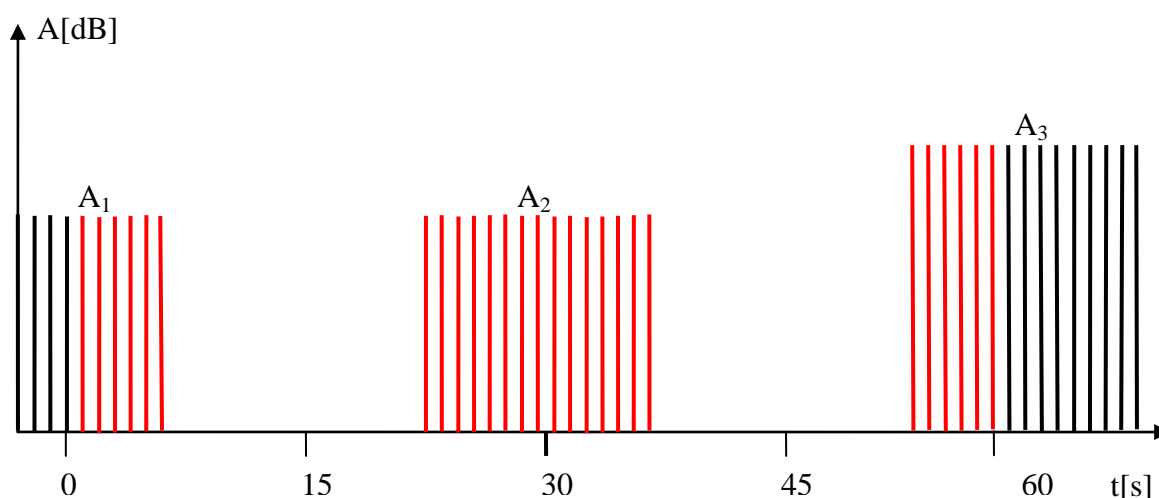
$$\alpha_{12} = 10 \cdot \log(3.5719) = \underline{5.529dB} \quad (5.3)$$

Paprsek se u obou kanálů rozloží do plochy o průměru 62.5 cm. Průměr přijímací čočky je 6 cm, tedy zhruba desetina. Za předpokladu ideálního zaměření paprsku přímo do středu přijímací apertury dosahuje útlum vlivem ředění výkonu optického spoje na Milešovce hodnoty **5.53 dB**. Tato hodnota odpovídá měření prezentovanému v další kapitole.

5.5 Zpracování dat z optického spoje

Pro potřeby matematických operací je nutné oboje data časově sesynchronizovat. Perioda byla zvolena na hodnotu **1 minuta**. Pro dosažení co nejpřesnější hodnoty, která by nejlépe odpovídala skutečnosti, byl zvolen následující postup zpracování dat.

Jeden údaj útlumu odpovídá průměrné hodnotě za 15 s vysílání na dané vlnové délce. Zapsaný časový údaj je konec měřicího intervalu. Do jedné minuty se vejdu maximálně 2 tyto intervaly a nelze použít jednoduché průměrování, protože údaj může zasahovat do dvou po sobě jdoucích minutových intervalů. Lze si představit, že průměrná hodnota útlumu za 15-секundové vysílání byla po celou dobu konstantní. Tento průběh navzorkujeme s intervalem 1s a získáme tak dostatečný počet hodnot k tomu, aby byl minutový průměr co nejbližší skutečnosti. Z těchto hodnot je poté počítán aritmetický průměr, čímž získáme výslednou hodnotu útlumu pro každou minutu. Jedná se prakticky o vážený průměr, kdy interval, který je celý obsažen v dané minutě, poskytuje nejvíce hodnot a má největší vliv na hodnotu průměrného útlumu.

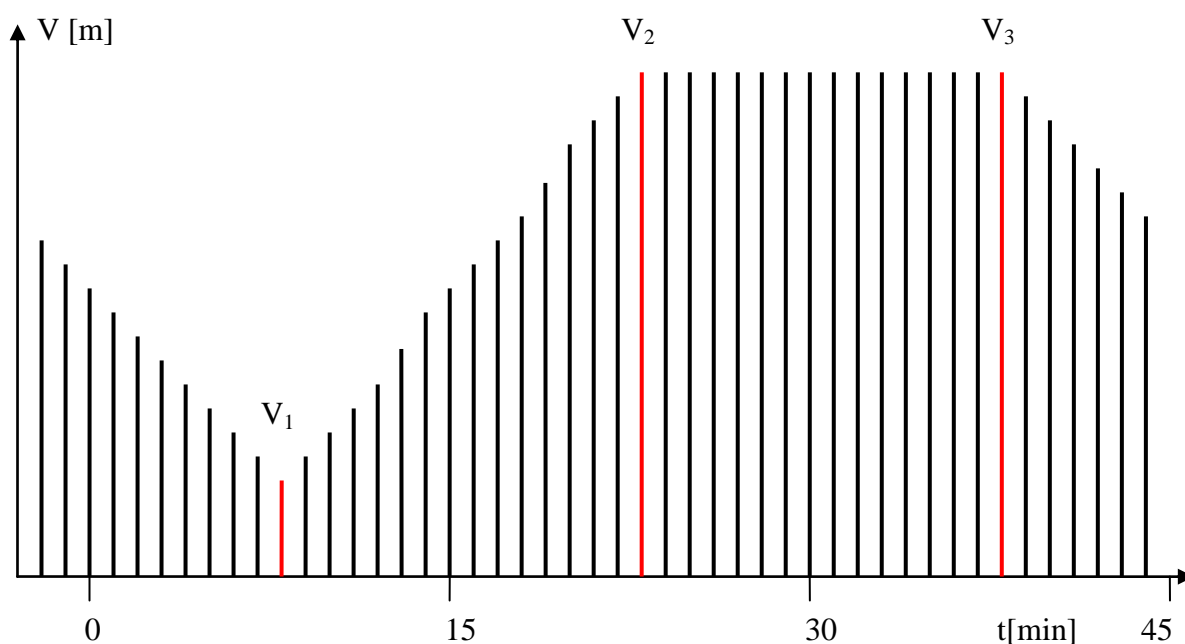


Obrázek 21 - Zpracování dat optického spoje

Pokud je v dané minutě nízký počet vzorků, dochází k výraznému zkreslení. Proto byla zavedena podmínka, že vzorky musí vyplňovat alespoň čtvrtinu intervalu, tedy 15 vzorků. Při menším počtu vzorků je vyhodnocen výpadek spoje, předejdeme tak chybným výpočtům.

5.6 Zpracování dat dohlednosti

Hodnota dohlednosti ve třetím sloupci v Tab. 5 udává průměrnou hodnotu za předešlý 15-ti minutový interval. Aby se dosáhlo co nejlepšího přiblížení skutečnosti, posuneme hodnotu útlumu v čase o 7 min zpět – tedy zhruba do poloviny časového intervalu, který tato hodnota reprezentuje. Na rozdíl od optického spoje je měření dohlednosti kontinuální, minutové hodnoty tak můžeme získat lineární interpolací, jak naznačuje následující graf na Obr. 22:



Obrázek 22 - Zpracování dat dohlednosti

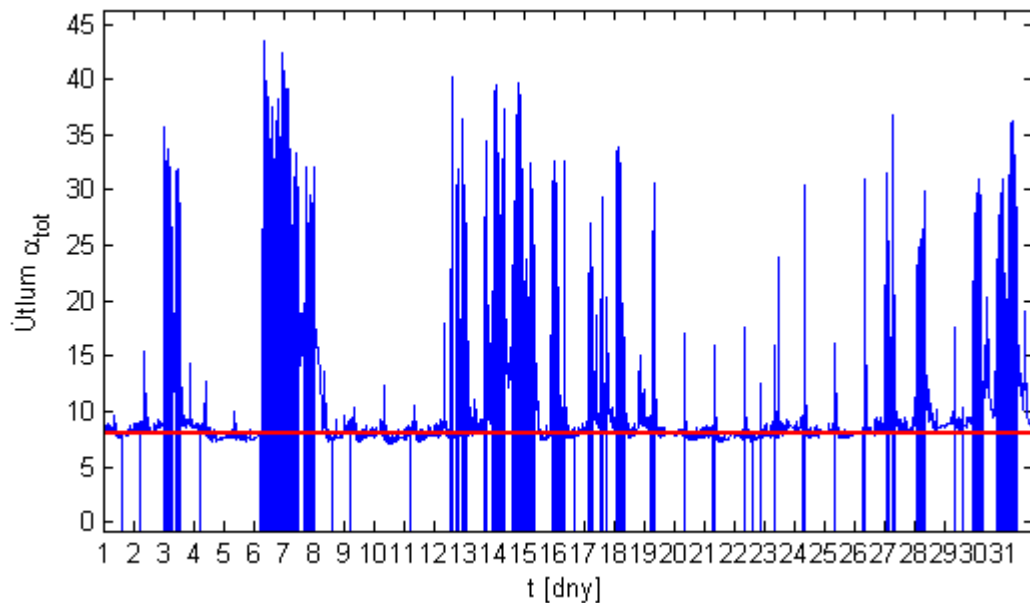
Všechny výpočty jsou prováděny v programovém prostředí Matlab. Po tomto základním zpracování dat lze provádět matematické výpočty jako např. korelace útlumu s dohledností apod.

