

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Vliv atmosférických turbulencí na útlum optických  
bezkabelových spojů

Viktor Pek

Bakalářská práce  
2013

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Viktor Pek**  
Osobní číslo: **I10515**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
Název tématu: **Vliv atmosferických turbulencí na útlum optických bezkabelových 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 :

Zpracujte záznamy senzorů pro měření tlaku, vlhkosti a teploty na experimentálním pracovišti Milešovka. Z těchto parametrů spočtete strukturální parametr indexu lomu atmosféry a korelujte ho s útlumem optického bezkabelového spoje. Zjistěte matematickou závislost mezi těmito dvěma veličinami.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

[1] P. E. Ciddor. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared Appl. Opt. 35, 1566-1573 (1996)

[2] O. Wilfert. Optoelektronika. Elektronický učební text. UREL VUT v Brně, Brno 2002, REL 023

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Vladimír Brázda**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

**21. prosince 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**10. května 2013**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

## 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 6. 5. 2013

Viktor Pek

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Ondřejovi Fišerovi, CSc. z Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd České republiky za námět mé bakalářské práce, který je mi blízký a který má i praktické využití. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vladimírovi Brázdovi z Katedry elektrotechniky Univerzity Pardubice za cenné připomínky, které významnou měrou pomohly k vytvoření bakalářské práce v předkládaném znění.

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá vlivem atmosférických turbulencí na útlum optického bezkabelového spoje. V teoretické části práce je popsán optický bezkabelový spoj a jsou zde teoreticky shrnuty vybrané útlumové faktory. Praktická část se zabývá statistickým zpracováním dat z experimentálního pracoviště Milešovka. Hlavním přínosem práce je odvození matematicky vyjádřené závislosti mezi naměřeným útlumem optického spoje a strukturním parametrem indexu lomu.

## **Klíčová slova**

Optický bezkabelový spoj, atmosférická turbulence, útlum, strukturní parametr indexu lomu, index lomu

## **Title**

Influence of atmospheric turbulence on the attenuation of free space optical links

## **Annotation**

This thesis deals with the influence of atmospheric turbulence on the attenuation of free space optical links. The theoretical part describes the free space optical links and theoretically summarizes selected attenuation factors. The practical part deals with statistical processing the data received from the experimental center Milešovka. The main contribution of this work is the derivation of mathematical expression of the relationship between the measured attenuation of optical link and structural parameter of the refractive index.

## **Keywords**

Free space optical link, atmospheric turbulence, attenuation, structural parameter of the refractive index, index of refraction

## Obsah

<b>Seznam zkratek.....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>11</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>12</b>
<b>1 Optický bezkabelový spoj.....</b>	<b>13</b>
1.1 Princip .....	13
1.2 Výhody OBS.....	14
1.3 Nevýhody OBS.....	14
<b>2 Vliv atmosféry na OBS.....</b>	<b>15</b>
2.1 Útlum ředěním.....	15
2.2 Útlum čistou atmosférou.....	15
2.3 Útlum deštěm.....	16
2.4 Útlum sněhem.....	17
2.5 Útlum mlhou.....	17
2.6 Útlum atmosférickými turbulencemi.....	18
<b>3 Výkonové úrovně spoje.....</b>	<b>26</b>
3.1 Stacionárně -statistický model.....	26
<b>4 Optický spoj na Milešovce.....</b>	<b>29</b>
4.1 Vysílač - přijímač OBS.....	29
<b>5 Analýza dat.....</b>	<b>31</b>
5.1 Analýza spoje 830 nm.....	31
5.2 Analýza spoje 1550 nm.....	39
5.3 Porovnání obou kanálů.....	45
<b>Závěr.....</b>	<b>47</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>49</b>

## Seznam zkratk

OBS	Optický bezkabelový spoj
ÚFA AV ČR	Ústav fyziky atmosféry Akademie věd České republiky
LED	Light emitting diode
PIN	Positive Intrinsic Negative
APD	Avalanche PhotoDiode



## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Propustnost atmosféry v závislosti na vlnové délce .....	15
Obrázek 2 - Atmosférické turbulence .....	19
Obrázek 3 - Turbulentní víry v úseku cesty .....	20
Obrázek 4 - Závislost relativní variance optické intenzity na parametru $\beta_0$ .....	21
Obrázek 5 - Výkonové úrovně spoje .....	27
Obrázek 6 - Průběh přijatého výkonu .....	28
Obrázek 7 - Blokované schéma OBS .....	29
Obrázek 8 - Umístění spoje a senzorů.....	30
Obrázek 9 - Optický vysílač a přijímač.....	30
Obrázek 10 - Časový průběh naměřeného útlumu optického spoje (830 nm) za celé období po filtraci.....	32
Obrázek 11 - Vliv výpadků měřicích přístrojů pro spoj 830 nm (nahore - měření útlumu pouze bez výpadků přijímače-vysílače; dole - bez výpadků všech měřicích přístrojů).....	32
Obrázek 12 - Porovnání A830 a Aturb, vybraného úseku v délce 48 hodin -dodatečné prahování.....	33
Obrázek 13 - Průměrovaný bodový graf - porovnání A830 a Aturb vybraného úseku v délce 48 hodin.....	34
Obrázek 14 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání Cn2 s A830 a Aturb.....	34
Obrázek 15 - Časový průběh útlumu, vlhkosti a teploty vybraného úseku v délce 48 hodin (830 nm).....	36
Obrázek 16 - Časový průběh útlumu a teploty vybraného úseku v délce 48 hodin (830 nm) .....	37
Obrázek 17 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání Cn2 s A830. Všechna data pro $R > +0,4$ s ohledem na co nejméně výpadků.....	38
Obrázek 18 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání Cn2 s A830. Všechna data pro $R > +0,4$ s ohledem na co nejméně výpadků. Logaritmické měřítko osy x.....	38
Obrázek 19 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání Cn2 s A830. Dva nezávislé analyzované úseky s proložením rovnice (41).....	39
Obrázek 20 - Časový průběh A1550 za celé období po filtraci.....	40
Obrázek 21 - Porovnání A1550 a Aturb vybraného úseku v délce 47 hodin.....	40

Obrázek 22 - Průměrovaný bodový graf - porovnání A1550 a Aturb vybraného úseku v délce 47 hodin.....	41
Obrázek 23 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání Cn2 s A1550 a Aturb.....	41
Obrázek 24 - Časový průběh útlumu, vlhkosti a teploty (1550 nm).....	42
Obrázek 25 - Časový průběh útlumu a teploty (1550 nm).....	43
Obrázek 26 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání Cn2 s A1550. Všechna data pro $R > +0,2$ s ohledem na co nejméně výpadků.....	43
Obrázek 27 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání Cn2 s A1550. Dva nezávislé analyzované úseky s proložením rovnice (44).....	44
Obrázek 28 - Porovnání vzorců obou kanálů .....	45
Obrázek 29 - Porovnání vzorců obou kanálů - logaritmické měřítko osy x.....	46

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 - Rozdělení světla podle vlnové délky .....	13
Tabulka 2 - Propustnost atmosféry .....	17
Tabulka 3 - Vliv strukturního indexu lomu .....	21
Tabulka 4 - Konstanty pro výpočet indexu lomu v optickém a infračerveném spektru.....	25
Tabulka 5 - Naměřené útlumy, které se objevují periodicky každý den.....	35

## Úvod

Optické spoje se v dnešní době používají pro přenos velkých objemů dat. V případě bezdrátového spoje se jedná o šíření laserového paprsku volným prostorem. V místech, kde není možná instalace optického kabelu z různých příčin, je často možné realizovat spoj bezdrátově. Je ale nutné počítat s vyšším výskytem degradace signálu, který je silně závislý na aktuálním stavu přenosové cesty.

Pro přenos informace optickými bezdrátovými spoji se používají vybrané vlnové délky z tzv. komunikačních oken v infračervené spektrální oblasti. Tyto vlnové délky se vyznačují nejvyšší propustností v atmosféře. Vlivem rozšiřování svazku dochází k ředění energie a na přijímač dopadá méně energie. Dále, jakékoliv volně pohybující částice v přenosové části spoje způsobují pohlcení a rozptýlení energie. Tyto a jiné faktory omezují maximální vzdálenost jednoho spoje. Pro realizaci delších spojení je řešením kaskádní řazení jednotlivých spojů.

Tato práce se v teoretické části zabývá uvedením některých útlumových faktorů na optický bezkabelový spoj. Praktická část se zabývá analýzou dat útlumu z experimentálního pracoviště Milešovka a vyhodnocuje vliv strukturního parametru indexu lomu, kterým je atmosférická turbulence charakterizována.

Dominantními útlumovými faktory jsou všechny druhy hydrometeorů, čili mlha, déšť, sníh atd. Útlum atmosférickými turbulencemi se prakticky projevuje až při jasném počasí. Pro správnou analýzu bylo tedy nutné nejprve filtrovat data se srážkovými úseky a případy, kdy se spoj nacházel v mlze či nízké oblačnosti.

# 1 Optický bezkabelový spoj

Optický bezkabelový spoj (OBS) je jeden z možných způsobů přenosu dat volným prostorem přinášejících řadu výhod, ale rovným dílem i řadu nevýhod.

## 1.1 Princip

OBS se skládá z vysílače, přijímače a volného prostoru, v němž se daný spoj provozuje. Spoj je realizován optoelektronickými prvky. Ve vysílači může být například laserová či elektroluminiscenční (LED) dioda a v přijímači fotodioda typu PIN nebo lavinová fotodioda APD. V poslední době byly vyvinuty i plně optické spoje, kde optická anténa zesiluje a přenáší signál přímo z optického kabelu. Přenášený užitečný signál je namodulován na vlnových délkách v infračervené spektrální oblasti viz. Tabulka 1. Jedná se o lidským okem neviditelné spektrum. Z důvodu možnosti poškození zraku náhodného pozorovatele, je vysílací výkon omezen na jednotky až desítky mW, v závislosti na vlnové délce. Pro zlepšení parametrů přenosu může být zajištěna zpětná vazba soustavy pro částečné kompenzování změny přijaté úrovně signálu. Vzhledem k nízké spolehlivosti je v současné době výhodné zálohovat OBS rádiovým spojem. Poté se již jedná o hybridní spoj, který využívá přednosti jednotlivých vlnových délek. Je nutné si ale uvědomit, že použitím rádiového spoje výrazně klesá bezpečnost vůči odposlechům. V současné době nejsou technické prostředky na dosažení vysoké směrovosti rádiových spojů v řádu miliradiánů a méně.

Tabulka 1 - Rozdělení světla podle vlnové délky [1]

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	<b>780-1430 nm</b>	384-214
	6	<b>1,4-3 μm</b>	214-100
	7	3μm-1mm	100-0,3

## 1.2 Výhody OBS

**bezlicenčnost** - na dané frekvenční pásmo se nevztahují omezení

**rychlá instalace** - odpadá nutnost instalace kabelů

**velké přenosové rychlosti** - optimální pro spojení optických kabelů

**relativně bezpečný přenos dat** - malý rozptyl paprsku znemožňuje neoprávněný odposlech. Do paprsku je nutné vstoupit a takovýto čin je možné detekovat v důsledku narušení spojení. Ovšem na větší vzdálenosti je zpravidla paprsek natolik rozšířen, že mnohonásobně svojí plochou přesahuje přijímací aperturu přijímače a při odposlechu již není nutné přerušovat spoj.

**galvanické oddělení** - odstraňuje se negativní vliv galvanické vazby metalických vedení

**elektromagnetická odolnost** - díky vysoké směrovosti paprsků je obtížné spoj rušit

## 1.3 Nevýhody OBS

**přímá viditelnost** - mezi přijímačem a vysílačem nesmějí být překážky. Pro překonávání překážek se může použít kaskádní spojení, kde mezi jednotlivými prvky musí být přímá viditelnost

**útlum prostředím** - na paprsek působí různé negativní vlivy např. molekuly vzduchu, různé hydrometeory, ředění paprsku atd.

**nízká spolehlivost** - v důsledku nutnosti přímé viditelnosti může kdokoliv či cokoliv vstoupit do dráhy paprsku, a tím způsobit výpadek spoje. K výpadku může dojít pokud se přesáhne citlivostní práh přijímače. Řešením může být dostatečná rezerva ve výkonu vysílače a zvýšení citlivosti přijímače.

**omezený dosah** - vlivem negativních dopadů na šíření paprsku není možné signál přenášet na příliš velké vzdálenosti. Jedná se o relativní pojem neboť záleží na typu okolí, v němž se OBS provozuje.

## 2 Vliv atmosféry na OBS

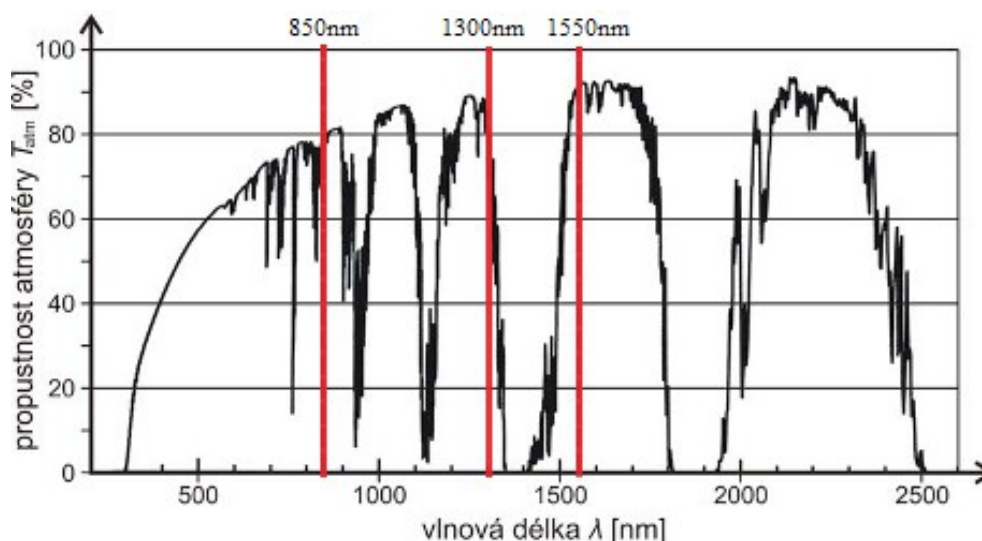
Na šířící se optický svazek působí mnoho faktorů, mezi které patří například útlum způsobený deštěm, mlhou, nízkou oblačností, mokřým sněhem, suchým sněhem, kroupami, turbulencí, ale i útlum tzv. čistou atmosférou, ředěním paprsku, prolétajícím živým tvorem atd. Některé útlumové faktory jsou probrány v následujících podkapitolách.

