

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Šíření optického a radiového signálu v prostředí s hydrometeory a větrnými
turbulencemi

Ing. Jiří Pešek

Disertační práce

2017

Prohlašuji:

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10. 12. 2017

Ing. Jiří Pešek

ANOTACE

Práce je věnována studiu vlivů způsobující útlum na optickém bezkabelovém spoji. Věnuje se především vlivu mlhy a větrných turbulencí, které se jsou dlouhodobě označovány jako nejvýznamnější vlivy ztrát. Oba vlivy jsou podrobeny zkoumání v přirozeném venkovním prostředí, tak i v laboratorním prostředí, s možností napodobení podmínek panujících venku.

KLÍČOVÁ SLOVA

optický spoj, mlhy, větrné turbulence, srážky, pohyb paprsku, útlum

TITLE

Optical signal propagation in presence of hydrometeors and wind turbulences

ANNOTATION

This thesis studies conditions which lead to attenuation on optical free space link. In particular the impact of fog and wind turbulences on optical link is discussed. These two environmental phenomena are generally described to contribute most significantly to signal attenuation. This thesis is focused both on measurements in the natural outside environment and in the laboratory test bed simulating outside conditions.

KEYWORDS

Optical link, fog, wind turbulence, precipitation, beam moving, attenuation

OBSAH

0	ÚVOD	12
1	PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	14
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A METODIKA JEJICH ŘEŠENÍ	16
3	ROZDĚLENÍ OBS	17
3.1	VENKOVNÍ SPOJ NA PŘÍMOU VIDITELNOST.....	17
3.2	VNITŘNÍ SPOJE.....	18
3.3	SPECIÁLNÍ	19
3.3.1	<i>Spoje na nepřímou viditelnost v Ultrafialovém spektru</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Podmořské spoje</i>	<i>20</i>
3.3.3	<i>Satelitní spoje.....</i>	<i>21</i>
4	ZTRÁTY V ATMOSFÉŘE	23
4.1	ABSORPCE ZÁŘENÍ.....	23
4.2	ROZPTYL	24
4.2.1	<i>Rayleigho rozptyl</i>	<i>25</i>
4.2.2	<i>Mie rozptyl</i>	<i>25</i>
4.2.3	<i>Geometrický rozptyl</i>	<i>26</i>
4.3	ÚTLUM DEŠTĚM.....	27
4.3.1	<i>Tvar dešťové kapky.....</i>	<i>28</i>
4.3.2	<i>Rozptyl na dešťové kapce - simulace.....</i>	<i>30</i>
4.3.3	<i>Útlum souboru kapek</i>	<i>32</i>
4.4	ÚTLUM MLHOU.....	33
4.4.1	<i>Tvorba mlh</i>	<i>33</i>
4.4.2	<i>Dohlednost</i>	<i>34</i>
4.4.3	<i>Empiricky stanovený útlum</i>	<i>35</i>
4.5	SPECIÁLNÍ VLIVY NA OBS.....	36
4.5.1	<i>Atmosférická elektřina.....</i>	<i>36</i>
4.5.2	<i>Sluneční záření</i>	<i>36</i>
4.5.3	<i>Pohyb budov.....</i>	<i>37</i>
4.5.4	<i>Písek</i>	<i>37</i>
5	VLIV VĚTRNÝCH TURBULENCÍ NA OBS.....	38
5.1	TURBULENCE	38
5.2	INDEX LOMU.....	40
5.3	VLIV TURBULENCÍ NA OPTICKÝ PAPERSEK	41
6	METODY ZÍSKÁVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT	42

6.1	CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTÁLNÍHO PRACOVISTĚ	42
6.2	MĚŘENÍ NA VENKOVNÍM PRACOVISTĚ.....	43
6.2.1	<i>Mlha</i>	43
6.2.2	<i>Nízká oblačnost</i>	46
6.2.3	<i>Vliv větru</i>	48
6.2.4	<i>Index lomu vzduchu</i>	50
6.3	MĚŘENÍ V LABORATOŘI.....	52
6.3.1	<i>Laboratorní pracoviště</i>	52
6.3.2	<i>Měření dohlednosti</i>	54
6.3.3	<i>Tvorba mlhy v laboratoři</i>	55
6.3.4	<i>Porovnání výsledků vodní mlhy s modely</i>	61
6.3.5	<i>Kontrola a tvorba turbulencí</i>	64
6.3.6	<i>Shrnutí výzkumu na Northumbria university</i>	65
7	ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ INDEXU LOMU	66
7.1	POŽADAVKY NA ZAŘÍZENÍ	66
7.2	REALIZACE ZAŘÍZENÍ	67
7.3	SOFTWAREVÁ ČÁST.....	70
7.4	REALIZACE.....	71
7.5	NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY	71
7.5.1	<i>Index lomu</i>	73
7.5.2	<i>Strukturní index</i>	74
8	ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ POHYBU PAPRSKU.....	80
8.1	PRINCIP FUNKCE	80
8.2	ZPRACOVÁNÍ OBRAZU	81
8.3	HODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	83
8.4	MOŽNÁ VYLEPŠENÍ ZAŘÍZENÍ	87
9	ZÁVĚR.....	88
10	BIBLIOGRAFIE	93
11	PŘÍLOHY	98
	PŘÍLOHA A SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	99

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 - Schématické znázornění OBS	17
Obrázek 2 - Schématické znázornění funkce UV NLOS OBS	19
Obrázek 3 - Schéma komunikace satelitu s ponorkou, převzato z [3]	20
Obrázek 4 - Porovnání modelového optického a rádiového spoje Země – Mars [3]	22
Obrázek 5 - Propustnost atmosféry vlivem molekulární absorpce [5]	24
Obrázek 6 - Schéma Rayleigho rozptylu	25
Obrázek 7 - Schéma Mie rozptylu	26
Obrázek 8 - Ukázka rozptylu v testovací komoře, vysílací lasery jsou umístěny vlevo	26
Obrázek 9 - Princip rozptylu na spojně čočce	27
Obrázek 10 - Tvary kapek podle Pruppachera a Bearda. Kapky o ekvivalentním průměru, první řádek zleva 4,00 mm, 3,68 mm, 2,90 mm, druhý řádek zleva 2,65 mm, 1,75 mm, 1,35 mm a poslední řádek zleva 0,393 mm, 0,354 mm, 0,155 mm (poslední řádek byl proporcionálně zvětšen jako ukázka kulovitosti těchto kapek) [6]	28
Obrázek 11 - Vyobrazení kapek různých velikostí o ekvivalentním průměru v intervalu 0,5 – 8 mm, na osách jsou uvedeny rozměry v mm	29
Obrázek 12 - Odraz paprsků od kapky, zeleně dopadající paprsky a oranžové – odražené paprsky	30
Obrázek 13 - Průchod 50 paprsků kapkou průměru 0,5 mm, rozměry na osách jsou mm	31
Obrázek 14 - Průchod 50 paprsků kapkou průměru 3,5 mm, rozměry na osách jsou mm	31
Obrázek 15 - Měrný útlum optického signálu v závislosti na intenzitě srážek	32
Obrázek 16 - Přeměna energie vírů	39
Obrázek 17 - Prostorové uspořádání optického spoje na observatoři Milešovka	43
Obrázek 18 - Porovnání útlumu s odhadem útlum z dohlednosti (6.1)	44

Obrázek 19 - Metoda hledání prahu, vlevo data s nalezeným prahem červeně v aktivní zóně zeleně, vpravo histogram četnosti hodnot v aktivní zóně, rozhodující o prahu	45
Obrázek 20 - Porovnání vztahů mezi dohledností a útlumem spoje (délka 60 m, $\lambda = 830$ nm) na datech za 1 rok.....	46
Obrázek 21 - Schématické znázornění nízké oblačnosti.....	47
Obrázek 22 - Průběh vývoje výšky rozhraní nízké oblačnosti trvající 123 min.....	48
Obrázek 23 - Závislost útlumu spoje na turbulentní energii (modře), červeně je zobrazena numerická závislost (6.8)	49
Obrázek 24 - Rádiový index lomu vypočtený pro dva body vzdálené 20 m.....	51
Obrázek 25 - Porovnání strukturního indexu lomu s útlumem spoje, vlevo vlnová délka 830 nm, vpravo vlnová délka 1550 nm.....	51
Obrázek 26 - Schématické znázornění laboratorní testovací komory optických spojů (DC Bias – stejnosměrné předpětí, Laser diode – laserová dioda, Fog control – regulace mlhy, Fog – mlha, controlled chamber – testovací komora, Power meter – měřič výkonu, LabVIEW control and Data Acquisition – LabVIEW řízení a sběr dat)	52
Obrázek 27 - Laboratorní testovací komora OBS Northumbria University	53
Obrázek 28 - Vývojový diagram měření útlumu v komoře	54
Obrázek 29 - Vývoj dohlednosti v komoře s časem	55
Obrázek 30 - Závislost koeficientu útlumu na vlnové délce a dohlednosti pro glycerinový kouř	56
Obrázek 31 - Výsledek měření v celém spektru 600 – 1600 nm s rozlišením 2,4 nm (glycerinový kouř).....	57
Obrázek 32 - Koeficient útlumu v celém spektru v porovnání s Kimovým modelem	58
Obrázek 33 - Koeficient útlumu v závislosti na dohlednosti, vybrané vlnové délky (logaritmické měřítko)	58
Obrázek 34 - Vodní mlha během měření útlumu spektroskopem, zelený laser měří dohlednost	59

Obrázek 35 - Koeficient útlumu v celém spektru v porovnání s Kimovým modelem, mlha z vody	60
Obrázek 36 - Koeficient útlumu v závislosti na dohlednosti, vybrané vlnové délky (logaritmické měřítko) mlha z vody.....	61
Obrázek 37 - Porovnání výsledků s modely pro dohlednost 48 m	62
Obrázek 38 - Porovnání výsledků s modely pro dohlednost 76 m	62
Obrázek 39 - Porovnání výsledků s modely pro dohlednost 103 m	63
Obrázek 40 - Porovnání výsledků s modely pro dohlednost 259 m	63
Obrázek 41 - Blokové schéma zařízení pro měření indexu lom / strukturního indexu	68
Obrázek 42 - Diagram měření a přenosu dat	69
Obrázek 43 - Diagram rozmístění různých typů čidel podél optického spoje	69
Obrázek 44 - Pohled na zahrádku observatoře, ocelové lanko nese čidla měřicího zařízení .70	
Obrázek 45 - Naměřené hodnoty teplot 6 čidel (nahore), rozdíly teplot (uprostřed), index lomu vzduchu (dole)	72
Obrázek 46 - Denní chody indexu lomu v různých pozicích, čidlo 1 je nejbližší věži	73
Obrázek 47 - Průběhy naměřené teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku ve zvoleném období	74
Obrázek 48 - Měřená hodnota dohlednosti ve zvoleném období.....	75
Obrázek 49 - Zobrazení indexů lomu vzduchu (nahore) a útlumu optického spoje 845 nm (dole)	76
Obrázek 50 - Průběhy strukturního indexu C_n^2 v jednotlivých úsecích mezi čidly	77
Obrázek 51 - Maxima a minima strukturního indexu C_n^2	77
Obrázek 52 - Porovnání výpočtu útlumu ze strukturního indexu pro různý počet intervalů..78	
Obrázek 53 - Porovnání vypočteného útlumu a měřeného útlumu na OBS	79
Obrázek 54 - Schématické zobrazení funkce přístroje na měření scintilací a putování paprsku	80
Obrázek 55 - Obraz na stínítku měřicího přístroje z místa instalace, červený bod je projekce optického paprsku	81

Obrázek 56 - Diagram měření vlastností paprsku.....	82
Obrázek 57 - Zařízení pro měření pohybu paprsku, dole vysílač, přijímač na věži	82
Obrázek 58 - Odchylka kruhovitosti, měřeno 5. 7. 2017 0 - 5 hod.....	84
Obrázek 59 - Graf rychlosti a směru větru 5. 7. 2017 0 - 5 hod	84
Obrázek 60 - Plocha kruhu, měřeno 5. 7. 2017 0 - 5 hod	85
Obrázek 61 - Pozice středu kruhu, měřeno 5. 7. 2017 0 - 5 hod.....	86

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Mezinárodní hodnocení rozdělení klimatických podmínek podle dohlednosti.....	34
Tabulka 2 - Koeficient q stanoven Krusem pro vzorec [35] [5]	35
Tabulka 3 - Koeficient q stanoven Kimem pro vzorec [35]	35
Tabulka 4 - Oblast přesnosti rovnice 3.8	40
Tabulka 5 - Seznam koeficientů modelu 4.4	47

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

DSD	Drop size distribution; spektrum velikosti kapek
FSO	Free Space Optics
ITU-R	International Telecommunication union – Radiocommunication; Mezinárodní telekomunikační unie - Radiokomunikace
LWC	Liquid water content; obsah kapalné vody
NIR	Near infra-red; blízké infračervené světelné spektrum
NWS	National Weather Service; Národní meteorologická služba
OBS	Optický Bez kabelový Spoj
PSA	Particle surface area, povrchová plocha částic
LOS	Line Of Sight, šíření elmag. vln po přímce
NLOS	Non Line Of Sight, šíření elmag. vln přes překážku
LED	Light Emitting Diode, světlo vyzařující dioda
OLED	Organic Light Emitting Diode, organická světlo emitující dioda
VLC	Visible Light Communication, přenos informací ve viditelném spektru
WiFi	Wireless Fidelity, označení norem pro bezdrátovou komunikaci
LiFi	Light Fidelity, označení rychlého ekvivalentu WiFi, pomocí světla

0 ÚVOD

Požadavky na přenos informací jsou staré stejně jako lidstvo samo. Od nepaměti se lidé pokoušeli předávat informace. S postupem času a vývoje se zdokonalovaly metody přenosu i jejich rychlost. Často využívaným médiem pro přenos informací bylo i světlo, jeho důležitost v předávání informací rostla a nadále roste. V dnešní době datové komunikace existuje asi jen velmi málo informací, které nejsou přenášeny po optických kabelech rychlostmi desítek, až stovek Gb/s. Nicméně protikladem k extrémně rychlým kabelovým optickým spojmům jsou požadavky na mobilitu, nebo alespoň na rychlé budování infrastruktury pevné či dočasné. Přesně těmto požadavkům vyhovují optické bezkabelové spoje (OBS) anglicky označované „Free Space Optics“ (FSO), jejich kořeny sahají do poměrně dávné minulosti. Jako první, kdo úspěšně demonstroval přenos informace pomocí světla, byl Alexander Graham Bell za využití svého fotofónu v roce 1880. Jednalo se o zařízení podobné telefonu, k přenosu se však používalo modulované odražené sluneční světlo. Absence vhodného zdroje světla dlouho brzdila vývoj optických datových spojmů. Až v roce 1960 s vynálezem laseru se naplno otevřely možnosti optických komunikací, pevných i bezkabelových. V 60. letech byl vyvinut i první optický bezkabelový spoj využívající jako zdroj záření právě laser.

Využití optických bezkabelových spojmů je v dnešní době, čím dál tím běžnější a snažší. Ať již jsou to dálkové spoje na jednotky kilometrů, fungující jako poslední míle pro připojení datových bodů, či komunikace v budovách integrované do LED žárovek, až po speciální spoje pro vojenské účely a speciální účely. Optickým spojmům bez kabelů dominují výhody v podobě snadné instalace, nižších nákladů na instalaci, nebo rozměrové a energetické faktory. Nepřehlédnutelnou a nezanedbatelnou výhodou je i bezpečnost přenosu, daná vysokou směrovostí spoje. Světelný paprsek zaručuje elektromagnetickou kompatibilitu, světlo nezpůsobuje rušení v elektronických obvodech. Naproti všem těmto výhodám stojí i nějaké nevýhody, kdy hlavní nevýhodou je vlastní přenosové médium datového spoje, tedy atmosféra. Ta je ve svých částech v blízkosti země, kde se optické spoje používají velmi dynamická a často se mění doslova s počasím. Ano, právě počasí, současně s vlivem člověka na životní prostředí udává kvalitu přenosového prostředí optického spoje. Nejvýraznějšími vlivy jsou déšť, sníh, mlha, kouř anebo dokonce vítr. Nevýhodou, která se často opomíjí, je například i zastínění paprsku v důsledku pohybu ptáků přes trasu spoje.

V důsledku stálé snahy o zlepšení kvality optických bezkabelových spojmů, se provádí měření atmosférických událostí ovlivňujících tyto spoje. Neustále dochází ke zpřesňování modelů vlivů působících na OBS. Při návrhu nových spojmů se využívají naměřené výsledky

ke stanovení výkonové rozvahy optického pojítka. Získávání zkušeností s měřením a modelováním spojů se přesouvají také do laboratorních podmínek, kde dochází k ověřování nových přístupů a technologií, které bude možné použít na nových spojích další generace.

Důležitost optických komunikací bez kabelů roste a tato možnost komunikace je stále více využívána, proto tato práce shrnuje možnosti použití optických spojů a nastiňuje překážky, na které tato technologie naráží.

1 PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Optické bezkabelové spoje nabízí výhody v podobě velké šířky použitelného pásma, malých rozměrů, malé váhy i relativně snadné instalace. Jejich přenosové rychlosti se pohybují v Gigabitech za sekundu a tím se přibližují své předloze ve vláknových spojích. Často se také využívají na místech, kde není vhodné nebo ekonomické instalovat vláknové přenosové systémy, jako jsou dočasné spoje, poslední míle, atd.

V posledních 20-ti letech prošly optické bezkabelové spoje bouřlivým vývojem, který se snažil minimalizovat vliv atmosféry, použité jako přenosového média na vlastní spoj (mlha, déšť, turbulence). Po celé zeměkouli probíhaly a stále probíhají výzkumy problematiky OBS. Typický výzkum prováděný na OBS je kvantifikace mlhy, kde většinou probíhá měření na vlnových délkách v blízkém infračerveném spektru (830 nm, 1150 nm). Tyto pokusy probíhají na pracovištích TU Graz v Rakousku [1] [2] [3] [4], VUT v Brně [5] [6], Politecnico di Milano [7], Českého Metrologického Institutu (ČMI) [8] [9]. Zde se přístupy ke kvantifikaci a modelování různí, podle použitých měřících přístrojů. Formulace vztahu pro útlum na základě LWC vznikla na ČMI v Praze. Obdobný systém vlastní konstrukce využívá TU Graz, kde je měřena odrazivost částic ve vzduchu a na jejím základě vypočteno LWC. Klasickým přístupem zůstává měření dohlednosti dohledoměry jako na Politecnico di Milano. I měření dohlednosti využívá různých principů. Například C. P. Colvero z Metrologického institutu v Brazílii využívá k měření dohlednosti kameru a kontrastní terč [10]. Dalším přínosem zmíněného autora je porovnání OBS blízké-IR a vzdálené-IR oblasti na vlnové délce 9,1 μ m. Spoj na vlnové délce 9,1 μ m vykazuje daleko lepší vlastnosti při průchodu mlhou než klasické NIR vlnové délky [11] [12] [13].

Tento fakt potvrdil i Paul Corrigan v měření v New Yorku [14] na vlnové délce 8,1 μ m. Všechny tyto experimenty mají společné měření ve venkovním prostředí. Naproti tomu i v laboratoři lze provádět experimenty, jak ukazuje pracoviště Northumbria University UK [15]. Toto pracoviště produkuje velké množství výsledku od charakterizace mlhy, testování vhodnosti požitého kódování na dostupnost spoje a jeho chybovost. Možnosti snižování vlivu turbulencí výběrem vhodného rozložení energie v paprsku a komunikace pozemních OBS stanic s vlaky [16]. Pozadu nezůstávají ani metody komunikace MIMO v optickém spektru [17] pro zvýšení dostupnosti a kvality spoje. V Čechách se simulacím rozložení energie ve vysílacím paprsku a problematice kódování věnuje skupina na VUT Brno. V oblasti popisu měření turbulencí [18] jsou publikovány práce v USA včetně doporučení pro popis a modelování [19]. Zdejší publikace se věnují často přenosovým systémům komunikujícím

s pohyblivým jedním bodem. To je pochopitelné, protože OBS jsou zde využívány pro přenos informací z UAV (bezpilotní letouny). V neposlední řadě se objevují i výzkumy z čínských univerzit, odkud je velmi znát technologický a výrobní potenciál této země. Často se jedná o OBS komunikující až v oblasti desítek Gbit/s současně s řešenou problematikou přenosu optického signálu z vlákna volným prostorem a opětovné navázání do optického vlákna na straně přijímače [20]. Tuto technologii komplikují právě turbulence a efekty jimi způsobené na OBS (scintilace, beam dancing, ...). Za zmínku stojí pozorování rozložení intenzity laserového paprsku na apertuře přijímače v závislosti na měřené hodnotě strukturního indexu C_n^2 během dne [21].

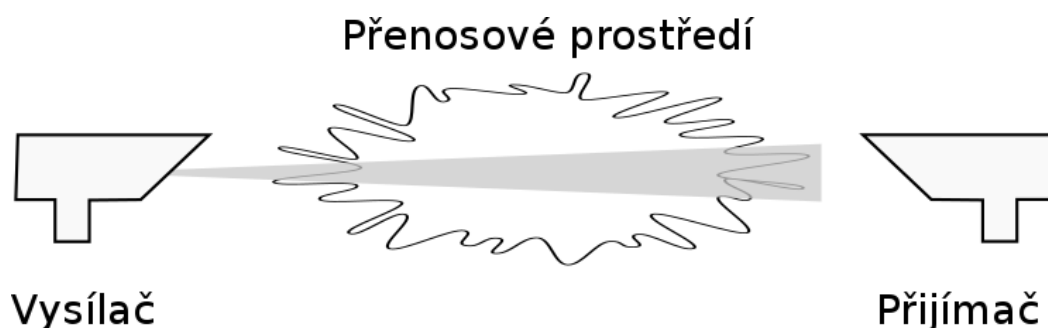
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A METODIKA JEJICH ŘEŠENÍ

1. Proved'te vývoj a výrobu meteorologických čidel ("lampionů") měřících teplotu, relativní vlhkost a atmosférický tlak v několika bodech s dobou odečtu okolo 10 vteřin pro účely výpočtu strukturního indexu atmosféry podél dráhy optického spoje (prototyp měřícího zařízení byl předmětem studentského projektu SGFEI02/2010). Vaším úkolem je využít odladěná čidla z prototypu, vyvinout řídicí firmware, vyvinout odolný hardware pro použití na experimentálním pracovišti ÚFA Milešovka, kde se nachází experimentální optický spoj. Dále uveďte v chod a proved'te obsluhu sběru dat ze zařízení (čidel) do PC.
2. Proved'te dokumentaci stávajících dat získaných na experimentálním pracovišti Milešovka za účelem analýzy strukturního indexu atmosféry. Zejména formulujte vztahy pro útlum turbulencemi v závislosti na parametrech větru (turbulentní energie, sonická teplota atd.) a na měřeném strukturním indexu atmosféry. Vyhledejte extrémní a standardní hodnoty útlumů v závislosti na měřených parametrech, přičemž tyto parametry nebudou ovlivněny rušivými „nevětrnými“ jevy. K tomuto účelu použijte data z meteorologických přístrojů na výzkumném meteorologickém pracovišti ÚFA Milešovka.
3. Proved'te základní i rozšířenou statistickou analýzu výsledků, formulujte závěry pro použití v praxi. Soustřed'te se zejména na matematické modelování závislostí s cílem získat model popisující vliv turbulentního proudění popsaného strukturním indexem na útlum optického spoje za podmínek vysoké dohlednosti (jasné počasí).

3 ROZDĚLENÍ OBS

Optické bezkabelové spoje se využívají k přenosu informací na rozmezí vzdáleností jednotky centimetrů, až pod desítky kilometrů. Nejčastěji jsou k nalezení v domácnosti, ale slouží i přenosu dat ve venkovním prostředí ovlivněném atmosférou. Existují i velmi specifické využití této technologie.

Každý optický spoj se skládá z vysílače a přijímače. Úlohou vysílače je vyslat modulovaný, velmi směrový optický paprsek skrze přenosové prostředí k přijímači Obrázek 1. Ten má naopak za úkol tento modulovaný signál zachytit, zesílit a dekodovat. Pro duplexní funkci spoje je tedy zapotřebí pár vysílač, přijímač na obou stranách spoje.



Obrázek 1 - Schématické znázornění OBS

3.1 Venkovní spoj na přímou viditelnost

Venkovní spoj na přímou viditelnost je takový spoj, který přenáší informace v prostředí ovlivněném atmosférou, po přímce z bodu A do bodu B. Typickým využitím je přenos dat v metropolitních sítích WAN, LAN, nebo jako poslední míle od páteřní konektivity do koncového bodu.

Přenosovým kanálem je troposféra, tedy část atmosféry Země do výšky 10 km. Troposféra je nejhustší vrstva atmosféry, vyskytují se zde všechny důležité meteorologické jevy, jako jsou mlha, déšť, sníh, vítr atd.

Spoje používají k přenosu informací zpravidla vlnové délky 850, 1300, 1550 nm, ale nejsou výjimkou ani spoje ve viditelném spektru, či spoje v infračerveném spektru okolo 6 μm . Jmenované vlnové délky se nacházejí v oblasti absorpčních oken atmosféry Obrázek 5, kde se nacházejí minima absorpce. Vzdálenost, kterou lze spojem překlenout se pohybuje v jednotkách kilometrů a je silně ovlivněna parametry spoje (vlnová délka, vysílací výkon), místními podmínkami a požadovanou časovou dostupností spoje.

Parametry ovlivňující kvalitu spoje a jeho realizovatelnost budou diskutovány dále.

3.2 Vnitřní spoje

Vnitřní optický spoj je zařízení, které přenáší informace v nějakém uzavřeném prostoru, typicky uvnitř místnosti v budově. Tyto spoje mohou být provozovány v režimu na přímou viditelnost LOS nebo v režimu na nepřímou viditelnost NLOS, kdy se pro přenos informace využívá odrazu paprsku do překážek a stěn místnosti. Tyto spoje jsou speciálně navrženy pro komunikaci v daném prostředí, kde platí podmínky odlišné od podmínek pro venkovní spoje. Mezi specifické parametry patří vícecestné šíření signálu, který se může odrážet od překážek, než dorazí k cíli.

Vnitřní optické bezkabelové spoje lze rozdělit na dvě kategorie:

1. pracující v infračerveném spektru
2. pracující ve viditelném spektru

Do první kategorie spadají známá zařízení, jako jsou dálkové ovladače k TV, DVD, ovladače hraček, nebo také infračervený port IrDA. Jedná se většinou o zařízení s nízkou přenosovou kapacitou a přesným určením použití. Samozřejmě lze vyrobit i zařízení s vysokou přenosovou kapacitou, ale v době vysoké mobility zařízení, je využití Wi-Fi praktičtější, vzhledem k prostupu radiového signálu překážkami.

Druhá kategorie optický spojů uvnitř budov, tedy ve viditelném spektru dostala název VLC (Visible Light Communication), tedy komunikace ve viditelném spektru, nebo také Li-Fi (Light Fidelity) zde je podobnost s Wi-Fi záměrná a jsou jí míněny bezdrátové spoje realizované světelným paprskem. Tato technologie využívá myšlenku sdílení zařízení pro osvětlování místnosti se zařízením přenášející data. Prostředkem umožňujícím realizovat VLC jsou LED, které lze snadno modulovat datovým signálem a zároveň jsou masivně využívány jako úsporný zdroj světla. Možnost přenášet informace současně s osvětlením je dána setrvačností lidského oka, které nerozliší rychlé změny intenzity světla. Výhodou komunikace s využitím LED nebo OLED je, především jejich nízká cena, zároveň však současné LED lze efektivně využít do rychlosti cca 50 Mb/s [22]. Více než v jakékoliv jiné kategorii OBS zde hraje roli rozložení intenzity světla v místnosti a vícecestné šíření signálu v prostoru.

Dne 6. srpna 2011 byl publikován standard IEEE 802.15.7 VLC, který upravuje parametry optických spojů ve viditelném spektru na krátkou vzdálenost.

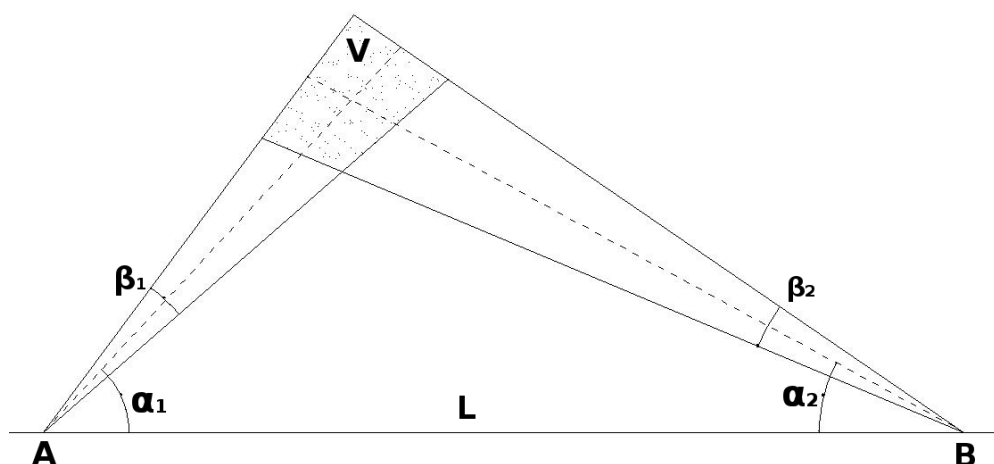
3.3 Speciální

Mezi typické využití OBS patří přenos dat v metropolitních sítích WAN, či LAN, postupně však tato technologie proniká do speciálních odvětví přenosu informací, jako jsou spoje na nepřímou viditelnost, podmořské spoje, či spoje vesmírné.

3.3.1 Spoje na nepřímou viditelnost v Ultrafialovém spektru

V této části se budeme zabývat OBS z kategorie s velmi specifickými vlastnostmi. Jedná se o spoje NLOS (non line of sight – tedy spoje na nepřímou viditelnost), v tomto režimu komunikace se využívá takové vlastnosti, že na přímce mezi vysílačem a přijímačem může být překážka. Toto uspořádání přináší výhody v podobě komunikace např. přes hory, les atd. Zároveň je k přenosu informace použito přenosové pásmo oblasti ultrafialového spektra (UV) záření, které se rozprostírá ve vlnových délkách 4 – 400 nm.

Zemská atmosféra vykazuje specifické vlastnosti v rozmezí vlnových délek 200-280 nm, oblast UV-C záření (tvrdé UV), v tomto spektru vlnových délek prakticky neexistuje záření ze Slunce, vlivem absorpce na molekulách ozónu a vysoké hodnotě rozptylu vzduchu. Za předpokladu velice nízkého rušení lze používat přijímače s maximální citlivostí. Další velice vhodnou vlastností atmosféry je velmi velký rozptyl, vznikající interakcí fotonů s molekulami plynu a aerosoly. Tento rozptyl umožňuje vytváření NLOS spojů, tím že jsou fotony z vysílače rozptýleny do všech směrů.



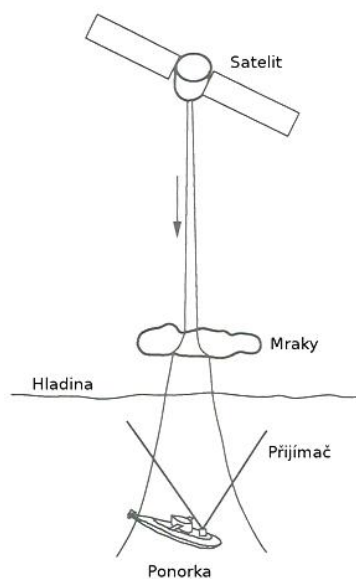
Obrázek 2 - Schématické znázornění funkce UV NLOS OBS

Historie NLOS UV spojů se začala psát v 60. letech 20. století, kdy byl sestaven experimentální spoj na velkou vzdálenost za použití xenonové UV výbojky jako vysílače a fotonásobiče jako přijímače. Zmíněný spoj pracoval na vlnové délce 280 nm, vzdálenost vysílače a přijímače byla 26 km, to odpovídá délce spoje okolo 40 km [23].

Princip funkce NLOS spoje nám zobrazuje Obrázek 2, kde vysílá-li se z bodu A do bodu B, které jsou vzdáleny na vzdálenost L , není využita přímá dráha mezi body A a B, nýbrž jsou vysílač i přijímač vychýleny pod úhlem α_1 a α_2 od roviny. Divergence přijímače β_2 i vysílače β_1 určují v průsečíku svých optických cest objem V , ve kterém se uplatňuje rozptyl využitý ke komunikaci mezi body A a B.

3.3.2 Podmořské spoje

Komunikace pod hladinou moře je zajímavá disciplína. Vzhledem k plánům na využití automatických strojů pro průzkum, i ostatní operace pod kladinou moře. Je zapotřebí zajistit těmto autonomním strojům komunikaci. Mezi možnosti patří akustická komunikace. Ta je spolu s akustickou detekcí překážek (SONAR) dobře propracována. Vlastnosti mořské vody však nepřijímá velkým přenosovým rychlostem v akustickém pásmu, protože se zvyšující se frekvencí zvuku velmi rychle stoupá i útlum. Využití rádiových frekvencí, jako alternativy k akustickému přenosu, není vhodné pro velký útlum mořské vody.



Obrázek 3 - Schéma komunikace satelitu s ponorkou, převzato z [24]

Z výše zmíněných důvodů začal v 70. letech 20. století výzkum laserové komunikace pod vodou. Agentura DARPA začala financovat projekt, který si kladl za cíl komunikaci mezi ponorkou a satelitem [24]. Postupem času byly stanoveny hlavní příčiny útlumu optického signálu v mořské vodě, jako jsou útlum v závislosti na vlnové délce záření, rozptyl na molekulách, rozptyl na „velkých částicích“, turbulentní rozptyl (teplota, tlak, salinita vody), absorpce na fytoplanktonu atd. [23] Charakterizací mořské vody bylo zjištěno přenosové okno

v oblasti vlnových délek optického spektra, nejnižší útlum se nachází v oblasti nazývané modro-zelená, tedy v rozmezí vlnových délek 400 – 500 nm. Jako příklad lze uvést, že podmořský optický spoj dlouhý 10 m na vlnové délce 700 nm vykazuje o více než 25 dB vyšší útlum oproti spoji v modrozelené oblasti.

