

**Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Vliv mlh na útlum optických bezdrátových spojů**

**Vladimír Brázda**

**Bakalářská práce**

**2009**

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektrotechniky  
Akademický rok: 2008/2009

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vladimír BRÁZDA**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**

Název tématu: **Vliv mlh na útlum optických bezdrátových spojů**

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

Význam optických spojů pro rozvoj komunikací. Přehled řešení problematiky. Popis dostupných dat z experimentálního bezdrátového spoje na Milešovce. Statické zpracování dat a jeho význam pro plánování optických spojů. Uvážení vlivu mlhy.



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). KOLKA, Z. - Wilfert, O. - Fišer, Ondřej Achievable qualitative parameters of optical wireless links. [Parametry pro odhad spolehlivosti optického bezdrátového spoje.] Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. Roč. 9, č. 8 (2007), s. 2419-2423. ISSN 1454-4164

Vedoucí bakalářské práce:

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2009**



doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2009

Prohlašuji:

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 4. 5. 2009

Vladimír Brázda

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, CSc., za ochotu, množství vyhrazeného času a za poskytnutí materiálů, které přispěly k napsání této práce.

Dále bych chtěl poděkovat kolegovi a kamarádovi Janu Jarošovi za občasnou spolupráci na tomto projektu.

### **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá popisem optického bezdrátového spoje a vlivu atmosférických jevů na jeho funkci.

Dále tato práce obsahuje výsledky statistického zpracování dat z experimentálního spoje na Milešovce a porovnání s daty z měření dohlednosti.

### **Klíčová slova**

Optický bezdrátový spoj, útlum, dohlednost, výkon, korelace

### **Abstract**

Free space optics is described in this bachelor work. Influence of atmospheric effects on function of free space optics is presented.

This work contains conclusions of statistical data processing from experimental link on Milešovka and comparison with visibility data.

### **Keywords**

Free space optics, attenuation, visibility, power, correlation

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OPTICKÝ BEZDRÁTOVÝ SPOJ.....</b>	<b>10</b>
2.1	PRINCIP OPTICKÉHO SPOJE .....	10
2.2	VÝHODY POUŽITÍ FSO .....	10
2.3	NEVÝHODY POUŽITÍ FSO.....	11
<b>3</b>	<b>ÚČINKY REÁLNÉ ATMOSFÉRY .....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>VÝKONOVÉ ÚROVNĚ NA FSO .....</b>	<b>12</b>
4.1	STACIONÁRNÍ MODEL .....	12
4.2	STATISTICKÝ MODEL .....	14
4.3	KOEFICIENT KORELACE .....	15
<b>5</b>	<b>OPTICKÝ SPOJ NA MILEŠOVCE.....</b>	<b>17</b>
5.1	VYSÍLAČ .....	18
5.2	PŘIJÍMAČ.....	19
5.3	DOHLEDOMĚR VAISALA .....	20
5.3.1	<i>Princip činnosti .....</i>	<i>21</i>
5.3.2	<i>Modely dohledoměru.....</i>	<i>22</i>
5.4	PŘÍSTROJ PRO MĚŘENÍ OBSAHU TEKUTÉ VODY VE VZDUCHU.....	22
<b>6</b>	<b>POPIS DAT Z MĚŘENÍ.....</b>	<b>23</b>
6.1	DATA Z OPTICKÉHO SPOJE.....	23
6.2	DATA Z DOHLEDOMĚRU .....	24
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....</b>	<b>25</b>
7.1	MĚŘENÍ V ROCE 2008 .....	25
7.1.1	<i>Spolehlivost spoje.....</i>	<i>25</i>
7.1.2	<i>Průměrné hodnoty útlumu .....</i>	<i>26</i>
7.1.3	<i>Denní průběh útlumu.....</i>	<i>27</i>
7.1.4	<i>Časový průběh měření.....</i>	<i>27</i>
7.1.5	<i>Korelace CH<sub>2</sub> a CH<sub>1</sub> .....</i>	<i>29</i>
7.1.6	<i>Určení počasí z kamery.....</i>	<i>29</i>
7.2	MĚŘENÍ V ROCE 2009 .....	33
7.2.1	<i>Časový průběh měření.....</i>	<i>33</i>
7.2.2	<i>Korelační koeficienty.....</i>	<i>34</i>
7.2.3	<i>Distribuční funkce útlumu .....</i>	<i>35</i>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>37</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Výkonové úrovně optického spoje.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 Průběh přijatého výkonu.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3 Umístění optického spoje na Milešovce.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4 Optický vysílač (vlevo) a přijímač (vpravo) .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 5 Umístění optického spoje na Milešovce.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 6 Blokové schéma optického spoje.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 7 Dohledoměr Vaisala PWD21. ....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 8 Dohledoměr Vaisala PWD21 na Milešovce.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 9 PVM-100 na Milešovce. ....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 10 Spolehlivost spoje v roce 2008.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 11 Průměrné hodnoty útlumu v roce 2008.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 12 Denní průběh útlumu v roce 2008.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 13 Průběh útlumu na spoji v listopadu 2008.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 14 Průběh útlumu na spoji v období 1.-8. listopadu 2008.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 15 Koeficienty korelace mezi CH2 a CH1 za rok 2008.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 16 Umístění optického spoje na Milešovce.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 17 Mlha č.3(vlevo) a č.2(vpravo) .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 18 Mlha č.1(vlevo) a č.0(vpravo) .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 19 Průběh útlumu na spoji v listopadu 2008.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 20 Průběh útlumu na spoji v období 1.-12. prosince 2008.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 21 Průběh útlumu v období 14.-19. ledna 2009.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 22 Bodový graf.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 23 Distribuční funkce útlumu v lednu 2009.....</i>	<i>35</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Technické parametry optického spoje.....</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 2 Data z optického spoje.....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 3 Data z dohledoměru.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 4 Tabulka korelačních koeficientů.....</i>	<i>34</i>



# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá popisem optického bezdrátového spoje a vlivu atmosférických jevů na jeho funkci. Dále tato práce obsahuje výsledky statistického zpracování dat z experimentálního spoje na Milešovce a porovnání s daty z měření dohlednosti.

V první kapitole je popsán optický bezdrátový spoj obecně, čili jeho princip, vlastnosti, výhody a nevýhody použití pro přenos dat. V další kapitole je popsán vliv reálné atmosféry na útlum optického spoje. Je zde naznačeno, jaké počasí má na přenos největší vliv a proč. Třetí kapitola se zaměřuje na průběh výkonu v rámci spoje, rozdělení útlumu a statistické zpracování výpadků spoje.

Čtvrtá kapitola se již zabývá optickým spojením umístěným na Milešovce, kde se nachází meteorologická observatoř. V této části je popsán vysílač i přijímač a dále meteorologické přístroje, které nás v souvislosti s optickým spojením zajímají. V další kapitole jsou stručně popsána data z měřicích přístrojů a způsob jejich zpracování. V šesté kapitole jsou zveřejněny výsledky zpracování dat. Je zde zpracován celý rok 2008 a navíc jsou prezentovány výsledky z ledna 2009, kdy došlo k výměně meteorologických měřicích přístrojů.

## 2 Optický bezdrátový spoj

### 2.1 Princip optického spoje

Optický bezdrátový spoj je spoj, který jako přenosové médium používá úzký světelný paprsek (průměr řádově miliradiány) – tzv. optický svazek, který se šíří ve volné atmosféře. Nejedná se tedy o optický kabel, jak se může někdo mylně domnívat. Z angličtiny se používá zkratka FSO (Free Space Optics).

Základní strukturu systému tvoří vysílač a přijímač. Základní princip je takový, že vysílač například pomocí laserové diody vyšle signál namodulovaný na optickou nosnou vlnu a přijímač ji optoelektronickým prvkem zpracuje. Signál se přenáší světelným paprskem o vlnové délce 850-1550nm, přičemž nejčastěji se používá vlnová délka 850nm. Viditelné světlo se pohybuje v pásmu 400–750nm, z čehož vyplývá, že paprsek optického spoje se pohybuje v oblasti infračerveného záření a je neviditelný.

Zkušenosti s důsledky na lidské oko jsou takové, že při přímém zasažení dochází k dočasnému oslepnutí, může ale dojít i k trvalým následkům.

FSO se používá k přenosu dat volným prostorem, stejně jako rádiový spoj. FSO v porovnání s rádiovým spojem má své výhody i nevýhody.

### 2.2 Výhody použití FSO

- **spoje jsou nelicencované** – doposud není potřeba povolení
- **šířka pásma odpovídá možnostem vláknové optiky** – FSO mohou být článkem optických kabelových sítí
- **vysoká bezpečnost dat** – díky velmi úzkému svazku paprsků je téměř nemožné signál odposlouchávat. Pro odposlech je nutné do paprsku vstoupit, čímž dojde k přerušení, které se dá snadno na straně přijímače detekovat. Díky těmto vlastnostem se FSO využívá v oblastech, kde je požadována maximální míra zabezpečení (vojenství, státní správa, atd.).
- **přenosové rychlosti** se nyní pohybují v rozmezí 1,5 Mbps až 2,5 Gbps.

## 2.3 Nevýhody použití FSO

- **nehodné pro velké vzdálenosti** – použití do 5 km. Technologie se ale vyvíjí a již dnes je možné provozovat spoj na vzdálenost desítek kilometrů. Lze vyřešit kaskádním řazením. Největší efektivita je pro spoj do 1km.
- **nutností je přímá viditelnost** – nikdy se nevyhneme občasnému přerušení paprsku, např. prolétajícím ptákem. Takováto přerušení trvají velmi krátce a současné technologie umožňují detekci těchto krátkodobých výpadků a opětovné poslání ztracených dat.
- **menší spolehlivost** – na optický spoj mají větší vliv atmosférické jevy. U spojů, které přenášejí důležitá data, je proto potřeba zálohovat spoj paralelním rádiovým spojením, které se aktivuje v případě výpadku na FSO. Další alternativou pro zlepšení stability je vícesvazkové šíření.