### 2.1 Útlum ředěním

Vysílačem produkované elektromagnetické vlny se šíří v daném rozložení paprsku. Nejčastěji se používá tvar Gaussovy křivky. Tato křivka se s narůstající vzdáleností rozšiřuje zpravidla v jednotkách miliradiánů. Jedná se o technologický dopad, neboť není možné v reálných podmínkách zajistit dokonalou směrovost spoje. Za dokonalou křivku by v tomto případě byl obdélník, kde veškerá vysílaná energie by dopadla na plochu o stejném rozměru, z jakého byl svazek vyslán. V opačném případě se dopadající energie natolik rozprostře, že na větší vzdálenosti by přijímací apertura musela být značně velká pro pochycení veškeré energie, pokud nebudeme uvažovat rozptyl a jiné nežádoucí dopady na šířící se svazek. Vysílač tedy produkuje elektromagnetické vlny o daném výkonu a tento výkon se rozprostírá při rozšiřování svazku. To znamená, že s narůstající vzdáleností dopadá na přijímač méně energie.

### 2.2 Útlum čistou atmosférou

Za čistou atmosféru se považuje taková atmosféra, kde není snížena dohlednost a je tedy jasno. Vzduch obsahuje různé molekuly, pevné částice, hmyz atd. a díky tomu vzniká útlum. Útlum čistou atmosférou se může měnit jak v krátkodobých intervalech, řádu minut, tak i v dlouhodobých, v řádu týdnů až měsíců. Na základě čisté atmosféry je možné stanovit propustnost pro jednotlivé vlnové délky viz Obrázek 1.



Obrázek 1 - Propustnost atmosféry v závislosti na vlnové délce [2]

Z obrázku je patrné, že jsou přítomny oblasti s velmi malou propustností, což se dá vysvětlit interakcí paprsku o určité vlnové délce s částicemi ve vzduchu. Na základě nejlepší propustnosti se pro přenos informace volí například blízké okolí vlnových délek vyznačené červenými čarami. Jedná se o tzv. komunikační okna.

### 2.3 Útlum deštěm

Děšť patří mezi nejběžnější atmosférické jevy v mírných klimatických podmínkách. Vliv deště na OBS není tak velký jako na rádiový spoj, ale nelze ho zanedbat. Útlum je způsoben jak pohlcením části energie vlny kapkami, tak rozptylem. Na útlumu z hlediska vlnových délek světla výrazně převažuje vliv rozptylu a pohlcení lze zanedbat. Průměr dešťových kapek se pohybuje od 0,1 mm do 7 mm. Malé kapky jsou sférické, s narůstajícím průměrem se tvar kapky zplošťuje, až se začne zespona prohýbat dovnitř.

Pro výpočet měrného útlumu můžeme použít teoretický vztah [3]:

$$\alpha_{rain} = 8.686 \cdot 10^3 \cdot \lambda \cdot \text{Im} \int f(D) \cdot N(D) dD \quad [\text{dB/km}] \quad (1)$$

kde

- $D$  je efektivní průměr dešťové kapky [mm],
- $\lambda$  je vlnová délka [m],
- $f(D)$  je komplexní rozptylová funkce dešťových kapek udávající vztah mezi dopadající a rozptýlenou elektromagnetickou vlnou,
- $N(D)$  je spektrum dešťových kapek.

Spektrum kapek lze například aproximovat Marshall-Palmerovým vztahem [4]:

$$N(D, R) = 8000 e^{\frac{-4.1 \cdot D}{R^{0.21}}} \quad [\text{cm}^{-4}] \quad (2)$$

kde

- $R$  je intenzita srážek v [mm/h].

Rozptylová funkce závisí mimo jiné na tvaru dešťové kapky. Přesných výpočtů lze dosáhnout u malých kapek mající kulový tvar. Pro větší objemy, a tedy již nekulové tvary, lze do jisté míry používat aproximované tvary.

Pro vztah (1) je potřeba znát spektrum kapek. Můžeme použít jednodušší empirické vztahy, protože útlum prakticky nezáleží na vlnových délkách.



Následující vzorec byl odvozen za použití výpočtu rozptylových funkcí dle Mie [3];

$$\alpha_{rain} = 1.6 \cdot R^{0.63} \quad [\text{dB/km}] \quad (3)$$

Dále lze použít empirický vzorec naměřený ve Francii [5]:

$$\alpha_{rain} = 1.076 \cdot R^{0.67} \quad [\text{dB/km}] \quad (4)$$

## 2.4 Útlum sněhem

Při výpočtech útlumu se rozlišuje vlhký a suchý sníh. Na OBS je dosažen větší útlum při suchém sněhu. Na rozdíl od deště je vliv útlumu sněhem nezanedbatelně závislý na vlnové délce.

Výraz pro výpočet útlumu sněhem [6]:

$$\alpha_{snow} = a \cdot S^b \quad [\text{dB/km}] \quad (5)$$

kde:

- $S$  je intenzita sněžení [mm/h],
- $a$ ,  $b$  jsou funkce vlnové délky a jsou dány Tab. 2:

Tabulka 2 - Propustnost atmosféry [6]

	<b>a</b>	<b>b</b>
Vlhký sníh	$0.0001023\lambda_{nm} + 3.7855466$	0.72
Suchý sníh	$0.0000542\lambda_{nm} + 5.4958776$	1.38

## 2.5 Útlum mlhou

Mlha, spolu s nízkou oblačností, má největší vliv na degradaci optického svazku. Průměr kapek se pohybuje od 2  $\mu\text{m}$  do 80  $\mu\text{m}$ . Velikost útlumu se velice dobře určuje z dohlednosti, která charakterizuje hustotu mlhy. Dohlednost je definovaná jako [2]:

„Dohlednost je vzdálenost  $x$ , kde zdánlivý kontrast  $C(x)$  klesne na 2 %“

$$C(x) = \frac{I_z(x) - I_p(x)}{I_p(x)} \quad (6)$$

kde  $I_z(x)$  a  $I_p(x)$  jsou svítivost zdroje a pozadí ve vzdálenosti  $x$ .

Dohlednost lze do jisté míry určovat subjektivně na základě zkušeností nebo za použití tzv. dohledoměrů. Dohledoměry pracují na různých principech a jedním z těchto principů je měření rozptylu na kapkách vody.

Pro  $\tau = 2\%$  byl stanoven vzorec, který zohledňuje vlnovou délku světla [2].

$$\alpha_0 = \frac{3.91}{V} \cdot \left( \frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q} \quad [\text{km}^{-1}] \quad (7)$$

kde

- $V$  je dohlednost [m],
- $\lambda_{nm}$  je vlnová délka [nm],
- $q$  je koeficient závislý na dohlednosti dle I.I.Kima [7]:

$$q = 1,6 \quad \text{pro } V > 50 \text{ km}$$

$$q = 1,3 \quad \text{pro } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}$$

$$q = 0,16V + 0,34 \quad \text{pro } 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$$

$$q = V - 0,5 \quad \text{pro } 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km}$$

$$q = 0 \quad \text{pro } V < 0,5 \text{ km}$$

Pro převod do dB je nutné vztah upravit.

$$\alpha = \frac{16.98}{V} \cdot \left( \frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q} \quad [\text{dB/km}] \quad (8)$$

Z dat OBS na Milešovce byl stanoven empirický vztah, který nejvíce vyhovoval naměřeným údajům při daném měřicím vybavení [2]:

$$A = 401.4 \cdot V^{-0.5738} - 1.462 \quad [\text{dB}/60\text{m}] \quad (9)$$

## 2.6 Útlum atmosférickými turbulencemi

Turbulence vznikají jako důsledek proudění vzduchu vyvolaný tlakovými změnami, které jsou způsobeny změnami teplot. Jinými slovy, turbulence vznikají na základě změn teploty mezi Zemským povrchem a atmosférou. Největších teplotních rozdílů je dosaženo během poledne a půlnoci. Sluneční záření způsobuje ohřev země, a to je jednou z příčin vzniku

turbulencí, které můžeme charakterizovat indexem lomu. To je také důvod, proč za teplých jasných dnů je největší útlum čisté atmosféry způsoben právě turbulencemi.

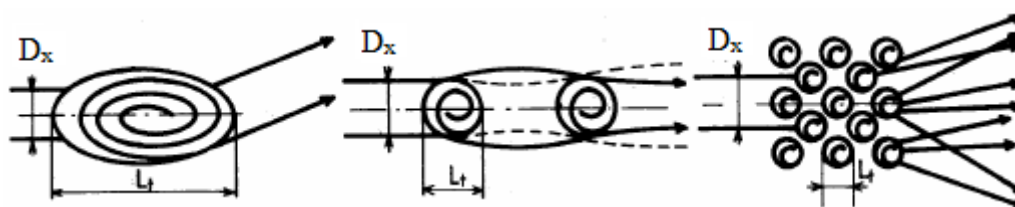
Index lomu je obecně komplexní veličinou, tedy kmitočtově závislou, a je možné ji vyjádřit následovně:

$$N(\omega) = n(\omega) + j\kappa(\omega) \quad (10)$$

kde:

- $n(\omega)$  je reálná část a představuje rozptyl,
- $\kappa(\omega)$  je imaginární část a představuje absorpci.

Atmosférické turbulence narušují koherenci optického svazku. Vliv velikosti turbulentního víru na velikost optického svazku názorně ukazuje následující obrázek.



Obrázek 2 - Atmosférické turbulence [2]

kde

- $L_t$  je velikost turbulentní poruchy vzhledem ke směru šíření optického svazku,
- $D_x$  je šířka optického svazku ve vzdálenosti  $x$ ,

Z obrázku jsou jasně patrné tři případy:

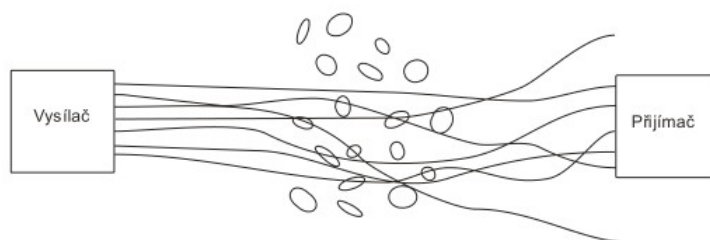
$D_x \ll L_t$  - dochází k odklonění paprsku (možnost řešit situaci automatickým natáčením vysílače)

$D_x \approx L_t$  - dochází ke změně divergence svazku, nikoliv k odklonu (zpravidla nemá zásadní důsledky na přenos signálu)

$D_x \gg L_t$  - menší množství turbulentních vírů způsobí rozptyl signálu do více směrů (velice negativní dopad na přenos signálu)

Dále je možné si uvědomit, že se v podstatě nejedná o útlum, ale o přerozdělení signálu.

Takovéto nehomogenity mohou dosahovat velikostí od milimetrů po stovky metrů. Následující obrázek názorně ukazuje přerozdělení signálu.



Obrázek 3 - Turbulentní víry v úseku cesty [8]

Pro výpočet útlumu potřebujeme znát index lomu minimálně dvou míst na úseku, ve kterém probíhá měření. Index lomu lze určit pomocí teploty, tlaku a vlhkosti. Jelikož turbulence mají statistický charakter, musí být pro ně odvozeny statistické metody. Veličina popisující tuto problematiku je strukturní funkce indexu lomu  $D_n$  [8]:

$$D_n = \langle [n(A, t) - n(B, t)]^2 \rangle, \quad (11)$$

kde

- $n(A, t)$  je index lomu v místě  $A$  a v čase  $t$ ,
- $n(B, t)$  je index lomu v místě  $B$  a v čase  $t$ ,
- $\langle \rangle$  značí střední hodnotu (například minutové intervaly).

Dále strukturní funkce indexu lomu může být vyjádřena pomocí strukturního parametru indexu lomu  $C_n^2$  :

$$D_n = C_n^2 \cdot r^{\frac{2}{3}}, \quad (12)$$

kde

- $r$  je vzdálenost mezi bodem A a B [m].

Tedy pro výpočet strukturního parametru indexu lomu stačí jednoduchá matematická operace:

$$C_n^2 = D_n r^{-\frac{2}{3}} \quad [\text{m}^{-2/3}] \quad (13)$$

vztah platí pro  $l_{\min} \ll r \ll l_{\max}$ , kde  $l_{\min}$  a  $l_{\max}$  jsou minimální a maximální rozměry turbulentních virů.

Strukturní parametr indexu lomu nám udává míru turbulencí například viz. Tabulka 3.

**Tabulka 3 - Vliv strukturního indexu lomu [8]**

Cn <sup>2</sup> [m <sup>-2/3</sup> ]	Atmosferické turbulence
10 <sup>-16</sup>	slabé
10 <sup>-15</sup>	střední
10 <sup>-14</sup>	silné
10 <sup>-13</sup>	velmi silné

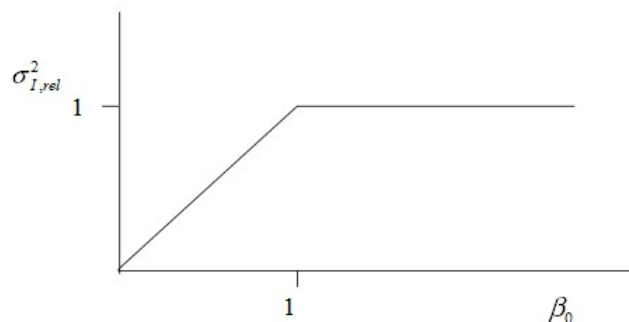
Dále je možné díky Cn<sup>2</sup> stanovit relativní varianci optické intenzity  $\sigma_{I,rel}^2$  v místě příjmu dle Rytovovy aproximace [8]:

$$\sigma_{I,rel}^2 = K C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}} \quad (14)$$

kde

- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  je vlnové číslo [m<sup>-1</sup>],
- $K$  je konstanta rovna 1,23 pro rovinnou vlnu nebo 0,5 pro kulovou vlnu,
- $L$  je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem [m].

Relativní variance optické intenzity nám udává míru fluktuace optického výkonu v intervalu  $\langle 0; 1 \rangle$ . Pro  $\sigma_{I,rel}^2 > 1$  nastává saturace a relativní variance optické intenzity dále neroste. Viz následující zjednodušený Obrázek 4.



**Obrázek 4 - Závislost relativní variance optické intenzity na parametru  $\beta_0$  [9]**

$$\text{Parametr } \beta_0 = K C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}} \quad (15)$$

$\sigma_{I,rel}^2 \ll 1$  , jedná se o slabou fluktuaci

$\sigma_{I,rel}^2 < 1$  , střední

$\sigma_{I,rel}^2 > 1$  , silnou [10]

Vztah (14) platí tedy pro  $\sigma_{I,rel}^2 < 1$  [11]

Na základě této podmínky platí z Rytovovy aproximace vztah pro útlum způsobený turbulencí [8,11]:

$$\alpha_{turb} = 2 \sqrt{23.17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6}} \quad [\text{dB}] \quad (16)$$

vyjadřující střední hodnotu tohoto útlumu.