Smyslem využití OBS pod vodou, není pouze komunikace s ponorkami, v dnešní době autonomních strojů, leží možnosti v této komunikaci v přenosu informací pro navigaci a koordinaci podmořských strojů, jako jsou těžební roboti, automatický průzkum hlubin a roboti pro čištění moří od odpadu z pevniny.

3.3.3 Satelitní spoje

Satelitní optické spoje se testují a provozují od 70. let 20. století, kdy NASA začalo testovat LASERCOM systém pracující s CO₂ laserem na vlnové délce 10,6 μm, která dobře prochází atmosférou.

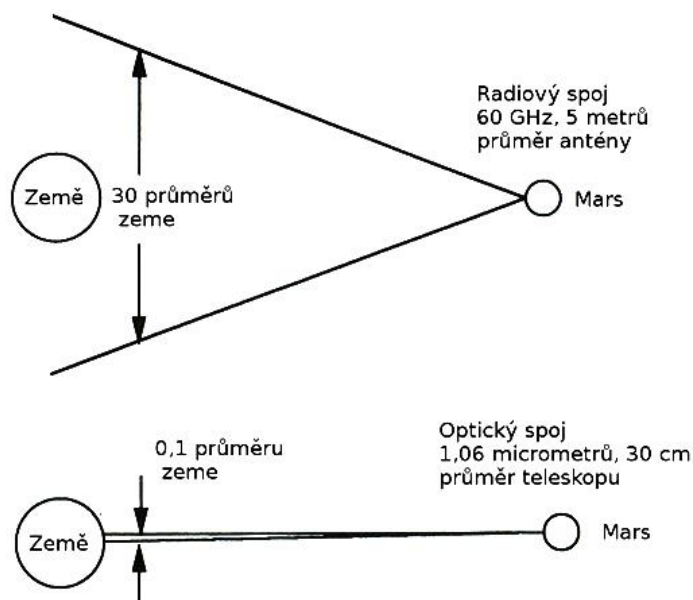
Optické spoje lze v kategorii satelitních rozdělit do několika kategorií:

- Země – Satelit
- Satelit – Satelit (GEO – geostacionární oběžná dráha, MEO – střední oběžná dráha a LEO – nízká oběžná dráha)
- Satelit – hluboký vesmír (např. Mars, vesmírné sondy)

Výhody OBS ve vesmírném prostředí jsou umocněny požadavky na provozování satelitů. Především je vhodná jejich nižší hmotnost oproti rádiovým spojům, protože cena při startu satelitu ze země je přímo úměrná jeho hmotnosti. Dále pak využití spektrum pro přenos přináší výhody v podobě menší velikosti antén (teleskopů), větší šířky pásma pro přenos dat a především větší směrovosti spoje, která přispívá k většímu zabezpečení spoje a zvyšuje koncentraci energie pro příjem na přijímači. Výhodou pro komunikaci ve vesmírném prostředí je také absence atmosféry, čímž nedochází k degradaci signálu. Na druhé straně stojí technické výzvy v podobě sledování paprsku pro nepřerušovanou komunikaci v prostředí se stálým pohybem komunikujících uzlů (satelitů). To vedlo k vývoji pokročilých technik sloužících ke sledování paprsku.

Jediný druh satelitního spoje, který interaguje se zemskou atmosférou je typ země – satelit. Do těchto spojů lze započítat spoj s pevnou pozemní stanicí, či s mobilní stanicí, například letadlem či lodí. Zde se jako největší překážka ukazuje přítomnost oblaků. Oblak

způsobuje absorpci a rozptyl signálu, podle [24] však lze dosáhnout prostorovou diversitou 4 pozemních stanic dostupnosti až 97%.



Obrázek 4 - Porovnání modelového optického a rádiového spoje Země – Mars [24]

Posledním druhem spojů ve vesmíru zůstávají spoje do hlubokého vesmíru. V této rovině se jedná spíše o testovací pokusy, než běžnou praxi, nicméně principiálně jsou shodné se spoji mezi satelity. Hlavní výhodou zůstává velká koncentrace energie svazku při komunikaci na velké vzdálenosti, jako příklad poslouží modelová komunikace Země – Mars Obrázek 4. Zde je vidět výhoda jednak ve velikosti antény/teleskopu, tak i v malé divergenci svazku, při vysílání na velmi velké vzdálenosti.

4 ZTRÁTY V ATMOSFÉŘE

Ztráty v atmosféře neboli útlum optického paprsku se skládá z absorpce a rozptylu v přenosovém prostředí. Absorpce znamená ztrátu fotonu ze světelného svazku, vlivem zvyšování vnitřní energie částice, která záření absorbuje. Oproti tomu rozptyl způsobuje vychýlení světla do libovolného směru po srážce s rozptylujícím objektem. Existují tři kategorie rozptylu popsané dále. Rozptyl na rozdíl od absorpce nezpůsobuje ztrátu energie optického svazku, ale rozdělení světla do různých směrů. To může vést velmi velkým ztrátám v síle signálu ve směru spoje.

Beer – Lambertův zákon popisuje útlum světla procházející skrz atmosféru, v závislosti na absorpci i rozptylu. Transmittance ve vzdálenosti L od zdroje je dána podle vztahu [5]:

$$T(\lambda, L) = \frac{I(\lambda, L)}{I(\lambda, 0)} = e^{-\gamma(\lambda)L} \quad (4.1)$$

kde $I(\lambda, L)/I(\lambda, 0)$ je poměr intenzit ve vzdálenosti L od zdroje záření, v závislosti na vysílacím výkonu $P(\lambda, 0)$ a $\gamma(\lambda)$ je koeficient útlumu závislý na vlnové délce.

Koeficient útlumu je součet čtyř parametrů – molekulární absorpce α_m , aerosolové absorpce α_a , molekulárního rozptylu β_m a aerosolového rozptylu β_a , zapsaný následovně [5]:

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (4.2)$$

Tento vztah nám udává, že výsledný útlum je superpozicí jednotlivých složek absorpce a rozptylu, způsobených různými vlivy.

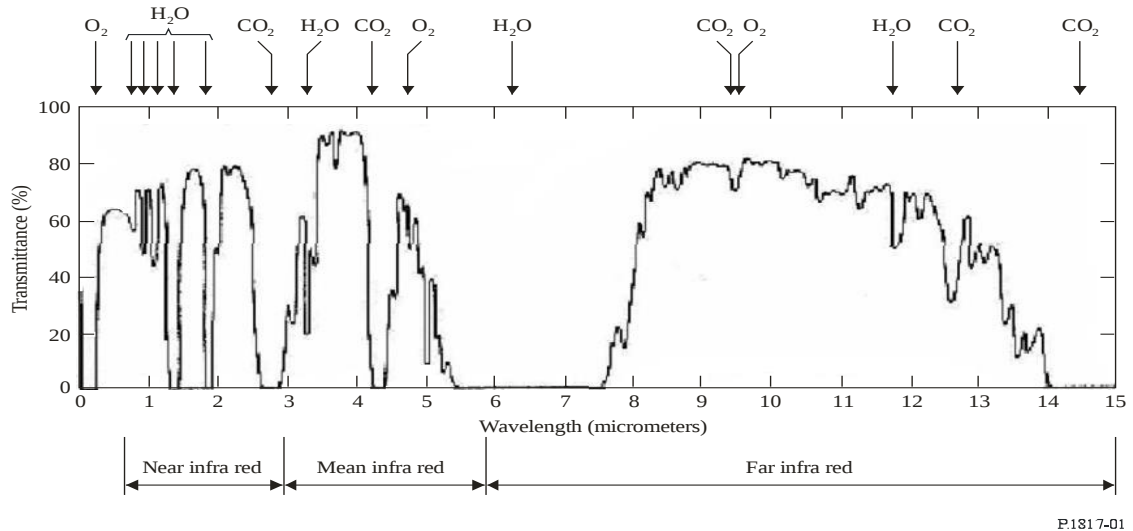
4.1 Absorpce záření

Absorpce má původ v přítomnosti částic, které jsou schopné přijímat energii fotonu a tím zvýšit svoji vnitřní energii. Množství částic v atmosféře určuje, jak silně bude optický signál absorbován. Částice nabývají mnoho vibračních a rotačních energetických stavů, proto jsou schopné absorbovat energii fotonu v různých pásmech. Absorbující částice lze rozdělit do dvou hlavních kategorií: molekulární a aerosolové

Molekulární absorpce je způsobena interakcí světla s molekulami plynu v atmosféře N_2 , O_2 , H_2 a dalšími. Částice jsou charakterizovány jejich indexem lomu, kde imaginární část indexu lomu n_{im} odpovídá absorpčnímu koeficientu α_m v rovnici:

$$\alpha_m = \frac{4\pi n_{im}}{\lambda} = \sigma_{abs} N \quad (4.3)$$

kde σ_{abs} je absorpční průřez, n_{im} je imaginární část indexu lomu a N je koncentrace částic. Molekulární absorpce je závislá na vlnové délce, tudíž ve spektru vznikají místa s větší absorpcí, ale i místa s menší absorpcí takzvaná přenosová okna. Obrázek 5 zobrazuje inverzní hodnotu absorpce tak zvanou transmitanci, jinými slovy jak moc atmosféra propouští danou vlnovou délku.



Obrázek 5 - Propustnost atmosféry vlivem molekulární absorpce [25]

Přenosová okna v atmosféře odpovídají přenosovým oknům v optickém vláknu, tudíž je pro OBS používají stejné optické zdroje (Lasery) jako ve vláknové optice.

Aerosolová absorpce je závislá na typu a složení aerosolové částice. Ta může být pevná, nebo tekutá, dle svého původu např. mlha, prach, různé produkty průmyslového znečištění a jiné. O aerosolu mluvíme, pokud se velikost částic rozptýlených ve vzduchu pohybuje v rozmezí od 0,01 μm do 100 μm .

4.2 Rozptyl

Rozptyl světla má velký vliv na kvalitu OBS. Důvodem jsou vysoké ztráty přijímané intenzity světla v důsledku směrového přerozdělení energie na rozptylující částici. Existují tři hlavní třídy rozptylu, které můžeme klasifikovat na základě hodnoty velikostního parametru Ω :

$$\Omega = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (4.4)$$

kde r je poloměr částice. Pro $\Omega \ll 1$ se jedná o Rayleighho rozptyl, pro $\Omega \approx 1$ jde o Mie rozptyl a pokud $\Omega \gg 1$, tak se jedná o neselektivní geometrický rozptyl.

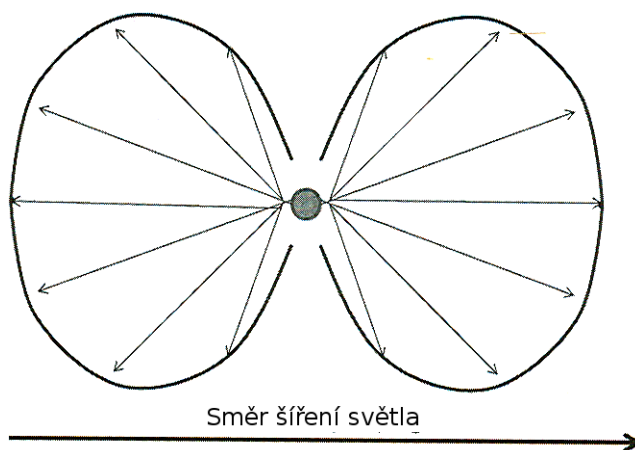
4.2.1 Rayleighho rozptyl

Pokud je velikost rozptylující částice daleko menší než vlnová délka, tak se uplatňuje pouze Rayleighho rozptyl. Principálně funguje následovně: Dopadající záření v podobě fotonu interaguje s elektrony atomu, či molekuly rozptylující částice, to vytváří nábojovou nerovnováhu, nebo dipólový moment oscilující na frekvenci dopadajícího záření. Kmitající elektrony vyzařují světlo v podobě rozptýlené vlny Obrázek 6. Rayleighho klasický vzorec rozptylového průřezu je definován dle [23] následovně:

$$\sigma_s = \frac{2\pi^2}{3} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \frac{(2r)^6}{\lambda^4} \quad (4.5)$$

kde n je index lomu. Z rovnice (4.5) je zřejmá závislost na vlnové délce λ^{-4} , která vystihuje daleko větší dopad rozptylu na kratší vlnové délky, než na delší vlnové délky, proto lze v blízké infračervené oblasti pokládat Rayleighho rozptyl za zanedbatelný.

Snadno pozorovatelným efektem Rayleighho rozptylu je modrá barva oblohy vznikající rozptylem modrého světla (při průchodu atmosférou). Protože k rozptylu dochází opakovaně a rozptylové schéma je podobné vyzařování dipólu Obrázek 6, zdá se obloha modrá ve všech směrech.



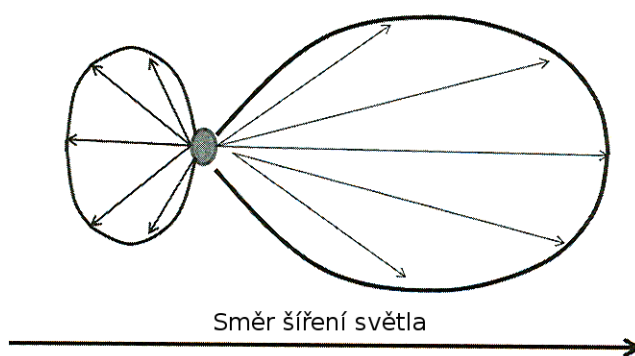
Obrázek 6 - Schéma Rayleighho rozptylu

4.2.2 Mie rozptyl

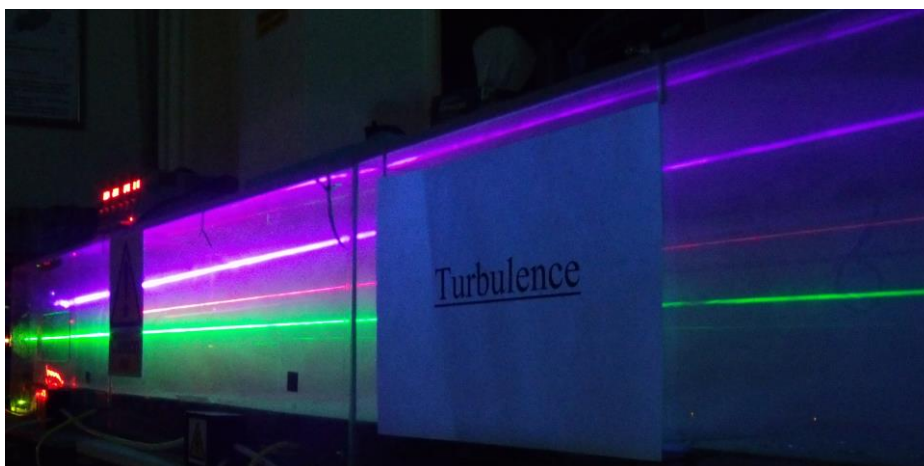
Pokud je velikost rozptylující částice srovnatelná s vlnovou délkou záření, pak se uplatňuje Mie rozptyl, který tvoří největší příspěvek v blízké infračervené oblasti (800 -

1900 nm) pro podmínky jako je opar, mlha a znečištění vzduchu (aerosoly). Velikosti těchto částic se pohybuje v rozsahu 0,1 – 50 μm .

Mie rozptyl je v porovnání s Rayleigho rozptylem více směrově orientovaný do směru šíření optického záření Obrázek 7, reálná ukázka rozptylu je zobrazena Obrázek 8, kdy vysílací lasery jsou umístěny vlevo. Ačkoliv je Mie rozptyl velmi dobře propracován a existují spolehlivé metody výpočtu jeho parametrů, zůstává nesnadným úkolem přesné srovnání s experimentálními daty. Výsledky získané výpočtem počítají pouze s rozptylem a nikoliv i s absorpcí záření, zároveň má na výpočet vliv i skutečnost, že není přesně známo rozdělení částic.



Obrázek 7 - Schéma Mie rozptylu

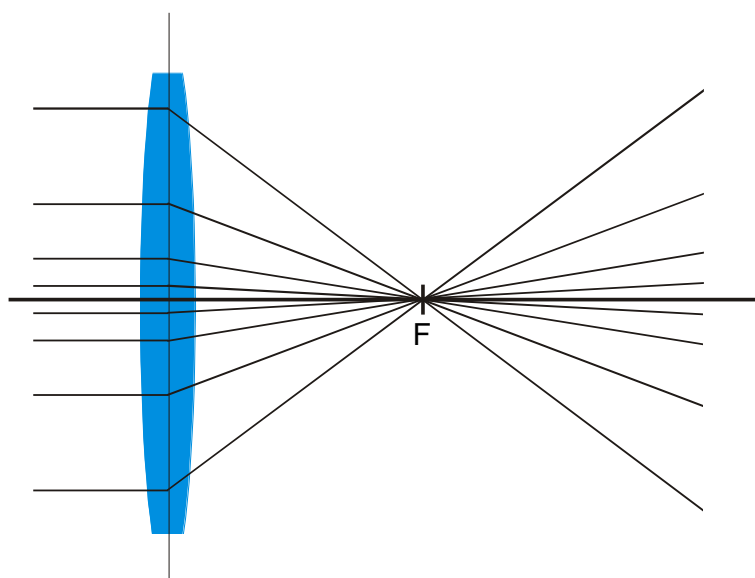


Obrázek 8 - Ukázka rozptylu v testovací komoře, vysílací lasery jsou umístěny vlevo

4.2.3 Geometrický rozptyl

Poslední kategorii rozptylu je neselektivní geometrický rozptyl, ten nastává pro velikostní koeficient Ω daleko větší než 1. V blízkém infračerveném spektru, odpovídají geometrickému rozptylu: déšť, sníh, kroupy a objekty větší než 0,5 mm.

V podmínkách mírného klimatického pásu, kde se nachází naše observatoř, je nejčastějším druhem srážek déšť, který je diskutován dále. Zjednodušeně, lze přirovnat dešťovou kapku svým tvarem ke spojně čočce Obrázek 9. Optické záření procházející kapkou jako čočkou, je na krátkou vzdálenost směřováno do ohniska, dále od ohniska dochází rozbíhání paprsků. Při mnohonásobné interakci deště s paprskem, je výsledné rozložení intenzity světla jiné, než po jednom průchodu čočkou.



Obrázek 9 - Princip rozptylu na spojně čočce

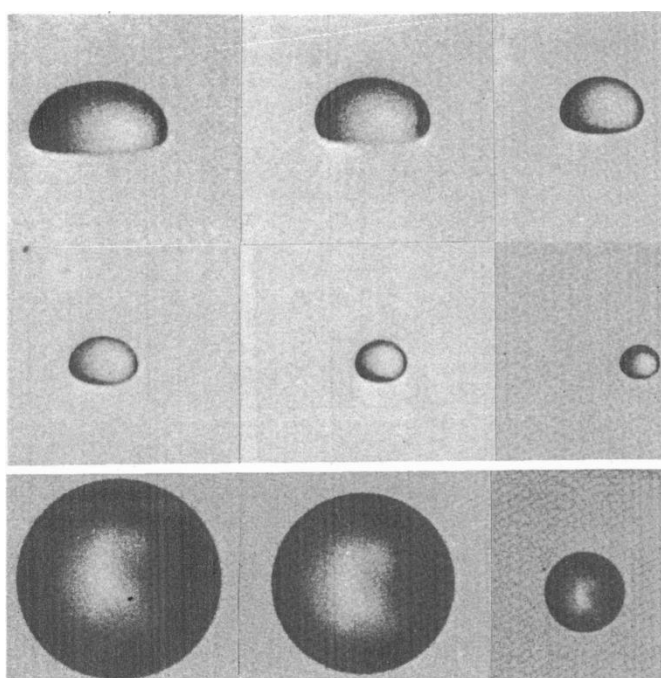
4.3 Útlum deštěm

Pro vlnové délky OBS patří déšť do kategorie geometrického rozptylu, proto je k jeho vyhodnocení zapotřebí zmapovat vlastnosti padajících dešťových kapek. Nejprve jako jednotlivých útvarů a následně jako souboru útvarů ovlivňující optický signál. Z meteorologického hlediska je déšť charakterizován intenzitou deště R , která odpovídá množství vody měřené v mm na jednotku plochy m^2 za čas h . Jednotlivé srážkové události se od sebe liší množstvím kapek a jejich velikostí. Podrobnou statistiku deště lze měřit distrometry. Distrometry měří tvar, velikost i počet jednotlivých kapek. Následně kalkulují distribuční funkci velikosti kapek a intenzitu deště. Jeden takový přístroj provozuje Ústav fyziky atmosféry Akademie věd.

4.3.1 Tvar dešťové kapky

Dešťové kapky je možné pozorovat v rozmezí velikostí od 0,1 mm do 7 mm tzv. ekvivalentního průměru. Ekvivalentní průměr odpovídá průměru koule o stejném objemu, jako má dešťová kapka. Ekvivolumetrická aproximace kapky je jedním z přiblížení využívaných při výpočtech útlumů např. v rádiovém spektru. Zjednodušení bylo nutné zavést pro komplexní tvar dešťové kapky, který se navíc mění s její velikostí a tím související pádovou rychlostí. Při pádu deformuje aerodynamický odpor vzduchu tvar padající kapky.

Dešťová kapka vzniká kondenzací vodní páry na prachových částicích nebo jiných nečistotách ve vzduchu. Takto vznikají maličké kapičky vody skutečně kulového tvaru, ty se postupně spojují do větších a větších kapek kulového tvaru, protože povrch koule má nejmenší povrch. Když však kapka dosáhne určité velikosti a hmotnosti, začne na její spodní stranu působit brzdná síla odporu vzduchu, která má za následek zplošťování kapky Obrázek 10. Zde je vidět, změna tvaru kapky v závislosti na ekvivalentním průměru D_0 . Tvar se mění od kulové přes zploštělé sféroidy, až po asymetrické zploštělé sféroidy. Největší kapky mohou dosahovat objemu až 0,25 ml.

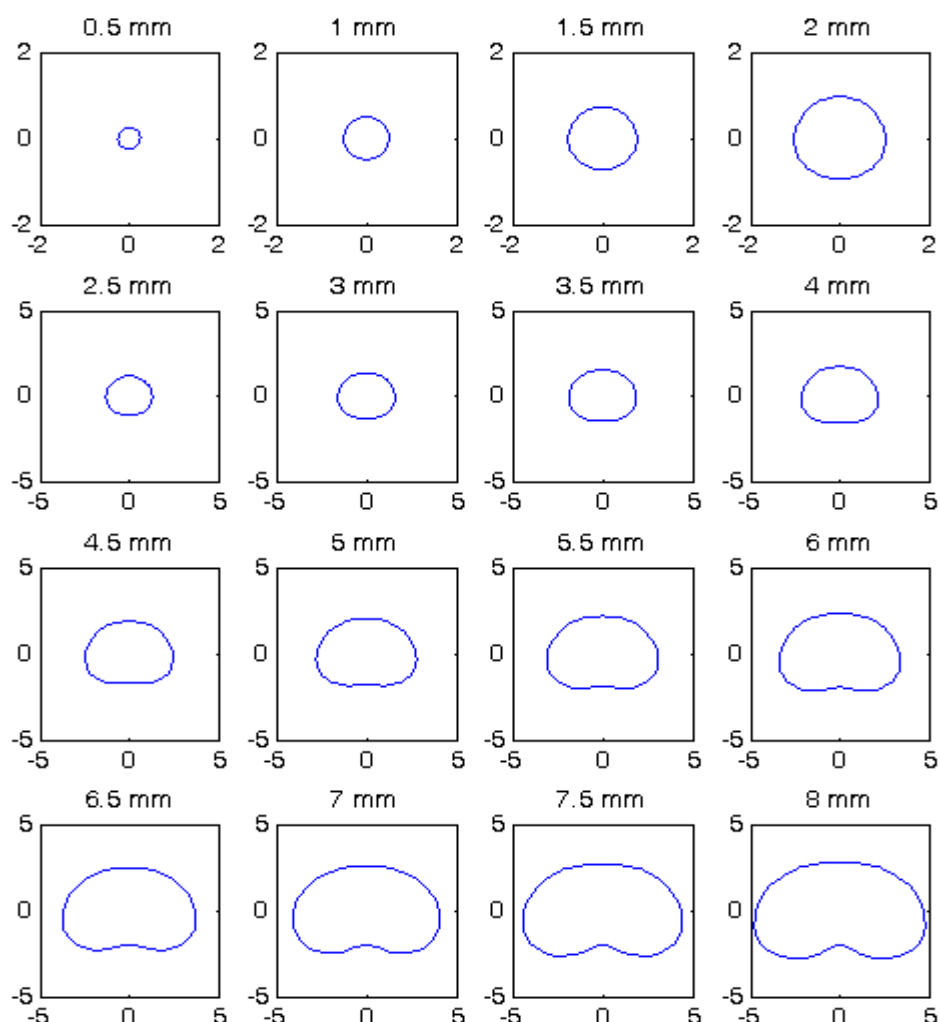


Obrázek 10 - Tvary kapek podle Pruppachera a Bearda. Kapky o ekvivalentním průměru, první řádek zleva 4,00 mm, 3,68 mm, 2,90 mm, druhý řádek zleva 2,65 mm, 1,75 mm, 1,35 mm a poslední řádek zleva 0,393 mm, 0,354 mm, 0,155 mm (poslední řádek byl proporcionálně zvětšen jako ukázka kulovitosti těchto kapek) [26]

Na základě fotografií Obrázek 10 byl sestaven Pruppacher – Pitterův model dešťové kapky [26]. Tento model umožňuje rekonstruovat tvar dešťové kapky ze znalosti ekvivalentního poloměru a_0 a daného vektoru deformačních koeficientů c .

$$R(\psi) = a_0 \left[1 + \left[\sum_{n=0}^9 (c_n \cos(n\psi)) \right] \right] \quad (4.6)$$

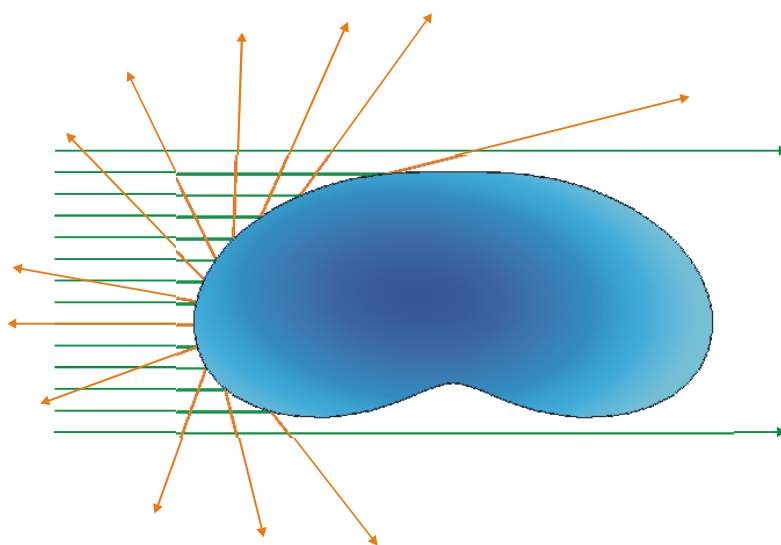
kde c je vektor deformačních koeficientů, závislý na velikosti ekvivalentního poloměru, ψ je úhel nabývající hodnot $0^\circ - 360^\circ$. Výpočtem získané tvary kapek jsou řezy geometrickým objektem Obrázek 11. Zde jsou vypočítány tvary kapek v relevantních průměrech 0,5 – 7 mm. Kapky větší než 7 mm se rozpadají. Nejčastější rozměr dešťové kapky je 0,8 mm.



Obrázek 11 - Vyobrazení kapek různých velikostí o ekvivalentním průměru v intervalu 0,5 – 8 mm, na osách jsou uvedeny rozměry v mm

4.3.2 Rozptyl na dešťové kapce - simulace

Při geometrickém rozptylu můžeme rozložit rozptýlené záření na část procházející skrz objem kapky a část odraženou při dopadu (stejně jako v předcházejících případech). Použitím paprskové aproximace lze odraz definovat jako energii odraženou na základě rozdílů indexů lomu vzduchu a vody Obrázek 12. Znázornění vychází ze Snellova zákona (4.7)(4.8), při dopadu se postupně mění úhel dopadu a dopadající vlna se tříští na odraženou vlnu.



Obrázek 12 - Odraz paprsků od kapky, zeleně dopadající paprsky a oranžové – odražené paprsky

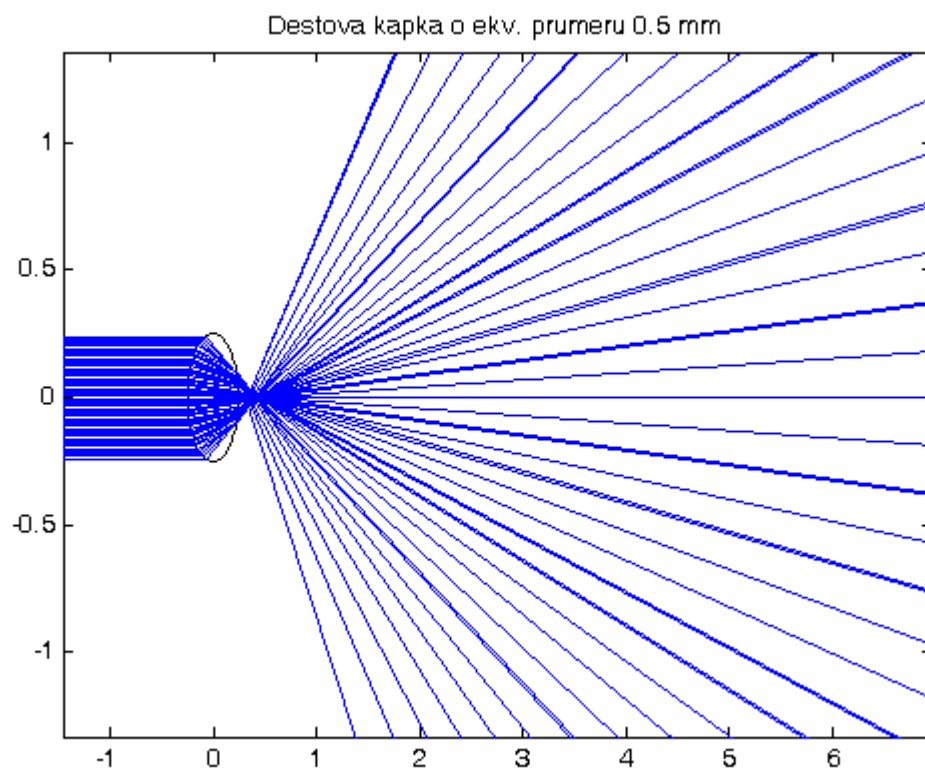
Snellův zákon odrazu

$$\varphi_o = \varphi_d \quad (4.7)$$

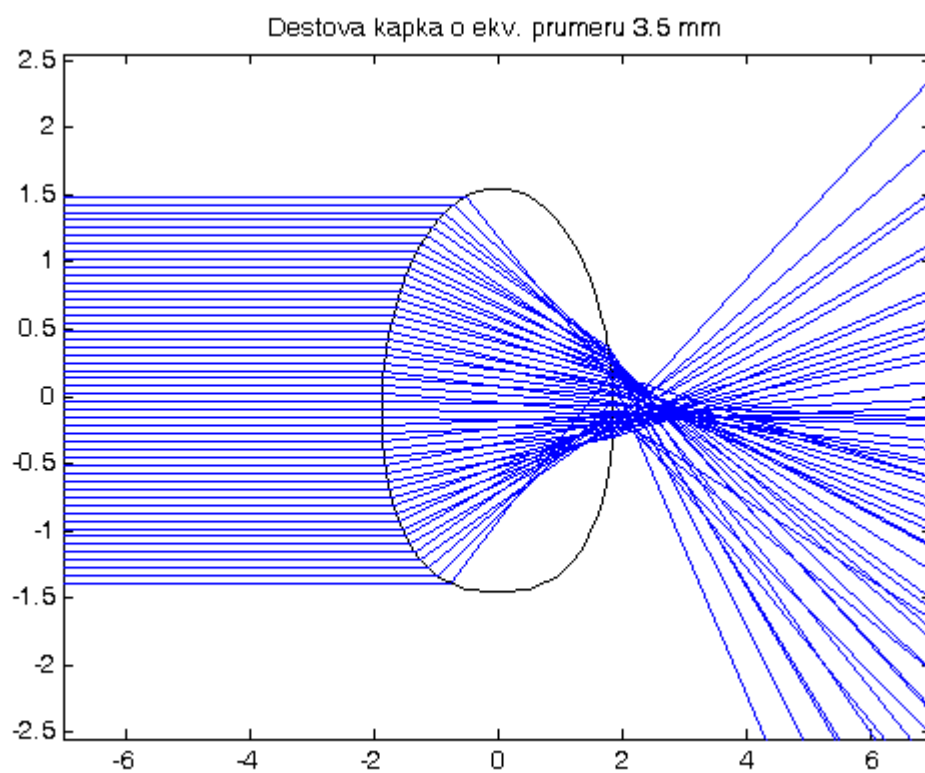
Snellův zákon lomu

$$n_1 \sin(\varphi_d) = n_2 \sin(\varphi_p) \quad (4.8)$$

kde n_1 je index lomu prvního prostředí, n_2 je index lomu druhého prostředí, φ_d úhel dopadu a φ_p úhel lomu. Většina energie projde kapkou, je odkloněna dvěma průchody rozhraním vzduch-voda a tvarem objektu. Způsob, jakým je rozptylováno světlo, ukazuje Obrázek 13 a Obrázek 14. Zde se jedná o výstup simulace průchodu paprsků dešťovou kapkou metodou Ray tracing (sledování paprsku). Tuto simulaci jsem vytvořil v rámci předchozích práce a je zaregistrována jako software 386333. Za předpokladu, že malé kapky jsou prakticky kulového tvaru, zobrazuje Obrázek 13 výsledek pro vertikální, i horizontální rovinu řezu dešťové kapky velikosti 0,5 mm.