6 Analýza experimentálních dat

Tato kapitola se zabývá popisem zpracovaných dat a porovnáním empirických výsledků s teoretickými předpoklady.

6.1 Časový průběh měření útlumu

Na následujícím grafu (Obr. 23) je zobrazen časový průběh celkového útlumu α_{tot} na CH2 (vlnová délka 830nm) v období celého měsíce srpna 2010.

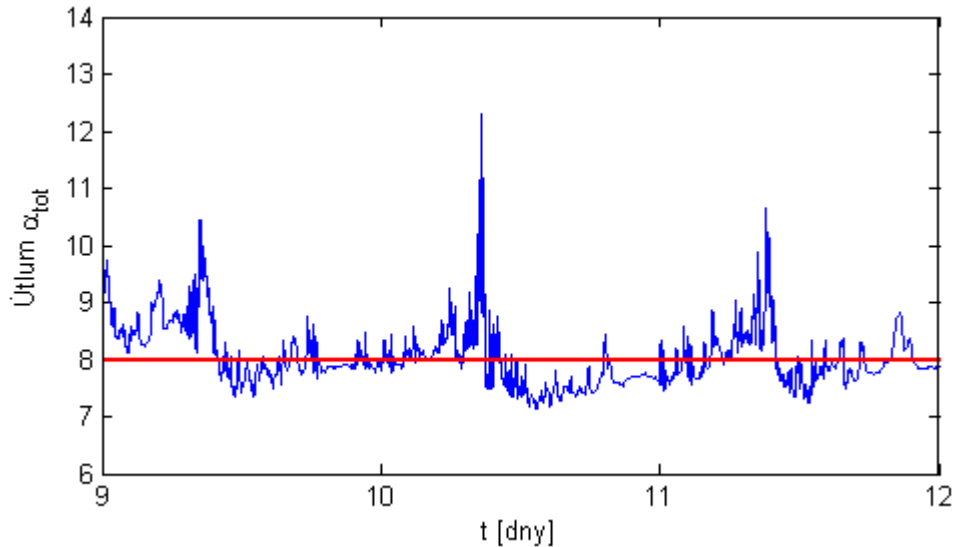


Obrázek 23 - Časový průběh celkového útlumu α_{tot} na CH2(830nm) v srpnu 2010

Zápornými hodnotami jsou znázorněny výpadky měření, kdy došlo k překročení citlivostního prahu přijímače $P_{0,RXA}$. K výpadkům dochází i v časových úsecích, kdy se útlum pohybuje okolo 20 dB. To je zřejmě způsobeno větrnými turbulencemi, které způsobí odklonění paprsku z dráhy mezi vysílačem a přijímačem. Maximální detekované útlumy dosahují téměř 45 dB na vzdálenost 60 m, což při přepočtu odpovídá měrnému útlumu α_0 až 700 dB/km. V těchto extrémních podmínkách je nutné v praxi volit pokud možno velmi malou vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem.

Minimální hodnoty útlumu se v tomto období pohybují v rozmezí okolo 8dB. Jedná se o situaci, kdy se nevyskytuje žádná mlha ani déšť a projevuje se útlum šířením vlivem ředění energie α_{12} a útlum průchodem čistou atmosférou $\tilde{\alpha}_{atm}$.

Na Obr. 24 je zobrazen detail v období 9.-12. srpna, kde se neprojevil útlum způsobený atmosférickými jevy.



Obrázek 24 - Časový průběh celkového útlumu α_{tot} na CH2(830nm) v období 9.-12. srpna 2010

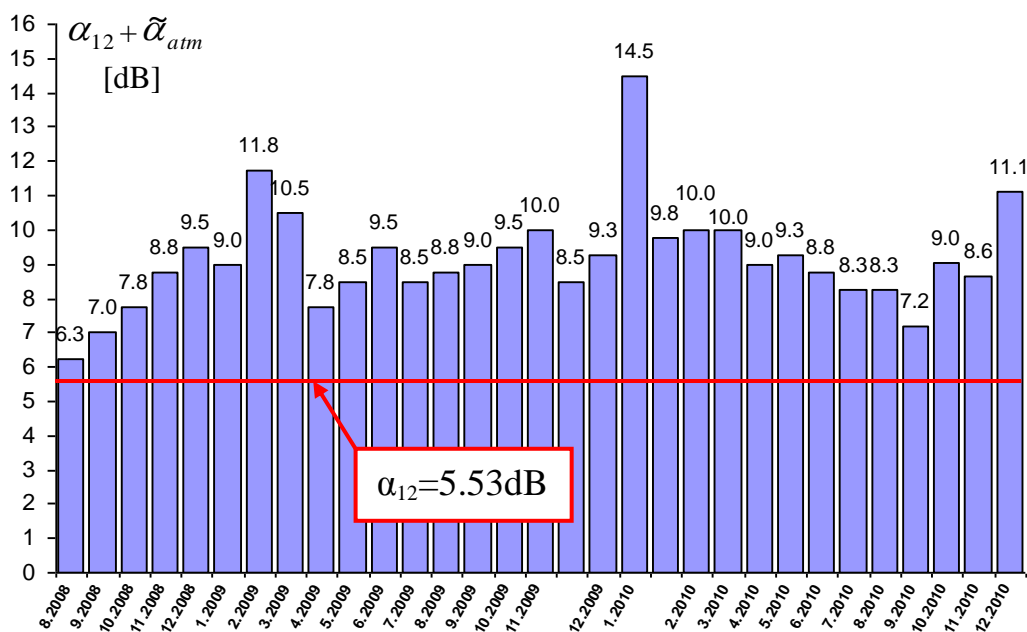
Z grafu je zřetelná krátkodobá fluktuace útlumu až o 1 dB. Mimo jiné se zde projevují i atmosférické turbulence. Pro získání informace o útlumu způsobeném atmosférickými jevy je nutné odečíst tzv. *práh*, což představuje právě útlum $\alpha_{12} + \tilde{\alpha}_{atm}$.

6.2 Automatické prahování

Pro zautomatizované určení prahu byl použit následující algoritmus (PEŠEK, 2010):

V daném období (v našem případě byla zvolena perioda 1 měsíc) se určí minimální hodnota útlumu A_{min} . Z dat, které vyhovují rozmezí A_{min} až $A_{min}+B$ se zobrazí histogram s danou velikostí intervalu na ose x a najde se hodnota s nejvyšší četností. B je empirická konstanta, v našem případě používáme hodnotu 7 dB. Tímto způsobem je určen i práh na předcházejícím grafu na Obr. 24. Po odečtení prahu do značné míry eliminujeme útlumy způsobené vedlejšími vlivy jako nečistoty na skle, v zimě případné zamrznutí hledí apod. Prahováním tedy získáme informaci o útlumu vlivem atmosférických jevů α_{atm} . Z grafu je patrné, že po odečtení budou některé útlumy v záporných hodnotách. V těchto případech lze uvažovat, že útlum atmosférickými jevy nenastává a tedy ho **položíme nule**. Vyhnete se tak nepříjemnostem při statistickém zpracování a přitom se nejedná o

zkreslování dat. Z důvodu odlišení naměřeného a teoreticky vypočítaného útlumu zavedeme pro naměřený útlum po prahování označení **A**.



Obrázek 25 - Prahy kanálu CH2

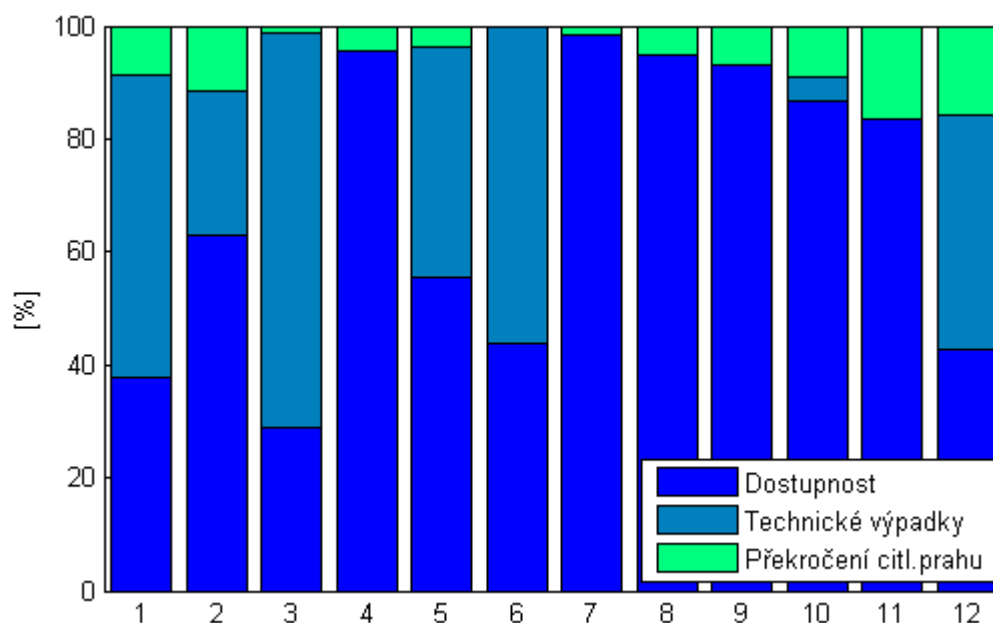
Prahy se vlivem různého složení vzduchu mění i dlouhodobě až o jednotky dB. Na Obr. 25 je patrný trend – v létě bývá nižší práh než zimním období. To může být mimo jiné způsobeno zamrzlým krytem přijímače, které na rozdíl od vysílače v této době nedisponovalo vlastním vytápěním.

