

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Moderní metody výzkumu atmosféry pro modelování šíření optických a rádiových vln

Ing. Vladimír Brázda

Disertační práce

2018

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 18. 6. 2018

Ing. Vladimír Brázda

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě chci vyjádřit vděčnost všem, kteří mě podporovali na mé cestě studiem a mají tak na předkládané práci nemalý podíl.

V první řadě to jsou mí rodiče, bez jejichž víry, trpělivosti a dobře mířených rad, bych daleko nedošel. Díky, že jste mi ukázali tu správnou cestu.

Obrovský dík patří Dr. Ondřeji Fišerovi za skvělou kamarádkou spolupráci během celého mého studia a za možnost věnovat se tak zajímavému a progresivnímu tématu.

Děkuji též kolegům z ČMI za poskytnutí dat, které významnou měrou přispěly k dokončení práce.

ANOTACE

Práce je věnována studiu vlivu meteorologických jevů na útlum signálu optického bezkabelového spoje. Zaměřuje se podrobněji především na útlum vlivem deště a mlhy, kde analyzuje stávající aproximativní modely a zkoumá dané meteorologické jevy do hloubky za pomoci spektra velikosti kapek. V práci jsou formulovány vlastní matematické modely a metody pro stanovení měrného útlumu optického signálu ve zhoršených atmosférických podmínkách.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optický bezkabelový spoj, měrný útlum, dohlednost, intenzita srážek

TITLE

Modern methods of atmospheric research for modeling of the propagation of optical and radio waves

ANNOTATION

The work is devoted to the study of influence of meteorological phenomena on the signal attenuation of the free space optical link. It focuses in particular on rain and fog, where it analyzes existing approximate models and examines the meteorological phenomena in depth using the drop size distribution. Own mathematical models and methods for determining the specific attenuation of the optical signal in real atmospheric conditions are formulated in the thesis.

KEYWORDS

Free space optics, specific attenuation, visibility, rain rate

OBSAH

0	ÚVOD DO PROBLEMATIKY ŠÍŘENÍ OPTICKÝCH VLN V ATMOSFÉŘE	14
1	PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	17
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A METODIKA JEJICH ŘEŠENÍ	19
3	TEORETICKÁ ČÁST	21
3.1	VÝKONOVÁ BILANCE OBS	21
3.2	PŘESNÉ MODELOVÁNÍ ÚTLUMU OPTICKÉHO SIGNÁLU	22
3.2.1	<i>Extinkční koeficient Q_{ext}</i>	22
3.2.2	<i>Výpočet Q_{ext}</i>	24
3.3	VLIV DEŠTĚ NA ÚTLUM OBS	28
3.4	TECHNOLOGIE MĚŘENÍ SRÁŽEK	28
3.4.1	<i>Intenzita srážek a její měření</i>	29
3.4.2	<i>Měření spektra velikosti dešťových kapek</i>	31
3.5	SPEKTRUM VELIKOSTI KAPEK DEŠTĚ	35
3.6	VÝPOČET ÚTLUMU DEŠTĚM	36
3.7	SIMULACE ÚTLUMU DEŠTĚM	37
3.8	VLIV MLHY NA ÚTLUM OBS	39
3.8.1	<i>Tvorba mlh a jejich rozdělení</i>	39
3.8.2	<i>Dohlednost</i>	40
3.8.3	<i>Měření dohlednosti</i>	40
3.8.4	<i>Měření dohlednosti kamerou</i>	41
3.8.5	<i>Model měrného útlumu s použitím dohlednosti</i>	42
3.8.6	<i>Spektrum kapek mlhy</i>	46
3.8.7	<i>Měření spektra mlžných kapek</i>	47
3.9	ŠÍŘENÍ OPTICKÉHO SIGNÁLU OBLAKY	49
3.9.1	<i>Spektrum oblačných kapek</i>	50
4	PRAKTICKÁ ČÁST	52
4.1	EXPERIMENTÁLNÍ PRACOVÍŠTĚ	52
4.1.1	<i>Meteorologická observatoř na Milešovce</i>	52
4.1.2	<i>Experimentální spoj ČMI v Praze</i>	55
4.2	DLOUHODOBÉ STATISTIKY NAMĚŘENÉHO ÚTLUMU OBS	55
4.2.1	<i>Porovnání měrného útlumu na dvou vlnových délkách</i>	55
4.2.2	<i>Měrný útlum v závislosti na intenzitě srážek</i>	58
4.2.3	<i>Měrný útlum v závislosti na dohlednosti</i>	59
4.3	DALŠÍ JEVY, KTERÉ MAJÍ VLIV NA POHOTOVOST SPOJE	65
4.3.1	<i>Vliv Slunce</i>	65
4.3.2	<i>Námraza</i>	66
4.4	MĚŘENÍ DOHLEDNOSTI KAMEROU NA MILEŠOVCE	67

4.4.1	<i>Výsledky měření</i>	69
4.5	POROVNÁNÍ PŘESNÉHO A APROXIMATIVNÍHO MODELOVÁNÍ ÚTLUMU DEŠTĚM	72
4.5.1	<i>Intenzita srážek z distrometru a srážkoměru</i>	73
4.5.2	<i>Model útlumu OBS deštěm z intenzity srážek</i>	74
4.6	ZPŘESNĚNÍ PREDIKCE MĚRNÉHO ÚTLUMU V MLZE	81
4.6.1	<i>Metoda pro stanovení dvou parametrů DSD</i>	81
4.6.2	<i>Metoda pro stanovení tří parametrů DSD</i>	83
5	ZÁVĚR	96
	SEZNAM LITERATURY	101
	SEZNAM ODBORNÝCH PUBLIKACÍ AUTORA	107

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Reálná část indexu lomu vody v závislosti na vlnové délce	24
Obrázek 2 - Imaginární část indexu lomu vody v závislosti na vlnové délce	24
Obrázek 3 - Extinkční koeficient	25
Obrázek 4 - Extinkční koeficient rozdělený do tří oblastí	26
Obrázek 5 - Rozptyl v Rayleighově a Mieově oblasti (Nave, 2018)	27
Obrázek 6 - Váhový srážkoměr MRW500 firmy Meteoservis (Meteoservis, 2015).....	29
Obrázek 7 - Princip člunkového srážkoměru (Sunjray Infosystems, 2018)	30
Obrázek 8 - Metoda výpočtu intenzity srážek z dat člunkového srážkoměru (Fišer, 2009).....	31
Obrázek 9 - Princip funkce 2D Video-distrometru (Joanneum Research, 2010)	32
Obrázek 10 - Kroupa naměřená 15. 8. 2010 v 21:14. $D=14.5$ mm, pádová rychlost 17,1 m/s.	33
Obrázek 11 - Zploštělá kapka o ekv. průměru 5,4 mm, pádová rychlost 8,2 m/s, datum 15. 8. 2010 v 21:18	33
Obrázek 12 - Distrometr Parsivel (OTT Messtechnik, 2004).....	34
Obrázek 13 - Princip funkce distrometru Parsivel (OTT Messtechnik, 2004)	34
Obrázek 14 - Princip snímače Vaisala RAINCAP (Vaisala, 2014).....	35
Obrázek 15 - Měrný útlum deštěm v závislosti na vlnové délce. Parametrem je intenzita srážek. Svislé čáry vymezují optické spektrum 550 nm – 1550 nm.....	38
Obrázek 16 - Vzorce pro měrný útlum optického signálu v závislosti na intenzitě srážek	38
Obrázek 17 - Dohledoměr PWD-21 umístěný na Milešovce	40
Obrázek 18 - Porovnání naměřeného útlumu v mlze s Kimovým modelem při $V = 357$ m (Ijaz, 2013b).....	43
Obrázek 19 - Porovnání naměřeného útlumu v mlze s Kimovým modelem při $V = 785$ m (Ijaz, 2013b).....	43
Obrázek 20 - Propustnost atmosféry vlivem molekulární absorpce (ITU-R, 2008).....	44
Obrázek 21 - Porovnání teoretických modelů s experimentálním měřením v Praze na ČMI, vlnová délka 830 nm. Křivky “advection” a “convection” jsou dva typy modelů Al Naboulsi (Grábner, 2010).....	44

Obrázek 22 - Empirické vzorce pro měrný útlum OBS na vlnové délce 830 nm z dohlednosti na základě dat z ČMI v Praze, modře je vyznačen model (3.34) (Grábner, 2010).....	45
Obrázek 23 - Spektrum kapek mlhy dle ITU-R (2008)	46
Obrázek 24 - Princip metody měření velikosti aerosolů přístrojem APS (TSI Inc., 2014)	47
Obrázek 25 - Přístroj APS (TSI Inc., 2014).....	48
Obrázek 26 - Ukázka naměřených spekter kapek na Milešovce dne 19. srpna 2013.....	48
Obrázek 27 - Měrný útlum optického signálu v jednotlivých typech oblaků s průměrnými spektry (Capsoni, 2012).....	51
Obrázek 28 - Experimentální optický bezdrátový spoj ATMO TL - 02_DUAL – vlevo vysílač, vpravo přijímač. (Kvíčala, 2009).....	53
Obrázek 29 - Schéma měřicího pracoviště na Milešovce.....	53
Obrázek 30 - Experimentální pracoviště na Milešovce	54
Obrázek 31 - Hustota pravděpodobnosti útlumu na obou vlnových délkách.....	56
Obrázek 32 - Distribuční funkce útlumu na obou vlnových délkách	56
Obrázek 33 - Porovnání časového chodu měrného útlumu na dvou vlnových délkách	57
Obrázek 34 - Porovnání časového chodu měrného útlumu na dvou vlnových délkách	57
Obrázek 35 - Konvektivní déšť 3. června 2009	58
Obrázek 36 - Průměrovaný bodový graf závislosti naměřeného měrného útlumu na intenzitě srážek	59
Obrázek 37 - Příklad oblačné události – časový chod měrného útlumu naměřeného na vlnové délce 1550 nm a teoretických útlumů spočtených z dohledností Kimovým vzorcem.....	59
Obrázek 38 - Příklad oblačné události – časový chod měrného útlumu naměřeného na vlnové délce 1550 nm a teoretických útlumů spočtených z dohledností Kimovým vzorcem.....	60
Obrázek 39 - Nehomogenita dohlednosti naměřená 20. prosince 2012	61
Obrázek 40 - Bodový graf naměřeného útlumu na kanálu 1550 nm v závislosti na dohlednosti – pouze homogenní podmínky.....	62
Obrázek 41 - Detail bodového grafu naměřeného útlumu na kanálu 830 nm v závislosti na dohlednosti – pouze homogenní podmínky	62

Obrázek 42 - Odvození parametrů empirického modelu útlumu na kanále 830 nm na Milešovce.....	63
Obrázek 43 - Odvození parametrů empirického modelu útlumu optického signálu na kanále 1550 nm na Milešovce.....	63
Obrázek 44 - Porovnání aproximativních modelů z dohlednosti	64
Obrázek 45 - Vliv slunce na funkci optického spoje	65
Obrázek 46 - Závislost naměřeného měrného útlumu (1550 nm) na dohlednosti v každém měsíci roku 2009.....	66
Obrázek 47 - Námraza na krytu přijímače na Milešovce	66
Obrázek 48 - Umístění černobílého terče pro měření dohlednosti	67
Obrázek 49 - Umístění kamery Basler pro měření dohlednosti na věži meteorologické observatoře na Milešovce	68
Obrázek 50 - Dohlednost 144.5 m naměřená 11. 11. 2012 v 8:56 UTC	69
Obrázek 51 - Maximální dohlednost naměřená 11. 11. 2012 v 8:59 UTC.....	70
Obrázek 52 - Časový průběh naměřeného útlumu na 1550 nm a útlumu vypočteného pomocí Kimova vzorce (3.33) z tří měřených dohledností dne 14. 11. 2012 v období od 6 do 8 hodin UTC	70
Obrázek 53 - Průměrovaný bodový graf – závislost měřeného útlumu na 1550 nm na měřené dohlednosti.....	71
Obrázek 54 - Porovnání dohledností z kamery s dohlednostmi z dohledoměrů v homogenní mlze.....	72
Obrázek 55 - Časový průběh intenzity srážek měřené distrometrem a člunkovým srážkoměrem z 23. 5. 2014 v období 13:00 až 17:30	73
Obrázek 56 - Porovnání záznamů intenzity srážek z distrometru a člunkového srážkoměru v květnu 2014.....	74
Obrázek 57 - Porovnání měrného útlumu z modelu Carbonneau a ze spektra velikosti kapek – detail hodnot do 5 dB/km.....	74
Obrázek 58 - Porovnání měrného útlumu z modelu Carbonneau a ze spektra velikosti kapek – celý rozsah naměřených hodnot.....	75

Obrázek 59 - Logaritmický bodový graf mezi intenzitou srážek a měrným útlumem z DSD pro nový model útlumu OBS deštěm na základě dat z ÚFA	75
Obrázek 60 - Porovnání naměřených dat s modely Carbonneau (3.28), ÚFA (4.11) a modelem na základě Marshall-Palmerova rozdělení DSD (3.27)	76
Obrázek 61 - Porovnání různých naměřených spekter velikosti kapek při intenzitě srážek $R = 10$ mm/h.	77
Obrázek 62 - Porovnání různých naměřených spekter velikosti kapek při intenzitě srážek $R = 50$ mm/h.	77
Obrázek 63 - Závislost měrného útlumu na koncentraci kapek.....	78
Obrázek 64 - Chyba aproximativního modelu ÚFA v závislosti na efektivním poloměru kapek	78
Obrázek 65 - Distribuční funkce útlumu deštěm na základě reálně měřených spekter velikosti kapek a aproximativních vzorců s použitím intenzity srážek	79
Obrázek 66 - Průměrné spektrum dešťových kapek naměřené 2D Video-distrometrem v Praze v roce 2011 (Fišer, 2012).....	80
Obrázek 67 - Časový průběh měrného útlumu optického spoje (modrá) a relevantních meteorologických parametrů během oblačné události. LWC a PSA jsou násobeny konstantami pro lepší zobrazení v grafu. Zeleně je zobrazena intenzita srážek R . Průběh $17/V$ odpovídá útlumu dle Kimova vzorce, kde V je dohlednost v km.....	81
Obrázek 68 - Efektivní poloměr r_e a parametr a spektra velikosti kapek v každé události	82
Obrázek 69 - Spektra velikosti kapek pro jednotlivé události v únoru a březnu 2012	82
Obrázek 70 - Závislosti LWC na dohlednosti v jednotlivých událostech, kde je efektivní poloměr parametrem	83
Obrázek 71 - Křivka extinkčního koeficientu pro $\lambda = 550$ nm v závislosti na poloměru kapky	85
Obrázek 72 - Všechny vzorky LWC a dohlednosti z Milešovky z období 29. 2. – 14. 3. 2012	86
Obrázek 73 - Všechny vzorky LWC a dohlednosti z Prahy z období 8. 1. – 31. 5. 2009	86

Obrázek 74 - Hustota pravděpodobnosti parametru a na Milešovce (vlevo) a v Praze (vpravo)	88
Obrázek 75 - Hustota pravděpodobnosti parametru b na Milešovce (vlevo) a v Praze (vpravo)	88
Obrázek 76 - Hustota pravděpodobnosti parametru α na Milešovce (vlevo) a v Praze (vpravo)	88
Obrázek 77 - Tvar průměrných typických spekter velikosti kapek mlhy	89
Obrázek 78 - Porovnání vypočteného útlumu s naměřeným na kanále 1550 nm v Praze	90
Obrázek 79 - Časový průběh parametrů odhadnutého spektra velikosti kapek mlhy v Praze	91
Obrázek 80 - Bodový graf naměřeného a odhadnutého útlumu na kanále 1550 nm v Praze	92
Obrázek 81 - Průměrovaný bodový graf naměřeného a odhadnutého útlumu na kanále 1550 nm v Praze	93
Obrázek 82 - Porovnání vypočteného a naměřeného útlumu na obou kanálech v Praze	93
Obrázek 83 - Porovnání vypočteného a naměřeného útlumu na kanále 1550 nm na Milešovce	94

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 -	Komplexní index lomu vody pro vlnové délky OBS.....	24
Tabulka 2 -	Koeficient q pro Kimův vzorec (Kim, 2001).....	42
Tabulka 3 -	Parametry spekter mlžných kapek dle ITU-R (2008).....	46
Tabulka 4 -	Parametry průměrného spektra kapek pro různé typy oblaků.....	50
Tabulka 5 -	Parametry experimentálního OBS na Milešovce ATMO TL - 02_DUAL (Kvíčala, 2009) 52	
Tabulka 6 -	Tabulka korelačních koeficientů a relativní RMSE mezi naměřeným útlumem na 1550 nm a útlumem teoreticky vypočteným z naměřených dohledností dle (3.33)	71
Tabulka 7 -	Měrný útlum deštěm v závislosti na pravděpodobnosti překročení.....	80
Tabulka 8 -	Intervaly pro DSD parametry – Milešovka.....	87
Tabulka 9 -	Intervaly for DSD parametry – Praha	87
Tabulka 10 -	Typické hodnoty DSD parametrů gamma rozdělení.....	89

SEZNAM ZKRATEK

APS	Aerodynamic Particle Sizer
COST	European Cooperation in Science and Technology
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
METAR	Message d'observation météorologique régulière pour l'aviation; pravidelná letecká meteorologická zpráva
NIR	Near Infra-Red; blízké infračervené světlo
NWS	National Weather Service; Národní meteorologická služba
OBS	Optický Bezkabelový Spoj
OOK	On-Off keying
PSA	Particle Surface Area, povrchová plocha částic
PVM	Particle Volume Monitor
SPECI	Aviation Selected Special Weather Report; zvláštní letecká meteorologická zpráva
SYNOP	Surface Synoptic Observations; pozemní synoptické pozorování
UTC	Coordinated Universal Time
ÚFA	Ústav fyziky atmosféry AVČR, v.v.i.
VLC	Visible Light Communication; komunikace pomocí viditelného světla

0 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ŠÍŘENÍ OPTICKÝCH VLN V ATMOSFÉŘE

Poslední léta jsme svědky rostoucí poptávky po vyšších přenosových rychlostech a po širším pásmu používaných kmitočtů k manipulaci s multimediálními informacemi. Tento vývoj bude pokračovat i v příštích několika desetiletích, což představuje výzvu pro budoucí komunikační síť nové generace. Koncový uživatel bude potřebovat vyšší rychlost přenosu dat a přístup k dostupné šířce pásma páteřní sítě. Tyto parametry jsou výrazně degradovány tzv. poslední mílí použitím nízkokapacitních kabelových rozvodů. Optické bezdrátové spoje jsou výtečnou alternativou pro řešení poslední míle, protože dokážou propojit například dvě optické kabelové sítě beze ztráty kapacity v případech, kde je použití optického kabelu nemožné, či velmi nákladné.

Optický bezdrátový spoj je moderní technologie využívající laserový paprsek k přenosu dat volným prostorem. Tato technologie využívá velkého potenciálu světla, díky kterému je možno přenášet data, zvuk i obraz ve vysokých přenosových rychlostech, které odpovídají rychlostem vláknové optiky, ovšem bez nutnosti použití optického kabelu. Je alternativou k použití rádiového spoje.

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

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

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

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

- Lom paprsku při průchodu atmosférou – atmosférické turbulence způsobují nehomogenitu indexu lomu v přenosovém kanálu a tím i refrakci optického paprsku.
- Nedostatečná tuhost uchycení vysílače – pohyb jeho konstrukce o milimetry způsobí při větší vzdálenosti vychýlení paprsku o metry.
- Výkyvy výškových budov – běžně se pohybují v řádu centimetrů. Kvůli tomu se již u moderních optických spojů zavádí systém zvaný Autotracking. Je to princip zpětné vazby – jde o aktivní natáčení paprsku podle potřeby tak, aby dopadl za aktuálních podmínek přímo na aperturu přijímače.

Oproti rádiovým spojům nejsou optické spoje vhodné na velké vzdálenosti. Měrný útlum je na optických kmitočtech větší než na rádiových a kombinace s nuceným nízkým vysílacím výkonem omezuje vzdálenost spolehlivého přenosu na jednotky km. V současné době vědci pracují na dosažení větších vzdáleností spolehlivé komunikace OBS.

Pozemní bezdrátové spoje jsou silně ovlivněny reálnou atmosférou. Interakce hydrometeorů či atmosférických turbulencí s optickým signálem vede k jevům, jako jsou rozptyl, absorpce, refrakce či selektivní útlum přenášeného optického signálu. Rozptyl a absorpce závisí na frekvenci, polarizaci dopadající vlny a dále na velikosti, tvaru a materiálovém složení částice (prach, mlha, smog, sníh, déšť atd.).

Největší překážkou pro elektromagnetické vlny ve volném prostoru představují částice, jež mají srovnatelné rozměry s používanou vlnovou délkou. Při této situaci je ze všech jevů nejvíce dominantní rozptyl, který je odpovědný za útlum vedoucí až k výpadku spojení.

Zatímco rádiovým spojům nejvíce vadí hustý déšť, déšť s kroupami, déšť se sněhem a sněžení, u optických spojů způsobuje největší útlum mlha a nízká oblačnost.

Pro racionální plánování rádiových i optických spojů je třeba vzít do úvahy všechny faktory, které mají na pohotovost spoje vliv. Základní ovlivnitelné faktory jsou např.:

- Spolehlivé řešení napájení se záložním zdrojem
- Délka a elevace spoje
- Přenosová rychlost, typ modulace
- Velikost optických hlavic = zisk optické soustavy / zisk antény
- Vlnová délka záření
- Vysílací výkon
- Divergence svazku
- Směr spoje

Reálná atmosféra a její projevy počasí jsou ale faktory, které už ovlivnit nelze. Do jisté míry lze tyto projevy eliminovat dostatečnou citlivostí přijímače. Pro správné stanovení citlivosti je nutná podrobná analýza lokálních atmosférických podmínek, a především vhodné modely šíření vln v reálné atmosféře. A právě tyto modely jsou předmětem odborných konferencí po celém světě.

Problematika šíření rádiových vln má již svojí dlouhou historii a za tu dobu již jsou modely pro kmitočty do několika desítek GHz bezpečně popsány a ověřeny. Z důvodu vytížení kmitočtového spektra se postupně přechází i na aplikace, které využívají vysoké frekvence v řádu desítek a stovek GHz.

To optické spoje jsou oproti rádiovým poměrně mladé a problematika modelování šíření volným prostorem stále není podrobně dořešena. V této práci se zabývám tedy primárně atmosférickým útlumem optického signálu, výsledky této práce ale bude možno použít i pro výzkum spojů rádiových.

Základní aproximativní modely stanovující útlum optického signálu u jednotlivých typů srážek využívají běžně měřitelné meteorologické veličiny:

- Déšť: intenzita srážek R (mm/h)
- Mlha: dohlednost V (m)
- Sníh: intenzita sněžení (cm/h)

Přesné modelování útlumu pak vyžaduje znalost spektra velikosti kapek a rozptylové funkce.

1 PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Vědecké publikace o vlivu reálné atmosféry na přenos OBS se začaly objevovat po roce 2000, kdy se odborníci na šíření rádiových vln začali orientovat i na vlny optické a zúročili tak již zavedenou metodiku výzkumu.

Významnou měrou se na rozvoji výzkumu šíření podílela Evropská unie prostřednictvím akcí COST – Evropská spolupráce ve vědě a technologii. Akce COST 270 (2000-2006) (COST, 2000), byla první, kde se objevilo téma šíření optických vln v atmosféře. Skupina okolo prof. Ericha Leitgeba z TU Graz se prezentovala prvotním výzkumem na základě měření na experimentálním OBS (Gebhart, 2003) (Leitgeb, 2006) (Muhammad, 2005). Zároveň představila studie hybridních spojů, kde se OBS zálohují rádiovým spojem k dosažení řádově vyšší pohotovosti komunikace (Leitgeb, 2005).

Akce COST IC0802 (2008-2012) byla zaměřena na výzkum šíření elektromagnetických vln pro telekomunikaci, navigaci a systémy pozorování Země. Výzkum šíření OBS zde byl již sdružen do samostatné pracovní skupiny, kde spolupracovaly týmy z celé Evropy i mimo ni. Skupina z TU Graz pod vedením prof. Leitgeba pracovala na inteligentním prepínači mezi optickým a rádiovým přenosem pro hybridní spoje (Nadeem, 2009) a prohlubovala analýzy vlivu reálné atmosféry na přenos OBS. Awan (2009) formuloval empirický model měrného útlumu OBS s využitím teploty a relativní vlhkosti. Aktivní byla i Česká republika prostřednictvím hned několika zástupců. Tým z ČMI (Dr. Grábner a Dr. Kvičera) prezentoval analýzy útlumu vlivem mlhy a deště z experimentálních spojů v Praze (Kvičera, 2009) (Grábner, 2012). Grábner (2009) také formuloval metodu odhadu spektra velikosti mlžných kapek pro zpřesnění predikce měrného útlumu OBS s využitím dat s obsahem kapalné vody ve vzduchu (LWC) a povrchové plochy částic (PSA). Na akci se výrazně podílel i tým Ústavu fyziky atmosféry AVČR, v.v.i. (ÚFA) a Univerzity Pardubice pod vedením doc. Fišera, CSc., včetně mé osoby. Přispěli jsme především experimentálními analýzami ze specifického prostředí horské meteorologické observatoře na Milešovce, kde se mimo OBS nachází celá řada meteorologických přístrojů (Brázda, 2011a) (Pešek, 2011). Skupina z Northumbria University (Newcastle upon Tyne, UK) vybudovala v laboratoři speciální komoru, ve které kontrolovaně vytvářela zhoršené atmosférické podmínky a zkoumala především vliv na chybovost (BER) pro různé modulace optického signálu (Le-Minh, 2010).

Vzestup výzkumu v oblasti optických bezkabelových systémů vedl k samostatné akci COST IC 1101 „Optické bezkabelové komunikace – rozvíjející se technologie,“ která proběhla

v letech 2011 až 2015. Skupina z Northumbria University publikovala příspěvky z atmosférické komory, například dopady simulované písečné bouře (Ghassemlooy, 2013). M. Ijaz (2013a) v komoře vytvářel mlhu, nejprve glycerínovou a poté i vodní. Podrobněji jsou některé závěry z jeho analýz obsaženy v teoretické části této práce. Společně s J. Peškem pak spolupracovali na výzkumu vlivu atmosférických turbulencí. C. Gabriel (2011) se věnuje podmořské optické bezkabelové komunikaci. Tým z Politecnico di Milano se specializuje na výzkum šíření pro satelitní optické spoje (Capsoni, 2012) či modelování rozptylu optického signálu na různých hydrometeorech (Mori, 2014). Podrobně se analyzuje vliv atmosférických turbulencí – jak teoreticky (Baykal, 2015) tak prakticky (Pešek, 2018). Tým ÚFA a Univerzity Pardubice prezentuje podrobné analýzy útlumu s měřeným či odhadovaným spektrem velikosti kapek mlhy (Brázda, 2015a) a deště (Brázda, 2015b), které jsou jedním z cílů této práce.

Významnými pracovišti v Česku, které se zabývají výzkumem v oblasti OBS je hned několik. Ústav radioelektroniky při VUT Brno (prof. O. Wilfert, prof. Z. Kolka) se věnuje použití laseru v komunikaci již od 90. let 20. století a mimo jiné vyvinul řadu měřicích souprav pro výzkum šíření optických vln.

Vědecký tým při ČVUT v Praze pod vedením prof. S. Zvánovce provozuje řadu optických spojů tvořících komunikační síť. V současné době se pražský tým zabývá výzkumem v oblasti komunikace pomocí viditelného světla v budovách (VLC – visible light communication), což je zároveň nejaktuálnější téma z hlediska šíření OBS.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A METODIKA JEJICH ŘEŠENÍ

Práce má 3 konkrétní cíle.

Prvním cílem je teoretické a experimentální stanovení parametrů rozdělení spektra kapek mlhy a oblaků z měřitelných meteorologických veličin v reálném čase. Nejčastěji používané gamma rozdělení obsahuje tři proměnné parametry a , b a α . Byly publikovány metody s jedním fixovaným parametrem. Cílem práce bude prezentovat metodiku odvození všech tří parametrů na základě měřitelných meteorologických veličin. K realizaci cíle bude využito experimentální zázemí na observatoři Ústavu fyziky atmosféry AVČR v.v.i. na Milešovce, konkrétně především přístroj PVM-100 firmy Gerber Scientific, který měří obsah tekuté vody ve vzduchu (LWC) a povrchovou plochu částic (PSA). V lednu 2014 jsem na toto téma absolvoval dvoutýdenní stáž u prof. Marzana z Univerzity La Sapienza v Římě. Rozpracovali jsme metodiku určení všech tří parametrů na základě měřeného LWC a PSA. Plánuji využít pro ověření data z přístroje APS (Aerodynamic Particle Sizer), který měří spektrum velikosti kapek (DSD) mlhy a oblaků.

Observatoř na Milešovce se nachází v nadmořské výšce 837 m.n.m. a převyšuje okolní terén přibližně o 400 m. Vrchol hory se často nalézá uprostřed nízké oblačnosti, nejčastěji jde o oblačnost stratiformní a orografickou. To nám dává příležitost zkoumat útlum optického signálu přímo v oblacích za přítomnosti velkého množství špičkových meteorologických přístrojů.

Druhým cílem je provedení racionální syntézy jednotlivých poznatků vedoucí k formulaci modelu k popisu a predikci útlumu optického signálu v atmosféře. Kimův vzorec pro útlum z dohlednosti a vzorec Carbonneau pro útlum deštěm platí pro průměrné podmínky. Cílem bude nalézt atypická spektra a stanovit podmínky, pro které se již budou tyto vzorce významně lišit.

Třetím cílem je vývoj nízkonákladového distrometru, který bude dostatečně přesně měřit spektrum dešťových kapek. Vyvíjený distrometr navazuje na princip přístroje Parsivel. Díky dvěma optickým závorám, které jsou vertikálně vzdáleny o známou vzdálenost, lze určit skutečnou pádovou rychlost každé kapky. Z doby průletu jedním kanálem pak určím přesný vertikální rozměr kapky. S pomocí teorie o tvaru dešťové kapky a Gunn-Kinzerova modelu pak stanovím dostatečně přesný ekvivolumentrický průměr kapky. Jedním z výstupů práce bude i formulace vztahu mezi vertikálním rozměrem kapky a jejím ekvivolumentrickým

průměrem. Laboratorní model distrometru byl předmětem studentského projektu SGSFEI01/2013 a na jeho vývoji se významně podíleli kolegové Ing. Luboš Rejček, Ing. Jiří Pešek a doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc. Technické podrobnosti lze nalézt v (Rejček, 2014). V současné době je ověřena funkčnost jednotlivých elektronických bloků, mým úkolem je za pomoci mikroprocesoru zpracovávat data ze senzorů a vypracovat ovládací software, který bude data vyhodnocovat a ukládat je v přehledné formě na pevný disk počítače.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Výkonová bilance OBS

Následující rovnice popisuje výkonovou bilanci optického spoje na trase vysílač – přijímač (Kolka, 2012):

$$P_{RX} = P_{TX} - 20 \log \frac{L \cdot \varphi}{D_{RX}} - A_{sys} - \beta \cdot L \text{ [dB]}, \quad (3.1)$$

kde P_{RX} je přijatý výkon v dB, P_{TX} je vyslaný výkon v dB, L je délka spoje v m, φ je divergence svazku v rad, D_{RX} je průměr přijímací apertury v m. Celý člen $-20 \log(L \cdot \varphi / D_{RX})$ představuje útlum vlivem rozptýlení paprsku. A_{SYS} (dB) představuje všechny konstantní ztráty na vysílacích a přijímacích optických prvcích. β (dB/km) je měrný útlum způsobený atmosférickými jevy. Vzorec (3.1) je platný pro $L \cdot \varphi \gg D_{RX}$.

Měrný útlum β je ve vzorci (3.1) jedinou proměnnou, vše ostatní jsou konstanty. Pro zachování komunikace musí být přijatý výkon P_{RX} vyšší, než je citlivost přijímače, což je minimální výkon, kdy je ještě spoj funkční.

Klíčovou veličinou v praxi je potom tzv. pohotovost spoje (anglicky availability), která udává, kolik procent času je spoj funkční. Poskytovatel spoje klientovi garantuje určitou pohotovost, která se pohybuje typicky mezi 99.9 % (tzv. na tři devítky) a 99.999 % času (tzv. na pět devítek). V prvním případě je celková doba, kdy spoj nefunguje rovna necelým 9 hodinám v roce, v případě 99.999 % času je to pouze 5 minut za celý rok.

Stoprocentní pohotovost by vyžadovala velmi vysokou citlivost, což by neúměrně zvýšilo cenu samotného spoje. Proto je úkolem návrhářů spojů odhadnout ideální kompromis mezi cenou a dostatečnou pohotovostí. Pro správný odhad je tedy nutné znát statistiku měrného útlumu atmosférou β . Tu nám umožňují určit statistiky meteorologických veličin skrze modely šíření elektromagnetických vln atmosférou.

3.2 Přesné modelování útlumu optického signálu

Při průchodu elektromagnetické vlny hydrometeorem dochází ke dvěma základním jevům, rozptylu a absorpci. Absorpce je jev, kdy je energie fotonu částicí pohlcena, respektive přeměněna na jiný druh energie (přechod elektronu v atomu na vyšší energetickou úroveň). Rozptylem rozumíme změnu směru procházející elmag. vlny. Při průchodu vlny částicí dochází vlivem skokové změny indexu lomu k difrakci, refrakci i odrazu a výsledkem je rozptyl vlny do všech směrů. Amplitudu a fázi rozptýlené vlny v každém směru popisuje tzv. rozptylová funkce.

Přesný útlum optického signálu průchodem oblasti s hydrometeory vlivem rozptylu a absorpce lze určit dle vztahu (ITU-R, 2008):

$$\beta = 10^5 \int_0^{r_{\max}} Q_{\text{ext}} \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, \hat{n} \right) \pi r^2 N(r) dr, \quad (3.2)$$

kde β je měrný útlum v km^{-1} , Q_{ext} je extinkční koeficient reprezentující rozptylovou funkci, r je poloměr kapky v cm, λ je vlnová délka v cm, \hat{n} je komplexní index lomu kapky a $N(r)$ je spektrum velikosti kapek v cm^{-4} .

Pro přepočítání do decibelové míry pak platí

$$\beta (\text{dB} / \text{km}) = 4,343 \cdot \beta (\text{km}^{-1}) \quad (3.3)$$

Jednotlivé veličiny jsou podrobně popsány v následujících podkapitolách.

3.2.1 Extinkční koeficient Q_{ext}

V této práci používám vyjádření rozptylové funkce pomocí tzv. extinkčního koeficientu Q_{ext} spočteného za pomoci Mieovy teorie. Extinkční koeficient v sobě zahrnuje též ztráty absorpcí a jeho výpočet vychází z celkové ztrátové plochy C_{ext} .

Celková ztrátová plocha (extinction cross-section) násobená hustotou výkonu dopadající na částici udává výkon ztracený z dopadající vlny. Má rozměr plochy.

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

$$C_{\text{ext}} = C_{\text{sca}} + C_{\text{abs}} \quad (3.4)$$

kde C_{sca} je odrazná plocha, která vyjadřuje výkon rozptýlený (scattering) a C_{abs} je absorpční plocha, která vyjadřuje výkon ztracený absorpcí v částici (absorption).

Extinkční koeficient Q_{ext} je pak poměr ztrátové plochy ke skutečné velikosti průřezu částice G (van de Hulst, 1957).

$$\begin{aligned}
Q_{ext} &= C_{ext} / G \\
Q_{sca} &= C_{sca} / G \\
Q_{abs} &= C_{abs} / G \\
Q_{ext} &= Q_{sca} + Q_{abs}
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

U kulových částic platí

$$Q_{ext} = \frac{C_{ext}}{\pi \cdot r^2}, \tag{3.6}$$

kde r je poloměr částice.

V odborné literatuře se používají i další definice rozptylové funkce. Rozptylová funkce značená S je bezrozměrná veličina definovaná vztahem (van de Hulst, 1957)

$$\hat{E}_s = \hat{E}_i \hat{S}(\Theta, \varphi) \frac{e^{-jkr}}{jkr}, \tag{3.7}$$

kde \hat{E}_s , \hat{E}_i je intenzita elektrického pole rozptýlené, resp. dopadající vlny, k je vlnové číslo, r je vzdálenost.

Obecně je rozptylová funkce S popisující rozptyl v každém směru popsána čtyřmi amplitudovými funkcemi S_1 , S_2 , S_3 a S_4 (van de Hulst, 1957).

$$S(\Theta, \varphi) = \begin{pmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{pmatrix} \tag{3.8}$$

V topologii vysílač-přijímač nás zajímá, jak velký signál se rozptýlí v přímém směru čili azimut i elevace jsou rovny nule ($\Theta = \varphi = 0$). Jde o tzv. dopředný rozptyl.

Pro kulové částice platí, že S_3 a S_4 jsou nulové. Pro dopředný rozptyl navíc platí $S_1 = S_2$, čímž se matice zjednoduší na jeden prvek, dopředný rozptyl tedy značíme $S(0)$.