## 3 Účinky reálné atmosféry

Účinky reálné atmosféry na rádiový spoj a na FSO jsou poněkud rozdílné. U rádiového spoje způsobuje největší útlum hustý déšť, sněžení a déšť s kroupami. Na FSO má největší vliv mlha a v horských oblastech nízká oblačnost. To rádiovému spoji tolik nevádí, proto se v případě mlhy využívá již zmíněné zálohování FSO paralelním rádiovým spojením.

Mezi mlhou a oblakem je rozdíl ve velikostech kapiček vody. Mlha je složena z kapiček o průměru 2-18 $\mu$ m. Při průchodu paprsku mlhou dochází ke dvěma jevům, které způsobují útlum. Kapičky vody se chovají jako ztrátové dielektrikum a paprsek utlumí vlivem větší permitivity. Dále dochází při průchodu kapičkami k rozptylu paprsku a na aperturu antény přijímače tak dopadne jen část vyslané energie.

Na FSO má také velký vliv déšť a turbulence větru. V oblastech s turbulencemi větru se projevuje nehomogenita indexu lomu a paprsek se může ohýbat. Tím pádem paprsek nezasáhne přesně aperturu antény přijímače a projeví se to jako útlum.

Pro útlum vlivem mlžných a oblačných atmosférických částic byl zjištěn empirický vztah [3]

$$\alpha_{1,part} = \frac{17}{V_m \left( \frac{555}{\lambda} \right)^q} [dB / km], \quad (3.1)$$

kde

- $V_m$  je meteorologická dohlednost v km
- $\lambda$  je vlnová délka paprsku v nm
- koeficient  $q$  záleží na  $V_m$ :

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

## 4 Výkonové úrovně na FSO

V této kapitole si provedeme teoretický rozbor výkonových úrovní na FSO a vlivu atmosféry na útlum.

Přenos spoje závisí na zisku antén vysílače a přijímače (stacionární model) a na aktuálních vlastnostech atmosféry v daném místě (statistický model). Statistický model popisuje statistické vlastnosti výpadků přenosu.

### 4.1 Stacionární model

Stacionární model je vyjádřen rovnicí:

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

kde

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

Celkový útlum prostředím  $\alpha_{tot}$  můžeme rozdělit na útlum šířením volným prostorem  $\alpha_{12}$  a na útlum způsobený náhodnými atmosférickými jevy  $\alpha_{atm}$ .

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

Atmosférický útlum  $\alpha_{atm}$  ještě dále rozdělujeme na útlum způsobený atmosférickými částicemi  $\alpha_{part}$  a na útlum způsobený větrnou turbulencí  $\alpha_{turb}$ .

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

Atmosférický útlum lze též vyjádřit jak součet útlumu při jasném klimatu  $\tilde{\alpha}_{atm}$  a náhodného přídavného útlumu  $\alpha_{add}$ .

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

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

kde

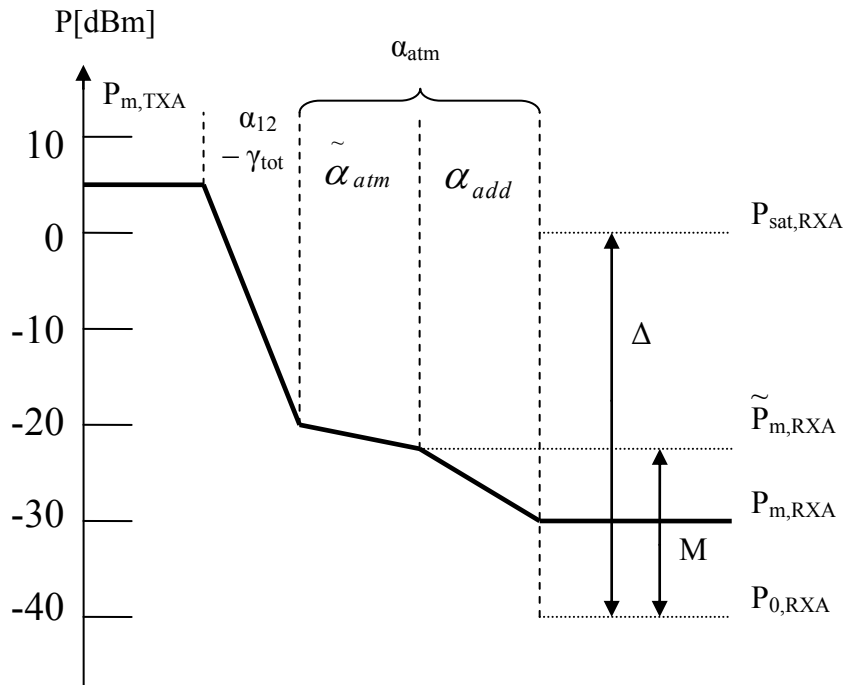
- $\alpha_{1,part}$  je měrný útlum způsobený částicemi v dB/km
- $L_{12}$  je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem

Celkový zisk přijímače  $\gamma_{tot}$  můžeme rozdělit na geometrický zisk  $\gamma_{RXA}$  a přídavný zisk  $\gamma_{add}$ . Geometrický zisk je dán podílem průměrů hledí (apertur) na přijímací ( $D_{RXA}$ ) a vysílací straně ( $D_{TXA}$ ). Přídavný zisk je dán rozdílným rozložením optické intenzity na přijímací a vysílací straně.

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



Následující graf (Obr.1) znázorňuje výkonové úrovně optického spoje. Vlevo na diagramu je úroveň u vysílače, poté paprsek prochází atmosférou a utlumený ho přijímá přijímač.



Obr.1 Výkonové úrovně optického spoje

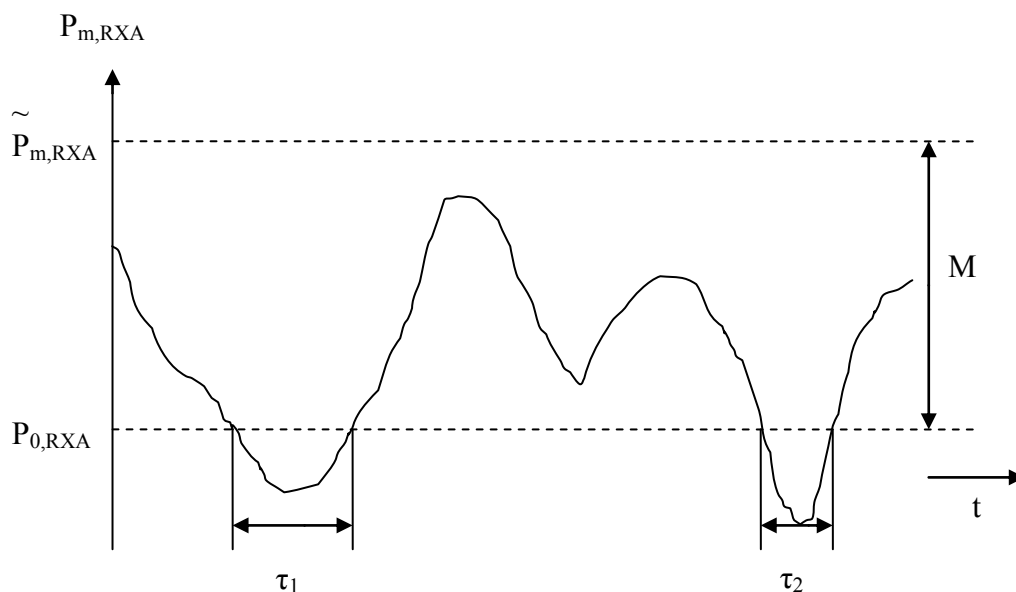
$\tilde{P}_{m,RXA}$  je střední hodnota přijatého výkonu pro ideální čistou atmosféru.  $P_{sat,RXA}$  a  $P_{0,RXA}$  jsou saturační a citlivostní práh přijímače. Jejich rozdíl se nazývá dynamický rozsah přijímače  $\Delta$ .

Rozdíl mezi přijatým výkonem pro ideální čistou atmosféru a prahem citlivosti přijímače je tzv. zisk spoje  $M$ . Tento zisk hraje významnou roli ve spolehlivosti spoje.

## 4.2 Statistický model

Známa nevýhoda přenosu signálu atmosférou je závislost na počasí. Na optický spoj mají největší vliv mlhy, silné dešťové a sněhové srážky a také větrné turbulence. Tyto atmosférické jevy potom zvyšují přídavný útlum  $\alpha_{add}$ . Jestliže tento útlum přesáhne zisk spoje  $M$ , pak přijatý výkon spadne pod hranici citlivostního prahu přijímače a nastane výpadek spojení.

Průběh přijatého výkonu pak může vypadat například jako v následujícím grafu (Obr. 2).



Obr. 2 Průběh přijatého výkonu

S ohledem na předešlý graf je možné vyjádřit spolehlivost spoje podle vzorce

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

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

### 4.3 Koeficient korelace

Pro pozdější srovnání průběhů z různých měření je potřeba si nadefinovat pojem koeficient korelace.

Koeficient korelace  $\varphi(X,Y)$  je číslo nabývající hodnot  $\langle -1, 1 \rangle$ , které udává, jak jsou si dvě různé veličiny  $X$  a  $Y$  podobné. Nezkoumají se kvantitativní hodnoty, ale pouze vztah, jakým způsobem jsou na sebe oba průběhy závislé.

Definice:

$$\varphi(X, Y) = \frac{C(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)}, \quad (4.7)$$

kde

$C(X, Y)$  je kovariance. Kovariance je střední hodnota součinu odchylek obou náhodných veličin  $X, Y$  od jejich středních hodnot.

$\sigma(X)$  a  $\sigma(Y)$  jsou směrodatné odchylky veličin  $X$  a  $Y$

Pokud:

$\varphi(X, Y) = 1$ , pak jsou veličiny  $X$  a  $Y$  absolutně korelované, tzn. pokud se zvýší  $X$ , zvýší se i  $Y$  a naopak, čili platí pro ně přímá lineární závislost.

$\varphi(X, Y) = -1$ , pak jsou veličiny  $X$  a  $Y$  také absolutně korelované ale platí pro ně nepřímá závislost tzn. pokud se zvýší  $X$ , sníží se  $Y$  a naopak.

