

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Přehled vlivu meteorologických parametrů na
degradaci signálu optických i radiových spojů

Petr Popovský

Bakalářská práce

2011

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr POPOVSKÝ**
Osobní číslo: **I07459**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Přehled vlivu meteorologických parametrů na degradaci signálu optických i radiových spojů**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Vytipujte meteorologické parametry ovlivňující útlum a případně změnu dráhy optického a radiového bezkabelového spoje. Tyto parametry statisticky zpracujte a proveďte rozbor jejich kvantitativního vlivu na degradaci signálu.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

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). Dokumenty ITU-R

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.
AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání bakalářské práce: **2. prosince 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2011**


prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan





Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2011

Prohlášení autora

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 30.05. 2011

Petr Popovský

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, Csc., za jeho přístup, odborné vedení, věcné připomínky a také čas, který mi přes jeho nabitý program věnoval. Děkuji kolegům Bc. Vladimíru Brázdovi a Ing. Jiřímu Peškovi, za spolupráci a ochotu seznámit mě s problematikou zpracování dat OBS. Nesmím zapomenout ani na kolegu a kamaráda Martina Kaplana, program který vytvořil, mi při zpracování dat velmi pomohl.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá popisem optického bezkabelového spoje a vlivu atmosférických jevů (především větru) na útlum signálu. Dále tato práce obsahuje výsledky statisticky zpracovaných dat z experimentálního spoje na Milešovce a porovnání s anemometrickými záznamy rychlosti větru.

Klíčová slova

Optický bezkabelový spoj, větrná turbulence, útlum, dohlednost, směrodatná odchylka, rychlost větru, sonická teplota

Title

Summary of meteorologic parameters causing signal degradation on optical and radio links

Annotation

This bachelor work deals with the description of free space optics communications and the influence of atmospheric phenomena (mainly wind) in the signal attenuation. The thesis contains the results of statistically processed data from the experimental link Milešovka and comparison with anemometric records of wind speed.

Keywords

Free space optics, wind turbulence, attenuation, visibility, standard deviation, wind speed, sonic temperature

Obsah

1	Úvod	11
2	Optický bezkabelový spoj	12
2.1	Výhody OBS	13
2.2	Nevýhody OBS	14
3	Účinky reálné atmosféry na OBS	15
4	Výkonové úrovně OBS	17
4.1	Stacionární model spoje	17
4.2	Statistický model	19
4.3	Vliv větrných turbulencí na OBS	20
5	Optický spoj na Milešovce	21
5.1	Optický bezkabelový spoj	21
5.1.1	Vysílač	22
5.1.2	Přijímač	23
5.2	Anemometry	24
6	Teorie větru a větrných turbulencí	26
6.1	Směr větru	26
6.2	Větrné turbulence	26
7	Popis dat z měřicího pracoviště Milešovka	27
7.1	Surová data	27
7.2	Upravená data	28
8	Výsledky	29
8.1	Korelační tabulky	30
8.2	Grafy průběhů	36
9	Závěr	41
	Literatura	42

Seznam zkratek

APD	Lavinová fotodioda
OBS	Optický bezkabelový spoj
IREL	Infračervená luminiscenční dioda
LD	Laserová dioda
FSO	Free space optics (angl. OBS)
SMD	Směrodatná odchylka
S	Korelace typu Spearman
P	Korelace typu Pearson
ST	Sonická teplota
CH1	Kanál 1 (1550nm)
CH2	Kanál 2 (830nm)
USA	Ultrazvukový anemometr

Seznam obrázků

Obr. 1 – Blokové schéma OBS.....	12
Obr. 2 – Snellův zákon	16
Obr. 3– Výkonové úrovně OBS	18
Obr. 4 – Příklad průběhu přijatého výkonu (statistický model)	19
Obr. 5 – OBS na Milešovce.....	21
Obr. 6 – Blokové schéma OBS.....	22
Obr. 7 – Optický vysílač a přijímač (vpravo) - Vyroben na VUT Brno.....	22
Obr. 8 – Měřicí pracoviště na Milešovce vysílač a přijímač (vpravo)	23
Obr. 9 – Ultrazvukový anemometr USA-1.....	24
Obr. 10 – Větrná růžice	26
Obr. 11 - Graf počtu dat.....	29
Obr. 12 – Graf korelace S a P na CH1 za květen 2009	32
Obr. 13 – Graf korelace S a P na CH1 za září 2009.....	34
Obr. 14 – Graf korelace S a P na CH2 za květen 2009	36
Obr.15 – Graf závislosti útlumu na sonické teplotě září CH1.....	37
Obr.16 – Graf četnosti útlumu září CH1	37
Obr.17 – Graf kvadratické aproximace září CH1.....	38
Obr.18 – Graf lineární aproximace září CH1	38
Obr.19 – Graf závislosti útlumu na sonické teplotě duben CH2.....	39
Obr.20 – Graf četnosti útlumu duben CH2	39
Obr.21 – Graf lineární aproximace duben CH2	40

Seznam tabulek

Tab. 1 – Rozdělení světla podle vlnové délky.....	13
Tab. 2 – Dostupnost spoje	13
Tab. 3 – Technické parametry OBS	24
Tab. 4 – Legenda ke korelační tabulce	30
Tab. 5 – Korelační tabulka leden-květen na CH1 za rok 2009.....	31
Tab. 6 – Korelační tabulka srpen-listopad na CH1 za rok 2009.....	33
Tab. 7 – Korelační tabulka duben-srpen na CH2 za rok 2009	35

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá popisem optického bezkabelového spoje (OBS), který v dnešní době může sloužit jako náhrada optické sítě v místech, kde je výstavba optické sítě velmi nákladná nebo přímo nemožná. Díky vysoké přenosové rychlosti může být OBS přirozeným článkem optických sítí, tam kde není možné z jakéhokoliv důvodu optické vlákno položit. Rychlá instalace OBS přináší další možnost použití jako v případě krátkodobého požadavku vysokorychlostního připojení v mimoměstské nebo elektromagneticky zarušené oblasti např.: při pořádání veřejné události.

Dále popisují atmosférické jevy, které mají rozdílný vliv na útlum signálu při působení na optický a rádiový spoj. Této odlišnosti se využívá pro konstrukci hybridních systémů, kde se kombinují výhody optického i mikrovlnného spoje. V činnosti bude pouze ten systém, který má v daný časový okamžik menší útlum.

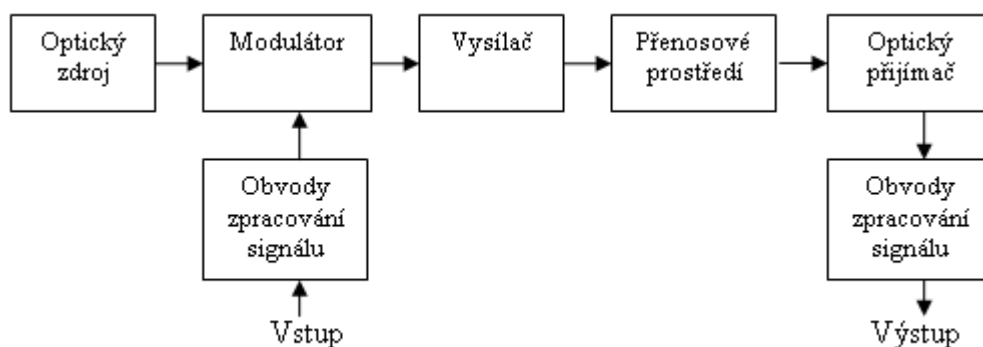
Pro analýzu OBS mi byla poskytnuta data z experimentálního testovacího spoje umístěného v drsném podnebí na Milešovce, kde se nachází meteorologická observatoř s potřebným vybavením pro sledování změn a stavu atmosféry. OBS pracuje v simplexním režimu, který vysílá na dvou časově oddělených kanálech o vlnových délkách 830nm a 1550nm.

Cílem práce je vytipovat a najít jak působí meteorologické jevy na útlum OBS. V této práci se zabývám analýzou záznamů pohybu větru a jeho vlivu na OBS. Pro měření rychlosti větru slouží dva 3D ultrazvukové anemometry, které jsou umístěny v blízkosti spoje. Data z těchto sond statisticky zpracuji a pokusím se najít vzájemný vztah mezi větrnými parametry a útlumem.

Útlum způsobený mlhou bude na základě dohlednosti z útlumu OBS vyloučen, aby neovlivnil výsledky analýzy. Pokud by byla nalezena závislost mezi útlumem a atmosférickým jevem, může být nalezená závislost využita pro odhad útlumu na OBS při známých stavech atmosféry. Tyto stavy je možné určit na základě dlouhodobého měření v dané lokalitě. Pro tuto lokalitu lze pak stanovit dostupnost spoje a přizpůsobit plánování OBS.

2 Optický bezkabelový spoj

Optický bezkabelový spoj (OBS), anglicky Free space optics (FSO). Popis je v [1], zde uvádím to hlavní. OBS se skládá z modulovaného zdroje záření, optického přenosového prostředí a přijímače záření, blokové schéma takového zapojení vidíme na (Obr. 1). Pro přenos signálu se používá úzký světelný paprsek (o průměru řádu miliradiánů) – tzv. optický svazek, který se šíří volnou atmosférou.



Obr. 1 – Blokové schéma OBS

Dosah optického bezdrátového spoje (OBS) byl kdysi stovky metrů a to s potížemi, dnes už to jsou bez problému kilometry i více. Základ OBS tvoří optický vysílač, což může být laser, laserová dioda (LD) nebo infračervená luminiscenční dioda (IRED). Modulace se provádí buď v optickém modulátoru nebo v případě polovodičových prvků přímo (změnou budícího proudu diody). Na druhé straně přijímač je tvořen optickým detektorem a to buď germaniovou fotodiodou PIN nebo lavinovou fotodiodou (APD), většinou na bázi InGaAs pro vyšší citlivost. Používaná optická pásma jsou v oblasti infračerveného záření, které je pro lidské oko neviditelné, ale při přímém kontaktu může dojít i k oslepnutí. Vlnová délka těchto pásem je 850-1550nm, což odpovídá frekvenci 193,5-353THz. Rozdělení světelného záření a jejich frekvence můžeme vidět v následující tabulce (Tab. 1) [2], [11].

Tab. 1 – Rozdělení světla podle vlnové délky

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 μm	214-100
	7	3 μm -1mm	100-0,3

Pro větší spolehlivost přenosu se používají spoje hybridní, kde se v případě výpadku optiky aktivuje záloha v podobě mikrovlnného rádiového spoje. Moderní digitální rádiové spoje pracující s kmitočtem nad 50 GHz dosahují přenosové rychlosti až 10 Gbit/s. Takovéto hybridní spoje využívají předností obou systémů pro zvýšení kvality a pohotovosti spoje. Rádiový systém není náchylný k rušení způsobenému silnou mlhou a OBS zase příliš nevdává intenzivní dešť. Bylo zjištěno [4], že rádiový spoj na kmitočtu 58 GHz může být použit jako plnohodnotná záloha OBS bez nutnosti snižovat přenosovou rychlost jak je tomu u úzkopásmových rádiových systémů pracujících na kmitočtech do 10 GHz. Pohotovost takového hybridního systému byla zvětšena téměř o dva řády oproti samotnému OBS, jak je z výzkumu patrné (Tab. 2) [4].

Tab. 2 – Dostupnost spoje

System	Dostupnost spoje (%)
Optický	99,1030
Rádiový	99,9053
Hybridní	99,9935

2.1 Výhody OBS

Mezi hlavní výhody OBS patří následující:

- Použití v bezlicenčním pásmu.
- Rychlá instalace spoje umožňuje využití při krátkodobém požadavku vysokorychlostního datového připojení. (např. sportovní a jiné přenosy z mimoměstských lokalit)
- Velké přenosové rychlosti od 1 Mbit/s až 2,5 Gbit/s (někde i 10 Gbit/s).
- Vysoká bezpečnost přenášených dat, díky úzkému svazku paprsků lze jen obtížně odposlouchávat (a to pouze v cestě spoje, což je rozpoznatelné). Proto je OBS

vhodný pro použití i v oblastech kde je požadováno maximální zabezpečení (bankovníctví, vojenství, atd.)

- Pracuje v oblasti neviditelného IR záření, nositelem signálu jsou fotony které se navzájem neovlivňují, tudíž signál není rušen EMI.
- Úplné galvanické oddělení vstupu od výstupu.