Mezi extinkčním koeficientem Q_{ext} a rozptylovou funkcí $S(0)$ existuje jednoznačný vztah:

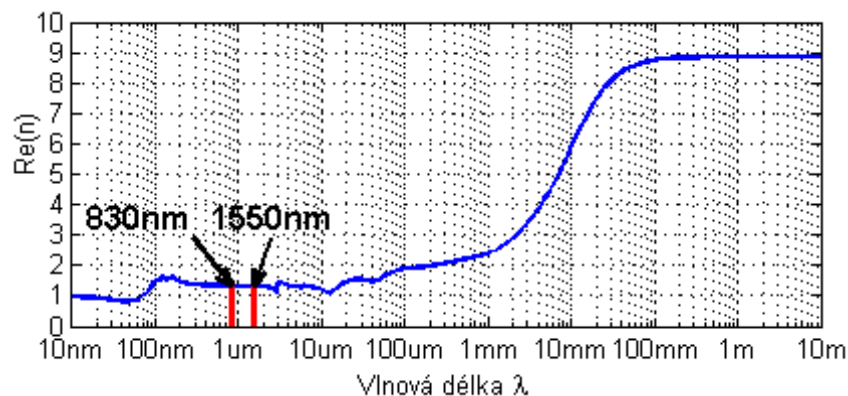
$$Q_{ext} = \frac{4\pi}{k^2} \cdot \text{Re} \hat{S}(0) \tag{3.9}$$

Jiné vyjádření dopředné rozptylové funkce \hat{f} dostáváme při použití vztahu (Uzunoglu, 1977):

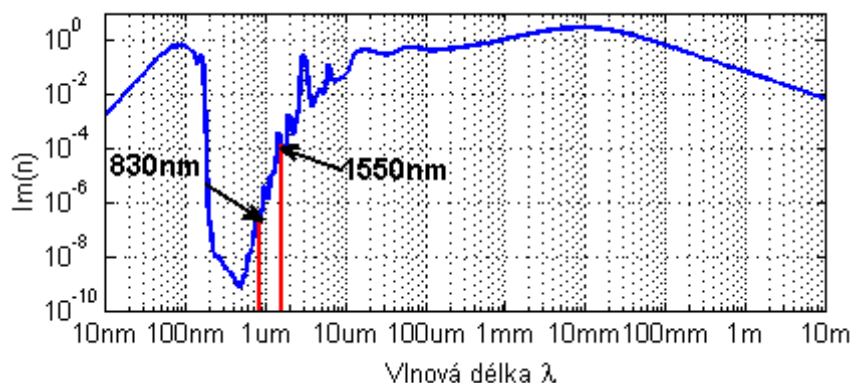
$$\hat{f}(D) = -j \frac{\lambda}{2\pi} \hat{S}(0)^* \tag{3.10}$$

3.2.2 Výpočet Q_{ext}

Pro výpočet Q_{ext} je nutné znát komplexní index lomu částice \hat{n} . Index lomu vody je frekvenčně závislý, v této práci se zaměřuji na standardně používané vlnové délky 830 nm a 1550 nm. Graficky je závislost reálné i imaginární části indexu lomu vody znázorněna na obrázku 1 a 2. Tabulka 1 pak shrnuje konkrétní indexy lomu, které jsou použity pro další výpočty. Data byla čerpána z (Segelstein, 1981).



Obrázek 1 - Reálná část indexu lomu vody v závislosti na vlnové délce



Obrázek 2 - Imaginární část indexu lomu vody v závislosti na vlnové délce

Tabulka 1 - Komplexní index lomu vody pro vlnové délky OBS

	Reálná část	Imaginární část
830 nm	1.3252	2.0445e-7
1550 nm	1.3109	1.3382e-4

Rozptylové funkce se obecně zobrazují v závislosti na poměru vlnové délky a rozměru částice. Tento poměr vyjadřuje tzv. velikostní parametr x :

$$x = \frac{\pi \cdot D}{\lambda}, \quad (3.11)$$

kde D je průměr částice a λ je vlnová délka.

Extinkční koeficient Q_{ext} se spočte z Mieovy teorie dle vztahu (Mätzler, 2002):

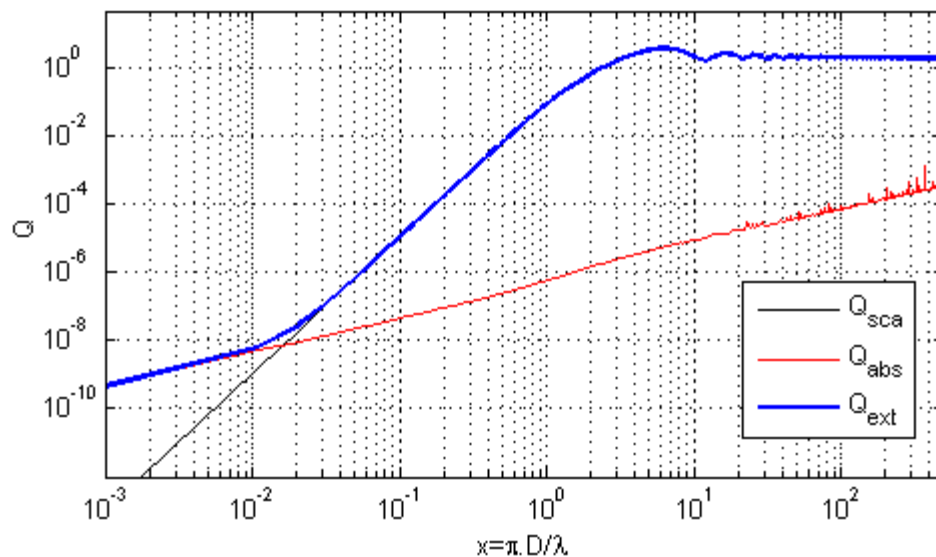
$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \cdot \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \left((2\hat{n} + 1) \cdot (a_n + b_n)^* \right), \quad (3.12)$$

kde a_n a b_n jsou Mieovy koeficienty.

Pro tento výpočet jsou využity programy v prostředí MATLAB, zpracované Ch. Matzlerem (Mätzler, 2002). Mieovy koeficienty a_n a b_n tvoří vlastní základ výpočtu Mieových rozptylových funkcí. Vyžadují zahrnutí sférických Besselových funkcí vyšších řádů, které v dřívějších dobách poněkud znesnadňovaly výpočet. V dnešní době jsou Besselovy funkce již standardní součástí vývojového prostředí MATLAB. Nekonečná řada v rovnici (3.12) může být ukončena po n_{max} krocích. V použitých programech je tento počet (Bohren, 1983):

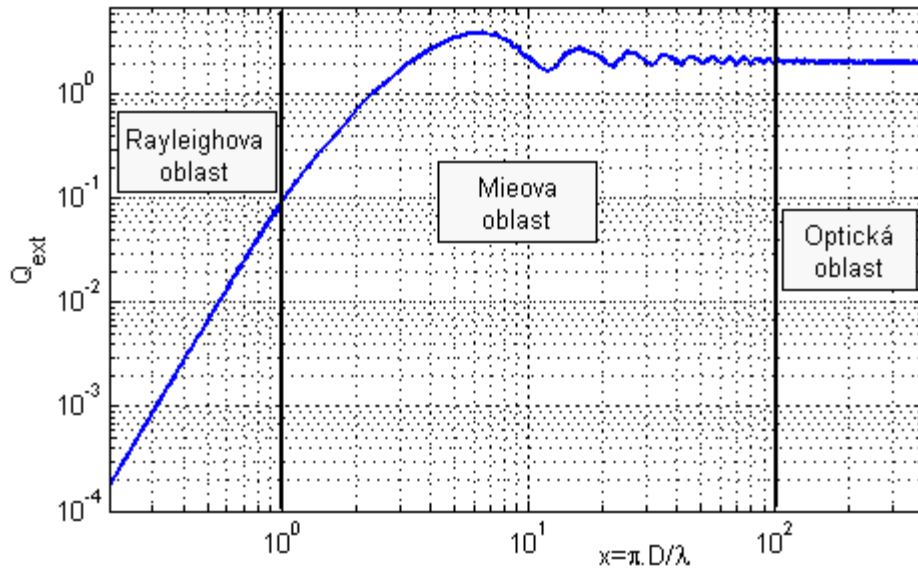
$$n_{max} = x + 4x^{1/3} + 2 \quad (3.13)$$

Na obrázku 3 jsem provedl simulaci extinkčního koeficientu Q_{ext} v závislosti na parametru x . Do hodnoty $x = 0,01$ je dominantním jevem absorpce (Q_{abs}), od hodnoty $x = 0,02$ křivka Q_{ext} kopíruje křivku rozptylu Q_{sca} a absorpce je tu již zanedbatelná.



Obrázek 3 - Extinkční koeficient

Mieova teorie platí pro kulové částice a řeší celé spektrum parametru x . Křivka Q_{ext} je poměrně složitá ale lze ji rozdělit do více částí a uplatnit jednodušší aproximaci.



Obrázek 4 - Extinkční koeficient rozdělený do tří oblastí

Pokud je parametr x menší než 1, projevuje se tzv. Rayleighův rozptyl. V této oblasti jsou částice mnohem menší, než je vlnová délka. Pokud jsou částicemi míněny kapky deště (uvažujeme maximální průměr kapky 7 mm), pak do Rayleighovy oblasti spadají všechny rádiové frekvence menší než 14 GHz. Týká se to ale též rozptylu světla na molekulách obsažených ve vzduchu.

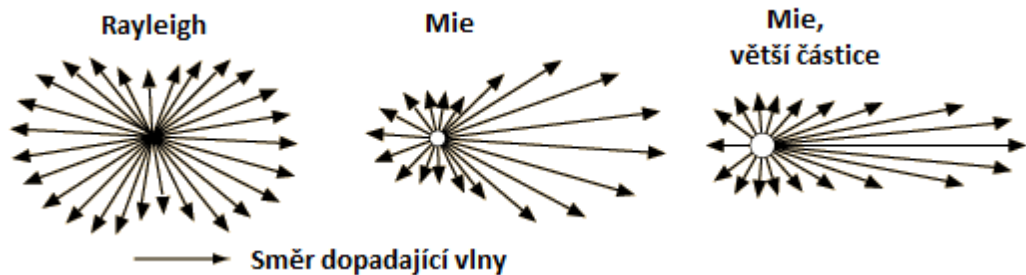
Rayleighův rozptyl lze aproximovat vztahem (Cox, 2002):

$$Q_s = \frac{8\pi^4 D^4}{3\lambda^2} \left(\frac{\hat{n}-1}{\hat{n}+2} \right)^2, \quad (3.14)$$

kde D je průměr částice, λ je vlnová délka a n je komplexní index lomu. Je to zároveň i aproximace extinkčního koeficientu Q_{ext} v Rayleighově oblasti, ale pouze tam, kde je dominantní rozptyl nad absorpcí ($0,02 < x < 1$).

Ve vztahu (3.14) si všimněme závislosti na vlnové délce. Čím je vlnová délka kratší, tím více energie se rozptýlí do okolí. V případě Rayleighova rozptylu se tedy sice odráží všechny vlnové délky dopadajícího záření, ty nejkratší jsou ale svojí energií dominantní. Typickým příkladem je zbarvení nebe ve dne, kdy se záření ze Slunce rozptyluje na molekulách vzduchu. Přestože sluneční denní záření obsahuje všechny složky viditelného spektra, přičemž největší intenzitu má zelená a žlutá část, jeví se nebe jako modré, jelikož modrá barva je na té straně viditelného spektra s nejkratší vlnovou délkou.

Rozdíl v rozptylu v Rayleighově a Mieově oblasti názorně naznačuje následující obrázek 5.



Obrázek 5 - Rozptyl v Rayleighově a Mieově oblasti (Nave, 2018)

Rayleighův rozptyl je relativně izotropní. S vyšším poměrem velikosti částice k vlnové délce přecházíme do Mieovy oblasti, kde se nejvíce energie rozptýlí v dopředném směru. Do této oblasti spadá problematika šíření radiových vln na vysokých frekvencích v dešti a rozptyl viditelného a z části i infračerveného světla v mlze a oblacích, které tvoří vodní kapky s průměrem 2 až 80 μm . Směrové znázornění rozptylu pak připomíná vyzářovací charakteristiku antény, přičemž se zvyšujícím se parametrem x se šířka svazku zužuje. Frekvenční závislost Mieova rozptylu je zanedbatelná, všechny vlnové délky dopadajícího záření se tedy rozptylují se stejnou energií. To je také důvod, proč se například oblaka jeví jako bílá. V případě viditelného slunečního záření dochází na oblačných kapkách k Mieově rozptylu, kde se odráží všechny složky světla rovnoměrně a tím pádem se jeví opět jako bílé světlo.

V Mieově oblasti se objevují oscilace extinkčního koeficientu, kdy je ztrátová plocha i více než šestinásobkem skutečného geometrického průřezu.

Již v roce 1957 aproximoval van de Hulst (1957) Mieovu oblast vztahem:

$$Q_{ext} = 2 - \frac{4}{p} \cdot \sin p + \frac{4}{p^2} (1 - \cos p), \quad (3.15)$$

kde p je k parametru x vztaženo:

$$p = 2x(\hat{n} - 1) \quad (3.16)$$

Oscilace se se zvyšujícím parametrem x zmenšují a od hodnoty $x = 100$ se nacházíme v tzv. optické oblasti, kde lze hodnotu extinkčního koeficientu aproximovat konstantou

$$Q_{ext} = 2, \quad (3.17)$$

čili

$$C_{ext} = \frac{\pi \cdot D^2}{2}, \quad (3.18)$$

což znamená, že celková ztrátová plocha se rovná v optické oblasti dvojnásobku skutečné plochy částice. V odborné literatuře se pro to používá termín „extinkční paradox.“ Přesné vysvětlení tohoto faktu je předmětem výzkumu.

3.3 Vliv deště na útlum OBS

Děšť je nejčastější typ atmosférických srážek v našich mírných klimatických podmínkách. Způsobuje degradaci signálu při frekvencích vyšších než 10 GHz, kde se vlnová délka blíží k velikosti kapek.

Malé srážkové kapky o průměru 0,2 mm až 0,5 mm označujeme jako mrholení (Řezáčová, 2007). Dešťové kapky mají průměr mezi 0,5 a 7 mm. Větší kapky jsou nestabilní a tříští se.

Velmi malé kapky o průměru do 0,28 mm jsou kulové, větší kapky o průměru do 3 mm se zplošťují, přičemž dolní základna je pro menší kapky rovná, pro průměry nad 3 mm se dolní základna prohýbá dovnitř. Skutečný tvar kapek byl odvozen a prokázán Pruppacherem a Pitterem v (Pruppacher, 1971) a (Pruppacher, 1997). Tvar kapek bývá pro odvození rozptylujících se vlastností elektromagnetických vln různě aproximován. Pro potřeby modelování útlumu elektromagnetických vln se ale velikost nesférické kapky nahrazuje tzv. ekvivolumentrickým průměrem čili průměrem sférické kapky, která má stejný objem. Průchod elektromagnetické vlny dešťovou kapkou lze považovat jako průchod ztrátovým dielektrikem, které je popsáno tvarem (velikostí) a komplexním indexem lomu.

Pádová rychlost dešťové kapky závisí na její velikosti. Průměrně se blíží modelu dle Gunna a Kinzera (1949):

$$v(D) = 9.95 - 10.3 \cdot e^{-0.6D} \quad (3.19)$$

kde $v(D)$ je pádová rychlost kapky v m/s a D je ekvivolumentrický průměr v mm.

Útlum deštěm je způsoben absorpcí energie dešťovou kapkou (např. se energie absorbuje na teplo) a rozptylem různými směry.

3.4 Technologie měření srážek

Pro modelování útlumu elektromagnetického záření srážkami je potřeba dešť klasifikovat veličinou. Dešť se nejčastěji klasifikuje intenzitou srážek R udávanou v mm/h. Jde o výšku vodního sloupce, který naprší na ploše 1 m² za hodinu, kde 1 mm představuje 1 l/m² srážek. Ze znalosti rozptylových funkcí víme, že různě velké kapky mají různé příspěvky k útlumu signálu. Proto je výhodné měřit přesné rozložení kapek, co se jejich velikosti týče. Spektrum

kapek $N(r)$ je veličina udávající počet kapek o poloměru r až $r+dr$ v jednotkovém objemu 1 m^3 .

3.4.1 Intenzita srážek a její měření

Pro potřeby modelování šíření elektromagnetických vln je potřeba, aby časové rozlišení bylo co nejvyšší. Standardní meteorologické záznamy o úhrnu za 6 hodin apod. nejsou v oblasti šíření dostatečně podrobné. Nejen v této práci se tedy uvažuje úhrn srážek za 1 minutu, který je poté přepočítán do standardních jednotek mm/h.

Intenzita srážek se měří tzv. srážkoměry. Podle měřicího principu rozlišujeme dva základní typy, váhové a člunkové.

3.4.1.1 Váhové srážkoměry

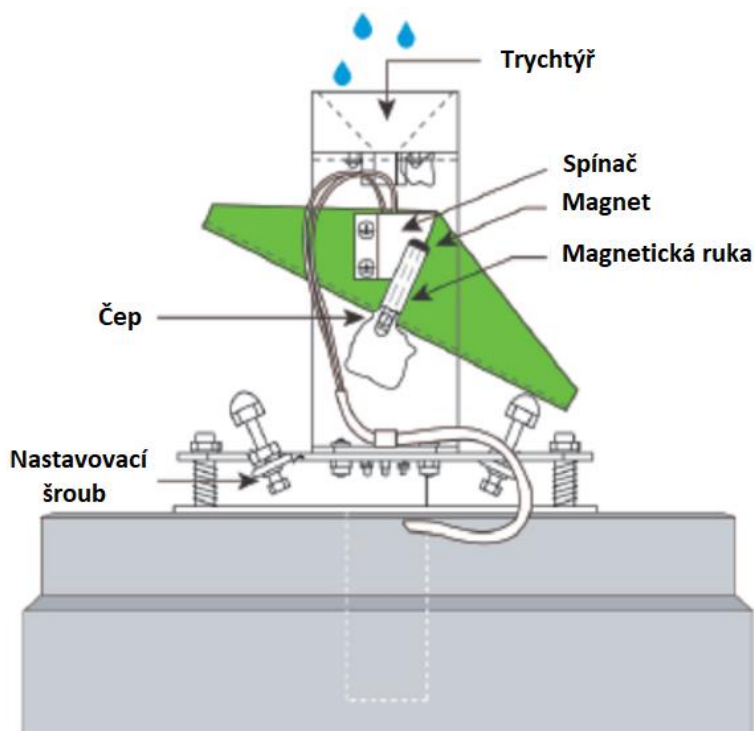
Váhové srážkoměry, jak již označení jasně vypovídá, měří hmotnost nashromážděných srážek v nádobě, která stojí na váhové jednotce. Změna naměřené hmotnosti je přepočítána na intenzitu srážek v mm/h s tím, že minimální časové rozmezí je typicky 1 minuta. Porovnání obou typů srážkoměru z hlediska principiálních systematických chyb je provedeno v (Kněžínková, 2010). Tento typ srážkoměru správně vyhodnocuje i vysoké intenzity, okamžitě měří pevné srážky (sníh, kroupy), protože netrpí zkreslením měření vlivem akumulace srážek. Neobsahuje pohyblivé části, což minimalizuje náklady na průběžnou údržbu. Nevýhodou je vysoká cena, měření může zkreslovat hmyz či padající listí, které přístroj zaznamená jako atmosférickou srážku. Kompenzovat se musí též systematická chyba způsobená výparem vody z nádoby. Dražší přístroje (např. MRW500 firmy Meteoservis) používají k ochraně před výparem vrstvu silikonového oleje (Meteoservis, 2015). Nádoba, ve které se srážky akumulují, musí obsahovat nemrznoucí směs.



Obrázek 6 - Váhový srážkoměr MRW500 firmy Meteoservis (Meteoservis, 2015)

3.4.1.2 Člunkové srážkoměry

Princip člunkového srážkoměru je patrný z obrázku 7. Jímací plocha je tvarována do kužele, který svádí srážky do překlopného člunku. Tento kalibrovaný člunek se po naplnění definovaným množstvím vody překlopí, voda z něj volně vyteče a zároveň se začne naplňovat druhá polovina člunku. Hrubá data z přístroje jsou buď počet překlopení za každou minutu, či přesná časová razítka každého překlopení.



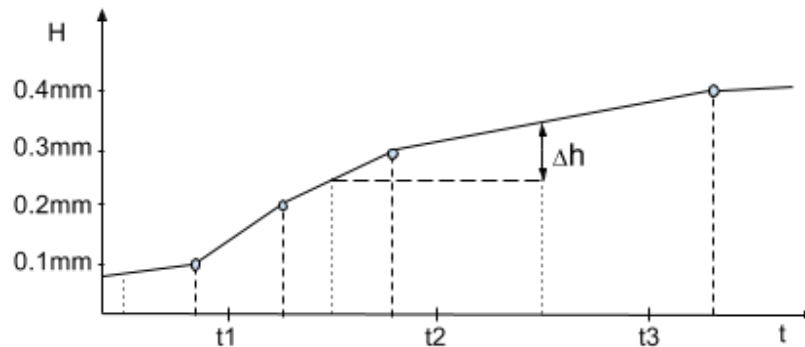
Obrázek 7 - Princip člunkového srážkoměru (Sunjray Infosystems, 2018)

Hlavní výhodou je jednoduchá konstrukce a tím pádem i nízká cena. Člunkový srážkoměr ale vyžaduje častou údržbu, protože jímací plocha se velmi snadno zanechá nečistotami, které úzký otvor ucpou, a tím znemožní měření. Další nevýhodou je zpožděné měření pevných srážek, kdy se sníh či kroupy nejprve musí roztéci. Při velkých úhrnech pak dochází k akumulaci pevných srážek ve srážkoměru a hrozí podhodnocení celkového úhrnu, pokud je srážkoměr již zcela naplněn.

3.4.1.3 Zpracování dat z člunkového srážkoměru

V případech, kdy člunkový srážkoměr ukládá pouze časy každého překlopení, je potřeba zpracovat data tak, aby byla časově synchronizována s ostatními daty, se kterými je posléze chceme korelovat. Čili je potřeba vyhodnotit intenzitu srážek každou minutu. V této práci

využívám právě dat z člunkového srážkoměru a pro vyhodnocení intenzity srážek jsem použil metodu Fišera a Wilferta (Fišer, 2009). Princip je naznačen na obrázku 8.



Obrázek 8 - Metoda výpočtu intenzity srážek z dat člunkového srážkoměru (Fišer, 2009)

Jedno překlopení člunku znamená inkrementaci celkového úhrnu srážek H o 0,1 mm. Každé překlopení (zobrazeno čárkovanou čarou) je na ose y vždy tedy o 0,1 mm výše. Data mezi překlopeními se lineárně interpolují. Intenzita srážek například v čase t_2 se pak vypočte jako přírůstek úhrnu srážek Δh dělený příslušným časovým intervalem. Pokud vyhodnocujeme srážky za 1 minutu, pak jde o interval $\langle t_2 - 30 \text{ s}, t_2 + 30 \text{ s} \rangle$, na grafu vyznačený tečkovanými čarami. Obecně to lze vyjádřit vzorcem (Fišer, 2009):

$$R(t_n) = \frac{H\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) - H\left(t_n - \frac{\Delta t}{2}\right)}{\Delta t} \quad (\text{mm/h}), \quad (3.20)$$

kde H je celkový úhrn srážek v mm a Δt je integrační čas v hodinách.

Výhodou algoritmu je, že lze určovat intenzitu srážek díky pohyblivému oknu v jakýkoliv okamžik. Dlouhodobé testování ukázalo, že tato metoda je přesná a užitečná.

3.4.2 Měření spektra velikosti dešťových kapek

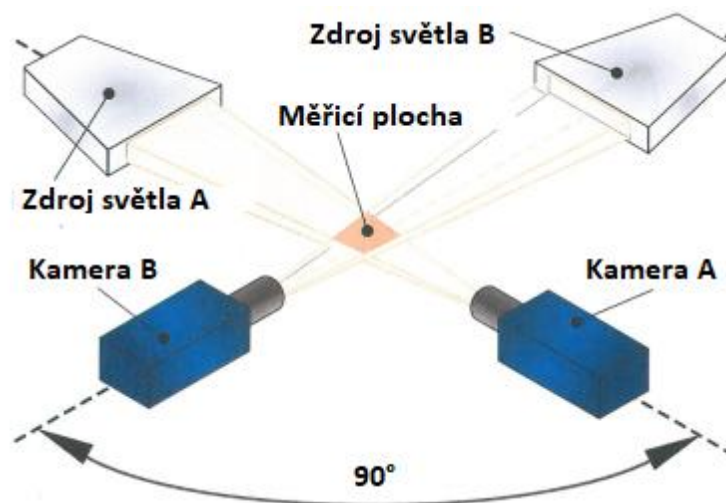
Pokud chceme modelovat útlum srážkami optického signálu přesně, musíme znát aktuální spektrum velikosti dešťových kapek. V této kapitole představuji vybrané měřicí systémy (distrometry), které jsou v současné době k dispozici.

3.4.2.1 2DVD: 2D Video-distrometr

V dnešní době nejpřesnější a zároveň nejnákladnější distrometr. Výrobce je společnost Joanneum Research z rakouského Grazu. Princip snímání je na obrázku 9. Dvě řádkové kamery A a B snímají měřicí prostor o rozměrech 10 x 10 cm. Tento rozměr je kompromisem

mezi dvěma požadavky: plocha musí být dost velká tak, aby to byl reprezentativní vzorek ale zároveň dost malá na to, aby pravděpodobnost, že se v měřicí oblasti vyskytnou dvě kapky najednou, byla zanedbatelná.

Žárovky, soustava čoček a zrcadel zajišťují zdroj rovnoměrného světla. Propadávající kapky poté zastíní určité pixely na obou kamerách a software z těchto dat generuje velmi podrobné informace o každé kapce. Oba kanály A a B jsou od sebe vertikálně vzdáleny o 6 mm, což zajišťuje možnost měření pádové rychlosti. Standardní součástí distrometru je i sonický anemometr, jenž měří tzv. sonickou teplotu, rychlost a směr větru.

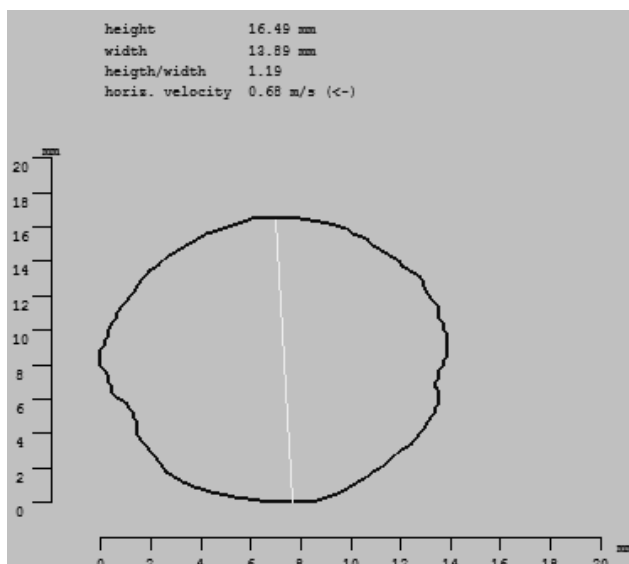


Obrázek 9 - Princip funkce 2D Video-distrometru (Joanneum Research, 2010)

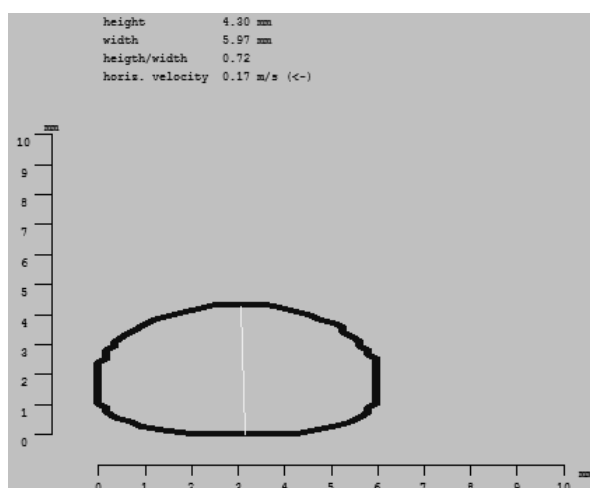
Výstupem je sada informací o každé kapce:

- Přesný časový údaj o průletu kapky
- Vertikální řezy tvaru kapky (zepředu a z boku)
- Ekvivolumentrický průměr
- Výška a šířka kapky
- Zploštělost
- Pádová rychlost
- Horizontální rychlost (typicky v důsledku bočního větru)
- Souřadnice průletu kapky v rámci měřicího prostoru

Ukázky hydrometeorů naměřených 2D Video-distrometrem na Ústavu fyziky atmosféry AVČR v.v.i. v Praze jsou na obrázcích 10 a 11.



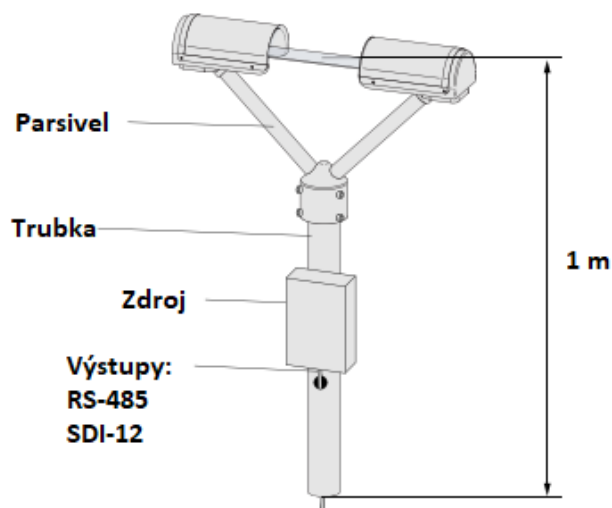
Obrázek 10 - Kroupa naměřená 15. 8. 2010 v 21:14. D=14.5 mm, pádová rychlost 17,1 m/s.



Obrázek 11 - Zploštělá kapka o ekv. průměru 5,4 mm, pádová rychlost 8,2 m/s, datum 15. 8. 2010 v 21:18

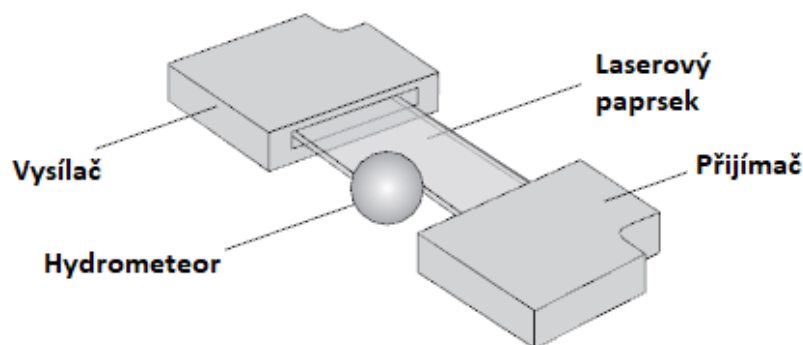
3.4.2.2 Distrometr typu Parsivel

Parsivel je přístroj vyráběný firmou OTT. Měří a rozpoznává všechny typy srážek od mrholení přes déšť, sníh až po kroupy, a to včetně detekce smíšených srážek. Rozsah velikosti měřených hydrometeorů je od 0,2 mm do 5 mm, přičemž rozsah pádových rychlostí je 0,2 m/s až 20 m/s. Z naměřených kapek přístroj určuje řadu meteorologických veličin jako je intenzita srážek, radarová odrazivost, dohlednost atd. Poskytuje také meteorologické zprávy ve formátech standardů SYNOP, METAR/SPECI a NWS. Vzhled distrometru je znázorněn na obrázku 12.



Obrázek 12 - Distrometr Parsivel (OTT Messtechnik, 2004)

Jádrem přístroje jsou dvě hlavičky – vysílač a přijímač. Vysílač produkuje horizontální laserový paprsek o vlnové délce 780 nm a měřicím prostoru 54 cm² (18 x 3 cm). Přijímač vyhodnocuje úroveň napětí, kde případný hydrometeor část paprsku zastíní a způsobí pokles napětí, který je úměrný velikosti částice (ekvivolumetrický průměr). Pádová rychlost je pak dána dobou trvání poklesu napětí na výstupu čili měří se doba mezi vstupem hydrometeoru do paprsku a jeho výstupem. Přístroj dokáže rozpoznat případy měření kapky na okraji měřicí oblasti, kde by se mohl hydrometeor jevit menší než ve skutečnosti. Princip funkce je zobrazen na obrázku 13.

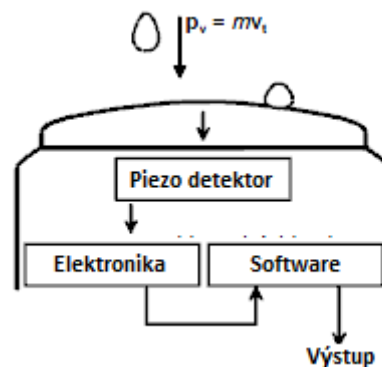


Obrázek 13 - Princip funkce distrometru Parsivel (OTT Messtechnik, 2004)

Tento princip měření má ale jistá omezení. Výsledky měření jsou přesné za předpokladu, že kapka má přesně kulový tvar. Jak bylo zmíněno v předcházejících kapitolách, větší kapky jsou zploštělé. Tím, že měření probíhá pouze na jednom kanálu, nemůže být měření vertikální velikosti kapky z principu přesné. Tím je zanesena nepřesnost do měření jak ekvivolumetrického průměru, tak pádové rychlosti.

3.4.2.3 Akustický distrometr

Firma Vaisala představila technologii RAINCAP (Vaisala, 2014), založenou na snímání dopadajících kapek akustickým senzorem. Přístroj tvoří ocelový kryt o průměru 90 mm, pod kterým je instalován piezoelektrický snímač. Ten vyhodnocuje vertikální hybnost (angl. *vertical momentum*) každé kapky p_v (viz obrázek 14) při jejím dopadu na senzor.



Obrázek 14 - Princip snímače Vaisala RAINCAP (Vaisala, 2014)

Vertikální hybnost kapky p_v je součinem hmotnosti kapky m a její pádové rychlosti v_v . Větší kapky mají větší hmotnost a vyšší rychlost než menší kapky, a tedy větší akustický signál při dopadu. Piezoelektrický snímač převádí signál na napětí, které vyhodnocují obvody pro zpracování signálu. Algoritmus uvažuje vztah (3.19) mezi rychlostí kapky a jejím průměrem. Tím je i u tohoto přístroje zanesena určitá nepřesnost. Na rozdíl od předcházejících optických snímačů je RAINCAP schopen spolehlivě rozeznat dešťovou kapku od kroupy, protože akustický signál kroupy je významně odlišný. Přístroj nemá žádné pohyblivé a náchylné části a díky tomu je bezúdržbový. Výrobci v (Vaisala, 2014) prezentují srovnání měření denních akumulovaných srážek s člunkovými a váhovými srážkoměry. Grafy ukazují, že RAINCAP celkové srážky lehce nadhodnocuje, což může být způsobeno právě předpokládáním vztahu (3.19) dle Gunna a Kinzera.

3.5 Spektrum velikosti kapek deště

Jak již bylo zmíněno, spektrum velikosti kapek $N(r)$ je funkce, která udává počet kapek o poloměru r až $r+dr$ v daném objemu. Spektrum může mít různé rozměry podle toho, v jakých jednotkách uvažujeme objem a poloměr kapky. Nejčastěji používané jsou rozměry $m^{-3}mm^{-1}$ či cm^{-4} .

Distrometry představené v předcházející podkapitole ale neměří přímo kapky v daném objemu, nýbrž pouze jejich průlet měřicí plochou (dopad na měřicí plochu v případě přístroje

RAINCAP). Dále je nutné si uvědomit, že kapky mají různou pádovou rychlost dle jejich velikosti, a tedy procházejí daným objemem různě dlouhou dobu. Pouhý histogram velikosti naměřených kapek tedy ještě není spektrum. Pro výpočet spektrálních hodnot je nutné uvažovat jistý integrační čas (typicky 1 minuta), během kterého zaznamenáváme průlety jednotlivých kapek, které jsou poté roztrženy dle poloměru do jednotlivých tříd se šířkou intervalu dr . Ve výpočtu spektrálních hodnot se pak zohlední jak pádová rychlost, tak integrační čas dle vzorce:

$$N_i = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{S \cdot v_j \cdot t \cdot dr} \quad (3.21)$$

kde N_i je spektrální hodnota i -té třídy se šířkou intervalu dr , n_i je počet kapek v i -té třídě, S je měřicí plocha distrometru, t je integrační čas a v_j je pádová rychlost j -té kapky.

Zlomek uvnitř sumy představuje spektrální příspěvek každé kapky. Součin $S \cdot v_j \cdot t$ určuje objem, ve kterém se kapka po dobu integračního času během pádu nacházela.