$\varphi(X, Y) = 0$ , pak pro obě veličiny neplatí žádná lineární závislost, nejsou si vůbec podobné a říkáme, že jsou nekorelované.

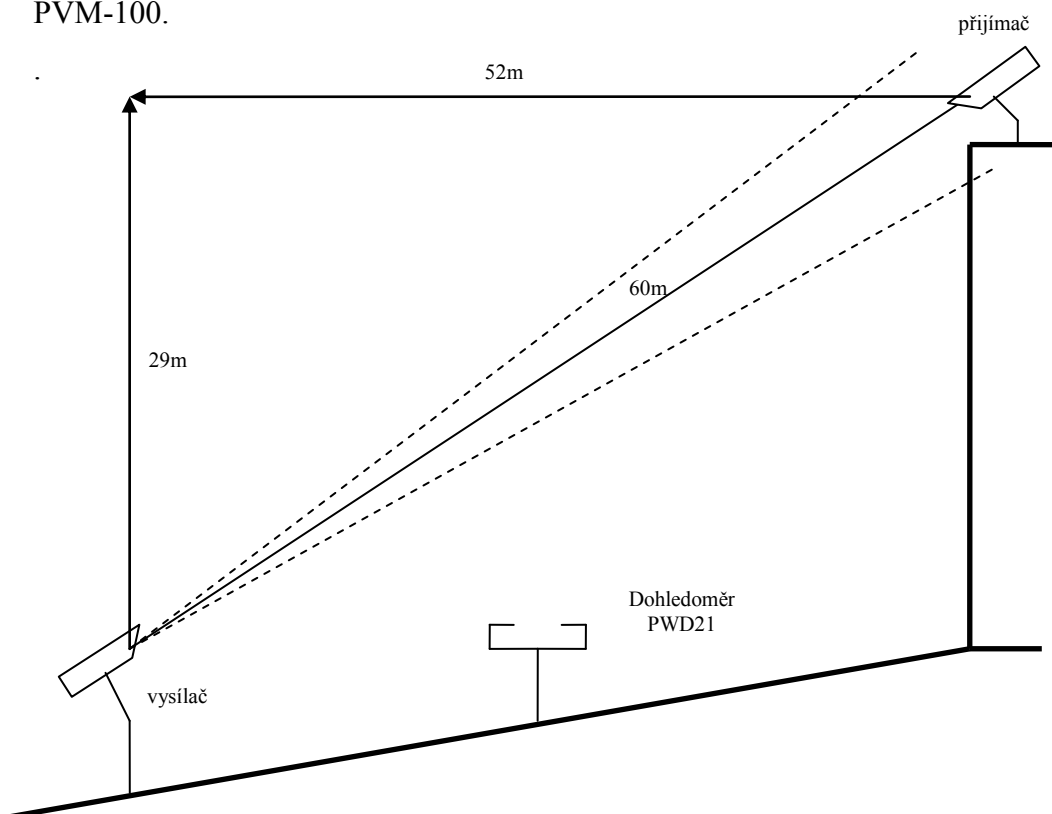
## 5 Optický spoj na Milešovce

Úkolem této práce je analyzovat data z experimentálního optického spoje na Milešovce, který byl vyroben na VÚT Brno a provozuje ho Ústav fyziky atmosféry Akademie věd ČR.

Milešovka je nejvyšší hora Českého středohoří s nadmořskou výškou 837 m.n.m. Je to místo s nejhorším podnebím v České republice, jsou zde extrémní teploty, časté deště a husté mlhy, což je výborný předpoklad pro studování vlivu mlhy na optický spoj.

V roce 1905 byla na vrcholu zřízena meteorologická stanice a u ní pak 19 metrů vysoká rozhledna. Dnes je na vrcholu hory umístěno stálé meteorologické pracoviště Ústavu fyziky atmosféry.

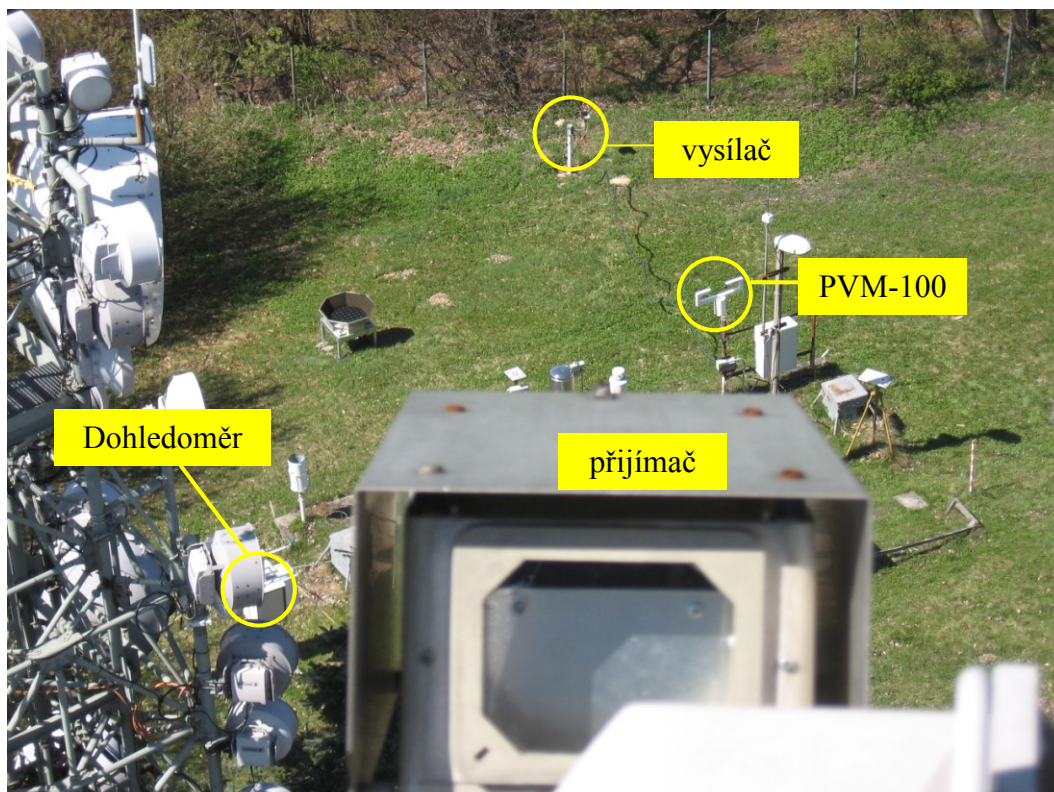
Součástí meteorologického vybavení observatoře je také přístroj pro měření dohlednosti od firmy Vaisala a přístroj pro měření vodního obsahu ve vzduchu PVM-100.



Obr. 3 Umístění optického spoje na Milešovce



Obr. 4 Optický vysílač (vlevo) a přijímač (vpravo)



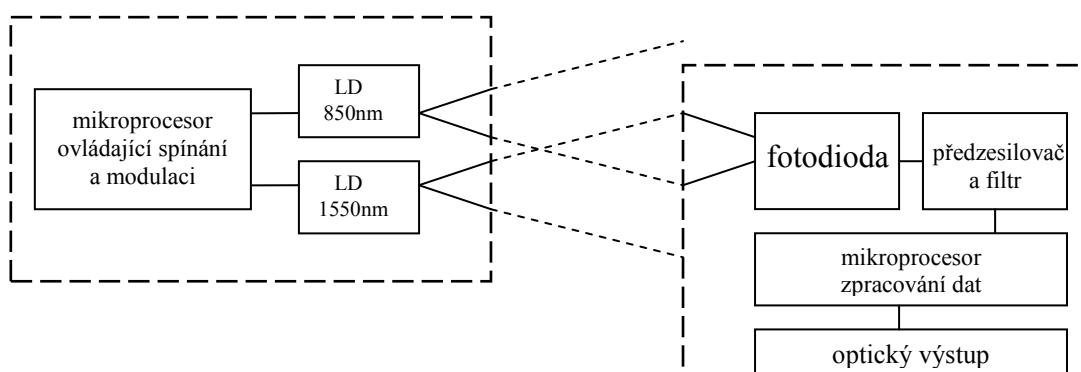
Obr. 5 Umístění optického spoje na Milešovce

## 5.1 Vysílač

Vysílač v sobě obsahuje dvě oddělené optické antény, které používají laserové diody s vlnovými délkami 850nm (kanál 2) a 1550nm (kanál 1). Obě laserové diody jsou modulované a jejich spínání zajišťuje mikroprocesor.

Laserové paprsky mají odchylku 6mrad pro 850nm a 12mrad pro 1550nm. Průměr apertur obou antén je 23mm. Pro použitou vzdálenost 60m jsou paprsky dostatečně široké na to, aby nebyl přenos citlivý na drobné vychýlení paprsku z osy.