2.2 Nevýhody OBS

- Vyžaduje přímou viditelnost vysílače a přijímače. Občasné přerušení paprsku, např. prolétajícím ptákem, lze vyřešit vhodným kódováním např.: ARQ které si vyžádá opětovné zaslání ztracených dat.
- Dostupnost spoje je závislá na stavu počasí (to lze zlepšit použitím hybridního spoje nebo dostatečnou výkonovou rezervou).
- Omezený dosah spoje – zatím několik km. Vývoj technologie jde ale kupředu a lze pozorovat i spoje na vzdálenosti několika desítek kilometrů. Toho lze také dosáhnout kaskádním řazením skoků spoje [11].

3 Účinky reálné atmosféry na OBS

Účinky reálné atmosféry mají na rádiový a optický spoj rozdílný vliv. U rádiového spoje způsobuje útlum hustý déšť, sněžení a déšť s kroupami. Na útlum OBS má největší vliv mlha, méně déšť a v horských oblastech nízká oblačnost, také to může být teplý kouř (z komínů), tok teplého vzduchu z klimatizací umístěných na střeších budov nebo písečná (prachová) bouře a v poslední řadě také přímé sluneční záření. Pokud se slunce dostane do zorného pole OBS, kde přímo svítí na přijímací čočku, může dojít k saturaci fotodetektoru a následnému krátkodobému výpadku spojení. V praxi se tato situace řeší clonou v podobě prodlouženého „kšiltu“ nebo optickým filtrem umístěným před přijímač. Velikost útlumu je závislá na aktuálních meteorologických podmínkách (indexu lomu atmosféry) a na výšce paprsku od zemského povrchu. Bylo zjištěno [3], že OBS vadí i vítr. Rychlost větru pravděpodobně nemá na útlum optického spoje vliv. Jsou to velikosti změny rychlosti větru, tedy turbulence, které mají vliv na útlum OBS. Směrodatná odchylka rychlosti větru za x minutový interval, přičemž x je předmětem intenzivního výzkumu.

Intenzita optické vlny I , která se šíří turbulentní atmosférou, je proměnná. Pro určení intenzity optické vlny je zavedený normalizovaný vztah známý jako scintilační index, který je definován [6]:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (3.1)$$

Scintilační index určuje míru kolísání světelného toku. Pro slabé fluktuace je úměrný vztahu (3.1), a pro silné je nepřímo úměrný dle Rytova vztahu pro prostorovou vlnu:

$$\sigma_I^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (3.2)$$

kde C_n^2 [$\text{m}^{-2/3}$] je strukturní index lomu atmosféry. Tento strukturní index lomu je velmi těžké změřit, závisí na teplotě, síle větru, nadmořské výšce, vlhkosti vzduchu a na atmosférickém tlaku. Pro homogenní turbulentní pole, které se předpokládá v blízkosti zemského povrchu a šíří se jím horizontální povrchová vlna, je strukturní index lomu konstantní [6].

V místech kde jsou větrné turbulence se projeví nehomogenita indexu lomu atmosféry a paprsek se tak může ohýbat. Fyzikální princip vlivu větru na útlum optického spoje je ten, že vítr způsobuje změny směru optického svazku, jehož část popř. celek dopadá mimo aperturu antény přijímače. To popisuje Snellův zákon (Obr. 2): „Uvažujme dvě různá prostředí, jejichž rozhraní je rovinné. Jsou-li indexy lomu těchto dvou prostředí n_1

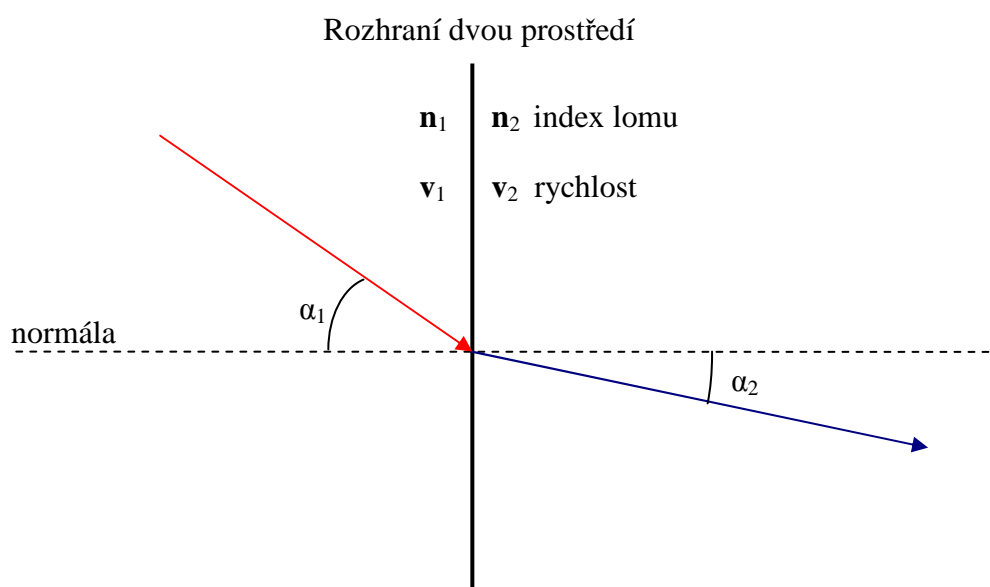
resp. n_2 , a označíme-li úhly dopadajícího resp. lomeného svazku α_1 a α_2 (měřeno ke kolmici rozhraní), pak podle Snellova zákona [9] platí:

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (3.3)$$

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

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.4)$$

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



Obr. 2 – Snellův zákon

4 Výkonové úrovně OBS

Přenos optického bezdrátového spoje se skládá ze dvou matematických modelů. První je závislý na zisku antén vysílače a přijímače (stacionární model) a druhý na okamžitých vlastnostech atmosféry v daném místě spoje (statistický model) který je určen z delších měření stavu atmosféry v daném místě [10].

4.1 Stacionární model spoje

Stacionární model je vyjádřen rovnicí:

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

kde

- $P_{m,RXA}$ je střední hodnota přijatého výkonu.
- $P_{m,TXA}$ je střední hodnota vyzářeného výkonu.
- α_{cel} je celkový útlum prostředím mezi vysílačem a přijímačem.
- γ_{cel} je celkový zisk přijímače.

Celkový útlum prostředím α_{cel} je možné dále rozdělit na útlum šíření volným prostorem α_{12} a na útlum způsobený náhodnými atmosférickými jevy α_{atm} .

$$\alpha_{cel} = \alpha_{12} + \alpha_{atm} [dB] \quad (4.2)$$

Útlum α_{12} je způsoben vzdáleností přijímače a vysílače. Pro daný spoj je tedy konstantní. Útlum atmosférou α_{atm} dále rozdělujeme na útlum způsobený atmosférickými částicemi α_{cast} a útlum způsobený větrnou turbulencí α_{turb} .

$$\alpha_{atm} = \alpha_{cast} + \alpha_{turb} [dB] \quad (4.3)$$

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

$$\alpha_{cast} = \alpha_{1,cast} L_{12} [dB], \quad (4.4)$$

kde

- $\alpha_{1,cast}$ je měrný útlum způsobený atmosférickými částicemi v dB/km.

- L_{12} je vzdálenost vysílače a přijímače v km.

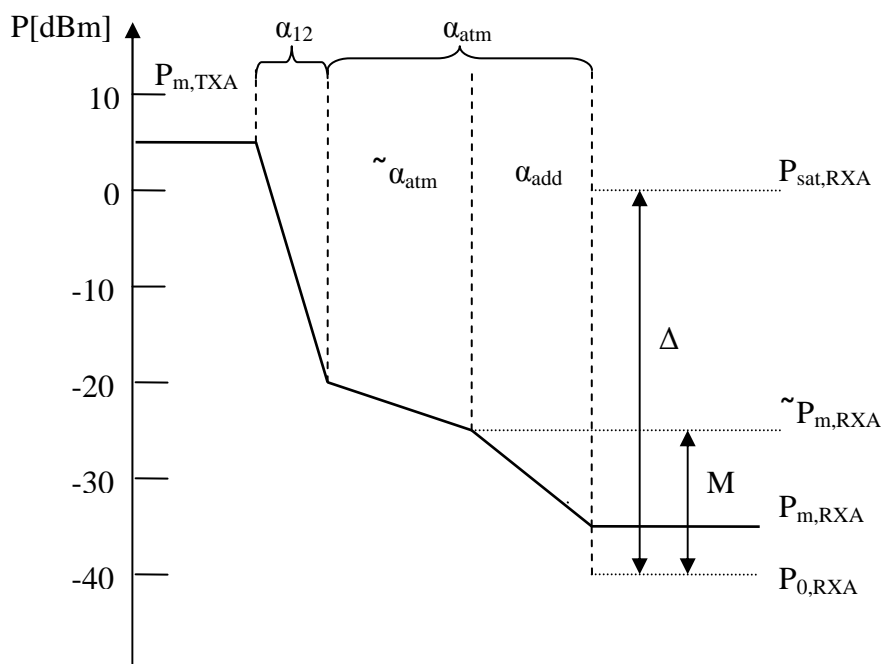
Celkový zisk přijímače γ_{cel} :

$$\gamma_{cel} = \gamma_{RXA} + \gamma_{add} = \left| 20 \log \frac{D_{RXA}}{D_{TXA}} \right| + \gamma_{add} [dB] \quad (4.5)$$

kde

- γ_{RXA} je geometrický zisk.
- γ_{add} je přídavný zisk dán rozdílným rozložením optické intenzity na přijímací a vysílací straně.
- D_{RXA} je průměr apertury (hledí) přijímače.
- D_{TXA} je průměr apertury vysílače.

Z následujícího diagramu (Obr. 3) jsou vidět výkonové úrovně jednotlivých útlumů prostředí [10].



Obr. 3– Výkonové úrovně OBS

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

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

$\sim P_{m,TXA}$ střední hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru

$P_{sat,RXA}$ saturační práh přijímače

$P_{0,RXA}$ citlivostní práh přijímače

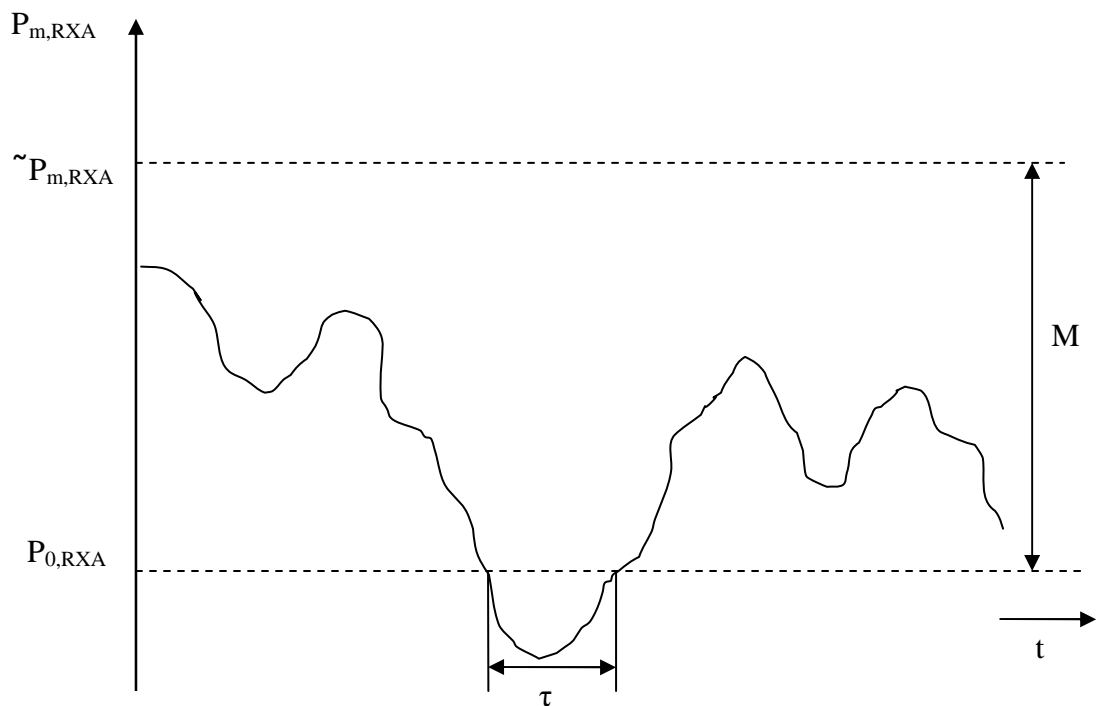
Rozdíl $P_{sat,RXA}$ a $P_{0,RXA}$ se nazývá dynamický rozsah přijímače Δ .

M je rozdíl mezi středním přijatým výkonem pro ideální čistou atmosféru $\sim P_{m,TXA}$ a prahem citlivosti přijímače $P_{0,RXA}$, což je tzv. linková rezerva. Tato rezerva se výrazně podílí na spolehlivosti spoje.

