

**UNIVERZITA PARDUBICE**

**FAKULTA ELEKTRONIKY A INFORMATIKY**

**Metody zpracování záznamů anemometrů a jejich využití**

**pro**

**predikci útlumu optických spojů v nehomogenní atmosféře**

**Autor práce: Jan Jaroš**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2014**

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Jaroš**  
Osobní číslo: **I10359**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**  
Název tématu: **Metody zpracování záznamů anemometrů a jejich využití pro predikci útlumu optických spojů v nehomogenní atmosféře**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Vypočítejte hodnoty vytipovaných parametrů z časové řady 3D dat vektoru rychlosti větru, u kterých jsou předpoklady, že jsou korelovány s útlumem optického bezkabelového spoje a tudíž i fluktuacemi indexu lomu nehomogenní atmosféry. Závislost ověřte kvantitativně (např. přes korelační koeficient) s využitím záznamů útlumu na experimentálních optických bezkabelových trasách. Uvažte vliv integračního času na výsledky a souvislost se strukturálním indexem atmosféry. Data dodá vedoucí práce.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

Jiří Pešek, O.Fišer, J.Svoboda, V. Schejbal: Modeling of 830 nm FSO Link Attenuation in Fog or Wind Turbulence Radioengineering, vol. 19, č. 2, June 2010, str. 237-241

Fišer, O., Svoboda, J., Pešek J., J. Schejbal, V: FSO link attenuation versus visibility or wind turbulent energy, Příspěvek na 3. zasedání Řídícího výboru mezinárodního projektu COST IC0802, 27.4.2010, Atény, Řecko, sborník publikován na webu

Jiří Pešek, Ondřej Fišer: Research of Atmospheric Structure Index Impact on FSO Link Attenuation 1st International Workshop "Measurements and Models for the Propagation Channel Characterisation" November 8-9, 2010, Centre for Scientific Culture "Ettore Majorana", Erice, Italy, sborník publikován na webu, str. 1-6

Zuzana Chladová, Ondřej Fišer, Jaroslav Svoboda, Jaroslav Fisak, Jiří Pešek, Vladimír Brazda: Impact of Fog and Wind on FSO Link Attenuation - Quick Experimental Results, 1st International COST IC0802 Workshop Measurements and Models for the Propagation Channel Characterisation, November 8-9, 2010, Centre for Scientific Culture "Ettore Majorana", Erice, Italy, sborník publikován na webu, str. 1-6

Petr Popovský, Bakalářská práce FEI UPCE, 2011

Martin Dlask, Bakalářská práce FEI UPCE, 2011

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.**

AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání diplomové práce:

**7. listopadu 2012**

Termín odevzdání diplomové práce:

**17. května 2013**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2012

## **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 Kolíně 1.8.2014

Jan Jaroš

## **Poděkování**

V první řadě bych touto cestou chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc., za to, že si na mě udělal čas ve svém, už tak velmi nabitém programu a pomohl tuto práci uskutečnit. Jeho rady, poznatky a poskytnuté materiály byly pro mne velmi přínosné. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Jaroslavu Svobodovi, Csc., za jeho zpřesňující rady a poznatky, vytvoření programů, které mi usnadnily práci. Dále chci poděkovat Ing. Vladimíru Brázdovi, se kterým jsem spolupracoval, který mi pomohl se zpracováním hrubých dat a jeho rady byly též přínosné.

**Anotace:**

V této práci se zabývám zdokonalením porozumění vlivů účinků větrných turbulencí, turbulentní energii, sonickou teplotu na přenos dat optickým bezdrátovým kabelem.

Hlavním úkolem bylo zmapovat chování optického bezdrátového spoje ovlivněného atmosférickými poruchami a to především větrných turbulencí a s nimi spojenými výkyvy.

**Klíčová slova:**

optický bezdrátový spoj, intenzita turbulence, rychlost větru, sonická teplota, směrodatná odchylka, útlum, dohlednost

# Obsah

1. Úvod .....	12
2. Optický bezkabelový spoj (OBS) .....	13
2.1 Vlastnosti OBS .....	15
2.1.1 Výhody OBS .....	15
2.1.2 Nevýhody OBS .....	15
2.3 Účinky atmosféry na OBS: .....	16
Změna indexu lomu .....	18
2.4 Výkonové úrovně na OBS .....	20
2.4.1 Stacionární model spoje: .....	20
2.4.2. Statický model .....	23
3. Teorie atmosféry .....	25
3.1 Charakteristika turbulentního proudění .....	26
3.2 Vliv turbulencí .....	27
3.3 Rychlost změn .....	28
3.4 Teplotní změny .....	28
3.5 Zdroje turbulence v atmosféře, mechanická a termická turbulence, uspořádaná konvence .....	29
3.6 Vliv terénu na deformaci proudění .....	29
3.7 Vliv překážek na proudění .....	30
3.8 Konstantní útlum OBS vlivem ředění výkonu ve svazku .....	31
3.9 Atmosférické turbulence .....	32
4. Korelace .....	35
5. Experimentální optický spoj .....	37
5.1 Umístění spoje .....	37
5.2 Optický spoj: .....	38
5.3 Vysílač .....	38
5.4 Přijímač .....	39
5.5 Anemometry .....	40
5.6 Dohledoměr Vaisala PWD21 .....	41
6. Řešení problému .....	42
7. Výsledky: .....	44
8. Závěr: .....	55
9. Seznam použité literatury: .....	57

## Seznam obrázků

Obr.1 Snellův zákon.....	17
Obr. 2 Výkonové úrovně optického stroje.....	22
Obr. 3 Statistický model. ....	23
Obrázek 3a - Propustnost atmosféry.....	24
Obr. č.3c: Větrná růžice.....	25
Obr. 4 Trajektorie svazku v čase $t_n$ .....	27
Obr. 5 Cestování svazku.....	27
Obr. 6 Teorie energetické kaskády.....	28
Obr. 7 Laminární proudění.....	30
Obr. 8 Turbulentní proudění.....	30
Obr. 9 Útlum vlivem ředění výkonu.....	32
Obr. 10 Atmosférické turbulence.....	33
Obr.12 Blokové schéma optického spoje.....	37
Obr.11 Vysílač v terénu.....	38
Obr. 14 Dohledoměr Vaisala PWD21 na Milešovce.....	39
Obr.13 Anemometr.....	40
Obr.12 nímání útlumu na kanálech CH1, CH2 .....	41

## Seznam grafů

Graf 1 – Korelace zkoumaných vel. s útlumen na kanále CH1 za jednotlivé roky.....	44
Graf 2 – Průměrná korelace zkoumaných vel. s útlumen na kanále CH1 za 3 roky.....	44
Graf 3 – Počet naměřených hodnot, se kterými počítáme za jednotlivé roky.....	45
Graf 4 – Korelace s různým integračním časem(1min,5min,15min) za rok 2011 .....	47
Graf 5 – Korelace s různým s různou podmínkou viditelnosti (2km, 10km) za tři roky.....	48
Graf 6 – Průměr a medián z korelace po jednom dni za tři roky.....	51
Graf 7 – Průměr a medián z korelace po třech dni za tři roky.....	51
Graf 8 – Průměr a medián z korelace po jednom dni za tři roky oddělené kladné a záporné dny...53	



## Seznam tabulek

Tabulka 1 - vlnová délka světla.....	13
Tabulka 2 - Parametry vysílače:.....	39
Tabulka 3 - Zkoumané veličiny.....	42
Tabulka 4 - Vše s útlum průměrovaný 1min dohlednost 10km za období tří let.....	44
Tabulka 5 – Statistika hodnot zkoumané veličin.....	46
Tabulka 6 – Různé integrační časy korelací veličin (tab. 3).....	47
Tabulka 7 – Korelace veličin pro různé dohlednosti.....	49
Tabulka 8 – Korelace veličin (tab. 3) po jednotlivých dnech, první den až patnáctý den	50
Tabulka 9 – Pokračování tabulky 8 pro zbylé veličiny.....	50
Tabulka 10a – Celkový průměr a medián z korelací veličin (tab. 3) po jednotlivých ....	51
Tabulka 10b – Pokračování tab.10a .....	51
Tabulka 10c – Pokračování tab.10a .....	51
Tabulka 11a – Celkový průměr a medián z korelací veličin (tab. 3) po třech dnech...	51
Tabulka 11b – Pokračování tab.11a .....	51
Tabulka 11c – Pokračování tab.11a.....	51
Tabulka 12a – Celkový průměr a medián z korelací veličin (tab. 3).....	53
Tabulka 12b – Pokračování tab.11a .....	53
Tabulka 12c – Pokračování tab.11a .....	53

## Seznam zkratek

OBS.....	optický bezkabelový spoj
IT.....	intenzita turbulence
SMD.....	směrodatná odchylka
LD .....	laserová dioda
IRED.....	infračervená elektroluminiscenční dioda
APD.....	lavinová fotodioda
n.....	index lomu prostředí
$P_{m,RXA}$ .....	střední hodnota přijatého výkonu
$P_{m,TXA}$ .....	střední hodnota vysílaného výkonu
$\alpha_{cel}$ .....	celkový útlum prostředím mezi vysílačem a přijímačem
$\gamma_{prij}$ .....	je celkový zisk přijímače
$\alpha_{cel}$ .....	celkový útlum prostředí
$\alpha_{12}$ .....	útlum šířením volným prostorem
$\alpha_{atm}$ .....	atmosférický útlum
$L_{12}$ .....	vzdálenost vysílače a přijímače
$\alpha_{atmk}$ .....	útlum způsobený konstantními atmosférickými jevy
$\alpha_{atmn}$ .....	útlum způsobený náhodnými atmosférickými jevy
$\alpha_{1,part}$ .....	měrný útlum způsobený částicemi v dB/km
$\gamma_{cel}$ .....	zisk přijímače
$\gamma_{RXA}$ .....	geometrický zisk
$\gamma_{add}$ .....	přídavný zisk je dán rozdílným rozložením optické intenzity na přijímací a vysílací straně
$D_{RXA}$ .....	průměrů hledí (apertur) na přijímací straně
$D_{TXA}$ .....	průměrů hledí (apertur) na vysílací straně
$P_{m,TXA}$ .....	hodnota vysílaného výkonu pro ideální čistou atmosféru
$P_{m,RXA}$ .....	hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru
$\tilde{P}_{m,RXA}$ .....	střední hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru
$P_{sat,RXA}$ .....	saturační práh přijímače
$P_{0,RXA}$ .....	citlivostní práh přijímače
$\Delta$ .....	dynamický rozsah přijímače
M .....	linková rezerva

$P_{m,TXA}$  ..... hodnota vyslaného výkonu pro ideální čistou atmosféru  
USA ..... ultrasonic anemometer

# 1. Úvod

Optický přenos v podobě, v jaké ho známe, se začal rozvíjet v 60. letech minulého století díky vynálezu laseru. V dnešní době se čím dál více používají optické spoje pro jejich velké přenosové kapacity. A dá se připojit velké množství uživatelů k páteřní optické síti. Optické spoje můžeme rozdělit podle typu přenosové cesty na velké vzdálenosti pomocí optického kabelu a na kratší vzdálenosti bezdrátové. Optické kabelové spoje se používají pro bezztrátové chování a odolnost proti rušení především na velké vzdálenosti. Optické bezkabelové spoje se využívají pro propojení optických kabelových sítí, především v případech, ve kterých při použití optických kabelů je ohrožen ztrátou výkonu signálu. Signál se v případě použití bezkabelové optiky přenáší volným prostorem, kde nejvíce kvalitu přenosu ovlivňují vlastnosti reálné atmosféry. Vliv atmosféry na OBS je nové odvětví a není toho moc známo okolo této problematiky, ale výzkum začíná probíhat po celém světě.

Úkole této diplomové práce je:

Vypočítání hodnoty vytipovaných parametrů z časové řady 3D dat vektoru rychlosti větru, u kterých jsou předpoklady, že jsou korelovány s útlumem optického bezkabelového spoje a tudíž i fluktuacemi indexu lomu nehomogenní atmosféry. Závislost ověřit kvantitativně (např. přes korelační koeficient) s využitím záznamů útlumu na experimentálních optických bezkabelových trasách. Zjistit vliv integračního času na výsledky a souvislost se strukturním indexem atmosféry.

## 2. Optický bezkabelový spoj (OBS)

OBS je moderní technologie využívající laserový paprsek k přenosu dat volným prostorem. Tato technologie využívá velkého potenciálu světla, a fyzikální zákony, díky kterým dosahují vysokým rychlostí, které odpovídají rychlostem vláknové optiky, ovšem bez nutnosti použití optického kabelu pro přenášení data. 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 už dnes se pracuje na spojích, které překročí rychlost 10 Gbit/s díky *vlnovému multiplexu*, což je optická obdoba rádiového kmitočtového multiplexu.

Optický bezkabelový spoj (OBS) využívá úzkého paprsku světla pro přenášení data atmosférou. Soustavu tvoří *vysílač (transmitter)* a *přijímač (receiver)*. Ve vysílači může být použit laser, laserová dioda (LD) nebo infračervená elektroluminiscenční dioda (IRED).

Když zařízení se skládá z obou prvků zároveň, označuje se *transceiver*.

Pro přenos se používá úzkého optického svazku (paprsku), na němž jsou namodulována data. Přijímač pomocí optoelektronického (nejčastěji bývá fotodioda) prvku data přijímá. Vysílač i přijímač obsahují čočky, které procházející paprsek usměrní a zvýší zisk.

OBS pracuje v simplexním provozu, přenos dat probíhá jen v jednom směru nebo v duplexním provozu přenos probíhá oběma směry. Zde jsou nutný transceivery na obou koncích spoje.

Využívají se pásma 850nm, 1060nm nebo 1550nm, avšak experimentuje se i na jiných vlnových délkách. Zpravidla se jedná o přenos informace v digitální duplexní podobě. OBS mají výbornou směrovost jejich divergence (rozptyl) svazku se pohybuje v řádu miliradiánů. Tzn. OBS s divergencí 5 mrad se ve vzdálenosti 100 m rozprostře do kruhu o průměru 50 cm.

Optický spoj pracuje v oblasti infračerveném spektru na vlnových délkách 700 - 1600 nm, a proto je neviditelný. Z tohoto důvodu se stává nebezpečný, v případě zasáhnutí oka může dojít k dočasnému nebo i k trvalému následku oslepnutí.

Tabulka 1 - vlnová délka světla

Oblast záření	Pásmo	Vlnová délka	Kmitočet [THz]
Ultrafialové	1	100-280 nm	2998-1071
	2	208-315 nm	1071-952
	3	315-380 nm	952-789
Viditelné světlo	4	380-780 nm	789-384
Infračervené	5	780-1430 nm	384-214
	6	1,4-3 $\mu\text{m}$	214-100
	7	3 $\mu\text{m}$ -1mm	100-0,3

OBS se používá tam, kde by bylo nasazení klasického optického kabelu, ať už z finančních nebo topologických důvodů, nemožné. V poslední době i pro jednodušší instalaci, protože spolehlivá vzdálenost se s vývojem technologie zvětšuje.