Algoritmus určení indexu lomu v jednom bodě přenosové cesty [12]:

část 1. Výpočet parciálního tlaku

$$p_v = (RH/100) \cdot p_{sv} \quad (17)$$

pro teplotu nad 0°C

$$p_{sv} = 10^6 \cdot (2 \cdot C/X)^4 \quad (18)$$

$$X = -B + \sqrt{B^2 - 4AC} \quad (19)$$

$$A = \Omega^2 + K_1 \cdot \Omega + K_2 \quad (20)$$

$$B = K_3 \cdot \Omega^2 + K_4 \cdot \Omega + K_5 \quad (21)$$

$$C = K_6 \cdot \Omega^2 + K_7 \cdot \Omega + K_8 \quad (22)$$

$$\Omega = T + K_9 / (T - K_{10}) \quad (23)$$

$$T = t + 273,15 \quad (24)$$

pro teplotu pod 0°C

$$p_{sv} = 611,657 \cdot e^y \quad (25)$$

$$Y = A_1 \cdot (1 - \Theta^{-1,5}) + A_2 \cdot (1 - \Theta^{-1,25}) \quad (26)$$

$$\Theta = T / 273,16 \quad (27)$$

$$T = t + 273,15 \quad (28)$$

$$A_1 = -13,928169 \quad (29)$$

$$A_2 = 34,7078238 \quad (30)$$

kde

-  $p_v$  je parciální tlak [Pa],

- $RH$  je relativní vlhkost [%],
- $p_{sv}$  je tlak nasycené vodní páry [Pa],
- $t$  je teplota [°C],
- $K_1 - K_{10}$  jsou konstanty uvedené v levém sloupci Tab. 4.

část 2. Modifikovaná Edlénova formule pro výpočet indexu lomu vzduchu

$$n = n_p - 10^{-10} [(292,75)/(t + 273,15)] \cdot [3,7345 - 0,0401 \cdot S] \cdot p_v \quad (31)$$

$$n_p = 1 + p \cdot (n_s - 1) \cdot X/D \quad (32)$$

$$n_s = 1 + 10^{-8} \cdot [A + B/(130 - S) + C/(38,9 - S)] \quad (33)$$

$$X = [1 + 10^{-8} \cdot (E - F \cdot t) \cdot p] / (1 + G \cdot t) \quad (34)$$

$$S = 1/\lambda^2 \quad (35)$$

kde

- $n$  je index lomu,
- $t$  je teplota [°C],
- $p$  je tlak vzduchu [Pa],
- $\lambda$  je vlnová délka [ $\mu\text{m}$ ],
- $A, B, C, D, E, F, G$  jsou konstanty uvedené v pravém sloupci Tab. 4.



**Tabulka 4 - Konstanty pro výpočet indexu lomu v optickém a infračerveném spektru**

<b>Část 1</b>	<b>Část 2</b>
K1= 1.16705214528E+03	A=8342.54
K2= -7.24213167032E+05	B=2406147
K3= -1.70738469401E+01	C=15998
K4= 1.20208247025E+04	D=96095.43
K5= -3.23255503223E+06	E=0.601
K6= 1.49151086135E+01	F=0.00972
K7= -4.82326573616E+03	G=0.003661
K8= 4.05113405421E+05	
K9= -2.38555575678E-01	
K10= 6.50175348448E+02	

### 3 Výkonové úrovně spoje

Modelování spoje se dělí na dvě části [13]:

**stacionární část** - přenos závisí na výkonu vysílače, zisku antén a neměnných parametrech při šíření signálu (např. ředění paprsku)

**statistická část** - přenos závisí na stavu atmosféry (jedná se o náhodný charakter, proto je nutné statistické zpracování)

#### 3.1 Stacionárně -statistický model

Přijatý výkon lze vyjádřit rovnicí [13]

$$P_{m,RXA} = P_{m,TXA} - \alpha_{tot} + \gamma_{tot} \quad [\text{dB}] \quad (36)$$

kde

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

Celkový útlum  $\alpha_{tot}$  se získá jako

$$\alpha_{tot} = \alpha_{12} + \alpha_{atm} \quad [\text{dB}] \quad (37)$$

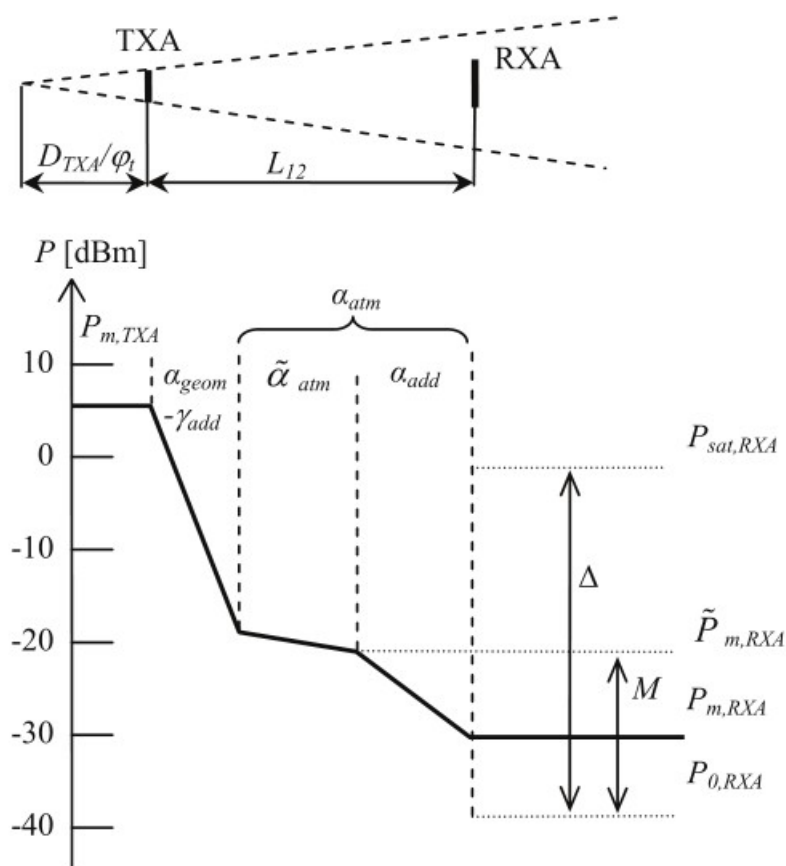
kde

- $\alpha_{12}$  je útlum vlivem ředění energie,
- $\alpha_{atm}$  je útlum způsobený atmosferickými jevy.

Útlum atmosférickými jevy je dále možné členit na útlum tzv. čistou atmosférou  $\tilde{\alpha}_{atm}$  a útlum náhodnými atmosférickými jevy  $\alpha_{add}$ .

Obrázek 5 zobrazuje jednotlivé výkonové úrovně OBS.  $P_{m, TXA}$  je střední hodnota vysílaného výkonu.  $P_{m, RXA}$  je střední hodnota přijatého výkonu.  $P_{sat, RXA}$  a  $P_{0, RXA}$  jsou saturační a citlivostní prahy přijímače, kde jejich rozdíl  $\Delta$  představuje dynamický rozsah přijímače.  $\tilde{P}_{m, RXA}$  je střední hodnota přijatého výkonu při ideální čisté atmosféře a rozdíl mezi touto hodnotou a prahem citlivosti představuje linkovou rezervu  $M$ .

V horní části obrázku je možné si všimnout důsledku útlumu ředěním, kdy na přijímací aperturu (RXA) dopadá méně energie.



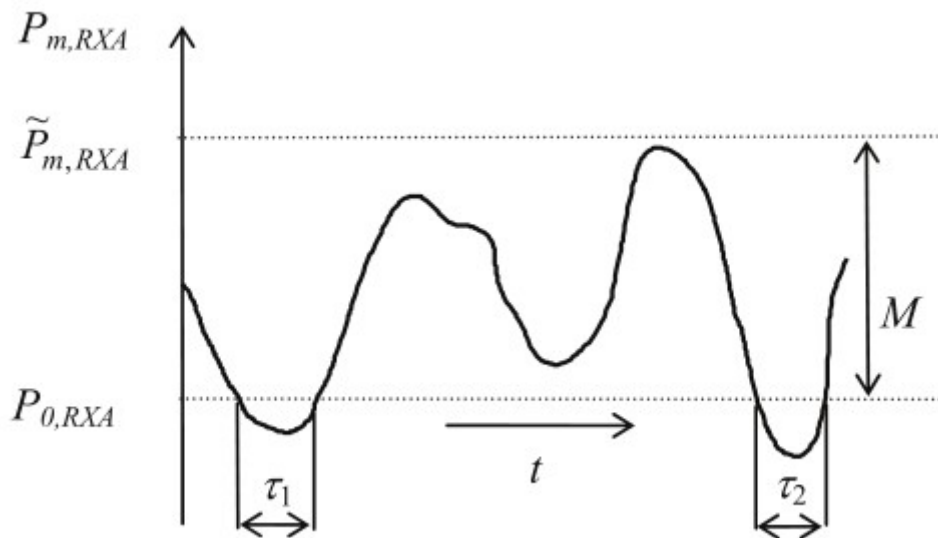
Obrázek 5 - Výkonové úrovně spoje [13]

Přenos optického svazku atmosférou je velmi náchylný na stav atmosféry. Největší vliv na přenos má především mlha a nízká oblačnost, mezi kterými je rozdíl pouze v mírně odlišném spektru velikosti kapek. Obrázek 6 zobrazuje náhodný charakter atmosféry, kdy může dojít k takovému poklesu dopadajícího výkonu, že přijímaný výkon se bude pohybovat pod citlivostním prahem přijímače. Na tomto modelu můžeme charakterizovat tzv. dostupnost spoje, jež je definována jako:

$$P_{av} = \frac{T - T_{un}}{T} = \frac{T - \sum \tau_i}{T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (38)$$

kde

- $\tau_i$  jsou jednotlivé výpadky spoje,
- $T$  je dostatečně dlouhá doba, při kterém probíhalo měření.



Obrázek 6 - Průběh přijatého výkonu [13]

## 4 Optický spoj na Milešovce

Předmětem této práce je zpracování naměřených dat a stanovení matematického modelu pro výpočet útlumu ze strukturního parametru indexu lomu.

Výzkumné pracoviště Milešovka se nalézá na nejvyšší hoře Českého středohoří. Její vrchol se tyčí do výšky 837 m n.m. a převyšuje okolní terén o 400 m. Svahy mají sklon až 30° a jsou hustě zalesněné. Vrchol hory čelí nejdrsnějšímu podnebí v celých Čechách, a proto se toto místo výborně hodí na testování vlivu reálných atmosférických jevů na přenos elektromagnetických vln.

V roce 1905 byla na hoře zřízena meteorologická stanice a od roku 1964 přešla správa pod Ústav fyziky atmosféry jenž je součástí Akademie věd ČR.

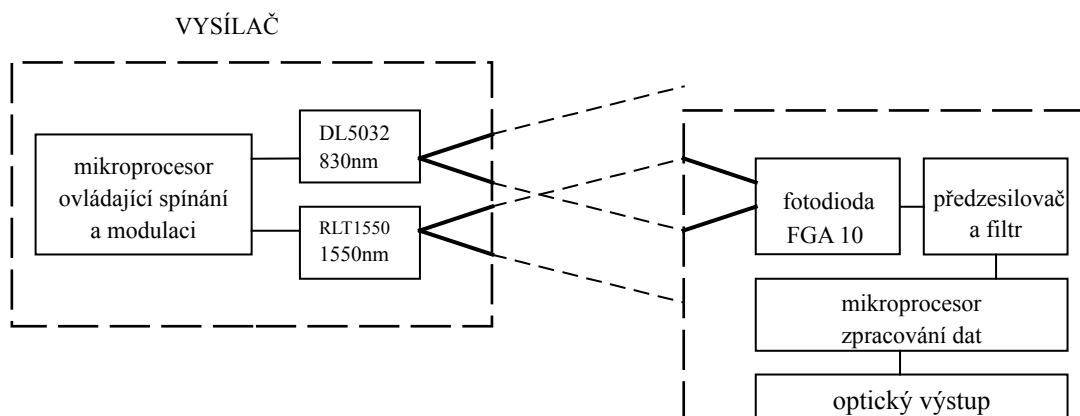
Pracoviště je vybaveno automatickou měřicí stanicí firmy Vaisala zahrnující řadu meteorologických přístrojů pro měření teploty, vlhkosti, tlaku, dohlednosti, obsahu tekuté vody ve vzduchu, srážek atd. Kromě toho je observatoř vybavena experimentálním optickým spojením, dvěma 3D anemometry pro měření rychlosti větru, kamerou a dvěma senzory teploty a vlhkosti určené primárně pro výpočet strukturního parametru indexu lomu  $C_n^2$ .

### 4.1 Vysílač - přijímač OBS

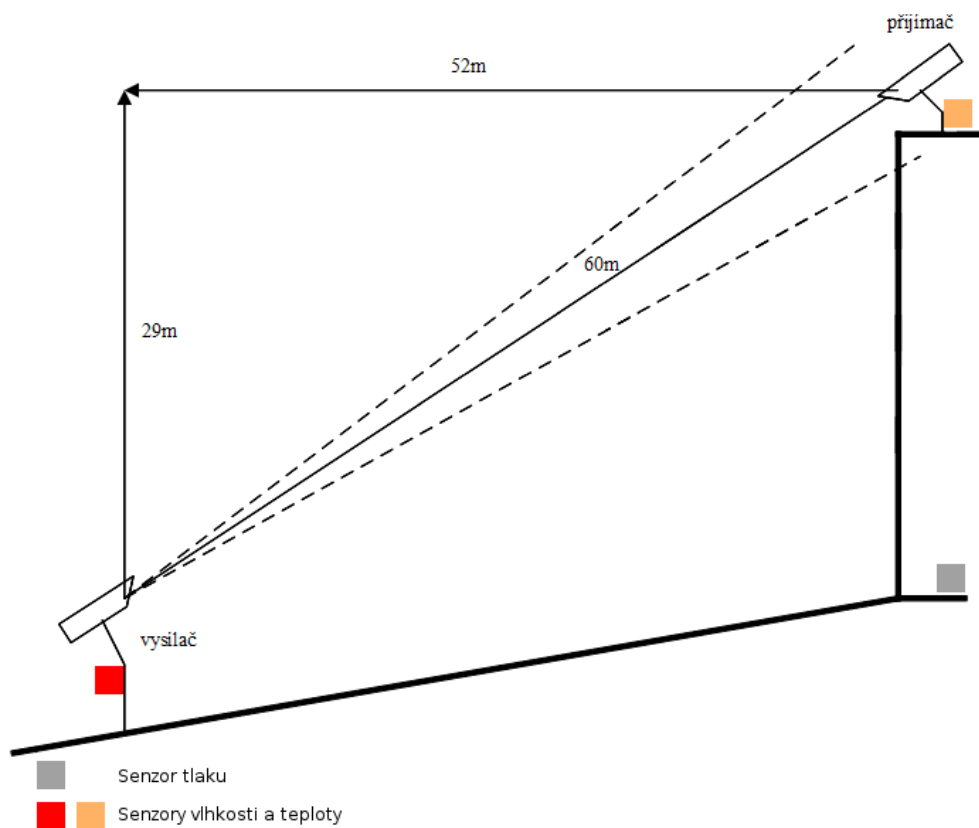
Doposud používaný spoj byl vyroben na VÚT Brno.