4.2 Statistický model

Tento model zahrnuje řešení spojené se stavem atmosféry, tedy počasí. Na optický spoj mají vliv mlhy, prudké deště, sněžení a větrné turbulence. Tyto jevy jsou zahrnuty v útlumu atmosférou α_{atm} . Pokud však tento útlum bude větší než je linková rezerva spoje, nastane výpadek spoje. To je způsobeno tím že přijatý výkon je nižší než je prahová citlivost přijímače.

Ukázku takové situace vidíme na (Obr. 4), kde je patrné že v čase τ nastává pokles přijatého výkonu pod prahovou citlivost přijímače a nastane výpadek spojení.



Obr. 4 – Příklad průběhu přijatého výkonu (statistický model)

Spolehlivost spoje lze vyjádřit podle následujícího vztahu (4.6).

$$P_{av} = \frac{T - T_{un}}{T} = \frac{T - \sum \tau_i}{T} \cdot 100 [\%] \quad (4.6)$$

Kde τ_i jsou časové úseky jednotlivých výpadků spoje zaznamenané během dostatečně dlouhé periody T [10].

4.3 Vliv větrných turbulencí na OBS

Turbulence atmosféry má za následek mnoho jevů, které způsobují kolísání optického signálu. Na laserový optický svazek šířící se atmosférou tak působí jevy jako jsou: rozptyl (na aerosolech plynů ve vzduchu), absorpce a turbulence. V úvahu připadá pouze rozptyl a turbulence, jelikož díky používaným optickým vlnovým délkám nemá na optický svazek absorpce vliv [6].

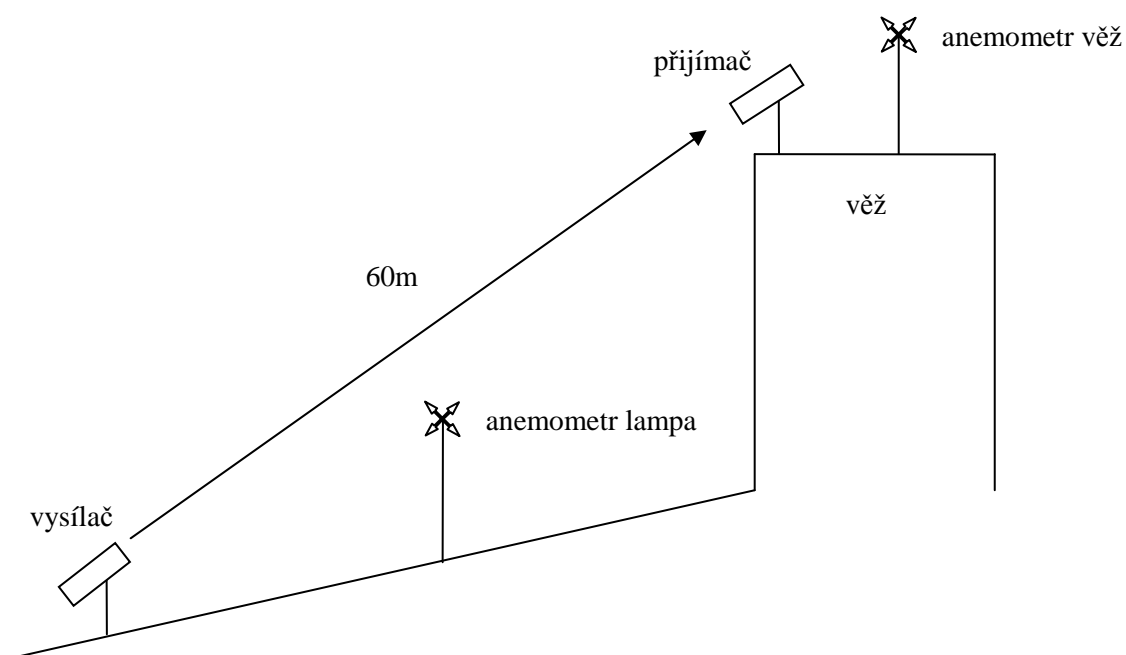
Nejdůležitější účinky atmosférické turbulence na laserový optický spoj jsou: fázový posun, zkreslení, rozšiřování paprsku, potulování a přerozdělování intenzity uvnitř paprsku. Chvilkové přerozdělení intenzity, známe jako turbulence, vyplývá z chaotické výměny toku vzduchu a teplotních gradientů uvnitř optické cesty, způsobené změnou teploty a hustoty vzduchu. Zóny (často označované jako víry) o různých velikostech a s odlišnými hustotami se chovají jako čočky, které rozptýlí paprsek světla z jeho původního směru. Potom některé části paprsku cestují mírně jinou trasou, a na přijímači tak dochází k jejich sčítání s rozdílnou fází. Součet signálů s posunutou fází může být destruktivní či konstruktivní v jakémkoliv daném okamžiku, a má za následek prostorové přerozdělení signálu, následkem čehož se snižuje přijímaný optický výkon [6].

5 Optický spoj na Milešovce

V této práci se zabývám vlivem meteorologických parametrů, které degradují optický signál šířící se volnou atmosférou. Konkrétně analyzuji data z testovacího optického bezdrátového spoje, který je instalován na Milešovce. Tento spoj byl vyroben na VUT Brno a je provozován Ústavem fyziky atmosféry Akademie věd ČR, v.v.i.

Milešovka, nejvyšší hora českého středohoří s nadmořskou výškou 837 m, je ideální místo pro zkoumání atmosférických vlivů na OBS. Převyšuje okolní terén o 400 m a podnebí je zde velmi drsné, jsou zde extrémní teploty, husté mlhy, časté deště a fouká zde silný vítr s průměrnou rychlostí 7,5-10 m/s.

Meteorologická pozorování na Milešovce probíhají od roku 1905. Milešovka je vůbec nejstarší horskou observatoří na území ČR. Vedle hlavní budovy je zde také 18m vysoká rozhledna, kde je umístěno stálé meteorologické pracoviště ÚFA AV ČR. Na obrázku je vidět umístění OBS na Milešovce (Obr. 5).

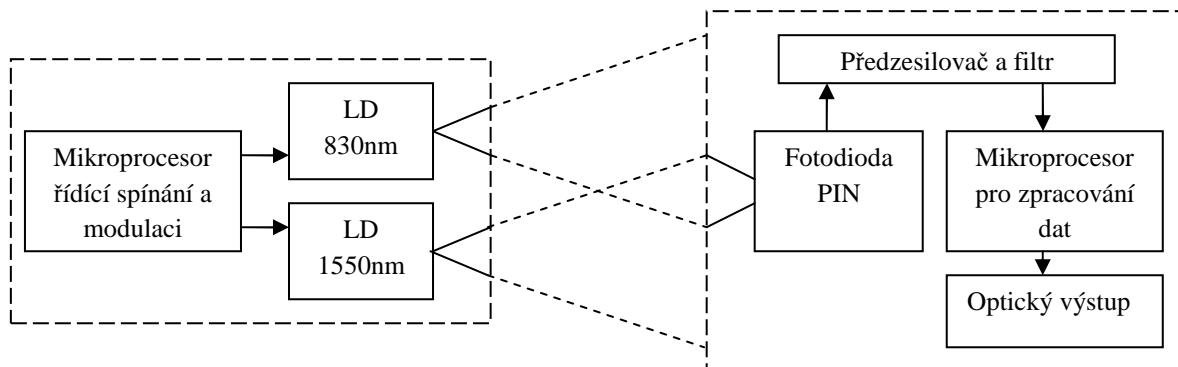


Obr. 5 – OBS na Milešovce

5.1 Optický bezkabelový spoj

Pracuje v simplexním režimu na vzdálenost 60 m. Každých 15 s se střídá vysílací kanál CH1 (1550 nm) a CH2 (830 nm) jedná se tedy o časový multiplex. Vysílač je umístěn u země pod věží a přijímač na vrcholu věže. Azimut spoje je 178°. Tato dosti

svisle orientovaná trasa spoje nám umožňuje zkoumat vlivy různých atmosférických vrstev na přenos optického signálu. Blokové schéma OBS je na následujícím obrázku (Obr. 6).



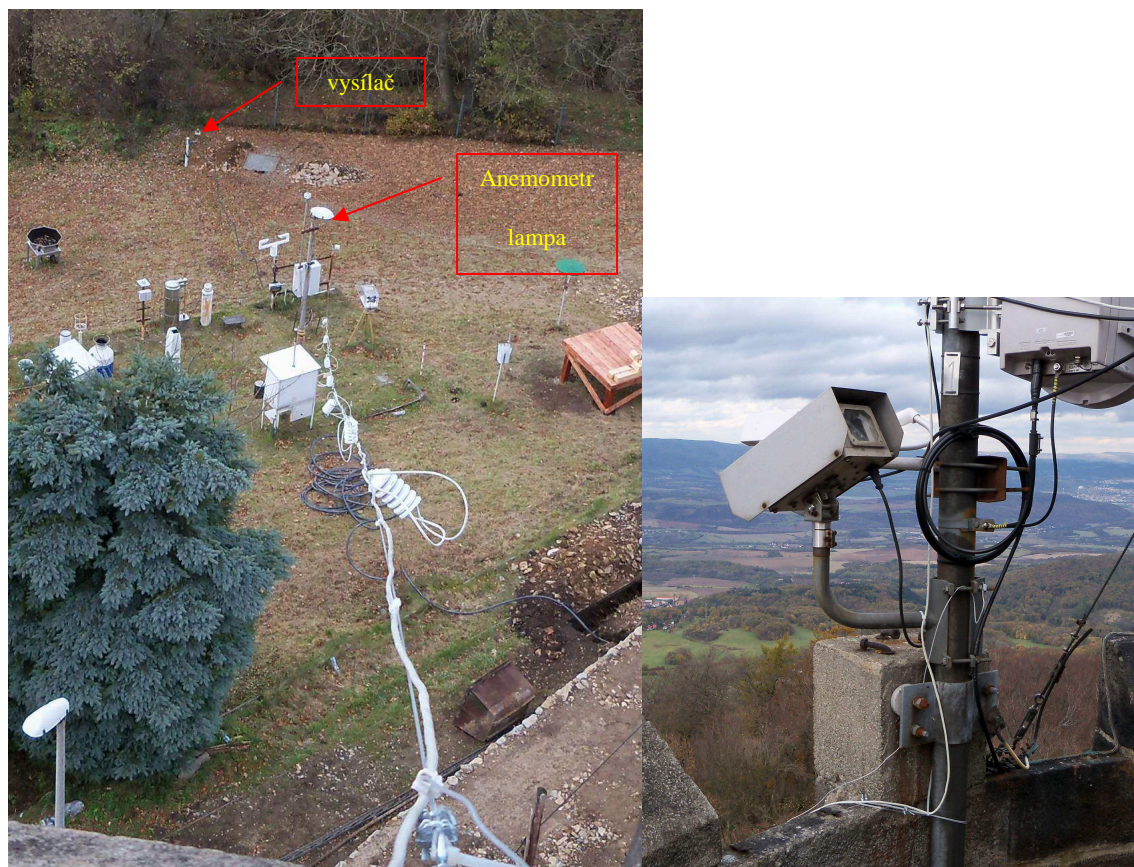
Obr. 6 – Blokové schéma OBS

5.1.1 Vysílač

Hlavice vysílače obsahuje dva oddělené optické kanály, které používají laserové diody o vlnových délkách 830 nm (CH 2) a 1550 nm (CH 1). Obě LD jsou modulované a jejich modulaci a spínání po 15s ovládá mikroprocesor. Laserové paprsky mají divergenci vysílacího paprsku 6 mrad pro 830 nm a 12 mrad pro 1550 nm. Průměr apertur obou vysílacích antén je 23 mm. Pro vzdálenost 60m jsou paprsky u přijímače dostatečně široké na to, aby nebyl přenos citlivý na drobné vychýlení paprsku z původní trasy.



Obr. 7 – Optický vysílač a přijímač (vpravo) - Vyroben na VUT Brno



Obr. 8 – Měřící pracoviště na Milešovce vysílač a přijímač (vpravo)

5.1.2 Přijímač

Přijímač na (Obr.8) (fotografie z místa přijímače vlevo) je tvořen fotodetektorem, předzesilovačem, a kontrolní jednotkou pro ukládání a vyhodnocování naměřených dat. Průměr optické čočky přijímače je 60 mm. Jako fotodetektor byla vybrána InGaAs PIN fotodioda FGA10 pro svojí schopnost reagovat na široké spektrum vlnových délek. Pro zpracování signálu slouží logaritmický detektor s dynamickým rozsahem 90 dB. Použité optické zdroje, detektor a jejich technické parametry jsou v následující tabulce (Tab. 3).