6.3 Dostupnost spoje

Jak již bylo zmíněno, dostupnost je procento času, kdy spoj plní svoji funkci. Rozlišujeme dva druhy výpadků:

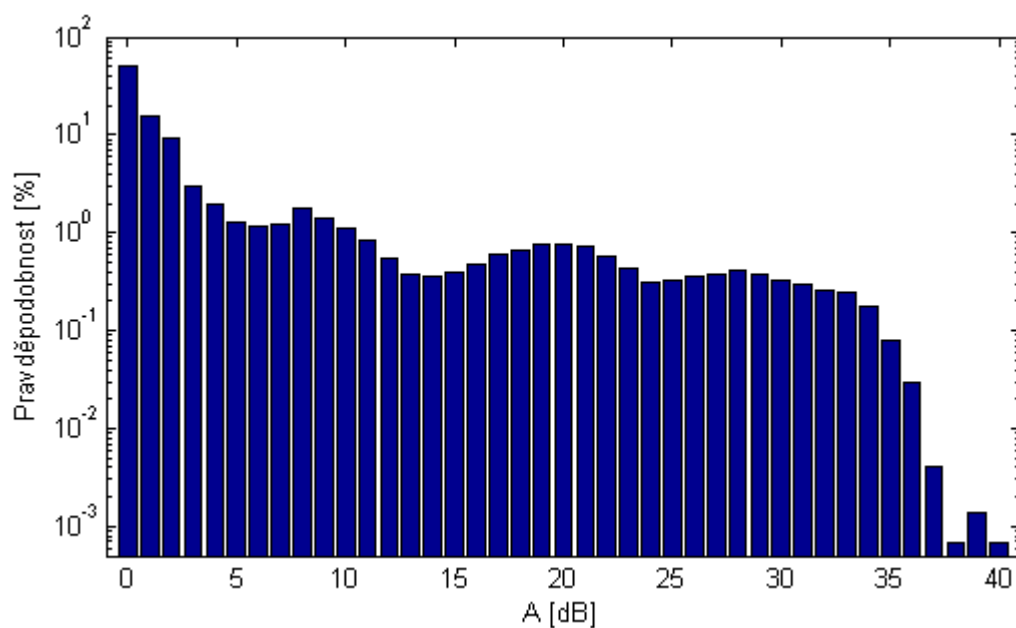
- technická závada
- překročení citlivostního prahu přijímače $P_{0,RXA}$

Technické závady mají dlouhodobější charakter a trvají tak dlouho, dokud je nepřijde technik odstranit. Kdežto druhý typ výpadku většinou netrvá déle než několik minut, proto je snadné tyto druhy výpadků od sebe rozlišit například z časového průběhu.



Obrázek 26 - Dostupnost spoje v jednotlivých měsících roku 2010

Na základě grafu dostupnosti (Obr. 26) lze zhodnotit, že spoj trpí relativně častými technickými závadami. Z průběhu výpadků vlivem překročení citlivostního prahu přijímače $P_{0,RXA}$ je opět patrný trend, nejvíce výpadků v komunikaci se objevuje v zimním období. V letním období, kdy se mlha objevuje méně, se dostupnost pohybuje okolo 95%. I takové hodnoty by byly v praxi nedostatečné, nicméně je nutné zdůraznit, že spoj pracuje v extrémních atmosférických podmínkách.

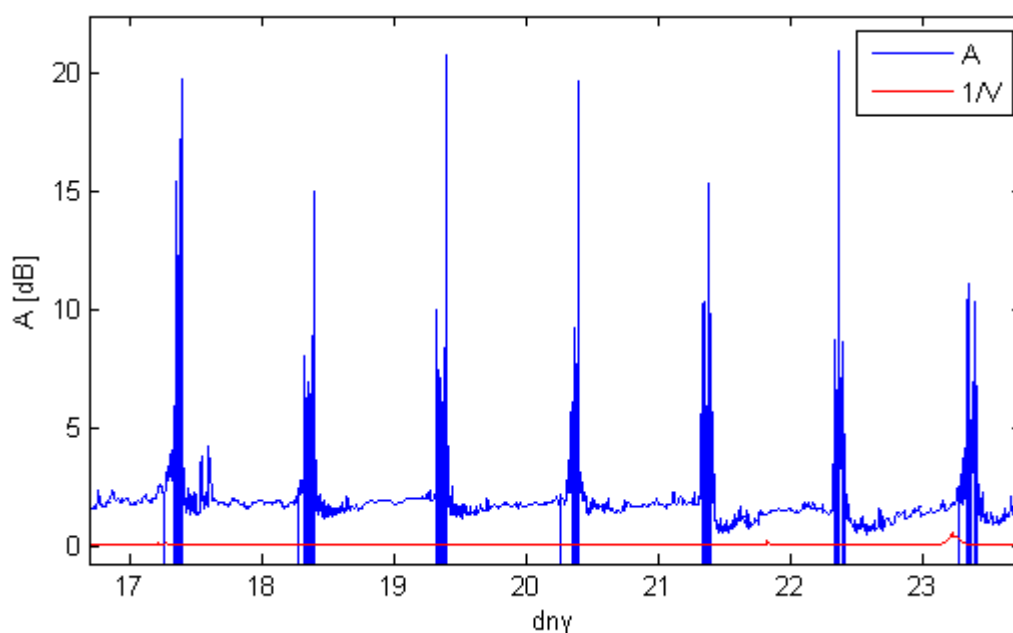


Obrázek 27 - Histogram výskytu útlumu - data za rok 2010

Na předchozím grafu (Obr. 27) je zobrazen histogram výskytu útlumu atmosférickými částicemi na kanálu CH2 (830nm). Přibližně 80 % všech hodnot leží v intervalu 0 - 5 dB. Poté se četnosti se zvyšujícím útlumem snižují, hodnoty nad 35 dB jsou velmi výjimečné.

6.4 Vliv Slunce na optický spoj

V jistém období v roce se na spoji objevují v dopoledních hodinách pravidelné časové průběhy útlumu (viz Obr. 28).



Obrázek 28 - Vliv slunce na optický spoj

Z porovnání s invertovanou dohledností vyplývá, že útlum není způsoben mlhou. Tento jev se opakuje každý rok vždy v dubnu a v září. Právě v dubnu a v září je Slunce ve Střední Evropě v elevaci přibližně 30°. Spoj je orientován zhruba na jih a ještě navíc s elevací 29°. Jedná se tedy o interakci se slunečními paprsky, které dopadají přímo na vysílač. Ve vysílači je zabudován senzor, který reguluje vysílání tak, aby byl vyzářený výkon konstantní. Pokud na přijímač dopadají navíc sluneční paprsky, senzor zaznamená zvýšení světelné intenzity a regulátor stáhne vysílaný výkon. To se následně projeví nižším přijatým výkonem v přijímači. Z grafu na Obr. 28 je patrné, že slunce dokáže způsobit i výpadky, proto je při instalaci optického spoje nutné dbát na umístění tak, aby vysílač ani přijímač nebyl nikdy natočen směrem k Slunci.