## 2.1 Vlastnosti OBS

### 2.1.1 Výhody OBS

- Nelicencované – není potřeba povolení k provozování, zdarma
- Má velice tenký svazek paprsku světla (řádově miliradiány) díky tomu je obtížné, aby byl rušen nebo odposloucháván. Odposlech by musel být přímo v dráze paprsku a to se dá dobře poznat.
- Díky úzkému svazku světla má výborné vlastnosti z hlediska EMC neruší se ani blízko sebe dva spoje
- Pracují v rozsahu optických vlnových délek a nedochází ke znečišťování životního prostředí vyzařováním elektromagnetické energie na radiových frekvencích
- Potenciál OBS z hlediska šířky pásma přenosu odpovídá možnostem vláknové optiky a proto se dají lehce připojit ke kabelové optické síti.
- Mohou pracovat v režimu jednofotonového přenosu technikou distribuce kvantových stavů fotonů umožňující aplikaci optické kvantové kryptografie s vysoce zabezpečeným přenosem utajovaných zpráv.
- Přenosové rychlosti se pohybují v rozmezí 1,5Mbps až 2,5Gbp

### 2.1.2 Nevýhody OBS

- Nevhodné pro větší vzdálenosti - použití jen do jednotek kilometrů, technologie se však vyvíjí a je možnost přenést data na větší vzdálenost pomocí kaskádního řazení spojů.
- Přímá viditelnost vysílače a přijímače musí na sebe stále vidět. Jedná se o krátkodobý výpadek. Když se detekuje přerušení a opět se odešlou data, která se ztratila.
- Náročnost na instalaci přesná instalace vysílače přijímače
- Menší spolehlivost OBS z důvodu ovlivňováním atmosférickými vlivy. To je také důvod pro to, aby spoje, kde dochází k přenosu důležitých dat, byly zálohovány paralelním radiovým spojením, který je aktivován při výpadku OBS. Protože účinky atmosféry na radiový spoj a na OBS jsou rozdílné. U OBS je velkým problémem mlha a nízká oblačnost a na radiové spoje má vliv silný déšť, kroupy s deštěm, husté sněžení. Z tohoto důvodu se používá zálohování OBS radiovým spojením.

Tyto nevhodné jevy ovlivňují spoj dvěma způsoby:

- Defekt paprsku průchodem atmosférou
- Rozkmitání vysílače / přijímače

Laserové paprsky jsou nebezpečné pro lidské oko. Aby nedošlo k poškození oka, je výkon jednotlivých vysílacích prvků omezen na maximální vysílací výkon (řádově mW).

Oproti rádiovým spojům nejsou optické spoje vhodné na velké vzdálenosti. Měrný útlum  $\alpha_0$  je na optických kmitočtech větší než na rádiových a kombinace s nuceným nízkým vysílacím výkonem omezuje vzdálenost spolehlivého přenosu na jednotky km (výjimečně i desítky dB). Obecně u optických spojů platí, že čím menší vzdálenost, tím větší dostupnost. Velký vliv na útlum spoje má aktuální stav počasí. Zatímco rádiovým spojům nejvíce vadí hustý déšť, déšť s kroupami, déšť se sněhem a sněžení, u optických spojů způsobuje největší útlum mlha a nízká oblačnost. Rozbor vlivu mlhy na útlum optického spoje je hlavní téma této práce.

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

Důležité je především přizpůsobit délku spoje místním atmosférickým podmínkám. Pokud hrozí časté a husté mlhy, neměla by být dráha spoje delší než několik set metrů. Zvýšení dostupnosti komunikace je úměrné finančním prostředkům k tomuto účelu vynaložených. Je několik možností, jak zvýšit dostupnost. [12]

### **2.3 Účinky atmosféry na OBS:**

Při přímé dohlednosti má na OBS největší vliv počasí. Spoje na vzdálenosti v rozsahu stovek metrů jsou ovlivňovány velkými změnami podmínek větrem, mlhou a nízkou oblačností. Spoje delší než kilometr navíc ovlivňuje méně viditelné změny prudký déšť a sníh. Jejich použitelnost závisí na výkonové bilanci a statistických parametrech atmosféry v místě instalace spoje.

Tyto přírodní úkazy mají na OBS dva účinky - útlum a rozptyl.



**Útlum** se projevuje pohlcení části energie při průchodu částicemi např. mlhy, deště. **Rozptyl** se projevuje průchodem různými prostředími. Paprsek se při přechodu z jednoho prostředí do druhého odkloní, a tak nedopadne celou svojí částí do přijímače. Toto popisuje **Snellův zákon (Obr.č.1)**: „Uvažujme dvě různá prostředí, jejichž rozhraní je rovinné. Jsou-li indexy lomu těchto dvou prostředí  $n_1$  resp.  $n_2$ , a označíme-li úhly dopadajícího resp. lomeného svazku  $\alpha_1$  resp.  $\alpha_2$  (měřeno ke kolmici rozhraní), pak podle Snellova zákona platí:

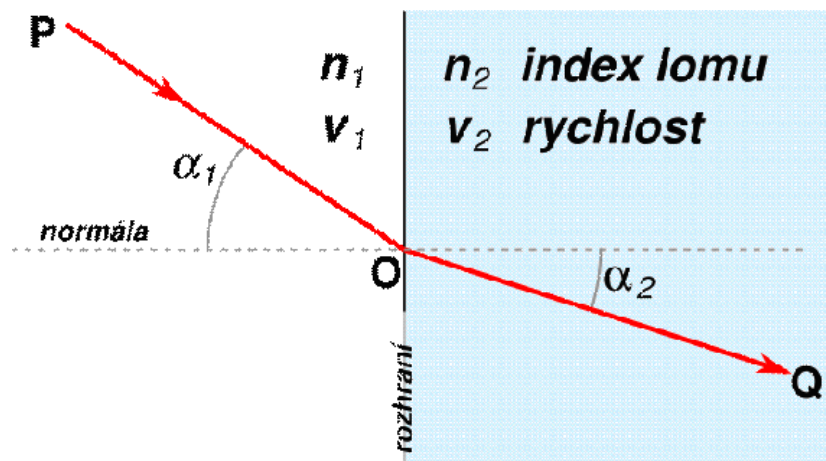
$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (2.3.1)$$

nebo také v jiném tvaru ( $v_1$  a  $v_2$  jsou rychlosti šíření vlnění v daném prostředí):

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3.2)$$

Úhly se vždy měří od normály, tj. při kolmém dopadu je  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ . Paprsky se šíří vždy přímočaře.“

[9]



Obr.č.1 Snellův zákon

## Změna indexu lomu

„Pro šíření optické vlny je známý index refrakce  $n$  je v atmosféře velice důležitý, je velice citlivý na změny teploty buněk malých rozměrů. Jednotlivé teplotní změny kombinované s turbulentním pohybem přimějí atmosférický index k refrakci. Index lomu je matematicky popsán v bodě prostoru a čase  $t$

$$n(\mathbf{R},t) = n_0 + n_1(\mathbf{R},t), \quad (2.3.3)$$

kde  $n_0 = [n(\mathbf{R},t)] \approx 1$  je střední hodnota indexu lomu a  $n_1(\mathbf{R},t)$  je náhodnou odchylku od  $n(\mathbf{R},t)$

Časové změny v indexu lomu jsou v šíření optických vln často potlačeny. To způsobí, že vlna zachovává při svém šíření stálou frekvenci.

$$n(\mathbf{R}) = 1 + n_1(\mathbf{R}), \quad (2.3.4)$$

kde  $n(\mathbf{R})$  je normalizovaná střední hodnota  $n_0$ . [2]

Změna indexu lomu je příbuzná odpovídajícím změnám teploty a tlaku. Index lomu v atmosféře můžeme popsat pro optické a IČ (infračervené) vlnové délky následovně

$$n(\bar{R}) = 1 + 77,6 \cdot 10^{-6} (1 + 7,52 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P(\bar{R})}{T(\bar{R})} \quad (2.3.5)$$

kde  $\lambda$  je optická vlnová délka v  $\mu\text{m}$ ,  $P$  je tlak v milibarech a  $T$  je teplota v kelvinech. [2]

Jelikož je změna tlaku obvykle zanedbatelná, můžeme vidět refrakční index fluktuací v souvislosti s viditelným a blízkým IR spektrálním oblastem jsou způsobeny skrze nahodilé fluktuace v teplotě. Změny optického signálu způsobeny absorpcí či rozptýlením na molekulách a aerosolech zde nejsou uvažovány. [2]

Popis náhodných turbulentních polí, změny indexu lomu v atmosféře: v inerčních suboblastech existují spojeny vnější rozměry  $L_0$  a níže ležící vnitřní rozměry  $l_0$ . Pokud vystavujeme pole změně rychlosti uvnitř inerčního dílčího rozsahu, k vlastnostem statistické homogenity a isotropie pole zdědí i změnu indexu lomu uvnitř odpovídající sub-oblasti. [2]

Proto  $[n_1(\mathbf{R})] = 0$ , kovariační funkci  $(B_n)$   $n(\mathbf{R})$  můžeme vyjádřit následovně

$$B_n(R_1, R_2) = B_n(R_1, R_1 + R) = [n_1(R_1)n_1(R_1 + R)] \quad (2.3.6)$$

což je náhodné pole změn indexu lomu, které je statisticky homogenní a je funkcí  $R = R_1 - R_2$ .

Pokud je náhodné pole statisticky homogenní a isotropní, kovarianční funkce podporuje redukci na pouhou skalární vzdálenost  $R = |R_1 - R_2|$ . Pro statisticky homogenní a isotropní turbulenci platí vztah strukturní funkce indexu lomu

$$D_n(R) = 2[B_n(0) - B_n(R)] = C_n^2 R^{2/3}, l_0 \ll R \ll L_0 \quad (2.3.7)$$

kde  $C_n^2$  je strukturní parametr indexu lomu a  $R$  je polohový vektor, který leží uvnitř inerciálního intervalu a určuje vnitřní rozměr turbulence.

Parametr indexu lomu  $C_n^2$  určuje míru změn indexu lomu. Chování  $C_n^2$  jako bodu podél cesty šíření můžeme předpovídat z teplotní struktury získané měřením teplotních rozdílů dvěma přesnými teploměry. V zařízení je strukturní parametr indexu lomu  $C_n^2$  vypočítán pomocí rovnice (5.3, 5.4) a hodnota  $C_n^2$  je vypočítána pomocí tohoto vztahu

$$C_n^2 = (79 \cdot 10^{-6} \frac{P}{T^2})^2 C_T^2. \quad (2.3.8)$$

Zprůměrované hodnoty  $C_n^2$  a vnitřní rozměry  $l_0$  můžeme získat soudobým optickým měřením (přes cesty dlouhé typicky 150m) užitím zařízení nazývajícím se SCINTILOMETR.“ [2]

Míra turbulence  $C_n^2$  [ $m^{-2/3}$ ]: slabá... ..... 10-16  
 střední ..... 10-15  
 silná ... ..... 10-14  
 velmi silná ... 10-13

## 2.4 Výkonové úrovně na OBS

Model optického bezdrátového spoje se skládá ze dvou částí [2]:

- stacionárního modelu - zisku vysílače - přijímače
- statistický model – aktuální atmosférické podmínky přenosového kanálu v místě instalace

### 2.4.1 Stacionární model spoje:

je vyjádřen rovnicí:

$$P_{m,RXA} = P_{m,TXA} - \alpha_{cel} + \gamma_{prij} [dB] \quad (2.4.1)$$

kde

- $P_{m,RXA}$  ..... střední hodnota přijatého výkonu
- $P_{m,TXA}$  ..... střední hodnota vysílaného výkonu
- $\alpha_{cel}$  ..... celkový útlum prostředím mezi vysílačem a přijímačem
- $\gamma_{prij}$  ..... je celkový zisk přijímače

Celkový útlum prostředí se skládá z mnoha dílčích útlumů. Základní rozdělení je útlum šířením volným prostorem  $\alpha_{12}$  a na útlum způsobený atmosférickými jevy  $\alpha_{atm}$ .

$$\alpha_{cel} = \alpha_{12} + \alpha_{atm} [dB] \quad (2.4.2)$$

Útlum  $\alpha_{12}$  je dán šířením optické vlny a prakticky závisí jen na vzdálenosti  $L_{12}$  vysílače a přijímače. Je proto pro daný spoj konstantní.

Útlum  $\alpha_{atm}$  je závislý na stavu atmosféry (mlha, déšť, sněžení, turbulence, apod.) a samozřejmě též na  $L_{12}$ . Je tedy proměnný v čase.

$$\alpha_{atm} = \alpha_{atmk} + \alpha_{atmn} [dB] \quad (2.4.3)$$

- $\alpha_{atmk}$  ..... útlum způsobený konstantními atmosférickými jevy
- $\alpha_{atmn}$  ..... útlum způsobený náhodnými atmosférickými jevy

Jestliže budeme uvažovat o neměnné homogenní atmosféře, je možné vyjádřit útlum atmosférickými částicemi jako funkci vzdálenosti:

$$\alpha_{part} = \alpha_{1,part} L_{12} [dB], \quad (2.4.4)$$

kde

- $\alpha_{1,part}$  je měrný útlum způsobený částicemi v dB/km
- $L_{12}$  je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem

Zisk přijímače  $\gamma_{cel}$ :

$$\gamma_{cel} = \gamma_{RXA} + \gamma_{add} = \left| 20 \log \frac{D_{RXA}}{D_{TXA}} \right| + \gamma_{add} [dB] \quad (2.4.5)$$

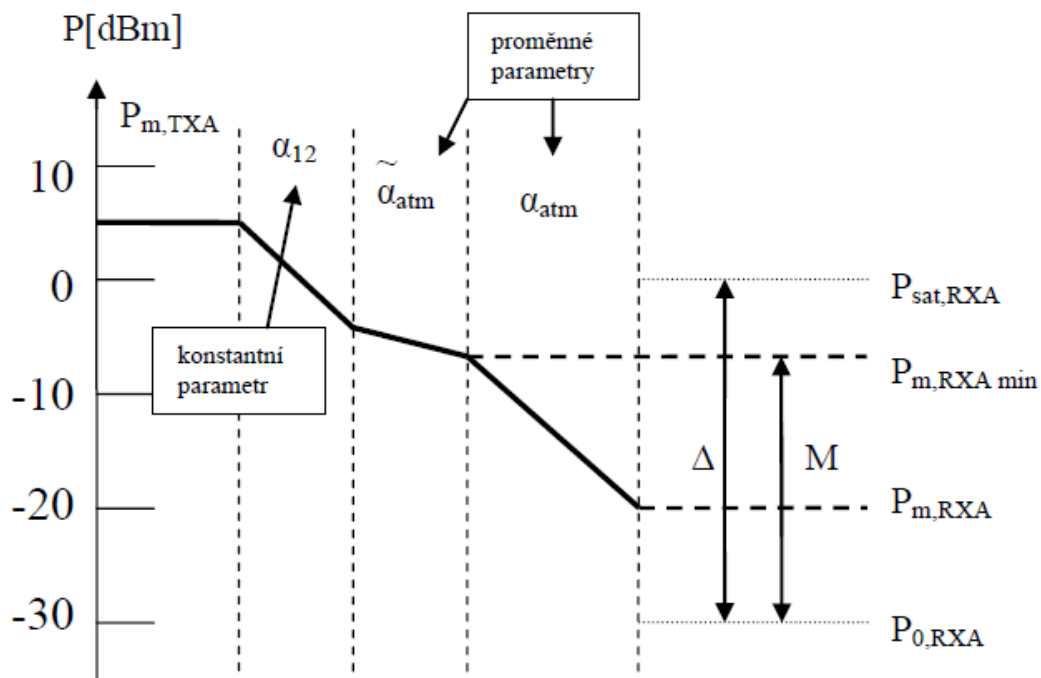
$\gamma_{RXA}$  geometrický zisk

$\gamma_{add}$  přídatný zisk je dán rozdílným rozložením optické intenzity na přijímací a vysílací straně.