Obrázek 13 - Průchod 50 paprsků kapkou průměru 0,5 mm, rozměry na osách jsou mm



Obrázek 14 - Průchod 50 paprsků kapkou průměru 3,5 mm, rozměry na osách jsou mm

4.3.3 Útlum souboru kapek

Předcházející sekce nás seznámila s rozptylem realizovaným jedinou kapkou. Také bylo řečeno, že data o intenzitě deště jsou uváděna, jako objem srážek na m^2 za čas. K modelování souboru kapek se využívá analytického rozdělení velikostí kapek v objemu. Nejčastěji používané analytické rozdělení dešťových kapek je Marshall-Palmerovo rozdělení exponenciálního tvaru [27], kde je parametrem nejčastěji měřený parametr – intenzita srážek:

$$N(D) = 0.08 \exp(-41 \cdot R^{-0.21} D) [cm^{-4}] \quad (4.9)$$

kde R je intenzita srážek [mm/h] a D je průměr kapky [cm].

Reálná měření spektra deště ukazují, že déšť má ve skutečnosti gamma rozdělení. Od určitého průměru počet menších kapek klesá na rozdíl od exponenciálního rozdělení, které říká, že čím menší průměr, tím více kapek se v jednotkovém objemu nachází, ale z hlediska šíření optické signálu, je to zanedbatelný příspěvek.

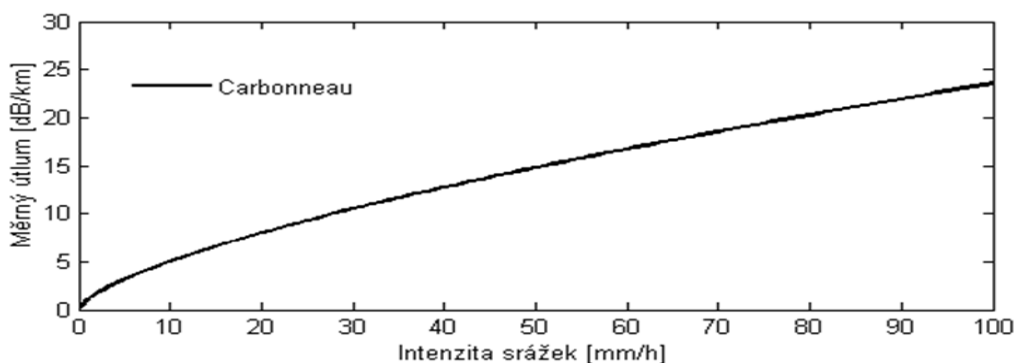
Ze znalosti spektra kapek $N(D)$, lze vyčíslit útlum optického signálu dle vzorce z [25]:

$$\alpha_0(\lambda) = 10^5 \int_0^\infty Q_{\text{ext}}\left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n'\right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad (4.10)$$

kde λ je vlnová délka záření v m, Q_{ext} je extinkční průřez kapky, r je ekvolumetrický poloměr kapky v cm, $N(D)$ je spektrum kapek v cm^{-4} .

V literatuře byl prezentován empiricky získaný vztah pro výpočet útlumu deštěm na základě dlouhodobého pozorování [28] ve Francii Obrázek 15:

$$\alpha_{\text{rain}} = 1.076 \cdot R^{0.67} [\text{dB/km}] \quad (4.11)$$



Obrázek 15 - Měrný útlum optického signálu v závislosti na intenzitě srážek

Můžeme si všimnout, že déšť s intenzitou srážek okolo 100 mm/h způsobí spoji o délce 1 km útlum okolo 25 dB.

4.4 Útlum mlhou

Již bylo zmíněno, mlha v pásmech se vyznačuje Mie rozptylem, který způsobuje redistribuci energie z přímého směru do směrů ostatních a tím způsobuje útlum. Strukturálně se mlha skládá z velkého počtu mlžných kapek, jejichž velikost je řádově srovnatelná s vlnovou délkou záření. Počet mlžných kapek ovlivňuje parametry mlhy. Čím větší je jejich počet, tím klesá meteorologická dohlednost V . Stejně, jako v případě deště určuje počet interakcí světla s kapičkami mlhy výsledný dopad na útlum signálu, přičemž dominantní je rozptyl oproti absorpci. Ačkoliv je možné matematicky vyjádřit dopad rozptylu na šířící se signál, nelze tuto metodu využít k určování útlumu, který obsahuje i neodlučitelnou část absorpce. Absorpce je závislá, jak na obecných parametrech, tak na místních vlivech okolí například vliv znečištění ovzduší. Tento důvod vede k vytváření empirických modelů.

4.4.1 Tvorba mlh

Mlha je tvořena malými vodními kapkami, které se vznášejí ve vzduchu v blízkosti zemského povrchu [29]. Vzniká jako důsledek kondenzace, když teplota vzduchu klesne pod hodnotu rosného bodu; jinými slovy, pokud relativní vlhkost vzroste na hodnotu blízkou nebo rovnu 100 %. Podle způsobu ochlazení vzduchu rozdělujeme mlhy na několik typů:

- **Radiační** – vznikají ochlazením vzduchu např. od studeného zemského povrchu, který v noci vyzařuje (odtud radiační) a ochlazuje tím přilehlý vzduch
- **Advekční** – vzniká vertikálním promícháváním částic vlhkého vzduchu o různé teplotě např. u vodních povrchů. Jestliže velmi chladný vzduch proudí vertikálně (odtud advekční) nad teplejší vodní povrch, může být teplý vzduch tlačén vzhůru do chladného vzduchu, kde dojde při příhodných podmínkách ke kondenzaci.
- **Frontální** – vzniká přidáním vodní páry, která vyvolá zvýšení vlhkosti. Při příchodu fronty padají teplejší dešťové kapky do ještě studeného vzduchu. Vypařování kapek pak zvýší vlhkost vzduchu, který může přesáhnout stav nasycení.
- **Ostatní typy** – ledové, sněhové atd.

Velikost mlžných kapek se pohybuje od 2 μm až do průměrů řádu desítek μm , přičemž typické hodnoty středního průměru se pohybují v rozmezí 10-20 μm .

4.4.2 Dohlednost

Meteorologická dohlednost V má svou historii v letectví, byla využívána jako jeden z ukazatelů, zda je možné bezpečné přistát či nikoliv. Dlouhou dobu bylo možné získat data o dohlednosti pouze z dohledoměrů instalovaných právě na letištích. V dnešní době je situace jiná, podél dálnic a vytižených silnic je možné si všimnout zařízení měřících meteorologické veličiny včetně dohlednosti. Získaná data pomáhají ke zvyšování bezpečnosti provozu.

Dohlednost je základní vlastnost pro hodnocení vlivu mlhy na OBS, porozumění tomuto pojmu je velmi důležité pro experimenty. Dohlednost definuje Kosmiderův zákon [30] jako (4.12) Definice je založena na pozorování dohlednosti lidským okem pro změnu kontrastu objektu ze 100 % na 2 %. Podle definice lze vytvořit snadno funkční měřicí systém za použití kamery a speciálního kontrastního terče jak předvedl M. Ijaz a V. Brázda [31].

K instrumentálnímu měření dohlednosti lze využít transmitanci T na specifické vlnové délce záření, konkrétně na vlnové délce 550 nm odpovídající nejvyšší citlivosti lidského oka.

$$V = \frac{10 \log_{10}(T_{th})}{\gamma_{\lambda}} \quad (4.12)$$

kde T_{th} je práh 2 % transmitance na vlnové délce 550 nm, kde γ_{λ} je měrný útlum v dB/km, který lze stanovit z Beer-Lambertova zákona (4.1).

Pro pojmenování jednotlivých kategorií mlhy existuje mezinárodní rozdělení klimatických podmínek podle dohlednosti Tabulka 1 [32] [33].

Tabulka 1 - Mezinárodní hodnocení rozdělení klimatických podmínek podle dohlednosti

popis	Popis anglicky	Rozsah dohlednosti (km)	Ztráty útlumem (dB/km)
Velmi silná mlha	Dense Fog	0,04 - 0,07	250 – 143
Silná mlha	Thick Fog	0,07 - 0,25	143 – 40
Mírná mlha	Moderate Fog	0,25 - 0,5	40 – 20
Slabá mlha	Light Fog	0,5 - 1	20 – 9,3
Kouřmo	Thin Fog	1 - 2	9,3 – 4
Kouřmo	Haze	2 - 4	4 – 1,6
Kouřmo	Light Haze	4 - 10	1,6 – 0,5
Jasná obloha	Clear Sky	10 - 25	0,5 – 0,1
Velmi jasná obloha	Very Clear Sky	25 - 50	0,1 – 0,04
Extrémně jasná obloha	Extremely Clear Sky	50 – 150	0,04 – 0,005

4.4.3 Empiricky stanovený útlum

Nejrozšířenějším současným modelem pro výpočet specifického útlumu optického signálu z dohlednosti je vzorec představený Krusem [34]:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{10 \log_{10} T_{th}}{V(km)} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q} \quad (4.13)$$

kde λ_0 je referenční vlnová délka 550 nm.

Hodnoty parametru q stanovené Krusem popisuje Tabulka 2.

Tabulka 2 - Koeficient q stanoven Krusem pro vzorec [35] [5]

$q =$	1,6	$V > 50 \text{ km}$
	1,3	$6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}$
	$0.585V^{1/3}$	$V < 6 \text{ km}$

Z důvodu upřesnění útlumu, modifikoval Kim Krusův model hodnotami q , Tabulka 3. Takto modifikovaný vztah vytváří na vlnové délce nezávislý region pro dohlednosti menší než 500 m [35].

Tabulka 3 - Koeficient q stanoven Kimem pro vzorec [35]

$q =$	1,6	$V > 50 \text{ km}$
	1,3	$6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}$
	$0,16V + 0,34$	$1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$
	$V - 0,5$	$0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km}$
	0	$V < 0.5 \text{ km}$

Naboulsi [35] představil vzorce pro předpověď útlumu dvou různých typů mlh, konvektivního typu mlhy a advektivního typu mlhy.

$$\gamma_{\lambda}(con) = 10 \ln \left(\frac{0,11478\lambda + 3,8367}{V(km)} \right) \quad (4.14)$$

$$\gamma_{\lambda}(adv) = 10 \ln \left(\frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,7205}{V(km)} \right) \quad (4.15)$$

kde λ může nabývat hodnot od 690 nm – 1550 nm, v rozmezí dohlednosti $V = 0,05 - 1 \text{ km}$.

Jiným přiblížením může být model, který definoval Grábner v [9], zde je zajímavý pohled na problematiku z úhlu mikrofyziky mlhy, vycházející z definice rozložení částic v závislosti na obsahu vody ve vzduchu (LWC).

$$\gamma_{\lambda} = \frac{10 \log_{10} T_{th}}{V(km)} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^s \quad (4.16)$$

kde $s = (\tanh(p_1(w+p_4))-1)+\exp(p_3(w+p_5))$ je funkce efektivního poloměru mlžných kapiček, pro komplexnost odkáží na zdroj [9], pro získání parametrů p_1 až p_5 .

Poslední modifikací vztahu podle Kruse, zlepšující závislost na vlnové délce v celém rozsahu dohledností představil M. Ijaz v [36]:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{10 \log_{10} T_{th}}{V(km)} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-q} \quad (4.17)$$

kde q je rozděleno pro mlhu a kouř:

$$q(\lambda) = \begin{cases} 0,1428\lambda - 0,0947 & \text{mlha} \\ 0,8467\lambda - 0,5212 & \text{kouř} \end{cases} \quad (4.18)$$

Tento model vychází z našich pokusů v laboratoři s možností kontrolovat podmínky v reálném čase.

4.5 Speciální vlivy na OBS

4.5.1 Atmosférická elektřina

V atmosféře vzniká elektrický náboj mezi oblaky nebo mezi oblaky a zemským povrchem. Velikost takto generovaného napětí lze odhadnout v rozmezí 20 kV až 100 MV. Při vzniku bleskového výboje prochází vzniklým plasmovým kanálem proud cca 35 kA. Teplota plasmy může dosáhnout teploty 28000 °K [22].

Blesk emituje elektromagnetické rušení v pásmu od dlouhých vln po velmi krátké vlnové délky, např.: VHF, UHF, IR, optické vlnové délky. Typická délka bleskového záblesku se nachází mezi 20 až 130 ms. OBS pracující s přenosovou rychlostí 1Gb/s, oslepený po dobu 100 ms nepřijme 10^8 bitů (přibližně 12,5 MBytu). Taková ztráta dat, může představovat problém i pro OBS zabezpečený dobrým kódováním.

4.5.2 Sluneční záření

Sluneční záření nesnižuje sílu signálu OBS, ale uplatňuje se v opačné části detekční charakteristiky. Tento silný zdroj světla v širokém spektru vlnových délek, vytváří šum. Tak

sluneční záření snižuje odstup signálu od šumu a tím i rezervu spoje na únik. Sluneční záření lze modelovat jako záření černého tělesa modifikovaného absorpcí atmosféry. Vliv slunečního šumu lze minimalizovat vhodnými optickými filtry, ale nelze ho úplně vyloučit.

4.5.3 Pohyb budov

OBS jsou z pravidla umísťovány na vyvýšených místech, ať jsou to vysoké budovy či telekomunikační věže. Důvodem pro toto umístění je nutnost dodržení podmínek spoje na přímou viditelnost a maximalizace území, které lze pokrýt z jednoho místa. Nicméně tyto objekty nejsou absolutně tuhé. Změny povětrnostních podmínek způsobují výchylky objektů. Nejvýraznějším vlivem je vítr, který vychyluje konstrukci ve směru větru, v závislosti na jeho síle a velikosti plochy konstrukce. Jestliže pak poryv větru zeslábně, uvolní se napětí v konstrukci, které se projeví jejím návratem do klidové polohy. Vítr, ale není jediným faktorem působícím na budovy, například i Slunce má nezanedbatelný vliv na výchylku budovy. Jestliže dochází k ohřevu jedné strany budovy slunečním zářením, zatím co opačná strana je v relativně chladném stínu, dochází k tepelnému rozpínání materiálu jedné strany budovy. Při těchto podmínkách vzniká tepelný ohyb budovy. Výše popsané příklady vedou ke změně pozice vrcholových partií budovy a tím i k rozladění prostorových parametrů optického spoje.

Moderní OBS řeší tuto problematiku systémem nazývaný autotracking, kdy se jedná o využití zpětné vazby sledující parametry optického signálu (intenzita, pozice). Ta na základě vyhodnocení podmínek optického signálu upravuje vlastnosti optické soustavy.

4.5.4 Písek

V oblastech Země s převládajícím suchým klimatem, je nutné mezi faktory působící na OBS počítat i poletující písek. Částice písku, respektive jednotlivá zrníčka mohou nabývat různých velikostí v závislosti na síle větru, který ho unáší. Od mikroskopických (desítky μm) zrn unášených mírním větrem, až po velká zrna unášená písečnou bouří. O tom že písek je seriózní problém pro OBS svědčí iniciativa probíhající na Northumbria university, která si klade za cíl postavit testovací komoru sloužící k výzkumu útlumu způsobeného pískem.

5 VLIV VĚTRNÝCH TURBULENCÍ NA OBS

„Vítr je pohyb částic vzduchu vzhledem k zemskému povrchu v daném časovém okamžiku. Částicemi rozumíme tak velký soubor molekul, který lze považovat za homogenní objem vzduchu. Vítr v libovolném bodě pozorování lze charakterizovat: směrem, rychlostí a nárazovostí větru (okamžitá odchylka rychlosti větru o 5 a více m/s).“ [37]

5.1 Turbulence

Proudění vzduchu, jak můžeme nazvat vítr, je v přízemní vrstvě troposféry ovlivněno vlastnostmi terénu, případně různými překážkami. To mohou být lidské stavby, stromy atd. Ty zapříčiňují různé způsoby obtékání vzduchu kolem překážek. V souladu s teoriemi proudění v uzavřeném prostoru (potrubí, aerodynamický tunel), vznikají v otevřeném prostoru za překážkami víry (turbulence). Tento typ turbulence se nazývá mechanická turbulence.

Mechanická turbulence vzniká z laminárního proudění vlivem působení objektů v cestě proudění, nicméně laminární proudění může přejít do turbulentního i vlivem rychlosti proudění a vnitřního tření proudícího média (vzduchu). Parametr popisující stav proudění i přechod z laminárního k turbulentnímu proudění se nazývá Reynoldsovo číslo Re .

$$Re = \frac{uL}{v_m} \quad (5.1)$$

kde u je rychlost větru, L je „charakteristický rozměr“ a v_m kinematická viskozita definovaná (5.2) jako poměr dynamické viskozity μ a hustoty média ρ .

$$v_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.2)$$

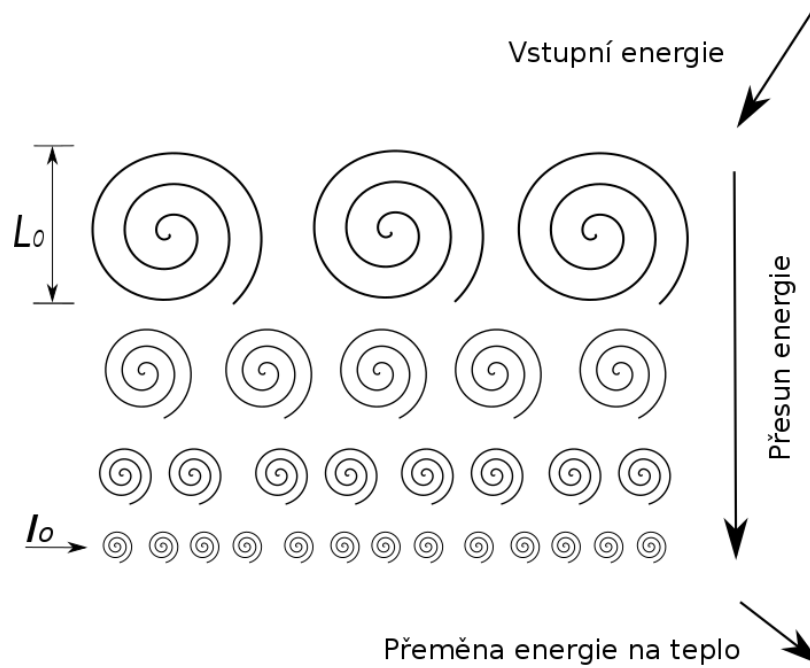
Často se vyskytují i termické turbulence, které vznikají interakcí povrchu země ohřívaného Sluncem s chladnějším vzduchem nad zemí. Tak vznikají nestabilní stoupající vzduchové víry s různými indexy lomu. V rozměrech pohybujících se od řádu mm (malých rozměrů l_0) až po řády metrů (velkých rozměrů L_0). Velikosti vírů se pohybují od velikosti L_0 nazývané vnější rozměr a postupně se zmenšující na velikost l_0 nazývané vnitřní rozměr. Rozsah mezi l_0 a L_0 je označován jako inerciální rozsah (inertial range) $l_0 < l < L_0$, zde dochází k přenosu energie velkých vírů na menší a menší, až postupně dosáhnou hranice l_0 Obrázek 16. Víry velikost $l < l_0$ náleží intervalu rozptýlení, kde dochází k přeměně energie víru na teplo.

Změny fluktuací turbulencí lze popsat strukturním indexem lomu C_n^2 [38]:

$$C_n^2 r^{\frac{2}{3}} = \langle (n_1(r_1) - n_2(r_2))^2 \rangle, l_0 \ll r \ll L_0 \quad (5.3)$$

$$C_n^2 l_0^{-4/3} r^2 = \langle (n_1(r_1) - n_2(r_2))^2 \rangle, r \ll l_0 \quad (5.4)$$

Vztah (5.3) definuje strukturní funkci, která je závislá na vzdálenosti R mezi body r_1 a r_2 . Okamžité hodnoty indexů lomu označujeme $n(r_1)$, $n(r_2)$ v bodech r_1 a r_2 a v daném čase, ostré závorky značí dlouhodobý průměr (ensemble average).



Obrázek 16 - Přeměna energie vírů

Strukturní index lomu nabývá hodnot, od $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ pro slabé turbulence až po $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ pro silné turbulence. C_n^2 se mění s nadmořskou výškou, pro spoje v horizontálním směru lze však uvažovat jako konstantní po celé délce spoje.

Strukturní index lomu C_n^2 lze také vyčíslit z teplotního měření v různých bodech (r_1, r_2) , v podobě teplotního strukturního koeficientu C_T^2 [38]

$$C_T^2 r^{\frac{2}{3}} = \langle (T_1(r_1) - T_2(r_2))^2 \rangle, l_0 \ll r \ll L_0 \quad (5.5)$$

$$C_T^2 l_0^{-4/3} r^2 = \langle (T_1(r_1) - T_2(r_2))^2 \rangle, r \ll l_0 \quad (5.6)$$

Následný přepočet na Strukturní index lomu lze provést pro suchý vzduch následujícím vztahem dle [39]:

$$C_n = \frac{10^{-6}}{T} \left(\frac{77,6P_{atm}}{T} + \frac{0,584P_{atm}}{T\lambda^2} \right) C_T \quad (5.7)$$

kde P_{atm} je atmosférický tlak v milibarech, T je teplota v Kelvinech.

5.2 Index lomu

Ze zkoumání turbulentního proudění vyplývá fakt, že v oblasti turbulence je změněný index lomu vzduchu. Změna se projevuje především změnou teploty, která inicializuje turbulence u termických turbulencí a zároveň indikuje přeměnu pohybové energie v turbulenci na teplo. Proto je možné stanovovat aktuální hodnotu indexu lomu vzduchu z měření meteorologických parametrů: teplota, relativní vlhkost a atmosférický tlak.

Index lomu atmosféry je komplexní problém, který je závislý na vlnové délce záření, ale také mění svojí hodnotu s například s koncentrací CO_2 . Rovnici pro výpočet indexu lomu definoval Edlén pro vlnové délky 350 – 650 nm [40], tato rovnice prošla postupem času upřesněními [41], nejpřesnější je v oblasti okolo 20 °C. Oproti tomu Ciddor definoval svou rovnici [42] v rozsahu vlnových délek 300 – 1700 nm a zlepšil výsledky v oblasti vysoké relativní vlhkosti a vyšších teplot. Obě formulace jsou poměrně komplexní pro výpočet. V [41] je také definována zjednodušená rovnice indexu lomu, která slouží k rychlým výpočtům:

$$n = 1 + \frac{7,86 \cdot 10^{-4}p}{(273 + t)} - 1,5 \cdot 10^{-11}RH(t^2 + 160) \quad (5.8)$$

kde p je atmosférický tlak v kPa, RH relativní vlhkost (0-100) % a t je teplota °C. Rovnice je platná s nejistotou $1,7 \cdot 10^{-7}$, při podmínkách viz Tabulka 4 a vlnové délce 633 nm.

Tabulka 4 - Oblast přesnosti rovnice 3.8

t	0	35	°C
p	50	120	kPa
RH	0	100	%
CO2	300	600	μmol/mol

5.3 Vliv turbulencí na optický paprsek

Jak bylo popsáno výše, turbulence způsobují lokální změny indexu lomu atmosféry. Tyto změny přispívají k následujícím efektům na optický svazek:

- **Rozšiřování paprsku** – jedná se o dodatečný geometrický rozptyl, který se přidává ke standardnímu rozptylu atmosféry. Má za následek rozšíření optického svazku mimo aperturu přijímače, tím zapříčiní snížení přijímaného výkonu.
- **Odklonění paprsku** – úhlová odchylka optického svazku od přímé trasy OBS, může způsobit vychýlení paprsku mimo přijímač. Je způsobeno turbulence o velkém průměru.
- **Tancování obrazu** – změny uhlu dopadu optického svazku, způsobuje pohyb („tancování“) fokusovaného bodu v rovině zaostření
- **Scintilace paprsku** – změny intenzity uvnitř plochy optického svazku, způsobuje velké náhodné úniky
- **Ztráta prostorové koherence** – schopnost světelného svazku interferovat s prostorově posunutou svojí částí.

6 METODY ZÍSKÁVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT

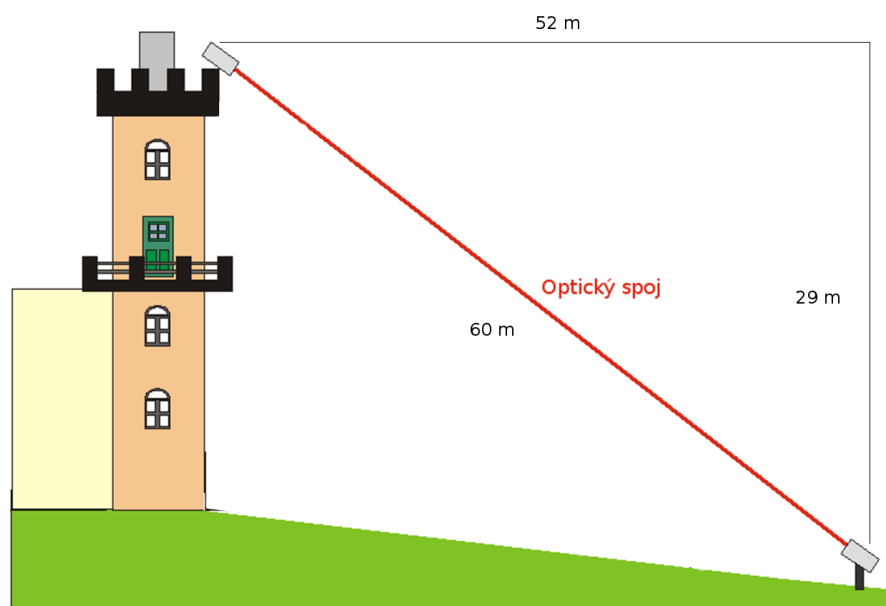
Jak již bylo napsáno, útlum optického spoje ovlivňuje hned několik faktorů, které je nutné kvantifikovat při získávání dat. Existují kombinace, které mohou nastat s větší pravděpodobností, i kombinace, které se vyskytují s velmi malou pravděpodobností. Cílem měření je získat data, vytvořit vhodný model, ten následně ověřit dalším měřením a predikovat vývoj. Také bývá snaha predikovat výskyt extrémních vlivů pro testování a ověření technických vylepšení zařízení. K těmto cílům mohou sloužit experimentální pracoviště nalézající se venku, tak pracoviště laboratorní.

6.1 Charakteristika experimentálního pracoviště

Zde využívané experimentální pracoviště se nachází na hoře Milešovka v Českém středohoří zhruba 70 km severně od Prahy. Hora Milešovka (836 m) na které se pracoviště nachází, je kuželovitého tvaru s výškovým rozdílem 300 m oproti okolnímu terénu. Tyto vlastnosti předurčují pracoviště na vrcholu k měření extrémních hodnot meteorologických veličin, současně je zde možné pozorovat i rychlé změny meteorologických veličin. Proto byl v roce 2009 na meteorologické stanici Milešovka umístěn experimentální optický spoj.

Optický spoj stanovuje útlum v blízkém infračerveném spektru na vlnových délkách 830 nm, 1550 nm. Prostorová orientace spoje je jihovýchodním směrem ze zahrady observatoře na vrchol věže Obrázek 17, délka spoje činí 60 m. Laserové paprsky obou kanálů mají Gaussovo rozdělení. Divergence svazku je v případě kanálu o vlnové délce 830 nm 6 mrad, pro kanál 1550 nm je divergence 12 mrad.

Pracoviště je dále vybaveno celou řadou měřících zařízení, z těch relevantních pro výzkum šíření optického paprsku jsou to dohledoměry, srážkoměry, teploměry, barometr, měřič relativní vlhkosti vzduchu, 3D sonické anemometry. Většina přístrojů se nachází na „zahrádce“ observatoře, kde slouží k trvalému monitorování meteorologických veličin. Některé přístroje jsou však rozmístěny specificky pro potřeby korelace s optickým spojem v blízkosti vysílače a přijímače např. dohledoměr umístěný na věži.



Obrázek 17 - Prostorové uspořádání optického spoje na observatoři Milešovka

Z dlouhodobého pozorování meteorologických parametrů vyplývá vhodnost umístění optického spoje na observatoři, protože se zde objevují časté mlžné události a působí tu i vítr ve velkém procentu času. Průběžně probíhá monitorování a vyhodnocování experimentálních dat z optického spoje a ta jsou korelována s ostatními meteorologickými veličinami.

6.2 Měření na venkovním pracovišti

Jak bylo zmíněno, je na observatoři umístěno velké množství měřících zařízení. Toho s výhodou využijeme v této části, protože metoda měření na observatoři spočívá v nepřetržitém záznamu dat z dostupných zdrojů. Následně pak dochází ke kategorizaci vlivů na sledovaný objekt, v tomto případě zmíněný spoj, respektive na jeho dostupnost. Základní metoda spočívá ve sledování nejvýraznějších vlivů, jejich prozkoumání, kvantifikaci a postup k méně výrazným vlivům, až se stanoví úplný model vlivu na sledovaný objekt.

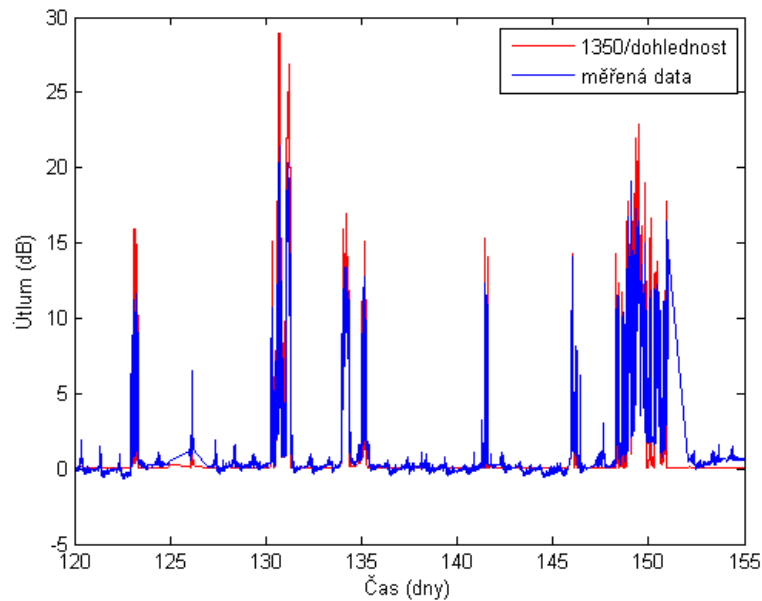
6.2.1 Mlha

Mlha je efekt působící OBS největší ztráty, jak bylo popsáno dříve, jedná se o kombinaci útlumu a rozptylu optického svazku. Při měření nejsme schopni tyto dva efekty rozlišit od sebe, proto měříme ztrátu výkonu na přijímači a tu označujeme jako útlum přijatého signálu.

Takto pojmenovaný útlum A je nejlépe dávat do souvislosti s dohledností V z tohoto důvodu vznikl z našich měření následující vztah:

$$A = \frac{1350}{V} \quad (dB/60m) \quad (6.1)$$

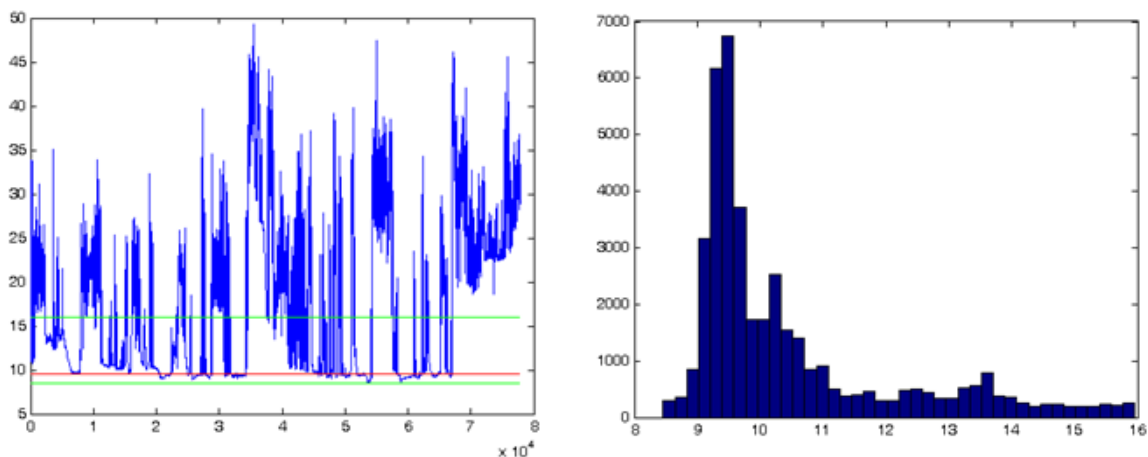
kde číslo 1350 je empiricky získaná hodnota specificky pro spoj na Milešovce, porovnání je vidět na obrázku dole. V tomto případě se jedná o formulku, která slouží k rychlému porovnání dat a rychlou analýzu mlžných událostí.