Tab. 3 – Technické parametry OBS

Vysílač	CH 1	CH 2
Laserová dioda	RLT1550 - 15G	DL5032
Vlnová délka λ	1550 nm	830 nm
Vyzářený výkon $P_{m, TXA}$	5 mW	5 mW
Divergence svazku φ_t	12 mrad	6 mrad
Apertura vysílače D_{TXA}	23 mm	23 mm
Přijímač		
Fotodioda	PIN InGaAs FGA 10	
Apertura přijímače D_{RXA}	60 mm	
Citlivost přijímače	0,94 A/W	0,2 A/W
Ekvivalentní šumový výkon	$2,5 \times 10^{-14}$ W/Hz (900nm)	

5.2 Anemometry

Pro měření rychlosti větru a větrných turbulencí slouží dva ultrazvukové anemometry USA-1 (Ultrasonic Anemometer) značky Metek. Tyto anemometry měří s větší přesností než miskové anemometry díky absenci pohyblivých částí a jsou schopny „on line“ vypočítat parametry turbulence větru a vyhodnocovat kompletní 3D informace o pohybu větru. Přímé měření lze rozšířit o distribuce příslušných turbulentních proměnných jako jsou: rozptyl, kovariance, teplotní a pohybové toky a umožňuje také „akustické“ odvození teploty.



Obr. 9 – Ultrazvukový anemometr USA-1

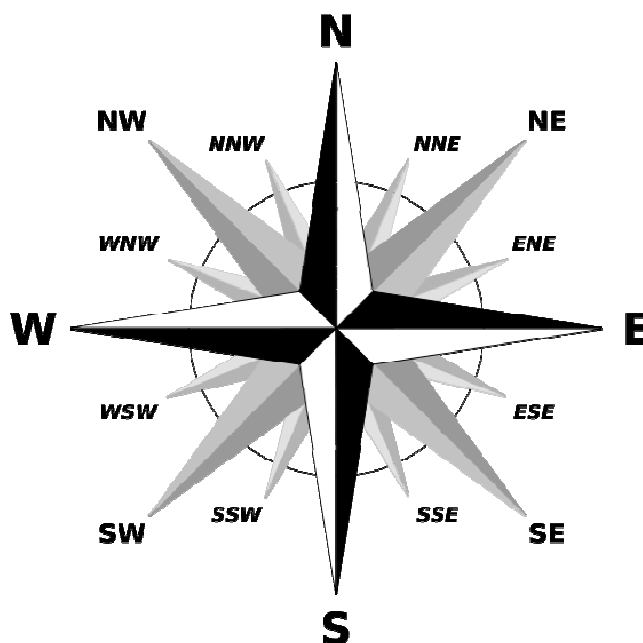
Princip funkce anemometru spočívá v přenosu krátkých ultrazvukových pulzů mezi dvěma sondami ve třech různých směrech (osách větru x,y,z), které jsou střídavě používány jako vysílací a přijímací jednotka a jsou od sebe vzdáleny 175 mm. Cestovní doba pulzu je dána rychlostí zvuku. Skládá se z rychlosti šíření zvuku v klidné atmosféře a rychlostí větru rovnoběžného s trajektorií ultrazvukového pulzu. Pokud se vzduch začne mezi sondami pohybovat, změní se i cestovní doba pulzu. Rychlost zvuku nezávisí jen na teplotě ale také na vlhkosti zvuku, proto se měřená teplota reprezentuje jako virtuální teplota, která je potřebná pro většinu výzkumů vrstev atmosféry. Odchylka od skutečné teploty je asi $0,25^{\circ}\text{C}$. Zvukové sondy jsou umístěny v aerodynamicky tvarované skříni poskytující výrazné snížení zkreslení průtoku okolního vzduchu a jsou v případě Milešovky vybaveny 50W topením, které jim umožňuje pracovat i v extrémních klimatických podmínkách [5].

6 Teorie větru a větrných turbulencí

„Vítej 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 5m/s a více)“ [8, s.3].

6.1 Směr větru

Směr větru, tedy odkud vítr vane se udává pomocí azimutu (0-360°), nebo jak je v meteorologii častější podle světových stran a to tzv. větrnou růžicí (Obr. 10), kde jsou světové strany popsány anglickými názvy N–north (sever), E–east (východ), S–south (jih), W–west (západ) a jejich kombinace jako mezisměry pro přesnější určení.



Obr. 10 – Větrná růžice

6.2 Větrné turbulence

Z delších měření vyplývá, že rychlost a směr větru převážně v přízemních vrstvách atmosféry prodělává rychlé neperiodické změny. Tyto změny jsou způsobeny vznikem, přesunem a zánikem složek všeobecné cirkulace atmosféry a dále jsou vyvolány turbulentními charakteristikami proudění. V reálné atmosféře má proudění převážně turbulentní charakter. Pro takové proudění jsou typické turbulentní pulzace rychlosti větru [3].

7 Popis dat z měřicího pracoviště Milešovka

Na observatoři Milešovka je vytvořena malá lokální síť, kde jsou připojeny všechny měřicí zařízení k serveru v hlavní budově, buď přímo na rozhraní ethernet, nebo jiným vhodným konektorem. Server je připojen k internetu a ukládá data z měřících přístrojů, jelikož má veřejnou IP adresu, můžeme se k němu připojit přes FTP a stahovat z něj všechna potřebná data.

7.1 Surová data

Data z útlumu OBS vypadají takto:

```
2010 08 01 00 00 09 CH 1 A 17.55 D 0.10 G 0 256
2010 08 01 00 00 25 CH 2 A 16.02 D 0.07 G 0 1793
2010 08 01 00 00 39 CH 1 A 17.54 D 0.08 G 0 2048
2010 08 01 00 00 55 CH 2 A 16.03 D 0.07 G 0 1795
2010 08 01 00 01 09 CH 1 A 17.53 D 0.08 G 0 2050
2010 08 01 00 01 25 CH 2 A 16.04 D 0.06 G 0 1538
2010 08 01 00 01 39 CH 1 A 17.53 D 0.08 G 0 2048
2010 08 01 00 01 55 CH 2 A 16.06 D 0.08 G 0 2048
```

Prvních 6 sloupců určuje čas: rok, měsíc, den, hodina, minuta, vteřina. Dále sedmý sloupec CH1 nebo CH2 určuje, na které vlnové délce se vysílá, A je průměrná 15-ti vteřinová hodnota útlumu OBS, D je směrodatná odchylka útlumu za 15 s interval, a G je servisní veličina. Konkrétně první řádek nám říká, že se jedná o 1.červenec 2008, 00h:00m:09s po půlnoci a naměřený útlum byl 17.55 dB. Útlum na OBS se ukládá každý den do nového textového souboru, a jeden den obsahuje typicky 5754 řádků dat.

Podobně jako data útlumu se ukládají i data z anemometru, anemometr díky rychle měnící se povaze rychlosti a směru větru měří desetkrát za sekundu, což znamená, že objem těchto dat je mnohonásobně větší. Na Milešovce jsou anemometry dva. První je umístěn zhruba v první třetině vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem a je v dostatečné blízkosti dráhy OBS. Pracovní název je anemometr-Lampa, jelikož je umístěn na lampě.

Druhý výrazně méně korelovaný anemometr s útlumem na OBS je umístěn na věži, z toho název anemometr-Věž. Parametry větru změřené anemometrem na věži jsou ve skutečnosti mimo dráhu OBS, ale jsou to hodnoty v blízkosti přijímače, které jsou také předmětem zkoumání.

Ukázka záznamu dat z anemometru je zde:

100801000000 Střední čas (běžný čas) M:x = 15 y = 1 z = -1 t = 1673
 100801000000 Střední čas (běžný čas) M:x = 16 y = 4 z = 6 t = 1675
 100801000000 Střední čas (běžný čas) M:x = 10 y = -4 z = -4 t = 1668
 100801000000 Střední čas (běžný čas) M:x = 25 y = -8 z = 0 t = 1676
 100801000000 Střední čas (běžný čas) M:x = 18 y = -2 z = -7 t = 1673
 100801000000 Střední čas (běžný čas) M:x = 10 y = -13 z = -4 t = 1678
 100801000000 Střední čas (běžný čas) M:x = 23 y = -8 z = 1 t = 1665
 100801000000 Střední čas (běžný čas) M:x = 16 y = -1 z = -10 t = 1672
 100801000000 Střední čas (běžný čas) M:x = 18 y = -2 z = 3 t = 1667

Zde prvních dvanáct hodnot je čas: rok, měsíc, den, hodina, minuta, sekunda, dále formát času, tři ortogonální složky rychlosti větru x,y,z, v [cm/s] kde osa x je orientována na sever a t sonická teplota. Data se stejně jako u útlumu ukládají do textového souboru. A jeden den tak obsahuje cca 864169 řádků.

7.2 Upravená data

Ve své práci se zabývám zkoumáním vlivu větrných parametrů na útlum OBS, proto pro další zpracování používám upravená data, která zpracovali RNDr. Jaroslav Svoboda, CSc a RNDr. Zuzana Chládová z ÚFA AV ČR do minutových průměrů. Podmínka pro počítání průměrů je, že musí být k dispozici alespoň 80 % hodnot v daném intervalu a kde je několik dalších vypočítaných veličin souvisejících s větrem jako turbulentní energie, intenzita turbulence, průměrná sonická teplota a další. Celkem je v jednom řádku 28 veličin.

Ukázka prvních devíti sloupců zpracovaných dat:

31622460 1 0 203. 0.61 0.39 0.5862E+00 -0.1533E+00 0.7763E-01
 31622520 2 0 221. 0.64 0.32 0.6404E+00 0.3829E-01 0.6418E-01
 31622580 3 0 226. 0.53 0.32 0.5207E+00 0.7192E-01 0.1345E+00
 31622640 4 0 228. 0.47 0.51 0.4640E+00 0.8029E-01 0.1527E+00

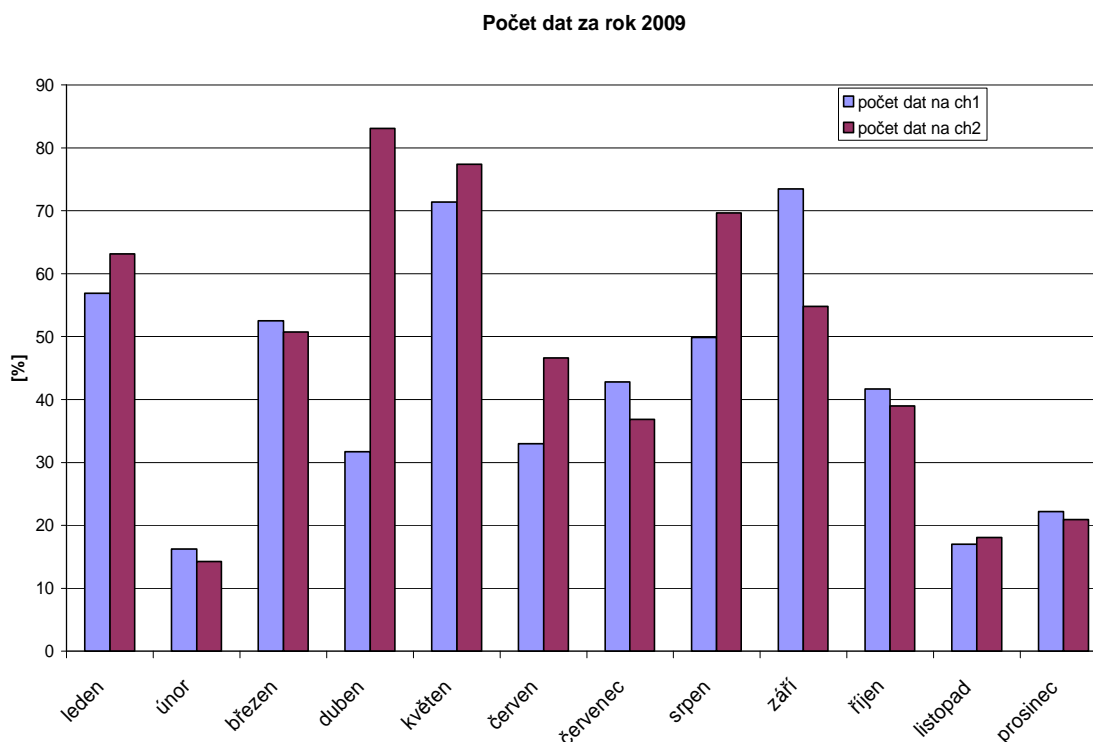
První sloupec je počet vteřin od začátku roku 2008, druhý sloupec je pořadí minuty od půlnoci toho dne, hodina dne, průměrný směr větru 2D, průměrná horizontální rychlost, 2D intenzita turbulence, MU-průměrná složka větru U(x), MV- průměrná složka větru V(y) a MW- průměrná vertikální složka větru W(z). Další sloupce dál neuvádím. Definice veličin je v části 8.1.