$D_{RXA}$  průměrů hledí (apertur) na přijímací straně

$D_{TXA}$  průměrů hledí (apertur) na vysílací straně

## Výkonové úrovně optického spoje:



Obr. č. 2 Výkonové úrovně optického stroje

$P_{m,TXA}$  hodnota vyslaného výkonu pro ideální čistou atmosféru.

$P_{m,RXA}$  hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru.

$\tilde{P}_{m,RXA}$  střední hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru

$P_{sat,RXA}$  saturační práh přijímače

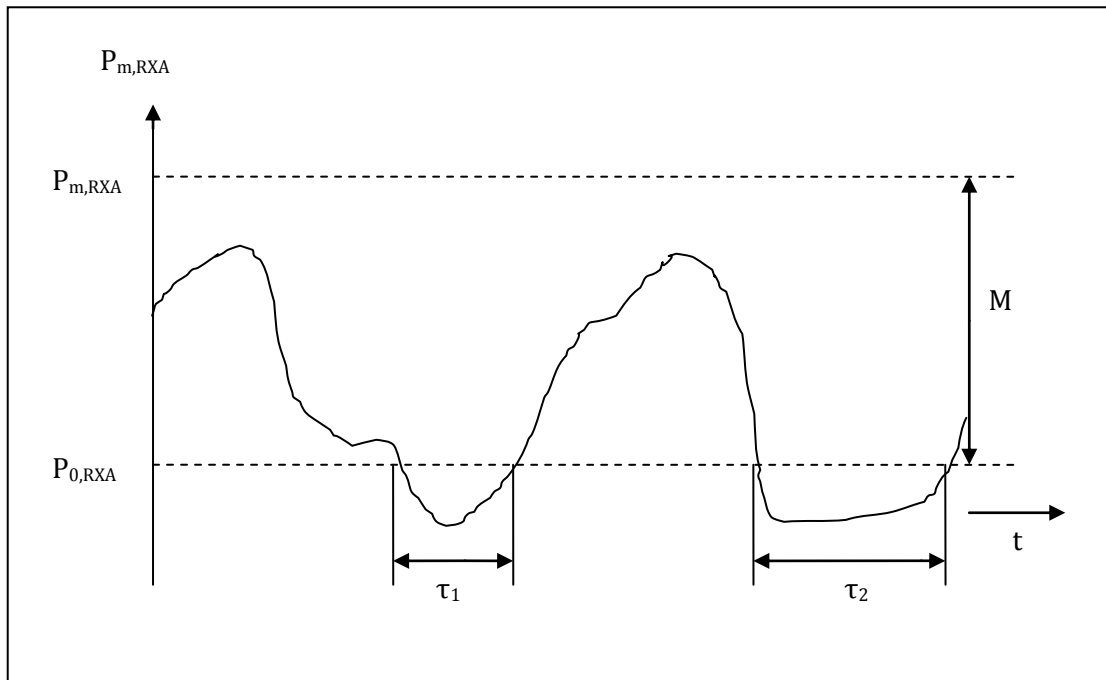
$P_{0,RXA}$  citlivostní práh přijímače

Rozdíl  $P_{sat,RXA}$  a  $P_{0,RXA}$  se nazývá **dynamický rozsah přijímače  $\Delta$** .

Rozdíl mezi  $\tilde{P}_{m,RXA}$  přijatým výkonem pro ideální čistou atmosféru a  $P_{0,RXA}$  prahem citlivosti přijímače je tzv. **linková rezerva M**.

### 2.4.2. Statický model

V tomto modelu se řeší útlumy spojené s počasím. Na optický spoj mají vliv mlhy, deště, sněh, větrné turbulence atd. Součet těchto útlumů označujeme  $\alpha_{atmn}$ . Jestliže tento útlum přesáhne linkovou rezervu spoje  $M$ , nastává výpadek spojení, protože přijatý výkon spadne pod hranici citlivostního prahu přijímače. Z obrázku č.3 je patrné, že při čase  $\tau_1$  a  $\tau_2$  je výpadek spojení.



Obr. č. 3 Statistický model.

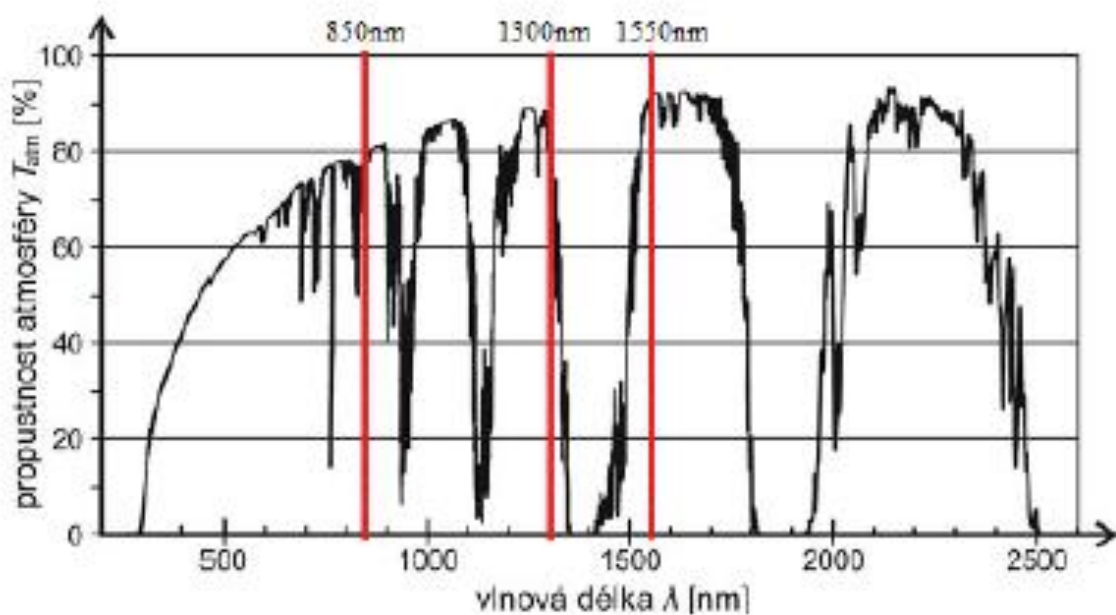
Spolehlivost spoje je definována výrazem:

$$P_{av} = \frac{T - T_{un}}{T} = \frac{T - \sum \tau_i}{T} * 100[\%] \quad (2.4.6.)$$

kde  $\tau_i$  jsou časové úseky jednotlivých výpadků zaznamenané během dostatečně dlouhé periody.  $T$  je perioda průběhu.

### 2.4.3 Útlum průchodem „čistou“ atmosférou

Pojem „čistá“ atmosféra právem patří do uvozovek, jedná se totiž o stav, kdy není snížená dohlednost, čili je jasno. Vzduch ale není nikdy čistý doslova - obsahuje různé plyny, poletují v něm pevné částice, hmyz a má i svojí vlhkost, tedy obsahuje nějaké minimální množství vodních částic. To vše způsobí optickému signálu mírný útlum. Tento útlum se mění v závislosti na aktuálních podmínkách a to jak krátkodobě v rámci několika minut, kdy se mění útlum o desetiny dB, tak dlouhodobě v řádu týdnů, kdy se mění průměrná úroveň útlumu až o jednotky dB. Na následujícím grafu je vykreslena propustnost atmosféry v závislosti na vlnové délce optického paprsku. [19]



Obrázek 3a - Propustnost atmosféry

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

-850nm

- 1300nm

- 1550nm



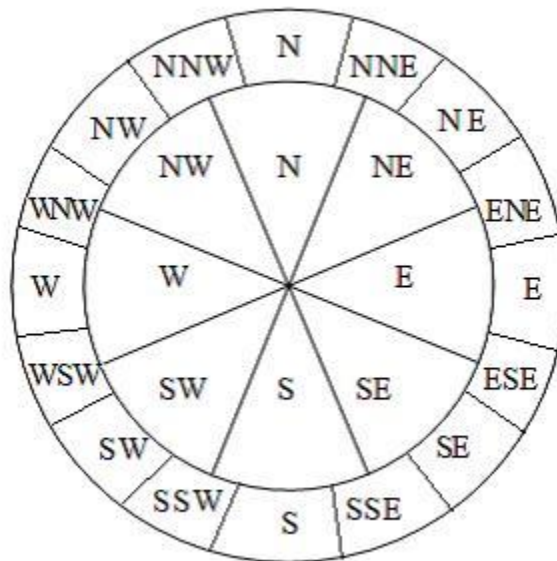
### 3. Teorie atmosféry

#### Vítr

„Vítr je pohyb částic vzduchu vzhledem k zemskému povrchu v daném časovém okamžiku. Částicemi rozumíme tak velký soubor molekul, který lze považovat za homogenní objem vzduchu. Vítr v libovolném bodě pozorování lze charakterizovat: směrem větru (odkud vane), rychlostí větru a nárazovostí větru (okamžitá odchylka rychlosti větru o 5 a více m/s).“ [5, s. 3]

#### Směr větru

Směr větru se nejčastěji vyjadřuje větrnou kružnicí, která může být 36-, 32-, 16-, 12-, nebo 8-dílnou směrovou růžicí. Směry se často označují začátečními písmeny anglických názvů. N-north (sever), E-east (východ), S-south (jih), W-west(západ). Jejich kombinace se označují mezisměry (Obr. č.9).



Obr. č.9: Větrná růžice

Měření ukazují, že jak rychlost, tak i směr větru prodělávají rychlé neperiodické změny, zvláště pak v přízemní vrstvě atmosféry. Tyto změny jsou způsobeny vznikem, přemístěním a zánikem složek všeobecné cirkulace atmosféry a dále jsou vyvolány turbulentním charakteristikem proudění. V reálné atmosféře má proudění převážně turbulentní charakter. Pro takové proudění jsou typické turbulentní pulzace rychlosti větru.

### 3.1 Charakteristika turbulentního proudění

Proudění podléhající náhodným fluktuacím, které lze poněkud zjednodušeně představit v podobě chaoticky se pohybujících vírů různých velikostí, nazýváme turbulentní. Jestliže do proudící tekutiny přimísíme vhodné barvivo, jež nám umožní zviditelnit proudnice, potom tyto mají v případě turbulentního proudění zcela nepravidelný tvar rychle se měnící v čase a nelze je prakticky sledovat na větší vzdálenosti. Turbulentní proudění tímto způsobem kontrastuje s prouděním laminárním, při němž jsou proudnice v pohybující se tekutině hladké, stabilní a můžeme je sledovat do značných vzdáleností od místa, kde jsme k tekutině přidali barvivo.

Z teoretických závěrů i z praktické zkušenosti vyplývá, že proudění se stává turbulentní, jestliže setrvačné síly v proudící tekutině nebo proudnici tekutiny jsou dostatečně velké ve srovnání se silami vazkého tření, tzn. **Reynoldsovo číslo  $Re$** . [1, s. 71]

Reynoldsovo číslo je číslo, které dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu (tedy odpor prostředí v důsledku vnitřního tření). Pomocí toho čísla je možné určit, zda je proudění tekutiny laminární anebo turbulentní. Čím je  $Re$  číslo vyšší, tím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor.

$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad (3.1)$$

$d$  ... označuje průměr trubice

$v_s$  ... je střední hodnota proudění kapaliny v daném průřezu

$\nu$  ... je kinematická viskozita

Pro velké hodnoty  $Re$  je proudění turbulentní, pro nízké hodnoty je proudění laminární. Při  $Re \rightarrow \infty$  je proudění potenciálové.

### 3.2 Vliv turbulencí

„Na degradaci a zhoršení optického svazku působí míšení vzdušných mas s rozličnými indexy lomu. Výsledkem je cestování svazku a zkreslení vlnoplochy, tj. mihotání neboli scintilace. Velikost buněk (vzdušných vírů) jimiž optický svazek prochází, má značný vliv na interakci svazku po průchodu buňkou.

Pokud je velikost buňky menší než poloměr laserového svazku, bude svazek odkloněn do různých směrů a bude sledována neuniformní optická intenzita napříč vlnoplochou, tj. intenzitní rozptyl svazku.

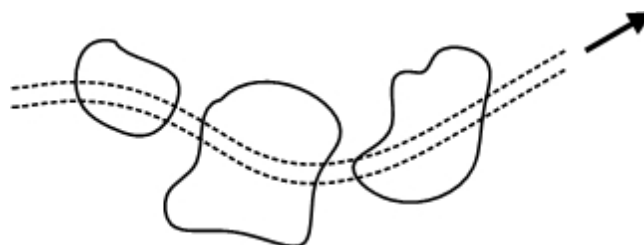
Pokud je velikost buňky srovnatelná s poloměrem laserového svazku, nemění se jeho směr šíření, pouze způsobí zvětšení úhlu divergence.

Pokud je velikost buňky větší než poloměr laserového svazku, dochází k ohybu a náhodnému cestování svazku (Obr.11). Možnost úplného přerušení optického bezkabelového spoje. [13]

Kombinování efektu scintilace a svazkového cestování vede k fluktuaci celkové stability signálu. Ze známých zkušeností se svazek v nehomogenním prostoru stejně jako cesta, kterou putuje, se chová náhodně (v každém čase  $t$ , má svazek jinou trajektorii).



Obr. 4 Trajektorie svazku v čase  $t_n$

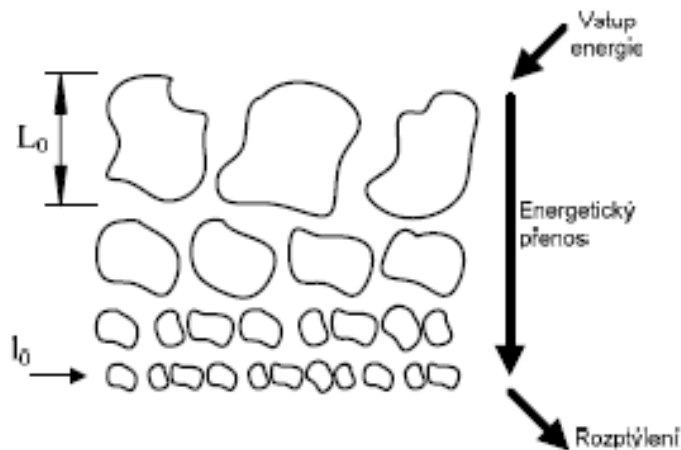


Obr. 5 Cestování svazku

Efekt scintilace je příčinou kolísání optické intenzity přijímaného signálu v ohniskové rovině přijímače. Rozložení přijímané optické intenzity v rovině přijímače je rovno log normálnímu rozložení. “[13]

### 3.3 Rychlost změn

„Klasická teorie turbulence podle Kolmogorova bere v úvahu náhodné změny ve velikosti a směru masy v kapalině. Tato teorie byla prezentována jako hypotéza, která je založená hlavně na fyzikálním pohledu. Pro dostatečně velké Reynoldsovo číslo je to předpoklad toho, že struktura malých rozměrů je určena kinematickou viskozitou  $\nu$  a průměrnou rychlostí rozptýlení  $\varepsilon$  ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ) turbulentní energie masou proudění.