6.5 Porovnání šíření OBS na dvou vlnových délkách

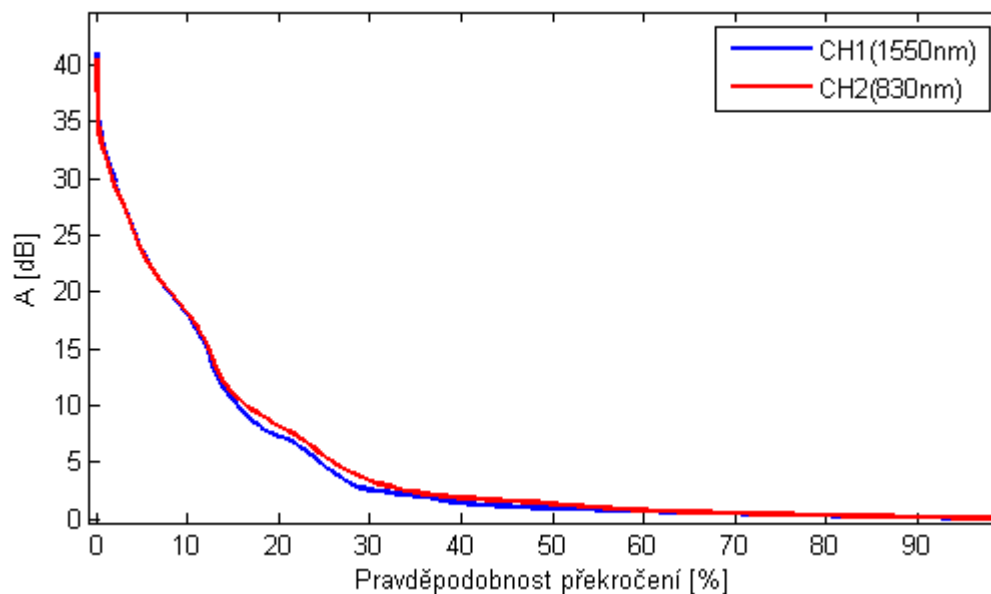
S histogramem souvisí distribuční funkce, která nám udává s jakou pravděpodobností překročí útlum na spoji určitou hodnotu. Klasická definice distribuční funkce je:

$$y_i = p(A \leq A_i) \quad (6.1)$$

kde p je pravděpodobnost. V oblasti šíření vln se používá doplněk distribuční funkce do hodnoty 1, čili

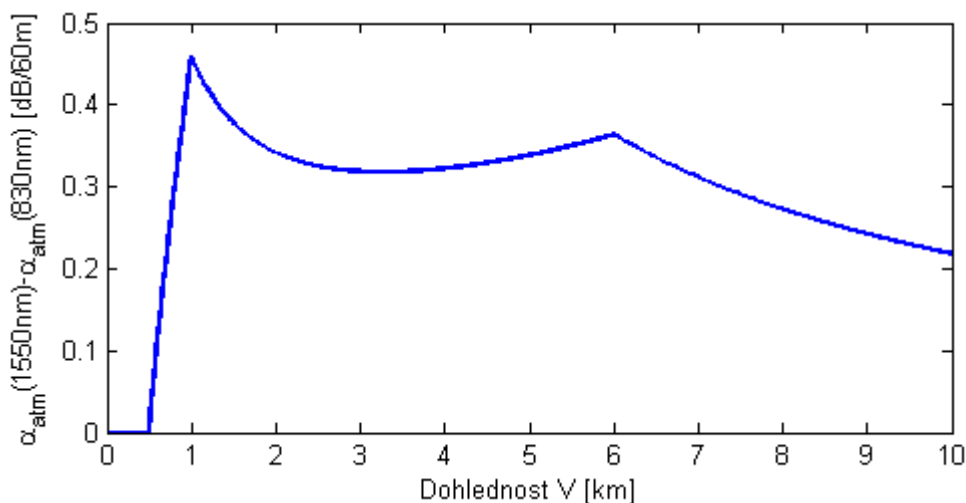
$$y_i = p(A > A_i), \quad (6.2)$$

Navíc bývají pro lepší ilustraci převrácené osy – na ose x je pravděpodobnost překročení a na ose y pak útlum. Pro srovnání jsou zobrazeny distribuční funkce obou kanálů CH1 i CH2. Byla použita data za celý rok 2010.

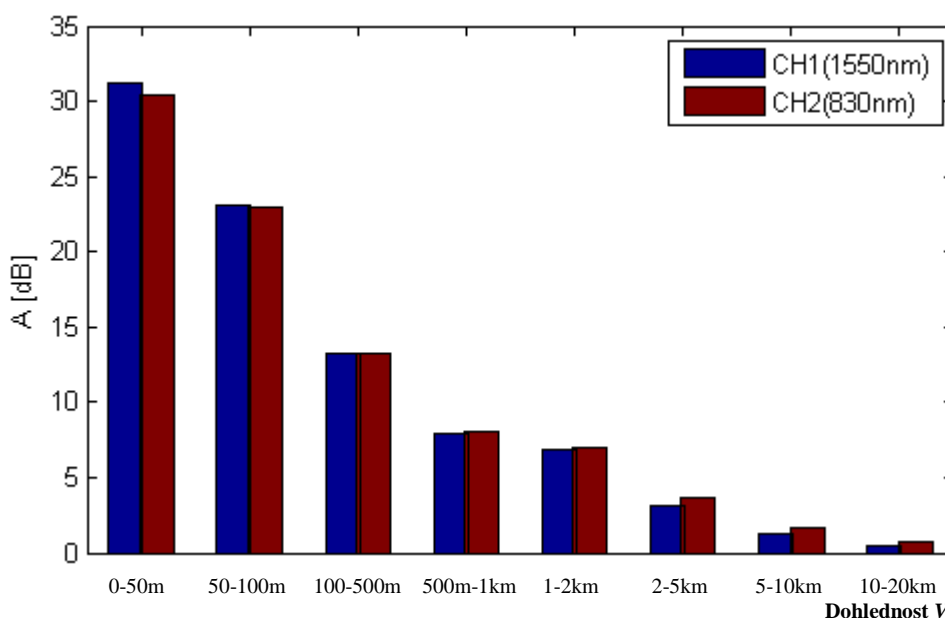


Obrázek 29 - Distribuční funkce útlumů na obou kanálech

Z distribuční funkce (Obr. 29) se zdá, že mezi šířením na vlnových délkách 830 nm a 1550nm není prakticky žádný rozdíl. Teoretický vztah pro výpočet útlumu z dohlednosti (4.29) modifikovaný I.I.Kimem tvrdí, že pokud je dohlednost nižší než 500 m, je vliv vlnové délky na přenos nulový. Se zvyšující se dohledností by mělo platit, že kratší vlnová délka bude mít větší útlum.



Obrázek 30 - Diference útlumů na vlnových délkách 1550 nm a 830 nm dle vzorce (4.29) na vzdálenost 60 m



Obrázek 31 - Diference naměřených útlumů na dvou kanálech

Z naměřených výsledků vyplývá zajímavé zjištění. Do hodnoty dohlednosti $V=500$ m je větší útlum na vlnové délce $\lambda=1550$ nm a při dohlednostech vyšších je útlum větší na vlnové délce $\lambda=830$ nm. Z hlediska porovnání dvou vlnových délek se tedy vzorec (4.29) potvrdil. V případě dohledností nižších než 500 m, kdy dle vzorce (4.29) útlum nezávisí na vlnové délce, byl naměřen rozdíl maximálně 0.7 dB. Hodnoty útlumů na různých vlnových délkách se pro náš spoj liší v řádu desetin dB pro celé spektrum dohledností, tudíž lze vliv vlnové délky na útlum optického spoje zanedbat. V případě spojů na delší vzdálenost už jsou ale rozdíly výrazné, Kimův vzorec (4.29) udává rozdíl až 8 dB/km.

6.6 Kombinace dvou dohledoměrů

Jak již bylo zmíněno, na Milešovce jsou nainstalovány dva dohledoměry od firmy Vaisala. Typ PWD-11 je umístěn na věži přímo u přijímače (označení $V_{\text{věž}}$) a měří dohlednost do vzdálenosti 2 000 m. Novější typ PWD-21 měří dohlednost ve výšce 2 m nad zemí (označení V_{2m}) do vzdálenosti 20 000 m a je umístěn několik metrů od vysílače. Máme-li tedy dvojce data o dohlednosti, zůstává otázkou jak stanovit co nejpřesnější dohlednost pro pozdější teoretický výpočet útlumu. Nejlepší řešení bude najít takovou kombinaci, která má nejvyšší korelační koeficient s naměřeným útlumem. Pro výpočet byly použity invertované dohlednosti $1/V$. Tím pádem lze určit korelace lineární korelací a vycházejí kladné koeficienty.