Vysílač je složen ze dvou oddělených laserových diod vysílajících na vlnových délkách 830 nm a 1550 nm. Rozptyl paprsku je 6 mrad pro 830nm a 12 mrad pro 1550 nm. Vysílání jednotlivých vlnových délek probíhá střídavě v 15ti vteřinových intervalech. Spínání a modulaci signálu zajišťuje mikroprocesor.

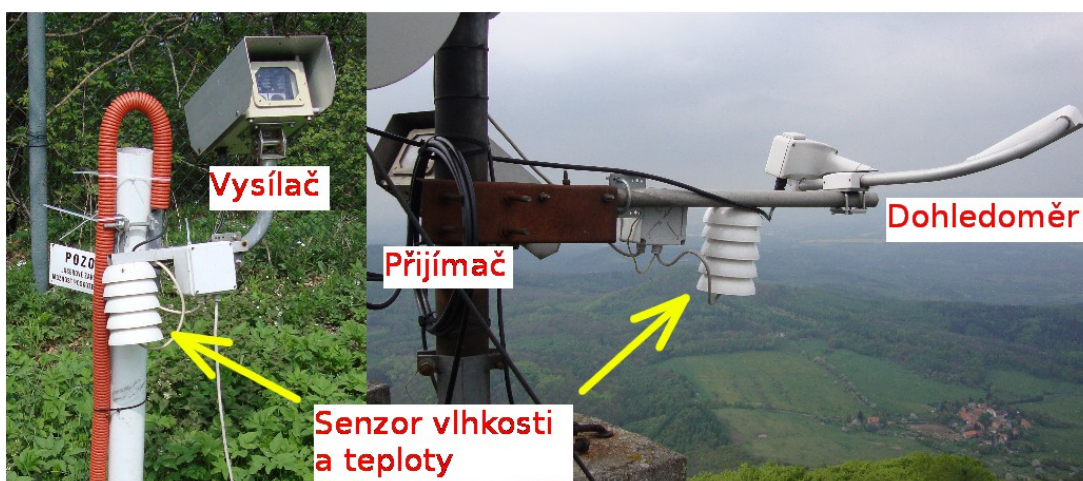
Přijímač obsahuje fotodiodu, předzesilovač a obvod pro zpracování dat viz Obrázek 7. Průměr přijímací apertury je 60 mm.



Obrázek 7 - Blokové schéma OBS [2]



Obrázek 8 - Umístění spoje a senzorů



Obrázek 9 - Optický vysílač a přijímač

## 5 Analýza dat

Cílem bakalářské práce je analýza naměřeného útlumu a strukturního parametru indexu lomu za účelem získání matematického modelu popisujícího vzájemnou vazbu mezi těmito dvěma parametry. Jednotlivá období pro rozbor byla vybrána na základě nejlepší kladné korelace mezi dvěma výše uvedenými parametry. Korelace je statistická informace, vyjadřující míru vzájemného vztahu porovnávaných dějů, a tato hodnota se pohybuje od -1 do +1. To znamená, že pokud bude korelace +1, budou změny jednotlivých porovnávaných dějů shodné. V situaci pro korelaci rovno -1 budou změny opačné. Při nule jsou děje nekorelované.

Pro zjednodušení bude v následujícím textu pojem korelace chápán právě jako vztah mezi naměřeným útlumem a strukturním parametrem indexu lomu.

K analýze jsou k dispozici data za období od 1.1.2012 až do 1.9.2012. Veškeré zobrazené průběhy mimo Obrázek 11 odpovídají čisté atmosféře.

Veškerá získaná data byla již časově synchronizována na jednominutové intervaly.

Filtrace dat proběhla dle těchto parametrů:

dohlednost > 1350 m (na obou dohledoměrech - odstranění situace, kdy by byla mlha, či nízká oblačnost pouze v jedné části přenosové cesty)

děšť == 0 mm/h

odfiltrování výpadků jednotlivých měřících přístrojů

Označení symbolů:

$\alpha$  - měrný útlum [dB / km],

A - útlum [dB / 60m],

$A_{830}$  - útlum naměřený na optickém spoji na vlnové délce 830 nm [dB / 60m],

$A_{1550}$  - útlum naměřený na optickém spoji na vlnové délce 1550 nm [dB / 60m],

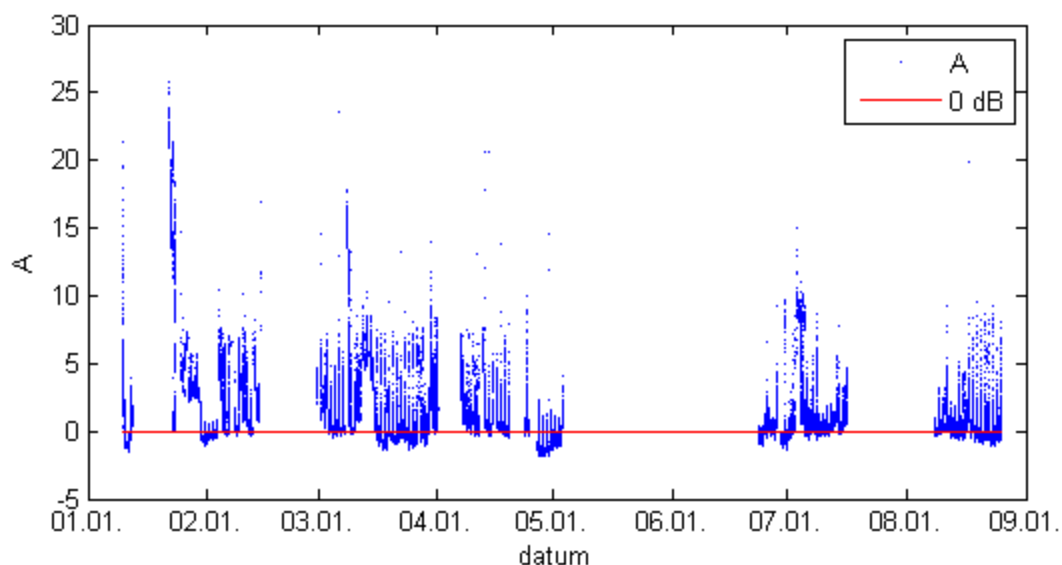
$A_{\text{turb}}$  - útlum atmosférickými turbulencemi vypočtený ze vzorce (16) [dB / 60m],

$t_p$ ,  $t_v$  - teplota přijímač, vysílač [°C],

RHp, RHv - relativní vlhkost přijímač, vysílač [%].

### 5.1 Analýza spoje 830 nm

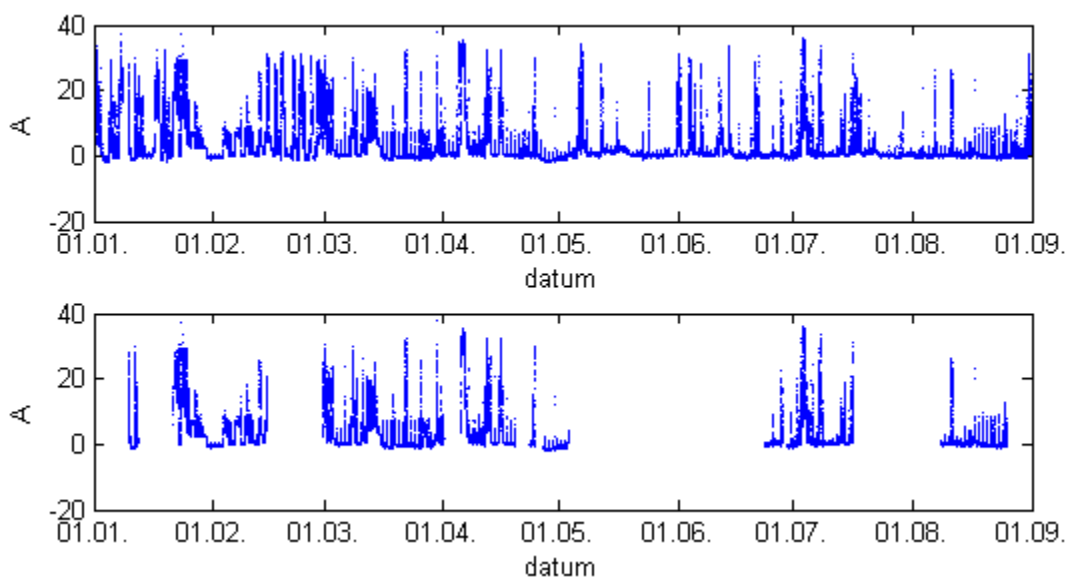
Na následujícím grafu je zobrazen útlum při čisté atmosféře za celé období prvních osmi měsíců roku 2012 při vlnové délce 830 nm.



**Obrázek 10 - Časový průběh naměřeného útlumu optického spoje (830 nm) za celé období po filtraci**

Z grafu je zřejmé, že mnoho dat se nalézá pod hodnotou 0 dB. Nejedná se o zisk, ale je to důsledek prahování. Prahování je proces snažící se odstranit, do jisté míry, konstantní útlum způsobený jednak čistou atmosférou, ředěním optického svazku, tak i útlum způsobený nečistotami na aperturách komunikačních zařízení. Pro správné zobrazení dodatečných atmosférických útlumů musíme právě tyto konstantní jevy odečíst.

Začátek roku neobsahuje dostatečné množství dat pro zpracování. Nejdéle trávající nevyhovující období pro analýzu dat se ukazuje květen a červen a také přelom července a srpna. Další obrázek ukazuje příčinu.



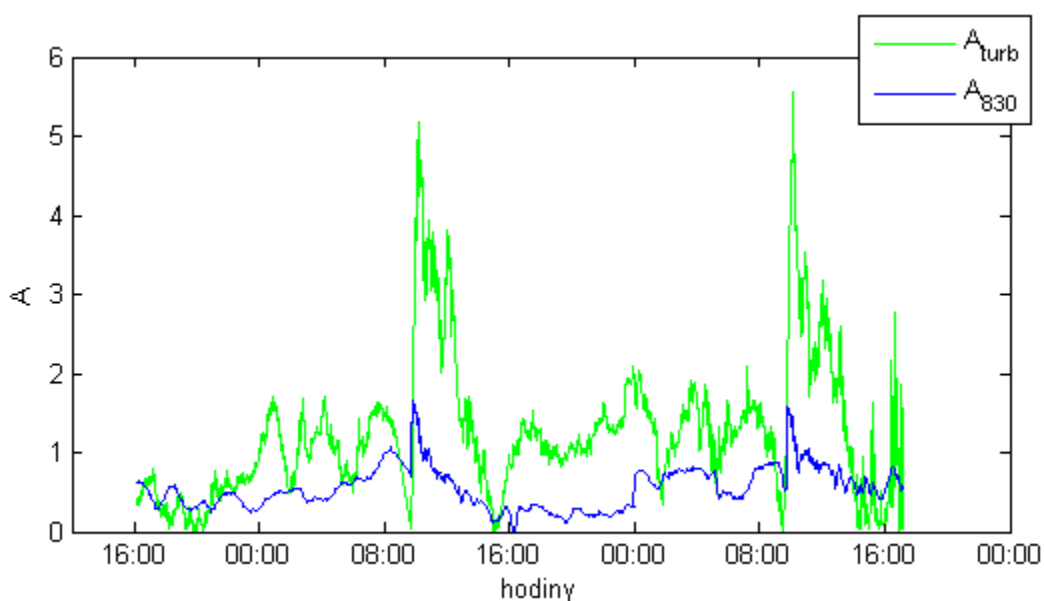
**Obrázek 11 - Vliv výpadků měřicích přístrojů pro spoj 830 nm (nahore - měření útlumu pouze bez výpadků přijímače-vysílače; dole - bez výpadků všech měřicích přístrojů)**



V horní polovině můžeme vidět téměř nepřetržitý provoz spoje. Avšak vlivem výpadků ostatních měřicích přístrojů se užitečná data výrazně zredukovala, proto je nejsme schopni v této práci využít. Pro správné vyhodnocení potřebujeme znát hodnoty všech důležitých měřicích přístrojů v daných časových okamžicích.

Pro demonstrativní účel je na následujícím obrázku vybrán 48 hodinový úsek na základě nejlepší korelace s co nejméně výpadky. Při vysoké korelaci si můžeme být jisti, že atmosférické turbulence byly v tu dobu dominantním jevem způsobující útlum. A teprve za tohoto předpokladu lze zjišťovat vzájemné vlivy.

Jedná se o období mezi dny 30.1.2012 a 1.2.2012. Korelace vychází  $R = 0.5745$  a nejdelší výpadek činí 61 minut, což odpovídá hodinovému výpadku mezi 9. a 10. hodinou dne 31.1.2012 (první prudký nárůst útlumu).

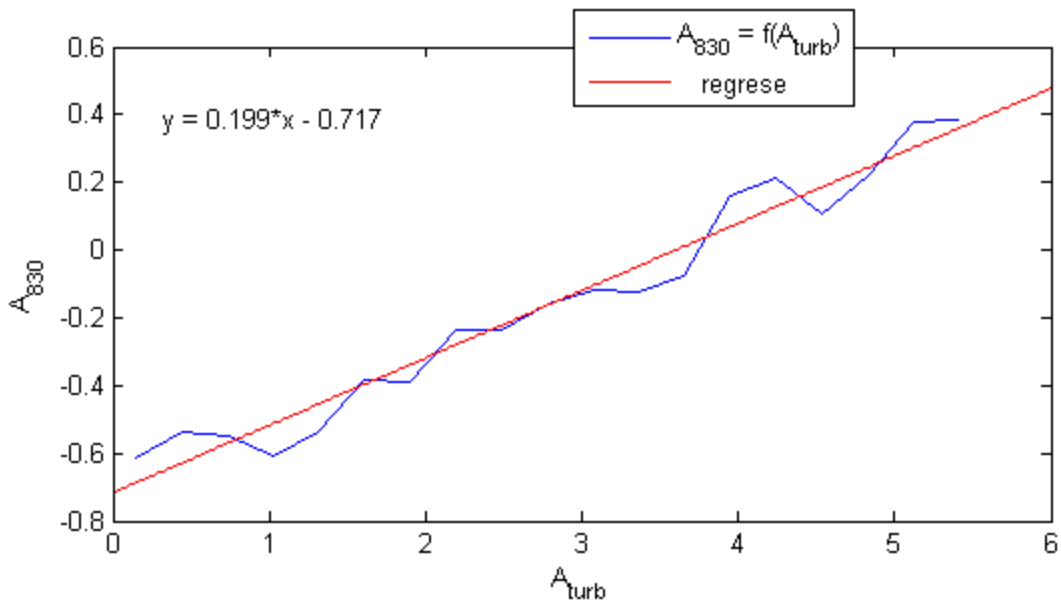


**Obrázek 12 - Porovnání  $A_{830}$  a  $A_{turb}$ , vybraného úseku v délce 48 hodin -dodatečné prahování**

Zde je patrné, že vypočítané hodnoty útlumu výrazně převyšují naměřené hodnoty. Práh byl posunut na nejmenší hodnotu naměřených dat v zobrazeném časovém intervalu.