Obr. 6 Teorie energetické kaskády

Za zdroj energie je považován z větší váhy buď stříh větru, nebo konvekce. Podle kaskádní teorie roste rychlost větru do té míry, než dosáhne Reynoldsovo číslo kritické hodnoty. Tato akce vyvolá lokální nestabilitu vzdušné masy a vzniknou vzdušné víry, které jsou mnohem menší než jejich „mateřský“ tok. Tyto víry se formují do makrocely o velikosti  $L_0$  (nazývaných vnější rozměr turbulence) a mikrocely  $l_0$  (nazývaných vnitřní rozměr turbulence). Tyto buňky jsou nezávislé na svém „mateřské“ toku.“ [14]

### 3.4 Teplotní změny

„Základní myšlenky a charakter turbulencí byly v historii rozvinuty ve vztahu ke změnám rychlosti. Avšak základní myšlenkou Kolmogorova ohledně rychlosti změn byla aplikace pasivních skalárů nebo-li potenciálů teploty (příbuzné absolutní teplotě při adiabatickém ději).

Teplotní změny považujeme za pasivní, neboť nepůsobí změny energie v rychlosti turbulence.

Kolmogorova teorie struktury - statisticky homogenní a izotropní teplotní změna, vedená stejným vztahem silového zákona jako u podélné změny rychlosti.

Pro teplotní strukturní funkci platí vztah

$$D_T(R) = \langle (T_1 - T_2)^2 \rangle = C_T^2 R^{2/3}, l_0 \ll R \ll L_0 \quad 3.2$$

kde  $T_1, T_2$  označuje teploty ve dvou bodech od sebe vzdálených vzdáleností  $R$  a  $C_T^2$  značí strukturní teplotní konstantu ( $\text{deg}^2/\text{m}^2/3$ ).“[14]

### 3.5 Zdroje turbulence v atmosféře, mechanická a termická turbulence, uspořádaná konvence

„Příčiny vzniku turbulence v atmosféře jsou jak mechanické, tak i termické povahy. Tzv. **mechanické turbulence** je v mezní vrstvě produkována třením proudícího vzduchu o zemský povrch, které vytváří vertikální gradient velikosti rychlosti proudění. Tento gradient je v interakci s polem fluktuací rychlosti proudění i teploty vzduchu a projevuje se neturbulentním přenosem hybnosti od výše ležících a rychleji se pohybujících vrstev vzduchu směrem dolů. Případné instabilní teplotní vrstvení má rovněž za následek vznik a rozvoj turbulentních vírů a představuje tak termický mechanismus produkující turbulenci. Stabilní teplotní zvrstvení naproti tomu tlumí rozvoj neuspořádaných turbulentních pohybů a lze ho tedy považovat za negativní zdroj turbulence.“ [1, s. 73]

### 3.6 Vliv terénu na deformaci proudění

Při proudění vzduchu přes vertikálně členitý terén dochází k obtékání a přetékání vzduchu kolem a přes jednotlivé terénní tvary. Tímto vznikají procesy s kladnou a zápornou akcelerací. Důležitou úlohu při těchto procesech hraje vertikální teplotní gradient. Například, když vezmeme izolovanou horu s kruhovým půdorysem. Je dokázáno:

- Zvýšení rychlosti větru na vrcholu hory činí 80%, porovnáno s neovlivněným profilem rychlosti větru před horou.
- Zmenšení rychlosti větru před a za horou (větrný stín hory) činí 20 až 40% porovnáno s neovlivněným profilem rychlosti větru před horou. [5]

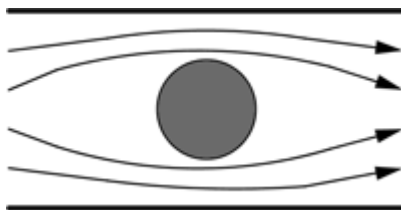
### 3.7 Vliv překážek na proudění

Překážky typu budova, strom, keř apod. způsobují, že natékající proudění směrem větru, se mění jeho rychlost a vzniká zóna turbulence.

Setká-li nenatékající proudění s překážkou, pak zčásti ji obtéká, zčásti přetéká, a jeli možno zčásti, proudí skrz překážku.

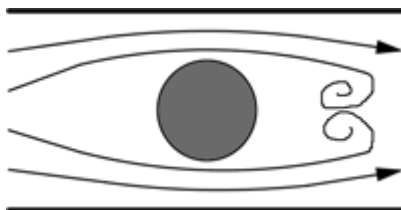
Máme - li izolovanou překážku např. stěnu o výšce  $H$ , pak při natékání překážka vzduch vytlačuje nahoru. Při tom se před překážkou vytvoří relativně malá turbulentní zóna. Ze zhuštění proudnic dojde k tomu, že se vzduchové částice nad překážkou zrychlují. Na závětrné straně překážky se postupně spojují složky přetékájícího a obtékajícího vzduchu a tvoří se turbulentní zóna. Tato zóna je dlouhá okolo pětinasobku výšky překážky. Čím více je překážka propustnější tím turbulentní zóny se zmenšují. [5]

„**Laminární proudění** (Obr. č.7) nastane, v případě, že jsou proudnice rovnoběžné a nemísí se. Částice se pohybují vedle sebe jakoby ve vrstvách - „destičkách“ (destička = lat. lamina), které se vzájemně nepromíchávají.“ [10]



Obr. 7 Laminární proudění

**Turbulentní proudění** (Obr. č. 8) je takové proudění, při kterém se proudnice navzájem *promíchávají*. Částice vykonávají při proudění kromě posouvání i *složitý* vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. Rychlosti jednotlivých částic kapaliny se nepravidelně mění.



Obr. 8 Turbulentní proudění

„**Potenciálové proudění** je takové proudění, kdy lze rychlostní pole kapaliny vyjádřit jako gradient určitého skalárního pole. Bývá označováno jako nevířivé proudění (nedochází ke vzniku vírů).“ [11]

„Skutečné proudění v atmosféře má zpravidla velmi nepravidelnou, statisticky náhodnou strukturu. Okamžité hodnoty jeho rychlosti se v každém bodě rychle mění s časem a časové peptidy nejkratších z těchto změn řádově odpovídají  $10^{-1} - 10^{-2}$  s, popřípadě i méně. Abychom mohli takto fluktuací rychlosti proudění vhodně vyjádřit, budeme předpokládat, že skutečná okamžitá rychlost proudění  $v$  je dána součtem střední rychlosti  $\bar{v}$  za určitých v hodně zvolený časový interval a turbulentní složky  $v'$  se složitým, často **negaussovským rozložením fluktuací**, která se překládá přes základní proudění a je důsledkem existence chaotického se pohybujících turbulentních vírů různých měřítek:

$$v = \bar{v} + v' \quad (3.3)$$

nebo ve složkách:

$$v_x = \bar{v}_x + v'_x \quad (3.4)$$

$$v_y = \bar{v}_y + v'_y \quad (3.5)$$

$$v_z = \bar{v}_z + v'_z \quad (3.6)$$

Střední rychlost proudění je dána vztahem:

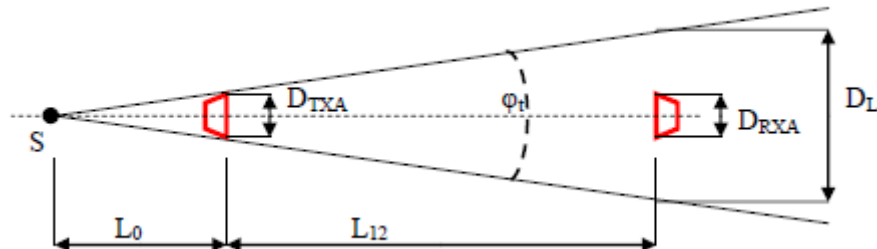
$$\bar{v}(x, y, z) = \frac{1}{t^*} \int_{t^* - \frac{t^*}{2}}^{t^* + \frac{t^*}{2}} v(x, y, z) dt \quad (3.7)$$

a představujeme tak průměrnou rychlost proudění v daném bodě za vhodně zvolený časový interval délky  $t^*$ . Tento interval musí být dostatečně dlouhý, abychom získali reprezentativní hodnotu, která se nemění moc rychle s časem, ale na druhou stranu nesmí být  $t^*$  na tolik velké, aby došlo k vyhlazení významných časových změn střední hodnoty rychlosti proudění.“ [1, s. 72]

### 3.8 Konstantní útlum OBS vlivem ředění výkonu ve svazku

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

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



Obr. 9 Útlum vlivem ředění výkonu

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

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

$\phi_t$  je divergence svazku

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

$D_L$  je průměr paprsku ve vzdálenosti  $L_{12}$

### 3.9 Atmosférické turbulence

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

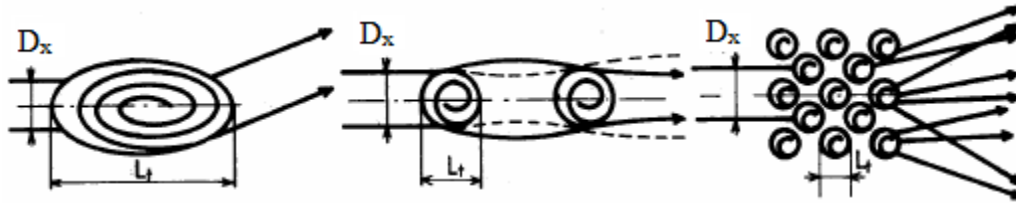
Způsob interakce závisí na velikosti turbulentní poruchy  $L_t$  vzhledem k šířce paprsku  $D_x$  ve vzdálenosti  $x$ . Mohou nastat 3 situace :

$D_x \ll L_t$  – turbulentní porucha se chová jako objekt, ve kterém se paprsek láme a odklání se jiným směrem. Pokud není použit *Autotracking*, může dojít k přerušení komunikace (viz kap. Vlastnosti optických spojů).

$D_x \sim L_t$  – turbulence se chová jako čočka, která změní divergenci svazku, nikoliv jeho směr. Nemívá na přenos zásadní důsledky.



$D_x \gg L_t$  – větší množství menších turbulentních poruch způsobí rozptyl paprsku různými směry.  
Dochází k velkému útlumu. “ [15]



Obr. 10 Atmosférické turbulence

## Útlum atmosférickými částicemi

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

$$\alpha_{atm} = \alpha_0 L_{12} [dB], \quad (3.8)$$

kde

- $\alpha_0$  je měrný útlum způsobený částicemi v dB/km
- $L_{12}$  je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem

### *Měrný útlum*

Měrný útlum  $\alpha_0$  způsobuje několik aspektů.

- útlum absorpcí v částicích
- útlum rozptylem na částicích

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

### *Útlum absorpcí v částicích*

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

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

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

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

## 4. Korelace

„Znamená vzájemný vztah mezi dvěma procesy nebo veličinami. Pokud se jedna z nich mění, mění se **korelativně** i druhá a naopak. Pokud se mezi dvěma procesy ukáže korelace, je pravděpodobné, že na sobě závisejí, nelze z toho však ještě usoudit, že by jeden z nich musel být příčinou a druhý následkem. To samotná korelace nedovoluje rozhodnout.

V určitějším slova smyslu se pojem korelace užívá ve statistice, kde znamená vzájemný lineární vztah mezi znaky či veličinami  $x$  a  $y$ . Míru korelace pak vyjadřuje korelační koeficient, který může nabývat hodnot od  $-1$  až po  $+1$ .

Vztah mezi znaky či veličinami  $x$  a  $y$  může být kladný, pokud (přibližně) platí  $y = kx$ , nebo záporný ( $y = -kx$ ). Hodnota korelačního koeficientu  $-1$  značí zcela nepřímou závislost (antikorelaci), tedy čím více se zvětší hodnoty v první skupině znaků, tím více se zmenší hodnoty v druhé skupině znaků, např. vztah mezi uplynulým a zbývajícím časem. Hodnota korelačního koeficientu  $+1$  značí zcela přímou závislost, např. vztah mezi rychlostí bicyklu a frekvencí otáček kola bicyklu. Pokud je korelační koeficient roven  $0$  (nekorelovanost), pak mezi znaky není žádná statisticky zjištělná lineární závislost. Je dobré si uvědomit, že i při nulovém korelačním koeficientu na sobě veličiny mohou záviset, pouze tento vztah nelze vyjádřit lineární funkcí, a to ani přibližně.

### Vzorec Pearsonova korelačního koeficient

Pearsonův korelační koeficient je definován, pokud jsou druhé momenty náhodných veličin  $X$  a  $Y$   $E(X^2)$ ,  $E(Y^2)$  konečné. Je založen na myšlence, že kovarianci převádíme na bezrozměrné číslo, že ji podělíme směrodatnými odchylkami obou proměnných:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E((X - \mu_X)(Y - \mu_Y))}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (4.1)$$

$$\text{Protože } \mu_X = E(X), \sigma_X^2 = E(X^2) - E^2(X) \quad (4.2)$$

a obdobně pro  $Y$ , lze výše uvedený vzorec upravit do přehlednějšího výpočetního tvaru:

$$\rho_{X,Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)} \sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}} \quad (4.3)$$

Koeficient korelace nabývá hodnot z intervalu  $\langle -1, 1 \rangle$ . Při nezávislosti veličin  $X$  a  $Y$  je koeficient korelace roven 0. Nulový korelační koeficient však neznamená, že jsou veličiny  $X$  a  $Y$  nezávislé. Nulový korelační koeficient má například dvojice náhodných veličin  $X$  a  $Y = X^2$ .“ [16]

„Ve statistice je **Spearmanův koeficient pořadové korelace** bezrozměrné číslo, které udává statistickou závislost (korelaci) mezi dvěma veličinami. Značí se řeckým písmenem  $\rho$  nebo  $r_s$ .

Mějme dvě náhodné veličiny  $X$  a  $Y$ , jejichž pravděpodobnostní rozdělení není známé. Uspořádáme  $n$  jejich hodnot  $x_i$  a  $y_i$  podle velikosti a přiřadíme jim pořadová čísla  $p_i$  a  $q_i$ . Hodnota koeficientu je pak rovna:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_i (p_i - q_i)^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (4.4)$$

nabývá hodnot z intervalu  $\langle -1, 1 \rangle$ . Spearmanův koeficient pořadové korelace lze spočítat také jako Pearsonův korelační koeficient pořadových čísel  $p_i$  a  $q_i$ .

V pro mouj diplomovou práci jsem použil Spearmanův koeficient korelace, protože se ukázalo, že dosahuje lepších hodnot.“ [17]

## 5. Experimentální optický spoj

### 5.1 Umístění spoje

„Úkolem této práce je analyzovat data z experimentálního bezkabelového spoje na hoře Milešovce, který byl vyroben na VÚT Brno a je provozován Ústavem fyziky atmosféry Akademie věd ČR. Byl vyroben přímo k účelu měření útlumu, jelikož bezkabelové spoje běžně dostupné na trhu neposkytují data o přijatém výkonu.

Milešovka je nejvyšší hora Českého středohoří s nadmořskou výškou 837 m. n. m a okolní terén převyšuje okolní terén o 400 m. S průměrnou rychlostí větru 8,5 m/s je vrchol hory největrnějším místem České republiky, bezvětří zde bývá v průměru jen 8 dní v roce. Velmi často se zde tvoří mlha, nízká oblačnost a dohlednost se často mění, proto je to ideální místo pro studium vlivu atmosferických jevů na optický spoj.

V roce 1905 byla na vrcholu zřízena meteorologická stanice a u ní pak devatenáct metrů vysoká rozhledna. Dnes je na vrcholu hory umístěno stálé meteorologické pracoviště Ústavu fyziky atmosféry.