Obr. 6 Blokové schéma optického spoje

## 5.2 Přijímač

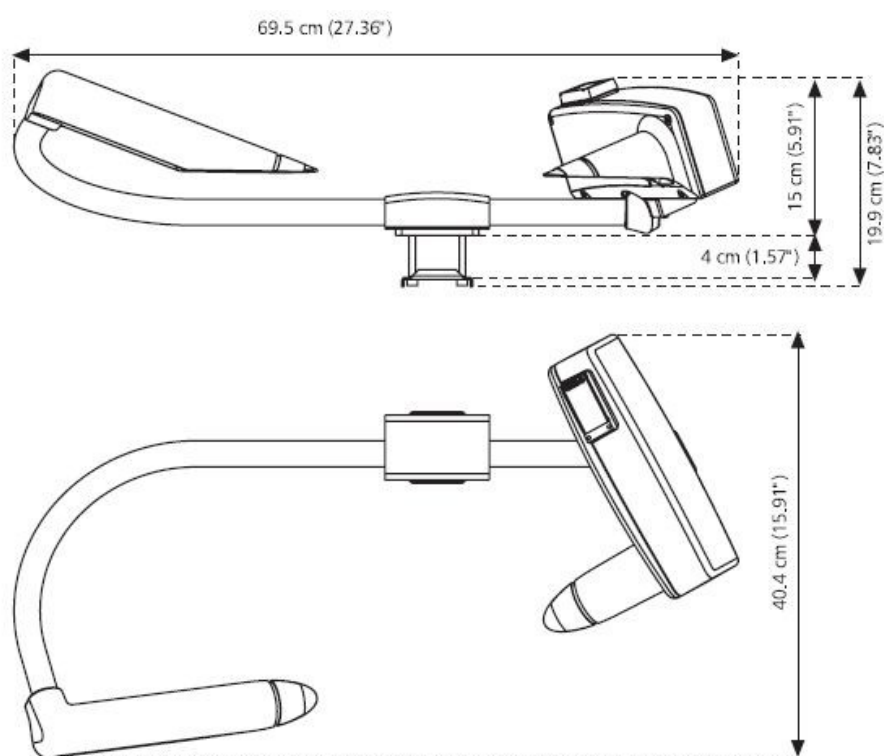
Přijímač je složen z fotodiody, předzesilovače a kontrolní jednotky pro ukládání a vyhodnocování naměřených dat. Průměr čočky přijímače je 60mm. Pro svoji schopnost reagovat na široké spektrum vlnových délek byla vybrána InGaAs fotodioda FGA10. Pro zpracování signálu byl vybrán logaritmický detektor s dynamickým rozsahem 90dB.

Tab. 1 Technické parametry optického spoje

	CH2	CH1
Laserová dioda	DL5032	RLT1550-15G
Vlnová délka $\lambda$	850nm	1550nm
Vyzářený výkon $P_{m,TXA}$	5mW	5mW
Odchylka paprsku $\varphi_t$	6mrad	6mrad
Apertura na vysílači $D_{TXA}$	23mm	23mm
Fotodioda	PIN InGaAs FGA 10	
Apertura na přijímači $D_{RXA}$	60mm	
Citlivost fotodiody	0,2 A/W	0,94 A/W
Ekvivalentní šumový výkon NEP	$2,5 \times 10^{-14}$ W/Hz (900nm)	

### 5.3 Dohledoměr Vaisala

Ústav fyziky atmosféry nainstaloval na Milešovce přístroj PWD11 od finské firmy VAISALA. Je to přístroj, který dokáže komplexně analyzovat počasí a také určit dohlednost a rozpoznat 7 typů srážek (déšť, mrznoucí déšť, mrholení, mrznoucí mrholení, déšť se sněhem, sněžení, kroupy) a různé druhy mlhy. Od ledna 2009 byl model PWD11 nahrazen novějším modelem PWD21 (Obr.7). Oba pracují na stejném principu.



Obr. 7 Dohledoměr Vaisala PWD21



*Obr. 8 Dohledoměr Vaisala PWD21 na Milešovce*

### **5.3.1 Princip činnosti**

Senzor pracuje na principu rozptylu laserového paprsku o atmosférické částice. Dohledoměr má dvě ramena, na nichž je posazen vysílač a přijímač. Čočky chrání kryt a jsou natočeny směrem k zemi, čímž je zamezeno shromažďování vody nebo sněhu. Vysílač a přijímač nejsou zaměřeni ve stejné horizontální ani vertikální ose a v případě jasného počasí přijímač nedetekuje žádný výkon.

V případě mlhy se laserový paprsek o kapičky vody rozptýlí a část výkonu dopadne i na přijímač. Přístroj pak na základě rozptylu, přesného určení obsahu tekuté vody ve vzduchu a teploty určí dohlednost a typ srážek podle tabulek Světové meteorologické organizace WMO.

### 5.3.2 Modely dohledoměru

Model PWD11 dokáže detekovat dohlednost s horní hranicí 2 000m a je určen primárně pro měření počasí u silnic, kde má aktuální stav počasí velký vliv na bezpečnost dopravy.

Model PWD21 už je určen pro automatické meteorologické stanice a měří dohlednost až do vzdálenosti 20 000m.

### 5.4 Příklad pro měření obsahu tekuté vody ve vzduchu

PVM-100 (Obr. 9) je další laserový přístroj, kterým je vybavena observatoř na Milešovce. Měří LWC (Liquid Water Content), což je obsah tekuté vody ve vzduchu, udávaný v  $\text{kg/m}^3$ .



Obr. 9 PVM-100 na Milešovce

## 6 Popis dat z měření

### 6.1 Data z optického spoje

Optický spoj pracuje v simplexním provozu, kdy se v pravidelných časových intervalech střídá vysílání paprsku o vlnových délkách 1550nm(CH1) a 850nm(CH2). Přijímač pak za jednu periodu vysílání hodnotu útlumu zprůměrnuje a počítač do textového souboru zapíše data v následujícím formátu:

*Tab. 2 Data z optického spoje*

2008	01	01	00	00	15	CH 2	A	55.12	D	0.08	G	1
2008	01	01	00	00	31	CH 1	A	65.85	D	0.19	G	1
2008	01	01	00	00	48	CH 2	A	54.85	D	0.08	G	1
2008	01	01	00	01	04	CH 1	A	65.63	D	0.22	G	1
2008	01	01	00	01	21	CH 2	A	54.53	D	0.08	G	1
2008	01	01	00	01	37	CH 1	A	65.26	D	0.15	G	1
2008	01	01	00	01	55	CH 2	A	54.37	D	0.07	G	1
2008	01	01	00	02	11	CH 1	A	65.05	D	0.14	G	1
2008	01	01	00	02	28	CH 2	A	54.22	D	0.08	G	1
2008	01	01	00	02	44	CH 1	A	64.68	D	0.22	G	1
2008	01	01	00	03	01	CH 2	A	54.15	D	0.08	G	1
2008	01	01	00	03	17	CH 1	A	64.54	D	0.24	G	1
2008	01	01	00	03	34	CH 2	A	54.07	D	0.08	G	1
2008	01	01	00	03	51	CH 1	A	64.36	D	0.23	G	1
2008	01	01	00	04	08	CH 2	A	54.09	D	0.08	G	1
2008	01	01	00	04	24	CH 1	A	64.05	D	0.17	G	1
2008	01	01	00	04	41	CH 2	A	54.07	D	0.08	G	1
2008	01	01	00	04	57	CH 1	A	64.03	D	0.17	G	1
2008	01	01	00	05	14	CH 2	A	54.10	D	0.08	G	1
2008	01	01	00	05	30	CH 1	A	63.52	D	0.18	G	1
2008	01	01	00	05	47	CH 2	A	54.24	D	0.09	G	1

Přístroj zapisuje data do textového souboru. V prvním až šestém sloupci jsou zapsány informace o datumu zápisu do souboru – rok, měsíc, den, hodina, minuta a sekunda. Dále je zapsána indikace kanálu, hodnota útlumu v dB a standardní odchylka, která vznikla při průměrování za jednu periodu měření.

Čím je standardní odchylka menší, tím je daný průměr přesnější, protože se většina hodnot velmi blížíla průměrné hodnotě. Odchylka se zvětší například při špatném počasí, kdy se útlum často mění až o desítky dB.

Perioda měření se dá nastavit a z předchozího výpisu dat je vidět, že pro kanál 1 byla zvolena perioda 16 sekund a pro kanál 2 byla zvolena perioda 17 sekund. Díky rozdílným hodnotám periody přijímač snadno rozpozná, který kanál právě vysílal.



Časový úsek okolo patnácti vteřin je zvolen s ohledem na to, že největší vliv na útlum má mlha, která se nemění tak rychle, a zapisovat například každou vteřinu by bylo zbytečné na rozdíl od měření rychlosti větru, kde by se měla data zapisovat několikrát do sekundy.

## 6.2 Data z dohledoměru

Dohledoměr PWD11 zapisuje výsledky měření do souboru ve formátu tabulkového procesoru. Přístroj zpracovává přes 60 různých měření jako jsou například data o teplotě, o vlhkosti vzduchu, o rychlosti a směru větru, dále jsou detekovány jednotlivé srážky, tlak atd. Nás nejvíce zajímá sloupec s dohledností.

V tabulce č. 3 je ukázána část dat z měření přístrojem PWD11.

*Tab. 3 Data z dohledoměru*

DAT	CAS	PW_VIS10
2.1.2008	02:45	2000
2.1.2008	03:00	2000
2.1.2008	03:15	2000
2.1.2008	03:30	2000
2.1.2008	03:45	1880
2.1.2008	04:00	1167
2.1.2008	04:15	671
2.1.2008	04:30	677
2.1.2008	04:45	1076
2.1.2008	05:00	855
2.1.2008	05:15	1371
2.1.2008	05:30	805
2.1.2008	05:45	1343
2.1.2008	06:00	2000
2.1.2008	06:15	997
2.1.2008	06:30	877
2.1.2008	06:45	513
2.1.2008	07:00	599
2.1.2008	07:15	682
2.1.2008	07:30	777
2.1.2008	07:45	2000
2.1.2008	08:00	2000
2.1.2008	08:15	2000
2.1.2008	08:30	2000
2.1.2008	08:45	2000

V prvním sloupci je datum, ve druhém čas, kdy došlo k zápisu, a ve třetím sloupci je naměřená dohlednost v metrech. Přístroj měří dohlednost každé 2 minuty. Do souboru ale ukládá až průměrnou hodnotu za 15 minut, protože přístroj je na Milešovce nainstalován primárně pro meteorologické účely, kde je standardní krok odečtu právě 15 minut.