Toto zobrazení je pouze pro demonstraci z jednoho možných úprav prahu. Ve skutečnosti může být práh jiný a tudíž záleží na správné interpretaci co je ještě útlum čistou atmosférou, ředěním atp.

Bez zásahu dodatečného prahování je na následujícím obrázku vynesena závislost naměřeného útlumu na vypočteném dokazující přeceňování skutečného útlumu.

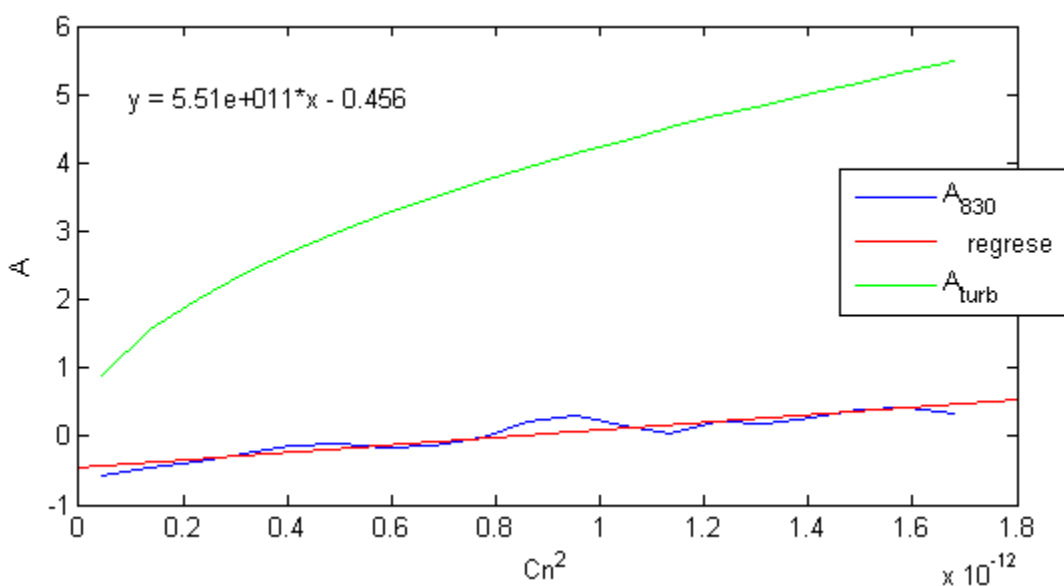


Obrázek 13 - Průměrovaný bodový graf - porovnání  $A_{830}$  a  $A_{turb}$  vybraného úseku v délce 48 hodin

Použitím lineární regrese jsme získali vztah:

$$A_{830} = 0.199 \cdot A_{turb} - 0.717 \quad (39)$$

který udává v jaké závislosti je  $A_{830}$  vůči  $A_{turb}$ . V tomto případě se část průběhu nachází v záporných hodnotách, což je důsledek nevhodného prahování. Posunem prahu se pouze změní konstantní člen v rovnici lineární regrese (uvažujeme-li přičtení jedné a té samé konstanty ke každému bodu daného úseku). Důležitým výsledkem je zjištění multiplikační konstanty udávající kolikrát musíme zmenšit teoretické výpočty, abychom dostali hodnoty více odpovídající těm skutečným.



Obrázek 14 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání  $Cn^2$  s  $A_{830}$  a  $A_{turb}$

Na Obrázku 14 je vynesena závislost útlumu na strukturním parametru indexu lomu. Ve skutečnosti má strukturní parametr indexu lomu na daném úseku menší vliv na útlum, než je chápáno podle vzorce (16), a to v řádu jednotek dB.

Vztah pro útlum dle regresní přímky pro tento analyzovaný úsek je:

$$A = 5.51 \cdot 10^{11} C_n^2 - 0.456 \quad (40)$$

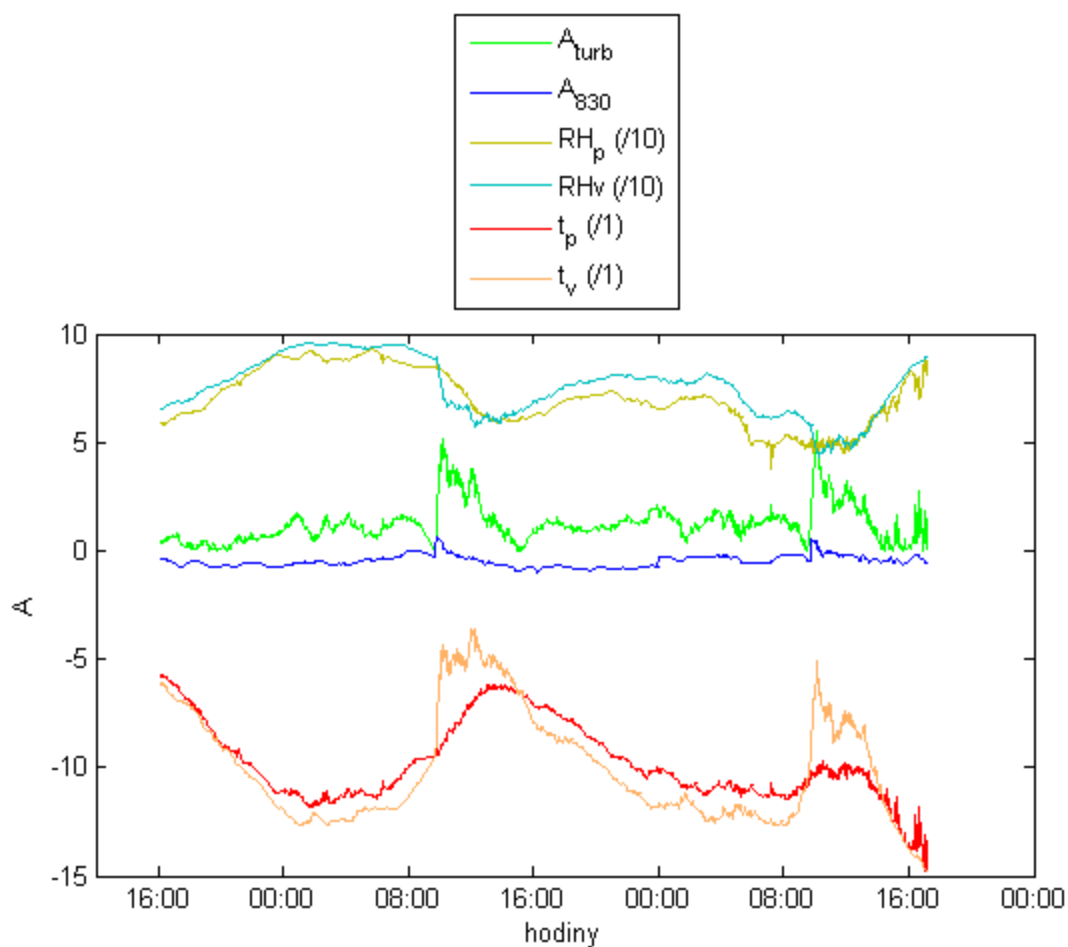
Z filtrovaných dat je zřejmý trend, že v pravidelných 24 hodinových intervalech se v určitých měsících objevuje veliký nárůst útlumu. Tento jev je například možné pozorovat na Obrázku 12.

**Tabulka 5 - Naměřené útlumy, které se objevují periodicky každý den**

měsíc	časový interval	útlum
březen	8:00 - 10:00	7-8 dB výpadky
duben	8:20 - 9:20	7 dB výpadky
červenec	7:00 - 13:00	1-2 dB
srpen	8:30 - 9:20	5-10 dB výpadky

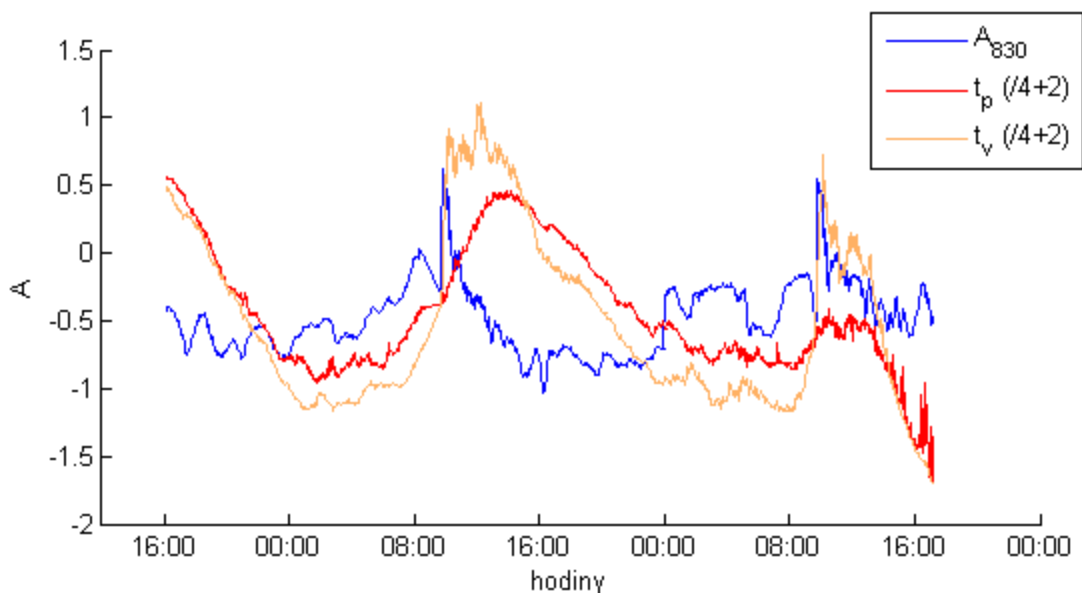
Dle Brázdy vyplývá, že se jedná o vliv Slunce, které dopadá v určitých časových okamžicích na vysílač, který začne snižovat vysílaný výkon a může tak dojít k výpadku spoje. V dubnu a září se Slunce nachází v elevaci 30° a vysílač je zhruba natočen na jih s elevací 29° [2]. Dle Tabulky 5 vše nasvědčuje vlivu Slunci. V červenci je nízký, ale déle trvající útlum, který se dá vysvětlit tím, že Slunce je v tento měsíc výš na obloze a také po delší dobu. Elevace Slunce tedy není již riziková pro vysílač jako v ostatních uvedených měsících.

Tato domněnka ale vedla k otázce, proč na tento trend reaguje i vypočtený útlum způsobený turbulencemi. Teplotní a vlhkostní čidla měří po celou dobu i když Slunce se ještě nedostalo do krizové pozice způsobující výpadek spoje. Jinými slovy, na senzor teploty a vlhkosti by neměla mít razantní vliv pozice Slunce. Na následujícím obrázku je tato situace názorně ukázána.



**Obrázek 15 - Časový průběh útlumu, vlhkosti a teploty vybraného úseku v délce 48 hodin (830 nm)**

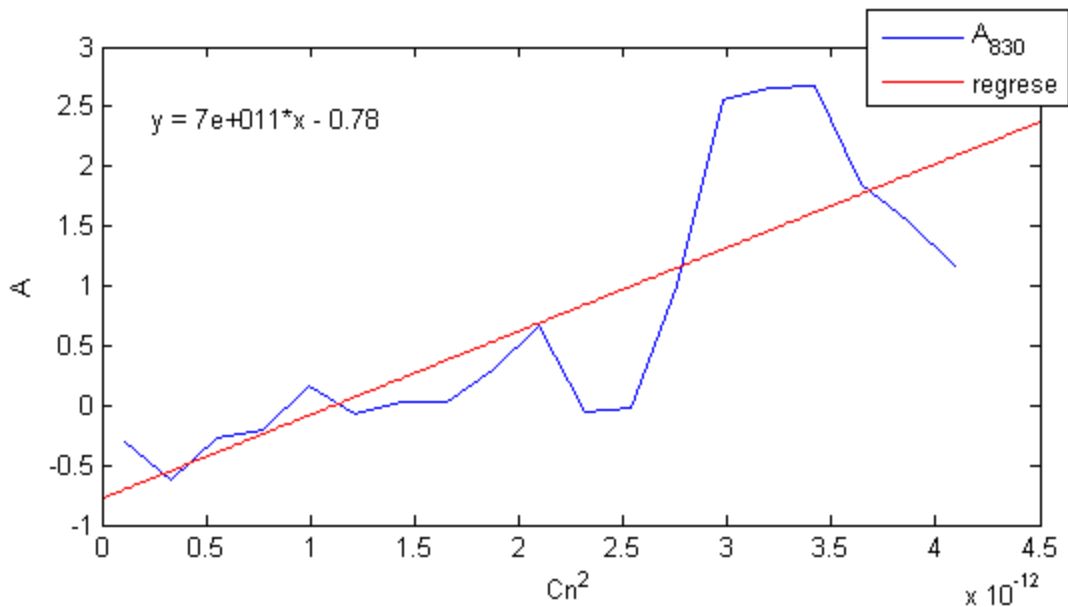
Můžeme si všimnout trendu všech průběhů. Avšak ve chvíli velké skokové změny je výrazně vyšší teplota u vysílače a i nižší vlhkost. Po konzultaci s pracovníky ÚFA AVČR jsem došel k závěru, že tento prudší nárůst teploty mají na svědomí stromy, které stíní spoj až do blízkého okamžiku ozáření vysílače Sluncem. Tedy, že Slunce začne působit v blízkém okolí na senzor teploty v blízkém okamžiku negativního ozáření vysílače.