8 Výsledky

Ve své práci se zabývám analýzou vybraných dat za rok 2009 v prostředí programu MatLab, zpracovával jsem i data do poloviny roku 2010, ale těchto dat je ve srovnání s rokem předchozím méně. Proto jsem se zaměřil na rok 2009.

Aby moje výsledky nebyly ovlivněny jinými meteorologickými jevy, (hlavně útlum způsobený mlhou), který má na OBS největší vliv, poskytl mi kolega Bc. Vladimír Brázda (UPa FEI) data z jeho předchozího výzkumu, kde byla z útlumových dat vyloučena mlha, na základě dohlednosti. Tím je zajištěno, že zkoumaný útlum nebude ovlivněn mlhou.

Pokud chci analyzovat vztah mezi dvěma veličinami, používám statistickou metodu, která se nazývá korelační analýza. Pro korelaci je třeba mít dostatek dat za zpracovávané období. Může totiž dojít k výpadku OBS, nebo výpadku anemometru. Na následujícím grafu (Obr. 11) je zobrazen průnik, kdy měřily oba přístroje, a z dat útlumu byla vyloučena mlha.



Obr. 11 - Graf počtu dat

Z grafu je vidět, že pro korelaci dat je vhodné uvažovat pouze měsíce: květen, září na CH1 a duben, květen, srpen na CH2.

8.1 Korelační tabulky

Koreloval jsem všechny větrné, popř. s větrem související dopočítané veličiny s útlumem na OBS. Zde uvádím vztahy pro výpočet větrných parametrů jako intenzita turbulence 3D (I_{3D}), turbulentní energie (E_T), vertikální turbulentní tok tepla (W_Z) a intenzita turbulence 2D (I_{2D}) [7].

$$I_{3D} = \frac{\sum \sqrt{(u - \bar{u})^2 + (v - \bar{v})^2 + (w - \bar{w})^2}}{\sqrt{N} * \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}} [-] \quad (8.1)$$

$$E_T = 0,5 * \frac{1}{N} \sum ((u - \bar{u})^2 + (v - \bar{v})^2 + (w - \bar{w})^2) [m^2 * s^{-2}] \quad (8.2)$$

$$W_Z = \frac{1}{N} \sum ((w - \bar{w}) * (T - \bar{T})) [m * ^\circ C * s^{-1}] \quad (8.3)$$

$$I_{2D} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (g - \bar{g})^2}}{\bar{g}} [-] \quad (8.4)$$

$$g = \sqrt{(u^2 + v^2)} [m * s^{-1}] \quad (8.5)$$

Legenda ke korelačním tabulkám je v následující tabulce (Tab. 4).

Tab. 4 – Legenda ke korelační tabulce

Korelace útlum 2009 anemometr-Lampa	
1. Průměrný směr větru [°]	15. Směrodatná odchylka W [m/s]
2. Průměrná horizontální rychlost větru [m/s]	16. Směrodatná odchylka T [°C]
3. 2D intenzita turbulence [-]	17. smd M (miskový anemometr) [m/s]
4. MU = průměrná složka větru U [m/s]	18. smd R_ox (okamžitá rychlost větru) [m/s]
5. MV = průměrná složka větru V [m/s]	19. smd R_oy (okamžitá rychlost větru) [m/s]
6. MW = průměrná složka větru W (vertikální) [m/s]	20. Směrodatná odchylka směru větru [°]
7. MT = průměrná sonická teplota [°C]	21. Průměrná 3D rychlost [m/s]
8. MM miskový anemometr [m/s]	22. (smd W)/(smd R_ox) [-]
9. Vertikální turbulentní tok tepla [m ³ C/s]	23. (smd R_oy)/(smd R_ox) [-]
10. Vertikální turbulentní energie [m ² /s ²]	24. MW/(MR_ox) [-]
11. Turbulentní energie [m ² /s ²]	25. (smd R_ox)/(MR_ox) [-]
12. Horizontální turbulentní energie [m ² /s ²]	26. (smd R_oy)/(MR_ox) [-]
13. Směrodatná odchylka U [m/s]	27. (smd W)/(MR_ox) [-]
14. Směrodatná odchylka V [m/s]	28. 3D intenzita turbulence [-]

Pozn.: Směrodatná odchylka (smd), řádky 22 – 27 jsou poměrové veličiny v rotované soustavě souřadnic a vyjadřují: 22 – podíl směrodatných odchylek dvou různých směrů větru, nebo také „kmitání“ osy z vůči ose x, 23 – kmitání osy y vůči ose x,

24 – náklon (úhel) průměrné rychlosti složky větru z od průměrné rychlosti složky větru x,
 25, 26, 27 – příspěvek k turbulentní energii od osy x, y, z, tedy jak každá ze složek větru
 přispívá k celkové turbulentní energii.

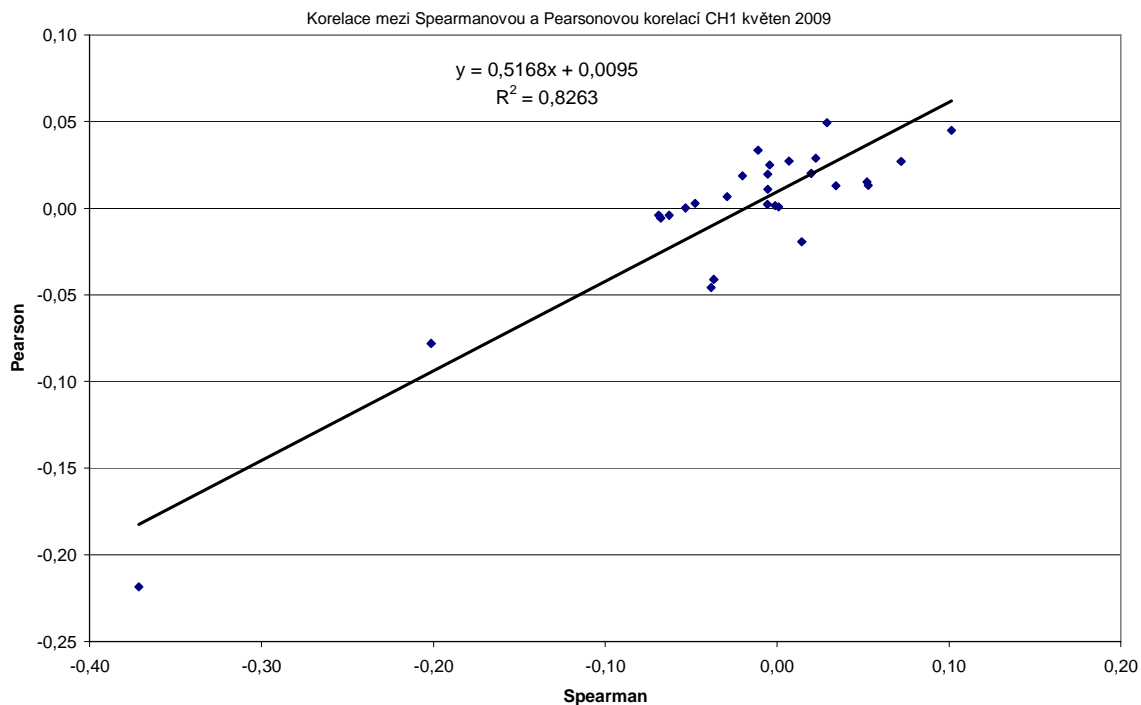
První sloupec popisuje parametry větru, které koreluji s útlumem. Příslušná čísla 1 až 28 odkazují na parametry pospané v (Tab.4). S - znamená Spearmanův korelační koeficient, P – Pearsonův korelační koeficient.

Tab. 5 – Korelační tabulka leden-květen na CH1 za rok 2009

CH1	leden		únor		březen		duben		květen	
	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P
1	-0,01	-0,07	-0,05	-0,01	0,19	0,18	-0,05	-0,04	0,07	0,03
2	-0,15	-0,04	0,16	0,06	0,20	0,10	0,00	-0,02	0,05	0,01
3	0,22	0,22	-0,02	0,01	0,04	0,08	0,06	0,06	-0,01	0,03
4	-0,22	-0,24	0,14	-0,04	0,11	-0,09	-0,07	-0,02	-0,05	0,00
5	0,14	0,11	0,19	0,09	0,20	0,15	-0,11	-0,04	0,10	0,04
6	-0,04	-0,01	0,14	0,03	0,20	0,12	-0,11	-0,07	0,03	0,05
7	-0,27	-0,10	0,74	0,83	-0,18	-0,45	-0,48	-0,44	-0,37	-0,22
8	-0,11	-0,01	0,14	0,06	0,20	0,10	0,02	-0,01	0,03	0,01
9	0,32	0,32	-0,06	-0,10	0,04	0,08	0,07	0,03	0,00	0,02
10	-0,11	-0,12	-0,14	-0,04	-0,11	-0,05	-0,02	0,00	0,01	-0,02
11	0,10	0,13	0,11	0,12	0,17	0,07	0,08	0,03	0,00	0,00
12	0,09	0,13	0,11	0,13	0,18	0,07	0,08	0,03	0,00	0,00
13	0,10	0,18	0,08	0,05	0,15	0,10	0,10	0,03	-0,02	0,02
14	0,09	0,13	0,13	0,07	0,19	0,12	0,06	0,04	0,02	0,02
15	0,12	0,17	0,11	0,04	0,16	0,10	0,10	0,04	-0,01	0,02
16	0,11	0,01	-0,13	0,07	-0,12	-0,04	0,11	0,09	-0,20	-0,08
17	0,07	0,13	0,13	0,08	0,19	0,12	0,06	0,02	0,02	0,03
18	0,08	0,15	0,11	0,07	0,18	0,12	0,07	0,03	0,01	0,03
19	0,11	0,16	0,11	0,05	0,17	0,11	0,09	0,05	-0,01	0,01
20	0,24	0,20	-0,12	-0,04	0,00	0,01	0,10	0,08	-0,07	-0,01
21	-0,15	-0,04	0,16	0,06	0,20	0,10	0,00	-0,02	0,05	0,02
22	0,07	0,03	0,00	0,09	-0,07	-0,07	0,06	0,03	-0,04	-0,04
23	0,06	0,03	-0,01	0,04	0,00	-0,01	0,04	0,03	-0,04	-0,05
24	0,08	0,04	-0,16	-0,07	0,07	0,02	-0,08	-0,02	-0,01	0,00
25	0,23	0,11	-0,08	-0,02	0,01	-0,02	0,09	0,03	-0,05	0,00
26	0,24	0,11	-0,08	-0,02	0,01	-0,02	0,10	0,03	-0,07	0,00
27	0,26	0,12	-0,09	0,00	-0,02	-0,03	0,10	0,02	-0,06	0,00
28	0,26	0,22	-0,10	0,02	-0,01	-0,02	0,09	0,06	-0,03	0,01

Z této tabulky můžeme vzít v úvahu pouze korelační koeficienty z měsíce května, kde byl k dispozici dostatek dat. V ostatních měsících je málo dat, proto jejich korelace nejsou směrodatné. Největší korelace útlumu je s průměrnou sonickou teplotou a to -0,37 Spearman, a -0,22 Pearson. Záporné znaménko u korelačního koeficientu značí, že závislost mezi veličinami je nepřímo úměrná. Oproti ostatním řádkům je ještě výrazná korelace se směrodatnou odchylkou sonické teploty (smd T) -0,20 S. Na spodním grafu

(Obr. 12) je srovnání použitých korelací, kde je přidána spojnice trendů a zobrazen vzorec regresní analýzy s korelačním koeficientem. Velmi vysoká korelace je v měsíci únor, zde bude ještě třeba hlubší analýzy, ale zatím je v tomto měsíci málo dat.