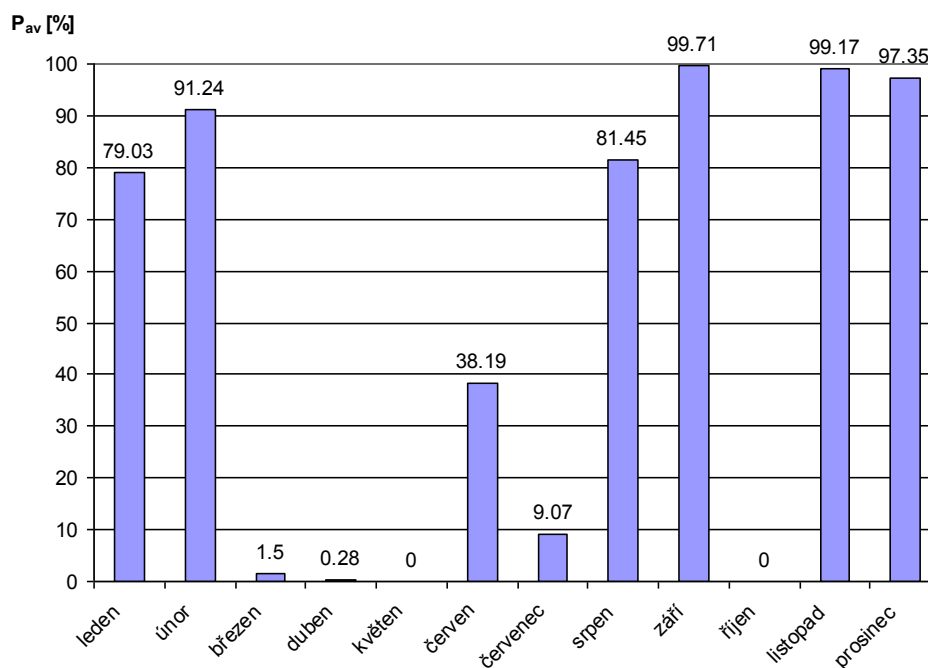
## 7 Výsledky měření

V této práci jsou zpracovány a porovnány výsledky měření za celý rok 2008 a za leden 2009. Pro dlouhodobou analýzu v rámci jednotlivých měsíců bylo zvoleno průměrování všech hodnot s krokem 1 hodina. Data jsou zpracována v programovém prostředí MATLAB, zdrojový kód je přiložen na CD. Jako kritérium platnosti měření útlumu na optickém spoji byla zvolena podmínka, že spoj musí měřit alespoň 45 minut v jedné hodině. Pokud měřil méně často, je to zapsáno jako výpadek, protože by mohlo dojít k nepřesnostem při porovnávání s daty z jiných měření.

### 7.1 Měření v roce 2008

#### 7.1.1 Spolehlivost spoje

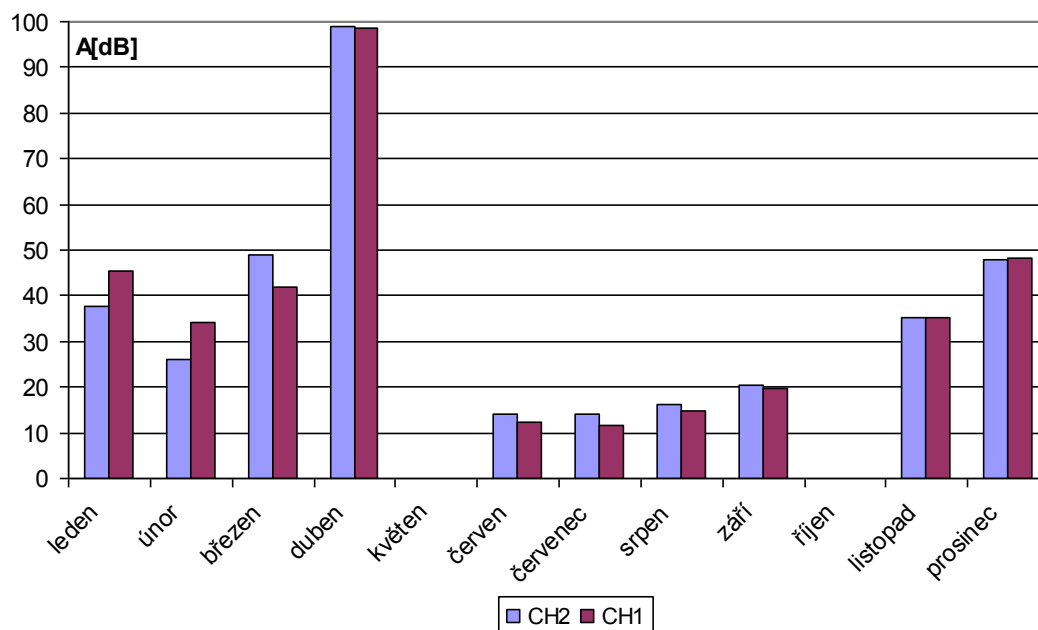
V následujícím grafu (Obr. 10) je zobrazena statistika spolehlivosti spoje.



Obr. 10 Spolehlivost spoje v roce 2008

Na ose y je vynášeno procento času, kdy přístroj měřil. Z grafu vidíme, že v období od března do května spoj prakticky neměřil, což je způsobeno technickými problémy. Ty měsíce, které mají spolehlivost přes 90% jsou vhodné pro porovnání s daty z dohledoměru.

### 7.1.2 Průměrné hodnoty útlumu



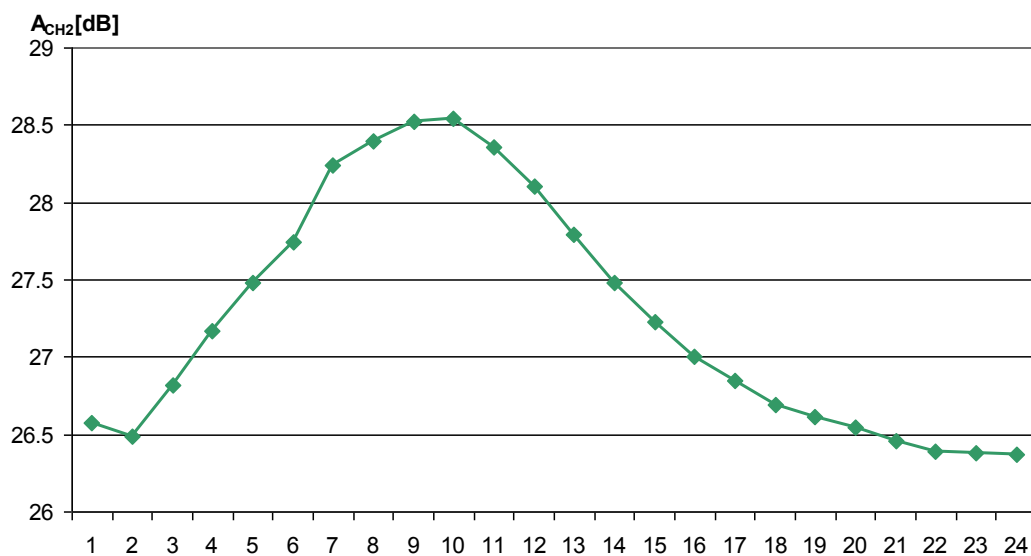
Obr. 11 Průměrné hodnoty útlumu v roce 2008

Na grafu č.11 jsou vyneseny průměrné měsíční hodnoty útlumu na jednotlivých kanálech. V dubnu je průměrná hodnota téměř 100dB, to je ale způsobeno tím, že spoj měřil pouze 2 hodiny za celý měsíc a to zrovna v dobu, kdy bylo zhoršené počasí a tedy velký útlum.

Můžeme si všimnout, že v létě, kdy bývá menší četnost mlh, je menší průměrný útlum než v zimě, kdy se počasí zhoršuje.

Podle empirického vzorce (3.1) pro útlum způsobený mlžnými a oblačnými částicemi  $\alpha_{1,part}$  vyplývá, že pro menší vlnovou délku by měl být menší útlum. To se ale při měření na Milešovce nepotvrdilo, na počátku roku má větší útlum kanál 1 s vlnovou délkou 1550nm, v létě má větší útlum kanál 2 s vlnovou délkou 850nm a ke konci roku byly hodnoty téměř totožné.

### 7.1.3 Denní průběh útlumu

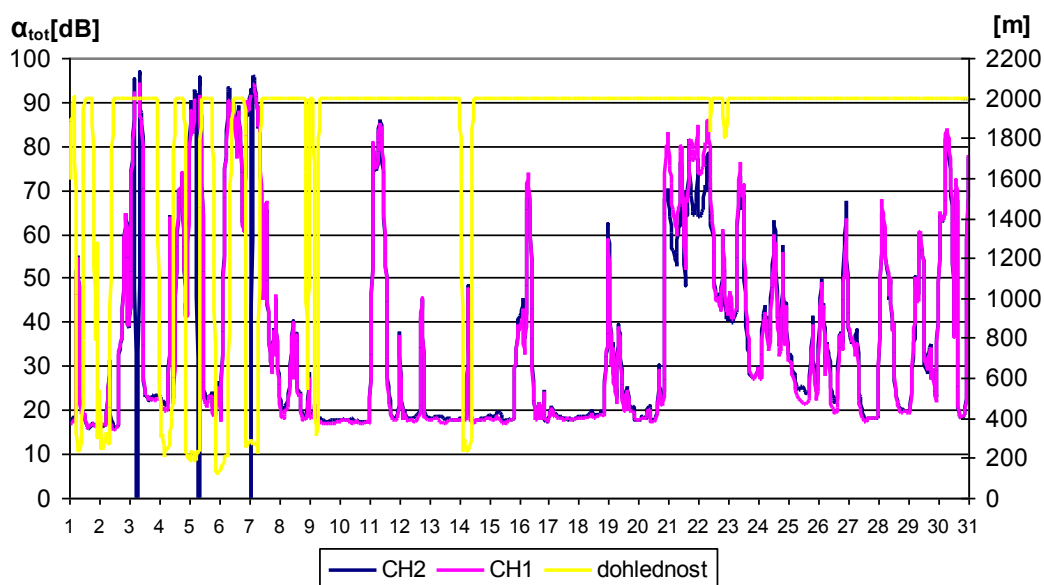


Obr. 12 Denní průběh útlumu v roce 2008

Na grafu č.12 jsou zobrazeny průměrné hodinové hodnoty útlumu za každou hodinu dne. Vidíme, že nejmenší útlum býval v noci a největší dopoledne během deváté a desáté hodiny ránní. Rozdíl mezi minimem a maximem jsou přibližně 2dB.