**Obrázek 16 - Časový průběh útlumu a teploty vybraného úseku v délce 48 hodin (830 nm)**

Na tomto obrázku je lépe vidět potvrzení, že zvýšená teplota u vysílače se objeví až v blízkém okamžiku ozáření vysílače Sluncem, mnohdy způsobující výpadky. Zde se nachází další otázka, proč byl vypočtený útlum větší a déletrvající než útlum naměřený na optickém spoji. Odpovědí může být nedostatečné rozmístění senzorů pro určení indexu lomu. Strukturální parametr indexu lomu je tím větší, čím větší rozdíly mezi dvěma prostředími jsou. Uvažujme příklad, že na dráze spoje je jedna skoková změna indexu lomu mezi dvěma prostředími. Pokud je toto rozhraní blízko vysílači, má na přenos větší vliv než kdyby byl až u přijímače. V našem případě máme pouze dva senzory – u vysílače a u přijímače. Nejsme tedy schopni zaznamenat případné další rozhraní na trase spoje. Pro přesnější měření doporučuji instalovat hustší síť senzorů, čímž se výrazně zvýší přesnost výpočtu strukturálního parametru indexu lomu. Dalším možnou příčinou je interval měřených dat, který má délku 1 minuty. Atmosférické turbulence se projevují ve značně kratších intervalech. Provedené měření v podstatě nevyjadřuje okamžité turbulence ale jejich průměrnou zvýšenou četnost v rámci daného časového intervalu.

Pro co nejpřesnější analýzu je nutné uvážit co nejvíce dat. Z tohoto hlediska byla vybrána data s korelací  $R > +0,4$  s co nejméně výpadky. Korelační koeficienty vybraných dat se pohybovaly od 0,4 do 0,59. Celková doba analyzovaných dat činí cca 520 hodin (21,5 dne). Výsledek je na následujícím obrázku zobrazujícím závislost naměřeného útlumu na strukturálním parametru indexu lomu.



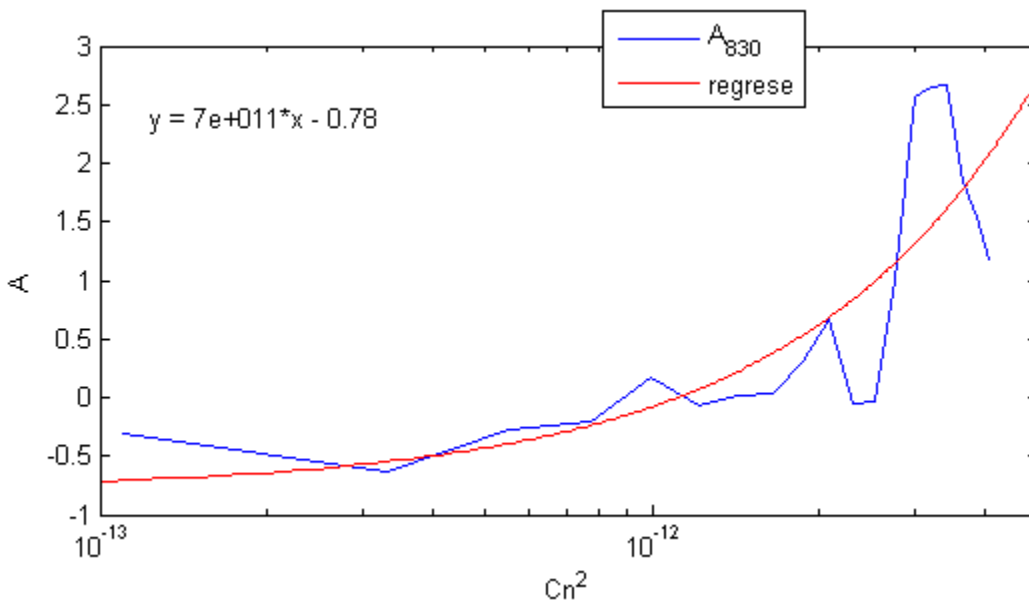
Obrázek 17 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání  $Cn^2$  s  $A_{830}$ . Všechna data pro  $R > +0,4$  s ohledem na co nejméně výpadků.

Výsledný vztah pro útlum dle regresní přímky vyšel:

$$A = 7 \cdot 10^{11} C_n^2 - 0,78 \quad (41)$$

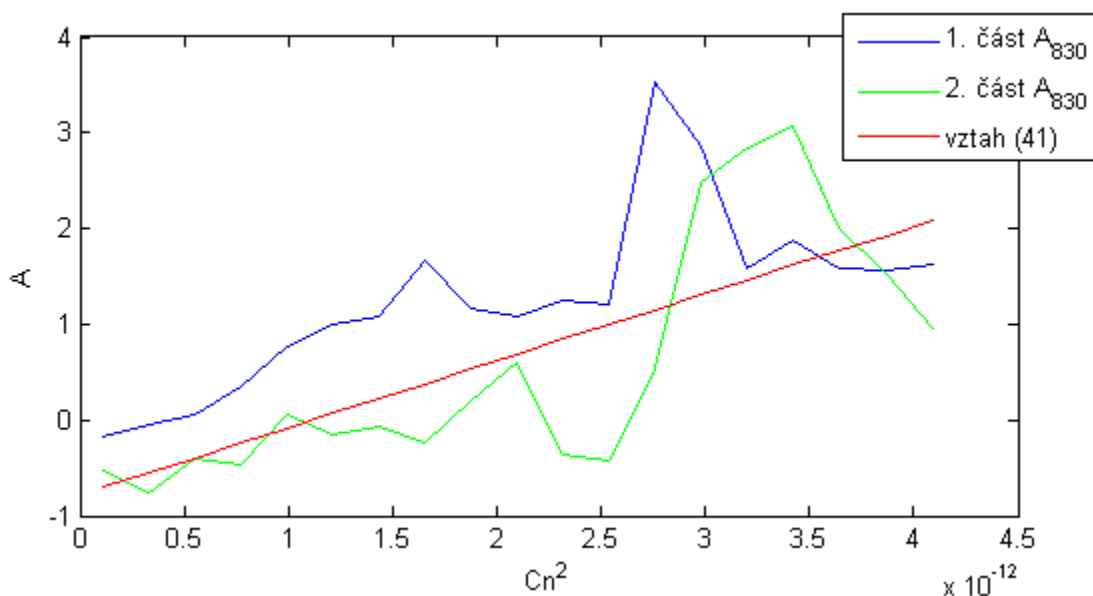
I zde je patrné, že na vyšších hodnotách  $Cn^2$  je prudší nárůst útlumu. Tento jev je způsoben Sluncem, které snižovalo vysílací výkon vysílače a docházelo tak k dalšímu útlumu spoje. Tento nárůst výrazně ovlivňuje směrnici vypočtené lineární regresní přímky. Jinými slovy, dochází k nárůstu multiplikativní konstanty.

Na následujícím obrázku je pro názornost osa x převedena do logaritmického měřítka.



Obrázek 18 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání  $Cn^2$  s  $A_{830}$ . Všechna data pro  $R > +0,4$  s ohledem na co nejméně výpadků. Logaritmické měřítka osy x.

Pro ověření tohoto vztahu se použila pozmeněná forma křížové validace. U křížové validace se vyhodnotí část dat a zjištěný matematický model se aplikuje na jinou část dat. V tomto případě se předchozí objem dat rozdělil na dva oddělené nezávislé stejně dlouhotrvající úseky dat a proložily se vztahem (41), určený na základě všech analyzovaných dat.



Obrázek 19 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání  $Cn^2$  s  $A_{830}$ . Dva nezávislé analyzované úseky s proložením rovnice (41)

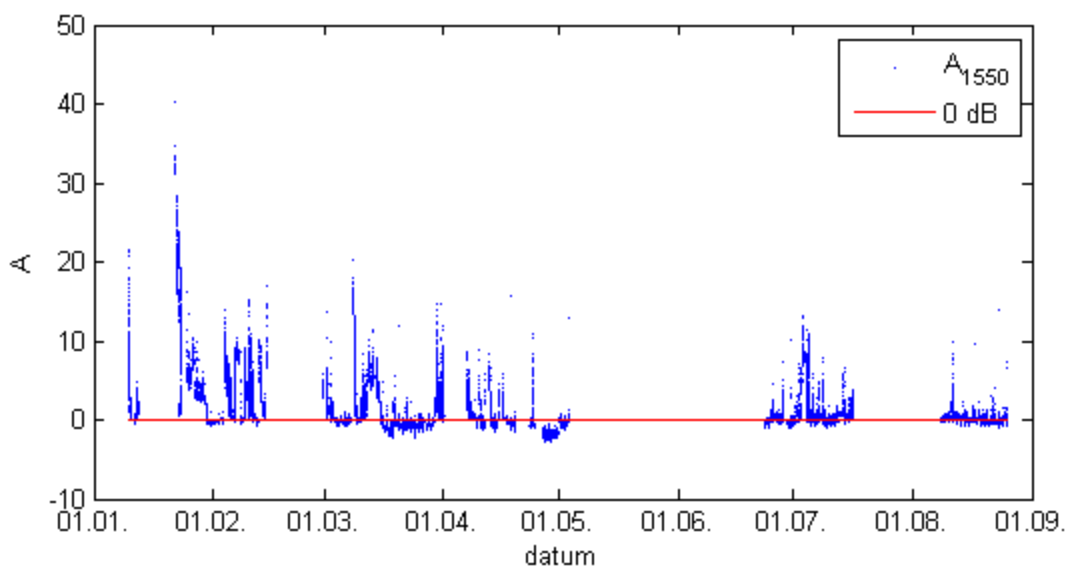
Zde je vidět, že vztah (41) leží mezi křivkami pro oba úseky dat. Jednotlivé úseky se hlavně liší jiným prahováním, ale směrnice regresní přímky je uspokojivá s ohledem na oba průběhy.

Vezmeme-li v potaz nalezené hodnoty korelačních koeficientů, výpadky v analyzovaných úsecích, nedostatečné pokrytí přenosové cesty senzory tepla a vlhkosti a nedostatečné časové rozlišení, mohou být získané výsledky velice zkreslené. Pro ověření konkrétních vztahů či nalezení více odpovídajících vztahů je zapotřebí vybavit měřící stanoviště více přístroji a zároveň kvalitnějšími.

Atmosférické turbulence mají mnohem rychlejší změny stavů než mlha, nízká oblačnost, sníh či déšť. Zároveň turbulentní nehomogenity mohou dosahovat velmi malých rozměrů. Dále je spoj nevhodně umístěn, protože Slunce pravidelně v určitých intervalech v určitých měsících způsobuje nemalé útlumy až výpadky optického spoje. Tímto mechanismem se Slunce stává hlavní příčinou útlumu a „zastiňuje“ vliv atmosférických turbulencí a dochází k znehodnocování měření, které se projevuje nárůstem útlumu při vyšších hodnotách  $Cn^2$  v dříve uvedených grafech.

## 5.2 Analýza spoje 1550 nm

Analýza spoje 1550 nm je analogií ke spoji 830 nm. V této části tedy není zapotřebí stejně podrobný rozbor jako u předcházejícího kanálu.

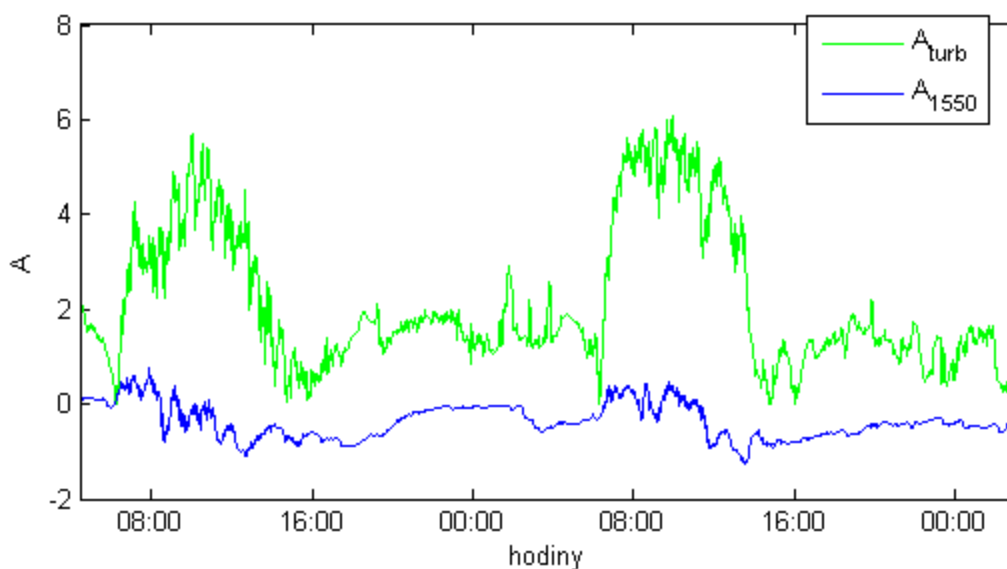


**Obrázek 20 - Časový průběh  $A_{1550}$  za celé období po filtraci**

I zde se mnoho hodnot nalézá pod úrovní 0 dB. Dostupnost spoje je přibližně stejná jako na druhém kanále.

Nejvyšší nalezené korelační koeficienty mezi útlumem na 1550 nm a  $Cn^2$  se pohybovaly v rozmezí od 0,2 do 0,37, na rozdíl od kanálu 830 nm, kde byla korelace výrazně vyšší.

Pro dokázání podobných závislostí jako u spoje 830 nm byl vybrán úsek trvající cca 47 hodin s průměrně nejlepší korelací  $R = 0,362$  v období mezi 1.5.2012 a 3.5.2012.

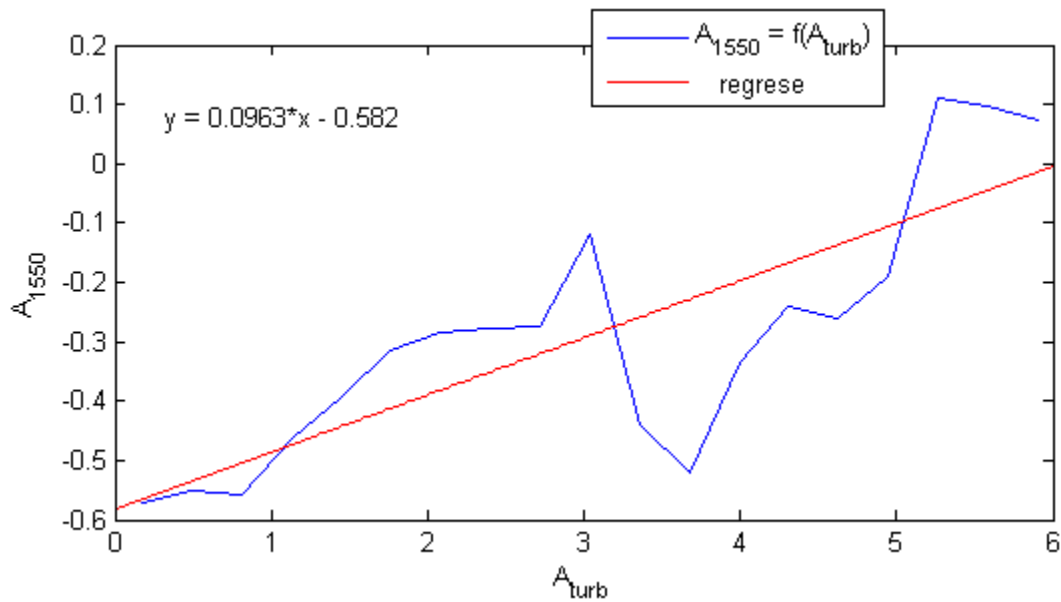


**Obrázek 21 - Porovnání  $A_{1550}$  a  $A_{turb}$  vybraného úseku v délce 47 hodin**

Trend nasvícení vysílače Sluncem je zhruba od 7:00 do 14:00 hodin. Opět teoretický vztah (16) nadhodnocuje naměřené hodnoty viz Obrázek 22 a Obrázek 23. Vezmeme-li v potaz



vyšší teploty okolo poledne, i zde by zvýšená scintilace mohla potvrzovat zvýšené množství turbulencí.