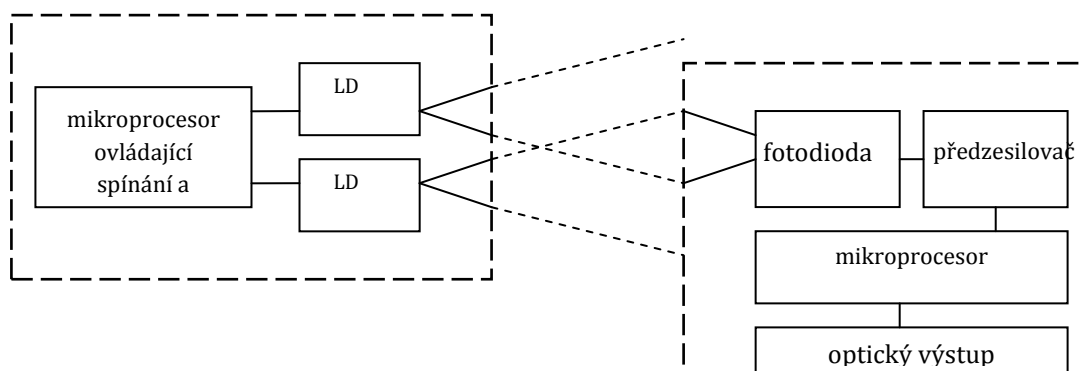


Obr.11 Vysílač v terénu

Pro moji práci krom OBS zde jsou důležité dva anemometry umístěné na věži a lampě 3D sonické anemometry USA-1 a dva dohledoměry novější typu PWD-21. Jeden dohledoměr je umístěn několik metrů od vysílače a druhý je instalovaný na věž blízko k přijímači umístěn další dohledoměr typu PWD-11.

## 5.2 Optický spoj:

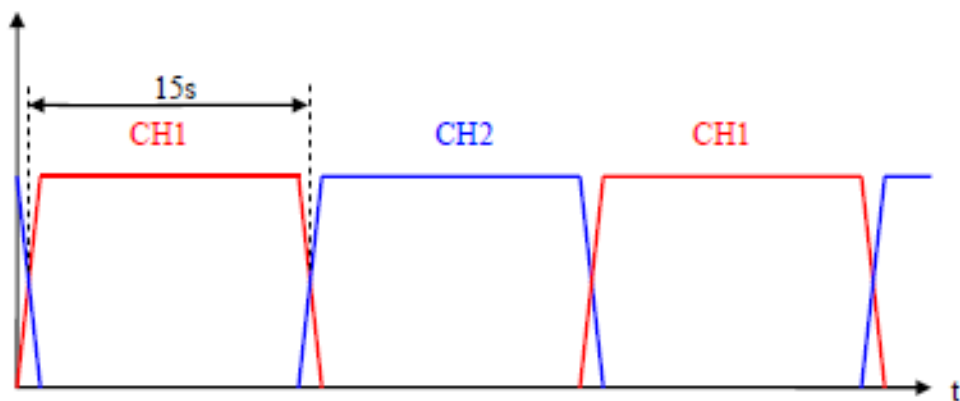
Spoj je orientovaný na jiho-jihovýchod na vzdálenost 60 m s vertikálním převýšením 29 m. Pracuje v simplexním provozu, kdy se v pravidelných intervalech střídá vysílání na dvou vlnových délkách – 830 nm a 1550 nm. Trasa je orientovaná jak horizontálně tak vertikálně a tak umožňuje analyzování dopadu z různé atmosférické vrstvy na přenosu signálu.



Obr.12 Blokové schéma optického spoje

## 5.3 Vysílač

Vysílač obsahuje dva oddělené optické zdroje, které mají Gaussovské laserové diody s vlnovými délkami 1550 nm (CH1) a 830 nm (CH2). Vysílání na obou kanálech zajišťuje mikroprocesor, který je moduluje a postupně střídá se s pravidelnou nastavitelnou periodou 15s, který zdroj vysílá.



Obr.12 nímání útlumu na kanálech CH1, CH2

Tabulka 2 - Parametry vysílače:

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

## 5.4 Přijímač

Signál přijímá fotodioda. Průměr čočky apertury přijímače je 60 mm. V přijímači je použita InGaAs fotodioda FGA10, protože má schopnosti reagovat na široké spektrum vlnových délek. Potom je zde předzesilovač a modul pro vyhodnocování a ukládání dat. Signál zpracování logaritmický operační zesilovač s dynamickým rozsahem 45 dB. Informace z přijímače jsou vedeny optickým kabelem na server.

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

Tabulka 4 - Ukázka dat z optického spoje

```
2013 10 16 03 41 57 CH 1 A 19.69 D 0.07
2013 10 16 03 42 12 CH 2 A 19.46 D 0.10
2013 10 16 03 42 27 CH 1 A 19.69 D 0.08
```

## 5.5 Anemometry

Pro měření korelace větru a útlumu na OBS na Milešovce byly vybrány dva 3D sonické anemometry USA-1 (ultrasonic anemometer) od firmy METEK (SRN) (Obr. č.7).



Obr.13 Anemometr

Zvukové anemometry jsou robustními, rychlými a spolehlivými senzory větru. Metek USA-1 anemometr využívá ultrazvukové pulsy na tři nerovnoběžné cesty paprsku pro měření rychlosti a směru větru, případně třech ortogonálních složek větru  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Vzdálenost vysílače a přijímače je od sebe 0,175 m. Hmotnost tohoto anemometru je 2,3 kg. Tento anemometr nemá žádné pohyblivé části a jeho plocha je malá. Jeho výhodou je větší odolnost proti námraze než u miskovitého anemometru. Navíc přístroj používá vnitřní elektrický ohřev. Každá hlava s čidlem má topení s výkonem 50W. Má malou plochu, a proto se nerozkmitává při větru. Sonický anemometr má velmi malou časovou konstantu. Na druhou stranu k jeho nevýhodám patří znehodnocené měření při atmosférických srážkách, protože se na něm utvoří kapičky na přijímači a vysílači.

### **Princip funkce:**

Jeho rychlost zvuku pohybujícím se klidným atmosférickým prostředím známe. Jakmile se vzduch začne pohybovat, rychlost zvuku se mění. Ve třech osách v kolmých na sebe jsou proti sobě orientovaný vysílač-přijímač zvuku. To umožňuje určit rychlost větru ve třech osách.



## 5.6 Dohledoměr Vaisala PWD21

Vysílač a přijímač nejsou ve stejné horizontální ani vertikální ose. Senzor pracuje na principu rozptylu laserového paprsku o atmosférické částice. Vysílač vyšle laserový paprsek, a když je například mlha paprsek o kapičky vody rozptýlí a část výkonu dopadne i na přijímač. Podle velikosti přijatého signálu, přístroj určí dohlednost.

Při jasném počasí přijímač nedetekuje žádný odražený výkon. Nápadné kryty natočeny směrem k zemi přístroj dobře chrání proti shromažďování vody nebo sněhu u čoček a tím zamezují ovlivňování měření.“ [18]



Obr. 14 Dohledoměr Vaisala PWD21 na Milešovce

## 6. Řešení problému

Všechny měřicí přístroje a výsledky jsou propojeny s meteorologickou observatoří Milešovka. Tato observatoř je v přímém spojení s Ústavem fyziky a atmosféry AVČR pomocí datové sítě.

Pro zpracování dat z anemometru jsem dostal programy od RNDr. Jaroslava Svobody, CSc z UFA. Tyto programy zkomprimovaly velikost datových souborů a provedli základní výpočty.

Dále se data synchronizovala s ostatními daty (vítr, útlum, dohlednost...) a vložila do jedné databáze (aby byla možno použít Programátorským prostředím Matlab). To provedl ing. Vladimír Brázda.

Pro potřeby matematických operací je nutné všechny data časově se synchronizovat. Anemometry měří jednou za 0,1 sekundy. Protože každý kanál s patnáctisekundovým intervalem na jedné vlnové délce. Rozhodlo se, že se zprůměruje na 1 min aniž bychom přišli o přesnost.

Dále pro další zkoumání bylo potřeba odstranit z měření data, které by mohla být ovlivněna málo viditelností (ta je způsobená špatnými meteorologickými podmínkami), deštěm, výpadky měření jakéhokoliv přístroje, který byl použit pro moje měření ať extrémními podmínkami nebo selháním elektroniky.

V datech se objevují dvě proměnné, kdy se jedná o -999 tzv. Nedostatečný počet měřených hodnot a -99, kdy není jejich relevantnost (porucha).

Dále se posuzovalo, kdy nejsou data ovlivněna jinými meteorologickými úkazy než větrem a jim podobné veličiny. Tato data nebyla brána v úvahu.

S vedoucím práce jsme se rozhodli zaměřit se na tyto veličiny (tab. 3):

Tabulka 3 - Zkoumané veličiny

1. průměrný směr větru (průměrováno vektorově) ve stupních - 2D-průměr
2. průměrná horizontální rychlost (průměrováno vektorově) v m/s -2D-průměr Pozn.: je to shodné s MR_ox (viz. řádek 10.)
3. 2D intenzita turbulence (bezrozměrně): $\sqrt{\text{turbulentní energie}} / \text{MR}_{ox}$
4. MU = průměrná složka U (m/s)
5. MV = průměrná složka V (m/s)
6. MW = průměrná složka W (vertikální složka) (m/s)
7. MT = průměrná sonická teplota (stupně Celsia)
8. MM = průměr z absolutní hodnoty horizontální složky větru (miskový anemometr)
9. průměr $(W-MW)*(T-MT)$ = úměrně vertikálnímu turbulentnímu toku tepla
10. průměr $(W-MW)*(R_{ox}-MR_{ox})$ , $R_{ox}$ , $R_{oy}$ = okamžité složky rychlosti v pootočené s.s., ve které má osa ox směr průměrně rychlosti (průměrované vektorově) průměrná "příčna" rychlost musí být nulová, tj. $MR_{oy}=0$ .
11. turbulentní energie = $0.5 * \text{průměr}((U-MU)**2 + (V-MV)**2 + (W-MW)**2)$
12. horizontální turb.energie = $0.5 * \text{průměr}((U-MU)**2 + (V-MV)**2)$
13. směrodatná odchylka U (smd)
14. smd V
15. smd W
16. smd T
17. smd M ( M = absolutní hodnota okamžité horizontální rychlosti(miskový anemometr))
18. smd R_ox (rychlosti větru v ose X)
19. smd R_oy
20. smd smeru větru
21. průměrná 3D rychlost (průměrováno vektorově)
22. $(\text{smd } W)/(\text{smd } R_{ox})$
23. $(\text{smd } R_{oy})/(\text{smd } R_{ox})$
24. $MW/(MR_{ox})$
25. $(\text{smd } R_{ox})/(MR_{ox})$ (průměrná hod. rychlosti větru v ose X)
26. $(\text{smd } R_{oy})/(MR_{ox})$
27. $(\text{smd } W)/(MR_{ox})$
28. 3D intenzita turbulence (bezrozměrně)
29. průměr $(W-MW)*(R_{oy}-MR_{oy})$ , viz. také položku 15.
30. maximální naráz (m/s)
31. čas maximálního narázu od začátku průměrovacího intervalu (sec)
32. tlak
33. . vis_mean- spodní dohledoměr PWD21: dohlednost interpolovaná z průměrně dohlednosti PW_VIS10, v metrech

V mé diplomové práci jsem studoval data ze tří let - rok 2009, 2010 a 2011. Díky tomu se minimalizovalo ovlivnění výsledů mé práce chvilkovými abnormalitami.

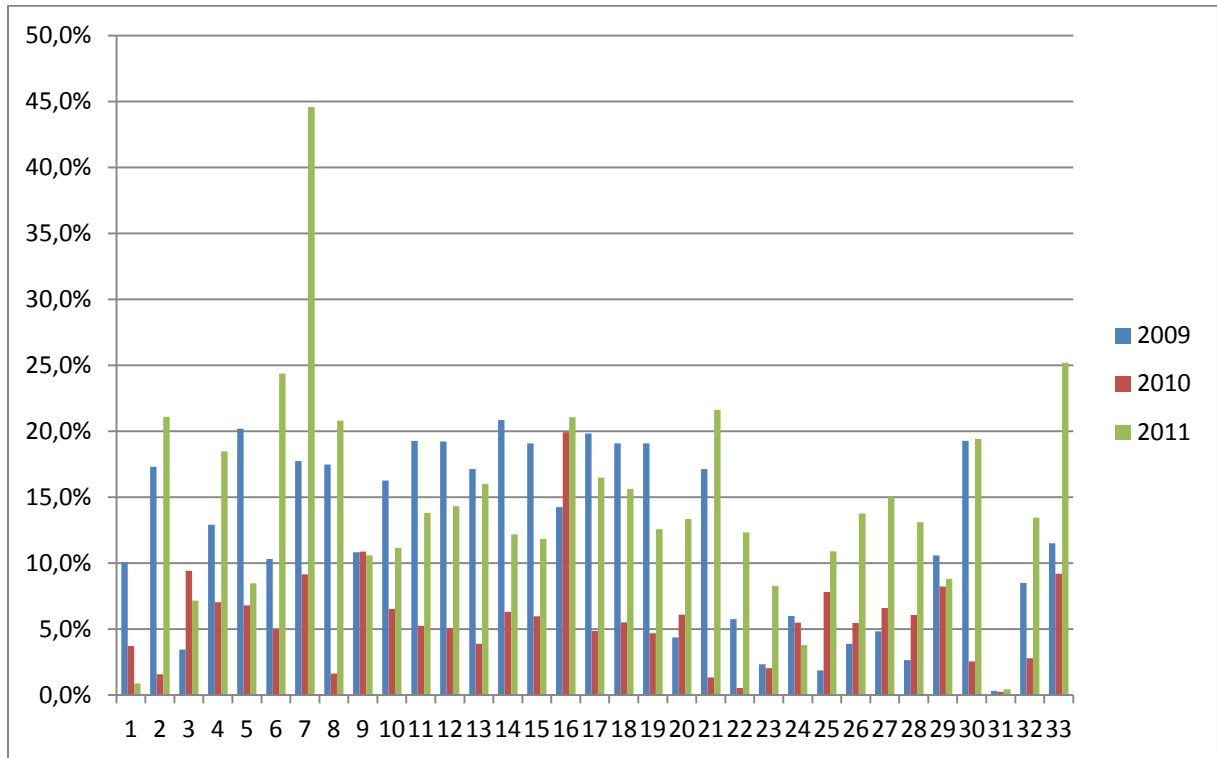
## 7. Výsledky:

V tabulce níže jsou korelovány všechny vedené parametry s útlumem na kanálu CH1 za období tří let průměrované po jedné minutě s dohledem minimálně 10km.