Tabulka 6 - Korelační koeficienty mezi útlumem a dohledností

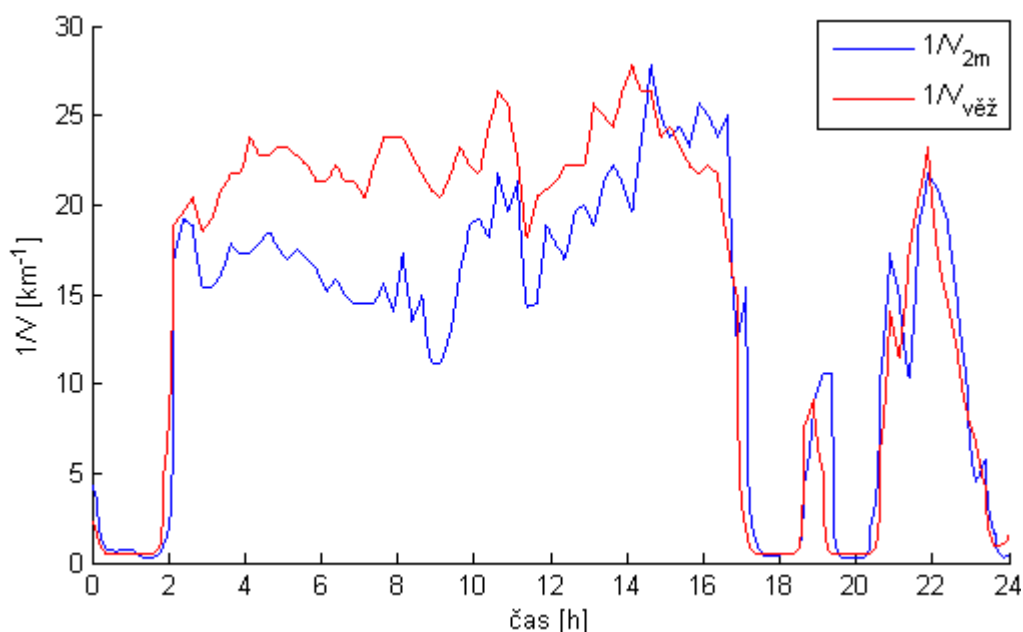
Kombinace	Kor. koeficient
A vs. $V_{\text{věž}}$	0.8253
A vs. V_{2m}	0.8697
A vs $\min(V_{2m}, V_{\text{věž}})$	0.8645
A vs $(V_{2m} + V_{\text{věž}})/2$	0.8814
A vs $(2 * V_{2m} + V_{\text{věž}})/3$	0.8856

Potvrzuje se teoretický předpoklad, že dohlednost u vysílače má na spoj větší vliv než dohlednost u přijímače. Jako nejlepší kombinace se projevuje vážený průměr, nazvěme ho celkovou dohledností V_t :

$$V_t = \frac{(2 * V_{2m} + V_{\text{věž}})}{3} [m] \quad (6.3)$$

Díky dvěma dohledoměrům je dosaženo zvýšení korelace o 2 % oproti použití pouze spodního dohledoměru.

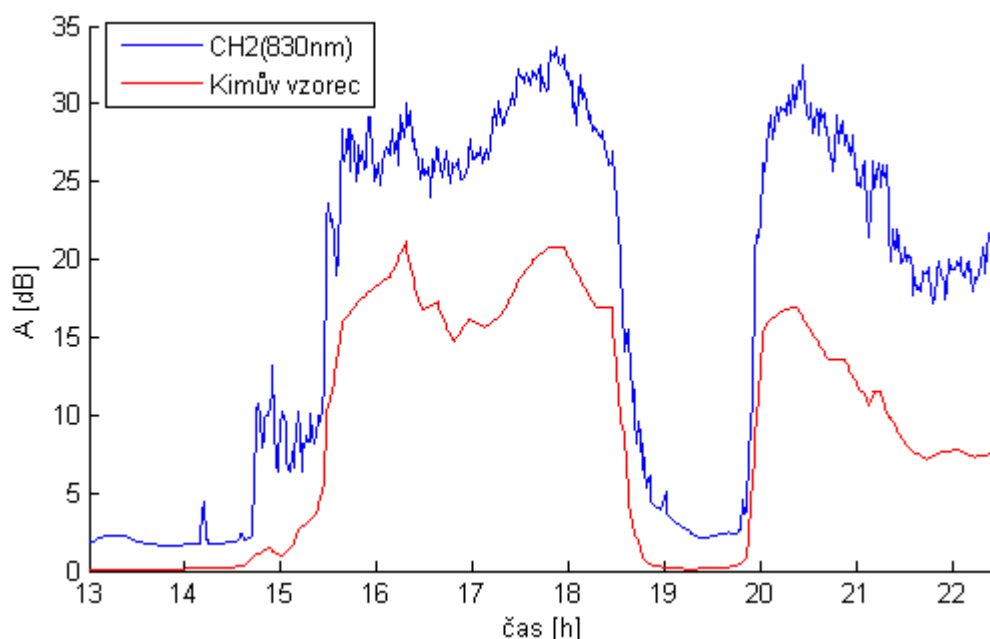
Dalším důležitým přínosem je detekování, zda mlžné kapky pokrývají celý spoj či zda jen jeho část.



Obrázek 32 – Porovnání invertovaných dohledností u vysílače a na věži

Zajímavý průběh z 19. února 2010 je zobrazen na Obr. 32. Celý den až do 17 hodin byla nižší dohlednost na věži, v grafu zobrazená červeně. Jednalo se tedy o nízkou oblačnost, zatímco po zbytek dne pokrývala již mlha celou dráhu optického spoje. Již v teoretické části je zmíněno, že mlha a nízká oblačnost se lehce liší ve spektru kapek, což má vliv i na výsledný útlum optického signálu.

6.7 Odhad útlumu z dohlednosti



Obrázek 33 - Časový průběh útlumu v porovnání s Kimovým vzorcem - 15. listopadu 2010

Na Obr. 33 je velmi dobře patrná dobrá korelace mezi útlumem naměřeným a útlumem vypočteným z dohlednosti. Obr. 33 ukazuje, že Kimův

vzorec odhaduje nižší hodnoty útlumu, než je naměřeno na našem optickém spoji. Proto byly naším týmem odvozeny dva vzorce na základě dat z Milešovky. Oba vzorce neuvažují rozdíl mezi vlnovými délkami.

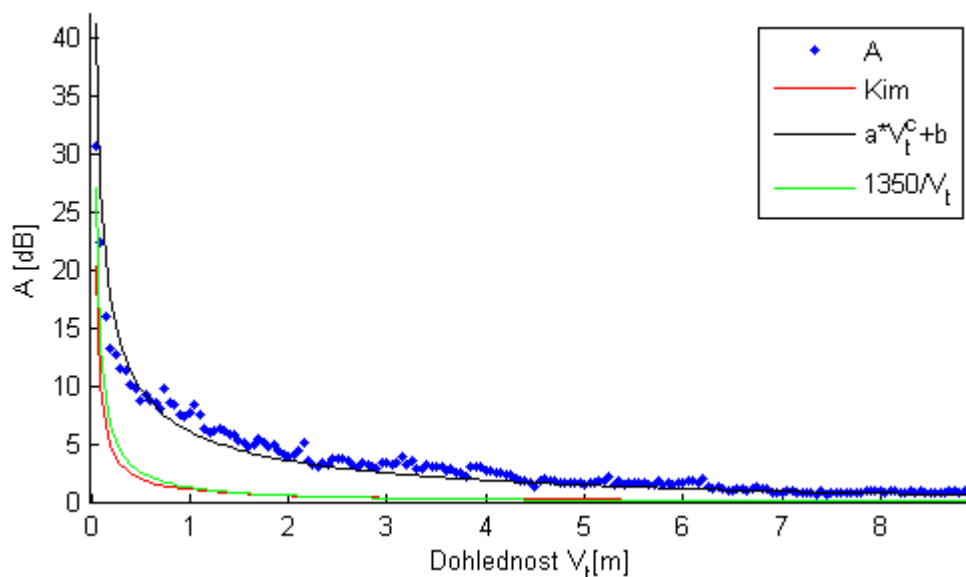
První jednoduchý vzorec, který byl publikován v našem článku (FIŠER, 2009), byl stanoven jako invertovaná dohlednost násobená empirickou konstantou:

$$A = \frac{1350}{V} [dB/60m] \quad (6.4)$$

Druhý vzorec je stanoven regreseí bodového grafu z dat útlumu a dohlednosti za rok 2009 a je publikován v (PEŠEK, 2010):

$$A = 401.4 V^{-0.5738} - 1.462 [dB/60m] \quad (6.5)$$

Porovnání vzorců vidíme na následujícím průměrovaném bodovém grafu (Obr. 34). Není to klasický bodový graf, protože je pro lepší ilustraci osa x rozdělena do intervalů po 50 m a v každém intervalu je spočtena průměrná hodnota útlumu.