V této práci prezentuji výsledky měření 2D-Video-distrometru firmy Joanneum Research s měřicí plochou 10 x 10 cm. Integrační čas je zvolen 60 sekund a velikost kapek je rozdělena dle poloměru do 75 tříd se šířkou intervalu 0,1 mm. Rozpětí poloměrů je tedy 0 až 7,5 mm a spektrum $N(r)$ bude funkce diskrétní v amplitudě.

Nejčastěji používané analytické rozdělení velikosti dešťových kapek je Marshall-Palmerovo rozdělení exponenciálního tvaru, kde je parametrem intenzita srážek R (Řezáčová, 2007):

$$N(r) = 0.16 \exp(-82 \cdot R^{-0.21} r) \quad (3.22)$$

kde $N(r)$ je spektrum velikosti dešťových kapek (cm^{-4}), R je intenzita srážek (mm/h) a r je poloměr kapky (cm).

3.6 Výpočet útlumu deštěm

Dosazením Marshall-Palmerova rozdělení si můžeme vypočítat teoretický útlum deštěm z hlavní rovnice (3.2) pro útlum elektromagnetických vln. Parametrem Marshall-Palmerova rozdělení je intenzita deště, vyjde nám tedy závislost útlumu pouze na intenzitě deště. Jelikož se problematika šíření optického signálu na vlnových délkách v NIR v dešti nachází v optické oblasti (viz kap. 3.2.2), můžeme extinkční koeficient Q_{ext} aproximovat hodnotou 2. Útlum v decibelové míře je pak roven

$$\beta = 4.343 \cdot 10^5 \int_0^{\infty} 2 \pi r^2 0.16 \exp(-82 \cdot R^{-0.21} r) dr \quad (\text{dB/km}). \quad (3.23)$$

Po úpravě dostáváme

$$\beta = 4.366 \cdot 10^5 \int_0^{\infty} r^2 \exp(-82 \cdot R^{-0.21} r) dr \quad (dB/km). \quad (3.24)$$

Gamma funkce má zápis

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} x^{t-1} \exp(-x) dx. \quad (3.25)$$

Abychom rovnici (3.24) přiblížili zápisu gamma funkce, provedeme substituci:

$$\begin{aligned} \beta &= 4.366 \cdot 10^5 \int_0^{\infty} r^2 \exp(-82 \cdot R^{-0.21} r) dr = \left[\begin{array}{l} x = 82 \cdot R^{-0.21} r \\ r = \frac{x}{82 \cdot R^{-0.21}} \\ dr = \frac{dx}{82 \cdot R^{-0.21}} \end{array} \right] = \\ &= 4.366 \cdot 10^5 \int_0^{\infty} \left(\frac{x}{82 \cdot R^{-0.21}} \right)^2 \exp(-x) \frac{1}{82 \cdot R^{-0.21}} dx = \\ &= 4.366 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{82 \cdot R^{-0.21}} \right)^3 \int_0^{\infty} x^2 \exp(-x) dx = 4.366 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{82 \cdot R^{-0.21}} \right)^3 \Gamma(3) \end{aligned} \quad (3.26)$$

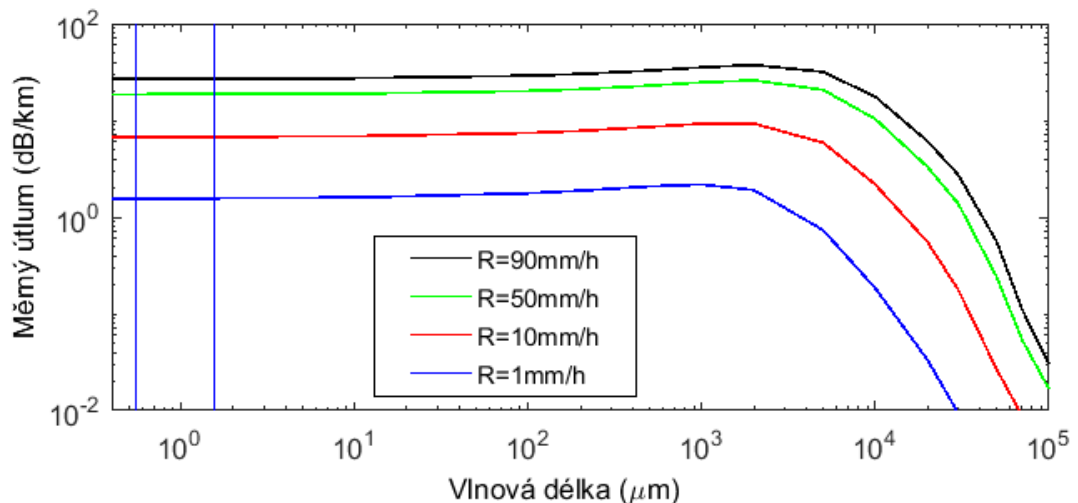
Po konečné úpravě pak dostáváme vztah pro útlum optického signálu v závislosti na intenzitě srážek:

$$\beta_R = 1.58 \cdot R^{0.63} \quad (dB/km), \quad (3.27)$$

kde R je intenzita srážek (mm/h). Tento vztah platí pro vlnové délky do 10 μ m. Perličkou je, že tento vzorec s totožnými parametry je v doporučení ITU-R P.1814 (ITU-R, 2007) veden jako empirický vztah pro Japonsko. V této práci je v grafech označován jako “Marshall-Palmer” dle dosazeného spektra velikosti kapek.

3.7 Simulace útlumu deštěm

V následující analýze na obrázku 15 simuluji útlum OBS v dešti v závislosti na všech vlnových délkách. Zde jsem již použil neaproximovaný extinkční koeficient Q_{ext} , určený metodikou z kap. 3.2.2. Za spektrum kapek jsem dosadil Marshall – Palmerovo rozdělení (3.22).



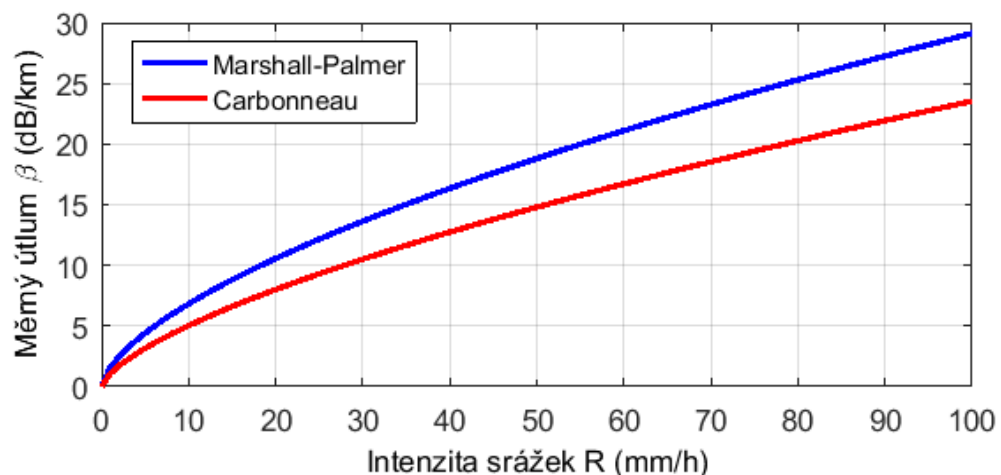
Obrázek 15 - Měrný útlum deštěm v závislosti na vlnové délce. Parametrem je intenzita srážek. Svislé čáry vymezují optické spektrum 550 nm – 1550 nm.

Dvě svislé čáry na obrázku 15 vymezují spektrum v optické oblasti mezi 550 nm a 1550 nm. Toto rozmezí se nachází v optické oblasti a je patrné, že na vlnové délce v rámci tohoto intervalu měrný útlum optického signálu nezávisí. Předpokládáme-li Marshall-Palmerovo rozdělení, přechází se na závislost na intenzitě srážek R , viz předcházející kapitola.

Podobný vzorec byl prezentován v (Carbonneau, 1998), jedná se o empirickou závislost naměřenou ve Francii a je zároveň druhým vzorcem v doporučení ITU-R (ITU-R, 2007):

$$\beta_R = 1.076 \cdot R^{0.67} \text{ (dB/km)} \quad (3.28)$$

Grafické porovnání obou vzorců je na obrázku 16.



Obrázek 16 - Vzorce pro měrný útlum optického signálu v závislosti na intenzitě srážek

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

Nicméně je třeba brát v potaz, že tyto modely jsou aproximativní, protože předpokládají průměrné spektrum velikosti kapek s exponenciálním rozdělením. Reálná měření spektra deště ale ukazují, že dešť má ve skutečnosti gamma rozdělení, které se navíc mění v čase. Od určitého poloměru počet menších kapek klesá na rozdíl od exponenciálního rozdělení, které říká, že čím menší poloměr, tím více kapek se v jednotkovém objemu nachází.

3.8 Vliv mlhy na útlum OBS

Mlha je pro OBS v porovnání s deštěm daleko horším atmosférickým jevem. Velký počet mlžných kapek, jejichž velikost je řádově srovnatelná s vlnovou délkou záření, způsobuje měrný útlum signálu řádově až stovky dB/km.

3.8.1 Tvorba mlh a jejich rozdělení

Mlha je tvořena malými vodními kapkami, které se vznášejí ve vzduchu v blízkosti zemského povrchu (Řezáčová, 2007). 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.

- Radiální – vznikají ochlazením vzduchu např. od studeného zemského povrchu, který v noci vyzařuje (odtud radiální) a ochlazuje tím přilehlý vzduch
- Advekční – vznikají 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 tlačěn vzhůru do chladného vzduchu, kde dojde při dostatečných podmínkách ke kondenzaci.
- Frontální – vznikají přidáním vodní páry, které 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 . Vodní obsah (LWC) je zpravidla nižší než 0,2 g/m^3 (Řezáčová, 2007).

Podobným způsobem, jakým je mlha překážkou pro vlnové délky v oblasti NIR, ovlivňuje i elektromagnetické záření v oblasti viditelného spektra – světlo. Veličina, jež tuto závislost popisuje, se nazývá dohlednost.

3.8.2 Dohlednost

V odborné literatuře se vyskytují dvě definice dohlednosti:

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

Pro instrumentální měření dohlednosti bylo potřeba definovat dohlednost i pomocí měřitelných veličin.

Dle další definice je dohlednost vzdálenost x , kde kontrastní poměr C/C_0 klesne na 2 % (Kruse, 1962).

Kontrastní poměr představuje poměr zdánlivého kontrastu objektu C určeného ze vzdálenosti x vůči vnitřnímu kontrastu objektu C_0 měřeného z jeho blízkosti. Nutno zdůraznit, že se v literatuře objevují definice s kontrastním poměrem i na 5 %.

3.8.3 Měření dohlednosti

První definici využívají pozorovatelé, jež měří dohlednost subjektivně na meteorologických observatořích.

Alternativou je snímání panoramatické fotografie s různě vzdálenými známými objekty (Baumer, 2008). Tento systém je založen na detekci hran a odpovídá klasickému měření dohlednosti pozorovateli.

Na druhé definici je založena většina ostatních automatických měřicích systémů. Ten nejrozšířenější je založen na principu dopředného rozptylu světla, který využívá např. řada přístrojů Present Weather Detector (PWD) od firmy Vaisala. Přístroj sestává z optického vysílače a přijímače, přičemž jejich osy jsou vzájemně vychýlené. Dohlednost je pak nepřímo úměrná intenzitě světla, která se odráží od hydrometeorů a dopadá na přijímač.



Obrázek 17 - Dohledoměr PWD-21 umístěný na Milešovce

Tento systém je spolehlivý a bezúdržbový ale poskytuje pouze bodové měření dohlednosti v daném místě.

3.8.4 Měření dohlednosti kamerou

Z našich zkušeností víme, že mlha či oblaka mohou být i na velmi krátké vzdálenosti značně nehomogenní. Pro potřeby výzkumu optických bezdrátových spojů a vlivu reálné atmosféry na jejich útlum by měl systém ideálně měřit dohlednost mezi dvěma pevně danými body (přijímač a vysílač optického spoje). Tuto podmínku splňuje systém pro měření dohlednosti kamerou (Colvero, 2005). Systém využívá digitální fotoaparát či kameru a je tedy levnější variantou k drahým měřicím přístrojům.

Princip metody vychází z druhé výše uvedené definice dohlednosti. Do určité vzdálenosti x je umístěn černobílý terč, který je snímán kamerou či digitálním fotoaparátem. Z fotografií lze poté určit dohlednost pomocí následujícího algoritmu. Kontrastní poměr C_T je definován jako poměr zdánlivého kontrastu $C(x)$ ke kontrastu vlastnímu C_0 :

$$C_T = \frac{C(x)}{C_0} \quad (3.29)$$

Vlastní kontrast C_0 je v našem případě kontrast terče změřený v jeho blízkosti. Zdánlivý kontrast $C(x)$ je pak kontrast změřený ze vzdálenosti x v aktuálních meteorologických podmínkách.

Samotný kontrast je definován A. Michelsonem (1927) následovně:

$$C = \frac{L_w - L_b}{L_w + L_b} \quad (3.30)$$

kde L_w je svítivost (luminance) bílé části terče a L_b je svítivost černé části terče. Díky faktu, že jde o poměr mezi oběma svítivostmi, není nutné znát absolutní svítivost v cd/m^2 . Postačuje relativní svítivost ve stupních šedi určená z fotografie.

Výsledná dohlednost je za použití Beer-Lambert-Boguerova zákona určena vztahem (Colvero, 2005):

$$V = \frac{\ln(0.02)}{\ln\left(\frac{C(x)}{C_0}\right)} \cdot x \quad (3.31)$$

kde V je dohlednost (m), x je vzdálenost mezi kamerou a terčem (m), $C(x)$ je zdánlivý kontrast měřený ve vzdálenosti x a C_0 je vlastní kontrast terče.

3.8.5 Model měrného útlumu s použitím dohlednosti

Vliv útlumu OBS v závislosti na dohlednosti je nedávným i současným tématem výzkumu. Nejrozšířenějším současným modelem pro výpočet měrného útlumu optického signálu z dohlednosti je vzorec dle I. I. Kima (2001) odvozený z Beer-Lambertova zákona:

$$\beta = \frac{3.91}{V} \cdot \left(\frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q} \quad (3.32)$$

kde β je měrný útlum v km^{-1} , V je dohlednost v km, λ je vlnová délka záření v nm a koeficient q závisí na aktuální dohlednosti V :

Tabulka 2 - Koeficient q pro Kimův vzorec (Kim, 2001)

$q=$	1.6	pro $V > 50$ km
	1.3	pro $6 \text{ km} < V < 50$ km
	$0.16V + 0.34$	pro $1 \text{ km} < V < 6$ km
	$V - 0.5$	pro $0.5 \text{ km} < V < 1$ km
	0	pro $V < 0.5$ km

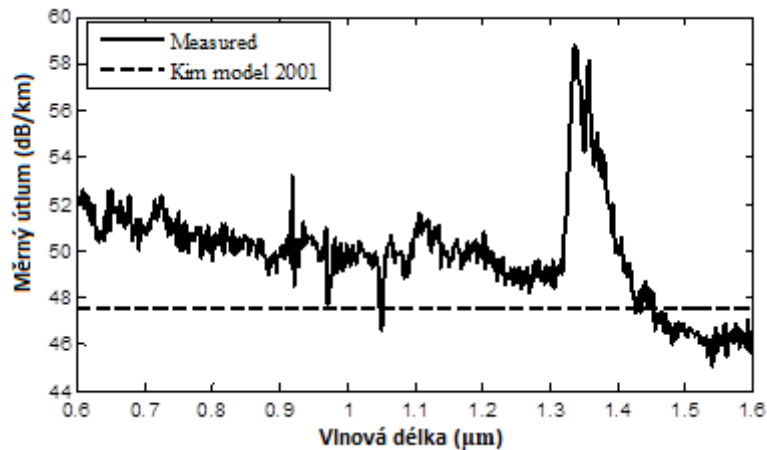
Vzorec v podstatě říká, že útlum optického spoje je převrácená hodnota dohlednosti násobená frekvenčně závislým koeficientem. Tabulka 2 mimo jiné říká, že při dohlednosti nižší než 500 m je útlum optického signálu v rámci NIR spektra frekvenčně nezávislý.

Pro vyjádření v decibelové míře platí:

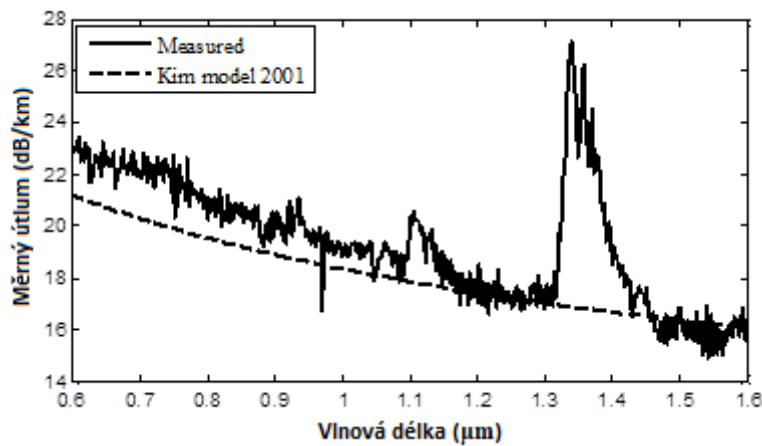
$$\beta = \frac{16.98}{V} \cdot \left(\frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q} \quad (\text{dB} / \text{km}) \quad (3.33)$$

Další modely jsou např. Al Naboulsi (2004) či Kruse (1962), který má stejný předpis jako (3.33), ale liší se v definici koeficientu q .

Je nutné zmínit, že kmitočtová závislost Kimova modelu (3.33) nereflektuje molekulární absorpci optického signálu na kapkách vody. Například M. Ijaz (2013b) změřil přímo útlum optického signálu při dané dohlednosti na celém spektru NIR v laboratorních podmínkách, viz obrázky 18 a 19.



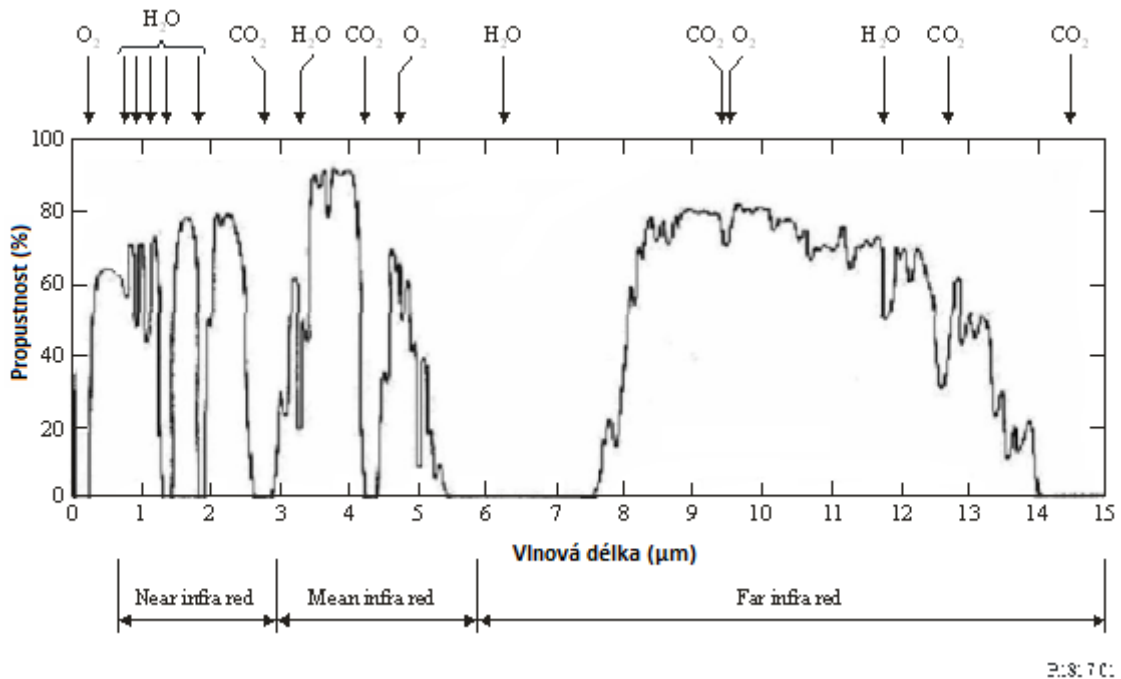
Obrázek 18 - Porovnání naměřeného útlumu v mlze s Kimovým modelem při $V = 357$ m (Ijaz, 2013b)



Obrázek 19 - Porovnání naměřeného útlumu v mlze s Kimovým modelem při $V = 785$ m (Ijaz, 2013b)

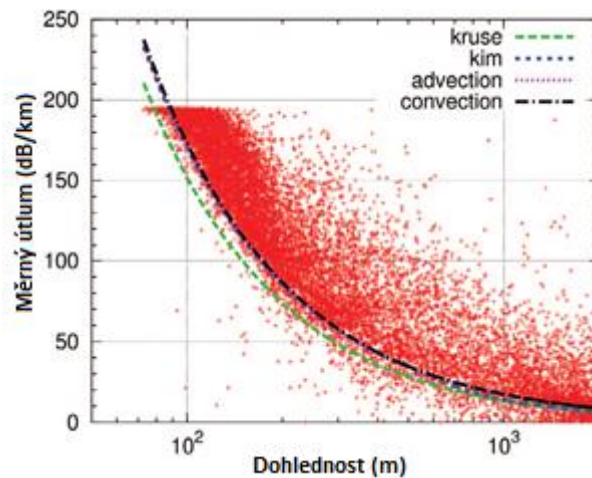
Na obou grafech je patrný interval $1,35 - 1,45 \mu\text{m}$, kde naměřený útlum výrazně převyšuje teoretické hodnoty dle (3.33). Tyto výsledky jsou ve shodě s grafem propustnosti atmosféry, viz obrázek 20. Patrný je rovněž mírný vrchol na $1,1 \mu\text{m}$, kde propustnost dle ITU-R klesá na 45 %.

Autor dále upozorňuje na rozpor ve frekvenční závislosti při dohlednosti nižší než 500 m (viz obrázek 18).



Obrázek 20 - Propustnost atmosféry vlivem molekulární absorpce (ITU-R, 2008)

Ne všechna experimentální měření ale tyto modely potvrzují. Výsledky analýzy Grábnera a Kvičery (2010) z měření v Praze ukazují, že všechny používané modely měrný útlum podhodnocují, viz obrázek 21.



Obrázek 21 - Porovnání teoretických modelů s experimentálním měřením v Praze na ČMI, vlnová délka 830 nm.

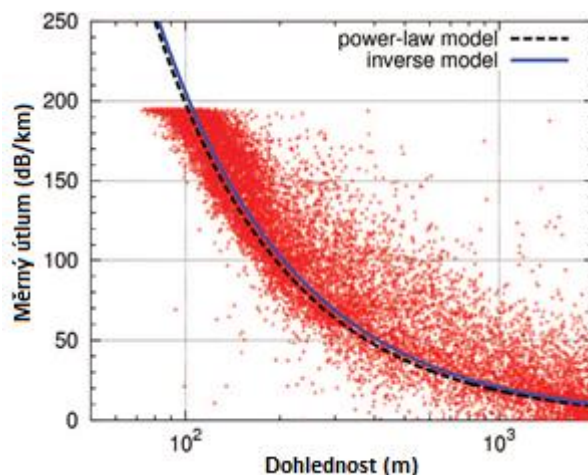
Křivky “advection” a “convection” jsou dva typy modelů Al Naboulsi (Grábner, 2010)

Autoři to vysvětlují rozdílnými lokálními klimatickými podmínkami, které by měly být při návrhu OBS vždy brány v potaz. Zároveň publikují vlastní empirické vzorce pro vlnové délky 830 nm a 1550 nm pro podmínky v Praze ve formátu převrácené hodnoty dohlednosti, podobně jako vzorec (3.33):

$$\beta_{830nm} = \frac{20.57}{V} \text{ (dB/km)} \quad (3.34)$$

$$\beta_{1550nm} = \frac{18.22}{V} \text{ (dB/km)} \quad (3.35)$$

kde V je dohlednost v km.



Obrázek 22 - Empirické vzorce pro měrný útlum OBS na vlnové délce 830 nm z dohlednosti na základě dat z ČMI v Praze, modře je vyznačen model (3.34) (Grábner, 2010)

Z bodového grafu je patrný značný rozptyl hodnot útlumu při daných meteorologických podmínkách, v tomto případě reprezentovaných dohlednostmi. Tento rozptyl následně snižuje přesnost predikce pomocí dané meteorologické veličiny. Příčin může být hned několik.

Měření meteorologických veličin je bodové (pouze v jednom místě). V případě nehomogenních meteorologických podmínek podél celého spoje pak dochází ke zkreslení predikovaného útlumu.

Je také otázkou, do jaké míry reflektuje dohlednost variabilitu spektra velikosti kapek mlhy. Dané dohlednosti může být dosaženo různými spektry – buď velkým počtem malých kapek nebo menším počtem velkých kapek. Přístroj pro měření dohlednosti od firmy Vaisala pracuje na principu rozptylu světla a spektrum velikosti kapek tak přirozeně reflektuje. Dohlednost je ale integrální veličina definovaná ve viditelném spektru. Rozptyl je frekvenčně závislý a pro přesný přepočítání útlumu vlivem rozptylu na jinou vlnovou délku bychom potřebovali znát právě spektrum velikosti kapek. Kimův model (3.33), který frekvenční závislost útlumu obsahuje, je proto pouze aproximativní – předpokládá jednotné spektrum velikosti kapek. Ale pokud se skutečné spektrum výrazně odlišuje od předpokládaného, může to vést na signifikantní rozdíl mezi skutečným a predikovaným útlumem.

3.8.6 Spektrum kapek mlhy

Pro přesný výpočet útlumu v mlze slouží opět vztah (3.2) dle ITU-R, pro který musíme znát spektrum velikosti mlžných kapek. Obecně se pro tvar spektra kapek mlhy používá gamma rozdělení s předpisem (ITU-R, 2008)

$$N(r) = ar^\alpha \exp(-br), \quad (3.36)$$

kde $N(r)$ je počet kapek na jednotku objemu a na jednotku přírůstku poloměru kapky, r je poloměr kapky, a , b a α jsou parametry rozdělení.

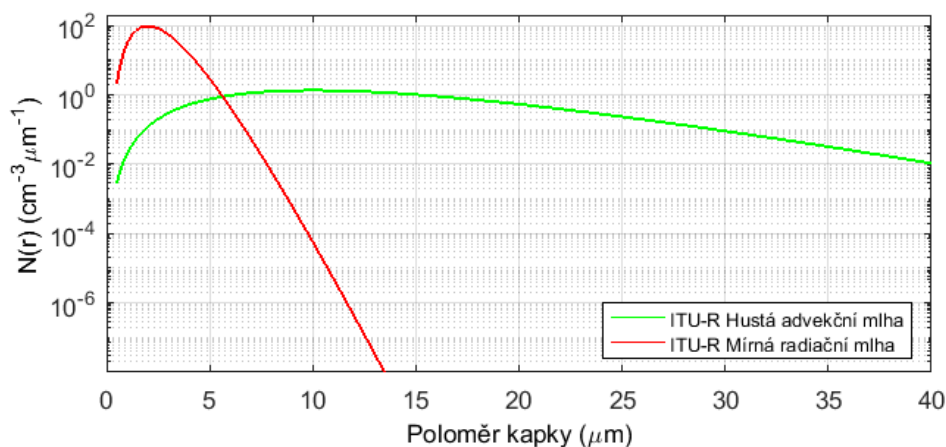
V doporučení ITU-R jsou navrženy typické hodnoty pro dva typy mlhy: husté advekční a mírné radiační, viz tabulka 3.

Tabulka 3 - Parametry spekter mlžných kapek dle ITU-R (2008)

	α	a	b	N (cm ⁻³)	LWC (g/m ³)	r_m (μm)	V (m)
Hustá advekční mlha	3	0.027	0.3	20	0.37	10	130
Mírná radiační mlha	6	607.5	3	200	0.02	2	450

kde N je celkový počet částic na jednotku objemu (cm⁻³), r_m je modální poloměr (μm), kde má rozdělení maximum (je to tedy nejčastější hodnota), LWC je obsah kapalné vody (g/m³), V je dohlednost vztahovaná k typu mlhy (m).

Obě spektra jsou pro názornost vykreslena na obrázku 23. Průměrná mírná radiační mlha obsahuje velký počet malých kapiček, které v součtu představují relativně malý obsah tekuté vody ve vzduchu s dohledností okolo 500 m. Typická hustá radiační mlha obsahuje v jednotce objemu menší počet kapek mající větší průměr. Obsah tekuté vody dosahuje přibližně 0,4 g/m³ a dohlednost klesá na 130 m.



Obrázek 23 - Spektrum kapek mlhy dle ITU-R (2008)

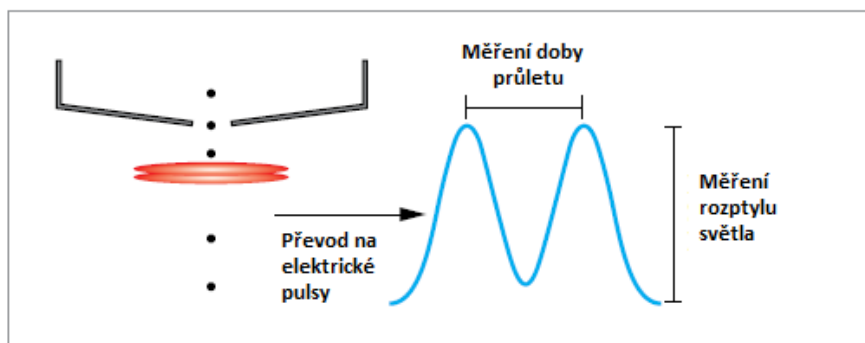
Výskyt a parametry mlhy jsou ale silně závislé na lokálních podmínkách a pro praktické plánování parametrů optických spojů jsou tyto informace příliš obecné. Řešením je přímé měření či alespoň odhad parametrů rozdělení spektra kapek na základě meteorologických měření. Současný stav problematiky měření spektra kapek mlhy je shrnut v další podkapitole.

3.8.7 Měření spektra mlžných kapek

Měření spektra kapek mlhy je oproti dešti výrazně obtížnější. Déšť totiž tvoří dostatečně velké kapky, které padají k zemi, a tudíž stačí monitorovat jejich průlet měřenou oblastí. Kdežto průměry kapek mlhy se pohybují v řádu mikrometrů a volně se vznášejí ve vzduchu. Technologie dešťových distrometrů tu tedy nelze využít.

3.8.7.1 Aerodynamic Particle Sizer

Jednou z možností je přístroj firmy TSI Aerodynamic Particle Sizer® (APS) Model 3321. Přístroj je primárně určen pro měření aerosolů ve vzduchu s rozsahem 0 až 20 μm v průměru. Nepokrývá tedy celé spektrum velikostí mlžných kapek, ale alespoň jeho hlavní část. Princip spočívá v nasávání vzduchu a měření aerodynamických vlastností jednotlivých aerosolů ve vzduchu obsažených.



Obrázek 24 - Princip metody měření velikosti aerosolů přístrojem APS (TSI Inc., 2014)

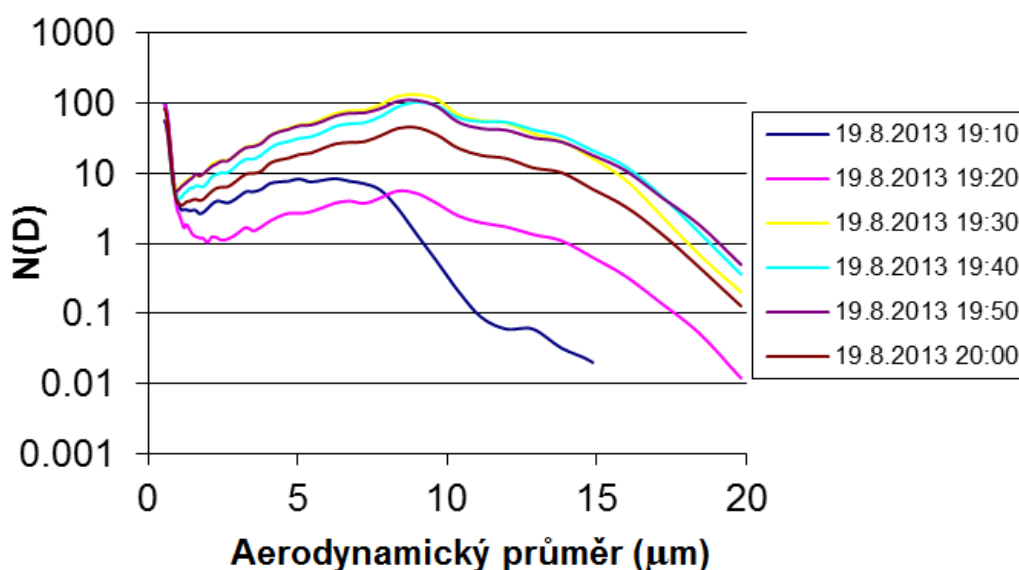
Usměrněné částice procházejí dvěma optickými závory, které se částečně překrývají. Jak částice prochází oběma svazky, generuje se na výstupu signál se dvěma vrcholy. Časové zpoždění mezi vrcholy pak odpovídá tzv. aerodynamickému průměru částice.

Aerodynamický průměr je definován jako průměr částice o hustotě 1000 kg/m^3 se stejnou ustálenou rychlostí způsobenou gravitační silou v klidném ovzduší, jako má měřená částice (Hollerová, 2008). Pevné částice totiž mohou mít nepravidelný tvar. Pokud jde o mlžné kapky, aerodynamický průměr měřený přístrojem APS odpovídá skutečnému průměru kapky.



Obrázek 25 - Přístroj APS (TSI Inc., 2014)

Ve spolupráci s Mgr. Naděždou Zíkovou a Dr. Vladimírem Ždímallem z Ústavu chemických procesů AVČR, v.v.i. byl přístroj APS instalován v srpnu roku 2013 na meteorologické observatoři Milešovka ke zkušebnímu měření. Ukázku naměřených spekter s integračním časem 10 minut můžeme vidět na obrázku 26.



Obrázek 26 - Ukázka naměřených spekter kapek na Milešovce dne 19. srpna 2013

V tomto případě byl modální průměr okolo 10 μm , počet kapek o velikosti nad 20 μm již je v podstatě zanedbatelný z hlediska útlumu elektromagnetických vln. Tvar naměřených křivek potvrzuje předpoklad, že DSD má tvar gamma rozdělení.

Přístroj APS je poměrně drahý, hledají se tak levnější způsoby odhadu spektra mlžných kapek, a to například s pomocí standardních meteorologických přístrojů.

3.8.7.2 Odvození parametrů rozdělení DSD mlhy

K odvození parametrů gamma rozdělení (3.36) lze využít meteorologický přístroj PVM-100 firmy Gerber Scientific Inc., jenž měří obsah tekuté vody LWC a povrchovou plochu částic PSA (Particle Surface Area).

LWC je definován jako (Gerber Scientific Inc., 1993):

$$LWC = \frac{4\pi\rho}{3} \int r^3 N(r) dr \quad (g/m^3) \quad (3.37)$$

kde $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ je hustota vody, r (cm) je poloměr kapky a $N(r)$ je spektrum kapek DSD.

PSA je definován (Gerber Scientific Inc., 1993):

$$PSA = 4\pi \int r^2 N(r) dr \quad (cm^2/m^3) \quad (3.38)$$

LWC a PSA jsou v podstatě třetím, respektive druhým momentem DSD. Poměr LWC a PSA násobený konstantou představuje efektivní poloměr r_e (Gerber Scientific Inc., 1993):

$$r_e = 3 \cdot 10^4 \frac{LWC [g/m^3]}{PSA [cm^2/m^3]} \quad (\mu m) \quad (3.39)$$

r_e je v podstatě vážený průměr poloměrů kapek v jednotce objemu.

Autoři článku (Grábner, 2009) publikovali algoritmus, kde je parametr α gamma rozdělení (3.36) fixně stanoven na hodnotu 2. Zbylé parametry rozdělení pak lze spočítat z LWC a r_e :

$$b = \frac{\alpha + 3}{r_e} \quad (3.40)$$

$$a = \frac{3 \cdot 10^6 LWC \cdot b^{\alpha+4}}{4\pi \cdot \Gamma(\alpha + 4)} \quad (3.41)$$

Vzhledem k tomu, že předepsané rozdělení má tři proměnné parametry a v tomto případě jsou k dispozici dva měřené momenty DSD, je potřeba jeden parametr určit předem. Dle autorů je fixován parametr α , protože dle numerických testů je měrný útlum na změnu α nejméně senzitivní.

3.9 Šíření optického signálu oblaky

V současné době probíhá analýza možnosti provozovat optický bezdrátový spoj na trase satelit-země. Největší překážkou pro pohotovost těchto spojů jsou oblaka. Pro modelování útlumu na celé trase spoje je mimo jiné potřeba určit model šíření optického signálu oblaky. Doporučení ITU-R se o šíření oblaky nezmiňuje.

Otázkou je, jakou veličinou oblaka vlastně charakterizovat. Nejpřesnější volbou je opět spektrum kapek. Dle (Řezáčová, 2007) je rozdíl mezi mlhou a oblaky v podstatě pouze

v poloze pozorovatele. Dle autorky jsou oblaka strukturou velmi podobná advekční mlze. Mají ale vyšší obsah tekuté vody sahající k hodnotám $0,5 \text{ g/cm}^3$.