### 7.1.4 Časový průběh měření

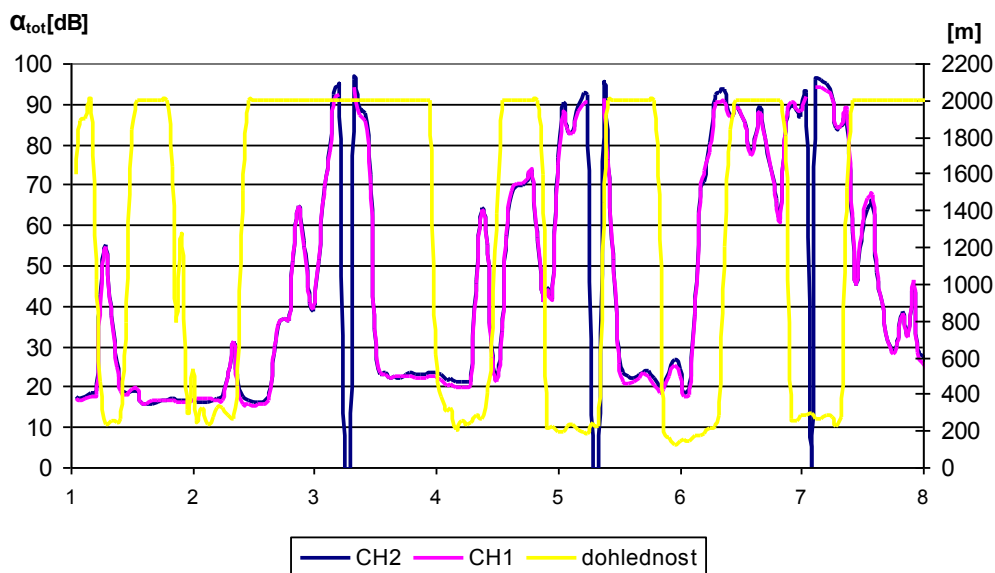
Pro ukázkou časového průběhu útlumu si vybereme listopad, který je zajímavý z hlediska častých mlh.



Obr. 13 Průběh útlumu na spoji v listopadu 2008

Na grafu č.13 je patrné, že od 1. do 8. listopadu dohledoměr zaznamenal sérii horších dohledností a přijímač na spoji detekoval útlum. Jenže v druhé polovině listopadu nebyla podle dohledoměru téměř žádná mlha a spoj mezitím detekoval výrazné útlumy.

Z předešlého grafu je vybrána zajímavá část od 1. do 8. listopadu.



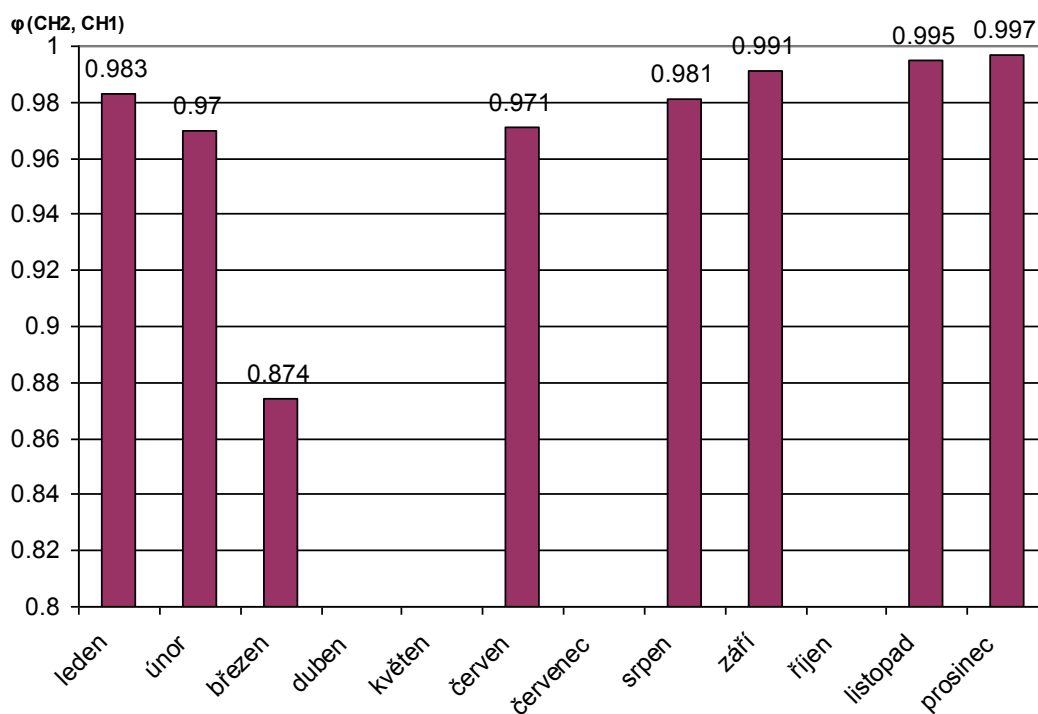
*Obr. 14 Průběh útlumu na spoji v období 1.-8. listopadu 2008*

Na grafu č.14 jsou patrné 3 výpadky útlumu – 3., 5. a 7. listopadu. Tyto výpadky jsou přímo v období, kdy je útlum největší. To indikuje, že výpadek nastal díky překročení citlivostního prahu přijímače  $P_{0,RXA}$ .

Dále sledujeme, že průběhy útlumu na kanálu 1 a na kanálu 2 jsou výborně korelované a i kvantitativní hodnoty jsou velmi podobné.



### 7.1.5 Korelace CH2 a CH1



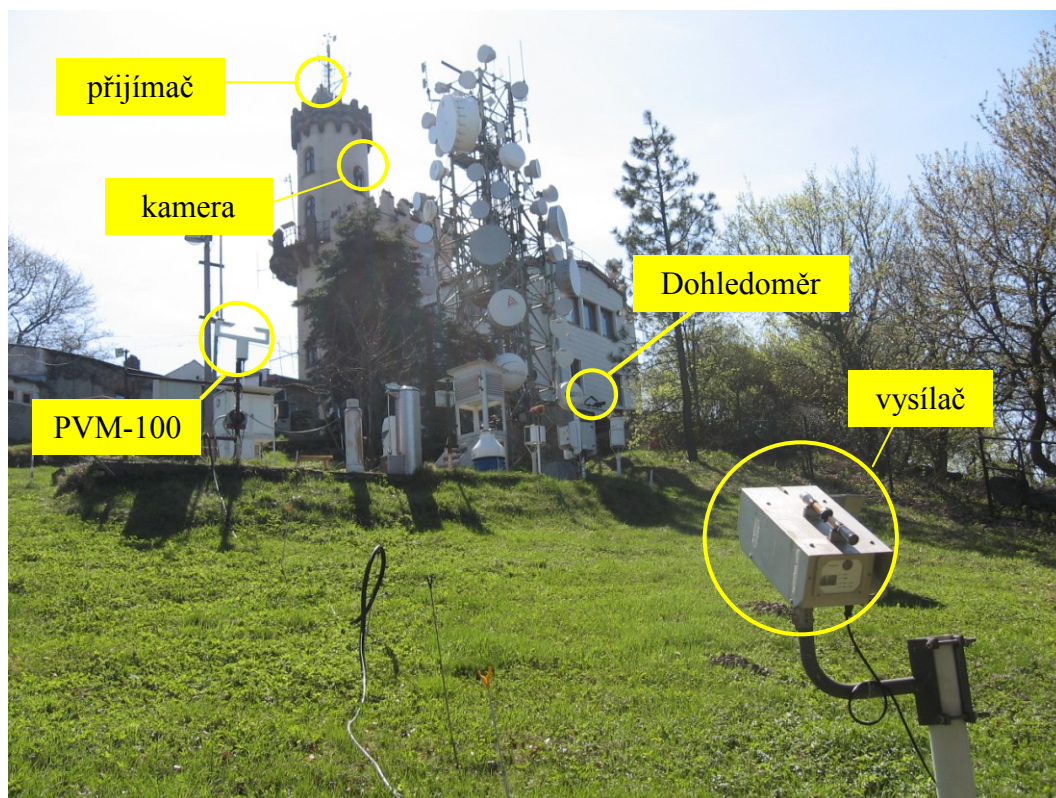
Obr. 15 Koeficienty korelace mezi CH2 a CH1 za rok 2008

Z grafu č.15 je patrné, že  $\varphi(\text{CH2}, \text{CH1})$  se pohybuje nad hodnotou 0,97, to znamená, že mezi průběhy útlumu na kanálu 1 a 2 platí téměř absolutní lineární závislost. V březnu, kde je koeficient korelace 0,874 měřil spoj pouze 1,5% času a dochází tedy k jisté nepřesnosti.

Nejsou si ale vůbec podobné průběhy útlumu s průběhem dohlednosti. Koeficient korelace útlumu a dohlednosti za celý listopad je pouze -0,156. Záporné znamínko správně značí, že pokud se zmenší dohlednost, zvětší se útlum, ale tento koeficient je dost nízký na to, abychom mohli říct, že jsou průběhy korelované.

### 7.1.6 Určení počasí z kamery

Ústav fyziky atmosféry nainstaloval na observatoři na Milešovce kamery, díky kterým si můžeme ověřit skutečný stav počasí. Jedna z kamer je umístěna přímo na věži ve výšce zhruba 4m pod přijímačem, která sice nemíří přesně na osu spoje ale poskytuje nám přehled, jaký je stav počasí ve zhruba poloviční výšce mezi vysílačem a přijímačem.