Obrázek 18 - Porovnání útlumu s odhadem útlumu z dohlednosti (6.1)

Graf (Obrázek 18) vykazuje i záporné hodnoty útlumu, tento efekt je způsoben algoritmem zpracování dat pro analýzu mlžných událostí. Měřený útlum vykazuje fluktuace mezi hodnotami 6 a 8 dB. Pro zpracování mlhy jsem navrhl metodu prahování registrovanou i jako software. Ta spočívá v nalezení hodnoty útlumu, která se následně považuje za nulovou hodnotu. Bez této operace by data i za jasného počasí vykazovala útlum ve výše zmíněném rozsahu. Hledaný „práh“ odpovídá statisticky nejvíce zastoupené hodnotě subintervalu v aktivní zóně hledání Obrázek 19. Aktivní zóna prahování se stanovuje tak, že se nalezne minimální hodnota útlumu a k ní se přičte volitelná hodnota rozsahu hledání prahu.

$$A = A_{\text{měřený}} - \text{práh} \quad (dB) \quad (6.2)$$



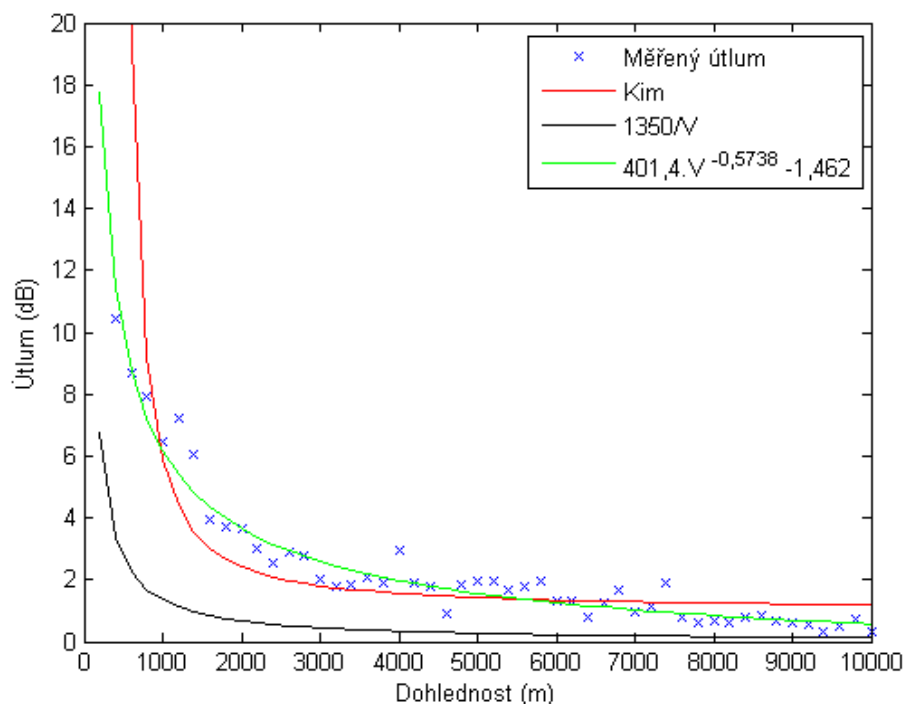
Obrázek 19 - Metoda hledání prahu, vlevo data s nalezeným prahem červeně v aktivní zóně zeleně, vpravo histogram četnosti hodnot v aktivní zóně, rozhodující o prahu

Zmíněný vztah (6.1) pro porovnání měřeného útlumu a dohlednosti nebyl dostatečně přesný. Z toho důvodu jsme provedli regresní analýzu dat za časový úsek jednoho roku. Testovali jsme několik vztahů mezi dohledností a útlumem, výsledkem výběru je nakonec naše formulace rovnice (6.3), která platí v rozsahu dohlednosti 0 – 10 km :

$$A = 401,4V^{-0,5738} - 1,462 \left(\frac{dB}{60m} \right) \quad (6.3)$$

kde A je útlum na 60 m délky spoje a V je dohlednost v metrech. Limit dohlednosti je dán podstatou zpracování dat a především prahování, aby se vyloučila chyba určení útlumu pro jasnou oblohu.

Porovnání předložených modelů pro závislost útlumu na dohlednosti spoje dlouhého 60 m, pracujícího na vlnové délce 830 nm předkládá Obrázek 20. Z grafu je vidět, že vztah (6.1) (černě) je velmi přibližně stanovený, není vhodné ho tedy používat jinak, než pro rychlé porovnání pro svou jednoduchost. Vztah (6.3) (zeleně) naproti tomu vykazuje velmi dobrou shodu s měřenými daty v oblasti použitelnosti dohledností 0 - 10 km. Kimův vztah (červeně) vykazuje velmi dobrou shodu s daty v oblasti dohledností 3 - 8 km, nicméně se rozchází s měřením pro dohlednosti menší než 3 km.

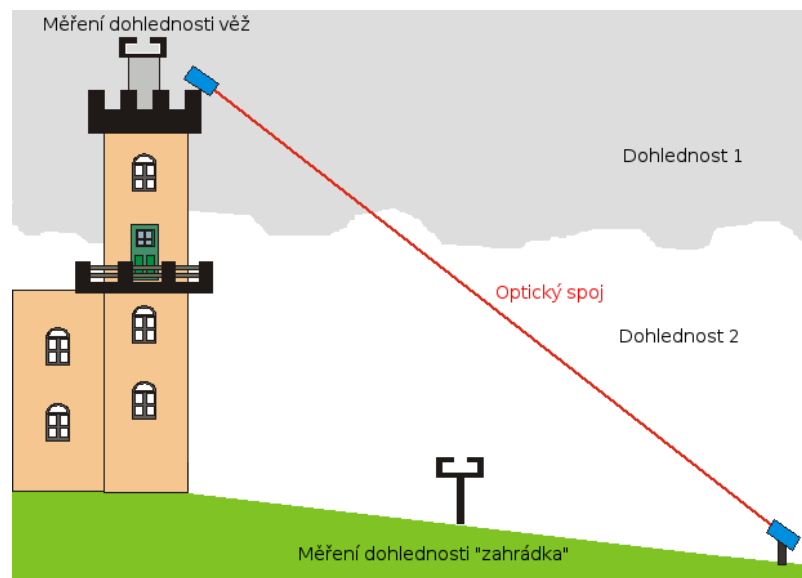


Obrázek 20 - Porovnání vztahů mezi dohledností a útlumem spoje (délka 60 m, $\lambda = 830$ nm) na datech za 1 rok

6.2.2 Nízká oblačnost

Poloha observatoře umožňuje poměrně snadno pozorovat změny počasí. Tato vlastnost má i své nevýhody, např. v podobě nízké oblačnosti Obrázek 21, která se tu vyskytuje a je zapotřebí ji oddělit od mlžných událostí. Nehomogenita mlhy byla potvrzena Brázdou [43]. Zde prezentovaný přístup hledá aktivně v naměřených datech situace, kdy došlo k nehomogenitě mlhy. Přibližný model využívá předpokladu nízké oblačnosti, tzn. Výskyt dvou různých dohledností oddělených „ostrým“ přechodem. Následně je možné vyčíslit výšku teoretického rozhraní a stanovit, v jaké vzdálenosti na trase optického spoje se vyskytuje rozhraní dvou dohledností.

Celý proces výpočtu výšky rozhraní a tedy i přítomnosti nehomogenity v mlze využívá dvou dohledoměrů. První je umístěn na zahrádce observatoře poblíž vysílače, zatím co druhý dohledoměr se nachází na věži u přijímače. Do výpočtu také vstupují data o útlumu optického spoje na vlnové délce 1550 nm.



Obrázek 21 - Schématické znázornění nízké oblačnosti

Při konstrukci algoritmu byly zkoušeny dostupné modely, bohužel se ukázalo, že jsou obecné a nevystihují dobře lokální podmínky. Z toho důvodu jsme vytvořili model pro koeficient útlumu (6.4), speciálně k použití ve výpočtu, který vychází z naměřených lokálních dat za období 8 měsíců:

$$\gamma = ae^{bV} + ce^{dV} \left(\frac{dB}{km} \right) \quad (6.4)$$

kde koeficienty a, b, c, d jsou uvedeny v tabulce:

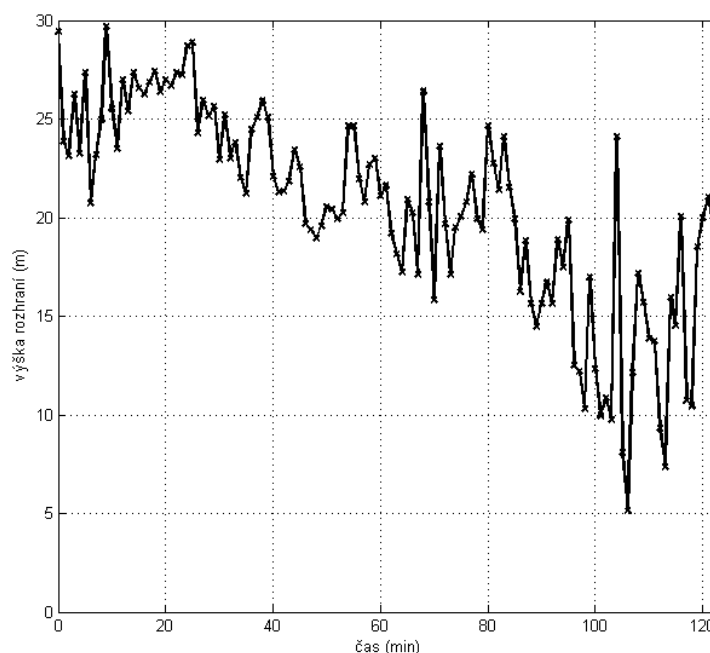
Tabulka 5 - Seznam koeficientů modelu 4.4

Koeficient	Hodnota
a	141.8
b	-0.01272
c	38.43
d	-0.0006256

Jestliže využijeme logaritmického měřítka pro stanovení útlumu spoje, pak bude výsledný útlum spoje (OBS) roven součtu příspěvků útlumu vrstvy 1 (dohlednost 1) a vrstvy 2 (dohlednost 2). Z měření máme dán celkový útlum a koncové body s dílčími útlumy, tím se problém převede na hledání průsečíku dvou přímek s různou směrnici. Pozice průsečíku udává, jak výšku rozhraní nad zemí, tak i vzdálenost rozhraní na trase spoje.

Výsledky ukazují, že v naměřených datech lze nalézt důkazy o přítomnosti nízké oblačnosti. Zároveň je také patrné, že tyto události jsou krátkodobého charakteru v řádech desítek minut. Délka trvání události je dána vlastnostmi rozhraní nízké oblačnosti, které není pevně zakotveno ve specifické výšce a při pohyby oblaků se mění jeho poloha. Nejdelší

naměřená událost nízké oblačnosti trvala celkem 123 minut a její průměrná výška rozhraní se nacházela v 20,5 metrech nad zemí Obrázek 22.



Obrázek 22 - Průběh vývoje výšky rozhraní nízké oblačnosti trvající 123 min

6.2.3 Vliv větru

Předcházející kapitoly se zabývaly vlivem mlhy na optický spoj, protože její vliv má největší impakt na fungování spoje. Během měření a vyhodnocování dat se objevují i poměrně velké fluktuace přijímaného signálu i v oblasti vysoké dohlednosti $V > 10$ km. Z tohoto důvodu se začalo hledat vysvětlení i jinde. Jedním z podezřelých meteorologických vlivů byl déšť, ten může způsobit útlum i v případě, že je detekována vysoká dohlednost. Po odfiltrování dešťových událostí však i nadále zůstávají patrné fluktuace přijímaného signálu. Podezření padlo tedy na vítr z důvodu velké větrné aktivity na observatoři.

S výhodou byl využit nainstalovaný sonický 3D anemometr, který umožňuje měřit složky rychlosti větru ve všech třech osách x, y, z. Z měření je možné vyvodit mnoho parametrů větru, ty vybrané parametry z [44], jsou uvedeny dále

Horizontální rychlost větru:

$$g = \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (6.5)$$

3D rychlost větru:

$$g3D = \sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)} \quad (6.6)$$

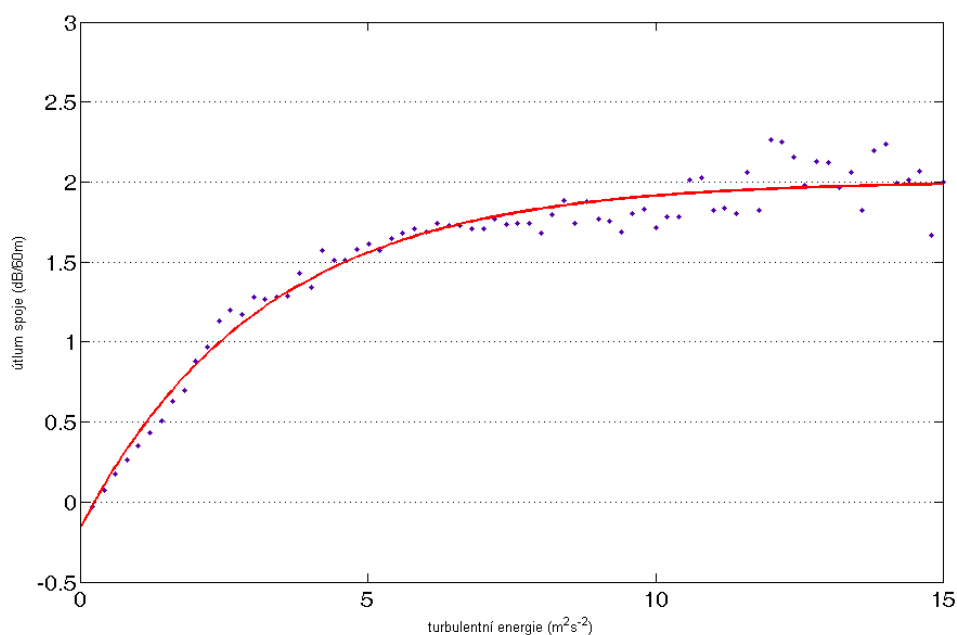
Turbulentní energie:

$$E_T = 0,5 \frac{1}{N} \sum ((u - \bar{u}) + (v - \bar{v}) + (w - \bar{w})) \quad (6.7)$$

u , v a w jsou x-, y- a z- osové složky vektoru rychlosti větru v , složky označené pruhem jsou střední hodnoty za integrační interval, N je počet vzorků za integrační interval.

Porovnáním dat vypočtené turbulentní energie a útlumu spoje na vlnové délce 1550 nm za období jednoho roku. Vznikl graf průměrných hodnot vlivu turbulentní energie na útlum Obrázek 23 (modré body v grafu). Proložením numerickou aproximací jsme zjistili následující závislost:

$$A = 2,112 - 2,213e^{-0,2867E_T} \quad (6.8)$$



Obrázek 23 - Závislost útlumu spoje na turbulentní energii (modře), červeně je zobrazena numerická závislost (6.8)

Ze zjištěné závislosti (6.8) je vidět poměrně rychlý růst útlumu se vzrůstající turbulentní energií větru do velikosti $6 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, od této velikosti turbulentní energie vykazuje útlum již jen malý přírůstek. Otázkou zůstává, zda zpomalení růstu útlumu s růstem turbulentní energie je způsobeno fyzikálními vlastnostmi vzduchu nebo zda se vlivy vyšší turbulentní energie nemohou uplatnit na délce spoje 60 m.

6.2.4 Index lomu vzduchu

Po nalezení závislosti mezi útlumem optického spoje a turbulentní energii větru, vyvstala otázka, čím je fyzikálně způsoben pozorovaný útlum. Odpověď byla nalezena v teorii turbulentního proudění. Proudí-li látka turbulentně, dochází k vytváření vírů, které přeměňují energii pohybu na teplo, čímž vznikají kapsy vyplněné látkou o jiné teplotě. Zároveň změní-li se teplota vzduchu, dochází i ke změně indexu lomu. Takto vzniklé kapsy o jiné teplotě mají i jiný index lomu. Dochází tedy k vytváření velkého množství různě velkých čoček. Ty stojí v cestě přímému šíření optického signálu a rozptylují ho, nebo dokonce úplně vychylují z apertury přijímače.

Rozhodl jsem se tedy pro stavbu zařízení na měření indexu lomu vzduchu z meteorologických veličin. Druhá verze tohoto zařízení je popsána v kapitole 7. Princip měření spočívá v možnosti vypočítat index lomu vzduchu z meteorologických veličin teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku. K prvnímu ověření funkčnosti byl použit vztah pro výpočet rádiového indexu lomu N dle doporučení ITU-R [45] :

$$N = pF_1(t) + RHF_2(t) \quad (6.9)$$

p je tlak vzduchu v hPa, RH je relativní vlhkost, t je teplota ve °C

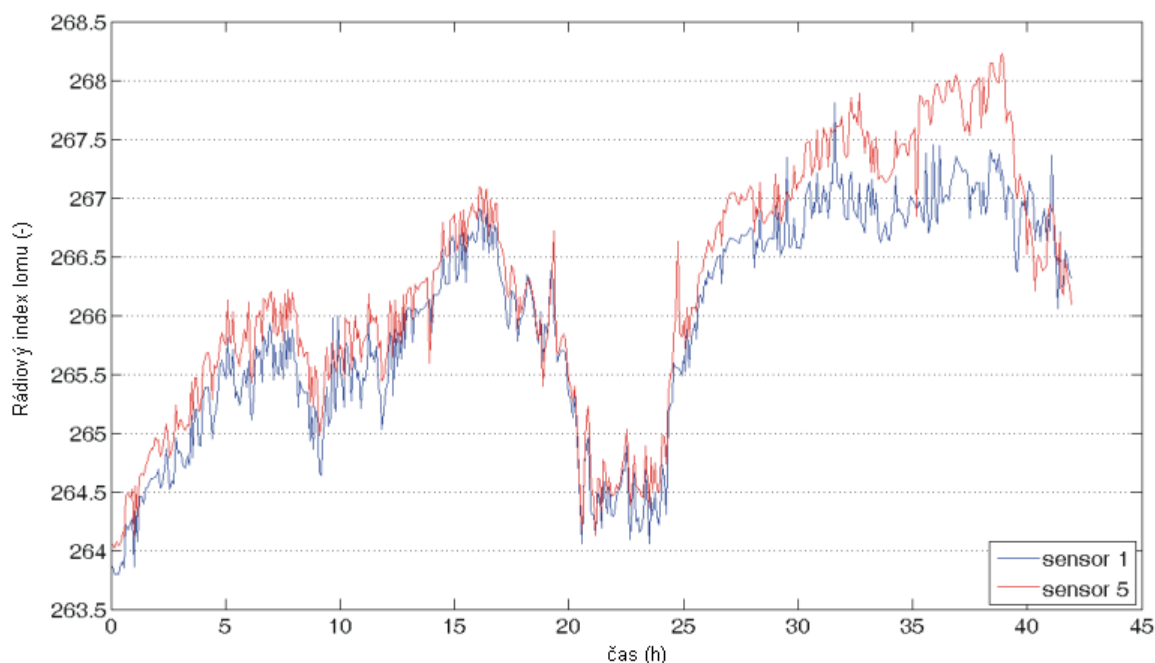
$$F_1(t) = \frac{77,6}{t + 273,16} \quad (6.10)$$

$$F_2(t) = 29,4 \frac{e^{\frac{17,502t}{t+240,97}}}{t + 273,16} F_1(t) \quad (6.11)$$

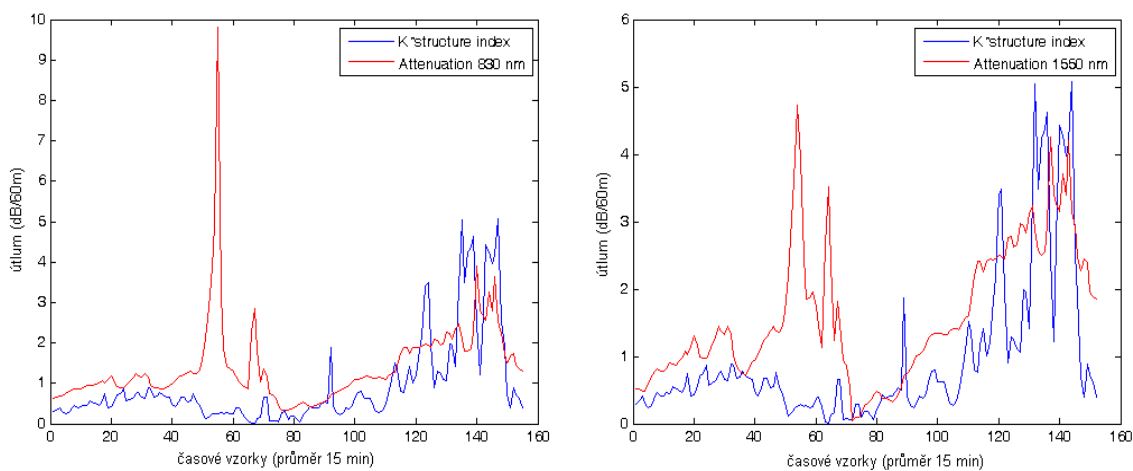
$$N = (n - 1)10^6 \quad (6.12)$$

n je index lomu vzduchu.

Výsledky výpočtu radiového indexu lomu pro 2 body, jsou zobrazeny v grafu Obrázek 24. Modrá čára prezentuje čidlo číslo jedna umístěné na věži, červeně je zobrazeno čidlo číslo pět vzdálené 20 m od prvního. Výsledky zobrazují pokles indexu lomu s výškou. Naměřené indexy lomu byly dosazeny do rovnice (5.3) pro výpočet strukturního indexu C_n^2



Obrázek 24 - Rádiový index lomu vypočtený pro dva body vzdálené 20 m



Obrázek 25 - Porovnání strukturního indexu s útlumem spoje, vlevo vlnová délka 830 nm, vpravo vlnová délka 1550 nm

Výsledky změřeného strukturního indexu v porovnání s útlumy obou kanálů optického spoje vykazují velmi dobrou shodu obrázků nahoře. Výsledky korelace ukazují shodu 35,97 % pro vlnovou délku 830 a 58 % u vlnové délky 1550 nm.

6.3 Měření v laboratoři

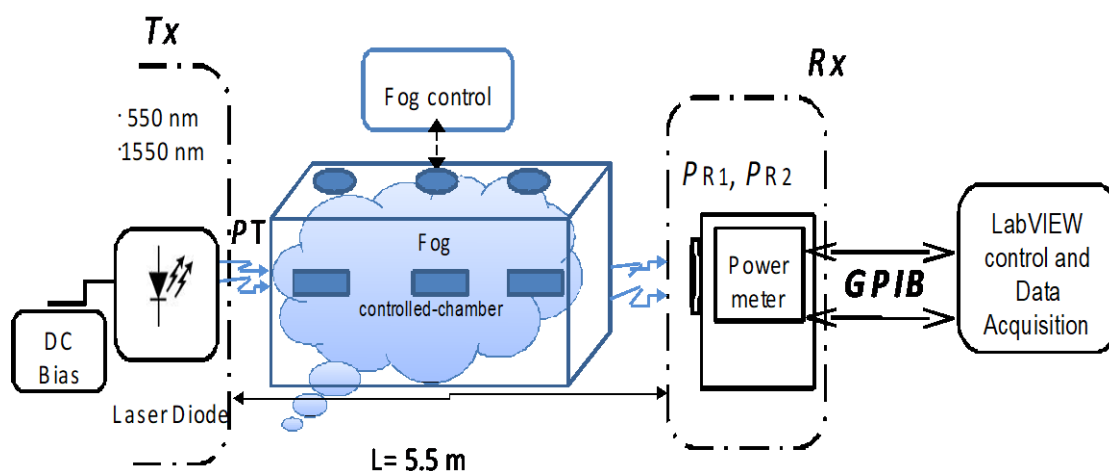
Laboratorní prostředí skýtá zajímavé možnosti k výzkumu optických spojů. V tomto prostředí odpadají problémy spojené s odloučeností pracoviště od vývoje nebo výroby. Pokud dojde k nepředvídatelnému problému např: s měřícím zařízením, řeší se tyto nesnáze daleko lépe než v místě venkovního pracoviště, zpravidla umístěného mimo civilizaci. Další výhodou je i možnost využít všechny přístroje dostupné v laboratoři.

Na opačné straně, ale nejsou jen výhody v laboratorním prostředí. Jsme zde omezeni možnostmi, jakými vytváříme vlivy, které následně pozorujeme.

6.3.1 Laboratorní pracoviště

Laboratorní pracoviště umožňující zkoumání vlivů atmosféry se nachází na Northumbria University v Newcastleu (Anglie). Měl jsem to štěstí pracovat na tomto pracovišti během své pětiměsíční stáže. Také jsem mohl přispět k vylepšení pracoviště svými nápady, za co jsem byl pracovištěm oceněn a také si toho velmi vážím.

Testovací komora, ve které se veškeré experimenty odehrávají, je plastový box z průhledného materiálu dlouhý 5,5 m. Obrázek 27. Tento box je vybaven několika uzavíratelnými prostupy, sloužícími k nastavení vnitřního vybavení. Vnitřní vybavení se stává z ventilátorů a topných těles pro tvorbu větrných a tepelných turbulencí, bohužel bez možnosti regulace.



Obrázek 26 - Schématické znázornění laboratorní testovací komory optických spojů (DC Bias – stejnosměrné předpětí, Laser diode – laserová dioda, Fog control – regulace mlhy, Fog – mlha, controlled chamber – testovací komora, Power meter – měřič výkonu, LabVIEW control and Data Acquisition – LabVIEW řízení a sběr dat)



Obrázek 27 - Laboratorní testovací komora OBS Northumbria University

Obrázek 26 schematicky znázorňuje uspořádání funkčních prvků komory pro testování. Tato verze schématu je originál z Northumbria university. Při popisu zleva doprava vidíme část Tx – vysílač složenou ze stejnosměrného předpětí a zdroje pro laserovou diodu. Uvedené vlnové délky jsou dvě, vlnová délka 550 nm je využívána pro měření dohlednosti během pokusu v komoře, druhá libovolná vlnová délka zde 1550 nm je určena k pokusu (měření útlumu). Následující částí je vlastní komora o délce 5,5 m s možností kontrolovat mlhu uvnitř. Finální část Rx – přijímač, sestávající se z dvou optických měřičů výkonu propojených sběrníci GPIB k ovládacímu PC s programovým vybavením LabView. Ačkoliv bylo možné provádět i měření manuálně, byla zvolena možnost osvojit si znalost LabView na úrovni pro ovládání měřicího zařízení.

Metodika měření je nejlépe zobrazena ve vývojovém diagramu Obrázek 28. Měření může začít po nastavení všech mechanických a elektronických prvků určujících parametry měření (zaměření spoje, proud laserovou diodou, ...). Druhým krokem je stanovení maximálního přijímaného výkonu měřeného spoje i měřiče dohlednosti. Následuje pumpování mlhy do komory a její rozprostření, tak aby byla v celém objemu pokud možno rozptýlená homogenně, to je velmi důležité pro získání správných výsledků. V tomto bodě se část používá ventilátor k promíchání obsahu komory. Pak již následuje cyklické zapisování hodnot řízené počítačem, s vyhodnocením úrovně dohlednosti, při které se má měření ukončit.



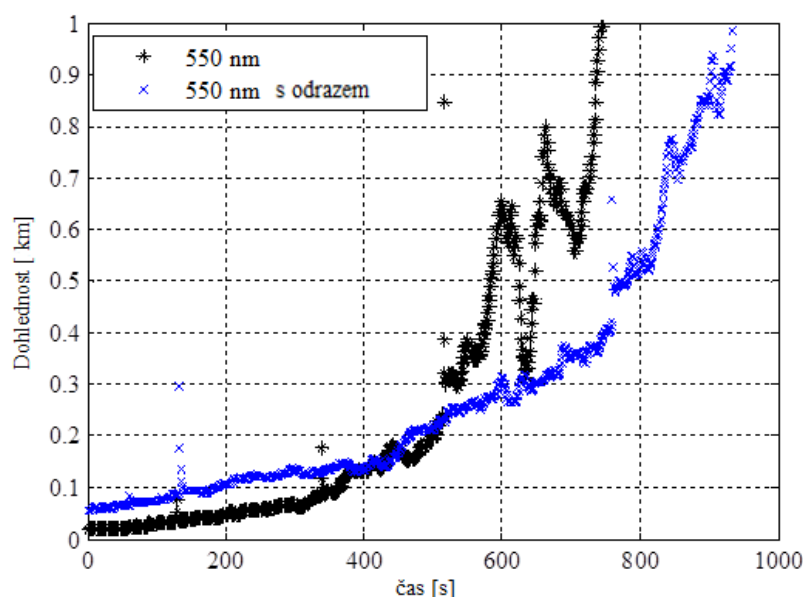
Obrázek 28 - Vývojový diagram měření útlumu v komoře

6.3.2 Měření dohlednosti

Velmi důležitým prvkem pro měření útlumu je stanovit správně dohlednost uvnitř komory, aby naměřená data odpovídala skutečnosti. Dohlednost v komoře stanovujeme za pomoci Beer-Lambertova zákona (4.1), odkud vyčíslíme koeficient útlumu γ definovaný (4.2), který v sobě zahrnuje absorpci i rozptyl. Následně dosadíme koeficient útlumu γ do Kimova vzorce bez frekvenční závislosti (4.12), toto můžeme udělat z důvodu měření na $\lambda = 550$ nm. Vlnová délka 550 nm odpovídá nejvyšší spektrální citlivosti lidského oka a tím jsme splnili podmínku prahu T_{th} z Kosmiderova zákona.

Vývoj měřené dohlednosti je vidět zde: Obrázek 29, černý průběh zobrazují vývoj dohlednosti při přímém měření přes délku (5,5 m) komory. Jak je vidět v oblasti dohlednosti okolo 450 m začíná měřená hodnota oscilovat, tento efekt se velmi nevhodně projevuje do výsledků výkonu měřeného spoje. Příčinou kolísání signálu bylo přepínání citlivosti přístroje, který měří výkon zeleného laseru. Řešením je využít citlivosti přístroje pod hranicí změny rozsahu. Toho bylo docíleno zdvojnásobením optické dráhy (11 m), jež vedla k nárůstu

měřeného útlumu (modrý průběh). Současně došlo i ke zvýšení rozlišení u dohlednosti blízko hodnoty 1 km.



Obrázek 29 - Vývoj dohlednosti v komoře s časem

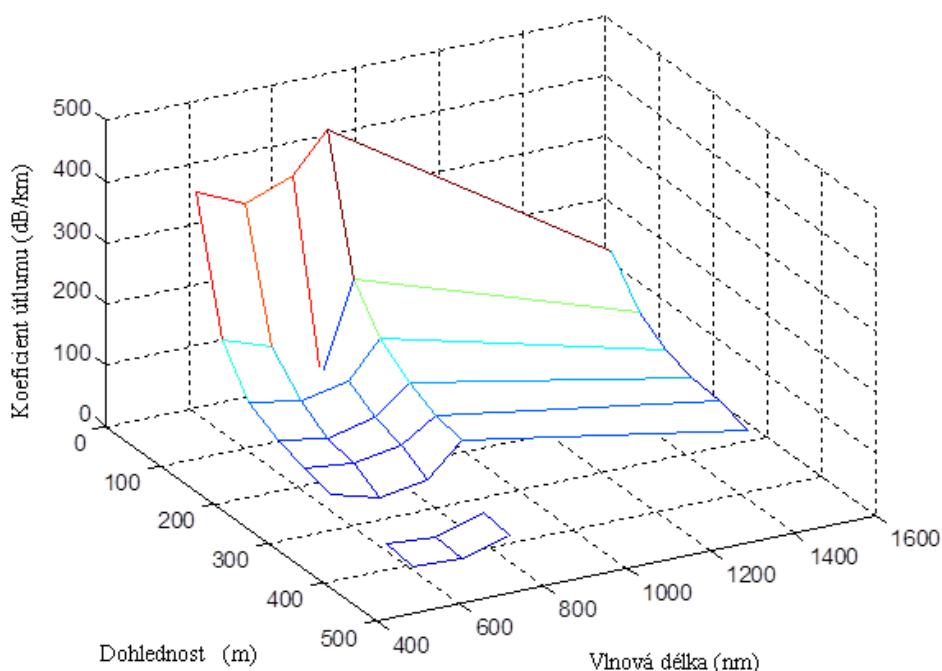
6.3.3 Tvorba mlhy v laboratoři

Mlha, jak již bylo zmíněno, je směs vzduchu a vodních kapiček velmi malých rozměrů [33]. V laboratoři je tvorba mlhy zajímavým problémem, který byl řešen následujícími způsoby:

- **Glycerínový generátor kouře** - zařízení známé z hudebních produkcí. Vytváří mlhu, nebo lépe kouř odpařováním speciální tekutiny na bázi glycerínu. Značnou výhodou pro laboratorní použití je délka mlžné události až do 30 min s velmi pozvolným průběhem změny útlumu. Další velmi značná výhoda je fakt, že neobsahuje vodu, tzn., nezvyšuje vlhkost v laboratoři a nehrozí poškození přístrojů vodou.
- **Vodní mlha** – Vytváření mlhy z horké páry. Pára po vpravení do prostoru testovací komory začne sama kondenzovat a vytvářet mlhu. Mlha produkovaná tímto způsobem velmi dobře napodobuje svým složením reálnou mlhu. Doba trvání jedné mlžné události byla cca 10 min a podmínky se velmi rychle měnily, proto bylo nutné zaznamenávat data o dohlednosti i o měřeném spoji s vysokou frekvencí.