3.9.1 Spektrum oblačných kapek

Průměrné spektrum velikosti oblačných kapek se liší v závislosti na typu oblaku. Oblaka lze rozdělit podle výšky na čtyři základní typy (Capsoni, 2012):

- Vysoké – mezi 5 až 13 km nad povrchem Země
- Střední – mezi 2 až 7 km nad povrchem Země
- Nízké – méně než 2 km nad povrchem Země

Samostatnou kategorii tvoří vertikálně rozprostřená oblaka, která zasahují do více vrstev, typicky oblaka typu Cumulus či Cumulonimbus.

Pro oblaka, respektive některé typy, platí modifikované gamma rozdělení s parametrem γ navíc:

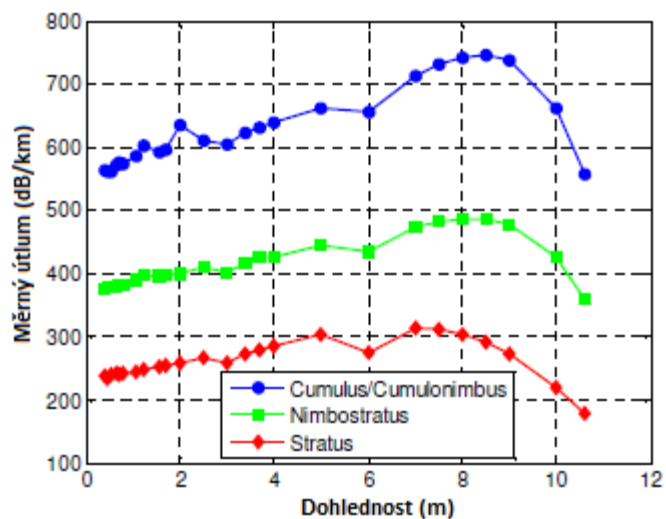
$$N(r) = ar^\alpha \exp(-br^\gamma), \quad (3.42)$$

Pro každý typ oblaku lze v literatuře nalézt definované parametry průměrného spektra (Capsoni, 2012), viz tabulka 4.

Tabulka 4 - Parametry průměrného spektra kapek pro různé typy oblaků

Typ oblaku	r_e (μm)	b	α	γ
Vertikálně rozprostřený - Cumulonimbus	10-20	0.5	6-5	0.5-0.3
Vertikálně rozprostřený - Cumulus	10-20	0.5	6-5	0.5-0.3
Střední - Nimbostratus	6	0.425	4	1
Nízký - Stratus	10	0.6	6	1

Můžeme si všimnout, že pro nízká a střední oblaka platí stejně jako pro mlhu, že $\gamma = 1$. Oblaka s těmito průměrnými spektry způsobují útlum v řádech stovek dB/km, viz graficky na obrázku 27.



Obrázek 27 - Měrný útlum optického signálu v jednotlivých typech oblaků s průměrnými spektry (Capsoni, 2012)

Dle (Řezáčová, 2007) se ale spektrum výrazně mění v jednotlivých fázích vývoje oblaku a tyto průměrná spektra jsou tedy hrubým přiblížením.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Experimentální pracoviště

4.1.1 Meteorologická observatoř na Milešovce

Ústav fyziky atmosféry AVČR, v.v.i. provozuje od roku 2008 experimentální optický bezdrátový spoj na meteorologické observatoři na Milešovce. V rámci výzkumu fyziky atmosféry je v okolí observatoře umístěno velké množství různých meteorologických přístrojů. Vrchol hory je často pokryt nízkou oblačností, což nám dává unikátní příležitost studovat vliv reálných atmosférických podmínek na přenos optického signálu.

Milešovka, nejvyšší hora Českého středohoří s nadmořskou výškou 837 m. n. m., má výrazný kuželovitý tvar a převyšuje okolní terén o 400 m. Díky svému tvaru a umístění je to jedno z míst s nejdrsnějším počasím v České republice. Od roku 1905 zde probíhá pravidelné meteorologické měření.

4.1.1.1 Experimentální optický bezdrátový spoj

Optický spoj na Milešovce je orientovaný na jiho-jihovýchod. Vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem je 60 m, přičemž úhel sklonu je 29°. Mezi roky 2008 a 2013 byla v provozu optická soustava ATMO TL - 02_DUAL, která byla vyrobena na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Pracuje v simplexním provozu, kdy se v pravidelných 15sekundových intervalech střídá vysílání na vlnových délkách 830 nm a 1550 nm. Spoj je určen speciálně pro experimentální měření přijatého výkonu, ve svazku nejsou modulována žádná data.

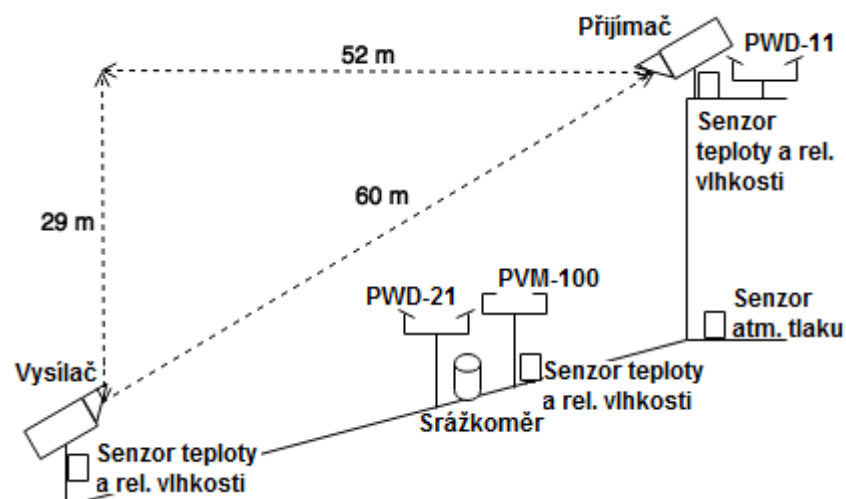
Tabulka 5 - Parametry experimentálního OBS na Milešovce ATMO TL - 02_DUAL (Kvíčala, 2009)

	830 nm	1550 nm
Laserová dioda	DL5032	RLT1550-15G
Vlnová délka λ	830 nm	1550 nm
Vyzářený výkon $P_{m,TXA}$	5 mW	7 mW
Průměr vysílací apertury $DTXA$	25,4 mm	
Průměr přijímací apertury $DRXA$	60 mm	
Dynamický rozsah (odvozeno z měření)	40 dB (optických)	

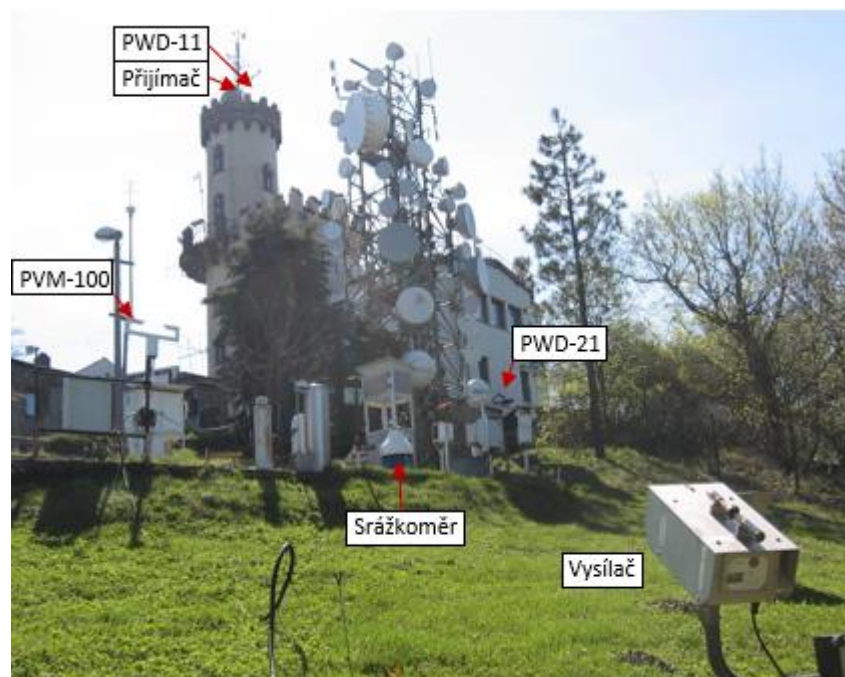


Obrázek 28 - Experimentální optický bezdrátový spoj ATMO TL - 02_DUAL – vlevo vysílač, vpravo přijímač.
(Kvíčala, 2009)

V říjnu roku 2013 byl optický spoj vyměněn za novější soustavu, pracující na vlnových délkách 845 nm a 1550 nm. Obě vlnové délky jsou modulovány jinou konstantní frekvencí (40 a 60 kHz), což umožňuje měřit útlum obou kanálů současně a zároveň potlačit okolní záření na pozadí. Více technických informací lze nalézt v (Kolka, 2012). Oproti původní optické sestavě vyhodnocuje nový optický spoj útlum s vzorkovací frekvencí 10 Hz, díky čemuž je též schopen analyzovat vliv atmosférických turbulencí. Vysílaný výkon je 10 mW, divergence svazku 4 mrad.



Obrázek 29 - Schéma měřicího pracoviště na Milešovce



Obrázek 30 - Experimentální pracoviště na Milešovce

4.1.1.2 Meteorologické přístroje

Meteorologická observatoř je kromě standardní automatické měřicí stanice vybavena přístroji speciálně pro experimentální vědeckou činnost, týkající se fyziky atmosféry. Umístění některých z nich je naznačeno na obrázku 30.

- 3x senzor teploty a relativní vlhkosti. Jedna sada je součástí automatické měřicí stanice firmy Vaisala (zhruba v polovině vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem), další dvě byly instalovány pro měření gradientu indexu lomu podél trasy optického spoje.
- Senzor atmosférického tlaku. Umístěn v suterénu budovy observatoře. Atmosférický tlak nevykazuje rychlé časové ani prostorové změny, stačí tedy jedno měření na celou observatoř.
- Váhový srážkoměr MRW500 firmy Meteoservis
- Particle Volume Monitor PVM-100. Měří LWC (rozsah $0,002 - 10 \text{ g/m}^3$) a PSA (rozsah $5 - 20\,000 \text{ cm}^2/\text{m}^3$). Integrační čas 1 minuta.
- 2 dohledoměry Vaisala. Typ PWD-21 (rozsah dohlednosti $10 - 20\,000 \text{ m}$) je součástí automatické měřicí stanice Vaisala. Měří dohlednost ve výšce 2 m nad zemí. Do března 2010 byl integrační čas 15 min, od tohoto data do současnosti je integrační čas 10 minut. Typ PWD-11 (rozsah dohlednosti $10 - 2\,000 \text{ m}$) je umístěn na věži vedle přijímače. Ten slouží pouze pro experimentální účely a pomáhá nám detekovat

nehomogenitu dohlednosti podél osy optického spoje. Do 21. ledna 2013 byl integrační čas 15 min, od tohoto data 1 minuta.

- 2 sonické anemometry USA-1 firmy Metek. Měří směr a rychlost větru ve 3D na základě zpoždění akustického signálu. Jeden anemometr umístěn v blízkosti automatické měřicí stanice, druhý je na věži u OBS přijímače. Je vhodný pro analýzu atmosférických turbulencí, rychlost odečtu je 0,1 s.
- Ceilometr Vaisala pro detekci výšky oblačnosti – měří až 3 vrstvy.
- Senzor globální radiace ve W/m^2 . Senzor umístěn na věži. Senzor dále určuje délku trvání slunečního svitu v daném integračním čase.

4.1.2 Experimentální spoj ČMI v Praze

Pro účely disertační práce mi kolegové z ČMI poskytli velmi cenná data z jejich experimentálního pracoviště, které se nachází na střeše budovy ČMI v Praze na Roztylech. Experimentální optický spoj pracuje taktéž na vlnových délkách 830 nm a 1550 nm, přičemž vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem je 100 m (Grábner, 2010). Spoj je umístěn ve výšce 26 m nad zemí a je orientován vodorovně – nemá žádné převýšení.

Vysílaný výkon kanálu 830 nm je 13 dBm, průměr vysílací Fresnelovy čočky je 15 cm. Přijímač je schopen změřit útlum 20 dB oproti vysílanému výkonu, měrný útlum změří tedy až do hodnoty 200 dB/km.

Kanál 1550 nm vysílá s výkonem 3,5 dBm s využitím Fresnelovy čočky o průměru 18 cm a je schopen změřit měrný útlum až do 130 dB/km. Na obou kanálech je aplikována OOK modulace.

Poblíž přijímače je instalován dohledoměr PWD-11 s rozsahem měření dohlednosti 10 – 2 000 m. Současně je pracoviště vybaveno i přístrojem PVM-100 pro měření LWC a PSA.

4.2 Dlouhodobé statistiky naměřeného útlumu OBS

V této kapitole prezentuji výsledky z dlouhodobého měření na experimentálním optickém bezdrátovém spoji na Milešovce. Popis hrubých dat z přístrojů, jejich zpracování a synchronizace je popsána v mé diplomové práci (Brázda, 2011b). V grafech jsem zpracoval data ze čtyř let (leden 2009 až prosinec 2012).

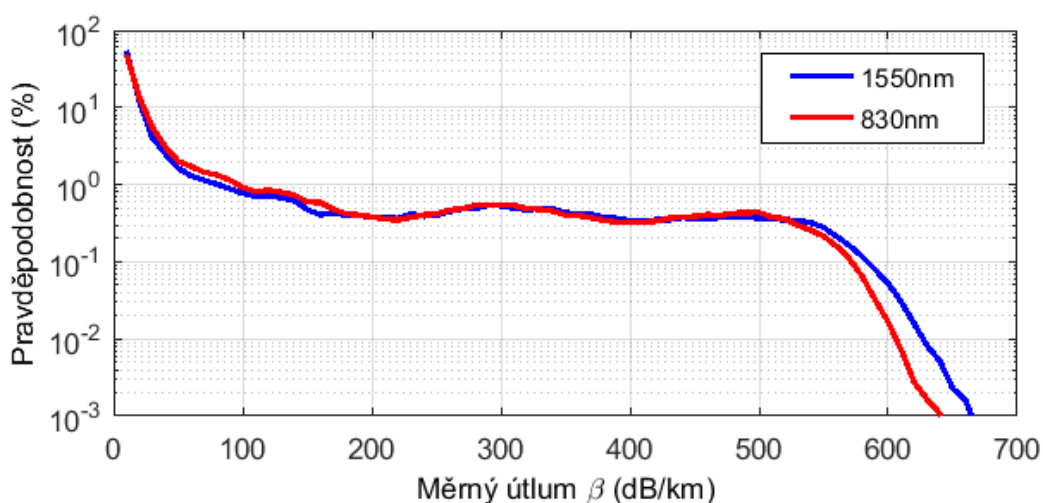
4.2.1 Porovnání měrného útlumu na dvou vlnových délkách

Základní náhled na statistické chování měrného útlumu na Milešovce získáme pomocí následujících analýz. Na obrázku 31 je vykreslena hustota pravděpodobnosti útlumů na obou

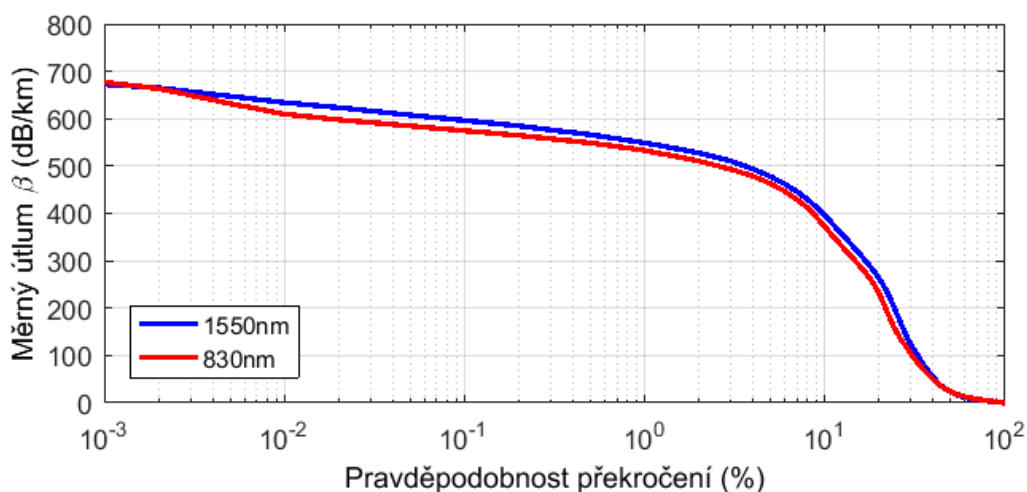
vlnových délkách. Tyto útlumy jsou způsobeny všemi atmosférickými jevy – mlha/oblačnost, déšť, vítr, nehomogenity indexu lomu po délce trasy apod. Přibližně 63 % všech hodnot je v rozmezí 0–20 dB/km. Pro vyšší hodnoty pravděpodobnost klesá a měrný útlum nad 500 dB/km je už velmi výjimečný.

Zde je nutno upřesnit, že útlumy v řádech stovek dB jsou pro každý optický spoj velmi kritické. Dynamický rozsah přijímače se totiž pohybuje řádově v desítkách dB. Na Milešovce jsme schopni tyto hodnoty zaznamenat jen díky velmi krátké vzdálenosti 60 m mezi vysílačem a přijímačem.

Odpovídající distribuční funkce naměřených útlumů je na obrázku 32.



Obrázek 31 - Hustota pravděpodobnosti útlumu na obou vlnových délkách

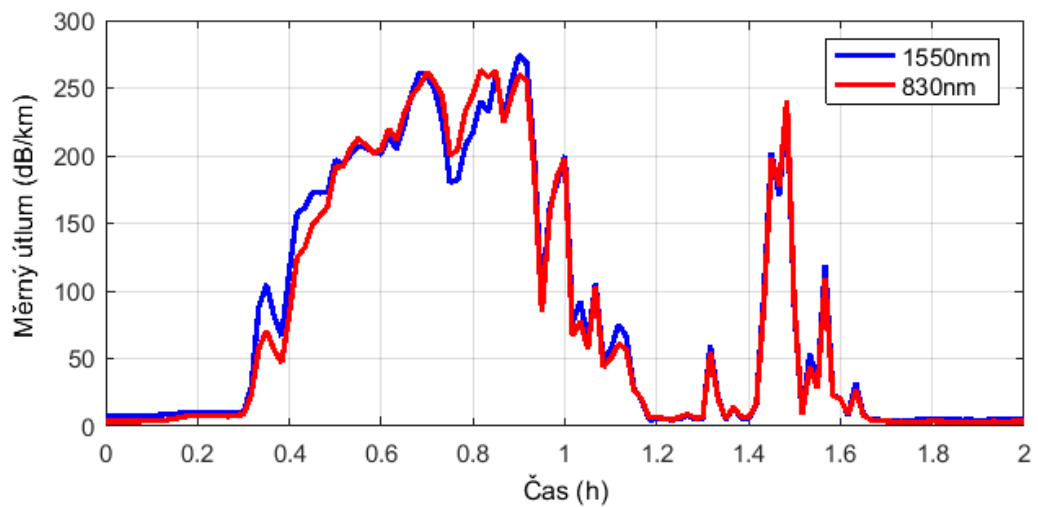


Obrázek 32 - Distribuční funkce útlumu na obou vlnových délkách

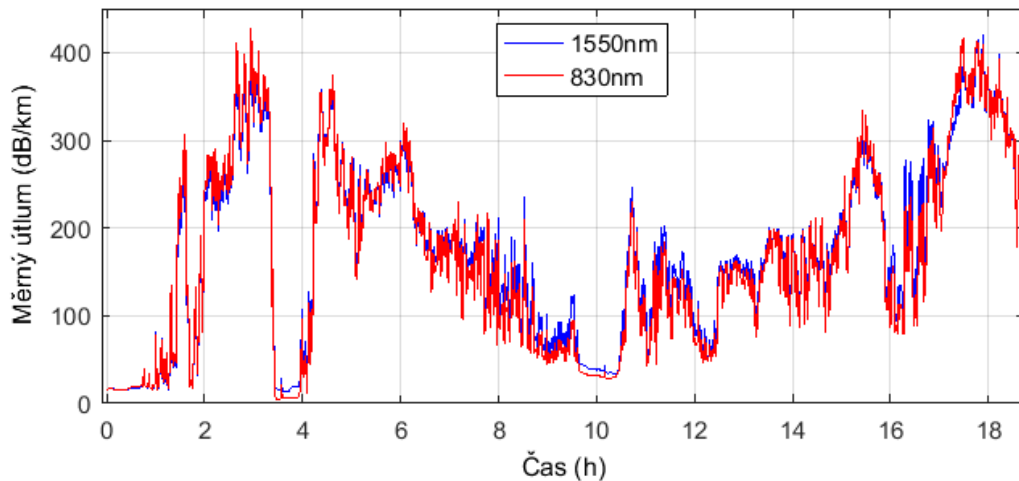
Předcházející grafy jasně dokazují, jak často se na Milešovce vyskytuje nízká oblačnost. Ve 20 % času je měrný útlum optického spoje 100 dB/km a vyšší. Na hladině 1 % je to již

550 dB/km. Tyto statistiky jsou platné pouze pro podmínky na Milešovce a nelze je brát jako indikativní pro městské prostředí, kde je výskyt mlhy daleko méně častý.

Dle Kimova vzorce (3.33) je šíření signálu v rámci infračerveného pásma nezávislé na vlnové délce při dohlednosti nižší než 500 m. Předcházející statistiky na obrázcích 31 a 32 skutečně ukazují, že z dlouhodobého hlediska je mezi oběma vlnovými délkami zanedbatelný rozdíl. Následující obrázky 33 a 34 ukazují příklady časového chodu útlumu na obou vlnových délkách. Z krátkodobého hlediska je patrné, že občas je více tlumena kratší vlnová délka a občas je tomu naopak.



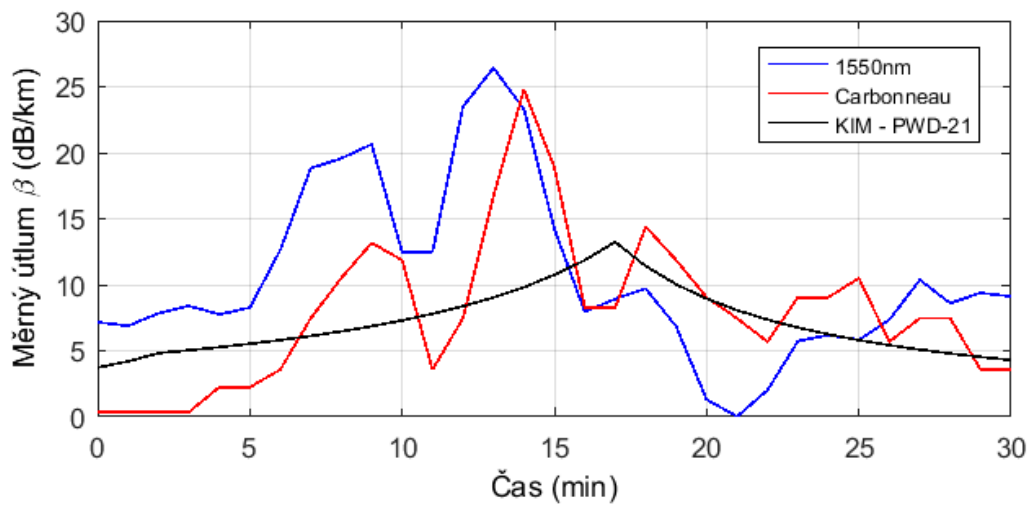
Obrázek 33 - Porovnání časového chodu měrného útlumu na dvou vlnových délkách



Obrázek 34 - Porovnání časového chodu měrného útlumu na dvou vlnových délkách

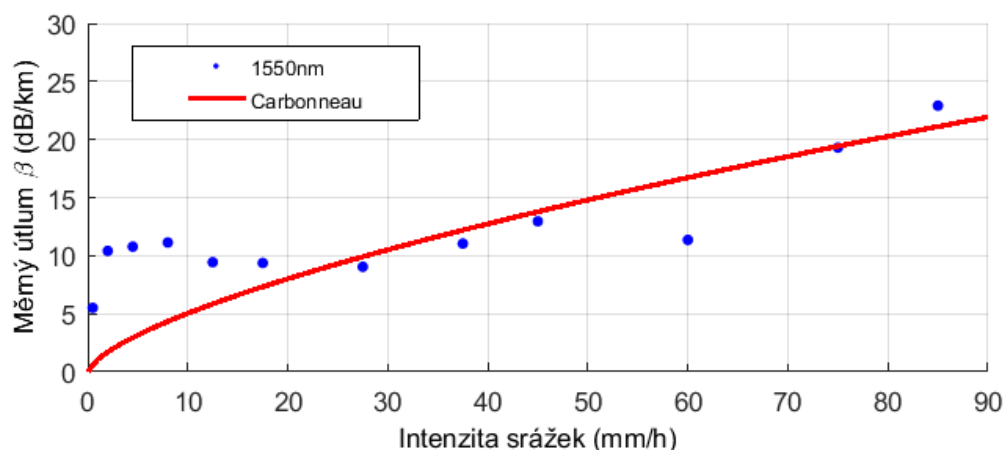
4.2.2 Měrný útlum v závislosti na intenzitě srážek

Obrázek 35 již ukazuje příklad naměřeného útlumu deštěm. Jednalo se o konvektivní dešť s maximální intenzitou srážek 108 mm/h. Je patrná dobrá korelace mezi naměřeným útlumem na 1550 nm a výstupem z modelu Carbonneau (3.28). U nižších intenzit je útlum deštěm na Milešovce těžko měřitelný z důvodu velmi krátké délky spoje. Pro měření útlumu mlhou a nízkou oblačností je krátký spoj výhodou. U deště, který způsobuje řádově nižší útlumy, je to ale nevýhodou. Například při dané intenzitě 108 mm/h je naměřený specifický útlum 26 dB/km, jenž je ale přepočten z hodnoty 1,6 dB/60 m. To je velmi malá hodnota, kde se výrazně projevuje chyba měření a odchylky v důsledku prahování naměřených hodnot.



Obrázek 35 - Konvektivní dešť 3. června 2009

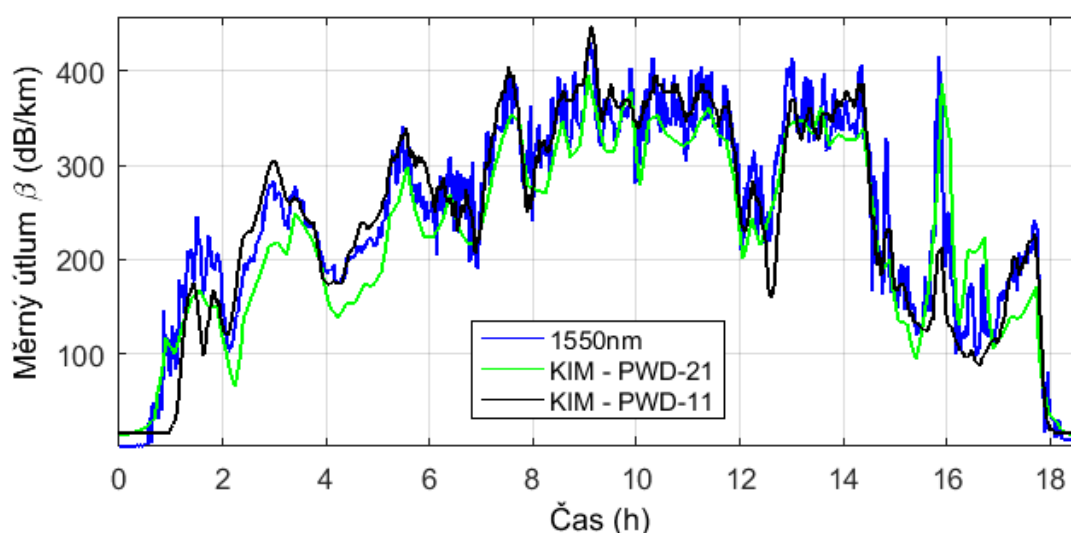
Na obrázku 36 je vykreslen průměrovaný bodový graf závislosti naměřeného měrného útlumu na 1550 nm na intenzitě srážek. Osa x je rozdělena do intervalů, přičemž v každém intervalu je spočtena průměrná hodnota měrného útlumu. V analýze jsou zahrnuta pouze data, kde se projevoval čistě vliv deště. Vliv mlhy je filtrován podmínkou $V < 1350$ m, což je empiricky stanovená hodnota, při které již mlha nezpůsobuje na Milešovce žádný útlum optického spoje. Měřené hodnoty dobře vystihuje teoretický model Carbonneau. Především na nízkých intenzitách i v intervalu okolo 60 mm/h se ale projevují zmíněné nepřesnosti. Relevantnější výzkum útlumu deštěm je tak dle mého názoru analýza s využitím dat z distrometru, viz kapitola 4.5.



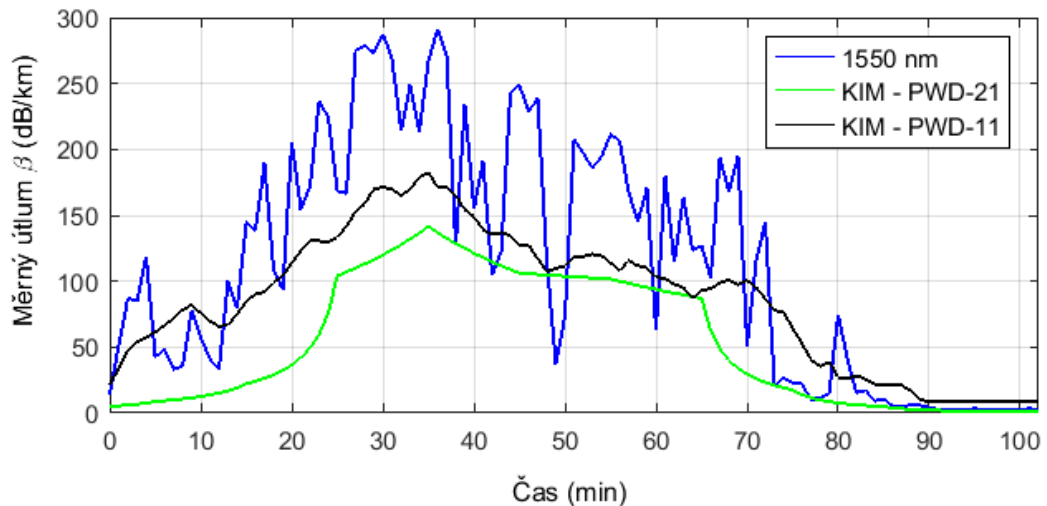
Obrázek 36 - Průměrovaný bodový graf závislosti naměřeného měrného útlumu na intenzitě srážek

4.2.3 Měrný útlum v závislosti na dohlednosti

Jedním z cílů této práce je ověření či zpřesnění modelu šíření optického signálu v mlze či nízké oblačnosti. Porovnání měřeného měrného útlumu a útlumu spočteného z obou dohledoměrů Kimovým vzorcem jsou na obrázku 37 a 38. První příklad dokumentuje homogenní podmínky dohlednosti, oba dohledoměry (na věži i ve výšce 2 metry nad zemí) se ve svých hodnotách shodují. Teoretický Kimův model pak dobře predikuje skutečně naměřený útlum. Druhý příklad na obrázku 38 je ale v podmínkách na Milešovce mnohem častější. Oba průběhy spočtené z dohlednosti podhodnocují měřený měrný útlum o desítky dB/km.



Obrázek 37 - Příklad oblačné události – časový chod měrného útlumu naměřeného na vlnové délce 1550 nm a teoretických útlumů spočtených z dohledností Kimovým vzorcem

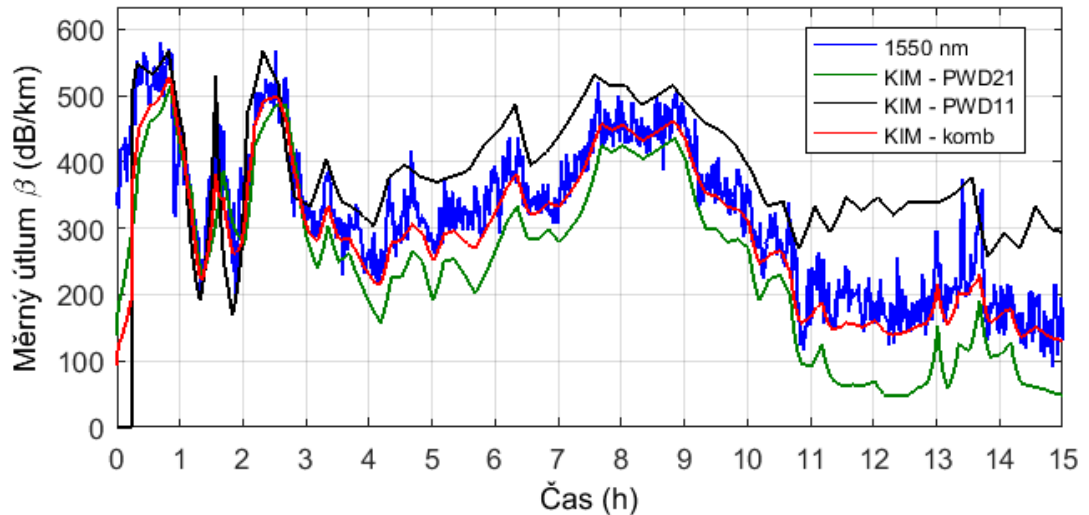


Obrázek 38 - Příklad oblačné události – časový chod měrného útlumu naměřeného na vlnové délce 1550 nm a teoretických útlumů spočtených z dohledností Kimovým vzorcem

Rozdíly mezi těmito případy ilustrují, že veličina dohlednost není dokonalý prediktor. Rozdíly v obou případech jsou s největší pravděpodobností způsobeny variabilitou spektra velikosti kapek. Při shodné dohlednosti totiž může být v jednotkovém objemu velký počet malých kapek či menší počet velkých kapek, což činí při výpočtu měrného útlumu optického signálu výrazné rozdíly.

4.2.3.1 Nehomogenita dohlednosti

Předešlé grafy reprezentovaly případy, kdy je rozložení nízké oblačnosti podél optického spoje homogenní. Vzhledem k tomu, že se observatoř nachází na vrcholu hory a přijímač s vysílačem jsou umístěny každý v jiné výšce, setkáváme se i se situacemi, kdy je rozložení mlhy i na tak krátkém spoji nehomogenní. Příklad takové události je na obrázku 39, kdy je v prvních třech hodinách naměřený měrný útlum shodný s teoretickými měrnými útlumy spočtenými dle Kimova vzorce z obou dohledoměrů zvlášť. Postupem času se ale mlha začne zvedat a stává se tak oblakem typu stratus, zeleně vyznačená křivka měrného útlumu odvozeného z dohlednosti u země klesá na hodnotu kolem 50 dB/km. Naměřený měrný útlum je tak mezi oběma teoretickými křivkami, což dokazuje, že rozhraní oblačnosti bylo ve výšce mezi vysílačem a přijímačem.



Obrázek 39 - Nehomogenita dohlednosti naměřená 20. prosince 2012

V mé diplomové práci jsem prezentoval vzorec, který na základě nejlepší korelace vystihuje tyto podmínky, kdy je měrný útlum na Milešovce odvozen z kombinace dat z obou dohledoměrů (Brázda, 2011b).

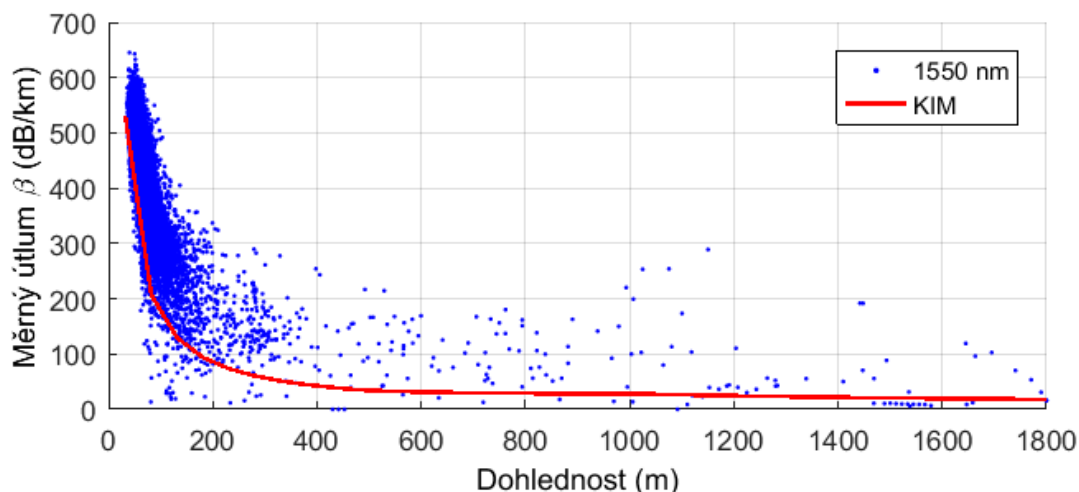
$$V_{komb} = \frac{(2 * V_{2m} + V_{věž})}{3}, \quad (4.1)$$

kde V_{komb} je kombinovaná dohlednost, V_{2m} je dohlednost z přístroje PWD-21 ve výšce 2 m nad zemí a $V_{věž}$ je dohlednost z přístroje PWD-11 umístěného na věži.