Obr. 12 – Graf korelace S a P na CH1 za květen 2009

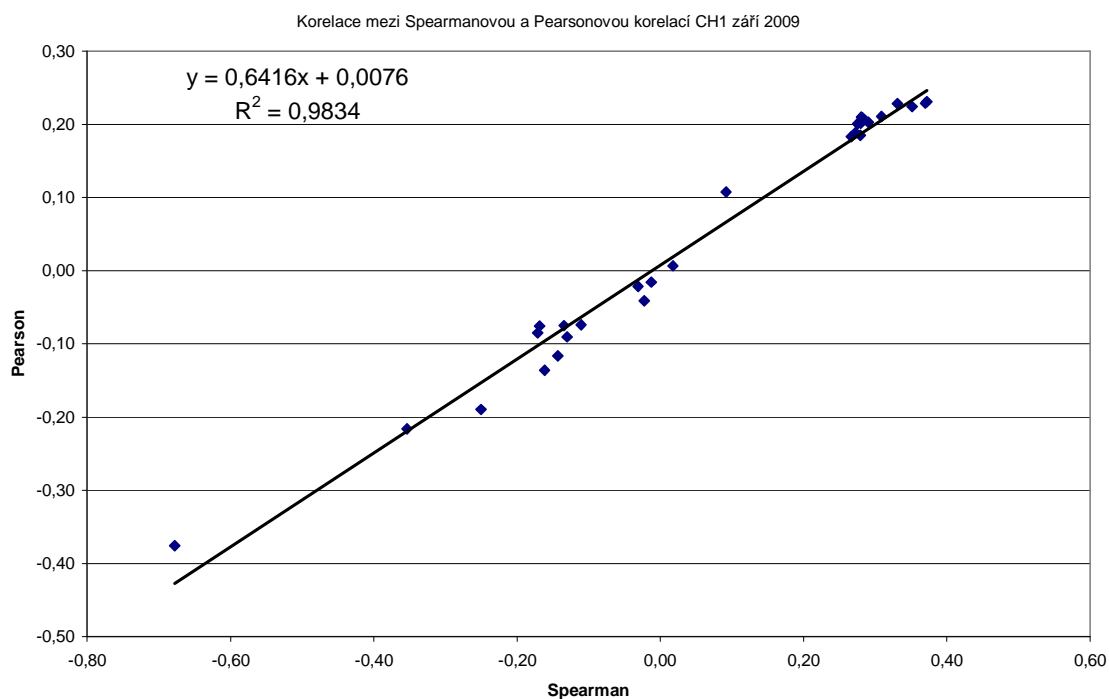
Z předchozího grafu vyplývá, že obě dvě korelační analýzy lze použít pro zpracování dat.

Nyní se podíváme na další měsíce roku 2009 na CH1 (Tab. 6), s přidaným sloupcem ročního průměru korelací typu S a P.

Tab. 6 – Korelační tabulka srpen-listopad na CH1 za rok 2009

CH1	srpen		září		říjen		listopad		prosinec		Roční průměr	
	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P
1	-0,09	0,04	0,09	0,11	0,20	0,06	0,39	0,48	-0,23	-0,51	0,03	0,01
2	0,09	0,06	0,37	0,23	0,12	0,11	-0,08	-0,13	-0,58	-0,56	0,02	-0,01
3	-0,20	-0,09	-0,02	-0,04	-0,13	0,04	0,37	0,33	0,52	0,60	0,07	0,11
4	0,02	0,07	0,02	0,01	-0,37	-0,59	-0,36	-0,47	-0,60	-0,54	-0,10	-0,15
5	-0,01	0,05	0,33	0,23	0,13	0,07	0,36	0,23	-0,24	-0,30	0,10	0,06
6	-0,08	0,06	0,28	0,20	-0,01	0,20	-0,07	-0,09	-0,53	-0,51	-0,01	0,00
7	-0,19	-0,02	-0,68	-0,38	-0,47	-0,54	-0,50	-0,42	-0,51	-0,74	-0,30	-0,22
8	0,04	0,05	0,35	0,22	0,09	0,14	-0,04	-0,09	-0,54	-0,50	0,04	0,00
9	-0,29	-0,10	-0,01	-0,02	0,25	0,19	0,25	0,36	0,47	0,51	0,10	0,12
10	-0,03	-0,04	-0,25	-0,19	-0,03	0,05	-0,25	-0,07	-0,07	0,12	-0,11	-0,04
11	-0,07	0,04	0,28	0,21	0,02	0,14	0,35	0,14	0,06	-0,13	0,12	0,07
12	-0,07	0,03	0,28	0,21	0,03	0,16	0,34	0,15	0,04	-0,14	0,12	0,07
13	-0,07	0,02	0,28	0,18	0,03	0,23	0,28	0,15	0,03	-0,03	0,10	0,09
14	-0,07	0,01	0,28	0,20	0,03	0,15	0,38	0,23	0,06	-0,10	0,13	0,08
15	-0,05	0,03	0,27	0,19	-0,04	0,10	0,35	0,18	0,11	-0,01	0,12	0,08
16	-0,24	-0,14	-0,35	-0,22	0,17	0,14	0,32	0,33	0,60	0,74	0,02	0,08
17	-0,04	0,02	0,31	0,21	0,03	0,14	0,33	0,18	-0,05	-0,15	0,11	0,08
18	-0,06	0,02	0,29	0,20	0,03	0,16	0,34	0,19	0,01	-0,09	0,11	0,08
19	-0,08	0,01	0,27	0,18	0,03	0,21	0,34	0,21	0,07	-0,05	0,12	0,09
20	-0,22	-0,11	-0,16	-0,14	-0,12	0,06	0,35	0,31	0,57	0,71	0,05	0,10
21	0,07	0,06	0,37	0,23	0,11	0,12	-0,08	-0,13	-0,58	-0,56	0,03	-0,01
22	0,04	0,02	-0,13	-0,08	-0,19	-0,18	0,03	-0,02	0,25	0,32	0,00	0,01
23	-0,03	-0,03	-0,13	-0,09	0,01	0,04	0,12	0,08	0,16	0,23	0,01	0,02
24	-0,12	-0,02	-0,03	-0,02	-0,16	-0,01	0,07	0,03	-0,10	0,03	-0,05	0,00
25	-0,22	-0,05	-0,11	-0,07	-0,14	0,00	0,36	0,32	0,56	0,23	0,06	0,05
26	-0,22	-0,05	-0,17	-0,09	-0,11	0,00	0,35	0,27	0,56	0,26	0,05	0,05
27	-0,19	-0,04	-0,17	-0,08	-0,23	-0,04	0,35	0,25	0,60	0,22	0,04	0,04
28	-0,20	-0,08	-0,14	-0,12	-0,14	0,01	0,38	0,30	0,58	0,59	0,06	0,09

Zaměřím se na září kde je nejvíce dat CH1 a výborná korelace sonické teploty s útlumem a to 68 % S, a 38 % P. Dobrá je zde korelace i s průměrnou 3D rychlostí větru a také s průměrnou horizontální rychlostí. Pokud srovnám korelační koeficienty s jinými měsíci. Mohu říci, že září je nejlépe korelovaným měsícem na CH1 za rok 2009. Je zde i patrná dobrá korelace 0,28 s turbulentní energií (dříve favorizovanou veličinou způsobující útlum na OBS), a také se směrodatnými odchylkami všech složek rychlosti větru. Za roční průměr korelačních koeficientů je opět nejvyšší s průměrná sonická teplota -0,30 S a -0,22 P.



Obr. 13 – Graf korelace S a P na CH1 za září 2009

Na horním obrázku (Obr. 13) je vidět velmi dobrá korelace mezi použitými korelačními metodami a to 98 %.

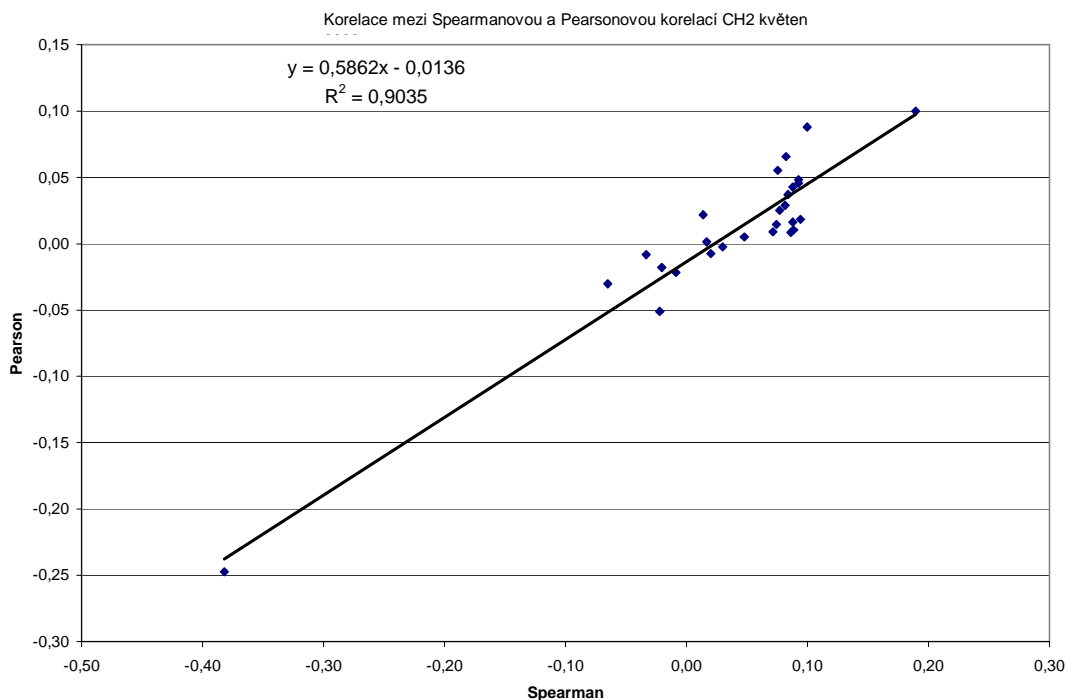
Dále uvádím korelační tabulku pro kanál 2 (CH2) zaměřím se hlavně na zajímavé měsíce: duben, květen a srpen, kde je dostatek dat. A dále sloupec s průměrnou hodnotou korelačních koeficientů za stanovené období duben – srpen 2009.

Tab. 7 – Korelační tabulka duben-srpen na CH2 za rok 2009

CH2	duben		květen		červen		červenec		srpen		průměr 04-08	
	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P
1	-0,06	-0,05	-0,02	-0,02	0,02	0,05	-0,06	-0,03	0,03	0,07	-0,02	0,00
2	0,04	-0,03	0,02	-0,01	0,28	0,20	-0,06	0,00	0,13	0,05	0,08	0,04
3	0,02	0,06	0,10	0,09	0,18	0,14	0,02	0,01	0,08	0,01	0,08	0,06
4	-0,14	-0,05	0,01	0,02	0,28	0,18	0,07	0,05	0,03	0,07	0,05	0,05
5	-0,03	-0,05	0,02	0,00	0,26	0,20	-0,08	0,00	0,16	0,08	0,07	0,05
6	-0,03	-0,03	0,08	0,06	0,30	0,17	-0,02	-0,01	0,18	0,11	0,10	0,06
7	-0,59	-0,38	-0,38	-0,25	-0,39	-0,25	-0,05	0,03	-0,05	0,03	-0,29	-0,16
8	0,04	-0,04	0,05	0,01	0,33	0,22	-0,06	0,00	0,15	0,05	0,10	0,05
9	0,09	0,09	0,19	0,10	0,11	0,03	-0,01	-0,03	0,13	0,06	0,10	0,05
10	-0,07	-0,01	-0,07	-0,03	-0,27	-0,18	0,01	-0,01	-0,15	-0,06	-0,11	-0,06
11	0,04	-0,02	0,09	0,01	0,38	0,19	-0,04	0,00	0,17	0,07	0,13	0,05
12	0,04	-0,02	0,09	0,01	0,37	0,18	-0,05	0,00	0,17	0,07	0,12	0,05
13	0,04	-0,01	0,09	0,05	0,37	0,24	-0,05	-0,01	0,17	0,06	0,12	0,07
14	0,03	-0,02	0,08	0,03	0,37	0,23	-0,04	0,00	0,16	0,06	0,12	0,06
15	0,05	0,00	0,09	0,05	0,37	0,25	-0,03	0,00	0,18	0,07	0,13	0,07
16	0,03	0,09	-0,03	-0,01	0,07	-0,03	0,03	0,06	-0,08	-0,03	0,00	0,02
17	0,05	-0,01	0,08	0,04	0,36	0,23	-0,05	0,00	0,17	0,06	0,12	0,06
18	0,05	-0,02	0,09	0,04	0,37	0,24	-0,04	0,00	0,18	0,06	0,13	0,06
19	0,02	-0,02	0,08	0,03	0,37	0,23	-0,05	0,00	0,16	0,06	0,12	0,06
20	0,00	0,05	0,08	0,07	0,10	0,05	0,04	0,02	0,00	-0,01	0,04	0,04
21	0,04	-0,03	0,03	0,00	0,29	0,21	-0,06	0,00	0,14	0,06	0,09	0,05
22	-0,01	0,03	-0,01	-0,02	-0,11	-0,09	0,02	0,02	-0,04	0,02	-0,03	-0,01
23	-0,03	0,00	-0,02	-0,05	-0,07	-0,08	-0,01	-0,01	-0,08	-0,03	-0,04	-0,03
24	-0,03	0,03	0,07	0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,01	0,06	0,03	0,02	0,01
25	0,01	0,02	0,09	0,02	0,14	0,03	0,03	0,01	0,03	-0,01	0,06	0,01
26	-0,01	0,02	0,07	0,01	0,09	0,02	0,03	0,01	-0,02	-0,02	0,03	0,01
27	0,01	0,02	0,09	0,02	0,08	0,02	0,04	0,01	0,01	-0,01	0,05	0,01
28	0,00	0,03	0,11	0,07	0,08	0,02	0,03	0,01	-0,01	-0,03	0,04	0,02

Z této tabulky je vidět výborná korelace se sonickou teplotou v měsíci dubnu. Korelační koeficient je -0,58 S a -0,38 P. Ostatní korelace v dubnu jsou velmi malé hodnoty, až na průměrnou složku větru U která je -0,14, nedosahují hodnoty ani přes 0,1. Zdá se, že žádná jiná veličina není tak dobře korelována jako průměrná sonická teplota (ST). V květnu je opět dobrá korelace se ST a to -0,38 S a -0,25 P. Ostatní hodnoty korelace jsou velmi malé.