Obrázek 34 - Průměrovaný bodový graf – porovnání vzorců

Dle Obr. 34 lze zhodnotit, že Kimův vzorec (4.29) i vzorec 1350/V (6.4) podhodnocují útlum vypočtený z dohlednosti. Pro odhad útlumu nejlépe vyhovuje vzorec (6.5). Pro kvantitativní vyjádření odhadu v grafu na Obr. 34 použijeme dva parametry – korelační koeficient a relativní RMSE (Root mean square error, střední kvadratická chyba) určený vztahem:

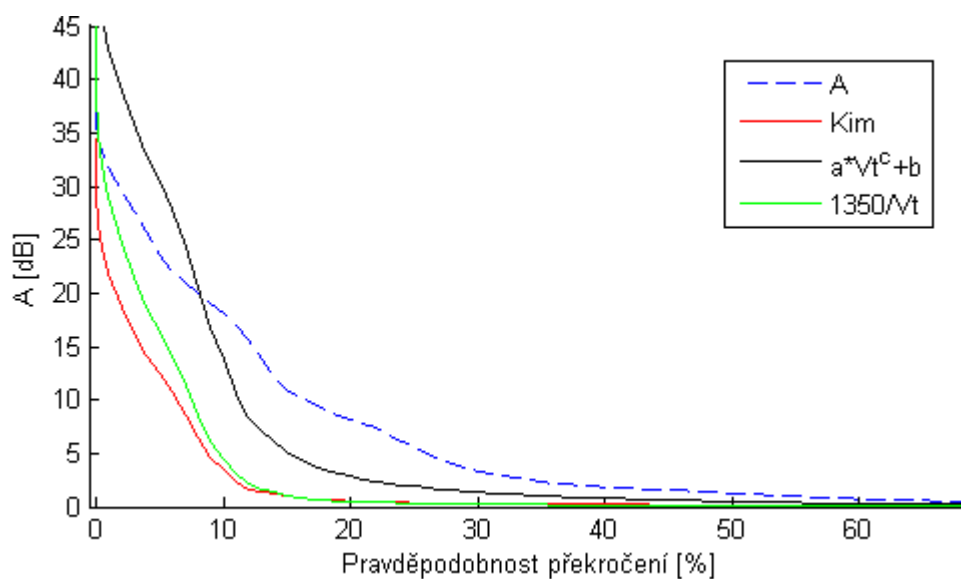
$$rel.RMSE = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{teor} - A}{A} \right)^2} [\%] \quad (6.6)$$

kde A je naměřený útlum a A_{teor} je útlum spočtený ze vzorců.

Tabulka 7 - Parametry shody mezi naměřeným a vypočteným útlumem

Vzorec	rel. RMSE [%]	kor. koef.
1350/V	82.8	0.876
$a \cdot V_t^c + b$	30.2	0.978
Kim	80.1	0.874

Tab. 7 potvrzuje velkou podobnost vztahů 1350/V (6.4) a Kimovým vzorcem (4.29). Vzorec (6.5) predikuje útlum na našem spoji nejlépe a sice s relativní RMSE 30,2 %.

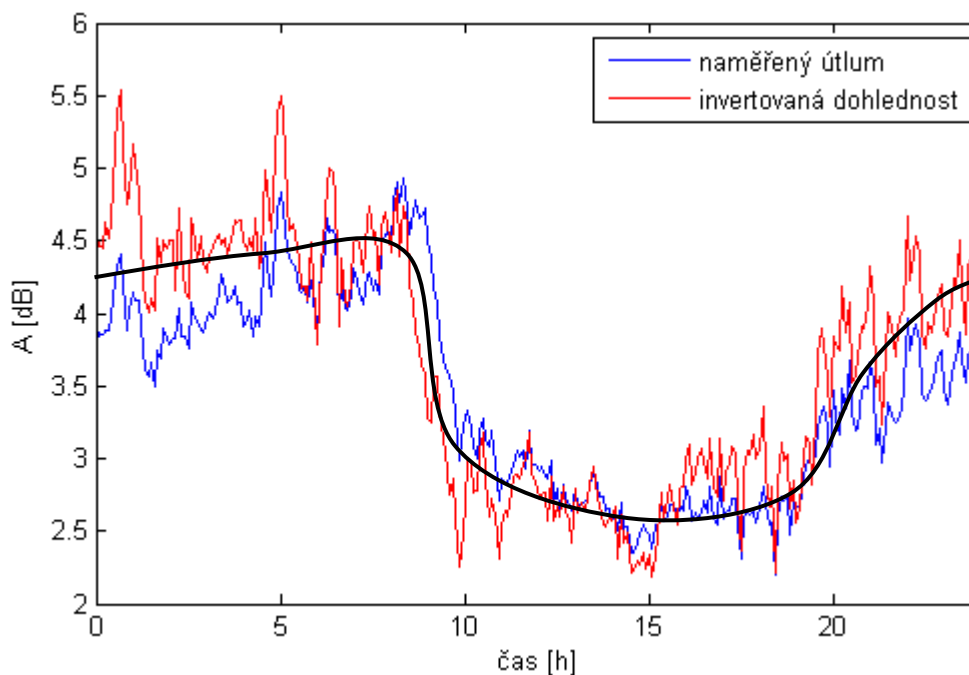


Obrázek 35 - Distribuční funkce vypočtených a naměřených útlumů

Z distribuční funkce (viz Obr. 35) je patrné, že vzorec (6.5) jako jediný dobře odhaduje i vyšší hodnoty útlumů.

6.8 Denní chod

Útlum na optickém spoji má v rámci jednoho dne jakýsi průměrný trend. Byla zpracována data za celý rok 2010. Invertovaná dohlednost je násobena konstantou tak, aby byla ve stejném měřítku jako útlum. Při porovnání útlumu s invertovanou dohledností je patrná opět vysoká korelace (viz Obr.36).



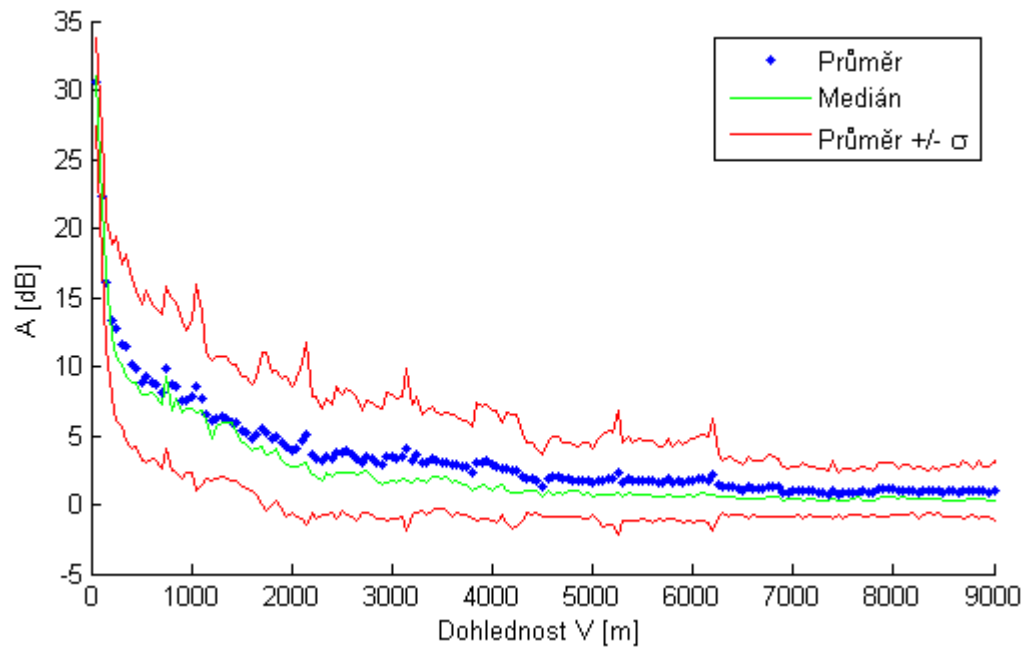
Obrázek 36 - Denní chod útlumu a dohlednosti

Mlha se na Milešovce tvoří nejvíce v nočních hodinách až do zhruba osmé hodiny ranní. Poté její průměrný výskyt prudce klesá a až do večerních hodin zůstává relativně nízký. Jak se mění dohlednost, tak se mění útlum optického spoje. Nejlepší období pro přenos signálu je tedy přes den, což naprosto vyhovuje potřebám v praxi.

6.9 Rozptyl útlumu

Že podmínky v reálné atmosféře nejsou ideální potvrzuje i následující Obr. 37 poskytující informaci o rozptylu útlumu. V každém intervalu dohlednosti o délce 50 m je z dat útlumu vypočten průměr, medián a průměr zvětšený i zmenšený o směrodatnou odchylku σ . Rozdíl mezi průměrem a mediánem není statisticky významný. Přestože je mezi útlumem a dohledností vynikající korelace (přibližně 0.89 – viz Tab. 6), rozdíly v útlumu při relativně konstantní dohlednosti jsou značné. Například pro interval dohlednosti 450 - 500 m je střední hodnota

útlumu 8.8 dB a směrodatná odchylka dosahuje hodnoty 5.7 dB. Na malé změny dohlednosti tedy připadají velké změny v útlumu.