Nejvyšší korelace mezi naměřenými a teoretickými útlumy platí pro kombinaci, kdy je dvojnásobná váha na straně dohlednosti u země. To vede k myšlence, že pro výsledný útlum na trase optického spoje mají větší vliv podmínky u vysílače nežli u přijímače.

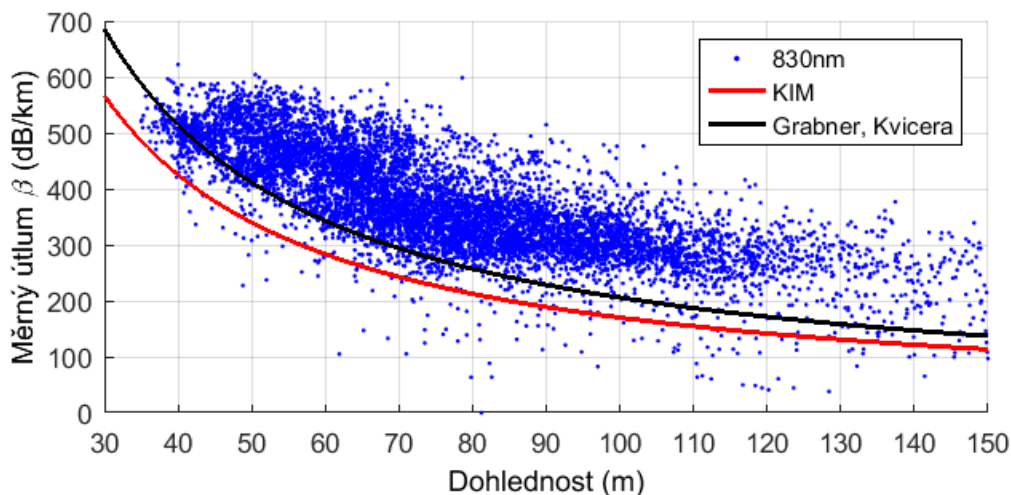
Nicméně data z takových situací nejsou vhodná pro výzkum šíření vzhledem k tomu, že nemáme dostatečně přesné informace o stavu prostředí. Proto jsou při dalších analýzách vyloučena data, kdy se údaje z obou dohledoměrů výrazně liší.

Bodový graf čtyřletých měření závislosti měřeného útlumu na dohlednosti je pak zobrazen na obrázku 40. V této analýze byla použita pouze data z letních měsíců (květen až září; kvůli vlivu námrazy, viz kapitola 4.3.2) a pouze při homogenní dohlednosti (oba dohledoměry se nelišily o více než 30 m). Každý modrý bod pak představuje jednodominutový průměr.



Obrázek 40 - Bodový graf naměřeného útlumu na kanálu 1550 nm v závislosti na dohlednosti – pouze homogenní podmínky

Bodový graf na obrázku 40 je z hlediska této práce velmi důležitý, lze z něj vyčíst několik faktů. Jednak vidíme distribuci naměřených dohledností, kde většina bodů leží v oblasti nižší než 200 metrů. To je důsledkem speciálního umístění observatoře na vrcholu hory Milešovka, která je velmi často pokryta nízkou oblačností. Homogenní mírné mlhy se zde prakticky nevyskytují. Naměřené body v oblastech, kde je dohlednost vyšší než 400 m, jsou ve skutečnosti pouze přechodové jevy na začátku či na konci oblačných událostí. Další důležité aspekty jsou lépe viditelné na detailu na obrázku 41, kde jsou zobrazeny pouze dohlednosti do 150 m.



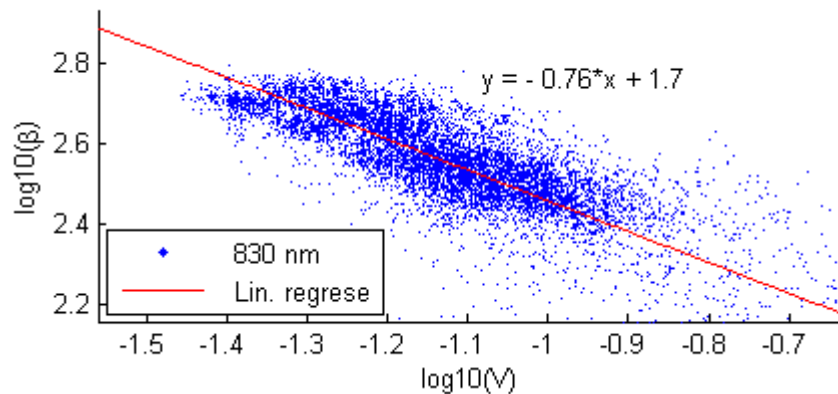
Obrázek 41 - Detail bodového grafu naměřeného útlumu na kanálu 830 nm v závislosti na dohlednosti – pouze homogenní podmínky

Kimův model závislosti měrného útlumu na dohlednosti podhodnocuje experimentální měření na Milešovce cca o 100 dB/km. Ani empirický model z experimentálních dat z ČMI v Praze

naměřená data nevystihuje a potvrzuje se v tomto případě výrok autorů tohoto modelu, že je nutné brát v potaz lokální klimatické podmínky. Proto jsem v rámci této práce odvodil model, který platí pro podmínky na Milešovce. Na obrázku 42 je zobrazeno odvození parametrů modelu v navrženém tvaru:

$$\beta = a \cdot V^b \text{ [dB/km]}, \quad (4.2)$$

kde β je měrný útlum v dB/km a V je dohlednost v km.



Obrázek 42 - Odvození parametrů empirického modelu útlumu na kanále 830 nm na Milešovce

Po zlogaritmování obou stran rovnice (4.2) můžeme po úpravě provést lineární regresi k získání parametrů a a b . Ty jsou v případě Milešovky a kanálu 830 nm následující:

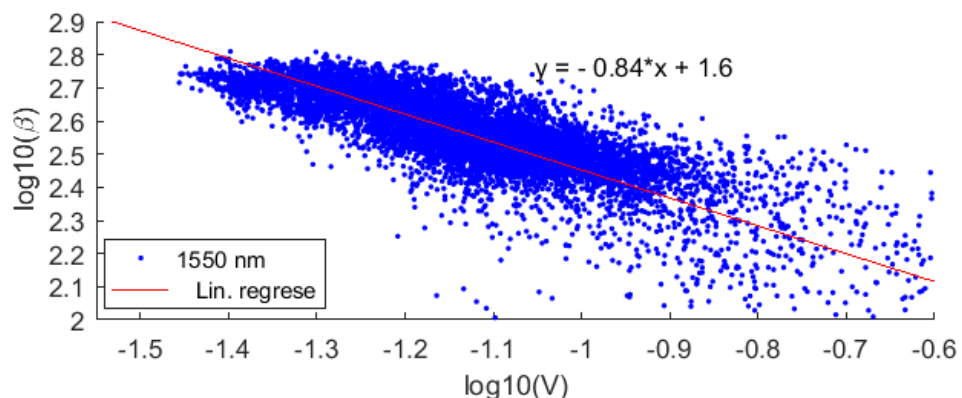
$$\begin{aligned} a &= 10^{1.7} = 50 \\ b &= -0.76 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Výsledný vzorec pro měrný útlum OBS na 830 nm v závislosti na dohlednosti je tedy

$$\beta_{830nm} = 50 \cdot V^{-0.76}, \quad (4.4)$$

kde β je měrný útlum v dB/km a V je dohlednost v km.

Obdobně provedeme regresi pro kanál 1550 nm, viz obrázek 43.



Obrázek 43 - Odvození parametrů empirického modelu útlumu optického signálu na kanále 1550 nm na Milešovce

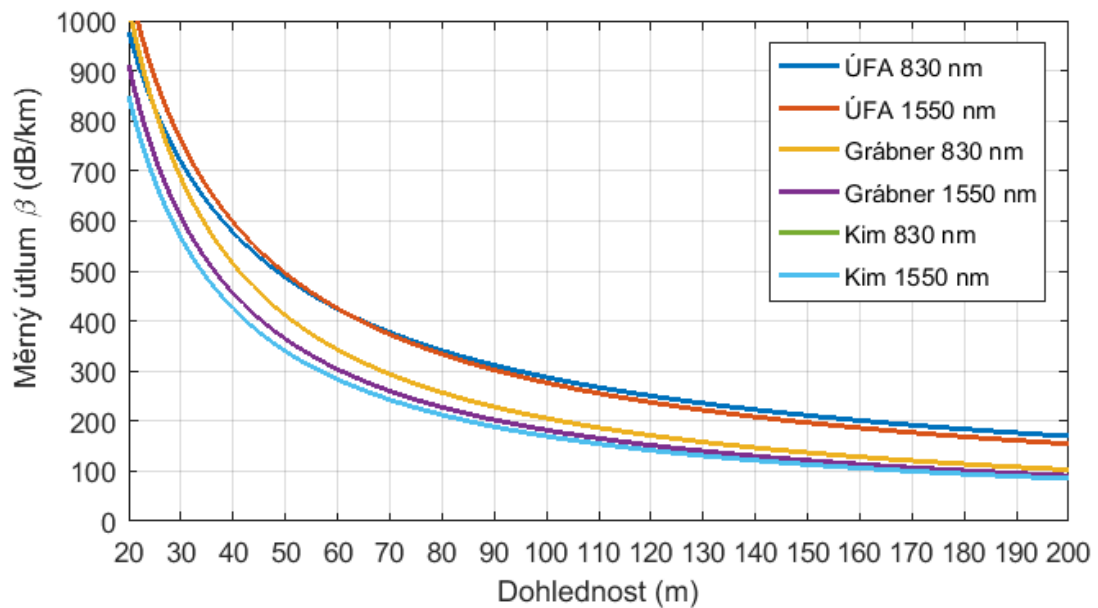
Parametry a a b získané z lineární regrese jsou následující:

$$\begin{aligned} a &= 10^{1.6} = 40 \\ b &= -0.84 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Výsledný vzorec pro měrný útlum na kanále 1550 nm je tedy

$$\beta_{1550nm} = 40 \cdot V^{-0.84}, \quad (4.6)$$

Výsledné porovnání jednotlivých modelů měrného útlumu s využitím dohlednosti pro oba optické kanály je na obrázku 44.



Obrázek 44 - Porovnání aproximativních modelů z dohlednosti

Kimův model (3.33) tvrdí, že při dohlednosti pod 500 m není v oblasti NIR žádná kmitočtová závislost. Proto se křivky pro oba kanály v případě tohoto modelu překrývají. Grábnerovy empirické modely jsou s tím v nesouladu, když kanál 830 nm vykazuje větší útlum než kanál 1550 nm. Modely ÚFA jsou pro oba kanály ale takřka totožné, na základě našich dat tedy potvrzujeme nezávislost na kmitočtu. Hodnoty měrného útlumu jsou ale při dané dohlednosti výrazně vyšší. Těžko z dostupných dat stanovit důvody, je ale pravděpodobné, že se projevuje výrazná odlišnost umístění experimentálního spoje. Městské mlhy mohou mít výrazně odlišné vlastnosti od horské mlhy, která je v podstatě nízkou oblačností. Ve městě se vyskytují ve vzduchu pevné částice, které představují tzv. pevná kondenzační jádra, na kterých při poklesu teploty pod tzv. rosný bod zkondenzuje vodní pára do kapiček mlhy. Oproti tomu na Milešově je mlha nejčastěji vytvořena vzestupným prouděním vzduchu okolo hory, díky

kterému dochází k ochlazení vzduchu a následné kondenzaci bez přítomnosti kondenzačních jader.

Rozdíl v umístění spoje a tím pádem i v atmosférických podmínkách vedou k domněnce, že ani typické spektrum velikosti kapek nebude úplně totožné. Podrobnější analýza následuje v závěrečné kapitole, která se věnuje odhadu spektra velikosti mlžných kapek.

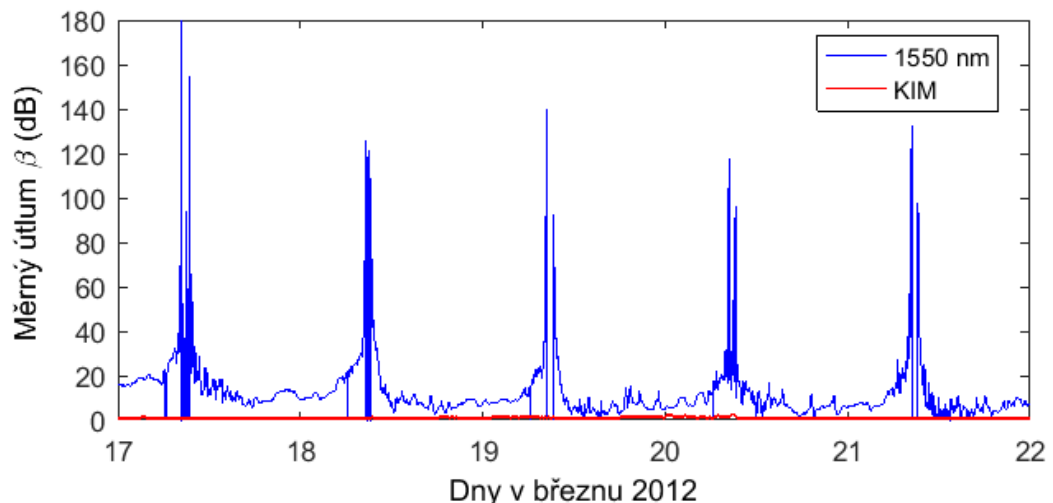
4.3 Další jevy, které mají vliv na pohotovost spoje

Při reálném provozu OBS se mimo klasických atmosférických jevů zahrnující různé druhy hydrometeorů projevují i další jevy, které mají vliv na pohotovost spoje.

4.3.1 Vliv Slunce

Optické bezdrátové spoje pracují v blízkém infračerveném pásmu NIR. Slunce je výrazným zdrojem záření v tomto pásmu a negativně tak může ovlivňovat přenos ve formě dodatečného šumu. V (Sidorovitch, 2002) jsou zmíněny různé podmínky vlivu slunečního záření. V případech, kdy přijímač míří přímo k Slunci, dopadají sluneční paprsky na fotodiodu a zvyšují výkon šumu. Klesá tak poměr S/N, který je rozhodující pro zachování komunikace mezi přijímačem a vysílačem.

Na Milešovce je přijímač orientován zhruba na sever, přesto se v určitý čas roku objevují pravidelné útlumy i výpadky spoje, viz obrázek 45.



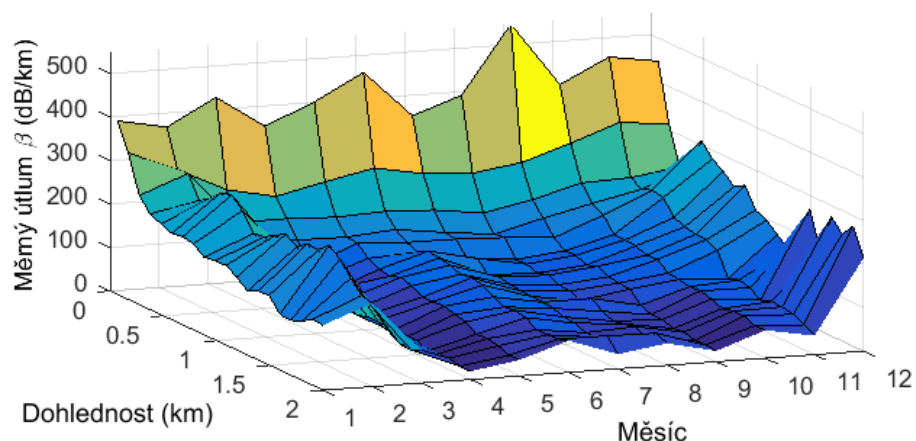
Obrázek 45 - Vliv slunce na funkci optického spoje

V grafu je zobrazen červeně průběh teoretického útlumu mlhou dle Kimova vzorce. Tato křivka dokazuje, že útlum nebyl způsoben mlhou či nízkou oblačností. Periodické průběhy útlumu se opakují každý rok přibližně v dubnu a v září. Právě v dubnu a v září je Slunce ve

Střední Evropě v elevaci přibližně 30°. Vysílač je orientován na jih s elevací 29°. Jedná se tedy o interakci vysílače se slunečními paprsky. Ve vysílači je totiž zabudován zpětnovazební senzor, který reguluje vysílání tak, aby byl vyzářený výkon konstantní. Pokud na přijímač dopadají navíc sluneční paprsky, senzor zaznamená zvýšení světelné intenzity a regulátor stáhne vysílaný výkon. To se následně projeví nižším přijatým výkonem v přijímači. Z grafu je patrné, že sluneční záření takto dokáže způsobit i výpadky. Proto je při instalaci optického spoje nutné dbát na umístění tak, aby vysílač ani přijímač nebyly nikdy natočeny směrem k Slunci.

4.3.2 Námraza

V oddíle 3.2.3.1 jsem zmiňoval, že pro analýzu vztahu dohlednost – měrný útlum jsem využil pouze data z letních měsíců. Na obrázku 46 je zobrazena průměrná závislost mezi naměřeným měrným útlumem na kanále 1550 nm a dohlednostmi v každém měsíci roku 2009.



Obrázek 46 - Závislost naměřeného měrného útlumu (1550 nm) na dohlednosti v každém měsíci roku 2009

Je patrné, že v zimních měsících je i na vyšších dohlednostech převládající útlum o hodnotách nad 100 dB/km. Ten ale není způsoben rozptylem na hydrometeorech nýbrž námrazou na krytu přijímače, viz obrázek 47.



Obrázek 47 - Námraza na krytu přijímače na Milešově

Problémy s námrazou se nemusí vyskytovat pouze v horském prostředí na Milešovce ale též na střechách výškových budov ve městě, kde je zvýšená rychlost větru. Čím je totiž rychlost větru vyšší, tím intenzivněji námraza narůstá.

4.4 Měření dohlednosti kamerou na Milešovce

Převýšení mezi vysílačem a přijímačem experimentálního optického spoje na Milešovce činí 29 m. Z toho důvodu jsme často svědky nehomogenního rozložení dohlednosti podél trasy spoje, viz kapitola 4.2.3.1. Bodové měření dohlednosti pomocí dohledoměrů tedy může vykazovat značné nepřesnosti při detailní analýze jednotlivých událostí. Ideálně bychom potřebovali znát dohlednost přesně podél trasy spoje. Pro tento účel jsem v rámci dizertačního tématu vyvinul a otestoval měřicí systém, který vyhovuje našim požadavkům. Navrhovaný systém je inspirován článkem (Colvero, 2005). Teoretický základ tohoto experimentu je popsán v kapitole 3.8.4.

Pro účely měření dohlednosti digitální kamerou dle vzorce (3.31) jsem nechal na Univerzitě Pardubice vyrobit černobílý terč o rozměrech 1 m x 1 m, který jsem umístil k vysílači, viz obrázek 48. Jeho vnitřní kontrast je $C_0 = 0,6$.



Obrázek 48 - Umístění černobílého terče pro měření dohlednosti

Na věž k přijímači jsem instaloval černobílou kameru značky Basler typu acA1600-20gm s rozlišením 1628 x 1236 pixelů, která je schopna snímat v 12bitovém režimu. Svítivost každého pixelu je tedy vyjádřena číslem v rozmezí 0 – 4095 odpovídající odstínu šedi, kde 0 představuje černou a 4095 dokonale bílou barvu. Objektiv Computar M7528-MP s pevnou ohniskovou vzdáleností 75 mm zajišťuje zorné pole na vzdálenost 60 m tak, aby byl terč zachycen dostatečným rozlišením.



Obrázek 49 - Umístění kamery Basler pro měření dohlednosti na věži meteorologické observatoře na Milešovce

V rámci práce jsem vyvinul obsluhující software, který je napsán v jazyce C#. Využívá předdefinované metody z knihovny PylonC.NET poskytnuté výrobcem. Metoda pro načtení zařízení vyhledává všechna zařízení Basler v pevné síti, kamera tedy nemusí být připojena do počítače přímo. Ovládání grafického rozhraní je jednoduché, obsahuje pouze tlačítka Start a Stop (pro spuštění a ukončení měření) a sadu parametrů pro určení umístění černé a bílé části terče na snímku viz obrázky 48 a 49. Výsledná hodnota svítivosti jedné části terče (L_w či L_b) je střední hodnotou svítivosti všech pixelů v určené oblasti.

Parametrem se rozumí počet pixelů od levého, respektive horního okraje snímku:

- X0W, Y0W – x a y souřadnice levého horního bodu bílé části terče
- X0B, Y0B – x a y souřadnice levého horního bodu černé části terče
- Delta X – šířka jedné části terče (v horizontální rovině)
- Delta Y – výška jedné části terče (ve vertikální rovině)

Rovněž lze nastavit hodinu počátku a konce měření během dne, tento koncept totiž neumožňuje měření v noci. Při umělém osvětlení terče během noci by výsledky měření byly značně rozdílné, ve dne se totiž projevuje též difúzní sluneční záření odražené přímo od kapiček mlhy.

Po zachycení je snímek zobrazen společně s časovým razítkem a se spočtenou dohledností na stavovém řádku. Snímek je automaticky uložen na pevný disk a výsledky měření do textového souboru ve formátu:

den	měsíc	rok	hodina	minuta	sekunda	C(x)	dohlednost
13	11	2012	9	54	00	0.5363	2091.22
13	11	2012	9	55	00	0.5462	2496.48
13	11	2012	9	56	00	0.599	20000

Program používá koncepci dvou vláken. Hlavní vlákno obsluhuje uživatelské příkazy (spuštění a zastavení měření, posunutí detekce terče na snímku). Při probíhajícím měření

běží na pozadí druhé vlákno, které zachycuje snímky v daném intervalu, spočte ze zadaných kritérií kontrast terče a dohlednost a následně uloží snímek a výsledky měření na pevný disk. To vše během několika stovek milisekund, zbývající čas do dalšího měření je vlákno uspané. Tím je docílena minimální zátěž procesoru. Snímky, a tudíž i dohlednost, jsou pro účely práce snímány každých 60 sekund shodně s integračním časem optického spoje. Tento interval je u kamery ale nastavitelný, měřit dohlednost lze v podstatě kontinuálně.

4.4.1 Výsledky měření

Data prezentovaná v tomto článku byla naměřena na meteorologické observatoři Milešovka v období od 7. - 14. listopadu 2012. V tomto období se odehrálo 5 úseků, kdy se přes den objevovala mlha či nízká oblačnost, o celkové délce 27 hodin. Pro přepočtení změřené dohlednosti na útlum optického signálu a následné porovnání s útlumem naměřeným je použit teoreticky odvozený vzorec s empirickou korekcí pomocí koeficientu q dle I. I. Kima (3.33). Následující obrázky 50 a 51 ilustrují dva případy stavu atmosféry. Na obrázku 50 dosahuje dohlednost naměřená kamerou hodnoty 144,5 m. V levé části fotografie je optický vysílač, jenž v tom okamžiku vysílal na vlnové délce 830 nm, která je lidskému oku neviditelná ale kamera jej díky širší spektrální odezvě zaznamená. Je patrné, že mlha je příčinou ztmavení bílé části a zesvětlení černé části terče, což vede k poklesu kontrastu. Na obrázku 51 je zachycena situace při maximální dohlednosti. Kontrast mezi bílou a černou částí terče zde dosahuje hodnoty 0,6, což je zároveň i vnitřní kontrast C_0 .

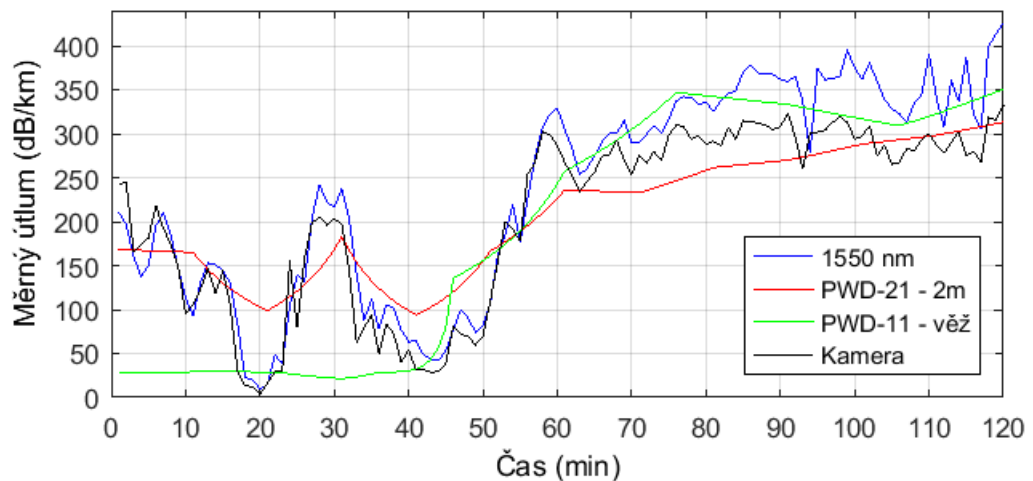


Obrázek 50 - Dohlednost 144.5 m naměřená 11. 11. 2012 v 8:56 UTC



Obrázek 51 - Maximální dohlednost naměřená 11. 11. 2012 v 8:59 UTC

Vrchol Milešovky je velmi specifické prostředí, kde se může dohlednost změnit velmi rychle. Všimněme si, že mezi prvním a druhým snímkem je časový rozestup pouze 3 minuty. Ukázka časového průběhu měřeného a teoreticky spočteného útlumu optického signálu dle (3.33) je na obrázku 52.



Obrázek 52 - Časový průběh naměřeného útlumu na 1550 nm a útlumu vypočteného pomocí Kimova vzorce (3.33) z tří měřených dohledností dne 14. 11. 2012 v období od 6 do 8 hodin UTC

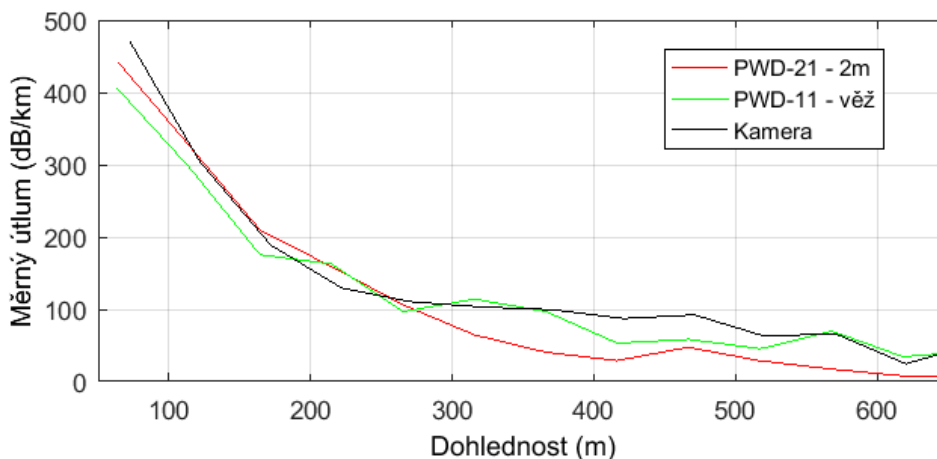
Na první pohled je patrná vysoká korelace mezi naměřeným útlumem (modrá) a útlumem spočítaným z dohlednosti pomocí kamery (černá). Průměrné 10ti či 15ti minutové měření dohlednosti není schopno zaznamenat rychlé změny. V prvních 40 minutách časového průběhu je dohlednost na Milešovce podél dráhy optického spoje nehomogenní. Zatímco

spodní dohledoměr PWD-21 ve výšce 2 metry nad zemí zaznamenává mlhu, na věži je ještě dohlednost vysoká. To je hlavní důvod, proč jsme systém měření dohlednosti kamerou chtěli zavést. Teoretický útlum z měření dohlednosti kamerou zde velmi dobře kopíruje útlum naměřený na optickém spoji. Statistické zpracování tohoto časového průběhu je shrnuto v tabulce 6.

Tabulka 6 - Tabulka korelačních koeficientů a relativní RMSE mezi naměřeným útlumem na 1550 nm a útlumem teoreticky vypočteným z naměřených dohledností dle (3.33)

	Korel. Koef.	Rel. RMSE
1550 nm vs. PWD-21 – 2 m	0.945	0.8452
1550 nm vs. PWD-11 - věž	0.884	0.4791
1550 nm vs. Kamera	0.969	0.2076

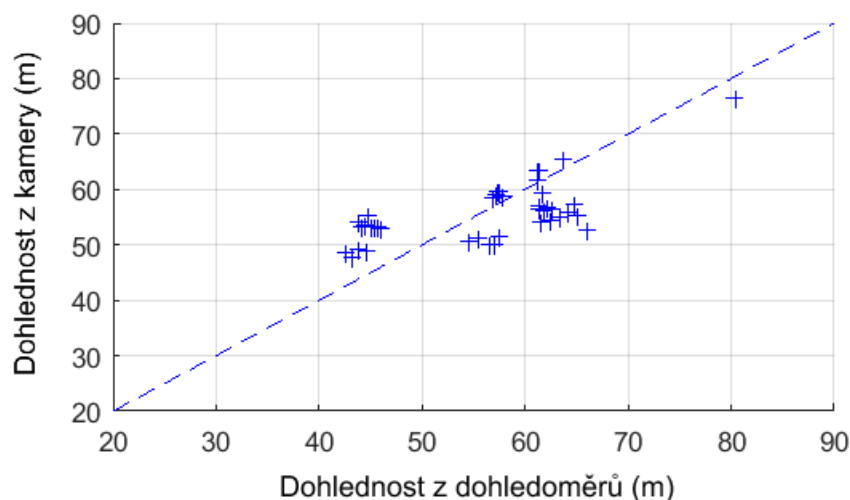
Na obrázku 53 je zobrazena závislost měřeného útlumu na dohlednosti. Osa x byla rozdělena na konečný počet intervalů, kde v každém intervalu byla spočtena průměrná hodnota. Použil jsem data z období 7. -14. 11. 2012. Z grafu vyplývá, že z hlediska dlouhodobějšího měření není mezi metodami měření dohlednosti žádný výrazný rozdíl. Především v oblasti velmi nízkých dohledností jsou minimální diference. Větší odchylky v oblasti vyšších dohledností jsou způsobeny nedostatečným množstvím dat.



Obrázek 53 - Průměrovaný bodový graf – závislost měřeného útlumu na 1550 nm na měřené dohlednosti

Oba profesionální a kalibrované dohledoměry PWD poskytují v každém intervalu 2 hodnoty – průměrnou dohlednost za celý interval a aktuální dohlednost na konci každého intervalu. A právě tuto aktuální dohlednost můžeme využít k testování a kalibraci metody měření dohlednosti kamerou. Na ose x následujícího grafu je vyznačen průměr aktuálních dohledností z obou dohledoměrů PWD za podmínky, že se jejich hodnoty neliší o více jak

5 m. To znamená, že předpokládáme v podstatě homogenní mlhu po celé délce optického spoje. Na ose y je vyznačena tomu odpovídající změřená dohlednost pomocí kamery. V oblasti velmi nízkých dohledností, které nás z hlediska šíření optického signálu zajímají nejvíce, dosahují nejvyšší odchylky 10 m, což je velmi dobrá přesnost. Symetrické rozložení bodů kolem osy naznačuje, že není potřeba žádné kalibrace.



Obrázek 54 - Porovnání dohledností z kamery s dohlednostmi z dohledoměrů v homogenní mlze

Největší výhodou systému měření kamerou je určení dohlednosti mezi pevně danými body. Další velkou výhodou je možnost detekovat časově velmi krátké mlžné či oblačné události, díky čemuž jsme schopni tyto události z dat filtrovat za účelem studování vlivu ostatních meteorologických jevů (např. větrných turbulencí, deště atd.) na přenos optického spoje. V neposlední řadě poskytuje vizuální kontrolu pracoviště, díky čemuž lze detekovat typ srážek, pokud by identifikace z meteorologických měřených dat nebyla stoprocentní.

Bohužel je systém měření kamerou nevhodný pro operační dlouhodobé měření dohlednosti kvůli nemožnosti měřit v noci. I při osvětlení terče v noci by se jednalo o odlišné podmínky, jelikož ve dne se na kameře zachycuje i difúzní sluneční záření odražené přímo od kapiček mlhy. Data jsou tedy využita pro analýzu jednotlivých krátkých událostí, pro dlouhodobější statistiky i analýzy delších událostí jsem využil primárně dat z profesionálních dohledoměrů.

4.5 Porovnání přesného a aproximativního modelování útlumu deštěm

Ústav fyziky atmosféry AVČR, v.v.i. provozuje 2D Video-distrometr v Praze od roku 2010. Díky těmto datům můžeme přesně studovat rozdíly mezi přesným určením útlumu OBS deštěm (ze spektra velikosti kapek) a aproximativním vztahem (z intenzity srážek).

Intenzita srážek R se ze spektra velikosti kapek určí pomocí vztahu:

$$R = \frac{4.8}{10^3} \pi \int_0^{r_{\max}} r^3 v(r) N(r) dr \quad (4.7)$$

kde r je ekvivolumentrický poloměr, $v(r)$ je pádová rychlost kapky, $N(r)$ je spektrum velikosti kapek.

V našem případě, kdy indikujeme průlety kapek po dobu jednodominutového integračního času, je jednodušší pouze sečíst objemy všech kapek v dané minutě a přepočítat na rozměr mm/h pomocí vztahu:

$$R = 80\pi \cdot 10^{-4} \sum_{i=1}^k r_i^3 \quad (mm/h), \quad (4.8)$$

kde r je poloměr kapky v mm a k je počet kapek v dané minutě měření.

V analýzách je též výhodné brát v úvahu efektivní poloměr kapek, který je definován vztahem (Gunn, 1949):

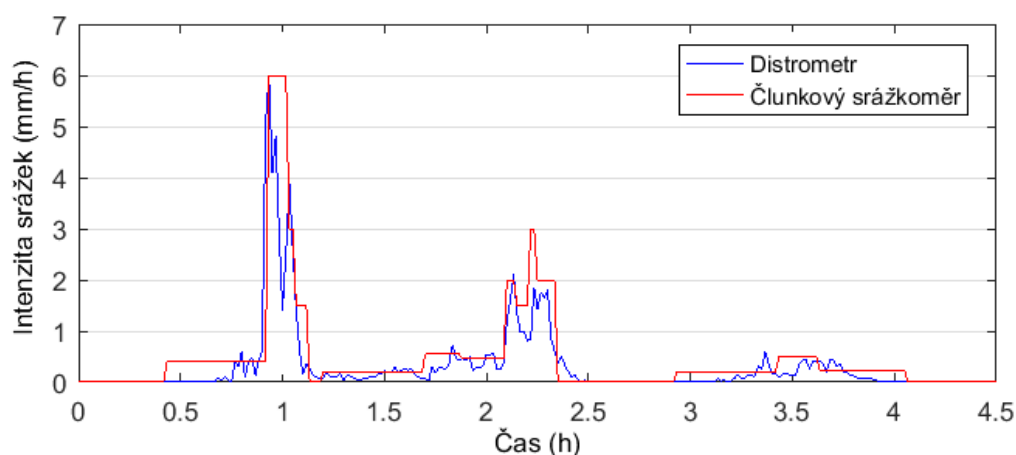
$$r_e = \frac{M_3}{M_2} \quad (4.9)$$

Kde M_i je i -tý moment spektra velikosti kapek, definovaný jako

$$M_i = \int r^i N(r) dr \quad (4.10)$$

4.5.1 Intenzita srážek z distrometru a srážkoměru

Na obrázku 55 jsou porovnány průběhy intenzity srážek z distrometru a člunkového srážkoměru. Z časového průběhu je patrné, že princip člunkového srážkoměru vede ke kvantizaci naměřené intenzity.



Obrázek 55 - Časový průběh intenzity srážek měřené distrometrem a člunkovým srážkoměrem z 23. 5. 2014 v období 13:00 až 17:30

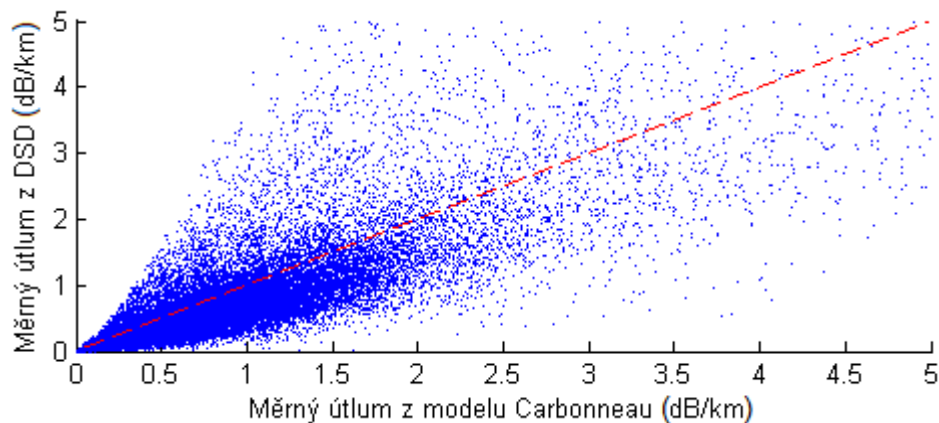
Bodový graf intenzity srážek naměřené distrometrem a srážkoměrem na obrázku 56 ukazuje, že dlouhodobě distrometr srážky lehce podhodnocuje. Rozptyl jednotlivých bodů je způsoben převážně faktem, že člunkový srážkoměr z principu nereaguje na rozdíl od distrometru na rychlé změny intenzit. Ve vyhodnocených datech pak nacházíme i výrazné rozdíly, viz např. obrázek 55 a situace v čase $t = 1$ h, kde je na distrometru patrný výrazný krátkodobý pokles, který srážkoměr nezaznamenal.