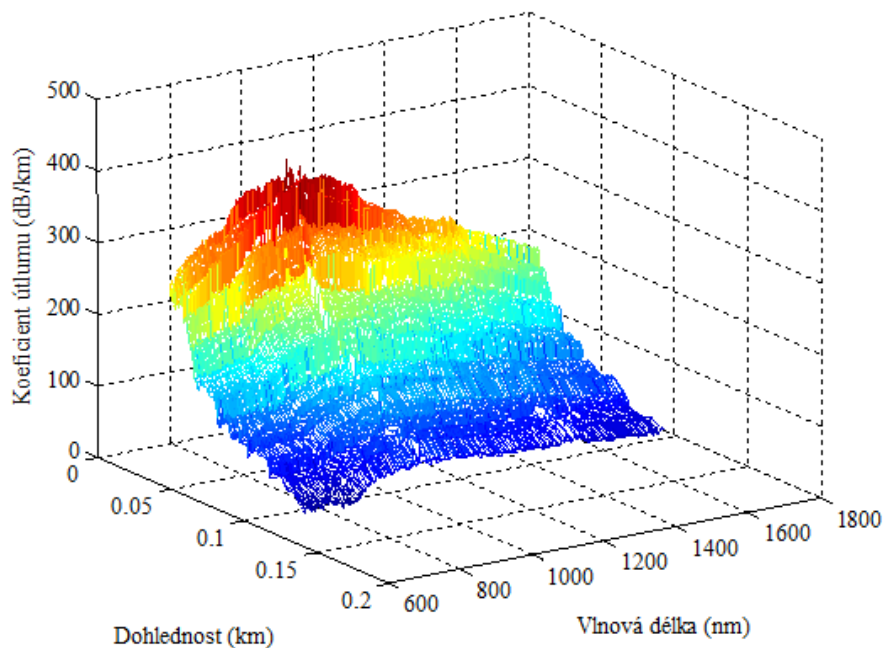
Glycerinový kouř jako mlha

Výsledky, které jsme naměřeni v Glycerinovém kouři na pomoci jednotlivých zdrojů záření (laser, LED) Obrázek 30. Zde je patrná nízká hodnota koeficientu útlumu v oblasti NIR, především na měřené vlnové délce 1550 nm, naopak největší hodnota útlumu je naměřena na vlnové délce 865 nm. Ve viditelné části spektra 550 – 700 nm je velikost útlumu proměnlivá nedosahuje, však tak výrazných hodnot jako zmíněné dvě vlnové délky. Slabinou toho přístupu je stanovení hodnoty útlumu pouze na měřených vlnových délkách a nutnost opatřit zdroje záření v oblasti zájmu měření, oblast 865 – 1550 nm.



Obrázek 30 - Závislost koeficientu útlumu na vlnové délce a dohlednosti pro glycerinový kouř

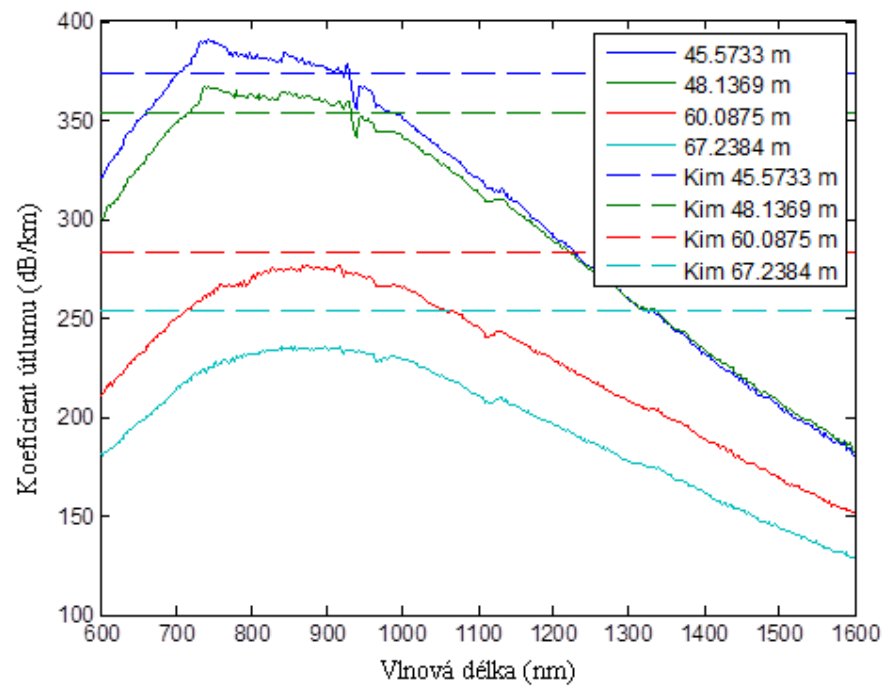
Nedostatek předchozí metody, v podobě potřeby velkého množství zdrojů k proměření spektrální charakteristiky odstranila mnou vyvinutá metoda pro měření útlumu v celém rozsahu vlnových délek 600 – 1600 nm. Nová metoda využívá širokospektrálního zdroje optického záření k buzení přenosového prostředí. Na druhé straně je jako přijímač zařazení optický spektrometr s uvedeným rozsahem vlnových délek, tento přístroj zaručuje rozlišení vlnových délek 2,4 nm v celém měřeném spektru. Vzhledem k rychlosti skenování spektrometru, bylo zapotřebí provést adekvátní kontrolu měření dohlednosti během skenování a případně vhodně kompenzovat změnu dohlednosti.



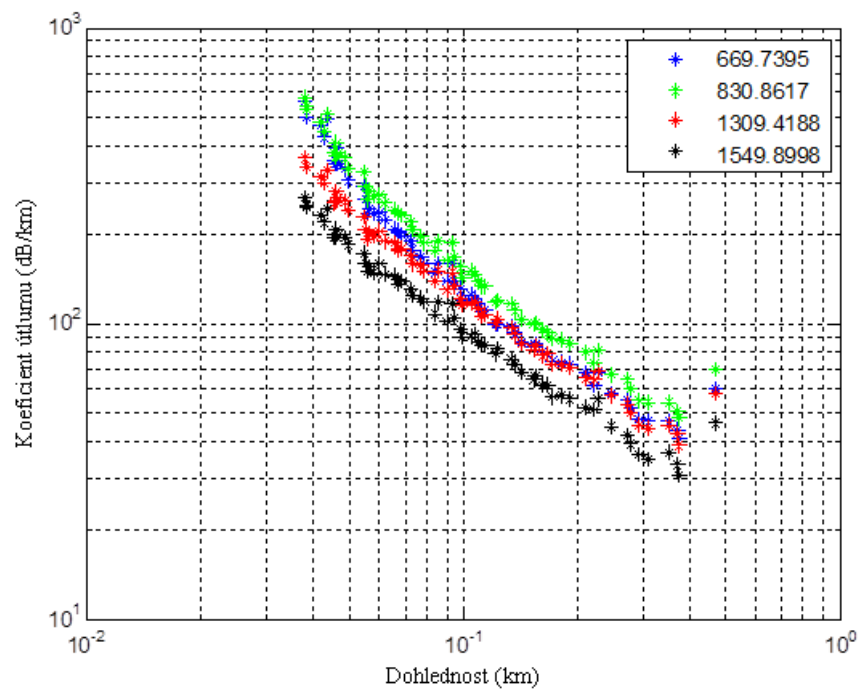
Obrázek 31 - Výsledek měření v celém spektru 600 – 1600 nm s rozlišením 2,4 nm (glycerinový kouř)

Obrázek 31 zobrazuje výsledek měření glycerinového kouře v celém rozsahu vlnových délek. Při porovnání měření na jednotlivých vlnových délkách a v celém spektru, vykazuje výsledky stejný charakter spektra, což je zapříčiněno vlastní spektrální charakteristikou glycerinového kouře. Oba výsledky potvrzují správnost měření. Tento typ útlumového prostředí pro měřicí komoru dosahuje maxima útlumu v oblasti okolo vlnové délky 900 nm směrem k delším vlnám (1600 nm) dochází skoro k lineárnímu poklesu útlumu. K potvrzení vlastností útlumového prostředí bylo nutné vybrat vhodný model k porovnání. Vzhledem k velké podobnosti dostupných modelů útlumu jsme vybrali pro porovnání pouze tu nejjednodušší variantu v podobě Kimova vztahu. Graf Obrázek 32 zobrazuje průběhy koeficientu útlumu v oblasti dohledností do 100 m, v této oblasti je Kimův vzorec definován jako frekvenčně nezávislý. Porovnáním modelu a měřených dat zjistíme velmi dobrou shodu v oblasti vlnových délek 700 – 1000 nm.

Následně jsme zjistili, že je možné používat glycerinový kouř, jako mlhu pro pokusy v oblasti řečených vlnových délek.



Obrázek 32 - Koefficient útlumu v celém spektru v porovnání s Kimovým modelem



Obrázek 33 - Koefficient útlumu v závislosti na dohlednosti, vybrané vlnové délky (logaritmické měřítko)

Mlha vytvořená z vody

Předchozí část nám ukázala možnosti měření, jednak dvě metody pro získávání spektrální závislosti útlumu a zároveň jednodušší generování „mlhy“ bez vody. Porovnali jsme vlastnosti „mlhy“ s teoretickým vztahem a určili jsme oblast použitelnosti.

Tato část bude využívat měření spektrálního útlumu jako hlavní metody k získávání dat o útlumu, zároveň se pokusíme simulovat v laboratoři podmínky panující ve venkovním prostředí a vyrobit mlhu z vody.

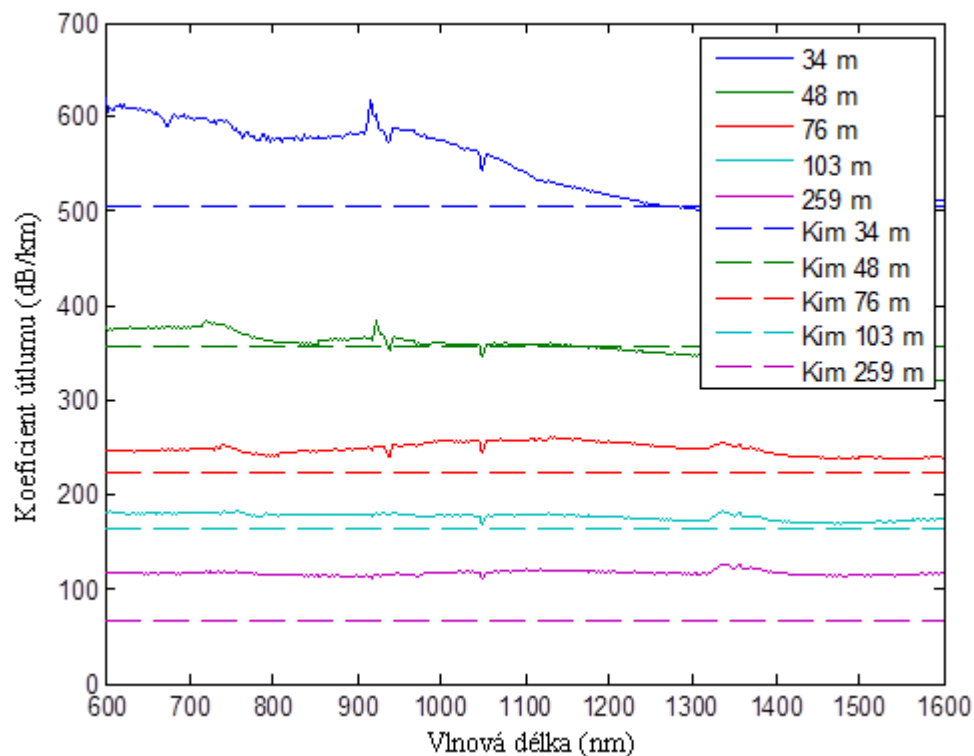
Mlha, jak již bylo popsáno, je množství mikroskopických kapiček vody vznášejících se ve vzduchu. Vyrobit mlhu znamená naplnit objem testovací komory ($0,5 \text{ m}^3$) mikroskopickými kapičkami vody a k tomu je rovnoměrně rozprostřít v celém objemu komory. Výroba mlhy spočívá v řízené kondenzaci vodní páry. Prakticky existují dvě možnosti, jak toho docílit.

- a) Podchladit velmi rychle páru stoupající z vody o teplotě cca $30\text{--}40^\circ\text{C}$, k tomu lze použít suchý led či tekutý dusík. Nevýhoda této metody spočívá v uchovávání a manipulaci s náročnými komponentami jako suchý led, či tekutý dusík.
- b) Ochladit na pokojovou teplotu horkou páru o teplotě okolo 100°C .

Použitým řešením se stala varianta b), protože se jedná o snadno ovladatelné řešení, kdy se injektuje horká pára do prostoru komory a nechá se samovolně začne kondenzovat na kapičky vody. Zároveň vstřikování páry pod tlakem lépe promísí objem komory a dojde k homogennějšímu rozložení mlhy v komoře. Obrázek 34 zobrazuje komoru naplněnou mlhou, bílé světlo pochází ze širokospektrálního zdroje světla a zelený laser je využit k měření dohlednosti uvnitř komory.



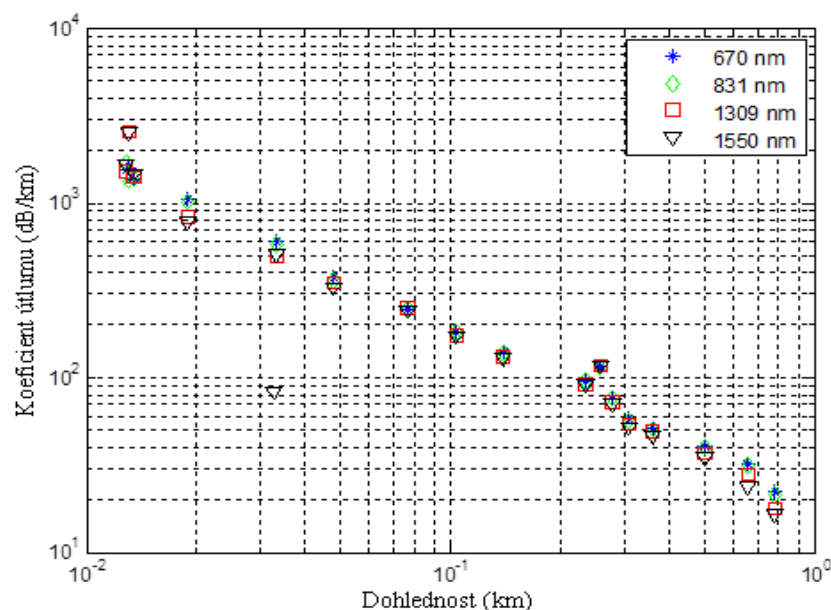
Obrázek 34 - Vodní mlha během měření útlumu spektroskopem, zelený laser měří dohlednost



Obrázek 35 - Koeficient útlumu v celém spektru v porovnání s Kimovým modelem, mlha z vody

Výsledky měření Obrázek 35 jsou vyobrazeny podobně jako pro glycerinový kouř Obrázek 32, aby bylo možné výsledky snáze porovnat. V případě mlhy z vody vykazuje koeficient útlumu menší závislost na vlnové délce, pouze v případě dohlednosti 34 m se zobrazuje větší změna. Tento efekt může být způsoben měřením velmi vysokých útlumů pro takto nízkou dohlednost. Přiložený Kimův model velmi dobře aproximuje změřený spektrální útlum Obrázek 35, čímž se potvrzuje i předpoklad možnosti porovnání naměřených dat v laboratoři s empirickým vztahem z měření v exteriéru. Zároveň se potvrzuje možnost vytvoření mlhy v laboratoři s vlastnostmi přírodní mlhy.

Přejdeme-li k porovnání útlumového koeficientu v závislosti na dohlednosti, tak pro vybrané vlnové délky vidíme markantní rozdíl u glycerinového kouře Obrázek 33, kde se jedná o čtyři samostatné přímky a mlhy z vody Obrázek 36, kde se jedná o jednu překrývající se přímku, ta značí velmi slabou závislost na vlnové délce v oblasti dohlednosti do 1 km.



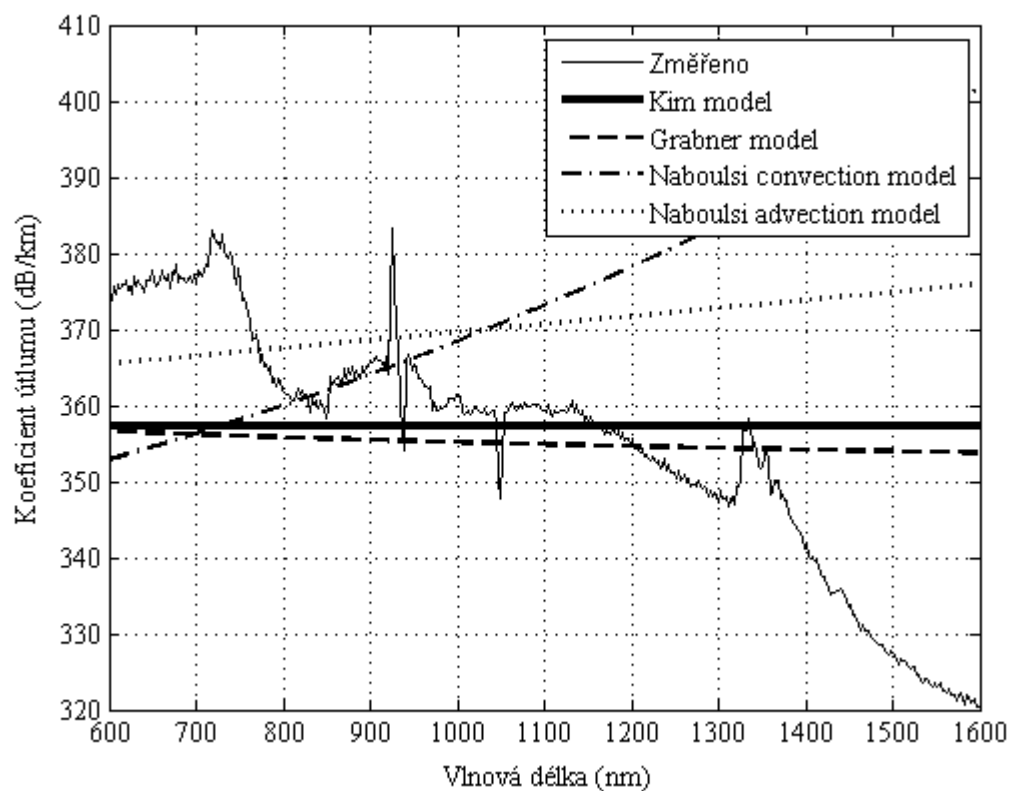
Obrázek 36 - Koefficient útlumu v závislosti na dohlednosti, vybrané vlnové délky (logaritmické měřítko) mlha z vody

6.3.4 Porovnání výsledků vodní mlhy s modely

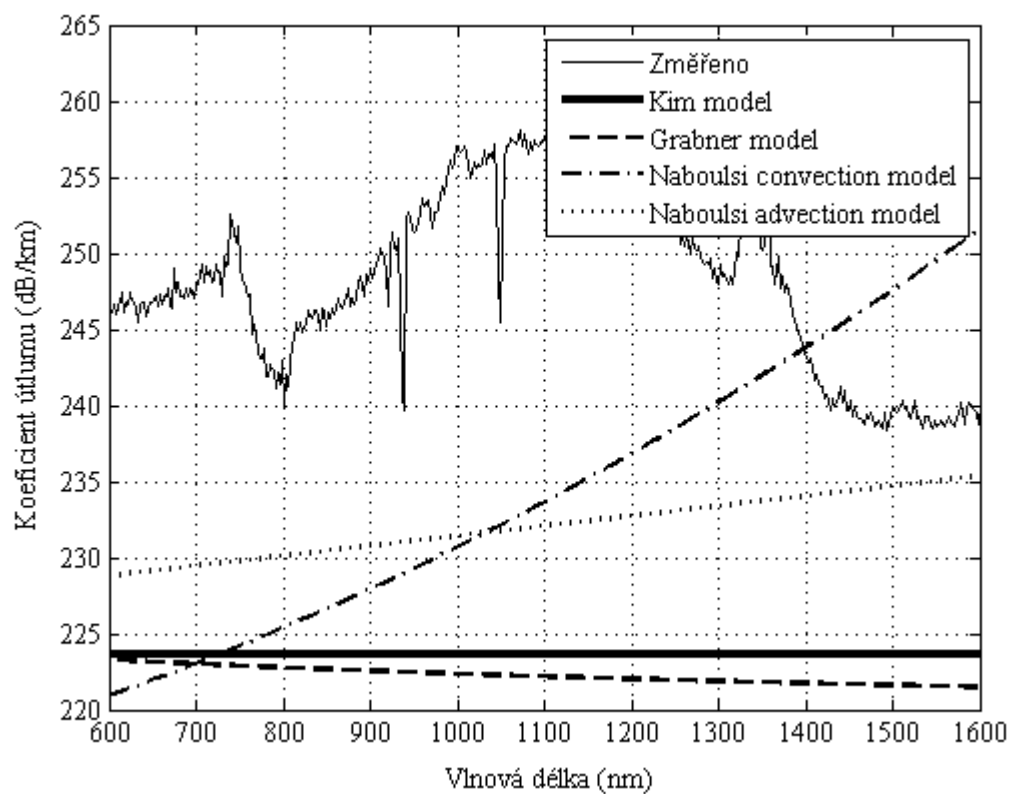
V předchozí části jsme porovnali výsledky mlhy tvořené z vodní páry se základním Kimovým modelem. V této části se zaměříme na srovnání výsledků s modely uvedenými v části 4.4.3, tedy modely: Kim, Naboulsi convection, Naboulsi advection a Grábner. Model Ijaz není v porovnání zobrazen, protože tento model vychází z dat zde uvedených.

Výsledky porovnání jsou vidět na následujících obrázcích. Obecně shrnuto, zmíněné modely popisují hodnotu útlumu dobře, nicméně se rozcházejí v interpretaci spektrální závislosti. Výrazný rozdíl spektrálního útlumu 50 dB/km vykazuje graf pro dohlednost 259 m (Obrázek 40), v porovnání s Obrázek 36 zjistíme, že se jedná o odchylku. Korekcí dojdeme k průměrné hodnotě útlumu 80 dB/km, což odpovídá modelům. Pokud se zaměříme na jednotlivé modely:

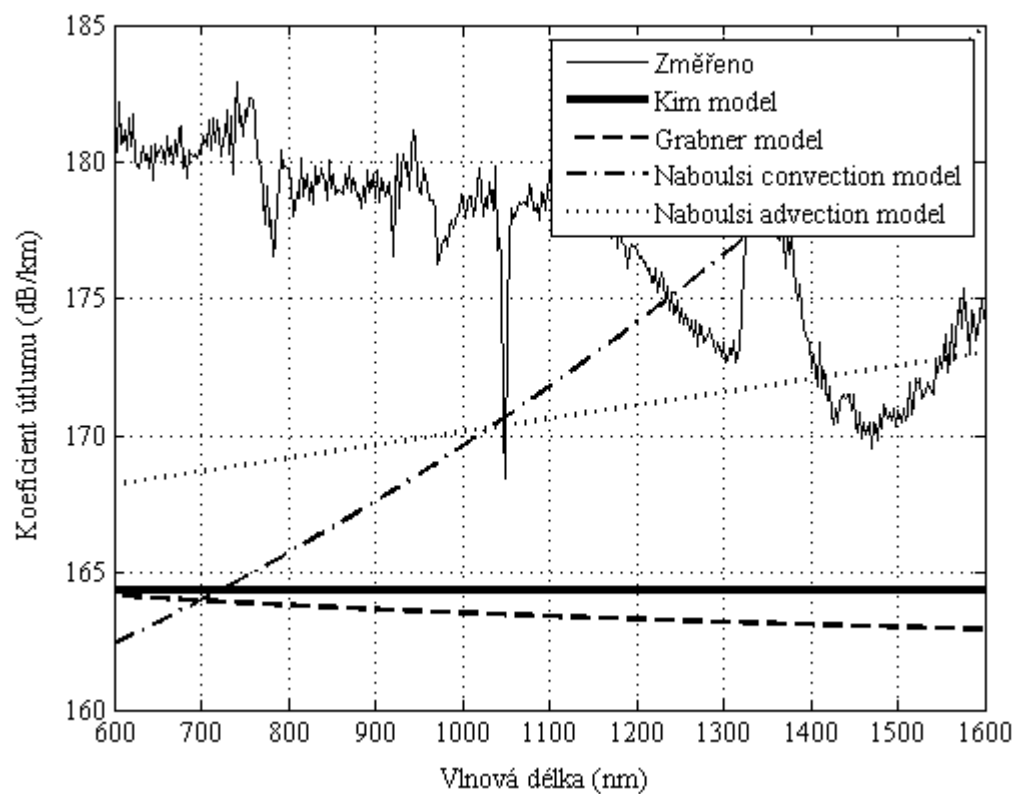
- Kimův model je spektrálně nezávislý v oblasti dohledností do 500 m
- Naboulsi advection model vykazuje stoupající trend směrem k delším vlnovým délkám, podobně jako jeho convection varianta. To je způsobeno vlastním typem mlhy, kterou popisují a zároveň je ovlivněn místními.
- Naboulsi convection model vykazuje podobnou charakteristiku jako předchozí varianta, pouze s větší strmostí růstu útlumu v závislosti na vlnové délce.
- Grábner model je stanoven z dat měřených v Praze. Vykazuje klesající trend s prodlužující se vlnovou délkou, což nejlépe odpovídá měřeným datům



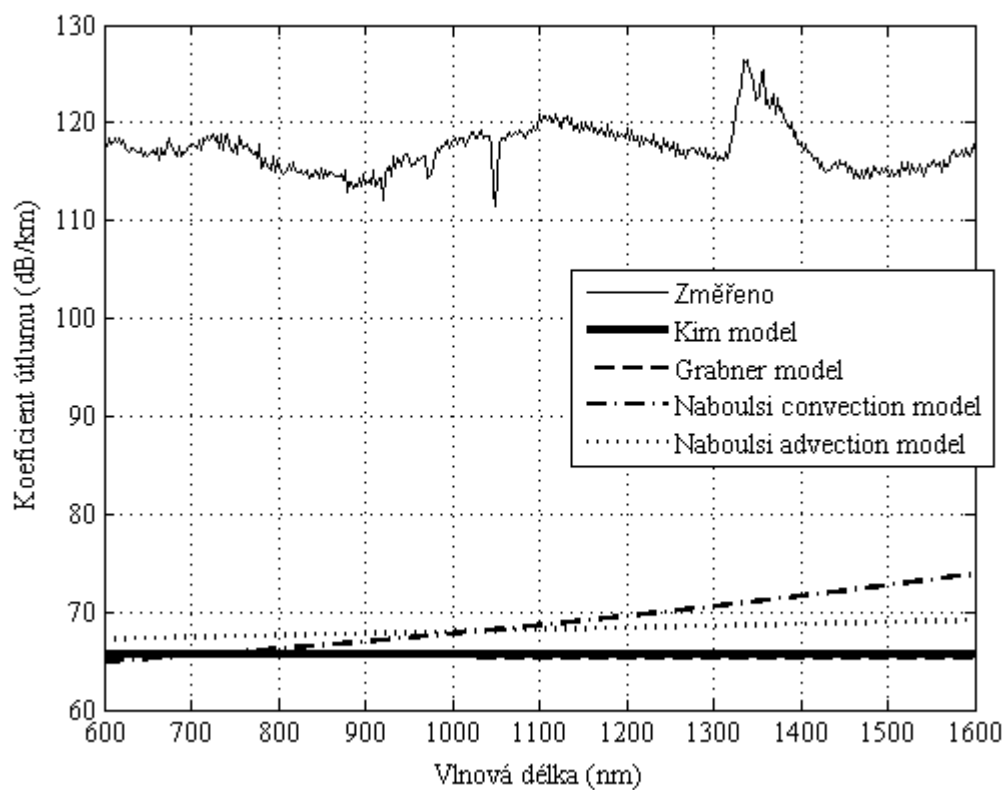
Obrázek 37 - Porovnání výsledků s modely pro dohlednost 48 m



Obrázek 38 - Porovnání výsledků s modely pro dohlednost 76 m



Obrázek 39 - Porovnání výsledků s modely pro dohlednost 103 m



Obrázek 40 - Porovnání výsledků s modely pro dohlednost 259 m

V grafech výše je patrný interval vlnových délek 1350 - 1450 nm, kde změřený útlum výrazně převyšuje hodnoty útlum z okolních vlnových délek. Tento fakt potvrzuje korelaci s propustností atmosféry Obrázek 5. Nepatrně se zde objevuje vrchol i na vlnové délce 1100 nm, který je také způsoben absorpcí vody. Zajímé jsou i oblasti v okolí vlnových délek 830 nm, 1310 nm a 1550 nm, které vykazují pokles útlumu. Výhodou těchto vlnových délek je fakt, že odpovídají telekomunikačním oknům vláknové optiky, z toho plynou výhody při technické realizaci spoje.

6.3.5 Kontrola a tvorba turbulencí

Jestliže chceme kontrolovat turbulence v experimentální komoře, musíme dosáhnout turbulentního proudění uvnitř boxu. Toho lze dosáhnout

1. vháněním teplého vzduchu do komory z čela s přidáním překážky, nebo překážek pro narušení laminárního proudění uvnitř komory
2. vháněním teplého vzduchu bočním otvorem, čímž se přeruší kontinuita toku vzduchu, který se turbulentně rozdělí v objemu komory
3. využít speciálně připravených topení s ventilátory, které jsou zabudovány v komoře.

Ve všech zmíněných bodech vyvstává velká otázka kontroly a hlavně určení, o jaký typ turbulence se jedná. Metody 1 a 2 umožňují vytvářet turbulence bez zpětné vazby. Je možné kontrolovat teplotu vzduchu i jeho průtok. Pro výsledky měření lze konstatovat jen např. 3 stupně: bez turbulencí, slabé turbulence, silné turbulence. S tímto aparátem lze pozorovat obecný vliv turbulencí na útlum hodnocený podle velikosti otevření oka rozhodnutí zobrazený na osciloskopu.

Metoda 3 je slibnější, opět neslibovala žádné hodnocení velikosti turbulencí. Na rozdíl od předchozích mělo toto zařízení 5 samostatných sekcí pro ovládání vyhřívání a ventilátorů. V době mé stáže nebylo možné zařízení využít pro nedokončený stav v podobě absence řízení. Proto jsem ve spolupráci s místními kolegy navrhl řídicí systém komunikující s počítačem. Zároveň byl systém doplněn o měřicí moduly laboratorní teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku. Dalším navrženým vylepšením bylo měření teploty uvnitř komory na několika místech a měření teploty vyhřívacích ploch, aby bylo možné monitorovat stavy uvnitř komory samotné. Za pomoci řízení z počítače by mělo být možné zajistit dobrou opakovatelnost podmínek měření.

6.3.6 Shrnutí výzkumu na Northumbria university

Měření dat popsané v této kapitole jsem uskutečnil během pětíměsíční stáže na Northumbria university ve městě Newcastle upon Tyne ve Velké Británii. Během této doby jsem se seznámil s místní laboratoří a vybavením v ní. Především se zde nacházela testovací komora pro OBS. Společně s kolegy jsme pracovali na charakterizaci mlhy v komoře a jejím srovnání s měřením ve venkovním prostředí. Zde jsme narazili na rozcházející se výsledky při porovnání útlumu pro vlnové délky 830 nm a 1550 nm. Měření z Milešovky (venkovní prostředí) vykazovalo daleko menší spektrální závislost než měření v laboratoři. Abychom ověřili správnost výsledku, rozhodli jsme se pro nová měření v laboratoři. Pro získání přesnějších výsledků jsem naprogramoval automatické odečítání dat z měřících přístrojů připojených na sběrnici GPIB. Porovnáním nově naměřených dat s daty předchozími jsme ověřili správnost měření v laboratoři. Proto jsem hledal další rozdíly. Rozdíl jsem našel ve vlastní mlze. K výrobě mlhy v laboratoři se používal vyvíječ kouře pro audiovizuální produkce, využívající glycerinové kapaliny. Bylo tedy logickým krokem vytvořit mlhu z vody a porovnat její výsledky s výsledky glycerinového kouře. Řešení pro výrobu mlhy z vody v laboratoři jsem našel v kondenzaci vodní páry v uzavřeném prostoru. Zároveň bylo mojí motivací urychlit získávání dat o útlumu na více vlnových délkách. Současná metoda, která využívala zdrojů záření o různých vlnových délkách byla jednak zdlouhavá a pak také byla limitována počtem a zdrojů záření. Při řešení tohoto úkolu se ukázala pravá výhoda měření v laboratoři, kdy je dostupné velké množství zařízení oproti venkovnímu měření. S výhodou jsem použil optický spektrální analyzátor a širokopásmový zdroj optického záření. Tato sestava mi umožnila změřit během jedné mlžné události v komoře rozsah vlnových délek 600 nm – 1600 nm. To urychlilo sběr dat neuvěřitelným způsobem i přes větší komplikovanost měřící metody. Výsledkem bylo porovnání mlhy vytvořené z glycerinu a mlhy z vody. Ukázalo se, že mlha má daleko menší spektrální závislost než glycerinový kouř. Následně při porovnání výsledků měření vodní mlhy v laboratoři s mlhou měřenou na venkovním pracovišti došlo ke shodě. Výsledkem tohoto výzkumu byla publikace v časopise Journal of Lightwave Technology (JLT Vydání: 31, Číslo 11, 2013).

Celá stáž byla pro mě velmi přínosná a vážím si toho, že jsem ji mohl absolvovat. Spolupráce s kolegy v Anglii byla pro mě novou zkušeností a vážím si jejich odbornosti i cenných rad.

7 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ INDEXU LOMU

V části 5.2 je uvedeno, že lze určit index lomu vzduchu na základě měření meteorologických veličin teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku. Zároveň je možné rozšířit toto měření do více bodů a odvodit tak i strukturní index charakterizující sílu turbulence [46].

Tato část se bude zabývat návrhem a vývojem přístroje vlastní konstrukce měřícího index lomu ve více bodech situovaných blízko trasy optického spoje. V dalším kroku dojde k dopočítání strukturního indexu a bude následovat diskuze a porovnání s výsledky optického spoje.

7.1 Požadavky na zařízení

Zde je nutné si osvětlit požadavky a nároky na měřící zařízení. Ze situačního nákresu optického spoje Obrázek 17 známe základní pozice důležitých bodů, např. vzdálenost vysílače a přijímače (60 m), jejich výškový rozdíl (29 m). Tyto parametry je nutné zahrnout do návrhu zařízení.

Požadavky na měřící zařízení:

- umístění čidel podél trasy spoje
- velké množství měřících bodů – malá vzdálenost měřících bodů
- měření veličin teplota, relativní vlhkost, atmosférický tlak
- vysoké rozlišení měření
- interval odečítání kratší než 10 sec
- automatická funkce s možností obnovení z chybových stavů
- automatické zpracování měřených dat na výsledný strukturní index
- ukládání dat na bezpečném uložišti

Požadavek na umístění jednotlivých čidel umístěných v prostoru, bez jakékoliv podpory poblíž dráhy optického spoje, jsme vyřešili zavěšením čidel na napnuté ocelové lanko. To však nesmí být vedeno přes prostor meteorologických přístrojů a zároveň nemůže úplně kopírovat dráhu spoje, aby nedocházelo k interakci optickým signálem. Zde bylo nutné zvolit kompromis vzhledem k místním podmínkám. Konečná délka závěsného lanka je 40 m. Lanko je vedeno o 14° severněji než je trasa optického spoje.