Tabulka 4 - Vše s útlum průměrovaný 1min dohlednost 10km za období tří let

Korelace útlumu kanálu Ch1				
Veličina\Rok	2009	2010	2011	průměr
1	10,073%	3,697%	0,870%	4,880%
2	17,294%	-1,562%	21,093%	13,316%
3	3,443%	9,413%	-7,142%	6,666%
4	-12,892%	-7,037%	18,466%	12,798%
5	20,181%	6,785%	8,465%	11,810%
6	10,302%	4,976%	24,353%	13,210%
7	-17,724%	9,139%	-44,581%	23,815%
8	17,473%	-1,608%	20,785%	13,289%
9	-10,823%	-10,875%	-10,576%	10,758%
10	-16,248%	-6,509%	-11,163%	11,307%
11	19,272%	5,240%	13,813%	12,775%
12	19,214%	5,065%	14,306%	12,862%
13	17,125%	3,864%	15,977%	12,322%
14	20,829%	6,306%	12,167%	13,101%
15	19,067%	5,952%	11,844%	12,288%
16	-14,234%	-19,916%	-21,053%	18,401%
17	19,814%	4,854%	16,462%	13,710%
18	19,066%	5,508%	15,626%	13,400%
19	19,070%	4,677%	12,557%	12,101%
20	-4,354%	6,095%	-13,340%	7,929%
21	17,125%	-1,337%	21,611%	13,358%
22	-5,734%	-0,528%	-12,313%	6,192%
23	-2,321%	-2,022%	-8,273%	4,205%
24	-5,977%	5,480%	3,775%	5,077%
25	-1,852%	7,810%	-10,899%	6,854%
26	-3,879%	5,461%	-13,748%	7,696%
27	-4,825%	6,592%	-15,016%	8,811%
28	-2,646%	6,051%	-13,095%	7,264%
29	10,583%	8,213%	8,790%	9,195%
30	19,274%	2,532%	19,409%	13,738%
31	0,317%	0,238%	0,439%	0,332%
32	8,484%	2,789%	-13,438%	8,237%
33	-11,497%	9,184%	-25,179%	15,286%

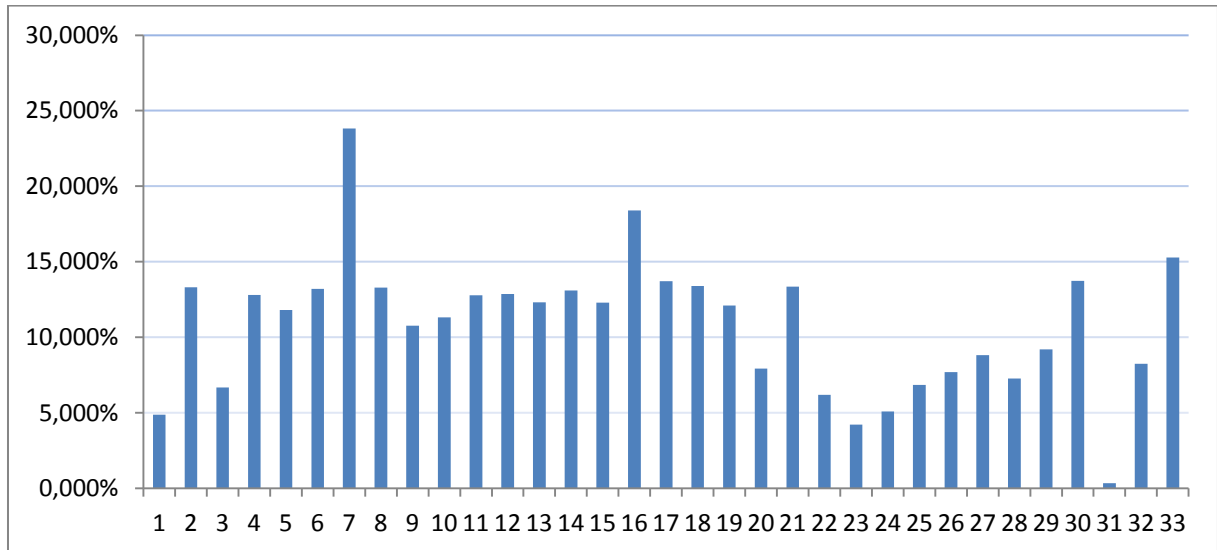
korelace



parametry (tab. 3)

Graf 1 – Korelace zkoumaných vel. s útlumen na kanále CH1 za jednotlivé roky

korelace



parametry (tab. 3)

Graf 2 – Průměrná korelace zkoumaných vel. s útlumen na kanále CH1 za 3 roky

Korelace okolo 50% se dá považovat za velmi silnou. To zde na první pohled je zřejmé, že tyto veličiny nedosahují velikých hodnot. Tím pádem na první pohled tu závislost není moc patrná.

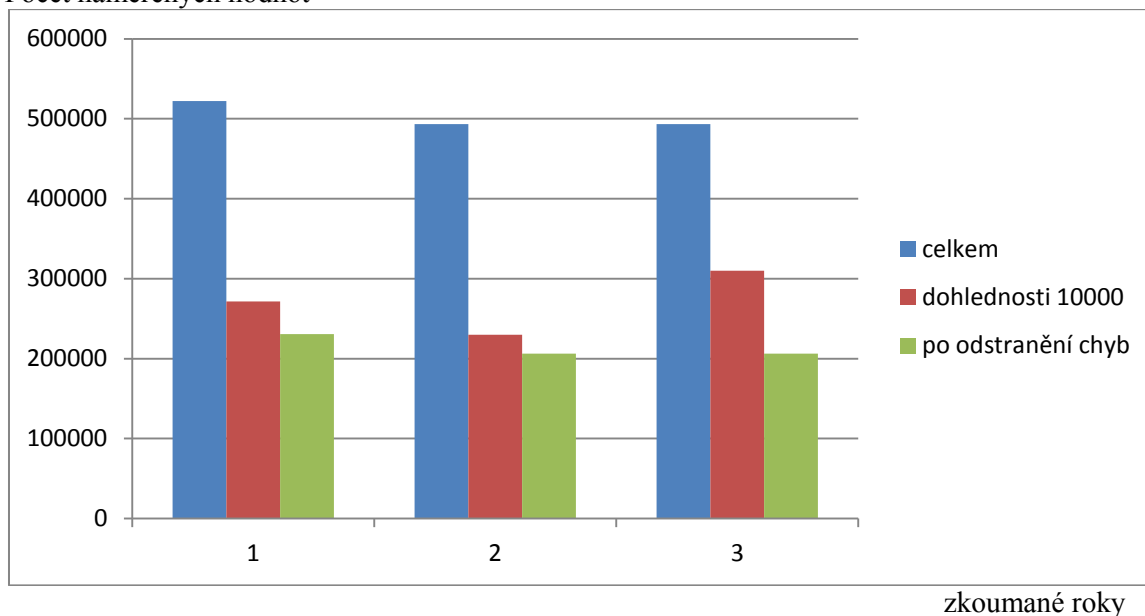
Zde si můžeme všimnout, jak se liší korelace v jednotlivých letech, tím pádem je pak průměrná korelace ještě menší. Ale přesto nesmíme přehlédnout např. 7. řádek Sonickou teplotu, a také 11. turbulentní energie, 12. horizontální turbulentní energie, 13. směrodatná odchylka U, 21. průměrná 3D rychlost, 30. maximální náraz.

V tabulce 5 je vidět s kolika hodnotami se pracuje ročně, dále je vidět, že okolo 50% se muselo ignorovat, protože nebyly vhodné klimatické podmínky (dohlednost menší než 10km) a pak ze zbylé poloviny byla jedna desetina buď výpadek měření, nebo nastala chyba.

Tabulka 5 – Statistika hodnot zkoumané veličin

	2009		2010		2011	
celkem	521951	100%	493261	100%	493261	100%
Dohlednosti 1400	271420	52%	230016	47%	310098	63%
po odstranění chyb	230564	44%	206205	42%	206205	42%

Počet naměřených hodnot



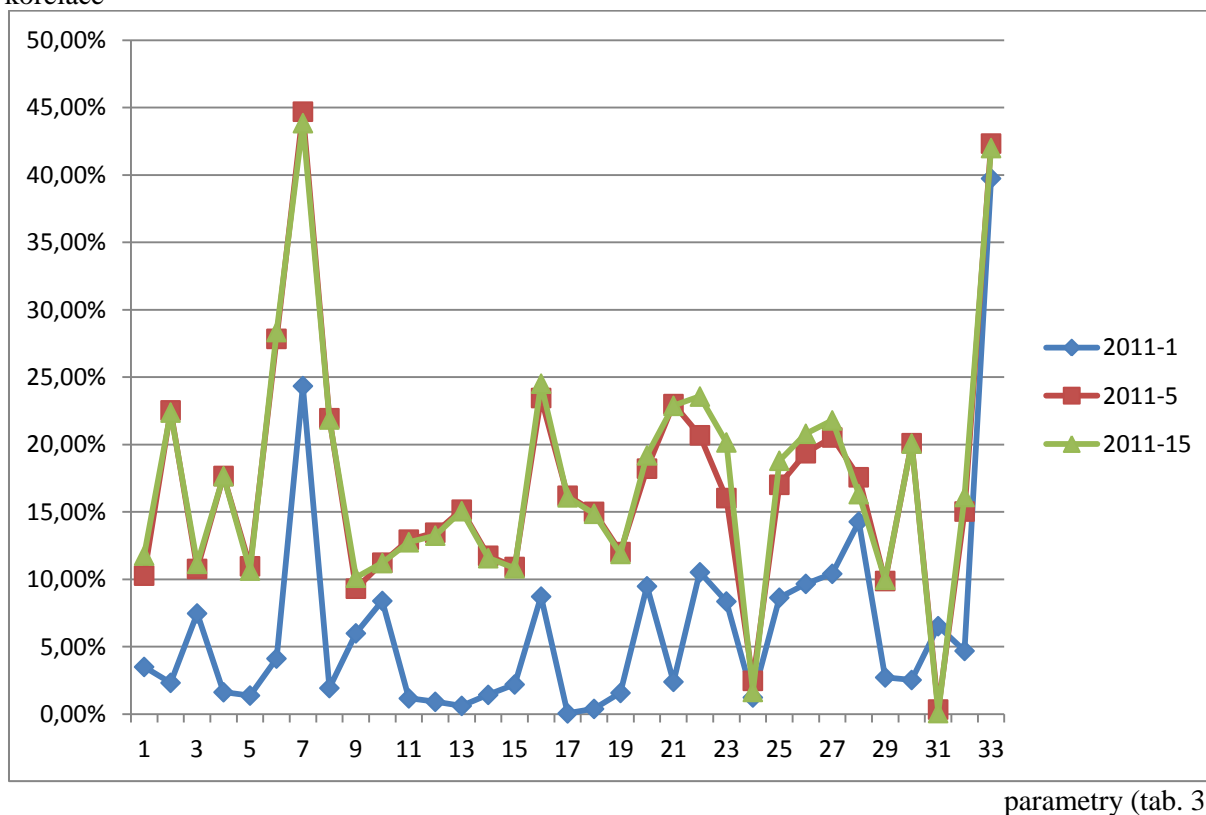
Graf 3 – Počet naměřených hodnot, se kterými počítáme za jednotlivé roky

Tabulka 6 – Různé integrační časy korelací veličin (tab. 3)

	2009-1	2009-5	2009-15	2010-1	2010-5	2010-15	2011-1	2011-5	2011-15
1	5,76%	10,76%	11,52%	0,87%	5,38%	5,44%	3,51%	10,29%	11,78%
2	9,91%	18,93%	19,24%	4,60%	0,36%	0,63%	2,33%	22,54%	22,38%
3	1,26%	4,08%	4,85%	4,19%	8,44%	8,45%	7,48%	10,78%	11,16%
4	7,86%	7,23%	6,91%	7,53%	8,18%	8,32%	1,64%	17,68%	17,66%
5	12,72%	18,51%	18,40%	6,31%	8,68%	8,59%	1,39%	10,98%	10,66%
6	5,83%	10,85%	11,23%	1,62%	6,21%	6,33%	4,13%	27,85%	28,36%
7	22,04%	25,23%	25,25%	32,69%	1,92%	2,05%	24,35%	44,70%	43,85%
8	9,91%	18,24%	18,43%	4,70%	0,11%	0,34%	1,94%	21,96%	21,87%
9	1,53%	4,83%	6,03%	7,46%	7,00%	7,76%	6,00%	9,32%	10,13%
10	10,69%	16,93%	17,23%	9,63%	7,14%	7,68%	8,41%	11,24%	11,22%
11	10,82%	15,40%	15,36%	8,48%	6,18%	6,03%	1,18%	12,95%	12,76%
12	10,76%	15,45%	15,42%	8,67%	6,09%	5,92%	0,93%	13,47%	13,25%
13	9,67%	14,39%	14,42%	8,52%	4,75%	4,53%	0,62%	15,18%	15,07%
14	11,64%	16,46%	16,37%	8,64%	7,43%	7,26%	1,44%	11,76%	11,58%
15	10,87%	15,05%	15,00%	7,19%	6,32%	6,19%	2,21%	10,93%	10,83%
16	9,06%	14,56%	15,38%	4,87%	18,65%	19,13%	8,73%	23,46%	24,53%
17	11,09%	16,65%	16,66%	8,86%	5,96%	5,76%	0,07%	16,21%	16,10%
18	10,70%	15,65%	15,63%	8,97%	6,41%	6,21%	0,40%	15,01%	14,88%
19	10,76%	15,36%	15,31%	8,09%	5,73%	5,56%	1,58%	12,03%	11,90%
20	1,69%	11,65%	13,00%	1,37%	4,11%	3,71%	9,50%	18,22%	19,21%
21	9,79%	18,57%	18,81%	4,30%	0,19%	0,46%	2,41%	23,01%	22,88%
22	2,19%	10,50%	12,40%	6,46%	4,02%	4,65%	10,53%	20,70%	23,57%
23	0,26%	6,66%	9,46%	2,09%	5,32%	7,44%	8,37%	16,04%	20,17%
24	2,66%	10,43%	12,15%	6,67%	5,37%	5,58%	1,25%	2,48%	1,66%
25	0,83%	10,53%	12,44%	3,02%	5,19%	4,18%	8,65%	17,02%	18,81%
26	1,23%	11,77%	13,42%	0,86%	2,79%	1,99%	9,67%	19,37%	20,81%
27	1,83%	12,50%	13,86%	0,02%	3,75%	3,03%	10,42%	20,54%	21,80%
28	1,04%	9,78%	9,44%	1,75%	3,92%	3,48%	14,28%	17,58%	16,33%
29	5,38%	9,41%	8,98%	4,52%	8,58%	8,70%	2,73%	9,89%	9,98%
30	10,79%	17,62%	17,69%	6,81%	4,14%	3,99%	2,54%	20,11%	20,09%
31	0,44%	0,43%	0,91%	0,33%	0,26%	0,03%	6,54%	0,35%	0,09%
32	12,55%	5,58%	4,02%	8,63%	1,69%	1,87%	4,70%	15,04%	16,12%
33	38,19%	33,78%	34,05%	20,05%	16,43%	17,09%	39,74%	42,34%	42,01%

Při korelaci veličin s útlumem bylo použito třech integračních časů 1min, 5min, 15min. S korelací typu spearman.

korelace



Graf 4 – Korelace s různým integračním časem(1min,5min,15min) za rok 2011

Předpoklad je, že čím dál větší integrační tím lepší korelace, což se ověřilo.

Zde si můžeme všimnout, že při zvětšení integračního času z 1min na 5min se korelace zdvojnásobí a při použití 15min sice korelace zlepši ale už ne o takový rozdíl. Proto pro další zkoumání navrhuji integrační čas 5min, ale neztratili jsme dostatečnou citlivost.