Obrázek 56 - Porovnání záznamů intenzity srážek z distrometru a člunkového srážkoměru v květnu 2014

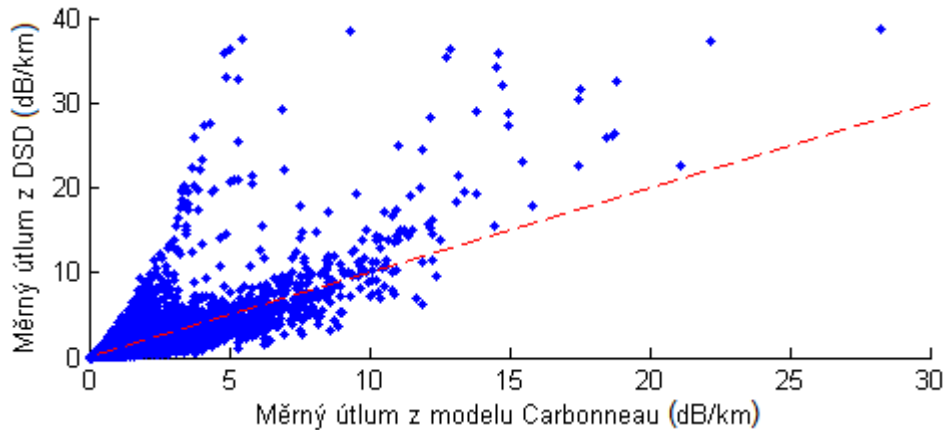
4.5.2 Model útlumu OBS deštěm z intenzity srážek

Obrázek 57 porovnává měrný útlum OBS z reálně naměřeného DSD distrometrem dle vzorce (3.2) s výstupem aproximativního modelu Carbonneau (3.28), jehož parametrem je intenzita srážek R . Každý bod reprezentuje měření s integračním časem 1 minuta. Vidíme, že body jsou okolo ideální křivky značně rozptýlené. Důvodem je právě variabilita spektra velikosti kapek, kdy při dané intenzitě srážek může být velký počet malých kapek nebo naopak menší počet velkých kapek.



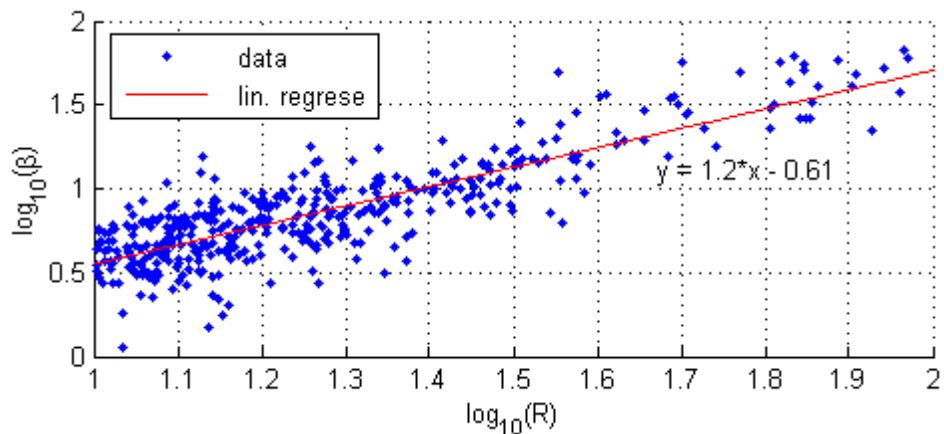
Obrázek 57 - Porovnání měrného útlumu z modelu Carbonneau a ze spektra velikosti kapek – detail hodnot do 5 dB/km

V předcházejícím grafu je zobrazen detail hodnot pouze do 5 dB/km. Celý rozsah naměřených útlumů je na obrázku 58.



Obrázek 58 - Porovnání měrného útlumu z modelu Carbonneau a ze spektra velikosti kapek – celý rozsah naměřených hodnot

Model Carbonneau útlum OBS na základě našich dat na vyšších hodnotách podhodnocuje, je tedy na místě vyhodnotit vlastní závislost útlumu OBS na intenzitě srážek. Na následujícím obrázku 59 je vykreslen bodový graf mezi logaritmem naměřené intenzity R a logaritmem přesného měrného útlumu β . Vzhledem k tomu, že nás zajímají především vysoké útlumy, použil jsem k regresi pouze data, kde je intenzita srážek vyšší než 10 mm/h. Směrnice přímky, jež je lineární regresi, je exponentem b v mocninném modelu $\beta_R = a \cdot R^b$. Násobící koeficient a je pak určen přepočtem $a = 10^{-0.61} = 0.25$.

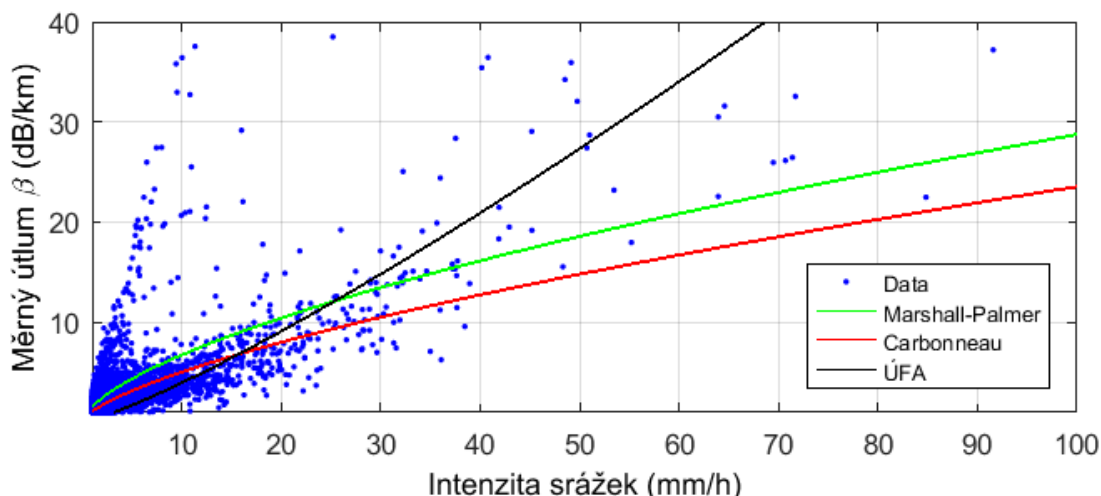


Obrázek 59 - Logaritmický bodový graf mezi intenzitou srážek a měrným útlumem z DSD pro nový model útlumu OBS deštěm na základě dat z ÚFA

Výsledný nový model na základě reálně měřených dat z distrometru v Praze na ÚFA AVČR, v.v.i. (dále značený jako „ÚFA“) má předpis:

$$\beta_R = 0.25 \cdot R^{1.2} \quad (\text{dB/km}) \quad (4.11)$$

Porovnání naměřených dat s modely ÚFA, Carbonneau a modelem na základě Marshall-Palmerova rozdělení DSD je na obrázku 60.

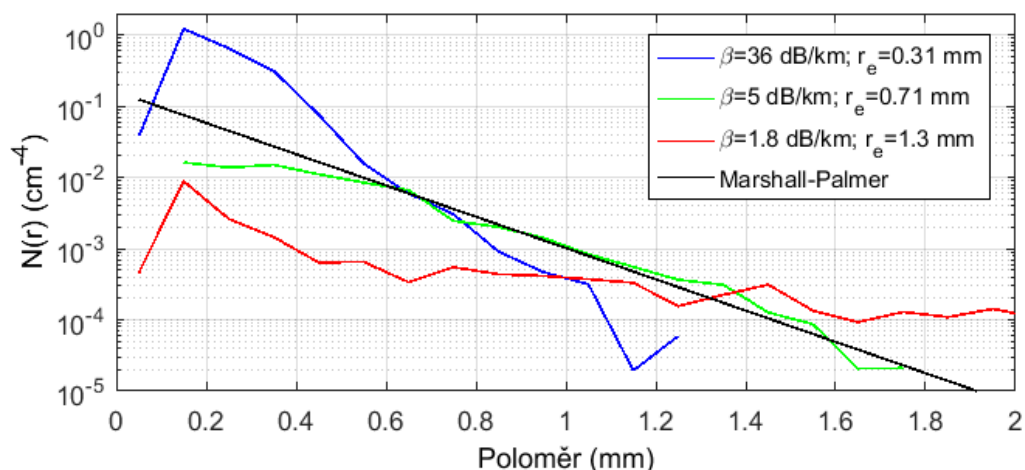


Obrázek 60 - Porovnání naměřených dat s modely Carbonneau (3.28), ÚFA (4.11) a modelem na základě Marshall-Palmerova rozdělení DSD (3.27)

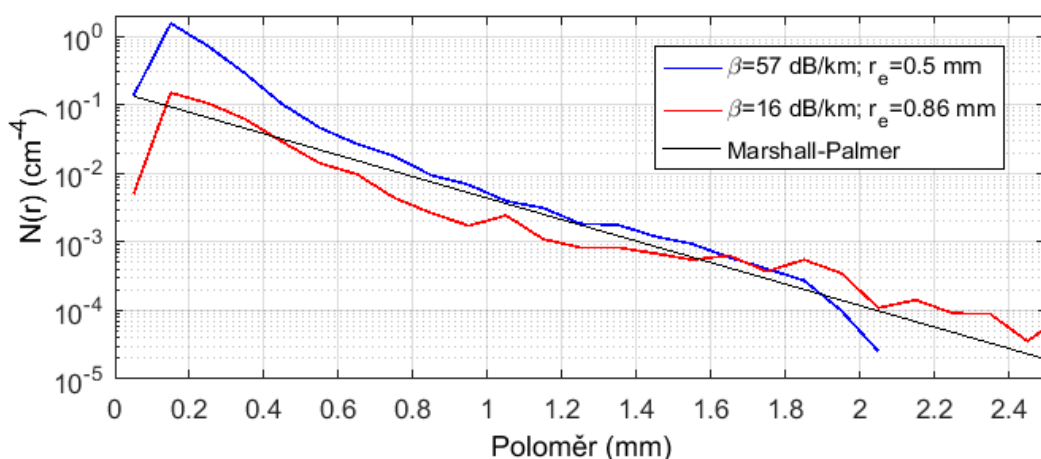
Na nízkých intenzitách jsou mezi jednotlivými aproximativními vzorci rozdíly v řádu jednotek dB. To jsou zanedbatelné rozdíly, pokud bereme v potaz fakt, že variabilita spektra způsobuje rozdíly daleko větší, a především není tato oblast pro funkci OBS kritická. Důležitější je část grafu s vysokými intenzitami srážek, kde oba modely doporučené ITU-R podhodnocují odhadované útlumy v Praze. Nový model ÚFA odhaduje tuto oblast lépe, stále ale platí, že variabilita spektra způsobuje rozdíly v řádu desítek dB. Za pozornost stojí též oblast bodů, kde intenzita srážek nepřesahuje 20 mm/h ale měrný útlum stoupá přes 20 dB/km.

Pro názornost si vykreslíme porovnání naměřených spekter se stejnou intenzitou srážek ale diametrálně odlišným měrným útlumem, na obrázku 61 jsou ukázky spekter při intenzitě srážek $R = 10$ mm/h, na obrázku 62 je intenzita $R = 50$ mm/h.

Modrá křivka na obrázku 61 znázorňuje právě zmiňovaný bod s nízkou intenzitou ale velkým měrným útlumem. I dle vykresleného spektra kapek je zřejmé, že se jednalo o dešť složený z velmi malých kapek, kde má většina z nich poloměr menší než 0,3 mm. Ty se svojí velikostí již blíží mlžným kapkám a při dostatečném množství způsobují měrný útlum v řádu desítek dB/km.



Obrázek 61 - Porovnání různých naměřených spekter velikosti kapek při intenzitě srážek $R = 10$ mm/h.



Obrázek 62 - Porovnání různých naměřených spekter velikosti kapek při intenzitě srážek $R = 50$ mm/h.

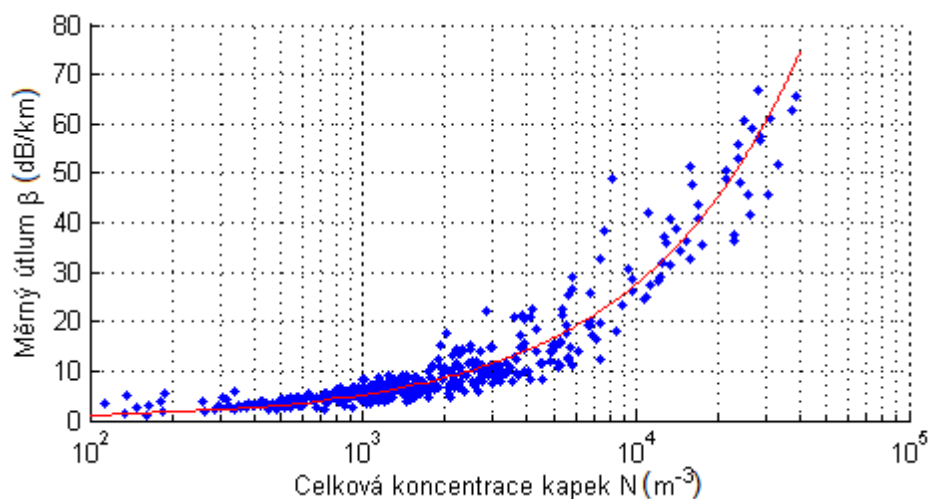
Předchozí grafy potvrzují, že hlavní rozdíly odhadnutých měrných útlumů je dán především počtem malých kapek ve spektru. Efektivní poloměr r_e tento fakt dobře vystihuje. Pokud bychom měli hledat jiný prediktor nežli intenzitu srážek R , nejlepší závislost je dle analýzy ale na celkové koncentraci kapek N_0 , kterou lze ze spektra určit pomocí vzorce:

$$N_0 = \int_{r=0}^{r_{\max}} N(r) dr \quad (\text{m}^{-3}), \quad (4.12)$$

kde $N(r)$ je zde v $\text{m}^{-3}\text{mm}^{-1}$ a dr je v mm.

Na obrázku 63 je pak zobrazena závislost mezi N a měrným útlumem β spočteným z naměřených spekter v Praze. Data jsou proložena mocninovou aproximací s předpisem:

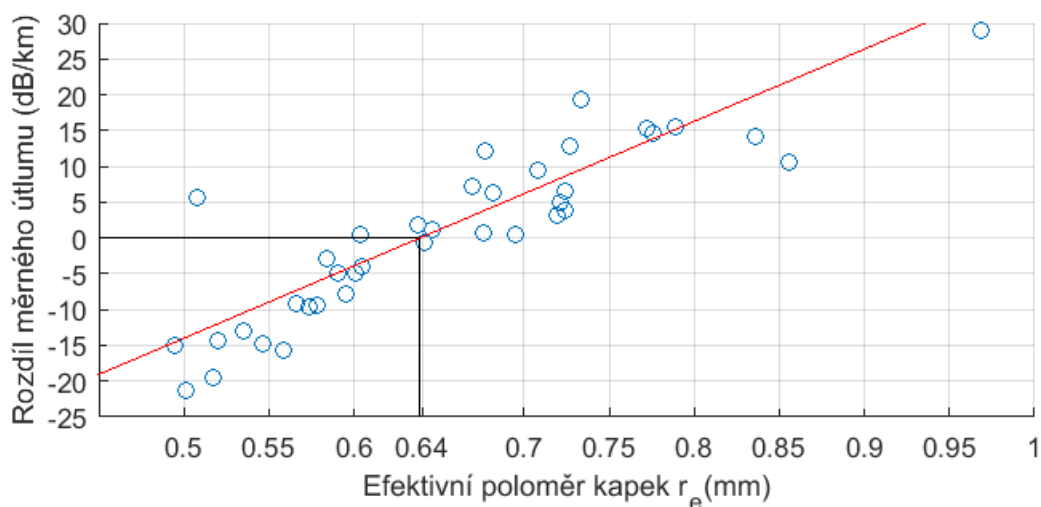
$$\beta_N = 0.0363 \cdot N^{0.72} \quad (\text{dB/km}) \quad (4.13)$$



Obrázek 63 - Závislost měrného útlumu na koncentraci kapek

Pro praktické účely je to ale těžko použitelný vzorec, vzhledem k tomu, že pro určení N_0 je potřeba distrometr. Jediná běžně měřená charakteristika deště je intenzita srážek, nezbyvá tedy než používat modely založené na právě na ní.

Užitečná je analýza, za jakých podmínek se již aproximativní vzorec liší výrazně od skutečnosti. Nemá smysl řešit mírné deště, kde měrný útlum dosahuje několika dB/km, proto jsem jako vstupní data do této analýzy vzal pouze výrazné deště, kde intenzita srážek přesáhla 40 mm/h. Jedná se tedy o body, které jsou na obrázku 60 na ose x na hodnotě 40 a výš. Efektivní poloměr kapky je parametrem, který reflektuje tvar spektra velikosti kapek – dává informaci, jak velké kapky se převážně v daném okamžiku vyskytují. Na obrázku 64 je vykreslena závislost chyby aproximativního modelu ÚFA vůči přesnému vzorci na efektivním poloměru kapek r_e .

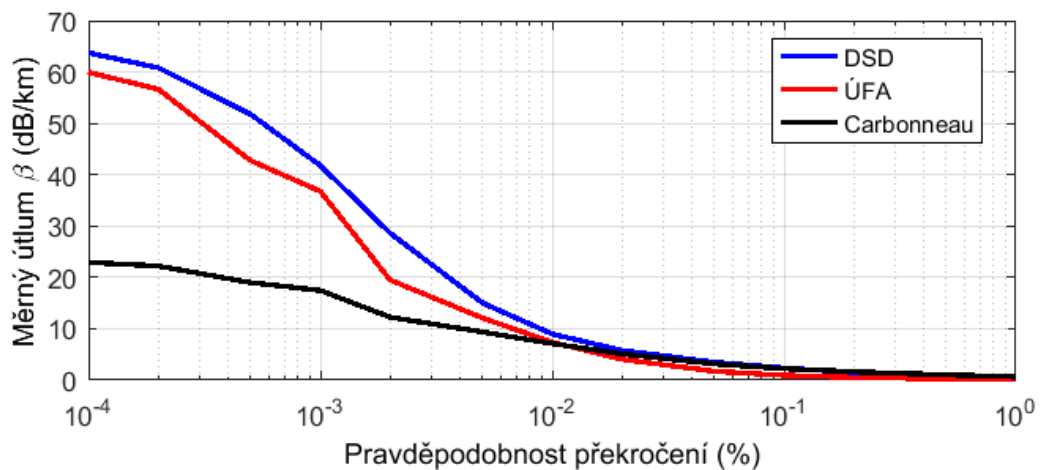


Obrázek 64 - Chyba aproximativního modelu ÚFA v závislosti na efektivním poloměru kapek

Můžeme si všimnout, že pro efektivní poloměr 0,64 mm se oba modely shodují. Měrný útlum v případě deště s tímto rozložením velikosti kapek bude tedy modelem ÚFA predikován přesně. V případě menšího efektivního poloměru aproximativní vzorec podhodnocuje skutečný měrný útlum, což je v souladu s předcházející analýzou.

Dle obrázku 64 pak platí, že změna efektivního poloměru o každých 0,1 mm zvýší chybu predikce o 10 dB/km.

Pro praktické účely plánování parametrů OBS je velmi důležitá distribuční funkce útlumu. Poskytovatel OBS navrhne dynamický rozsah přijímače tak, aby spoj pracoval bez výpadku určité minimální procento času v roce. Pro ideální poměr cena/výkon optického spoje je tedy třeba znát, jak často v roce překročí útlum deštěm danou hodnotu.



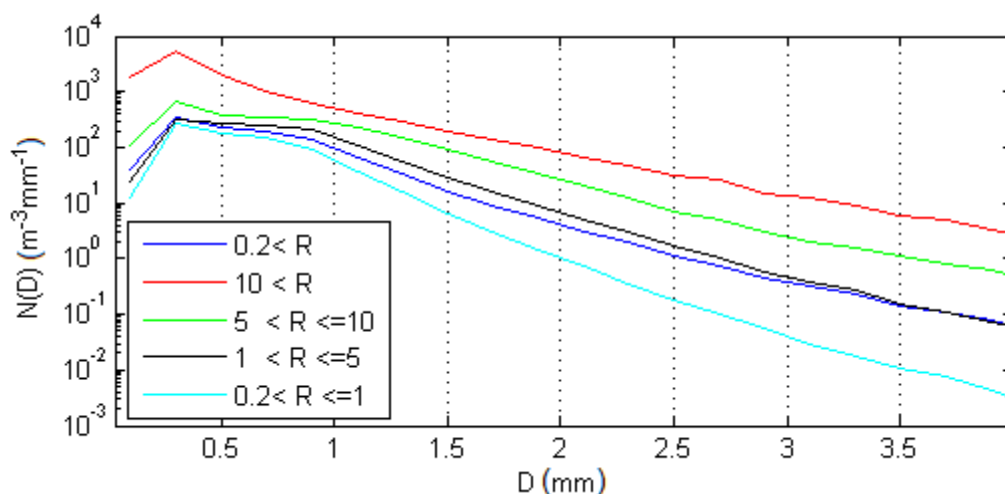
Obrázek 65 - Distribuční funkce útlumu deštěm na základě reálně měřených spekter velikosti kapek a aproximativních vzorců s použitím intenzity srážek

Modrou barvou je na obrázku 65 znázorněna distribuční funkce odhadovaných měrných útlumů z reálně naměřených spekter velikosti kapek deště distrometrem. Aproximativní model Carbonneau distribuční funkci značně podhodnocuje, což je z hlediska návrhu spoje nevyhovující. Mnou stanovený model ÚFA již vystihuje distribuční přímku daleko lépe. Hodnoty distribuční funkce pro typická procenta času jsou shrnuty v tabulce 7.

Tabulka 7 - Měrný útlum deštěm v závislosti na pravděpodobnosti překročení

Pravděpodobnost překročení (%)	Čas v roce (min)	Měrný útlum z DSD (dB/km)	Měrný útlum z modelu ÚFA (dB/km)	Měrný útlum z modelu Carbonneau (dB/km)
10^{-1}	525.6	2.3	0.9	2.2
10^{-2}	52.6	9	7.4	7.1
10^{-3}	5.26	41.8	36.8	17.5
10^{-4}	0.53	63.7	59.9	22.9

Na obrázku 66 jsou vykreslena naměřená průměrná spektra kapek s integračním časem 1 minuta. Použil jsem data za celý rok 2011. Analýza ukazuje spektra v závislosti na intenzitě deště.



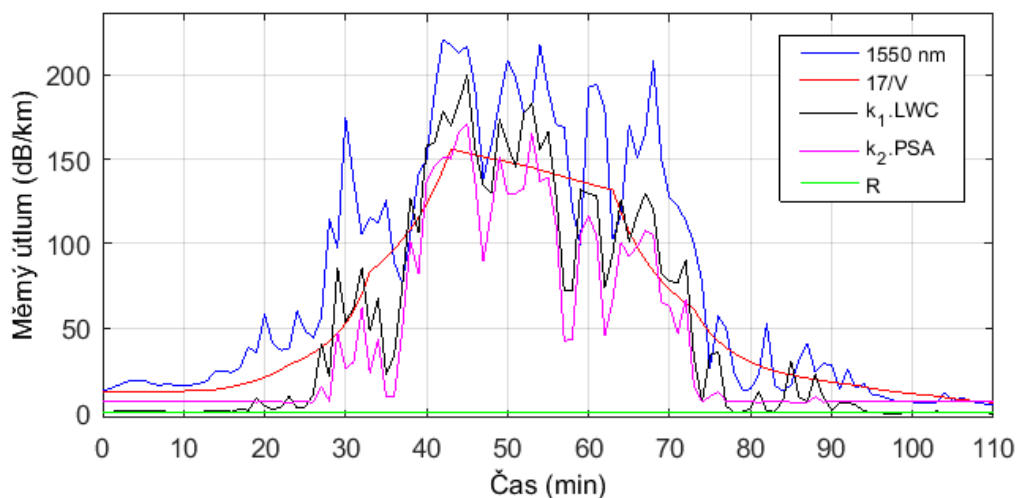
Obrázek 66 - Průměrné spektrum dešťových kapek naměřené 2D Video-distrometrem v Praze v roce 2011 (Fišer, 2012)

4.6 Zpřesnění predikce měrného útlumu v mlze

V závěru teoretické části v kapitole 3.8.5 jsem diskutoval rozptyl hodnot při vykreslené závislosti měřeného měrného útlumu na dohlednosti. Jednou z hypotéz je variabilita spektra kapek, kterou dohlednost, jakožto integrální veličina, nedokáže plně reflektovat. V této kapitole se tedy zaměříme na zpřesnění predikce měrného útlumu pomocí metod odhadu spektra velikosti kapek, které je následně dosazeno do základního vzorce (3.2).

4.6.1 Metoda pro stanovení dvou parametrů DSD

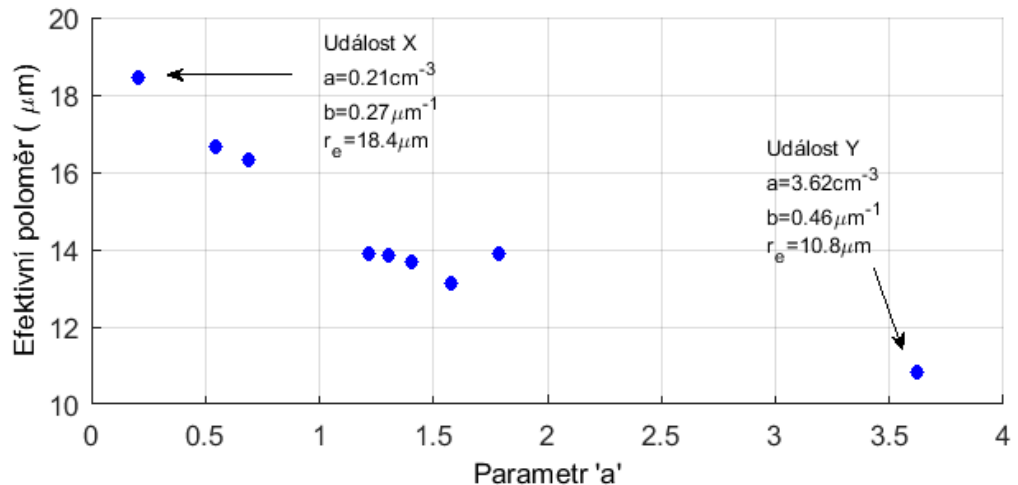
V kapitole 3.8.7.2. je popsána metoda pro stanovení dvou parametrů gamma rozdělení spektra velikosti kapek mlhy dle vzorce (3.36). Třetí parametr α je fixován na hodnotu 2. Pojdme si tedy vyzkoušet metodu na experimentálních datech. V této části jsem využil data z přístroje PVM-100 na Milešovce z období 29. 2. 2012 – 14. 3. 2012. Během této doby nastalo celkem devět oblačných událostí. V analýze jsem bral v potaz pouze střední část každé události, kde byly stabilní a homogenní podmínky. Příklad jedné události je zobrazen na obrázku 67. Na první pohled je vidět dobrá korelace útlumu optického spoje s meteorologickými parametry.



Obrázek 67 - Časový průběh měrného útlumu optického spoje (modrá) a relevantních meteorologických parametrů během oblačné události. LWC a PSA jsou násobeny konstantami pro lepší zobrazení v grafu. Zeleně je zobrazena intenzita srážek R. Průběh 17/V odpovídá útlumu dle Kimova vzorce, kde V je dohlednost v km.

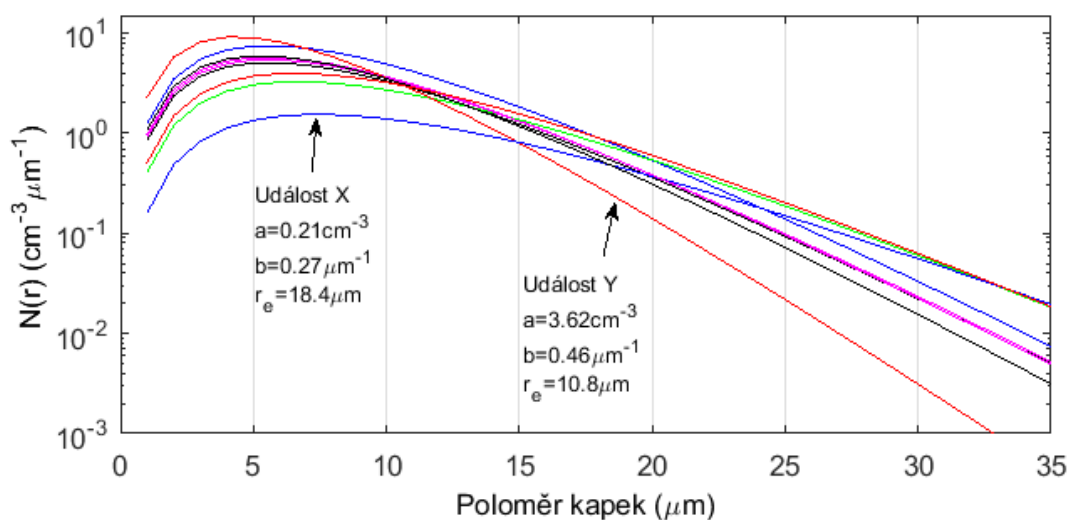
Na všech devět událostí jsem aplikoval metodu pro stanovení parametrů a a b spektra velikosti kapek, popsanou v kapitole 3.8.7.2. Z obrázku 68 vidíme, že se efektivní poloměr kapek pohyboval mezi 10 a 20 μm . Parametr a je rozprostřen v intervalu hodnot 0 až 4. Vidíme nepřímou závislost efektivního poloměru na parametru a . Parametr a v gamma rozdělení (3.36) reflektuje koncentraci částic o poloměru r až $r+dr$ v jednotkovém objemu,

zde v 1 cm^3 . Nepřímá závislost tedy indikuje logickou věc, že čím jsou kapky menší, tím větší je jejich koncentrace. Ovšem pouze za předpokladu konstantního LWC, což je v tomto případě zhruba splněno, jelikož se ve středních fázích všech událostí pohybovaly hodnoty LWC v intervalu $0,2$ až $0,4 \text{ g/m}^3$. Zvláště jsou pro lepší orientaci vyznačeny dvě události X (6. 3. 2012, 5:38 až 6:12) a Y (8. 3. 2012, 3:10 až 5:44).



Obrázek 68 - Efektivní poloměr r_e a parametr a spektra velikosti kapek v každé události

Na obrázku 69 jsou vykreslena jednotlivá spektra velikosti kapek pro každou událost. Událost X má nejnižší parametr a , ale nejvyšší efektivní poloměr. Má tedy nízkou koncentraci malých kapek a nejvyšší koncentraci velkých kapek. Krátce po této události byl na srážkoměru zaznamenán lehký déšť, šlo tedy o srážkovou oblačnost ještě před zformováním dešťových kapek.



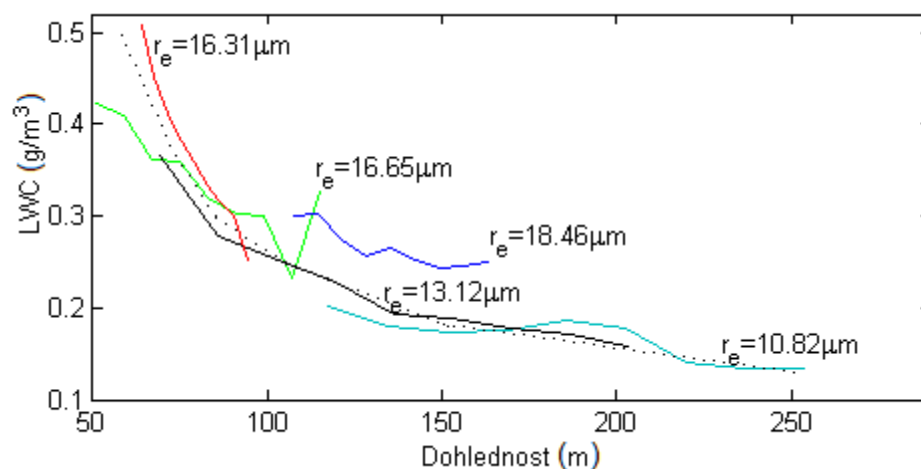
Obrázek 69 - Spektra velikosti kapek pro jednotlivé události v únoru a březnu 2012

Událost Y má nejvyšší parametr a a nejnižší efektivní poloměr, oblačnost byla v tomto případě tvořena velkým množstvím malých kapek, což je z hlediska šíření optického signálu mnohem horší varianta než v případě události X . Teoretický výpočet ze spektra velikosti kapek dle vzorce (3.2) udává pro událost X měrný útlum 98.6 dB/km a pro událost Y 120 dB/km. Útlum menšími kapkami je tedy více než o 20 dB/km větší, přestože je LWC o 0.08 g/m^3 menší. To je ukázkový případ chyby stanovení měrného útlumu na základě aproximativních modelů, které využívají integrální veličiny, jako jsou LWC, dohlednost, intenzita srážek apod.

4.6.2 Metoda pro stanovení tří parametrů DSD

Jedním z cílů této práce je vyvinutí metody pro přesné určení útlumu OBS. Byla popsána metoda pro stanovení dvou parametrů gamma rozdělení, které má ale parametry tři. Už z doporučení ITU-R je ale zřejmé, že parametr α , který je ve výše popsané metodě fixován, se nezanedbatelně mění s typem mlhy. V této kapitole navrhuji metodu, pomocí které určím všechny tři parametry gamma rozdělení dle vzorce (3.36). Pro určení všech tří parametrů je potřeba do výpočtu zahrnout i třetí veličinu, která souvisí se spektrem kapek. A tou je dohlednost.

Ještě, než budeme využívat všechny tři veličiny LWC, PSA a dohlednost V , je užitečné zabývat se otázkou, zda stačí veličiny dvě, tentokrát ale ty nejčastěji měřené – LWC a dohlednost. Čili zda ze vzájemného vztahu těchto dvou lze určit tu třetí – PSA, potažmo efektivní poloměr r_e . K zodpovězení této otázky slouží analýza na obrázku 70, kde jsou vykresleny průměrované závislosti LWC na dohlednosti jednotlivých událostí z předcházející analýzy, přičemž r_e je parametrem každé události.



Obrázek 70 - Závislosti LWC na dohlednosti v jednotlivých událostech, kde je efektivní poloměr parametrem

Otázkou tedy je, zda lze z pozice křivky (např. vlevo nebo vpravo) vůči pomyslné průměrné závislosti (tečkovaně) odhadnout r_e . To se ale v našem případě nepotvrzuje. Například modrá křivka s $r_e = 18,46 \mu\text{m}$ je sice oproti průměrné závislosti více vpravo, ostatní případy ji ale poměrně dobře sledují, takže efektivní poloměr ze závislosti LWC na dohlednosti stanovit nelze.