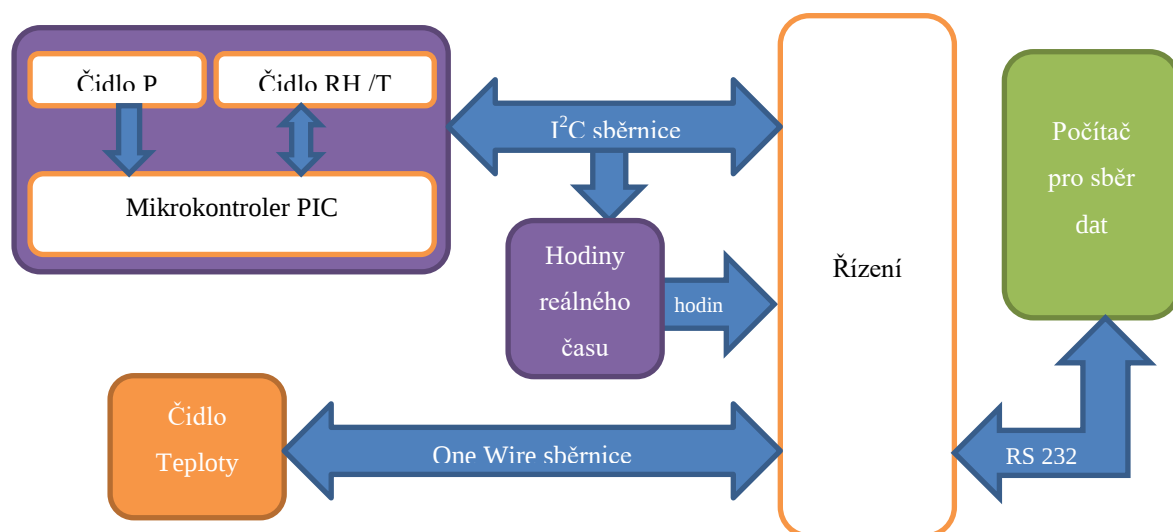
Množství měřících bodů je úzce spjato s délkou lanka z věže observatoře na její zahrádku. Pro snadnost výpočtu jsou čidla rozmístěna po 2,5 m od sebe. Protože je dispozici 40 m závěsného prostoru umístili jsme celkem 13 čidel. Zbývající vzdálenost, tedy 10 m lanka je rozdělena na půl. Na každé straně vznikl ochranný prostor dlouhý 5 m, který zajišťuje aby nedocházelo k ovlivňování měření koncovými body (zemí a věží).

Výběr čidel byl podřízen snadné realizaci a spolehlivosti bez nutnosti kompenzace většího počtu senzorů. Proto byly zvoleny integrované senzory s digitálními rozhraními pro měření teploty a tlaku. V případě atmosférického tlaku bylo nutné použít A/D převodníku k získání digitální interpretace měřené hodnoty. Všechna čidla mají možnost nastavení rozlišení měření, aby bylo možné optimálně nastavit rozlišení měřené hodnoty a čas nutný k měření a přenosu dat do počítače.

7.2 Realizace zařízení

Ve světle zmíněných požadavků byla vybrána následující čidla:

- Tlak – MPX4115 tento senzor disponuje měřícím rozsahem 15 – 115 kPa, jeho výstup je napětí úměrné měřenému tlaku. O převod napětí na hodnotu se stará A/D převodník s rozlišením 10 bitů integrovaný v mikrokontroléru PIC obsluhující i čidlo vlhkost/teplota
- Relativní vlhkost/teplota – SHT11 toto čidlo kombinuje měření relativní vlhkosti s teplotou, toho se využívá pro kompenzaci měřené relativní vlhkosti. Rozlišení měření je 8 bitů pro relativní vlhkost a 12 bitů pro teplotu. Výstup čidla je již digitální, obsluhu čidla a komunikaci po společné sběrnici zajišťuje mikrokontrolér PIC.
- Teplota – DS18B20 toto teplotní čidlo využívá implementovanou 1-Wire sběrnici, která má svůj komunikační protokol a danou rychlost komunikace. Rozlišení měření teploty je nastavitelné v rozmezí 8 - 12 bitů. Pro účely měření se využívá 12 bitové rozlišení. Doba převodu teploty na digitální interpretaci je zhruba 700 ms.



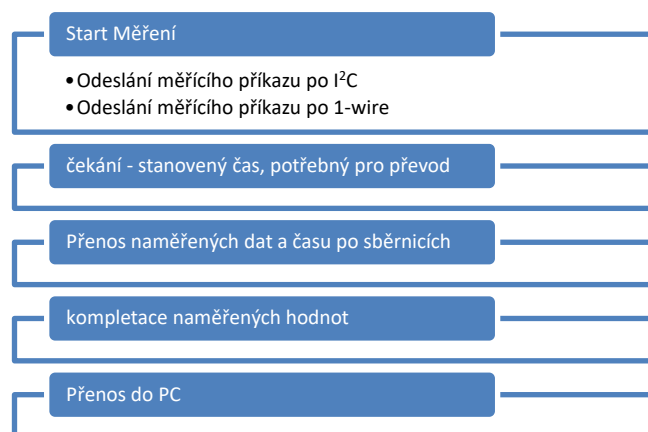
Obrázek 41 - Blokové schéma zařízení pro měření indexu lomu / strukturního indexu

Blokové schéma zobrazuje funkční bloky a celou koncepci zařízení bez softwarové části. Máme tu k dispozici dvě komunikační sběrnice obsluhující rozdílná čidla. V případě 1-Wire sběrnice je veškerá logika pro komunikaci implementována do teplotního čidla. Omezení sběrnice je na 254 připojených zařízení. Komunikace probíhá protokolem definovaným od výrobce. Obsluha sběrnice je implementována jako softwarový modul do mikropočítače v části řízení.

Druhá sběrnice I²C slouží ke komunikaci řídicího mikropočítače s obvodem reálného času a čidly s možností měření tlaku, vlhkosti a teploty. I²C je standardizovaná sběrnice, obsluhovaná HW modulem jak v čidlech, tak v modulu řízení.

Modul řízení zajišťuje komunikaci s PC, ze kterého přijímá nastavení z PC a odesílá do PC naměřená čidla. Současně modul obsahuje část, která monitoruje stav jednotky do PC, také umožňuje při problémových stavech jednotlivé části systému restartovat.

Ve finální konfiguraci, bylo použito celkem 13 čidel, z toho 7 čidel vyžívá komunikaci po sběrnici I²C a 6 čidel komunikuje po sběrnici „One-wire“. Za pomoci tohoto řešení (dvou sběrnic) bylo možné snížit časovou náročnost odečtu z čidel na opakovatelný čas 4 vteřiny. Správné časování odečtu v takto vysokém taktu zajišťuje modul reálného času, který každé 4 vteřiny zahájí měření. Celý proces měření popisuje diagram měření Obrázek 42.



Obrázek 42 - Diagram měření a přenosu dat

Odečítání hodnot po dvou sběrnicích se ukázalo výhodné pro zrychlení měření. Zároveň na základě předpokladu změny měřených veličin mohl být omezen počet čidel relativní vlhkosti a atmosférického tlaku následovně: Nejdůležitější veličina teplota se měří na všech 13 bodech. Druhou nejčastěji zastoupenou veličinou je relativní vlhkost měřená v 7 bodech a to v čidlech na sběrnici I²C. Tlaková čidla jsou osazena pouze 3, zde není předpoklad na velké změny podél dráhy spoje. Atmosférický tlak je měřen v bodech rovnoměrně rozmístěných podél trasy, na začátku, konci a uprostřed. Podrobné rozložení měřených veličin na čidlech je zobrazeno v diagramu Obrázek 43.



Obrázek 43 - Diagram rozmístění různých typů čidel podél optického spoje



Obrázek 44 - Pohled na zahrádku observatoře, ocelové lanko nese čidla měřícího zařízení

7.3 Softwarová část

V této části popíšeme mechanismus uložení a zpracování naměřených dat. Začneme od počítače obsluhujícího sběr dat ze zařízení. Jedná se o minipočítač, na kterém běží operační systém Linux Debian. Operační systém určuje nástroje použité k přenosu a zpracování dat.

Vzhledem k tomu, že pro komunikaci fyzického zařízení s počítačem bylo zvoleno sériové rozhraní RS232 (sériový port). Byl napsán program obsluhující sériový port, zároveň tento program zapisuje data rozdělené do hodinových úseků v textovém formátu, protože uložení dat v minipočítači nevyhovuje požadavku na bezpečnost a zpracování dat. Každou hodinu se provede synchronizace naměřených dat na vzdálený server. Zde pak dochází k automatickému přečtení souboru s naměřenými hodnotami a následný přesun dat do databáze MySQL. Využití databáze pro zprávu naměřených hodnot je výhodné z hlediska uložení i čtení dat. Databázový stroj je optimalizován k vyhledávání a vracení výsledků podle zadaných kritérií, tím odpadá zdlouhavá příprava naměřených dat do formátu vhodného pro další zpracování např.: Matlabem. Jednoduše lze z databáze vracet maxima, minima, četnosti hodnot, průměry za daný časový interval. Dokonce i měnit způsob řazení výstupních dat.

Poslední úloha softwaru je automatický výpočet indexu lomu a strukturního indexu. Tohoto úkolu se zhostil skriptovací jazyk Python pomocí vztahu (5.8). Výsledek byl opět uložen do databáze pro snadnější hodnocení vlivu na indexu lomu a strukturního indexu na optický spoj.

7.4 Realizace

Zařízení na měření indexu lomu bylo realizováno přesně podle plánu nastíněného v předchozích kapitolách. Při konstrukci bylo provedeno několik vývojových iterací k odladění drobných vad, které se objevili při výrobě. Zároveň došlo k doplnění funkcí pro testování a vzdálený restart. Možnost diagnostikovat, kontrolovat a restartovat zařízení vzdáleně se ukázala jako klíčová vzhledem k umístění celého zařízení na vzdálené observatoři a i na základě předchozích zkušeností. Při testování byla také naměřena kalibrační data nutná pro správnou funkci a zvýšení přesnosti celého zařízení.

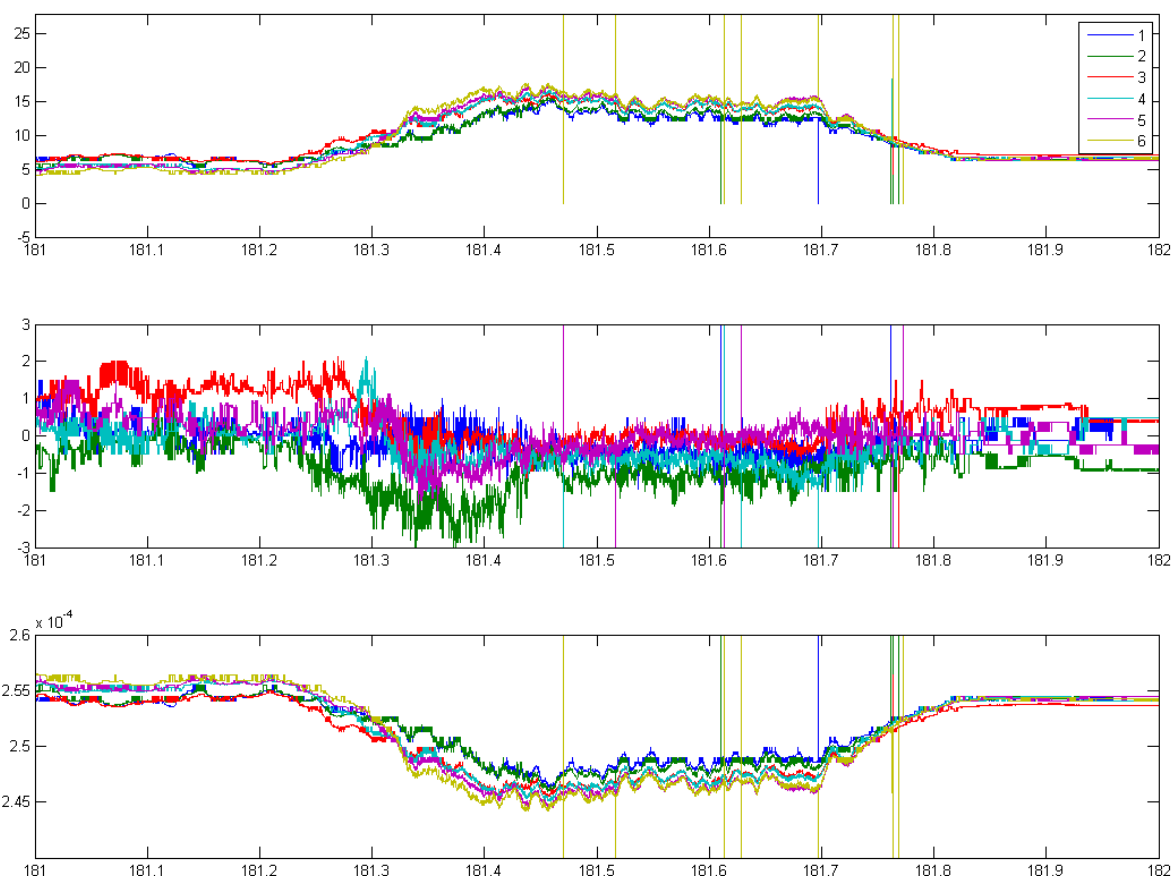
Funkce zařízení byla od prvopočátku problematická. Přímě na observatoři se projevovala chyba komunikace čidel po sběrnici I²C. Bohužel i přes opětovné servisní zásahy nebyla zjištěna příčina této chyby. Při pokusu o opravení tohoto stavu mimo prostor observatoře se tuto chybu nepodařilo zopakovat. Bylo tedy rozhodnuto pokračovat pouze se šesti teplotními čidly, která fungují perfektně.

Absenci čidel relativní vlhkosti a tlaku nahradili meteorologické senzory observatoře. Z dlouhodobého pozorování i předchozího měření se ukázalo, že obě veličiny neprocházejí tak rychlými změnami. Proto jsou data z observatoře vhodná, ačkoliv jsou zaznamenávána s menší frekvencí (10 minut).

7.5 Naměřené výsledky

Naměřené výsledky se skládají z teplot změřených pomocí čidel zařízení a atmosférického tlaku, relativní vlhkosti změřené na observatoři přístroji pro monitorování počasí. Výsledkem spojení těchto hodnot je index lomu atmosféry zobrazený v čase pro šest různých bodů Obrázek 45. První, tedy horní graf nám ukazuje průběh všech šesti měřených teplot, během jednoho dne. Vzdálenost měřicích bodů je 5 metrů. Z průběhů teplot je patrné, že během noci panuje klidnější období, kdy je teplota stálější. S východem Slunce, začínají teploty stoupat, během dne se drží na vyšší úrovni než v noci. S blížícím se západem Slunce a po jeho západu dochází ke snižování teplot na noční hodnoty.

Pro větší přehlednost dat je dopočítán druhý graf (uprostřed Obrázek 45). Zde jsou vyneseny rozdíly teplot mezi sousedními body. Skutečná hodnota teploty nás zajímá pro výpočet indexu lomu, ale z rozdílů teplot lze snadněji určit časy zájmu pro podrobnější analýzu. Ukazuje se, že především v ranních a dopoledních hodinách jsou vlivem ohřevu chladnější země rozdíly teplot větší, proto by mělo v těchto časech docházet k většímu výskytu velkých vírů termických turbulencí.

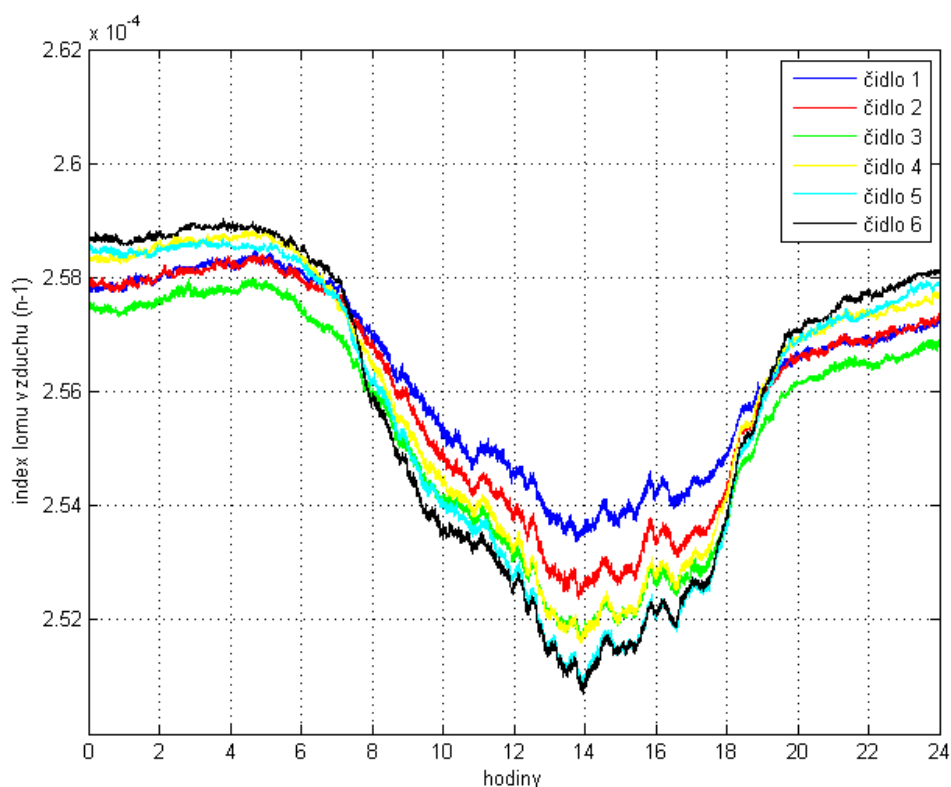


Obrázek 45 - Naměřené hodnoty teplot 6 čidel (nahore), rozdíly teplot (uprostřed), index lomu vzduchu (dole)

Poslední graf umístěný úplně dole vykresluje průběhy indexu lomu vypočtené dle (5.8) v jednotlivých měřicích bodech. Jednou ze základních charakteristik indexu lomu je, že je inverzně podobný teplotě, čím vyšší je teplota, tím index lomu klesá. Původní myšlenka vírů jako teplejších míst s jiným indexem lomu platí, nicméně nejedná se o stejný typ lomu, jako je tomu při simulaci dešťové kapky. Kapka má index lomu větší, než vzduch. Proto působí jako spojná čočka. Naproti tomu teplejší víry budou s nižší hodnotou indexu lomu fungovat jako čočka rozptylná. Bohužel nepůjde jednoduše sestavit simulaci jako v případě dešťové kapky, protože vír pravděpodobně nebude ohraničen skokovým přechodem dvou indexů lomu, ale spíše gradientním přechodem. Tento typ přechodu lze připodobnit gradientnímu přechodu indexů lomu v optickém vlákně, kde se pomocí postupného přechodu indexu lomu ohýbá paprsek ve vlákně (místo totálního odrazu), aby se šířil dále ve směru vlákna.

7.5.1 Index lomu

Jestliže jsme zjistili velmi silnou závislost indexu lomu na teplotě, je pak vhodné zobrazit, jakým způsobem se mění index lomu během několika dní. Provedeme-li průměrování hodnot indexu lomu ve stejný čas pro různé dny, dostaneme denní chody indexu lomu Obrázek 46. Protože je tato průměrovaná veličina silně závislá na teplotě a tedy i na délce slunečního svitu, není vhodné dělat denní chody pro velké množství dní. Lze se o tom přesvědčit výpočtem východu a západu Slunce [47].



Obrázek 46 - Denní chody indexu lomu v různých pozicích, čidlo 1 je nejbližší věži

V obrázku jsou vyneseny denní chody pro všechna měřená body, první čidlo 1 se nachází v největší výšce blízko věže, poslední čidlo 6 je nejbližší zemi. Jednotlivé chody vykazují podobný charakter, pouze velikost změny indexu lomu je různá v každém bodě. Pro body nejbližší zemi je změna indexu lomu největší, zatím co se stoupající výškou se tato změna zmenšuje. Důvodem pravděpodobně bude vzdálenost od vyhrátého povrchu Země.

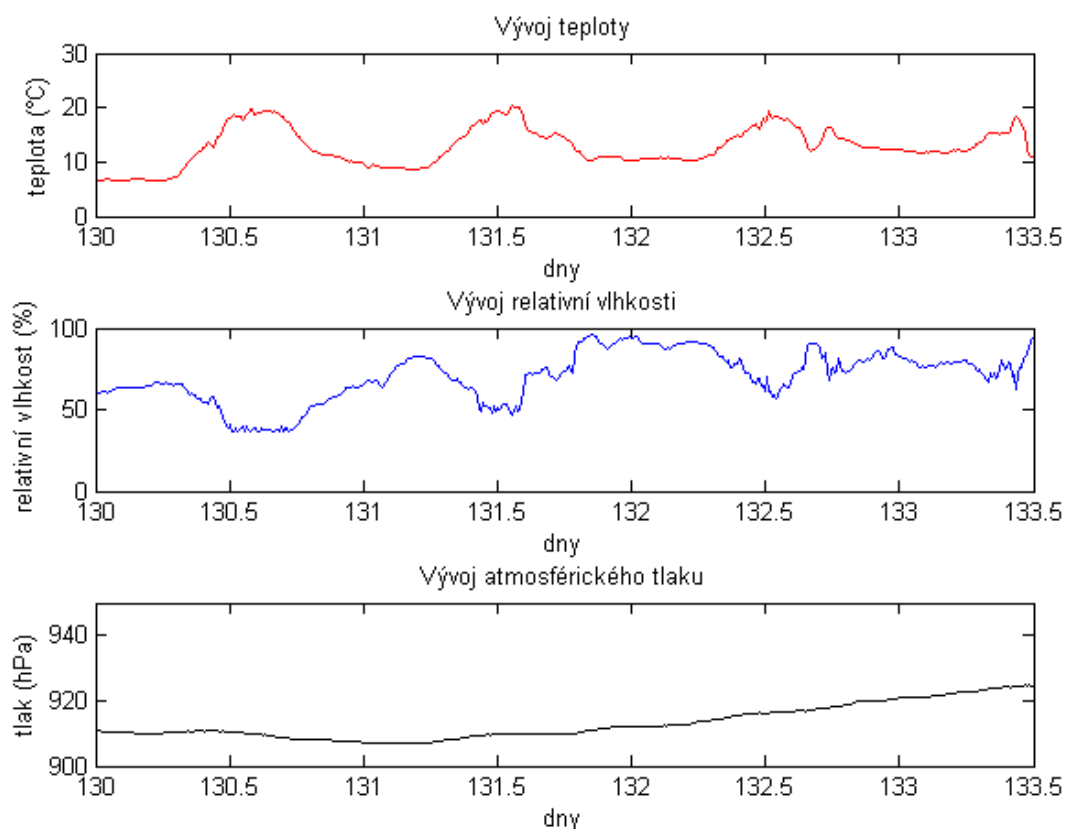
Porovnáním denních chodů s délkou dne dojdeme k následujícím: Východ Slunce byl uprostřed intervalu průměrování 5:28 hod a západ 20:32 hod [47] (jedná se o začátek měsíce května) Porovnáme-li časy s grafem a vidíme, že časy ohraničují dobu, kdy dochází ke změnám. Zároveň vidíme i pomalý nástup změn, to souvisí s časem nutným pro Slunce, aby po východu začalo osvětlovat pozici stanoviště. Opačně je tento efekt také patrný, zhruba od

18 hodiny dochází k nárůstu indexu lomu. Tento vzestup je zapříčiněn opět postavením Slunce a pozorovaného stanoviště. Na konci dne se projevuje i jistý druh setrvačnosti, kdy ještě i po západu Slunce ve 20:32 stále ještě dochází k růstu indexu lomu vlivem ochlazování vzduchu.

7.5.2 Strukturní index

Jestliže jsme byli schopni v přechozí kapitole stanovit index lomu vzduchu, následujícím krokem je výpočet strukturního indexu dle (5.3). Dále bude následovat výpočet útlumu optického svazku. Nadále využíváme změřených hodnot ze stejného období jako pro index lomu. Snáze se pak budou hledat případné souvislosti.

Na začátku stojí kontrola vstupních dat, které slouží k výpočtům. Grafy Obrázek 47 zobrazují hodnoty změřené teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku v intervalu 3,5 dne.

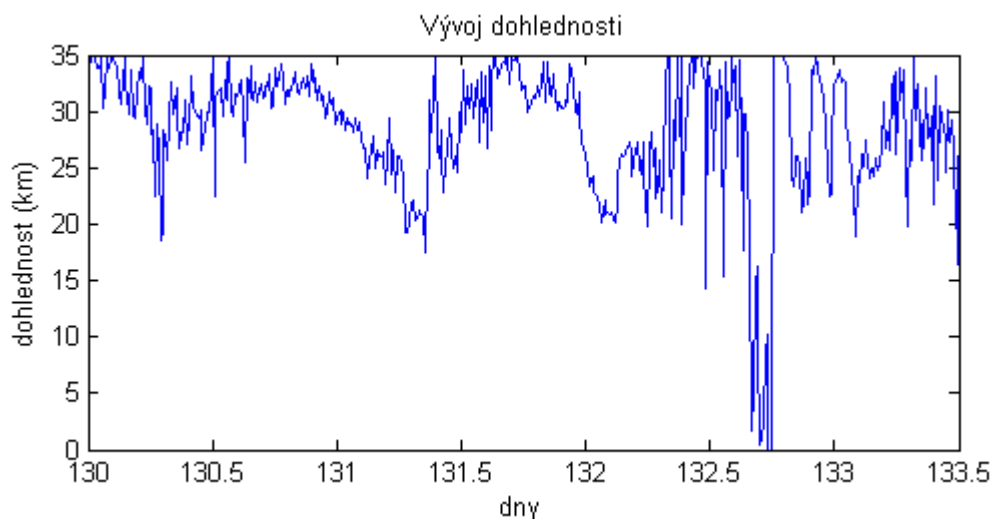


Obrázek 47 - Průběhy naměřené teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku ve zvoleném období

U tlaku vzduchu vidíme stoupající tendenci v pozorovaném intervalu, která však svojí rychlostí změny nebude hrát klíčovou roli ve výpočtu indexu lomu. Vezmeme-li v potaz rychlost změny tlaku, není zapotřebí měřit tuto hodnotu každých 5 vteřin. Je možné říci, že je

pro nás důležitá hodnota, kterou atmosférický tlak nabývá, nikoliv však jeho změna. Dvojice veličin teplota, relativní vlhkost projevují větší dynamiku během jednotlivých denních cyklů. Také je velmi dobře patrná jejich závislost. Teplejší vzduch je schopen pojmout více vlhkosti, tudíž při ohřátí vzduchu a zachování konstantního množství vodní páry musí relativní vlhkost klesat. Celý proces funguje i obráceně, pokud však dojde k nasycení vzduchu, musí následovat vyloučení vody v podobě kondenzátu.

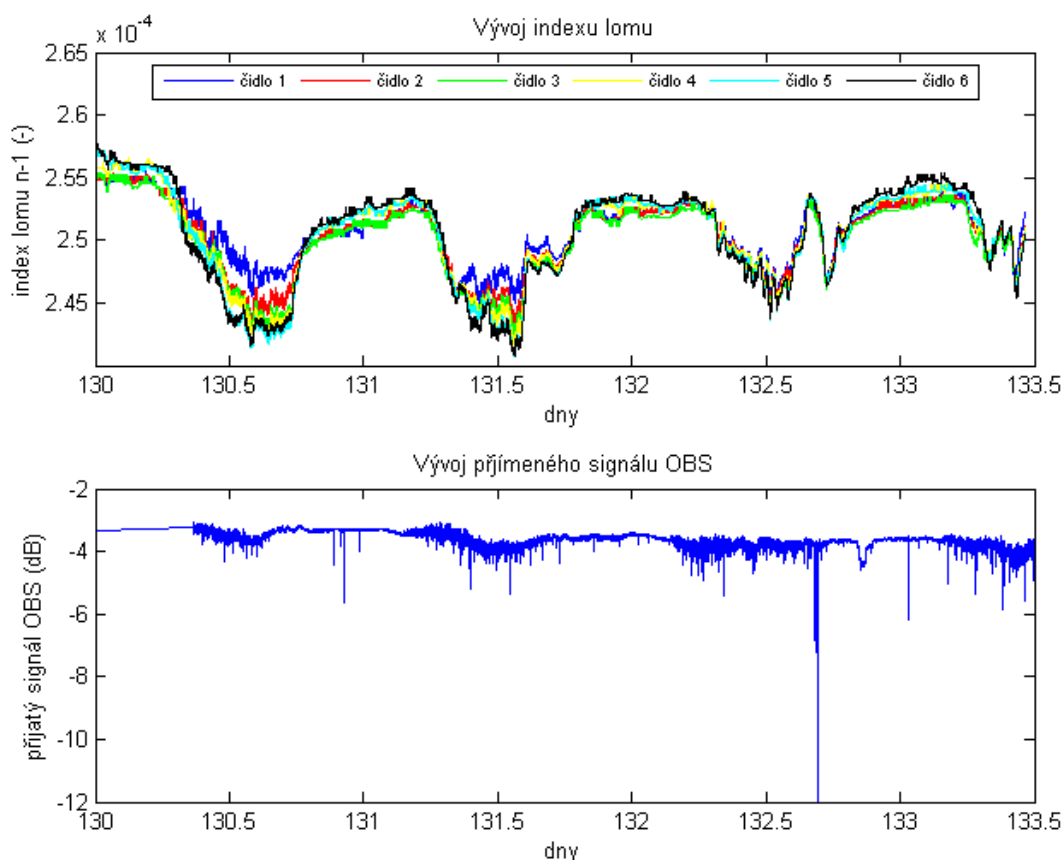
Stanovit index lomu lze za každých meteorologických podmínek, pro korelaci s optickým spojem je však zapotřebí vybrat časy s vysokou dohledností. Jedině pak je zaručen jako hlavní vliv na útlum spoje turbulence. Obrázek 48 zobrazuje vývoj dohlednosti ve vyhodnocovaném časovém intervalu. Sledovaná dohlednost se celou dobu s výjimkou jediné události pohybuje v oblasti nad 20 km. V čase 132,7 dne, tedy okolo 17 hodiny 132. dne v roce 2017 došlo ke snížení dohlednosti vlivem deště na úroveň 500 m.



Obrázek 48 - Měřená hodnota dohlednosti ve zvoleném období

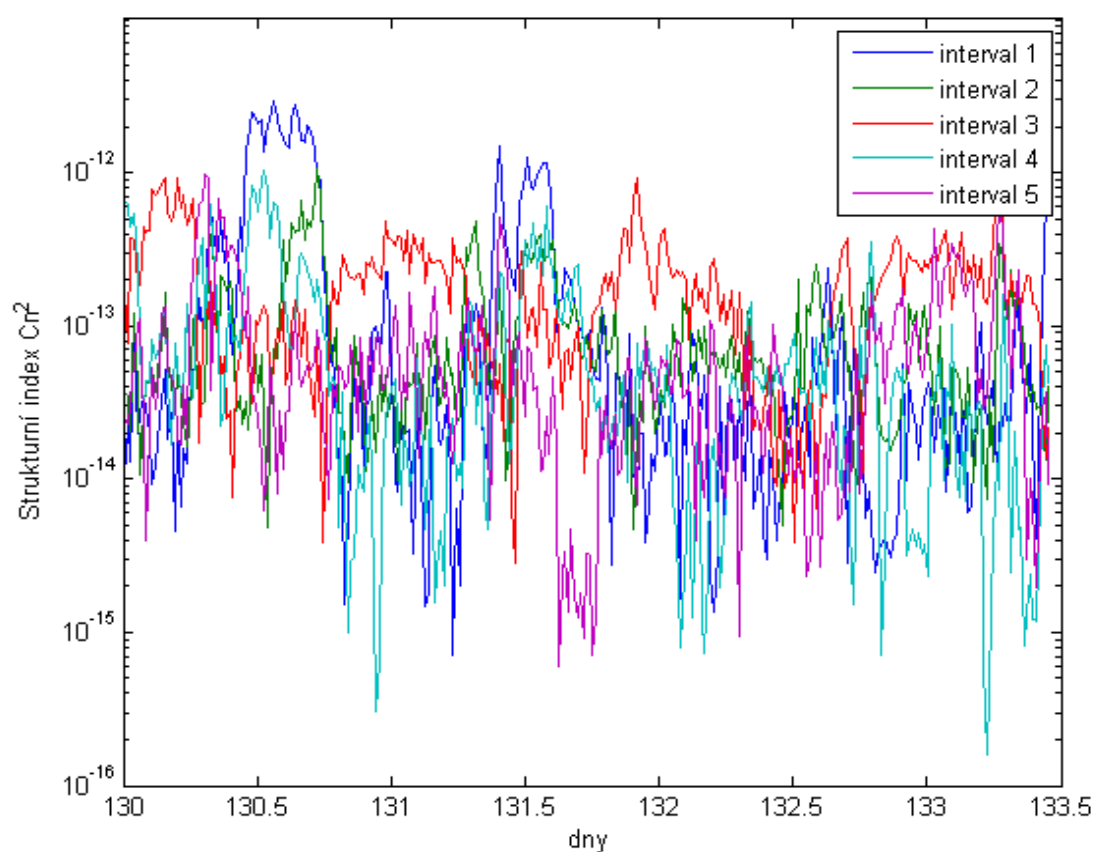
Na základě předložených základních měření vypočteme jednotlivé indexy lomu a porovnáme je s výsledky měření optického spoje Obrázek 49. V horní části jsou zobrazeny průběhy indexů lomu pro jednotlivá místa měření. Průběhy odpovídají již popsaným denním chodům. Především je patrné ochlazení vlivem deště a s tím spojené zvýšení indexu lomu ve 132. den. V grafu ve spodní části obrázku vidíme přijatý výkon na prvním kanálu optického spoje. Z grafu útlumu jsou patrné dva různé efekty. Prvním efektem jsou rychlé změny intenzity dopadajícího svazku, které vytvářejí špičky útlumu různých velikostí modulované na pomalejším průběhu. Tyto rychlé úniky signálu velmi dobře odpovídají scintilacím popsaným v literatuře. Scintilace jsou rychlé změny intenzity signálu způsobené šířením světla v turbulentním prostředí. Druhý pomalejší efekt, který se objeví po odstranění rychlých

úniků, svým průběhem připomíná denní chod indexu lomu s maximálním útlumem 0,5 – 1,5 dB.