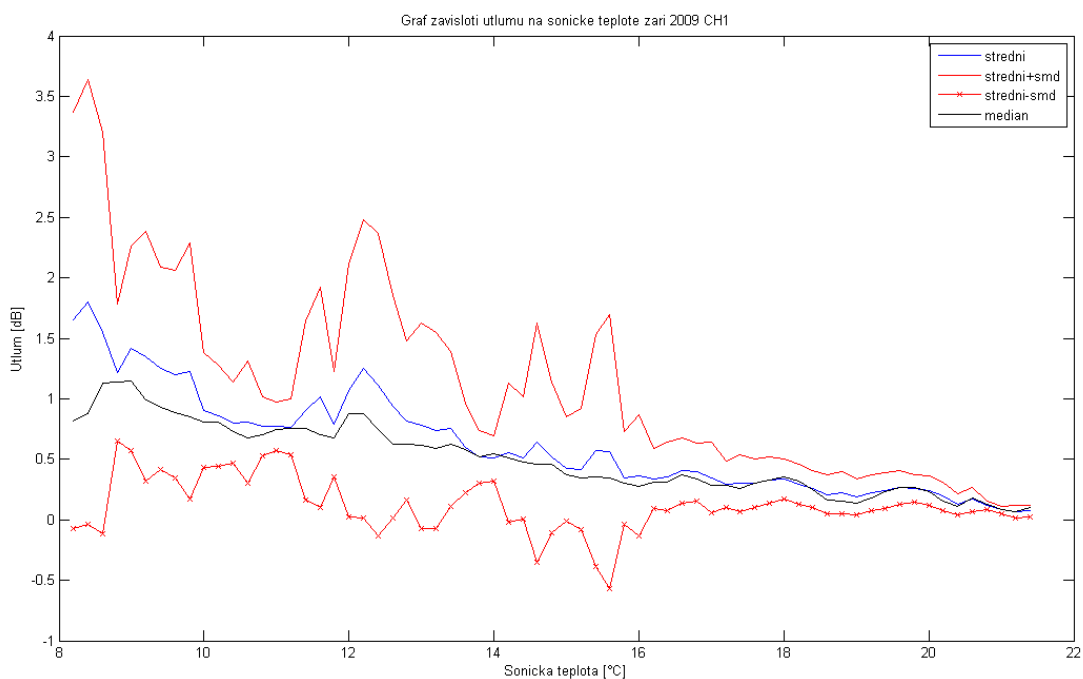
Pokud se podíváme na srpen na CH2, zjistíme že korelace se ST je velmi malá 0,05 S a 0,03 P. Jsou zde ale výrazné korelace s řádky 5,6 což jsou průměrné složky rychlosti větru V a W (vertikální) a řádky 8-15 ze kterých největší korelace představují E_T (turbulentní energie) 0,17 S a smd W 0,18 S. Opět nejvyšší průměrná korelace za měsíce duben – srpen je s ST a to -0,29 S a -0,16 P.



Obr. 14 – Graf korelace S a P na CH2 za květen 2009

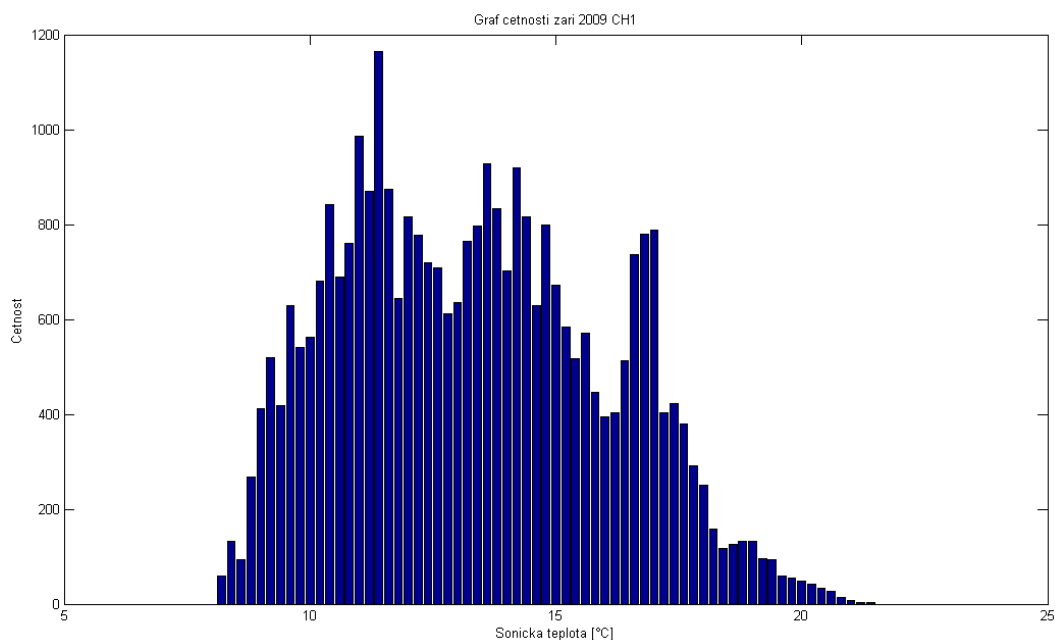
8.2 Grafy průběhů

Pro zjištění závislosti mezi sonickou teplotou a útlumem OBS jsem vykreslil následující grafy. Osa x - sonická teplota je rozdělena po $0,2^\circ\text{C}$ a v těchto intervalech je vypočítaná střední hodnota útlumu, směrodatná odchylka a medián. Na prvním grafu (Obr. 15) je zobrazen průběh útlumu OBS v závislosti na sonické teplotě za měsíc září na CH1.



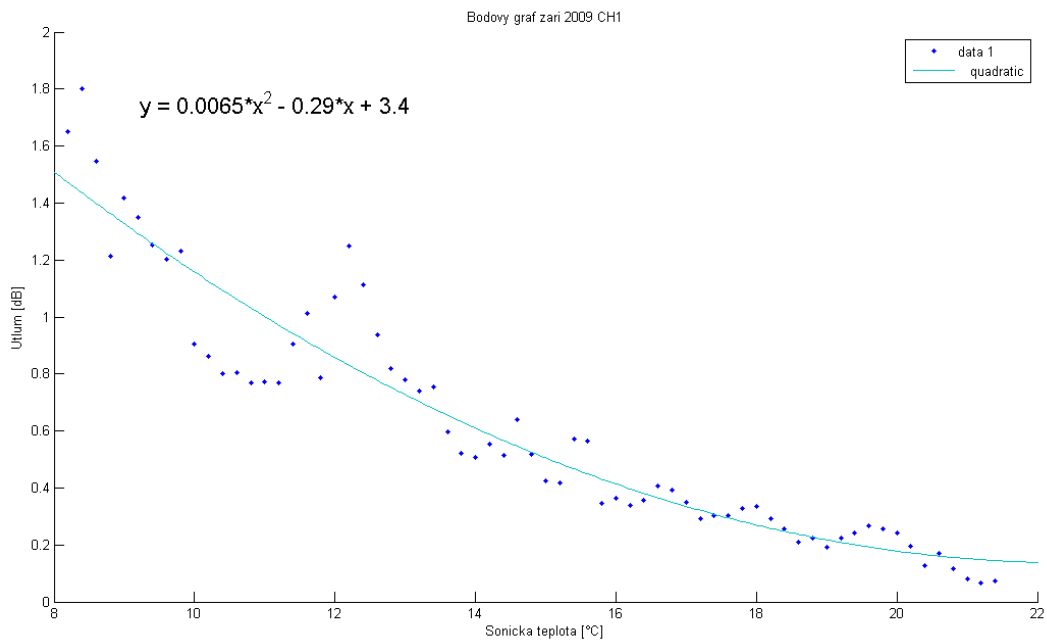
Obr.15 – Graf závislosti útlumu na sonické teplotě září CH1

Z grafu je vidět že mezi hodnotou 8 a 9°C je velký rozptyl útlumu, pokud ke střední hodnotě útlumu přičteme jeho směrodatnou odchylku. To je způsobeno malým výskytem hodnot v tomto intervalu. To je zřejmé z následujícího histogramu (Obr.16).

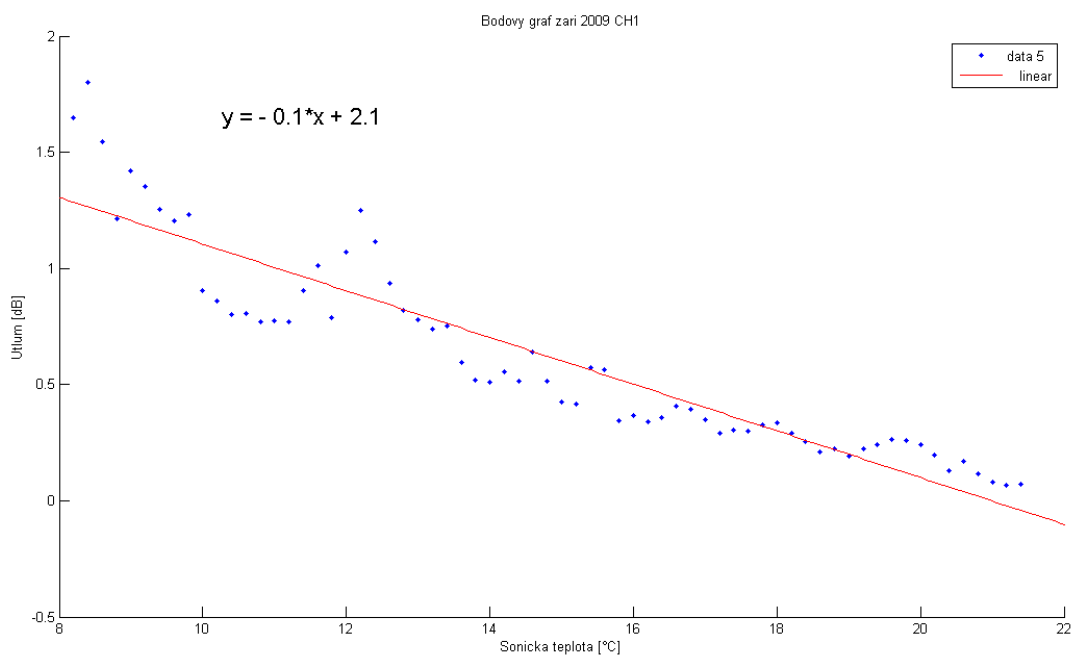


Obr.16 – Graf četnosti útlumu září CH1

Z histogramu je patrné, že v intervalu 9 - 17°C je dostatečný výskyt hodnot a průběh útlumu z (Obr. 15) se dá v tomto intervalu pokládat za monotónní klesající funkci. Nalezenou závislost jsem aproximoval nejdříve kvadratickou funkcí (Obr. 17) a poté přímkou (Obr. 18).