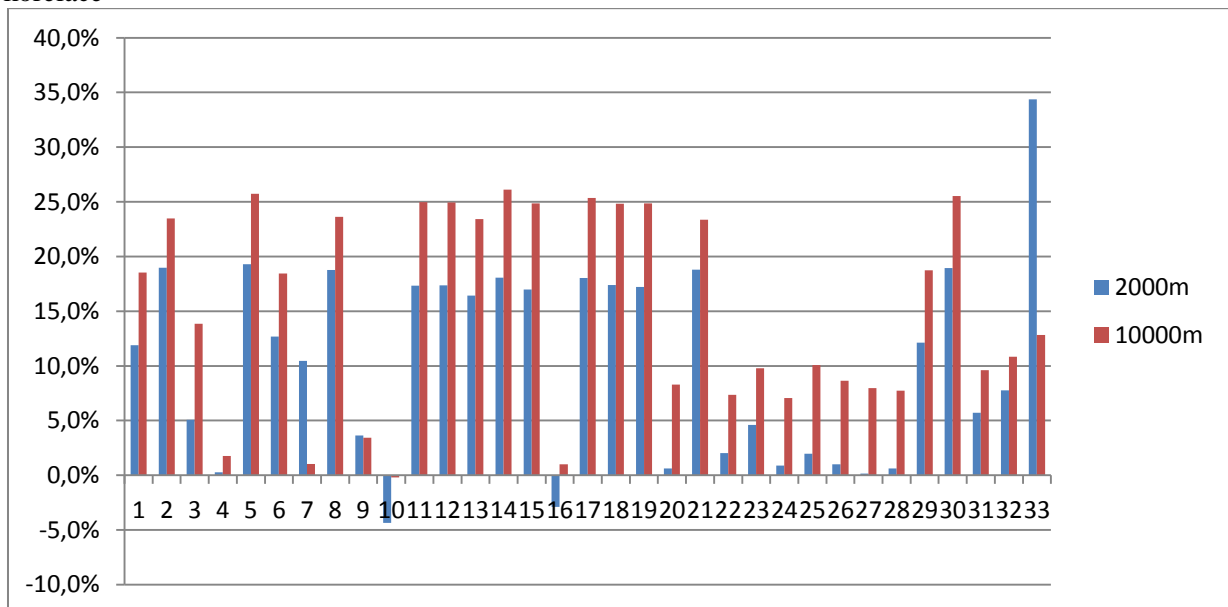
Korelace při lepší dohlednosti vzrůstá. Spoj je méně ovlivněný mlhou a deštěm, ale také je tím na druhé straně méně dat.



Tabulka 7 – Korelace veličin pro různé dohlednosti

Dohlednost	2000m	10000m
1	11,9%	18,5%
2	19,0%	23,5%
3	5,1%	13,8%
4	0,3%	1,8%
5	19,3%	25,7%
6	12,7%	18,4%
7	10,5%	1,0%
8	18,8%	23,6%
9	3,6%	3,4%
10	-4,3%	-0,2%
11	17,3%	25,0%
12	17,4%	24,9%
13	16,4%	23,4%
14	18,1%	26,1%
15	17,0%	24,8%
16	-2,9%	1,0%
17	18,0%	25,3%
18	17,4%	24,8%
19	17,2%	24,9%
20	0,6%	8,3%
21	18,8%	23,4%
22	2,0%	7,4%
23	4,6%	9,8%
24	0,9%	7,1%
25	2,0%	10,1%
26	1,0%	8,6%
27	0,2%	8,0%
28	0,6%	7,7%
29	12,1%	18,7%
30	18,9%	25,5%
31	5,7%	9,6%
32	7,8%	10,8%
33	34,4%	12,8%

korelace



parametry (tab. 3)

Graf 5 – Korelace s různým s různou podmínkou viditelnosti (2km, 10km) za tři roky

U celkových korelací hodnoty nenabývají velkých hodnot, tak se dále začalo zkoumat korelace za jeden den tab. 8,9 a za tři dny. To jsem udělal s daty za tři roky. A jejich hodnoty korelací jsem udělal průměr a medián tab. 10a-c a 11a-c.

Tabulka 8 – Korelace veličin (tab. 3) po jednotlivých dnech, první den až patnáctý den

dny\veliciny	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1.den	8%	-39%	-1%	10%	-20%	1%	-42%	-36%	13%	19%	-20%	-19%	-17%	-20%	-24%	15%
2.den	-52%	2%	-12%	-86%	-4%	-41%	-21%	4%	-7%	-5%	-12%	-12%	-4%	-16%	-11%	-29%
3.den	31%	0%	18%	-36%	6%	-15%	64%	1%	41%	-5%	10%	10%	13%	8%	9%	35%
4.den	46%	47%	34%	57%	50%	61%	66%	48%	59%	-51%	68%	68%	67%	65%	66%	-25%
5.den	7%	17%	-25%	-13%	-6%	35%	17%	16%	7%	14%	6%	7%	7%	1%	1%	-28%
6.den	2%	-49%	67%	-57%	15%	-18%	-7%	-48%	30%	-26%	57%	58%	52%	62%	52%	51%
7.den	39%	-12%	24%	-15%	56%	47%	-21%	-11%	-9%	19%	28%	29%	29%	27%	25%	-20%
8.den	-27%	3%	26%	-13%	-28%	0%	-75%	4%	-34%	-7%	21%	23%	28%	16%	16%	-1%
9.den	40%	-64%	68%	-63%	31%	-46%	-83%	-61%	42%	-2%	41%	40%	36%	40%	43%	32%
10.den	5%	-28%	19%	-73%	85%	34%	71%	-28%	42%	-22%	2%	1%	-8%	13%	9%	-34%
11.den	-31%	-50%	-37%	-41%	-53%	-56%	-84%	-51%	-1%	17%	-69%	-69%	-68%	-68%	-67%	-14%
12.den	15%	-21%	40%	-18%	17%	3%	-67%	-16%	9%	8%	30%	30%	31%	28%	30%	27%
13.den	24%	-8%	-23%	3%	-10%	16%	-32%	-8%	23%	29%	-18%	-18%	-19%	-15%	-21%	-32%
14.den	3%	78%	-14%	41%	38%	69%	-30%	78%	-20%	-10%	67%	66%	68%	64%	66%	-79%
15.den	46%	45%	18%	-31%	55%	25%	-86%	45%	-1%	-37%	45%	44%	40%	47%	45%	-27%

Tabulka 9 – Pokračování tabulky 8 pro zbylé veličiny

dny\veliciny	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
1.den	-24%	-22%	-14%	11%	-38%	3%	19%	27%	1%	12%	2%	5%	-15%	-29%	-3%	60%	-39%
2.den	-9%	-10%	-14%	-22%	1%	0%	-9%	-34%	-15%	-20%	-15%	-17%	-20%	1%	-1%	85%	-64%
3.den	11%	12%	6%	16%	-1%	-9%	-10%	-10%	20%	11%	12%	18%	25%	2%	-4%	-81%	-55%
4.den	66%	68%	64%	13%	47%	-47%	-34%	22%	25%	9%	2%	16%	53%	57%	1%	-37%	-56%
5.den	13%	10%	-3%	-32%	17%	-13%	-19%	17%	-28%	-35%	-33%	-34%	-12%	16%	2%	24%	-56%
6.den	49%	51%	60%	68%	-49%	-8%	12%	14%	67%	68%	67%	68%	18%	-17%	2%	46%	-34%
7.den	24%	23%	31%	27%	-11%	11%	18%	47%	25%	28%	27%	27%	39%	-2%	4%	67%	-75%
8.den	28%	29%	14%	17%	3%	-13%	-19%	-3%	26%	16%	17%	20%	12%	16%	0%	-48%	-77%
9.den	17%	25%	49%	71%	-65%	31%	41%	23%	70%	72%	73%	73%	45%	-32%	-4%	-35%	-77%
10.den	0%	-2%	7%	20%	-27%	12%	9%	46%	18%	22%	23%	21%	-40%	-15%	-1%	55%	-59%
11.den	-68%	-68%	-65%	-29%	-51%	17%	-1%	-6%	-34%	-28%	-30%	-31%	26%	-58%	-1%	74%	-38%
12.den	16%	21%	38%	48%	-20%	10%	27%	21%	43%	48%	44%	46%	20%	3%	1%	36%	-46%
13.den	-16%	-15%	-20%	-28%	-7%	-5%	-11%	25%	-23%	-30%	-31%	-29%	-33%	-12%	-1%	-9%	-51%
14.den	69%	69%	63%	-26%	78%	-11%	-19%	-14%	-19%	-28%	-24%	-24%	-11%	72%	-1%	-49%	-49%
15.den	46%	45%	45%	5%	45%	-17%	-5%	-24%	13%	8%	1%	10%	26%	48%	0%	83%	-82%

Korelace jsou lepší u některých dnů a veličin, když se to provádí pro kratší období. Některé hodnoty nabývají vysokých hodnot. Ale často se mění jejich polarita, a proto je jejich výsledný průměr za celé období tří let dosahuje malých hodnot. Můžeme si všimnout, že den číslo 4,6,9,11 mají silné korelace. Z toho se dá usuzovat, že tyto dny bel OBS nejvíce ovlivňován zkoumanými parametry.

Další důležitá věc je, že pro parametry 4,5,7,32,33 (viz tab. 3) dosahují korelace vysokých hodnot. (směrodatná odchylka osy x, y, sonická teplota, tlak, střední hodnota dohlednosti) poslední hodnota nám říká, že útlum OBS je korelovaný jen za pěkného počasí, resp. není ovlivňován nežádoucími vlivy počasí (děšť, mlha,..)

U veličin se často mění znamínko.

Z těchto hodnot parametrů jsem udělal průměr a medián za období třech let 2009-11. Jak pro jednotlivý dny (tab.10a-c) tak pro tří denní (11a-c) korelace. Bohužel zase jsem se dostal k nízkým hodnotám.

Tabulka 10a – Celkový průměr a medián z korelací veličin (tab. 3) po jednotlivých dnech za tři roky

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
průměr	4%	12%	-5%	-10%	5%	4%	-44%	11%	-12%	-6%
medián	3%	12%	-6%	-12%	4%	4%	-62%	10%	-10%	-5%

Tabulka 10b – Pokračování tab.10a

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
2%	3%	3%	3%	2%	-20%	5%	4%	2%	-9%	12%	-4%
0%	1%	-1%	3%	2%	-26%	5%	3%	0%	-12%	11%	-3%

Tabulka 10c – Pokračování tab.10a

23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
-4%	-4%	-7%	-9%	-10%	-9%	3%	9%	0%	-5%	-37%
-5%	-3%	-10%	-13%	-13%	-12%	2%	9%	0%	-6%	-45%

Tabulka 11a – Celkový průměr a medián z korelací veličin (tab. 3) po třech dnech za tři roky

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
průměr	6%	13%	0%	-11%	9%	6%	-44%	13%	-5%	-10%
medián	5%	16%	-4%	-14%	9%	6%	-60%	13%	-7%	-8%

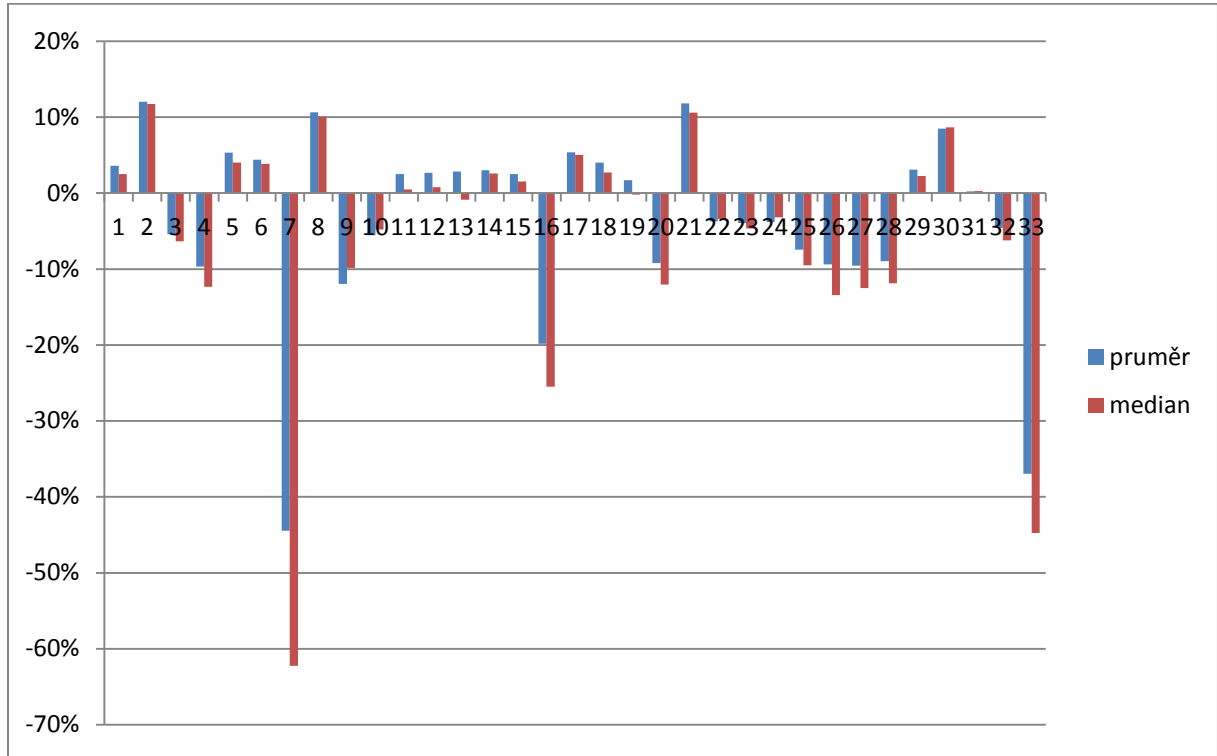
Tabulka 11b – Pokračování tab.11a

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
9%	9%	9%	9%	9%	-16%	11%	10%	8%	-5%	13%	-4%
6%	5%	8%	6%	6%	-18%	9%	7%	5%	-11%	15%	-4%

Tabulka 11c – Pokračování tab.11a

23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
-3%	-4%	-3%	-5%	-6%	-5%	6%	12%	0%	1%	-40%
-5%	-5%	-8%	-11%	-12%	-9%	5%	10%	0%	1%	-49%

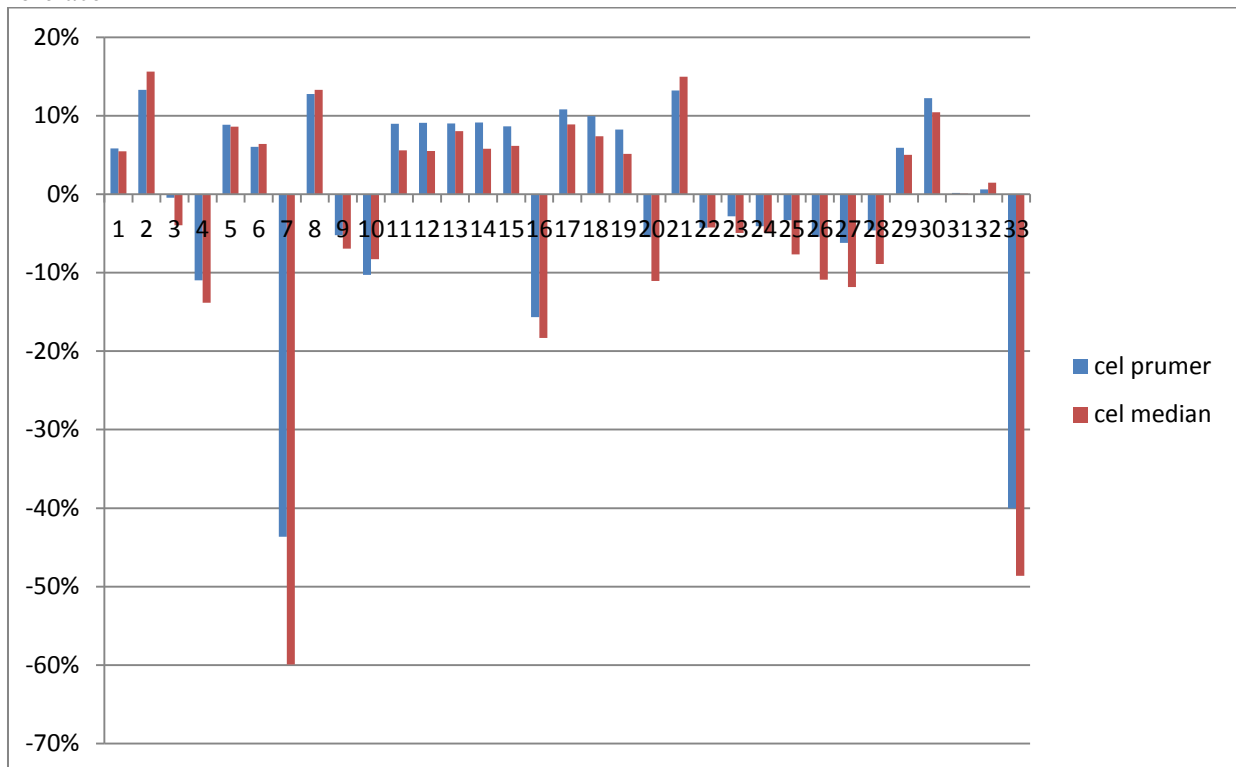
korelace



parametry (tab. 3)

Graf 6 – Průměr a medián z korelace po jednom dni za tři roky

korelace



parametry (tab. 3)

Graf 7 – Průměr a medián z korelace po třech dni za tři roky

Průměr z korelací jedno denní a tří denní jsou dost podobné, ale o něco jsou lepší než korelace celková. Průměr z korelací jednotlivých dnů je způsobená polaritou korelace jednotlivých dnů tím pádem je malá. Ale můžeme si všimnout, že hodnoty 7,16, a 33 výrazně vyčnívají a dále 2,4, 8,9,20,21,25,26,7,28 a30 jsou statisticky zajímavé.