*Obr. 16 Umístění optického spoje na Milešovce*

Fotografie z kamery jsou snímány každých 5 minut. Bylo provedeno subjektivní hodnocení intenzity mlhy podle následujícího klíče:

- |   |   |              |
|---|---|--------------|
| 0 | - | žádná mlha   |
| 1 | - | mírná mlha   |
| 2 | - | střední mlha |
| 3 | - | hustá mlha   |

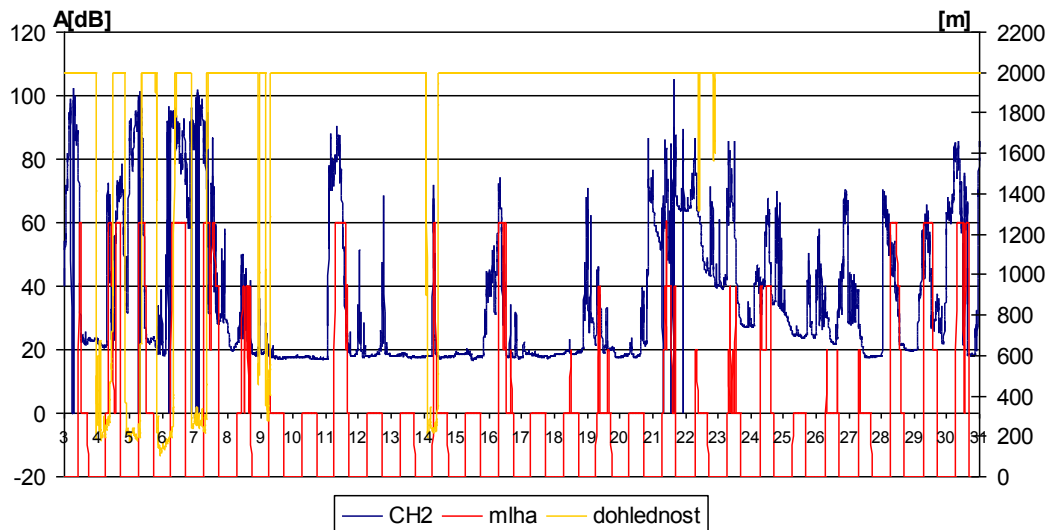


*Obr. 17 Mlha č.3(vlevo) a č.2(vpravo)*



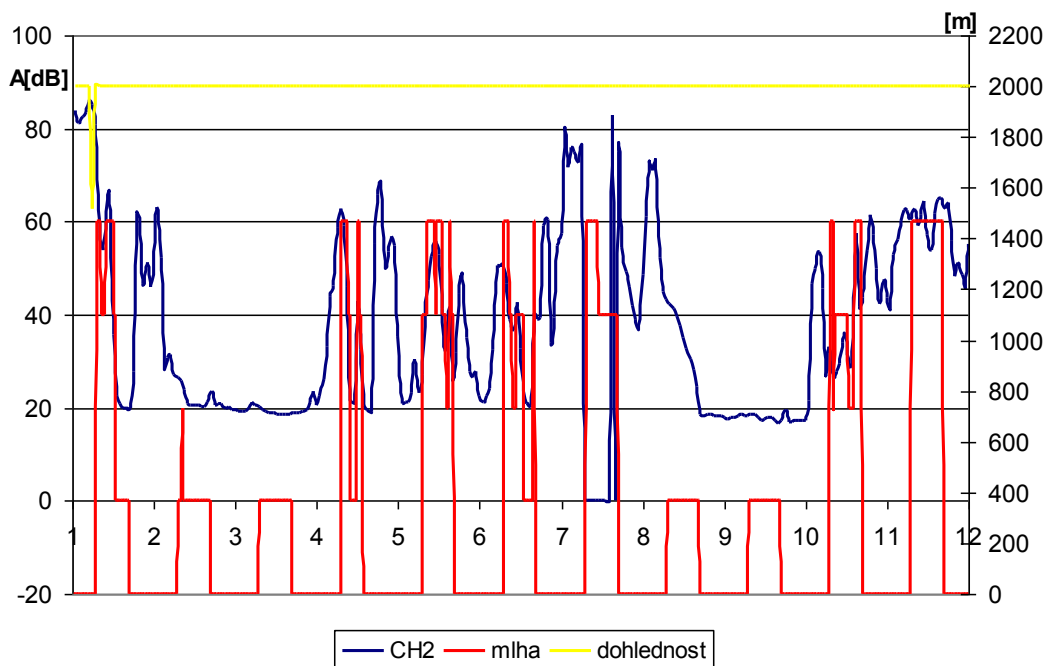
Obr. 18 Mlha č.1(vlevo) a č.0(vpravo)

Podíváme-li se na následující graf, je patrné zajímavé zjištění.



Obr. 19 Průběh útlumu na spoji v listopadu 2008

Útlum optického spoje je velmi dobře korelovaný s průběhem mlhy určené z kamer, koeficient korelace je v listopadu  $\phi=0,785$ . To ukazuje na velkou lineární závislost. Snímky z kamery máme k dispozici od 3. listopadu 2008. V noci nejsou kvůli tmě snímány fotografie, což je na grafu znázorněno zápornými hodnotami. Mlhy, které jsou zaznamenány na kameře ale dohledoměr PWD11 vůbec nedetekuje.



Obr. 20 Průběh útlumu na spoji v období 1.-12. prosince 2008

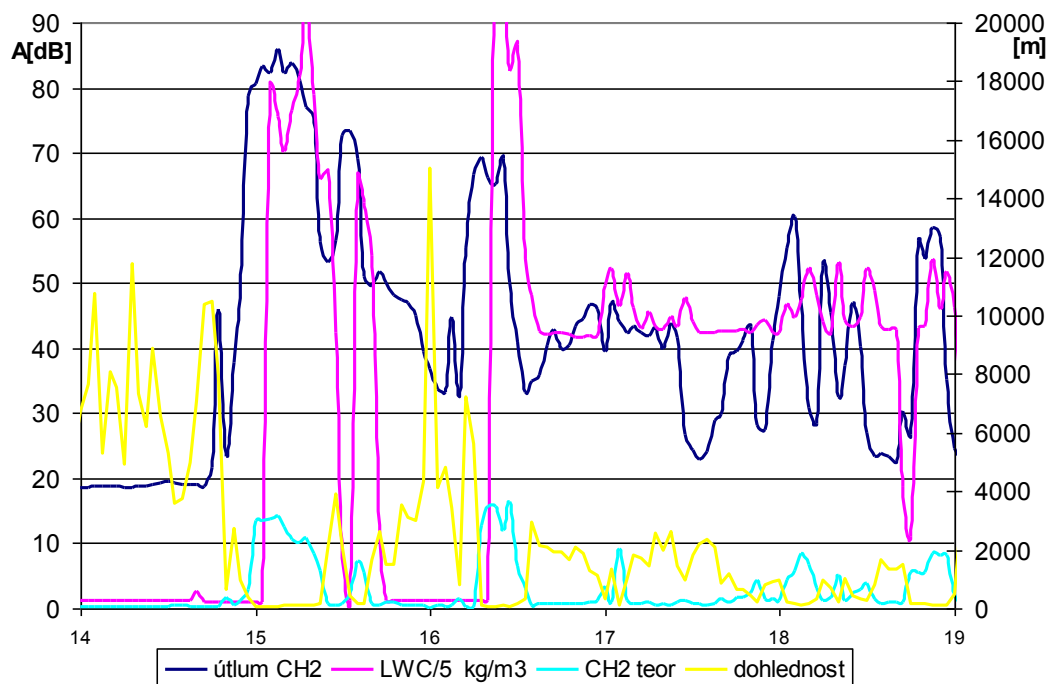
Na předešlém grafu (Obr. 20) je vidět, jak útlum kopíruje mlhu, kterou zaznamenaly kamery. Dohledoměr ani jednu z nich nezaznamenal. Vedoucí observatoře Milešovka Jan Crha mi poskytl konzultaci. Pokud je na Milešovce mlha, velmi často se stává, že do výšky zhruba 2 metry nad zemí žádná mlha není.

To je způsobeno tím, že vyhřátá země ohřívá vzduch v její blízkosti. Při poklesu teploty vzduchu pod teplotu tzv. rosného bodu se vodní páry kondenzují a vzniká mlha. Vzhledem k tomu, že je teplota vzduchu blízko země vyšší, stává se, že mlha se tvoří až pár metrů nad zemí.

Nemůžeme tedy regulérně porovnávat útlum optického spoje s daty z dohledoměru PWD11 kvůli jeho nevhodnému umístění. Lepších výsledků by se dosáhlo, kdyby byl dohledoměr umístěn poblíž přijímače. Nemůžeme ani porovnávat teoretický útlum se skutečným, vypočítaný ze vztahu pro  $\alpha_{1,part}$  protože nemáme relevantní údaje dohlednosti.

## 7.2 Měření v roce 2009

### 7.2.1 Časový průběh měření



Obr. 21 Průběh útlumu v období 14.-19. ledna 2009

Na předchozím grafu č.21 je zobrazen průběh měření v lednu 2009, kdy je nainstalován novější dohledoměr PWD21. Jsou k dispozici též výsledky z měření LWC přístrojem PVM-100.

Je patrné, že PWD21 měří dohlednost o mnoho kvalitněji než PWD11. Průběh útlumu na kanálu 2 je velmi dobře korelovaný s dohledností a tím pádem i teoreticky vypočítaným útlumem  $\alpha_{1,\text{part}}$ . Vztah pro  $\alpha_{1,\text{part}}$  (3.1) vyjadřuje útlum způsobený atmosférickými částicemi, zatímco naměřený útlum je celkový. Pro porovnání by se tedy z útlumu kanálu 2 měla odečíst hodnota, odpovídající útlumu při jasném počasí. V období na předchozím grafu je tato hodnota přibližně 18dB.

Teoretický vztah pro  $\alpha_{1,\text{part}}$  se nepotvrdil, průběhy jsou dobře korelované, protože je teoretický útlum vypočítáván z dohlednosti, ale kvantitativní hodnoty se výrazně liší. To může být způsobeno opět tím, že blízko u země je méně intenzivní mlha. Tím pádem dohledoměr změří vyšší dohlednost a ze vzorce vyjde menší útlum.

Útlum na kanálu 2 s množstvím vody ve vzduchu LWC dobře koreluje, pouze je LWC posunuto z neznámých příčin o zhruba 4 hodiny dopředu. Surová data, která byla k dispozici s grafem souhlasí.