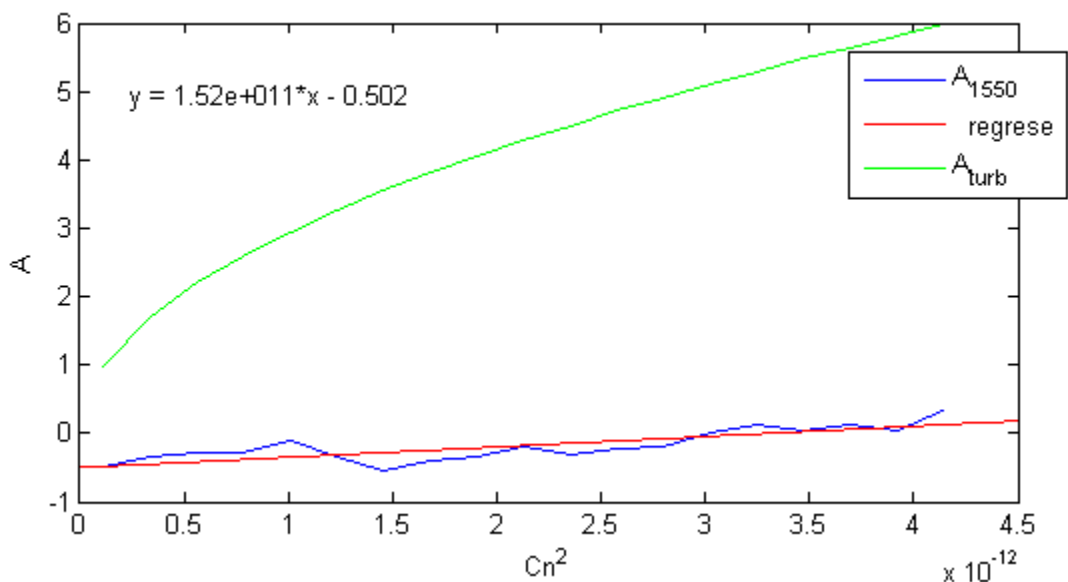


Obrázek 22 - Průměrovaný bodový graf - porovnání  $A_{1550}$  a  $A_{turb}$  vybraného úseku v délce 47 hodin

Po použití lineární regrese jsme dostali vztah:

$$A_{1550} = 0.0963 \cdot A_{turb} - 0.582 \quad (42)$$

Závislost  $A_{1550}$  na  $A_{turb}$  je o cca 11% horší v porovnání s druhým kanálem. To odpovídá nižší korelaci tohoto úseku.



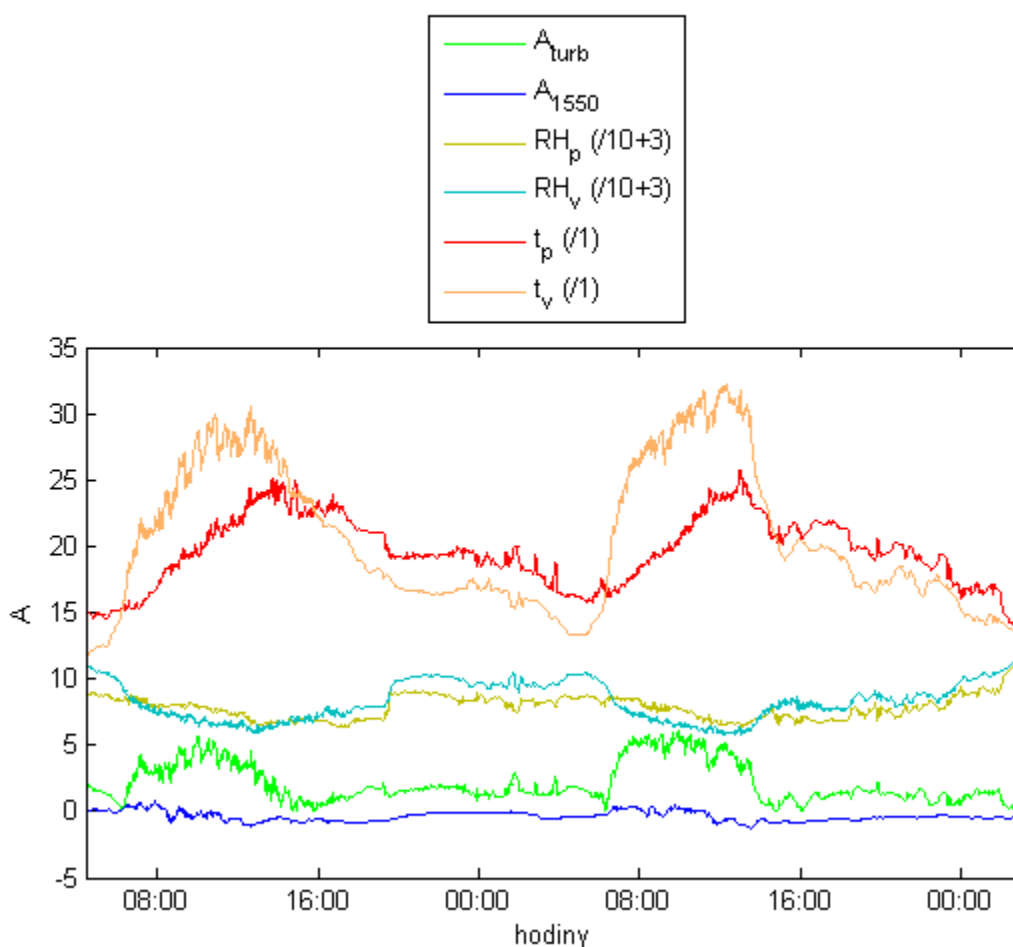
Obrázek 23 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání  $Cn^2$  s  $A_{1550}$  a  $A_{turb}$

Po lineární regresi závislosti naměřeného útlumu na strukturním indexu parametru lomu vyšel vztah:

$$A = 1.52 \cdot 10^{11} C_n^2 - 0.502 \quad (43)$$

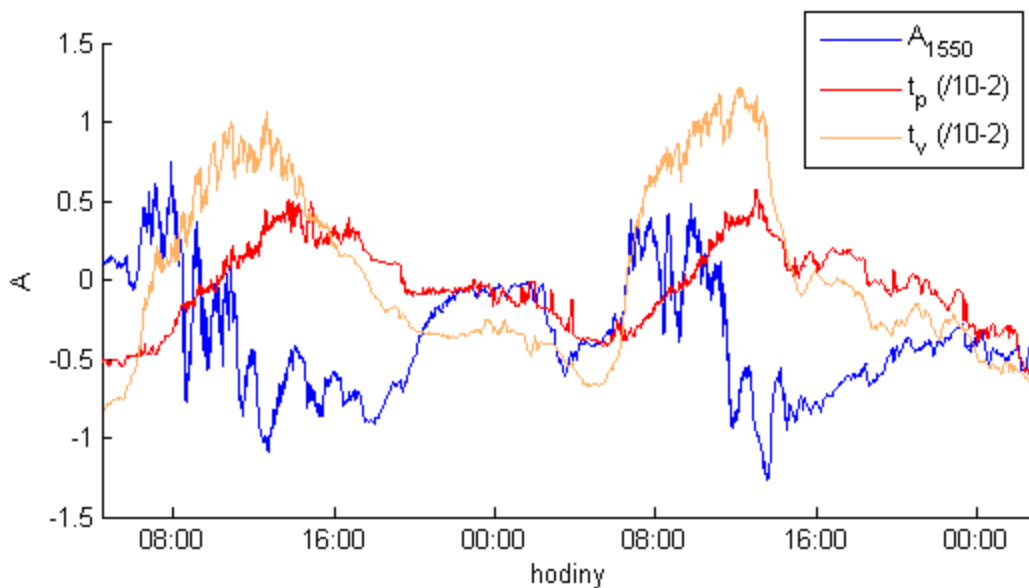
který má menší sklon než v případě vztahu (40). To odpovídá tomu, že na vlnové délce 1550 nm je menší útlum při průchodu atmosférou, než při vlnové délce 830 nm.

Na dalším obrázku je možno vidět stejné chování zobrazených jevů jako na spoji 830 nm.



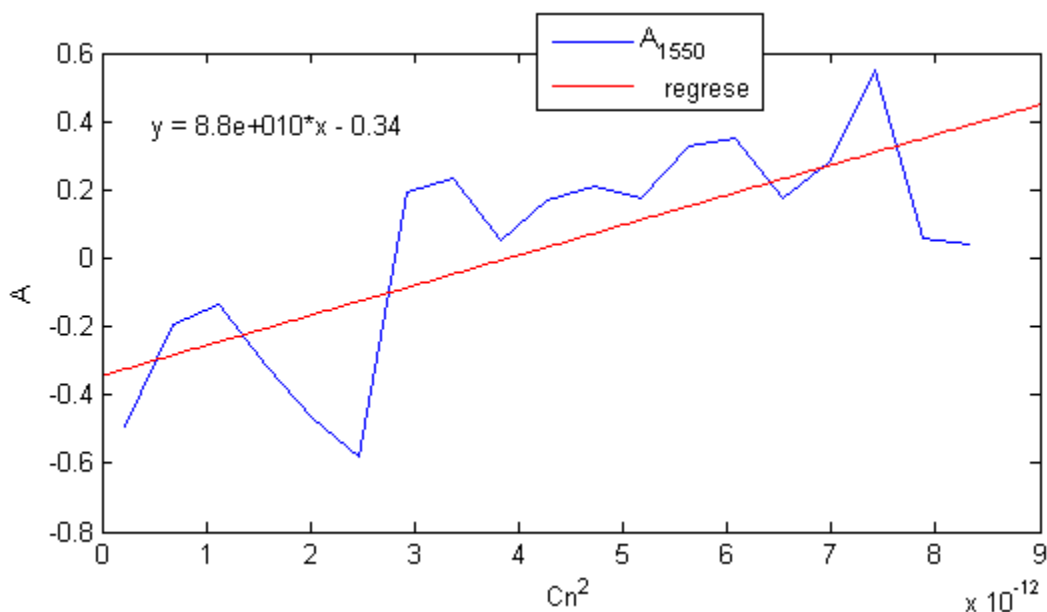
**Obrázek 24 - Časový průběh útlumu, vlhkosti a teploty (1550 nm)**

Zásadní rozdíl je, že teploty se pohybují nad 0°C. Dalším nezanedbatelným rozdílem jsou změny teplot. Zatímco v případě spoje 830 nm (Obrázek 15) je změna 8 °C, zde změna dosahuje téměř 20 °C, což je pochopitelné s přihlédnutím na roční dobu. Následující obrázek je pouhým upravením pro názornější zobrazení vlivu Slunce na útlum.



Obrázek 25 - Časový průběh útlumu a teploty (1550 nm)

V důsledku malých korelací proběhla analýza největšího vhodného objemu dat pro korelaci  $R > +0,2$  s co nejméně výpadky. Objem dat činí dohromady cca 247 hodin (10 dnů). Výsledky jsou na následujících obrázcích.



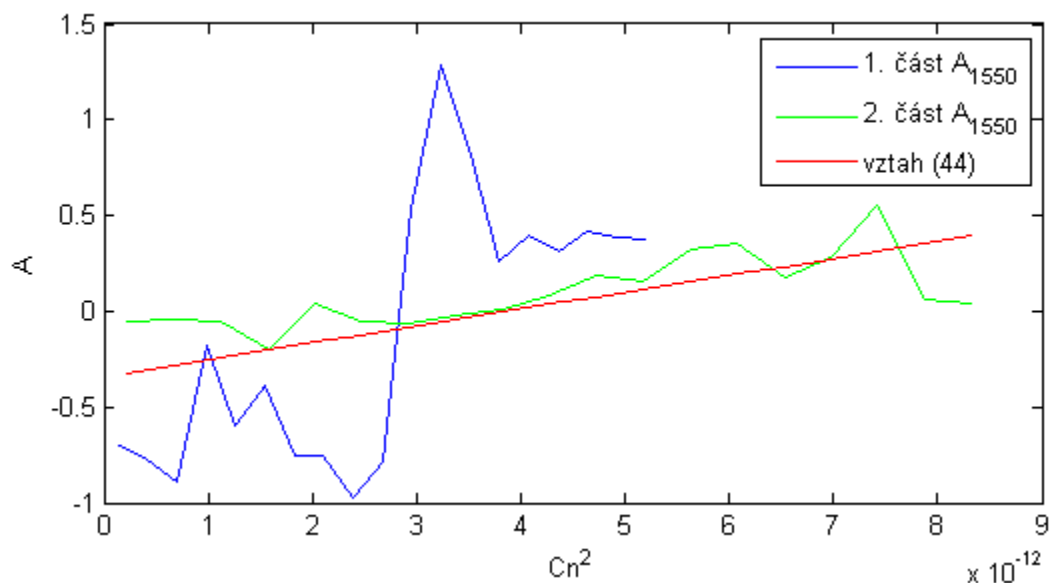
Obrázek 26 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání  $Cn^2$  s  $A_{1550}$ . Všechna data pro  $R > +0,2$  s ohledem na co nejméně výpadků

Výsledný vztah pro celý objem dat dle regresní přímky vyšel:

$$A = 8,8 \cdot 10^{10} C_n^2 - 0,34 \quad (44)$$

i zde je vidět, že na vlnové délce 1550 nm, je za daných podmínek menší útlum, než na vlnové délce 830 nm. Tento poznatek potvrzuje skutečnost že vlnová délka 1550 nm je za daných podmínek vhodnější pro přenos dat.

Jako v předchozím případě, i zde je zapotřebí provést (pozměněnou) křížovou validaci. V tomto případě oba dva nezávislé průběhy nejsou stejně dlouhé, ale jsou v poměru cca 1:1,28.