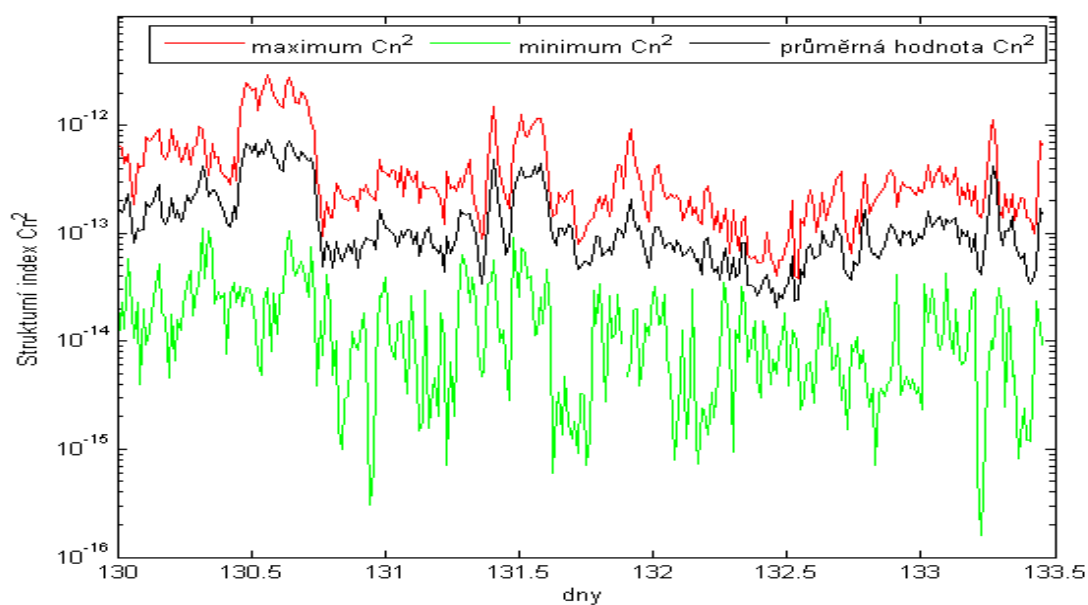


Obrázek 49 - Zobrazení indexů lomu vzduchu (nahore) a útlumu optického spoje 845 nm (dole)

Výše uvedené dva dopady na optický spoj, mají svou příčinu v působení turbulencí. Zatím co scintilace jako velmi rychlé úniky nelze zachytit aparaturou na měření turbulencí, tak pomalé působení turbulencí shodné s denním vývojem indexu lomu lze hodnotit na základě měření a výpočtu strukturního indexu Cn^2 . Strukturní index vypočtený pro 5 vzdálenostních intervalů je zobrazen na Obrázek 50. Tato změť naměřených hodnot je lépe charakterizována minimy a maximy hodnot strukturních indexu Obrázek 51. Zde ohraničený prostor nabývá hodnot 10^{-15} až $10^{-11} \text{ m}^{-2/3}$, průměrné hodnoty se pohybují v řádu 10^{-13} , tedy v oblasti vysoké intenzity turbulencí (dle literatury). Můžeme také pozorovat maxima v oblasti poledne, kdy dochází ke zvyšování intenzity turbulencí a nárůstu strukturního indexu. Literatura uvádí malou intenzitu turbulencí pro hodnoty Cn^2 v řádech 10^{-16} , takto nízkou intenzitu turbulencí se nepodařilo zatím změřit. Může však to souviset s místními podmínkami a častým působením větru. Způsob, jakým lze ověřit měření slabých turbulencí spočívá v přesunutí aparatury na jiné místo s klidnějšími klimatickými podmínkami.



Obrázek 50 - Průběhy strukturálního indexu Cn^2 v jednotlivých úsecích mezi čidly



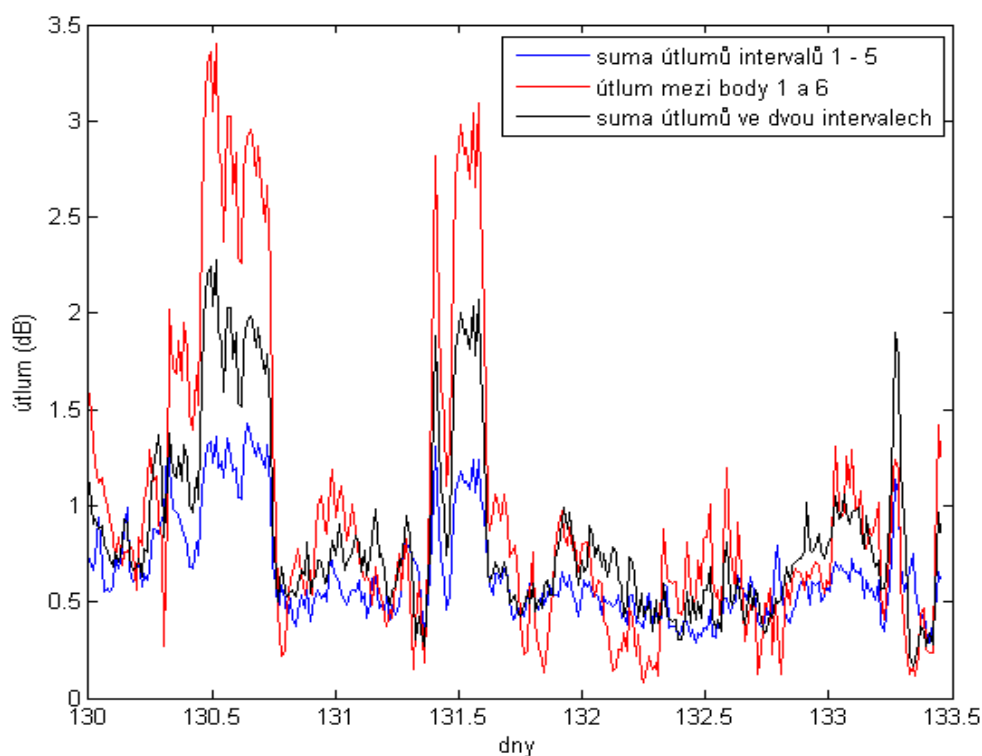
Obrázek 51 - Maxima a minima strukturálního indexu Cn^2

Přejdemei od strukturního indexu k útlumu, který turbulence způsobují za využití vztahu, který formuloval Rytov [48] takto:

$$A_{turb} = 2\sqrt{23,17k^{\frac{7}{6}}C_n^2r^{\frac{11}{6}}} \text{ (dB)} \quad (7.1)$$

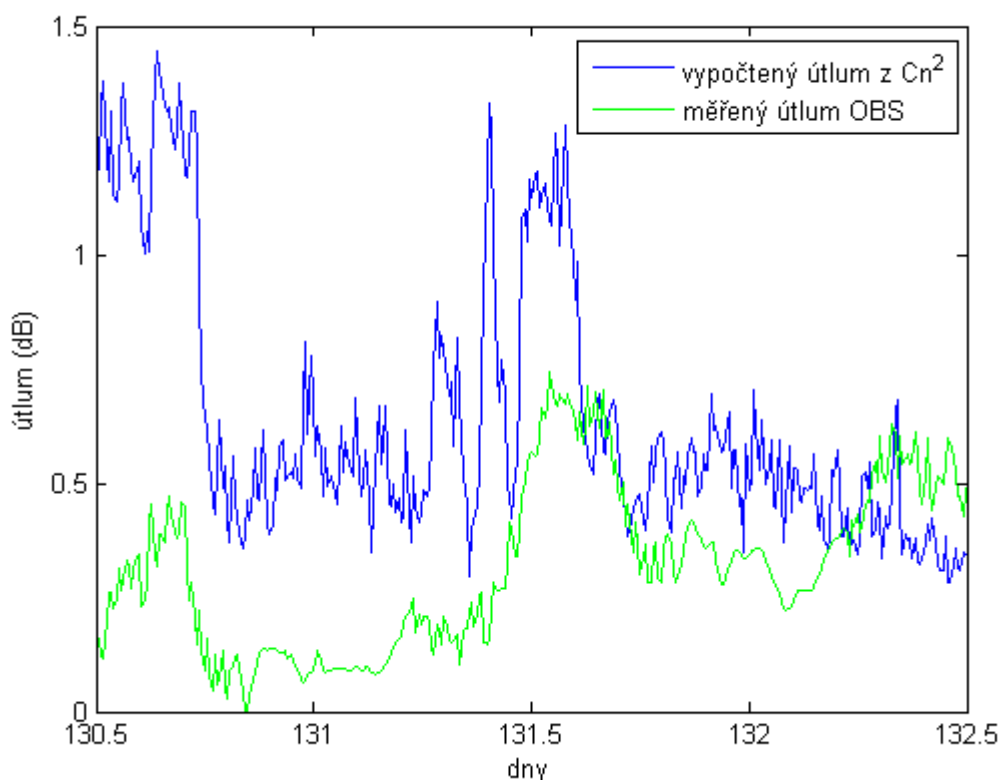
kde $k = 2\pi/\lambda$ je vlnové číslo.

Výsledky útlumu získané výpočtem pro námi sledovaný časový interval zobrazuje Obrázek 52. Zde zobrazené výsledky, porovnávají výstup tří odlišných způsobů výpočtu a to pokud použijeme k výpočtu útlumu jeden interval vzdáleností, dva intervaly nebo 5 intervalů. Je jasně zřejmé, že se zvyšujícím počtem intervalů použitých pro výpočet klesá maximální odhadnutý útlum. Tento fakt je způsoben tím, že dojde k ohraničení extrémních hodnot C_n^2 na kratší vzdálenost, zároveň pokud v ostatních úsecích, nejsou měřeny tak vysoké hodnoty C_n^2 , odpovídá vypočtený útlum lépe realitě. Pokud tedy nedochází k extrémním výkyvům strukturního indexu v určité části měřené trasy, lze měření zjednodušit na jeden interval. Toto tvrzení, ale neplatí pro měření na Milešovce, kde se útlum optického spoje pohyboval v rozmezí 0,5 – 1,5 dB, zatím co výsledky vypočteného útlumu z jednoho intervalu dosahovali maxima až 3,5 dB.



Obrázek 52 - Porovnání vypočteného útlumu ze strukturního indexu pro různý počet intervalů

Výsledné porovnání měřeného útlumu na OBS a vypočteného útlumu z pěti intervalů C_n^2 je možné vidět na Obrázek 53. Porovnání je provedeno pro interval dvou dnů, protože pod časovou hodnotu 130,5 dne nejsou k dispozici data z optického spoje, druhou hranici tvoří hodnota 132,5 z důvodu dešťové události v odpoledních hodinách. Z porovnání průběhů je patrné, že v případě extrémních hodnot strukturního indexu dochází k nadhodnocování útlumu oproti realitě. Porovnáme-li shodnost obou průběhů, vyjde koeficient lineární korelace 0,245. Tato hodnota je poměrně dobrým úspěchem, pokud vezmeme v úvahu náhodnou povahu dopadu turbulencí na optický svazek.



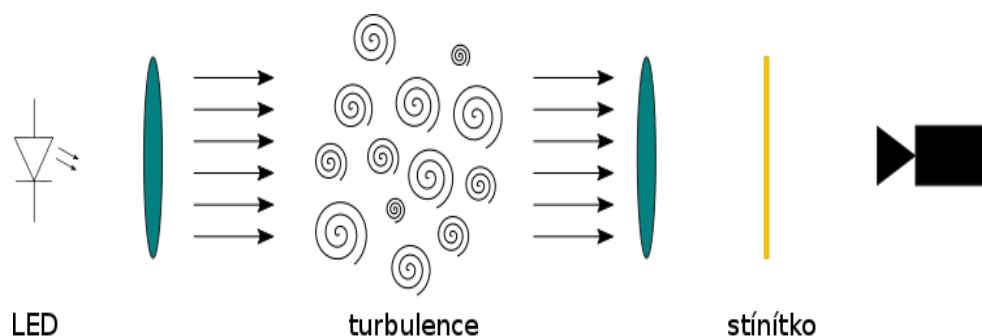
Obrázek 53 - Porovnání vypočteného útlumu a měřeného útlumu na OBS

8 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ POHYBU PAPRSKU

Turbulentní přenosové prostředí ovlivňuje OBS především v podobě scintilací a putování paprsku v rovině zaostření. Scintilace se projevuje změnami intenzity přichozícího signálu na aperturu přijímače po průchodu turbulentní atmosférou. Putování paprsku mění místo největší intenzity zaostřeného paprsku ve fokální rovině, čímž může docházet k oslabení až zániku přijímaného signálu. V tomto případě se přesune optický signál v rovině zaostření mimo oblast přijímací fotodiody. Za účelem rozlišení jmenovaných vlivů jsme vyvinuli a sestrojili zařízení, které měří pozici a plochu bodu zaostřeného paprsku.

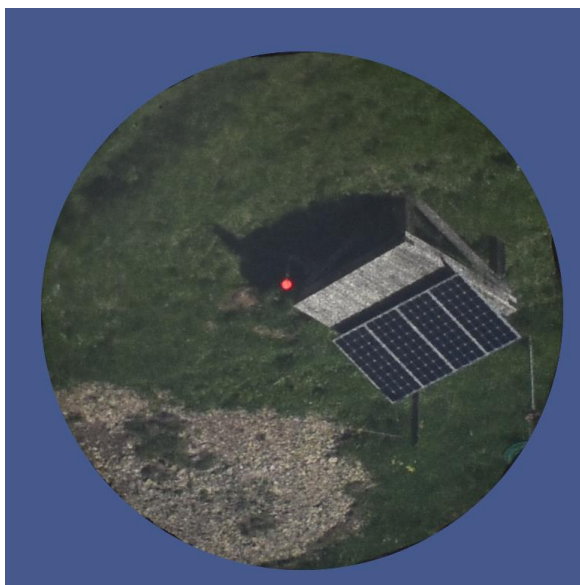
8.1 Princip funkce

Principiálně funguje námi navržené zařízení na měření scintilací a putování paprsku jako kamera snímající scénu s výrazným objektem, např.: hořící svíčka na stole. V našem příkladu pak dojde k vyhodnocení parametrů plamene svíčky, jako jsou pozice ve směru x, y, případně velikost a jas plamene. Ve chvíli, kdy postavíme mezi naši scénu a snímací zařízení turbulentní atmosféru, začne docházet ke změnám měřených parametrů v závislosti na čase. Je tedy možné pozorovat různé změny pozice, jasu i velikosti plamene.



Obrázek 54 - Schématické zobrazení funkce přístroje na měření scintilací a putování paprsku

Přesuneme se od příkladu k realizaci Obrázek 54: Nahradíme výrazný objekt LED diodou s anténou v podobě čočky, jenž uzpůsobí vysílaný paprsek do tvaru optického svazku s malou divergencí. Vytvořený optický svazek bude ovlivněn turbulentní atmosférou a přijat na opačné straně „spoje“. Přijímací část „spoje“ je tvořena čočkou, fokusující přijímaný optický svazek na plochu poloprůhledného stínítka. Stínítko slouží jako zobrazovací plocha a zároveň i jako snímací plocha kamery. Reálnou projekci obrazu na stínítko přístroje zobrazuje Obrázek 55. Červený kroužek je projekce optického paprsku vyslaného z vysílače skrze atmosféru.



Obrázek 55 - Obraz na stínítku měřicího přístroje z místa instalace, červený bod je projekce optického paprsku

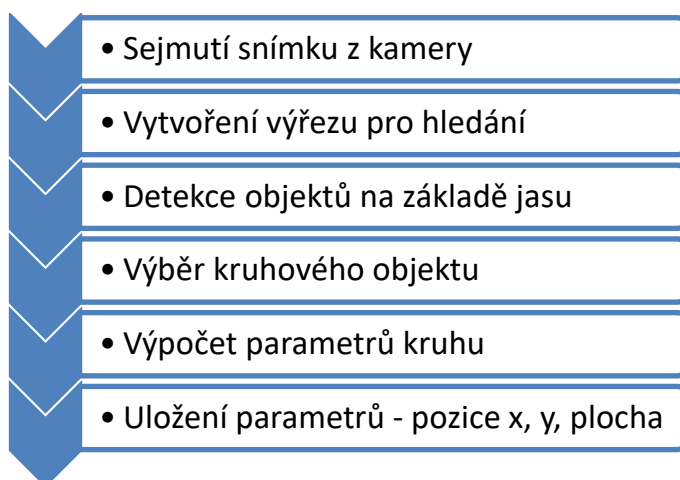
8.2 Zpracování obrazu

Celé zařízení využívá jednoduchého principu zachycení polohy a velikosti kruhu v obraze z kamery. Použitá snímací kamera disponuje rozlišením 640x480 pixelů, které je dostatečně velké ke zpracování i malých pohybů kruhu po stínítku. V krátkodobém horizontu je možné snímky z kamery ukládat na uložení a zpracovat následně na výkonném stroji. Toto řešení se hodí pro optimalizaci parametrů sloužících k vyhodnocení sledovaného kruhu. V dlouhodobém horizontu takové řešení není možné. Zejména z důvodu omezené kapacity lokálního uložení, kdy se ukládá velké množství obrazových dat, která nejsou zapotřebí.

Řešením je využití algoritmů pro detekci a identifikaci objektů v obraze přímo na místě u kamery, toto řešení využívá metod počítačového vidění. Při implementaci je použito knihoven počítačového vidění projektu SimpleCV [49] pro skriptovací jazyk Python.

Tvar námi sledovaného objektu patří mezi jednodušší obrazce, jedná se o kruh. Výhodou je také znalost základní pozice sledovaného kruhu, která se nachází vždy na stejném místě obrazu po zaměření aparatury. Znalost pozice středu kruhu lze s výhodou použít ke zrychlení hledání v obraze tím, že omezíme oblast možného pohybu kruhu v obraze a zmenšíme tak plochu, kterou je nutné prohledat. S výhodou využijeme funkci pro detekci kruhových objektů v dostatečně velké části obrazu okolo základní pozice sledovaného kruhu. Hranice mezi kruhovým a nekruhovým objektem je dána parametrem „odchylka kruhovitosti“. Zvolili jsme hodnotu 35 % tak, aby nedocházelo k falešným detekcím a zároveň nebyly odmítány platné výsledky měření. V případě zamítnutí snímku z důvodu, že neobsahuje kruh, dojde

k automatickému uložení. Uložené snímky lze vyhodnotit ručně, aby se zjistil důvod zamítnutí snímku automatikou.



Obrázek 56 - Diagram měření vlastností paprsku

Zpracování obrazu se provádí na běžně dostupném jednodeskovém počítači s procesorem ARM. Algoritmus je schopen zpracovat cca 7 snímků za vteřinu. To odpovídá periodě 142 ms. Záznam s tak krátkou periodou je možné porovnávat i s údaji o větru. Mělo by tedy být možné detekovat vlivy nejen termických ale i větrných turbulencí. Vypočtené výsledky pozice a velikost měřeného kruhu jsou kopírovány na vzdálený server, kde jsou zpracovány a nahrány do databáze.



Obrázek 57 - Zařízení pro měření pohybu paprsku, dole vysílač, přijímač na věži

8.3 Hodnocení měření

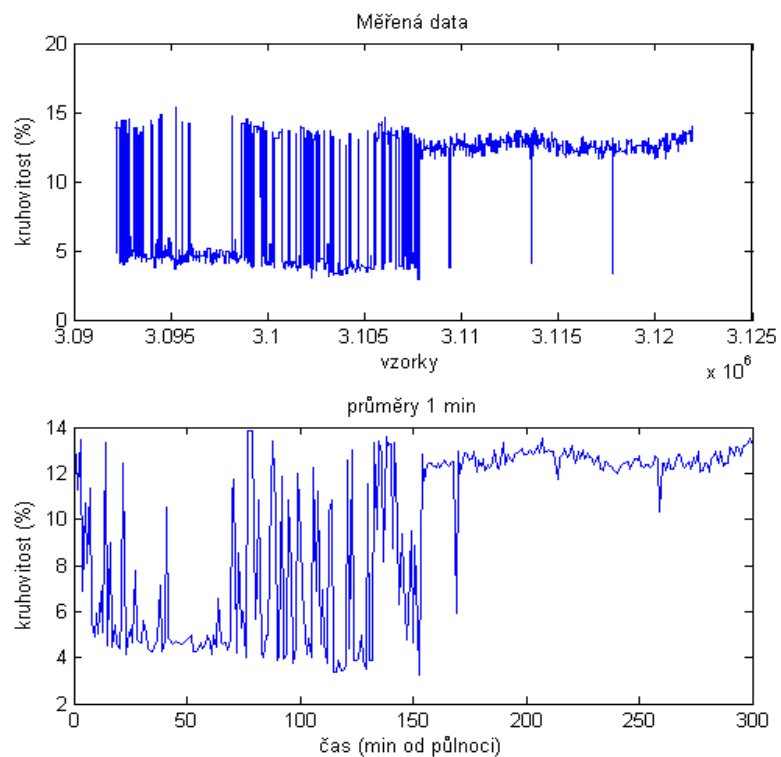
Z naměřených dat vyplynulo několik technických závěrů pro toto zařízení.

Jednak se ukázal nedostatek v podobě měření za slunečného dne. Velkou překážkou se staly odlesky od ploch relativně blízko vysílanému kuželu světla. Jedná se např. o dřevěnou konstrukci nebo třeba i posekaný trávník. Velikost odlesků těchto ploch byla naprosto neočekávána s ohledem na barvu materiálů. Efekt nechtěných odlesků by se dal omezit vhodným filtrem v optickém spektru na přijímací apertuře, případně využít řízené clony pro omezení množství světla vstupujícího do zařízení.

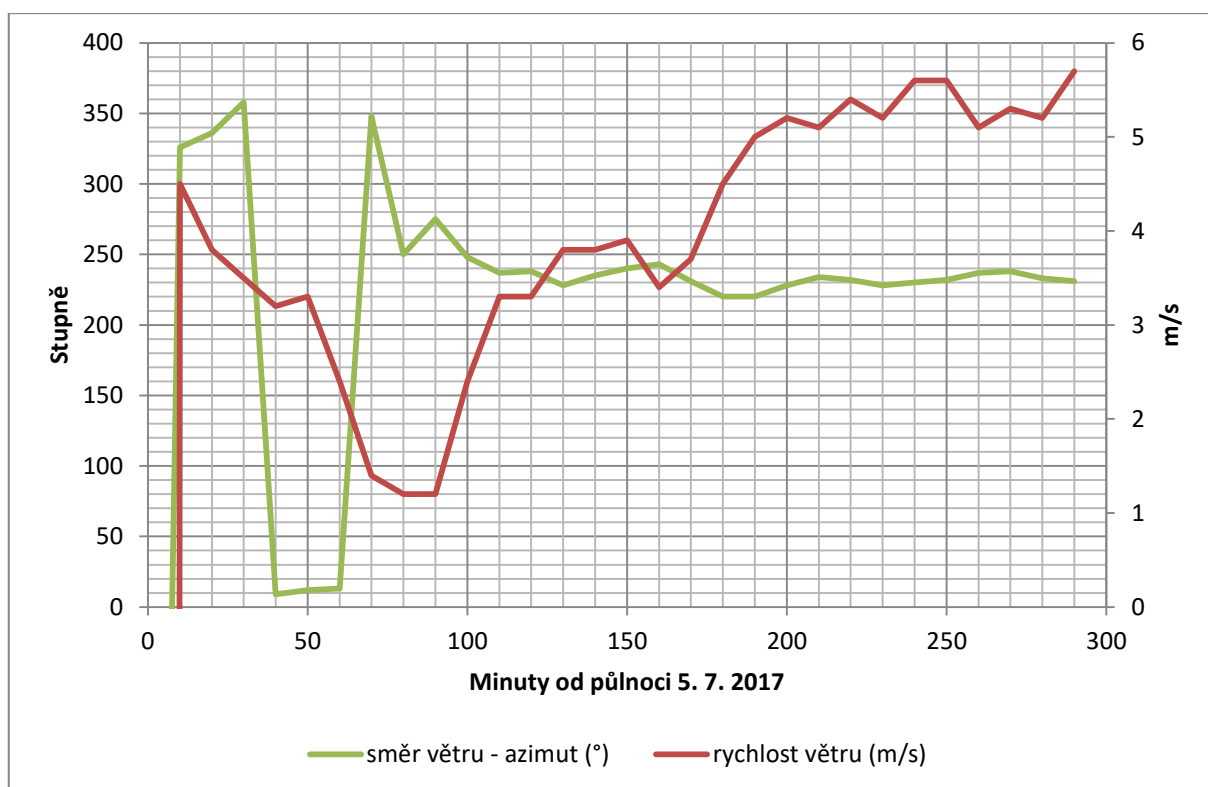
Dalším neočekávaným efektem ovlivňujícím měření se stalo automatické řízení zesílení uvnitř použité kamery. Tato funkce přizpůsobuje citlivost kamery světelným podmínkám scény. Následkem automatické korekce dochází v přechodových časech, kdy se snižuje/zvyšuje (ráno/večer) kontrast scény k nezanedbatelným změnám kontrastu měřeného objektu a tím změně plochy, která je měřena jako jeden z parametrů. Řešením by mohlo být použití řízené clony a kamery s fixním zesílením.

Měření probíhající v noci není poznamenáno vlivem korekce a vykazuje dobré výsledky. Hlavním parametrem, který sledujeme (a slouží také pro rozhodování o tvaru objektu) je odchylka kruhovitosti. Ta popisuje, jak moc se měřený tvar liší od kruhu Obrázek 58. Hranice rozhodnutí, že se jedná o kruh, je nastavena na 35%. Pak dochází k odmítnutí snímku při vyhodnocení a zaznamenání události ke zhodnocení člověkem.

Z výsledků našich měření plyne, že porovnáme-li směr a rychlost větru Obrázek 59 s grafem kruhovitosti, vidíme závislost na rychlosti i směru větru, kde rychlost větru má vliv na kruhovitost. Čím silnější vítr tím vyšší je odchylka od ideálního kruhu (%). Druhým zajímavým momentem je oblast 40. až 60. minuty, kdy je směr větru okolo azimutu 15°. V tomto místě je patrné snížení odchylky kruhovitosti na minimální hodnotu 5 %. Tento efekt bude způsoben poměrně slabým větrem 3 m/s a geometrickým uspořádáním spoje a observatoře, protože zde je spoj praktický ve větrném stínu budovy observatoře.

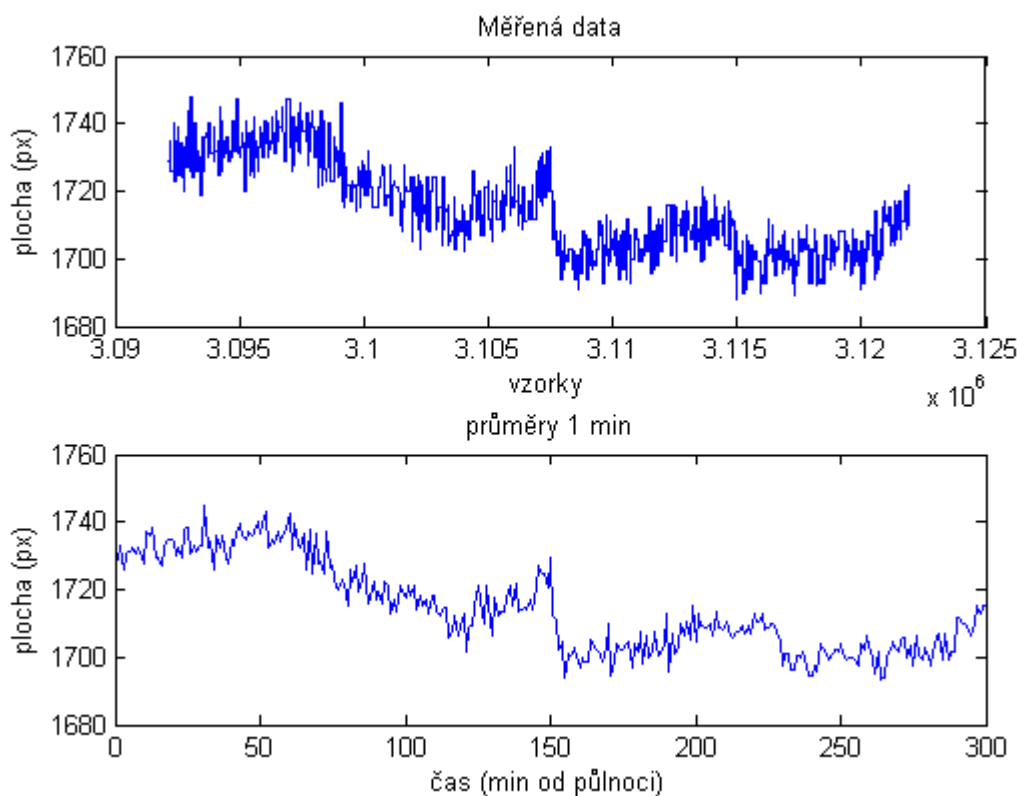


Obrázek 58 - Odchylka kruhovitosti, měřeno 5. 7. 2017 0 - 5 hod



Obrázek 59 - Graf rychlosti a směru větru 5. 7. 2017 0 - 5 hod

Při pohledu na měření plochy sledovaného kruhu obrázek dole je patrný pokles plochy po 150. minutě měření. To odpovídá zvýšení rychlosti větru. Obecně byla sledována menší naměřená plocha pro vyšší rychlosti větru, např. pro průměrné rychlosti větru 11,5 m/s se naměřená plocha pohybovala okolo 1470 pixelů. Závislost rychlosti větru na měřené ploše není podrobně vypracována, protože nejsou k dispozici dostatečně podrobná data o rychlosti větru s intervalem průměrování alespoň 1 minuta.

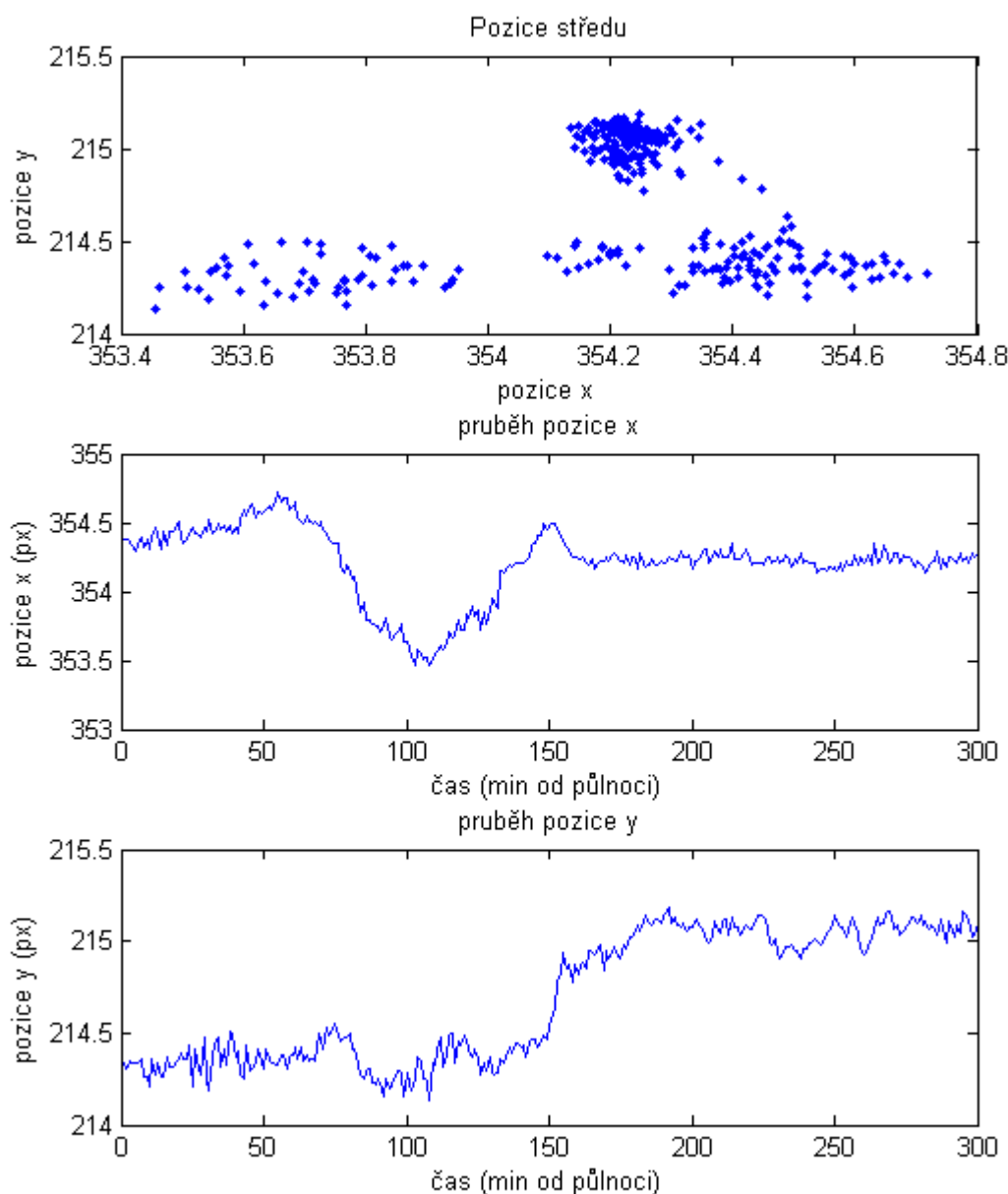


Obrázek 60 - Plocha kruhu, měřeno 5. 7. 2017 0 - 5 hod

Poměrně zajímavá je korelace odchylky kruhovitosti s měřenou plochou kruhu. Oba případy dobře zobrazují změnu rychlosti větru, která nastala v čase 150 minut po půlnoci, to odpovídá času 2:30 ráno.