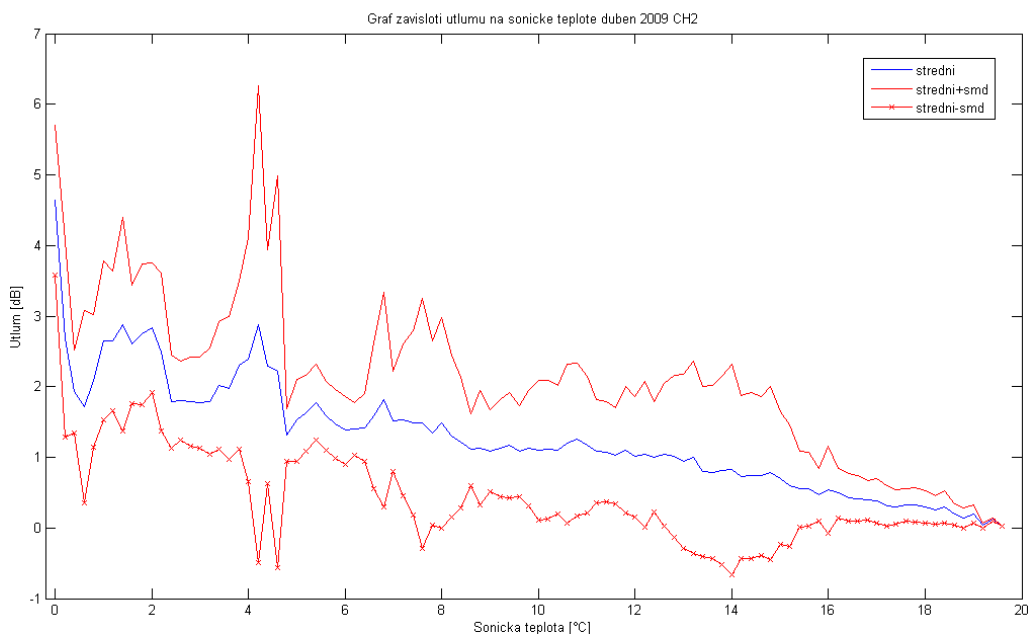


Obr.17 – Graf kvadratické aproximace září CH1

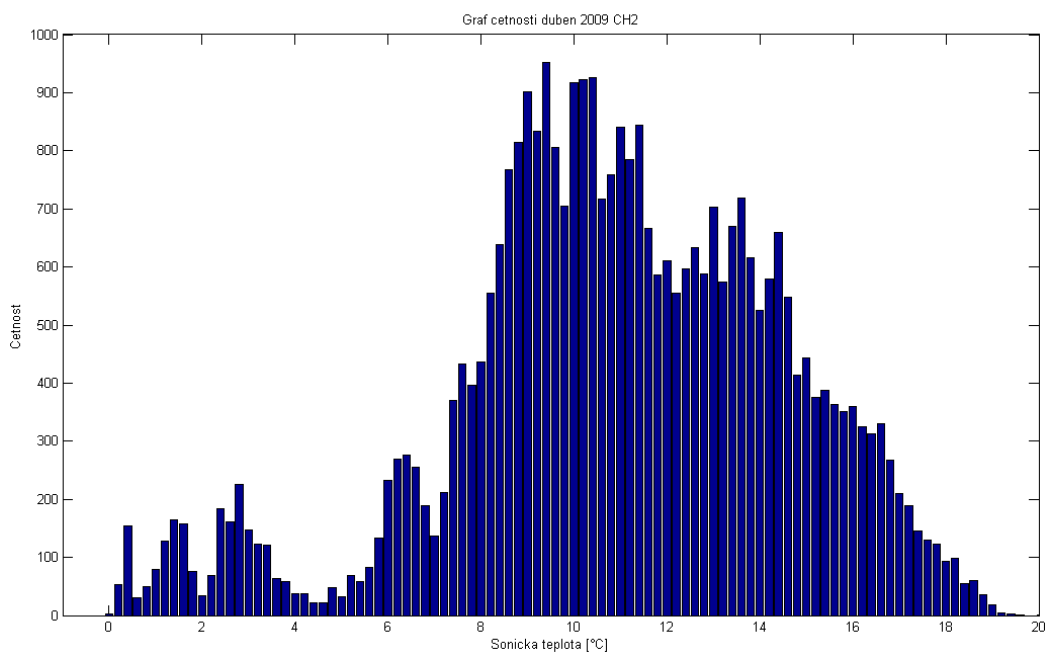


Obr.18 – Graf lineární aproximace září CH1

Nalezené aproximace jsou popsány rovnicemi v grafech, jde o klesající funkce jak bylo zřejmé ze záporných hodnot korelačních koeficientů. Se zvětšující se sonickou teplotou klesá útlum OBS. Zajímavé je srovnání s dalšími grafy měsíce dubna na CH2.

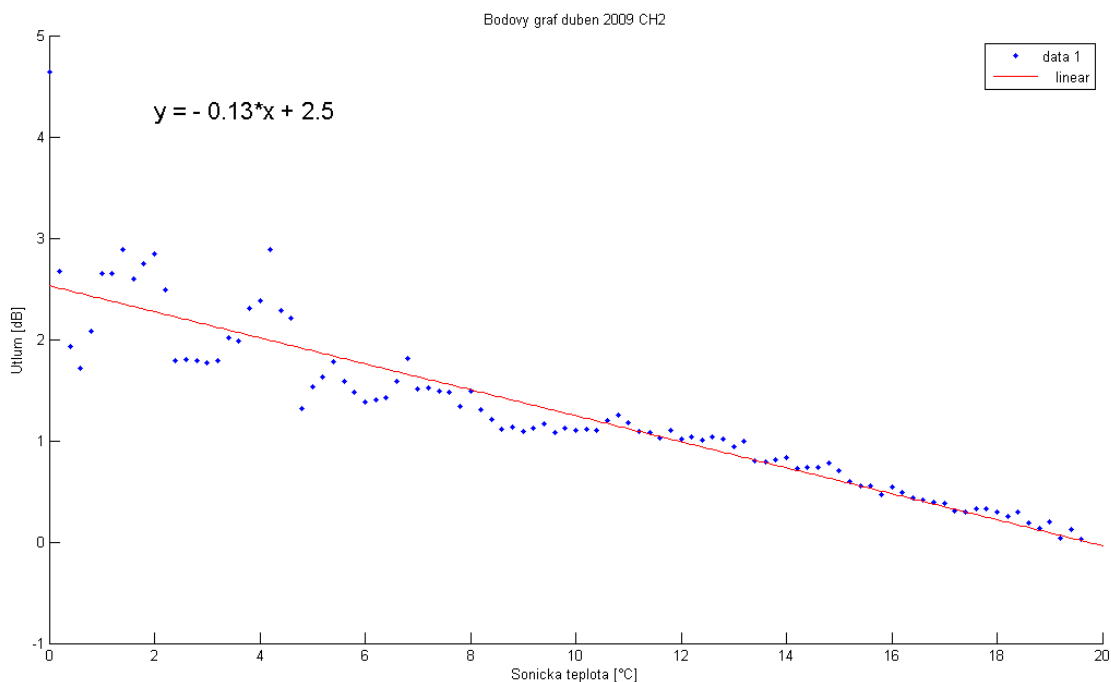


Obr.19 – Graf závislosti útlumu na sonické teplotě duben CH2



Obr.20 – Graf četnosti útlumu duben CH2

Histogram četnosti v měsíci dubnu nám ukazuje že je dostatek hodnot v intervalu od 8 do 16°C. V tomto intervalu sonické teploty je vidět malý rozptyl hodnot útlumu.



Obr.21 – Graf lineární aproximace duben CH2

Z grafu (Obr. 21) je vidět, že by se od hodnoty 10°C dal průběh dobře nahradit aproximovanou přímkou. V této oblasti je závislost sonické teploty s útlumem téměř lineární. Pokud porovnáme nalezené vztahy: $y = -0,13x + 2,5$ za měsíc duben na CH2 a $y = -0,1x + 2,1$ za září na CH1, mohu je prohlásit za velmi podobné.

9 Závěr

Cílem práce bylo najít, jak působí meteorologické jevy (především vítr) na útlum OBS. Ve své práci se zabývám analýzou vybraných dat za rok 2009, zpracoval jsem i data do poloviny roku 2010, ale těchto dat je ve srovnání s rokem předchozím méně. Proto jsem se zaměřil na rok 2009.

Data z měření rychlosti větru bylo nejprve nutné upravit a složit do jednotlivých měsíců, aby odpovídala měsíčním záznamům z měření útlumu v jednodominutových průměrech. Z těchto záznamů bylo ještě nutné vyřadit hodnoty, kdy anemometr neměřil. Aby nebyly výsledky ovlivněny jinými meteorologickými jevy, hlavně útlum způsobený mlhou, který má na OBS největší vliv, mi byla poskytnuta kolegou Bc. Vladimírem Brázdou (UPa FEI) data z jeho předchozího výzkumu, kde byla z útlumových záznamů vyloučena mlha na základě dohlednosti. Tím je zajištěno, že zkoumaný útlum nebude ovlivněn mlhou.

Úprava a analýza dat byla provedena v programovém prostředí MatLab, některé další grafy a tabulky byly zhotoveny v MS Excel. Pro analýzu a nalezení vzájemného vztahu mezi dvěma veličinami byla použita statistická metoda, která se nazývá korelační analýza. Pro korelaci je třeba mít dostatek dat za zpracovávané období, aby byly výsledky věrohodné. Pro analýzu závislosti mezi veličinami byly použity výpočty Spearmanova a Pearsonova korelačního koeficientu. Při srovnání použitých korelačních koeficientů se ukázalo, že vzájemná korelace mezi nimi je až 98 %. Pokud však srovnám velikost korelací, můžu říct, že Spearmanův korelační koeficient vychází vždy o něco lépe než Pearsonův.

Výsledek analýzy ukázal, že nejlépe korelovaná veličina s útlumem je sonická teplota a to v měsíci září 2009 na CHI, kdy Spearmanův korelační koeficient dosahuje 68 %. Dobrá korelace se sonickou teplotou je i v měsících: duben, květen, srpen. V těchto měsících se hodnota korelace pohybuje kolem 30 %. Jelikož tyto korelace mají záporné znaménko znamená to, že nalezená závislost je nepřímo úměrná. Se zvyšující se sonickou teplotou klesá útlum OBS. Tato závislost byla nezávisle potvrzena na dalším výzkumném OBS umístěném v Praze na ÚFA AV ČR, v.v.i. Zde se korelace mezi útlumem a sonickou teplotou pohybovala kolem 50 %. Tento objev bude potřebovat ještě podrobnější zkoumání, avšak cíl práce byl splněn. Původní předpoklad, že útlum na OBS je způsoben velikostí turbulentní energie větru nebyl potvrzen. To může být způsobeno tím, že analýza předchozích dat byla průměrována v delších časových intervalech než jedna minuta.

Nalezený vztah může být využit pro odhad útlumu na OBS při známých stavech atmosféry. Tyto stavy atmosféry se určí statisticky z dlouhodobého měření daného místa. Pro taková místa by bylo možné na základě měření stanovit dostupnost spoje a přizpůsobit plánování a výstavbu OBS.

Literatura

1. **FIŠER, O. et al:** *Attenuation measurement on dual-wavelength optical free-space link*. Proc. of Spie, session Atmospheric Optics: Models, Measurements and Target-in-the-Loop propagation III), 3-4 August 2009, San Diego, United States, pp. 7463-1 - 7463-11.
2. **FILKA, M.** *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vydání první. Brno : Centa, spol. s r.o., 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
3. **JAROŠ, J.** *Analýza anemometrických záznamů a vliv větrných turbulencí na fluktuaci radiokomunikačního signálu, Bakalářská práce, UPa 2009*. [online]. Dostupný na: <http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/34696/1/Jaro%C5%A1J_Analyzaanemometrickych_OF_2009.pdf>.
4. **KVIČERA, V.; GRÁBNER, M.; FIŠER, O.** Hybridní optické/rádiové systémy. In *Sborník 11. seminář Šíření optického signálu v atmosféře* [CD-ROM], Pardubice 6. 5. 2010. Univerzita Pardubice.
5. **METEK.** *Ultrasonic Anemometer* [online]. 2011 [cit.2011-04-06]. Dostupný na: <http://www.deltatech.ch/up/ktml/files/produkte/METEK_USA1_EN.pdf>.
6. **PROKEŠ, A.** *Modelnig of Atmospheric Turbulence Effect on Tterrestrial FSO link* [online]. 2009 [cit.2011-03-22]. Dostupný na: <http://www.radioeng.cz/fulltexts/2009/09_01_042_047.pdf>.
7. **STULL, R.B.** *Boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publisher. 1998. 500 p. ISBN 90-277-2768-6
8. **ŠTĚKL, J.** *Větrná energie. Meteorologie ve větrné energetice*, 1997, Roč. 4, č.11. 1, ISBN 1211-0531.
9. **WIKIPEDIE.** *Snellův zákon* [online]. 2005 [cit.2010-08-10]. Dostupný na: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Snell%C5%AFv_z%C3%A1kon>.
10. **WILFERT, O.** *Nové metody optických komunikací ve volném prostoru* [online]. 2006 [cit.2010-08-24]. Dostupný na: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/optic_kom.pdf>.
11. **WILFERT, O.; KOLKA, Z.** *Optické (laserové) bezdrátové sítě* [online]. 2009 [cit.2010-08-10]. Dostupný na: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/Wilfert_Kolka_opticke_spoje.pdf>.