**Obrázek 27 - Průměrovaný bodový graf - Porovnání  $Cn^2$  s  $A_{1550}$ . Dva nezávislé analyzované úseky s proložení rovnic (44)**

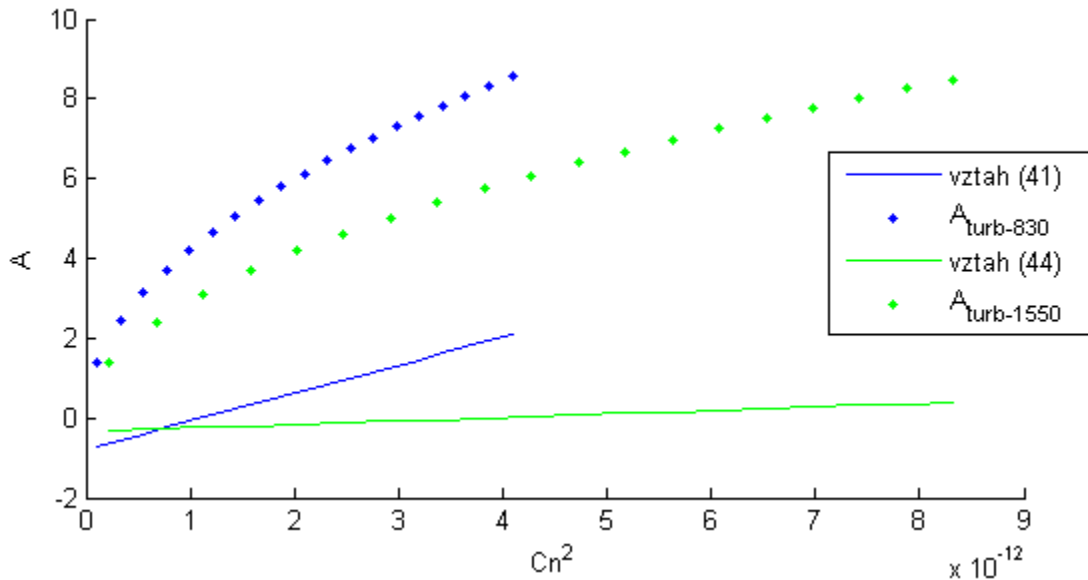
Zde je patrné, že první část má mnohem větší změny útlumu při menších turbulencích, než část druhá. Směrnice regresní přímky odpovídá oběma průběhům.

V důsledku menších korelací je očekávaná horší závislost mezi naměřeným útlumem a strukturálním parametrem indexu lomu. Stejně jako v případě pro 830 nm i zde platí, že je zapotřebí analýza při lepších měřicích podmínkách.

Razantně menší korelace může být známkou toho, že atmosferické turbulence nemají tak zásadní vliv na útlum jako v případě druhého kanálu, kdy na spoj působily jiné faktory, které „zastiňovaly“ vliv těchto atmosferických turbulencí.

### 5.3 Porovnání obou kanálů

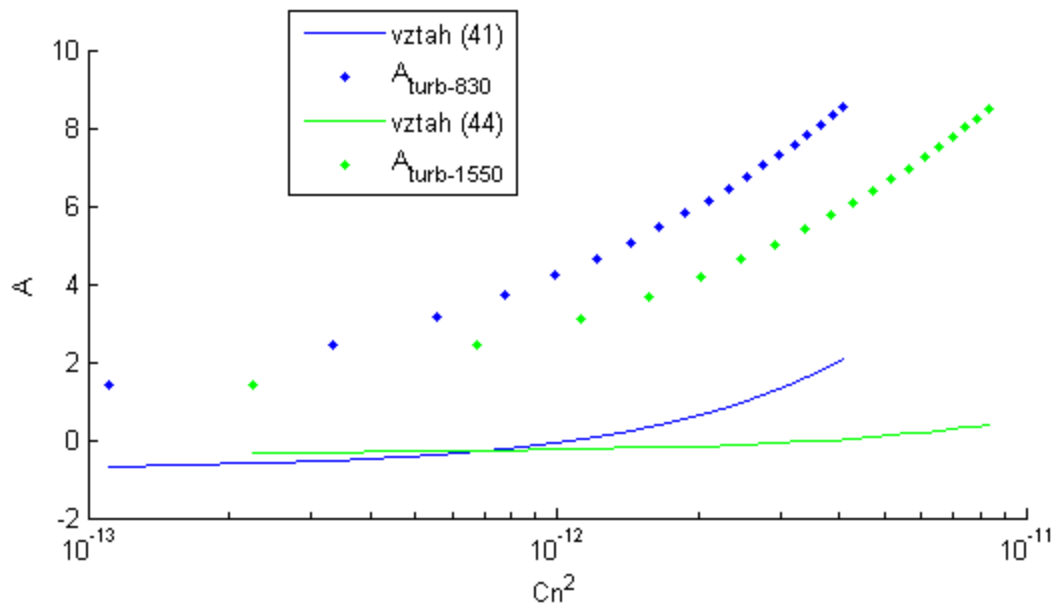
Tato podkapitola slouží k ověření obecných vlastností útlumu jednotlivých vlnových délek při šíření turbulentním prostředím při čisté atmosféře. Jak již bylo zmíněno, pro kanál 1550nm jsme naměřili nižší korelaci s  $Cn^2$  než pro 830nm.



Obrázek 28 - Porovnání vzorců obou kanálů

Tento obrázek potvrzuje, že vztahy, objevené v této práci, souhlasí se vztahem (16) a říká nám, že na vlnové délce 830 nm je větší útlum, než na vlnové délce 1550 nm. Na nižších hodnotách  $Cn^2$  se z obrázku může toto tvrzení jevit jako částečně pravdivé, ale je nutné přihlídnout na vliv prahování a tento vliv má za následek posunutí regresní přímky kanálu 830 pod regresní přímku kanálu 1550.

Následující obrázek má pouze změněné měřítko osy x na logaritmické.



**Obrázek 29 - Porovnání vzorců obou kanálů - logaritmicke měřítka osy x**

Můžeme si zde všimnout menšího vlivu atmosferických turbulencí na vlnovou délku 1550 nm vůči vztahu (16), než je vliv v případě vlnové délky 830 nm. Zásadní vliv na tento jev může mít snížená korelace.

## Závěr

Cílem této práce bylo vyšetření vlivu atmosferických turbulencí na útlum optického svazku o vlnových délkách 830 nm a 1550 nm. K dispozici byla data z experimentálního pracoviště Milešovka za období od 1.1.2012 do 9.1.2012. Dále byla k dispozici data naměřených útlumů obou kanálů, senzorů tepla a vlhkosti nalézající se po jednom, u vysílače a přijímače, jeden senzor tlaku je umístěn ve věži. Údaje z ostatních přístrojů, jako je srážkoměr a dohledoměr, byly použity pro filtraci dat.

Pro analýzu dat bylo zapotřebí obdržená data filtrovat z důvodů odstranění případů, kde by byl vliv atmosferických turbulencí „zastíněn“ jinými jevy a tedy by nebylo prakticky možné data správně vyhodnotit. Jedná se konkrétně o případy deště, sněhu a mlhy. Dohledoměry byly použity dva, aby se co nejvíce eliminovala situace, kde by byla například mlha pouze u vysílače nebo u přijímače.

Atmosferické turbulence vznikají jako důsledek změn teplot v atmosféře. Vznikají nehomogenity, které podle velikosti vzhledem k velikosti šířícího se optického svazku, způsobují odklonění svazku, změnu tvaru svazku, či přerozdělení svazku. Turbulence je možné charakterizovat indexem lomu. Pro výpočet útlumu musíme znát minimálně dva indexy lomu na přenosové cestě. Turbulence mají statistický charakter a mohou být popsány například strukturním parametrem indexu lomu  $C_n^2$ , který vyjadřuje míru

turbulence. Na experimentálním pracovišti Milešovka se dle analýzy vyskytovaly velmi silné turbulence. Tento poznatek se dá očekávat dle vyskytujících se klimatických podmínek v místě měření. Pro porovnání naměřeného útlumu se vztahem (16), který platí za podmínky, že  $\sigma_{I,rel}^2 < 1$ , bylo nutné data dále filtrovat dle této podmínky. To je z toho

důvodu, že při  $\sigma_{I,rel}^2 > 1$  je  $\sigma_{I,rel}^2$  saturovaná a dále neroste. Dle Perlota vyplývá, že

$\sigma_{I,rel}^2$  v oblasti saturace mírně klesá [14]. Ovšem toto není možné při daných měřicích

podmínkách ověřit. V tomto případě by bylo zapotřebí měřit  $\sigma_{I,rel}^2$  přímo a to například pomocí scintilometrů.

Při analýze dat se hledaly ty úseky, kde byla nejvyšší korelace a málo výpadků. Pro spoj 830 nm byly nalezeny korelační koeficienty od 0,4 do 0,59 a objem dat činil 520 hodin. Získaný vztah je (41):

$$A = 7 \cdot 10^{11} C_n^2 - 0,78 \quad [\text{dB}/60\text{m}].$$

V případě kanálu 1550 nm byly nalezeny výrazně nižší korelační koeficienty v rozmezí od 0,2 do 0,37. Objem dat činil 247 hodin. Získaný vztah je (44):

$$A = 8,8 \cdot 10^{10} C_n^2 - 0,34 \quad [\text{dB}/60\text{m}].$$

Nižší korelace na vlnové délce 1550 nm mohou být způsobeny menší citlivostí této vlnové délky vůči turbulencím.

Při vyšetřování závislosti mezi naměřeným útlumem a vztahem (16) se prokázalo, že vztah (16) výrazně přeceňuje skutečný naměřený útlum. Po konzultaci s pracovníky ÚFA AV ČR jsem došel k názoru, že senzor vlhkosti a teploty u vysílače je stíněn stromy až do okamžiku, kdy Slunce začne svítit na senzor vysílače. Ten tak následně sníží výkon vysílání a způsobí vyšší útlum až výpadek. Senzor vlhkosti a teploty tak začne měřit tuto skokovou změnu, která má razantní vliv na výpočet útlumu, protože vzniká náhlá skoková změna indexu lomu jednoho místa. Pro výzkum atmosferických turbulencí by podle mého názoru bylo vhodnější spoj umístit tak, aby nebyl negativně ovlivňován Sluncem. Tím by se eliminoval vliv zpětnovazebního členu způsobujícího útlumy, které znesnadňují identifikaci útlumu způsobeného turbulencí. Tento jev je možné pozorovat v uvedených grafech, kde docházelo k opakovaným nárůstům útlumu s periodou 24 hodin. Tento jev se promítá do výsledných vztahů a způsobuje nárůst multiplikační konstanty. Dále na přesnost měření má vliv nedostatečné rozmístění senzorů teploty a vlhkosti, protože při dvou senzorech na obou koncích spoje nejsme schopni zaznamenat skokové změny na zbytku trasy. Vzhledem k délce spoje není potřeba více jak jeden senzor tlaku, protože se prakticky téměř nemění. Dalším a z mého pohledu nejdůležitějším faktorem, který razantně způsobuje nepřesnosti, je interval měření po jedné minutě. Neměříme totiž aktuální stav atmosféry, ale její průměrnou četnost během jedné minuty. Atmosferické turbulence mají zpravidla kratšího trvání.

Jako přínos této práce vidím v odvození matematických vztahů (41, 44) mezi naměřeným útlumem a  $C_n^2$ . Tyto vztahy je nutné ověřit dlouhodobější analýzou. Vhodnější by bylo zlepšení měřicích podmínek.

Dalším přínosem je zjištění, že měření atmosferických turbulencí za daných měřicích podmínek se může jevit jako velmi nedostatečné a je tedy nutné dané pracoviště přizpůsobit těmto rychlejším a na přesnost náchylnějším jevům v porovnání s jevy, jako je déšť, mlha a sníh. Jako zlepšení bych navrhoval umístění spoje tak, aby nedocházelo k nasvícení apertury antén Sluncem. Dále by bylo vhodné snížit interval průměrování a dále, aby po délce celé přenosové cesty bylo rozmístěno několik senzorů tepla a vlhkosti.



## Literatura

- [1] DLASK, Martin. *Popis atmosféry z hlediska šíření optického i radiového signálu* [online]. Pardubice, 2011 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/42022>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [2] BRÁZDA, Vladimír. *Šíření optického signálu v atmosféře* [online]. Pardubice, 2011 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/39296>. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [3] BRAZDA, Vladimír; SCHEJBAL, Vladimír; FISER, Ondřej. Rain impact on FSO link attenuation based on theory and measurement. In: *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on*. IEEE, 2012. p. 1239-1243.
- [4] LANGROVÁ, Alena. *Zpracování srážkových záznamů pro stanovení podmínek radiokomunikačního přenosu* [online]. Pardubice, 2010 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/38367>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [5] CARBONNEAU, T; WISLEY, D. Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded marketplace, *Proc. SPIE 3232: Wireless Technologies and Systems: Millimeter-Wave and Optical* [online], 119 (January 23, 1998); [cit. 2013-05-03]. DOI:10.1117/12.301022; Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1117/12.301022>
- [6] Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links. In: *Recommendation ITU-R P.1817-1* [online]. 02/2012 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1817-1-201202-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1817-1-201202-I!!PDF-E.pdf)
- [7] KIM, I.I.; McARTHUR, B.; KOREVAAR, E. Comparison of Laser Beam Propagation at 785nm and 1550nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications. *Proc. SPIE 4214: Optical Wireless Communications III*. [online], 26 (February 6, 2001); [cit. 2013-05-03]. DOI:10.1117/12.417512; Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1117/12.417512>
- [8] DORDOVÁ, Lucie. *Metoda stanovení charakteristik atmosférického přenosového prostředí v optické oblasti spektra* [online]. Brno, 2009 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=19536](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=19536). Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika*. Elektronický učební text. UREL VUT v Brně, Brno 2002, REL 023
- [10] POKRYVKA, Marián. *Simulácia pôsobenia vonkajších vplyvov na optický spoj WO-LINK*. Ostrava, 2012. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava.

- [11] DORDOVÁ, Lucie; WILFERT, Otakar. Calculation and comparison of turbulence attenuation by different methods. *Radioengineering*, 2010, 19.1: 162-167.
- [12] STONE, Jack A. a Jay H. ZIMMERMAN. Index of Refraction of Air. In: *Engineering metrology toolbox* [online]. National Institute of Standards and Technology (NIST), 2011 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp>
- [13] KOLKA, Z.; WILFERT, O.; FIŠER, O. Achievable qualitative parameters of optical wireless links. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2007, vol. 9, no. 5, p. 2419–2423. ISSN: 1454-4164.
- [14] PERLOT, Nicolas. *Characterization of signal fluctuations in optical communications with intensity modulation and direct detection through the turbulent atmospheric channel*. Aachen : Shaker, 2005. Dissertation. Université de Valenciennes.