4.6.2.1 Popis metody

Cílem mé metody je stanovit všechny tři neznámé parametry a , b a α gamma rozdělení (3.36), které je obecně skrz odbornou literaturu uznáváno jako nejvíce odpovídající tvar spektra velikosti mlžných kapek. Metoda navazuje na algoritmus popsany v kapitole 3.8.7.2, kde se využívá vztahu pro LWC (3.37) a PSA (3.38). Třetí veličinou je vybrána dohlednost, která se spektrem kapek souvisí skrze Beer-Lambertův zákon:

$$\beta = \frac{3.91}{V} \quad (\text{km}^{-1}), \quad (4.14)$$

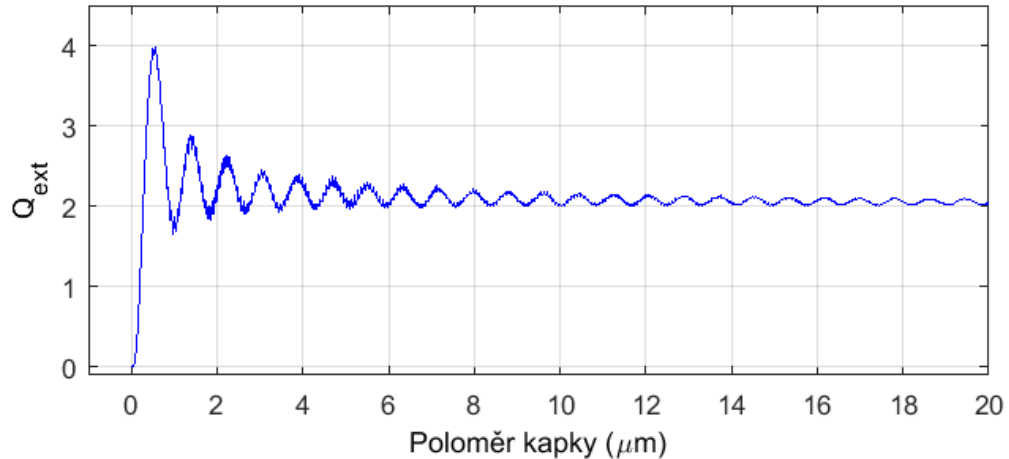
kde V je dohlednost v km. Tento vzorec je platný pro viditelnou vlnovou délku $\lambda=550 \text{ nm}$. S využitím obecného vzorce (3.2) pak můžeme nahradit měrný útlum na této vlnové délce a získáme závislost dohlednosti na $N(r)$:

$$V = \frac{3.91}{10^{-3} \int_0^{\infty} Q_{ext} \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, \hat{n} \right) \pi r^2 N(r) dr} \quad (4.15)$$

kde V je dohlednost v km, Q_{ext} je extinkční koeficient, r je poloměr kapek v μm , λ je vlnová délka v μm (zde $0,55 \mu\text{m}$), n je komplexní index lomu vody a $N(r)$ je spektrum velikosti kapek v $\text{cm}^{-3}\mu\text{m}^{-1}$.

Extinkční koeficient je stanoven výpočty dle Mie (Matzler, 2002) a v kombinaci s výrazy pro LWC a PSA získáváme tři rovnice o třech neznámých, kterými jsou právě parametry a , b a α spektra velikosti kapek $N(r)$.

Ideálním řešením je vyřešit tuto soustavu rovnic analyticky. Jenže tvar extinkčního koeficientu v rovnici pro dohlednost je příliš složitý (viz obrázek 71) na to, aby mohl být integrál ve jmenovateli analyticky vyřešen.



Obrázek 71 - Křivka extinkčního koeficientu pro $\lambda = 550$ nm v závislosti na poloměru kapky

Proto v této práci řeším danou soustavu numericky. Numerický výpočet spočívá v hlavní myšlence, že necháme všechny tři parametry gamma rozdělení měnit se v zadaných mezích a pro každou kombinaci těchto parametrů spočteme všechny tři veličiny V_{calc} , PSA_{calc} a LWC_{calc} skrze rovnice (4.15), (3.38) a (3.37). Tyto spočtené veličiny budou ve skutečnosti třírozměrné pole, jehož rozměry jsou dány právě zvolenými intervaly pro parametry a , b a α . To je jakási vypočtená databáze všech teoretických kombinací. Poté vezmeme tři měřené veličiny V_{meas} , PSA_{meas} a LWC_{meas} naměřené v daný moment a snažíme se najít odpovídající kombinaci v teoretické databázi skrze relativní kvadratickou chybu, definovanou vztahem:

$$\xi_r^2 = \left(\frac{V_{calc} - V_{meas}}{V_{meas}} \right)^2 + \left(\frac{PSA_{calc} - PSA_{meas}}{PSA_{meas}} \right)^2 + \left(\frac{LWC_{calc} - LWC_{meas}}{LWC_{meas}} \right)^2 \quad (4.16)$$

Zvolil jsem relativní hodnoty, protože např. PSA je číselně mnohem větší než LWC. Proto by PSA bylo dominantní v hledání minima chyby ξ_r^2 . Takto jsou příspěvky od všech veličin rovnoměrné. Tři parametry gamma rozdělení jsou pak nalezeny jako pozice minima relativní kvadratické chyby v databázi:

$$[a, b, \alpha] = \min(\xi_r^2) \quad (4.17)$$

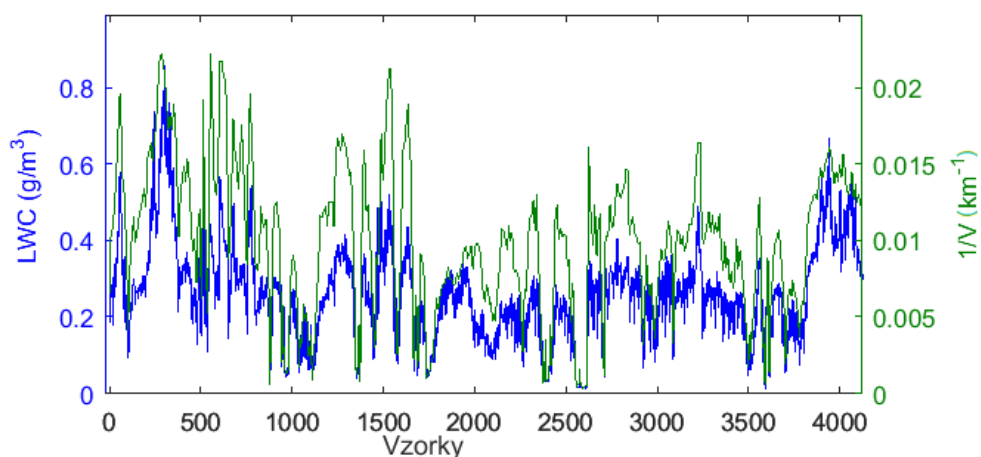
4.6.2.2 Experimentální data

K otestování metody máme k dispozici data ze dvou typově odlišných experimentálních stanišť. Prvním je horská meteorologická observatoř na Milešovce, kde se velmi často vyskytuje nízká oblačnost a mlhy. Druhým místem je pak experimentální stanoviště na střeše Českého Metrologického Institutu v Praze (ČMI). Máme tedy možnost získat a porovnat výsledky šíření optického signálu v oblačnosti a v městské mlze.

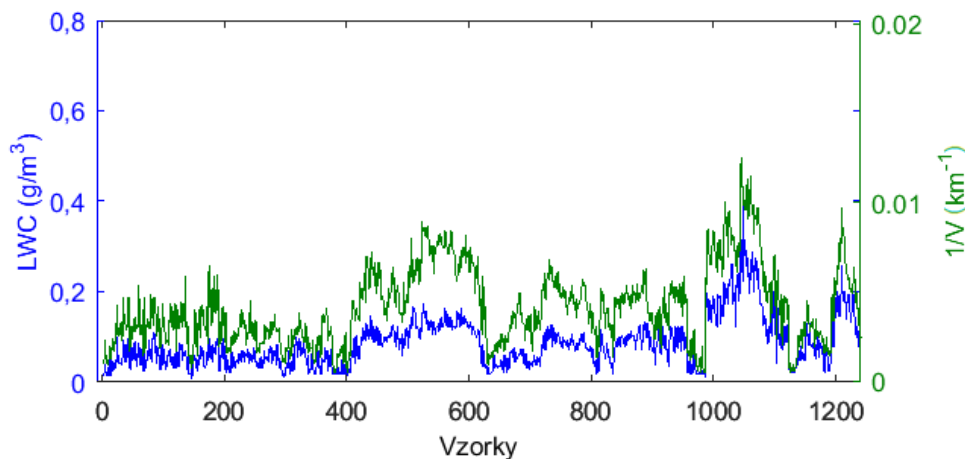
Na Milešovce využíváme data z přístroje PVM-100 a z dohledoměru PWD-21, oba přístroje jsou od sebe vzdáleny pouze cca 5 metrů. Použil jsem ta samá data jako v předcházející analýze čili z období 29. 2. – 14. 3. 2012, během kterého se objevilo několik oblačných událostí. K analýze máme k dispozici celkový počet 4152 jedninutových vzorků, kde se vyskytovala oblačnost. To znamená 4152 sad tří měřených meteorologických veličin a v každém vzorku určíme tři parametry gamma rozdělení.

Stejně meteorologické zázemí je i v Praze na střeše ČMI, odkud mi byla Ing. Martinem Grábnerem, Ph. D. poskytnuta data z PVM-100, z dohledoměru PWD-11 společně s údaji o útlumu OBS na vlnových délkách 830 nm a 1550 nm, přičemž vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem činí 100 metrů. K dispozici je téměř pět měsíců experimentálních dat z období 8. 1. – 31. 5. 2009. Nicméně výskyt mlhy je v tomto případě znatelně menší. K analýze bylo použito celkem 1250 vzorků.

Všechny vzorky LWC a invertované dohlednosti z Milešovky jsou zobrazeny na obrázku 72, zatímco data z Prahy jsou na obrázku 73.



Obrázek 72 - Všechny vzorky LWC a dohlednosti z Milešovky z období 29. 2. – 14. 3. 2012



Obrázek 73 - Všechny vzorky LWC a dohlednosti z Prahy z období 8. 1. – 31. 5. 2009

Předcházející grafy jasně ukazují rozdíl mezi oběma stanovišti především z hlediska hustoty mlhy. LWC nad $0,3 \text{ g/m}^3$ je v Praze velmi výjimečné, zatímco na Milešovce hustá oblačnost pokrývá vrchol hory velmi často. Přestože je časový úsek měření na Milešovce o mnoho kratší v porovnání s Prahou, počet analyzovaných vzorků je mnohem vyšší.

I intervaly parametrů gamma rozdělení pro výpočet teoretických veličin jsou odlišné kvůli odlišným meteorologickým podmínkám. Intervaly hodnot parametrů použité pro data z Milešovky jsou v tabulce 8 a pro data z Prahy v tabulce 9.

Tabulka 8 - Intervaly pro DSD parametry – Milešovka

Parametr	Od	Krok	Do
a	0,01	0,001	0,1
b	0,01	0,01	5
α	3	0,01	8

Tabulka 9 - Intervaly for DSD parametry – Praha

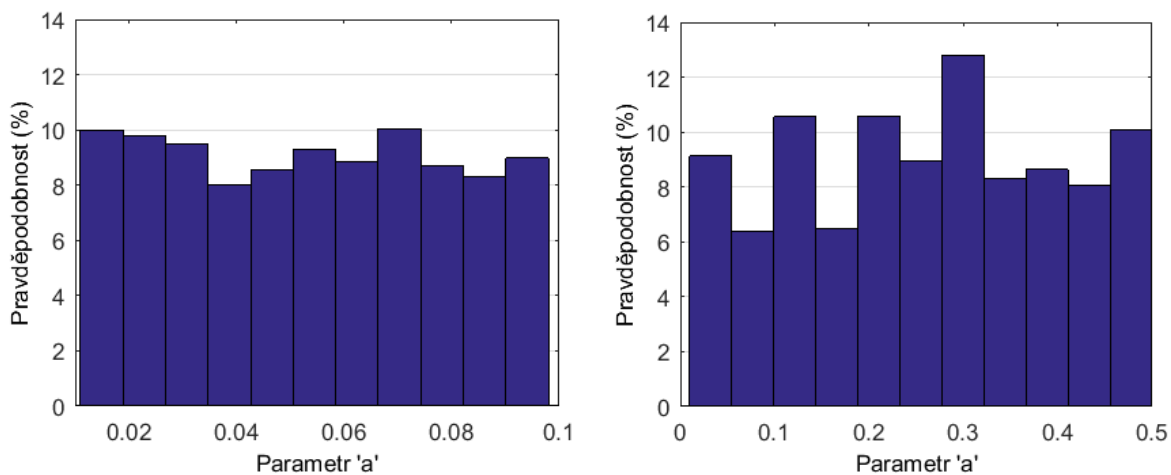
Parametr	Od	Krok	Do
a	0,01	0,01	0,5
b	0	0,1	10
α	0	0,4	20

Jemné kroky mezi jednotlivými hodnotami jsou důležité z hlediska přesnosti metody, na druhou stranu příliš podrobné kroky zvyšují neúměrně náročnost výpočtu.

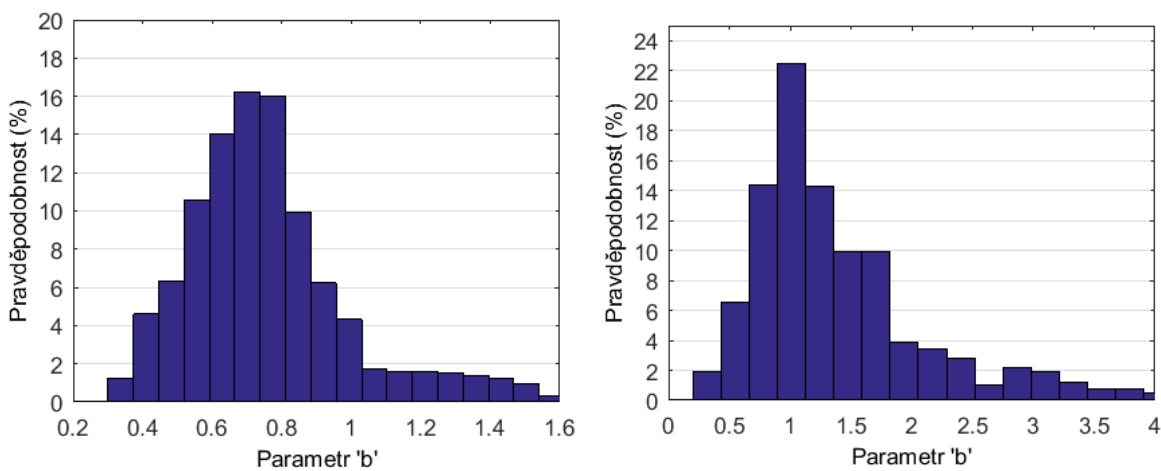
Výsledné intervaly jsem stanovil ad hoc pro každou databázi zvlášť postupnými iteracemi, kdy jsem zvolil nejprve hrubý krok a široký interval, které jsem postupně na základě histogramů zúžil do konečné podoby.

Z těchto parametrů jsou tedy vypočítány teoretické hodnoty meteorologických veličin, které jsou poté porovnány s naměřenými vzorky a v každém vzorku určíme tři parametry a , b a α a to z dat obou experimentálních pracovišť.

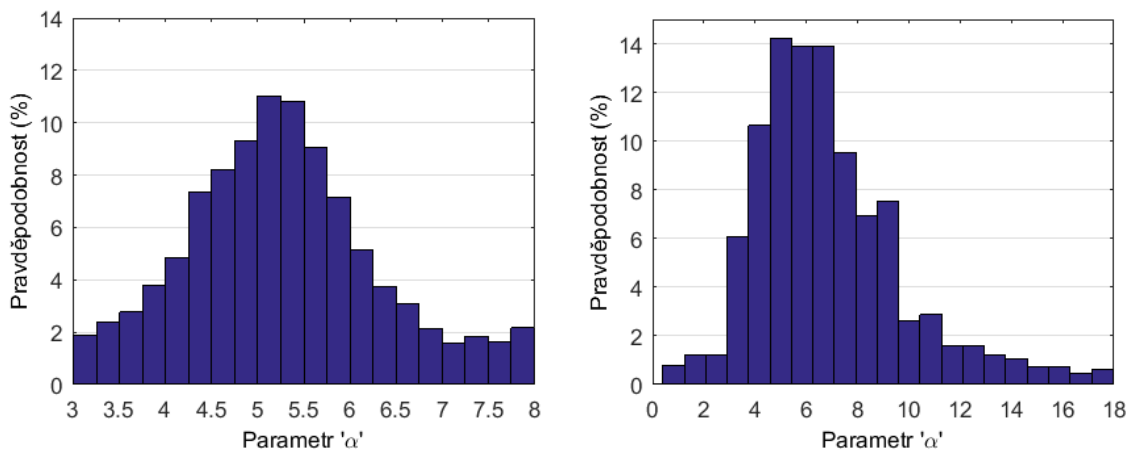
Prvotní výsledky jsou ukázány v následujících grafech na obrázcích 74 až 76 ve formě hustoty pravděpodobnosti výskytu jednotlivých parametrů. Levý graf vždy reprezentuje měření na Milešovce a pravý graf ukazuje výsledky z dat naměřených v Praze.



Obrázek 74 - Hustota pravděpodobnosti parametru a na Milešovce (vlevo) a v Praze (vpravo)



Obrázek 75 - Hustota pravděpodobnosti parametru b na Milešovce (vlevo) a v Praze (vpravo)



Obrázek 76 - Hustota pravděpodobnosti parametru α na Milešovce (vlevo) a v Praze (vpravo)

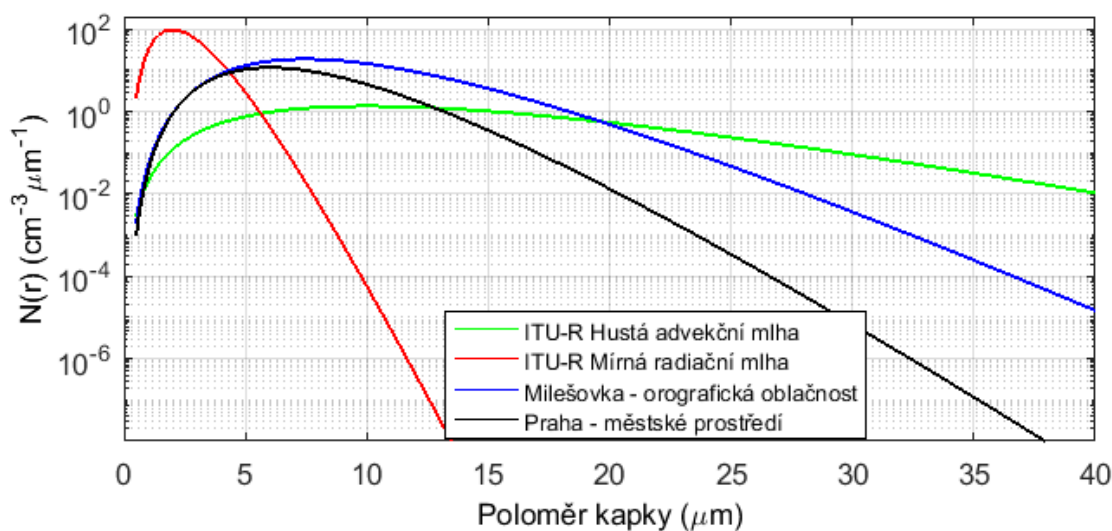
Je zajímavé, že parametr a má v obou případech rovnoměrné rozložení. Není zde patrná žádná typická hodnota. Pokud si vykreslíme graf spektra velikosti kapek dle (3.36), parametr a posouvá křivku nahoru a dolů na ose y v logaritmickém měřítku. Zatímco parametry b a α

mění tvar spektra. A právě tyto dva parametry mají dle obrázku 75 a 76 své typické hodnoty, které jsou sumarizovány v tabulce 10, kde je zároveň porovnání se spektry doporučenými ITU-R (viz kapitola 3.8.6).

Tabulka 10 - Typické hodnoty DSD parametrů gamma rozdělení

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>α</i>
ITU-R hustá advekční mlha	0.027	0.3	3
ITU-R mírná radiační mlha	607.5	3	6
Milešovka orografická oblačnost	0 - 0.1	0.7	5.2
Praha městské prostředí	0 - 0.5	1	6

Grafické vyjádření jednotlivých průměrných spekter velikosti kapek je na obrázku 77. Parametr *a* je v případě Milešovky a Prahy variabilní, pro účel vykreslení byla zvolena v obou případech hodnota $a = 0.1$.



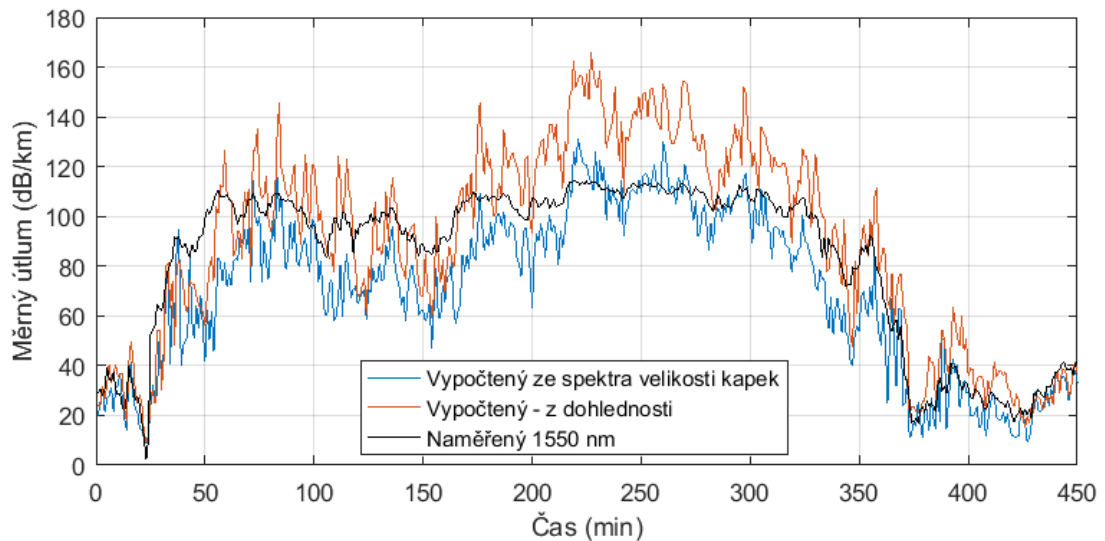
Obrázek 77 - Tvar průměrných typických spekter velikosti kapek mlhy

Dle výskytu dohlednosti i LWC je jasné, že oblačnost na Milešovce je značně hustší než městská mlha v Praze. Dle obrázku 77 je hlavní rozdíl ve výskytu kapek větších než 5 μm. Ani jedno ze dvou spekter doporučených ITU-R není měřením potvrzeno.

4.6.2.3 Porovnání s měřeným útlumem

Následující analýza ověří navrženou metodu odhadu měrného útlumu porovnáním s naměřenými daty. Měrný útlum je spočten jednak z dohlednosti a za druhé ze spektra

velikosti kapek vzorcem (3.2). Měrný útlum z dohlednosti je stanoven nyní již pomocí vzorců, které byly odvozeny přímo pro danou lokalitu na základě měřených dat. Pro Prahu jsou to vzorce (3.34) pro 830 nm a (3.35) pro 1550 nm, zatímco pro Milešovku se jedná o vzorce (4.4) pro 830 nm a (4.6) pro 1550 nm. Ve výpočtu měrného útlumu z odhadnutého spektra velikosti kapek byly vždy použity aktuální hodnoty parametrů a , b a α spočtené pro daný vzorek. Na obrázku 78 vidíme porovnání časových průběhů útlumu na optickém spoji na kanále 1550 nm v Praze při nejvýraznější mlžné události, kterou máme k dispozici.

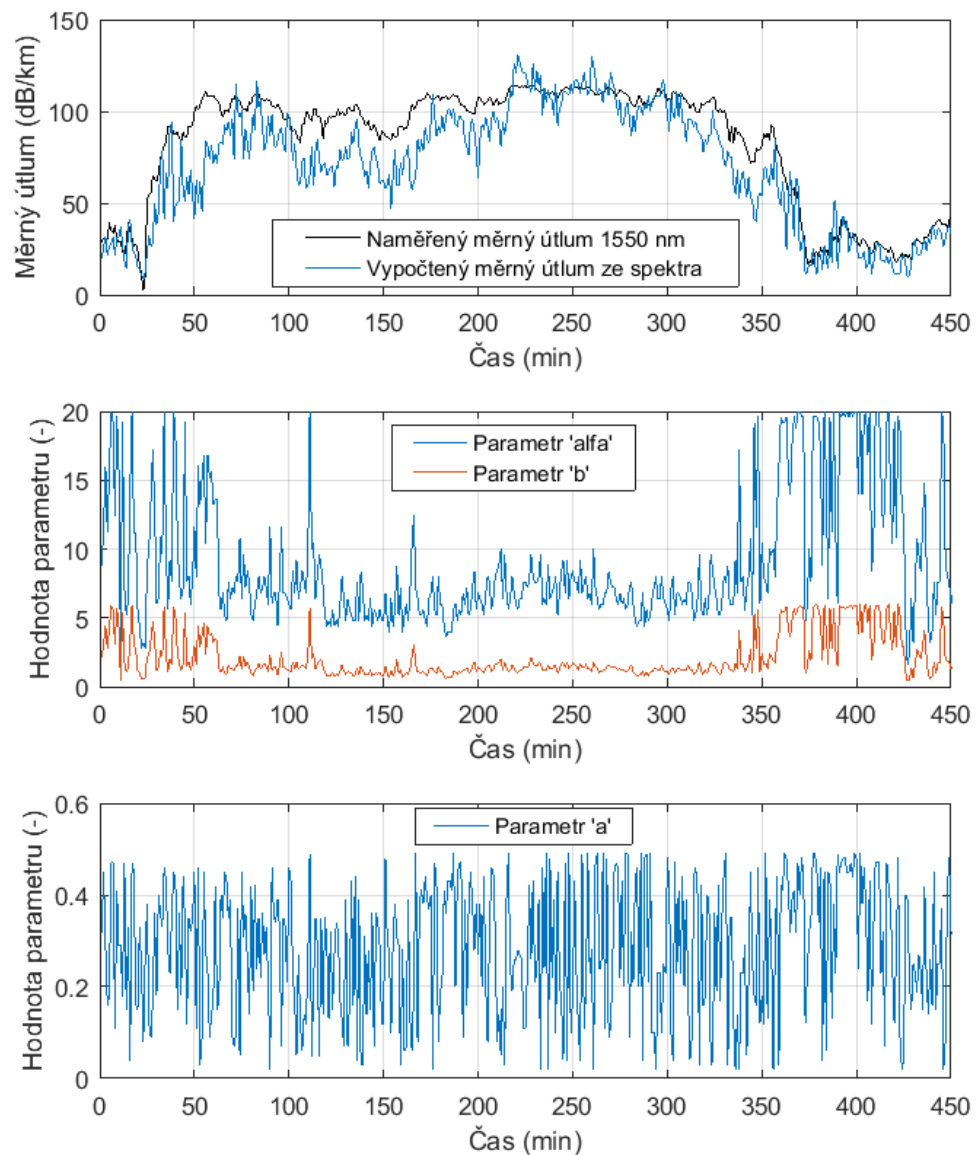


Obrázek 78 - Porovnání vypočteného útlumu s naměřeným na kanále 1550 nm v Praze

Je patrné, že predikovaný útlum z meteorologických veličin dobře kopíruje útlum změřený. Útlum predikovaný z dohlednosti v zobrazené události převyšuje měřený útlum místy až o 20 dB/km a to v podmínkách s nejnižší dohledností. Metoda s odhadnutým spektrem velikosti kapek ale predikovaný měrný útlum redukuje tak, že se téměř shoduje s měřenými hodnotami. Mlha je ze své podstaty relativně pomalu měnícím se jevem, což potvrzuje hladký průběh měřeného měrného útlumu na optickém spoji. Můžeme si ale všimnout, že hodnoty predikovaného útlumu vykazují poměrně velký rozptyl. Tento rozptyl je pravděpodobně způsoben vlastnostmi dohledoměru, jenž vykazuje v rámci minut změny dohlednosti i o desítky až stovky metrů.

Jak vypadá samotné odhadované spektrum velikosti kapek v analyzované události a jeho vývoj ukazuje názorně obrázek 79, kde jsou vykresleny všechny tři odhadnuté parametry rozdělení v závislosti na čase. V krajních částech grafu, na začátku a na konci mlžné události, parametry a a b poměrně výrazně fluktuují. Právě tyto parametry určují výsledný tvar spektra. Jakmile ale měrný útlum dosáhne hodnot kolem 100 dB/km, parametry se ustálí na hodnotách, které souhlasí s grafy hustoty pravděpodobnosti hodnot jednotlivých parametrů

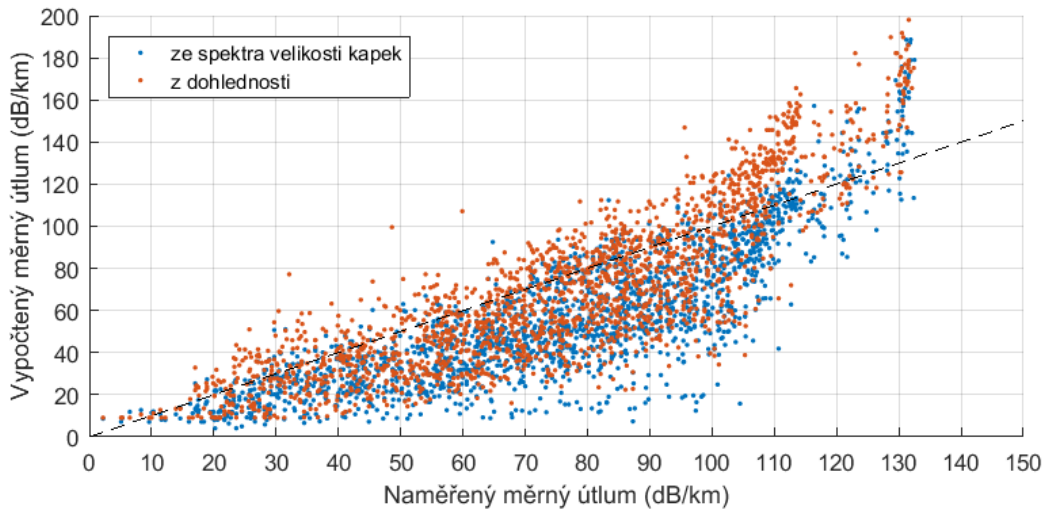
v předcházející analýze. Parametr b se pohybuje mezi hodnotami 1 – 1,5 a parametr α mezi hodnotami 5 – 7. To potvrzuje stabilitu navržené metody odhadu parametrů spektra velikosti kapek, ovšem pouze v podmínkách, kdy je mlha dostatečně hustá. Fluktuace parametrů v oblastech s mírnější mlhou není přirozená a je tak s největší pravděpodobností způsobena nedokonalostí metody.



Obrázek 79 - Časový průběh parametrů odhadnutého spektra velikosti kapek mlhy v Praze

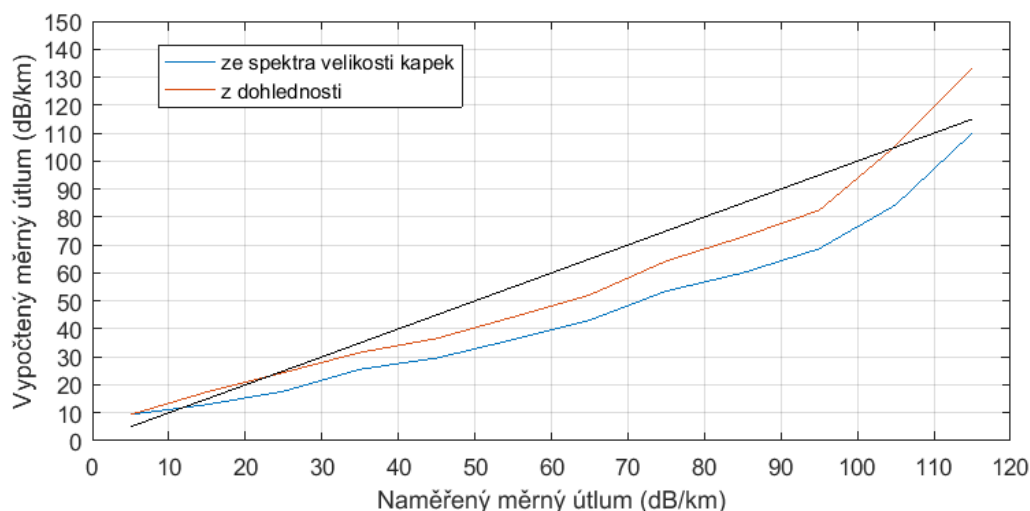
Porovnání měřeného a predikovaného útlumu pomocí obou metod ze všech analyzovaných vzorků na kanále 1550 nm z Prahy je na obrázku 80. Ideálně by měly body ležet na přímce.

Značný rozptyl hodnot při vykreslení závislosti mezi měřeným útlumem a dohledností jsme zmiňovali již v kapitole 3.8.5.



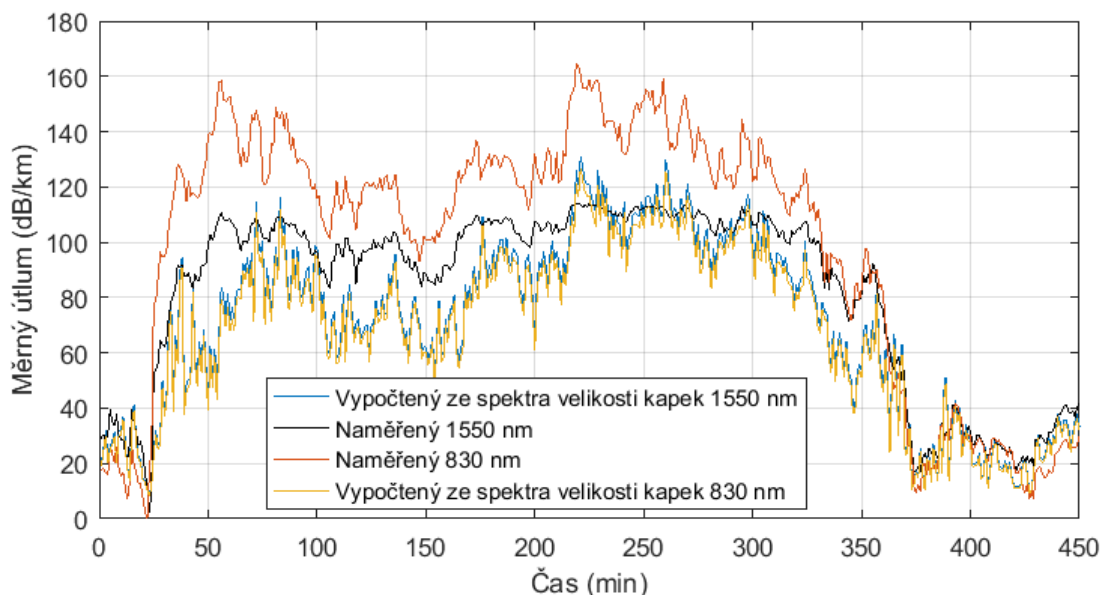
Obrázek 80 - Bodový graf naměřeného a odhadnutého útlumu na kanále 1550 nm v Praze

Je patrné, že metoda odhadu spektra velikosti kapek tento rozptyl nevyřešila. Nelze tedy vyvrátit ani potvrdit hypotézu, že by byly tyto odchylky způsobeny variabilitou samotného spektra kapek, kterou dohlednost nedokáže z principu reflektovat. Při řídkší mlze je odhad parametrů spektra nevěrohodný a nelze tak spolehlivě hodnotit výsledky analýzy. Při hustší mlze, kde měrný útlum dosahuje 100 dB/km a víc, je již odhad parametrů spolehlivý a útlum odhadnutý ze spektra velikosti kapek se shoduje s naměřeným více v porovnání s odhadem pomocí dohlednosti. Přehledněji je to vidět na průměrovaném bodovém grafu na obrázku 81. V oblastech do 100 dB/km je metoda odhadu pomocí dohlednosti lepším prediktorem, když se průměrná odchylka od naměřených hodnot liší méně než o 10 dB/km. V oblastech nad 100 dB/km ale metoda s dohledností měrný útlum nadhodnocuje (přestože se jedná o empirický vzorec pro danou lokalitu), zatímco metoda ze spektra velikosti kapek odpovídá naměřeným hodnotám na kanále 1550 nm.



Obrázek 81 - Průměrovaný bodový graf naměřeného a odhadnutého útlumu na kanále 1550 nm v Praze

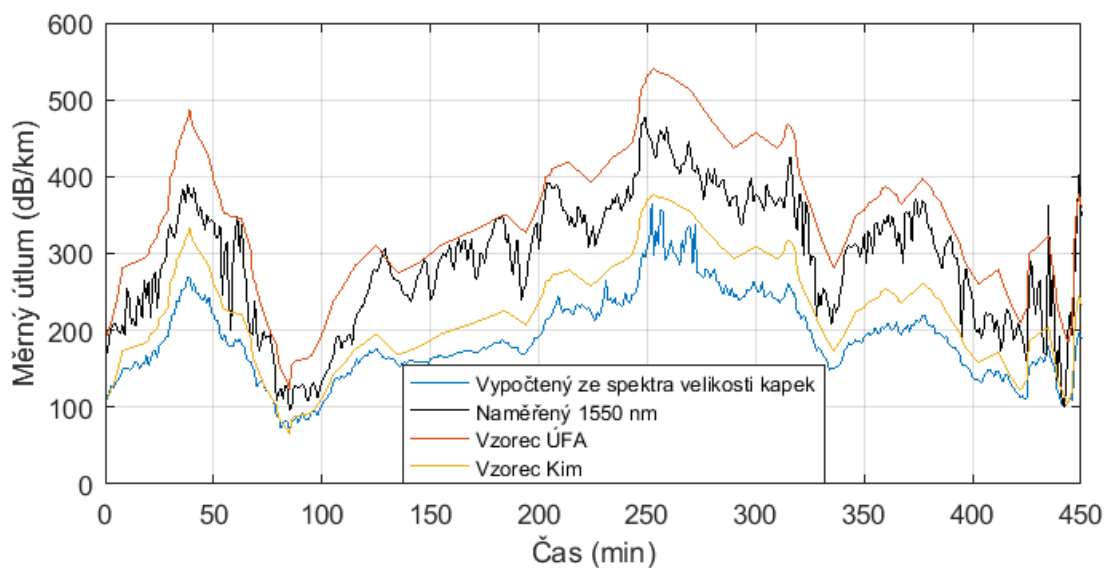
Nyní se podíváme také na kanál 830 nm. Na obrázku 82 je vykreslena znovu událost z obrázku 78 ale nyní již s naměřenými i predikovanými hodnotami na obou kanálech pro porovnání. Měřený útlum na kanále 830 nm vykazuje hodnoty řádově o desítky dB/km vyšší. Průběhy predikované ze spektra velikosti kapek (modrá a žlutá křivka) jsou téměř totožné, což je v souladu s hypotézou, že při dohlednosti pod 500 m je měrný útlum nezávislý na vlnové délce v rámci oblasti NIR dle Kimova modelu (3.33).