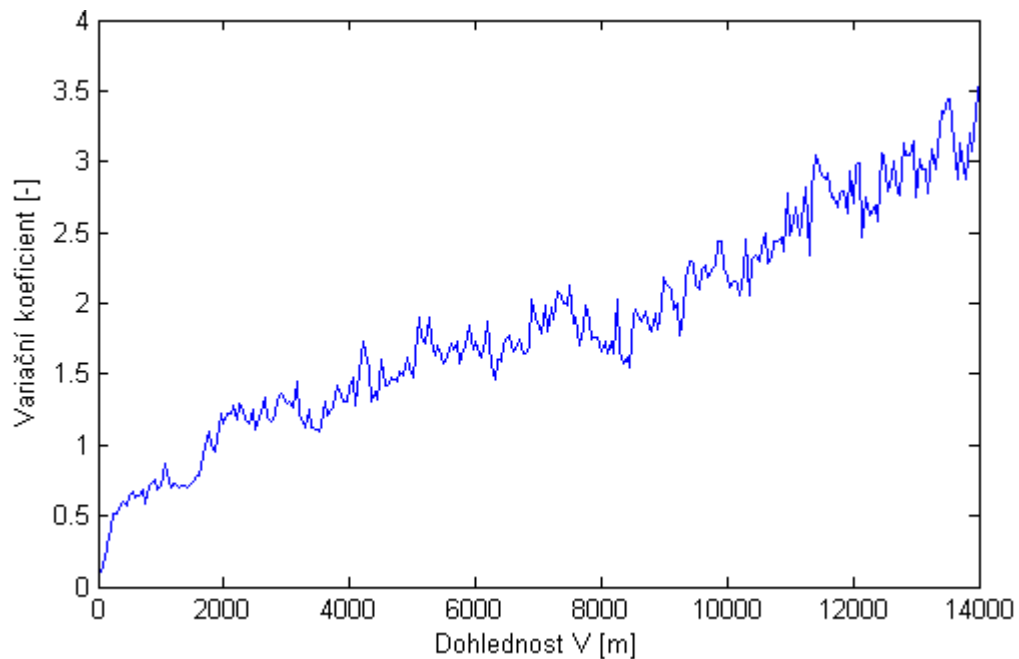


Obrázek 37 - Průměrovaný bodový graf – rozptyl útlumu

Obr. 37 naznačuje, že rozptyl útlumu klesá s rostoucí dohledností. Když si ale zobrazíme variační koeficient (viz Obr. 38) určen rovnicí

$$v = \frac{\sigma}{A}, \quad (6.7)$$

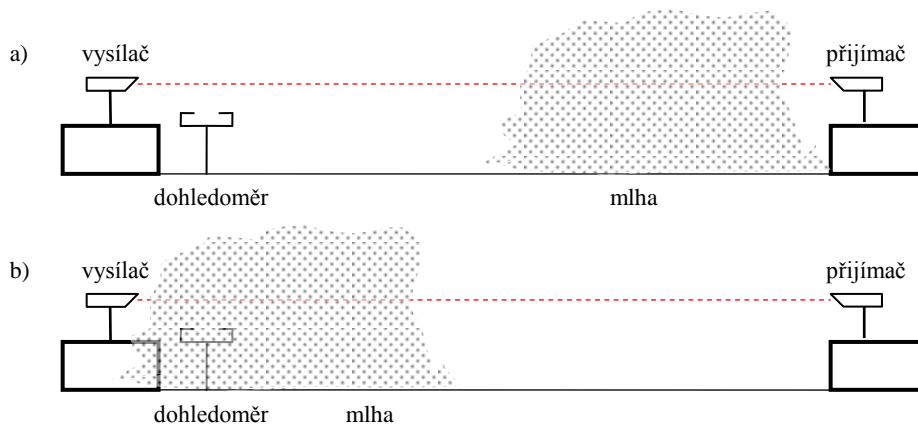
zjistíme, že nejmenší relativní změny jsou v oblasti nízkých dohledností. Tento graf vyjadřuje svým způsobem i kvalitu predikce, čím nižší je dohlednost, tím přesněji lze z dohlednosti odhadnout útlum.



Obrázek 38 - Variační koeficient

6.10 Dráhový redukční faktor

Změny útlumu při konstantní dohlednosti prezentované v předcházejícím oddílu lze logicky vysvětlit. Aby byla predikce útlumu z dohlednosti dostatečně přesná, muselo by platit, že naměřená dohlednost je po celé délce optického spoje konstantní (čili předpoklad homogenního prostředí), což v reálné atmosféře zdaleka nebývá pravidlem. V případě spojů na vzdálenost stovek metrů či jednotek kilometrů je homogenita mlhy prakticky vyloučená. Na Milešovce byly prof. Kolkou z VUT v Brně pozorovány jakési „chuchvalce“ mlhy, tedy malé oblasti s velkou hustotou mlžných kapek. Pokud tedy máme jeden dohledoměr například blízko vysílače, bude poskytovat informaci o dohlednosti pouze v jeho blízkosti. Při následné predikci útlumu tak může dojít ke dvěma typům zkreslení – podhodnocení a nadhodnocení útlumu.



Obrázek 39 - a) Podhodnocení, b) nadhodnocení útlumu

Při situaci a) je mlha v jiné lokalitě než dohledoměr. Naměřený útlum tedy bude větší než útlum teoreticky vypočtený z dohlednosti. Při situaci b) je to naopak, dohledoměr detekuje mlhu ale pokud mlha pokrývá pouze určitou část délky optického spoje, bude teoreticky vypočtený útlum vyšší než naměřený.

Typ zkreslení predikce závisí na lokálních podmínkách, z velké části se mlhy tvoří na stejných typických místech, která jsou pro její tvorbu ideální. Lze tedy ve většině lokací tento jev vysledovat a následně redukovat pomocí tzv. *redukčního faktoru r*:

$$r = \frac{A}{A_{\text{teor}}} [-], \quad (6.8)$$

kde A je naměřený útlum v dB a A_{teor} je útlum vypočtený z dohlednosti v dB.

Na Milešovce má redukční faktor velký význam. Přestože je délka spoje relativně krátká, dochází ke zkreslení díky vertikálnímu převýšení 29 m. Redukční faktor byl posouzen jako funkce pravděpodobnosti překročení (viz Obr. 35).

Tabulka 8 - Redukční faktor

Pravděpodobnost překročení [%]	V_{2m} [m]	A_{teor} [dB]	A [dB]	r
1	41.9	24.34	31.86	1.3088
0.1	35	29.14	34.95	1.1993
0.01	31.23	32.66	36.7	1.1237
0.001	29.4	34.69	40.23	1.1596
0.0001	29	35.17	40.5	1.1515

Hodnota redukčního faktoru pro optický spoj na Milešovce je přibližně $r = 1.18$ a důležité je, že víceméně nezávisí na pravděpodobnosti překročení v hodnotách do 2 %, tedy v případech, kdy byla na Milešovce hustá mlha. Útlum teoreticky vypočtený z dohlednosti V_{2m} (spodní dohledoměr) pomocí Kimova vzorce (6.5) je tedy **podhodnocený** oproti útlumu skutečnému.

7 Závěr

V teoretické části diplomové práce je popsán optický bezkabelový spoj, jeho výhody i nevýhody použití v porovnání s rádiovým spojem. V práci je jasně dokázáno, že největší vliv na spoj má mlha, popřípadě nízká oblačnost. Rozdíl mezi mlhou a oblačností je především v poloze pozorovatele. Na kopci se snížená dohlednost jeví pozorovateli jako mlha, pod kopcem se může jevit jako nízká oblačnost. Fyzikální rozdíl mezi mlhou a oblakem je v případě radiační mlhy v lehce odlišném spektru kapek a ve vodním obsahu. Mezi advekční mlhou a oblakem jsou rozdíly zanedbatelné.

Útlum optického spoje lze rozdělit na několik částí: útlum vlivem ředění energie, útlum průchodem čistou atmosférou a útlum atmosférickými jevy.

Útlum vlivem ředění energie je způsoben divergencí svazku a v této práci bylo provedeno vlastní odvození tohoto útlumu, které bylo později úspěšně ověřeno na experimentálních datech z Milešovky.

V kapitole o útlumu rozptylem na částicích je vypočítána celková ztrátová plocha Q_t pro dopředný rozptyl, která se jinde v literatuře neobjevuje a říká, že v optické oblasti, kde je vlnová délka mnohem menší než velikost kapky, konverguje Q_t k hodnotě $\pi D^2/2$, kde D je průměr částice. Mimo jiné se díky tomuto výpočtu potvrzuje, že optický signál se v případě interakce s oblačnými kapkami tlumí **rozptylem** o částice. Absorpce je zanedbatelná.

Největší přínos práce je podle mého názoru ve statistickém zpracování experimentálních dat a porovnání s teoretickými předpoklady. V praktické části je provedena analýza dat experimentálního spoje ATMO TL - 02_DUAL umístěného na Milešovce. Díky tvaru hory jde z drtivé většiny o mlhy advekční, fyzikální rozdíly ve spektru kapek mezi mlhou a oblačností jsou tedy zanedbatelné.

Paprsek na Milešovce se ve vzdálenosti u přijímače rozprostře do kruhu o průměru **62.5 cm**. Při průměru přijímací čočky 6 cm dochází ke konstantnímu útlumu vlivem ředění energie **5.53 dB**.

Největší průměrné útlumy v rámci kalendářního roku bývají v zimním období, což koresponduje i s dostupností spoje. V letních měsících dosahuje

dostupnost hodnot kolem 95 %, což by v praxi bylo stále nedostatečné. Nutno ale zdůraznit, že vyšetřovaný spoj pracuje v extrémních klimatických podmínkách.