Proto jsem se dále zaměřil na jednotlivé dny. A udělal jsem průměr a medián pro dny kladné polarity a záporné hodnoty (12a-c).

Tabulka 12a – Celkový průměr a medián z korelací veličin (tab. 3) po jednotlivých dnech za tři roky zvlášť kladný a záporný korelace

parametry tab. 3		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
záporné	průměr	-21%	-21%	-24%	-32%	-27%	-24%	-62%	-24%	-31%	-19%
	medián	-17%	-15%	-24%	-26%	-25%	-19%	-69%	-21%	-33%	-15%
	počet dnů	134	111	169	177	130	127	233	110	184	176
kladné	průměr	25%	33%	22%	26%	32%	27%	34%	32%	22%	16%
	medián	21%	33%	18%	23%	32%	24%	32%	34%	20%	13%
	počet dnů	153	175	117	109	156	159	53	177	103	109

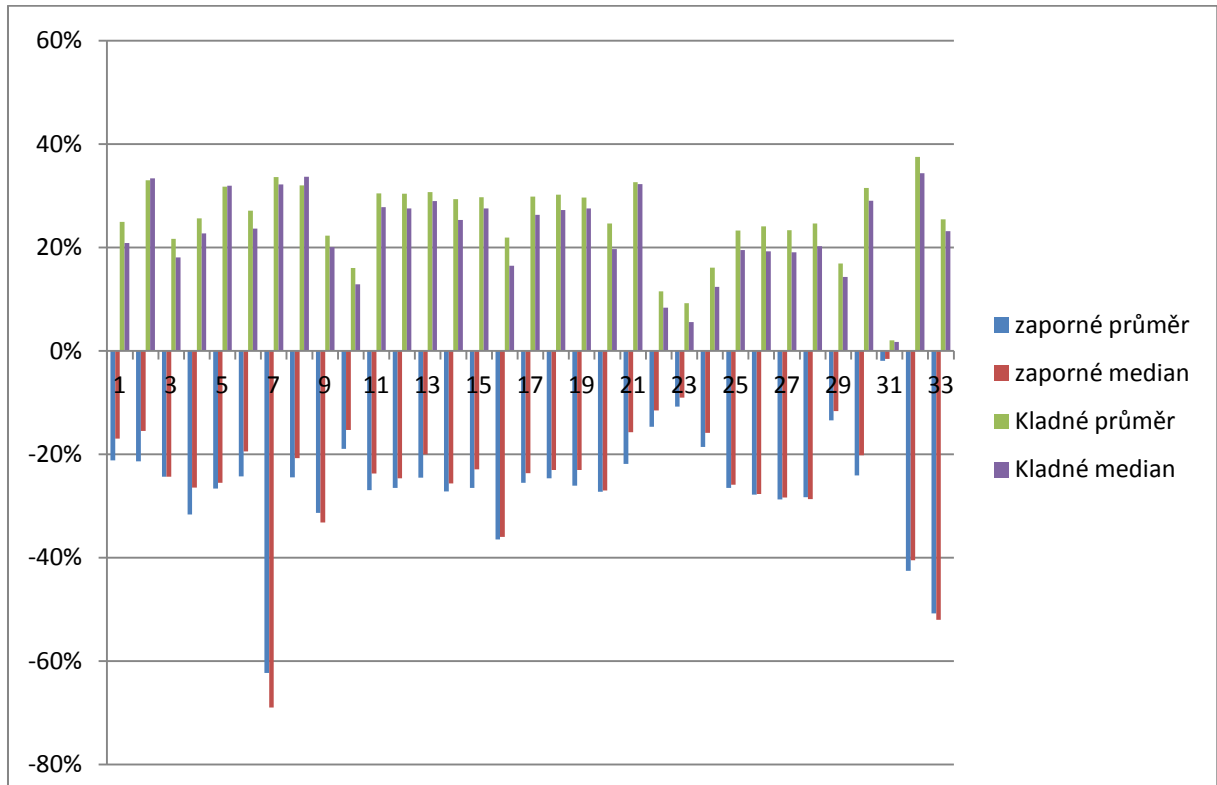
Tabulka 12b – Pokračování tab.11a

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-27%	-27%	-25%	-27%	-27%	-36%	-25%	-25%	-26%	-27%	-22%	-15%
-24%	-25%	-20%	-26%	-23%	-36%	-24%	-23%	-23%	-27%	-16%	-12%
140	140	1455	134	139	205	127	137	144	188	110	167
31%	30%	31%	29%	30%	22%	30%	30%	30%	25%	33%	12%
28%	28%	29%	25%	28%	16%	26%	27%	28%	20%	32%	8%
146	146	141	152	147	81	159	149	142	99	176	119

Tabulka 12c – Pokračování tab.11a

23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
-11%	-19%	-26%	-28%	-29%	-28%	-13%	-24%	-2%	-43%	-51%
-9%	-16%	-26%	-28%	-28%	-29%	-12%	-20%	-2%	-40%	-52%
188	165	178	186	182	183	131	120	131	151	230
9%	16%	23%	24%	23%	25%	17%	32%	2%	38%	25%
6%	12%	20%	19%	19%	20%	14%	29%	2%	34%	23%
97	121	109	101	105	104	155	167	154	135	51

korelace



parametry (tab. 3)

Graf 8 – Průměr a medián z korelace po jednom dni za tři roky oddělené kladné a záporné dny

## 8. Závěr:

V této diplomové práci jsem měl za úkol zdokonalit chápání vlivu větru a jeho vytipovaných parametrů působících na optický bezdrátový spoj.

Útlum na OBS může vzniknout jakýmkoliv působení atmosféry. Můžeme ho popsat průchodem čistou atmosférou, atmosférickými jevy a ředění energie. Tyto jevy nelze přesně od sebe oddělit, abychom s jistotou věděli, že útlum je jasně daný tímto jevem. Ale směřujeme k tomuto stavu.

Zkoumané období proběhlo v letech 2009 až 2011. To považuji za dostatečně dlouhé, aby poznatky byly průkazné. Díky umístění spoje na Milešovce byl OBS vystaven všem extrémním druhům klimatických podmínek, které se v naší republice vyskytují. Z tohoto důvodu byl OBS dokonale prověřen zkoumanými prvky. Bohužel všechny atmosférické vlastnosti prostředí jsou více či méně vždy provázané, je nesmírně obtížné najít data, která by byla ovlivněna jen vybranou veličinou, ale jsme schopni silné vazby vyfiltrovat.

Úprava a analýza dat byla provedena v programovém prostředí MatLab, které je dobře postavené pro práci velkým množstvím dat. Z naměřených dat byla desetina dat znehodnocena pro výpadek nebo nastala chyba měření. Ze zbylých dat byla polovina vyloučena z důvodu ovlivnění silnějšími meteorologickými jevy mimo rámec této práce. I přes tyto faktory zůstalo dostatečné množství dat pro zkoumání.

Pro porovnávání veličin s útlumem se používá korelace typu Spearman. Při celkové korelaci za celé období nejlépe vycházeli:

sonickou teplotu: 23,8%

smt T: 18,4

turbulentní energie: 12,9%

horizontální turbulentní energie: 12,9%

směrodatná odchylka U: 12,3%

průměrná 3D rychlost: 13,4%

maximální náraz: 13,8%

Přestože tyto veličiny vycházeli nejlépe, jejich korelace je slabá zajímavá se jeví sonická teplota.

Dále jsem experimentoval s integračním časem, který jsem se rozhodl vyzkoušet v intervalech 1min, 5min, 15min. Předpoklad byl, že čím dál větší integrační tím lepší korelace, což se ověřilo. S tím že veliký rozdíl nastal mezi 1min a 5min dvojnásobně lepší hodnoty. Při použití intervalu 15min zlepšení nastalo, ale pouze zanedbatelné. Proto pro další zkoumání jsem navrhl integrační čas 5min i za cenu snížení citlivosti.

Další zlepšení korelace můžeme dosáhnout, když u dat dojde ke zvýšení podmínky viditelnosti - čím lepší viditelnost tím k menšímu ovlivnění spoje dochází ostatními atmosférickými jevy.

Při korelaci pro jednotlivé dny jsem zjistil, že u některých dnů, některé veličiny dosahují velmi zajímavých velikostí až 60-94% (např. sonická teplota), což je velmi silná korelace. Ale průměrná hodnota těchto korelací se vrací k nízkým velikostem, protože se mění polarita korelace. Takto získané korelace pro jednotlivé dny a třídní intervaly vycházejí podobně. Zprůměrováním zvláště kladných a záporných korelací jsem se dostal na hodnoty okolo 30%, což je statisticky zajímavé. Z této veličiny vyčnívá sonická teplota (přes 60% v záporných dnech) a její směrodatná odchylka (tyto dvě veličiny mají mezi sebou korelaci 47%), průměrovaná dohlednost, tlak, průměrná horizontální rychlost, průměrná 3D rychlost... viz graf č. 8.

Z výše uvedených důvodů bych doporučil pro další zkoumání těchto veličin integrační čas 5min, avšak korelací po třech dnech se zaměřením na určité dny. Vítr a jeho parametry je jev nestálý, ale není pro OBS hlavní rušivý element jako je mlha a déšť. Vhodné by bylo i pro zkoumání těchto veličin zvětšit podmínku viditelnosti, která je v této práci stanovena na 1350m.



## 9. Seznam použité literatury:

- 1) Bendnář, J., Zikmunda, O.: *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. Praha, Academia 1985. ISBN 21-070-85
- 2) KOLKA Z., WILFERT O., FIŠER O.: *Achievable qualitative parameters of optical wireless links*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2007, Roč. 9, č. 8, s. 2419-2423. ISSN 1454-4164.
- 3) PROKES, A.: *Modeling of Atmospheric Turbulence Effect on Terrestrial FSO Link* [online]. 2009 [cit. 2009-02-12] Dostupný z WWW: <[http://www.radioeng.cz/fulltexts/2009/09\\_01\\_042\\_047.pdf](http://www.radioeng.cz/fulltexts/2009/09_01_042_047.pdf)>
- 4) Sobíšek, Bořivoj.: *Rychlost a směr větru na území České republiky v období 1961-1990*. Praha, Český hydrometeorologický ústav 2000, ISBN 80-85813-79-3
- 5) Štěkl, J.: *Větrná energie. Meteorologie ve větrné energetice*, 1997, Roč. 4, č. 1, ISSN 1211-0531
- 6) UNIS COMPUTERS: *FSO - optika bez kabelů* [online]. 2008 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <[http://www.uniscomp.cz/free-space-optics/page.php?def=hi\\_technology&idmenu=63&idtext=46](http://www.uniscomp.cz/free-space-optics/page.php?def=hi_technology&idmenu=63&idtext=46)>.
- 7) WILFERT, O., KOLKA, Z., BIOLKOVA, V., KŘIVÁK, P., DORDOVÁ, L., FIŠER, O., NĚMEČEK, J.: *Dual optical wireless test link*. Proceedings of the SPIE, Volume 7091 (Free-Space Laser Communications VIII), pp. 70910W-70910W-8 (2008).
- 8) WILFERT, O., KOLKA, Z.: *Optické (laserové) bezdrátové sítě* [online]. 2011 [cit.2011-04-10]. Dostupný z WWW: <[http://www.urel.feec.vutbr.cz/web\\_pages/projekty/clanky/Wilfert\\_Kolka\\_opticke\\_spoje.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/Wilfert_Kolka_opticke_spoje.pdf)>.
- 9) Wikipedie.: *Snellův zákon* [online]. 2011 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Snell%C5%AFv\\_z%C3%A1kon](http://cs.wikipedia.org/wiki/Snell%C5%AFv_z%C3%A1kon)>
- 10) Wikipedie.: *Laminární proudění* [online]. 2011 [cit. 2011-02-20]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Lamin%C3%A1rn%C3%AD\\_proud%C4%9Bn%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Lamin%C3%A1rn%C3%AD_proud%C4%9Bn%C3%AD)>
- 11) Wikipedie.: *Potenciálové proudění* [online]. 2009 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Potenci%C3%A1lov%C3%A9\\_proud%C4%9Bn%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Potenci%C3%A1lov%C3%A9_proud%C4%9Bn%C3%AD)>
- 12) KAISER DATA - Divize bezdrátových komunikací [online]. 2008 [cit. 2011-04-05]. *Stručná teorie laserových spojů*. Dostupné z WWW: <<http://www.bezdratove-telekomunikace.cz/katalog-pojitek/o-laserovych-spojich/>>.

- 13) Korevaar, E.J., Optical Wireless Communications. Boston: SPIE , 1999. ISBN 0-8194-2993-7
- 14) Andrews, L. C., Phillips, R. L. Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham: SPIE, 1998. ISBN 0-81942787-X
- 15) WILFERT, O. 2002. *Optoelektronika*, Brno University of Technology, Institute of Radio Electronics, Brno, 2002
- 16) Wikipedie.: *Korelace* [online]. 2014 [cit. 2014-03-15]. Dostupný z WWW:  
< <http://cs.wikipedia.org/wiki/Korelace> >
- 17) Wikipedie.: **Spearmanův koeficient** [online]. 2014 [cit. 2014-03-15]. Dostupný z WWW:  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Spearman%C5%AFv\\_koeficient\\_po%C5%99adov%C3%A9\\_korelac](http://cs.wikipedia.org/wiki/Spearman%C5%AFv_koeficient_po%C5%99adov%C3%A9_korelac)>
- 18) Jaroš,J:2009 Bakalářská práce *Analýza anemometrických záznamů a vliv větrných turbulencí na fluktuaci radiokomunikačního signálu*
- 19) KVÍČALA, R. 2009. *Chybovost a dostupnost atmosférických optických spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 103 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.