Obrázek 82 - Porovnání vypočteného a naměřeného útlumu na obou kanálech v Praze

Dle teorie je tedy vyloučeno, že by rozdíl způsobily abnormální charakteristiky mlhy. Nejedná se ani o důsledek špatného prahování (odečtení úrovně přijatého signálu při maximální dohlednosti při prvotním zpracování dat) vzhledem k patrné shodě na začátku i konci mlžné události.

Nyní se podíváme na výsledky z Milešovky. Na obrázku 83 je zobrazeno porovnání naměřeného měrného útlumu s výstupy prediktivních modelů. Zobrazil jsem jednu konkrétní událost, všechny ostatní jsou ale velmi podobné, co se rozdílů mezi měřenými daty a výstupy modelů týče. Černě je vykreslen měřený měrný útlum, který nejlépe vystihuje model ÚFA, který je stanoven empiricky přímo na těchto datech. Kimův model měření podhodnocuje, což jsem diskutoval už v kapitole 4.2.3. Výstup modelu s využitím spektra velikosti kapek ale vykazuje hodnoty v této události ještě o něco nižší.



Obrázek 83 - Porovnání vypočteného a naměřeného útlumu na kanále 1550 nm na Milešovce

Nepotvrzuje se tedy hypotéza, že by měření na Milešovce nekorrespondovalo s Kimovým vzorcem kvůli nestandardnímu spektru velikosti kapek. Průběhy na kanálu 830 nm jsou velmi podobné.

4.6.2.4 Zhodnocení metody

Pro ověření metody máme k dispozici dvě různá experimentální stanoviště s optickým bezkabelovým spojem, který každý operuje na dvou kanálech s vlnovou délkou 830 nm a 1550 nm. Porovnatelné výsledky prediktivního modelu s měřenými hodnotami pozorujeme na jednom kanále s vlnovou délkou 1550 nm na OBS v Praze. Ostatní tři případy (830 nm v Praze a oba kanály na Milešovce) nejsou navrženou metodou dobře predikovány.

Pokud se podíváme na empirické vztahy odvozené z jednotlivých kanálů na jednotlivých spojích, vidíme, že právě kanál 1550 nm v Praze se svým modelem nejvíce blíží Kimovu

modelu, viz obrázek 44. Ostatní modely predikují výrazně větší měrný útlum při dané dohlednosti.

Navržená metoda využívá Beer-Lambertova zákona pro relaci dohlednosti a spektra velikosti kapek. Beer-Lambertův zákon (4.14) je předlohou Kimova modelu, který pouze řeší navíc kmitočtovou závislost pro různé hodnoty dohlednosti. Pokud tedy závislost měřeného útlumu na dohlednosti nesedí s Kimovým vzorcem a zároveň tato neshoda není způsobena abnormálním spektrem velikosti kapek, je logické, že zde navržená metoda nebude fungovat.

Předpokladem je, že navržená metoda bude zpřesňovat měrný útlum v případech s abnormálním spektrem velikosti kapek. Z dlouhodobého hlediska by se měly hodnoty průměrně shodovat s Kimovým vzorcem. Pokud ale měření vykazuje dlouhodobě výrazně odlišné hodnoty od těch teoretických, nejedná se s největší pravděpodobností o důsledek abnormalit spektra velikosti kapek.

5 ZÁVĚR

Optické bezkabelové spoje jsou důležitým článkem komunikačních sítí. V dnešní době, kdy se nároky na přenosovou kapacitu každým rokem výrazně zvyšují, mají OBS nezastupitelnou roli v případech, kdy je potřeba propojit dvě optické sítě beze ztráty kapacity, přičemž použití vláknové optiky by bylo příliš nákladné ba dokonce nemožné.

Pohotovost služby je ale degradována různými atmosférickými jevy. Pro racionální plánování parametrů OBS je nezbytné pracovat s matematickými modely, které odhadují útlum signálu v různých atmosférických podmínkách. Tyto modely využívají meteorologických parametrů, jako jsou intenzita deště, dohlednost či intenzita sněžení apod. To jsou základní meteorologické parametry měřené poměrně hustou sítí meteorologických stanic po celém světě. Za použití matematických modelů tak lze určit dlouhodobé statistiky útlumu elektromagnetických vln kdekoli, kde máme meteorologická data k dispozici.

Výsledky z experimentálních pracovišť po celém světě ale ukazují, že zmíněné meteorologické veličiny nejsou stoprocentně spolehlivými prediktory. Dlouhodobá statistika závislosti mezi měrným útlumem OBS a dohledností se liší od modelu doporučeného ITU-R hned u několika experimentálních stanovišť. Tyto modely navíc předpokládají průměrné spektrum velikosti kapek (DSD). V případě, že se aktuální spektrum odlišuje, modely na základě integrálních meteorologických veličin vykazují chybu.

Metody stanovení DSD deště a mlhy a podrobná experimentální analýza útlumu optických vln v atmosféře je pak hlavním tématem této práce. Soustředím se na tyto dva jevy, které způsobují největší útlumy.

V úvodu teoretické části práce provádím rozbor modelu útlumu elektromagnetické vlny s využitím DSD. Tento přesný model (3.2) je součtem dílčích útlumů vlivem rozptylu a absorpce elektromagnetické vlny na každé jednotlivé kapce zvlášť. Vstupními parametry modelu je DSD, vlnová délka elektromagnetické vlny a rozptylová funkce. Rozptylová funkce určuje právě míru rozptylu a absorpce vlny na určité vlnové délce pro danou částici, charakterizovanou jejím indexem lomu a velikostí.

V teoretickém rozboru věnovanému dešti prezentuji technologii měření srážek (intenzity srážek i DSD). Nejčastěji používaným teoretickým rozložením DSD deště je Marshall-Palmerovo rozdělení (3.22). Dosazením tohoto rozdělení do rovnice (3.2) odvozuji jeden ze dvou modelů na základě intenzity srážek obsažený v doporučení ITU-R. Druhým je empirický model Carbonneau (3.28), který se liší pouze koeficienty mocninného modelu.

Pro modelování vlivu mlhy je všeobecně používána veličina dohlednost. Tu lze přístrojově měřit buď dohledoměry, či s využitím digitální kamery. Prezентuji nejčastěji používaný Kimův vzorec (3.33) i experimentální výsledky z evropských pracovišť, které poukazují na odchylky od Kimova modelu na základě statistické dlouhodobé analýzy. Hodnoty naměřeného měrného útlumu navíc vykazují značný rozptyl při dané dohlednosti. V této části diskutuji, zda jsou dané odchylky vysvětlitelné odlišným spektrem velikosti kapek, které dohlednost ne zcela dokáže reflektovat. Výsledky z našeho experimentálního pracoviště pak Kimův vzorec též nepotvrzují. To byl hlavní impuls proč se pustit do hlubšího studia DSD mlhy i deště.

Praktická část je rozdělena na několik podkapitol, snažící se řešit jednotlivé cíle práce. Nejprve představuji experimentální pracoviště na Milešovce, kde se mimo dvoukanálového OBS (vlnové délky 830 nm a 1550 nm) nachází celá řada meteorologických přístrojů umožňujících podrobný výzkum šíření optického signálu v atmosféře.

Analýza závislosti dohlednosti na měřeném měrném útlumu ukazuje nesoulad s Kimovým vzorcem. Formuluji tedy vlastní empirické vzorce využívající dohlednost platné pro experimentální pracoviště na Milešovce – vzorce (4.4) a (4.6).

Dlouhodobá statistika závislosti měrného útlumu na intenzitě deště pak potvrzuje model Carbonneau (3.28) obsažený v doporučení ITU-R. Nicméně vzhledem k velmi krátké délce spoje (60 m) a poměrně malým útlumům, které dešť v oblasti NIR způsobuje, shledávám jako relevantnější analýzu s využitím distrometru.

ÚFA AVČR, v.v.i totiž provozuje v Praze profesionální distrometr od firmy Joanneum Research, který je schopen přesně změřit parametry dešťové kapky. Z histogramu kapek prolétajících měřicí oblastí dopočítávám DSD deště i odpovídající intenzitu srážek. K analýze mám k dispozici pět let měření z let 2011 až 2015. Za jeden z největších přínosů této práce pak považuji analýzu v kapitole 4.5, kde porovnávám měrný útlum určený aproximativním modelem využívající intenzitu srážek a měrný útlum stanovený přesným vzorcem, který využívá DSD. Bodový graf na obrázku 57 pak ukazuje značné rozdíly mezi těmito modely při totožných podmínkách. Tato analýza mimo jiné ukazuje, že model Carbonneau podhodnocuje měrný útlum při nejvyšších intenzitách deště, které jsou však pro OBS nejvíce relevantní. Na základě dat z distrometru tedy formuluji vlastní vzorec pro měrný útlum OBS v oblasti NIR s využitím intenzity deště (4.11) a nazývám ho vzorec „ÚFA“. Nicméně zároveň zdůrazňuji, že v případě abnormálního DSD se hodnoty mohou značně lišit od skutečnosti. Jak moc, ukazuje výsledek analýzy na obrázku 64. Spektrum velikosti kapek deště charakterizují jedním parametrem – tzv. efektivním poloměrem kapek, který reflektuje, jak velké kapky se

v danou chvíli vyskytují nejčastěji. Analýza měřených dat ukázala, že pokud se efektivní poloměr kapek pohybuje okolo 0,64 mm, nevykazuje aproximativní model s využitím intenzity srážek žádnou chybu oproti přesnému modelu (3.2). Změna efektivního poloměru kapek o každých 0,1 mm způsobí chybu určení měrného útlumu o 10 dB/km s tím, že pokud je efektivní poloměr menší, aproximativní model podhodnocuje skutečný útlum a naopak.

Jedním z cílů práce je vývoj nízkonákladového distrometru pro měření DSD deště. Při realizaci tohoto cíle v průběhu studia jsem ale přišel na základní problém v samém principu přístroje, který nedovolil zamýšlený výrobek v navrhované podobě realizovat. Základním principem bylo rozmítání paprsku laserové diody pomocí Fresnelovy čočky a jeho následné usměrnění pomocí další Fresnelovy čočky na přijímač tvořený fotodiodou. Rozmítnutý vodorovný paprsek měl tvořit měřicí plochu, kde každá dešťová kapka, která projde skrz bude zaznamenána poklesem úrovně přijatého signálu na fotodiodě. Při realizaci jsem ale zjistil, že pro zamýšlené rozměry měřicí plochy alespoň 10 x 10 cm menší kapky nezpůsobí žádný pokles signálu, respektive tento pokles nepřesáhne hranici šumu, aby bylo možno částici detekovat. Menší rozměry měřicí plochy by již způsobily značné nepřesnosti měření DSD.

Navíc vzhledem k tomu, že máme k dispozici profesionální distrometr, nepřinesla by data z navrhovaného výrobku žádnou přidanou hodnotu k našim analýzám. Po dohodě se školitelem jsme se tedy rozhodli zaměnit vývoj tohoto výrobku za jiný, který bude navíc relevantnější pro náš výzkum.

Tím výrobkem je systém pro měření dohlednosti pomocí digitální kamery. Vzhledem k charakteru umístění experimentálního OBS na Milešovce, kde se často vyskytuje mlha a nízká oblačnost, pozorujeme velmi často nehomogenní podmínky podél osy spoje, protože je převýšení mezi polohou přijímače a vysílače 29 m. Profesionální dohledoměry poskytují hodnotu dohlednosti pouze v jednom bodu. V případě nehomogenního rozložení mlhy tedy nemáme přesné informace, což řeší měření dohlednosti pomocí kamery. Nechal jsem vyrobit černobílý terč, který jsem umístil k vysílači. K přijímači OBS na věži observatoře jsem umístil digitální kameru, která snímala terč a z poklesu kontrastu mezi bílou a černou částí terče jsem stanovil dohlednost, která odpovídá průměrné dohlednosti po celé délce trasy OBS. V rámci projektu jsem vytvořil obsluhující software, který automaticky v zadaném intervalu snímá fotografii, z které spočte dohlednost, a výsledná data uloží na disk počítače. Analýza výsledků prokázala přesnost systému i vyšší korelační koeficient s měřenými daty s OBS v porovnání s dohledoměry, které ale měly značně delší interval mezi měřeními. Vzhledem k tomu, že systém měření dohlednosti kamerou není vhodný pro měření v noci, využíváme ho

pouze pro mikro analýzu jednotlivých událostí. Pro dlouhodobé statistiky využíváme dat z profesionálních dohledoměrů.

Největším přínosem práce pak považuji navrženou metodu pro stanovení DSD mlhy z meteorologických přístrojů. Tvar DSD mlhy je nejčastěji aproximován gamma rozdělením (3.36) s třemi parametry a , b a α . V literatuře se objevují buď pevně stanovené parametry nebo metoda pro stanovení dvou parametrů, kde třetí je předem stanoven kvalifikovaným odhadem. V rámci disertační práce navrhuji metodu pro stanovení všech třech parametrů s využitím LWC, PSA a dohlednosti. Metodu mám díky poskytnutí dat kolegy z ČMI šanci aplikovat na datech ze dvou typově odlišných experimentálních stanovišť (horská observatoř na Milešovce a městské prostředí v Praze).

Je zajímavé, že v obou případech mají parametry b a α dle histogramu ze všech měřených vzorků své typické hodnoty. Právě tyto dva parametry určují výsledný tvar křivky gamma rozdělení. Jedním z důležitých výsledků práce je tedy stanovení průměrného spektra kapek mlhy pro lokalitu v Praze a na Milešovce, viz tabulku 10. Obě tato spektra se liší od spekter navržených v doporučení ITU-R pro mírnou radiační a hustou advekční mlhu. Analýzou jednotlivých událostí jsem dokázal stabilitu metody, kdy se jednotlivé odhadované parametry v hustější mlze stabilizovaly v čase. Analýza též prokázala, že je metoda nestabilní pro dohlednosti větší než cca 200 metrů, kdy odhadované parametry již nereálně fluktuují v čase. Z finančních důvodů bohužel nebylo možné ověřit výsledky metody pomocí přístroje APS.

Pro výsledné porovnání predikovaného útlumu pomocí odhadnutého DSD s měřeným měrným útlumem na experimentálním OBS jsme měli k dispozici data z Prahy na vlnových délkách 830 nm a 1550 nm a ty samé kanály z Milešovky.

Dobrá shoda s měřením byla prokázána v případě kanálu 1550 nm v Praze. V tomto případě predikovala metoda s využitím DSD nejvyšší naměřené útlumy (okolo 110 dB/km) přesněji nežli model s využitím dohlednosti. Pro nižší útlumy pod 100 dB/km byla stabilnější metoda s využitím dohlednosti. Analýza ukázala, že výše diskutovaný rozptyl predikovaných a měřených hodnot se metodou stanovení DSD nevyřešil a s největší pravděpodobností se tedy nepotvrzuje hypotéza, že by byl způsoben variabilitou DSD.

Stejně tak nemohu potvrdit hypotézu, že by byly případy, kdy měření na experimentálním OBS nesedí s Kimovým modelem, způsobeny abnormálním DSD. To se týká právě zbylých tří případů (kanál 830 nm v Praze a oba kanály na Milešovce). Zmiňovaný kanál 1550 nm v Praze se totiž parametry svého empirického modelu velmi blíží hodnotám parametrů dle Kimova vzorce. Metoda stanovení měrného útlumu z DSD nepredikuje hodnoty, které by

odpovídaly hodnotám měřeným. Nesoulad s Kimovým vzorcem tedy nelze v těchto případech vysvětlit charakteristikami mlhy.

Dle mého názoru jsem cíle disertační práce splnil.

SEZNAM LITERATURY

- AL NABOULSI, M. et. al., 2004. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves. *Optical Engineering*, **43**(2). DOI 10.1117/1.1637611
- AWAN, M. S., et. al., 2009. A New Method of Predicting Continental Fog Attenuations for Terrestrial Optical Wireless Link. *Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*. DOI 10.1109/NGMAST.2009.31
- BÄUMER D., S. VERSICK S. a B. VOGEL, 2008. Determination of the visibility using a digital panorama camera. *Atmospheric Environment*. **42**(11), s. 2593-2602. ISSN 1352-2310
- BAYKAL, Y., 2015. Multimode Laser Beam Scintillations in Non-Kolmogorov Turbulence. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. **33**(9), s. 1883-1889. DOI 10.1109/JSAC.2015.2432531
- BEDNÁŘ, J. et al., 1993. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha: MŽP. ISBN 8085368455.
- BOHREN, C.F. a D. R. HUFFMAN, 1983. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: John Wiley. ISBN 9780471293408
- BRÁZDA, V., O. FIŠER, P. PEŠICE a J. PEŠEK, 2011a. Combination of two visibility sensors to predict fog attenuation on FSO links. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Telecommunications*. ISBN 987-953-184-152-8
- BRÁZDA, V., 2011b. *Šíření optického signálu v atmosféře*. Pardubice. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, FEI. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.
- BRÁZDA, V. a O. FIŠER, 2015a. Estimation of fog drop size distribution based on meteorological measurement. *Conference on Microwave Techniques (COMITE)*. DOI 10.1109/COMITE.2015.7120331
- BRÁZDA, V. a O. FIŠER, 2015b. Comparison of exact and approximate FSO rain attenuation formulas based on actual DSD. *9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. ISBN 978-8-8907-0185-6
- CAPSONI, C., et. al., 2012. Prediction of cloud attenuation on earth-space optical links. *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, s. 326-329. ISBN 978-1-4577-0918-0

- CARBONNEAU, T. a D. WISLEY, 1998. 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*. s. 119–128.
- COLVERO C. P., M.C.R. CORDEIRO a J.P. VON DER WEID, 2005. New Proposal for Real Time Measurements of Visibility and Signal Levels in Free Space Optical Systems. *SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics*. s. 344 – 347. ISBN 0-7803-9341-4
- COST, 2000. ICT COST Action 270. *Reliability of optical components and devices in communications networks and systems* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.cost.eu/COST_Actions/ict/270
- COST, 2008. ICT COST Action IC0802. *Propagation tools and data for integrated Telecommunication, Navigation and Earth Observation systems* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.cost.eu/COST_Actions/ict/IC0802
- COX, A. J., 2002. An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections. *American Journal of Physics*. **70**(6), s. 620–625. DOI 10.1119/1.1466815.
- FÍŠER, O. a O. WILFERT, 2009. Novel processing of Tipping-bucket rain gauge records. *Atmospheric Research*. **92**(3), s. 283-288. DOI: 10.1016/j.atmosres.2009.01.008. ISSN 01698095.
- FÍŠER, O., V. BRÁZDA a M. MANDLÍK, 2012. New DSD Measurement in Prague – Parametrisation, hail detection. *Urban Challenges in Rainfall Analysis*, ETH Zurich
- GABRIEL, C. et. al., 2011. Channel modeling for underwater optical communication. *IEEE GLOBECOM Workshops*. DOI 10.1109/GLOCOMW.2011.6162571
- GEBHART, M., E. LEITGEB a J. BREZENGER, 2003. Atmospheric effects on Optical Wireless links. *Proceedings of the 7th International Conference on Telecommunications (ConTel 2003)*. DOI 10.1109/CONTEL.2003.176939
- GERBER SCIENTIFIC INC., 1993. *Operator's manual for PVM-100*. Bentana Way, Reston.
- GHASSEMLOOY, Z., J. PEREZ a E. LEITGEB, 2013. On the performance of FSO communications links under sandstorm conditions. *Proceedings of the 12th International Conference on Telecommunications*. s. 53-58. ISBN 978-1-4673-5984-9

- GRÁBNER, M. a V. KVIČERA, 2009. On the relation between atmospheric visibility and the drop size distribution of fog for FSO link planning. *35th European Conference on Optical Communication*. ISBN 978-1-4244-5096-1
- GRÁBNER, M. a V. KVIČERA, 2010. Fog attenuation dependence on atmospheric visibility at two wavelengths for FSO link planning. *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, s. 193-196. DOI 10.1109/LAPC.2010.5666176
- GRÁBNER, M., V. KVIČERA a O. FIŠER, 2012. Rain attenuation measurement and prediction on parallel 860 nm free space optical and 58 GHz millimeter wave paths. *Optical Engineering*. **51**(3). DOI 10.1117/1.OE.51.3.031206
- GUNN, K. L. S. a T. W. R. EAST, 1954. The microwave properties of precipitation particles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. **80**(136), s. 522-545. ISSN 0035-9009
- GUNN, R. a D. G. KINZER, 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, **6**, 243-248. DOI 10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2
- HOLLEROVÁ, J., 2008. *Prašnost na pracovišti* [online]. [cit. 2012-06-16]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/prasnost-na-pracovisti-1>
- ITU-R, 2007. *Recommendation ITU-R P.1814: Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1814-0-200708-I!!PDF-E.pdf
- ITU-R, 2008. *Recommendation ITU-R P.1817: Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1817-0-200708-S!!PDF-E.pdf
- IJAZ, M., et. al., 2013a. Modeling of Fog and Smoke Attenuation in Free Space Optical Communications Link Under Controlled Laboratory Conditions. *Journal of Lightwave Technology*. **31**(11), s. 1720-1726. DOI 10.1109/JLT.2013.2257683
- IJAZ, M, et. al., 2013b. Enhancing the Atmospheric Visibility and Fog Attenuation Using a Controlled FSO Channel. *IEEE Photonics Technology Letters*. **25**(13), s. 1262-1265. DOI 10.1109/LPT.2013.2264046
- JOANNEUM RESEARCH, 2010. *2D-Video-Distrometer User's manual*. Graz, Austria

- KIM, I. I. et. al., 2001. Comparison of Laser Beam Propagation at 785 nm and 1550 nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications. *Proc. SPIE Optical Wireless Communications III*. Vol. 4214. DOI 10.1117/12.417512
- KNĚŽÍNKOVÁ, B., R. BRÁZDIL a P. ŠTĚPÁNEK, 2010. Porovnání měření srážek srážkoměrem Metra 886 a automatickým člunkovým srážkoměrem MR3H ve staniční síti Českého hydrometeorologického ústavu. *Meteorologické zprávy*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, **63**(5), s. 147-155. ISSN 0026-1173.
- KOLKA Z., et. al., 2012. Hybrid FSO/RF test link. *4th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, s. 502-505. ISBN 978-1-4673-2016-0.
- KRUSE, P. W. et. al., 1962. *Elements of Infrared Technology: generation, transmission and detection*. New York: J. Wiley & Sons. ISBN 9780471508861
- KVIČERA, V., M. GRÁBNER a O. FIŠER, 2009. Analysis of fog attenuation events at 850 nm measured on an 853 m path. *Proc. of SPIE 7464*. DOI 10.1117/12.825927
- KVÍČALA, R. 2009. *Chybovost a dostupnost atmosférických optických spojů*. Brno. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
- LE MINH, H., et. al., 2010. Experimental Study of Bit Error Rate of Free Space Optics Communications in Laboratory Controlled Turbulence. *IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications*. DOI 10.1109/GLOCOMW.2010.5700099
- LEITGEB, E., et. al., 2005. Hybrid Wireless Networks combining WLAN, FSO and Satellite Technology for Disaster Recovery In *Proceedings of the IST Mobile and Wireless Communications Summit 2005* [online][cit. 2018-05-20]. Dostupný z: <https://www.eurasip.org/Proceedings/Ext/IST05/papers/190.pdf>
- LEITGEB, E., et. al., 2006. The influence of dense fog on Optical Wireless systems, analysed by measurements in Graz for improving the link-reliability. *Proceedings of IEEE Conference ICTON 2006*. DOI 10.1109/ICTON.2006.248424
- MATZLER, Ch., 2002. *MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption* [online]. [cit. 2011-05-27]. Dostupné z: http://arrc.ou.edu/~rockee/NRA_2007_website/Mie-scattering-Matlab.pdf.

- METEOSERVIS, 2015. *MRW500 Weighing Rain Gauge* [online], [cit. 2015-09-30]. Dostupné z: http://www.meteoservis.cz/fotky/fotos/_c_141MRW500_2015_eng1.pdf
- MICHELSON, A., 1927. *Studies in Optics*. Chicago: University of Chicago Press. OCLC 971625835
- MORI, S. a F. S. MARZANO, 2014. Effects of multiple scattering due to atmospheric water particles on outdoor Free Space Optical links. *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*. DOI 10.1109/EuCAP.2014.6901945
- MUHAMMAD, S. S., P. KOHLDORFER, E. LEITGEB, 2005. Channel Modeling for Terrestrial Free Space Optical Links. *Proceedings of IEEE Conference ICTON 2005*. DOI 10.1109/ICTON.2005.1505832
- NADEEM, F., et. al., 2009. Switch over implementation and analysis for hybrid wireless network of optical wireless and GHz links. *Wireless Telecommunications Symposium 2009*. DOI 10.1109/WTS.2009.5068951
- NAVE, R. 2018. Blue Sky [online], [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>
- OTT MESSTECHNIK GmbH & Co. KG, 2004. *Operating instructions. Present Weather Sensor Parsivel*. Kempten, Germany
- PEŠEK, J. a O. FÍŠER, 2011. Research of Refractive Index Impact on Dual Wavelength FSO Link Attenuation. *International Conference on Applied Electronics*. Plzeň: Západočeská univerzita. ISBN 978-80-7043-987-6
- PEŠEK, J., 2018. *Šíření optického a radiového signálu v prostředí s hydrometeory a větrnými turbulencemi*. Pardubice. Disertační práce. Univerzita Pardubice, FEI. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.
- PRUPPACHER, H. R. a J. D. KLETT, 1997. *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Dordrecht, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. ISBN 0792342119
- PRUPPACHER, H. R. a R. L. PITTER, 1971. A semi-empirical determination of the shape of clouds and raindrops. *Journal of the Atmospheric Sciences*. **28**(1), s. 86-94. DOI 10.1175/1520-0469(1971)028<0086:ASEDOT>2.0.CO;2
- REJFEK, L. et. al., 2014. Distrometer based on measurement of fall velocity. *24th International Conference Radioelektronika*. DOI 10.1109/Radioelek.2014.6828453

- ŘEZÁČOVÁ, D. et al., 2007. *Fyzika oblaků a srážek*. Academia. ISBN 978-80-200-1505-1.
- SEGELSTEIN, D., 1981. *The Complex Refractive Index of Water*. Kansas City. Diplomová práce. University of Missouri
- SIDOROVITCH, V. G., 2002. Solar background effects in wireless optical communications. *Optical Wireless Communications V*. DOI 10.1117/12.456303
- SUNJRAY INFOSYSTEMS, 2018. *Tipping Bucket Rain Gauge* [online], [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://sunjray.com/product/jdz05-1a-stainless-steel-tipping-bucket-rain-gauge/>
- UZUNOGLU N. K., B. G. EVANS a A. R. HOLT, 1977. Scattering of electromagnetic radiation by precipitation particles and propagation characteristics of terrestrial and space communication systems. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. **124**(5), s. 417-424. DOI 10.1049/piee.1977.0078
- TSI INC., 2014. *Aerodynamical Particle Sizer, model 3321* [online]. [cit. 2014-05-28] Dostupné z: http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3321.pdf.
- VAISALA, 2014. *Vaisala RAINCAP® Sensor Technology* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/RAINCAP_Technology.pdf
- VAN DE HULST, H. C., 1957. *Light scattering by small particles*. New York: John Wiley and Sons. ISBN 9780486139753.

SEZNAM ODBORNÝCH PUBLIKACÍ AUTORA

Kapitola v knize

FIŠER, O. a V. BRÁZDA, 2016. Experimental Validation of FSO Channel Models. *Optical Wireless Communications*. Cham: Springer, 2016, s. 69-86. Signals and Communication Technology. ISBN 978-3-319-30200-3

Impaktované publikace

IJAZ, M., Z. GHASSEMLOOY, J. PEREZ SOLER, V. BRAZDA, O. FISER, 2013. Enhancing the Atmospheric Visibility and Fog Attenuation Using a Controlled FSO Channel. *Photonics Technology Letters*. **25**(13), s. 1262-1265. DOI 10.1109/LPT.2013.2264046

CHLÁDOVÁ, Z., O. FIŠER, V. BRÁZDA, J. SVOBODA, 2013. Correlation of free-space optics link attenuation with sonic temperature. *Optical Engineering*. **52**(3), DOI 10.1117/1.OE.52.3.030503

DEV, K., R. NEBULONI, C. CAPSONI, O. FIŠER a V. BRÁZDA, 2017. Estimation of optical attenuation in reduced visibility conditions in different environments across free space optics link. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. **11**(12). DOI 10.1049/iet-map.2016.0872

Recenzované časopisy

BRÁZDA, V., M. IJAZ, J. PEREZ SOLER a O. FIŠER, 2012. Měření dohlednosti digitálním fotoaparátem. *Perner's Contacts*. **7**(3), s. 16-23. ISSN 1801-674x.

BRÁZDA, V. a O. FIŠER, 2013. Měření dohlednosti kamerou pro účely studia vlivu reálné atmosféry na přenos optického bezkabelového spoje. *ElectroScope*. (1). ISSN 1802-4564

MANDLÍK, M. a V. BRÁZDA, 2011. Sound source location method. *Perner's Contacts*, **6**(5), s. 197-204. ISSN 1801-674X.

Sborníky

BRÁZDA, V., O. FIŠER, P. PEŠICE a J. PEŠEK, 2011. Combination of two visibility sensors to predict fog attenuation on FSO links. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Telecommunications*. ISBN 987-953-184-152-8

BRÁZDA, V., O. FIŠER a J. SVOBODA, 2011. FSO and radio link attenuation: meteorological models verified by experiment. *Proc. of Conference SPIE Optics + Photonics*, DOI 10.1117/12.893819

FIŠER et. al., 2009. Attenuation measurement on dual-wavelength optical free-space link. *Proc. SPIE 7463*, DOI 10.1117/12.825700

BRÁZDA, V., V. SCHEJBAL a O. FIŠER, 2012. Rain impact on FSO link attenuation based on theory and measurement. *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. s.1239-1243. DOI 10.1109/EuCAP.2012.6206120

REJFEK, L. a V. BRÁZDA, 2012. Radar based passive measurement of vehicle speed in optical spectrum. *7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2012)* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/NMUR_320_ext_abs.pdf

BRÁZDA, V., et. al., 2013. Cloud microphysics from the free space optical link point of view — Preliminary experimental results. *2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW)*. DOI 10.1109/IWOW.2013.6777778

BRÁZDA, V., et. al., 2013. On wind influence on FSO link attenuation. *Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2013)*. s. 949-951. ISBN 978-88-907018-1-8

FIŠER, O., Z. CHLÁDOVÁ, V. BRÁZDA a V. SCHEJBAL, 2013. Examples of DSD products to study radio wave propagation. *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, s. 2533-2536. ISBN 978-1-4673-2187-7

FIŠER, O., L. REJFEK a V. BRÁZDA, 2013. On forward and backward scattering from fog and rain drops. *Conference on Microwave Techniques (COMITE)*. s. 152-155. DOI 10.1109/COMITE.2013.6545060

BRÁZDA, V., O. FIŠER, L. REJFEK a M. MANDLÍK, 2013. Attenuation of optical signal in free space - Event analysis. *Conference on Microwave Techniques (COMITE)*, s. 166-170. DOI 10.1109/COMITE.2013.6545063

FIŠER, O., V. BRÁZDA a O. FIŠER jr., 2013. Clear air attenuation on FSO links. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*. DOI 10.1109/IMOC.2013.6646590

- BRÁZDA, V. a O. FIŠER, 2013. Long-term analysis of atmospheric effects on free space optical links. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, DOI 10.1109/IMOC.2013.6646585
- REJFEK, L., V. BRÁZDA a O. FIŠER, 2013. Device for measurement of optical visibility. *Conference on Microwave Techniques (COMITE)*. s. 90-94. DOI 10.1109/COMITE.2013.6545049
- BRÁZDA, V. et. al., 2014. Meteorological Measurement of Atmospheric Turbulence and FSO Link Attenuation – Preliminary Results. *8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. DOI 10.1109/EuCAP.2014.6901946
- BRÁZDA, V., O. FIŠER a L. REJFEK, 2014. Development of system for measuring visibility along the free space optical link using digital camera. *24th International Conference Radioelektronika*. DOI 10.1109/Radioelek.2014.6828458
- BRÁZDA, V. a O. FIŠER, 2014. First results from measurement of free space optical link in clouds. *24th International Conference Radioelektronika*. DOI 10.1109/Radioelek.2014.6828444
- FIŠER, O., V. BRÁZDA a L. REJFEK, 2014. Two ways to consider atmospheric turbulences in FSO propagation. *24th International Conference Radioelektronika*. DOI 10.1109/Radioelek.2014.6828447
- REJFEK, L., J. PEŠEK, V. BRÁZDA a O. FIŠER, 2014. Distrometer Based on Measurement of Fall Velocity. *24th International Conference Radioelektronika*. DOI 10.1109/Radioelek.2014.6828453
- REJFEK, L., P. BEZOUŠEK, O. FIŠER a V. BRÁZDA, 2014. FMICW radar simulator at the frequency 35.4 GHz. *24th International Conference Radioelektronika*. DOI 10.1109/Radioelek.2014.6828452
- FIŠER, O., V. BRÁZDA a V. SCHEJBAL, 2015. Tests of wind parameters as predictors of free space optic link attenuation. *Conference on Microwave Techniques (COMITE)*. DOI 10.1109/COMITE.2015.7120329
- MANDLÍK, M. a V. BRÁZDA, 2015. FMICW radar simulator. *25th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. DOI 10.1109/RADIOELEK.2015.7129054

REJFEK, L., D. BUREŠOVÁ, O. FIŠER a V. BRÁZDA, 2015. Comparison of parametric methods for radar signal processing. *25th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. DOI 10.1109/RADIOELEK.2015.7128986

BRÁZDA, V. a O. FIŠER, 2015. Estimation of fog drop size distribution based on meteorological measurement. *Conference on Microwave Techniques (COMITE)*. DOI 10.1109/COMITE.2015.7120331

BRÁZDA, V. a O. FIŠER, 2015. Comparison of exact and approximate FSO rain attenuation formulas based on actual DSD. *9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. ISBN 978-8-8907-0185-6

REJFEK, L., J. PEŠEK a V. BRÁZDA, 2015. Targets detection for FMICW radar. *25th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. DOI 10.1109/RADIOELEK.2015.7128995

SCHEJBAL, V., R. DOLEČEK, O. FIŠER, V. BRÁZDA a Z. NĚMEC, 2016. Propagation over terrain considering refractivity profiles. *26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. DOI 10.1109/RADIOELEK.2016.7477342

FIŠER, O., V. PEK, V. BRÁZDA a V. SCHEJBAL, 2016. Mathematical elimination of unwanted signal decrease due to satellite spatial motion. *26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. DOI 10.1109/RADIOELEK.2016.7477397

PEK, V., V. BRÁZDA a O. FIŠER, 2016. First Ka and Q band results of atmospheric attenuation measurements using Alphasat receiver in Czech Republic. *26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. DOI 10.1109/RADIOELEK.2016.7477398

PEK, V., V. BRÁZDA a O. FIŠER, 2016. Description of Alphasat satellite space motion and its consequences for signal reception. *26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. DOI 10.1109/RADIOELEK.2016.7477396

FIŠER, O., V. PEK, V. BRÁZDA and V. SCHEJBAL, 2016. Experiences with special Ka- and Q-band receivers for alphasat signal monitoring in Prague, CZ. *Conference on Microwave Techniques (COMITE)*. DOI 10.1109/COMITE.2017.7932355

Ostatní

CHLÁDOVÁ, Z. et. al., 2010. Impact of Fog and Wind on FSO Link Attenuation - Quick Experimental Results. *1st International Workshop Measurements and Models for the*

Propagation Channel Characterisation Proceedings. November 8-9, 2010, Centre for Scientific Culture "Ettore Majorana", Erice, Italy.

FIŠER, O. et. al, 2011. Models of FSO link attenuation due to fog, rain and wind derived from measurement. *MCM#6 meeting of COST action IC0802*, 28.-30. 9. 2011, Prague

CHLÁDOVÁ, Z., et. al., 2012. Influence of Wind Conditions on the FSO link attenuation at Milešovka Hill. *MCM#7 meeting of COST action IC0802*, 16.-18. 4. 2012, Portsmouth, UK

PEŠICE, P., O. FIŠER, Z. CHLÁDOVÁ a V. BRÁZDA, 2012. Air refractivity index in optical region: formulas and measurement in CZ. *MCM#7 meeting of COST action IC0802*, 16.-18. 4. 2012, Portsmouth, UK