Posledním měřeným parametrem, respektive dvojicí parametrů je pozice středu kruhu v obraze Obrázek 61. Zde je komplexnost vyhodnocení vyšší, částečně bude záviset na rozložení velikostí vírů, protože každá velikost vzhledem k průměru paprsku působí jinak. Větší průměry víru paprsek více odkloňují ze své cesty, zatím co menší a početnější víry budou paprsek spíše rozptylovat. Bude proto nutné nejprve dobře korelovat vliv rychlosti a směru větru a následně posuzovat vliv na pozici středu kruhu. Měřená událost je zajímavá i svým dopadem na pozici středu kruhu. Výsledky měření pozice y ukazují dobrou shodu s průběhem velikosti plochy, tudíž i odchylky kruhovitosti. Tento fakt svědčí o dopadu

rychlosti větru na y-ovou souřadnici. V případě druhé souřadnice (x) není vliv patrný na první pohled, zřejmě zde hraje roli vliv azimutu větru, který se plynule měnil z pozice 10° v 50té minutě na 230° v minutě 130té. Také zde bude hrát roli rychlost větru, kdy při menších rychlostech je pravděpodobnější tvorba větších víru, které ovlivňují více směr paprsku. Důkazem tohoto tvrzení je ustálení středu v okolí souřadnic [354,2 ; 215] pro hodnoty získané po 150té minutě, kdy foukal silnější vítr.



Obrázek 61 - Pozice středu kruhu, měřeno 5. 7. 2017 0 - 5 hod

8.4 Možná vylepšení zařízení

Představené zařízení jsme postavili jako demonstraci měření málo běžných vlivů na optický spoj. Teprve po vyhodnocení prvních dat se ukazuje možný potenciál a vlivy působící na toto zařízení. Ačkoliv měření v noci probíhá bez problému, možnost rozšíření měření do denních hodin by pomohla v určení korelací vlivů působících na útlum spoje přes den (např. vliv indexu lomu).

Možná vylepšení jsou například:

- Výměna optického zdroje LED za Laser – koherentní světlo umožňuje pozorovat více vlivů na optický svazek. Jde o vlivy, jako je ztráta prostorové koherence vlivem zpoždění části vlnoplochy záření v přenosovém kanále apod.
- Filtr optického záření – filtr typu pásmová propust v optickém spektru sloužící k odstranění vlivu okolního záření a odrazů.
- Snímač s nastavitelnou citlivostí – známá hodnota citlivosti přidá možnost měření rozložení intenzity uvnitř „kruhu“.
- Nastavitelná clona – možnost korigovat množství světla dopadajícího na snímač

9 ZÁVĚR

Tato práce je věnována rozboru přenosu optických bezkabelových spojů (OBS), především však vlivům působícím na LOS optické spoje ve venkovním prostředí. Protože je zde přenosovým prostředím sama atmosféra, je tato práce také věnována měření a získávání meteorologických dat z měření v terénu, jejich kvantifikaci a vyhodnocování.

V první části této práce jsme se seznámili s historií optických spojů, která sahá do 60-tých let 20. století a je úzce spjata s vynálezem laseru. Tento silný zdroj koherentního záření s velmi malou divergencí svazku umožnil konstruovat právě optické bezkabelové spoje s dosahem až desítek kilometrů v atmosféře a na miliony km ve vesmíru.

Jak bylo napsáno, přenosovým prostředím optického bezkabelového spoje je atmosféra mezi koncovými body A a B, které jej ohraničují. Atmosféra v takovém místě je ovlivněna lokálními podmínkami, jako jsou znečištění nebo meteorologické podmínky pro dané místo na Zemi. I přes odlišné lokální podmínky, které způsobují útlum v dané oblasti, jsou původem útlumu dva efekty. Za prvé je to absorpce záření na atomech, molekulách a aerosolech obsažených v atmosféře. Absorpce je dána vlastnostmi absorbující částice, tedy schopností přijmout vlnovou délku dopadajícího světla a zvýšit si tím svou energii. Tato část útlumu je velmi silně závislá na vlnové délce, přičemž ve spektru existují oblasti s nízkou hodnotou absorpce, které se nazývají přenosová okna. Pro optické spoje bez kabelů jsou nejvíce využívána optická okna v blízké infračervené oblasti, která odpovídají i přenosovým oknům skleněných optických vláken (850 nm, 1310 nm, 1550 nm). Výhoda plynoucí z této shody je zřejmá, snadno lze tedy přecházet z optického vlnovodu do volného prostoru a zpět. Druhá součást útlumu se nazývá rozptyl. Rozptyl nezapříčiňuje ztrátu energie jejím pohlcením, nýbrž dochází ke směrové redistribuci energie optického svazku do různých směrů, tím se snižuje množství energie, které lze detekovat na přijímači. Příčinou rozptylu jsou dešťové kapky, vločky sněhu, mlha, nebo i turbulentní proudění vzduchu. Typ rozptylu lze určit na základě výpočtu velikostního parametru Ω a to na Raileghův, Mie a geometrický rozptyl. Každý druh má své specifické vlastnosti a zařazení do dané kategorie závisí na poměru délky vlny a velikosti rozptylujícího objektu (např.: pro vlnovou délku 1550 nm nastává pro déšť geometrický rozptyl, mlha je Mie rozptyl).

Samostatnou kapitolu tvoří vzdušný rozptyl nebo lépe šíření optického svazku v atmosférických turbulencích. Turbulentní prostředí vzniká vlivem rychlosti a vnitřního odporu proudícího média přechodem z laminárního proudění na turbulentní, případně vlivem obtékání překážek v cestě proudění. Zvláštním případem je termické turbulentní proudění,

kteřé vzniká při stoupání teplejšího vzduchu vzhůru od zahřátého povrchu, do prostoru studenějšího vzduchu.

Turbulence zapřičiňuje nerovnoměrné rozložení teplot v objemu ve tvaru vírů, přičemž každý vír prochází cyklem změny velikosti s konečným spotřebem své energie přeměnou na teplo. Právě změny teplot způsobují změny indexu lomu vzduchu. Tyto náhodně velké a náhodně rozmístěné variace indexu lomu v prostoru vytváří nehomogenní prostředí pro šíření optického signálu. Ten je v takovém prostředí degradován hned několika způsoby, které se navíc mění podle převládající velikosti turbulentních vírů.

Charakterizaci OBS lze rozdělit do dvou částí podle místa, kde byla prováděna. Bylo tomu tak v laboratoři nebo ve volném prostoru v reálných podmínkách. Každé umístění umožňuje pozorovat a charakterizovat rozdílné efekty. Například laboratoř je jako stvořená pro testování za podmínek velmi husté mlhy. Právě mlha v laboratoři je diskutována v této práci a došlo k jejímu podrobnému proměření v širokém spektru vlnových délek pomocí optického spektrometru. Ukázalo se, že suchá mlha z glycerinové kapaliny je použitelná jako náhrada normální mlhy v oblasti vlnových délek 700 – 1000 nm, pro ostatní vlnové délky není spektrální charakteristika tohoto materiálu již vhodná. Mlha vyrobená z vody vykazuje velmi slabou závislost na vlnové délce, zároveň jsou na její spektrální charakteristice patrné zvýšené útlumy v oblasti absorpce vody (1350 – 1450 nm, okolo 1100 nm). Lze zde nalézt i poklesy útlumu v okolí vlnových délek 830 nm, 1300 nm, 1550 nm, které odpovídají propustnosti atmosféry a zároveň korelují s optickými okny vláknové optiky. Takto získané spektrální závislosti jsou oproštěné od lokálních podmínek. Především se jedná o absenci znečištění jak chemických sloučenin rozpustných/nerozpustných ve vodě, tak i pevných částic.

Oproti měření v laboratoři je měření ve volném prostoru, (tedy za normálních atmosférických podmínek) náročnější na vybavení. Lze používat pouze zařízení k tomuto účelu konstruovaná a odolná atmosférickým vlivům jako jsou střídání teplot, vlhkost, déšť, sníh a atmosférická elektřina (blesk). Popsané nároky na zařízení ztěžují konstrukci měřících zařízení a zpomalují testování nových postupů na OBS. Ostatně tyto nároky byly ověřeny i prakticky na konstruovaných zařízeních, kdy došlo ke zničení zařízení na měření indexu lomu vlivem silného větru a zároveň k jeho poškození vlivem vlhkosti a deště. Celé zařízení jsme přepracovali, ale po krátké době po nasazení, bylo poškozeno vlivem atmosférické elektřiny (blesku v blízkosti observatoře). I když bylo s touto eventualitou počítáno, došlo k poškození zařízení. Z toho důvodu jsme popsali výsledky z menšího počtu čidel, než byl původní záměr (6 čidel místo 13 čidel).

Pozorování na venkovním pracovišti Milešovka přinesla výsledky v oblasti útlumu OBS mlhou, nízkou oblačností, vlivem větru a turbulencí. Podívejme se popořadě na zmíněné výsledky.

Útlum mlhou je výrazným negativním činitelem pro časovou dostupnost optického spoje v podzimních, zimních a jarních měsících, kdy se hojně vyskytuje. Mlha snižuje dohlednost vlivem dodatečného rozptylu světla na částicích mlhy. Principem hodnocení dopadu mlhy na optický spoj je především správný výběr dat použitých pro analýzu. Důvodem je oddělení více různých vlivů působících na OBS současně. Zde jsme postupovali zprvu dle údajů jednoho dohledoměru, následně byly využívány dva dohledoměry. V důsledku důkladné filtrace a hodnocení dat útlumu mlhou jsme formulovali místně platný model pro vlnovou délku 830 nm rovnice (6.3). Místní odchylky tohoto modelu od generalizovaného modelu Kim se vyskytují v oblasti dohledností do 3000 m. V laboratoři však model Kim odpovídal útlumu čisté mlhy velmi dobře. Z toho lze usuzovat na vliv místních podmínek a to především působení chemických továren v nedalekých Lovosicích. Bylo již zmíněno, že na útlum mlhy mají vliv i nečistoty v ní obsažené.

Nízká oblačnost jako vliv na útlum optického spoje není úplně běžný případ. V našem případě byl tento efekt pozorován opakovaně, a proto jsme vyvinuli metodu pro odhalení tohoto efektu. Nízká oblačnost se vyznačuje výskytem vysokého útlumu při neodpovídající hodnotě dohlednosti. Z toho důvodu jsme instalovali druhý dohledoměr. Za pomoci dat ze dvou dohledoměrů a útlumu optického spoje jsme dopočítali výšku rozhraní nízké oblačnosti. Pokud je tedy tento klimatický úkaz zaznamenán, vstupuje tento podnět do filtrace dat o útlumu OBS.

Vliv větru na optický spoj je jako efekt patrný za podmínek vysoké dohlednosti. Je to způsobeno faktem, že útlum způsobený větrem nedosahuje takových hodnot útlumu jako například mlha či déšť. Oproti klasickému útlumu ale přináší vítr i další degradující vlivy na optický signál jako jsou scintilace, změna úhlu příchodu signálu a interference signálu se sebou samým. Z dlouhodobého měření 3D sonickým anemometrem byla za období 1 roku vypočtena hodnota turbulentní energie a porovnána s útlumem optického spoje. Toto porovnání dalo vzniknout vztahu (6.8), který popisuje vliv větru na optický signál. Zde je patrný rychlý nárůst útlumu spoje. Jakmile však dojde dosažení hodnoty turbulentní energie $6 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, dostaneme se do oblasti, kde velký přírůstek turbulentní energie znamená pouze malý nárůst útlumu.

Atmosférické turbulence vznikají různými způsoby, ať již je to přechodem z laminárního do turbulentního proudění nebo obtékáním překážek, popř. jako termické turbulence vlivem

ohřevu povrchu Sluncem. Mají všechny vliv na změnu homogenního prostředí klidné atmosféry, na prostředí plné vírů o různých velikostech. Každý vír svým pohybem spojeným s přeměnou energie na teplo vytváří místo s rozdílným indexem lomu. V takovém prostředí se šířící paprsek náhodně ohýbá a rozptyluje. Charakteristika takového prostředí však není jednoduchá, protože vše je v neustálém pohybu. Můžeme sledovat rychle se opakující krátkodobé poklesy signálu zvané scintilace nebo pomalejší změny přijímaného signálu způsobené ohybem světla od osy šíření. Z důvodů snahy kvantifikovat vlivy turbulencí jsme postavili měřicí přístroj na měření indexu lomu vzduchu. Ten pracuje na základě měřených veličin jako teploty, relativní vlhkosti a tlaku. Na základě změřených hodnot byl vyčíslen index lomu vzduchu v daný okamžik měření. Následně byl z něj vypočten strukturní index C_n^2 . Ten udává míru změny indexu lomu mezi dvěma body. Zde je tedy možné ze šesti bodů vyčíslit pět intervalů C_n^2 podél trasy optického spoje. V těchto oblastech lze hodnotit míru aktivity strukturního indexu (myšleno velikost hodnoty), která se mění v čase oproti ostatním oblastem. Ze strukturního indexu byl vypočten také útlum podle Rytova vztahu. Ukázalo se, že pro podmínky panující na Milešovce lépe odpovídá určení útlumu z pěti oblastí podél trasy, než pouze ze dvou koncových bodů. Toto je dáno velmi silnou aktivitou C_n^2 v první oblasti okolo věže. Určování útlumu pouze ze dvou bodů velmi nadhodnocovalo útlum spoje vlivem turbulencí a nelze to zde doporučit.

Vraťme se zpět k indexu lomu. Měření ukázalo, že je velmi závislý na teplotě, tudíž prochází denním cyklem změn (podle změny teploty). Z vypočteného indexu lomu jsme sestavili denní chod indexu lomu. Z něj je patrný průběh, který začíná na vyšších hodnotách a během dne (jak se teplota zvyšuje) index lomu pomalu klesá ke svému minimu. V odpoledních hodinách hodnota indexu lomu s ochlazováním vzduchu opět roste k nočním hodnotám.

Snaha zachytit a změřit vliv turbulencí, nás přivedla ke konstrukci zařízení, které by bylo schopné zachytit pohyb paprsku světla vlivem turbulencí. Princip zařízení je poměrně jednoduchý, využívá snímání velikost bodu a jeho pohyb na stínítku. Za účelem automatizace byly nasazeny metody strojového vidění. Zařízení bylo inspirováno podobným zařízením popsáním v [21], kde autoři zachycovali přímo rozložení optického signálu na apertuře přijímače.

Za svůj největší přínos považuji následující body. Vytvoření vlastního empirického modelu útlumu mlhy na optickém spoji [vztah (6.3)] a s tím spojené úkony filtrace a prahování naměřených dat. Dále pak model závislosti útlumu optického spoje na turbulentní energii [vztah (6.8)]. Jako velmi přínosný hodnotím také svůj postup výroby mlhy z vodní

páry v laboratoři, který mi umožnil změřit spektrální závislost útlumu skutečné mlhy v rozsahu vlnových délek 600 nm až 1600 nm se spektrálním rozlišením 2,4 nm. Z naměřených výsledků spektrálního útlumu jsme společně s týmem vytvořili model popisující spektrální závislost útlumu mlhy [vztahy (4.17)(4.18)]. V neposlední řadě je třeba zmínit přístroj vlastní konstrukce na měření indexu lomu vzduch a strukturního indexu v šesti bodech. Jako druhý přípravek jsem zhotovil a s kladným výsledkem vyzkoušel, demonstrační přístroj na detekci pohybu paprsku vlivem atmosférických turbulencí.

Podle mého názoru jsem cíle disertační práce splnil.

10 BIBLIOGRAFIE

1. **M. S. Awan, L. C. Horwath, S. S. Muhammad, E. Leitgeb, F. Nadeem, and M. S. Khan.** Characterization of fog and snow attenuations for free-space optical propagation. *Journal of Communications*. Vol. 4, 2009.
2. **S. S. Muhammad, P. Kohldorfer and E. Leitgeb.** *Channel modeling for terrestrial free space optical links*. místo neznámé : Proceedings of 2005 7th International Conference Transparent Optical Networks, 2005. doi: 10.1109/ICTON.2005.1505832.
3. **S. S. Muhammad, B. Flecker, E. Leitgeb, and M. Gebhart.** Characterization of fog attenuation in terrestrial free space links. *Journal of Optical Engineering*. Vol. 46, 2007.
4. **E. Leitgeb, et al.** *Analysis and evaluation of optimum wavelengths for free-space optical transceivers*. Munich : 2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks, 2010. doi: 10.1109/ICTON.2010.5549009.
5. **L. Dordova, O. Wilfert.** *Free space optical link range determination on the basis of meteorological visibility*. Bratislava : 19th International Conference Radioelektronika, 2009. 10.1109/RADIOELEK.2009.5158794.
6. **Wilfert, P. Krivak and O.** *Long Range Free Space Optical Link*. Brno : 2007 17th International Conference Radioelektronika, 2007. doi: 10.1109/RADIOELEK.2007.371682.
7. **M. S. Awan, et al.** *Distribution function for continental and maritime fog environments for optical wireless communication*. Graz : 2008 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2008. doi: 10.1109/CSNDSP.2008.4610728.
8. **F. Nadeem, T Javorník, E. Leitgeb, V. Kvicera, G. Kandus.** Continental Fog Attenuation Empirical Relationship . *Radio*. 19, 2010, Sv. 4.
9. **M. Grabner, V. Kvicera.** The wavelength dependent model of extinction in fog and hase for free space optical communication. *Journal of Optics Express*. 2011, Sv. 4, 19.
10. **C. P. Colvero, M. C. R. Cordeiro and J. P. von der Weid.** *New proposal for real time measurements of visibility and signal levels in free space optical systems*. místo neznámé : SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics, 2005. stránky 344-347. doi: 10.1109/IMOC.2005.1580039.

11. **M. C. R. Cordeiro, C. P. Colvero and J. P. von der Weid.** *Experimental comparison of scintillation effects in far and near infrared wavelengths in FSO systems.* místo neznámé : SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics, 2005. stránky 393-395. doi: 10.1109/IMOC.2005.1580026.
12. **C. P. Colvero, M. C. R. Cordeiro and J. P. von der Weid.** Real-time measurements of visibility and transmission in far-, mid- and near-IR free space optical links. *Electronics Letters*. 41, 2005, Sv. 10, Květen.
13. **C. P. Colvero, M. C. R. Cordeiro, J. P. von der Weid.** *FSO systems: Rain, drizzle, fog and haze attenuation at different optical windows propagation.* Brazil : SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. stránky 563-568. doi: 10.1109/IMOC.2007.4404328.
14. **P. Corrigan, R. Martini, E. A. Whittaker and C. Bethea.** *Mid-infrared lasers and the Kruse-Mie theorem in fog for free-space optical communication applications.* San Jose : 2008 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science, 2008. stránky 1-2. doi: 10.1109/CLEO.2008.4551899.
15. **X. Tang, et al.** *Free-space optical communication employing polarization shift keying coherent modulation in atmospheric turbulence channel.* Newcastle upon Tyne : 2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010), 2010.
16. **R. Paudel, Z. Ghassemlooy, H. Le Minh, S. Rajbhandari and B. Livingstone.** *Investigation of turbulence effect on the free space optical link for ground-to-train communications.* Graz : Proceedings of the 11th International Conference on Telecommunications, 2011.
17. **Yimeng Xing, M. Zhang, D. Han and Z. Ghassemlooy.** *Experimental study of a 2×2 MIMO scheme for ultraviolet communications.* Hangzhou : 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 2016. doi: 10.1109/ICOON.2016.7875595.
18. **Reiersen, Joseph Lee.** *ANALYSIS OF ATMOSPHERIC TURBULENCE EFFECTS ON LASER BEAM PROPAGATION USING MULTI-WAVELENGTH LASER BEACONS.* Dayton : UNIVERSITY OF DAYTON, 2011.

19. **Ricklin Jennifer C., Hammel Stephen M., Eaton Frank D., Lachinova Svetlana L.** Atmospheric channel effects on free-space laser communication. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*. 3, 2006, Sv. 2.
20. **X. Zhao, H. Jiang and H. Zheng.** *Fiber coupling efficiency through turbulence medium for long and short exposures*. Changchun : 2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics, 2012. stránky 334-336. doi: 10.1109/ICoOM.2012.6316285.
21. **D. Jiang, Deng Ke, Qin Kaiyu and X. Li.** *Laser beam wander monitoring with large aperture for terrestrial free space optical communication*. Chengdu : 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2011.
22. **Kartalopoulos, Stamatios V.** *FREE SPACE OPTICAL NETWORKS for Ultra-Broad Band Services*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2011. ISBN: 978-1-118-10423-1.
23. **Arnon, Shlomi, a další, a další.** *Advanced Optical Wireless Communication Systems*. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. ISBN: 978-0-521-19787-8.
24. **Lambert, Stephen G. a Casey, William L.** *Laser Communications in Space*. Norwood : Artech House, Inc., 1995. ISBN: 0-89006-722-8.
25. **ITU-R.** Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links. *Recommendation ITU-R P.1818-1*. 2012.
26. **Pruppacher R., Klett J.** *Microphysics of Clouds and Precipitation* . místo neznámé : D. Reidel Publishing Company, 1980.
27. **Bažant, Lubor.** *Vliv deště na přenos signálu v terestriálních spojích pro kmitočtové pásmo 37GHZ*. Praha : Disertační práce, 1999.
28. **Carbonneau, T., Wisley D.** Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded market place. *SPIE Conference on Optical Wireless Communications*. 1998.
29. **Řezáčová, D. et al.** *Fyzika oblaků a srážek*. místo neznámé : Academia, 2007. ISBN 978-80-200-1505-1.
30. **Muhammad, Sajid Sheikh, Flecker, Benno a Gebhart, Erich Leitgeb and Michael.** Characterization of fog attenuation in terrestrial free space optical links. *Optical Engeneering*. 20. june 2007.
31. **M. Ijaz, Z. Ghassemlooy, J. Perez, V. Brazda and O. Fiser.** Enhancing the Atmospheric Visibility and Fog Attenuation Using a Controlled FSO Channel. *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 25, 1. July 2013, Sv. no. 13, stránky 1262-1265.

32. **AWAN, MUHAMMAD SALEEM.** *Statistical-Dynamical Channel Modeling of Outdoor OpticalWireless Links*. Graz : TU Graz, 2010.
33. **ČMeS, Terminologická skupina.** Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS). *Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)*. [Online] Česká meteorologická společnost (ČMeS), 6 2017. <http://slovník.cmes.cz/>.
34. **Paul W. Kruse, Laurence D. McGlauchlin, Richmond B. McQuistan.** *Elements of infrared technology: generation, transmission, and detection*. místo neznámé : J. Wiley and sons, 1962. 0471508861.
35. **Naboulsi, Maher Al, a další, a další.** Measured and predicted light attenuation in dense coastal upslope fog at 650, 850, and 950nm for free-space optics applications. *Optical Engeneering*. 47, 2008.
36. **Muhamad Ijaz, Zabih Ghassemlooy, Joaquin Perez, Jiri Pesek, Ondrej Fiser.** Modeling of Fog and Smoke Attenuation in Free Space Optical Communications Link under Controlled Laboratory Conditions. *Journal of Lightwave Technology*. 2013, Sv. 11, 31.
37. **O., Bendnář J. Zikmunda.** *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. Praha : Academia, 1985. ISBN 21-070-85.
38. **Andrews, Larry C.** *Filed Guide to Atmospheric Optics*. Bellingham, Washington : SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004.
39. **Barčík, Peter.** *OPTIMAL INTENSITY DISTRIBUTION IN A LASER BEAM*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2017.
40. **Edlén, Bengt.** The Refractive Index of Air. *Metrologia*. 2, 1966, Sv. 2.
41. **Zimmerman, Jack A. Stone and Jay H.** Index of Refraction of Air. *emtoolbox.nist.gov*. [Online] 28. 12 2011. [Citace: 6. 5 2017.] <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp>.
42. **Ciddor, Philip E.** Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Appl. Opt.* 1996, 35, stránky 1566-1573.
43. **V. Brázda, O. Fišer.** *First results from measurement of free space optical link in clouds*. Bratislava : 2014 24th International Conference Radioelektronika, 2014. 10.1109/Radioelek.2014.6828444.
44. **Stull, R.B.** *Boundary layer meteorology*. místo neznámé : Kluwer Academic Publisher, 1998. ISBN 90-277-2768-6.
45. **ITU-R.** The Radio Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data. *ITU-R P.453-7*. 1999.

46. **Engert, Karl-Hans Gunther.** *The propagation of liight in a turbulent atmosphere.* Portland : Portland State University, 1970.
47. **meteogram.cz.** V kolik se rozednívá a stmívá? <http://www.meteogram.cz/vychod-zapad-slunce/>. [Online] [Citace: 10. 09 2017.]
48. **Fišer Ondřej, Brázda Vladimír, Rejfek Luboš.** *Two ways to consider atmospheric turbulences in FSO propagation.* Bratislava : International Conference Radioelektronika, 2014. doi: 10.1109/Radioelek.2014.6828447.
49. **Sight Machine, Inc.** SimpleCV. <http://simplecv.org/>. [Online]
50. **Chadha, Devi.** *Terrestrial Wireless Optical Communication.* místo neznámé : The McGraw-Hill Companies, Inc., 2013. ISBN: 978-0-07-181875-9.
51. **Mathar, Richard J.** Refractive index of humid air in the infrared: model fits. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics.* 2007, Sv. 5, 9.
52. **Gunn, R., Kinzer, D. G.** The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology.* No. 6, 1949.
53. **Kim, I.I., McArthur, B. a E., Korevaar.** Comparison of Laser Beam Propagation at 785nm and 1550nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications. *Optical Wireless Communications.* Vol. 4214, 2001, Sv. III.
54. **M. Al Naboulsi, H. Sizun, F. de Fornel.** Fog attenuation prediction for optical and infrared waves. *Journal of SPIE, Optical Engineering.* 43, 2004.
55. **Thomas, Michael E.** *Optical Propagation in Linear Media: Atmospheric Gases and Particles, Solid-State Components, and Water.* OXFORD : OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2006.
56. **E. Ferdinandov, K. dimitrov, A. Dandarov, and I. Bakalski.** A general model of the atmospheric scattering in the wavelength interval 300 - 1100nm. *Journal of Radio Engineering.* Vol. 18, 2009.
57. **Fišer, Ondřej.** *Interakce elektromagnetického pole s dešťovým prostředím se zřetelem na predikci útlumu deštěm družicových spojů v pásmech nad 10 GHz.* Praha : disertační práce, 1986.
58. **Abdulsalam Alkholidi, Khalil Altowij.** *Asia, Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications in Western.* místo neznámé : InTech, 2012. DOI: 10.5772/35186.
59. **Fiser, Ondrej, Brazda, Vladimír a Schejbal, Vladimír.** *Tests of wind parameters as predictors of free space optic link attenuation.* Pardubice : 2015 Conference on Microwave Techniques (COMITE), 2015. 10.1109/COMITE.2015.7120329.

11 PŘÍLOHY

PŘÍLOHA A SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	99
--	-----------

- impaktované publikace:

1. **J. Pesek, O. Fiser, J. Svoboda, V. Schejbal**, „Modeling of 830 nm FSO Link Attenuation in Fog or Wind Turbulence“, *RADIOENGINEERING*, vol. 19, no. 2, str. 237-241, 2010
2. **M. Ijaz, Z. Ghassemlooy, J. Pesek, O. Fiser, H. Le Minh and E. Bentley**, "Modeling of Fog and Smoke Attenuation in Free Space Optical Communications Link Under Controlled Laboratory Conditions," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 11, pp. 1720-1726, June1, 2013. doi: 10.1109/JLT.2013.2257683
3. **L. Rejfek, J. Pesek and V. Brazda**, "Targets detection for FMICW radar," *2015 25th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, Pardubice, 2015, pp. 160-163. doi: 10.1109/RADIOELEK.2015.7128995

- sborníky

4. **O. Fiser, J. Svoboda, J. Fisak, Z. Chladova, J. Pesek**, „Wind parameters influencing FSO attenuation“, *Příspěvek na 2. zasedání Řídícího výboru mezinárodního projektu COST IC802*, Toulouse, Francie, sborník publikován na webu., str. 1-6, 2009
5. **J. Pešek**, „Příspěvek k řešení problematiky útlumu na OBS, *Sborník k semináři doktorandů ČVUT a VUT na FEKT VUT Brno*, Brno, 2009
6. **O. Fiser, J. Svoboda, J. Pesek, V. Schejbal**, „FSO link attenuation versus visibility or wind turbulent energy“, *Příspěvek na 3. zasedání Řídícího výboru mezinárodního projektu COST IC802*, Atény, Řecko, sborník publikován na webu., str. 1-4, 2010
7. **J. Pešek**, „Systém pro sběr meteorologických dat a útlumu optického spoje na Milešovce“, *11. Seminář DFJP UPCE o šíření vln „Šíření optického signálu v atmosféře“*, UPCE Pardubice, publikováno na CD, 2010
8. **Z. Chládová, O. Fišer, J. Svoboda, J. Fišák, J. Pešek, V. Brázda**, "Impact of Fog and Wind on FSO Link Attenuation - Quick Experimental Results." *1st International Workshop Measurements and Models for the Propagation Channel Characterisation Proceedings*, Centre for Scientific Culture "Ettore Majorana", Erice, Italy, 2010
9. **J. Pešek, O. Fišer**, “Research of Atmospheric Structure Index Impact on FSO Link Attenuation”, *Příspěvek na zasedání Řídícího výboru mezinárodního projektu COST IC0802*, Erice Itálie, 2010

10. **V. Brazda, O. Fiser, P. Pesice and J. Pesek**, "Combination of two visibility sensors to predict fog attenuation on FSO links," *Proceedings of the 11th International Conference on Telecommunications*, Graz, pp. 199-202, 2011
11. **O. Fiser, J. Svoboda, Z. Chladova, V. Schejbal, J. Pesek**, "FSO link attenuation measurement and modelling on Mílesovka hill," *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Rome, 2011, pp. 2518-2521.
12. **J. Pesek and O. Fiser**, "Research of refractive index impact on dual wavelength FSO link attenuation," *2011 International Conference on Applied Electronics*, Pilsen, 2011, pp. 1-3.
13. **J. Pesek, M. Ijaz, Z. Ghassemlooy, O. Fiser and S. Rajbhandari**, "Measuring the fog attenuation in an indoor free space optical laboratory chamber," *2012 International Conference on Applied Electronics*, Pilsen, 2012, pp. 203-206.
14. **J. Pesek and O. Fiser**, "Automatically low clouds or fog detection, based on two visibility meters and FSO," *2013 Conference on Microwave Techniques (COMITE)*, Pardubice, 2013, pp. 83-85. doi: 10.1109/COMITE.2013.6545048
15. **L. Rejfeš, J. Pesek, V. Brazda, O. Fiser**, "Distrometer based on measurement of fall velocity," *2014 24th International Conference Radioelektronika*, Bratislava, 2014, pp. 1-4. doi: 10.1109/Radioelek.2014.6828453
16. **O. Fišer, V. Brázda, J. Pešek, L. Rejfeš**, "Šíření a odraz rádiových vln od ionosféry", *Šíření vln a vliv ionosféry 15. Seminář*, Pardubice, Univerzita Pardubice, 2014, ISBN 978-80-7395-785-8.
17. **O. Fišer, V. Brázda, J. Pešek, L. Rejfeš**, "Historie výzkumu šíření vln na drahách družicových spojů", *seminář DFJP UPCE "ŠÍŘENÍ VLN NA SPOJÍCH DRUŽICE-ZEMĚ"*, Pardubice, Univerzita Pardubice, 2015
18. **O. Fišer, V. Brázda, J. Pešek, L. Rejfeš**, "Současné poznatky a experimentální výzkum šíření vln z družic", *seminář DFJP UPCE "ŠÍŘENÍ VLN NA SPOJÍCH DRUŽICE-ZEMĚ"*, Pardubice, 2015
19. **V. Pek, J. Pešek, V. Brázda, L. Rejfeš, O. Fišer ml.**, "Rozptyl elektromagnetických vln na dešťových a oblačných kapkách", *17. Seminář o šíření elektromagnetických vln DFJP UPCE „Rozptyl vln na objektech, využití v radarové technice a radiokomunikacích“*, Pardubice, 2016
20. **O. Fišer, V. Brázda, L. Rejfeš, J. Pešek**, "Detailní analýza útlumu deštěm v pásmu cm a mm vln", *Seminář DFJP Šíření vln v atmosféře 2013*, Pardubice, 2013

- ostatní

21. **J. Pešek**, “Propagation on FSO links“, *Zpráva STSM na zasedání Řídícího výboru Mezinárodního projektu COST IC0802*, Graz, Rakousko, 2011
22. **V. Mattioli, O. Fišer, V. Kvičera, M. Grábner, P. Pešice, Z. Chladová, V. Brazda, L. Rejček, C. Riva, M. C. Riera, J. Pesek**, „Kapitola "Meteorological Measurements"“ *v Závěrečné zprávě projektu COST IC08021*, 2011
23. **O. Fišer, V. Brázda, J. Pešek, L. Rejček**, Zařízení pro monitorování a záznam charakteristik optických spojů, FEI, UPCE, 2012

- software

24. **J. Pešek**, Automatické hledání prahu útlumu FSO spoje, software, FEI UPCE 2010
25. **J. Pešek**, Sledování paprsku světla v dešťové kapce, software, FEI UPCE 2010