## 7.2.2 Korelační koeficienty

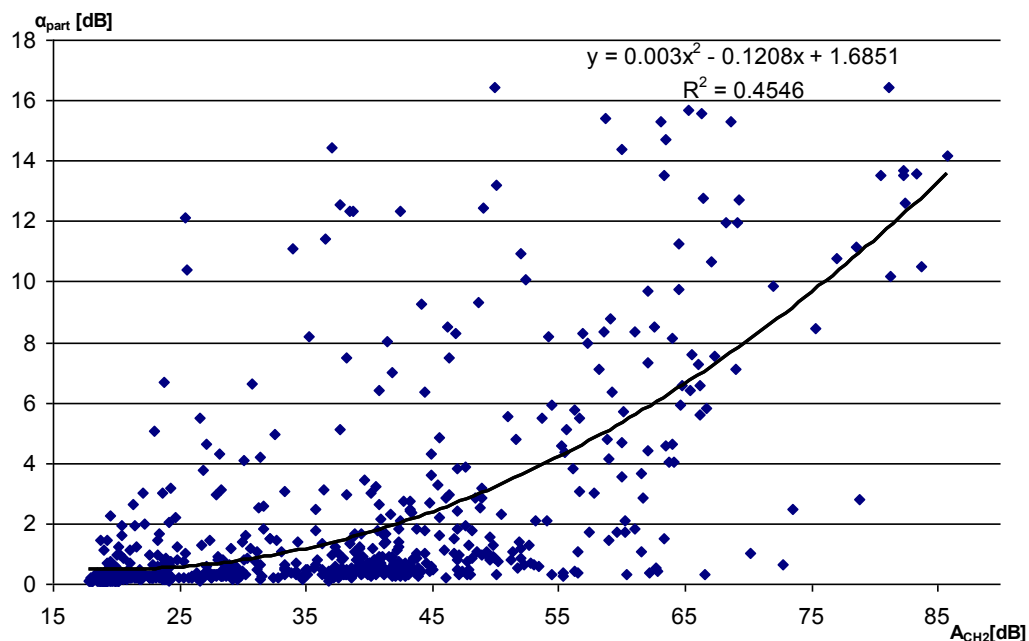
Tab. 4 Tabulka korelačních koeficientů

	dohlednost	LWC	CH2 teor
CH2	-0.685	0.436	0.685
CH2 teor	-1	0.461	*
LWC	-0.436	*	*

Korelační koeficienty v tabulce č. 4 jsou počítány v Matlabu příkazem „corr“. Ve vztahu pro teoretický útlum je dohlednost ve jmenovateli, to znamená, že jejich vzájemný vztah je nelineární - má tvar hyperboly. Pro výpočet korelačního koeficientu tedy nemůžeme využít standardní Pearsonovu metodu, která vypočítává lineární korelační koeficient. Koeficienty v tabulce jsou vypočteny Spearmanovou metodou, která vypočítává nelineární korelační koeficienty.

Nejdůležitější koeficient  $\phi(\text{CH2}, \text{CH2 teor})$  je 0.685, což je velmi dobrá korelace. Koeficienty mezi LWC a útlumy jsou pod 0.5, po umělém posunutí LWC o 4 hodiny zpět by se zvedly koeficienty o více než jednu desetinu.

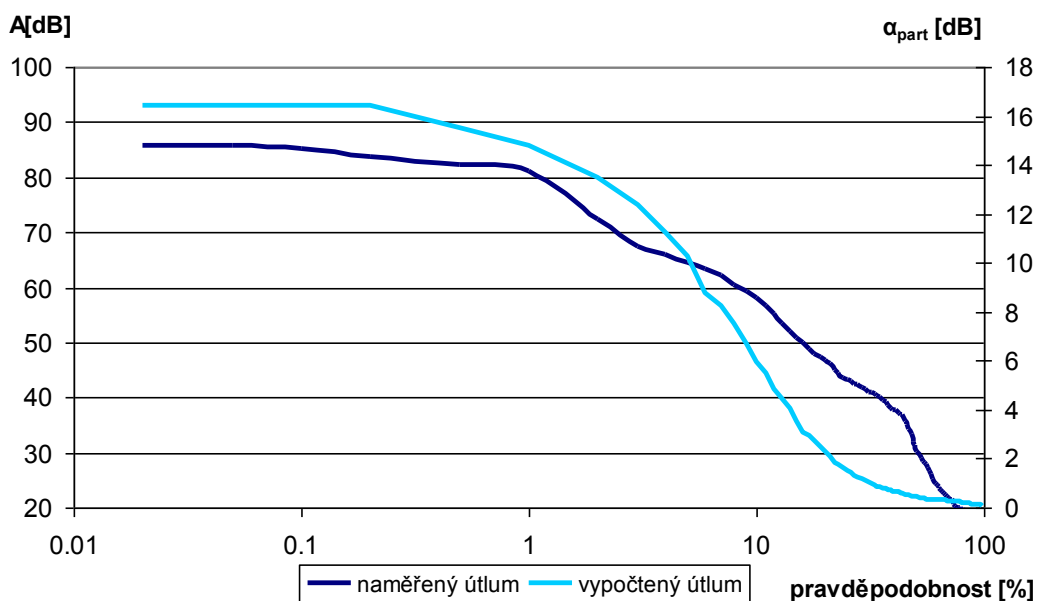




Obr. 22 Bodový graf

Na grafu č.22 je zobrazena závislost mezi naměřeným útlumem na kanálu 2 a teoreticky vypočítaným útlumem z dohlednosti. Závislost je proložena polynomičnou spojnicí trendu 2. řádu. R je hodnota spolehlivosti a vyjadřuje podobnost mezi grafem a spojnicí trendu. Nabývá hodnot mezi 0 a 1, přičemž 1 značí absolutní shodu. Ideálně by spojnice trendu zde měla být lineární, nám vyšel nejpodobněji polynom 2. řádu.

### 7.2.3 Distribuční funkce útlumu



Obr. 23 Distribuční funkce útlumu v lednu 2009

Distribuční funkce má pro komunikaci velký význam. Ukazuje totiž, s jakou pravděpodobností bude útlum na optickém spoji větší než daná hodnota. Distribuční funkce je definována jako pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude hodnoty **menší nebo rovné** než je daná hodnota. Z našeho hlediska je náš graf tedy doplněk distribuce.

Z grafu (Obr. 23) můžeme odvodit, že dohledoměr PWD21 měřil dohlednost se stejnou statistickou četností jako se mlhy objevují na spoji, kde působí útlum.

Z této distribuční funkce se vychází například při stanovení vyzářeného výkonu. Pokud si stanovíme, že chceme, aby spolehlivost spoje byla  $P_{av} = 99,9\%$ , zjistíme, že s pravděpodobností 0,1% byl útlum na spoji v lednu větší než 81dB. Vyzářený výkon můžeme stanovit větší ale z hlediska ekonomické otázky je výhodné, když to bude výkon takový, aby přijímač rozpoznal signál utlumený i o 81dB.



## 8 Závěr

Cílem této práce je zpracování dat z měření na optickém spoji a jeho následné vyhodnocení.

Podle předpokladu vyšla velmi dobrá korelace mezi útlumy na obou kanálech o vlnových délkách 850nm a 1550nm. Nebyl ovšem potvrzen předpoklad, že pro menší vlnovou délku by měl být menší útlum, na počátku roku 2008 má větší útlum kanál 1 s vlnovou délkou 1550nm, v létě má větší útlum kanál 2 s vlnovou délkou 850nm a ke konci roku byly hodnoty téměř totožné.

Dále bylo zjištěno, že nejmenší průměrný hodinový útlum v rámci dne byl v noci a největší dopoledne kolem desáté hodiny ranní.

V roce 2008 byl na Milešovce nainstalován dohledoměr Vaisala PWD11. Data z jeho měření ale neodpovídají průběhu útlumu na optickém spoji. Důvodem je jeho nevhodné umístění zhruba 2 metry nad zemí. Do výšky pár metrů nad zemí se totiž na Milešovce velmi často netvoří mlha z důvodu vyšší teploty vzduchu, kterou způsobuje vyhřátá země. Dalším důvodem je nižší kvalita přístroje z hlediska meteorologického měření, primárně je tento typ určen pro analýzu počasí u silničních komunikací.

V roce 2009 byl přístroj vyměněn za typ PWD21, který měří dohlednost kvalitněji. Byla zjištěna velmi dobrá korelace ( $\varphi = -0.685$ ), ale kvantitativní hodnoty neodpovídají empirickému vzorci pro výpočet útlumu vlivem atmosférických částic. To může být způsobeno taktéž nevhodným umístěním, novější typ sice mlhu detekuje ale výrazně menší, než je o pár metrů výš.

Pro lepší měření dohlednosti je třeba umístit dohledoměr alespoň do střední výšky optického spoje.

Výsledky z měření obsahu tekuté vody ve vzduchu (LWC) jsou k dispozici za leden 2009. Korelační koeficient průběhů útlumu a LWC je  $-0,436$ , což značí dobrou korelaci ale ne úplnou závislost. Útlum optického spoje závisí víc na dohlednosti než na LWC.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] KOLKA Z., WILFERT O., FIŠER O.: *Achievable qualitative parameters of optical wireless links*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2007, Roč. 9, č. 8, s. 2419-2423. ISSN 1454-4164.
- [2] WILFERT, O., KOLKA, Z., BIOLKOVA, V., KŘIVÁK, P., DORDOVÁ, L., FIŠER, O., NĚMEČEK, J.: *Dual optical wireless test link*. Proceedings of the SPIE, Volume 7091 (Free-Space Laser Communications VIII), pp. 70910W-70910W-8 (2008).
- [3] I. KIM, B. McARTHUR, E. KOREVAAR: *Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications*, Proc. of SPIE – Vol. 4214 Optical Wireless Communications III, ed. Eric J. Korevaar, February 2001, pp. 26-37.
- [4] WILFERT, O.: *Optická komunikace laserovými svazky* [online]. 2007 [cit.2009-05-10]. Dostupný z WWW: <[http://www.urel.feec.vutbr.cz/web\\_documents/seminare/Prezentace\\_opticke\\_kom\\_07.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/seminare/Prezentace_opticke_kom_07.pdf)>.
- [5] 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)>.
- [6] VAISALA: *Parametry PWD* [online]. 2005 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.vaisala.com/files/PWD%20Brochure%20in%20English.pdf>>.