Z histogramu výskytu útlumu vyplývá, že přibližně 80 % hodnot leží v intervalu 0 – 5 dB. Maximální detekované útlumy jsou pod 40 dB a jejich výskyt je velmi výjimečný.

Při výzkumu bylo objeveno, že vliv na přenos mají i sluneční paprsky. Každý rok v dubnu a v září se Slunce dostane do elevace přibližně 30° a sluneční paprsky svítí přímo na vysílač optického spoje na Milešovce. Ve vysílači je zabudován senzor, který reguluje vysílání tak, aby byl vyzářený výkon konstantní. Pokud na přijímač dopadají navíc sluneční paprsky, senzor zaznamená zvýšení světelné intenzity a regulátor stáhne vysílaný výkon. To se následně projeví nižším přijímacím výkonem, který způsobí výpadek spoje. Je tedy nutné v praxi dbát na umístění spoje vzhledem k Slunci.

Z porovnání výsledků šíření signálu na vlnových délkách 830 nm a 1550 nm vyplývá, že pro krátký spoj jsou rozdíly útlumu zanedbatelné. Pro delší spoje již nelze rozdíl zanedbat. Dle Kimova vzorce (4.29) se útlum se snižující vlnovou délkou zvětšuje (v případě spoje dlouhého 1 km až o 8 dB).

Na experimentálním pracovišti na Milešovce jsou umístěny dva dohledoměry – jeden u vysílače a jeden u přijímače. Kombinací dat z obou dohledoměrů je dosaženo 2 % zvýšení korelace mezi útlumem a dohledností v porovnání s použitím pouze spodního dohledoměru. Hodnota korelačního koeficientu mezi dohledností a útlumem optického spoje činí **0.8856**, což značí výbornou korelaci. Dalším přínosem použití dvou dohledoměrů je detekce, zda se na spoji vyskytovala mlha, či nízká oblačnost. Lze tedy zjistit, zda snížená dohlednost postihla spoj celý nebo jen jeho část.

Několik vzorců pro predikci útlumu z dohlednosti je zkoumáno v praktické části. Jako nejlepší se osvědčil vzorec stanovený naším týmem (6.5):

$$A = 401.4 V^{-0.5738} - 1.462 [dB / 60m]$$

Pokud je u spoje jeden dohledoměr, může docházet ke zkreslení vlivem podhodnocení či nadhodnocení útlumu odhadnutého z dohlednosti. Mlha se totiž nemusí vyskytovat v části spoje, kde je dohledoměr umístěn – v tomto případě dochází k podhodnocení útlumu. Analogicky opačně je tomu u nadhodnocení. Tento jev se dá vysledovat a redukovat pomocí redukčního faktoru. Na Milešovce

se Kimův vzorec při porovnání kvantitativních hodnot nepotvrdil, dochází k podhodnocení útlumu a pro redukční faktor byla nalezena hodnota **1.18**. Dráhový redukční faktor v případě použití vzorce formulovaného na základě našich měření (6.5) vychází **0.7**.

Dalším přínosem práce je navržení metody oddělující data útlumu podle fyzikální příčiny. Při zpracování dat byla nalezena ideální hodnota dohlednosti **V=1350 m** tak, že lze říci, že při hodnotách dohlednosti nad 1350 m nebyl útlum spoje způsoben mlhou. Takto filtrovaná data byla poskytnuta kolegům, kteří řeší vliv deště, větru a jiných atmosférických jevů na optický bezkabelový spoj.

Seznam literatury

ŘEZÁČOVÁ, Daniela et al. 2007. *Fyzika oblaků a srážek*. [s.l.] : Academia, 2007. 576 s. ISBN 978-80-200-1505-1.

KIM, I.I.; McARTHUR, B.; KOREVAAR, E. 2001. *Comparison of Laser Beam Propagation at 785nm and 1550nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications*. [s.l.] : Proc. SPIE, Vol.4214 Optical Wireless Communications III., 2001.

DEIRMENDJIAN, D. 1975. *Far-Infrared and submillimeter Wave Attenuation by Clouds and Rain*. [s.l.] : J. Appl. Meteor., Vol. 14, 1975.

PRUPPACHER, Hans R.; KLETT, James D. 1980. *Microphysics of clouds and precipitation*. Dordrecht, Holland : D. Riedel Publishing Company, 1980. Microstructure of atmospheric clouds and precipitation, s. 21.

BEDNÁŘ, Jan et al. 1993. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*, MŽP Praha, 1993

KRUSE, P.W.; MCGLAUCHLIN, L.D.; MCQUISTAN, R.B. 1962. *Elements of Infrared Technology: generation, transmission and detection*. [s.l.] : J.Wiley & Sons, 1962.

KAISER DATA - Divize bezdrátových komunikací [online]. 2008 [cit. 2011-04-05]. *Stručná teorie laserových spojů*. Dostupné z WWW: <<http://www.bezdratove-telekomunikace.cz/katalog-pojitek/o-laserovych-spojich/>>.

URBAN, František. 2001. *Laserové bezdrátové spoje*. IT Systems [online]. 2001, příloha 5, [cit. 2011-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.systemonline.cz/clanky/laserove-bezdratove-spoje.htm>>.

KVÍČALA, R. 2009. *Chybovost a dostupnost atmosférických optických spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 103 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

WILFERT, O. 2002. *Optoelektronika*, Brno University of Technology, Institute of Radio Electronics, Brno, 2002

WILFERT, O. 2006. *Ústav radioelektroniky* [online]. 2006 [cit. 2011-04-08]. *Nové metody optických komunikací ve volném prostoru*. Dostupné z WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/optic_kom.pdf>.

SEGELSTEIN, D. 1981. *The Complex refractive index of water*, M.S. Thesis, University of Missouri, Kansas City.

FIŠER, Ondřej. 1993. *A simple generator of forward scattering functions on spherical dielectrics*. Radioengineering. April 1993, vol. 2, No. 1, s. 21-22.

PEŠEK, Jiří, et al. 2010. *Modeling of 830 nm FSO Link Attenuation in Fog or Wind Turbulence.* Radioengineering. June 2010, vol. 19, No.2, s. 237-241. Dostupný také z WWW: <http://www.radioeng.cz/fulltexts/2010/10_02_237_241.pdf>.

ÚSTAV FYZIKY ATMOSFÉRY [online]. 2006 [cit. 2011-04-22]. *Meteorologická observatoř Milešovka.* Dostupné z WWW: <<http://www.ufa.cas.cz/html/meteo/cindex.html>>.

BRÁZDA, Vladimír. 2009. *Vliv mlh na útlum optických bezdrátových spojů.* Pardubice, 2009. 38 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.

FIŠER O. et al. 2009. *Attenuation measurement on dual-wavelength optical free-space link,* Proc. of Spie, session Atmospheric Optics: Models, Measurements and Target-in-the-Loop propagation III), 3-4 August 2009, San Diego, United States, pp. 7463-1 - 7463-11

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.

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.

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.

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

WIKIPEDIE [online]. 2006, 18. 5. 2011 [cit. 2011-05-20]. *Mlha.* Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Mlha>>.

VAISALA. 2005. *Parametry PWD* [online]. [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.vaisala.com/files/PWD%20Brochure%20in%20English.pdf>>.

WOLFF, Christian. 1997. Radartutorial.eu [online]. [cit. 2011-05-20]. *Rayleigh-versus Mie-Scattering.* Dostupné z WWW: <<http://www.radartutorial.eu/18.explanations/ex22.en.html>>.

Recommendation ITU-R P.1814, 2007. *Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links.* Question ITU-R 228/3

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>.

Seznam vlastních publikací

FIŠER O., SVOBODA J., CHLÁDOVÁ Z., PEŠICE P., FIŠÁK J., WILFERT O., KOLKA Z., BRÁZDA V. and JAROŠ J. 2009. *Attenuation measurement on dual-wavelength optical free-space link*, Proc. SPIE 7463, 746302 (2009); doi:10.1117/12.825700

CHLÁDOVÁ Z., FIŠER O., SVOBODA, J., FIŠÁK J., PEŠEK J., BRÁZDA V. (2010) *Impact of Fog and Wind on FSO Link Attenuation -- Quick Experimental Results*. In: 1st International Workshop Measurements and Models for the Propagation Channel Characterisation Proceedings. November 8-9, 2010, Centre for Scientific Culture "Ettore Majorana", Erice, Italy.

BRÁZDA V., FIŠER O., PEŠICE P., PEŠEK J. 2011. *Combination of two visibility sensors to predict fog attenuation on FSO links*. Přijato na konferenci ConTEL 2011, 15-17.6.2011, Graz, Rakousko.

FIŠER O., JAROŠ J., BRÁZDA V. 2009. *“Aplikovaný výzkum atmosféry v ÚFA AV ČR, v.v.i. Sborník semináře společnosti Envitech-Bohemia, Jindřichův Hradec, 18. září 2009, str. 23-27*